

兰州物理研究所
达道安 主编

ZHENKONG SHEJI SHOUC

ZHENKONG 真空设计手册 SHEJI SHOUC

第 3 版

真空设计手册

(第3版)

兰州物理研究所 达道安 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本手册是兰州物理研究所在《真空设计手册》第2版(1991年)的基础上,经修改并增添了大量内容的新版本。

手册共16章,内容丰富,囊括了从低真空到极高真空领域的各个方面:真空物理、真空系统设计、真空获得、真空阀门、真空密封、真空测量、真空材料、真空检漏、真空工艺、真空工业新产品、真空应用及真空工程实例。其中极高真空、真空装置自动控制、航天器用材料质量损失、干式真空泵均为第2版没有的新内容。附录中还提供了大量技术数据、相关真空标准目录及主要真空厂所简介,进一步丰富了手册内容。

本手册文字洗练,内容系统全面,编入了大量数据、图表和新资料、新标准,实用性强,可供各行业从事真空工程设计、研究及应用的科技人员使用,亦可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空设计手册/达道安主编.—3版.—北京:国防工业出版社,2004.7

I.真… II.达… III.真空技术—设计—手册
IV.TB7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 013621 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 106 2685 千字

2004 年 7 月第 3 版 2004 年 7 月北京第 5 次印刷

印数:25001—29000 册 定价:186.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)



达道安，陕西省泾阳人，1958年毕业于兰州大学物理系。研究员，博士生导师，国家级有突出贡献专家。曾任中国空间技术研究院科技委副主任、兰州物理研究所所长、中国真空学会副理事长，现任真空低温技术与物理国家重点实验室主任、中国宇航学会理事、中国空间科学学会理事等职。长期从事航天技术和真空科学技术应用研究，发表论文 150 篇，主编《真空设计手册》（第 2 版）、《空间真空技术》、《空间低温技术》等著作。曾获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项，部级科技进步一、二等奖 5 项。

本书编委会

主 编 达道安

副主编 邱家稳

编著者 (以章节先后为序)

肖祥正 刘玉魁 谈治信 崔遂先

王先路 李旺奎 张涤新 李得天

李正海 胡炳森 王荣宗 范垂祯

薛大同 张景钦 许启晋 曹慎诚

达道安

技术编辑 崔遂先 谈治信

责任编辑 唐应恒 邢海鹰

序 言

在金建中、达道安等数代科学家的主持下,兰州物理研究所从1962年由中国科学院建立以来,已成为中国真空技术强有力的现代研究中心。40多年来,该所为中国基础科学的进步,为很多技术学科的建立和发展,为航天事业的前进和经济建设都做出了卓越的贡献,赢得了全国科学技术界和工业界的赞扬和尊敬。

人类生活在地球表面,有大气层保护着,在日常生活中人们已经感到研究真空的重要。实际上,数十公里高的大气层以外的太阳系空间,太阳系以外的银河系以及整个可见宇宙中全部是“真空”。20世纪下半叶,人类航天事业的出现,卫星、飞船、登月、深空探测都迫切需求关于真空的科学知识和开发利用以及对付真空的技术。为适应中国航天事业的发展计划,1968年兰州物理所转归航天部门,成为中国航天事业的支柱性科学研究机构,为空间事业的展开提供了强有力的科学指导,也为各类卫星、飞船的设计和空间探测做出了不可替代的贡献。与此同时,他们坚持了基础科学研究,为这一新兴学科培养和造就了大批科学家和工程师,为该学科的未来发展和广泛应用奠定了人才基础。

真空科学是一门基础科学和应用科学紧密结合的现代基础学科,它的主要研究对象是真空环境的结构和性质以及在这种环境中物质的相互作用。在不同真空度的低气压环境中,真空环境和各种物质发生相互作用,产生不同的效应。例如真空吸力、真空隔热和散热、真空蒸馏、真空防氧化、真空干燥、真空绝缘、真空脱气、保鲜、清洁、灭菌、检漏、稀薄气体放电、宇宙真空效应等都和该学科研究的主题有关。这些科学和技术知识已广

泛用于电子、半导体、集成电路、冶金、食品、医药、运输、热处理、焊接、铸造、镀膜、检测、离子束、电子束、激光、微机电、可控热核反应及航空航天等领域,推动了近代科学技术进步及工农业的发展。真空科学技术已成为各行各业科技工作及工艺人员的必备知识。学习掌握真空科学技术成为发展现代科学技术的必要条件。

早在上世纪 70 年代末,由金建中院士(第一任所长)主编了《真空设计手册》一书。1991 年由达道安所长和李旺奎副所长主编了该手册第二版,全面总结和详介了关于真空科学技术的基础理论、技术基础及应用领域,深受科技界的欢迎,前后印刷四次仍不能满足各界需求。现在奉献给大家的第三版是由达道安和邱家稳主编。他们又花费了数年的精力,对第二版别陈增新,力求反映该学科的最新成就,扩大了应用范围,使全书内容增加了一倍,成为真正的真空科学的百科全书,这在世界科学史上是罕见的巨著。这本新版巨著的出版,对 21 世纪我国科学技术的进步必会起到有力的推动作用,是对实施科教兴国战略的一大贡献。

在《真空设计手册》第三版付梓之际,我向作者和出版社表示祝贺。我相信这对中国科技界、工业界是难得的善举,对编者和作者们致以衷心谢意。

宋健

2004 年 7 月

前 言

《真空设计手册》(第3版)是在《真空设计手册》第1、2版的基础上重新编写的。该书是供从事真空科学技术与工程的广大科技人员使用的一本实用工具书,亦可作为大专院校师生的教学参考书。

《真空设计手册》第1版分上、下两册。上册1979年5月出版,下册1981年6月出版。该书是我国首次出版的真空科学技术与工程方面的工具书。它概括了我国20世纪70年代真空科学技术的发展水平及国际真空技术发展趋势。第2版,即修订版,将手册上、下册合为一册,于1991年11月出版。它概括了我国20世纪80年代真空技术水平及国际真空发展趋势。修订版内容丰富、结构清晰、层次分明,收集了从低真空到超高真空领域内的真空技术与真空工程各方面的资料,深受国内真空界广大科技人员的欢迎。

《真空设计手册》是国内真空工程界畅销的工具书。第1、2版前后共重印4次,数量达25000册,但是仍满足不了广大读者需求。这些年来,国内很多专家教授及工程技术人员都渴望兰州物理研究所能够在该书的基础上再次修编,把从1991年以来10多年的真空科技发展的新成果、新设备、新工艺、新技术等反映在书中,以适应新时期真空科学发展的水平,满足真空工程技术及应用的需要。在这种情况下,兰州物理研究所的领导高度重视,决定重新编写第3版《真空设计手册》。

《真空设计手册》(第3版)反映了我国当今真空科学技术的发展水平及国际真空技术发展趋势,在保留第2版主要章节的基础上,进行了修改和编写,并增加了极高真空技术及应用一章。全书内容更加丰富,260多万字,2000幅图表,概括了真空基本概念、真空技术基础理论、真空设计、真空检测、真空工艺及材料和真空装置及仪器等内容;结构清晰,图文并茂。读者通过本书能够方便地查到从低真空、高真空、超高真空到极高真空领域内的真空技术和真空工程各方面的资料。第3版的主要特点有:

1. 删除了原手册各章节中不适用的内容,增加了相应的新内容;按最新国家标准的规定,规范了名词术语、图表、公式、数据、符号等,使手册提供的资料更加新颖、可靠和实用。

2. 修订了手册第2版中过时的标准和内容。手册包含了大量的现行真空技术标准,从基础标准到产品标准;从各类真空泵和真空机组的型号、参数到各类真空泵的性能测试方法等,可最大限度地满足科技人员的使用要求。

3. 新增添的内容涉及到各个章节。例如,无油立式节能往复式真空泵、各类干式真空泵、水蒸气喷射泵的技术特性和设计要点及磁流体密封、磁传动技术、离子束刻蚀技术、真空预冷处理技术、真空保鲜工艺、纳米材料制备、航天器用材料质量损失、真空清洁处理工艺等。

4. 增加了第十六章极高真空技术及应用。概括了获得极高真空的方法、技术和实验装备及应用等内容,给出了大量的数据、图表,总结了国内外极高真空研究成果,展现了我国极高真空技术发展水平,为我国今后极高真空技术应用提供了数据、经验。

5. 充实了四极质谱计、真空计量、校准、真空容器设计计算、真空镀膜技术、真空冷冻升华

干燥技术、真空包装技术等内容;附录中增加了常用设计所需的技术资料,根据最新颁布的国家标准修编了常用真空技术标准目录。

6. 增加了真空装置自动控制新内容,概括了真空装置自动控制的基本概念及应用;补充了油扩散喷射泵、油扩散泵设计计算内容(兰州真空设备有限责任公司夏正勋高级工程师修改)。

手册第1版的主编是中国科学院院士、中国真空学会原理事长、著名真空专家金建中教授。手册第2版的主编是中国真空学会原副理事长、中国航空航天部兰州物理研究所原所长达道安研究员,副主编是原副所长李旺奎研究员。崔遂先、谈治信为手册第1、2版技术编辑。

《真空设计手册》(第3版)的主编仍是中国航天科技集团公司中国空间技术研究院原科技委副主任、博士生导师达道安研究员,副主编是兰州物理研究所所长邱家稳研究员。全书技术编辑仍由崔遂先、谈治信担任。全书作者按章节顺序排列有肖祥正(第一章,附录),刘玉魁(第二、八、九、十章),谈治信(第三、四章,附录),崔遂先(第五、六、七、九章),王先路(第十章)李旺奎、张涤新、李得天、李正海(第十一章),胡炳森、王荣宗(第十二章),范垂祯(第十三章),薛大同、张景钦(第十四章),许启晋、曹慎诚(第十五章),达道安(第十六章)等17人。谈治信同志仍负责全书协调组织和对外联系工作。

参与手册编写工作的人员还有:闫鸿祥、曹艳秋、孟静蓉、陈月琴、赵光平等。

本手册由北京国防工业出版社出版,从第1版到第3版历经25年,得到该社高度重视。王礼国、宋桂珍为手册第1、2版责任编辑;唐应恒、邢海鹰为第3版责任编辑。他们为手册的出版付出了很多心血。

在修订过程中,得到全国高校、真空科研单位、真空厂(企业)很多专家教授、工程技术人员的大力支持。他们提出了不少修改意见,寄来了大量的技术资料,对手册的编写起了很大作用。在此,手册编委会向他们致以诚挚的感谢!由于编写水平有限,涉及内容较多,手册中难免有许多不足之处,恳望读者批评、指正。

兰州物理研究所《真空设计手册》(第3版)编委会

主编 达道安

2004年2月26日

目 录

第一章 真空基础	1	(三)算术平均速度 \bar{v}	55
一、真空概念和测量单位	1	(四)均方根速度 v_s	55
(一)真空概念	1	(五)气体中的声速	55
(二)真空度及测量单位	1	九、气体分子碰撞次数	56
二、真空区域划分	3	(一)气体分子间的碰撞	56
三、大气	3	(二)气体分子与容器壁碰撞	57
四、真空技术术语(GB/T3163—93) ..	5	(三)蒸发、凝结与饱和蒸气压 ..	58
五、真空技术系统图用图形符号		十、气体分子的平均自由程	59
(GB/T3164—93)	43	(一)单一气体分子的平均	
(一)真空泵	43	自由程	59
(二)真空阀门	44	(二)两种气体混合时的平均	
(三)挡板	45	自由程	60
(四)阱	46	(三)多种气体混合时的平均	
(五)除尘、过滤器	46	自由程	60
(六)真空管路及其连接	46	(四)在气体中运动的电子的平均	
(七)压力测量仪表	47	自由程	61
(八)真空容器	48	(五)在气体中运动的离子的	
(九)符号应用示例	48	平均自由程	61
六、理想气体的基本定律及状态		(六)平均自由程与温度的关系 ..	61
方程	49	(七)分子自由程的分布规律	62
(一)理想气体	49	十一、常压下气体的迁移过程	62
(二)气体分子运动论的基本		(一)平衡态与非平衡态及非	
假设	50	平衡态下的输运过程	62
(三)理想气体的基本定律及		(二)迁移方程	63
状态方程	50	(三)气体的内摩擦(粘滞性)	63
(四)蒸气	51	(四)气体的热传导	64
七、理想气体的压力、质量和密度	52	(五)气体的扩散	65
(一)理想气体的压力	52	十二、中、低压下气体的迁移过程	73
(二)理想气体的质量	52	(一)中压下的滑动现象	73
(三)理想气体的密度	54	(二)低压下气体的外摩擦(自由	
八、气体分子热运动速度	54	分子的粘滞性)	75
(一)麦克斯韦速度分布定律	54	(三)低压下的热流逸现象	75
(二)最可几速度 v_m	55	(四)中压下的温度剧增(温度	

跃变)现象	76	(一)圆截面长管	106
(五)低压下气体的自由分子		(二)矩形及正方形圆截面短管...	106
热传导	77	(三)截面管道	108
十三、吸附	78	(四)环形截面管道	109
(一)固体与气体的相互作用	78	(五)偏心圆环	109
(二)吸附的基本概念	78	(六)椭圆形截面管道	110
(三)吸附的平衡状态——吸附		(七)径向辐射流结构流导	110
等温线	79	(八)各种气体的流导关系	111
(四)吸附的非平衡状态——		八、分子流时管道的流导	112
吸附和解吸速率	84	(一)圆截面长管	112
十四、低压下的气体放电现象	88	(二)圆截面短管	112
(一)气体的电离	88	(三)环形截面管道	114
(二)气体放电	90	(四)椭圆形截面管道	115
(三)辉光放电	93	(五)锥形管道	115
(四)弧光放电	94	(六)扁缝形管道	116
(五)火花放电	95	(七)矩形管道	116
(六)电晕放电	95	(八)等边三角形截面管道	117
(七)高频放电	95	(九)变截面及匀截面管道	117
(八)潘宁放电	96	(十)弯管	118
第二章 管道流导计算	98	(十一)径向辐射流结构的	
一、气体流量、流阻、流导的基本		流导	118
公式	98	(十二)各种气体的管道流导	
二、流量单位	98	关系	119
三、应用列线图 and 曲线计算管道串联时		九、分子流、粘滞流时对 20℃ 空气,	
的流导和泵的有效抽速	99	孔和管道的流导汇总表	120
四、气体沿管道的流动状态	100	十、粘滞—分子流时管道的流导	122
(一)湍流	100	(一)圆截面管道	122
(二)粘滞流	100	(二)矩形截面管道	123
(三)分子流	101	十一、以克劳辛系数计算管道流导	123
(四)粘滞—分子流	101	十二、挡板的流导	124
(五)湍流与粘滞流的判别	101	十三、用传输概率计算流导	126
(六)粘滞流、粘滞—分子流和		十四、分子流下复杂管路的流导和	
分子流的判别	102	传输概率	130
五、粘滞流时孔的流导	102	(一)两截面相同的管道串联	130
六、分子流时孔的流导	103	(二)两截面相同的管道中间	
(一)圆孔	103	连接一个大容器	131
(二)矩形薄壁窄缝	104	(三)管道与小孔组合后的	
(三)管道中隔板上的小孔	105	传输概率	131
(四)缩孔	105	(四)两管道中间有小孔时	
七、粘滞流时管道的流导	106	管路传输概率	131

(五)两个截面不同的管道 串联后的传输概率	132	(六)国产直联旋片式真空泵的 技术性能、特性曲线、 外形及安装尺寸	196
第三章 机械真空泵	133	(七)国产 2H 型滑阀式真空泵 技术性能、特性曲线、 外形及安装尺寸	205
一、真空泵型号编制方法	133	六、罗茨式真空泵	222
(一)真空泵型号组成	133	(一)概述	222
(二)真空泵型号示例	134	(二)工作原理	223
二、往复式真空泵	134	(三)ZJ 型罗茨真空泵的型式 和基本参数(摘自 ZB/T 7674—95)	223
(一)概述	134	(四)国产罗茨泵技术性能、特性 曲线、外形及安装尺寸	224
(二)结构原理	135	七、涡轮分子泵	245
(三)型式与基本参数(摘自 JB/T 7675—95)	135	(一)概述	245
(四)国产往复真空泵的技术 性能、外形及安装尺寸	136	(二)涡轮分子泵结构原理	246
(五)WL 系列立式节能往复 真空泵	140	(三)立式涡轮分子泵行业标准 (摘自 JB/T 9125—99) ...	246
三、液环式真空泵	145	(四)国产 F 型立式涡轮分子泵 技术性能、特性曲线、外形 及安装尺寸	249
(一)概述	145	八、干式真空泵	257
(二)工作原理	145	(一)概述	257
(三)型式与基本参数(摘自 JB/T 7255—94)	146	(二)干式旋片真空泵	259
(四)国产水环式真空泵的技术 性能、特性曲线、外形及安 装尺寸	148	(三)爪式真空泵	260
四、水环—大气喷射真空泵组	171	(四)涡旋式真空泵	265
(一)概述	171	(五)螺杆式真空泵	267
(二)工作原理	171	九、机械真空泵性能测试标准	268
(三)国产水环—大气喷射真空泵 组技术性能、特性曲线、外 形及安装尺寸	172	(一)容积真空泵性能测试方法 (摘自 JB/T 7266—94) ...	268
五、油封式旋转机械真空泵	176	(二)容积真空泵噪声测量方法 (摘自 JB/T 8106—99) ...	273
(一)概述	176	(三)旋片式真空泵性能测试方法 (摘自 JB/T 6533—97) ...	278
(二)工作原理	176	(四)滑阀式真空泵性能测试方法 (摘自 JB/T 1246—97) ...	281
(三)油封式旋转机械真空泵 行业标准	178	(五)涡轮分子泵性能测试方法 (摘自 GB7774—87)	287
(四)国产 2X 型旋片式真空泵 的技术性能、特性曲线、 外形及安装尺寸	181	(六)罗茨真空泵性能测试方法	
(五)国产 XD、X 系列单级旋片式 真空泵技术性能、特性曲线、 外形及安装尺寸	192		

(摘自 JB/T 7674—95) …	290	(八)国产 K、KT 型系列高真空油 扩散泵主要技术性能、特性 曲线及外形连接尺寸 ……	353
(七)往复真空泵性能测试方法 (摘自 JB/T 7675—95) …	292	(九)蒸气流真空泵性能测试方法 (摘自 JB/T 8272.1—96) …	381
第四章 蒸气流真空泵 ……	297	第五章 气体捕集真空泵 ……	391
一、概述 ……	297	一、钛泵 ……	391
二、水蒸气喷射真空泵 ……	297	(一)概述 ……	391
(一)应用范围 ……	297	(二)升华钛泵和蒸发钛泵 ……	392
(二)结构简述 ……	297	(三)弹道式钛泵 ……	398
(三)工作原理 ……	298	(四)溅射离子泵 ……	400
(四)水蒸气喷射泵真空的几个 重要参数 ……	300	二、低温泵 ……	414
(五)水蒸气喷射真空泵设计 要点 ……	301	(一)概述 ……	414
(六)水蒸气喷射真空泵型式 及基本参数(摘自 JB/T 8540—97) ……	309	(二)低温泵的分类 ……	415
(七)国产水蒸气喷射真空泵 技术性能 ……	310	(三)低温泵的抽速 ……	416
三、油扩散喷射真空泵 ……	325	(四)低温泵的极限压力 ……	420
(一)概述 ……	325	(五)低温泵的热负荷 ……	421
(二)结构原理 ……	325	(六)低温泵的启动时间 ……	423
(三)油扩散喷射真空泵的 抽气特性 ……	326	(七)低温泵的工作时间 ……	423
(四)油扩散喷射真空泵的 设计计算 ……	328	(八)深冷霜吸气现象 ……	424
(五)国产 Z 型系列油扩散喷射 真空泵主要技术性能、特 性曲线及外形尺寸 ……	332	(九)小型制冷机低温泵 ……	425
四、油扩散真空泵 ……	340	三、低温容器 ……	432
(一)概述 ……	340	(一)概述 ……	432
(二)结构原理 ……	341	(二)低温容器的热流量计算 ……	433
(三)影响油扩散泵性能的 因素 ……	341	(三)液氮生物容器(摘自 GB 5458—85) ……	438
(四)提高油扩散泵极限真空 的方法 ……	342	(四)自增压式液氮容器 (摘自 ZBB 42004—87) ……	440
(五)用油扩散泵获得超高 真空的方法 ……	343	(五)国产低温容器的技术 性能 ……	440
(六)金属油扩散泵的设计 ……	344	四、分子筛吸附泵 ……	442
(七)蒸气流真空泵行业标准(摘 自 JB/T 7265—2003) ……	350	(一)概述 ……	442
		(二)分子筛吸附泵的结构 ……	445
		(三)分子筛吸附泵的计算 ……	446
		(四)影响分子筛吸附泵性能的 因素 ……	447
		(五)分子筛在温度 20K 以下 工作时的吸附性能 ……	449
		(六)分子筛用作干燥剂的 性能 ……	450

(七)国产分子筛吸附泵主要 技术参数	451	一、真空室	676
五、锆铝吸气泵	451	(一)概述	676
(一)概述	451	(二)真空室的门	676
(二)锆铝吸气剂泵结构及 抽气原理	452	(三)真空室的水冷	678
(三)锆铝吸气带的工作特性 ..	454	二、真空室强度计算的一般知识	679
(四)锆铝吸气泵性能参数的 选择	456	(一)薄壳	679
第六章 真空密封	459	(二)设计压力	679
一、概述	459	(三)壁厚的附加量	679
二、静密封	459	(四)容器的最小壁厚	679
(一)橡胶密封	459	(五)许用应力	679
(二)氟塑料密封	478	(六)焊缝系数	680
(三)金属密封	480	(七)开孔削弱系数	681
(四)真空法兰、真空规管接头 ..	486	(八)压力试验	681
三、动密封	531	三、真空室壳体设计	682
(一)动密封型式	531	(一)圆筒形壳体	682
(二)真空动密封型式及尺寸 ..	533	(二)球形壳体	685
(三)金属波纹管密封	547	(三)锥形壳体	685
(四)液态金属密封	556	(四)盒形壳体	686
(五)磁力传动密封	557	(五)椭圆球形壳体	691
(六)磁流体密封	562	(六)环形壳体	692
第七章 真空元件	589	四、国家标准(GB150—98)中外压 圆筒和球壳壁厚计算公式	694
一、真空阀门	589	(一)外压圆筒和外压管子	694
(一)概述	589	(二)外压球壳	695
(二)真空阀门的一般结构 原理	589	五、圆筒体加强圈的设计	705
(三)真空阀门的型号编制、 型式及基本参数	590	(一)概述	705
(四)国产真空阀门型式、性能 参数	599	(二)图表法计算加强圈	705
二、挡油帽、挡板和冷阱	648	六、封头强度计算	706
(一)挡油帽	648	(一)外压球形封头	706
(二)挡板	648	(二)外压凸形封头	707
(三)阱	654	(三)锥形封头	708
三、观察窗、电极引入	665	(四)平盖	708
(一)观察窗	665	(五)与圆筒体连结的加强 球盖	712
(二)电极引入	668	(六)井字加强圆形球盖	714
第八章 真空室设计	676	七、封头标准	715
		(一)钢制压力容器用封头标准(摘 自 JB /T4746—2002)	715
		(二)封头内表面积、容积及 质量	721

(三)封头内表面积、容积及质量计算	750	(三)粗抽泵抽速确定	782
八、开孔加强设计	753	五、计算实例	783
(一)概述	753	(一)确定真空室中保持 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的工作压力所需要的真空系统的有效抽速 S	783
(二)封头开孔补强	753	(二)根据要求的工作压力及使用要求,选油扩散泵作为主泵	783
(三)外压容器的开孔补强	755	(三)计算扩散泵与真空室排气口间管路的流导,验证选 K-600 型扩散泵是否合适	784
(四)内压圆筒体开孔补强	755	(四)计算前级真空管路流导	785
(五)开孔补强计算	755	(五)计算抽气时间	785
(六)并联开孔的补强	756	六、超高真空系统设计	786
(七)补强方法	756	(一)超高真空与高真空系统设计	786
(八)补强图标准(摘自 JB/T 4736—2002)		(二)材料选择	786
九、法兰及管道设计	761	(三)表面化学清洗及烘烤	787
(一)螺栓计算	761	(四)抽气技术	787
(二)内压法兰计算	764	(五)超高真空装置实例	789
(三)外压法兰计算	766	七、真空机组	792
(四)管道壁厚计算	767	(一)低真空抽气机组	792
第九章 真空系统设计	769	(二)高真空抽气机组	795
一、真空系统设计中的主要参数	769	(三)超高真空抽气机组	796
(一)真空室的极限压力	769	八、罗茨真空泵机组	797
(二)真空室的工作压力	770	(一)概述	797
(三)真空室抽气口处泵的有效抽速	771	(二)罗茨真空泵机组标准 (JB/T 6921—93) 摘选	797
二、抽气时间计算	773	(三)国产罗茨真空泵机组技术性能、曲线、外形尺寸	801
(一)粗真空、低真空下抽气时间计算	773	九、扩散泵真空机组	818
(二)高真空下抽气时间计算	776	(一)概述	818
(三)真空室压力下降至初始压力的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{10}$ 和 $\frac{1}{e}$ 时的抽气时间	778	(二)国产扩散泵真空机组外形尺寸与基本参数	819
三、出气对真空系统的影响	778	第十章 真空装置	834
(一)局部出气时对稳定过程或瞬变过程计算的影响	778	一、真空镀膜	834
(二)均匀出气条件下,细长真空室内压力分布	779	(一)概述	834
四、选泵及配泵	780	(二)真空蒸发镀膜	835
(一)主泵选择及抽速计算	780	(三)蒸发卷绕式镀膜机	845
(二)前级系的配置及抽速确定	781		

(四)真空溅射镀膜	847	(八)冷焊模拟设备	938
(五)离子镀膜	856	(九)轴承真空试验设备	938
(六)化学气相沉积(CVD)制作 薄膜	865	(十)超高真空防冷焊评价试验 设备	939
(七)各种化合物薄膜及形成 方法	875	(十一)宇航员训练试验设备	941
(八)真空镀膜设备国家标准	879	(十二)固体火箭发动机点火模拟 设备	943
(九)国产真空镀膜设备概况	885	(十三)激光点火模拟设备	943
二、分子束外延设备	896	(十四)火箭发动机高空试 车台	944
(一)概述	896	(十五)姿态调整火箭高空试 车台	946
(二)独立束源快速换片型分子 束外延设备	896	五、真空冶金炉	947
(三)对真空的要求	897	(一)概述	947
(四)清洁的超高真空抽气 系统	897	(二)真空电阻炉	947
(五)几个重要部件的真空 问题	898	(三)真空电子束炉	956
三、离子束刻蚀技术	899	(四)真空电弧炉	960
(一)概述	899	(五)真空感应炉	965
(二)工作原理	900	(六)真空炉产品	973
(三)技术性能	901	六、钢液真空脱气处理	974
(四)结构特点	901	(一)概述	974
(五)离子源及真空系统设计 要点	906	(二)钢液真空脱气及排除夹杂 原理	974
(六)电源和控制系统设计 要点	910	(三)钢液真空处理方法	975
(七)离子束刻蚀工艺	912	(四)钢液处理设备设计	978
(八)国内外离子束刻蚀机 概况	915	七、真空热处理炉	984
四、空间环境模拟设备	918	(一)概述	984
(一)概述	918	(二)真空退火	985
(二)热真空模拟试验设备	918	(三)真空淬火	987
(三)亚暴环境模拟设备	930	(四)伊普森真空热处理炉	990
(四)X射线望远镜空间环境模拟 检测装置	933	(五)HBV-200型高压真空气 淬炉	991
(五)空间辐射制冷器用小型环境 模拟设备	935	(六)真空渗碳炉	993
(六)空间辐射环境模拟设备	936	八、辉光离子氮化	993
(七)涂层材料综合环境模拟 设备	936	(一)概述	993
		(二)工作原理	994
		(三)辉光离子氮化炉	994
		(四)D30型辉光离子氮化炉	996
		九、真空钎焊	997
		(一)概述	997

(二)真空钎焊原理	998	十五、真空浸渍	1057
(三)真空钎焊设备	1000	(一)基本要素	1057
(四)真空铝钎焊设备	1003	(二)浸渍主要工序	1057
十、真空电子束焊	1004	(三)浸渍工作压力与真空 系统	1059
(一)概述	1004	(四)浸渍装置	1060
(二)电子束焊原理	1005	十六、真空蒸馏	1062
(三)电子束焊设备	1007	(一)概述	1062
(四)低真空电子束焊机的真空 系统	1009	(二)真空蒸馏装置	1063
十一、真空冷冻升华干燥	1010	(三)分子蒸馏装置	1065
(一)概述	1010	十七、真空输送	1068
(二)冷冻升华干燥原理	1011	(一)真空吊车	1068
(三)食品冷干设备	1012	(二)物料的真空吸送	1070
(四)真空冷冻升华干燥 工艺	1013	(三)混凝土真空吸水软吸盘	1072
(五)食品冻干机与医药冻干 机设计差异	1023	十八、真空过滤	1075
十二、果蔬食品的真空保鲜	1026	(一)概述	1075
(一)概述	1026	(二)真空过滤机	1075
(二)真空预冷保鲜	1026	十九、加速器真空系统	1080
(三)真空包装保鲜食品	1031	(一)概述	1080
(四)真空气体置换保鲜	1035	(二)高压加速器真空系统	1080
(五)真空包装材料	1038	(三)6MeV 串列加速器真空 系统	1080
十三、真空包装机	1042	(四)高能同步加速器	1083
(一)概述	1042	(五)回旋加速器真空系统	1086
(二)台式真空包装机	1042	二十、受控核聚变装置	1088
(三)单室真空包装机	1044	(一)概述	1088
(四)双室真空包装机	1045	(二)受控核聚变装置真空环境 特点	1088
(五)输送带式真空包装机	1047	(三)真空室	1089
(六)热成型真空包装机	1049	(四)托卡马克装置	1090
(七)吸管式真空充气包装机	1051	(五)HL-2A 托卡马克真空 系统及烘烤	1090
(八)膨松柔软物品缩体包装 机	1052	(六)HT-7 超导托卡马克第 一壁 He 辉光硼化	1093
十四、真空气相干燥	1053	二十一、真空在核电工程中的 应用	1094
(一)概述	1053	(一)概述	1094
(二)真空气相干燥原理	1053	(二)真空在核电燃料生产中的 应用	1094
(三)VPD 设备原理及组成	1054	(三)真空在核电设备制造中的	
(四)主要工艺	1055		
(五)热利用及煤油净化 系统	1056		

应用	1095	(六)测量值的评价和误差	1176
(四)真空在核电站运行中的应		(七)选择、安装、规程	1181
用	1096	(八)附表	1182
二十二、真空环境制备纳米材料 ..	1098	第十二章 真空系统的气体分析与分压	
(一)概述	1098	测量	1191
(二)纳米半导体薄膜制备	1098	一、概述	1191
(三)制备银纳米颗粒与薄膜 ..	1099	(一)真空分析质谱计的主要应用	
(四)纳米颗粒铜薄膜制备	1099	范围	1191
(五)真空冷冻干燥方法制备纳		(二)对真空分析质谱计的一般	
米粉	1100	要求	1192
二十三、真空装置自动控制	1103	(三)可用于真空分析的	
(一)概述	1103	质谱计	1192
(二)自动控制元件及装置	1107	二、真空质谱计的离子源	1193
(三)真空装置自动控制系统 ..	1112	(一)传统电子碰撞式离子源 ..	1194
第十一章 真空度测量与真空规		(二)传统碰撞源的改进形式 ..	1194
校准	1122	(三)磁控管型冷阴极离子源 ..	1195
一、概述	1122	(四)无磁场放电型离子源	1196
二、真空规	1122	(五)电子振荡型离子源	1197
(一)液压式真空规	1122	(六)脉冲电子碰撞源	1198
(二)弹性变形真空规	1128	(七)离子贮存式电子碰撞源 ..	1199
(三)热传导真空规	1130	三、不同质量分离原理的质谱计 ..	1200
(四)辐射计型真空规	1136	(一)回旋质谱计	1200
(五)粘滞性真空规	1138	(二)离子回旋共振质谱计	1202
(六)电离真空规	1142	(三)磁偏转质谱计	1203
(七)极高真空测量	1151	(四)摆线质谱计	1205
三、真空规校准	1160	(五)飞行时间质谱计	1207
(一)概述	1160	(六)射频质谱计	1210
(二)绝对真空规比对校准		(七)线振质谱计(静电	
系统	1162	质谱计)	1212
(三)膨胀式校准系统	1162	(八)四极质谱计	1214
(四)动态流量法校准系统	1164	(九)单极质谱计	1214
(五)趋势	1168	(十)三维四极离子阱	1215
四、真空测量技术	1169	四、真空质谱计的离子检测器	1216
(一)概述	1169	(一)电测法离子检测器的	
(二)气体种类与真空规	1170	分类	1216
(三)作为“气沉”和“气源”的		(二)法拉第筒	1217
测量系统	1171	(三)电子倍增器	1217
(四)非均匀环境下的真空		五、四极质谱计	1222
测量	1174	(一)基本原理	1222
(五)特殊条件下的真空测量 ..	1175	(二)稳定图与质量扫描线	1225

(三)仪器基本参数之间的关系	1225	四、氦质谱检漏仪	1280
(四)仪器工作模式及质谱扫描	1226	(一)质谱仪器与检漏技术	1280
(五)四极质谱计特性	1227	(二)氦质谱检漏仪的基本原理与组成	1281
(六)四极质谱计基本参数设计	1230	(三)氦质谱检漏仪的主要参数	1281
(七)主要技术指标测试方法	1231	(四)高灵敏度氦质谱检漏仪	1285
(八)真空系统离子的判别和残余气体分析	1234	(五)返流氦质谱检漏仪	1286
(九)仪器进展概况	1235	(六)国产氦质谱检漏仪	1287
六、常用术语和真空质谱计的主要技术指标	1236	五、如何选择检漏仪器、检漏方法和示漏物质	1294
(一)常用术语	1236	(一)选择检漏仪器和方法应注意的几个问题	1294
(二)真空质谱计的主要技术指标	1239	(二)示漏物质的选择及使用中应注意的事项	1296
七、附表	1240	(三)选择检漏方法和示漏物质时还要考虑的安全因素	1297
第十三章 真空检漏技术和仪器	1250	六、氦质谱检漏技术	1298
一、概述	1250	(一)检漏的物理过程及有关公式	1298
(一)真空系统中漏气、虚漏与抽气之间的平衡	1250	(二)辅助真空系统	1303
(二)最大允许漏率	1250	(三)氦罩法检漏	1304
(三)真空检漏的目的	1251	(四)压力检漏法	1304
二、漏孔、漏率及标准漏孔	1251	(五)检漏盒法	1304
(一)漏孔	1251	(六)背压法检漏	1305
(二)漏率及漏率单位	1254	(七)喷吹法	1306
(三)标准漏孔及其校准	1254	(八)吸入法检漏	1308
三、检漏方法和仪器	1260	(九)检漏台	1310
(一)检漏方法的分类	1260	(十)累积法检漏	1310
(二)气泡检漏法	1262	(十一)用选择性抽气方法提高检漏灵敏度	1310
(三)放电管法与高频火花检漏器	1265	(十二)各种氦质谱检漏方法的应用	1311
(四)真空规检漏法	1265	七、检漏的实践	1311
(五)氦—钡法	1271	(一)在真空工作的各个阶段都要考虑检漏工作	1311
(六)静态升压法	1272	(二)检漏工作人员与检漏实验室(车间)	1313
(七)离子泵检漏器	1272	(三)如何进行检漏	1313
(八)卤素检漏仪	1274	第十四章 真空技术常用材料	1315
(九)氨气检漏法	1276		
(十)氦质谱检漏仪	1279		
(十一)其它检漏法	1279		

一、材料的真空性能	1315	三、真空设备制造中常用的几种永	
(一)概述	1315	久性连接方法	1484
(二)扩散、溶解、渗透	1315	(一)氩弧焊	1484
(三)出气	1330	(二)钎焊	1488
(四)蒸气压、蒸发、蒸发(升		(三)电子束焊	1496
华)速率	1372	(四)其它焊接方法	1499
二、真空材料	1392	四、玻璃、陶瓷工艺	1502
(一)壳体材料	1392	(一)金属—陶瓷封接	1502
(二)焊接、连接和封接材料 ..	1399	(二)玻璃—金属封接	1513
(三)泵工作物质	1407	(三)玻璃的熔接和切割工艺 ..	1520
(四)真空规、质谱计用材	1417	五、真空排气工艺	1520
(五)高温真空装置用材	1421	(一)概述	1521
三、航天器用材料质量损失性能 ..	1428	(二)低温容器抽气时存在的	
(一)空间环境和航天器的相		主要问题	1521
互作用	1428	(三)通常采用的排气工艺	1523
(二)航天器用材料出气筛		(四)气体热冲洗和间断排气	
选的主要指标	1429	新工艺	1524
(三)航天器用材料出气筛选的		(五)低温容器的抽气时间	1526
试验方法标准及材料出		(六)吸附剂活化处理	1527
气筛选的取舍判据	1430	第十六章 极高真空技术及其应用	1528
(四)航天器用材料出气筛选		一、概述	1528
的异位测试	1430	二、限制极限压力的因素	1529
(五)航天器用材料出气筛选		(一)容器内原有的气体	1530
的原位测试	1438	(二)漏气	1531
(六)航天器用润滑油(硅油)		(三)放气	1531
饱和蒸气压	1457	(四)渗漏	1537
(七)原子氧对航天器用材作		(五)返流	1540
用的效应	1458	三、获得极高真空的方法	1541
第十五章 真空技术常用工艺	1464	四、获得极高真空的技术	1545
一、概述	1464	(一)油扩散泵系统获得极高	
二、真空技术中的清洁处理	1464	真空的质谱分析	1545
(一)概述	1464	(二)贮槽式液氮冷凝泵的设	
(二)污染物的几种类型	1465	计及性能测试	1550
(三)污染的形成及其影响	1465	(三)钛钼和钛钨丝蒸发参数	
(四)真空对环境的要求	1466	和吸气性能的测定	1557
(五)真空环境的有关标准	1468	(四)极高真空设备中的冷	
(六)真空装置常见污染及其		漏现象及其消除方法	1565
防治	1474	五、用分子沉技术获得 10^{-11} Pa 极	
(七)表面处理的基本方法	1478	高真空	1569
(八)清洗实例	1481	(一)极高真空装置真空系统	

的结构及特点	1570	(二十)高熔点材料在 2000K	
(二)压力的测量	1569	时的性质	1613
(三)系统运转程序	1570	(二十一)液体金属的一些性	
(四)实验结果	1571	质	1614
六、极高真空技术的应用	1571	(二十二)高温下金属的机械	
附录	1573	性能	1616
一、真空设计常用数据	1573	(二十三)高温下纯金属的物	
(一)基本物理常数	1573	理性质	1617
(二)数表($N=0.01\sim 100$) ..	1574	(二十四)真空中加热电流、电压	
(三)常用量和单位	1579	与钨丝直径的关系 ..	1619
(四)单位的换算	1585	(二十五)热阴极材料的热电子	
(五)常用气体的物理性质	1588	发射电流密度	1620
(六)物质的蒸气压	1594	(二十六)可伐的物理特性	1622
(七)液化气体的种类和性质 ..	1596	(二十七)主要的薄膜制造方	
(八)气体在低温下的性质	1597	法	1623
(九)活性炭、沸石、氧化硅、		(二十八)常用蒸镀物质的性	
氧化铝对气体的吸附	1598	能	1634
(十)某些材料的吸附热	1600	(二十九)薄膜制作技术在电子	
(十一)各种气体的附着系数 ..	1601	产品上的应用	1634
(十二)气体的脱附活化能	1601	(三十)材料的摩擦因数	1635
(十三)真空绝热材料的热导		(三十一)镀铜、镍、金零件的	
率	1602	烧氢温度	1637
(十四)各种气体与蒸气的爆		(三十二)表面分析装置的名	
炸范围和自燃点	1603	称、代号及原理	1638
(十五)主要溶剂的某些性质 ..	1603	(三十三)表面分析装置的性	
(十六)真空技术中使用的有		能和特点	1640
害物质	1605	(三十四)蒸汽流泵对不同种类	
(十七)无机物和有机物的特		气体的理论抽速	1642
性	1607	二、我国现有的真空标准	1642
(十八)高熔点氧化物陶瓷的		三、主要真空研究单位及生产厂家	
性能	1610	简介	1646
(十九)高氧化铝陶瓷的性质 ..	1612	参考文献	1666

第一章 真空基础

一、真空概念和测量单位

(一) 真空概念

“真空”是指在指定空间内低于环境大气压力的气体状态,也就是该空间内气体分子数密度低于该地区大气压的气体分子数密度。不同的真空状态,就意味着该空间具有不同的分子数密度。在标准状态(STP:即 0°C , 101325Pa)下,气体的分子数密度为 $2.6870 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$,而在真空度为 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 时,气体的分子数密度只有 $2.65 \times 10^{16}\text{m}^{-3}$ 。

完全没有气体的空间状态称为绝对真空。绝对真空实际上是不存在的。

(二) 真空度及测量单位

在真空技术中常用真空度来度量真空状态下空间气体的稀薄程度。通常真空度用气体的压力值来表示。压力值越高,真空度越低;压力值越低,真空度越高。

常用的压力单位有:

①帕斯卡(Pa):国际单位制中的压力单位,我国法定压力单位。 1Pa 压力就是 1m^2 面积上作用 1N 的力,即

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

②微巴(μbar): $1\mu\text{bar}$ 的压力就是 1cm^2 面积上作用 1dyn 的力,即

$$1\mu\text{bar} = 1\text{dyn}/\text{cm}^2$$

③标准大气压(atm):1927 年在第七次国际计量大会上,给标准大气压下了定义,即在重力加速度为 $980.665\text{cm}/\text{s}^2$,水银温度为 0°C ,水银密度为 $13.5951\text{g}/\text{cm}^3$ 的条件下,760mm 高的汞柱产生的压力称为 1atm ,即

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1013250.144354\text{dyn}/\text{cm}^2$$

这种标准大气压依赖于汞的密度的测量精度,是不够严格的。

1954 年在第十次国际计量大会上,又重新定义了标准大气压,即

$$1\text{atm} = 1013250\text{dyn}/\text{cm}^2 = 101325\text{Pa}$$

④工程大气压(at):由于大气压力约为 $1\text{kg}/\text{cm}^2$,所以把 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 称为 1at ,即

$$1\text{at} = 1\text{kg}/\text{cm}^2$$

⑤毫米汞柱(mmHg): 1mmHg 是指 0°C 时 1mm 高水银柱(汞柱)作用在 1cm^2 面积上的力。由于纯水银 0°C 时的密度是 $13.5951\text{g}/\text{cm}^3$,所以

$$1\text{mmHg} = 13.5951\text{g}/\text{cm}^2$$

⑥托(Torr): 1Torr 定义为

$$1\text{Torr} = \frac{1}{760}\text{atm}$$

由于 1927 年与 1954 年定义的标准大气压有差值,因而造成 1mmHg 比 1Torr 大 $1.9 \times 10^{-4} \text{dyn/cm}^2$,即

$$1\text{mmHg} = 1\text{Torr} + 1.9 \times 10^{-4} \text{dyn/cm}^2$$

但由于两者差值很小,故通常认为

$$1\text{mmHg} \approx 1\text{Torr}$$

⑦英寸汞柱(inHg):英制压力单位,它是 1 英寸高水银柱作用在 1cm^2 面积上的力,即

$$1\text{inHg} = 25.4\text{mmHg}$$

⑧普西(Psi):英制压力单位,它是 1 平方英寸面积上作用 1 磅的力,即

$$1\text{Psi} = 1\text{lb/in}^2$$

⑨真空度的百分数($\delta\%$):用真空度的百分数表示压力的大小,一般只有在压力高于 100Pa 时才采用。真空度的百分数为

$$\delta\% = \frac{1 \times 10^5 - p}{1 \times 10^5} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 p ——以 Pa 作单位时的压力数值。

已知真空度的百分数,可用下式求气体压力 p

$$p = 1 \times 10^5 \left(1 - \frac{\delta}{100} \right) \quad (1-2)$$

真空度的百分数与压力 p 的对照值见表 1-1。表 1-1 只给出海平面附近点的值,其它地区要按海拔高度查出当地大气压值后另给出换算对照表。各种压力单位的换算关系见表 1-2。

表 1-1 真空度的百分数与压力 p 对照

真空度的百分数 $\delta/\%$	压 力 p/Pa	真空压力表读数 $1 \times 10^5 - p/\text{Pa}$	真空度的百分数 $\delta/\%$	压 力 p/Pa	真空压力表读数 $1 \times 10^5 - p/\text{Pa}$
0	100000	0	85	15000	85000
10	90000	10000	90	10000	90000
20	80000	20000	95	5000	95000
30	70000	30000	96	4000	96000
40	60000	40000	97	3000	97000
50	50000	50000	98	2000	98000
60	40000	60000	99	1000	99000
70	30000	70000	99.5	500	99500
80	20000	80000	100	0	100000

表 1-2 压力单位换算表

	帕 Pa	托 Torr	微米汞柱 μmHg	微巴 μbar	毫巴 mbar	标准大气压 atm	工程大气压 at	英寸汞柱 inHg	普西 (磅/英寸 ²) Psi
1Pa	1	7.50062×10^{-3}	7.50062	10	10^{-2}	9.86923×10^{-6}	1.0197×10^{-5}	2.953×10^{-4}	1.450×10^{-4}
1Torr	1.33322×10^2	1	10^3	1.33322×10^3	1.33322	1.31579×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	3.937×10^{-2}	1.934×10^{-2}

(续)

	帕 Pa	托 Torr	微米汞柱 μmHg	微巴 μbar	毫巴 mbar	标准大气压 atm	工程大气压 at	英寸汞柱 inHg	普西 (磅/英寸 ²) Psi
1 μmHg	1.33322×10^{-1}	10^{-3}	1	1.33322	1.33322×10^{-3}	1.31579×10^{-6}	1.3595×10^{-6}	3.937×10^{-5}	1.934×10^{-5}
1 μbar	10^{-1}	7.50062×10^{-4}	7.50062×10^{-1}	1	10^{-3}	9.86923×10^{-7}	1.0197×10^{-6}	2.953×10^{-5}	1.450×10^{-5}
1mbar	10^2	7.50062×10^{-1}	7.50062×10^2	10^3	1	9.86923×10^{-4}	1.0197×10^{-3}	2.953×10^{-2}	1.450×10^{-2}
1atm	1.01325×10^5	7.6×10^2	7.6×10^5	1.01325×10^6	1.01325×10^3	1	1.0333	2.9921×10	1.4696×10
1at	9.80663×10^4	7.3556×10^2	7.3556×10^5	9.80663×10^5	9.80663×10^2	9.67839×10^{-1}	1	2.8959×10	1.4223×10
1inHg	3.386×10^3	2.54×10	2.54×10^4	3.386×10^4	3.386×10	3.342×10^{-2}	3.453×10^{-2}	1	4.912×10^{-1}
1Psi (lb/in ²)	6.895×10^3	5.1715×10	5.1715×10^4	6.895×10^4	6.895×10	6.805×10^{-2}	7.031×10^{-2}	2.086	1

二、真空区域划分

为实用上便利起见,人们常把真空度粗划为几个区段,根据 GB/T3163—93,真空区域大致划分如下

低真空	$10^5\text{Pa} \sim 10^2\text{Pa}$	中真空	$10^2\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$
高真空	$10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-5}\text{Pa}$	超高真空	$< 10^{-5}\text{Pa}$

随着真空技术的发展,在更低压力下,气体空间的物理特性有了新的特点,真空获得和真空测量有了新的手段。因此,兰州物理研究所真空专家推荐采用下面的真空区域划分方法,即

低真空	$10^5\text{Pa} \sim 10^2\text{Pa}$	中真空	$10^2\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$
高真空	$10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-5}\text{Pa}$	超高真空	$10^{-5}\text{Pa} \sim 10^{-9}\text{Pa}$
极高真空	$< 10^{-9}\text{Pa}$		

三、大 气

地球周围有一层厚厚的大气,大气由十几种气体成分组成。表 1-3 列出了大气的主要组成成分。

表 1-3 大气的主要组成成分

成 分	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne
相对分子量	28	32	40	44	20
容积百分比/%	78.1	21.0	0.9	3.1×10^{-2}	1.84×10^{-3}
质量百分比/%	75.5	23.1	1.3	4.8×10^{-2}	1.3×10^{-3}
分压/Pa	7.9×10^4	2.12×10^4	9.46×10^2	32	1.87
成 分	He	Kr	Xe	H ₂	CH ₄
相对分子量	4	84	131	2	16
容积百分比/%	5.2×10^{-4}	1.1×10^{-4}	8.7×10^{-6}	5×10^{-5}	2×10^{-4}
质量百分比/%	6.9×10^{-3}	3.3×10^{-4}	3.9×10^{-3}	3.5×10^{-6}	1×10^{-4}
分压/Pa	5.33×10^{-1}	1.16×10^{-1}	8.8×10^{-3}	5.33×10^{-2}	2.0×10^{-1}

注:CO₂在各地含量不同

受地球引力的影响,处于地球表面上的大气的分子密度最大,大气压力也就越高。离地球表面越高,大气的密度就越小,压力也就越低。大气压 p 与海拔高度 h 之间的关系如下

$$p = 0.9998^{\frac{h}{1000}} \times 101325$$

式中 p ——大气压力[Pa];

h ——海拔高度[m]。

表 1-4 列出了大气的温度、压力、密度与海拔高度的关系。图 1-1 表示了大气压力随海拔高度的变化情况。由图 1-1 可见,广阔的宇宙空间是一个无限大的真空环境。现已测得,距地面 10km 的高空的气压是 2.67×10^4 Pa;在 45km 的高空,也就是次级火箭点火的位置,其压力为 133Pa;世界上最底的侦察卫星及宇宙飞船的轨道距地面 120km,压力只有 10^{-3} Pa;我国发射的第一颗人造地球卫星,离地面的近地点 438km,远地点 2384km,在它的轨道上的压力大约在 10^{-6} Pa~ 10^{-10} Pa 之间。

表 1-4 大气的温度、压力、密度与海拔高度的关系

高度 /km	温度 /℃	压 力 /Pa	密 度 /kg·m ⁻³	高度 /km	温度 /℃	压 力 /Pa	密 度 /kg·m ⁻³
0	15	101325	1.23×10^{-6}	40	-22.8	286	4.00×10^{-9}
1	8.5	89642	1.11×10^{-6}	50	-2.5	79.5	1.03×10^{-9}
2	2.0	79308	1.01×10^{-6}	60	-17.4	22.3	3.06×10^{-10}
3	-4.5	69958	9.09×10^{-7}	70	-53.5	5.51	8.75×10^{-11}
4	-11	61513	8.19×10^{-7}	80	-92.5	1.03	2.00×10^{-11}
5	-17.5	53918	7.36×10^{-7}	90	-92.5	1.64×10^{-1}	3.17×10^{-12}
6	-24.0	47109	6.60×10^{-7}	100	-63.1	3.0×10^{-2}	5.0×10^{-13}
7	-30.5	41004	5.90×10^{-7}	160	749	3.68×10^{-4}	1.28×10^{-15}
8	-36.9	35564	5.26×10^{-7}	220	1021	8.51×10^{-5}	2.0×10^{-16}
9	-43.4	30723	4.67×10^{-7}	300	1159	1.86×10^{-5}	3.6×10^{-17}
10	-49.9	26440	4.14×10^{-7}	400	1214	3.99×10^{-6}	6.5×10^{-18}
15	-56.5	12076	1.95×10^{-7}	500	1226	1.09×10^{-6}	1.6×10^{-18}
20	-56.5	6451	8.89×10^{-8}	600	1233	3.45×10^{-7}	4.6×10^{-19}
30	-46.6	1194	1.84×10^{-8}	700	1234	1.18×10^{-7}	1.5×10^{-19}



图 1-1 大气压力随海拔高度的变化

四、真空技术术语(GB/T 3163—93)^①

本标准参照采用国际标准 ISO 3529—81《真空技术名词术语》。

1 主题内容与适用范围

本标准规定了真空技术方面的一般术语、真空泵术语、真空计术语、真空系统术语、真空检漏术语、真空镀膜技术术语、真空干燥术语、表面分析术语和真空冶金术语。

本标准适用于真空技术方面的技术文件、标准、书籍和手册等有关资料的编写。

2 引用标准

- GB 3101 有关量、单位和符号的一般原则
- GB 6306.1~6306.4 变容真空泵性能测试方法
- GB 6307.1~6307.2 蒸气流真空泵性能测试方法

注：①本节中的序号为原标准序号。

3 一般术语

3.1 标准环境条件 standard ambient conditions

温度为 20℃,相对湿度为 65%,大气压力为:

$$101\,325\text{Pa} = 1013.25\text{mbar} = 760\text{Torr}。$$

3.2 气体的标准状态 standard reference conditions for gases

温度为 0℃,压力为:101 325Pa。

3.3 压力(压强) p pressure

气体分子从某一假想平面通过时,沿该平面的正法线方向的动量改变率,除以该平面面积或气体分子作用于其容器壁表面上的力的法向分量,除以该表面面积。

注:“压力”这一术语只适用于气体处于静止状态的压力或稳定流动时的静态压力。

3.4 帕斯卡 Pa pascal

国际单位制压力单位,1Pa = 1N/m²。

3.5 托 Torr torr

压力单位,1Torr = $\frac{1}{760}$ atm。

3.6 标准大气压 atm standard atmosphere

压力单位,1atm = 101 325Pa。

3.7 毫巴 mbar millibar

压力单位,1mbar = 10²Pa。

3.8 分压力 partial pressure

混合气体中某一组分的压力。

3.9 全压力 total pressure

混合气体中所有组分压力的总和。

3.10 真空 vacuum

在指定空间内,低于环境大气压力的气体状态。

3.11 真空度 degree of vacuum

表示真空状态下气体的稀薄程度,通常用压力值来表示。

3.12 真空区域 ranges of vacuum

真空区域大致划分如下:

真 空 区 域	压 力	
	Pa	Torr
低 真 空	10 ⁵ ~10 ²	760~1
中 真 空	10 ² ~10 ⁻¹	1~10 ⁻³
高 真 空	10 ⁻¹ ~10 ⁻⁵	10 ⁻³ ~10 ⁻⁷
超 高 真 空	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁷

3.13 气体 gas

不受分子间相互作用力的约束且能自由地占据任意空间的物质。

注:在真空技术中,“气体”一词不严格地应用于非可凝性气体和蒸气。

3.14 非可凝性气体 non-condensable gas

在临界温度以上的气体,即单纯增加压力不能使其液化的气体。

- 3.15 蒸气 vapour**
在临界温度以下的气体,即单纯增加压力能使其液化的气体。
- 3.16 饱和蒸气压 saturation vapour pressure**
在给定温度下,某种物质的蒸气与其凝聚相处于相平衡状态下的该种物质的蒸气压力。
- 3.17 饱和度 degree of saturation**
蒸气压对其饱和蒸气压之比。
- 3.18 饱和蒸气 saturated vapour**
在给定温度下,压力等于其饱和蒸气压的蒸气。
- 3.19 未饱和蒸气 unsaturated vapour**
在给定温度下,压力小于其饱和蒸气压的蒸气。
- 3.20 分子数密度 n, m^{-3} number density of molecules**
在某瞬时,气体中某点周围体积内的分子数,除以该体积。
- 3.21 平均自由程 l, λ, m mean free path**
一个分子与其它气体分子每连续二次碰撞走过的路程,叫自由程。相当多的不同自由程的平均值,叫平均自由程。
- 3.22 碰撞率 ϕ, s^{-1} collision rate**
在给定时间间隔内,一个分子(或其它规定粒子)相对于其它气体分子(或其它规定粒子)运动,受到的平均碰撞次数,除以该时间。这个平均碰撞次数是应在足够多的分子数和足够长的时间间隔下取得。
- 3.23 体积碰撞率 χ volume collision rate**
在给定时间间隔内,在围绕规定一点的空间范围内气体分子间的平均碰撞次数,除以该时间和该空间范围体积。所取时间间隔和体积不应太小。
- 3.24 气体量 G quantity of gas**
处于平衡状态的理想气体所占有的体积同其压力的乘积。此值必须注明气体温度或换算成 20℃ 时的数值。
注:气体量是指该量气体所占体积内气体内禀能量(或位能)的 2/3。
- 3.25 气体的扩散 diffusion of gas**
气体由于浓度梯度而在另一种介质中的运动。介质可以是另一种气体(这种情况下的扩散称之为互扩散)或者是可凝聚物质。
- 3.26 扩散系数 D diffusion coefficient; diffusivity**
通过单位面积的质量流率的绝对值同该单位面积的法向浓度梯度之比。
- 3.27 粘滞流 viscous flow**
气体分子的平均自由程远小于导管最小截面尺寸的流态。因此,流动取决于气体的粘滞性,粘滞流可以是层流或滞流。
- 3.28 粘滞系数 η viscous factor**
在气流速度梯度方向单位面积上的切向力与速度梯度之比。
- 3.29 泊肖叶流 poiseuille flow**
流过圆截面长导管的层流粘滞流。
- 3.30 中间流 intermediate flow**
在层流和分子流之间状态下气体通过导管的流动。

- 3.31 分子流** molecular flow
气体分子的平均自由程远大于导管截面最大尺寸的流态。
- 3.32 克努曾数** number of knudsen
气体分子的平均自由程与导管直径之比。
- 3.33 分子泻流** molecular effusion; effusive flow
气体流过薄壁小孔,其分子的平均自由程较小孔尺寸大得多的情况时的流动状态。
- 3.34 流逸** transpiration
由压力差引起的气体通过多孔物体的流动。
- 3.35 热流逸** thermal transpiration
在分子流状态下,两个连通容器由于温度不同引起了气体流动,当气体传输达到平衡时,两个容器之间产生压力梯度的现象。
- 3.36 分子流率** q_N molecular flow rate; molecular flux
在给定时间间隔内,从给定方向穿过表面的分子数与从相反方向穿过该表面那些分子数之差,除以该时间。
- 3.37 分子流率密度** molecular flow rate density; density of molecular flux
分子流率除以表面面积。
- 3.38 质量流率** q_m mass flow rate
在给定时间间隔内通过某一截面的气体质量,除以该时间。
- 3.39 流量** q_G throughput of gas
在给定时间间隔内通过某一截面的气体量除以该时间。
- 3.40 体积流率** q_N volume flow rate
在给定温度、压力和给定时间间隔通过某截面的气体体积,除以该时间。
- 3.41 摩尔流率** q_v molar flow rate
在给定时间间隔内通过给定截面的气体的摩尔数,除以该时间。
- 3.42 麦克斯韦速度分布** maxwellian velocity distribution
由麦克斯韦—玻耳兹曼速度分布函数确定的一种速度分布。即气体分子在一定温度下处于平衡态和到器壁的距离大于分子平均自由程时的速度分布。
- 3.43 传输概率** P_c transmission probability
无规律地进入导管入口的分子通过出口的概率。
- 3.44 分子流导** C_N, U_N molecular conductance
气体通过管的两规定截面或孔流动的分子流导为:其分子流率与管的两截面或孔的两侧的平均分子数密度差之比。
- 3.45 流导** C, U conductance
在等温条件下,气体通过导管或孔流动时,其流量与导管的两规定截面或孔的两侧的平均压力差之比。
- 3.46 固有流导** C_i, U_i intrinsic conductance
在容器中麦克斯韦速度分布占优势的条件下,连接这样两个容器的导管(或小孔)的流导。在分子流条件下,它等于入口流导与传输概率之积。
- 3.47 流阻** W resistance
流导的倒数。

- 3.48 吸附 sorption**
固体或液体(吸附剂)对气体或蒸气(吸附质)的捕集现象。
- 3.49 表面吸附 adsorption**
气体或蒸气(吸附质)存留在固体或液体(吸附剂)表面上的吸附现象。
- 3.50 物理吸附 physisorption**
由于物理作用的吸附现象。
- 3.51 化学吸附 chemisorption**
由于化学作用的吸附现象。
- 3.52 吸收 absorption**
气体或蒸气(吸附质)扩散进入到固体或液体(吸附剂)内部的现象。
- 3.53 适应系数 α accommodation factor**
入射到某一表面的粒子和该表面实际交换的平均能量与粒子在该表面上达到完全的热平衡条件所应当交换的平均能量之比。
- 3.54 入射率 ν impingement rate**
在给定时间间隔内,入射到表面的分子数,除以该时间和该表面面积。
- 3.55 凝结率 condensation rate**
在给定时间间隔内凝结在某一表面积上的分子数(或物质量或物质质量)除以该时间和该表面面积。
- 3.56 粘着率 sticking rate**
在给定时间间隔内表面上吸附的分子数,除以该时间和该表面面积。
- 3.57 粘着概率 P sticking probability**
粘着率与入射率之比。
- 3.58 滞留时间 τ residence time**
分子在表面上以吸附状态被约束的平均时间。
- 3.59 迁移 migration**
分子在表面上的移动。
- 3.60 解吸 desorption**
被材料吸附的气体或蒸气的释放现象。释放可以是自然的,也可用物理方法加速。
- 3.61 去气 degassing**
气体从材料中人为的解吸。
- 3.62 放气 outgassing**
气体从材料中自然的解吸。
- 3.63 解吸或放气或去气速率 q_{GU} desorption or outgassing or degassing rate**
在给定时间间隔内,从材料中解吸(或放气或去气)的气体流量(或分子流率),除以该时间和该表面面积。
- 3.64 蒸发率 evaporation rate**
在给定时间间隔内从表面上蒸发的分子数(或物质量或物质质量)除以该时间和该表面面积。
- 3.65 渗透 permeation**
气体通过固体阻挡层的现象。该现象包括气体通过固体的扩散,也可以包括其它的表

面现象。

3.66 渗透率 φ permeability

在稳定流动的条件下,气体通过阻挡层(如器壁)的流量除以阻挡层两侧压力函数的量,该函数形式取决于实际渗透所涉及的物理过程。

3.67 渗透系数 P permeability coefficient

渗透率与阻挡层厚度之积除以渗透表面积。

4 真空泵及有关术语

4.1 真空泵 vacuum pumps

产生、改善和(或)维持真空的装置。基本上分为气体传输泵和气体捕集泵两种类型。

4.1.1 容积真空泵 positive displacement pump

容积真空泵是利用泵腔容积的周期变化来完成吸气和排气的装置。气体在排出前被压缩。这种泵分为往复式及旋转式两种。

4.1.1.1 气镇真空泵 gas ballast vacuum pump

泵工作中,经气镇阀放入适量的非可凝性气体到泵的压缩室,以降低被抽气体中可凝性蒸气在泵内凝结程度的容积真空泵。4.1.1.6~4.1.1.10 的容积真空泵均可装气镇装置。

4.1.1.2 油封(液封)真空泵 oil-sealed(liquid-sealed) vacuum pump

利用油类密封各运动部件间的间隔和减少压缩室有害空间的旋转容积真空泵。

4.1.1.3 干封真空泵 dry-sealed vacuum pump

不用油类(或液体)密封的容积真空泵。

4.1.1.4 往复真空泵 piston vacuum pump

利用泵腔内活塞往复运动,将气体压缩并排出的容积真空泵。

4.1.1.5 液环真空泵 liquid ring vacuum pump

带有多叶片的转子偏心装在泵壳内,当它旋转时,把液体(通常为水)抛向泵壳并形成与泵壳同心的液环,液环同转子叶片形成了容积周期变化的旋转容积真空泵。

4.1.1.6 旋片真空泵 sliding vane rotary vacuum pump

转子偏心的装在泵壳内并同泵壳内表面固定面相切,在转子内装有二个(或二个以上)旋片,当转子旋转时滑片能沿其径向槽往复滑动且与泵壳内壁始终接触,将泵腔分成几个可变容积的旋转容积真空泵。

4.1.1.7 定片真空泵 rotary piston vacuum pump

在泵壳内装有一个与泵壳内壁相接触的偏心转子,泵壳上装有一片始终与转子表面接触的径向滑片,当转子旋转时滑片上、下滑动将泵腔分成两个可变容积的旋转容积真空泵。

4.1.1.8 滑阀真空泵 rotary plunger vacuum pump

在偏心转子外有一滑阀环,转子旋转时带动滑阀环沿泵壳内壁滑动和滚动,固定在滑阀环上的滑阀杆能在装于泵壳适当位置可摆动的滑阀导轨中滑动,而把泵腔分成两个可变容积的旋转容积真空泵。

4.1.1.9 余摆线真空泵 trochoidal vacuum pump

在泵壳内,偏心装有一个余摆线型转子,它沿泵壳内壁滑动并将泵腔分成两个可变

容积的容积真空泵。

4.1.1.10 多室旋片真空泵 multi-chamber sliding vane rotary vacuum pump

在一个泵壳内并联装有由同一电动机驱动的多个独立工作室的旋片真空泵。

4.1.1.11 罗茨真空泵 roots vacuum pump

泵内装有两个相反方向同步旋转的双叶形或多叶形转子,转子间,转子同泵壳内壁保持一定的间隙的旋转容积真空泵。

4.1.2 动量传输泵 kinetic vacuum pump

高速旋转的叶片或射流,把动量传输给气体或气体分子,使气体连续不断的从入口传输到出口的真空泵。

4.1.2.1 牵引分子泵 molecular drag pump

气体分子与高速转动的转子相碰撞而获得动量,被送到出口的一种动量传输泵。

4.1.2.2 涡轮分子泵 turbo molecular pump

泵内装有带槽的圆盘或带叶片的转子,它在定子对应的圆盘间旋转。转子圆周的线速度和气体分子速度是相同的量级的,泵通常在分子流条件下工作。

4.1.2.3 喷射真空泵 ejector vacuum pump

利用文丘里(Venturi)效应的压力降产生的高速射流把气体输送到出口的一种动量传输泵。喷射真空泵适于粘滞流和过渡流条件下工作。

4.1.2.4 液体喷射真空泵 liquid jet vacuum pump

以液体(通常为水)为工作介质的喷射真空泵。

4.1.2.5 气体喷射真空泵 gas jet vacuum pump

以非可凝性气体作为工作介质的喷射真空泵。

4.1.2.6 蒸气喷射真空泵 vapour jet vacuum pump

以蒸气(水、油、汞等蒸气)作为工作介质的喷射真空泵。

4.1.2.7 扩散泵 diffusion pump

以低压高速蒸气流(油或汞等蒸气)作为工作介质的气体动量传输泵。气体分子扩散到蒸气射流中,被送到出口。在射流中气体分子密度始终是低的。这种泵适于分子流条件下工作。

4.1.2.8 自净化扩散泵 self purifying diffusion pump

泵液中的易挥发杂质经专门的机构输送到出口而不回到锅炉中的一种油扩散泵。

4.1.2.9 分馏扩散泵 fractionating diffusion pump

这种泵具有分馏装置,使蒸气压力较低的工作液蒸气进入高真空工作的喷嘴,而蒸气压力较高的工作液蒸气进入低真空工作的喷嘴中的一种多级油扩散泵。

4.1.2.10 扩散喷射泵 diffusion ejector pump

有扩散泵特性的单级或多级喷嘴和具有喷射泵特性的单级或多级喷嘴组成的动量传输泵。

4.1.2.11 离子传输泵 ion transfer pump

被电离的气体在电磁场或电场的作用下,输送到出口的一种动量传输泵。

4.1.3 捕集真空泵 entrapment vacuum pump

气体分子被吸附或凝结在泵内表面上的真空泵。

4.1.3.1 吸附泵 adsorption pump

主要用具有大表面的吸附剂(如多孔物质)的物理吸附作用来抽气的捕集真空泵。

4.1.3.2 吸气剂泵 getter pump

用吸气剂以化学结合方式捕获气体的捕集真空泵。吸气剂通常是以块状或沉积新鲜薄膜形式存在的金属或合金。

4.1.3.3 升华(蒸气)泵 sublimation(evaporation)pump

一种用间断或连续方式升华(蒸气)吸气材料以达到抽气目的的捕集真空泵。

4.1.3.4 吸气剂离子泵 getter ion pump

被电离的气体通过电磁场或电场的作用吸附在有吸气材料的泵内表面上的捕集真空泵。

4.1.3.5 蒸发离子泵 evaporation ion pump

泵内被电离的气体传输到以间断或连续方式升华或蒸发而覆在泵内壁的吸气材料上而被吸附的一种吸气离子泵。

4.1.3.6 溅射离子泵 sputter ion pump

泵内电离的气体,被吸附在由阴极连续溅散出来的吸气材料上的吸气剂离子泵。

4.1.3.7 低温泵 cryopump

利用低温表面捕集气体的真空泵。

4.2 真空泵零部件

4.2.1 泵壳 pump case

将低压力气体与大气隔开的泵的外壳。

4.2.2 入口 inlet

真空泵的吸气口。

4.2.3 出口 outlet

真空泵的排气口。

4.2.4 旋片(滑片、滑阀) vane;blade

在一些容积真空泵中,将泵腔分成若干部分的滑动零件。

4.2.5 排气阀 discharge valve

在一些旋转容积真空泵中,从压缩室排气的自动阀。

4.2.6 气镇阀 gas ballast valve

在气镇真空泵的压缩室安装的一种起气镇作用的充气阀。

4.2.7 膨胀室 expansion chamber

在一些容积真空泵泵腔内,被抽气体进入逐渐增大的空间。

4.2.8 压缩室 compression chamber

进入容积真空泵泵腔的气体,在排出之前被压缩,使其体积逐渐减小的空间。

4.2.9 真空泵油 vacuum pump oil

在油封真空泵中,用来密封、冷却和润滑的液体。

4.2.10 泵液 pump fluid

喷射真空泵、扩散泵或扩散喷射泵的工作液。

4.2.11 喷嘴 nozzle

为使喷射真空泵、扩散泵或扩散喷射泵起抽气作用而对射流导向的部件。

4.2.12 喷嘴喉部 nozzle throat

喷嘴的最小横截面。

4.2.13 喷嘴扩张率 nozzle expansion rate

喷嘴出口面积和喷嘴喉部面积之比。

4.2.14 喷嘴间隙面积 nozzle clearance area

喷嘴出口外缘和泵壳之间最小横截面积。

4.2.15 喷嘴间隙 nozzle clearance

决定喷嘴间隙面积的环的宽度。

4.2.16 射流 jet

从喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵喷嘴喷射出的工作介质流。

4.2.17 扩散器 diffuser

喷射泵壁的收缩部分、喉部及扩张部分的总和。

4.2.18 扩散器喉部 diffuser throat

扩散器的最小截面部分。

4.2.19 蒸气导管 vapour tube(pipe;chimney)

在蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵中,从锅炉到喷嘴的连接管。

4.2.20 喷嘴组件 nozzle assembly

蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵的喷嘴与蒸气导管的组装件(一般指可拆卸部件)。

4.2.21 下裙 skirt

喷嘴组件下部的扩大部分。它使返回冷凝的泵液与锅炉产生的蒸气分开。

4.3 附件

4.3.1 阱 trap

用物理或化学的方法来降低气体混合物中蒸气压力的装置。

4.3.1.1 冷阱 cold trap

通过冷却表面凝结作用工作的阱。

4.3.1.2 吸附阱 sorption trap

以吸附方式工作的阱。

4.3.1.3 离子阱 ion trap

利用电离方法工作的阱。

4.3.1.4 冷冻升华阱 cryosublimation trap

用间断方式把吸气剂材料升华并沉积到阱的冷却表面上来吸附气体和凝结泵液蒸气的阱。

4.3.2 挡板 baffle

装在蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵入口,用以降低泵液返流和返迁移的遮挡装置(也可用冷却方式)。

4.3.3 油分离器 oil separator

装在真空泵出口处,用以减少以微滴形式被带走的泵油的装置。通常用于变容真空泵中。

4.3.4 油净化器 oil purifier

从泵油中清除污染物的装置。

4.3.5 冷凝器 condenser

用以冷凝混合气流中水蒸气的装置。

4.4 泵按工作分类

4.4.1 主泵 main pump

在真空系统中,用来获得所要求的真空度的真空泵。

4.4.2 粗抽泵 roughing vacuum pump

从大气压开始降低系统的压力到另一抽气系统开始工作的真空泵。

4.4.3 前级真空泵 backing vacuum pump

用以维持另一个泵的前级压力在其临界前级压力以下的真空泵。前级泵也可以做粗抽泵使用。

4.4.4 粗(低)真空泵 rough(low) vacuum pump

从大气开始降低容器压力的真空泵。

4.4.5 维持真空泵 holding vacuum pump

在真空系统中,当气体量很小时,不能有效的利用主前级泵,为此,在真空系统中配置一种容量较小的辅助前级泵维持主泵正常工作或维持已抽空容器所需之低压的真空泵。

4.4.6 高真空泵 high vacuum pump

在高真空范围工作的主真空泵。

4.4.7 超高真空泵 ultra-high vacuum pump

在超高真空范围工作的真空泵。

4.4.8 增压真空泵 booster vacuum pump

装于高真空泵和前级泵之间,用来提高抽气系统在中间压力范围的抽气量或者降低对前级泵容量要求的真空泵。

4.5 真空泵特性

4.5.1 真空泵的抽气速率(体积流率) s volume flow rate of a vacuum pump

当泵装有标准试验罩并按规定条件工作时,从试验罩流过的气体流量与在试验罩上指定位置测得的平衡压力之比。简称泵的抽速。

4.5.2 真空泵的抽气量 Q throughput of vacuum pump

流经泵入口的流量。

4.5.3 启动压力 starting pressure

泵无损坏启动并有抽气作用的压力。

4.5.4 前级压力 backing pressure

排气压力低于一个大气压力的真空泵的出口压力。

4.5.5 临界前级压力 critical backing pressure

蒸气喷射泵或扩散泵、扩散喷射泵所许可的最高前级压力值,超过了此值就破坏正常工作。当前级压力稍高于临界前级压力时,还不致于引起入口压力的显著增加。蒸气流泵的临界前级压力主要决定于抽气量。

注:某些泵正常工作的破坏不会突然出现,所以临界前级压力不能准确指出。

4.5.6 最大前级压力 maximum backing pressure

超过了能使泵损坏的前级压力。

4.5.7 最大工作压力 maximum working pressure

对应最大抽气量的入口压力。在此压力下,泵能连续工作而不恶化或损坏。

4.5.8 真空泵的极限压力 ultimate pressure of a pump

泵装有标准试验罩并按规定条件工作,在不引入气体正常工作的情况下,趋向稳定的最低压力。

4.5.9 压缩比 compression ratio

泵对给定气体的出口压力与入口压力之比。

4.5.10 何氏系数 Ho coefficient

蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵喷嘴间隙面积上的实际抽速与该处按分子泻流计算的理论抽速之比。

4.5.11 抽速系数 speed factor

蒸气喷射泵或扩散泵的实际抽速与泵入口处按分子泻流计算的理论抽速之比。

4.5.12 气体的反扩散 back-diffusion of gas

从真空泵出口向入口与抽气作用相反方向的气体流动。

4.5.13 泵液返流 back-streaming of pump fluid

泵液通过泵入口(或者附属挡板或阱)与被抽气体流动方向相反的流动。

4.5.14 返流率 back-streaming rate

泵按规定条件工作时,通过泵入口单位面积的泵液质量流率。

4.5.15 返迁移 back-migration

a. 蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵的泵液分子沿表面移动进入被抽容器。

b. 油封真空泵的泵油分子沿表面移动进入被抽容器。

4.5.16 爆腾 bumping

泵液在锅炉内由于局部过热产生的不稳定蒸发。

4.5.17 水蒸气允许量 q_m water vapour tolerable load

在正常环境条件下,气镇泵在连续工作时能抽除的水蒸气质量流率。

4.5.18 最大允许水蒸气入口压力 maximum tolerable water vapour inlet pressure

在正常环境条件下,气镇泵在连续工作时被抽气体中水蒸气的最高入口压力。

4.5.19 蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵的加热时间 warm-up time for a vapour jet pump or a diffusion pump or a diffusion ejector pump

锅炉中泵液的温度达到它正常工作温度所需要的时间。起始温度可以是环境温度,也可以是泵安全暴露大气的温度。

4.5.20 蒸气喷射泵、扩散泵或扩散喷射泵的冷却时间 cool-down time for a vapour jet pump or a diffusion pump or a diffusion ejector pump

泵停止加热后,锅炉中的泵液从正常工作温度降到可以安全暴露大气时的温度所需要的时间。

5 真空系统及有关术语

5.1 真空系统 vacuum system

由真空容器和产生真空、测量真空、控制真空等的组件组成。

5.1.1 真空机组 pump system

由产生真空、测量真空和控制真空等的组件组成。

- 5.1.2 有油真空机组** pump system used oil
用油作工作液或用有机材料密封的真空机组。
- 5.1.3 无油真空机组** oil free pump system
不用油作工作液和不用有机材料密封的真空机组。
- 5.1.4 连续处理真空设备** continuous treatment vacuum plant
能将处理研究的材料或工件连续地送入到真空容器中,并且又能从真空室输出而不必中断设备连续工序的一种真空设备。
- 5.1.5 闸门式真空系统** vacuum system with an air-lock
在不破坏真空情况下,能将工件或材料通过一个或若干个真空闸室导入或导出的一种真空系统。
- 5.1.6 压差真空系统** differentially pumped vacuum system
通过气体节流,使互相连接的各个室分别用单独真空泵抽气以达到维持压差(压降或压力梯段)目的的一种真空系统。
- 5.1.7 进气系统** gas admittance system
在规定的和控制的条件下,能将气体或气体混合物放入到真空系统的一种装置。
- 5.2 真空系统特性参量**
- 5.2.1 抽气装置的抽速** volume flow rate of a pumping unit
在抽气装置进气口测得的抽速。
- 5.2.2 抽气装置的抽气量** throughput of a pumping unit
流经抽气装置进气口的气体流量。
- 5.2.3 真空系统的放气速率** degassing(outgassing)throughput of a vacuum system
由真空系统所有表面解吸气体所产生的气体流量。
注:在真空系统内部经常出现一种漏气假象。这种情况叫做“虚漏”。
- 5.2.4 真空系统的漏气速率** leak throughput of a vacuum system
由于漏气渗入到真空系统中并影响真空容器中压力的气体流量。
- 5.2.5 真空容器的升压速率** rate of pressure rise of a vacuum chamber
在温度保持不变时,抽气系统关闭后,在给定时间间隔内容器的压力升高量除以该时间间隔之商。该商有可能不是恒定的。
- 5.2.6 极限压力** ultimate pressure
泵在工作时,空载干燥的真空容器逐渐接近稳定的最低压力。
- 5.2.7 残余压力** residual pressure
经过一定时间的抽气之后或真空过程结束之后还存在于真空容器中的气体或气体混合物(残余气体)的全压。在某些情况下残余压力等于极限压力。
注:在真空技术中,“气体”一词按广义的理解,即可适用于非冷凝性气体也可应用于蒸气。
- 5.2.8 残余气体谱** residual gas spectrum
真空容器中残余气体的质谱。
- 5.2.9 基础压力** base pressure
在真空容器中可以开始实施工艺时的压力。
注:在某些真空工艺中,例如表面的分析,基础压力也称作为“本底压力”。
- 5.2.10 工作压力** working pressure

在真空容器中为实施工艺所必需的压力(可能还有压力范围)。

5.2.11 粗抽时间 roughing time

前级真空泵或前级真空抽气装置从大气压抽至基础压力或抽至在较低压力下工作的真空泵的启动压力所需要的时间。

5.2.12 抽气时间 pump-down time

将真空系统的压力从大气压降低到一定压力,例如降到基础压力所需要的时间。

5.2.13 真空系统时间常数 time constant of a vacuum system

将真空容器中的压力降低到初始压力的 $1/e$ 所需要的时间。在抽速恒定时,该时间常数为容器体积除以抽气系统的抽速得出之商。

5.2.14 真空系统进气时间 venting time

经过规定的装置放入的空气使真空系统(或真空容器)内的压力由工作压力升高到较高的压力(一般到大气压)所需要的时间。如果放入的是空气,那么该时间称作为“通大气时间”。

5.3 真空容器

5.3.1 真空容器;真空室 vacuum chamber

根据力学计算能允许容器的压力低于环境压力的真空密封容器。

5.3.2 封离真空装置 sealed vacuum device

容器被抽空之后将其封离或者以别的方法用永久性的封接将其封离的一种真空容器,例如电子管,X射线管。

5.3.3 真空钟罩 vacuum bell jar

借助于一个可拆卸的连接件,将其放置到另一个组件(一般来说是一块底板)上并同这个组件共同组成一个真空室的钟罩形组件。

5.3.4 真空容器底板 vacuum base plate

真空容器底板通常位于真空设备抽气系统进气口上并包含有实施过程所必要的真空引入线。

5.3.5 真空歧管 vacuum manifold

可以和两个或若干个真空容器相连可以同时进行抽气的一种真空密封分配件。

5.3.6 前级真空容器(贮气罐) backing reservoir

设置在前级真空泵和其前级真空阀之间的容器。在前级真空泵断开时,它用来容纳被抽气体和(或)平衡压力的变化。

5.3.7 真空保护层 outer chamber

将一个真空容器全部或部分包围的一种真空密封容器。它用来减少漏气率和(或)降低作用于器壁的压力。真空保护层中所存在的真空称作为“保护真空”。

5.3.8 真空闸室 vacuum air lock

连接在两个不同压力空间之间的真空室。它具有能与这个或那个相接的空间相适应压力的连接装置和能将物件从这个空间输送到那个空间而在这些空间中压力不发生干扰性变化的开孔(全部或部分可以关闭)。一般来说这些装置和开孔用于将物件从大气送入到真空容器中或从真空中取出到大气中。

5.3.9 真空冷凝器,蒸汽冷凝器 device for condensing vapours

内部带有冷却面、设置于真空室和抽气系统之间用于冷凝大量蒸气的一种真空容器。

通常它有一个可闭锁的冷凝液收集罐能在不中断真空过程情况下排出液体冷凝物。

5.4 真空封接和真空引入线

5.4.1 永久性真空封接 permanent seal

不能以简单的方式加以制造或拆卸的一种真空连接。例如:钎焊的真空连接,焊接的真空连接;玻璃-玻璃封接;玻璃-金属封接。

5.4.2 玻璃分级过渡封接 graded seal

由具有不同热膨胀系数的各种玻璃组成的一种永久性真空封接。因此避免了在各连接元件内不希望有的大应力(所谓麦杆式封接)。

5.4.3 压缩玻璃金属封接 compression glass-to-metal seal

将玻璃同金属或合金熔接在一起,并使玻璃始终处于压缩应变之下的一种永久性真空连接。

5.4.4 匹配式玻璃金属封接 matched glass-to-metal seal

通过将玻璃熔接到金属或合金上所制得的密封,使金属或合金在很大的温度范围内其热膨胀系数几乎与玻璃相同的一种永久性真空连接。

5.4.5 陶瓷金属封接 ceramic-to-metal seal

将陶瓷零件的金属化表面与一个金属零件钎焊在一起的一种永久性真空连接。

5.4.6 半永久性真空封装 semi-permanent seal

用蜡、胶、漆或类似物质接合的一种真空连接。

5.4.7 可拆卸的真空封接 demountable joint

用简单的方式,一般来说用机械的方法可以拆卸又可以重新组装起来的一种真空连接。

5.4.8 液体真空封接 liquid seal

借助于低蒸气压液体进行密封的一种可拆卸式真空连接。

5.4.9 熔融金属真空封接 molten metal seal

用低熔点金属进行密封的一种可拆卸式真空连接。加热金属使密封进行拆卸或组合。

5.4.10 研磨面搭接封接 ground and lapped seal

由两个经研磨的表面构成的一种可拆卸式真空连接。研磨面可以是平面形状,球形或锥状,通常它们都涂以油脂。

5.4.11 真空法兰连接 vacuum flange connection

在两个法兰之间用一个适宜的可变形的密封件造成一个真空密封连接的一种可拆卸式真空连接。

5.4.12 真空密封垫 vacuum-tight gasket

放置于两个零件之间的一个可拆卸的真空连接件,用其进行密封的一种可变形的构件。在某些场合借助于支承架(例如垫圈密封),材料的选择要视所要求的真空范围而定,通常用弹性体或金属。

5.4.13 真空密封圈 ring gasket

一种环形真空密封件。

注:有各种不同截面形状的真空密封圈,例如:“O”形密封圈;“V”形密封圈,“L”形密封圈和其它型材的密封件(金属型材密封件)。

5.4.14 真空平密封垫 flat gasket

用扁平材料制得的一种真空密封件。

5.4.15 真空引入线 feedthrough leadthrough

通过真空容器器壁使运动气体或液体,电流或电压传递或引入的一种装置。这种装置通常支承在真空容器对大气密封的法兰上。

在真空中能用来作多种运动,一般来说作平动和旋转运动的传递运动的真空引入线称作为“多关节操作机”。

5.4.16 真空轴密封 shaft seal

用来密封轴的一种真空密封件,它能将旋转和(或)移动运动相对地传递到真空容器器壁内。

5.4.17 真空窗 vacuum window

装在真空容器器壁上能使电磁辐射或微粒辐射穿透的一种装置(例如列纳尔特窗)。

5.4.18 观察窗 viewing port

作为观察装置运转情况的一种真空窗。

注:在某些应用场合必须对观察窗的光学性能提出一定的要求。

5.5 真空阀门

5.5.1 真空阀门的特性 characteristics of vacuum valves

主要是指真空阀门外壳对大气的真空密封性,真空阀门的流导和真空阀门的阀座漏气率。

5.5.1.1 真空阀门的流导 conductance of a vacuum valve

在阀门打开状态下的气体流动的流导。

注:在样本中,真空阀门的流导常常以“当量管长度”列出,这里设管的名义口径与阀的名义口径相同。

5.5.1.2 真空阀门的阀座漏气率 leak rate of the vacuum valve seat

在关闭状态下由阀座漏入的气体流率。它取决于气体种类、压力、温度和阀门出、进气口的压差。

5.5.2 真空调节阀 regulating valve

能调节由真空阀隔开的真空系统部件之间的流率的一种真空阀。

5.5.3 微调阀 micro-adjustable valve

用来微量调节进入真空系统中的气体量的真空阀。

5.5.4 充气阀 charge valve

把气体充入真空系统的阀。

5.5.5 进气阀 gas admittance valve

将气体放入到真空系统中的一种真空控制阀。

5.5.6 真空截止阀 break valve

用来使真空系统的两个部分相隔离的一种真空阀。通常它不能当作控制阀使用。

5.5.7 前级真空阀 backing valve

在前级真空管路中用来使前级真空泵和与其相连的真空泵隔离的一种真空截止阀。

5.5.8 旁通阀 by-pass valve

在旁通管路中的一种真空截止阀。

5.5.9 主真空阀 main vacuum valve

用来使真空容器同主真空泵隔离的一种真空截止阀。

5.5.10 低真空阀 low vacuum valve

在低真空管路中,用来使真空容器同其粗抽真空泵隔离的一种真空截止阀。

5.5.11 高真空阀 high vacuum valve

符合高真空技术要求的主要在该真空区域内使用的一种真空阀。

5.5.12 超高真空阀:UHV 阀 ultra-high vacuum valve

符合超高真空技术要求的主要在该真空区域内使用的一种真空阀。超高真空阀的阀座和密封垫通常由金属制成,可以进行烘烤。

5.5.13 手动阀 manually operated valve

用手开闭的阀。

5.5.14 气动阀 pneumatically operated valve

用压缩气体为动力开闭的阀。

5.5.15 电磁阀 electromagnetically operated valve

用电磁力为动力开闭的阀。

5.5.16 电动阀 valve with electrically motorized operation

用电机开闭的阀。

5.5.17 挡板阀 baffle valve

阀板沿阀座轴向移动开闭的阀。

5.5.18 翻板阀 flap valve

阀板翻转一个角度开闭的阀。

5.5.19 插板阀 gate valve

阀板沿阀座径向移动开闭的阀。

5.5.20 蝶阀 butterfly valve

阀板绕固定轴在阀口中转动开闭的阀。

5.6 真空管路

5.6.1 粗抽管路 roughing line

连接被抽容器与用于粗抽的真空泵的一种真空管路系统。

5.6.2 前级真空管路 backing line

连接前级真空泵的一种真空管路系统。

5.6.3 旁路管路:By-Pass 管路 by-pass line

与真空系统管路并联装配的一种真空管路系统。它可同时和系统管路一起工作或者可以单独工作。

5.6.4 抽气封口接头 pumping stem

用于容器的抽气,在抽气结束后通常进行真空密封连接,一般来说不能拆卸的一种连接管。

5.6.5 真空限流件 limiting conductance

在真空管路上,用来限制气体流经管路的一个特殊件,通常它是指隔板或毛细管。

5.6.6 过滤器 filter

真空管路中清除固体微粒并防止其落入真空泵中的装置。

6 真空计

6.1 一般术语

6.1.1 压力计 pressure gauge

测量气体或蒸气压力的仪器。

6.1.2 真空计 vacuum gauge

测量低于一个大气压力的气体或蒸气压力的仪器。

注:某些常用的真空计实际上不直接测量压力,而测量在规定条件下与压力有关的某些其它物理量。

6.1.2.1 规头(规管) gauge head

某些种类真空计的一个部件,它含有压力敏感元件并直接与真空系统连接。

6.1.2.2 裸规 nude gauge

一种没有外壳的规头,其敏感元件直接插入真空系统。

6.1.2.3 真空计控制单元 gauge control unit

某些种类真空计的控制单元包含电源和真空计工作需要全部电路。

6.1.2.4 真空计指示单元 gauge indicating unit

某些种类真空计的指示输出信号部件,通常以压力单位刻度。

6.2 真空计一般分类

6.2.1 压差式真空计 differential vacuum gauge

测量同时存在于一个敏感元件两侧面上压力之差的一种真空计。例如这个元件为弹性膜片或可动分隔液体。

6.2.2 绝对真空计 absolute vacuum gauge

通过测定物理量本身来确定压力的一种真空计。

6.2.3 全压真空计 total pressure vacuum gauge

测量混合气体全压力的一种真空计。

6.2.4 分压真空计;分压分析器 partial pressure vacuum gauge; partial pressure analyser

测量混合气体组分分压力的质谱仪式的真空计。

6.2.5 相对真空计 relative vacuum gauge

通过测量与压力有关的物理量并与绝对真空计比较来确定压力的一种真空计。

6.3 真空计特性

6.3.1 真空计测量范围 pressure range of vacuum gauge

在规定条件下,由真空计指示的示值误差不超过最大允许误差的压力范围。

注:某些真空计测量范围与气体性质有关,在这种情况下,测量压力范围是对氮气而言。

6.3.2 灵敏度系数 sensitivity coefficient

对于一给定压力,真空计指示的读数变化,除以对应压力的变化。

注:某些真空计灵敏度系数与气体性质有关,在这种情况下灵敏度通常指氮气而言。

6.3.3 相对灵敏度系数 relative sensitivity factor

对于一给定的气体,真空计的相对灵敏度系数为:真空计对该气体的灵敏度除以在相同压力和相同工作条件下真空计对氮的灵敏度。

6.3.4 电离规系数(压力单位倒数) ionization gauge coefficient(in inverse pressure units)

对于一给定气体,电离规系数为:离子流除以电子流和对应压力的乘积,并应指出工作

参数。

6.3.5 规管光电流 photon current of vacuum gauge haed

阴极发射的电子打在加速极上,产生软 X 射线,使收集极产生光电发射,收集极上产生一个与压力无关与离子流同向的电流,该电流即称规管光电流。

6.3.6 等效氮压力 equivalent nitrogen pressure

作用在真空计上某一气体的压力为纯氮所产生相同的压力读数值。

6.3.7 X 射线极限值 X-ray limit

一种热阴极电离真空计的 X 射线级限值为与主要由离子收集极发射的光电子产生的残余电流所引起的相同读数的纯氮压力值。

6.3.8 逆 X 射线效应 anti-X-ray effect

阴极发射的电子打在加速极上产生软 X 射线射到规管金属壁上,使其发射光电子,其中能量较大的打到收集极上,使收集极回路产生了一个与离子电流反向的电流,即逆 X 射线效应。

6.3.9 布利尔斯效应 blears effect

真空度较高的系统烘烤结束后,由于连接规管的管壁对有机蒸汽的吸附,直到表面饱和为止,致使规管反应压力比真实压力低,这种现象叫布利尔斯效应。

6.4 全压真空计

6.4.1 液位压力计 liquid level manometer

通常为一种 U 型管绝对压差计。管中的敏感元件是一种可动的隔离液体(例如汞)。通过测量液位差便得到压力值。

6.4.2 弹性元件真空计 elastic element vacuum gauge

压差可以通过测量弹性元件位移(直接法)或保持它原来位置需要的力(回零法)来测定,例如电感式、电容式、电阻式薄膜真空计,布尔登(Bourdon)真空计等。

6.4.3 压缩式真空计 compression gauge

已知气体体积,在待测量的压力下,按已知比例压缩(例如通过液柱——汞的移动),于是产生较高测量的压力的一种真空计。对于满足 $PV-T$ 关系的气体,如果较高压力用液位压力计测量,这样的真空计是绝对真空计。如麦克劳真空计(Mcleod gauge)。

6.4.4 压力天平 pressure balance

一种绝对真空计,在其内,待测量的压力适当地加到一个精确匹配的已知横截面积活塞—气缸部件上,所产生的力与一组已知质量砝码的重力进行比较。

6.4.5 粘滞性真空计 viscosity gauge

通过测量作用在两个元件表面上的粘滞力来测定压力的一种真空计。它的两个元件温度相同。一个元件处于静止,另一个相对于第一个运动。这种基于与压力有关的粘滞性的真空计,有衰减真空计(如振膜式真空计),分子牵引真空计等。

6.4.6 热传导真空计 thermal conductivity gauge

通过测量保持在不同温度的两固定元件表面间热能的传递来测量压力的一种真空计。这种基于与压力有关的气体热传导性的真空计,有皮拉尼真空计,热偶真空计,热敏真空计,双金属片真空计。

6.4.7 热分子真空计 thermo-molecular gauge

通过测量气体分子打击保持在不同温度的两固定表面的净动量传输率来测定压力的

一种真空计、在真空计中,气体分子选择性地作用在可动元件上。与气体分子平均自由程比较,两固定表面间的距离必须是很小的。例如:克努曾真空计(knudsen gauge)、反磁悬浮热分子真空计(diamagnetic levitation thermo-molecular gauge)。

6.4.8 电离真空计 ionization vacuum gauge

通过测量待测气体在控制条件下,电离所产生的离子流来测定压力的一种真空计。

6.4.9 放射性电离真空计 radioactive ionization gauge

通过放射源射线使气体电离所产生离子的一种电离真空计。例 α 射线真空计, β 射线真空计等。

6.4.10 冷阴极电离真空计 cold cathode ionization gauge

通过冷阴极放电产生离子的一种电离真空计。该计通常有磁场存在,用来延长电子行程,以增加产生的离子数。在规头内或在规头外也可以用其它方法使其启动或维持放电。

6.4.11 潘宁真空计 penning gauge

带有磁铁和特定电极结构的一种冷阴极电离真空计。阴极由两个连接的平行圆盘组成。阳极通常是环形的,被安装在圆盘之间并与其平行,磁场与圆盘垂直。

6.4.12 冷阴极磁控管真空计 cold cathode magnetron gauge

圆筒阴极在圆筒阳极内同轴排列的一种冷阴极电离真空计。它的磁场与电场垂直。如果里面电极是阳极,那么这个真空计叫做“反磁控管真空计”。

6.4.13 放电管指示器 discharge tube indicator

从冷阴极放电(通常为射频放电)颜色和形状,可以粗略判别气体种类和压力的一种透明管。

6.4.14 热阴极电离真空计 hot cathode ionization gauge

通过加热阴极发射电子使气体电离的一种电离真空计。

6.4.15 三极管式真空计 triode gauge

具有一般三极电子管结构的一种热阴极电离真空计,灯丝装在以栅极作为阳极的轴线上,板极作为离子收集极与阳极同心。

6.4.16 高压力电离(中真空)真空计 high pressure(medium vacuum)ionization gauge

它的测量范围比一般三极管真空计压力量程范围向中真空范围移动了的一种热阴极电离真空计。

6.4.17 B-A 型电离真空计 Bayard-Alpert gauge

用装在圆筒栅极轴线上一根细的金属丝作离子收集极和栅极外面的阴极,来降低 X 射线极限值的一种热阴极电离真空计。

6.4.18 调制型电离真空计 modulator gauge

一种装有调制电极的 B-A 型热阴极电离真空计。当改变调制极的电位时,通过测量在离子收集极上电流效应可以估算残余电流(包括任何 X 射线电流)影响。

6.4.19 抑制型电离真空计 suppressor gauge

通过安装在离子收集极附近的抑制电极,使离子收集极发射的二次电子返回到它自身,来降低 X 射线极限值的一种热阴极电离真空计。

6.4.20 分离型电离真空计 extractor gauge

通过使用一个短而细的金属丝做离子收集极来降低 X 射线极限值的一种热阴极电

离真空计。这个收集极装在屏蔽罩内,圆筒栅极外面轴线上,因而收集了来自电离区域的离子。

6.4.21 弯注型电离真空计 bent beam gauge

离子从电离区域拉出进入一个静电偏转极的一种热阴极电离真空计。

6.4.22 弹道型电离真空计 orbitron gauge

使发射电子以长的弹道轨道飞行,于是增加了每个电子所产生离子数的一种热阴极电离真空计。发射发生于圆筒离子收集极和同轴的细金属丝之间的静电场。低的电子流降低了 X 射线和解吸的离子效应。

6.4.23 热阴极磁控管真空计 hot cathode magnetron gauge

类似于在截止状态下工作的简单的圆柱磁控管式的一种电离真空计。在其内,用磁场来延长电子路径,以增加产生的离子数。

6.5 分压真空计(分压分析器)

6.5.1 射频质谱仪 radio frequency mass spectrometer

离子沿直线路径飞行,并在飞行中穿过一系列交替加有射频电压栅极孔被加速,进入静电场,该场仅允许射频场加速的离子达到收集极的一种质谱仪。

6.5.2 四极质谱仪(四极滤质器) quadrupole mass spectrometer; quadrupole mass filter

离子进入四电极(通常为杆)组成的四极透镜系统,透镜上加以成临界比的射频和直流电场,使仅有一定的质荷比的离子通过四极透镜而被检测的一种质谱仪。

6.5.3 单极质谱仪 monopole mass spectrometer

采用一个 L 形电极和与其对称放置的单柱,提供了象四极透镜的一个象限那样形状的一个场,离子从 L 形电极角附近注入并使有一定质荷比(取决于电场)的离子通过电场而被检测的一种质谱仪。

6.5.4 双聚焦质谱仪 double focusing mass spectrometer

通过径向静电场和扇形磁场的连续作用来分离离子致使在两个分析器中,离子速度分布是相反的并近似相等的一种质谱仪。

6.5.5 磁偏转质谱仪 magnetic deflection mass spectrometer

加速的离子在磁场作用下,被分成不同圆弧路径的一种质谱仪。

6.5.6 余摆线聚焦质谱仪 trochoidal focusing mass spectrometer

离子通过正交电磁场被分离,根据它们的不同质荷比,按照不同的摆线路径来到不同聚焦点上的一种质谱仪。

6.5.7 回旋质谱仪 omegatron mass spectrometer

由于相互垂直的射频电场和稳定磁场所产生的回旋谐振效应,离子按照半径逐渐增大的螺旋路径被分离的一种质谱仪。

6.5.8 飞行时间质谱仪 time of flight mass spectrometer

气体被脉冲调制电子束所电离,并且每一簇离子被加速趋向于向漂移空间末端的离子收集极,每簇离子达到的时间差,取决于它们的质荷比的一种质谱仪。

6.6 真空计校准

6.6.1 标准真空计 reference gauges

校准真空计时,用来作量值传递或量值参照的真空计。

6.6.2 校准系统 system of calibration

校准真空计所用的真空系统。

6.6.3 校准系数 K calibration coefficient

在校准系统中标准计指示的压力值与被校准计指示的压力值之比。

6.6.4 压缩计法 mcLeod gauge method

在等温条件下,用压缩计做标准计与被校计进行比较的标准方法。

6.6.5 膨胀法 expansion method

在等温条件下,将已知体积和压力的小容器中的永久气体膨胀到已知体积的低压大容器中,根据波义耳定律算出膨胀后的气体压力。膨胀法校准系统是静态校准系统。

6.6.6 流导法 flow method

流导法即小孔法、泻流法,在等温条件和分子流条件下,使气体通过已知流导的小孔,达到动态平衡时利用小孔的流导和测得的流量计算出压力的一种校准方法。

7 检漏及有关术语

7.1 漏孔

7.1.1 漏孔 leaks

在真空技术中,在压力或浓度差作用下,使气体从壁的一侧通到另一侧的孔洞、孔隙、渗透元件或一个封闭器壁上的其它结构。

7.1.2 通道漏孔 channel leak

可以把它理想地当做长毛细管的由一个或多个不连续通道组成的一种漏孔。

7.1.3 薄膜漏孔 membrane leak

气体通过渗透穿过薄膜的一种漏孔。

7.1.4 分子漏孔 molecular leak

漏孔的质量流率正比于流动气体分子质量平方根的倒数的一种漏孔。

7.1.5 粘滞漏孔 viscous leak

漏孔的质量流率正比于流动气体粘度的倒数的一种漏孔。

7.1.6 校准漏孔 calibrated leak

在规定条件下,对于一种规定气体提供已知质量流率的一种漏孔。

7.1.7 标准漏孔 reference leak

在规定条件下(入口压力为 $100\text{kPa} \pm 5\%$, 出口压力低于 1kPa , 温度为 $23^\circ\text{C} \pm 7^\circ\text{C}$), 漏率是已知的一种校准用的漏孔。

7.1.8 虚漏 vitrual leak

在系统内,由于气体或蒸气的放出所引起的压力增加。

7.1.9 漏率 leak rates

在规定条件下,一种特定气体通过漏孔的流量。

7.1.10 标准空气漏率 standard air leak rate

在规定的标准状态下,露点低于 -25°C 的空气通过一个漏孔的流量。

7.1.11 等值标准空气漏率 equivalent standard air leak rate

对于低于 $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 标准空气漏率的分子漏孔,氮(分子量 4)流过这样的漏孔比空气(分子量 29.0)更快,即氮流率对应于较小的空气漏率,在规定条件下,等值标准空气漏率为 $\sqrt{4/29} = 0.37$ 氮漏率。

7.1.12 探索(示漏)气体 search gas

用来对真空系统进行检漏的气体。

7.2 本底

7.2.1 本底 background

一般地在没有注入探索气体时,检漏仪给出的总的指示。

7.2.2 探索气体本底 search gas background

由于从检漏仪壁或检漏系统放出探索气体所造成的本底。

7.2.3 漂移 drift

本底比较缓慢的变化。重要参量是规定周期内测得的最大漂移。

7.2.4 噪声 noise

本底比较迅速的变化。重要参量是规定周期内测得的噪声。

7.3 检漏仪

7.3.1 检漏仪 leak detector

用来检测真空系统或元件漏孔的位置或漏率的仪器。

7.3.2 高频火花检漏仪 H. F. spark leak detector

在玻璃系统上,用高频放电线圈所产生的电火花,能集中于漏孔处的现象来确定漏孔位置的检漏仪(通常用它对玻璃系统进行检漏)。

7.3.3 卤素检漏仪 halide leak detector

利用卤族元素探索气体存在时,使赤热铂电极发射正离子大大增加的原理来制做的检漏仪。

7.3.4 氦质谱检漏仪 helium mass spectrometer leak detector

利用磁偏转原理制成的对于漏气体氦反应灵敏,专门用来检漏的质谱仪。

7.3.5 检漏仪的最小可检漏率 minimum detectable rate of leak detector

当存在本底噪声时,将仪器调整到最佳情况下,纯探索气体通过漏孔时,检漏仪所能检出的最小漏率。

7.4 检漏

7.4.1 气泡检漏 leak detection by bubbles

将空气压入被检容器,然后将其浸入水中或者对其可凝表面涂上肥皂液,观察气泡确定漏孔位置。

7.4.2 氨检漏 leak detection by ammonia

将氨压入被检容器,然后通过观察覆在可凝表面上试纸或试布颜色的改变来确定漏孔位置。

7.4.3 升压检漏 leak detection of rise pressure

被抽空容器与真空泵隔离后,测定随时间的增加而升高的压力值,来确定漏气率。

7.4.4 放射性同位素检漏 radioactive isotope leak detection

在被检容器或零件内,装入适当半衰期的放射性同位素,利用测定从漏孔穿出的放射性同位素的放射能来确定漏孔位置。

7.4.5 荧光检漏 fluorescence leak detection

将被检零件浸入荧光粉的有机溶液(三氯乙烯和四氯化碳)中,漏孔处将留有荧光粉,用紫外线照射荧光粉发光来确定漏孔位置。

8 真空镀膜技术

8.1 一般术语

8.1.1 真空镀膜 vacuum coating

在处于真空下的基片上制取膜层的一种方法。

8.1.2 基片 substrate

膜层承受体。

8.1.3 试验基片 testing substrate

在镀膜开始、镀膜过程中或镀膜结束后用作测量和(或)试验的基片。

8.1.4 镀膜材料 coating material

用来制取膜层的原材料。

8.1.5 蒸发材料 evaporation material

在真空蒸发中用来蒸发的镀膜材料。

8.1.6 溅射材料 sputtering material

在真空溅射中用来溅射的镀膜材料。

8.1.7 膜层材料(膜层材质) film material

组成膜层的材料。

8.1.8 蒸发速率 evaporation rate

在给定时间间隔内,蒸发出来的材料量,除以该时间间隔。

8.1.9 溅射速率 sputtering rate

在给定时间间隔内,溅射出来的材料量,除以该时间间隔。

8.1.10 沉积速率 deposition rate

在给定时间间隔内,沉积在基片上的材料量,除以该时间间隔和基片表面积。

8.1.11 镀膜角度 coating angle

入射到基片上的粒子方向与被镀表面法线之间的夹角。

8.2 工艺

8.2.1 真空蒸镀 vacuum evaporation coating

使镀膜材料蒸发的真空镀膜过程。

8.2.1.1 同时蒸发 simultaneous evaporation

用数个蒸发器把各种蒸发材料同时蒸镀到基片上的真空蒸发。

8.2.1.2 蒸发场蒸发 evaporation field evaporation

由蒸发场同时蒸发的材料到基片上进行蒸镀的真空蒸发(此工艺应用于大面积蒸发以获得理想的膜厚分布)。

8.2.1.3 反应性真空蒸发 reactive vacuum evaporation

通过与气体反应获得理想化学成分的膜层材料的真空蒸发。

8.2.1.4 蒸发器中的反应性真空蒸发 reactive vacuum evaporation in evaporator

与蒸发器中各种蒸发材料反应,而获得理想化学成分膜层材料的真空蒸发。

8.2.1.5 直接加热的蒸发 direct heating evaporation

蒸发材料蒸发所必需的热量是对蒸发材料(在坩埚中或不用坩埚)本身加热的蒸发。

8.2.1.6 感应加热蒸发 induced heating evaporation

蒸发材料通过感应涡流加热的蒸发。

8.2.1.7 电子束蒸发 electron beam evaporation

通过电子轰击使蒸发材料加热的蒸发。

8.2.1.8 激光束蒸发 laser beam evaporation

通过激光束加热蒸发材料的蒸发。

8.2.1.9 间接加热的蒸发 indirect heating evaporation

在加热装置(例如小舟形蒸发器,坩埚,灯丝,加热板,加热棒,螺旋线圈等)中使蒸发材料获得蒸发所必须的热量并通过热传导或热辐射方式传递给蒸发材料的蒸发。

8.2.1.10 内蒸 flash evaporation

将极少量的蒸发材料间断地做瞬时的蒸发。

8.2.2 真空溅射 vacuum sputtering

在真空中,惰性气体离子从靶表面上轰击出原子(分子)或原子团的过程。

8.2.2.1 反应性真空溅射 reactive vacuum sputtering

通过与气体的反应获得理想化学成分的膜层材料的真空溅射。

8.2.2.2 偏压溅射 bias sputtering

在溅射过程中,将偏压施加于基片以及膜层的溅射。

8.2.2.3 直流二极溅射 direct current diode sputtering

通过二个电极间的直流电压,使气体自持放电并把靶作为阴极的溅射。

8.2.2.4 非对称性交流溅射 asymmetric alternate current sputtering

通过二个电极间的非对称性交流电压,使气体自持放电并把靶作为吸收较大正离子流的电极。

8.2.2.5 高频二极溅射 high frequency diode sputtering

通过二个电极间的高频电压获得高频放电而使靶极获得负电位的溅射。

8.2.2.6 热阴极直流溅射(三极型溅射) hot cathode direct current sputtering

借助于热阴极和阳极获得非自持气体放电,气体放电所产生的离子,由在阳极和阴极(靶)之间所施加的电压加速而轰击靶的溅射。

8.2.2.7 热阴极高频溅射(三极型溅射) hot cathode high frequency sputtering

借助于热阴极和阳极获得非自持气体放电,气体放电产生的离子,在靶表面负电位的作用下加速而轰击靶的溅射。

8.2.2.8 离子束溅射 ion beam sputtering

利用特殊的离子源获得的离子束使靶的溅射。

8.2.2.9 辉光放电清洗 glow discharge cleaning

利用辉光放电原理,使基片以及膜层表面经受气体放电轰击的清洗过程。

8.2.3 物理气相沉积;PVD physical vapour deposition

在真空状态下,镀膜材料经蒸发或溅射等物理方法气化,沉积到基片上的一种制取膜层的方法。

8.2.4 化学气相沉积;CVD chemical vapour deposition

一定化学配比的反应气体,在特定激活条件下(通常是一定高的温度),通过气相化学反应生成新的膜层材料沉积到基片上制取膜层的一种方法。

8.2.5 磁控溅射 magnetron sputtering

借助于靶表面上形成的正交电磁场,把二次电子束缚在靶表面特定区域,来增强电离效率,增加离子密度和能量,因而可在低电压,大电流下取得很高溅射速率。

8.2.6 等离子体化学气相沉积;PCVD plasma chemistry vapour deposition

通过放电产生的等离子体促进气相化学反应,在低温下,在基片上制取膜层的一种方法。

8.2.7 空心阴极离子镀,HCD hollow cathode discharge deposition

利用空心阴极发射大量的电子束,使坩埚内镀膜材料蒸发并电离,在基片上的负偏压作用下,离子具有较大能量,沉积在基片表面上的一种镀膜方法。

8.2.8 电弧离子镀 arc discharge deposition

以镀膜材料作为靶极,借助于触发装置,使靶表面产生弧光放电,镀膜材料在电弧作用下,产生无熔池蒸发并沉积在基片上的一种镀膜方法。

8.3 专用部件

8.3.1 镀膜室 coating chamber

真空镀膜设备中实施实际镀膜过程的部件。

8.3.2 蒸发器装置 evaporator device

真空镀膜设备中包括蒸发器和全部为其工作所需要的装置(例如电能供给、供料和冷却装置等)在内的部件。

8.3.3 蒸发器 evaporator

蒸发直接在其内进行蒸发的装置,例如小舟形蒸发器,坩埚,灯丝,加热板,加热棒,螺旋线圈等等,必要时还包括蒸发材料本身。

8.3.4 直接加热式蒸发器 evaporator by direct heat

蒸发材料本身被加热的蒸发器。

8.3.5 间接加热式蒸发器 evaporator by indirect heat

蒸发材料通过热传导或热辐射被加热的蒸发器。

8.3.6 蒸发场 evaporating field

由数个排列的蒸发器加热相同蒸发材料形成的场。

8.3.7 溅射装置 sputtering device

包括靶和溅射所必要的辅助装置(例如供电装置,气体导入装置等)在内的真空溅射设备的部件。

8.3.8 靶 target

用粒子轰击的面、本标准中靶的意义就是溅射装置中由溅射材料所组成的电极。

8.3.9 挡板 shutter

用来在时间上和(或)空间上限制镀膜并借此能达到一定膜厚分布的装置。挡板可以是固定的也可以是活动的。

8.3.10 时控挡板 timing shutter

在时间上能用来限制镀膜,因此从镀膜的开始、中断到结束都能按规定时刻进行的装置。

8.3.11 掩膜 mask

用来遮盖部分基片,在空间上能限制镀膜的装置。

8.3.12 基片支架 substrate holder

可直接夹持基片的装置,例如夹持装置,框架和类似的夹持器具。

8.3.13 夹紧装置 clamp

在镀膜设备中用或不用基片支架支承一个基片或几个基片的装置,例如夹盘,夹鼓,球形夹罩,夹篮等。夹紧装置可以是固定的或活动的(旋转架,行星齿轮系等)。

8.3.14 换向装置 reversing device

在真空镀膜设备中,不打开设备能将基片、试验玻璃或掩膜放到理想位置上的装置(基片换向器,试验玻璃换向器,掩膜换向器)。

8.3.15 基片加热装置 substrate heating device

在真空镀膜设备中,通过加热能使一个基片或几个基片达到理想温度的装置。

8.3.16 基片冷却装置 substrate cooling device

在真空镀膜设备中,通过冷却能使一个基片或几个基片达到理想温度的装置。

8.4 真空镀膜设备

8.4.1 真空镀膜设备 vacuum coating plant

在真空状态下制取膜层的设备。

8.4.1.1 真空蒸发镀膜设备 vacuum evaporation coating plant

借助于蒸发进行真空镀膜的装置。

8.4.1.2 真空溅射镀膜设备 vacuum sputtering coating plant

借助于真空溅射进行真空镀膜的装置。

8.4.2 连续镀膜设备 continuous coating plant

被镀物件(单件或带材)连续地从大气压经过压力梯段进入到一个或数个镀膜室,再经过相应的压力梯段,继续离开设备的连续式镀膜设备。

8.4.3 半连续镀膜设备 semi-continuous coating plant

被镀物件通过闸门送进镀膜室并从镀膜室取出的真空镀膜设备。

9 真空干燥和冷冻干燥

9.1 一般术语

9.1.1 真空干燥 vacuum drying

真空干燥是在真空下的一种热干燥过程。在真空条件下,物料湿气的沸点降低、汽化过程加速,因此就特别适合于对温度敏感而且易分解的物料。真空干燥主要在低真空区域内进行。

9.1.2 冷冻干燥 freeze drying

湿气在一次干燥过程中大体上通过升华,在二次干燥过程中,通过解吸得到去除的一种真空干燥。冷冻干燥是在低、中真空区域内进行的。

9.1.3 物料 material

在真空干燥和冷冻干燥之前以及干燥过程中和干燥后的物质。物料可以是固体或液体(例如油、汁液)。

9.1.4 待干燥物料 material to be dried

为进行干燥工艺准备的物料。

9.1.5 干燥物料 dried material

真空干燥和冷冻干燥之后的物料。

- 9.1.6 湿气** moisture; humidity
以自由溶剂和(或)化合溶剂存在的这部分物料。物料中的湿气用含湿量或湿度表示。
- 9.1.7 自由湿气** free moisture
用升华热和蒸发热足以去除的湿气。
- 9.1.8 结合湿气** bound moisture
除了升华热和蒸发热之外另外还要消耗能量才能去除的湿气(例如结晶水、结构水、吸附湿气、毛细水)。
- 9.1.9 分湿气** partial moisture
组成物质的总的湿气的组分。
- 9.1.10 含湿量** moisture content
湿气量与物料量的百分比。例如含湿量也可以说成是含水量,乙醇含量。在说明含湿量时应给出测定方法。含湿量和干燥物料含量之和为 1。
- 9.1.11 初始含湿量** initial moisture content
待干燥物料的含湿量。
- 9.1.12 最终含湿量** final residual moisture
从干燥器出来时干燥物的含湿量。
- 9.1.13 湿度** degree of moisture, degree of humidity
物料的含湿量与干燥物含量的百分比。在说明湿度时,必须给出测定方法。
- 9.1.14 干燥物质** dry matter
物料量与其所含湿气量之差。
- 9.1.15 干燥物质含量** content of dry matter
干燥物质的质量除以物料质量。在说明干燥物料含量时,应给出测定方法。干燥物料含量和含湿量之和为 1。
- 9.2 干燥工艺**
- 9.2.1 干燥阶段** stages of drying
系预干燥、一次干燥和二次干燥的干燥工艺的每个阶段。各个阶段的应用和所达到的干燥度,取决于其干燥工艺。
- 9.2.1.1 预干燥** preliminary drying
主要去除自由湿气的第一阶段干燥。在此阶段中,也可以应用有别于真空干燥工艺的其它方法。在此干燥阶段的干燥速度是不变的。
- 9.2.1.2 一次干燥(广义)** primary drying(in general)
一次干燥同样也是主要去除自由湿气的干燥阶段。一次干燥(本标准的意义)只能在真空中进行。此干燥阶段中的干燥速度几乎是不变的。
- 9.2.1.3 一次干燥(冷冻干燥)** primary drying(freeze-drying)
从冷冻干燥开始一直到完全去除在固体聚合态中所含湿气的干燥阶段。除了升华之外,液相的蒸发还与湿气的种类有关。
- 9.2.2 二次干燥** secondary drying
紧接着一次干燥之后去除结合湿气获得理想的最终含湿量的真空干燥和冷冻干燥阶段。在此干燥阶段中的干燥速度,随着含湿量的变小而降低。
- 9.2.2.1 接触干燥** contact drying

主要通过加热表面接触供给热量的干燥。

9.2.2.2 辐射干燥 drying by radiation

主要通过辐射供给热量的干燥(例如红外干燥)。

9.2.2.3 微波干燥 microwave drying

主要在交变电场中对物料湿气进行直接加热的干燥。

9.2.2.4 气相干燥 vapour phase drying

将待干燥物料送入真空干燥机,抽空之后通入合适的蒸气(例如有机物蒸气、煤油),使之冷凝于物料上并通过其释放的冷凝热使物料加热的干燥。

9.2.2.5 静态干燥 static drying

物料放在格层中、辊道或皮带等上面,其接触面不改变的干燥。

9.2.2.6 动态干燥 dynamic drying

物料不断运行或周期性运动的干燥。在干燥过程中使用机械装置(例如叶片式干燥机)或活动式接触面(例如震动式干燥机,筒式干燥机)对物料进行搅拌,这样使整个干燥时间缩短。

9.2.3 干燥时间 drying time

将物料由一定的初始含湿量干燥到规定的最终含湿量所需要的时间。

9.2.4 停留时间 length of stay(in the drying chamber)

停留时间就是物料在真空干燥机或冷冻干燥机中的时间。

9.2.5 循环时间 cycle time

物料在连续式工作的真空干燥机或冷冻干燥机中的停留时间。

9.2.6 干燥率 dessication ratio

在规定的干燥时间内,含湿量与初始含湿量的百分比。

9.2.7 去湿速率 mass flow rate of humidity

在某一时间间隔内,由物料中所去除的湿气量除以该时间。

9.2.8 单位面积去湿速率 mass flow rate of humidity per surface area

去湿速率除以干燥器与待干燥物料接触的面积。

9.2.9 干燥速度 drying speed

在给定时间间隔内,干燥物料厚度的变化除以该时间间隔。

9.2.10 干燥过程 drying process

表示面积相关去湿速率的函数,它取决于:

a. 物料的湿度;

b. 干燥开始以来的时间间隔。

同时必须给出基本量值。

9.2.11 加热温度 heating temperature

供热器(例如热辐射器,装载面)的温度。

9.2.12 干燥温度 temperature of the material being dried

在干燥过程中,物料在规定位置上测得的物料温度。应给出测量方法和测量位置。

注:应注意干燥物料的上限温度。

9.2.13 干燥损失 loss of material during the drying process

物料在干燥或冷冻过程中受损失的部分(例如由飞尘、磨损、沉积引起)。

9.2.14 飞尘 lift off(particles)

在干燥或冷冻干燥过程中,从物料脱落和去除的小颗粒物料。

9.2.15 堆层厚度 thickness of the material

物料在干燥过程中的厚度或颗粒物料在冷冻干燥中堆料的高度。

9.3 冷冻干燥

9.3.1 冷冻 freezing

在散热情况下,原料向适合于冷冻干燥状态的转化。散热方式可以是接触,辐射和(或)蒸发。

9.3.1.1 静态冷冻 static freezing

待冷冻的物料在冷冻过程中不运动的冷冻。

9.3.1.2 动态冷冻 dynamic freezing

待冷冻的物料在冷冻过程中处于运动状态的冷冻。

9.3.1.3 离心冷冻 centrifugal freezing

对运动物料的一种冷冻方式。冷冻时,原料在旋转的容器内冷冻(例如滚动冷冻,旋转冷冻)。

9.3.1.4 滚动冷冻 shell freezing

原料缓慢地绕容器的水平轴或倾斜轴转,由容器壁向物料进行冷冻的一种冷冻方式。

9.3.1.5 旋转冷冻 spin-freezing

原料快速地绕容器轴旋转,由容器壁开始冷冻的一种冷冻方式。

9.3.1.6 真空旋转冷冻 vacuum spin-freezing

原料快速地绕容器轴旋转,在真空中通过溶剂蒸发进行冷冻的一种冷冻方式。

9.3.1.7 喷雾冷冻 spray freezing

对运动物料的一种冷冻方式。冷冻时,原料被冷冻成粒状(喷射冷冻,滴状冷冻)。

9.3.1.8 气流冷冻 air blast freezing

对运动物料的一种冷冻方式。冷冻时,通过自下而上穿过物料层通入冷却气体(例如空气)形成强制对流,使颗粒状物料保持悬浮状态进行冷冻。

9.3.2 冷冻速率 rate of freezing

在给定时间间隔内,已冷冻的物料的厚度变化除以该时间间隔。

9.3.3 冷冻物料 frozen material

经受冷冻的原料。

9.3.4 冰核 ice core

主要被干燥物料外壳包围在固体聚合态中的湿气。

9.3.5 干燥物料外壳 envelope of dried matter

在冷冻干燥过程中,包围冰核甚至还包含结合湿气的已干燥的物料。

9.3.6 升华表面 sublimation front

处于固体聚合态中自由湿气发生升华的表面,它既是冰核的表面,在先进的干燥工艺中又是冰核和干燥物料外壳间的界面。

9.3.7 融化位置 freezer burn

在冷冻干燥过程中,冷冻物料冷冻后接着被融化的位置。通过其组织可找出干燥物料

缺陷。

9.4 真空干燥设备:真空冷冻干燥设备

9.4.1 真空干燥设备和真空冷冻干燥设备 vacuum drying plant and vacuum freeze drying plant

用来进行真空干燥和真空冷冻干燥的一种真空设备。

9.4.2 真空干燥器和冷冻干燥器 vacuum drying chamber and freeze drying chamber

一种真空容器,它至少配备有一个真空密封的可开闭的装料、卸料口及去除蒸汽状湿气、容纳物料并在必要时可使物料运动和将热量供给物料的装置。

9.4.3 加热表面 heating surface

能用来将热量传导给待干燥物料的热源部分。

9.4.4 物品装载面 shelf

在真空干燥器或冷冻干燥器中,用来接受物料或装载物料的装置。如果是接触式干燥,它同加热表面可以完全相同。

9.4.5 干燥器的处理能力 throughput(of the vacuum drying chamber)

干燥的物料量除以干燥时间。它可以说明:

- a. 原料处理能力;
- b. 冷冻物料处理能力;
- c. 干燥物料处理能力。

9.4.6 单位面积干燥器处理能力 throughput per shelf area

干燥器处理能力除以用于待干燥物料的物料装载面面积。

9.4.7 冰冷凝器 ice condenser

冷却表面上的蒸汽主要是以固体聚合态形式冷凝的冷凝器。

9.4.8 冰冷凝器的负载 load of the ice condenser

在规定时间内,主要以固体聚合态形式冷凝在冰冷凝器冷凝表面的蒸汽质量。

9.4.9 冰冷凝器的额定负载 rated load of the ice condenser

冰冷凝器能经济地运转的最高负载。

10 表面分析技术

10.1 一般术语

10.1.1 试样 sample

对其表面按工艺进行全部或部分研究的固体或液体。

注:如果内边界层也要进行研究,那么需由适宜的制作方法制成显露的表面。

10.1.1.1 表面层 surface layer

试样相对于气体、液体或固体的边界层。它包括可能存在的被吸附物或试样蒸气层原子的总体,其与介质交界的间距不应超过在特定情况下给出的值,在数量级上小于原子间距。表面层的厚度始终受观察的交界影响,它和处理方法有关,在某些情况下应给出表面层的厚度。

10.1.1.2 真实表面 true surface

冷凝物质与相邻介质之间的微观界面。

10.1.1.3 有效表面积 effective surface area

进行研究时所规定的真实表面积。

- 10.1.1.4 宏观表面;几何表面 macroscopic surface area;geometric surface area
真实表面的包封面,一般来说它是一个平面。
- 10.1.1.5 表面粒子密度 surface particle density
一定种类的表面粒子数与有效表面面积之商。
- 10.1.1.6 单分子层 monolayer
以一个原子或分子的厚度“完全地”覆盖真实表面的一定种类的粒子总体。
- 10.1.1.7 表面单分子层粒子密度 monolayer density
一定种类粒子的单分子层的表面粒子密度(表面单分子层粒子密度也经常称作为单分子层的覆盖)。
- 10.1.1.8 覆盖系数 coverage ratio
相同种类的粒子表面的粒子密度除以单分子层的表面分子密度。
- 10.1.2 激发 excitation
引起光子和粒子(例如原子、分子、离子、电子)发射(包括反射)的物理相互作用。
- 10.1.2.1 一次粒子 primary particles
用作激发的光子或粒子(例如原子、分子、离子、电子)。
注:“粒子”在特殊场合可用“离子”,“电子”等代替。
- 10.1.2.2 一次粒子通量 primary particle flux
在给定时间间隔内出现在表面上的一次粒子数与该时间间隔之商。
- 10.1.2.3 一次粒子通量密度 density of primary particle flux
气体空间中通过给定面积一次粒子的通量与该面积之商。
- 10.1.2.4 一次粒子负荷 primary particle load
一次粒子通量与激发面之商。必须给出一次粒子的能量。
- 10.1.2.5 一次粒子积分负荷 integral load of primary particle
一次粒子负荷在持续轰击时间上的积分。必须给出一次粒子的能量。
- 10.1.2.6 一次粒子入射能量 energy of the incident primary particles
一次粒子进入到表面层作用区域之前的动能。
- 10.1.2.7 激发体积 excited volume
发生激发的试样的体积。
- 10.1.2.8 激发面积 excited area
同时限制激发体积的宏观试样表面。
- 10.1.2.9 激发深度 excited depth
垂直于激发面积的激发体积的伸展深度。
- 10.1.2.10 二次粒子 secondary particles
由于激发引起表面发射或反射的光子或粒子(例如原子、分子、离子或电子)。
- 10.1.2.11 二次粒子通量 secondary particle flux
在给定时间间隔内,观察到的发射的二次粒子数与该时间间隔之商。
- 10.1.2.12 二次粒子发射能 energy of the emitted secondary particles
二次粒子从表面层作用范围发射之后的动能。
- 10.1.2.13 发射体积 emitting volume

产生发射的这部分激发体积。

10.1.2.14 发射面积 emitting area

同时限制发射体积的宏观试样表面。

10.1.2.15 发射深度 emitting depth

垂直于发射面积的发射体积的伸展深度。

10.1.2.16 信息深度 information depth

用作分析粒子的发射深度。信息深度至多只能与发射深度一样深。

10.1.2.17 平均信息深度 mean information depth

产生 $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$ 的 86% 粒子的信息深度。

10.1.3 入射角 angle of incidence

入射粒子平均方向在其入射位置与宏观表面的法线之间的夹角。

10.1.4 发射角 angle of emission

被观察的二次粒子发射方向在其发射位置上与宏观表面的法线之间的夹角。

10.1.5 观测角 angle of observation

表面法线方向的分析器轴与一次粒子平均方向的夹角。它表示偏振角和方位角。

10.1.6 分析表面积 analyzed surface area

用来作分析的发射面积。

10.1.7 产额 yield

与激发的方法有关的二次粒子数与一次粒子数之商。在说明产额时,必须列举出关联的参数(例如:一次粒子的能量和入射角,材料和表面状态)。

10.1.8 表面层微小损伤分析 minimum damage surface analysis

为达到研究的目标仅使表面层稍微发生变化的分析。

10.1.9 表面层无损伤分析 non-destructive surface analysis

表面层显示不出变化的分析。

10.1.10 断面深度分析 profile analysis in depth; depth profile analysis

对垂直于试样表面浓度分布的测定分析。有磨去表面层并产生新表面层和(或)对被磨去材料进行分析的断面深度分析法及不磨去表面层进行分析的方法(例如反射离散测量)。

10.1.11 可观测面积 observable area

由指示仪显示的试样宏观表面发射部分。

10.1.12 可观测立体角 observable solid angle

由试样一个点上发射的粒子可由分析器显示的立体角。

10.1.13 接受立体角;观测立体角 angle of acceptance

由分析器所显示的二次发射立体角。

10.1.14 角分辨能力 angular resolving power

接受立体角与 2π 之商。

10.1.15 发光度 luminosity

可观测面积与可观测立体角之积与固有发射之商。

10.1.16 二次粒子探测比 detection ratio for secondary particles

所记录下来的一定种类的二次粒子数与所发射的同一类型二次粒子数之商。

- 10.1.17** 表面层分析仪的探测极限 detection limit of an apparatus for surface analysis
在激发体积中化学元素的最小可指示浓度。在说明指示极限时应给出激发条件和所研究物质的种类。
- 10.1.18** 表面层分析仪灵敏度 sensitivity of an apparatus for surface analysis
所测得的一定种类的二次粒子数与一次粒子数之商。该灵敏度为二次粒子激发系数与探测比之积。在说明灵敏度时应给出参数(例如被研究物质的种类和状态,一次粒子的能量)。
- 10.1.19** 表面层分析仪质量分辨能力 mass resolving power of an apparatus for surface analysis
 $M/\Delta M$ 之商。在给出质量分辨能力时,应说明 M 是在何种物质上测得的, ΔM 是如何确定的。对用作检验的已给出分辨能力的标准试样,往往需要给予命名。
- 10.1.20** 表面层分析仪能量分辨能力 energy resolving power of an apparatus for surface analysis
 $E/\Delta E$ 之商。在给出能量分辨能力时,应说明 E 是在何种物质上测得的, ΔE 是如何确定的。对用作检验的已经给出分辨能力的标准试样,往往需要加以命名。能量分辨能力是通过测量行幅而确定的。
- 10.1.21** 本底压力 base pressure
在连续的激发和分析系统中并没装试样情况下,试样所在位置的最低压力。如果本底压力取决于激发和分析系统的工作,那么就应给出参数。
- 10.1.22** 工作压力 working pressure
测量试样时,在试样位置上的压力。
- 10.2 分析方法**
- 10.2.1** 二次离子质谱术;SIMS secondary ion mass spectroscopy;SIMS
用离子(一次离子)轰击表面,使其表面层发射出正离子和(或)负离子(二次离子)来进行质谱分析的一种表面分析法。
- 10.2.1.1** 静态二次离子质谱术;静态 SIMS static secondary ion mass spectroscopy;static SIMS
满足微小破坏分析条件的一种二次离子质谱测定。
- 10.2.1.2** 动态二次离子质谱术;动态 SIMS dynamic secondary ion mass spectroscopy;dynamic SIMS
能识别表面出现变化的一种二次离子质谱测定,同时应给出激发参数。
- 10.2.2** 二次离子质谱仪;SIMS 仪 secondary ion mass spectrometer;SIMS apparatus
真空仪器的一部分,它至少包括一个一次离子源,一个离子分析器(例如磁场或高频四极磁场)和一个离子检测器。
- 10.2.3** 离子散射表面分析 ion scattering spectroscopy
一种散射的一次离子能达到层的成分的表面的化学分析法。
- 10.2.4** 低能离子散射的表面分析;离子散射谱测定 ISS low energy ion scattering spectroscopy;ISS
一次离子的能量约小于 5keV 的表面散射化学分析法。

- 10.2.5** 卢瑟福后向散射的表面分析;RBS;卢瑟福离子后向散射的表面分析;RIBS Rutherford backscattering spectroscopy;RBS;Rutherford ion backscattering spectroscopy;RIBS 离子散射的一种表面分析。在这种分析中一次离子的能量约大于 100keV。
- 10.2.6** 离子散射谱仪 ion scattering spectrometer
真空仪器的一部分,它至少包括一个离子源,一个能量分析器和一个离子检波器。按照一次离子的不同能量,这样的光谱仪也叫 ISS 仪或 RBS 和 RISB 仪。
- 10.2.7** 俄歇效应 Auger process
原子或原子键中的电子,从较高能量的状态跃迁到较低能量的状态,由此释放的能量转递给另一个电子(俄歇电子)的一种弛豫过程。
- 10.2.8** 俄歇电子谱术;AES Auger electron spectroscopy;AES
根据发射的俄歇电子能来分析表面层的成分的一种化学分析法。采用这种方法,俄歇电子是由电子轰击激发的。
注:专有名称“俄歇电子谱术”只应用在本节中所阐述的方法。也有采用其它手段作为电子轰击的激发,采用别的方法固然也能激发出俄歇电子,对于这些方法只能用精确地激发机理加以说明。
- 10.2.9** 俄歇电子能谱仪;AES 仪 Auger electron spectrometer;AES apparatus
真空仪器的一部分,它至少包括电子源,一个能量分析器和一个电子检测器。
- 10.2.10** 光电子谱术 photoelectron spectroscopy
用来测量由电磁辐射所释放出来的光电子和俄歇电子的一种表面层分析法。
- 10.2.10.1** 紫外光电子谱术;UPS ultraviolet photoelectron spectroscopy;UPS
通过单色紫外辐射产生激发的一种光电子谱术。
- 10.2.10.2** X 射线光电子谱术;XPS X-ray photoelectron spectroscopy;XPS
由 X-射线辐射激发产生的光电子谱术。
- 10.2.11** 光电子谱仪 photoelectron spectrometer
真空仪器的一部分,它至少包含有一个光子源,一个能量分析器和一个电子检测器。
- 10.2.12** 低能电子衍射;LEED low energy electron diffraction;LEED
对给定能量的电子被表面(一般为凝聚且有弹性)后向散射的一种表面结构分析法。由通过表面层的晶体组织衍射电子的方向和电子束密度来分析表面结构。
- 10.2.13** 低能电子衍射仪;LEED 仪 apparatus for low energy electron diffraction;LEED-apparatus
真空仪器的一部分,至少包括有一个电子源和显示弹性散射电子的装置。在一次电子入射能量介于 20eV~300eV 时,显示装置必须适用于大立体角范围(几乎为 2π)的分析。
- 10.2.14** 电子能损失谱术 electron energy loss spectroscopy(ELS,EELS)
用于研究表面本身及其吸附物的电子结构和(或)几何结构的一种方法。采用此方法,电子以已知的脉冲受到表面的散射,于是从被散射电子的脉冲分布中,获得有关吸附物-基底-系统的结合性质和排列的情况。
- 10.2.15** 电子能损失光谱仪;ELS 仪 electron energy loss spectrometer;ELS apparatus
真空仪器的一部分,它至少包括一个带有规定脉冲电子的电子源,一个脉冲分析器和一个电子检测器。在源电流为约 1nA 时半宽值 ΔE 总约为 10meV,角半宽值约 1.5° 的仪表可以说得上是高分辨的 EL 光谱仪。只有用高分辨能力光谱仪才能研

究震动状态。

11 真空冶金

11.1 真空冶金

11.1.1 真空冶金 vacuum metallurgy

在真空下制造、处理和继续加工聚合状态金属的理论、经验和方法的总和。

11.1.2 真空精炼 vacuum refining

熔融金属或固体物料在真空下,以气相状态分离出不希望有的成分的一种处理法。

11.1.2.1 金属真空除气 metal vacuum degassing

将正常状态下气体的组分抽除的一种真空精炼。

11.1.2.2 金属真空蒸馏 metal vacuum distillation

制造和回收以有色金属为主的金属或合金的一种真空精炼。蒸馏时易挥发的成分在真空下被蒸发并凝结到冷凝器上。

11.1.2.3 化学反应真空精炼 chemical reaction vacuum refining

不希望有的成分通过与添加物的化学反应,与要求成分得到分离的一种真空精炼。在化学反应时,添加物同待分离成分一起形成挥发性化合物。

11.1.2.4 真空氧化 vacuum oxidation

通过加入氧化物或气态氧降低碳含量的一种化学反应真空精炼。

11.1.2.5 真空脱碳 vacuum decarbonizing

通过在熔融金属中溶解的氧与其内的碳的反应,来减少碳的一种化学反应真空精炼。

11.1.2.6 真空脱氧 vacuum deoxidation

主要通过碳降低游离氧含量的一种化学反应的真空精炼。

11.1.3 熔融金属真空精炼工艺 vacuum refining process for melting metal

熔融金属在真空下进行精炼的方法。也能同时进行或先后进行一些真空下其它加工过程,如炼制合金、扩散退火、金属渣反应。

11.1.3.1 真空钢包除气 vacuum ladle degassing

把钢水包中的熔融金属经真空处理的一种真空精炼工艺。

11.1.3.2 真空钢包脱气法 vacuum ladle degassing process

液态金属从钢包以液滴状态注入到真空室进行除气的一种真空精炼工艺(也称为BV法)。

11.1.3.3 真空虹吸脱气法 vacuum siphon degassing process

真空精炼熔融金属(主要是在炼钢时)的一种方法。采用这种方法,贮钢桶,例如浇注包中的熔融金属通过一根浸在其中的类似于气压计的管子吸升到真空室内。由于真空室中熔融金属液面上、下发生周期变化,于是引起贮钢桶和真空室之间熔融金属的交流。因此,在每次吸升时,新注入到真空室中的这部分熔融金属就进行除气(这种方法也称DH法)。

11.1.3.4 真空循环脱气法 vacuum cycle degassing process

真空精炼熔融金属的一种方法。采用这种方法时,在钢包上部有一真空室,它有两根管子浸入到钢包之中,当一浸管中有惰性气流动时,包内的熔融金属就流向真空

室,于是便使金属产生循环作用(也称 RH 法)。

11.2 真空熔炼和真空浇注

11.2.1 电子束熔炼 electron beam melting

通过电子轰击将能量供给炉料进行熔化的一种真空熔炼法。

11.2.2 真空感应熔炼 vacuum induction melting

通过感应将能量供给炉料进行熔化的一种真空熔炼法。

11.2.3 真空电弧熔炼 vacuum arc melting

通过电弧将能量供给炉料进行熔化的一种真空熔炼法。

11.2.4 真空等离子体熔炼 vacuum plasma melting

由等离子体将能量供给炉料进行熔化的一种真空熔炼法。

11.2.5 真空电阻熔炼 vacuum resistance melting

利用炉料本身电阻或特殊加热电阻将热能供给炉料进行熔化的一种真空熔炼法。

11.2.6 真空坩埚熔炼 vacuum crucible melting

炉料完全在坩埚中熔化,并通过其倾斜(倾翻式坩埚)或底孔(底部设有放液口的坩埚)浇注到铸型或锭模中的一种真空熔炼法。

11.2.7 真空凝壳熔炼 vacuum skull melting

使冷却的坩埚内表面和熔融金属之间形成一层熔炼物料的凝结外壳,接着将壳层中的熔融金属浇注到铸型或锭模中的一种真空坩埚熔炼法。

11.2.8 底部真空浇注 bottom vacuum pouring

真空中的一种底部放液法。它用来炼制特别精密的材料(例如用于核技术)。

11.2.9 真空精密浇注 vacuum precision casting

在真空下将液态金属压入到截面小形状复杂的空腔中的一种真空精密铸造(首饰制造)。

11.2.10 真空压铸 vacuum die casting

一种压铸法。压铸时将上部封闭带有开孔的铸型被抽空并浸入到处于真空下的熔融金属中,接着将气体放入到熔炼室中,以作用于熔融金属表面的气体压力将熔融材料压入到铸型中。

11.2.11 真空锭模熔炼 vacuum ingot melting

在加热的锭模内使炉料熔化,从而铸出铸锭的一种真空熔炼。

11.2.12 真空悬浮熔炼 vacuum floating melting

使炉料悬浮(例如通过在炉料中产生的高频涡流)并使之熔化的一种真空熔炼。

11.2.13 真空重熔 vacuum remelting

真空熔炼的一种。熔炼时炉料持续地熔化,以液态停留一段时间后,熔融金属获得一个凝固面,因此连续地产生出固态金属体。炉料一般都是预熔材料,经常把它作为熔化电极使用。

11.2.14 真空区域熔炼 vacuum zone melting

棒状材料的熔炼区域按一个方向移动的一种真空熔炼法。这种方法主要用于制取单晶和高纯材料。

11.2.15 真空拉单晶 vacuum pulling crystal

在真空中拉单晶,通常是从过冷熔融金属中以固定的低速拉制出均匀的定向相同的

晶体。

11.3 固体金属材料的真空处理和真空加工

11.3.1 电子束处理和电子束加工 electron beam processing

用真空处理和真空加工的工艺方法。采用这些方法时,所必要的能量由电子束输送,这里,真空是获得电子束的必要条件。由于能把电子束能量迅速精确地调节并集中到工件中的限制区域,因此电子束处理和电子束加工特别适用于高精度要求的工艺中(例如精密焊接)。在某些工艺方法(例如切削和钻孔)中电子束可用来代替一种机械工具。

11.3.2 等离子体热处理 plasma heat treatment

使铁质材料的工作经受气体放电的一种真空热处理。气体放电时,所选择气体的离子打到工件的表面并能渗入到表面层,于是表面层在化学成分上起了变化。

按照所使用气体的种类,这类热处理的例子有等离子渗氮,等离子碳氮共渗,等离子体渗碳。

11.3.3 离子蚀刻 ion etching

用离子轰击除去表面层。由于各种材料溅射速率不同,这样由多种材料组成的表面层上便出现有选择性的损蚀,因此用这种方式便制得要求的外形表面。

11.3.4 真空蒸发 vacuum evaporation

金属材料或金属化合物在真空下蒸发并在真空下制取金属中间产品或最终产品的方法,例如制取粉末、模制体和张臂式薄箔。

11.3.5 真空雾化 vacuum atomization

制取金属粉末的一种方法。它是把感应熔化的熔融金属通过喷嘴喷入真空室,由于其溶解的气体在低压下快速膨胀,使熔融金属雾化,进而制成金属粉末。

11.3.6 真空热处理 vacuum heat treatment

通过把材料或零件在真空状态下按工艺规程加热、冷却来达到预期性能的一种处理方法(如真空退火、回火、淬火等)。

11.3.7 真空钎焊 vacuum brazing

在真空状态下,把一组焊接件加热到填充金属熔点温度以上,但低于基体金属熔点温度,借助于填充金属对基体金属的湿润和流动形成焊缝的一种焊接工艺(钎焊温度因材料不同而异)。

11.3.8 真空烧结 vacuum sintering

在真空状态下,把金属粉末制品加热,使相邻金属粉末晶粒通过粘着和扩散作用而烧结成零件的一种方法。

11.3.9 真空加压烧结 vacuum pressure sintering

把在真空状态下的粉末,通过加热和机械压力同时作用的一种烧结方法。

11.4 真空冶金设备和专用部件

11.4.1 真空冶金设备 vacuum metallurgy plant

由泵、元件、真空室和仪表组成,能在真空下实施一定过程或实验的工艺设备。

11.4.1.1 电子束焊接设备 electron beam welding plant

借助于电子束实施焊接的一种真空冶金设备。实施焊接的工件可以处于高真空、中真空、低真空或特殊场合之中,也可以处于大气之中。

- 11.4.1.2 高真空电子束焊接设备** high vacuum electron beam welding plant
工件处于高真空中的一种电子束焊接设备。这种高真空室在结构上也可以成为一个可放在较大工件上面的真空室。
- 11.4.1.3 中(低)真空电子束焊接设备** medium(low) vacuum electron beam welding plant
工件处于中真空室和低真空室中的电子束焊接设备。由压力梯段维持电子束枪所需要的压差。在焊接技术中,这种设备直到今天还经常被称作为高真空设备。常常将工作室做成凹模状,并有节奏地同电子枪作真空密封连接。
- 11.4.1.4 用于大气压下焊接的电子束焊接设备** electron beam welding plant under atmosphere
工件处于大气压下的一种电子束焊接设备。通过压力梯段将高真空中的电子束与大气隔开。必要时采用保护气体对工件进行保护。
- 11.4.2 真空炉** vacuum furnace
炉室抽空的炉子。真空炉经常按使用目的或能量供给的方式表示,例如:真空熔炼炉、真空电弧炉。
- 11.4.2.1 真空热壁炉** vacuum heat wall furnace
热量通过炉壁传给工件的真空炉。
- 11.4.2.2 负压真空热壁炉** negative pressure vacuum heat wall furnace
带有真空外壳的真空热壁炉。为减少热损失和降低对炉壁的压力,炉中包围真空室的炉壳被抽空。
- 11.4.2.3 真空冷壁炉** vacuum cold wall furnace
热量在真空室之内直接传给工件,在热源和炉壁之间设有隔热装置的一种真空炉。
- 11.4.2.4 真空连续式加热炉** vacuum continuity heating furnace
炉料依次通过前后相连的加热和冷却区域的一种真空炉。加热和抽空是通过闸室系统或压力梯段实现的。
- 11.4.2.5 真空感应炉** vacuum induce furnace
由感应线圈连同坩埚组成的一种装置,它可以带有或不带安装在真空室中的倾翻装置。
- 11.4.3 电子枪** electron gun
至少包含有一个电子源(阴极)的电子光学系统。加速阳极要么处于同一系统中(自加速),要么就是熔炼物料或工件(外加速)。
为了维持高真空,电子源常常通过压力梯段同处理室分开。在某些情况下,用偏转系统阻止离子渗入到电子枪中。
- 11.4.3.1 自加速电子枪** self acceleration electron gun
电子源和加速阳极组成同一系统的一种电子枪。
- 11.4.3.2 电子平面射束枪** electron plane beam gun
线性阴极为伸展式或稍稍有点弧形的自加速电子枪。由线性阴极产生出扇形电子束。
- 11.4.3.3 电子束枪** electron beam gun
电子源附近的电子束扩展相当小的一种自加速电子枪。通过电子光学方法能使管内电子束产生密集的聚焦。

11.4.3.4 外加速电子枪 outer acceleration electron gun

由熔炼物料或工件构成的加速阳极的一种电子枪。

11.4.3.5 电子环射束近距离枪 electron ring beam short range gun

阴极为环形的加速电子枪。熔融物料处于电子束的中央。

11.4.3.6 压力梯段电子枪 pressure gradient electron gun

在电子枪和工作室之间连接有一个或若干个压力梯段的电子枪。

11.4.4 自耗电极(熔化电极) consumable electrode

在真空熔炼时,同熔池一起形成电弧,在此工艺过程中它被熔化。

11.4.5 非自耗电极(非熔化电极) non-consumable electrode

由高熔点电导性材料组成,尽可能保持稳定的一种电极。一般情况熔池就是炉料。

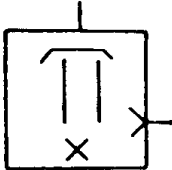
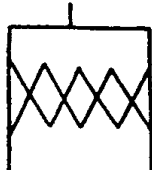
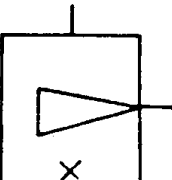
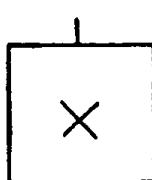
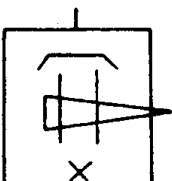

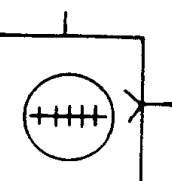
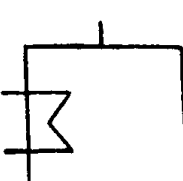
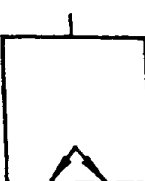
五、真空技术系统图用图形符号(GB/T3164—93)

(一) 真空泵

表 1-5 真空泵图形符号




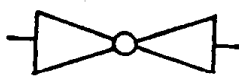
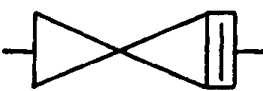
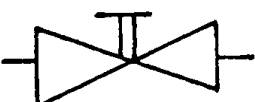
名 称	符 号	名 称	符 号
1. 真空泵(不指明类型)箭头是任意的,当与其它符号不可能相混淆时可以省略		5. 滑阀真空泵 一个大圆圈为单级 二个大圆圈为多级	
2. 容积真空泵(不指明类型)		6. 余摆线真空泵	
3. 气镇泵 可与其它变容真空泵符号合并		7. 往复真空泵	
4. 旋片真空泵或定片真空泵 一个圆圈为单级 二个圆圈为多级		8. 液环真空泵 一个圆圈为单级 二个圆圈为多级 所用泵液写在“×”处 水:H ₂ O;油:CH	
		9. 罗茨真空泵 一个圆圈为单级 二个圆圈为多级 有旁通阀者在“×”处标注“√”	

(续)

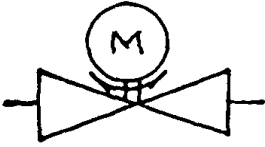
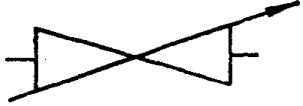
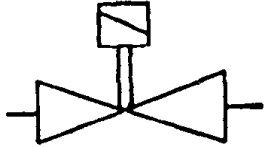
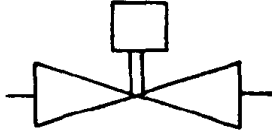
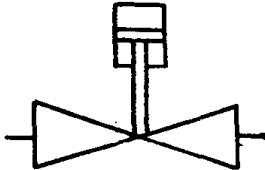


名 称	符 号	名 称	符 号
10. 扩散真空泵 所用泵液写在“×”处。 油:CH;汞:Hg		15. 吸附泵	
11. 蒸气喷射真空泵所用 介质符号写在“×”处。 油:CH;水:H ₂ O;汞:Hg		16. 升华泵 吸附剂化学符号写在 “×”处	
12. 扩散喷射泵 所用泵液写在“×”处。 油:CH;汞:Hg		17. 溅射离子泵	
13. 涡轮分子泵 圆圈内五条垂线表示 泵是多级的,不管级数 多少总是同样五条		18. 低温泵	
14. 捕集真空泵(不指明类 型) 箭头是任意的,当不与 其它符号相混淆时可以 省略			

(二) 真空阀门

表 1-6 真空阀门图形符号

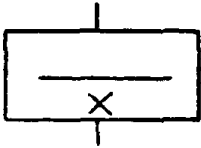
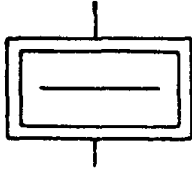

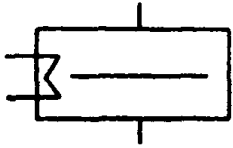

名 称	符 号	名 称	符 号
1. 真空阀门 (不指明类型)		4. 球阀	
2. 插板阀		5. 蝶阀	
3. 挡板阀或翻板阀		6. 手动阀 根据需要可与结构符号 合并	

(续)

名 称	符 号	名 称	符 号
7. 电动阀 根据需要可与结构符号 合并		11. 微调阀	
8. 电磁阀 根据需要可与结构符号 合并		12. 遥控阀	
9. 气动或液动阀 根据需要可与结构符号 合并		13. 隔膜阀	
10. 充气阀			

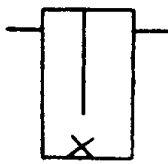
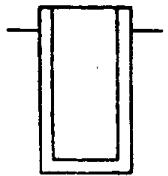
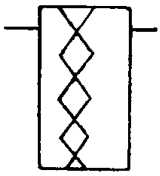
(三)挡板

表 1-7 挡板图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
1. 挡板 (不指明类型) 挡板温度可写在“×”处		4. 注入制冷剂挡板	
2. 空气冷却挡板			
3. 循环制冷剂挡板 制冷剂温度和种类分别写 在左边和右边		5. 珀尔帖(peltier)型挡板	

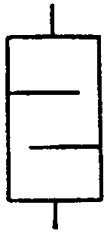
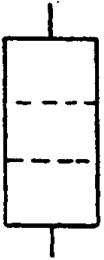
(四) 阱

表 1-8 阱图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号
1. 阱或冷凝器(不指明类型) 阱的温度写在“×”处		2. 贮液式阱		3. 吸附阱	

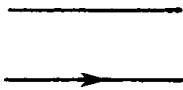




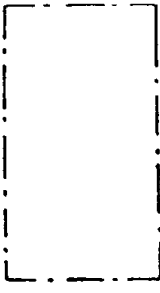

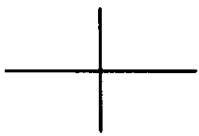
(五) 除尘、过滤器

表 1-9 除尘、过滤器图形符号

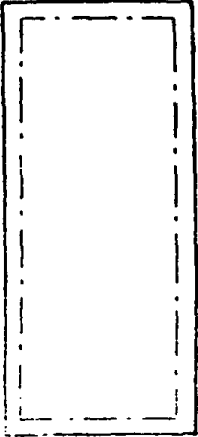
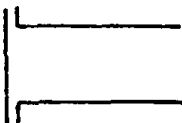
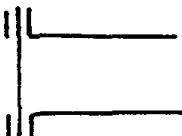
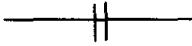

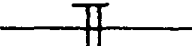
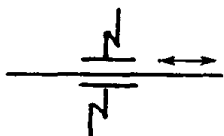
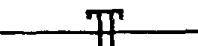
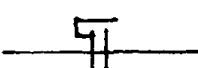
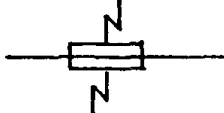
名 称	符 号	名 称	符 号
1. 真空除尘器		2. 真空过滤器	

(六) 真空管路及其连接

表 1-10 真空管路及其连接图形符号

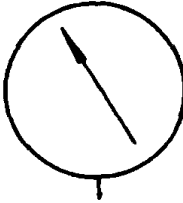
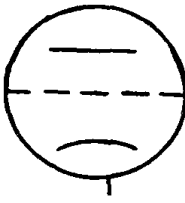
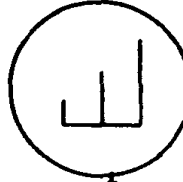
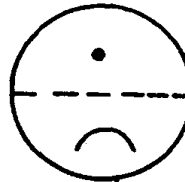
名 称	符 号	名 称	符 号
1. 管路 流动方向可用箭头表示		6. 橡胶管(塑料管)管路	
2. 接头 为实心圆,其直径为管 路线粗的五倍		7. 波纹管管路	
3. 带有接头的管路		8. 一个由若干元件组成的 外壳 这种情况下管路符号可 以省略,直接用组合符号 表示	
4. 十字接头管路			
5. 交叉管路 (不连接)			

(续)

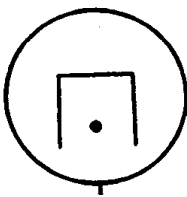
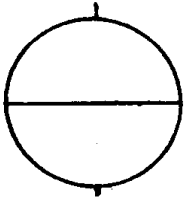
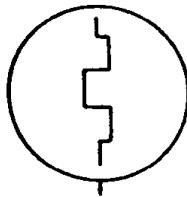
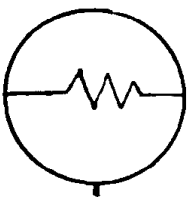
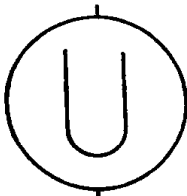
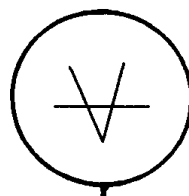
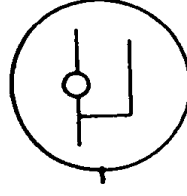
名 称	符 号	名 称	符 号
9. 烘烤装置		14. 盲法兰	
		15. 观察窗	
10. 可拆法兰 (不指明类型)		16. 转动轴	
11. 螺栓法兰		17. 往复轴	
12. 快拆法兰			
13. 钩头螺栓法兰		18. 电极引线密封	

(七)压力测量仪表

表 1-11 压力测量仪表图形符号

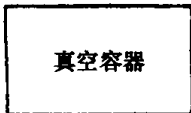
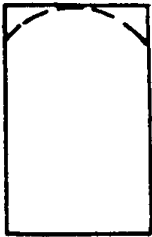
名 称	符 号	名 称	符 号
1. 压力计 (不指明类型)		3. 热阴极电离真空计	
2. 分压真空计		4. 超高真空热阴极电离真空计	

(续)

名 称	符 号	名 称	符 号
5. 冷阴极电离真空计		9. 薄膜真空计	
6. 热传导真空计		10. 电阻真空计	
7. 液位压力计		11. 真空压力控制仪	
8. 压缩式真空计 (麦克劳计)			

(八) 真空容器

表 1-12 真空容器图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
1. 真空容器 (真空室)		2. 钟罩	

(九) 符号应用示例

真空技术图形符号在真空系统上的应用示例,如图 1-2 所示。

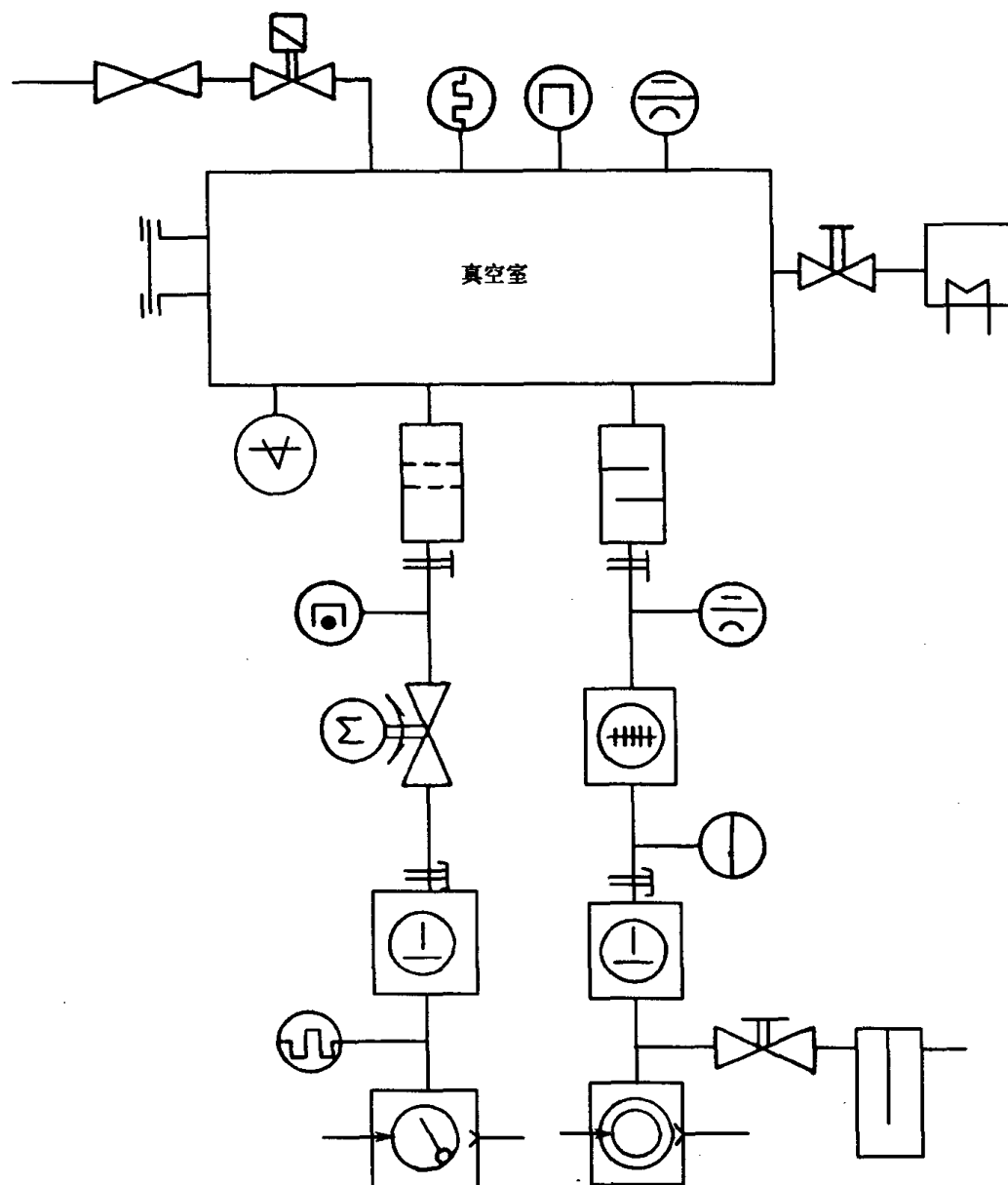


图 1-2 真空技术图形符号应用示例

六、理想气体的基本定律及状态方程

(一) 理想气体

为了建立气体分子运动理论,需要对客观气体分子进行一些假设限定。这些经过限定了的气体称为理想气体。理想气体的定义如下:

① 气体分子的体积与其活动空间相比是微不足道的。在考虑分子的运动时,可以将分子看成质点。

② 分子之间没有相互作用力。除了碰撞之外,每个分子的运动是完全独立的,不受其它分子的影响。

稀薄气体与理想气体很接近,因此在真空技术中完全可以应用理想气体的模型。

(二) 气体分子运动论的基本假设

气体分子运动论的基本假设如下:

① 任何气体均由大量微小的质点所组成。在单一气体中,这些质点是完全相同的。这些质点称为分子。

② 分子作永不停息的杂乱无章的热运动。分子虽然很小,但仍然有一定的体积。因此,它们在运动时不断地相互碰撞,并且与容器壁相碰撞。分子的运动和碰撞服从牛顿定律,可以应用经典力学来处理。

③ 分子的数量是巨大的,而气体的宏观性质是大量分子微观性质的统计平均值,可以用统计学的方法求出。

气体的压力、温度、密度等宏观特性都是大量分子热运动的反映。

(三) 理想气体的基本定律及状态方程

1. 玻义耳—马略特定律

一定质量的气体,如果其温度维持不变,气体的压力和体积的乘积为常数,即

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (1-3)$$

2. 盖·吕萨克定律

一定质量的气体,如果其压力维持不变,气体的体积与其绝对温度成正比,即

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1-4)$$

3. 查理定律

一定质量的气体,如果其体积维持不变,气体的压力与其绝对温度成正比,即

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1-5)$$

4. 阿伏加德罗定律

等体积的任何种类的气体,在同温度、同压力下均有相同的分子数。

在标准状态下,1mol 任何气体的分子数 N_A 为 6.022045×10^{23} 个,这个数目 N_A 称为阿伏加德罗常数。

5. 理想气体状态方程

一定质量的气体,不管其状态如何变化,它的压力和体积的乘积除以绝对温度,所得之商始终不变,即

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-6)$$

对于 1mol 气体,可写出其表达式

$$\frac{pV}{T} = R \quad (1-7)$$

对于质量为 m ,摩尔质量为 M 的气体,即表述为

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1-8)$$

式(1-8)便是理想气体的状态方程。

式中 p ——气体的压力;
 V ——气体的体积;
 m ——气体的质量;
 M ——气体的摩尔质量;
 T ——气体的热力学温度;
 R ——摩尔气体常数, R 的取值与公式中 p 、 V 的单位有关, 见表 1-13。

表 1-13 各种单位下的 R 值及 k 值

名称	符号	数值与单位					
压力	p	Pa	μbar	Torr	Torr	atm	atm
体积	V	m^3	cm^3	cm^3	L	L	cm^3
密度	n	$\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$
摩尔 气体常数	R	8.31441 $\text{J/mol} \cdot \text{K}$	8.31441×10^7 $\text{erg/mol} \cdot \text{K}$ 1.9872 $\text{cal/mol} \cdot \text{K}$	62362 $\text{Torr} \cdot \text{cm}^3 /$ $\text{mol} \cdot \text{K}$	62.362 $\text{Torr} \cdot \text{L} /$ $\text{mol} \cdot \text{K}$	8.2056×10^{-2} $\text{atm} \cdot \text{L} /$ $\text{mol} \cdot \text{K}$	82.056 $\text{atm} \cdot \text{cm}^3 /$ $\text{mol} \cdot \text{K}$
玻耳兹曼 常数	k	1.380662×10^{-23} J/K	1.380662×10^{-16} erg/K	1.03490×10^{-19} $\text{Torr} \cdot \text{cm}^3 / \text{K}$	1.03490×10^{-22} $\text{Torr} \cdot \text{L/K}$	1.36249×10^{-25} $\text{atm} \cdot \text{L/K}$	1.36249×10^{-22} $\text{atm} \cdot \text{cm}^3 / \text{K}$
注: $R = \frac{M}{m_0} k = N_A k$							

在标准状态下, 1mol 任何气体所占有的体积 V_0 是 $2.241383 \times 10^{-2} \text{m}^3$ 。

在标准状态下, 1m^3 中任何气体的分子数 n_0 是 2.6870×10^{25} 个。 n_0 称为洛喜密脱常数。

标准状态: 即压力为 101325Pa (1atm), 热力学温度为 273K (0℃) 的气体状态。

理想气体定律只是在压力不太高, 温度不太低时才精确成立。如果压力太高或温度太低, 就会与实际产生较大的偏离。

6. 道尔顿定律

相互不起化学作用的混合气体的总压力等于各气体分压力之和, 即

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \quad (1-9)$$

分压力是指各个成分单独占有混合气体原有体积时的压力。

(四) 蒸气

气体与蒸气的区别在于其所处温度是在临界温度以上还是以下。临界温度是这样温度: 当一种气态物质处在它的临界温度以上时, 无论怎样压缩都不能使其液化, 而当它处于临界温度以下时, 则可以通过加压使其液化。实用上以室温 (15℃ ~ 25℃) 为准, 凡临界温度高于室温的气态物质称为蒸气, 而低于室温的气态物质便称为气体。因此, 在室温下, 蒸气是随时可以液化的, 而气体是不可能液化的。

一些物质的临界温度如表 1-14。

表 1-14 一些物质的临界温度

物质名称	化学符号	临界温度 /℃	物质名称	化学符号	临界温度 /℃
氦	He	-267.9	空气	(空气中主要含 N_2, O_2)	-140.7
氢	H_2	-239.9	一氧化碳	CO	-139.0
氖	Ne	-228.5	氩	Ar	-122.0
氮	N_2	-147.1	氧	O_2	-118.8

(续)

物质名称	化学符号	临界温度/℃	物质名称	化学符号	临界温度/℃
甲烷	CH ₄	-82.1	氟里昂 22	CHF ₂ Cl	96.0
氪	Kr	-63.0	四氯化碳	CCl ₄	263.0
氙	Xe	-16.6	水蒸气	H ₂ O	374.0
二氧化碳	CO ₂	31.1	汞(水银)	Hg	> 1 550

七、理想气体的压力、质量和密度

(一) 理想气体的压力

理想气体的压力

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_s^2 = \frac{1}{3} \rho v_s^2 \quad [\text{Pa}] \quad (1-10)$$

$$p = nkT \quad [\text{Pa}] \quad (1-11)$$

式中 n ——单位体积内的分子数,即气体的分子数密度[m^{-3}];

m_0 ——气体分子的质量[kg];

ρ ——单位体积中的气体质量,即气体的密度[kg/ m^3];

v_s ——气体分子的均方根速度[m/s];

k ——玻耳兹曼常数, $1.380662 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

各种气体的分子质量 m_0 见表 1-15。

(二) 理想气体的质量

理想气体的质量

$$m = pV \frac{M}{RT} = 1.203 \times 10^{-1} pV \frac{M}{T} \quad (1-12)$$

20℃ 时,摩尔质量为 M [kg/mol],气体量为 $1 \text{Pa} \cdot \text{m}^3$ 的气体质量

$$m_{20^\circ\text{C}} (1 \text{Pa} \cdot \text{m}^3) = 4.103 \times 10^{-4} M \quad (1-13)$$

温度为 T [K] 时气体的质量

$$m_T = m_{20^\circ\text{C}} \times \frac{293.15}{T} \quad [\text{kg}] \quad (1-14)$$

一个分子的质量

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = 1.661 \times 10^{-24} M \quad (1-15)$$

以上式中

m ——气体的质量[kg];

M ——气体的摩尔质量[kg/mol];

p ——气体的压力[Pa];

m_0 ——一个分子的质量[kg];

V ——气体的体积[m^3];

R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——气体的热力学温度[K];

表 1-15 气体的有关数据

气体	摩尔质量 M $/\times 10^{-3}$ · $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	分子直径 σ $/\times 10^{-10}\text{m}$	1个分子 的质量 m_0 $/\times 10^{-26}\text{kg}$	分子热运动的平均速度 $/\times 10^3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			气体的 密度 ρ $/\times 10^{-5}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	平均自由程 λ $/\times 10^{-2}\text{m}$	与器壁碰撞的气体				气态定 压热容 c_p $\text{J} \cdot$ $\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	气态绝 热指数 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	热导率 K $/\text{W} \cdot$ $\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	粘滞系数 η $/\times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$	自由分子 粘滞系数 η_0 $/\times 10^{-4}\text{s} \cdot$ m^{-1}	自由分子 的热导率 Λ $/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ $\cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
				v_s	\bar{v}	v_m			分子个数 Γ_n $/\times 10^{22}\text{m}^{-2}$ $\cdot \text{s}^{-1}$	气体质量 Γ_m $/\times 10^{-3}\text{kg} \cdot$ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	气体体积 Γ_v $/\text{m}^3 \cdot$ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$							
							20℃, 1Pa					15℃						
								20℃	20℃	20℃					20℃	20℃	20℃	
氮	4.003	2.18	0.665	13.51	12.45	11.043	0.164	1.92	7.73	0.51	312.44	5230.62	1.660	0.1430	1.96	5.115	2.023	
氮	20.18	2.60	3.35	6.02	5.55	4.92	0.828	1.35	3.43	1.15	138.62	1037.59	1.64	0.0463	3.10	11.475	0.920	
氩	39.95	3.67	6.63	4.28	3.94	3.49	1.639	0.68	2.43	1.62	98.42	524.02	1.667	0.0163	2.22	16.20	0.631	
氖	83.80	4.16	13.91	2.95	2.72	2.41	3.438	0.53	1.68	2.34	68.11	253.64		0.0089	2.46	23.40		
氦	131.30	4.85	21.80	2.36	2.18	1.93	5.389	0.39	1.34	2.92	54.38	161.98		0.0052	2.26	29.325		
氢	2.016	2.75	0.335	19.06	17.56	15.57	0.083	1.20	10.82	0.36	437.42	14286.79	1.408	0.1745	0.88	3.639	4.159	
氮	28.01	3.75	4.65	5.11	4.71	4.17	1.149	0.65	2.91	1.35	117.87	1038.00	1.405	0.0240	1.75	13.50	1.137	
氧	32.00	3.64	5.31	4.78	4.41	3.91	1.313	0.69	2.72	1.45	109.97	918.72	1.396	0.0244	2.03	14.475	1.068	
空气	28.96	3.72	4.81	5.02	4.63	4.10	1.188	0.66	2.86	1.37	115.79	1008.29	1.4034	0.0242	1.81	13.8	1.121	
一氧化碳	28.01		4.65	5.11	4.71	4.17	1.149		2.91	1.35	117.87	1045.12	1.404	0.0224	1.77	13.50	1.137	
一氧化碳	30.01	2.59	4.98	4.94	4.55	4.03	1.231	1.36	2.81	1.40	113.78	997.40		0.0233		14.025		
水	18.02	4.68	2.99	6.37	5.87	5.20	0.739	0.42	3.63	1.08	146.90	1874.69		0.0242	8.80	10.80	1.715	
二氧化碳	44.01	4.65	7.31	4.08	3.76	3.33	1.806	0.42	2.32	1.70	93.73	835.43	1.302	0.0143	1.47	16.95	1.156	
一氧化二氮	44.01		7.31	4.08	3.76	3.33	1.806		2.32	1.70	93.73	839.61		0.0151		16.95		
甲烷	16.04	4.19	2.66	6.75	6.22	5.51	0.658	0.52	3.83	1.03	154.99	2204.50		0.0302	(1.14)	10.275	1.872	
乙烷	30.07	5.37	4.99	4.39	4.54	4.02	1.234	0.32	2.81	1.40	113.78	1700.15	1.23	0.0183		14.025	1.759	
乙烯	28.06	4.95	4.66	5.11	4.70	4.17	1.151	0.37	2.90	1.36	117.17	1511.38	1.25	0.0169		13.575	1.709	
乙炔	26.04		4.32	5.41	4.98	4.41	1.068		3.02	1.30	122.26	1668.34		0.0184		13.05		
丙烷	44.10	6.32	7.32	4.07	3.75	3.32	1.809	0.23	2.32	1.70	93.73	1831.57		0.0151		16.95		
丁烷	58.12	7.06	9.65	3.55	3.27	2.90	2.385	0.18	2.02	1.93	81.68	1420.14		0.0140		19.50		
苯	78.11	7.65	12.97	3.06	2.82	2.50	3.205	0.16	1.74	2.25	70.55	1204.59		0.0088		22.575		
氨	17.03	4.43	2.83	6.55	6.04	5.35	0.699	0.46	3.74	1.05	151.42	2170.18	1.32	0.0215	(1.03)	10.575	1.762	
氟里昂 11	137.37		22.81	2.31	2.13	1.89	5.636		1.31	3.00	53.06	—		—		30.00		
氟里昂 12	120.91		20.08	2.46	2.27	2.01	4.961		1.40	2.81	56.56	560.86		—		28.125		
水银	200.59	6.26	33.31	1.91	1.76	1.56	8.230	0.23	1.09	3.62	43.94	—	1.667	—		36.225	0.285	

N_A ——阿伏加德罗常数, $6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。

各种气体的摩尔质量 M 见表 1-15。

(三) 理想气体的密度

理想气体的密度

$$\rho = m_0 n = \frac{Mp}{RT} = 1.203 \times 10^{-1} \frac{Mp}{T} \quad (1-16)$$

20℃ 时理想气体的密度

$$\rho_{20^\circ\text{C}} = 4.103 \times 10^{-4} Mp \quad (1-17)$$

20℃ 时空气的密度

$$\rho_{20^\circ\text{C 空气}} = 1.190 \times 10^{-5} p \quad (1-18)$$

以上式中

ρ ——气体的密度 [kg/m^3];

M ——气体的摩尔质量 [kg/mol];

p ——气体的压力 [Pa];

T ——气体的热力学温度 [K];

R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

m_0 ——一个分子的质量 [kg];

n ——气体的分子数密度 [m^{-3}].

各种气体在 20℃, 1Pa 下的密度 ρ 见表 1-15。

八、气体分子热运动速度

(一) 麦克斯韦速度分布定律

在 N 个气体分子中, 分子热运动速度介于 $v \rightarrow v + dv$ 之间的分子数目

$$dN_v = N \cdot F(v)dv =$$

$$4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{1}{kT} \cdot \frac{m_0 v^2}{2}} v^2 dv \quad (1-19)$$

式中, dN_v 表示在 N 个气体分子中, 分子热运动速度介于 $v \rightarrow v + dv$ 之间的分子数目。 $F(v)$ 为速度 v 的连续函数, 称为麦克斯韦速度分布函数。如以 v 为横坐标, $F(v)$ 为纵坐标, 便可以绘出速度分布曲线, 见图 1-3。曲线与横坐标所包围的面积表示分子总数。 $F(v)dv = dN_v/N$ 为速度在 $v \rightarrow v + dv$ 之间的分子相对数目, 或一个分子速度在 $v \rightarrow v + dv$ 之间的概率。 $F(v)$ 为速度 v 附近单位速度间隔中的分子相对数目。

由式(1-19)可知, $F(v)$ 的分布形状与分子质量和绝对温度有关。对于同一气体来说, 温度越高, 则具有较高速度的分子数越多, 分布曲线变得越平坦。而对于温度相同的不同气体, 分子质量越小的气体, 则分子速度较高的分子数目越多。

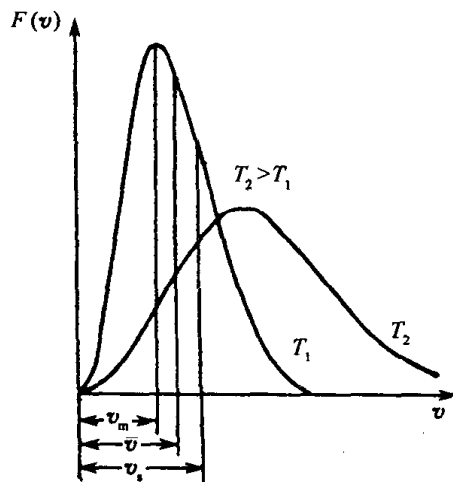


图 1-3 速度分布曲线

(二) 最可几速度 v_m

最可几速度就是在气体分子所具有的各种不同热运动速度中出现机会最多的速度,也就是大多数气体分子所具有的速度。它是对应于速度分布曲线最高点的速度,数学上也就是 $F(v)$ 最大值时所对应的 v 值,即

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 4.078\sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-20)$$

(三) 算术平均速度 \bar{v}

把所有气体分子的速度都加起来,然后被分子总数除就得到算术平均速度 \bar{v} ,即

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \int_0^\infty v dN_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 4.601\sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-21)$$

(四) 均方根速度 v_s

把所有气体分子的速度的平方加起来,然后被分子总数除,再开方就得到均方根速度 v_s ,即

$$v_s = \sqrt{\frac{1}{N} \int_0^\infty v^2 dN_v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 4.994\sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-22)$$

上述式中 v_m ——最可几速度[m/s];
 \bar{v} ——算术平均速度[m/s];
 v_s ——均方根速度[m/s];
 k ——玻耳兹曼常数, 1.381×10^{-23} J/K;
 R ——摩尔气体常数, 8.314 J/(mol · K);
 T ——热力学温度[K];
 m_0 ——一个气体分子的质量[kg];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol]。

由速度分布曲线及速度公式可知:

- ① 在给定温度下,均方根速度最大,算术平均速度次之,最可几速度又次之。
 - ② 某一瞬间具有算术平均速度的分子比具有最可几速度的分子少,而具有均方根速度的分子就更少。
 - ③ 速度与热力学温度的平方根成正比,与气体分子质量的平方根成反比。
- 三种速度之间的关系为

$$v_m : \bar{v} : v_s = 1 : 1.128 : 1.224$$

(五) 气体中的声速

气体中的声速

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$$

$$= \begin{cases} 3.715\sqrt{\frac{T}{M}} [\text{m/s}] & (\text{单原子分子}) \\ 3.412\sqrt{\frac{T}{M}} [\text{m/s}] & (\text{双原子分子}) \end{cases} \quad (1-23)$$

式中 p ——气体压力[Pa];

ρ ——气体密度[kg/m^3];

T ——气体热力学温度[K];

M ——气体摩尔质量[kg/mol];

c ——声速[m/s];

γ ——绝热指数,即比定压热容与比定容热容之比, $\gamma = c_p/c_v$, 对于单原子气体, $\gamma = 1.67$; 对于双原子气体, $\gamma = 1.40$, γ 值见表 1-15。

各种气体分子在 20°C 下的热运动速度 v_m 、 \bar{v} 、 v_s 值见表 1-15。

九、气体分子碰撞次数

(一) 气体分子间的碰撞

(1) 相同气体分子间的碰撞总次数

$$Z_{A-A} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} n^2 \sigma^2 \bar{v} = 10.222 n^2 \sigma^2 \sqrt{\frac{T}{M}} [\text{次}/(\text{m}^3\text{s})] \quad (1-24)$$

(2) 两种不同气体分子间彼此碰撞的总次数

$$Z_{A-B} = \frac{n_A n_B}{2} (\sigma_A + \sigma_B)^2 \sqrt{2\pi kT \left(\frac{1}{m_{0A}} + \frac{1}{m_{0B}} \right)} =$$

$$14.456 n_A n_B \sigma_{A-B} \sqrt{T \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)} [\text{次}/(\text{m}^3\text{s})] \quad (1-25)$$

(3) 多种气体分子间彼此碰撞的总次数

$$Z_n = Z_{1-1} + Z_{2-2} + \cdots + Z_{n-n}$$

$$+ Z_{1-2} + Z_{1-3} + \cdots + Z_{1-n}$$

$$+ Z_{2-3} + Z_{2-4} + \cdots + Z_{2-n}$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$+ Z_{n-n} \quad (1-26)$$

(4) 电子在电场中与气体分子碰撞次数

$$Z_e = \frac{\pi}{4} n \sigma^2 \sqrt{\frac{2e}{m_e}} U \quad (1-27)$$

上述式中

Z ——碰撞次数[次/($\text{m}^3 \cdot \text{s}$)];

n ——气体分子数密度[个/ m^3];

m_0 ——一个分子的质量[kg];

σ ——气体分子的直径[m];

\bar{v} ——气体分子的平均速度[m/s];

k ——玻耳兹曼常数, $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T ——热力学温度[K];

m_e ——电子的质量[kg];

e ——电子的电荷, $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$;

e/m_e ——荷质比, $1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$;

U ——电场电压[V];

σ_{A-B} ——A, B 两种分子的平均直径, $\sigma_{A-B} = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B)$;

Z_{n-m} ——第 n 种气体分子与第 m 种气体分子碰撞的总次数。

(二) 气体分子与容器壁碰撞

1. 余弦定律

如图 1-4 所示, 由与 ds 法线成 θ 角的立体角 $d\omega$ 飞来的气体分子, 碰撞到 ds 面积元上的分子数目与 $\cos\theta$ 成正比, 这就是通常所说的余弦定律, 其表示式为

$$dN_\theta = \frac{n \bar{v}}{4\pi} \cos\theta \cdot d\omega \cdot ds \quad (1-28)$$

式中 $d\omega$ ——角度 θ 与 $\theta + d\theta$ 的两锥面间所包括的立体角。

余弦定律也可以表述为: 碰撞于固体表面的分子, 飞离表面的方向与原来方向无关, 并按与表面法线方向所成角度 θ 的余弦而分布。

第一种表述, 表明了碰撞到 ds 面积元上的分子数目的量的概念, 第二种表述则表明了碰撞到表面后的气体分子的运动方向与原来方向的关系。因此, 余弦定律的完整表述应该是两种表述。

为了解释此定律, 克努森提出“吸附层”假说, 即认为凡是碰撞于表面的分子, 都被表面所暂时吸附, 停留一些时间后重新逸出, 重新逸出后当然与原来方向无关。这一点已被许多试验所证明。

余弦定律揭示了固体表面能够吸附气体分子的内在因素, 具有实际意义。由于碰撞于固体表面的气体分子在固体表面停留一定的时间, 它能够与固体表面进行能量、动量交换, 这就是吸附现象产生的原理。

2. 单位时间内碰撞在容器壁单位面积上的气体分子

(1) 气体分子个数(碰撞频度)

$$\Gamma_n = \frac{1}{4} n \bar{v} = 8.331 \times 10^{22} \frac{p}{\sqrt{MT}} \quad (1-29)$$

对于 20°C , 摩尔质量为 M 的气体

$$\Gamma_n = 4.867 \times 10^{21} \frac{p}{\sqrt{M}} \quad (1-30)$$

对于 20°C 的空气

$$\Gamma_n = 2.863 \times 10^{22} p \quad (1-31)$$

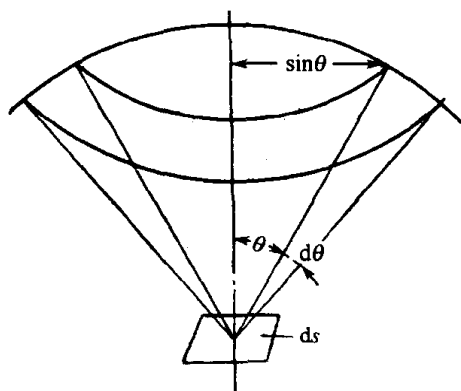


图 1-4 余弦定律示意图

(2) 气体质量

$$\Gamma_m = m_0 \Gamma_n = \frac{1}{4} \rho \bar{v} = 1.660 \times 10^{-24} M \Gamma_n = 1.383 \times 10^{-1} p \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1-32)$$

对于 20℃, 摩尔质量为 M 的气体

$$\Gamma_m = 8.080 \times 10^{-3} p \sqrt{M} \quad (1-33)$$

对于 20℃ 的空气

$$\Gamma_m = 1.376 \times 10^{-3} p \quad (1-34)$$

(3) 气体体积

$$\Gamma_V = \frac{1}{n} \Gamma_n = \frac{1}{4} \bar{v} = 1.150 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-35)$$

对于 20℃, 摩尔质量为 M 的气体

$$\Gamma_V = 19.684 / \sqrt{M} \quad (1-36)$$

对于 20℃ 的空气

$$\Gamma_V = 115.584 [\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})] \approx 11.56 [\text{L} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (1-37)$$

式(1-29) ~ 式(1-37) 中

Γ_n ——单位时间碰撞在器壁单位面积上的气体分子个数[个/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)];

Γ_m ——单位时间碰撞在器壁单位面积上的气体质量[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

Γ_V ——单位时间碰撞在器壁单位面积上的气体体积[$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

n ——气体分子数密度[m^{-3}];

\bar{v} ——气体分子热运动的平均速度[m/s];

M ——气体的摩尔质量[kg/mol];

T ——气体的热力学温度[K];

p ——气体的压力[Pa];

m_0 ——一个分子的质量[kg];

ρ ——气体的密度[kg/m^3].

各种气体在 20℃, 1Pa 时, 单位时间碰撞在容器单位面积上的气体分子个数 Γ_n , 气体质量 Γ_m 及气体体积 Γ_V 值见表 1-15。

(三) 蒸发、凝结与饱和蒸气压

容器中的液体分子跑到空间去的现象称为蒸发。

空间中的蒸气分子返回液体内部去的现象称为凝结。

在一定温度下, 单位时间内蒸发的分子数与蒸气分子凝结而返回液体内的分子数相等时, 蒸发处于饱和状态。此时, 容器内的压力称为饱和蒸气压。饱和蒸气压只决定于物质本身的性质和温度。温度越高, 物质本身分子间的吸附力越小, 就越容易蒸发, 其饱和蒸气压也就越高。在一定的温度下, 物质的饱和蒸气压恒定不变。

根据余弦定律, 真空中单位时间内单位面积上蒸发的分子数为

$$N = \alpha \Gamma_n = \frac{1}{4} \alpha n_s \bar{v} \quad (1-38)$$

蒸发率和饱和蒸气压的关系为

$$p_s = 7.225 \frac{W}{\alpha} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-39)$$

式中 N ——单位时间内单位面积上蒸发的分子数 $[\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$;
 α ——凝聚系数,与温度及凝聚相有关,与压力无关,氮、氢的凝聚系数与温度的关系见图 1-5;
 \bar{v} ——蒸气分子热运动平均速度 $[\text{m/s}]$;
 W ——单位时间单位面积上蒸发的质量 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$;
 n_s ——饱和蒸气压下蒸气的分子数密度 $[\text{m}^{-3}]$;
 p_s ——饱和蒸气压 $[\text{Pa}]$ 。

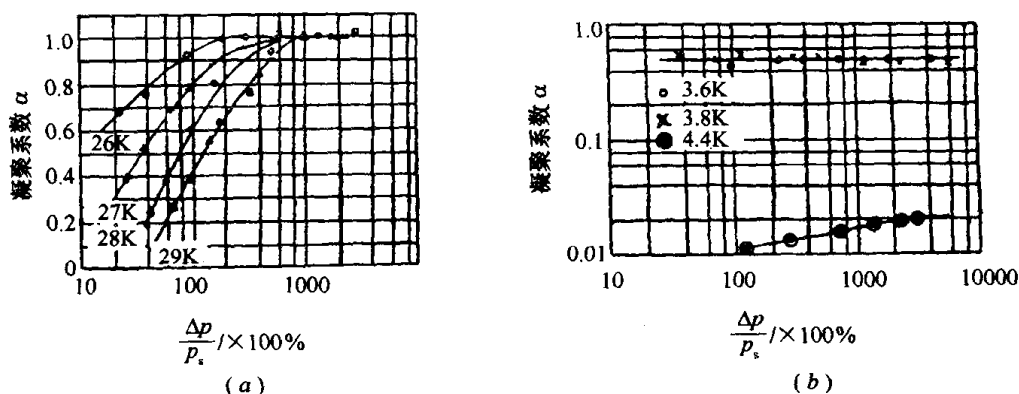


图 1-5 氮和氢的凝聚系数与温度的关系

(a) 氮; (b) 氢。

$\Delta p = p_g - p_s$; p_g —气体压力; p_s —对应于低温面温度的气体的饱和蒸气压。

十、气体分子的平均自由程

一个气体分子与其它气体分子每连续二次碰撞所走过的路程称为自由程。自由程有长有短,它们的差异很大。然而,相当多的自由程的平均值却是一定的,这个平均值便称为平均自由程,以 $\bar{\lambda}$ 表示。

(一) 单一气体分子的平均自由程

单一气体分子的平均自由程为

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n \sigma^2} = 3.107 \times 10^{-24} \frac{T}{p \sigma^2} \quad (1-40)$$

由上式可以看出,平均自由程 $\bar{\lambda}$ 与气体的压力 p 成反比。压力越低,平均自由程越长,且当 T 一定时, $\bar{\lambda}$ 与 p 的乘积为一常数,即

$$\bar{\lambda} p = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi \sigma^2} = \text{常数}$$

对于 20℃ 的任一气体

$$\bar{\lambda} = 9.108 \times 10^{-22} / (p \cdot \sigma^2)$$

对于 20℃ 的空气

$$\bar{\lambda} = 6.667 \times 10^{-3} / p$$

式中 $\bar{\lambda}$ ——平均自由程[m];
 n ——气体分子数密度[m⁻³];
 σ ——气体分子直径[m];
 T ——气体的热力学温度[K];
 k ——玻耳兹曼常数, 1.381×10^{-23} J/K;
 p ——气体的压力[Pa]。

各种气体在 20℃, 1Pa 时的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 值见表 1-15。

(二) 两种气体混合时的平均自由程

A、B 两种气体混合时的平均自由程

$$\left. \begin{aligned} \bar{\lambda}_A &= \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_A \sigma_A^2 + \pi n_B \sigma_{A-B}^2 \sqrt{1 + \frac{m_{0A}}{m_{0B}}}} \\ \bar{\lambda}_B &= \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_B \sigma_B^2 + \pi n_A \sigma_{A-B}^2 \sqrt{1 + \frac{m_{0B}}{m_{0A}}}} \end{aligned} \right\} \quad (1-41)$$

当 A 种气体远远少于 B 种气体, 即 $n_A \ll n_B$ 时

$$\left. \begin{aligned} \bar{\lambda}_A &= \frac{1}{\pi n_B \sigma_{A-B}^2 \sqrt{1 + m_{0A}/m_{0B}}} \\ \bar{\lambda}_B &= \frac{1}{\sqrt{2}\pi n_B \sigma_B^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-42)$$

式中 $\bar{\lambda}_A$ ——A 种气体在混合气体中的平均自由程[m];
 $\bar{\lambda}_B$ ——B 种气体在混合气体中的平均自由程[m];
 σ_A ——A 种气体分子的直径[m];
 σ_B ——B 种气体分子的直径[m];

σ_{A-B} ——A、B 两种气体分子直径的平均值[m], 即 $\sigma_{A-B} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}$;

n_A ——A 种气体的分子数密度[m⁻³];

n_B ——B 种气体的分子数密度[m⁻³];

m_{0A} ——A 种气体分子的质量[kg];

m_{0B} ——B 种气体分子的质量[kg]。

(三) 多种气体混合时的平均自由程

在混合气体中, 质量为 m_{01} 的气体的平均自由程

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{\sum_{x=1}^N \pi n_x \sigma_{1x}^2 \sqrt{1 + \frac{m_{01}}{m_{0x}}}} \quad (1-43)$$

式中 $\bar{\lambda}_1$ ——混合气体中第“1”种气体的平均自由程[m];
 n_x ——第“x”种气体的分子数密度[m⁻³];
 m_{01} ——第“1”种气体分子的质量[kg];

m_{0x} ——第“ x ”种气体分子的质量[kg];

σ_{1x} ——平均直径,即 $\sigma_{1x} = \frac{\sigma_1 + \sigma_x}{2}$ [m];

σ_1 ——第“1”种气体分子的直径[m];

σ_x ——第“ x ”种气体分子的直径[m]。

(四) 在气体中运动的电子的平均自由程

电子在气体中运动的平均自由程

$$\bar{\lambda}_e = \frac{4}{\pi n \sigma^2} = 4\sqrt{2}\bar{\lambda} \approx 5.7\bar{\lambda} \quad (1-44)$$

式中 $\bar{\lambda}_e$ ——电子在气体中运动的平均自由程[m];

$\bar{\lambda}$ ——气体分子的平均自由程[m];

n ——气体的分子数密度[m⁻³];

σ ——气体分子的直径[m]。

(五) 在气体中运动的离子的平均自由程

离子的直径与气体分子的直径相同,但在电场作用下其速度大于气体分子的速度,故可假定气体分子是相对静止的。此时,在气体中运动的离子的平均自由程

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{\pi n \sigma^2} = \sqrt{2}\bar{\lambda} \approx 1.4\bar{\lambda} \quad (1-45)$$

式中 $\bar{\lambda}_i$ ——在气体中运动的离子的平均自由程[m];

$\bar{\lambda}$ ——气体分子的平均自由程[m];

n ——气体的分子数密度[m⁻³];

σ ——气体分子的直径[m]。

(六) 平均自由程与温度的关系

平均自由程与温度的关系如下

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n \sigma^2 \left(1 + \frac{C}{T}\right)} = 3.107 \times 10^{-24} \frac{1}{p \sigma_\infty^2} \cdot \frac{T}{\left(1 + \frac{C}{T}\right)} \quad (1-46)$$

式中 $\bar{\lambda}$ ——平均自由程[m];

n ——气体的分子数密度[m⁻³];

σ ——气体分子的直径[m];

p ——气体的压力[Pa];

σ_∞ ——温度无限高时气体分子的直径[m];

T ——热力学温度[K];

C ——肖节伦德(Sutherland)常数[K],它与气体种类有关;各种气体的 C 值见表 1-16。当温度非常高时, $C/T \ll 1$, C/T 可以忽略。

表 1-16 各种气体的肖节伦德常数 C

气 体	H ₂	N ₂	O ₂	空气	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	H ₂ O	CO	CO ₂	HCl
肖节伦德常数 C/K	76	112	132	113	79	56	169	142	252	942	600	100	273	360

(七) 分子自由程的分布规律

气体分子在一定温度及压力下的自由程是非常不同的,有的大于平均自由程,有的小于平均自由程。利用统计方法,推出其分布规律为

$$n_x = n e^{-\frac{x}{\bar{\lambda}}} \quad (1-47)$$

式中 n_x ——单位体积中总数为 n 的分子中其自由程等于或大于 x 的分子数;

$\bar{\lambda}$ ——平均自由程;

n ——气体的分子数密度。

在单位体积内的 n 个分子中,其自由程等于或大于平均自由程 $\bar{\lambda}$ 的分子数

$$n_{\bar{\lambda}} = \frac{n}{e} = 0.368n \quad (1-48)$$

十一、常压下气体的迁移过程

(一) 平衡态与非平衡态及非平衡态下的输运过程

所谓平衡态,是指大量气体分子的微观运动在宏观(整体)上所表现出来的物理量,如能量(表现为气体温度)、动量(表现为气体向一定方向的流速)、质量(表现为气体密度)不但不随时间而变化,而且在空间均匀分布时的情况。

所谓非平衡态,是指上述宏观物理量如温度、流速、密度等不但随时间而变化,而且在空间分布不均匀的情况。

在没有外界条件影响下,若物理量在空间分布不均匀,那么由于分子热运动的结果,分子将把这个量由浓度较大的地方迁移到较小的地方,最终一定要达到均匀分布。在有外界条件影响下,则有可能达到稳态的不均匀分布,即非平衡态。在非平衡态情况下,气体各部分之间的物理量不等,其相互传送、交换的过程称为输运过程(或迁移现象)。

输运过程有如下几种:

① 粘滞性:由于气体各部分整体运动的速度不等,而存在着各部分之间的相对运动,或气体与器壁之间相对运动,因而产生摩擦效应。此时被输运的物理量是动量。

② 热传导:由于气体各部分温度不同,或者器壁之间、器壁与气体之间温度不同,使热量通过气体分子热运动从高温区传向低温区而产生传热效应。此时被输运的物理量是能量。

③ 扩散:因气体各部分的密度不同,使气体分子从密度大的区域移向密度小的区域。此时被输运的物理量是质量。

④ 热扩散或热流逸:气体各部分温度不同时,还可伴随产生分子从一处迁向另一处的现象。这时,原因虽是温度不同,但被输运的却是质量。

输运过程与真空度关系极大,真空度不同,输运机理有着质的差别。当压力较高时,气体分子之间的碰撞为主,输运主要靠气体分子之间的碰撞进行;当压力较低时,气体分子之间的碰撞可以忽略,气体分子与器壁的碰撞为主,输运现象主要靠分子与器壁之间的碰撞进行。

(二) 迁移方程

若某一物理量 g 在空间分布不均匀,即处于不稳定状态。由于分子热运动,气体分子将把该量由浓度大的地方迁移到浓度小的地方,则单位时间内经过面积 ds 迁移的量可由下式表示

$$\Gamma = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} n \left[\frac{\partial g(z)}{\partial z} \right]_{z=z_0} \cdot ds \quad (1-49)$$

考虑麦克斯韦速度分布时,

$$\Gamma = 0.499 \bar{\lambda} \bar{v} n \left[\frac{\partial g(z)}{\partial z} \right]_{z=z_0} \cdot ds \quad (1-50)$$

(三) 气体的内摩擦(粘滞性)

内摩擦现象就是:由于气体中各层之间在同一方向上速度不相等,使运动快的气体速度减慢,运动慢的气体速度加快,这样,各层之间就产生了摩擦力,这种现象便称为内摩擦现象,又称为粘滞现象。此时各层之间所迁移的量是动量 $m_0 v$,根据迁移方程可列出内摩擦方程为

$$\left. \begin{aligned} dL &= \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} n \frac{\partial(m_0 v)}{\partial z} ds = \\ &\frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} \rho \frac{\partial v}{\partial z} ds = \eta \frac{\partial v}{\partial z} ds \\ \eta &= \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} \rho \end{aligned} \right\} \quad (1-51)$$

考虑到麦克斯韦速度分布,方程式变为

$$\left. \begin{aligned} dL &= 0.499 \bar{\lambda} \bar{v} \rho \frac{\partial v}{\partial z} ds \\ \eta &= 0.499 \bar{\rho} \bar{\lambda} \bar{v} = \\ &8.57 \times 10^{-25} \sqrt{MT/\sigma^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-52)$$

如果考虑分子间引力的影响,即考虑温度的影响,有

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 0.499 \bar{\rho} \bar{\lambda} \bar{v} \left(\frac{1}{1 + C/T} \right) = \\ &8.57 \times 10^{-25} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2} \left(\frac{1}{1 + C/T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-53)$$

式中 L ——内摩擦力[N];
 $\bar{\lambda}$ ——气体分子的平均自由程[m];
 \bar{v} ——气体分子热运动的平均速度[m/s];
 ρ ——气体的密度[kg/m³];
 S ——面积[m²];
 η ——气体的粘滞系数[Pa·s];
 T ——气体的热力学温度[K];

M ——气体的摩尔质量[kg/mol];

σ ——气体分子的直径[m];

C ——肖节伦德常数[K],见表 1-16。

由上式可知:

① 粘滞系数 η 与气体的摩尔质量 M 的平方根成正比;

② 粘滞系数随温度而增加;

③ 常压下,由于 $\rho \bar{\lambda} = \text{常数}$,粘滞系数 η 与气体密度(即压力)无关;

④ 当压力 p 降到 $\bar{\lambda} \approx d$ 时,由于平均自由程不仅由分子之间的碰撞来决定,也由分子与器壁之间的碰撞来决定,因而 $\rho \cdot \bar{\lambda}$ 不为常数,因此粘滞系数 η 与气体压力有关。

某些气体的粘滞系数见表 1-15。

(四) 气体的热传导

气体的热传导现象就是:如果气体各部分温度不同,由于气体分子的热运动,便发生了能量交换,使较冷部分获得热量。

热传导现象中所迁移的量是能量 E ,且

$$E = \frac{c'_V T + \text{常数}}{N_A}$$

C'_V 为摩尔热容量, N_A 为阿伏加德罗常数。其热传导方程为

$$\left. \begin{aligned} dQ &= \frac{1}{3} n \bar{v} \bar{\lambda} \frac{c'_V}{N_A} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=z_0} \cdot ds = K \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=z_0} ds [\text{W}] \\ K &= \frac{1}{3} n \bar{v} \bar{\lambda} \frac{c'_V}{N_A} \end{aligned} \right\} \quad (1-54)$$

K 称为热导率。考虑到温度梯度的存在及分子的相互作用以及多原子气体的分子转动能与振动能,气体的热导率

$$K = \frac{1}{4} (9\gamma - 5) \eta c_V \quad (1-55)$$

式中 η ——粘滞系数[$\text{Pa} \cdot \text{s}$];

K ——热导率[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

c_V ——比定容热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

c'_V ——摩尔热容量[$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$];

M ——气体的摩尔质量[kg/mol];

N_A ——阿伏加德罗常数, $6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$;

γ ——绝热指数,见表 1-14;

n ——气体的分子数密度[m^{-3}];

\bar{v} ——气体分子热运动平均速度[m/s];

$\bar{\lambda}$ ——气体分子平均自由程[m].

对于单原子气体, $\frac{1}{4} (9\gamma - 5)$ 为 2.5, 双原子气体为 1.9, 多原子气体为 1.75 以至更小。由上可知:

① 由于 \bar{v} 、 $\bar{\lambda}$ 及 c_V 都与温度有关,所以热导率 K 与温度有关。 c_V 与温度的关系见表1-17。

表 1-17 c_V 与温度的关系

气 体	绝热指数 γ	$c_V/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
空 气	1.403	$717.756 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5}T + 6.30 \times 10^{-8}T^2)$
氮	1.405	$735.621 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5}T + 6.30 \times 10^{-8}T^2)$
氧	1.396	$644.349 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5}T + 6.30 \times 10^{-8}T^2)$
一氧化碳	1.404	$736.039 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5}T + 6.30 \times 10^{-8}T^2)$
氢	1.408	$9656.436 \times (1 + 1.5 \times 10^{-4}T)$
二氧化碳	1.302	$527.537 \times (1 + 8.11 \times 10^{-4}T - 1.84 \times 10^{-7}T^2)$
水(100℃)	1.32	$1603.544 \times (1 + 3.39 \times 10^{-7}T^2 - 1.72 \times 10^{-4}T)$
单原子分子	1.667	12.518/M

② 常压下 $\rho \cdot \bar{\lambda} = \text{常数}$,因而 K 与压力无关。

③ 当压力降到 $\bar{\lambda} \approx d$ 时, $\bar{\lambda}$ 为常数, $\rho \cdot \bar{\lambda}$ 不为常数,因而 K 与压力有关。

某些气体0℃时的热导率,见表1-15。

两块平板间的传热公式为

$$Q = KS \frac{T_2 - T_1}{d} \quad [\text{W}] \quad (1-56)$$

式中 S ——板的面积 $[\text{m}^2]$;

T_1 、 T_2 ——两板的温度 $[\text{K}]$;

d ——两板之间的距离 $[\text{m}]$;

K ——热导率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。

当 $T_1 > T_2$ 时,同心圆筒之间的热传导公式为

$$Q = 2\pi KL \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{W}] \quad (1-57)$$

式中 L ——两圆筒的长度 $[\text{m}]$;

r_1 、 r_2 ——内、外圆筒的半径 $[\text{m}]$;

T_1 、 T_2 ——内、外圆筒的温度 $[\text{K}]$ 。

(五) 气体的扩散

气体的扩散现象是由于气体各部分密度不同而产生的。由于气体的热运动,使较密部分的气体分子进入较疏部分,因而发生了质量交换,使气体分子密度变得均匀。

扩散有两种形式,一为气体在本身中的扩散,称为自扩散;一为两种以上气体之间的扩散,称为互扩散。

1. 气体的自扩散

单位时间内由浓度大处向较疏处扩散的分子数

$$\left. \begin{aligned} dN &= D \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)_{z=z_0} ds \quad [\text{s}^{-1}] \\ D &= \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (1-58)$$

式中 \bar{v} ——气体分子热运动的平均速度 $[\text{m/s}]$;

$\bar{\lambda}$ ——平均自由程[m];

D ——自扩散系数[m²/s]。

由于 $\bar{\lambda}$ 与压力成反比,与温度 T 成正比, \bar{v} 与温度的平方根成正比,因此自扩散系数与压力成反比,与温度的 $\frac{3}{2}$ 次方成正比,即

$$D \propto \frac{T^{3/2}}{p}$$

由 $\eta = \frac{1}{3} n \bar{\lambda} \rho$ 可知, $\frac{D\rho}{\eta} = 1$ 。但精确计算, $\frac{D\rho}{\eta}$ 不等于1,而是1.2(无分子力)或1.504,实验结果为1.37~1.50。

2. 气体的互扩散

气体的互扩散就是气体分子由于热运动逐渐互相渗入的现象。在互扩散中,假定两种气体都处于同样的压力及温度下,混和气体的体积保持不变,也就是分子数目保持不变,并且两种气体的分子数密度梯度之绝对值相等,但方向相反。经过推导可知,第一种气体在第二种气体中的扩散系数 D_{1-2} 等于第二种气体在第一种气体中的扩散系数 D_{2-1} ,并且

$$\left. \begin{aligned} D_{1-2} = D_{2-1} &= \frac{n_1 D_{2-2} + n_2 D_{1-1}}{n_1 + n_2} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \\ D_{1-1} &= \frac{1}{3} \bar{\lambda}_1 \bar{v}_1 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \\ D_{2-2} &= \frac{1}{3} \bar{\lambda}_2 \bar{v}_2 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \end{aligned} \right\} \quad (1-59)$$

式中 n_1 ——第一种气体的分子数密度[m⁻³];

n_2 ——第二种气体的分子数密度[m⁻³];

$\bar{\lambda}_1$ ——第一种气体分子的平均自由程[m];

$\bar{\lambda}_2$ ——第二种气体分子的平均自由程[m];

\bar{v}_1 ——第一种气体分子热运动的平均速度[m/s];

\bar{v}_2 ——第二种气体分子热运动的平均速度[m/s]。

必须注意的是,平均自由程 $\bar{\lambda}_1$ 、 $\bar{\lambda}_2$ 应按一种气体在另一种气体中运动时的混和气体中的平均自由程的公式计算。

气体的自扩散系数和互扩散系数见表1-18和表1-19。

表1-18 气体的自扩散系数

气 体	条 件 ^④	自扩散系数 D / $\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粘滞系数 η / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\frac{D\rho}{\eta}$
H_2	0℃	1.29	0.0899	8.5×10^{-6}	1.37
	15℃	1.43 ^①	—	—	—
	0℃ ^②	1.285 ± 0.0025	—	8.44×10^{-6}	1.37 ± 0.05
	-188℃ ^②	0.172 ± 0.008	—	3.77×10^{-6}	1.32 ± 0.06
	-253℃ ^②	0.00816 ± 0.0002	—	8.6×10^{-7}	1.28 ± 0.02
	15℃ ^③	1.24	—	—	—
HCl	22℃	0.1246	—	1.438×10^{-5}	1.33

(续)

气 体	条 件 ^④	自扩散系数 D $/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	密度 ρ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粘滞系数 η $/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\frac{D\rho}{\eta}$
HBr	22.3℃	0.0792	—	1.858×10^{-5}	1.43
N ₂	15℃	0.203 ^①	—	—	—
	20℃	0.200 ± 0.008	—	1.747×10^{-5}	1.48
NO	15℃	0.107 ^①	—	—	—
O ₂	0℃	0.189	1.429	1.926×10^{-5}	1.40
CO	0℃	0.175	1.250	1.665×10^{-5}	1.31
	15℃	0.211 ^①	—	—	—
CO ₂	0℃	0.104	1.977	1.38×10^{-5}	1.49
	15℃	0.121 ^①	—	—	—
	1200℃	2.5	—	—	—
CH ₄	219℃, $7.999 \times 10^3\text{Pa}$	26.32 ± 0.73	—	1.097×10^{-5}	1.33
Ne	20℃	0.473 ± 0.002	—	3.111×10^{-5}	1.27 ± 0.006
Ar	53.5℃	0.212 ± 0.002	—	2.435×10^{-5}	1.30
	22℃	0.180 ± 0.001	—	2.240×10^{-5}	1.32 ± 0.01
	0℃	0.158 ± 0.002	—	2.104×10^{-5}	1.34
	-78.5℃	0.0833 ± 0.0009	—	1.555×10^{-5}	1.34
	-183.0℃	0.028 ± 0.001	—	7.65×10^{-6}	2.1
Kr	20.8℃	0.09 ± 0.004	—	2.485×10^{-5}	1.30 ± 0.06
Xe	18.9℃	0.0443 ± 0.002	—	2.260×10^{-5}	1.24 ± 0.06
UF ₆	30℃, $1.33 \times 10^3\text{Pa}$	$D \cdot \rho = (234 \pm 9) \times 10^{-7} [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$			1.31

 注:① 近似值;② 仲氢向正氢的扩散;③ 重氢向轻氢的扩散;④ 除特别注明压力值外,一般为 $1.013 \times 10^5\text{Pa}$

表 1-19 气体的互扩散系数

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ / $\times 10^4\text{Pa}$	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
H ₂ -D ₂				1.20
H ₂ -He		25.0		1.64
		25.0	8.565	$1.339(1.01)^{\text{④}}$
H ₂ -H ₂ O				0.747
		50		1.012
		92.4		1.236
		99.3		1.282
		34.1		1.020
		55.4		1.121
		79.5		1.200
		34.0		0.915
		55.5		1.023
		20		0.850

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ / $\times 10^4$ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{H}_2\text{-N}_2$				0.674
				0.740
	745 : 235			0.744
		25		0.784
		55		0.908
		85		1.052
		24	8.651	0.914(0.782) ^④
		25		0.760
$\text{H}_2\text{-O}_2$				0.697
				0.758
	748 : 252			0.767
	3 : 1			0.739
				0.778
	1 : 3			0.803
		11.4	9.971	0.801(0.790) ^④
		15.8	6.825	1.172(0.791) ^④
		300		1.8
		600		5.5
$\text{H}_2\text{-空气}$				0.611
$\text{H}_2\text{-CO}$				0.651
$\text{H}_2\text{-CO}_2$				0.550
	3 : 1			0.592
				0.606
	1 : 3			0.634
		12.8	10.091	0.614(0.612) ^④
		15.4	6.798	0.918(0.616) ^④
		26.5	8.558	0.793(0.670) ^④
$\text{H}_2\text{-SO}_2$				0.480
		12.4		0.525
		- 10		0.430
		200		1.230
$\text{H}_2\text{-N}_2\text{O}$				0.535
				0.535
$\text{H}_2\text{-NH}_3$		25		0.849
		25		0.783
		85		1.093

十一、常压下气体的迁移过程

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ /×10 ⁴ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
H ₂ -NH ₃		-10		0.57
		200		1.86
H ₂ -Ar		25		0.770
H ₂ -Rn				0.476
H ₂ -HCl		21		0.795
H ₂ -CCl ₄				0.293
		23		0.345
H ₂ -CH ₄				0.625
H ₂ -C ₂ H ₄				0.625
		25		0.602
H ₂ -C ₂ H ₆				0.439
H ₂ -C ₃ H ₈		27		0.450
H ₂ -C ₆ H ₆				0.0797
				0.317
H ₂ -C ₂ H ₅ OH				0.377
				0.578
		67		0.586
H ₂ -C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅				0.299
				0.354
H ₂ -CH ₃ COCH ₃				0.361
H ₂ -Hg				0.53
He-H ₂ O		34		0.902
		55.3		1.011
		79.3		1.121
		25		0.908
He-N ₂		24.6	8.598	0.808(0.686) ^④
		22.6	8.611	0.833(0.708) ^④
He-O ₂		24.2	8.625	0.840(0.714) ^④
		23.7	8.625	0.860(0.731) ^④
He-NH ₃		23.9	8.531	0.923(0.776) ^④
He-Ar				0.641
		23	8.521	0.866(0.739) ^④
	727 : 273			0.689
	685 : 315			0.694
	500 : 500			0.706
	323 : 677			0.712

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ / $\times 10^4$ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
He-Ar	237 : 763			0.731
He-Ne		20		1.230
He-Rn		15		0.351
He-C ₆ H ₆		25		0.384
He-C ₂ H ₅ OH		25		0.494
		27		0.76
		700		6.25
		1700		20.49
		2700		42.11
H ₂ O-N ₂		34.4		0.256
		79		0.359
		55.8		0.313
		76		0.354
H ₂ O-O ₂		34.9		0.282
		79.2		0.352
		127		0.48
		427		1.20
		777		2.39
H ₂ O-空气		42		0.288
		16.7		0.244
		92.4		0.357
		99.3		0.317
		25		0.260
		20		0.260
				0.219
H ₂ O-CO ₂		25		0.164
		23		0.164
		99.4		0.259
		34.3		0.202
		79.2		0.245
		55.5		0.198
H ₂ O-CH ₄		34.5		0.292
		79.1		0.356
H ₂ O-C ₂ H ₄		34.6		0.204
		79.4		0.247
H ₂ O-氟里昂 12		20		0.085

十一、常压下气体的迁移过程

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ / $\times 10^4$ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
N ₂ -O ₂		11.8	10.084	0.203(0.202) ^④
		11.7	10.113	0.204(0.203) ^④
		13.1	10.084	0.200(0.199) ^④
		12.4	10.073	0.203(0.202) ^④
		12.7	10.141	0.204(0.204) ^④
				0.181
				0.210
	467 : 537			0.204
N ₂ -CO		15		0.192
N ₂ -CO ₂				0.144
		24.0	8.558	0.192(0.162) ^④
		1200		2.5
		25.0		0.158
N ₂ -SO ₂		- 10		0.104
N ₂ -NO		25		0.232
N ₂ -NH ₃		25		0.230
		25		0.241
		85		0.328
N ₂ -I ₂				0.07
N ₂ -Hg				0.119
				0.14
N ₂ -Na		15		20.4
N ₂ -Cd				0.17
O ₂ - 空气				0.175
				0.178
O ₂ -CO				0.185
		127		0.3
		527		1.0
O ₂ -CO ₂				0.139
		127		0.3
		527		1.0
O ₂ -NH ₃		25		0.163
O ₂ -CCl ₄				0.064
		23		0.075
		23		0.073
O ₂ -CH ₄				0.150
		400		1.0
		700		1.8

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ / $\times 10^4$ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{O}_2\text{-C}_2\text{H}_4$		20		0.182
$\text{O}_2\text{-C}_6\text{H}_6$				0.080
		23		0.094
空气 - CO_2				0.138
		17.6	10.011	0.165(0.163) ^④
		15.2	4.852	0.338(0.162) ^④
		15.7	4.119	0.414(0.164) ^④
				0.136
空气 -SO				0.122
空气 - CS_2				0.088
空气 -Rn		15		0.120
空气 - NH_3		25		0.084
空气 - Cl_2				0.124
空气 - CH_4				0.196
空气 - C_6H_6		25		0.096
空气 - CH_3OH		25		0.162
空气 - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$				0.099
		25		0.135
		42		0.145
		67		0.154
		67		0.153
空气 - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$				0.079
		20		0.090
空气 - C_5H_{12}		25		0.060
空气 - I_2				0.069
CO-CO_2				0.137
$\text{CO-C}_2\text{H}_4$				0.116
				0.151
$\text{CO}_2\text{-SO}_2$		- 10		0.064
		200		0.195
$\text{CO}_2\text{-CS}_2$				0.550
$\text{CO}_2\text{-N}_2\text{O}$				0.096
		25		0.117
$\text{CO}_2\text{-CH}_4$				0.153
$\text{CO}_2\text{-C}_3\text{H}_8$		25		0.086
$\text{CO}_2\text{-C}_6\text{H}_6$		45		0.072

(续)

气 体	组成比 ^①	温度 ^② /℃	压力 ^③ /×10 ⁴ Pa	扩散系数 $D_{1-2}/\times 10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
CO ₂ -CH ₃ OH		45		0.105
CO ₂ -C ₂ H ₅ OH				0.069
		67		0.106
CO ₂ -C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅				0.054
		19.9		0.063
SO ₂ -Ar		-10		0.077
N ₂ O-C ₃ H ₈		25		0.086
NH ₃ -C ₂ H ₄		25		0.177
NH ₃ -Ar		-19	0.729	2.070(0.150) ^④
		35	0.858	2.622(0.222) ^④
		60	0.853	3.003(0.253) ^④
NH ₃ -Kr		-19	0.798	1.535(0.121) ^④
		2.0	0.754	1.907(0.142) ^④
		35	0.800	2.262(0.178) ^④
		60	0.814	2.588(0.208) ^④
Ar-Ne		25		0.329
Ar-Rn		15		0.092
Ne-Rn		15		0.217
氟里昂 12-C ₆ H ₆		25		0.105
氟里昂 12-C ₂ H ₅ OH		25		0.048
CH ₄ -C ₂ H ₆		20		0.163
CH ₄ -C ₃ H ₈		20		0.085

注:①除特别注明外,均为1:1;②除特别注明外,均为0℃;③除特别注明外,均为101325Pa;④将101325Pa的值换算成特定压力的值

十二、中、低压下气体的迁移过程

(一) 中压下的滑动现象

常压下气体分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 远小于容器直径 d ,气体分子只要走很短的距离就能与其它分子交换动量,因此在气体内部以及气体与器壁间,速度的变化是连续的,且靠近壁面处的气层具有与壁面一样的速度。

当 $\bar{\lambda} \approx d$ 时,由于分子间碰撞机会很少,分子之间不能有显著的动量交换。此时气流特性仍然是粘滞性的,即气体内部的速度分布呈直线的,但靠近器壁的气体与器壁的速度不一样,出现了速度突变,好像气体分子沿壁面有一个滑移,这种现象称为滑动现象。

如图1-7,设有两器壁A、B。A以速度 v 运动,B的速度为零。如果两器壁之间的压力为 $\bar{\lambda} \approx d$ 的情况,即在接近A和B器壁处的气层有一速度突变量 Δv ,即B器壁稍上的气层具有不为零的速度 Δv ;A器壁稍下的气层具有比A器壁的速度 v 小 Δv 的速度;气体中的速度是逐

渐变化的。

速度的突变量 Δv 与气体中的速度梯度成正比,即

$$\Delta v = \varphi \frac{dv}{dz} \quad (1-60)$$

式中 φ 反映了滑动程度的大小,称为滑动系数。

φ 的几何意义是:如把 B 器壁由原来位置向离开 A 器壁的方向移动一个 φ 距离后,则贴近 B 器壁的气体分子速度为零;如把 A 器壁由原来位置向离开 B 器壁的方向移动一个 φ 距离后,则贴近 A 器壁的气体分子速度为 v 。由此可知, φ 的单位为长度单位。

由于气层与器壁之间有速度差 Δv ,故器壁与气层之间有一摩擦力,称为外摩擦力,且

$$\left. \begin{aligned} dF_{\text{外}} &= \eta_{\text{外}} \Delta v ds = \eta_{\text{外}} \varphi \frac{dv}{dz} ds \\ \eta_{\text{外}} &= 2p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \end{aligned} \right\} \quad (1-61)$$

式中 $\eta_{\text{外}}$ —— 外摩擦系数 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

气体各层之间具有内摩擦力,且

$$dF_{\text{内}} = \eta \frac{dv}{dz} ds \quad (1-62)$$

式中 η —— 内摩擦系数或粘滞系数 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]。

稳定时,内摩擦力与外摩擦力相等,则

$$\varphi = \frac{\eta}{\eta_{\text{外}}} \quad [\text{m}] \quad (1-63)$$

滑动系数实质上就是内摩擦系数与外摩擦系数之比。滑动系数的大小主要由气体分子与器壁之间的动量交换情况来定。从分子运动论的观点出发可以导出

$$\varphi = \frac{2}{3} \cdot \frac{2-f}{f} \cdot \bar{\lambda} \approx \frac{2-f}{f} \bar{\lambda} \quad (1-64)$$

式中 f —— 气体分子与器壁碰撞后漫反射的百分数,称为反射系数。某些材料的反射系数见表 1-20。

表 1-20 某些材料的反射系数 f

气体和表面材料	$f/\%$	$100 - f$	$\varphi/\bar{\lambda}$
空气在油面上	89.5	10.5	1.23
空气或 CO_2 在黄铜、水银、 洋干漆上	100	0	1.00
CO_2 在油面上	92	8	1.17
空气在玻璃表面上	89	11	1.24
空气在新的洋干漆上	79	21	1.53
氢在油面上	92.5	7.5	1.16
氮在油面上	87.4	12.6	1.29

由图 1-6 可知

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v}{d + 2\varphi} \quad (1-65)$$

故两器壁所受的力为

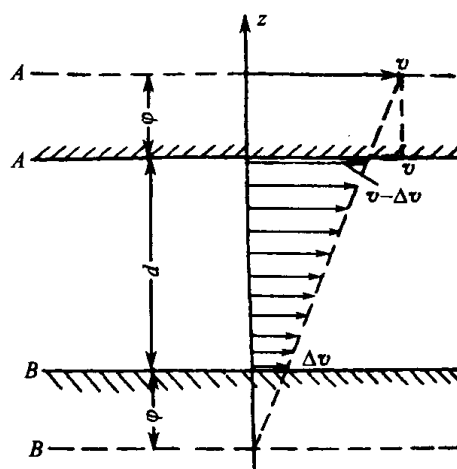


图 1-6 滑动现象

$$dF = \eta \frac{dv}{dz} ds = \eta \frac{v}{d + 2\phi} ds \quad (1-66)$$

(二) 低压下气体的外摩擦(自由分子的粘滞性)

当 $\bar{\lambda} \gg d$ 时, 气体分子之间的碰撞可以忽略。主要考虑的是分子与器壁的碰撞。如果两器壁之间以相对速度 v 运动, 此时, 作用于两器壁间的力为

$$dF = \eta_0 p v ds = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} p v ds \quad [\text{N}] \quad (1-67)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} = 1.385 \times 10^{-1} \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1-68)$$

对于 20℃ 摩尔质量为 M 的气体

$$\eta_0 = 8.089 \times 10^{-3} \sqrt{M} \quad (1-69)$$

对于 20℃ 的空气

$$\eta_0 = 1.378 \times 10^{-3} \quad (1-70)$$

式中 M ——气体的摩尔质量[kg/mol];

R ——摩尔气体常数, 8.31441J/(K·mol);

T ——气体的热力学温度[K];

p ——气体压力[Pa];

v ——两器壁之间的相对速度[m/s];

η_0 ——自由分子的粘滞系数[s/m]。

各种气体在 20℃ 时自由分子的粘滞系数 η_0 见表 1-15。

(三) 低压下的热流逸现象

在常压下, 气体分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 远小于容器直径 d , 不论温度 T 是否相同, 两相连的容器中的压力 p 在稳定状态时是相等的, 但单位体积中的分子数 n 不等, 而与绝对温度 T 成反比。即当 $\bar{\lambda} \ll d$, $T_A \neq T_B$ 时, 在稳定状态下有

$$\left. \begin{aligned} p_A &= p_B \\ \frac{n_A}{n_B} &= \frac{T_B}{T_A} \end{aligned} \right\} \quad (1-71)$$

在低压力下, 即 $\bar{\lambda} \gg d$ 时, 两个相连容器中如果温度不一样, 根据余弦定律则有

$$n_A \bar{v}_A = n_B \bar{v}_B$$

故

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_A}{p_B} &= \sqrt{\frac{T_A}{T_B}} \\ \frac{n_A}{n_B} &= \sqrt{\frac{T_B}{T_A}} \end{aligned} \right\} \quad (1-72)$$

由此可见, 在低压力时, 在两相连而温度不同的容器中, 气体压力及分子数密度均不相等。这种由于温度差而引起的气体分子质量的迁移称为热流逸现象(见图 1-7)。

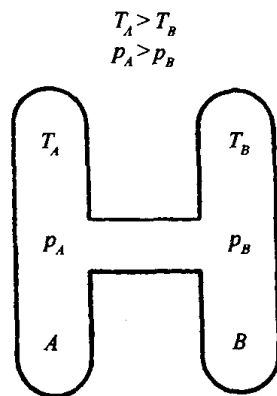


图 1-7 热流逸现象

当真空设备各部分温度相差很大时,它们的压力是不等的,必须予以考虑。

(四) 中压下的温度剧增(温度跃变)现象

常压下气体的热传导,只有当 $\bar{\lambda} \ll d$ 时才正确。当 $\bar{\lambda} \approx d$ 时,分子之间的碰撞减少,主要是分子与器壁的碰撞。此时,由于分子和器壁之间碰撞时能量交换不够充分,碰撞后气体分子并不具有器壁的温度而是有温度差,因此气体分子和器壁之间就出现了温度剧增(温度跃变)现象。

真空度愈高, $\bar{\lambda}$ 愈长,这时打到器壁上的分子在离器壁更远的地方进行最后一次碰撞,而获得该处的温度,因而分子的温度与器壁的温度相差更大。碰撞反射后,分子与器壁之间产生温度的突变量 ΔT 也更大。

温度突变量 ΔT 与器壁附近的气体温度梯度成正比,即

$$\Delta T = T'_1 - T_1 = g \frac{dT}{dz} \quad (1-73)$$

式中 g 反映了温度剧增程度的大小,称为温度剧增系数,见图1-8。 T_1 、 T_2 分别为A、B两器壁的温度。 T'_1 、 T'_2 分别为贴近A、B两器壁的气层温度。气层内部的温度分布是连续的,在气层与器壁之间产生了温度突变量 ΔT 。 g 的几何意义也就在于:如将A、B两器壁上下各推开一距离 g ,即两器壁之间的距离由 d 增加到 $d+2g$ 时,则靠近器壁的气层与器壁的温度就相同了,好像不存在温度剧增现象。

可以推出

$$g = \bar{\lambda} \frac{2-\alpha}{\alpha} \quad [\text{m}] \quad (1-74)$$

式中 α 为在碰撞后的气体分子总数中温度等于器壁温度的分子所占百分数,称为适应系数。它表示分子和器壁之间的热能交换的程度。它与气体种类及器壁材料有关(各种不同气体的适应系数 α ,见表1-21)。如 $\alpha = 0$,即气体分子与器壁碰撞时完全没有能量交换,则 $g = \infty$,温度剧增现象非常厉害。如 $\alpha = 1$,即气体分子的能量完全与器壁彻底交换,则 $g = \bar{\lambda}$, g 与压力 p 成反比。

由图1-8可知

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_2 - T_1}{d + 2g}$$

当温度剧增存在时,两平行平板之间的热传导公式为

$$Q = K \left(\frac{dT}{dz} \right) \cdot S = K \frac{T_2 - T_1}{d + 2g} S \quad [\text{J/s}] \quad (1-75)$$

当温度剧增存在时,同轴圆筒间的热传导公式为

$$Q = \frac{2\pi L K (T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1) + \bar{\lambda}(2-\alpha)/\alpha \cdot (1/r_1 + 1/r_2)} \quad [\text{J/s}] \quad (1-76)$$

式中 S ——平行平板的传热截面积 $[\text{m}^2]$;

d ——两平行平板之间的距离 $[\text{m}]$;

L ——圆筒的长度 $[\text{m}]$;

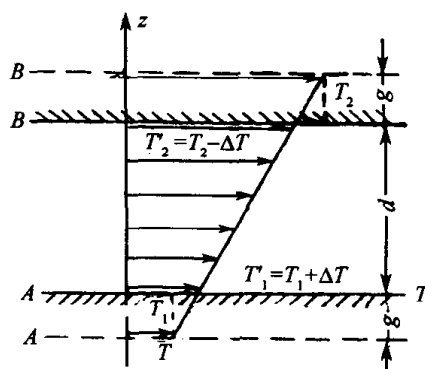


图1-8 温度剧增现象

T_1 、 T_2 —A、B两板的温度;

T'_1 、 T'_2 —A、B两板

附近气体分子的温度。

r_1, r_2 ——内、外圆筒的半径[m];

K ——热导率[W/(m·K)]。

表 1-21 各种不同气体的适应系数 α

气体的适应系数 ^①												
气体名称 表面状态	空气	H ₂	D ₂	He	Ne	Ar	Hg	O ₂	CO ₂	CO	H ₂ O	N ₂
白金		0.220	0.295	0.238	0.57	0.89	1.00	0.74	0.76	0.75	0.72	
白金		0.312		0.403	0.700	0.847		0.782		0.772		0.769
研磨的白金		0.358						0.835	0.868		—	
研磨的白金		0.26 (℃)			0.65	0.85 (30℃)		0.83 (20℃)	0.86 (20℃)			0.87 (20℃)
涂黑的白金		0.556						0.927	0.945			
涂厚黑色的白金		0.712						0.956	0.975			
钨		0.20				0.85	0.95					0.57
闪光的钨(90K)		0.09		0.41	0.081	0.16		0.20				
普通的白金	0.90	0.36				0.89						0.89
空气的适应系数												
研磨的黄铜	0.91 ~ 0.94		研磨的铸铁		0.87 ~ 0.93		研磨的铝		0.87 ~ 0.95			
机加工的黄铜	0.89 ~ 0.93		机加工的铸铁		0.87 ~ 0.88		机加工的铝		0.95 ~ 0.97			
腐蚀的黄铜	0.92 ~ 0.95		腐蚀的铸铁		0.89 ~ 0.96		腐蚀的铝		0.89 ~ 0.97			
氮的适应系数和温度 ^②												
	温 度 /K											
	12		90		195		273					
白金			0.49		0.49(153)		0.38(307 ~ 537)					
白金(光亮表面)							0.44(323 ~ 423)					
白金(涂黑表面)							0.91(323 ~ 423)					
钨(新鲜干净面)			0.025(79)		0.046		0.057(295)					
钨(有吸附层)							0.19 ~ 0.82(温度不明)					
镍(无吸附层)			0.048		0.060		0.071(273)					
镍(有吸附层)			0.413		0.423		0.360(273)					
玻璃	0.67		0.38(77)				0.34(273)					

注:① 表中的适应系数,除特殊标明温度外,均为室温下的值;
② 括号中的温度值也是以 K 为单位的

(五) 低压下气体的自由分子热传导

当 $\bar{\lambda} \gg d$ 时,器壁间的气体分子数更少,也就是迁移能量的气体分子数更少。因此,两器壁空间中没有温度梯度存在,而贴近器壁的表面则有温度剧增现象。此时,平行平板的热传导公式为

$$Q = A \cdot p \frac{\alpha}{2 - \alpha} (T_2 - T_1) S \quad [\text{J/s}] \text{ 或 } [\text{W}] \quad (1-77)$$

$$\Lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R}{2\pi MT}} = 5.752 \times 10^{-1} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \frac{1}{\sqrt{MT}} \quad [\text{m}/(\text{K} \cdot \text{s})] \quad (1-78)$$

对于 20℃, 摩尔质量为 M , 绝热指数为 γ 的气体

$$\Lambda = \frac{3.36 \times 10^{-2}}{\sqrt{M}} \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \quad [\text{m}/(\text{K} \cdot \text{s})] \quad (1-79)$$

当两板的适应系数不同而分别为 α_1, α_2 时(由于材料不一样), 其热传导为

$$Q = \Lambda p \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} (T_2 - T_1) S \quad [\text{J/s}] \text{ 或 } [\text{W}] \quad (1-80)$$

对于低压下的同轴圆筒, 其内筒半径为 r_1 , 外筒半径为 r_2 , 且 $r_1 \ll \bar{\lambda} \ll r_2$ 时, 其热传导为

$$Q = \frac{3}{16} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \cdot \frac{\alpha}{(1 - \alpha) \frac{r_1}{r_2} + 1} p \sqrt{\frac{\pi k}{2m_0 T}} (T_2 - T_1) 2\pi r_1 L \quad [\text{J/s}] \quad (1-81)$$

式中 Λ ——分子流条件下, 自由分子的热导率, 各种气体 20℃ 时的自由分子的热导率见表 1-15;

α ——适应系数;

γ ——绝热指数;

M ——气体的摩尔质量 $[\text{kg}/\text{mol}]$;

T ——气体的热力学温度 $[\text{K}]$;

R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

k ——玻耳兹曼常数, $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

m_0 ——一个分子的质量 $[\text{kg}]$;

p ——气体的压力 $[\text{Pa}]$;

S ——平板面积 $[\text{m}^2]$;

r_1 ——同轴圆筒的内筒半径 $[\text{m}]$;

r_2 ——同轴圆筒的外筒半径 $[\text{m}]$ 。

十三、吸 附

(一) 固体与气体的相互作用

在真空设备中, 容器壁或其它固体材料与气体之间存在着如下相互作用:

吸附——固体表面聚集一层或多层气体的现象。

吸收——气体扩散渗入固体内部并被溶解的现象。

解吸——被材料吸附的气体或蒸气的释放现象。

(二) 吸附的基本概念

1. 真空技术中的吸附问题

吸附是真空技术特别是近代超高真空中日益显得重要的物理现象。

人们很早就发现活性炭、硅胶、活性氧化铝、分子筛等多孔性材料和某些金属(如钛)可吸附大量气体。近来,在真空技术中广泛利用这些吸气剂材料做成阱或泵来吸附掉有害蒸气或气体。某些金属元素,如钡、锶等表现了很强的吸附性能,在电子管中蒸散一层这些金属的镜面以提高真空度。所以吸附作用是获得、提高或维持真空的重要手段。

事物在一定条件下会向相反的方向转化。在有些场合,吸附的逆过程——解吸,使真空容器中的材料放出气体,就要破坏真空或增加真空系统气体负荷。

2. 吸附过程

被吸附的气体称为吸附质。吸附气体的固体称为吸附剂。发生吸附作用的原因是由于在吸附剂表面存在着力场,如图 1-9。吸附剂和吸附质之间的相互作用力有如下二种形式:

① 范德瓦耳力。原子是由中心带正电的原子核和围绕核中心旋转的电子所组成。这样,由于各种机理所形成的电偶极子产生之作用力统称为范德瓦耳力。范德瓦耳力比较弱,作用距离大于分子直径时为吸力,但随着距离的增加而迅速衰减,一般与距离的六次方成反比。当距离小于分子直径时就产生很大的排斥力。其位能曲线见图 1-9 中的曲线 I。

② 化学键力。化学键又分为离子键和共价键。都是由于吸附剂和吸附质之间产生电子交换引起的。化学键力比较强,作用距离比较近。化学键力所形成的位能曲线见图 1-9 中的曲线 II。

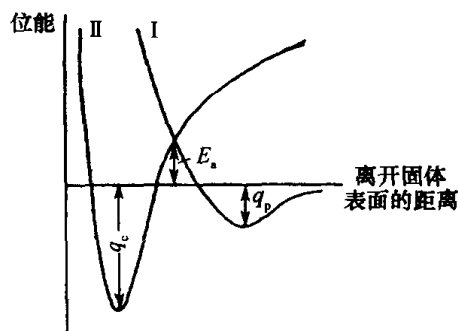


图 1-9 吸附位能曲线
I—物理吸附; II—化学吸附。

由于上述作用力的性质不同,吸附作用又可区分为物理吸附和化学吸附。

当空间分子热运动以平均动能 $\frac{1}{2} kT$ 接近固体表面时,开始受到范德瓦耳力吸引而落入第一个浅位阱 q_p 之中,这时放出一部分能量(称为吸附热)形成物理吸附。在单位时间碰撞在单位面积上的分子数为 $\frac{1}{4} n\bar{v}$,但是其中只有 α_p 部分被吸附,其余的 $1 - \alpha_p$ 部分立即返回气体中。 α_p 称为凝聚概率。物理吸附的特点是吸附比较弱,吸附热比较小(因为 q_p 位阱比较浅);对吸附的气体一般无选择性(只要温度足够低,任何气体都可以发生物理吸附);温度越低吸附量越大;可以吸附多层(因为吸附作用距离较大等原因)。在真空技术中深冷泵低温壁面的吸气作用属于物理吸附。

分子进入位阱 q_p 后,如果再克服 q_p 和 q_c 之间的位垒 E_a (称化学吸附活化能),解离成原子态,进入深位阱 q_c 之中,这时放出较大的能量(称化学吸附热)形成化学吸附。与凝聚概率 α_p 类似,化学吸附也有一个分数 α_c ,称为粘附概率。化学吸附的特点是吸附比较强,吸附热比较大;吸附有选择性;温度较高化学吸附的分子增多(因为这时分子能量增大,能克服位垒 E_a 的分子数增多了);只能吸附单层。电子管中吸气剂的吸气作用包括化学吸附。

(三) 吸附的平衡状态——吸附等温线

当气体—固体处于平衡状态,即吸附平衡时,吸附量 σ 是温度 T 和周围气体压力 p 的函数,即

$$\sigma = F(p \cdot T) \quad (1-82)$$

如果温度一定, $T = \text{常数}$, 则

$$\sigma = F(p) \quad (1-83)_a$$

这个关系叫做吸附等温式(线)。如果压力一定($p = \text{常数}$),则

$$\sigma = F(T) \quad (1-83)_b$$

叫做吸附等量式(线)。

在真空技术中,吸附等温线最有用。大量的科学实验证实,自然界的吸附等温线大约有图 1-10 所示的五种类型。第一种属于单分子层吸附,第 II ~ V 种属于多分子层吸附。

吸附等温式的理论形式很多。真空技术中比较有用的有以下六种等温式。

1. 朗缪尔等温式

朗缪尔等温式为

$$\theta = \frac{\sigma}{\sigma_m} = \frac{Ap}{1 + Ap} \quad (1-84)$$

如果吸附时双原子气体分子离解成原子态,则有

$$\theta = \frac{(Ap)^{1/2}}{1 + (Ap)^{1/2}} \quad (1-85)$$

式中 σ ——单位面积上的实际吸附量[个·m⁻²];

σ_m ——单位面积上一个单分子层的最大吸附量[个·m⁻²],根据研究,吸附时吸附质粒子并不是一个紧挨一个排列,而是在一定的位置上吸附,这些位置称为“吸附位”,一般金属元素每平方米大约有 $5 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19}$ 个吸附位;

θ ——覆盖度(即实际吸附占最大吸附量的比例);

p ——压力[Pa];

A ——常数[Pa⁻¹]。

朗缪尔等温式为单分子层吸附理论,物理吸附和化学吸附都适用。图 1-11 为氮在钨上实测的吸附等温线,符合朗缪尔等温式。

朗缪尔理论认为,在吸附过程中吸附热保持不变。实际上由于表面的不均匀,吸附剂各处的表面位能不一致,吸附时往往最容易先吸附在位阱最深处,以后依次逐渐吸附到较浅处,所以吸附热要随吸附量的增加而减少。考虑到这个因素,又有以下改进型的吸附等温式。

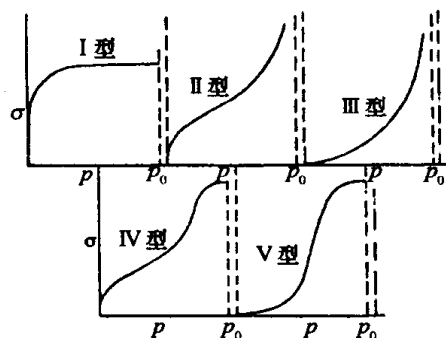


图 1-10 吸附等温线五种类型

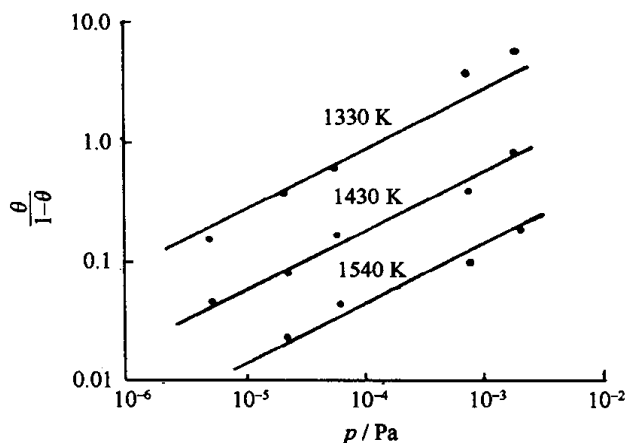


图 1-11 氮—钨吸附等温线

2. 弗利德利胥等温式

如果考虑吸附热 q_j 随吸附位数 n_j 呈如下关系 (n_0, q_m 为常数), 即

$$n_j = n_0 e^{(-q_j/q_m)}$$

可以得到

$$\theta = k_1 p^{1/n} \quad (1-86)$$

式中 n, k_1 是与吸附剂、吸附质种类有关的常数。

这是单分子层吸附理论, 运用于化学吸附。图 1-12 为氢在钨粉上实测等温线, 符合这个规律。

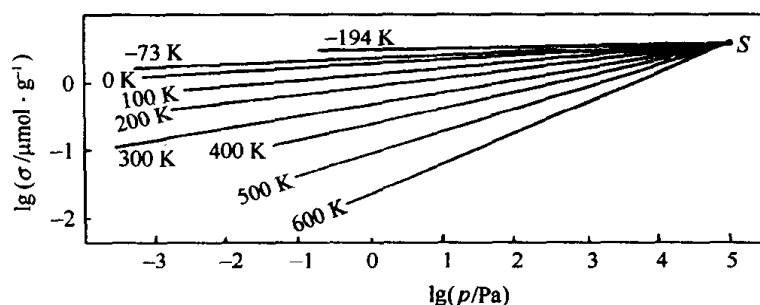


图 1-12 氢在钨粉上的吸附等温线

3. 捷姆金等温式

如果考虑吸附热随覆盖度呈如下关系 (β 为常数, q_0 是 θ 极小时的初始吸附热)

$$q = q_0(1 - \beta\theta)$$

可以得到

$$\theta = \frac{RT}{q_0\beta} \ln(k_2 p) \quad (1-87)$$

式中 θ ——覆盖度;

R ——摩尔气体常数, $8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度[K];

β ——常数;

q_0 ——初始吸附热[J/mol];

k_2 ——常数[Pa⁻¹];

p ——压力[Pa]。

这是单分子层吸附理论, 适用于 θ 在 0.27 ~ 0.75 之间中等覆盖度的化学吸附。图 1-13 为氢在钨粉上实测吸附等温线, 与捷姆金等温式一致。

对于物理吸附, 也有如下改进型等温式。

4. BET 等温式

如果考虑由范德瓦耳力吸附多层的情况, 假定:

① 第一层吸附热 q_1 与第二层以上的 q 不同;

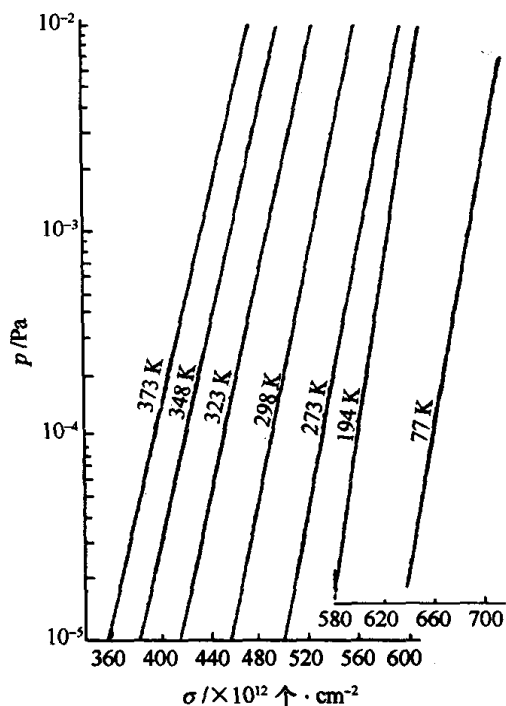


图 1-13 氢在钨上的吸附等温线

- ② 第二层以上的吸附、解吸与液体蒸发、凝结情况类似,因此吸附热等于液化热;
 ③ 吸附质分子间在平行于吸附剂表面方向上无相互作用力;
 ④ 周围气压达饱和蒸气压时,吸附量为无限大。可以得到

$$\theta = \frac{Cp}{(p_0 - p)[1 + (c - 1)p/p_0]} \quad (1-88)$$

式中 C ——常数;
 p ——压力;
 p_0 ——饱和蒸气压;
 θ ——覆盖度。

这是多分子层吸附理论,适用于 $0.05 \leq \frac{p}{p_0} \leq 0.35$ 时的物理吸附,可大量地解释高压力下
 图 1-10 所示 I ~ V 型实验吸附等温线。

5. 杜平宁等温式

在极低压力下,如果考虑到表面的不均匀,则有

$$\ln \theta = -B[RT \ln(p/p_0)]^2 \quad (1-89)$$

式中 B ——常数 [mol^2/J^2],某些气—固配组的 B 值见表 1-22;
 θ ——覆盖度;
 R ——摩尔气体常数, $8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;
 p ——压力 [Pa];
 T ——热力学温度 [K];
 p_0 ——饱和蒸气压 [Pa].

表 1-22 几种材料吸附气体的 $B^{-1/2} / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 值

吸附剂	气 体							
	He	H ₂	N ₂	CO	Ar	CH ₄	Kr	Xe
玻璃	662	2211	7005 6510	8307	4936 4878	6050	5774 5610 4702	6460 6155(平均)
MO 膜							9646	12351
W 膜							11095	14273
Zr 膜					5108		5694	5263(平均)
Ni 膜							4229	

这个等温式适用于极低压力下的物理吸附。各种气体在低温派热克斯玻璃上实测吸附等温线都符合这个规律。

图 1-14、图 1-15 和图 1-16 给出派热克斯玻璃和 304 不锈钢实测的低温物理吸附等温线。

6. 亨利定律

在极低压力下考虑朗缪尔等温式(1-84)中 $Ap \ll 1$, 可以简化为

$$\theta = Ap \quad (1-90)$$

这是单分子层吸附理论,在高真空特别是超高真空中常常适用。图 1-17 为水蒸气在硼硅玻璃上的实测等温线,符合亨利定律。此外由图 1-15 和图 1-16 也可看出,当压力极低时, $\lg \sigma - \lg p$ 图线的斜率逐渐趋向于 1。

亨利定律也可直接由吸附动力学观点得到

$$\sigma = \alpha \tau \Gamma_n \quad (1-91)$$

式中 σ ——实际吸附量[个·m⁻²];
 α ——凝聚概率或粘附概率;
 τ ——平均滞留时间[s];
 Γ_n ——单位时间碰撞在单位面积上的分子数
 [个·s⁻¹·m⁻²], 见式(1-29)

这里

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_d}{RT}\right) \quad (1-92)$$

式中 τ_0 ——吸附分子垂直于表面方向的振动周期,
 见表 1-23。

E_d ——解吸活化能[J/mol];

R ——摩尔气体常数, 8.31441 J/(mol·K);

T ——热力学温度[K]。

各种气体的 τ_0 、 E_d 值见表 1-23。

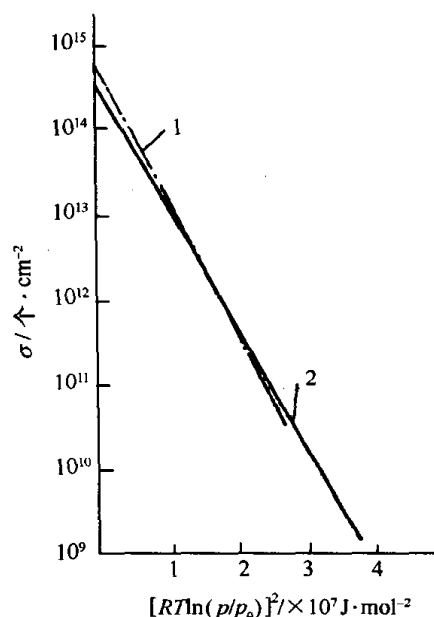


图 1-14 N₂ 在派热克斯玻璃
 上实测杜平宁吸附等温线
 1—Hobson 和 Armstrong 的实验结果;
 2—Tuzi 和 Saito 的实验结果。

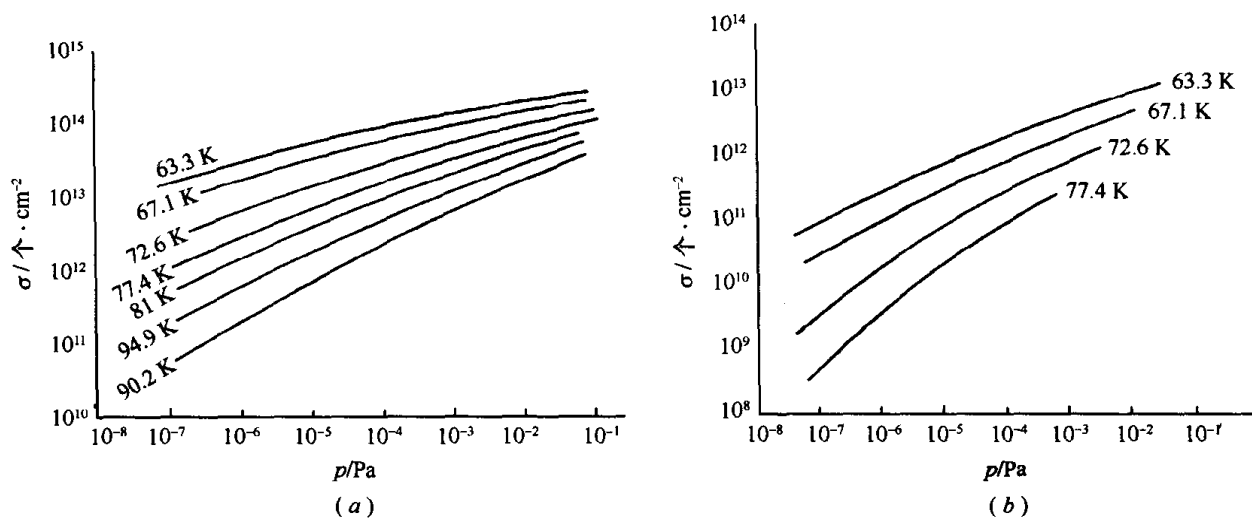


图 1-15 在派热克斯玻璃上的物理吸附等温线

(a)N₂; (b)Ar。

表 1-23 各种气体 E_d 和 τ_0 的测试结果

气 体	表 面	温度 /K	E_d /J·mol ⁻¹	τ_0 /s
Ar	不均匀派热克斯玻璃	83.3 ~ 100	9.923	10 ⁻¹¹
			14.989	10 ⁻¹³
Kr	不均匀派热克斯玻璃	97.9 ~ 129.7	9.002	10 ⁻⁹
			18.631	10 ⁻¹³
Xe	不均匀派热克斯玻璃	130.4 ~ 157.9	15.701	10 ⁻¹¹
			23.697	10 ⁻¹³
He	不均匀玻璃	13.8 ~ 24.4	0.959	10 ⁻⁹
			2.219	

(续)

气 体	表 面	温度 /K	$E_d/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	τ_0/s
DC703	有油膜的玻璃	348 ~ 373	113.462	5×10^{-20}
CO	多晶镍	1059	2202.257	2.6×10^{-11}
		442	27.214	7.2×10^{-4}
	镍(110)	970	191.337	6.3×10^{-11}
		604	57.778	2×10^{-5}
		372	16.329	4×10^{-3}
	多晶钨	1300	324.477	1×10^{-13}
		1181	283.028	3.3×10^{-13}
		963	216.458	2.1×10^{-12}
		506	78.293	5.7×10^{-9}

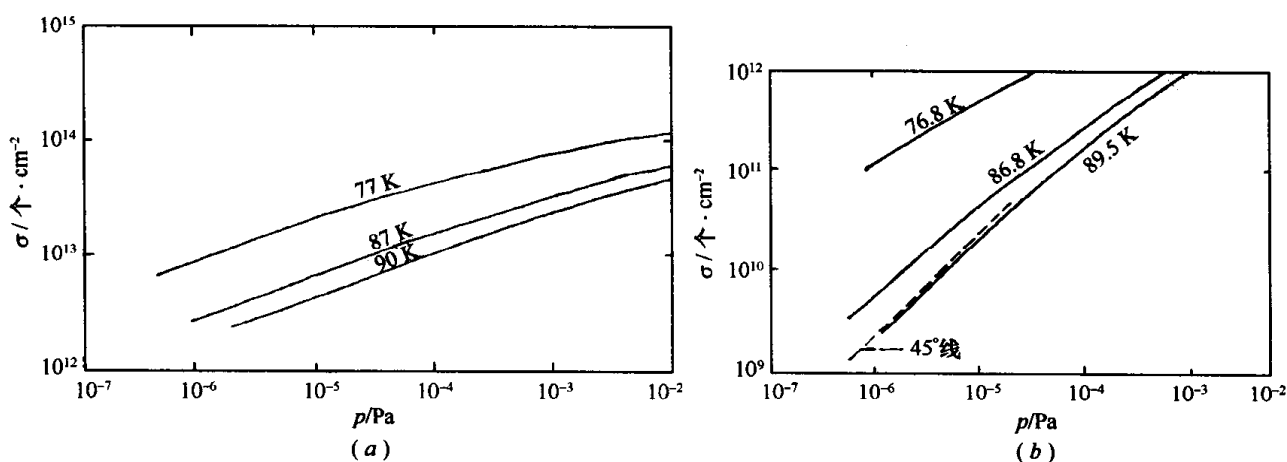


图 1-16 在 304 不锈钢上的物理吸附等温线
(a) N_2 ; (b) Ar 。

由式(1-90)、式(1-91)、式(1-92) 及式(1-29) 可得系数 A

$$A = a\tau_0(2\pi MRT)^{-1/2} \exp\left(\frac{E_d}{RT}\right) \quad (1-93)$$

(四) 吸附的非平衡状态 —— 吸附和解吸速率

1. 化学吸附速率

化学吸附速率 u_c 为

$$u_c = \Gamma_n \gamma F_c(\theta) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1-94)$$

式中 γ —— 系数(即吸附的成功率);

$F_c(\theta)$ —— 与没有被化学吸附占据的吸附位碰撞的概率, 所以是覆盖度 θ 的函数;

E_a —— 吸附活化能 $[\text{J}/\text{mol}]$;

Γ_n —— 单位时间碰撞到单位面积上的分子数
[$\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];

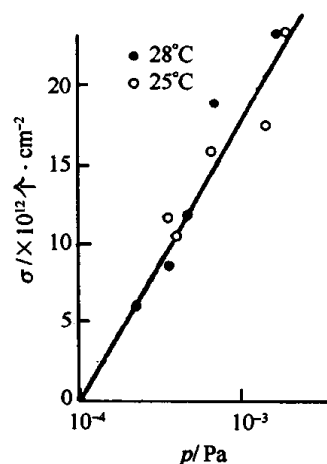


图 1-17 在玻璃上水蒸气的吸附等温线

T ——热力学温度[K];

R ——摩尔气体常数, $8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

一般令

$$\alpha_c = \gamma F_c(\theta) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

于是

$$u_c = \Gamma_n \alpha_c \quad [\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1-95)$$

α_c 即粘附概率。各种气体在不同材料上的粘附概率 α_c 见表 1-24, 图 1-18、图 1-19 和图 1-20。

表 1-24 300K 各种气体在钨上的 α_c 测试结果

气 体	表 面	$\sigma_{\text{max}}/\times 10^{18} \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$	θ (当 α_c 为坪区临界值)	α_c (坪区值)
CO	多晶丝	10	约 0.3	0.4
	W(100)			0.3 ~ 0.35
	W(110) β	7	0.5	约 1
	W(110) α	5		约 0.6
N ₂	多晶丝	1	0.6	0.27
	W(110)			0.25
		5		0.25
		2.8	0.36	0.16
		2	0.7	0.55
	W(110)			约 0
		2.8	< 0.03	< 10^{-4}
	W(111)			0.01
		2.9		< 0.04
				3×10^{-3}
H ₂	W(100)	11	约 0.6	0.65

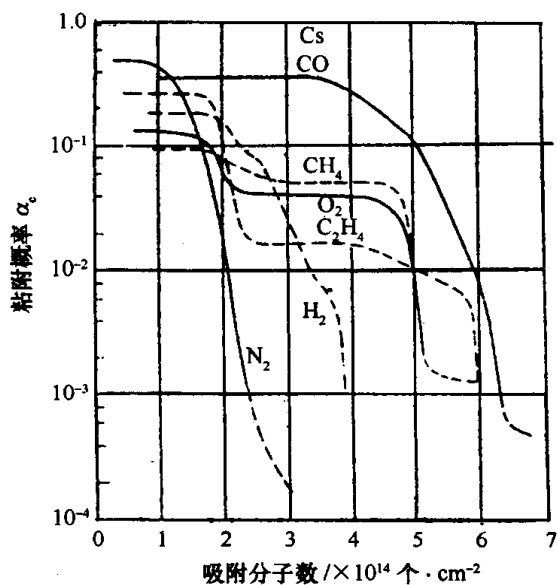


图 1-18 在 300K 时 W(111) 面上各种气体的粘附概率 α_c

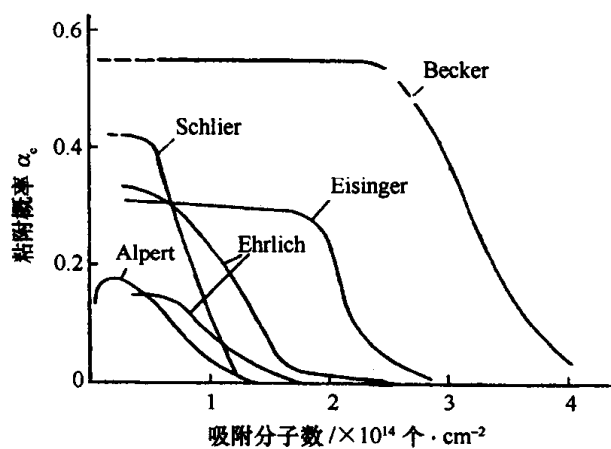


图 1-19 氮在钨上粘附概率 α_c (不同研究者研究结果比较)

2. 物理吸附速率

物理吸附速率 u_p 为

$$u_p = \Gamma_n \gamma F_p(\theta) \quad [\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1-96)$$

式中 $F_p(\theta)$ ——与没有物理吸附占据的吸附位碰撞概率;

Γ_n ——单位时间碰撞到单位面积上的分子数 $[\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$;

γ ——系数(即吸附的成功率)。

一般令

$$\alpha_p = \gamma F_p(\theta)$$

于是

$$u_p = \Gamma_n \alpha_p \quad [\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1-97)$$

α_p 即凝聚概率。各种气体的 α_p 值见表 1-25 至表 1-28。

表 1-25 各种气体 α_p 的近代测量结果

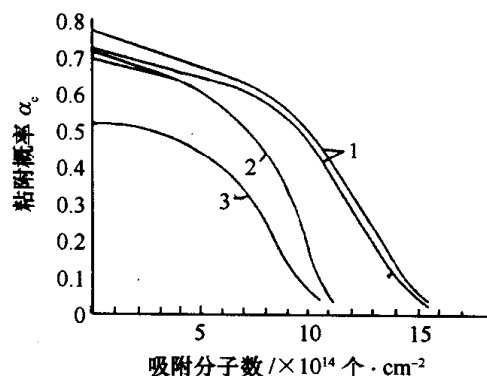
气 体		表 面		α_p
种 类	温度 /K	表面层	温度 /K	
H ₂	100 ~ 700	H ₂	3.2 ~ 39	0.7 ~ 0.59
He	4.2	5A 分子筛	4.2	0.7 ~ 0.9
N ₂	77 ~ 400	N ₂	10 ~ 25	0.5 ~ 1
CO	77 ~ 400	CO	10 ~ 25	0.73 ~ 1
O ₂	77 ~ 300	O ₂	20	0.86 ~ 1
CO ₂	150 ~ 400	CO ₂	10 ~ 77	0.49 ~ 1
Ar	77 ~ 1400	Ar	3.8 ~ 18	0.5 ~ 1
Kr	147 ~ 24	Kr	4.3 ~ 8	0.95 ~ 1
Xe	300	Mo	77 ~ 83	0.5
	124 ~ 230	Xe	4.2 ~ 8	0.95 ~ 1
	300	Mo	77 ~ 83	0.5
	300	Co	82	0.3 ~ 0.4

表 1-26 0 ~ 100℃ 玻璃表面各种气体的 α_p

气 体	0℃	50℃	100℃
He	0.24	0.17	0.13
Ne	0.484	0.408	0.340
H ₂	0.638	0.567	0.495
N ₂	0.812	0.761	0.704
O ₂	0.857	0.816	0.766
Ar	0.890	0.855	0.815

表 1-27 一些气体在 5A 型分子筛上(77K) 的凝聚概率

气 体	空 气	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂
凝聚概率 α_p	3.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}	4.8×10^{-3}	2.1×10^{-3}	约 0.4

图 1-20 在 300K 时铌膜上一氧化碳的粘附概率 α_c

1—沉积膜;2—测量前膜加热 10min 到约 400K;
3—测量前膜加热 10min 到约 460K。

表 1-28 气体在其本身冷冻层上的凝聚概率(表面温度 10K)

气 体	N ₂			Ar			CO			CO ₂			N ₂ O		
气体温度 /K	77	300	400	77	300	400	77	300	400	195	300	400	195	300	400
凝聚概率 α_p	1.0	0.65	0.49	1.0	0.68	0.50	1.0	0.90	0.73	1.0	0.75	—	1.0	0.63	0.50

3. 一级解吸速率

一级解吸速率为

$$\frac{d\sigma}{dt} = -V_1\sigma \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (1-98)$$

式中 σ ——单位面积吸附的分子数[m⁻²]; V_1 ——一级解吸速率常数, $V_1 = \frac{1}{\tau_0}$ [s⁻¹]; R ——摩尔气体常数, 8.31441 J/(mol · K); E_d ——解吸活化能[J/mol]; T ——热力学温度[K]; τ_0 ——吸附分子垂直于表面方向的振动周期, 约为 10⁻¹³s。一级解吸速率常数 V_1 及吸附热 q 见表 1-29。表 1-29 一级解吸速率常数 V_1 及吸附热 q

吸 附 质	表 面	吸附热 q /J · mol ⁻¹	V_1 /s ⁻¹
Na	W	2.633×10^5	5.13×10^{12}
K ⁺	W	2.462×10^5	3.31×10^{13}
Rb	W	2.512×10^5	4.0×10^{12}
Rb ⁺	W	1.834×10^5	2.9×10^{11}
Cs	W	2.696×10^5	1.75×10^{12}
Cs ⁺	W	1.972×10^5	0.88×10^{12}
Ba	W	3.651×10^5	3.85×10^{10}
H	W	2.805×10^5	2.2×10^{13}
O	W	6.155×10^5	1.25×10^{13}
Ar	玻璃	1.591×10^4	5.88×10^{13}

4. 二级解吸速率

在超高真空系统中许多化学活泼的双原子气体在金属表面上化学吸附时解离成原子态。其解吸速率称为二级解吸速率, 即

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = -\sigma_1^2 V_2 \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (1-99)$$

式中 σ_2 ——单位面积上吸附的分子数[m⁻²]; σ_1 ——单位面积上吸附的原子数[m⁻²]; E_d ——解吸活化能[J/mol]; V_2 ——二级解吸速率常数[m²/s]; R ——摩尔气体常数, 8.31441 J/(mol · K); T ——热力学温度[K]。二级解吸速率常数 V_2 和解吸活化能 E_d 见表 1-30。

表 1-30 二级解吸速率常数

气 体	相	表 面	$V_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$E_d/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
N_2	β	W	1.4×10^{-6}	3.391×10^5
H_2	β	W	5×10^{-7}	1.298×10^5
O_2	第一层	W	3×10^{-7}	4.438×10^5
O_2	第二层	W	2.5×10^{-7}	2.219×10^5

十四、低压下的气体放电现象

(一) 气体的电离

1. 有效截面

电子与分子碰撞时,设想分子是一球对称的势场,当电子从其附近飞过,只有在离势场中心小于某一距离 r_e 时势场才显著改变它的轨道。如以分子中心为圆心, r_e 为半径画一假想的球,则通过分子中心且垂直于电子运动方向的球的平截面称为有效截面。由于它是对单个分子(或原子)规定的,称为微观截面,用 σ_e 表示。此时,电子的自由程可表示为

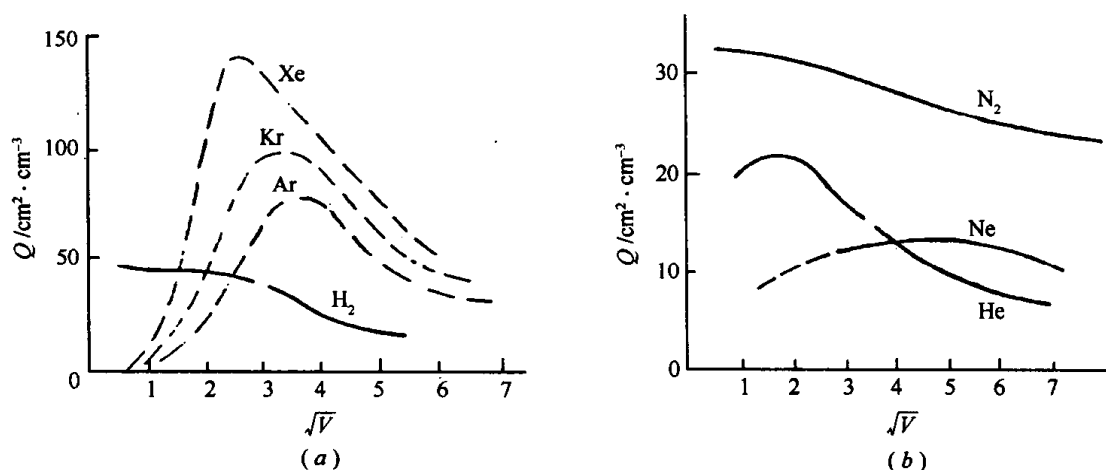
$$\lambda_e = \frac{1}{\sigma_e n} \quad (1-100)$$

经常使用的宏观截面或总有效截面的定义是: 1cm^3 体积中所有分子微观截面之总和,即 $\sigma_e n$, 称为总有效截面,简称总截面,用 Q 表示,即

$$Q = \sigma_e n = \frac{1}{\lambda_e} \quad (1-101)$$

总有效截面 Q 在物理意义上相当于一个电子在气体中经过单位路程能和气体分子(或原子)碰撞的概率。数值上等于气体的分子数密度 n 和微观截面 σ_e 之乘积,亦等于电子在气体中的平均自由程 λ_e 之倒数。

某些气体的总截面 Q 与电子速率的关系见图 1-21。

图 1-21 总截面 Q 与电子速率的关系(a) Xe, Kr, Ar, H_2 ; (b) N_2 , Ne, He。

2. 加速场下电子在极间的碰撞次数分布律

电子在加速场中能够不断获得能量由阴极飞往阳极。电子在路途中如与气体分子碰撞,改

变方向或损失能量之后,仍能够重新沿电场方向前进,即仍能参与后续过程,直至抵达阳极为止。电子从阴极飞抵阳极时遭遇碰撞 i 次的概率 $P\{i\}$ 为

$$\left. \begin{aligned} P\{i\} &= e^{-Y} \frac{Y^i}{i!} \\ Y^i &= \frac{d^i}{\lambda_e^i} \end{aligned} \right\} \quad (1-102)$$

式中 d ——阴极与阳极间的距离;

λ_e ——电子在加速场中运动时的平均自由程。

式(1-102)就是加速场下电子在电极间的碰撞次数分布律。这个分布在概率论中称为泊松分布,如图 1-22 所示。

N_0 个电子在电极间与气体分子发生碰撞的总次数 Z 为

$$Z = N_0 \sum_{i=0}^{\infty} iP\{i\} = N_0 \frac{d}{\lambda_e} \quad (1-103)$$

3. 电子碰撞气体引起的电离

电子与气体分子或原子碰撞时,如果电子能

量很低,往往不能引起分子或原子状态的变化,电子本身的能量变化亦很小,这就是弹性碰撞的情况。当电子能量足够高时,则碰撞会以某一概率引起气体分子或原子的激发或电离,这就是非弹性碰撞的情形。所谓激发,就是将原子或分子的一个外部价电子跃迁到较高的能级去的过程。在分子的情况,还可能是改变了它的转动能级或振动能级。所谓电离,就是一个或多个价电子脱离原子或分子的过程。原子电离后形成原子离子。分子电离后除了形成分子离子外,也有将分子离解而形成原子离子的。结构复杂的分子在遭受电子碰撞后常常分解为较简单的分子。

足以引起气体电离的电子能量叫电离能。电离能所对应的电位称电离电位。表 1-31 列出了一些气体(蒸气)的电离电位。

表 1-31 一些气体(蒸气)的电离电位

气体(蒸气)	电离电位 /V	气体(蒸气)	电离电位 /V
H ₂	15.427	Na	5.1
D ₂	15.46	K	4.3
He	24.5	Cs	3.9
Ne	21.5	CO	14.013
Ar	15.7	CO ₂	13.769
Kr	14.0	NH ₃	10.2
Xe	12.1	SO ₂	12.34
N ₂	15.576	H ₂ O	12.6
O ₂	12.063	HCl	12.74
F ₂	15.7	CH ₄	12.6
Cl ₂	11.48	C ₂ H ₂	11.4
Br ₂	10.54	C ₂ H ₄	10.5
I ₂	9.28	C ₆ H ₄	9.6
Hg	10.4	C ₂ H ₅ OH	10.49

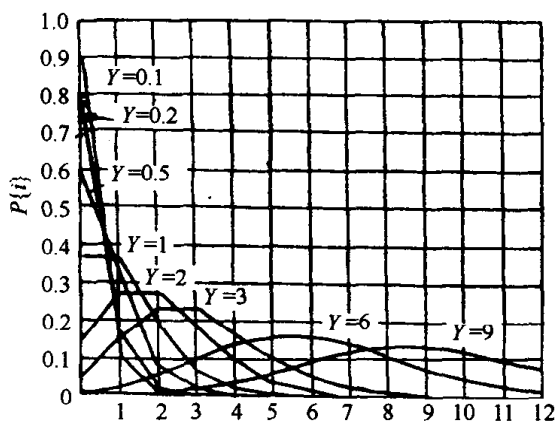


图 1-22 泊松分布多边形

在电离电位以上,也并不是每次碰撞都能引起电离,而仅仅有一部分能引起电离。引起电离的碰撞数与总碰撞数之比,就称为电离概率。电离概率与电子能量有关,通常先随电子能量增高而增大,达到最大值后逐渐下降。一些气体电离概率的实验曲线见图 1-23 与图 1-24。

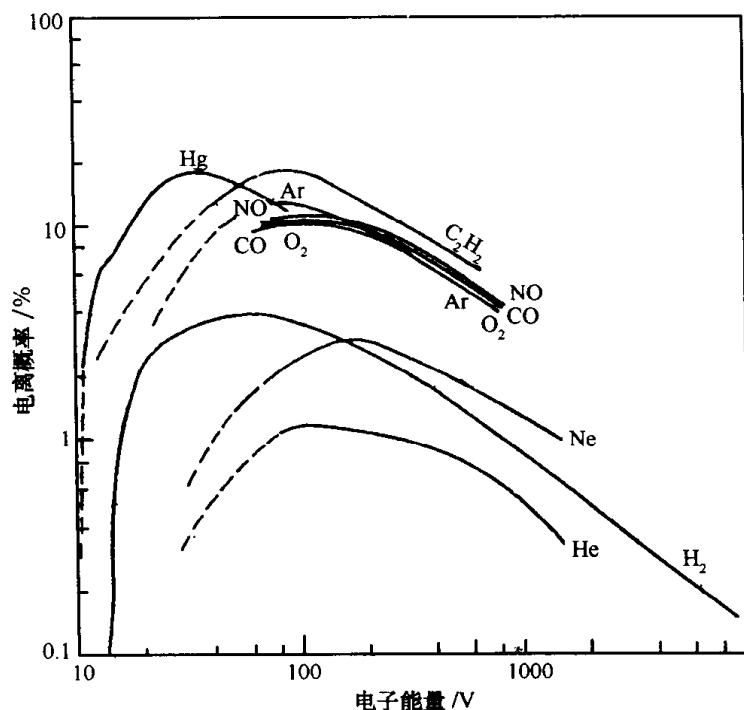


图 1-23 电离概率与电子能量的关系

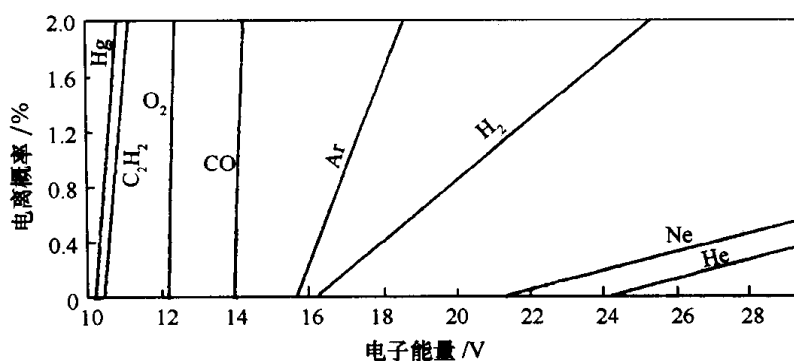


图 1-24 击穿电压附近的电离概率

(二) 气体放电

所谓气体放电,就是当气体原子或分子受到某种外界能量作用而形成荷电粒子(电子、正离子、负离子),气体变成导体,当有电场存在时,带电粒子便定向运动,产生了气体放电现象。

1. 气体放电的特点

① 气体本身不存在可以参与导电的带电粒子。气体导电是由于自然界存在的各种辐射线(紫外线、宇宙射线、放射性元素放射的 γ 射线等)的光子与气体分子碰撞,或参与导电的电子和正离子通过气体时和气体分子碰撞,而使气体分子电离的结果。

② 在恒定温度下,气体的电导率由电子密度 n 和平均自由程 $\bar{\lambda}_e$ 决定。它是随外界条件、电场强度 E 、气体的压力 p 等变化而变化的变量。

③ 电子从电场中获得的能量,主要可以转化为以下四种形式的能量:

- 通过和气体分子的弹性碰撞转化为分子热运动的能量;
- 通过激发碰撞转化为激发能;
- 通过电离碰撞转化为电离能;
- 通过和电极碰撞将能量转交给电极。

四种形式能量的分配与 $E\bar{\lambda}$ 或 E/p 的值有关,见表 1-32。

表 1-32 四种形式能量分配

$(E/p)/V \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$		2.25×10^{-3}	7.5×10^{-3}	2.25×10^{-2}	7.5×10^{-2}	2.25×10^{-1}	7.5×10^{-1}
四种能量所占的百分比/%	转化为分子热运动能量	100	60	8	0	0	0
	转化为激发能	0	40	90	84	56	44
	转化为电离能	0	0	2	10	28	32
	交给电极的能量	0	0	0	6	16	24

2. 气体放电的伏—安特性

平板电极之间气体放电的伏—安特性曲线,见图 1-25。

特性曲线各段的情况:OA 段是空间的自然带电粒子在电场作用下向电极移动时形成的电流;AB 段是原始带电粒子全部都到达电极时电流出现饱和的情况;BD 段是在继续增加电压,原始带电粒子的速度不断加大,这些粒子和中性气体分子碰撞,使之电离而产生繁衍过程亦即繁流(雪崩)放电的情况;D 点处管内电流突增,电压随即降低,管内出现可见光辉,D 点就称崩溃或着火;在 EF 段,不论增加电压或减小电阻而使电流增加时,管压保持恒定,这是正常辉光放电;在 FG 段,电流增大时管压随之增加,这是异常辉光放电;GH 段是放电电流增加到一定值后,电流继续增加,管压又一次迅速降低,且电流增加很大,这就是弧光放电,在弧光放电中具有负电阻效应。从放电的自持情况来看,OC 段属非自持放电;CD 段虽然开始满足了自持放电条件,但还是不稳定的自持放电;DE 段为过渡区;从 E 点开始,以后都是稳定的自持放电。

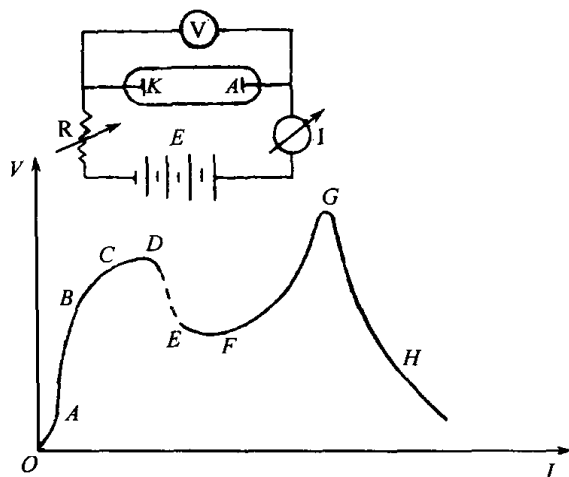


图 1-25 气体放电的伏—安特性

3. 着火电压和巴邢定律

当加在阴极与阳极之间的电压增大到某一数值时,放电从非自持放电转变为自持放电,放电电流会大幅度增大。非自持放电过渡到自持放电的突变过程称为崩溃(着火或点燃),对应的电压称为着火电压。

发生崩溃的条件是

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1-104)$$

或

$$\gamma(e^{\alpha V_s/E} - 1) = 1 \quad (1-105)$$

式中 α ——电离系数,即 1 个电子在电场方向经过 1cm 的路程中发生的电离碰撞数;

V_s ——着火电压;

E ——电场强度;

d ——两极间距离；
 γ ——二次发射系数。

着火电压相当于放电伏—安曲线上 D 点的电压,数值上决定于气体的压力 p 、极间距离 d ,即

$$V_s = f(pd) \quad (1-106)$$

这就是巴邢定律,即着火电压是气体压力 p 与极间距离 d 的乘积的函数。不论 p 与 d 本身的数值大小如何,只要 pd 的乘积不变, V_s 也不会改变。巴邢曲线如图 1-26 所示。

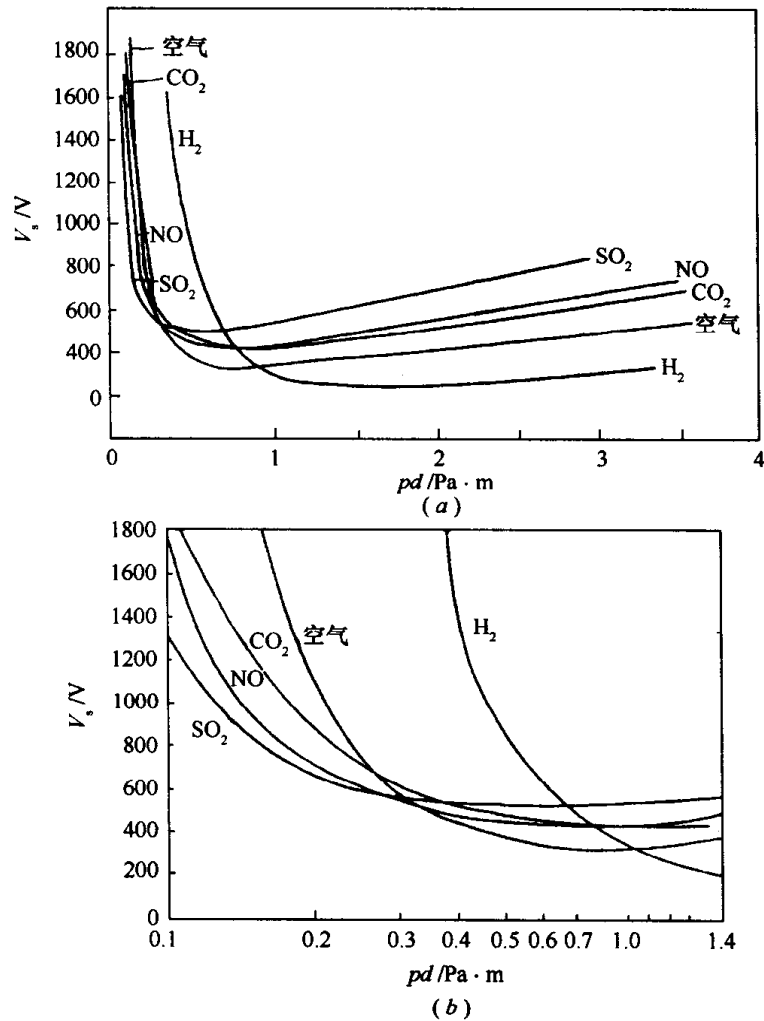


图 1-26 巴邢曲线

(a) 巴邢曲线; (b) pd 值在 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m} \sim 1.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 附近的扩大图。

由巴邢曲线可知,着火电压先随 pd 值的增加而降低,当达到一个最小值后又随 pd 值的增加而增加。各种不同电极材料在各种气体情况下最低的着火电压与相关的 pd 值见表 1-33。

表 1-33 最低着火电压 $(V_s)_{\min}$ 与相关的 $(pd)_{\min}$ 值

气 体	阴极材料	$(V_s)_{\min}/\text{V}$	$(pd)_{\min}/\text{Pa} \cdot \text{m}$
He	Fe	150	3.33
Ne	Fe	240	4.00
Ar	Fe	265	2.00

(续)

气 体	阴极材料	$(V_s)_{\min}/V$	$(pd)_{\min}/Pa \cdot m$
N ₂	Fe	275	1.00
O ₂	Fe	450	0.93
空气	Fe	330	0.76
H ₂	Pt	295	1.67
Hg	W	425	2.40
Hg	Fe	520	2.67
Hg	Hg	330	—
Na	Fe	335	0.053
Ne + 0.01 % Ar	Fe - Ni	105	—
Ne + 0.01 % Ar	Fe - Ba	65	—
Ne + 0.01 % Ar	Ni - Cs	341	—

(三) 辉光放电

辉光放电是在满足着火条件后立即发生的一种自持辉光放电。它的显著特点是从阴极至负电辉区有几百伏左右的电位变化。

辉光放电分正常辉光放电和异常辉光放电。放电开始时,辉光只覆盖一部分阴极表面,这就是正常辉光放电。随着放电电流的增加,辉光逐渐扩展到整个阴极表面,这就是异常辉光放电。

辉光放电的整个放电空间为明暗相间的光层所分隔,而最大多数的光层分布在紧靠阴极的地方。图 1-27 示出了辉光放电的形貌及各种参量的分布情况。

辉光放电空间可分为几个区域:

区域 I——阿斯顿暗区,不发生电离和激发;

区域 II——阴极辉区,气体分子激发发光;

区域 III——阴极暗区,产生很强电离,具有很高正离子浓度,有较强的空间电荷;

区域 I、II、III 总称阴极位降区,是辉光放电的特征区域;

区域 IV——负辉区,光度最强,有较

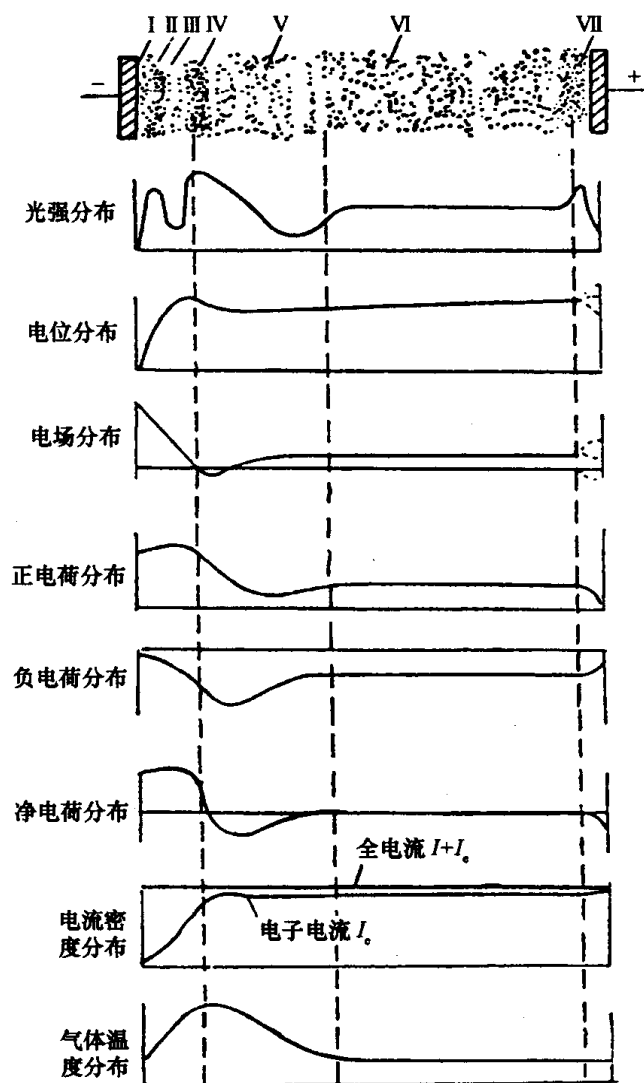


图 1-27 辉光放电形貌及参量分布

强的负空间电荷；

区域 V——法拉第暗区, 电离和激发都很小；

区域 VI——正柱区, 等离子区；

区域 VII——阳极区, 该区的存在与否决定于外线路电流大小、阳极面积和形状。

辉光放电的应用很广, 如利用辉光作光源(日光灯、霓虹灯、钠光灯); 利用辉光放电奇异的伏—安曲线作成各种辉光电真空器件(稳压管、整流管、闸流管、放电保险管等); 利用辉光放电中正离子轰击阴极现象作镀膜机的蒸发热源及其它阴极溅射设备; 利用辉光放电的理论基础而发展的辉光离子氮化技术(真空离子氮化炉)。

(四) 弧光放电

弧光放电是一种低电压、大电流的放电。它是当异常辉光放电达到峰值以后, 如果电流继续增加, 放电电压将迅速降低。当电流增加到 1A 以上时, 电压将下降到 40V 左右, 这时, 阴极遭到离子的强烈轰击后, 温度升高并产生阴极蒸发, 在阴极附近极薄的范围内产生很高的气压, 形成极强的正空间电荷层, 因而产生热电子发射或强电场发射, 放电管中将出现耀眼的弧光, 这就是弧光放电。由于弧光放电的电子发射很有效, 只要很小的发射面积就能产生很大的电流, 因此, 发射电子只是温度最高、电场最强或逸出功最低的很小阴极部分, 因而, 弧光放电有一很小而极亮的辉点。辉点电流密度高达数千安每平方厘米以上。某些阴极弧光放电时辉点电流密度, 见表 1-34。表中“真空”实际上是在该阴极材料的蒸气中。

表 1-34 弧光放电时辉点的电流密度

电 极	C	C	Fe	Cu	Cu	Hg
气 体	空气	N ₂	N ₂	空气	真空	真空
电流密度 /A · cm ⁻²	470	500	7000	3000	14000	4000

弧光放电时的电位分布见图 1-28。它和辉光放电时的电位分布很相似。两者的差别在于: 弧光放电时阴极位降区的宽度比辉光放电时小很多(一般只有几个平均自由程), 负辉区和法拉第暗区已消失, 阴极位降区直接向正柱区过渡。弧区的温度很高, 气体分子的电离和激发很强, 形成电荷密度较大的等离子区。阳极位降区的电位降比辉光放电时大。

根据阴极释放电子的方式不同, 弧光放电可分为热电弧光、场致弧光和热电子弧光三类。热电弧光是由难熔金属(如钨)阴极, 在离子的轰击下达到很高的温度后产生的热电子发射引起的; 场致弧光是利用蒸发温度低的物质作阴极(如汞阴极), 阴极受高速正离子的轰击后引起大量阴极物质的蒸发, 因而在阴极表面形成强电场, 在强电场的作用下, 使阴极表面产生场致发射, 所以又叫冷电弧。热电子弧光则是将阴极改用热阴极(氧化物阴极)。当阴极加热时获得大量的热电子发射而产生弧光放电, 这种放电称为热电子弧光。

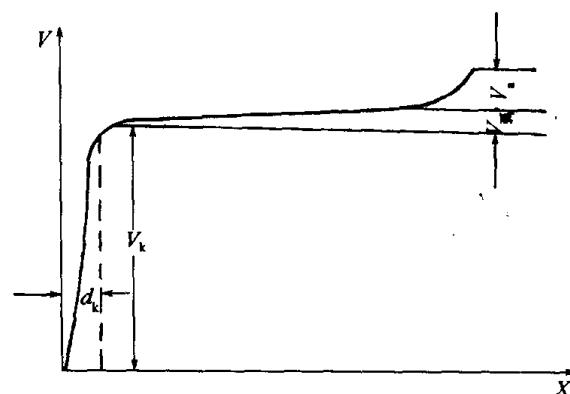


图 1-28 弧光放电的电位分布
 d_k —阴极位降区宽度; V_k —阴极位降;
 V_a —阳极位降; $V_{\text{弧}}$ —弧区位降。

弧光放电有三个主要特点: ① 有很高的温度, 利用它可作为热源来熔化金属、焊接金属。

② 有很强烈的弧光,利用它可制做成各种电光源用于照明、显示、防空等;③ 大电流、小电压,有负电特性,利用这一原理可制造电弧炉等设备。

(五) 火花放电

在大气压下,由非自持放电向自持放电过渡时,如果电源功率不足以产生和维持稳定的弧光放电时,那么依不同的放电间隔形状就会产生火花放电或电晕放电。而在频率较高的交变电场作用下,将产生高频放电。如果气体在电场和磁场联合作用下,电子在一特定空间作一定轨迹的运动,形成潘宁放电。

火花放电是一束明亮曲折而又分叉的细丝,它们很快地穿过放电间隙,又很快地熄灭,并且总是一个接一个地交替着。发亮的细丝常常在放电间隔中间任意地点中断而达不到对面的电极。放电的路径有时从负电极开始发展,有时从正电极开始发展,有时从放电间隔中间某一点开始发展。

火花放电是在很大的气压下发生,因此,着火电压很高。当放电间隔被击穿后,放电间隔内只有很小的电压。如果电源没有足够的功率,短时间的强大电流脉冲在火花路径里通过后放电马上终止,电极间的电压又上升到原来的值,此时又重新发生火花放电。火花放电是一种短时间的快速放电,从施加电压到电火花形成可以不超过 10^{-7} s。电压升高的时间随火花隙电极间的电容的增加而加长。

由于火花放电有它的特点,在工业生产中也有不少应用。如:① 火花放电是在一定的高压下出现的,因此,火花的出现便可作为两极间的电压达到某一高压的标志,在高压试验中便可用来测高压。② 当两极间的距离一定,供给的电功率一定时,两次火花放电之间的时间间隔是一定的,因此,可利用它来记录时间。③ 当外界带电粒子在放电气体中出现时,火花放电会得到加强。利用这一特点可制造测定放射性强度的计数仪等。④ 利用火花放电原理制造火花检漏仪。

(六) 电晕放电

在高的气压下,由于一个或两个电极表面曲率半径很小,以致放电间隔的电场非常不均匀时就会发生电晕放电。电晕放电发生在靠近曲率半径小的电极的很薄的一层里,该层称为电晕层。电晕放电的电流强度决定于加在电极间的电压、电极的形状和极间距离、气体的性质和密度,不需要外界的电离源来维持放电,所以,电晕放电是一种自持放电。但是,电晕放电的电流不取决于外电路的电阻,而决定于放电外围区域的电导。电晕有正负电晕之分,在阴极附近形成的电晕称为负电晕,在阳极附近形成的电晕称为正电晕。负电晕中的放电过程和辉光放电中阴极位降区的放电过程相似,自持条件是由阴极发射出的二次电子来保证的。正电晕是由繁衍过程所引起的自持放电,自持条件是由电晕层中由于激发所产生的光子轰击电晕外围原子的光电离来保证的。

电晕放电在工业生产中的应用也不少,如静电除尘器、电晕放电计数管、电晕放电高压稳压管等。

(七) 高频放电

高频放电就是当两个电极间有高频交变电场存在时所引起的放电形式。

当放电管两端加上交变电压时,气体中的电子和正离子便在交变电场作用下产生附加的

谐振动。因正离子质量比电子大得多,谐振动振幅很小。当频率较低,谐振动的振幅远大于两极间的距离时,电子在每个半周期中都经过崩溃、放电、熄灭的全过程,这时的放电情况和直流情况一样。当频率较高时,谐振动的振幅远小于两极间的距离时,由于电子不断地来回运动,其电离能力将大大加强。因电子谐振动的振幅很小,进入电极的电子数量将大大减少。这样,保证气体自持放电的电子将不再由电极产生的二次电子来提供,而是由电子来回运动时由电离产生的电子来提供。这时虽然也有少量正离子、光子轰击电极产生二次电子,但由于两个电极的极性不断发生变化,二次电子的振动方向有时与进入电极的电子流方向相同,有时相反。因此它对保证自持条件并不有利。

这种高频放电,只要有高频电场便可形成,不一定需要电极,所以一般又称无极放电。无极放电不仅能在交变的电场下形成,而且可以在交变磁场下形成。因交变磁场能产生涡旋电场,气体中由于残余电离产生的电子在涡旋电场的作用下围绕磁力线作加速运动,由此产生大量电离。当磁场方向沿放电管的轴线方向时,涡旋电场将沿半径方向逐渐减弱,电子的电离能力也沿半径方向减弱,因而形成了沿半径方向的电子与离子的浓度梯度。在浓度梯度的作用下,电子和离子从轴线向管壁扩散。由于电子扩散比离子快,扩散结果,在轴线处出现正电位,在管壁处出现负电位,这样又产生了由轴线指向管壁的静电场。因此,放电管中存在两种电场,一是围绕磁力线的涡旋电场,一是从轴线指向管壁的静电场。电子在这两个电场的同时作用下,一面围绕轴线运动,一面向管壁扩展,结果形成一系列的同轴光环。由于不同半径上电子的能量不同,激发的能级和数量不同,因此半径不同的光环,具有不同的颜色。

高频放电时的着火电压是放电发生时加在电极上的交变电位差的振幅。这个电压的振幅比直流放电的着火电压低。高频击穿电场强度与气压有关。气压愈高,击穿电场强度也愈大,击穿时的频率也愈高。

高频放电在雷达和脉冲技术方面有广泛的应用。

(八) 潘宁放电

潘宁(Penning)放电是气体在电场和磁场联合作用下,使电子在较长的一段时间内,局限在某一空间内运动所形成的一种放电类型。潘宁放电装置如图1-29所示。阳极A是一圆筒,阴极K是位于圆筒两端面处的垂直轴线的两块平板,磁场B的方向是沿圆筒轴线方向。

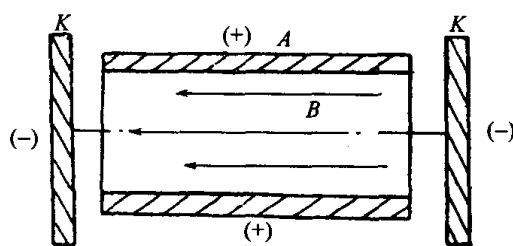


图1-29 潘宁放电装置

在放电装置中,电子的运动受到两个方面的限制:一是外加电场对它轴向运动的限制,当电子沿轴向运动到两端面附近时将受到阴极的强大斥力,使它不致沿轴向逸出端面;一是磁场对它半径方向运动的限制,电子在均匀磁场作用下围绕磁力线作圆周运动,它将限制电子向阳极运动。电子在这两种力的同时作用下,会长时间地在圆筒内作螺旋形的来回运动。它必然会因和气体分子多次发生碰撞而使大量气体分子电离,结果在圆筒内形成空间电荷。这样,圆筒内不仅有外加电磁场,而且有空间电荷的电磁场,情况比较复杂。但是只要单位时间进入阳极的电子数和因电离而产生的新电子数相等,就会达到动态平衡状态,气体将出现稳定的自持放电。所以,只要一个电子从形成开始到进入阳极消失为止能和一个气体分子发生一次电离碰撞,即能满足自持放电条件。而一个电子由于电磁场对其运动的限制,它在空间运动的时间是很长的,所以即使真空度很高、空气很稀薄,亦能满足自持条件,这是潘宁放电区别于其它放电

的基本特点。

潘宁放电的主要优点是：

- ① 这种放电过程完全不需热阴极,因而在真空系统中不怕因突然暴露大气而氧化甚至烧毁;
- ② 没有因高温钨丝而产生的化学清除效应而影响真空仪器或泵等装置的准确读数和性能;
- ③ 无需控制电子发射;
- ④ 放电线路和装置简单。

但是,潘宁放电的最大弱点是不易启动。

潘宁放电在真空技术中已应用在冷阴极电离真空计、冷阴极溅射离子泵等方面。

第二章 管道流导计算

一、气体流量、流阻、流导的基本公式

气体流量、流阻、流导的基本公式见表 2-1。

表 2-1 气体流量、流阻、流导的基本公式

项 目	意 义	公 式
气体量	气体的压力与其体积的乘积	$G = pV$ (2-1)
流量	单位时间内通过某一截面的气体量	$Q = \frac{pV}{t}$ (2-2)
		$Q = U(p_1 - p_2)$ (2-3)
		$Q = pS$ (2-4)
流量连续方程	在稳定流动状态下,单位时间内流过真空系统任一截面的气体量(流量)相等	$Q = p_1 S_1 = p_2 S_2 = \dots = p_i S_i$ (2-5)
流阻	气体通过管道时产生的阻力称为流阻,即管路两端的压力差与通过管路的流量之比	$W = \frac{p_1 - p_2}{Q}$ (2-6)
管道串联流阻	总流阻等于各段流阻之和	$W = W_1 + W_2 + \dots + W_i$ (2-7)
管道并联流阻	总流阻的倒数等于各分支流阻倒数之和	$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \dots + \frac{1}{W_i}$ (2-8)
流导	真空管道、孔及挡板、阱、阀门等元件传输气体的能力。与流阻是倒数关系	$U = \frac{1}{W} = \frac{Q}{p_1 - p_2}$ (2-9)
管道串联的流导	总流导的倒数等于各段流导倒数之和	$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_i}$ (2-10)
管道并联的流导	总流导等于各分支流导之和	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_i$ (2-11)
注:表中符号及单位: G —气体量[Pa·m ³ 或 Pa·L]; t —时间[s]; S —抽速[m ³ /s或 L/s]; p —压力[Pa]; Q —流量[Pa·m ³ /s或 Pa·L/s]; W —流阻[s/m ³ 或 s/L] V —气体体积[m ³ 或 L]; U —流导[m ³ /s或 L/s];		

二、流量单位

法定计量单位的流量导出单位为 Pa·m³/s 或者 Pa·L/s。考虑到查阅已往真空技术资料方便,在附录中给出了流量换算关系。

三、应用列线图 and 曲线计算管道串联时的流导和泵的有效抽速

应用列线图 2-1 及曲线图 2-2, 可计算两个管道串联时的流导及泵的有效抽速。

1. 应用列线图计算泵的流导

例 1 流导为 20L/s 的一直管接到一个流导为 30L/s 的弯管上, 求串联后的总流导?

如图 2-1 所示, 在 OA 线上取 $U_1 = 20$, 在 OC 线上取 $U_2 = 30$, 20 和 30 两点间连一直线与 OB 线相交于一点, 该交点所示值即为总流导值。由图可知总流导值为 $U_3 = 12\text{L/s}$ 。

应用图 2-1 计算流导时, 三条分度线上应该使用相同单位。

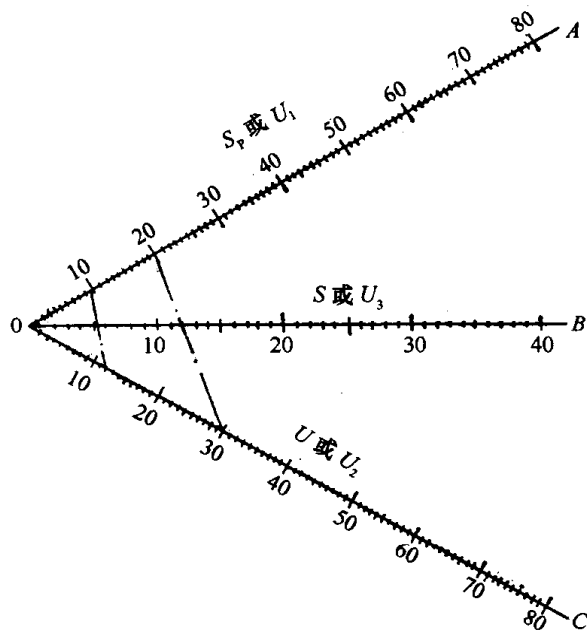


图 2-1 计算串联流导和有效抽速的列线图

2. 应用曲线图计算泵的流导

例题同上。

如图 2-2 所示, 首先求出 $\frac{U_2}{U_1} = \frac{30}{20} = 1.5$, 在 $\frac{U_2}{U_1}$ 的横坐标线上, 找到 1.5 的点, 由此点做横坐标的垂线与曲线相交于一点, 再由该点做与横坐标相平行的线并交于纵坐标线 $\frac{U_3}{U_1}$ 上一点, 由图可见该点值为 0.6, 即 $\frac{U_3}{U_1} = 0.6$, 由此可算出总流导

$$U_3 = 0.6U_1 = 0.6 \times 20 = 12 \text{ L/s}$$

3. 应用列线图计算泵的有效抽速

例 2 一直管道的流导为 30L/s , 一机械泵的抽速为 20L/s , 计算其有效抽速。

因为管道流阻的影响, 使泵的抽速减小, 用图 2-1 计算泵的有效抽速。

在 OA 线上取机械泵抽速 $S_p = 20\text{L/s}$, 在 OC 线上取管道流导 $U = 30\text{L/s}$, 20 和 30 两点间连一直线与 OB 线相交于一点, 该点即为有效抽速值, 由图可知有效抽速 $S = 12\text{L/s}$ 。

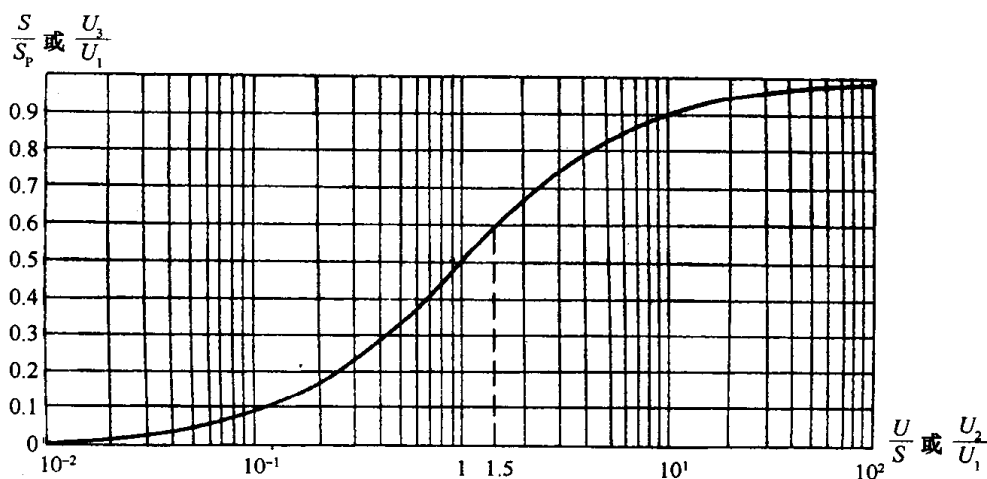


图 2-2 计算串联流导及有效抽速曲线图

四、气体沿管道的流动状态

气体沿管道的流动状态可分为四种：湍流、粘滞流、粘滞—分子流和分子流。

(一) 湍流

当气体的压力和流速较高时，气体流动是惯性力在起作用，气体流线不直，也不规则，而是处于旋涡状态（如图 2-3 所示），即旋涡时而出现、时而消失。管路中每一点气体的压力和流速随时间而变化。气体分子的运动速度和方向与气流的平均速度和气流的方向大致相同。试验证明，管道中气体的流量与气体压力梯度的平方根成正比，即 $Q \propto \sqrt{dp/dx}$ 。

湍流仅在气体开始运动的一瞬间才出现，粗抽泵在大气压附近工作时就会形成湍流。除了特别大的真空系统外，一般湍流持续的时间很短。因而，计算时通常不考虑这一流动状态。

(二) 粘滞流

粘滞流出现于气体压力较高、流速较小的情况下，通常发生在低真空管路中。它的惯性力很小，气体的内摩擦力起主要作用。此时，流线的方向变为直线，只是在管道的不规则处稍许弯曲，如图 2-4。管道中气体的流量与压力梯度成正比，即 $Q \propto \rho \frac{dp}{dx}$ 。



图 2-3 湍流

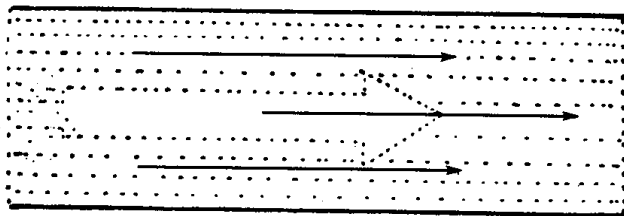


图 2-4 粘滞流

管壁附近的气体几乎不流动，一层气体在另一层气体上滑动，流速的最大值在管道的中心。气体分子的平均自由程比管道截面线性尺寸小得多。

(三) 分子流

分子流出现于管道内压力很低时,一般出现于高真空管道中。此时气体分子的平均自由程 $\lambda > d$ (管道直径),分子之间碰撞次数很少,主要与管壁发生碰撞。每次碰撞之后,分子向前或向后运动。经数次碰撞之后,有的分子由低压端离开管道出口;有的分子返回到高压端,如图 2-5 所示。



图 2-5 分子流

(四) 粘滞 — 分子流

介于粘滞流和分子流之间的流动状态称为粘滞 — 分子流。

(五) 湍流与粘滞流的判别

气体的流动状态是湍流还是粘滞流可以用雷诺数 Re 来判别

$$Re > 2200 \quad \text{为湍流}$$

$$Re < 1200 \quad \text{为粘滞流}$$

$$1200 < Re < 2200 \quad \text{为湍流或粘滞流}$$

后者状态取决于管道出口压力。鉴于这一过渡状态时间很短,作为近似计算,此状态可以认为是湍流。而雷诺数 Re 是由下列公式确定的

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta} \quad (2-12)$$

式中 w ——气体流速[m/s];
 d ——管道当量直径,对于圆管道即为几何直径[m];
 ρ ——气体密度[kg/m³];
 η ——气体粘滞系数[kg/(m·s)]。

若管道直径为 d ,通过的气体流量为 Q ,则

$$Q \geq 1.44 \times 10^4 \left(\eta \frac{T}{M} \right) d \quad \text{湍流} \quad (2-13a)$$

$$Q \leq 7.84 \times 10^3 \left(\eta \frac{T}{M} \right) d \quad \text{粘滞流} \quad (2-13b)$$

式中 Q ——气体流量[Pa·m³/s];
 d ——管道直径[m];
 η ——气体粘滞系数[N·s/m²];
 T ——气体温度[K];

M ——气体摩尔质量[kg/mol]。

对于 20°C 的空气, $\eta = 1.829 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s/m}^2$, 则

$$Q \geq 2.67d \quad \text{湍流} \quad (2-13c)$$

$$Q \leq 1.45d \quad \text{粘滞流} \quad (2-13d)$$

而 $2.67d \geq Q \geq 1.45d$ 时, 则为湍流到粘滞流的过渡状态, 此状态时间甚短, 常以湍流计。

(六) 粘滞流、粘滞 — 分子流和分子流的判别

① 根据管道中气体的平均压力和管道直径的乘积来判别:

$$\bar{p}d > 0.67 \text{Pa} \cdot \text{m} \quad \text{为粘滞流} \quad (2-14a)$$

$$\bar{p}d < 0.02 \text{Pa} \cdot \text{m} \quad \text{为分子流} \quad (2-14b)$$

$$0.02 \text{Pa} \cdot \text{m} < \bar{p}d < 0.67 \text{Pa} \cdot \text{m} \quad \text{为粘滞 — 分子流} \quad (2-14c)$$

② 根据气体分子的平均自由程和管道直径比来判别:

$$\frac{d}{\bar{\lambda}} > 100 \quad \text{为粘滞流} \quad (2-15a)$$

$$\frac{d}{\bar{\lambda}} < 1 \quad \text{为分子流} \quad (2-15b)$$

$$1 < \frac{d}{\bar{\lambda}} < 100 \quad \text{为粘滞 — 分子流} \quad (2-15c)$$

式中 \bar{p} ——管道中平均压力[Pa], 即入口压力与出口压力的平均值;

d ——管道直径[m];

$\bar{\lambda}$ ——气体分子的平均自由程[m]。

真空工程计算中可以粗略地判别分子流和粘滞流, 通常认为高真空管路中的流动状态为分子流, 低真空管路中的流动状态为粘滞流。

五、粘滞流时孔的流导

如图 2-6 所示, 孔的面积为 A_0 , 当 $x_c = x \leq 1$ (x_c 为压力比的临界值, 对于空气, $x_c = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = 0.525$) 时, 气体通过小孔的流量及管道的流导分别为

$$Q_n = \sqrt{\frac{2r}{r-1} \frac{RT}{M}} x^{1/\gamma} \sqrt{1 - x^{(\gamma-1)/\gamma}} p_1 A_0 \quad (2-16)$$

$$U_n = \sqrt{\frac{2r}{r-1} \frac{RT}{M}} x^{1/\gamma} \sqrt{1 - x^{(\gamma-1)/\gamma}} \frac{1}{1-x} A_0 \quad (2-17)$$

20°C 的空气通过小孔的流量

$$Q_{n, 20^\circ\text{C}} = 766 x^{0.712} \cdot \sqrt{1 - x^{0.288}} p_1 A_0 \quad (2-16a)$$

当 $x \leq 0.525$ 时,

$$Q_{n, 20^\circ\text{C}} = 220 p_1 A_0 \quad (2-16b)$$

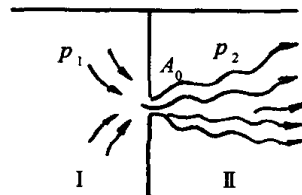


图 2-6 气体通过小孔

粘滞流状态下小孔对 20℃ 空气的流导：

当 $1 \geq x \geq 0.525$ 时

$$U_{n,20^\circ\text{C}} = 766x^{0.712} \cdot \sqrt{1-x^{0.288}} \cdot \frac{A_0}{1-x} \quad (2-17a)$$

当 $0.1 \leq x \leq 0.525$ 时

$$U_{n,20^\circ\text{C}} \approx \frac{200A_0}{1-x} \quad (2-17b)$$

当 $x < 0.1$ 时

$$U_{n,20^\circ\text{C}} \approx 200A_0 \quad (2-17c)$$

式中 Q_n ——粘滞流时气体通过小孔的流量[Pa·m³/s]；
 $Q_{n,20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时 20℃ 空气通过小孔的流量[Pa·m³/s]；
 U_n ——粘滞流状态下小孔的流导[m³/s]；
 $U_{n,20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流状态下小孔对 20℃ 空气的流导[m³/s]；
 R ——摩尔气体常数, 8.3143J/(K·mol)；
 T ——气体温度[K]；
 M ——气体摩尔质量[kg/mol]；
 A_0 ——小孔面积[m²]；
 γ ——绝热指数($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, c_p 为比定压热容, c_v 为比定容热容)；
 x ——压力比($x = \frac{p_2}{p_1}$)；
 p_1 ——I 区压力[Pa]；
 p_2 ——II 区压力[Pa]。

在各种压力比下, 孔对于 20℃ 空气的比流导见表 2-2。

表 2-2 粘滞流状态、各种压力比下的孔对 20℃ 空气的比流导

$x = \frac{p_2}{p_1}$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.525	0.5	0.3	0.1	< 0.03
$\frac{U_{n,20^\circ\text{C}}}{A_0} / [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$	∞	123	80	62	49	42	40	29	22	20

六、分子流时孔的流导

(一) 圆孔

气体通过圆孔(见图 2-7) 的流量为

$$Q_{o,f} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} (p_1 - p_2) A_0 =$$

$$1.15 \sqrt{\frac{T}{M}} (p_1 - p_2) A_0 =$$

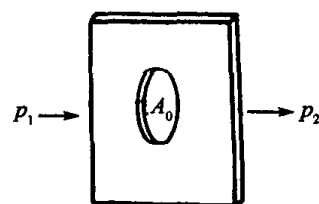


图 2-7 圆孔

$$0.9\sqrt{\frac{T}{M}}(p_1 - p_2)d^2 \quad (2-18)$$

20℃ 空气通过圆孔的流量

$$Q_{o.f.20^\circ\text{C}} = 116(p_1 - p_2)A_0 \quad (2-18a)$$

圆孔的流导

$$U_{o.f} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}}A_0 = 1.15\sqrt{\frac{T}{M}}A_0 = 0.9\sqrt{\frac{T}{M}}d^2 \quad (2-19)$$

对 20℃ 空气,圆孔的流导

$$U_{o.f.20^\circ\text{C}} = 116A_0 = 91.2d^2 \quad (2-19a)$$

对摩尔质量为 M 的 20℃ 气体,圆孔的流导

$$U_{o.f} = \frac{19.7}{\sqrt{M}}A_0 = \frac{15.5}{\sqrt{M}}d^2 \quad (2-19b)$$

式中 $Q_{o.f}$ ——分子流时,气体通过圆孔的流量[Pa·m³/s];
 $Q_{o.f.20^\circ\text{C}}$ ——分子流时,20℃ 空气通过圆孔的流量[Pa·m³/s];
 $U_{o.f}$ ——分子流时,圆孔的流导[m³/s];
 $U_{o.f.20^\circ\text{C}}$ ——分子流时,圆孔对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 R ——摩尔气体常数,8.3143J/(K·mol);
 T ——气体温度[K];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol];
 P_1, P_2 ——分别为孔两侧的气体压力[Pa];
 A_0 ——圆孔的面积[m²];
 d ——圆孔直径[m]。

(二) 矩形薄壁窄缝

矩形薄壁窄缝(见图 2-8)的流导

$$U_f = 3.638K_j ab \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-20)$$

对 20℃ 空气,矩形薄壁窄缝的流导

$$U_{f.20^\circ\text{C}} = 11.6K_j ab \quad (2-20a)$$

式中 U_f ——分子流时矩形薄壁窄缝的流导[L/s];
 $U_{f.20^\circ\text{C}}$ ——分子流时,矩形薄壁窄缝对 20℃ 空气的流导[L/s];
 a, b ——分别为矩形的两个边长[cm];
 L ——矩形薄壁窄缝的厚度[cm];
 T ——气体温度[K];
 K_j ——矩形窄缝的形状系数,数值见表 2-3。

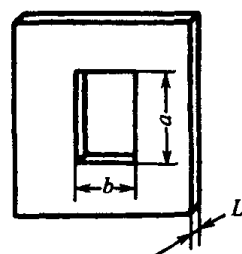


图 2-8 矩形薄壁窄缝

表 2-3 矩形窄缝形状系数 K_j 值

L/b	0	0.1	0.2	0.4	0.8	1.0	1.5
K_j	1.000	0.9525	0.9096	0.8362	0.7266	0.6846	0.6024
L/b	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	∞	
K_j	0.5417	0.4570	0.3999	0.3582	0.2457	$\frac{b}{L} \ln \frac{L}{b}$	

(三) 管道中隔板上的小孔

管道中隔板(见图 2-9)上小孔的流导

$$U_f = \frac{K_0}{1 - (A_0/A_g)} U_{o.f} \quad (2-21)$$

式中 U_f ——分子流时管道中隔板上小孔的流导 [m^3/s];
 $U_{o.f}$ ——分子流时圆孔的流导 [m^3/s], 见公式(2-19);
 A_0 ——小孔的面积 [m^2];
 A_g ——管道的截面积 [m^2];
 K_0 ——形状系数, 其值见表 2-4。

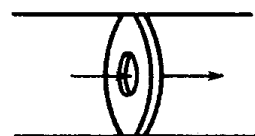


图 2-9 管道中隔板上的小孔

表 2-4 管道中小孔的形状系数 K_0 值

d_0/d_g	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
K_0	1.002	1.007	1.017	1.030	1.049	1.074	1.107	1.152	1.216	1.333

注: d_0 为小孔直径[m]; d_g 为管道直径[m]

(四) 缩孔

缩孔(见图 2-10)的流导

$$U_f = 2.87 \frac{d_1^2 d_2^2}{d_1^2 - d_2^2} \sqrt{\frac{T}{M}} = 3.64 \frac{A_1 A_2}{A_1 - A_2} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-22)$$

对于 20℃ 空气, 缩孔的流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 9.1 \frac{d_1^2 d_2^2}{d_1^2 - d_2^2} = 11.6 \frac{A_1 A_2}{A_1 - A_2} \quad (2-22a)$$

式中 U_f ——缩孔流导 [L/s];
 $U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——缩孔对 20℃ 空气的流导 [L/s];
 d_1 ——大端管道直径 [cm];
 d_2 ——小端管道直径 [cm];
 A_1 ——大端管道截面积 [cm^2];
 A_2 ——小端管道截面积 [cm^2];
 T ——气体温度 [K];
 M ——气体摩尔质量 [g/mol].

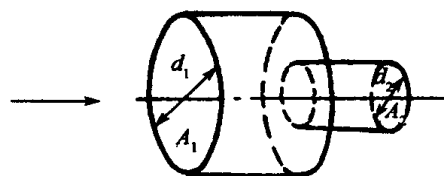


图 2-10 缩孔

七、粘滞流时管道的流导

(一) 圆截面长管

粘滞流时圆截面长管道 ($L > 20d$) 的流量公式, 由简便的泊稷叶方程解出, 此特解在下述四个假设条件下才成立: ① 速度分布剖面与位置无关; ② 粘滞流; ③ 器壁处的速度为零; ④ 气体的马赫数小于 0.3。由此导出的流量公式为

$$Q_n = \frac{\pi d^4}{128 \eta L} \frac{(p_1 + p_2)}{2} (p_1 - p_2) \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}] \quad (2-23)$$

流导由此式导出, 即

$$U_n = \frac{\pi d^4}{128 \eta L} \bar{p} \quad (2-24)$$

对 20℃ 空气的流导

$$U_{n, 20^\circ\text{C}} = 1.34 \times 10^3 \frac{d^4}{L} \bar{p} \quad (2-24a)$$

式中 U_n ——长管道的流导 [m^3/s];

$U_{n, 20^\circ\text{C}}$ ——长管对 20℃ 空气的流导 [m^3/s];

d ——管道直径 [m];

L ——管道长度 [m];

η ——气体粘滞系数 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$];

\bar{p} ——管道中平均压力 [Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端气体压力 [Pa]。

各种直径的管道在粘滞流下对 20℃ 空气的流导见图 2-11 和图 2-12, 曲线对长管短管均适用。

例 圆管道长 100cm, 直径 2cm, 管道入口处真空度为 9Pa, 管道出口处真空度为 1Pa, 求流导。

$$(1) \bar{p} = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) = 5\text{Pa};$$

$$(2) \text{查出 } \bar{p} = 5\text{Pa} \text{ 与 } d = 2\text{cm} \text{ 的交点};$$

$$(3) \text{得出 } L \times U = 200\text{cm} \cdot \text{L/s};$$

$$(4) U = \frac{200\text{cm} \cdot \text{L/s}}{100\text{cm}} = 2\text{L/s}。$$

(二) 圆截面短管

长度 $L \leq 20d$ 的管道称为短管, 计算流导时应考虑入口的影响。其流导

$$U_n = \frac{\pi d^4}{128 \eta (L + 0.029 Q_n)} \bar{p} \quad (2-25)$$

对于 20℃, 短管流导

$$U_{n, 20^\circ\text{C}} = 1.34 \times 10^3 \frac{d^4}{L + 0.029 Q_n} \cdot \bar{p} \quad (2-25a)$$

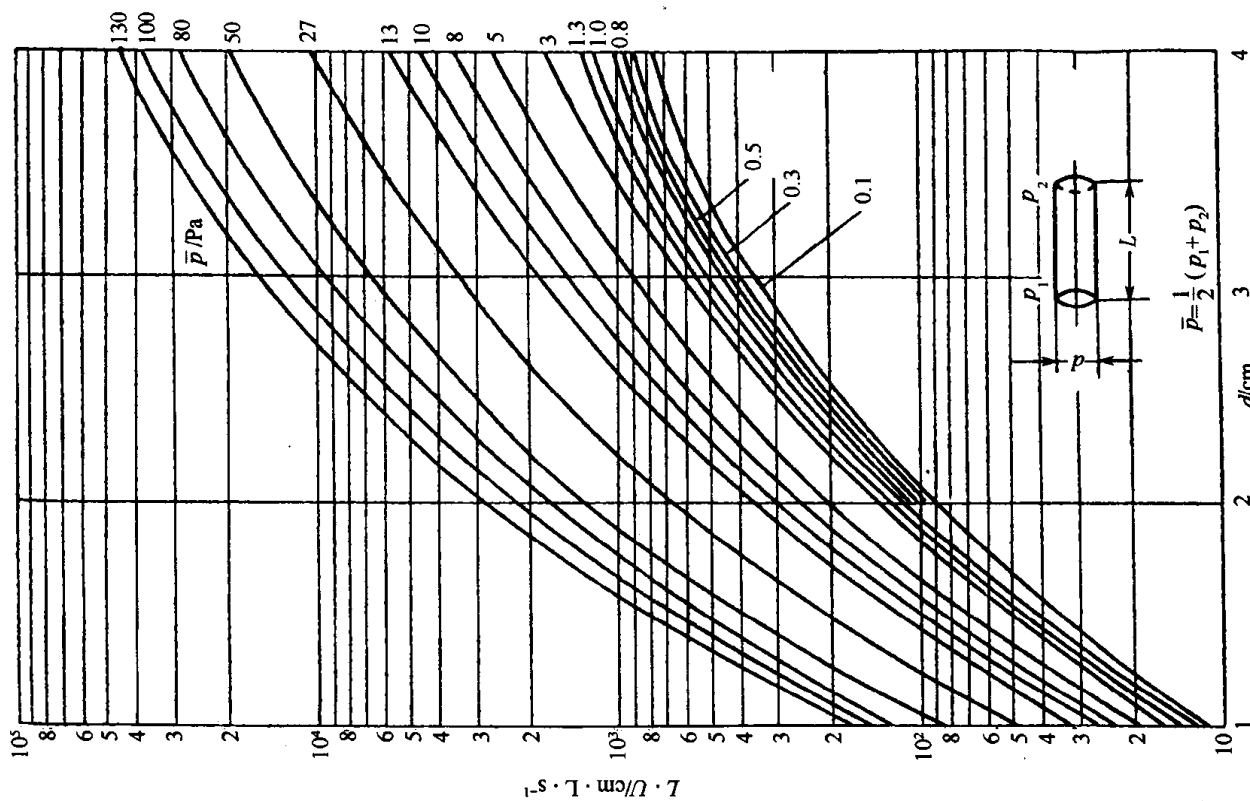


图 2-11 粘滞流时，圆管道对 20°C 空气的流导 (一)

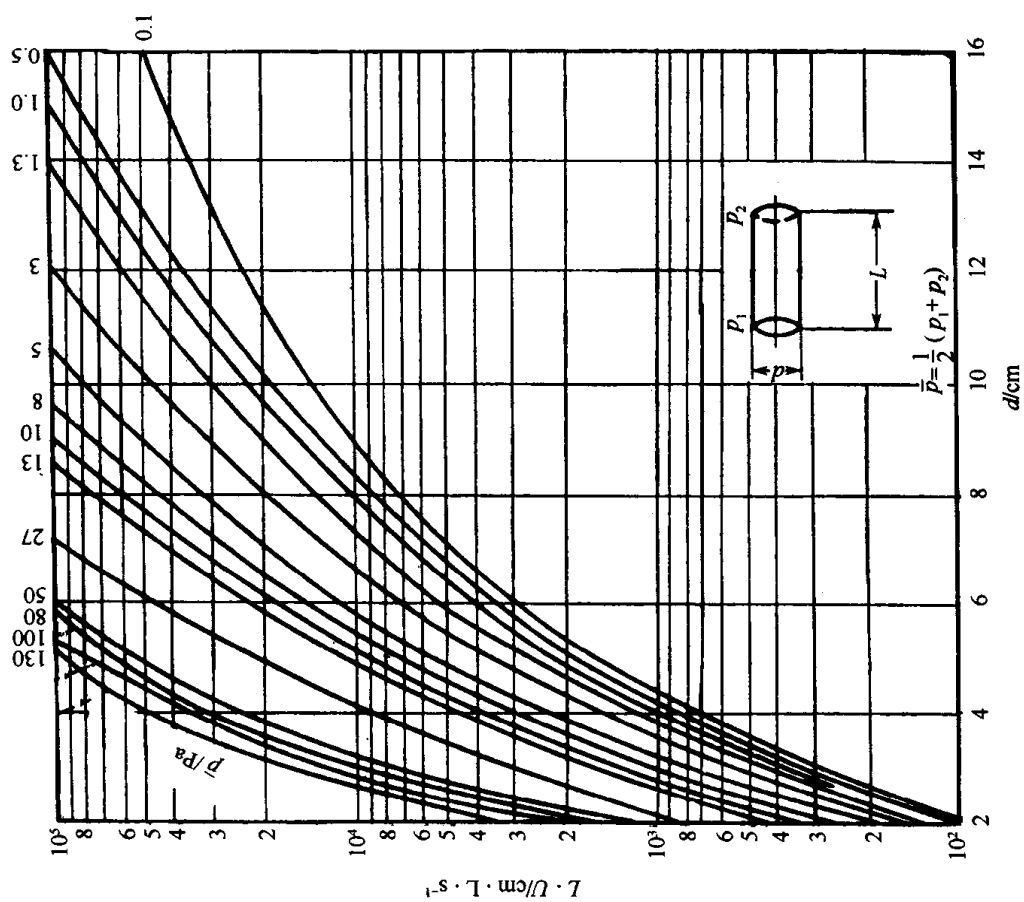


图 2-12 粘滞流时，圆管道对 20°C 空气的流导 (二)

式中 U_n ——粘滞流时短管流导 [m^3/s];

$U_{n, 20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时, 对 20°C 空气短管流导 [m^3/s];

Q_n ——通过短管的气体流量 [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$];

其余符号同式(2-24a)。

(三) 矩形及正方形截面管道

矩形截面管道(见图 2-13) 的流导

$$U_n = \frac{1}{12} \frac{a^2 b^2}{\eta L} \bar{p} \psi \quad (2-26)$$

对 20°C 空气, 矩形截面管道的流导

$$U_{n, 20^\circ\text{C}} = 4560 K_j \frac{a^2 b^2}{L} \bar{p} \psi \quad (2-26a)$$

式中 U_n ——粘滞流时矩形截面管道的流导 [m^3/s];

$U_{n, 20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时矩形截面管道对 20°C 空气的流导 [m^3/s];

η ——气体的粘滞系数 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$];

a, b ——矩形截面的两个边长 [m];

L ——管道长度 [m];

\bar{p} ——管道中平均压力 [Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1, p_2 分别为管道两端压力 [Pa];

K_j ——形状系数, 其值见表 2-5;

ψ ——与 a, b 有关的系数, 其值见图 2-14, 其公式为

$$\psi = 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{b}{a} \left(\text{th} \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^5} \text{th} \frac{3\pi a}{2b} + \frac{1}{5^5} \text{th} \frac{5\pi a}{2b} + \dots \right) \quad (2-26b)$$

表 2-5 矩形截面形状系数 K_j 值

a/b	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
K_j	1.00	0.99	0.98	0.95	0.90	0.82	0.71	0.58	0.42	0.23

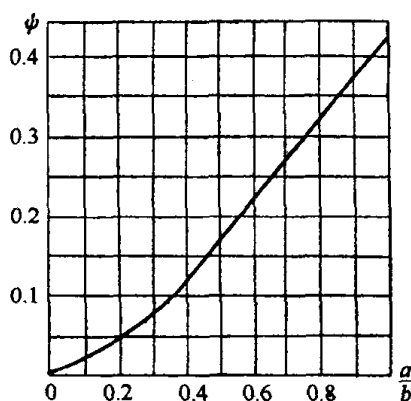


图 2-14 ψ 和 $\frac{a}{b}$ 关系曲线

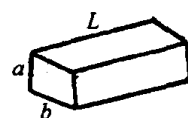


图 2-13 矩形截面管道

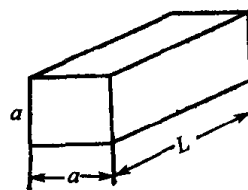


图 2-15 正方形管道

正方形截面管道的流导

$$U_n = 0.0352 \frac{a^4}{\eta L} \bar{p} \quad (2-27)$$

式中 U_n ——正方形截面管道的流导 $[\text{m}^3/\text{s}]$;
 a ——正方形截面的边长 $[\text{m}]$;
 L ——管道长度 $[\text{m}]$;
 η ——气体的粘滞系数 $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$;
 \bar{p} ——气体平均压力 $[\text{Pa}]$, $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端的压力 $[\text{Pa}]$ 。

对于 20℃ 的空气,正方形截面管道的流导

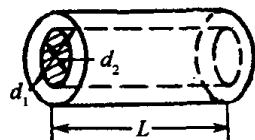
$$U_{n, 20^\circ\text{C}} = 1.92 \times 10^3 \frac{a^4}{L} \bar{p} \quad (2-27a)$$

式中 $U_{n, 20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时 20℃ 空气的流导 $[\text{m}^3/\text{s}]$;
 a ——正方形截面的边长 $[\text{m}]$;
 L ——管道长度 $[\text{m}]$;
 \bar{p} ——气体平均压力 $[\text{Pa}]$, $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端的压力 $[\text{Pa}]$ 。

(四) 环形截面管道

环形截面管道(见图 2-16)的外径为 d_1 , 内径为 d_2 , 管道长为 L , 其流导为

$$U_n = \frac{\pi}{128\eta} \frac{\bar{p}}{L} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln(d_1/d_2)} \right] \quad (2-28)$$



对于 20℃ 空气,环形截面管道的流导为

$$U_{n, 20^\circ\text{C}} = \frac{1340}{L} \bar{p} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln(d_1/d_2)} \right] \quad (2-28a) \quad \text{图 2-16 环形截面管道}$$

式中 U_n ——粘滞流时环形截面管道的流导 $[\text{m}^3/\text{s}]$;
 $U_{n, 20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流环形截面管道对 20℃ 空气的流导 $[\text{m}^3/\text{s}]$;
 η ——气体的粘滞系数 $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$;
 d_1 ——外径 $[\text{m}]$;
 d_2 ——内径 $[\text{m}]$;
 L ——管道长度 $[\text{m}]$;
 \bar{p} ——管道中平均压力 $[\text{Pa}]$, $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端压力 $[\text{Pa}]$ 。

(五) 偏心圆环

截面内圆半径为 r_1 , 外圆半径为 r_2 的偏心圆环管道(见图 2-17) 的流导如下

$$U_n = \frac{\pi}{128\eta} \cdot \frac{\bar{p}}{L} \left[(d_1^4 - d_2^4) - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\lg(d_1/d_2)} \right] \quad (2-29)$$

对于 20℃ 的空气,则

$$U_{n,20^\circ\text{C}} = 1300 \frac{\bar{p}}{L} \left[(d_1^4 - d_2^4) - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\lg(d_1/d_2)} \right] \quad (2-29a)$$

式中 U_n ——粘滞流时偏心环形截面管道流导 [m^3/s];
 $U_{n,20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时偏心环形截面管道对 20℃ 空气的流导 [m^3/s];
 η ——气体粘滞系数 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$];
 \bar{p} ——管道中平均压力 [Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端压力 [Pa];
 L ——管道长度 [m];
 d_1 ——外圆直径 [m];
 d_2 ——内圆直径 [m]。

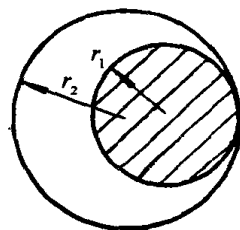


图 2-17 偏心圆环管道

当 $r_1/r_2 = 0.08 \sim 0.9$ 时,此式得到的计算值与实验值大致相同。

(六) 椭圆形截面管道

椭圆形截面管道(见图 2-18)的流导

$$U_n = \frac{\pi}{4\eta} \cdot \frac{\bar{p}}{L} \left(\frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} \right) \quad (2-30)$$

对 20℃ 的空气,椭圆形截面管道的流导

$$U_{n,20^\circ\text{C}} = \frac{42920}{L} \cdot \bar{p} \left(\frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} \right) \quad (2-30a)$$

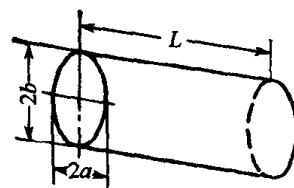


图 2-18 椭圆形截面管道

式中 U_n ——粘滞流时椭圆形截面管道的流导 [m^3/s];
 $U_{n,25^\circ\text{C}}$ ——粘滞流,椭圆形截面管道对 25℃ 空气的流导 [m^3/s];
 η ——气体的粘滞系数 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$];
 a ——椭圆形截面的短半轴 [m];
 b ——椭圆形截面的长半轴 [m];
 L ——椭圆形管道的管长 [m];
 \bar{p} ——管道中平均压力 [Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端的压力 [Pa]。

(七) 径向辐射流结构流导

径向辐射流结构如图 2-19 所示,此结构在真空工程中常见,如阱、阀、喷嘴、扩压器等。通过结构的气体流量为

$$Q_n = \frac{\pi a^3}{6\eta} \bar{p} (p_2 - p_1) \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2-31)$$

流导为

$$U_n = \frac{\pi a^3}{6\eta} \bar{p} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2-32)$$

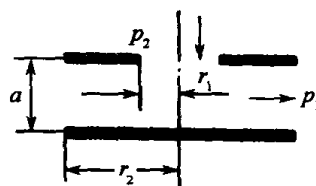


图 2-19 径向辐射流结构

对 20℃ 的空气,流量及流导分别为

$$Q_{n,20^\circ\text{C}} = 28613a^3\bar{p}(p_2 - p_1)\ln\frac{r_1}{r_2} \quad (2-31a)$$

$$U_{n,20^\circ\text{C}} = 28613a^3\bar{p}\ln\frac{r_1}{r_2} \quad (2-32a)$$

式中 Q_n ——粘滞流时气体流量[Pa·m³/s];
 $Q_{n,20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流时对 20℃ 空气的流量[Pa·m³/s];
 U_n ——粘滞流时对气体流导[m³/s];
 $U_{n,20^\circ\text{C}}$ ——粘滞流对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 \bar{p} ——结构中平均压力[Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为结构低压力端、高压力端压力[Pa];
 a ——两圆盘间之距[m];
 r_1 ——有孔圆盘的孔半径[m];
 r_2 ——无孔圆盘的半径[m];
 η ——气体粘滞系数[N·s/m²].

(八) 各种气体的流导关系

1. 各种气体之间的流导关系

粘滞流下各种气体之间的流导关系可用下式表示

$$U_2 = \frac{\eta_1}{\eta_2} U_1 \quad (2-33)$$

当两种气体的温度相同时,其关系为

$$U_2 = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^2 U_1 \quad (2-33a)$$

式中 U_2 ——管道对第二种气体的流导;
 U_1 ——管道对第一种气体的流导;
 η_1 、 η_2 ——第一、二种气体的粘滞系数;
 M_1 、 M_2 ——第一、二种气体的摩尔质量;
 σ_1 、 σ_2 ——第一、二种气体分子直径。

2. 各种气体与空气的流导关系

粘滞流下,管道对各种气体与空气的流导之间的关系见表 2-6。

表 2-6 粘滞流时各种气体流导为空气流导的倍数

各种 气体流导	U_{Ne}	$U_{\text{He 蒸气}}$	U_{Ar}	U_{O_2}	U_{H_2}	U_{CO}	U_{N_2}	U_{CO_2}	U_{NH_3}	$U_{\text{H}_2\text{O 蒸气}}$	U_{H_2}
倍数	0.58	0.79	0.82	0.90	0.93	1.02	1.04	1.24	1.86	1.90	2.10

八、分子流时管道的流导

(一) 圆截面长管

长度 $L > 20d$ (d 为管道直径) 的管道称为长管, 其流导为

$$U_f = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{d^3}{L} \quad (2-34)$$

或者

$$U_f = 1.21 \frac{d^3}{L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-34a)$$

对 20℃ 空气的流导

$$U_{f,20^\circ\text{C}} = 121 \frac{d^3}{L} \quad (2-34b)$$

对克分子量为 M 的 20℃ 气体流导

$$U_f = \frac{20}{\sqrt{M}} \frac{d^3}{L} \quad (2-34c)$$

式中 U_f ——分子流时圆截面长管流导 [m^3/s];

$U_{f,20^\circ\text{C}}$ ——分子流时圆截面长管对 20℃ 空气的流导 [m^3/s];

d ——管道直径 [m];

L ——管道长度 [m];

R ——摩尔气体常数, $8.3143[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$;

M ——气体摩尔质量 [kg/mol];

T ——气体温度 [K].

可利用图 2-20 的曲线查出分子流时圆截面管道对 20℃ 空气的流导值。曲线对于长管、短管均适用。

利用图 2-21 的列线图, 可以查出分子流时圆截面长管对 20℃ 空气的流导值。图中四条线依次为管长 L 线, 克劳辛 (Clausing) 计算的 α 值线, 流导 U 线, 管道直径 d 线。三个参数 L 、 d 、 U 中知道其中任意两个参数, 利用列线图即可求出第三个参数。如果求短管的流导应将得到的流导值乘以相应的克劳辛 α 值。

例 管道长 7m, 要得到 1L/s 的流导, 需要多粗的管径?

在长度 L 线上找到 $L = 7\text{m}$ 的一点, 流导 U 线上找到 $U = 1\text{L/s}$ 的另一点, 两点之间连一直线, 此直线的延长线与直径 d 线交会的一点即为所求直径 d 的值。由图可知应为 4cm。

(二) 圆截面短管

长度 $L \leq 20d$ 的管道称为短管。 d 为管道直径。在分子流时其流导

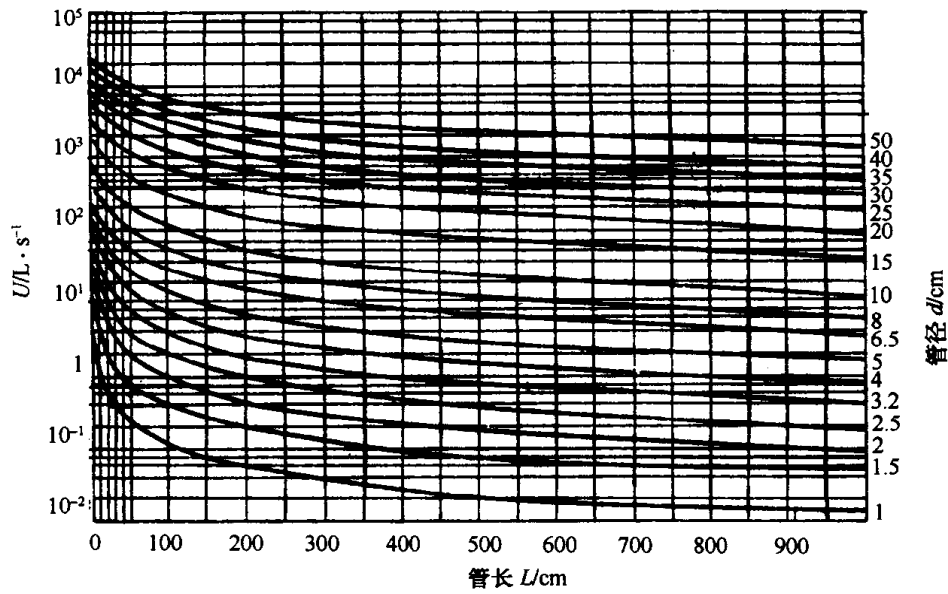


图 2-20 分子流下, 20°C 空气通过圆截面管道的流导

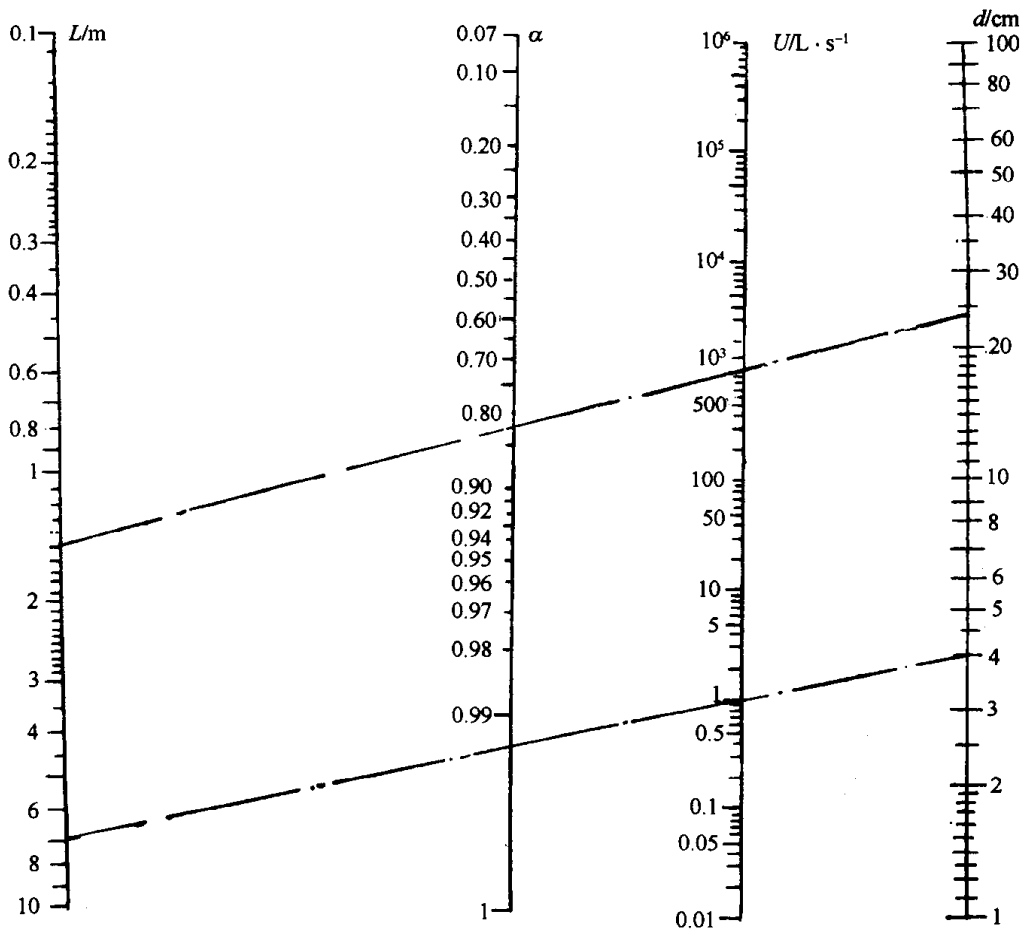


图 2-21 分子流下, 20°C 空气通过圆截面管道流导列线图

$$U_f = \alpha \cdot U_{o.f} \quad (2-35)$$

对于 20℃ 的空气

$$U_{f,20^\circ\text{C}} = \alpha \cdot 116A_0 \quad (2-35a)$$

式中 U_f ——分子流时圆截面短管流导[m³/s];
 $U_{f,20^\circ\text{C}}$ ——分子流时 20℃ 空气圆截面短管流导[m³/s];
 $U_{o.f}$ ——圆孔流导[m³/s];
 A_0 ——圆孔面积[m²];
 α ——克劳辛系数,见表 2-7。

表 2-7 克劳辛系数 α 值

L/d	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
α	1	0.952	0.909	0.831	0.718	0.632	0.566
L/d	1.0	2	4	6	8	10	20
α	0.514	0.359	0.232	0.172	0.137	0.114	0.061

(三) 环形截面管道

分子流时,环形截面管道(见图 2-16) 的流导

$$U_f = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{(d_1 + d_2)L} K_h \quad (2-36)$$

或者

$$U_f = 1.2 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{L} K_h \quad (2-36a)$$

对 20℃ 空气环形截面管道的流导

$$U_{f,20^\circ\text{C}} = 121 \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{L} K_h \quad (2-36b)$$

式中 U_f ——分子流时环形截面管道流导[m³/s];
 $U_{f,20^\circ\text{C}}$ ——分子流时环形截面管道对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 R ——摩尔气体常数,8.3143J/(K·mol);
 T ——气体温度[K];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol];
 d_1 ——外径[m];
 d_2 ——内径[m];
 L ——管道长度[m];
 K_h ——形状系数,数值见表 2-8。

表 2-8 环形截面形状系数 K_h 值

d_2/d_1	0	0.259	0.500	0.707	0.866	0.966
K_h	1	1.072	1.154	1.254	1.430	1.675

(四) 椭圆形截面管道

椭圆截面管道(见图 2-18) 的流导

$$U_f = \frac{8}{3} \frac{\pi}{L} \frac{a^2 b^2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}} \quad (2-37)$$

或者

$$U_f = 13.6 \frac{1}{L} \frac{a^2 b^2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-37a)$$

对 20℃ 的空气,椭圆形截面管道的流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 1366.8 \frac{1}{L} \frac{a^2 b^2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2-37b)$$

式中 U_f ——分子流时椭圆形截面管道的流导[m³/s];
 $U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——分子流时椭圆截面管道对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 L ——管道长度[m];
 a, b ——椭圆形截面的短半轴、长半轴[m];
 R ——摩尔气体常数, 8.3143J/(K·mol);
 T ——气体温度[K];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol]。

(五) 锥形管道

锥形管道(见图 2-22) 的流导

$$U_f = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{d_1^2 \cdot d_2^2}{dL} \quad (2-38)$$

对 20℃ 空气,锥形管道的流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 121 \frac{d_1^2 d_2^2}{dL} \quad (2-38a)$$

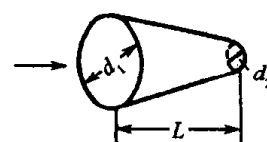


图 2-22 锥形管道

式中 U_f ——分子流时锥形管道的流导[m³/s];
 $U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——分子流时,锥形管道对 20℃ 空气的流导[L/s];
 d_1 ——圆锥体大端直径[m];
 d_2 ——圆锥体小端直径[m];

\bar{d} ——平均直径, $\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2}$ [m];

R ——摩尔气体常数, $8.3143 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$;

L ——锥体轴线长度[m];

M ——气体摩尔质量[kg/mol];

T ——气体温度[K]。

(六) 扁缝形管道

扁缝形管道(见图 2-23) 的流导

$$U_f = \frac{8}{3} K_b \frac{ab^2}{L} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (2-39)$$

或

$$U_f = 3.069 K_b \frac{ab^2}{L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-39a)$$

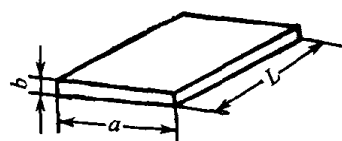


图 2-23 扁缝形管道

对 20°C 空气, 扁缝形管道的流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 309 K_b \frac{ab^2}{L} \quad (2-39b)$$

式中 U_f ——分子流时扁缝形管道的流导 [m^3/s];

$U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——分子流时扁缝形管道对 20°C 空气的流导 [m^3/s];

a ——扁缝的宽度[m];

b ——扁缝的高度[m];

L ——扁缝管道长度[m];

R ——摩尔气体常数, $8.3143 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$;

T ——气体温度[K];

M ——气体摩尔质量[kg/mol];

K_b ——修正系数, 其值见表 2-9。

表 2-9 扁缝形管道修正系数 K_b

L/b	0.1	0.2	0.4	0.8	1	2	3	4	5	10	> 10
K_b	0.036	0.068	0.13	0.22	0.26	0.40	0.52	0.60	0.67	0.94	1

(七) 矩形管道

矩形管道(见图 2-13) 的流导

$$U_f = \frac{8}{3} K_j \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (2-40)$$

或

$$U_f = 3.069 K_j \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-40a)$$

对于 20℃ 空气,矩形管道的流导

$$U_{f,20^\circ\text{C}} = 309K_j \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \quad (2-40b)$$

式中 U_f ——分子流时矩形管道的流导[m³/s];
 $U_{f,20^\circ\text{C}}$ ——分子流时矩形管道对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 a, b ——分别为矩形两边长[m];
 L ——管道长[m];
 R ——摩尔气体常数, 8.3143J/(K·mol);
 T ——气体温度[K];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol];
 K_j ——形状系数, 见表 2-10。

表 2-10 矩形管道形状系数 K_j

b/a	1	2/3	1/2	1/3	1/5	1/8	1/10
K_j	1.108	1.126	1.151	1.198	1.297	1.400	1.444

(八) 等边三角形截面管道

等边三角形管道(见图 2-24) 的流导

$$U_f = 0.413 \frac{a^3}{L} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (2-41)$$

或

$$U_f = 0.475 \frac{a^3}{L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-41a)$$

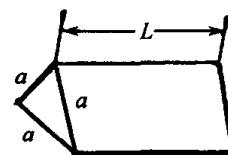


图 2-24 等边三角形管道

对 20℃ 空气,等边三角形截面管道的流导

$$U_{f,20^\circ\text{C}} = 47.9 \frac{a^3}{L} \quad (2-41b)$$

式中 U_f ——分子流时,等边三角形截面管道的流导[m³/s];
 $U_{f,20^\circ\text{C}}$ ——分子流时等边三角形截面管道对 20℃ 空气的流导[m³/s];
 a ——三角形边长[m];
 L ——管道长度[m];
 R ——摩尔气体常数, 8.3143J/(K·mol);
 T ——气体温度[K];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol]。

(九) 变截面及匀截面管道

图 2-25(a) 变截面管道流导按克努森(Knudsen) 公式计算

$$U_f = \frac{4}{3} \frac{\bar{c}}{\int_0^L \frac{H}{A^2} dl} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (2-42)$$

图 2-25(b) 匀截面直管流导为

$$U_f = 19.4 \frac{A^2}{H \cdot L} \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot K_x \quad [\text{L/s}] \quad (2-43a)$$

对于 20℃ 空气, 匀截面直管的流导

$$U_f = 61.8 \frac{A^2}{H \cdot L} \cdot K_x \quad (2-43b)$$

式中 U_f ——管道的流导[L/s];
 A ——管道截面面积[cm²];
 H ——管道截面周长[cm];
 L ——管道长度[cm];
 \bar{c} ——气体分子热运动的平均速度[cm/s];
 K_x ——管道截面形状系数。

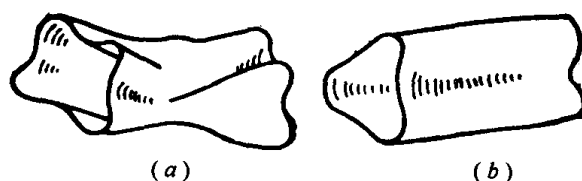


图 2-25 变截面和匀截面管道
 (a) 变截面管道; (b) 匀截面管道。

(十) 弯管

计算弯管流导时, 可以用一段等效的直管流导来代替。其等效长度为

$$L_{\text{等效}} = L_{\text{轴长}} + \frac{4}{3} d \quad (2-44)$$

而经常采用

$$L_{\text{等效}} = L_{\text{轴长}} + d \quad (2-44a)$$

式中 $L_{\text{轴长}}$ ——弯管轴线长[cm];
 d ——管道直径[cm]。

注: 弯管的影响一般认为粘滞流状态比分子流状态要强。但是, 根据 W. Klose 和 H. Eger 两人所给的数据发现, 弯管与轴线长度相等、截面相同的直管相比较时, 两者的流导没有显著的差别。当管道长度比较长时, 弯管的影响可以忽略, 计算弯管流导时可按等长度的直管计算。

(十一) 径向辐射流结构的流导

径向辐射流结构如图 2-19 所示, 其流导

$$U_f = \frac{4\pi a^2}{3 \ln(r_1/r_2)} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2-45a)$$

或者

$$U_f = 19.3 \frac{a^2}{\ln(r_1/r_2)} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2-45b)$$

对 20℃ 空气的流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 1940 \frac{a^2}{\ln(r_1/r_2)} \quad (2-45c)$$

式中 U_f ——分子流时对气体的流导[m³/s];
 $U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——分子流时对 20℃ 空气流导[m³/s];
 a ——两圆盘间之距[m];
 r_1 ——有孔圆盘的孔半径[m];
 r_2 ——无孔圆盘的半径[m];
 M ——气体摩尔质量[kg/mol];
 K ——气体温度[K];
 R ——摩尔气体常数, 8.3143[J/(K · mol)];

(十二) 各种气体的管道流导关系

分子流时, 各种气体的管道流导关系

$$U_2 = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} U_1 \quad (2-46)$$

式中 U_2 ——对第二种气体的流导;
 U_1 ——对第一种气体的流导;
 M_1 ——第一种气体的摩尔质量;
 M_2 ——第二种气体的摩尔质量。

分子流时, 各种气体和空气流导的关系见表 2-11。

表 2-11 各种气体和空气的流导关系

$U_{\text{H}_2} = 3.78 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{N}_2} = 1.02 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{H}_2\text{O蒸气}} = 0.38 U_{\text{空气}}$
$U_{\text{Ar}} = 0.85 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{NH}_3} = 1.30 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{Ne}} = 1.20 U_{\text{空气}}$
$U_{\text{CO}_2} = 0.81 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{H}_2\text{O蒸气}} = 1.26 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{O}_2} = 0.95 U_{\text{空气}}$
$U_{\text{CO}} = 1.02 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{He}} = 2.67 U_{\text{空气}}$	$U_{\text{气体}} = \sqrt{\frac{29}{M_{\text{气体}}}} \cdot U_{\text{空气}}$

不同温度下的流导按下式换算

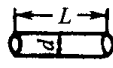
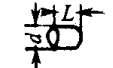
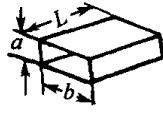
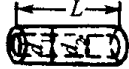
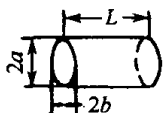
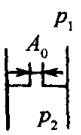
$$U_T = U_{20^\circ\text{C}} \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (2-47)$$

式中 U_T ——在温度 T 下的流导;
 $U_{20^\circ\text{C}}$ ——在温度 20℃ 下的流导;
 T ——气体温度[K]。

九、分子流、粘滞流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导汇总表

粘滞流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导见表 2-12。

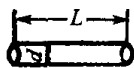

表 2-12 粘滞流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导

管道类型	略 图	公 式																						
圆长管		$U_n = 1.34 \times 10^8 \frac{d^4}{L} p$																						
圆短管		$1.34 \times 10^3 \cdot \frac{d^4}{L + 0.029 Q_n} \cdot p$																						
矩形截面管道		$U_n = 4560 K_j \frac{a^2 b^2}{L} p$ <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1.0</td> <td>0.9</td> <td>0.8</td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>0.4</td> <td>0.3</td> <td>0.2</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>K_j</td> <td>1.00</td> <td>0.99</td> <td>0.98</td> <td>0.95</td> <td>0.90</td> <td>0.82</td> <td>0.71</td> <td>0.58</td> <td>0.42</td> <td>0.23</td> </tr> </table>	a/b	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	K_j	1.00	0.99	0.98	0.95	0.90	0.82	0.71	0.58	0.42	0.23
a/b	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1														
K_j	1.00	0.99	0.98	0.95	0.90	0.82	0.71	0.58	0.42	0.23														
环形截面管道		$U_n = \frac{1340}{L} p \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln(d_1/d_2)} \right]$																						
椭圆截面管道		$U_n = \frac{42920}{L} p \left(\frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} \right)$																						
孔		<p>当 $1 \geq x \geq 0.525$ 时, $U_n = 766 x^{0.712} \sqrt{1 - x^{0.288}} \cdot \frac{A_0}{1 - x}$;</p> <p>当 $0.1 \leq x \leq 0.525$ 时, $U_n = \frac{200 A_0}{1 - x}$;</p> <p>当 $x < 0.1$ 时, $U_n = 200 A_0$</p>																						
注:符号参看前面诸公式																								

注:符号参看前面诸公式

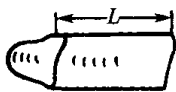
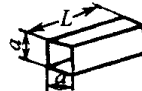
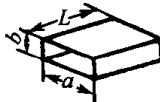
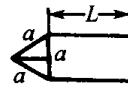

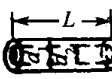
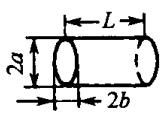
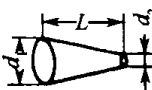
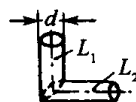

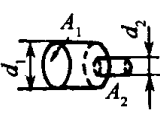
分子流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导见表 2-13。

表 2-13 分子流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导

管道类型	略 图	公 式																																
圆长管		$U_f = 12.1d^3/L$																																
圆短管		<div>$U_f = 11.6A_0\alpha$<table><tr><td>L/d</td><td>0</td><td>0.05</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>0.8</td></tr><tr><td>α</td><td>1</td><td>0.952</td><td>0.909</td><td>0.831</td><td>0.718</td><td>0.632</td><td>0.566</td></tr><tr><td>L/d</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>20</td></tr><tr><td>α</td><td>0.514</td><td>0.359</td><td>0.232</td><td>0.172</td><td>0.137</td><td>0.114</td><td>0.061</td></tr></table></div>	L/d	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	α	1	0.952	0.909	0.831	0.718	0.632	0.566	L/d	1	2	4	6	8	10	20	α	0.514	0.359	0.232	0.172	0.137	0.114	0.061
L/d	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8																											
α	1	0.952	0.909	0.831	0.718	0.632	0.566																											
L/d	1	2	4	6	8	10	20																											
α	0.514	0.359	0.232	0.172	0.137	0.114	0.061																											

九、分子流、粘滞流时对 20℃ 空气,孔和管道的流导汇总表

(续)

管道类型	略 图	公 式																								
匀截面直管		$U_t = 61.8 \frac{A^2}{H \cdot L} \cdot K_x$																								
正方形截面管道		$U_t = 15.45a^3/L$																								
矩形截面管道		$U_t = 30.9K_j \cdot a^2b^2/[(a + b)L]$ <table><tr><td>b/a</td><td>1</td><td>0.667</td><td>0.500</td><td>0.333</td><td>0.200</td><td>0.125</td><td>0.100</td></tr><tr><td>K_j</td><td>1.108</td><td>1.126</td><td>1.151</td><td>1.198</td><td>1.297</td><td>1.400</td><td>1.444</td></tr></table>	b/a	1	0.667	0.500	0.333	0.200	0.125	0.100	K _j	1.108	1.126	1.151	1.198	1.297	1.400	1.444								
b/a	1	0.667	0.500	0.333	0.200	0.125	0.100																			
K _j	1.108	1.126	1.151	1.198	1.297	1.400	1.444																			
等边三角形截面管道		$U_t = 4.79a^3/L$																								
扁缝形管道		$U_t = 30.9K_b \cdot ab^2/L$ <div>$a \gg b$<table><tr><td>L/b</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.4</td><td>0.8</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>10</td><td>> 10</td></tr><tr><td>K_b</td><td>0.036</td><td>0.068</td><td>0.13</td><td>0.22</td><td>0.26</td><td>0.40</td><td>0.52</td><td>0.60</td><td>0.67</td><td>0.94</td><td>1</td></tr></table></div>	L/b	0.1	0.2	0.4	0.8	1	2	3	4	5	10	> 10	K _b	0.036	0.068	0.13	0.22	0.26	0.40	0.52	0.60	0.67	0.94	1
L/b	0.1	0.2	0.4	0.8	1	2	3	4	5	10	> 10															
K _b	0.036	0.068	0.13	0.22	0.26	0.40	0.52	0.60	0.67	0.94	1															
环形截面管道		$U_t = 12.1K_h(d_1 - d_2)^2 \cdot (d_1 + d_2)/L$ <table><tr><td>d₂/d₁</td><td>0</td><td>0.259</td><td>0.500</td><td>0.707</td><td>0.866</td><td>0.966</td></tr><tr><td>K_h</td><td>1</td><td>1.072</td><td>1.154</td><td>1.254</td><td>1.430</td><td>1.675</td></tr></table>	d ₂ /d ₁	0	0.259	0.500	0.707	0.866	0.966	K _h	1	1.072	1.154	1.254	1.430	1.675										
d ₂ /d ₁	0	0.259	0.500	0.707	0.866	0.966																				
K _h	1	1.072	1.154	1.254	1.430	1.675																				
椭圆形截面管道		$U_t = 136.6 \frac{1}{L} \frac{a^2b^2}{\sqrt{a^2 + b^2}}$																								
锥形管道		$U_t = 12.1 \frac{d_1^2d_2^2}{dL}$																								
直角管道		按直管计算,管道计算长度应为 $L = L_1 + L_2 + \frac{4}{3}d$																								
圆孔		$U_t = 11.6A_0$																								
缩孔		$U_t = 9.1d_1^2d_2^2/(d_1^2 - d_2^2) = 11.6A_1A_2/(A_1 - A_2)$																								

注:符号参看前面诸公式,长度单位为 cm,面积单位为 cm²,流导单位为 L/s

 注:符号参看前面诸公式,长度单位为 cm,面积单位为 cm²,流导单位为 L/s

十、粘滞—分子流时管道的流导

(一) 圆截面管道

圆截面管道的流导

$$U_{n.f} = \frac{\pi}{128} \frac{d^4 \bar{p}}{\eta L} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{d^3}{L} \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{d\bar{p}}{\eta}}{1 + 1.24 \sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{d\bar{p}}{\eta}} \quad (2-48)$$

对 20℃ 空气, 圆截面管道的流导

$$U_{n.f.20^\circ\text{C}} = 1341 \frac{d^4 \bar{p}}{L} + 121 \frac{d^3}{L} \frac{1 + 189 d\bar{p}}{1 + 234 d\bar{p}} \quad (2-48a)$$

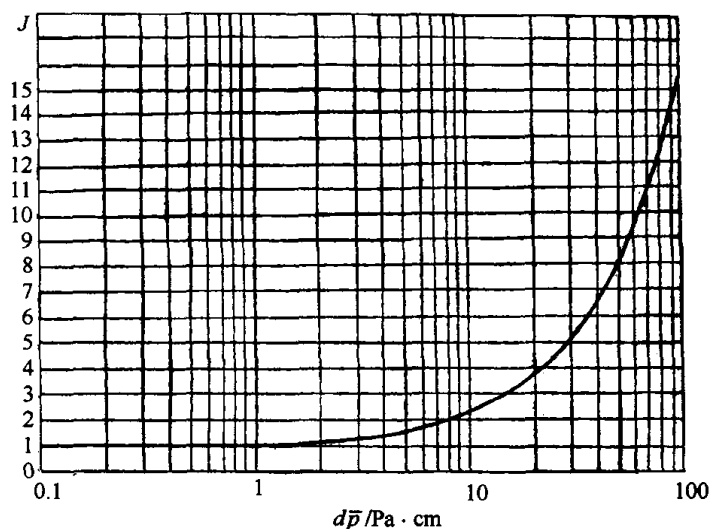
式中 $U_{n.f}$ ——粘滞—分子流时圆截面管道的流导 [m^3/s]; $U_{n.f.20^\circ\text{C}}$ ——粘滞—分子流时, 圆截面管道对 20℃ 空气的流导 [m^3/s]; d ——管道直径 [m]; L ——管道长度 [m]; \bar{p} ——管道中的平均压力 [Pa], $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1 、 p_2 分别为管道两端的压力; R ——摩尔气体常数, $8.3143 [\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$; T ——气体温度 [K]; M ——气体摩尔质量 [kg/mol]; η ——气体的粘滞系数 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$].

对 20℃ 空气, 圆截面管道流导由简化式给出, 即

$$U_{n.f.20^\circ\text{C}} = 12.1 \frac{d^3}{L} J \quad [\text{L/s}] \quad (2-48b)$$

式中 d ——管道直径 [cm]; L ——管道长度 [cm]; J ——与 d 、 \bar{p} 之积有关的系数, 见表 2-14 及图 2-26。表 2-14 20℃ 空气的 J 值

$d\bar{p}/\text{Pa} \cdot \text{cm}$	J	$d\bar{p}/\text{Pa} \cdot \text{cm}$	J
< 1.3	1.00	53	6.87
1.3	1.01	67	8.38
2.6	1.14	80	9.91
4.0	1.28	93	11.4
5.0	1.43	107	12.9
7.0	1.58	120	14.5
9.0	1.73	133	16.0
9.3	1.88	266	31.1
11	2.03	400	46.3
12	2.18	667	76.6
13	2.33	933	107
27	3.84	1333	152
40	5.37		

图 2-26 J 值与 $d\bar{p}$ 之积值的关系

(二) 矩形截面管道

矩形截面管道的流导

$$U_{n.f} = U_n + K_j U_f \left[\frac{1 + 1.23(a/\bar{\lambda})^{0.3}}{1 + (16K_j/3\pi)1.23(a/\bar{\lambda})^{0.3}} \right] \quad (2-49)$$

式中 $U_{n.f}$ ——粘滞 - 分子流时矩形截面管道的流导
[cm³/s];

U_n ——粘滞流时矩形截面管道的流导[cm³/s];

U_f ——分子流时矩形截面管道的流导[cm³/s];

a, b ——矩形截面的短边及长边[cm];

$\bar{\lambda}$ ——气体分子的平均自由程[cm];

K_j ——矩形截面管道形状系数, 见图 2-27。

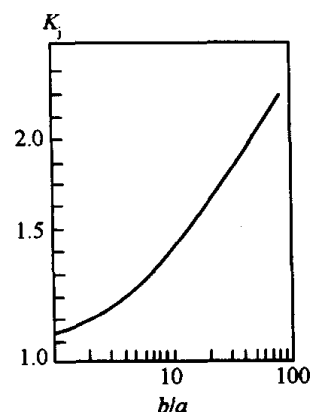


图 2-27 矩形截面管道形状系数 K_j

十一、以克劳辛系数计算管道流导

克劳辛于 1932 年给出了气体分子从一端进入管道从另一端出来的概率的计算方法, 此概率称为克劳辛系数。计算公式的解精确到 1% 左右。表 2-15 给出了圆柱管克劳辛系数与管的相对长度的关系。

表 2-15 圆柱管克劳辛系数与管的相对长度的关系

L/r	α	L/r	α	L/r	α	L/r	α
0	1.0000	1.3	0.6139	3.2	0.4062	16	0.1367
0.1	0.9524	1.4	0.5970	3.4	0.3931	18	0.1240
0.2	0.9092	1.5	0.5810	3.6	0.3809	20	0.1135
0.3	0.8699	1.6	0.5659	3.8	0.3695	30	0.0797
0.4	0.8341	1.7	0.5518	4.0	0.3589	40	0.0613
0.5	0.8013	1.8	0.5384	5.0	0.3146	50	0.0499
0.6	0.7711	1.9	0.5256	6.0	0.2807	60	0.0420
0.7	0.7434	2.0	0.5136	7.0	0.2537	70	0.0363
0.8	0.7177	2.2	0.4914	8.0	0.2316	80	0.0319
0.9	0.6940	2.4	0.4711	9.0	0.2131	90	0.0285
1.0	0.6720	2.6	0.4527	10.0	0.1973	100	0.0258
1.1	0.6514	2.8	0.4359	12.0	0.1719	1000	0.002658
1.2	0.6320	3.0	0.4205	14.0	0.1523	∞	$8r/3L$

注: L —管长; r —圆柱管半径

用克劳辛系数计算 20℃ 空气通过管道的流导公式如下

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 11.6 A \alpha \quad (2-50)$$

式中 $U_{f, 20^\circ\text{C}}$ ——分子流时对 20℃ 空气流导[L/s];

A ——入口面积[cm²];

α ——克劳辛系数,见表 2-16 ~ 表 2-18。

表 2-16 长方形截面窄缝形管克劳辛系数与它的长度的关系

L/b	α	L/b	α	L/b	α	L/b	α	L/b	α
0	1	0.8	0.7266	1.6	0.5888	2.8	0.4712	6.0	0.3260
0.1	0.9524	0.9	0.7049	1.7	0.5760	3.0	0.4570	7.0	0.3001
0.2	0.9096	1.0	0.6848	1.8	0.5640	3.2	0.4439	8.0	0.2789
0.3	0.8710	1.1	0.6660	1.9	0.5525	3.4	0.4318	9.0	0.2610
0.4	0.8362	1.2	0.6485	2.0	0.5417	3.6	0.4205	10.0	0.2475
0.5	0.8048	1.3	0.6321	2.2	0.5215	3.8	0.4099	∞	$(b/L)\ln(b/L)$
0.6	0.7763	1.4	0.6168	2.4	0.5032	4.0	0.3999		
0.7	0.7503	1.5	0.6024	2.6	0.4865	5.0	0.3582		

注: L —管长; a —长方形截面短边; b —长方形截面长边。 $a \gg b, a < L$

表 2-17 发散截锥形管克劳辛系数与它的相对长度和张角的关系

$2\beta/(^{\circ})$	L/r						
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
0	0.9524	0.9092	0.8013	0.6720	0.5142	0.3105	0.1909
1	0.9541	0.9125	0.8089	0.6854	0.5360	0.3460	0.2368
5	0.9604	0.9248	0.8373	0.7357	0.6176	0.4786	0.4086
10	0.9673	0.9384	0.8686	0.7908	0.7058	0.6172	0.5803
20	0.9787	0.9603	0.9185	0.8764	0.8370	0.8056	0.7964
30	0.9869	0.9761	0.9534	0.9334	0.9177	0.9081	0.9061
40	0.9927	0.9870	0.9762	0.9681	0.9629	0.9605	0.9601
50	0.9964	0.9939	0.9896	0.9870	0.9857	0.9852	0.9851
60	0.9986	0.9977	0.9965	0.9959	0.9957	0.9956	0.9955
70	0.9996	0.9994	0.9993	0.9992	0.9992	0.9992	0.9991
80	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
89	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

注: 1. 气流方向由大端到小端;
2. r —小端直径; L —截锥长度; 2β —截锥张角

表 2-18 弯管克劳辛系数

$\theta/(^{\circ})$	30	60	90	120	150	180
α	0.792	0.650	0.547	0.469	0.409	0.362

十二、挡板的流导

目前,在真空系统设计中,大多数采用比流导法来计算挡板的流导。比流导即挡板单位面积上的流导(由实验测出)。

十二、挡板的流导

分析法计算挡板流导所导出的公式不仅适用于挡板,也适用于形状复杂的真空元件的流导计算,如阱和阀门等,详见参考文献[18]。

挡板面积为 A , 在 20°C 室温下, 空气的比流导为 $U_{\text{比}}$, 挡板的流导

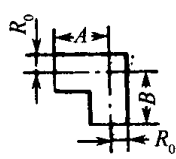
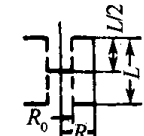
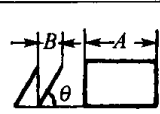
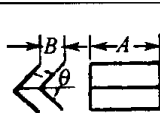
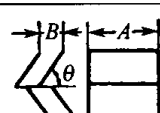
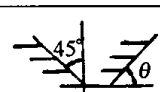
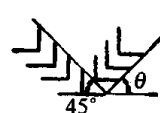
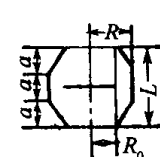
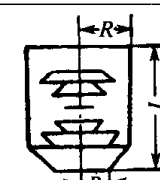
$$U_Z = U_{\text{比}} \cdot A \quad (2-51)$$

式中 U_Z ——挡板对 20°C 空气的流导 $[\text{L/s}]$;

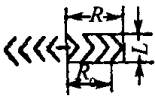
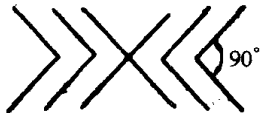
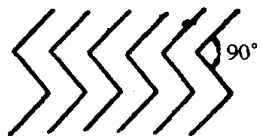
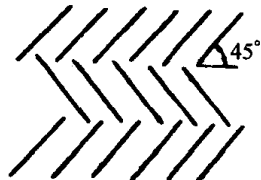
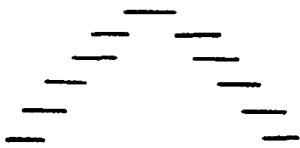
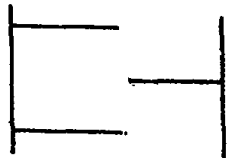
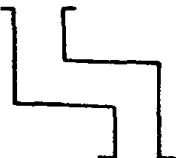
$U_{\text{比}}$ ——挡板对 20°C 空气的比流导 $[\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$ (见表 2-19);

A ——挡板面积 $[\text{cm}^2]$ 。

表 2-19 各种挡板的比流导

挡板名称	示意图	最佳尺寸比	传输概率 P_c	比流导 / $[\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$
直角		$A = B = 3R_0$	0.28	3.28
光圈式		$L = 3R_0$ $R/R_0 = 1.13$ $R/R_0 = 1.49$	0.15 0.40	1.76 4.70
单百叶窗		$A/B > 5$ $\theta = 60^{\circ}$	0.41	4.80
山型(人字型)		$A/B > 5$ $\theta = 60^{\circ}$	0.27	3.16
双百叶窗		$A/B > 5$ $\theta = 60^{\circ}$	0.25	3.00
锥状环型		$\theta = 60^{\circ}$	0.39	4.5
锥状山型		$\theta = 60^{\circ}$	0.33	3.8
变异光圈式		$R/R_0 = 1.29$ $L/R_0 = 1.5$	0.23	2.69
锥状环山型		$R/R_0 = 1.3$ $L/R_0 = 2.67$	0.33	3.86

(续)

挡板名称	示意图	最佳尺寸比	传输概率 P_c	比流导 / [$L/(s \cdot cm^2)$]
环状山型		$R/R_0 = 1.29$ $L/R_0 = 0.75$	0.22	2.57
山型			0.31	3.6
双山型			0.19	2.2
三百叶窗			0.17	2.0
锥状环状			0.69	8
半月型			0.1	1.2
双弯头			0.17	2.0

十三、用传输概率计算流导

用蒙特卡罗方法计算出结构元件的传输概率后,可以计算结构元件的流导。蒙特卡罗法是一种统计实验方法,是用计算机去跟踪大量分子的各个轨迹,得出有多少分子能通过真空管路结构元件,进而得到传输概率。

戴维斯和利文森 1960 年首次用此方法计算出了分子流时气体分子通过结构元件的传输概率,后来其它作者亦给出了一些计算结果,见图 2-28 ~ 图 2-45。其计算精度取决于被跟踪的分子数,跟踪分子越多,精度越高。由于计算机运算速度的提高及应用的普及,以此方法计算传输概率得到了发展,通过已有的资料不难看出,它对求解复杂结构的分子流流导是一种有效方法。

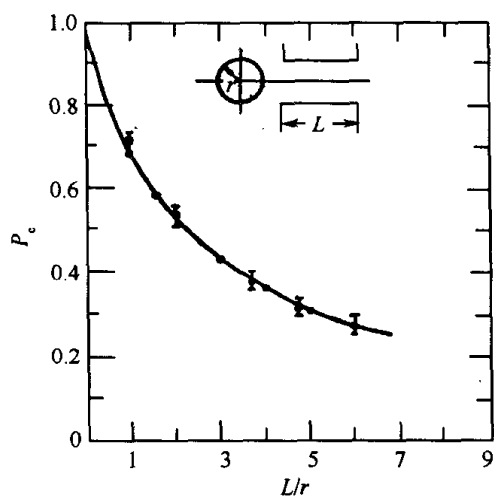


图 2-28 直管道传输概率

○ — 蒙特卡罗计算值；• — 实验值。

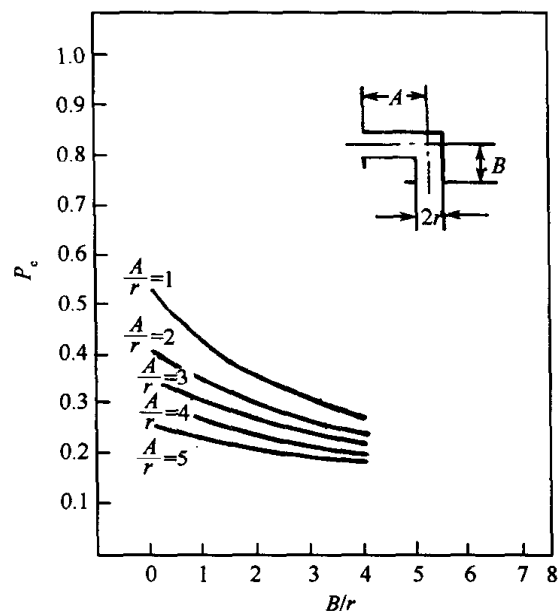


图 2-29 直角弯管传输概率

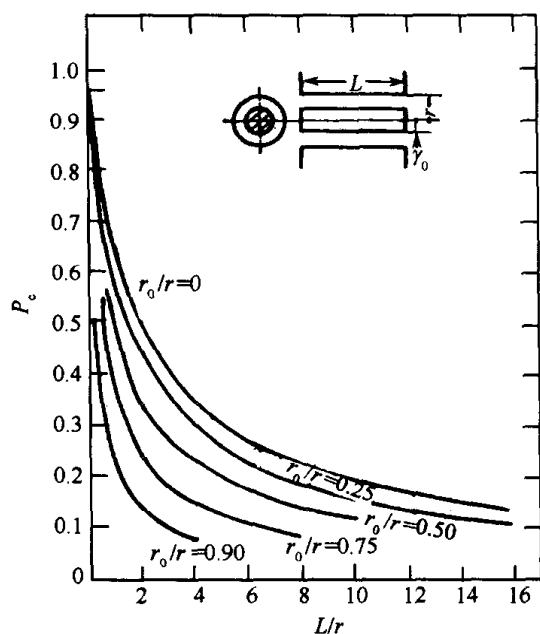


图 2-30 环形管道传输概率

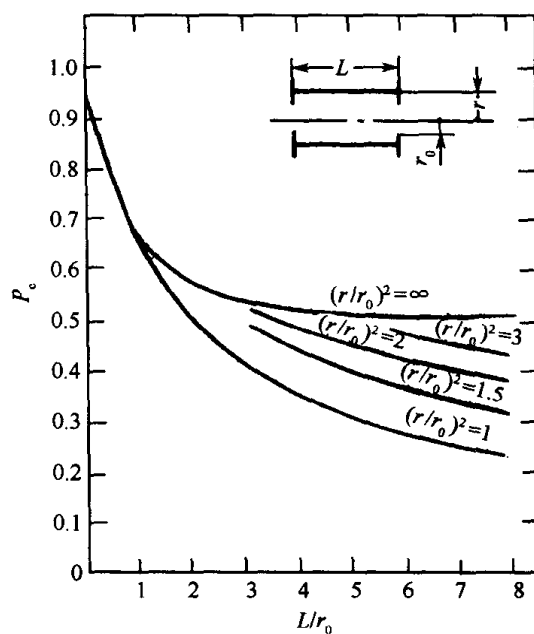


图 2-31 两端有环形挡板的管道传输概率

用传输概率计算分子流流导公式如下

$$U_f = P_c \cdot U_{of} \quad (2-52)$$

式中 U_f —— 分子流时结构元件的流导 [L/s];

U_{of} —— 分子流时结构元件入口孔的流导 [L/s];

P_c —— 结构元件的传输概率, 见图 2-28 ~ 图 2-45。

用于 20℃ 的空气, 其流导

$$U_{f, 20^\circ\text{C}} = 11.6A \cdot P_c \quad [\text{L/s}] \quad (2-53)$$

式中 A —— 结构元件入口孔的面积 [cm²].

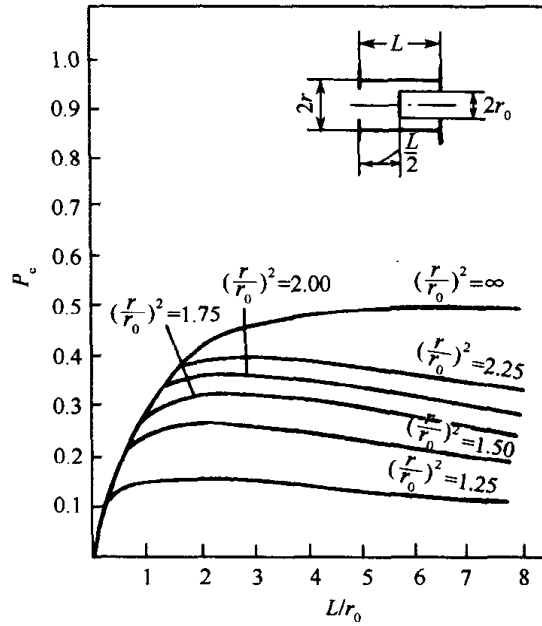


图 2-32 两端有环形挡板的管道中间置一挡板传输概率

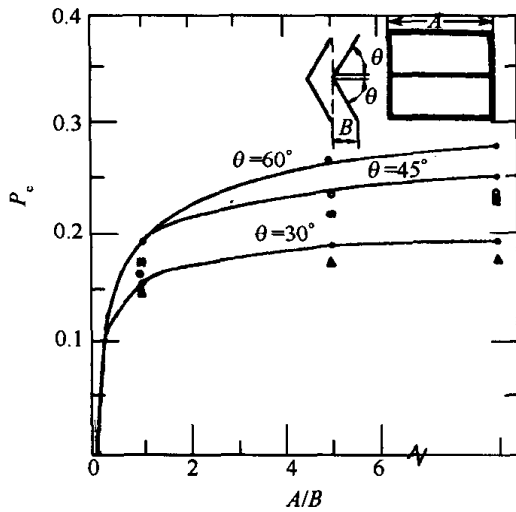


图 2-33 山型挡板(人字型挡板) 传输概率

●—计算值; ○— $\theta = 60^\circ$ 的实验值;
■— $\theta = 45^\circ$ 的实验值; ▲— $\theta = 30^\circ$ 的实验值。

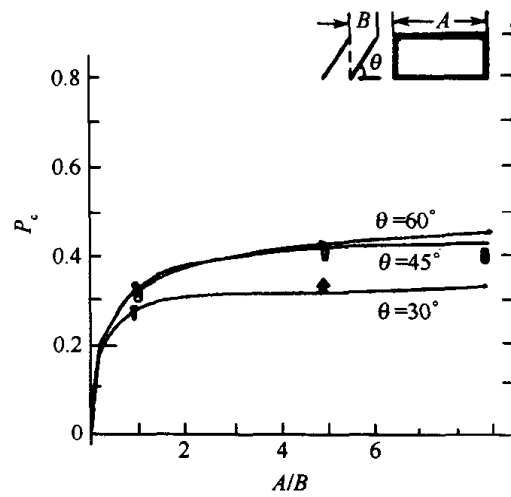


图 2-34 单百叶窗挡板传输概率

●—计算值; ○— $\theta = 60^\circ$ 的实验值;
■— $\theta = 45^\circ$ 的实验值; ▲— $\theta = 30^\circ$ 的实验值。

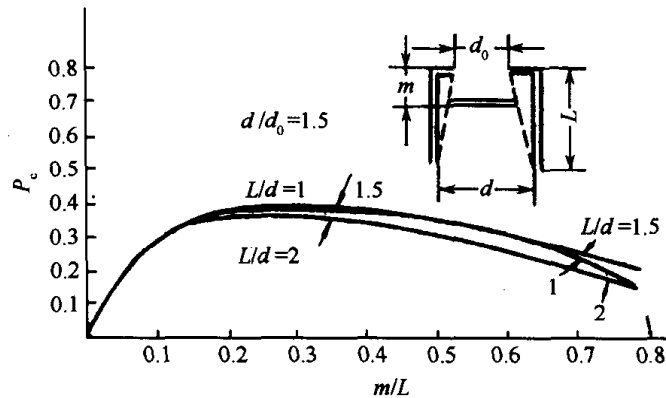


图 2-35 光圈式挡板传输概率

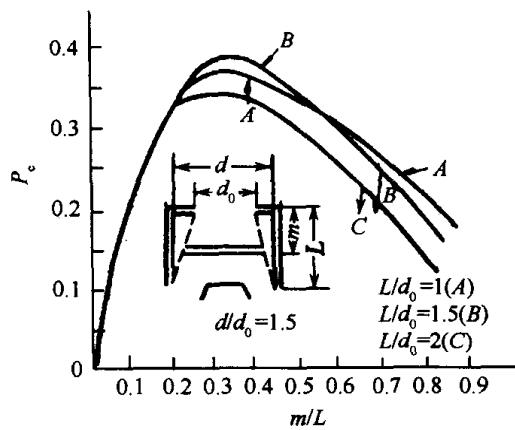


图 2-36 光圈式挡板与扩散泵连接后传输概率

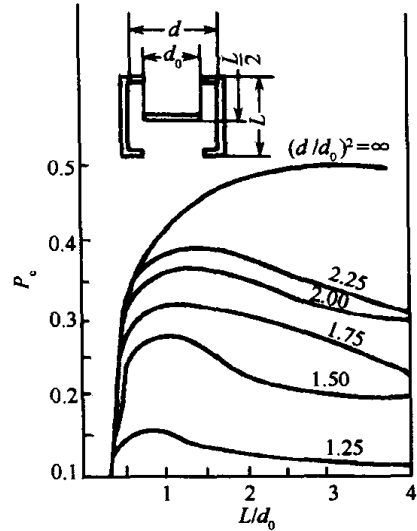


图 2-37 光圈式挡板传输概率

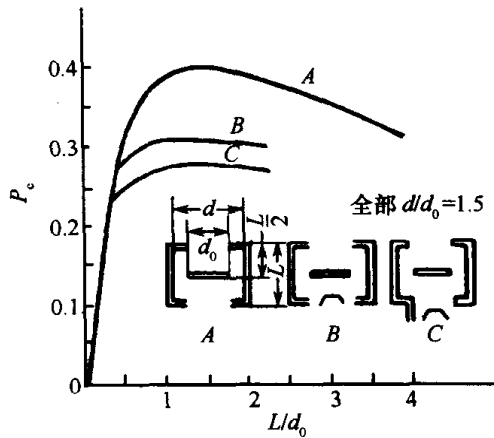


图 2-38 光圈式挡板与扩散泵连接后传输概率

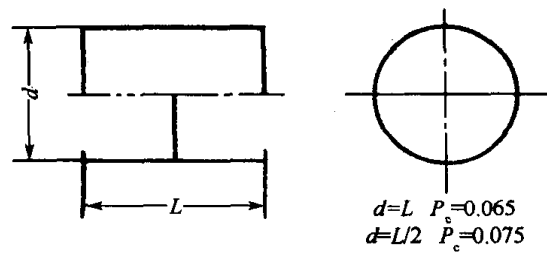


图 2-39 管道中装有半圆形挡板传输概率

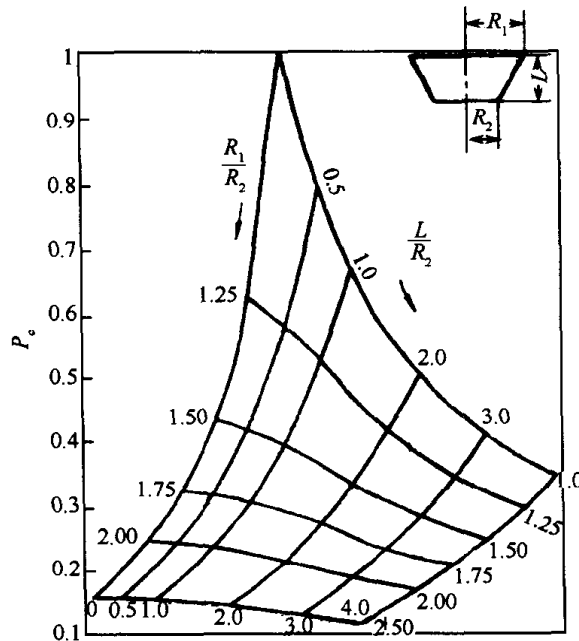


图 2-40 锥形管传输概率

注:按图 2-40 求锥形管传输概率时,可按 L/R_2 与 R_1/R_2 的两比值,找出某一交点,再按该点在纵坐标上找出 P_e 值。此值即为所求锥形管的传输概率。

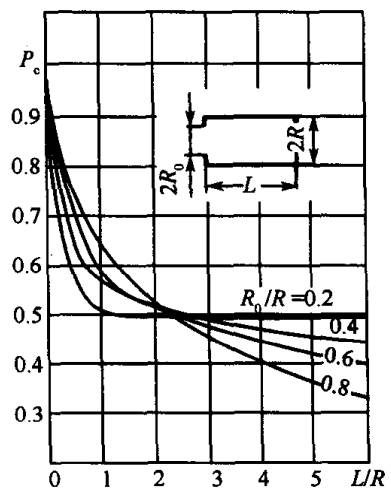


图 2-41 进出口直径不同的管道的传输概率

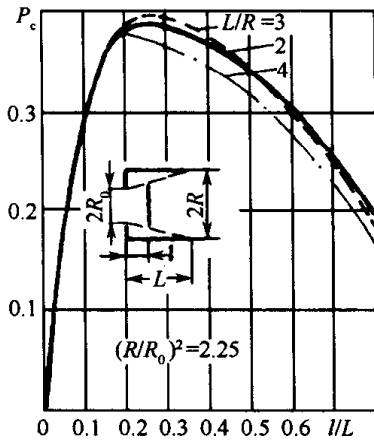


图 2-42 进出口直径不同管道中有圆形挡板的传输概率

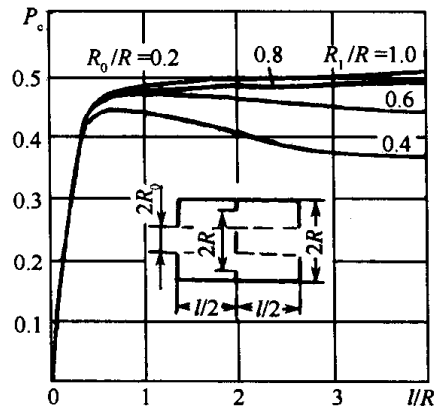


图 2-43 进出口直径不同的管道中有环形挡板的传输概率

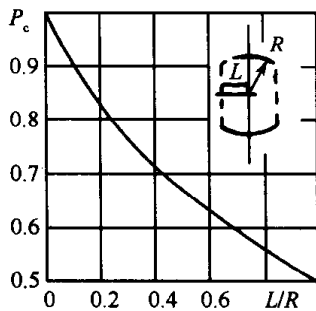


图 2-44 截球形管道中有挡板的传输概率

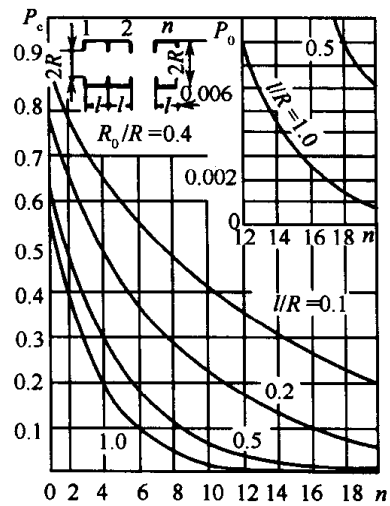


图 2-45 进出口直径不同且有多孔片挡板的传输概率

十四、分子流下复杂管路的流导和传输概率

(一) 两截面相同的管道串联

已知两个同直径管道(见图 2-46(a))的传输概率为 P_{c1} 和 P_{c2} , 两管道串联后的传输概率 P_c 用下式计算

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_{c1}} + \frac{1}{P_{c2}} - 1 \quad (2-54)$$

串联后管道的流导为

$$U = P_c U_{01} \quad (2-55)$$

此式对截面相同的弯管串接也适用。式中 U_{01} 为第一根管道入口孔的流导。

(二) 两截面相同的管道中间连接一个大容器

这种连接管如图 2-46(b) 所示。串联后的流导为

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_{\text{容}}} + \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} \quad (2-56)$$

当式中 $U_{\text{容}} \gg U_1$ 和 U_2 时, $\frac{1}{U_{\text{容}}}$ 的值很小, 可以忽略不计, 则公式(2-56) 可简化为

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} \quad (2-56a)$$

同理, 若已知管道 1 和管道 2 的传输概率为 P_{c1} 、 P_{c2} , 而忽略容器的传输概率 $P_{\text{容}}$ 时, 串联的管道总传输概率 P_c 的计算公式为

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_{c1}} + \frac{1}{P_{c2}} \quad (2-57)$$

此式同样适用于弯管。

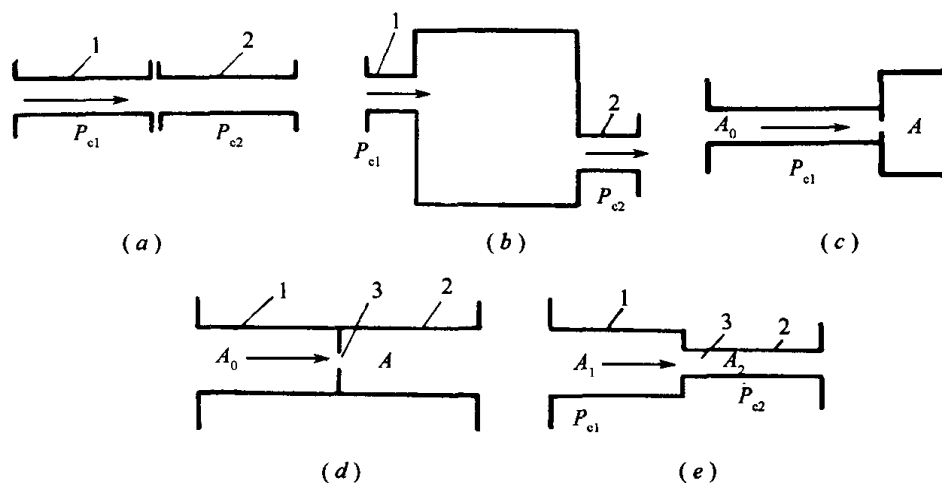


图 2-46 各种管道串联

(三) 管道与小孔组合后的传输概率

串联管道如图 2-46(c) 所示。管道右端有一小孔(截面为 A), 当气流由左向右沿管道流动, 在小孔处, 气体收缩后通过。此种情况下的小孔, 称为缩孔。反之, 气流由右向左流动, 先通过小孔, 然后流经管道, 这时的小孔看作普通孔(普通孔的流导可按公式(2-19) 来计算)。

对于带有缩孔的管道串联后的传输概率为

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_{c1}} + \frac{A_0}{A} - 1 \quad (2-58)$$

式中 A_0 为管道入口的截面积。

(四) 两管道中间有小孔时管路传输概率

图 2-46(d) 为这种组合管路的示意图。串联后的传输概率为

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_{c1}} + \frac{1}{P_{c2}} + \frac{A_0}{A} - 2 \quad (2-59)$$

式中 P_c ——串联后的总传输概率；
 P_{c1} ——管道 1 的传输概率；
 P_{c2} ——管道 2 的传输概率；
 A ——管道中的小孔截面面积；
 A_0 ——管道左端的截面面积。

(五) 两个截面不同的管道串联后的传输概率

如图 2-46(e) 所示。管道 1 的截面面积为 A_1 , 传输概率为 P_{c1} ; 管道 2 的截面面积为 A_2 , 传输概率为 P_{c2} , 串联后的传输概率 P_c 的计算公式为

$$\frac{1}{P_c} = \left(\frac{1}{P_{c1}} - 1 \right) \frac{A_2}{A_1} + \frac{1}{P_{c2}} \quad (2-60)$$

第三章 机械真空泵

一、真空泵型号编制方法

(一) 真空泵型号组成

JB/T 7637—95 规定,真空泵由基本型号和辅助型号两部分组成,两者中间为横直线。

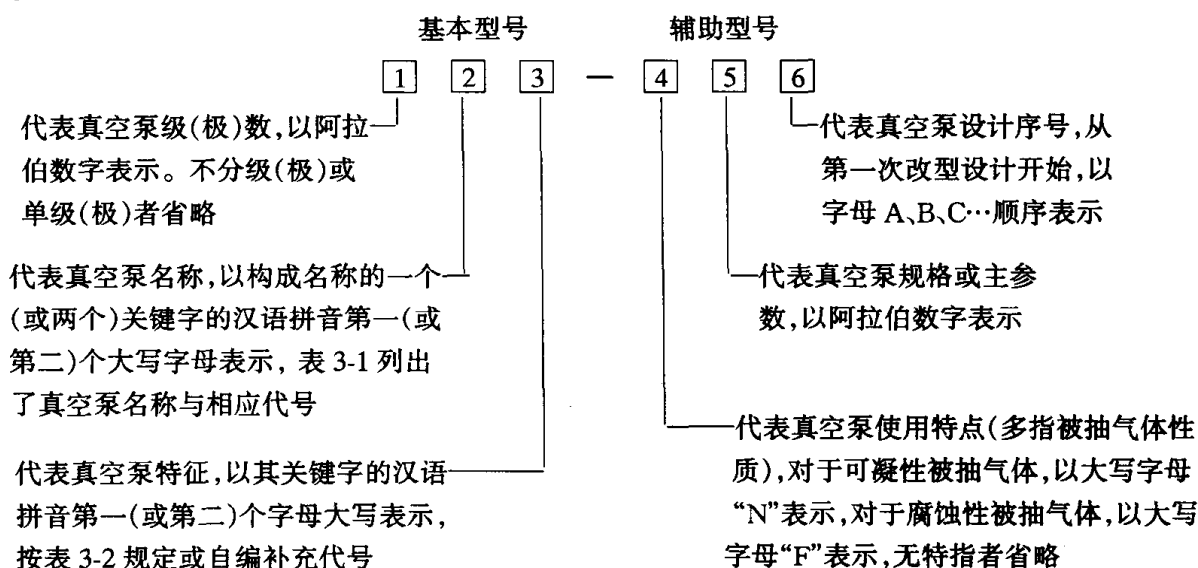


表 3-1 真空泵名称、代号

序号	真空泵名称	代号	关键字意义及拼音字母	真空泵规格或主参数	相应单位
1	往复真空泵	W	“往”复“wang”	抽气速率	L/s
2	定片真空泵	D	“定”片“ding”		
3	旋片式真空泵	X	“旋”片“xuan”		
4	滑阀真空泵	H	“滑”阀“hua”		
5	罗茨真空泵(机械增压泵)	ZJ	“增”压“zeng”,“机”械“ji”		
6	余摆线真空泵	YZ	“余”摆“yu”,“真”空“zhen”		
7	溅射离子泵	L	“离”子“li”		
8	单级多旋片式真空泵	XD	“旋”片“xuan”,“多”“duo”	抽气速率	m ³ /h
9	分子泵 ^①	F	“分”子“fen”	进气口径	mm
10	油扩散真空泵	K	“扩”散“kuo”		
11	汞扩散真空泵	KG	“扩”散“kuo”,“汞”“gong”		
12	油扩散喷射泵(油增压泵)	Z	“增”压“zeng”		
13	升华泵	S	“升”华“sheng”		
14	回旋泵(弹道泵)	HX	“回旋”“hui xuan”		
15	复合式离子泵	LF	“离”子“li”,“复”合式“fu”		
16	锆铝吸气剂泵	GL	“锆”“gao”,“铝”“lu”		
17	制冷机低温泵	DZ	“低”温“di”,“制”冷“zhi”		
18	灌注式低温泵	DG	“低”温“di”,“灌”注“guan”		

(续)

序号	真空泵名称	代号	关键字意义及拼音字母	真空泵规格或主参数	相应单位
19	分子筛吸附泵	IF	“吸”附“xi”, “分”子“fen”	分子筛质量	kg
20	水喷射泵	PS	“喷”射“pen”, “水”“shui”	抽气量	kg/h
21	空气喷射泵	PQ	“喷”射“pen”, 空“气”“qi”		
22	水蒸气喷射泵	P	“喷”射“pen”		

注:①个别规格泵的进气口径相同而抽气速率不等,则可同时标出抽气速率,单位:L/s

表 3-2 真空泵特征

代 号	关键字意义及拼音字母	代 号	关键字意义及拼音字母
W	“卧”式“wo”	T	“凸”腔“tu”
Z	“直”联“zhi”	F	“风”冷“feng”
S	“升”华器“sheng”	X	磁“悬”浮“xuan”
D	“多”式,“多”元“duo”	J	“金”属密封“jin”
C	“磁”控“ci”	G	“干”式(无油)“gan”

(二) 真空泵型号示例

- ①W-35B 往复真空泵,抽气速率为 35L/s,第二次改型设计;
- ②2X-15A 双级旋片式真空泵,抽气速率为 15L/s,第一次改型设计;
- ③XD-63 单级多旋片式真空泵,抽气速率为 63m³/h;
- ④ZJ-600 罗茨真空泵抽气速率为 600L/s;
- ⑤YZ-150 余摆线真空泵,抽气速率为 150L/s;
- ⑥3L-160 三极溅射离子泵,抽气速率为 160L/s;
- ⑦F-160 分子泵,进气口径为 160mm;
- ⑧K-800 油扩散真空泵,进气口径为 800mm;
- ⑨Z-400 油扩散喷射泵,进气口径为 400mm;
- ⑩S-400 升华泵,进气口径为 400mm;
- ⑪GL-100 锆铝吸气剂泵,进气口径为 100mm;
- ⑫DZ-160 制冷机低温泵,进气口径为 160mm;
- ⑬IF-3 分子筛吸附泵,装入分子筛质量为 3kg;
- ⑭水蒸气喷射泵型号按下例编制:

3P0.63-50/0.6-10 三级水蒸气喷射泵。吸入压力为 0.63kPa,抽气量为 50kg/h,其中可凝性气体量为 10kg/h,工作蒸汽压力为 0.6MPa。

二、往复式真空泵

(一) 概述

往复式真空泵(又称活塞式真空泵)的极限真空,单级为 $4 \times 10^2 \text{Pa} \sim 10^3 \text{Pa}$,双级可达 1Pa,抽速范围 45m³/h~20000m³/h,用于从密封的容器中抽除气体。被抽气体温度不超过 35℃。如果加上辅助设备,如冷冻器,也可以抽蒸气。往复式真空泵的排气量较大,多用于真空浸渍、

钢水真空处理、真空蒸馏、真空蒸发、真空浓缩、真空结晶、真空干燥、真空过滤及混凝土的真空作业等方面抽除气体。

往复式真空泵对于抽除腐蚀性的气体或含有颗粒状灰尘的气体是不适用的。被抽气体中如果含有灰尘,在泵的进口处必须加装过滤器。

无油往复真空泵由于采用自润滑材料的活塞环、密封环,气缸内无须加油润滑;在气缸与机体之间加设隔油腔(其长度大于一个行程长度),阻止机体内润滑油沿活塞杆漏入气缸,所以该泵对被抽系统无污染。无油往复真空泵有立式和卧式两种结构。

该泵的应用范围是:①需要清洁真空的环境中;②在气体需要回收时,可在充气腔充入回收气体,以保证气体的纯度;③当抽除易燃易爆气体时,可向隔离腔充入惰性气体,使空气(助燃剂)无法漏入气缸,避免事故发生。

(二) 结构原理

往复真空泵的工作原理如图 3-1 所示。主要部件是气缸 1 及在其中做往复直线运动的活塞 2。活塞的驱动是用曲柄连杆 3 来完成的。除上述主要部件外还有排气阀 4 和吸气阀 5。

运转时,在电动机的驱动下,通过曲柄连杆机构的作用,使气缸内的活塞做往复运动。当活塞在气缸内从左端向右端运动时,由于气缸的左腔体积不断增大,气缸内气体的密度减小,而形成抽气过程,此时容器中的气体经过吸气阀 5 进入泵体左腔。当活塞达到最右位置时,气缸内就完全充满了气体。接着活塞从右端向左端运动,此时吸气阀 5 关闭。气缸内的气体随着活塞从右向左运动而逐渐被压缩,当气缸内气体的压强达到或稍大于大气压时,排气阀 4 被打开,将气体排到大气中,完成一个工作循环。当活塞再自左向右运动时,又吸进一部分气体,重复前一循环,如此反复下去,直到被抽容器内达到某一稳定的平衡压力为止。

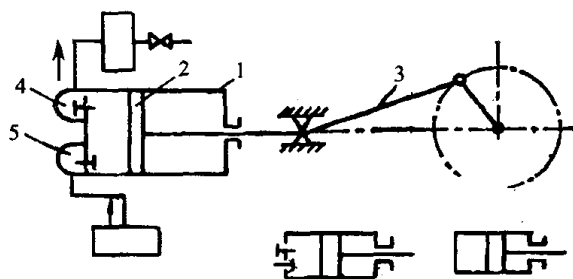


图 3-1 往复泵工作原理图

1—气缸; 2—活塞; 3—曲柄连杆机构;
4—排气阀; 5—吸气阀。

(三) 型式与基本参数(摘自 JB/T 7675—95)

JB/T 7675—95 适用于抽除不含颗粒和基本无腐蚀性气体的单级往复真空泵(以下简称泵)。泵的基本型式为单级立式或卧式往复真空泵,型号表示方法应符合 JB/T 7673—95 的规定。泵的基本参数应符合表 3-3、表 3-4 规定。泵进出口法兰应符合 GB 6070 规定。泵的性能测试应按本标准的试验方法和检验规则进行。

表 3-3 WY 系列(移动阀式)泵型号及其基本参数

型 号	抽气速率/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力/ kPa	功率/ kW	进出气法兰内径/ mm	
				进 口	出 口
WY-50	50	≤ 1.3	5.5	50	50
WY-100	100		11	80	80
WY-200	200		22	125	125

表 3-4 W 系列(固定阀式)泵型号及其基本参数

型 号	抽气速率/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力/kPa	功率/kW	进出气法兰内/mm	
				进 口	出 口
W-50	50	≤ 2.6	4	50	50
W-70	70		7.5	80	80
W-150	150		15	125	125
W-300	300		30	175	175
W-600	600		—	225	225
W-1200	1200		—	300	300

(四) 国产往复真空泵的技术性能、外形及安装尺寸

1. 技术性能

国产 W、WY 往复真空泵技术性能见表 3-5。

表 3-5 国产 W、WY 型往复真空泵技术性能

型 号	抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 /Pa	转速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功率 /kW	气缸直径×行程 /mm×mm	气管进出口直径 ^① /mm	水管进出口直径 ^② (mm/mm)	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	生产厂家
WY-50(V5)	56	1.3×10^3	300	5.5	250×150	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1435×624×710	山东淄博真空设备厂有限公司
WY-100(W4)	103	1.3×10^3	200	11	350×200	101.6(4)	76.2/101.6(3/4)	1819×876×900	
WY-200(W5)	214	1.3×10^3	200	22	455×250	127(5)	76.2/101.6(3/4)	2357×1010×1162	
W2	35	2.6×10^3	300	4	220×130	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1350×500×640	
W3	56	2.6×10^3	300	5.5	250×150	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1418×630×650	
W4-1	103	2.6×10^3	530	11	250×150	101.6(4)	25.4/101.6(1/4)	1486×520×720	
W5-1	214	2.6×10^3	430	22	350×200	127(5)	76.2/101.6(3/4)	1805×670×860	
W-300	300	2.6×10^3	300	30	450×200	175	76.2/101.6(3/4)	1980×745×980	
W-70	70	2.6×10^3		5.5		50.8(2)	50.8(2)	1420×564×640	浙江真空设备集团有限公司
WY-150	150	1.3×10^3		11		101.6(4)	101.6(4)	1804×820×892	
WY-300	300	1.3×10^3		22		127(5)	127(5)	2328×1010×1162	
W-30	30	2×10^3	300	4	220×130	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1237×447×640	上海真空泵厂
W-70	70	2×10^3	360	7.5	250×150	101.6(4)	25.4/50.8(1/2)	1573×503×720	
W-150	150	2×10^3	300	15	350×200	127(5)	76.2/101.6(3/4)	1946×654×812	
W-300	300	2×10^3	285	30	455×250	180	76.2/101.6(3/4)	2475×756×1138	
W2	30	2×10^3	300	4	220×130	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1205×500×640	
W3	50	2×10^3	300	5.5	250×150	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1402×615×640	
W4-1	100	2×10^3	530	11	250×150	101.6(4)	25.4/50.8(1/2)	1486×495×520	
W5-1	200	2×10^3	430	22	350×200	127(5)	76.2/101.6(3/4)	1801×668×650	

(续)

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	气缸直径×行程 /mm×mm	气管进出 口直径 ^① /mm	水管进 出口直径 ^① /(mm/mm)	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	生产厂家
WY-50(W3)	56	1.3×10 ³	300	5.5	250×150	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1435×624×710	沈阳真空泵厂
WY-100(W4)	103	1.3×10 ³	200	11	350×200	101.6(4)	76.2/101.6(3/4)	1819×876×900	
WY-200(W5)	214	1.3×10 ³	200	22	455×250	127(5)	76.2/101.6(3/4)	2357×1010×1162	
W3	56	2.6×10 ³	300	5.5	250×150	50.8(2)	25.4/50.8(1/2)	1418×630×650	
W4-4	103	2.6×10 ³	200	11	350×200	101.6(4)	76.2/101.6(3/4)	1819×876×900	
W4-1	103	2.6×10 ³	530	11	250×150	101.6(4)	25.4/50.8(1/2)	1486×520×720	
W5-1	214	2.6×10 ³	430	22	350×200	101.6(4)	76.2/101.6(3/4)	1805×670×860	
W-300	300	2.6×10 ³	300	30	450×220	175	76.2/101.6(3/4)	1930×745×980	
HWZ-4 ^②	4	1	910	1.1	/	φ17 进 φ40 排	/	917×350×294	
W-50	50	2.6×10 ⁻³	320	4					南京真空泵厂
W-100	100	2.6×10 ⁻³	350	7.5					
W-200	200	1.3×10 ⁻³	200	22					

注:①括号中的数为英寸;②HWZ-4 型真空泵属于卧式干式(无油)真空泵,能在 10⁻⁵Pa~10⁻²Pa 压力范围内工作。在泵腔及抽气流道内不使用任何油类或液体,泵排气口可直接向大气中排气。泵的压缩比为 10⁵:1,工作温度范围 0~50℃,多用于半导体元件生产、食品保鲜与包装、医药、化工、石油等工业中,能将大量凝性蒸气或有毒、易腐蚀等气体排出

2. W 型泵抽速特性曲线(上海真空泵厂)

W 型往复泵抽速特性曲线如图 3-2 所示。

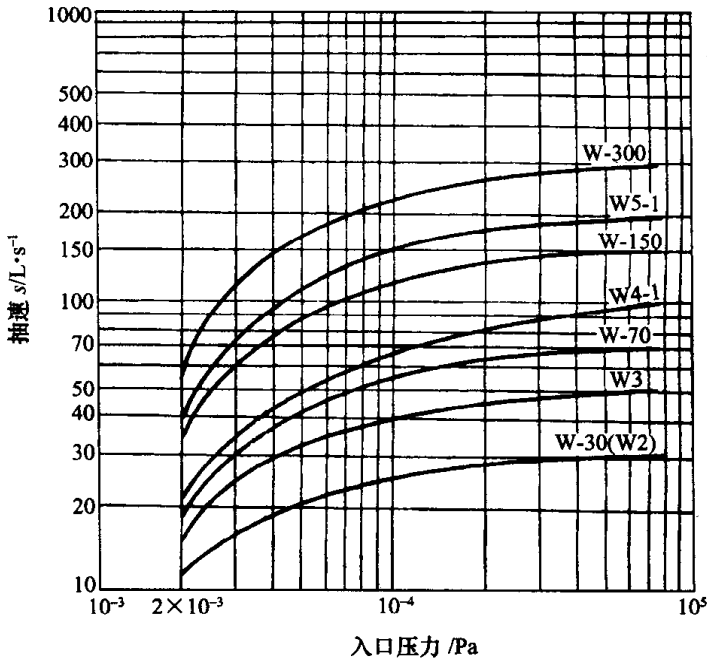


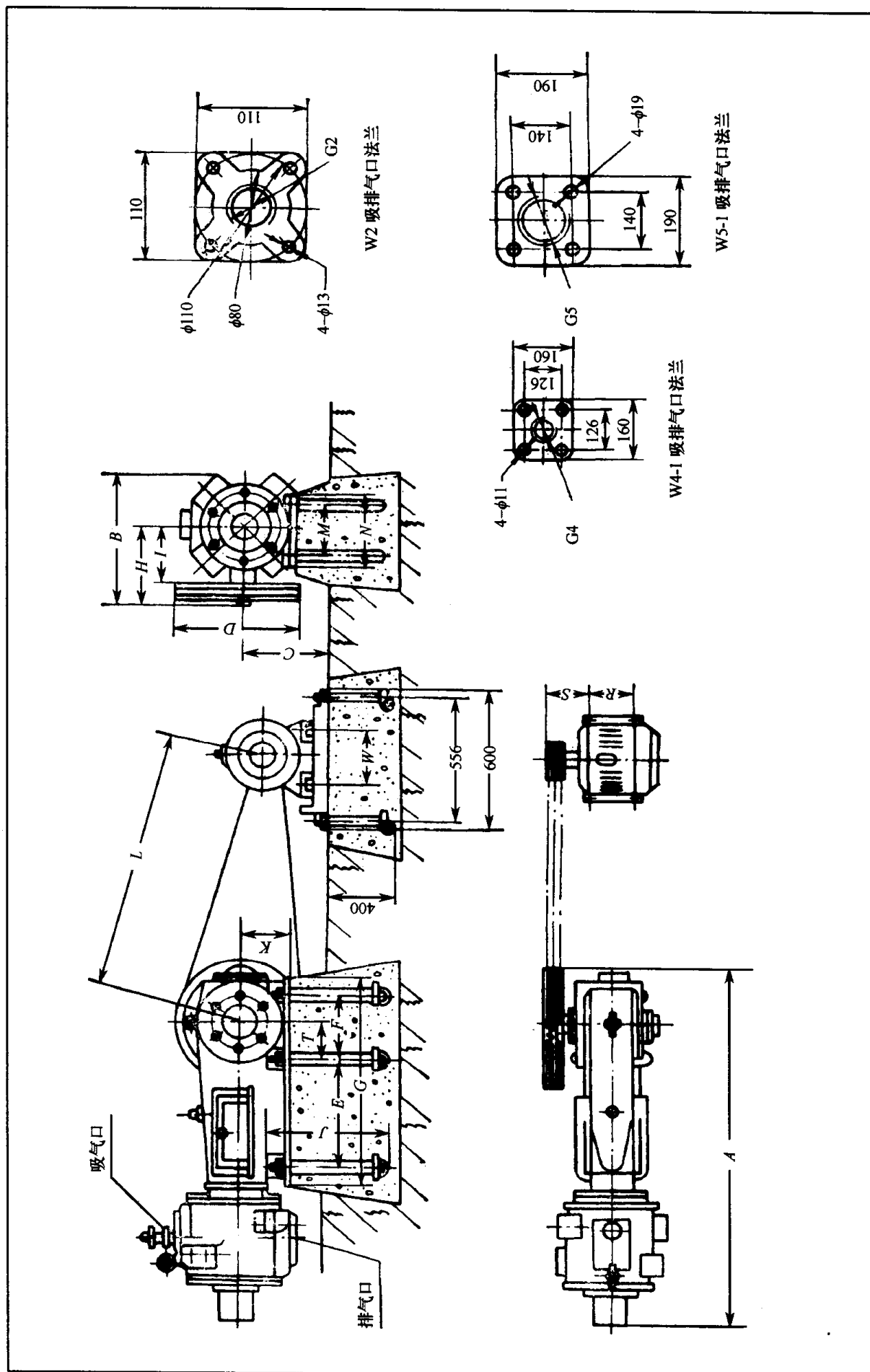
图 3-2 W 型往复泵抽速特性曲线

3. W 型往复泵安装尺寸图

①山东淄博真空设备厂有限公司、上海真空泵厂生产的 1W2、W3、W4-1、W5-1、W-50、W-100、W-200、W-300 型往复泵安装尺寸图表如表 3-6 所示。

表 3-6 W2、W3、W4-1、W5-1、W-100、W-200、W-300 型往复泵安装尺寸

(单位:mm)



W-300 吸排气口法兰

WY-100(W4) 排气法兰

WY-100(W4) 吸气法兰

WY-200 吸排气法兰 (W5)

W3、WV-50(V/S) 吸排气口法兰

W4-1

W5-1

W-300

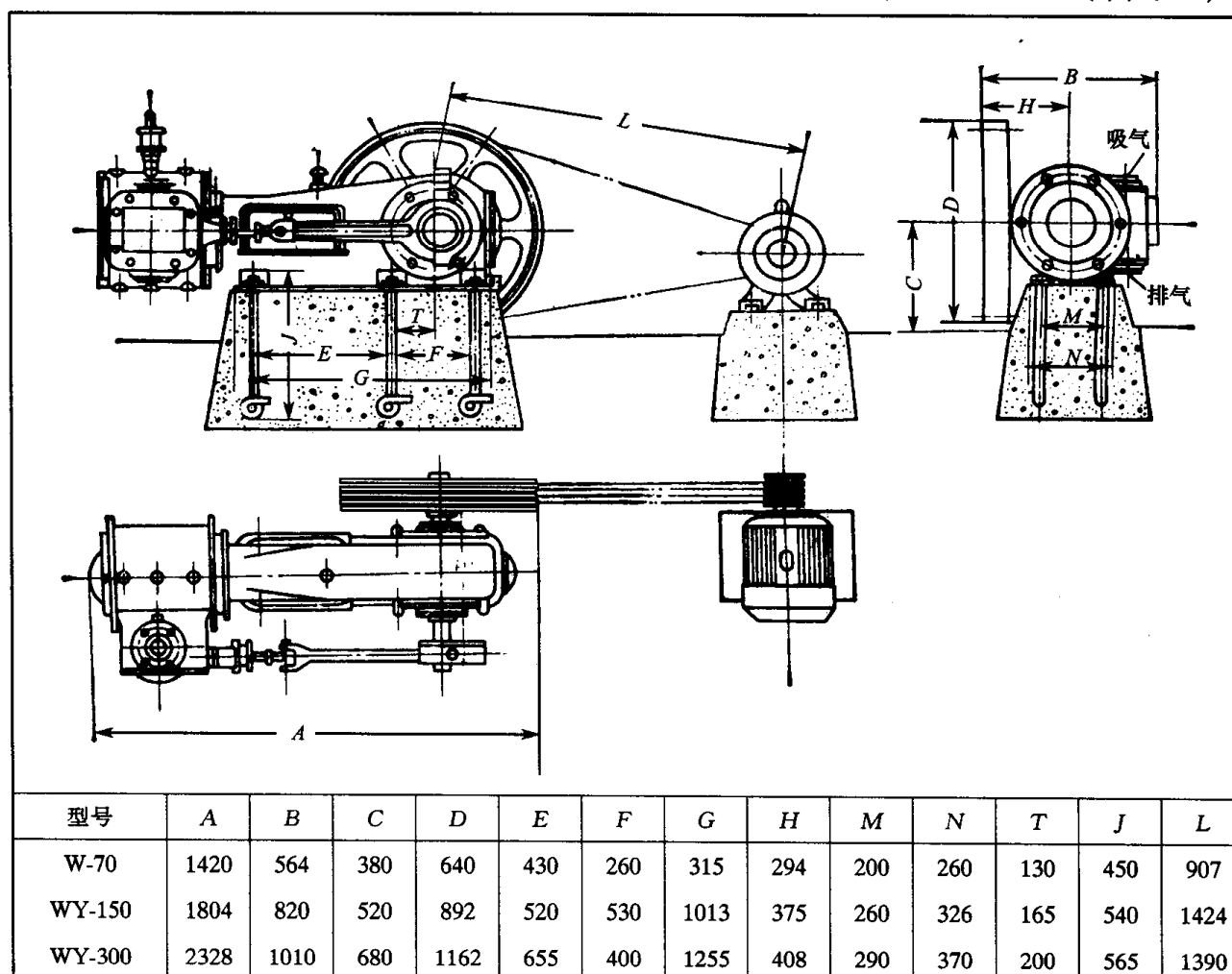
W2

W3

139

②浙江真空设备集团有限公司生产的 W-70、WY-150、WY-300 型往复泵安装尺寸图表如表 3-7 所示。

表 3-7 W-70、WY-150、WY-300 型往复泵安装尺寸 (单位:mm)



③山东淄博真空设备有限公司生产的 W-300W 型无油往复真空泵外形及安装尺寸图如图 3-3 所示。

④沈阳真空泵厂生产的 HWZ-4 型活塞干式真空泵外形及安装尺寸如图 3-4 所示。

(五) WL 系列立式节能往复真空泵

1. 概述

WL 系列往复立式节能真空泵是针对国内现有的 W 型系列卧式往复真空泵在长期使用过程中存在的种种缺陷,参考日本宇野泽(PVT)、瑞士勃克哈特(Burkhardt)产品的优点而设计的。它是国产 W 型卧式泵的更新换代产品,与老式 W 型卧式泵相比,其主要优点是:①功率消耗平均减少 1/3。原 W5 型为 22kW,而 WL-200 型为 15kW。原 W4 型为 11kW,而 WL-100 型为 7.5kW;原 W3 型为 5.5kW,而 WL-50 型为 4kW,节能显著。②占地面积平均减少 2/3。原 W5 型为 3.8m²,而 WL-200 型为 1.2m²;原 W4 为 2.4m²,而 WL-100 型为 0.8m²;原 W3 型为 1.5m²,而 WL-50 型为 0.55m²,省地明显。③节省水 1/2。气缸水套采用强制冷却,不仅冷却效果好,而且比 W 型泵节水近一半。④WL 系列泵因消除了横波劣性振动,故振动降低,噪声平均降低 5dB 以上。⑤WL 系列往复立式节能真空泵采用密封式,克服了原 W 型卧式泵不断向外溅油,既不卫生

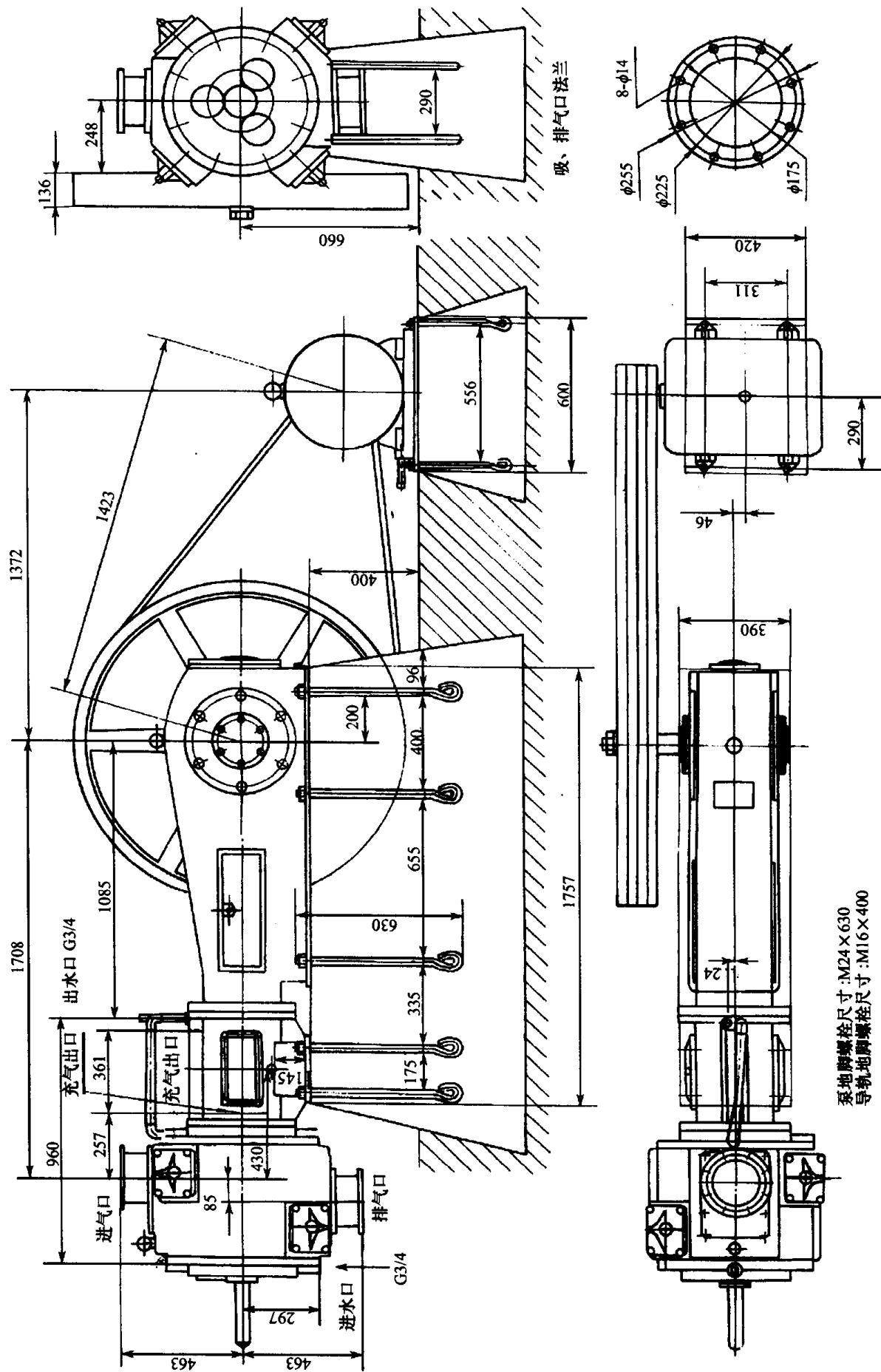


图 3-3 W-300W 型无油往复真空泵外形及安装尺寸图

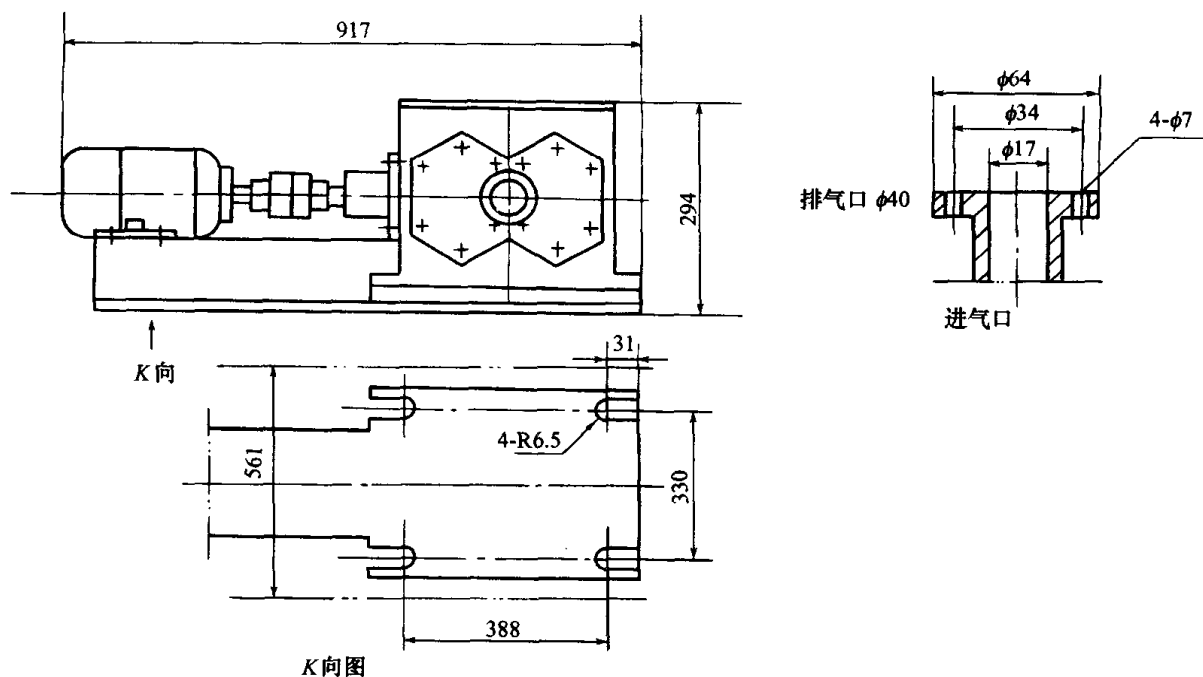


图 3-4 HWZ-4 型活塞式无油真空泵外型安装图

又浪费等缺陷。⑥使用寿命长。该泵由于结构合理,受力均匀,使得各运动部位磨损减轻,经实验数据表明:气缸、活塞环、活塞杆、轴衬、十字头等平均磨损率下降两个数量级;气阀优化设计,使得气道阻力减轻,阀片得到缓冲,气阀寿命提高 50~70 倍。

2. 技术性能

WL 型往复式真空泵技术性能如表 3-8 所示。

表 3-8 WL 型往复式真空泵技术性能

型号	抽气速率 $L \cdot s^{-1}$	极限压力 Pa	转速 $r \cdot min^{-1}$	机组噪声 dB_A	进/排气 管道 /mm	进/排 水管道 /mm	电机 功率 /kW	电机型号	质量 /kg	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	生产厂家
WL-50	50	1.3×10^3	380	<74	进 2 排 3	76.2/203.2(3/8)	4	Y132M1-6	500	1520×1255×1210	上海亚东 真空设备 厂
WL-100	100	1.3×10^3	340	<76	进 3 排 4	25.4/50.8(1/2)	7.5	Y136M-6	820	1620×1255×1310	
WL-200	200	1.3×10^3	320	<78	进 4 排 5	76.2/101.6(3/4)	15	Y180L-6	1200	1720×1255×1410	
WL-50	50	2.6×10^3	355	/	75/75	25.4/50.8(1/2)	4	Y132M-6	500	2230×1350×1400	
WL-100	100	2.6×10^3	350	/	100/100	25.4/50.8(1/2)	7.5	Y160M-6	820	1458×816×780	山东淄博 真空设备 有限公司
WL-200A	200	2.6×10^3	310	/	125/125	76.2/101.6(3/4)	15	Y180L-6	1400	1585×1080×928	
WL-600	600	2.6×10^3	320	/	175/175	76.2/101.6(3/4)	45	Y280S-6	2800	2166×1250×1080	
ZWL-25	25	1×10^2	355	<70	75/75	25.4/50.8(1/2)	4	Y32M1-6	500	900×390×1186	
ZWL-50	50	1×10^2	350	<75	80/80	25.4/50.8(1/2)	7.5	Y160M-6	800	1030×440×1413	
ZWL-100	100	1×10^2	300	<78	125/125	25.4/50.8(1/2)	15	Y180L-6	1200	1200×508×1611	
ZWL-150	150	1×10^2	300	<80	/	25.4/50.8(1/2)	22	Y200L-6	1600	/	
WLW (WL-50)	50	2.6×10^{-3}	320	<74	75	25.4/50.8(1/2)	4	Y132M1-6	/	/	南京真空 泵厂
WLW (WL-100)	100	2.6×10^{-3}	350	<76	100	25.4/50.8(1/2)	7.5	Y132M1-6	/	/	
WLW (WL-200)	200	2.6×10^{-3}	300	<78	125	76.2/101.6(3/4)	15	Y132M1-6	/	/	

3. 特性曲线

WL 型往复立式节能真空泵抽速特性曲线(上海亚东真空设备厂)如图 3-5 所示。

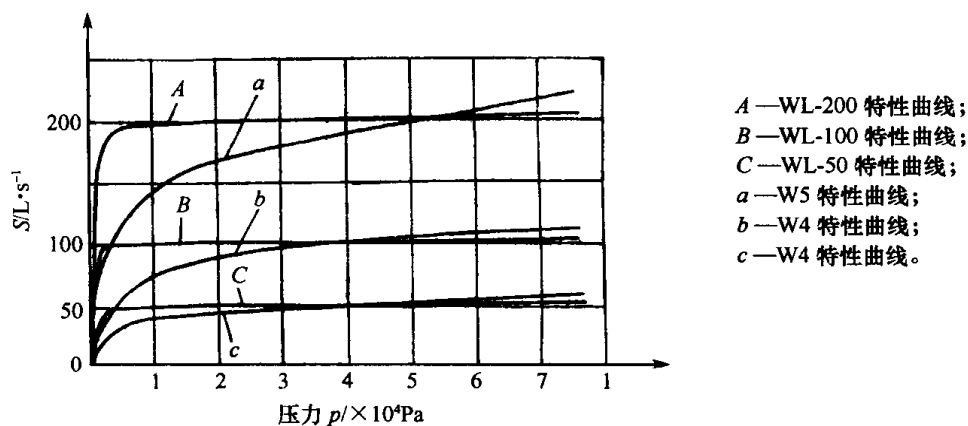


图 3-5 WL 型往复立式节能真空泵特性曲线

4. 外形及安装尺寸

WL 系列往复立式节能真空泵外形及安装尺寸(上海亚东真空设备厂)如表 3-9 所示;WL 系列立式往复真空泵外形尺寸(山东淄博真空设备厂有限公司)如表 3-10 所示;2WL 系列立式真空泵外形及安装尺寸(山东淄博真空设备厂有限公司)见表 3-11。

表 3-9 WL 系列往复立式节能真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

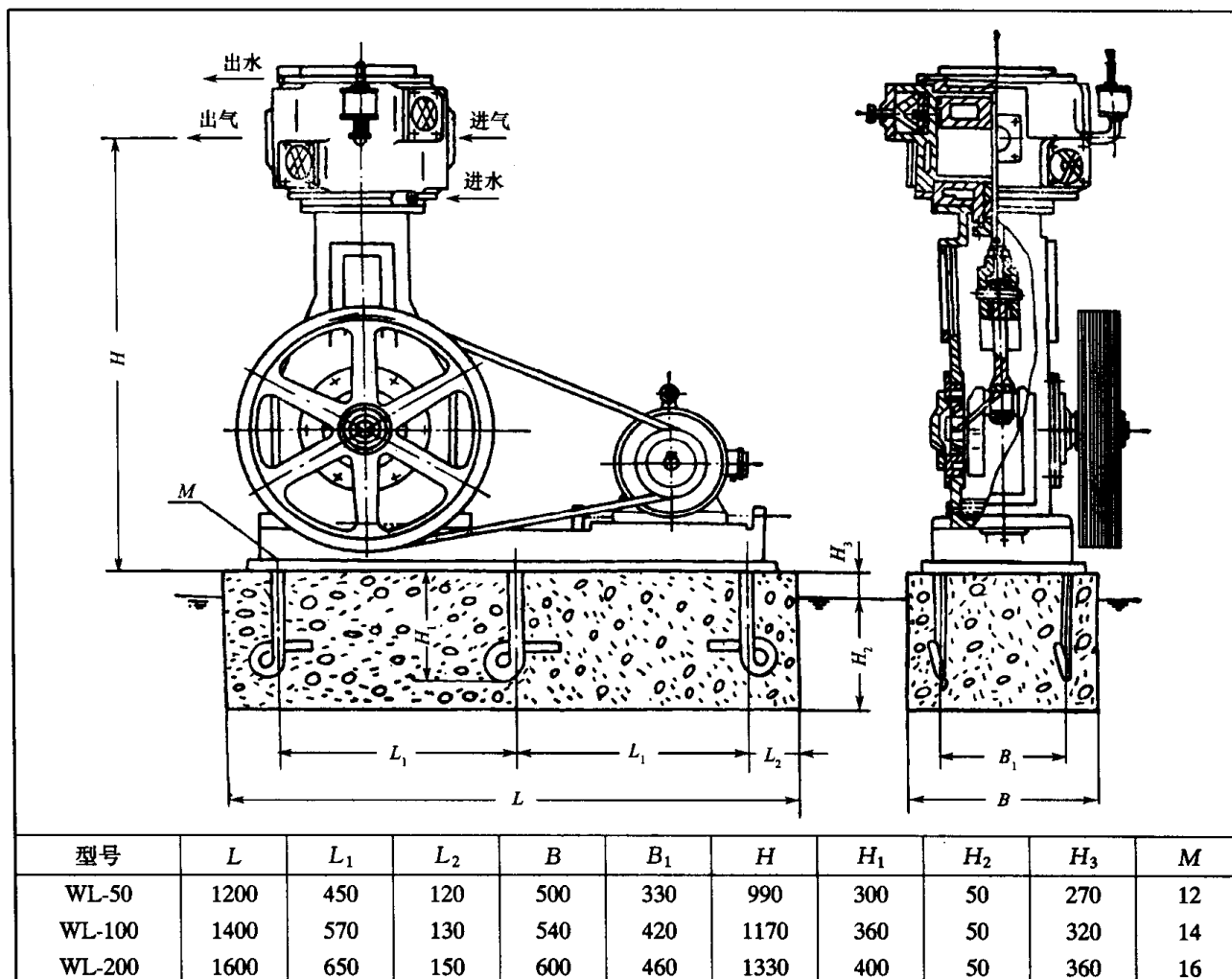


表 3-10 WL 系列立式往复真空泵外形尺寸

(单位:mm)

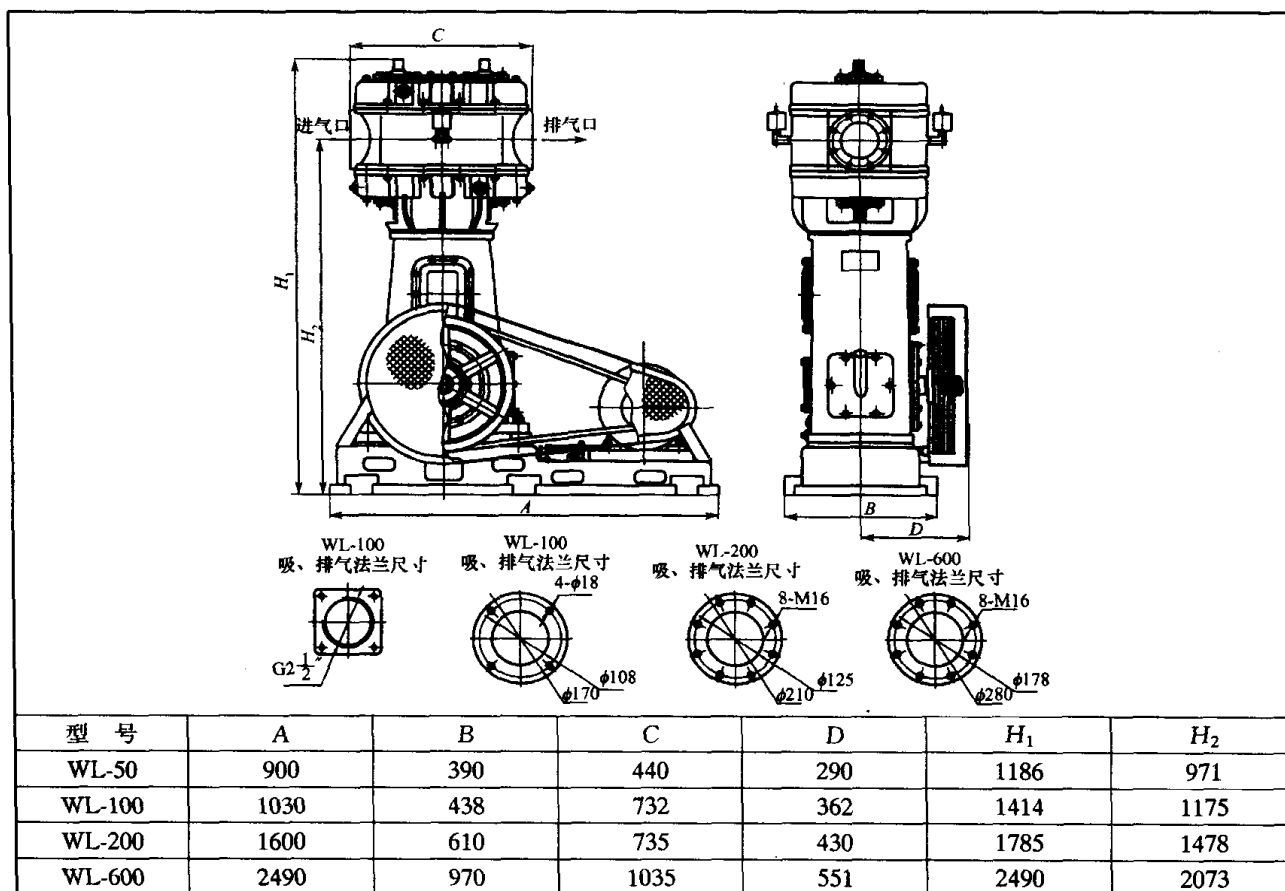
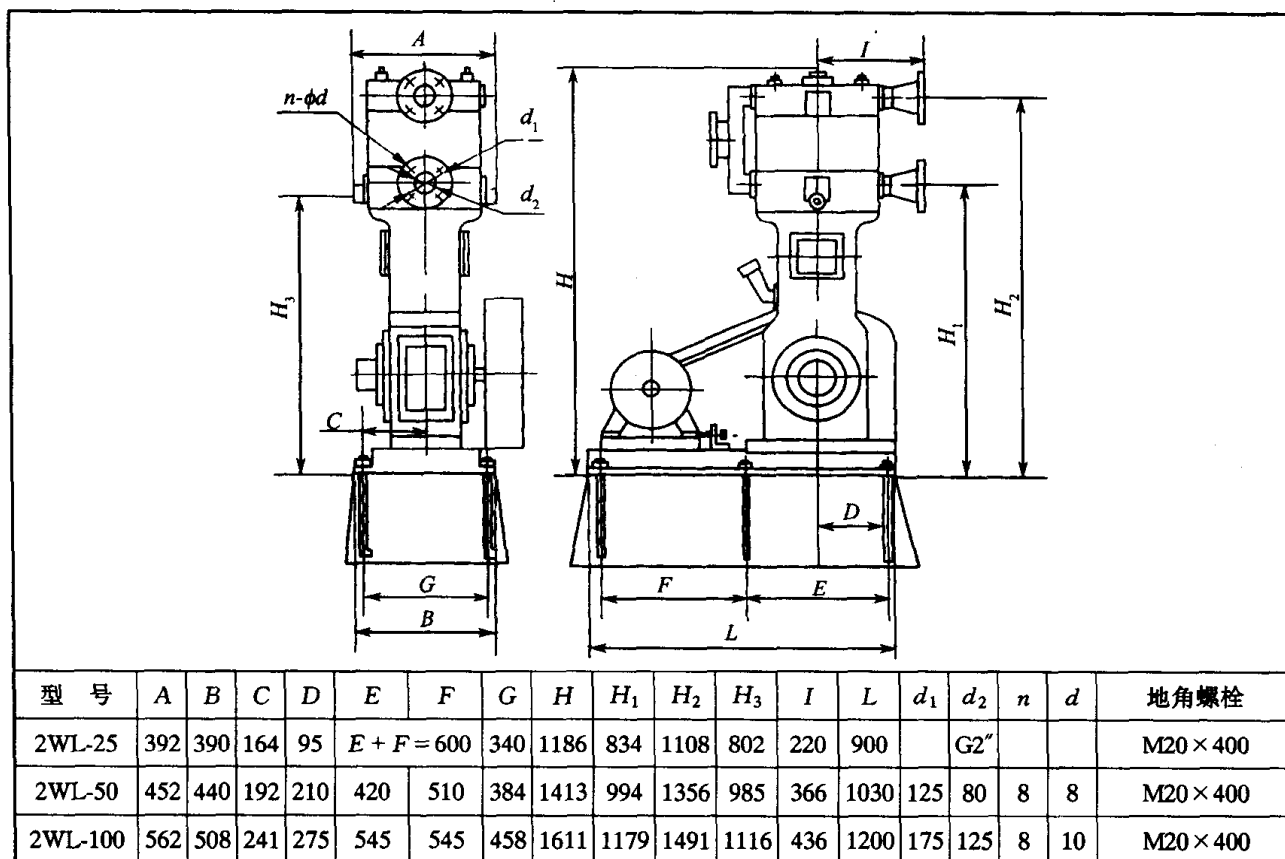


表 3-11 2WL 系列立式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



三、液环式真空泵

(一) 概述

液环式真空泵是带有多叶片的转子偏心装在泵壳内,当它旋转时,把液体(通常为水和变压器油)抛向泵壳并形成与泵壳同心的液环,液环同转子叶片形成了容积周期变化的旋转变容真空泵。水环式真空泵是液环式真空泵中最常见的一种。

水环式真空泵主要用于粗抽真空、抽气量大的工艺过程中,在化工、石油、轻工业部门得到了广泛的应用。这种泵的优点是:结构简单,制造容易,工作可靠,使用方便,耐久性强,可以抽腐蚀性气体、含有灰尘的气体和气水混合物。被抽气体的温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 为宜。

单级水环泵的极限压力可达 $8 \times 10^3 \text{Pa} \sim 2 \times 10^3 \text{Pa}$,双级水环泵的极限压力可达 $2 \times 10^3 \text{Pa} \sim 4 \times 10^3 \text{Pa}$,抽速为 $0.25 \text{m}^3/\text{min} \sim 500 \text{m}^3/\text{min}$ 。

目前国内水环泵的主要型号有 SZ 型、SZB 型、SZH 型、SZZ 型和 SZL 型、SK 型、2BE1 型。

SZ 型水环式真空泵可用于抽除无腐蚀性、不溶于水、不含有固体颗粒的气体 and 空气。

SZB 型水环式真空泵为悬臂式。除具有 SZ 型相同的用途外,特别适用于大型水泵真空引水,极限压力可达 $1.5 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

SZH 型水环式真空泵主要用于抽除空气,以便在密闭装置中获得真空,还特别适用于水泵真空引水,亦可用于真空过滤装置。SZH 泵工作时不宜使用含有杂质的水做循环水。

SZZ 型、SZL 型泵为直联式泵,用途同 SZB 型。

SK 型水环式真空泵是一种效率较高的双作用型水环真空泵。工作气体温度在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 。广泛用于各工业部门作真空干燥、真空脱水,尤其适用于需要清洁、无油的真空系统,有大量水蒸气溢出的抽气过程以及洗煤厂、选矿厂的真空过滤。

2BE1 型水环式真空泵是引进德国西门子公司技术开发的节能产品。采用单级单作用的结构形式,具有结构简单、运行可靠、高效节能的优点。用途同 SK 型水环式真空泵。

此外,油环泵也是液环式真空泵的一种。它与水环泵的最大区别是工作液由变压器油替代了水,除密封件的不同之外,泵本身结构与水环泵无多大差别。为使油环泵能在合适的温度下工作,油环泵本身均带有冷却油箱(又称油气分离器)。油环泵的极限压力可达 $6.7 \times 10^2 \text{Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{Pa}$ 。若需回收被抽物质,可采用与被抽物质相溶的液体作为泵的工作液,如煤油、苯乙烯、乙二醇等。

(二) 工作原理

水环泵工作原理如图 3-6 所示。

水环泵转子 2 在泵体 1 中旋转时形成了液体 3 和工作室 5。水环与工作轮构成了月牙形空间。右边半个月牙形的容积由小变大,形成吸气室,左边的半个月牙形的容积由大变小,构成排气室。被抽气体由进气管 8 和进气孔 4 进入吸气室。转子进一步转动,气体被压缩,经过排气孔 6 和排气管 7 排出。

排出的气体和水滴由排气管 7 进入水箱 10,此时气体由水中分离出来,气体经排气管 9 排到大气中,水由水箱进入泵中,或经过管道 11 排到排水设备中。

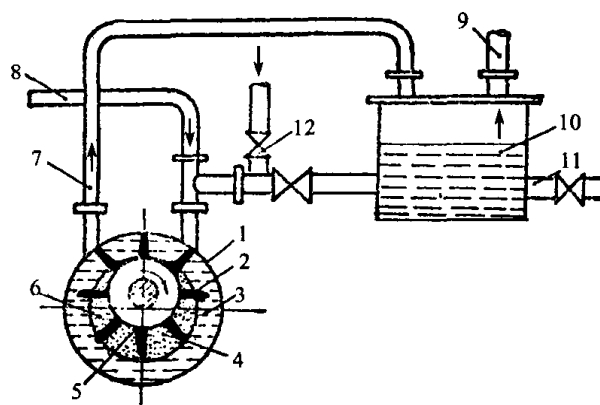


图 3-6 水环泵工作原理示意图

1—泵体;2—转子;3—液体环;4—进气孔;5—工作室;6—排气孔;
7—排气管;8—进气管;9—排气管;10—水箱;11—管道;12—控制阀。

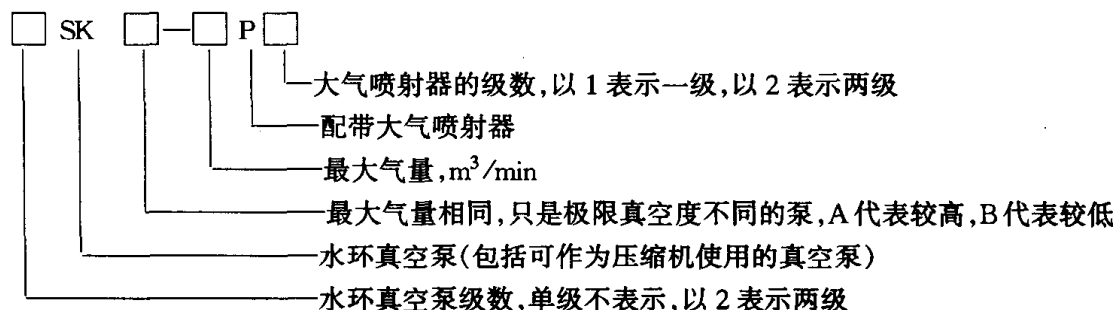
(三) 型式与基本参数(摘自 JB 17255—94)

1. 型式

水环真空泵和水环压缩机分为下列型式:单级水环真空泵(包括水环压缩机);两级水环真空泵。两种型式均可作为单作用轴向吸排气或径向吸排气,以及双作用轴向吸排气或径向吸排气。水环真空泵也可制成与大气喷射器组合使用的结构型式。

(1)型号

水环真空泵的表示方法为



(2)标记示例

①SK-6 最大气量为 $6\text{m}^3/\text{min}$ 的单级水环真空泵(包括也可作为压缩使用的水环真空泵);

②SKA-30 最大气量为 $30\text{m}^3/\text{min}$,当两个泵最大气量相同,只是极限真空度不相同,极限真空度高的单级水环真空泵;

③2SK-6 最大气量为 $6\text{m}^3/\text{min}$ 的两级水环真空泵;

④SK-6P1 最大气量为 $6\text{m}^3/\text{min}$,配带一级大气喷射器的单级水环真空泵;

⑤2SK-6P1 最大气量为 $6\text{m}^3/\text{min}$,配带一级大气喷射器的两级水环真空泵。

2. 基本参数

①水环真空泵和水环压缩机的基本参数应分别符合表 3-12~表 3-14 的规定。

②水环真空泵和水环压缩机应在下列条件下使用:a. 泵的工作介质为空气,泵的工作液环为水;b. 大气压力 101.325kPa ;c. 吸入气体的温度 20°C ,相对湿度 70%;d. 工作水温度 15°C 。

三、液环式真空泵

③表 3-11、表 3-12、表 3-13 中性能的允差按 GB/T 13929 的规定。

表 3-12 单级水环真空泵

型 号	最大气量 /m ³ ·min ⁻¹	极限真空度 /kPa	带一级大气 喷射器时 极限真空度 /kPa	带两级大气 喷射器时 极限真空度 /kPa	作压缩机用 时工作压力 范围 /MPa	转速 ^① /r·min ⁻¹	吸入和排出 口径 ^② /mm	
SK-0.4	0.4	19	—		—	1450	25	
SK-0.8	0.8				40			
SK-1.5	1.5	15			50			
SK-3	3	8	3	0.5	0~0.1	970	80	
SK-6	6						100	
SK-12	12						150	
SKA-20	20	15	4	0.6		730	200	
SKB-20	20							
SKA-30	30	8	3	0.5		585	250	
SKB-30	30	15	15	4		490		
SK-42	42					420		
SK-60	60					365	300	
SK-85	85					300		
SK-120	120					250	400	
SK-180	180					200	500	
SK-250	250							

注：①转速为推荐转速，下同；②口径为推荐口径，下同

表 3-13 两级水环真空泵

型 号	最大气量 /m ³ ·min ⁻¹	极限真空度 /kPa	带一级大气喷射 器时极限真空度 /kPa	转速 /r·min ⁻¹	吸入和排出口径 /mm
2SK-0.8	0.8	5	15	1450	40
2SK-1.5	1.5				50
2SK-3	2	4			80
2SK-6	6	35		970	100
2SK-12	12				150
2SK-20	20			730	200
2SK-30	30				

表 3-14 单级水环压缩机

型 号	最大气量 /m ³ ·min ⁻¹	工作压力 0.15MPa 时的气量 /m ³ ·min ⁻¹	工作压力 范围 /MPa	工作压力 0.25MPa 时的气量 /m ³ ·min ⁻¹	工作压力 范围 /MPa	转速 /r·min ⁻¹	吸入和排 出口径 /mm	
SYA-6	6	—		4	0.2~0.3	1450	80	
SYB-6		5	0.1~0.2	—				
SYA-12	12	—		9.5	0.2~0.3		970	100
SYB-12		10	0.1~0.2	—				
SYA-20	20	—		16	0.2~0.3	150		
SYB-20		17	0.1~0.2	—				
SYA-30	30	—	—	24	0.2~0.3	730		200
SYB-30		26	0.1~0.2	—				
SY-42	42	37					590	
SY-60	60	54					490	
SY-85	55	76					420	300
SY-120	120	108						

(四) 国产水环式真空泵的技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. SZ 型水环式真空泵的技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

(1) 技术性能

SZ 型水环式真空泵技术性能分别见表 3-15、表 3-16。

(2) 特性曲线

上海真空泵厂 SZ 型单级水环式真空泵特性曲线如图 3-7 所示。图中所示为水温为 27℃ 时的实测值。

SZ-1、SZ-2 型水环真空泵外形及安装尺寸见表 3-17 所示；SZ-3、SZ-4 型水环式真空泵外形及安装尺寸分别见表 3-18、表 3-19 所示；SZ-0.5、SZ-1、SZ-2、SZ-6 型水环真空泵外形及安装尺寸见表 3-20 所示。

表 3-15 SZ 型水环式真空泵技术性能(一)

型号	抽气速率/m ³ ·min ⁻¹					极限压力 /Pa	功率 /kW	转速 /r·min ⁻¹	水消耗量 /L·min ⁻¹	泵重 /kg	生 产 厂 家
	1×10 ⁵ Pa	1×10 ⁵ Pa	1×10 ⁵ Pa	1×10 ⁵ Pa	1×10 ⁵ Pa						
SZ-1	1.5	0.64	0.4	0.12		2×10 ⁴	4	1450	10	140	山东淄博真空 设备厂有限公司
SZ-2	3.4	1.65	0.95	0.25		1×10 ⁴	10	1450	30	150	
SZ-3	11.5	6.8	3.6	1.5	0.5	8×10 ³	30	975	70	463	武汉水泵厂
SZ-4	27	17.6	11	3	1	7×10 ³	70	730	100	975	

三、液环式真空泵

表 3-16 SZ 型单级水环真空泵技术性能(二)

产品型号	极限压力 /kPa	抽气速率 /m ³ ·min ⁻¹	功率 /kW	转速 /r·min ⁻¹	水消耗量 /m ³ ·h ⁻¹	进排气口径 /mm(英寸)	质量 /kg	生产厂家
SZ-0.5	4	0.65	1.5	2840	0.23	25.4(1)	40	上海真空 泵厂
SZ-1	4	1	2.2	2840	0.25	38.1(1 1/2)	55	
SZ-2	4	2	4	2890	0.45	38.1(1 1/2)	80	
SZ-6	4	6	11	1460	1.2~2	65mm	350	
SZ-1	16	1.5	4	1440	/	70mm	140	浙江真空 设备集团 有限公司
SZ-2	1.3	3.4	7.5	1440	/	70mm	150	
SZ-3	8	11.5	22	970	/	125mm	463	
SZB-8	15	0.84	3	1430	/	25.4(1)	45	

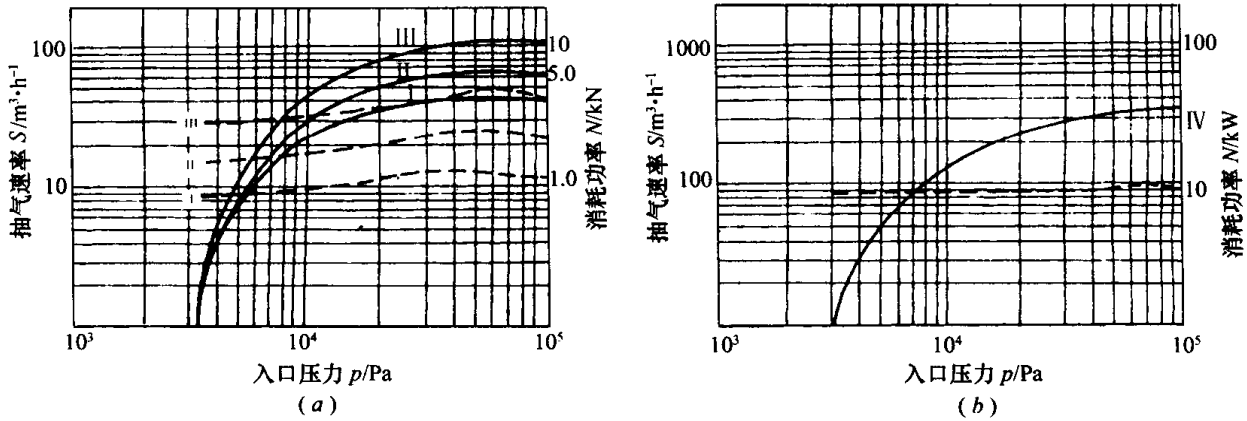


图 3-7 SZ 型单级水环真空泵特性曲线

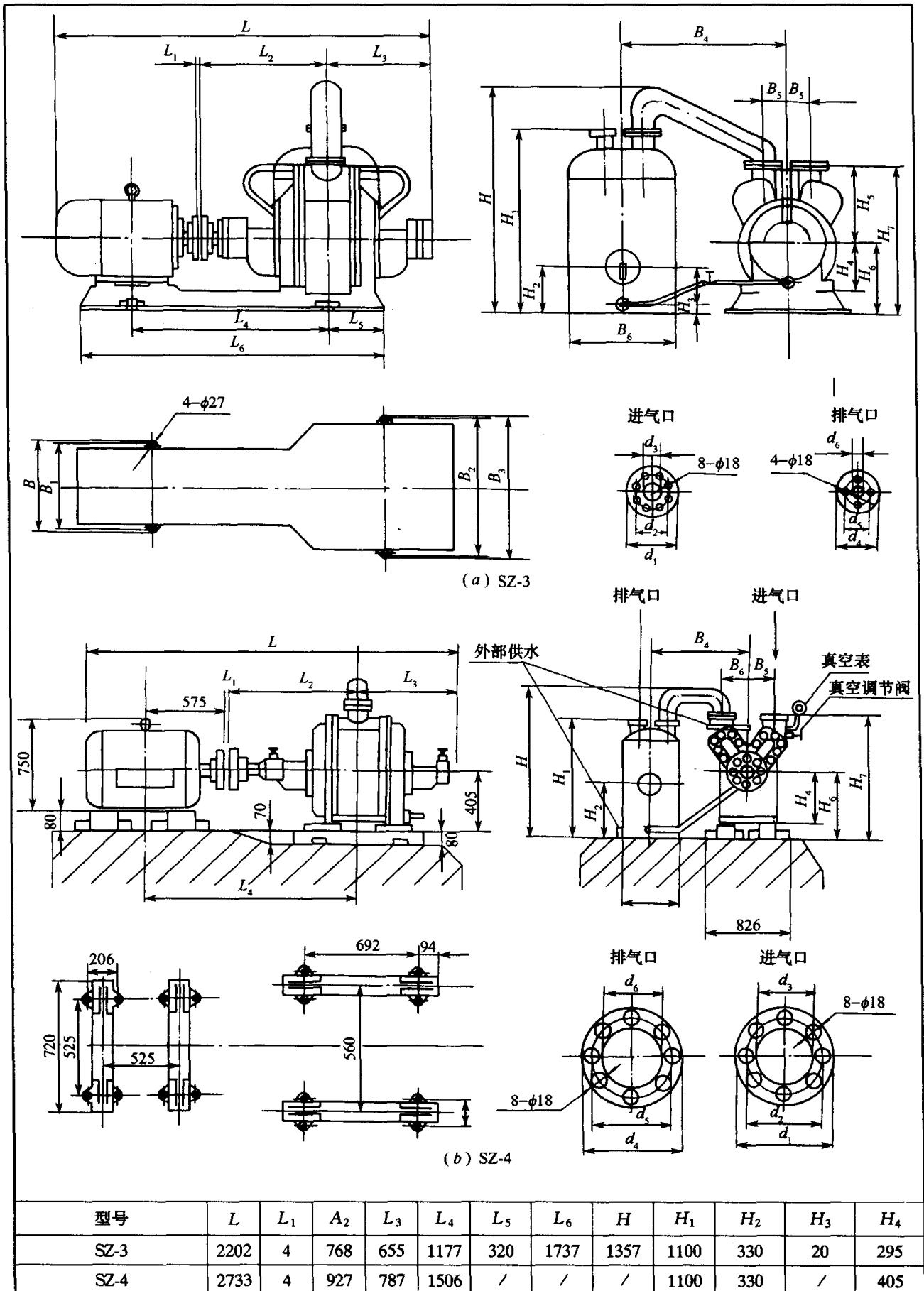
I—SZ-0.5; II—SZ-1; III—SZ-2; VI—SZ-6。

表 3-17 SZ-1、SZ-2 型水环真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

型号	A	B	C	D	E	F	H	P	R	K	T	M	L	电机型号
SZ-1	528	313	420 (342)	470	2	280	315	679	87	513	190	813	414	Y112M-44kW
SZ-2	646	378	454 (370)	514	2	346	315	672	80	640	320	1029	523	Y132M-47.5kW

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

表 3-18 SZ-3、SZ-4 型水环式真空泵外形及安装尺寸(一) (单位:mm)



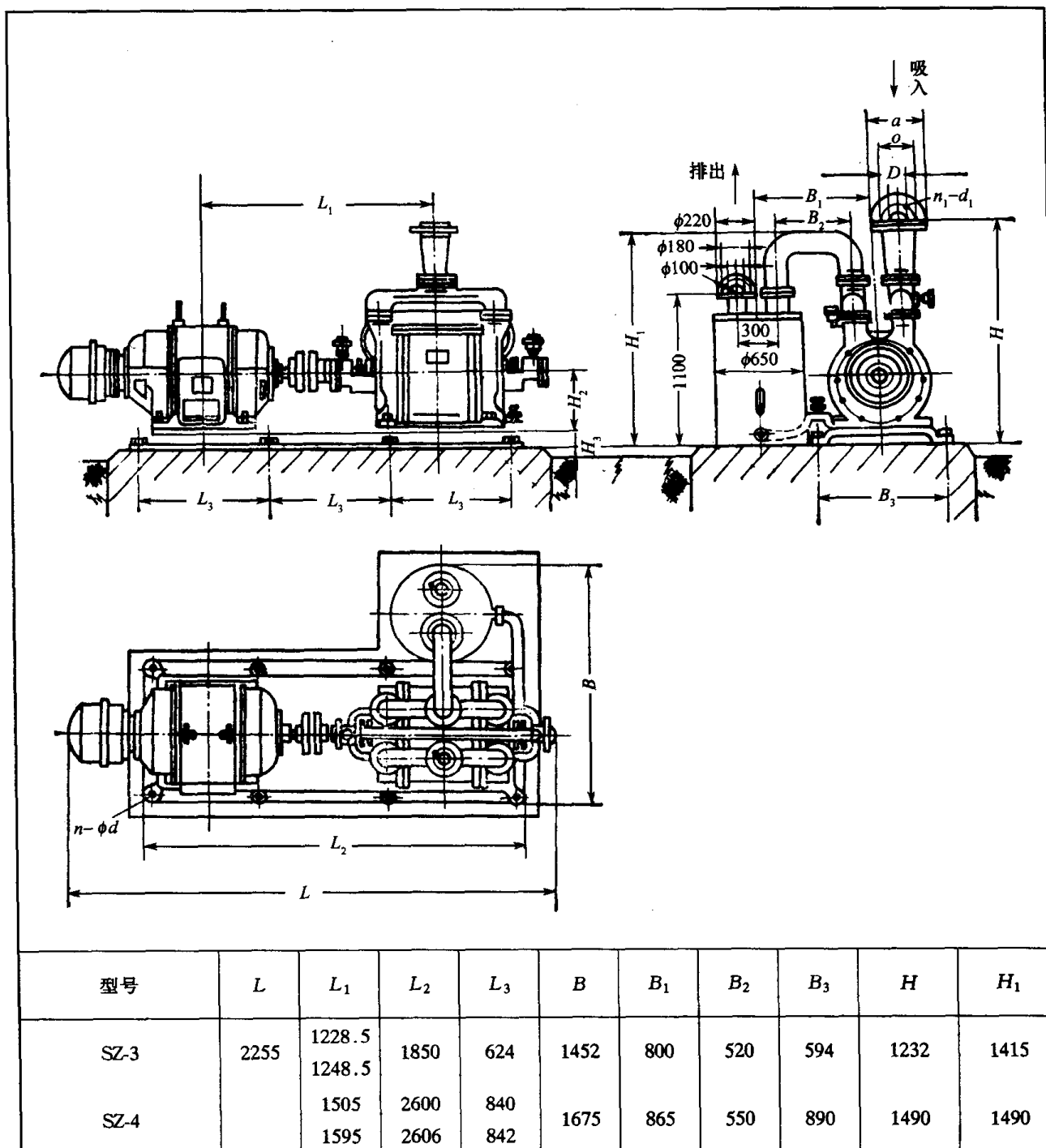
三、液环式真空泵

(续)

型号	H_5	H_6	B	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	d_1	d_2	d_3
SZ-3	380	420	550	480	580	650	912.5	142.5	φ650	φ235	φ200	φ125
SZ-4		485	/	/	/	/	864.5	192.5	φ650	φ290	φ225	φ175
型号	d_4	d_5	d_6		电机型号		地脚螺钉				H_7	
SZ-3	φ205	φ170	φ100		Y200L-6 22kW		M24×630				1050	
SZ-4	φ260	φ225	φ150		JS ₂ 116-8 70kW		M24×630				950	
注:山东淄博真空设备厂有限公司生产												

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

表 3-19 SZ-3、SZ-4 型水环式真空泵外形及安装尺寸(二) (单位:mm)



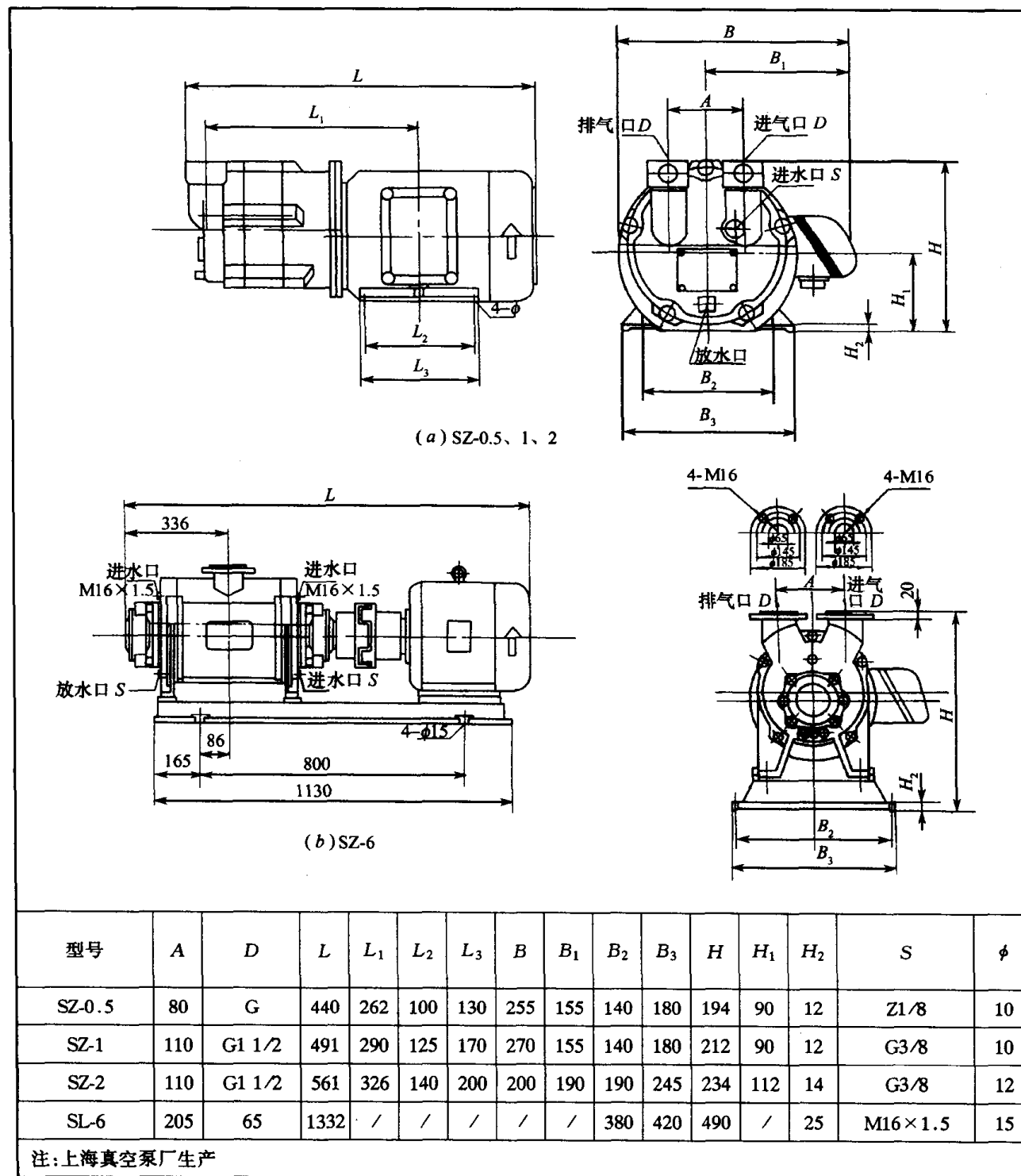
(续)

型号	H_2	H_3	n_1	d_1	D	o	a	d	n	电机型号
SZ-3	300	130	6	27	125	210	250	18	8	Y225M-6-30
SZ-4	405	140 130	8	27	200	295	340	23	8	Y315M1-8-75

注: SZ-3 地脚螺钉孔为 6 个, 分成两排, 排间纵向距离为 624mm; 武汉水泵厂生产

表 3-20 SZ 型单级水环真空泵外形及安装尺寸

(单位: mm)



三、液环式真空泵

2. SZB 型水环式真空泵的技术性能、外形及安装尺寸

SZB 型水环式真空泵的技术性能见表 3-21 所示。

SZB 型水环式真空泵外形及安装尺寸,见表 3-22 所示。

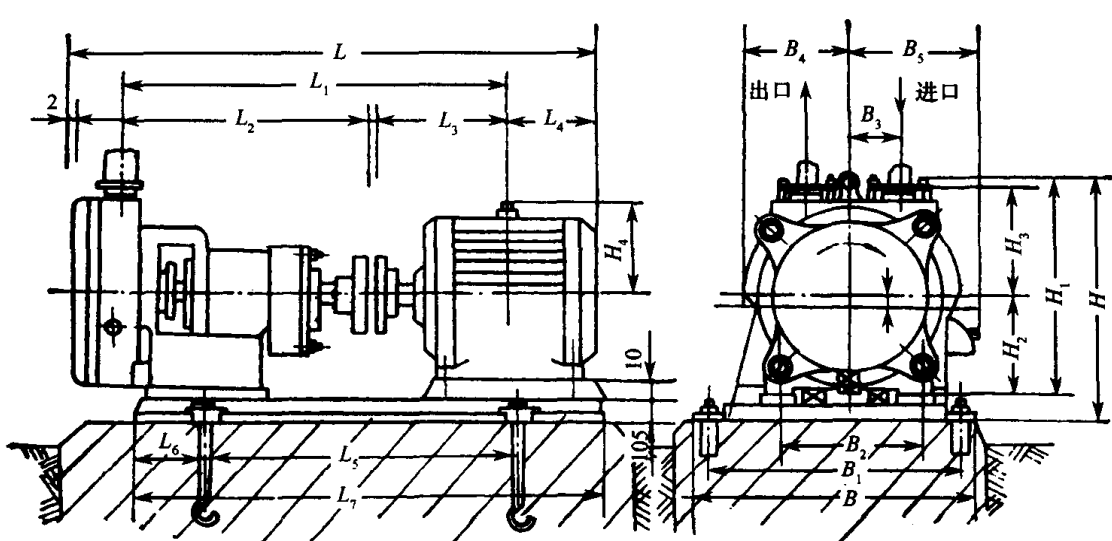
表 3-21 SZB 型水环式真空泵技术性能

型 号	抽速/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$		极限压力 /MPa	电机功率 /kW	泵转速 /r·min ⁻¹	吸入口径 /mm	排出口径 /mm	供水量 /L·min ⁻¹	泵重(包 括电机) /kg
	最大抽速	吸入压力为 0.03MPa							
SZB-4	0.4	0.24(4L/s)	0.02	1.5	1410	25.4	25.4	8	95
SZB-8	0.8	0.48(8L/s)	0.02	2.2	1420	25.4	25.4	10	105

注:山东淄博真空设备厂有限公司

表 3-22 SZB 型水环式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

										
型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	B	B ₁
SZB-4	700	504.5	313	189.5	122	390	123	635	365	315
SZB-8	760	523	313	208	122	393	133	665	395	345
型 号	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	H	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	电机型号
SZB-4	180	54	120	155	366	286	136	116	110	JO ₂ 22-4 1.5kW
SZB-8	180	54	120	180	378	286	136	116	145	JO ₂ 31-4 2.2kW

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

3. SK 型水环式真空泵的技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

SK 型水环式真空泵包括单级 SK 型、双级 2SK 型。

(1) 技术性能

SK、2SK 型系列水环式真空泵技术性能表如表 3-23 所示。

第三章 机械真空泵

表 3-23 SK、2SK 型系列水环式真空泵技术性能

(单位:mm)

型 号	抽速 $/\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	功 率 $/\text{kW}$	转 速 $/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	水消耗量 $/\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	口 径		生产厂家
						进	出	
SK-12	12	7×10^3	22	980	70	100	100	广东佛山 真空泵厂 有限公司
SK-27	27	2×10^2	45	490	140	200	200	
SK-30	30	2×10^2	55	550	/	200	200	
SK-42	42	2×10^2	60	490	150	200	200	
SK-60	60	2×10^2	90	372	160	250	250	
SK-85	85	2×10^2	130	365	180	300	300	
SK-120	120	2×10^2	185	250	200	300	300	
SK-250	250	2×10^2	400	200	220	500	500	
SK-27	27	2×10^2	45	490	140	200	200	
SK-110	120	2×10^2	185	250	200	300	300	
SK-1.5	1.5	1.1×10^4	4	1440	21	70	70	山东淄博 真空设备 厂有限公 司
SK-3	3	1.7×10^4	5.5	1440	28	70	70	
SK-6	6	1.7×10^4	11	1440	35	80	80	
SK-9	9	1.7×10^4	15	970		80	80	
SK-12	12	1.7×10^4	18.5	970	70	80	80	
SK-15	15	1.7×10^4	30	970	70	80	80	
SK-20	20	1.7×10^4	37	930		150	150	
SK-30	30	1.7×10^4	55	730		150	150	
SK-42	42	1.7×10^4	75	730	150	150	150	
SK-60	60	1.7×10^4	95	550		250	250	
SK-85	85	1.7×10^4	132	550		250	250	
SK-120	120	1.7×10^4	185	490		300	300	
SK-1.5B	1.5	4×10^3	4	2900	15	40	40	台州星光 真空设备 制造有限 公司
SK-12A	12	4×10^3	18.5	970	70	100	100	
SK-3	3	3.3×10^3	3	1450	20	50	50	
SK-6A	6	3.3×10^3	6	1450	35	80	80	
SK-1.5	1.5	1×10^4	4	2800		40	40	浙江真空 设备集团 有限公司
SK-3	3	8×10^3	5.5	1450		50	50	
SK-6	6	8×10^3	11	1450		80	80	
SK-12	12	8×10^3	22	980		100	100	
SK-25	25	2×10^4	30	420		100	100	
2SK-1.5	1.5	7×10^2	4	2800		35	35	
2SK-3	3	4×10^3	7.5	1450		50	50	
2SK-6	6	3×10^3	11	1450		80	80	
2SK-12	12	7×10^2	30	980		100	100	
2SK-25	25	7×10^2	45	980		100	100	

(续)

型 号	抽速 $/\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	功 率 $/\text{kW}$	转 速 $/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	水消耗量 $/\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	口 径		生产厂家
						进	出	
2S-185	2.1	3.5×10^3	5.5	1440		50	G1/2in	上海 真空泵厂
2S-185A	2.1		5.5	1440		50	G1/2in	
2S-230	4.2		11	1450		50	25	
2SK-12	9.9		22	1470		65	G3/4in	
2SK-25	24		55	980		100	G2	
SK-0.4	0.4	4×10^3	1.5	2860	4-8			沈阳 真空泵厂
SK-0.8	0.8		3		5-10			
SK-1.5	1.5		4		8-12			
SK-3	3		7.5		15-20			
SK-6	6	8×10^3	11		25-35			
SK-12	12		18.5		40-50			
SK-20	20		30		60-80			
SK-30	30		45		70-90			
SK-42	42		60		80-100			
SK-60	60		95		90-110			
SK-85	85		130		100-120			
SK-120	120		200		110-130			
SK-0.4	0.4	1×10^4	1.1	/	/	25	25	南京 真空泵厂
SK-0.8	0.8	1×10^4	1.5	/	/	40	40	
SK-1.5	1.5	1×10^4	4	/	/	50	50	
SK-3	3	8×10^3	5.5	/	/	50	50	
SK-6	6	8×10^3	1.1	/	/	80	80	

(2)特性曲线

山东淄博真空设备厂有限公司 SK 型单级水环式真空泵特性曲线如图 3-8 所示。

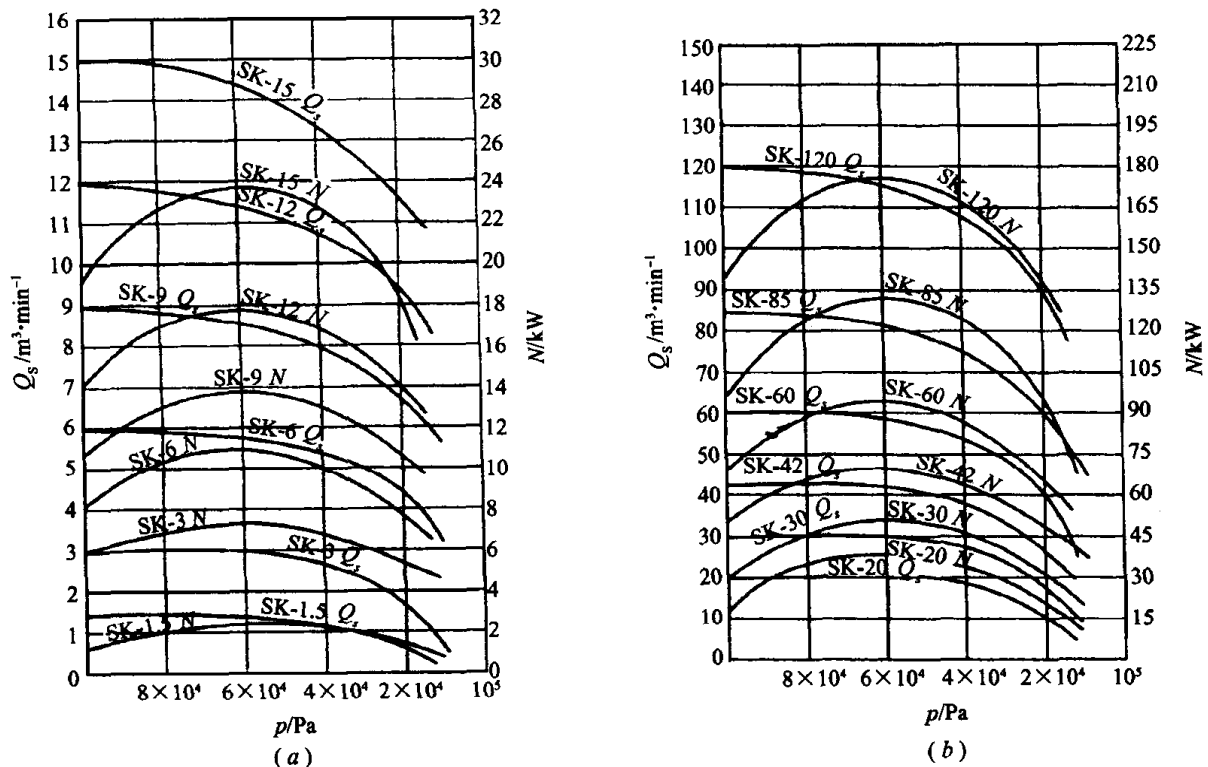


图 3-8 SK 型单级水环式真空泵特性曲线

(a)抽气量为 $1.5\text{m}^3/\text{min} \sim 15\text{m}^3/\text{min}$; (b)抽气量为 $20\text{m}^3/\text{min} \sim 120\text{m}^3/\text{min}$ 。

(3)外形及安装尺寸

SK(2YK)型水环式真空泵外形及安装尺寸如表 3-24 所示;SK-6、SK-12、SK-20、SK-30、SK-42 型水环式真空泵外形及安装尺寸如表 3-25、表 3-26 所示,同型号的气水分离器外形尺寸如表 3-27 所示;2S-185、2S-185A、2S-230 型水环式真空泵外形及安装尺寸如图 3-9 及图 3-10 所示;2SK-6A 型水环式真空泵外形及安装尺寸如图 3-11 所示;2SK-6B 型水环式真空泵外形及安装尺寸见图 3-12 所示。SK-12A、SK-9A、SK-6A 新型节能系列水环式真空泵外形安装图如表 3-28 所示。SK-60、SK-85、SK-120 型水环式真空泵外形及安装尺寸见表 3-29 所示。

表 3-24 SK(2YK)水环式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

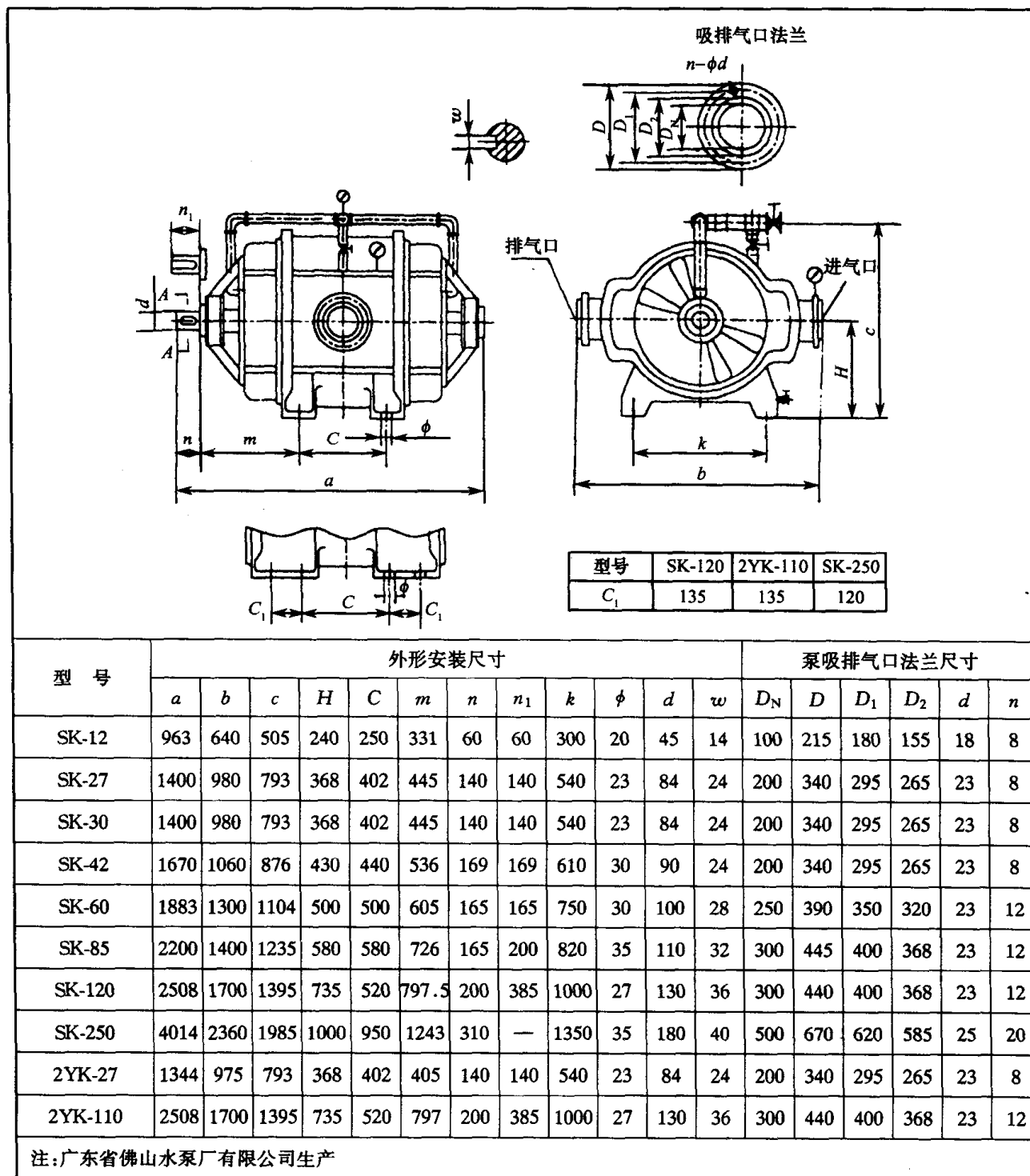
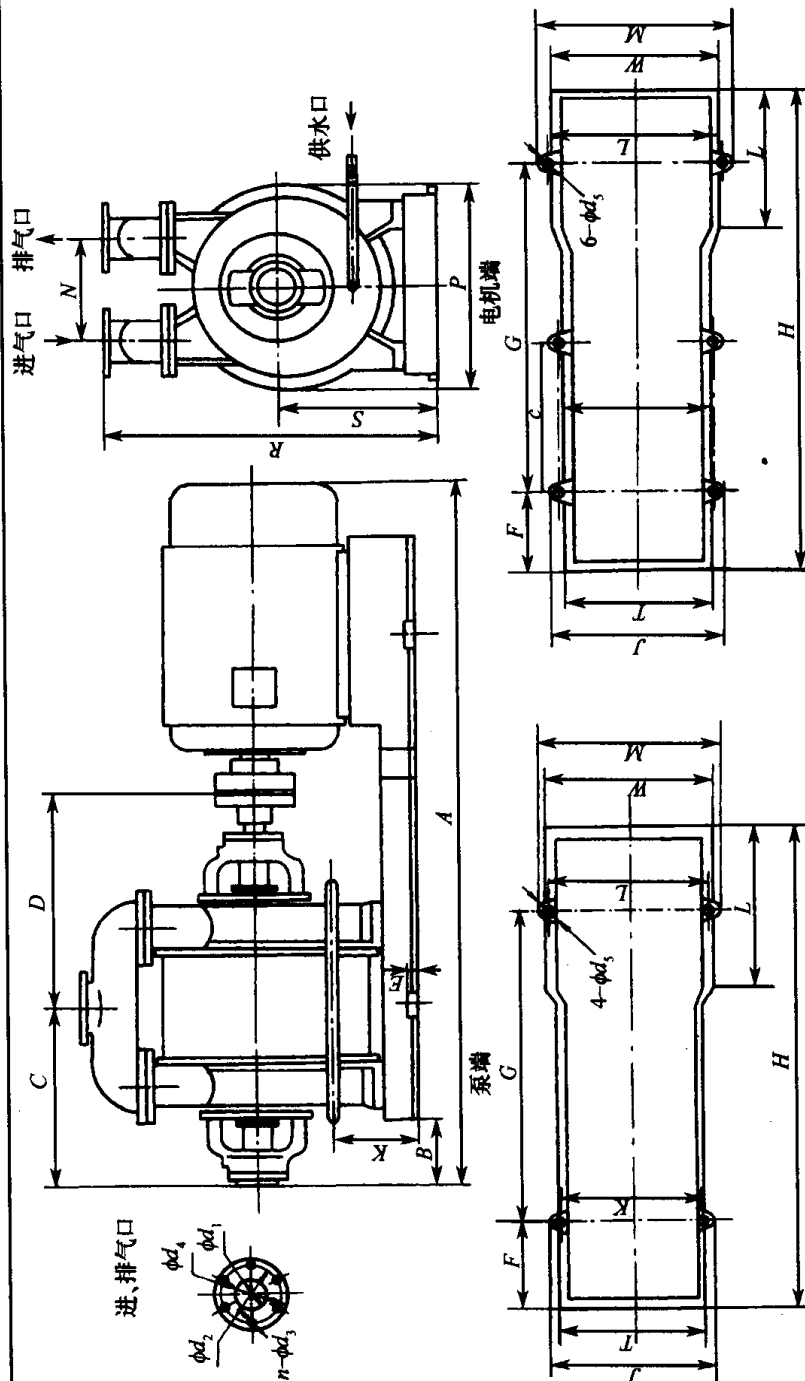


表 3-25 SK-6、SK-12、SK-20、SK-30、SK-42 水环真空泵外形及安装尺寸(一)

(单位:mm)

型 号	A	B	C	D	E	F	G/G ₁	H	I	J	K	L	M	N	P	R	S	T	W	X	Z	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	n	底脚 螺栓
SK-6 真空泵	1432	114	370	457	30	235	800	1225	/	470	420	420	470	210	330	610	315	410	410	183	G1/2	80	130	14	160	18	4	M16×400
SK-12 真空泵	1761	141	448	538	30	300	940	1468	858	580	520	460	520	280	440	740	355	520	520	163	G1/2	80	150	14	180	27	4	M24×600
SK-20 真空泵	2100	141	491	609	30	340	1132	1780	/	690	630	630	690	350	680	1010	485	650	650	220	G3/4	150	200	18	235	27	6	M24×600
SK-30 真空泵	2500	144	556	674	30	405	1270	2020	685	690	630	720	780	350	680	1010	485	650	650	225	G3/4	150	200	18	235	27	6	M24×600
SK-42 真空泵	2720	144	630	750	30	480	1445	2221	711	690	630	700	760	350	680	1015	490	650	650	225	G3/4	150	220	18	235	27	6	M24×600

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

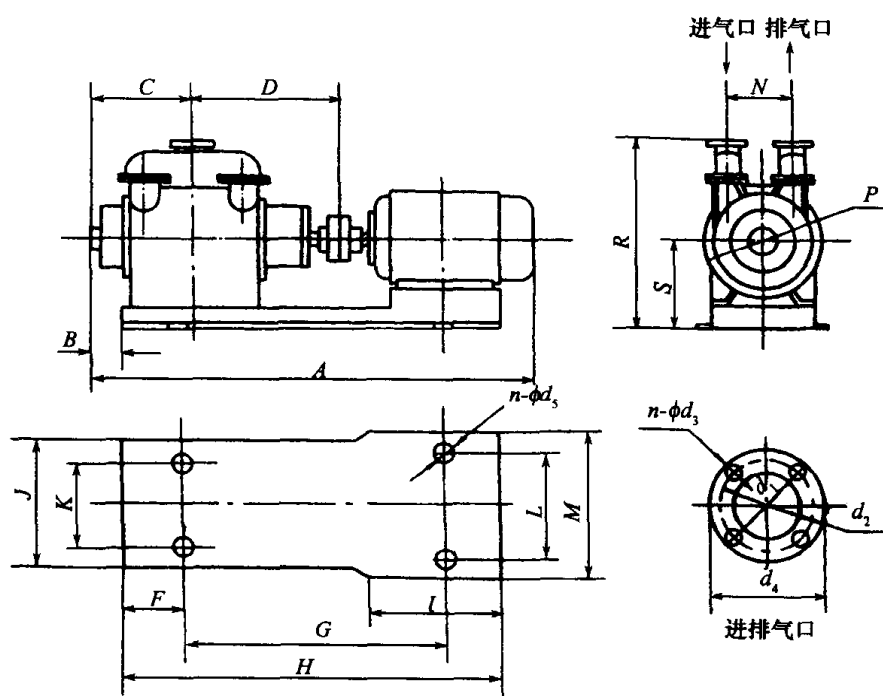


SK-6、SK-12、SK-20、SK-30 水环真空泵底脚安装尺寸

SK-42 真空泵底脚安装尺寸

表 3-26 SK-6、SK-12、SK-20、SK-30、SK-42 型水环式真空泵外形及安装尺寸(二)

(单位:mm)

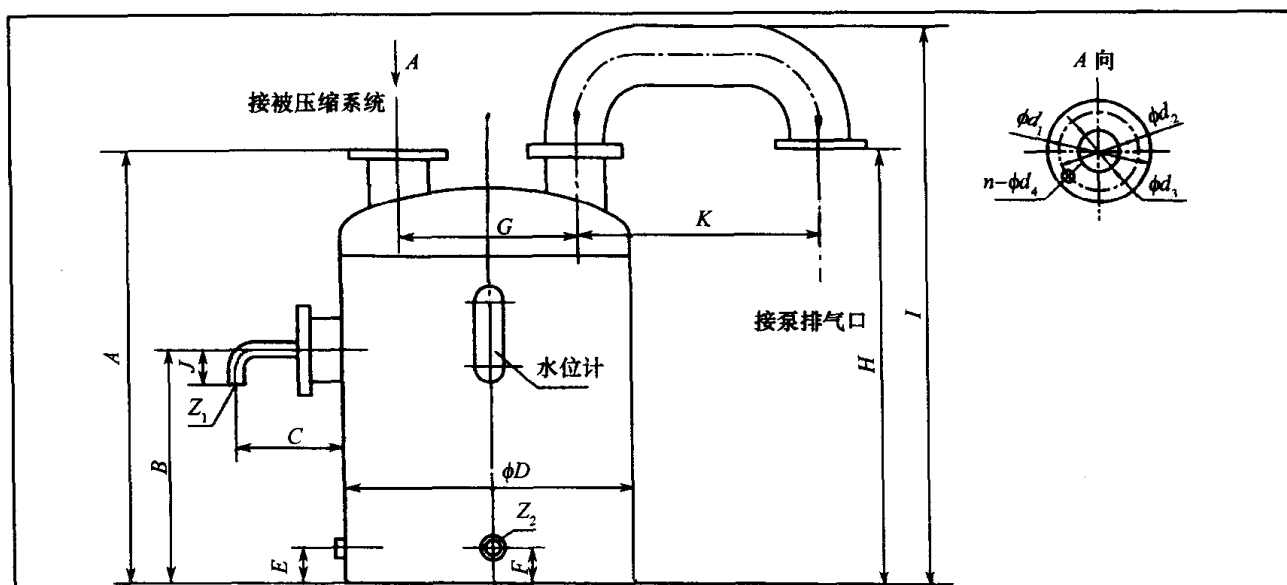


型 号	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M
SK-6	1432	114	370	457	235	800	1225	/	470	420	420	470
SK-12	1761	141	448	538	300	940	1468	858	580	520	460	520
SK-20	2100	141	491	609	340	1132	1780	/	690	630	630	690
SK-30	2500	144	556	674	405	1270	2020	685	690	630	720	780
SK-42	2720	144	630	750	480	1445	2221	711	690	630	700	760
型 号	N	P	R	S	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	n	地脚螺栓	
SK-6	210	330	610	315	80	130	14	160	18	4	M16×400	
SK-12	280	440	740	355	80	150	14	180	27	4	M24×600	
SK-20	350	680	1010	485	150	200	18	235	27	4	M24×600	
SK-30	350	680	1010	485	150	200	18	235	27	4	M24×600	
SK-42	350	680	1015	490	150	220	18	235	27	4	M24×600	

注:沈阳真空泵厂生产

三、液环式真空泵

表 3-27 SK-6、SK-12、SK-30 水环真空泵气水分离器外形尺寸 (单位:mm)



型 号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Z ₁	Z ₁	Z ₂	n	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
SK-6	740	320	250	500	60	80	220	870	1030	140	500	1 1/2	2 1/2	G1/2	4	160	130	65	14
SK-12	910	400	250	650	60	80	260	1080	1230	140	500	1 1/2	2 1/2	G1/2	4	185	150	80	18
SK-30	1070	610	250	650	60	80	260	1130	1408	140	500	1 1/2	2 1/2	G1/2	8	235	200	125	18

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

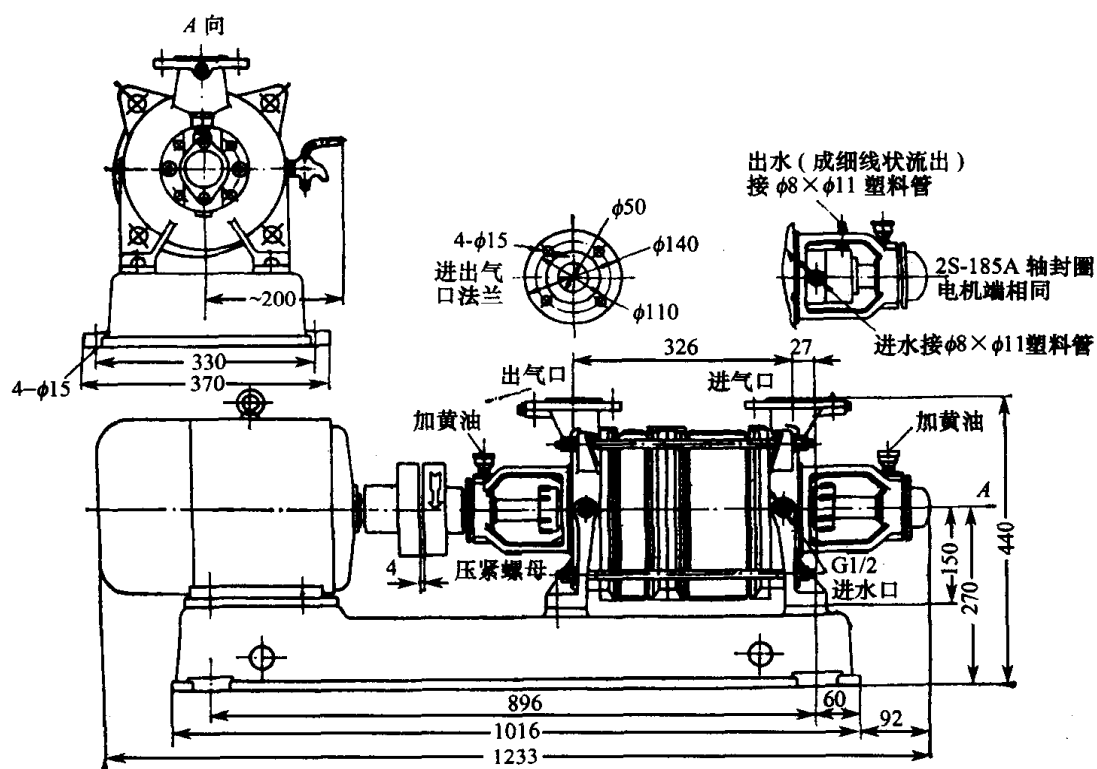


图 3-9 2S-185、2S-185A 型水环式真空泵外形尺寸图
(上海真空泵厂生产)

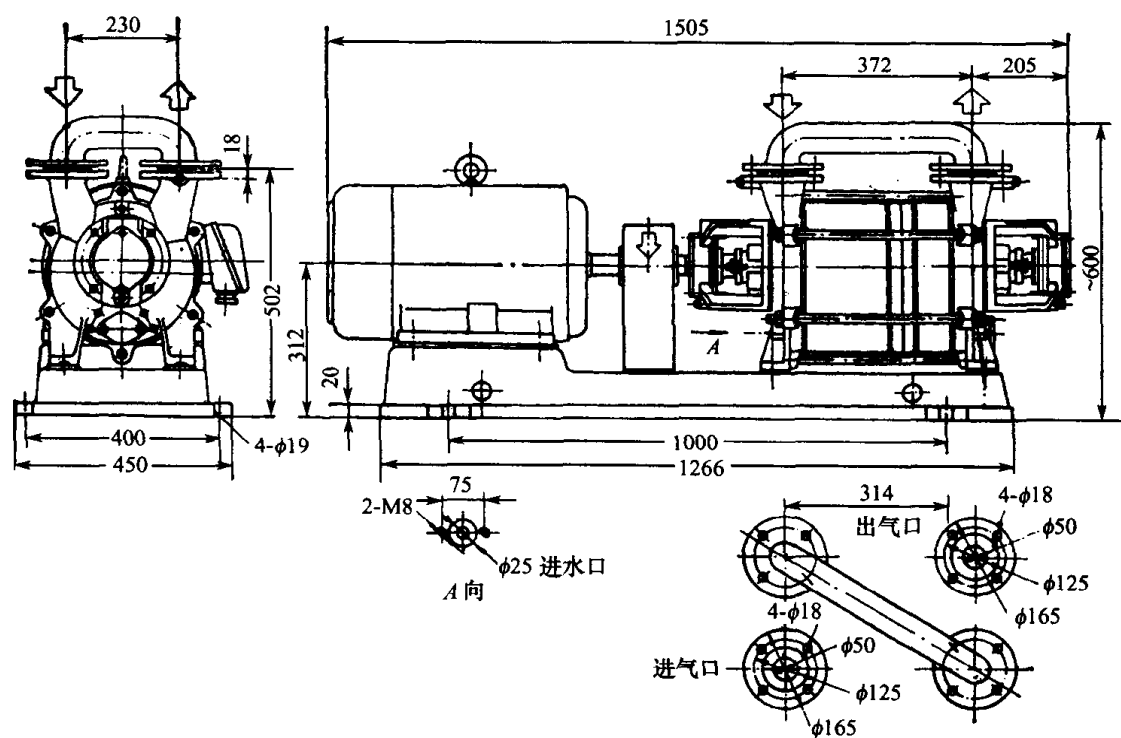


图 3-10 2S-230 型水环式真空泵外形尺寸图
(上海真空泵厂生产)

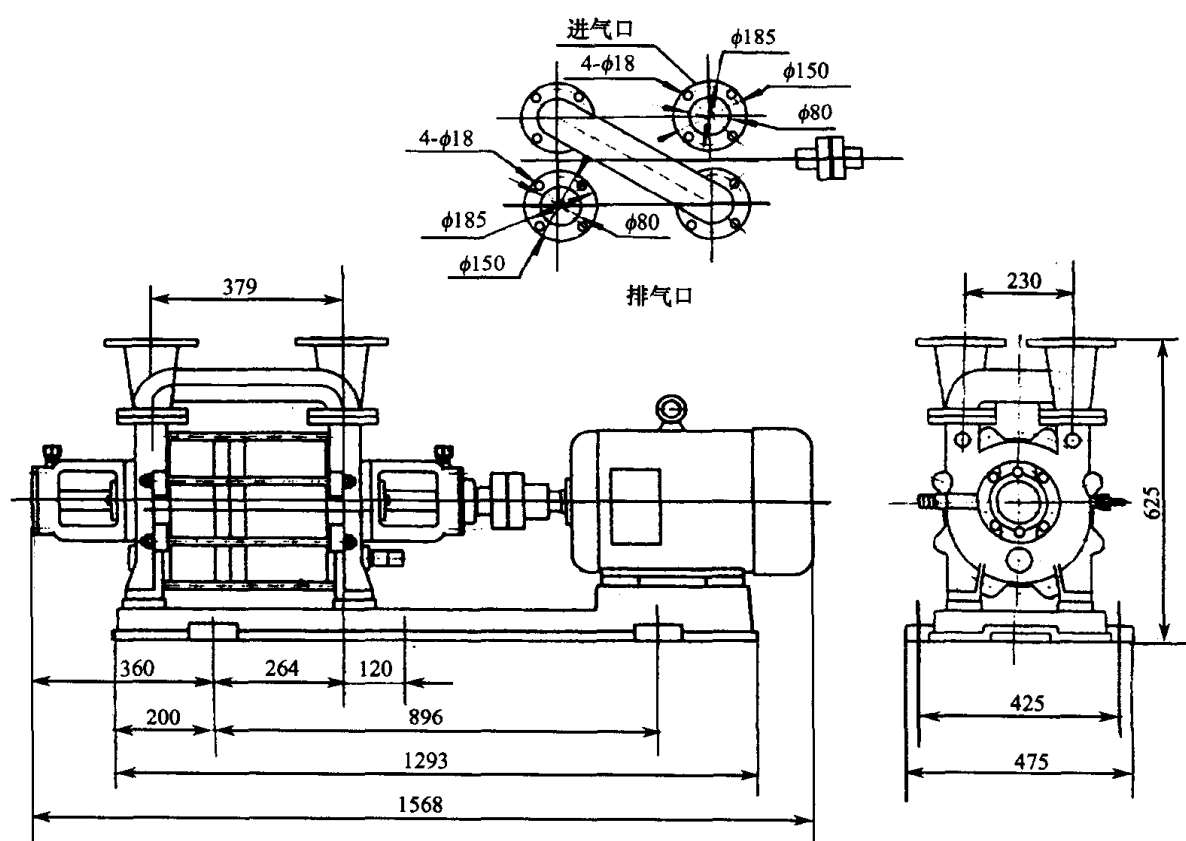


图 3-11 2SK-6A 型水环式真空泵外形及安装尺寸图
(台州市星光真空设备制造有限公司生产)

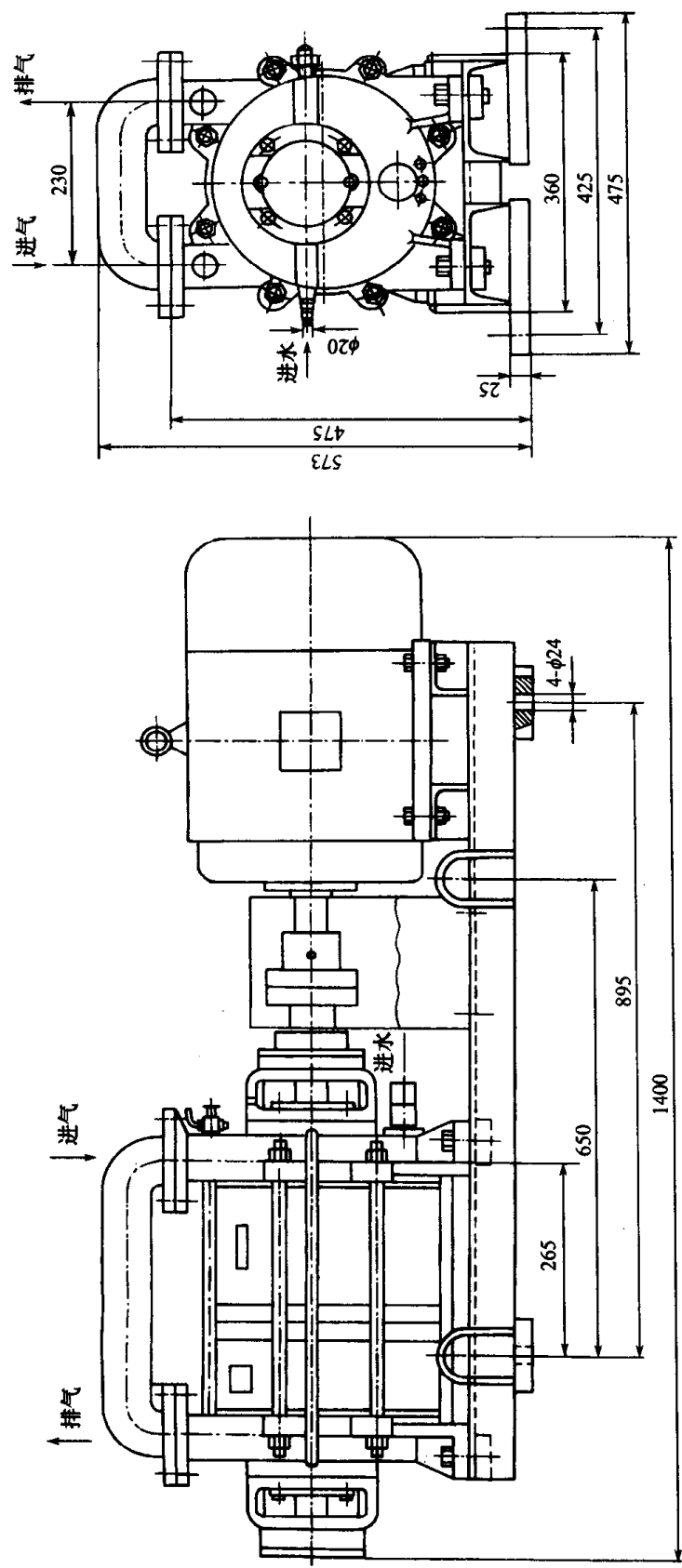
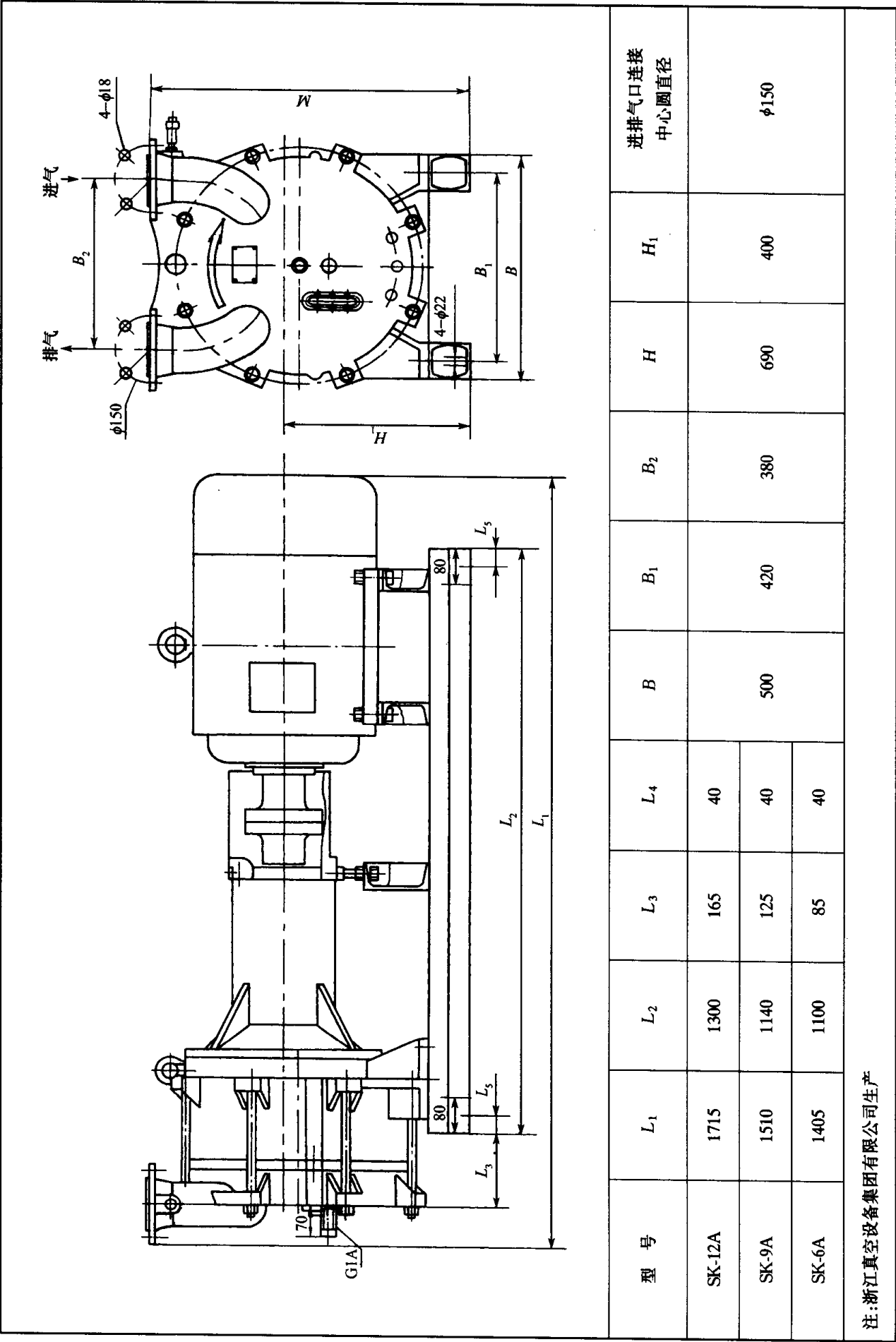


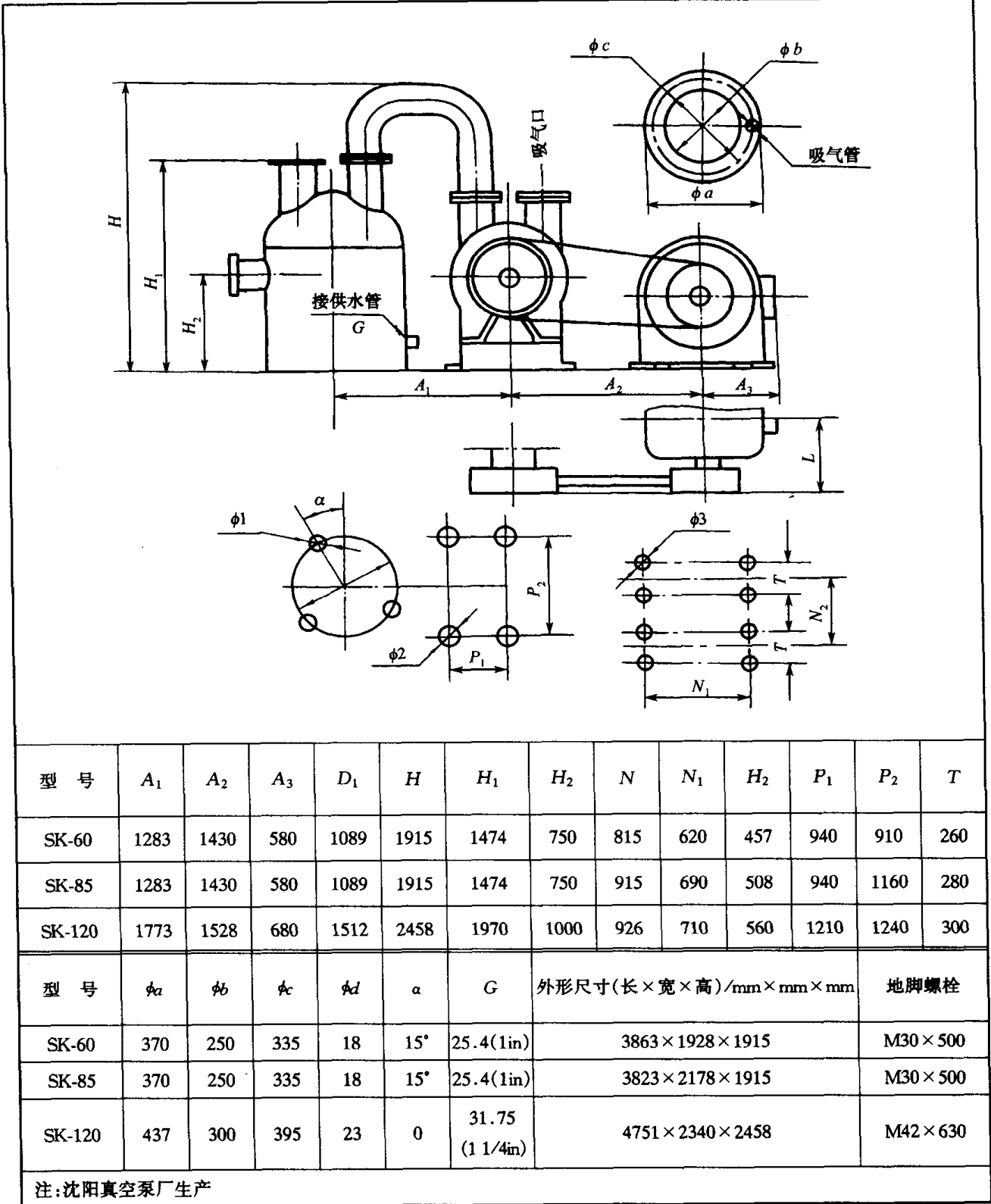
图 3-12 2SK-6B 水环式真空泵外形及安装尺寸图
(浙江真空设备集团有限公司生产)

表 3-28 SK-12A、SK-9A、SK-6A 新型节能系列水环式真空泵外形尺寸 (单位:mm)



三、液环式真空泵

表 3-29 SK-60、SK-85、SK-120 型水环式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



4. 2BE1 型水环式真空泵的技术性能、曲线、外形及安装尺寸(广东佛山水泵厂有限公司)

(1)特性曲线

2BE1 型水环式真空泵的特性曲线如图 3-13 所示。

(2)技术性能

2BE1 型水环式真空泵技术性能见表 3-30。

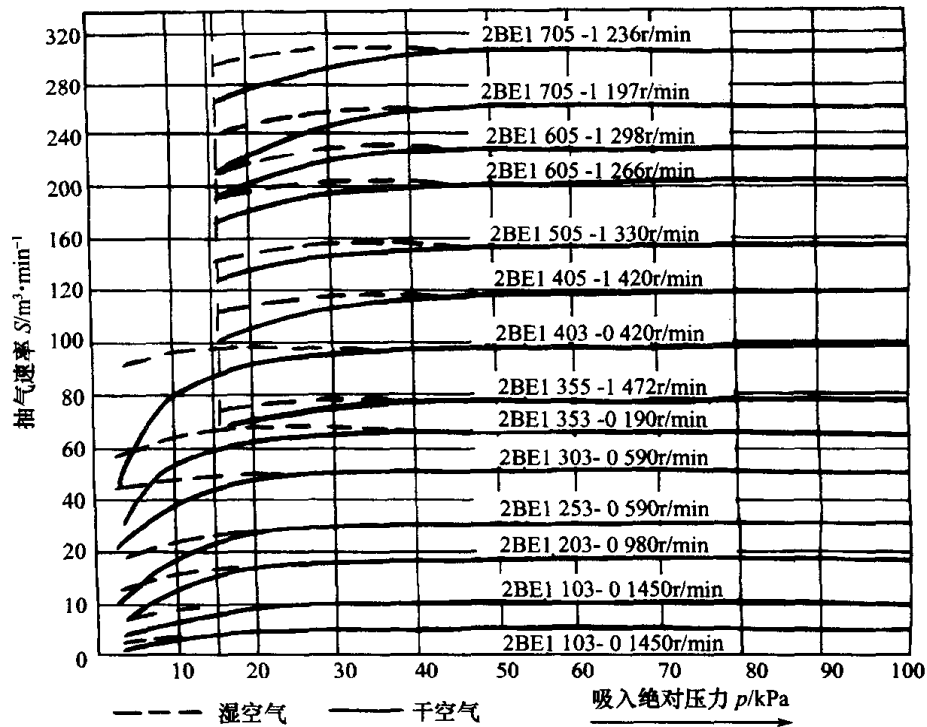


图 3-13 2BE1 型水环式真空泵特性曲线

表 3-30 2BE1 型水环式真空泵技术性能

型 号	最低入口压力 /kPa	抽气速率/m ³ ·min ⁻¹								最大 轴功率 /kW	转速/ r·min ⁻¹	泵重 /kg	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
		入口压力 /6kPa		入口压力 /10kPa		入口压力 /20kPa		入口压力 /40kPa					
		干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气				
2BE1 103-0	3	2.80	3.95	3.77	4.58	4.47	4.87	4.83	4.93	7.0	1300	125	795×375×355
		3.18	4.52	4.22	5.13	5.10	5.53	5.38	5.50	8.2	1450		
		3.87	5.47	4.90	5.97	5.83	6.33	6.10	6.23	9.9	1625		
		4.32	6.10	5.33	6.50	6.28	6.83	6.57	6.70	11.1	1750		
2BE1 153-0	3	4.15	5.67	5.60	6.77	6.70	7.33	7.20	7.33	10.6	1100	190	885×435×425
		5.37	7.58	6.87	8.35	8.22	8.93	8.60	8.80	13.7	1300		
		6.33	8.95	7.83	9.52	9.22	10.0	9.62	9.82	16.3	1450		
		7.22	10.2	8.72	10.6	10.1	11.0	10.6	10.8	19.6	1620		
		7.67	10.8	9.22	11.2	10.7	11.6	11.1	11.4	22.3	1750		
2BE1 203-0	3	8.25	11.6	11.1	13.5	13.4	14.5	14.3	14.6	21.2	790	410	1095×530×540
		9.70	13.7	12.7	15.4	15.3	19.6	16.1	16.4	24.9	880		
		11.6	16.4	14.5	17.7	17.3	16.3	18.0	18.4	29.6	980		
		13.5	19.0	16.4	19.9	19.2	20.9	20.0	20.4	35.6	1100		
		14.4	20.3	17.4	21.1	20.1	21.8	21.0	21.4	39.4	1170		
2BE1 253-0	3	14.1	20.0	19.5	23.8	25.6	28.1	28.3	28.8	37.2	565	890	1395×680×755
		15.1	21.8	20.4	24.8	26.7	29.0	29.5	30.1	40.5	590		
		20.1	28.4	25.8	31.3	31.9	34.6	34.3	35.1	44.5	660		
		24.3	34.3	30.3	36.8	36.5	39.6	38.3	39.6	53.8	740		
		27.9	39.3	34.2	41.5	40.6	44.1	42.9	43.7	65.2	820		
		30.2	42.6	36.7	44.7	43.5	47.2	45.8	46.7	75.1	880		

三、液环式真空泵

(续)

型 号	最低入口压力 /kPa	抽气速率/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$								最大 轴功率 /kW	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	泵重 /kg	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
		入口压力 /6kPa		入口压力 /10kPa		入口压力 /20kPa		入口压力 /40kPa					
		干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气				
2BE1 303-0	3	24.3	34.0	31.3	38.5	38.9	42.5	41.0	41.8	52.0	472	1400	1580×1010×910
		27.6	38.5	34.2	41.5	40.3	44.3	42.5	43.5	55.0	500		
		30.8	42.8	37.1	45.0	43.3	47.3	45.7	46.6	58.0	530		
		35.8	49.9	42.6	51.6	48.8	53.3	50.3	51.3	67.0	590		
		40.5	57.5	48.7	59.0	55.0	60.0	57.0	58.0	80.0	660		
		42.5	60.0	51.8	62.7	58.3	63.5	61.6	62.8	91.0	710		
2BE1 353-0	3	26.5	37.4	38.3	46.4	49.0	53.5	53.8	54.9	64.5	372	2000	1745×1160×1050
		35.8	50.6	45.3	54.9	53.8	58.6	57.2	58.4	77.0	420		
		43.6	61.5	52.8	63.9	61.0	66.5	63.7	65.0	86.0	472		
		46.5	65.6	55.7	67.6	63.0	68.7	66.4	67.7	91.0	490		
		46.6	65.8	56.3	68.2	65.0	70.9	67.6	69.0	94.5	500		
		49.5	69.9	60.1	72.8	68.5	74.7	71.5	73.0	105	530		
56.7	80.0	68.4	82.8	77.0	84.0	80.2	81.8	126	590				
2BE1 403.0	3	44.8	63.3	60.0	72.5	73.7	80.4	78.5	80.0	102	330	3300	2170×1370×1265
		57.4	81.0	70.6	85.5	82.1	89.6	86.9	88.6	116	372		
		67.3	95.0	81.4	98.5	93.5	102	97.0	99.0	136.5	420		
		78.7	111	95.0	115	107.2	116.8	110	112.3	168	472		
		85.1	120	103	125	117.1	127.6	123.5	126	212	530		
2BE1 355-1	16	52.2	57.0	56.0	59.2	59.6	61.4	60.2	62.1	71.5	372	2200	1885×1160×1050
		63.8	69.6	66.3	70.3	69.1	71.2	70.1	71.5	80.8	420		
		70.3	76.7	73.6	78.3	76.7	79.1	78.2	79.8	94.5	472		
		73.4	80.0	77.3	82.0	80.6	83.1	82.5	84.2	105	500		
		76.3	83.2	80.6	85.5	85.4	88.0	86.6	88.3	113	530		
		81.3	88.6	86.6	91.8	92.2	95.0	94.1	96.0	136	590		
2BE1 405-1	16	81.2	88.6	85.7	91.0	90.6	93.4	92.3	94.2	105	330	3400	2170×1370×1265
		94.5	103.0	98.5	104.5	103.4	106.5	104.7	106.8	124	372		
		104.5	114.0	109.5	116.3	115.2	118.7	116.3	118.7	147	420		
		111.7	121.8	118.7	125.8	126.2	130.0	128.2	130.8	178	472		
		120.2	131.1	127.3	135.0	136.8	141.0	141.0	143.7	218	530		
2BE1 505-1	16	104.5	114.0	110.0	116.4	117.1	120.7	120.0	122.5	136	266	5100	2435×1550×1475
		123.4	134.5	129.2	137.0	135.2	139.3	136.4	139.1	157	298		
		136.5	148.8	142.6	151.2	140.0	153.5	151.0	154.0	183	330		
		148.6	162.0	156.0	165.5	164.4	169.4	167.0	170.3	215	372		
		159.7	174.1	169.5	179.7	180.5	186.0	184.7	188.3	266	420		
2BE1 605-1	16	158	172	166	176	176	181	177	181	196	236	7900	2730×1800×1770
		183	200	192	203	200	206	202	206	231	266		
		201	219	210	223	221	228	224	229	275	298		
		214	233	225	239	238	245	244	249	324	330		
		229	250	245	260	261	269	269	274	399	372		

(续)

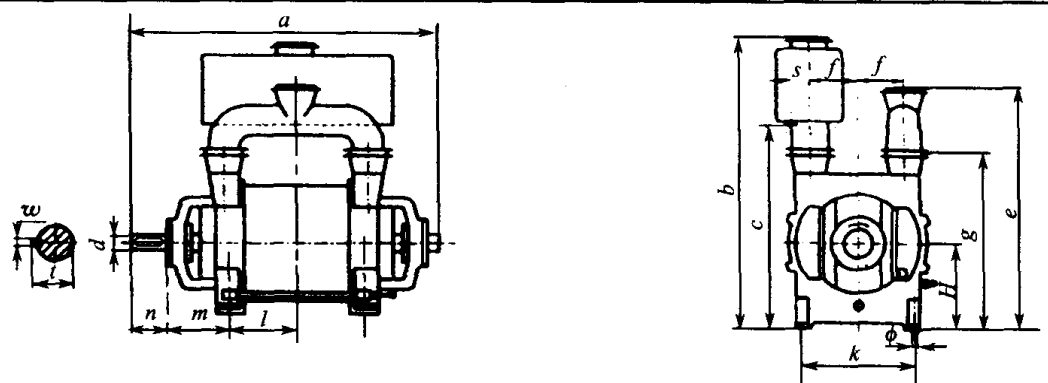
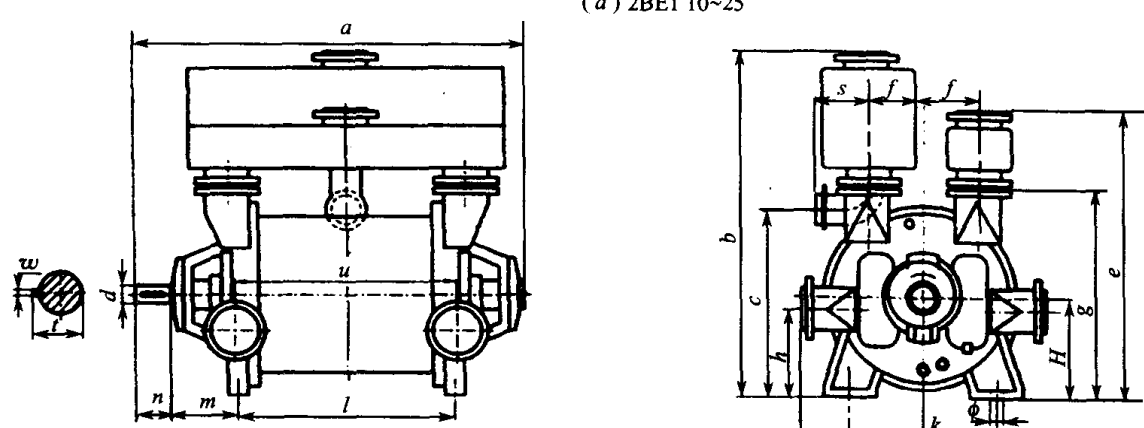
型 号	最低入口压力 /kPa	抽气速率/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$								最大 轴功率 /kW	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	泵重 /kg	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
		入口压力 /6kPa		入口压力 /10kPa		入口压力 /20kPa		入口压力 /40kPa					
		干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气	干空气	饱和 空气				
2BE1 705-1	16	230	250	240	256	251	259	255	259	285	197	11500	3185×2110×2045
		245	267	255	271	269	277	271	277	302	210		
		276	301	287	305	301	310	305	311	355	236		
		300	327	313	332	332	342	337	344	425	266		
		319	348	340	360	362	373	370	378	515	298		
		340	371	364	386	391	403	404	412	620	330		

注:1. 上列性能数据基于进气温度 20℃, 进水温度 15℃, 排气压力 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 的条件;2. 性能允差 10%

(3)外形及安装尺寸

2BE1 系列水环式真空泵外形及安装尺寸见表 3-31 及表 3-32。

表 3-31 2BE1 系列水环式真空泵外形及安装尺寸(一) (单位:mm)

 <p>(a) 2BE1 10~25</p>																
 <p>(b) 2BE1 30~70</p>																
型 号	a	b	c	e	f	g	H	l	m	n	s	k	ϕ	d	w	t
2BE1 101-0	638	645	394		105	355	180	206	146.5	58	40	220	15	35	10	38
2BE1 102-0	741	645	394	495	105	355	180	262	193.5	58	40	220	15	35	10	38
2BE1 103-0	795	645	394	495	105	355	180	316	193.5	58	40	220	15	35	10	38

三、液环式真空泵

(续)

型 号	a	b	c	e	f	g	H	l	m	n	s	k	φ	d	w	t
2BE1 152-0	807	745	467	600	125	425	225	302	206	58	50	260	19	35	10	38
2BE1 153-0	885	745	467	600	125	425	225	380	206	58	50	260	19	35	10	38
2BE1 202-0	975	985	629	840	155	590	315	395	227	82	50	340	24	50	14	53.5
2BE1 203-0	1095	985	629	840	155	590	315	515	227	82	50	340	24	50	14	53.5
2BE1 204-0	1131	985	629	840	155	590	315	551	227	82	50	340	24	50	14	53.5
2BE1 252-0	1237	1245	799	1030	215	755	400	525	262.5	105	80	465	28	70	20	74.5
2BE1 253-0	1395	1245	799	1030	215	755	400	675	262.5	105	80	465	28	70	20	74.5
2BE1 303-0	1580	1360	825	1185	230	910	475	790	315	165	205	670	35	100	28	106
2BE1 353-0	1745	1570	930	1370	285	1050	560	910	335	165	245	800	35	120	32	127
2BE1 403-0	2020	1865	1120	1625	335	1265	670	1110	355	200	285	950	42	140	36	148
2BE1 503-0	2255	2160	1335	1875	385	1475	800	1270	375	240	285	1120	42	160	40	169
2BE1 603-0	2510	2560	1555	2220	435	1770	950	1480	400	240	370	1320	48	180	45	190
2BE1 703-0	2885	2965	1835	2560	490	2045	1120	1720	450	280	370	1600	48	200	45	210
2BE1 305-1	1695	1360	825	1185	230	910	475	900	315	165	205	670	35	100	28	106
2BE1 355-1	1885	1570	930	1370	285	1050	560	1050	335	165	245	800	35	120	32	127
2BE1 405-1	2170	1865	1120	1625	335	1265	670	1260	355	200	285	950	42	140	36	148
2BE1 505-1	2435	2160	1335	1875	385	1475	800	1450	375	240	285	1120	42	160	40	169
2BE1 605-1	2730	2560	1555	2220	435	1770	950	1700	400	240	370	1320	48	180	45	190
2BE1 705-1	3185	2965	1835	2560	490	2045	1120	2020	450	280	370	1600	48	200	45	210

表 3-32 2BE1 系列水环式真空泵外形及安装尺寸(二) (单位:mm)

型 号	h	u	v	型 号	h	u	v
2BE1 303-0	335	864	480	2BE1 305-1	335	980	480
2BE1 353-0	395	1000	555	2BE1 355-1	395	1140	555
2BE1 403-0	475	1210	655	2BE1 405-1	475	1360	655
2BE1 503-0	560	1410	775	2BE1 505-1	560	1590	775
2BE1 603-0	665	1660	875	2BE1 605-1	665	1880	875
2BE1 703-0	790	1985	1025	2BE1 705-1	790	2230	1025

5. CBF 系列水环式真空泵特性曲线外形及安装尺寸(广东佛山水泵厂有限公司)

CBF 系列水环式真空泵是新一代节能产品。节能效果显著,在 $2 \times 10^4 \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 吸气区域,对泵的过流部件作了优化设计,大大提高了泵在这一区域内的运行效率。在 $2 \times 10^4 \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 使用范围内,比 2BE1 水环真空泵更加节能。该系列水环式真空泵压力范围为 $2 \times 10^4 \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$,抽气范围为 $80 \text{m}^3/\text{min} \sim 600 \text{m}^3/\text{min}$ 。

(1)特性曲线

CBF 系列水环式真空泵特性曲线如图 3-14 所示。

(2)外形及安装尺寸

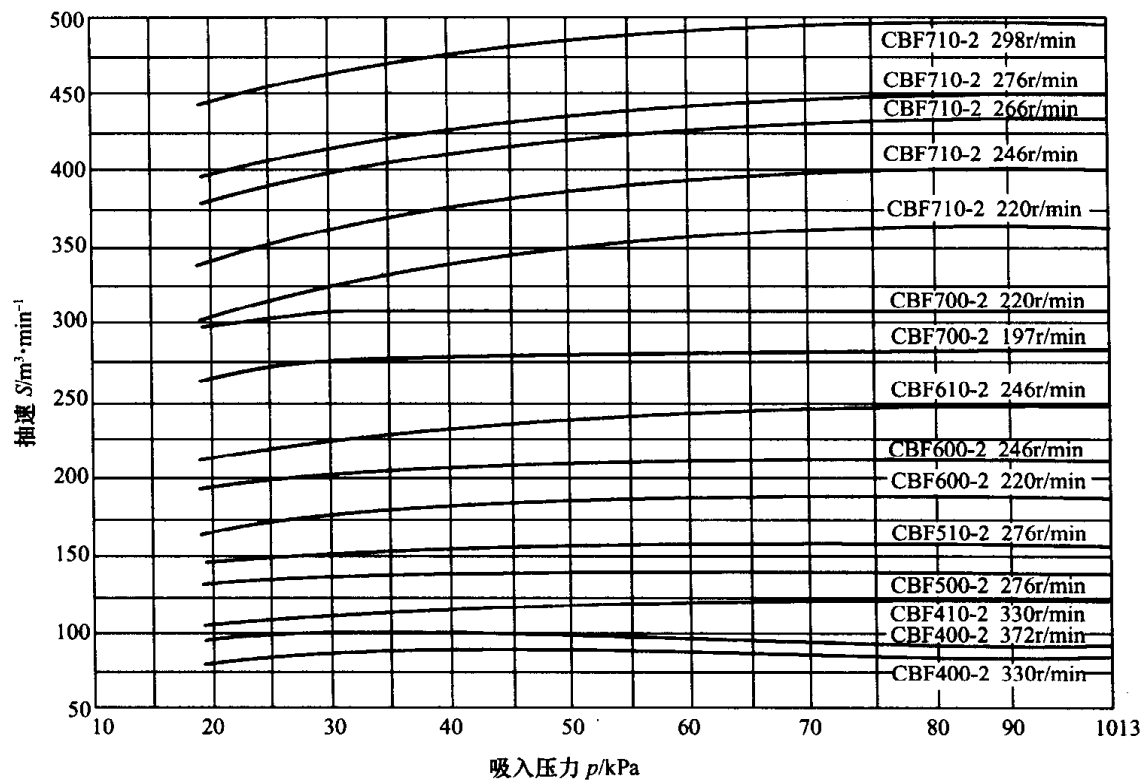


图 3-14 CBF 系列水环式真空泵特性曲线

CBF400~710 水环式真空泵外形及安装尺寸见表 3-33。

表 3-33 CBF400~710 外形和安装尺寸

(单位:mm)

型 号	a	b	c	e	f	g	H	l	m	n
CBF400-2	2170	2865	1120	1625	335	1265	670	1110	355	200
CBF410-2	2540	2865	1120	1625	335	1265	670	1480	355	200
CBF500-2	2435	2160	1335	1875	385	1475	800	1450	375	240
CBF510-2	2655	2160	1335	1875	385	1475	800	1670	375	240
CBF600-2	2730	2560	1555	2220	435	1770	950	1700	400	240
CBF610-2	2980	2560	1555	2220	435	1770	950	1950	400	240

三、液环式真空泵

(续)

型 号	a	b	c	e	f	g	H	l	m	n
CBF700-2	3180	2965	1835	2560	490	2045	1120	2020	450	280
CBF710-2	3445	2965	1835	2560	490	2045	1120	2280	450	280
型 号	s	k	h	u	v	o	d	w	t	
CBF400-2	285	950	475	1210	480	42	140	36	148	
CBF410-2	285	950	475	1580	480	42	140	36	148	
CBF500-2	285	1120	560	1590	775	42	160	40	169	
CBF510-2	285	1120	560	1810	775	42	160	40	169	
CBF600-2	370	1320	665	1880	875	48	180	45	190	
CBF610-2	370	1320	665	2130	875	48	180	45	190	
CBF700-2	370	1600	790	2230	1025	48	200	45	210	
CBF710-2	370	1600	790	2490	1025	48	200	45	210	

6. YK、2YK 型液(油)环真空泵技术性能,外形及安装尺寸

(1)技术性能

YK、2YK 型液(油)环真空泵技术性能见表 3-34。

表 3-34 YK、2YK 型液(油)环真空泵技术性能

型 号	极限压力 /kPa	抽气速率 /m ³ ·min ⁻¹	功率 /kW	转 速 /r·min ⁻¹	供液量 /L·min ⁻¹	进排口径 /mm	质量 /kg	生产厂家
YK-1.5B	1.06	1.5	4	2900	15	35	75	台州星光 真空设备 厂
YK-12A	1.06	12	18.5	970	70	100	650	
2YK-3	0.66	3	7.5	1450	20	50	226	
2YK-6A	0.66	6	11	1450	35	80	385	
2YK-2	0.66	2	5.5					上海真空 泵厂
2YK-4	0.66	4	4					
2YK-12	0.66	12	30					
2YK-25	0.66	25	55					
2YK-1	1.33	1	4		/	35	/	浙江真空 设备有限 公司
2YK-3	0.66	3	7.5	1450	/	50		
2YK-6A	0.66	6	11	1450	/	80		
2YK-12	0.66	12	22	980	/	80		
2YK-25	0.66	25	45	980	/	100		

(2)外形及安装尺寸

YK-1.5、2YK-3 及 YK-12A 型液环真空泵外形及安装尺寸图分别如图 3-15、图 3-16 及图 3-17 所示。

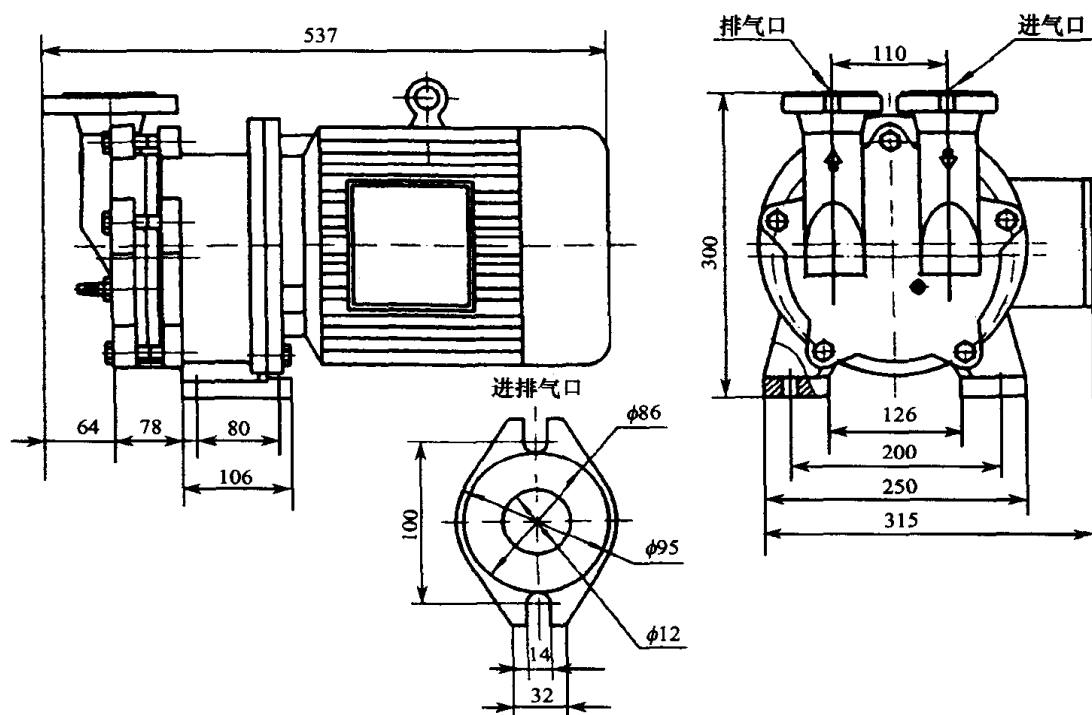


图 3-15 YK-1.5 型液环真空泵外形及安装尺寸图
(台州星光真空设备厂)

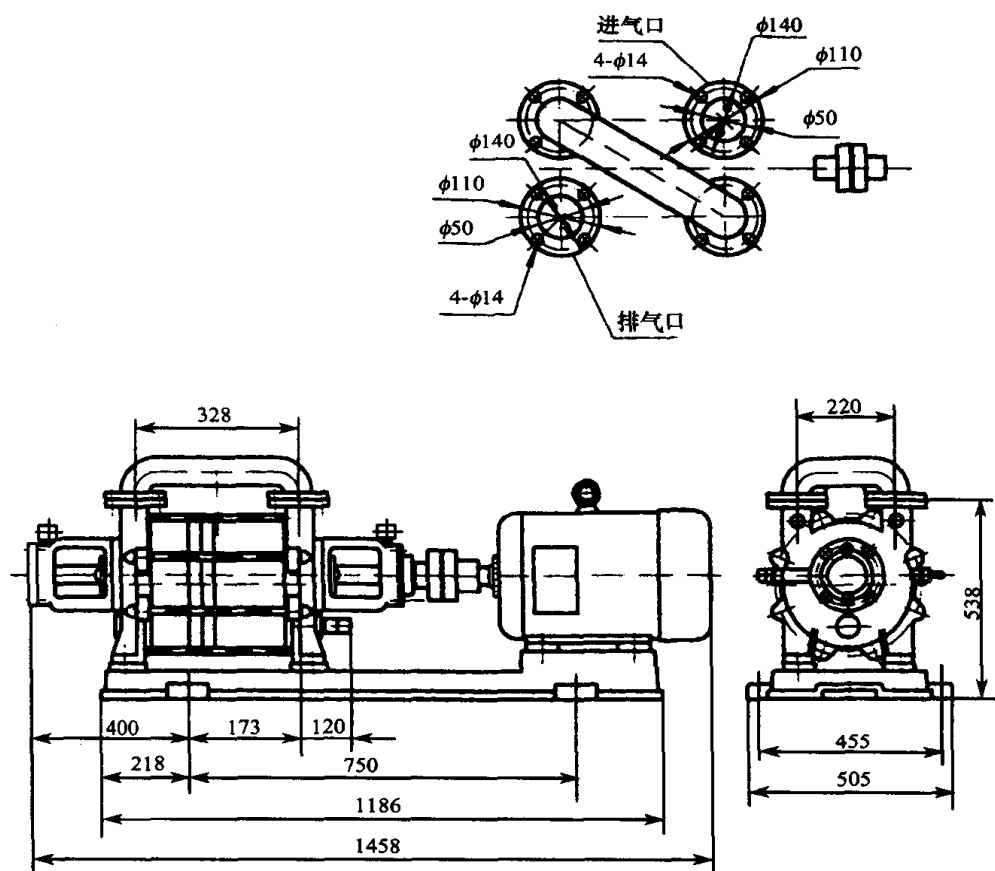


图 3-16 2YK-3 型液环真空泵外形及安装尺寸图

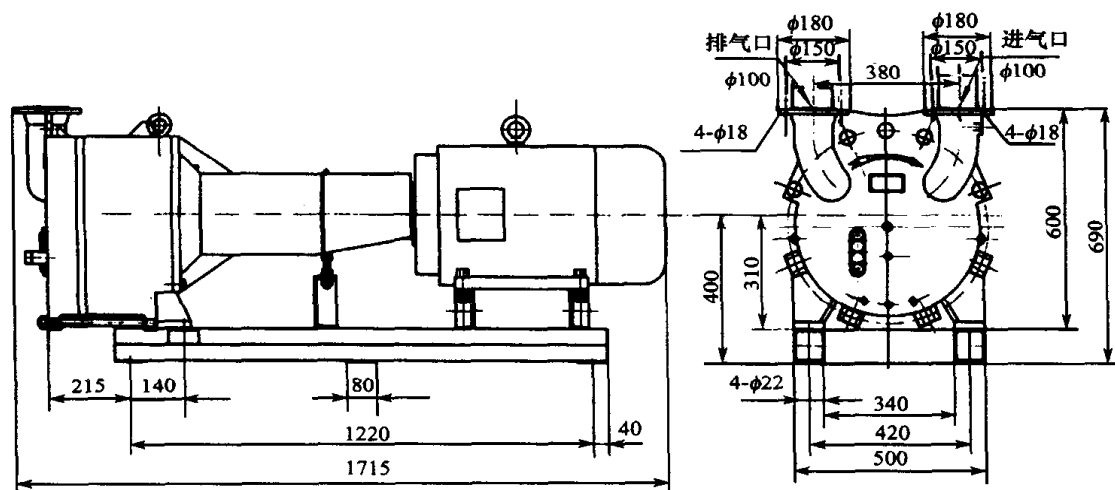


图 3-17 YK-12A 型液环真空泵外形及安装尺寸图

四、水环—大气喷射真空泵组

(一) 概述

水环—大气喷射真空泵组是由水环泵和大气喷射泵组合而成的真空泵组。可抽除空气及其它无腐蚀性、不溶于水、不含固体颗粒的气体；亦可抽除可燃、易爆、含水气、灰尘的气体。被抽气体温度一般不超过 40°C ，获得的最高真空度为 10^3Pa 。

水环—大气喷射真空泵组的特点，是它能够提高水环泵或液环泵的极限压力和抽速。因为单独的双级水环泵极限压力为 $2000\text{Pa}\sim 4000\text{Pa}$ ，一般当压力高于 4000Pa 时抽速不稳定，且随入口压力降低而抽速逐渐趋向于零。水环—大气喷射泵不仅极限压力较低，而且在压力较低时抽速明显增加。

水环—大气喷射真空泵组广泛应用于真空浓缩、真空浸渍、真空干燥、钢水脱气等领域。

(二) 工作原理

水环—大气泵的工作原理是建立在水环泵和大气泵两种真空泵工作原理基础上的，其工作原理见图 3-18。工作过程简述如下：

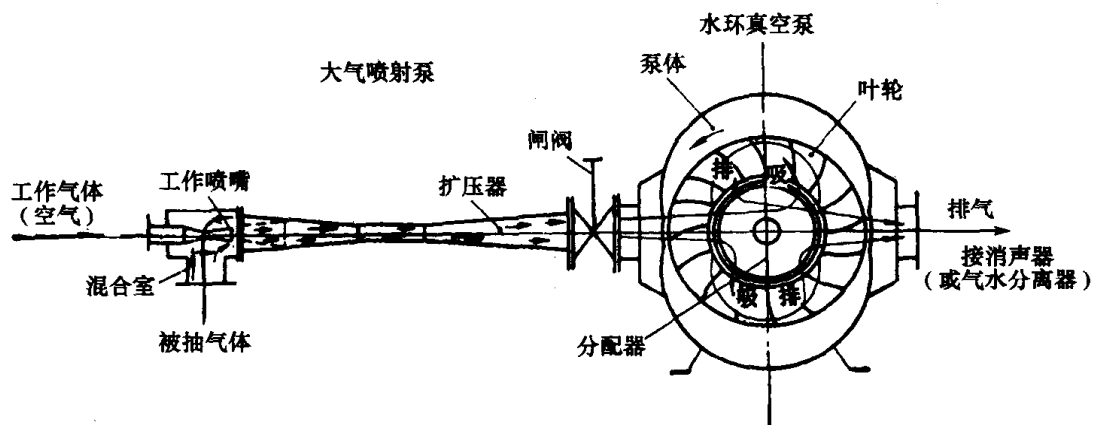


图 3-18 水环大气泵工作原理

开动水环泵,造成大气泵工作所要求的预真空。喷嘴的进气口和排气口之间有了压差,大气便通过喷嘴流入泵内。当压差达到大气压的一半以上(即喷嘴出口压力与大气压之比等于或小于 0.528)时,流入的气体经过喷嘴的收缩段得到加速,在喷嘴的喉部气流达到声速,然后经过喷嘴的扩张段,获得进一步加速,最后以超声速射向扩压器。在动能急骤增加的同时,伴随着压力的降低,造成了混合室较高的真空,它低于被抽容器的压力,从而将被抽气体吸入。

两股气流在混合过程中,由于动量的交换,特别是经过扩压器的收缩段而产生的冲击波造成了激波损失,使得混合气流的速度不断减慢;当进入扩压器的喉部时,速度降低到声速以下,然后通过扩压器的扩散段,速度继续降低,压力则不断增高;当达到大气泵的排气压力即水环泵的吸入真空度时,由水环泵把气体带走,排至大气中。

(三) 国产水环—大气喷射真空泵组技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

国产水环—大气喷射真空泵的型号为 SKP 型。2SK-120P₁ 的意义如下:其中 2SK-120 表示所用水环泵型号,2 表示双吸式,SK 表示水环式真空泵;P 表示大气泵;下脚 1 表示大气泵级数为 1 级。

1. 技术性能

国产 2SK-P 水环—大气喷射真空泵组技术性能见表 3-35。国产 2SK-P(SKT-P)水环—大气喷射真空泵组技术性能见表 3-36。

表 3-35 2SK-P 水环—大气喷射真空泵组技术性能

型 号	抽 速 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$		极限压力 /kPa	电机功率 /kW	转 速 /r·min ⁻¹	供水量 /L·min ⁻¹	生产厂家
	吸入压力为 3kPa	吸入压力为 2kPa					
2SK-0.4P ₁	0.28	0.24	1	2.2	2860	3~5	山东淄博 真空设备厂 有限公司
2SK-0.8P ₁	0.56	0.48		3	2880	5~8	
2SK-1.5P ₁	1.05	0.9		4	1440	10~15	
2SK-3P ₁	2.1	1.8		7.5	1440	15~20	
2SK-6P ₁	4.2	3.6		15	1460	25~35	
2SK-12P ₁	8.4	7.2		22	970	40~50	
2SK-20P ₁	14	12		37	740	60~80	
2SK-30P ₁	21	18		55	740	70~90	

2. 特性曲线

2SK-P 水环—大气喷射泵组特性曲线如图 3-19 所示。

四、水环—大气喷射真空泵组

表 3-36 2SK-P(SKT-P)水环—大气喷射真空泵组技术性能

型 号	抽速/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	极限压力 /kPa	电机功率 /kW	转 速 /r·min ⁻¹	生产厂家
	吸入压力 4kPa				
2SK-3P	2.1	1.06	7.5	1450	浙江真空设备 集团有限公司
2SK-6P	4	1.06	11	1450	
2SK-12P	8.4	1.06	22	970	
2SK-25P	17	1.06	45	740	
SKT-1.5P	1	1.33	3	2880	
SKT-3P	2	1.33	5.5	1450	
SKT-6P	4	1.33	11	1450	
SKT-12P	8	1.33	18.5	980	

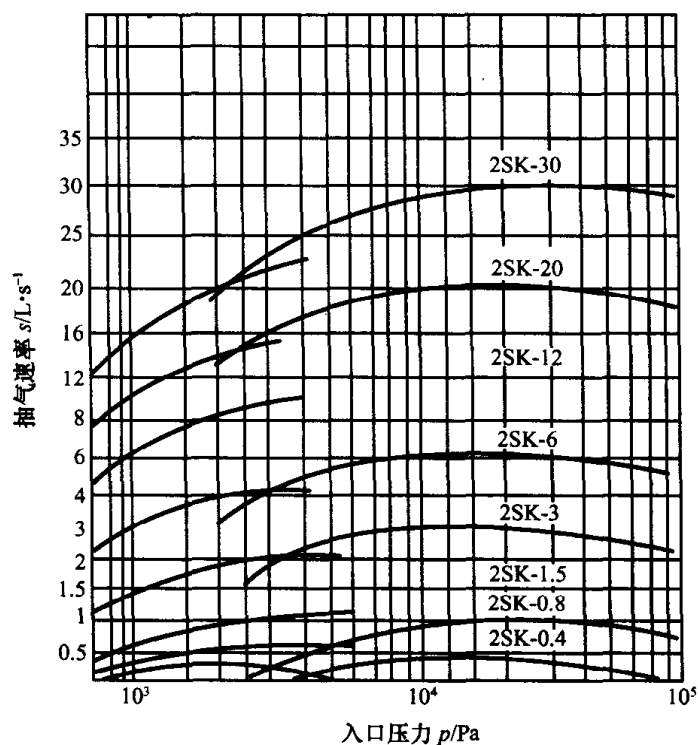


图 3-19 2SK-P 水环—大气喷射泵组特性曲线
(山东淄博真空设备厂有限公司生产)

3. 外形及安装尺寸

①2SK-6AP 水环—大气喷射真空泵组外形及安装尺寸如图 3-20 所示。

②2SK-1.5P₁ 水环—大气喷射真空泵组外形及安装尺寸见表 3-37。

③2SK-3P₁ 水环—大气喷射真空泵组外形及安装尺寸见表 3-38。

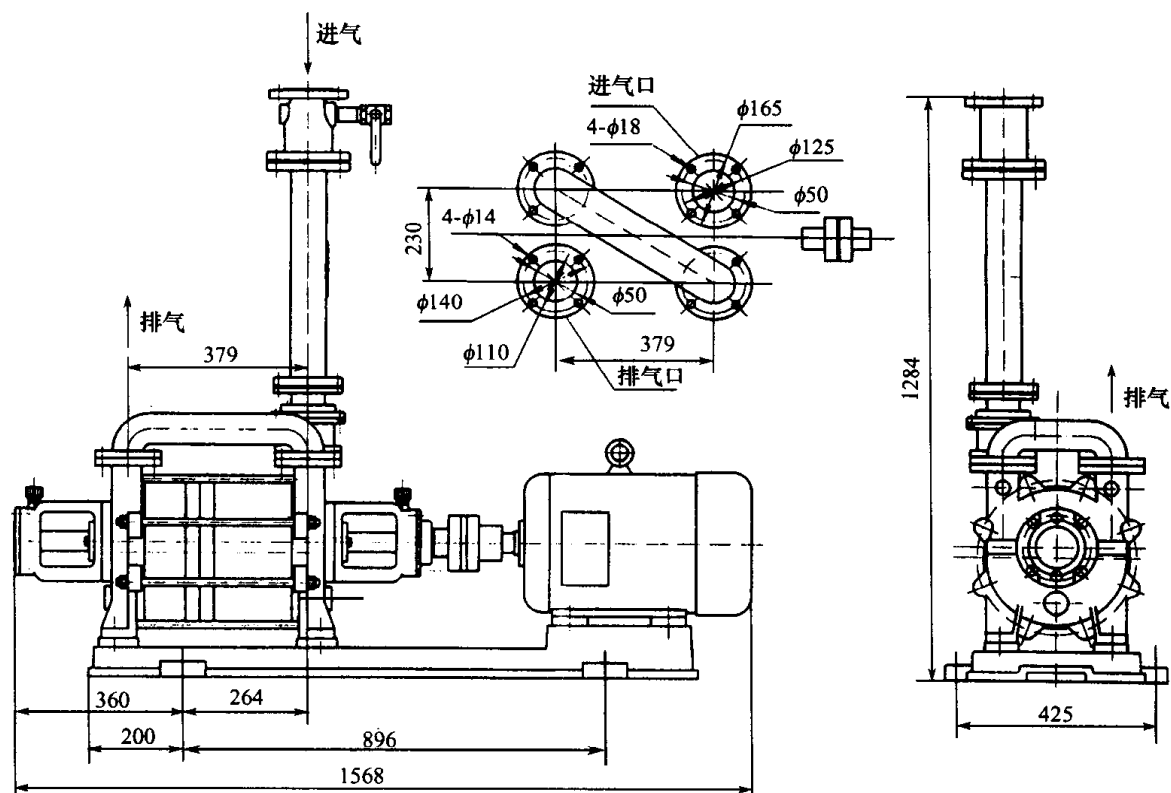


图 3-20 2SK-6AP 水环—大气喷射真空泵组外形及安装尺寸

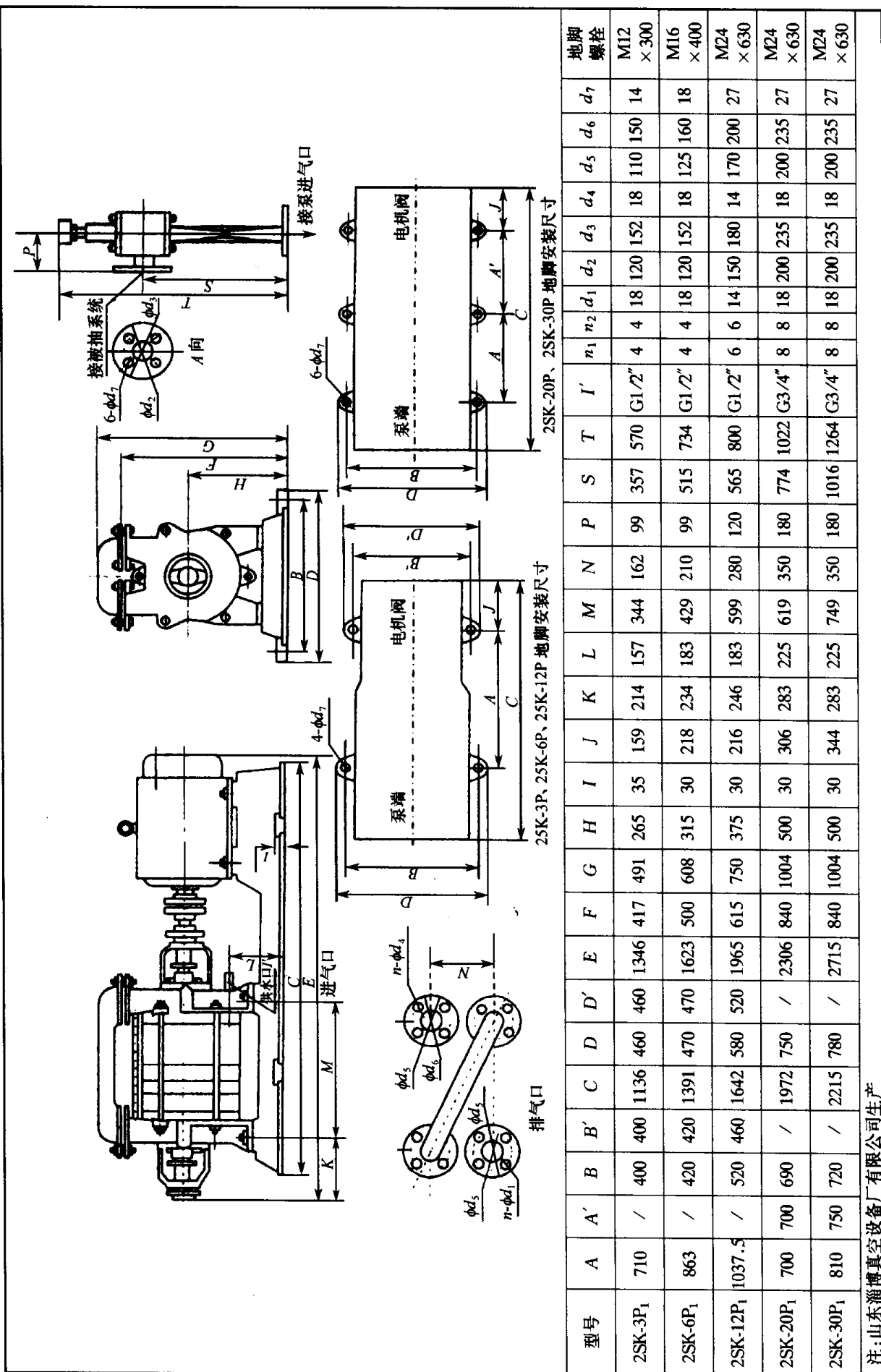
(台州星光真空设备厂生产)

表 3-37 2SK-1.5P₁ 水环—大气喷射真空泵组外形及安装尺寸 (单位:mm)

型 号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
2SK-1.5P ₁	605	125	125	950	1150	212	144	252	360	404	584	764	255	410
型 号	P	Z	n	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	地脚螺栓	
2SK-1.5P ₁	25	12.7 ($G\frac{1}{2}$)	4	φ140	φ98	φ40	M12	φ120	φ92	φ40	φ18	φ14	M16×400	

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

表 3-38 2SK-3P₁、2SK-6P₁、2SK-12P₁、2SK-20P₁、2SK-30P₁ 水环—大气喷射真空泵组外形安装尺寸 (单位:mm)



五、油封式旋转机械真空泵

(一) 概述

油封式旋转机械真空泵按照结构型式可分为定片式、旋片式、滑阀式(或柱塞式)、直联式四种。除定片式真空泵属淘汰产品外,其余三种结构型式的真空泵我国均有包括型式与基本参数在内的系列标准,即分别为 2X 系列、H 和 2H 系列、2XZ 系列。这些泵国内均有系列定型产品。

定片式真空泵抽速较小,双级泵的极限压力可达 10^{-1}Pa ,这种泵的特点是结构简单、使用寿命长和检修容易。一般用于仪器、医疗器械、科研等部门。

旋片式真空泵在它适用的真空度范围内,可以单独使用,也可以与其它类型的真空泵配套作为预真空抽气设备。主要用途如下:①用于抽除密封容积中的干燥气体或含有少量可凝性蒸气的气体。用于后者时,需使用该泵的气镇装置。②用作油扩散泵、油增压泵、罗茨泵的前级真空泵。③用于中小型的真空冶炼、真空焊接、真空处理、真空浇铸、医疗制药、冷冻干燥、电子管、暖水瓶等真空排气,以及半导体器件、电子束加工、质谱仪器、电子显微镜等现代工业技术。

2X 型真空泵只能在环境温度为 $5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内使用。此种泵对于抽除含氧过高的、有爆炸性的、对金属有腐蚀性的、对真空油起化学反应的以及含有颗粒尘埃的气体是不适用的,也不适用于把气体从一个容器输送到另一个容器作输送泵。

滑阀式真空泵由于采用严密油封,可靠耐用。传动部分由于采取了强制润滑,所以操作方便,安全可靠,使用寿命长。

HGL、HG 型单级单缸滑阀真空泵,在原 H 型滑阀泵基础上作了重大的技术改进,其综合性能有较大提高。它的使用范围除与 2X 型真空泵相同外,还可用于真空浸渍、真空蒸馏、真空模拟装置以及其它真空作业中,抽速可达 600L/s 以上。多数用作高真空泵的前级泵。

滑阀式真空泵同样不适用于抽除含氧过高的、有爆炸性的、对黑色金属有腐蚀性的和对真空油起化学反应的气体。亦不适于作气体输送泵。

直联高速旋片式真空泵是在旋片式真空泵的基础上经过结构、材料和制造工艺上重大革新后的一种新泵种。老式结构的旋片泵的转速低(400r/min 左右)、采用间接传动(皮带轮或齿轮减速),因而体积大、质量重、并有较大的振动和噪声。直联泵具有体积小、质量轻、振动小、噪声低等特点,适于安装在精密仪器设备上使用。

直联泵采用三相或单相交流电机直联驱动。用时可单独使用,亦可作为各类真空系统的前级泵。直联泵附有气镇装置,可以抽除含有一定数量可凝性蒸气的气体。但是,直联泵不能应用于抽除尘埃及腐蚀性、易爆性气体,不适应长期在高于 $1.3 \times 10^4\text{Pa}$ 的压力下工作,不得作压缩泵或输送泵使用。

(二) 工作原理

1. 定片式真空泵的工作原理

定片式真空泵的工作原理如图 3-21 所示。在圆柱缸体 1 内有旋转的偏心转子 2,缸体上有滑片 3,借助于弹簧 4 的作用压向转子,把缸体分隔成 A、B 两个空间。随着转子旋转角度

不同,两个空间体积交替增大或缩小而进行吸气与排气。

在工作过程中,滑片作垂直往复运动,并在转子表面上滑动。弹簧是通过一直角形杠杆 5 与滑片发生作用。泵内的一切运动表面都覆盖着油层,形成吸气腔和排气腔之间的油封。此外,油还充满了泵腔内的一切有害空腔,以消除它们对极限真空的影响。

2. 旋片式真空泵的工作原理

①单级旋片式真空泵的工作原理(图 3-22)。

单级旋片式真空泵只有一个工作室。泵主要由定子、旋片、转子组成。在定子缸内偏心地装有转子,转子槽中装有两块旋片,由于弹簧弹力作用而紧贴于缸壁(转动后还有旋片离心力)。定子上的进排气口被转子和旋片分为两部分。

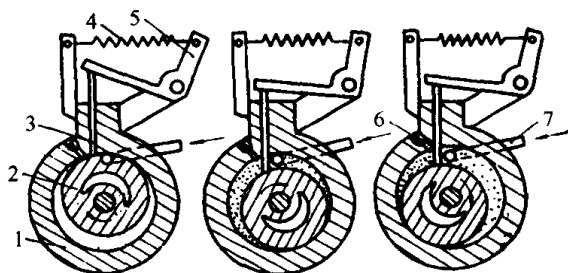


图 3-21 定片式真空泵工作原理图

1—圆柱形泵体;2—偏心转子;3—滑片;
4—弹簧;5—直角杠杆;6—排气阀;7—进气口。

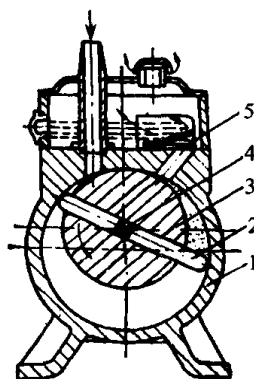


图 3-22 单级旋片式真空泵工作原理图

1—定子;2—旋片;3—转子;
4—弹簧;5—排气阀。

当转子在定子缸内旋转时周期性地将进气口方面容积逐渐扩大而吸入气体,同时逐渐缩小排气口方面容积将已吸入气体压缩从排气阀排出。

排气阀浸在油里以防止大气流入泵中。油通过泵体上的缝隙、油孔及排气阀进入泵腔,使泵腔内所有的运动表面被油覆盖,形成了吸气腔与排气腔之间的密封。同时,油还充满了泵腔内的一切有害空腔,以消除它们对极限真空的影响。

②双级旋片式真空泵的工作原理(图 3-23)。

双级旋片式真空泵由两个工作室组成。两室前后串联,同向等速旋转,Ⅰ室是Ⅱ室的前级,Ⅰ室是低真空级,Ⅱ室是较高真空级。被抽气体由进气管道进入Ⅱ室。当进入气体压力较高时,气体经Ⅱ室压缩、压强急增,被压缩的气体除经通道 2 进入Ⅰ室外,还能推开排气阀 1,从排气阀 1 排出。

当进入Ⅱ室的气体压力较低时,虽经Ⅱ室的压缩也推不开排气阀 1,气体全部经通道 2 进入Ⅰ室,经Ⅰ室的继续压缩,由排气阀 3 排出。因而双级旋片式真空泵比单级旋片式真空泵的极限真空高。

3. 滑阀式真空泵的工作原理

滑阀式真空泵的结构主要由泵体及内部作偏心转动的柱塞部件、半圆形的柱塞导轨、排气阀、轴等组成,如图 3-24 所示。

泵体中装有“滑阀”环 4,滑阀环内装有偏心轮 3,偏心轮固定在轴 2 上,轴与泵体中心线相重合。在柱塞环上装有长方形的滑阀杆 5,它能在半圆形滑阀导轨 7 中上下滑动及左右摆动,因此,泵体被滑阀环和滑阀杆分隔为 A、B 两室。泵在运转过程中,由于 A、B 两室容积周期

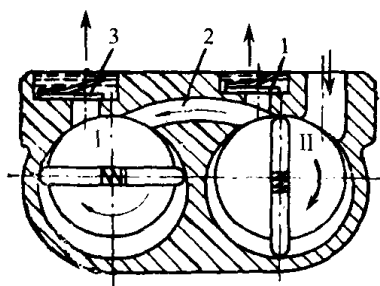


图 3-23 双级旋片式真空泵
工作原理图
1—排气阀;2—通道;3—排气阀。

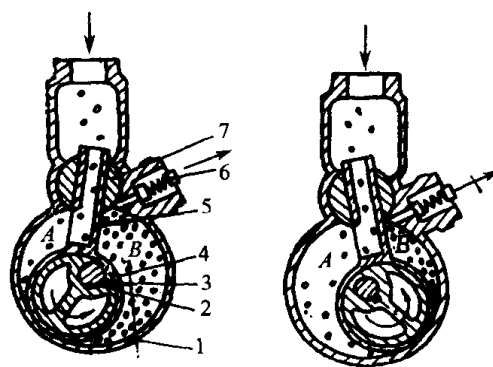


图 3-24 滑阀式真空泵工作原理图
1—泵体;2—轴;3—偏心轮;4—滑阀环;
5—滑阀杆;6—排气阀;7—滑阀导轨。

性地改变使气体不断进入逐渐增大容积的吸气腔;同时,在排气腔随着其容积的缩小而使气体受压缩,并通过排气阀排除气体。

4. 直联式真空泵的工作原理

直联泵是容积式真空泵的一种,它利用转子在缸内的高速旋转和滑片在转子槽内的往复运动以改变工作室的容积进行抽气。该泵的主要结构如图 3-25 所示。

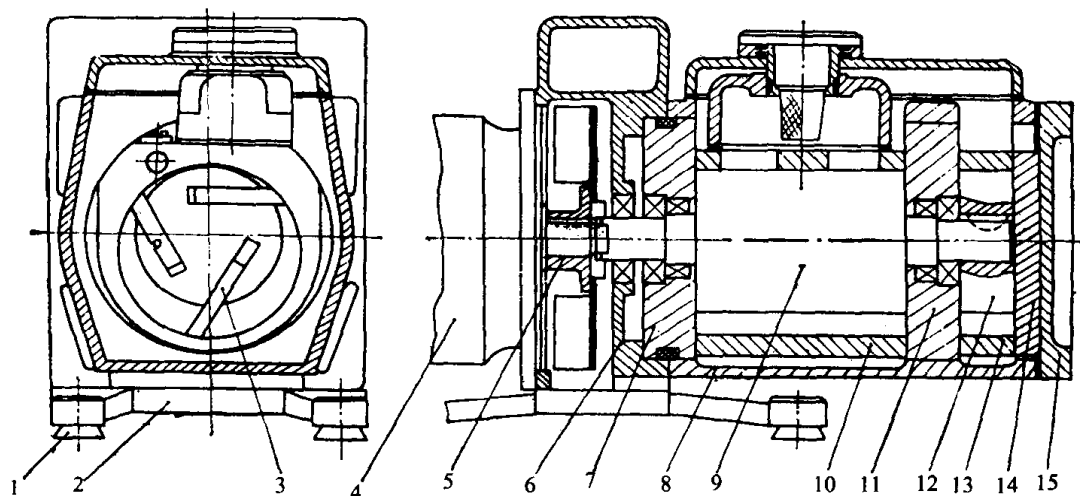


图 3-25 直联高速旋片式真空泵

1—胶垫;2—支架;3—旋片;4—电机;5—联轴器;6—支座;7—前盖;8—箱体;9—高级转子;
10—高级缸;11—隔板;12—低级转子;13—低级缸;14—后盖;15—法兰。

直联泵为双级结构,两级前后串联,被抽气体逐级被压缩后,推开排气阀排至泵外。泵的工作室用泵油密封,使抽气室、压缩室和排气室相互隔绝。此外,泵油用作各相对运动表面的润滑剂。

直联泵装有气镇阀,用以对压缩室掺入一定量气体,降低该压缩室中可凝性蒸气的压缩比,使可凝性蒸气排至泵外,不致凝入泵油中。

(三) 油封式旋转机械真空泵行业标准

1. 油封旋片式真空泵(摘自 JB/T6533—97)

①范围:本标准适用于双级油封旋片式真空泵(以下简称泵);

②定义:本标准采用下列定义:

a. 抽气速率 S 。当泵装有标准测试罩并按规定条件工作时,从测试罩流过的气体流量与在测试罩上指定位置测得的平衡压力之比,简称抽速。单位是升/秒(L/s)。[GB/T3163—93 中 4.5.1]。

b. 几何抽速 S_n 。泵每转理论吸气容积与额定转速的乘积。单位是升/秒(L/s)。转速的时间单位为秒(s)。

c. 极限压力。泵装有标准测试罩并按规定条件工作,在不引入气体正常工作的情况下,趋向稳定的最低压力,单位是帕(Pa)[GB/T3163—93 中 4.5.8]。

d. 最大允许水蒸气入口压力 P_{wo} 。标准环境条件下,气镇泵在连续工作时,被抽气体中水蒸气的最高入口压力。单位是帕(Pa)[GB/T3163—93 中 4.5.18]。

e. 水蒸气允许量 C_{wo} 。标准环境条件下(20℃和 101325Pa),气镇泵在连续工作时,单位时间内能抽除的最大水蒸气质量流量。单位是克/小时(g/h)[GB/T3163—93 中 4.5.17]。

f. 最低启动温度。停泵至少 1h 后,在 10^5 Pa 下泵能启动的最低环境温度(℃)。

③型式与基本参数:

a. 型式。泵的结构型式是转子偏心地装在泵壳内与泵壳内表面固定面相切(或相交),在转子内装有两个(或两个以上)旋片,当转子旋转时旋片能沿其径向(或斜向)槽往复滑动且与泵壳内壁始终接触,将泵腔分成几个可变容积。

b. 基本参数。旋片真空泵的基本参数应符合表 3-39 规定。

表 3-39 旋片真空泵的基本参数

序号	型 号	抽气速率 ^① /L·s ⁻¹	极限压力 ^② (关气镇) /Pa	极限全压力 ^③ (关气镇) /Pa	噪声 /dB(A)	配用电 机功率 /kW	进气口 内径 /mm	抽气效率 ^④ /%		比功率 ^⑤ /W·(s·L ⁻¹)
								1.5kPa 时	2Pa 时	
1	2X-0.5	0.5	≤6×10 ⁻²	≤1	≤68	≤0.18	16	≥80	≥45	≤360
2	2XZ-0.5				≤70	≤0.25				≤250
3	2X-1	1			≤72	≤0.37	25			≤185
4	2XZ-1									≤137
5	2X-2	2			≤75	≤0.55	40			≤147
6	2XZ-2									≤100
7	2X-4	4			≤78	≤1.1	50			≤79
8	2XZ-4									
9	2X-8	8			≤80	≤2.2	63			
10	2XZ-8									
11	2X-15	15			≤82	≤3.0	80			
12	2XZ-15									
13	2X-30	30			≤86	≤5.5				
14	2XZ-30									
15	2X-70	70								

注:①抽气速率指名义抽速。

②极限压力系指用压缩式真空计在测试罩上规定位置测得的永久性气体的极限分压力。

③极限全压力系指用经校准的热偶真空计等在测试罩上规定位置测得的极限全压力。此指标暂不作为出厂考核指标,但生产厂必须报告。

④抽气效率为泵的实测抽速与几何抽速之比,表中值仅适用于 2 个旋片的泵。3 个旋片的泵抽气效率 1.5kPa 时应 $\geq 70\%$, 2Pa 时应 $\geq 40\%$ 。

⑤比功率为泵的最大消耗功率与名义抽速之比

2. 单级旋片真空泵型式与基本参数(摘自 JB/T8944—99)

①型式。泵的结构型式是转子偏心地装在泵壳内表面固定面相切(或相交),在转子内装有两个(或二个以上)旋片,当转子旋转时,旋片沿其径向(或斜向)槽往复滑动且与泵壳内壁始终接触,将泵腔分成几个可变容积。

②基本参数。泵的基本参数应符合表 3-40 规定。

表 3-40 单级旋片真空泵的基本参数

序号	型 号	抽 气 速 率 ^① /L·s ⁻¹	极限 压力 ^② /Pa	极 限 全压力 ^③ /Pa	噪 声 /dB(A)	配用电 机功率 /kW	进气口 内 径 /mm	抽气效 率 ^④ /％ (1.5kPa 时)	比功率 ^⑤ /W·s·L ⁻¹	入口水 蒸气最 大允许 压力 ^⑥ /Pa	水蒸气 允许量 ^⑥ /g·h ⁻¹
1	XZ-0.5	0.5	≤7	≤35	≤78	≤0.12	10 或 16	≥70	≤240	—	—
2	XZ-1	1			≤80	≤0.18	16		≤180		
3	XZ-2	2			≤82	≤0.25	25		≤125		
4	XZ-4	4			≤85	≤0.37			≤93		
5	XZ-8	8			≤87	≤0.55	32		≤90		
6	X-15	15	≤2	≤20	≤88	≤1.5	63	≥80	≤130	≥3000	≥1200
7	X-30	30			≤90	≤4					≥2500
8	X-70	70			≤92	≤7.5	80		≤100		≥5600
9	X-150	150			≤95	≤15	125				≥12000

注:①抽气速率指名义抽速。

②极限压力系指用压缩式真空计在测试罩上规定位置测得的极限分压力。

③极限全压力系指用经校准的热偶真空计、薄膜真空计等全压力计在测试罩上规定位置测得的极限全压力;此指标暂作参考,但生产厂必须报告。

④抽气效率为泵的实测抽速与几何抽速之比。

⑤比功率为泵的最大驱动功率与名义抽速之比。

⑥入口水蒸气最大允许压力和水蒸气允许量的指标暂作参考,不作考核指标

3. 滑阀真空泵(摘自 JB/T1246—97)

①范围。本标准适用于各种类型的单级、双级滑阀真空泵(以下简称泵)

②定义。本标准采用下列定义:

a. 抽气速率。当泵装有标准测试罩并按规定条件工作时,从测试罩流过的气体流量与在测试罩上指定位置测得的平衡压力之比,简称抽速。单位是升/秒(L/s)。(见 GB/T3163—93 中 4.5.1)。

b. 极限压力。泵装有标准测试罩,并按规定条件工作,在不引入气体正常工作的情况下,趋向稳定的最低压力,单位是帕(Pa)。(见 GB/3163—93 中 4.5.8)

c. 几何抽速。泵每转理论吸气容积与额定转速的乘积。单位是升/秒(L/s),转速的时间单位为秒(s)。

③型式。滑阀真空泵的结构为在偏心子外有一滑阀环,转子旋转时带动滑阀环沿泵内壁滑动和滚动,固定在滑阀环上的滑阀杆能在装于泵壳适当位置可摆动的滑阀导轨中滑动,把泵腔分为两个可变容积。泵分单级和双级两种结构。

(4)基本参数。泵的性能参数应符合表 3-41 的规定。

表 3-41 滑阀真空泵性能参数

序号	型 号	抽气速率 ^① /L·s ⁻¹	极限压力 ^② (关气镇) /Pa	极 限 全压力 ^③ (关气镇) /Pa	抽气效率 ^④ /%		噪 声 /dB(A)	比功率 ^⑤ /W·s ·L ⁻¹	推荐电 机功率 /kW	泵法兰名义内径 /mm				
					1.5k Pa 时	2Pa 时				进口	出口			
1	H-8	8	≤6×10 ⁻¹	—	≥80	—	≤82	≤130	1.1	50	25			
2	2H-8		≤6×10 ⁻²	≤2.0		≥45								
3	H-15	15	≤6×10 ⁻¹	—		—	≤87		≤130			2.2		
4	2H-15		≤6×10 ⁻²	≤2.0		≥45								
5	H-30	30	≤6×10 ⁻¹	—		—	≤91	4		63	40			
6	2H-30		≤6×10 ⁻²	≤2.0		≥45								
7	H-70	70	≤1.3	≤6.5		—	≤94		≤90			7.5	80	63
8	2H-70		≤6×10 ⁻²	≤2.0		≥45			≤110					
9	H-150	150	≤1.3	≤6.5		—	≤96	≤90	15	100	80			
10	2H-150		≤6×10 ⁻²	≤2.0		≥45		≤100						
11	H-300	300	≤1.3	≤6.5		—	≤100	≤90				30	160	100

注:①抽气速率指名义抽速;

②极限压力指麦氏计示值;

③极限全压力指用经校准的热偶计等其它全压力真空计的示值,此指标暂不作为出厂考核指标,但生产厂必须报告;

④抽气效率为泵的实测抽速与几何抽速之比,几何抽速设计时按本标准原 5.2.5;

⑤比功率为泵的最大消耗功率与名义抽速之比

(四) 国产 2X 型旋片式真空泵的技术性能、性能曲线、外形及安装尺寸

1. 技术性能

国产 2X 型旋片式真空泵主要技术性能见表 3-42。

表 3-42 国产 2X 型旋片式真空泵主要技术性能

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	电机功率 /kW	进气口 直径/mm	用油量 /L	噪声 /dB	外形尺寸(长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
2X-4C	4	6×10^{-2}	450	1.00	25	1.0	≤ 75	490×310×410	59	上海真空 泵厂
2X-8	8		320	1.10	40	2.0	≤ 78	790×430×540	158	
2X-15	15		320	2.20	40	2.8	≤ 80	790×530×540	202	
2X-30A	30		450	3.00	65	2.0	≤ 82	780×500×560	236	
2X-70A	70		450	5.50	80	4.2	≤ 86	910×650×700	338	
2X-8	8	6×10^{-2}	590	1.10	34	1.3	< 75	580×340×380	78.5	成都国投 南光有限 公司
2X-8A	8		590	1.10	34	1.5	< 75	580×340×380	78.5	
2X-15	15		450	1.50	60	3.0	< 80	660×440×580	128	
2X-15A	15		450	1.50	60	2.5	< 80	660×440×580	128	
2X-30	30		450	3.00	70	3.2	< 82	730×470×670	231	
2X-70	70		450	5.50	90	8.0	< 86	850×600×610	450	
2XD-2	110	6×10^{-1}	500	1.5		10.0		910×680×430	250	
2X-2	2	6×10^{-2}	610	0.37	25	0.35	65	450×250×280	60	山东淄博 真空设备 厂有限公 司
2X-4	4		543	0.55	28	0.55	65	530×300×340		
2X-8	8		590	1.10	34	0.60	70	580×328×380		
2X-15	15		320	2.20	36	4.20	70	650×420×40		
2X-30A	30		450	3.00	65	3.20	70	780×500×560		
2X-70A	70		420	5.50	80	5.00	75	908×650×692	231	
2XQ-1	1	6×10^{-2}	450	0.25	15	1.60		470×240×350	40	北京北仪 创新真空 技术有限 公司
2XQ-2	2		450	0.37	20	1.30		470×240×355	50	
2X-4	3		450	0.55	32	0.50		500×332×340	56	
2X-8	8		400	0.75	32	0.80		580×334×463	118	
2X-15	4		400	1.50	50	1.50		660×400×560	185	
2X-30	30		370	3.00	63	2.00		730×500×452	300	
2X-70	70		450	5.50	80	4.00		840×466×572	/	

(续)

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	电机功率 /kW	进气口 直径/mm	用油量 /L	噪声 /dB	外形尺寸(长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
2X-0.5	0.5	≤6×10 ⁻²	500	0.18	16	0.5	≤68	375×215×295	35	南京真空 泵厂
2X-1	1		500	0.25	16	0.5	≤70	400×245×315	40	
2X-2	2		450	0.37	25	1.0	≤72	460×280×350	52	
2X-4	4		520	0.55	25	1.0	≤75	460×280×350	57	
2X-8	8		600	1.10	40	2.0	≤78	589×340×400	110	
2X-15	15		460	2.20	50	3.0	≤80	710×424×480	180	
2X-30A	30		400	3.00	63	4.5	≤82	750×490×600	300	
2X-70A	70		420	5.50	80	7.5	≤86	900×710×790	400	
2X-100	100		480	7.50	100	10.0	≤88	720×730×980	500	
2XT-300	5		500	0.75	25	15.0	≤60	501×295×360	75	
2X-1	1	6×10 ⁻²	500	0.18	16	0.25	70	300×210×260	20	沈阳真龙 真空设备 厂
2X-2	2		460	0.37	20	0.5	70	420×280×330	34	
2X-4	4		550	0.55	24	0.5	75	380×270×370	39	
2X-8	8		500	1.10	32	1.5	76	550×315×320	65	
2X-15	15		410	1.50	50	2.6	78	700×400×550	185	
2X-30	30		410	4.00	65	3.0	80	900×570×602	270	
2X-70	70		360	5.50	90	8.0	86	1000×772×755	560	
2X-150	150	6×10 ⁻¹	450	11.00	125	20.0	88	1365×945×1140	800	
2X-0.5	0.5	6×10 ⁻²	1400	0.18	16	0.18		300×220×230	14	沈阳真空 泵厂
2X-1	1		1400	0.18	16	0.20		300×220×320	16	
2X-2	2		1400	0.37	18	0.32		380×220×330	27	
2X-4	4		1400	0.55	22	0.55		380×260×390	35	
2X-8	8		1400	1.10	38	0.65		560×320×320	65	
2X-15	15		1400	1.50	50	1.50		760×440×520	100	
2X-30	30		1400	4.00	70	2.20		850×500×580	270	
2X-30C	30		1400	3.00	70	2.20		780×460×560	230	
2X-70	70		960	5.50	85	8.80		1000×780×750	560	
2X-1	1	6×10 ⁻²	500	0.18	16	0.25	70	335×258×256	20	沈阳恒星 实业有限 公司(沈 阳真空设 备厂)
2X-2	2		460	0.37	20	0.50	70	424×280×322	34	
2X-4	4		550	0.55	26	0.50	75	426×285×376	34	
2X-8	8		500	1.10	35	1.50	75	500×315×320	65	
2X-15	15		410	1.50	50	2.60	78	700×460×550	185	
2X-30	30		410	4.00	65	3.00	80	900×575×594	270	
2X-70	70		360	5.50	90	8.00	86	1000×772×755	560	
2X-0.5	0.5	2×10 ⁻²	530	0.18	10	0.5	64	420×274×270	21	广东真空 设备厂
2X-1	1	4×10 ⁻²	800	0.18	15	0.5	68	450×260×270	20	
2X-2	2	6×10 ⁻²	390	0.37	20	0.7	70	480×277×279	25	
2X-4	4	6×10 ⁻²	410	0.55	25	1.0	75	570×311×397	67	
2X-8	8	4×10 ⁻²	410	1.10	32	1.5	74	588×395×390	95	
2X-15	15	4×10 ⁻²	320	2.20	50	2.8	76	792×531×540	165	
2X-30	30	4×10 ⁻²	315	3.00	65	4.2	79	920×638×656	370	
2X-70	70	6×10 ⁻²	315	5.50	80	4.2	86	990×638×739	470	
2X-4A	4	≤1	525	0.55		1.50	72	460×300×325		成都无极 真空科技 有限公司
2X-8A	8		590	1.10		2.20	78	520×330×350		
2XT-15	15	6×10 ⁻²	700	1.50	50	6.00		633×480×480		沈阳真空 机械三厂
2XT-30	30		700	3.00	65	8.00		655×500×500		
2XT-70	70		450	5.50	80	12.00		850×700×585		

2. 特性曲线

2X 型旋片式真空泵抽气速率与进气口压力曲线如图 3-26 所示。

3. 外形及安装尺寸

①2X-4C、2X-8、2X-15、2X-30A、2X-70A 型旋片式真空泵如图 3-27、表 3-43、表 3-44 所示。

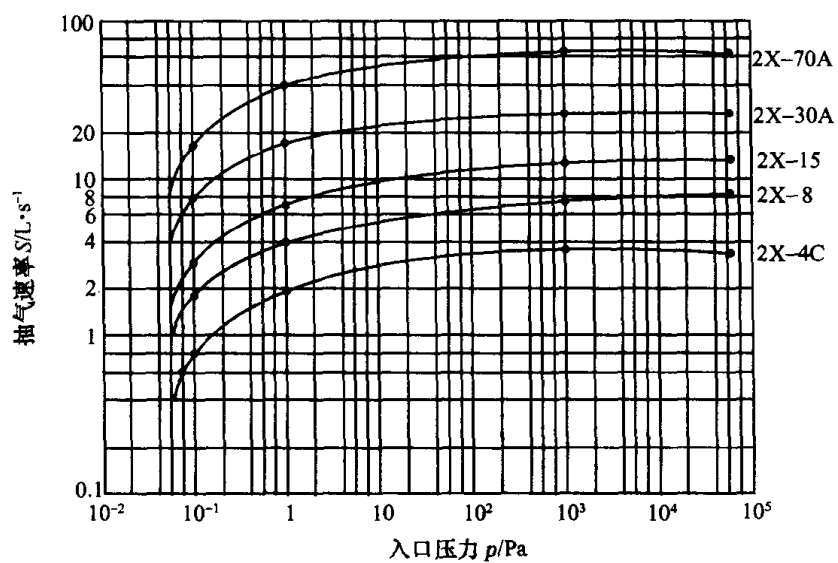


图 3-26 2X 型旋片式真空泵抽气速率与进气口压力曲线图
(上海真空泵厂生产)

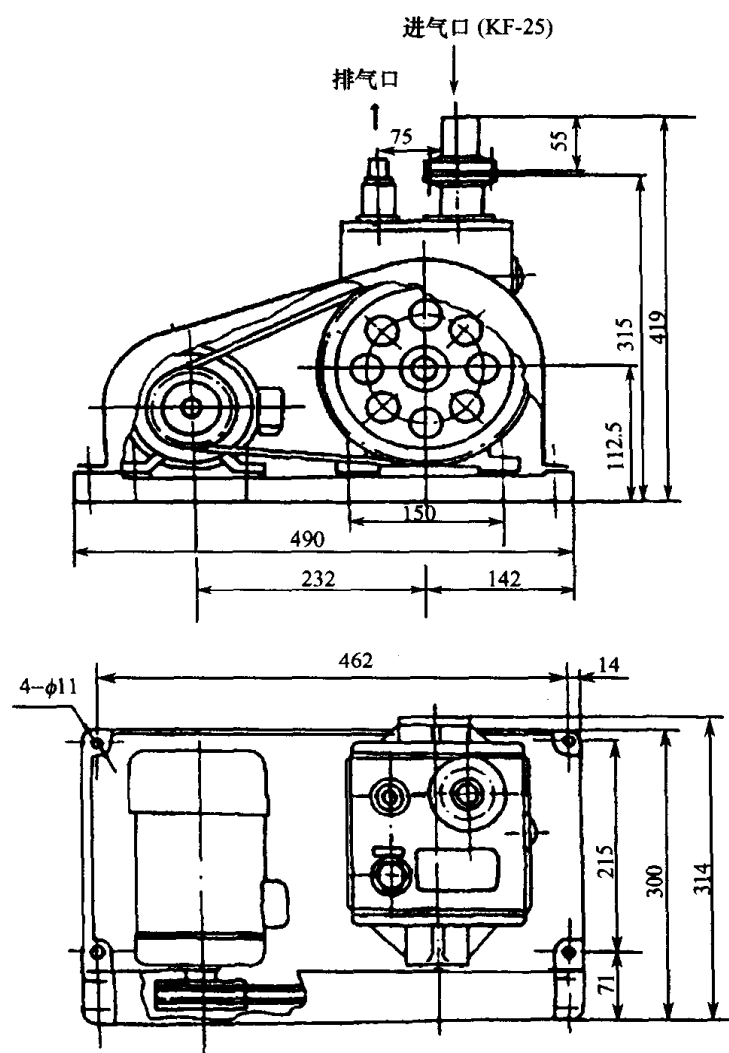
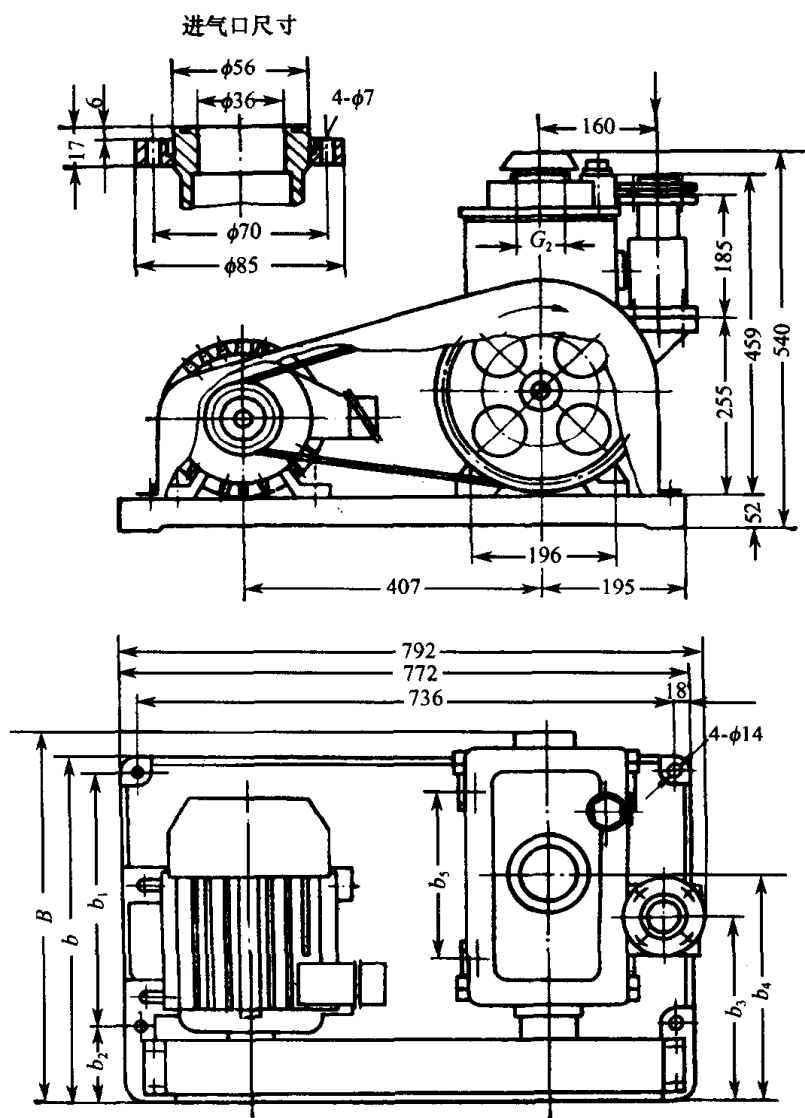


图 3-27 2X-4C 型旋片式真空泵外形及安装尺寸图
(上海真空泵厂生产)

表 3-43 2X-8、2X-15 型旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



型 号	B	b	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
2X-8	431	384	260	104	211	270	168
2X-15	531	484	356	110	261	324	260

注:上海真空泵厂生产

②2X-4、2X-8、2X-8A、2X-15、2X-30、2X-70 型旋片式真空泵外形及安装尺寸图见表 3-45。

③2X-2、2X-4、2X-8、2X-15、2X-30A、2X-70A 型旋片式真空泵(生产厂:山东淄博真空设备厂有限公司)见表 3-46。

④2X-70、2X-100 型旋片式真空泵外形及安装尺寸如图 3-28、图 3-29 所示。

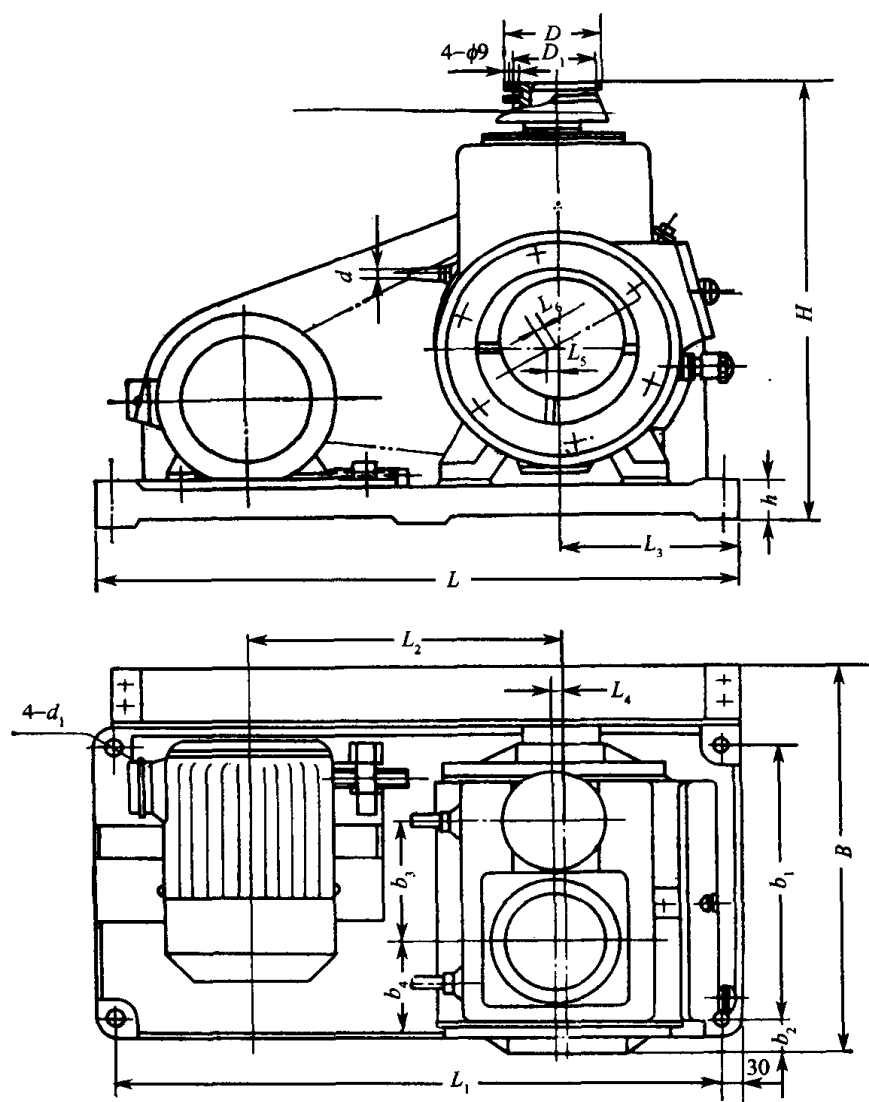
⑤2XQ-1.2、2X-4、2X-15 型旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-47。

⑥2X-0.5、2X-1 型旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-48。

⑦2X 系列旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-49。

五、油封式旋转机械真空泵

表 3-44 2X-30A、2X-70A 型旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



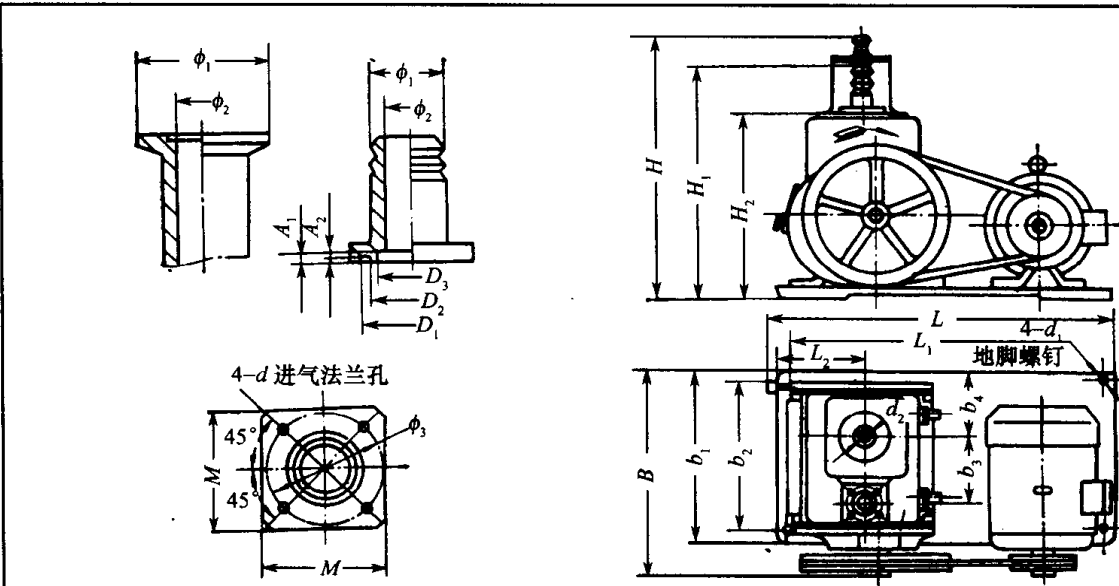
型 号	B	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	H	h
2X-30A	498	340	18	155	128	557	55
2X-70A	650	470	25	225	175	692	70

型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	D	D ₁	d	d ₁
2X-30A	780	730	376	225	10	8	21	φ125	φ105	φ13	4-φ16
2X-70A	908	848	445	286	15	10	29	φ145	φ125	φ13	4-φ20

注:上海真空泵厂生产

表 3-45 2X 型旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

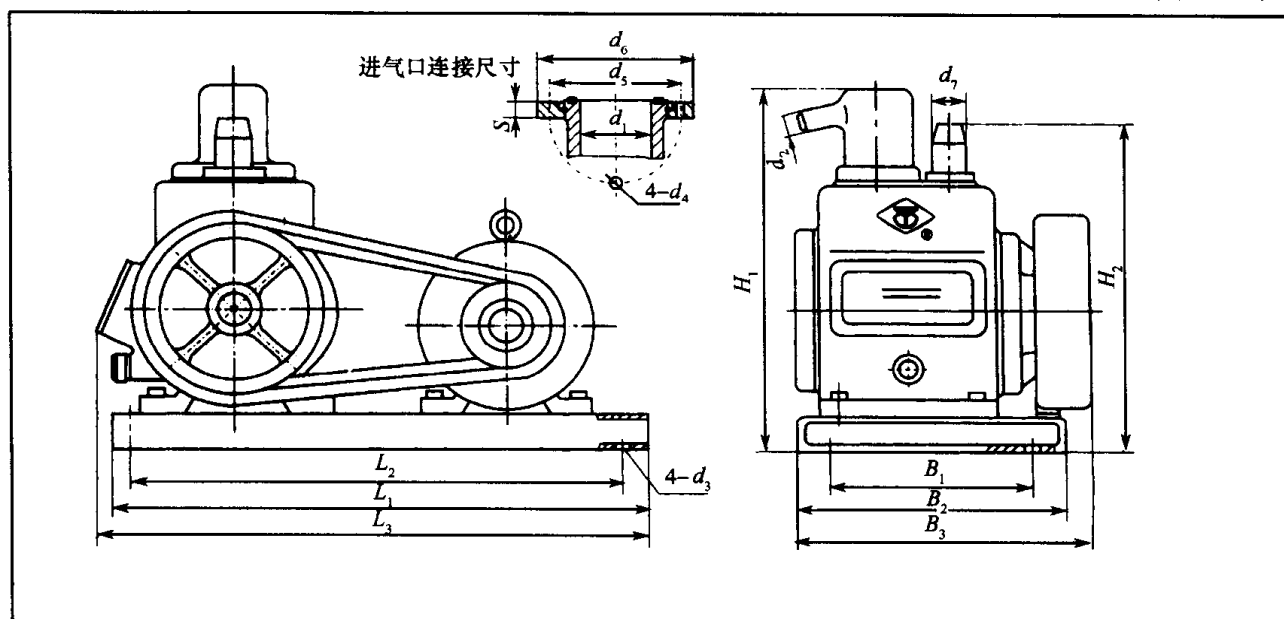


型 号	L	L ₁	L ₂	B	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	H	H ₁	H ₂	d	D ₁	D ₂	D ₃	A ₁	A ₂	M	d ₁	d ₂	φ ₁	φ ₂	φ ₃
2X-4	530	150	110	320	260	230	86	115	335	312	262	6.5	45	35	33	4	3	55	10	25	34 11	28 12	55
2X-8 2X-8A	580	490	130	348	280	210	83	112	380	360	282	8.5	52	42	38	4	3	64	10	25	40 55	34 32	64
2X-15 2X-15A	660	530	165	440	370	274	105	175	580		372	8.5	78	68	64	5	3	90	11	M33×1.5		60	90
2X-30	730	690	178	470	370	340	145	128	670		463	8.5	90	80	76	5	3	100	12	M48×1.5	70 63		105
2X-70	850	758	210	600	480	440	176	180	610		556	11	115	105	100	5	3	130	14	M76×3	90 80		130

注:成都国投南光有限公司生产

表 3-46 2X-2、2X-4、2X-8、2X-15、2X-30A、2X-70A 型旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



五、油封式旋转机械真空泵

(续)

型号	H_1	H_2	L_1	L_2	L_3	B_1	B_2	B_3	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
2X-2	260	240	400	360	410	260	240	180	$\phi 25$	$\phi 28$	$\phi 11$				$\phi 28$
2X-4	340 (330)	327 (316)	520	480	533	290	260	200	$\phi 28$ ($\phi 25$)	$\phi 25$ ($\phi 32$)	$\phi 11$				$\phi 32$ ($\phi 28$)
2X-8	380 (364)	380 (359)	560	520	593	330	280	210	$\phi 34$ ($\phi 40$)	$\phi 32$ ($\phi 44$)	$\phi 11$				$\phi 41$ ($\phi 44$)
2X-15	540	490	772	736	792	492	492	364	$\phi 36$	G2½	$\phi 14$	$\phi 7$	$\phi 70$	$\phi 85$	
2X-30A	530	560	780	730	780	500	390	340	$\phi 65$	G2½	$\phi 16$	$\phi 9$	$\phi 105$	$\phi 125$	
2X-70A	680	692	908	848	908	650	530	470	$\phi 80$	G3	$\phi 20$	$\phi 9$	$\phi 125$	$\phi 145$	

注:括号内尺寸为只安装快卸法兰时尺寸;山东淄博真空设备厂有限公司生产

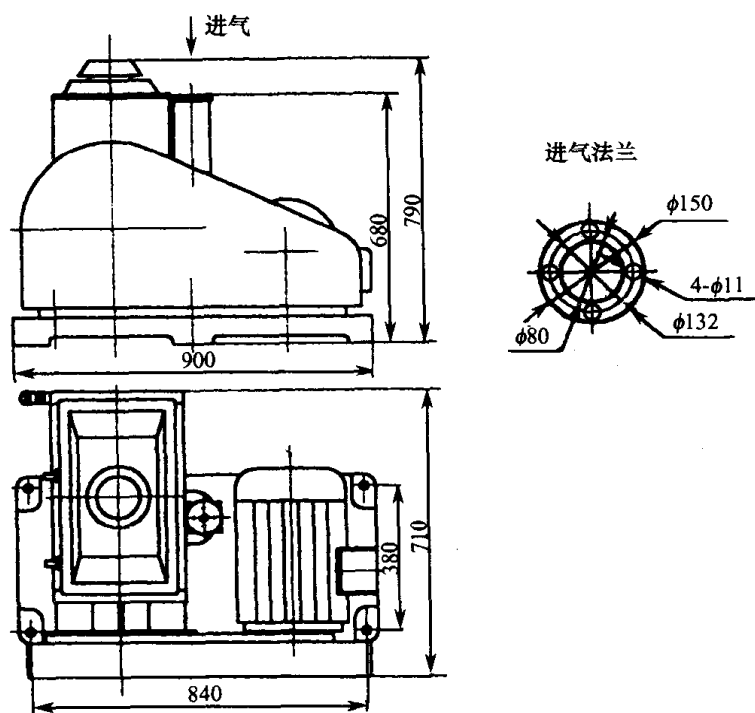


图 3-28 2X-70 旋片式真空泵外形及安装尺寸图
(南京真空泵厂生产)

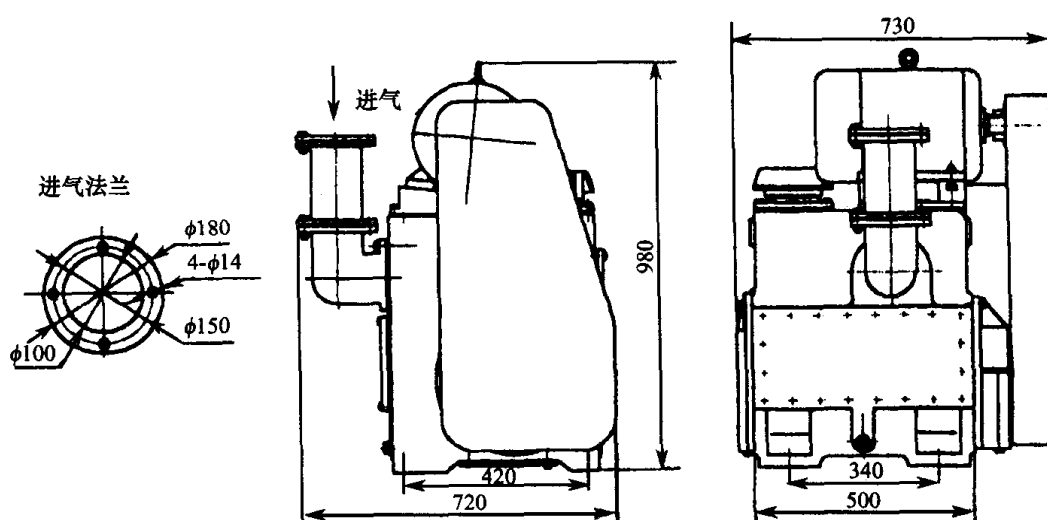


图 3-29 2X-100 旋片式真空泵外形及安装尺寸图
(南京真空泵厂生产)

表 3-47 2XQ、2X-4、2X-15 型旋片式真空泵外形安装尺寸 (单位:mm)

(a) 2XQ-1.2	(b) 2X-4									
(c) 2X-15										
型 号	L	L ₁	B	B ₁	H	H ₁	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
2XQ-1	470	450	240	220	350	376	φ19	φ16	φ9	—
2XQ-2	470	450	240	220	355	376	φ25	φ16	φ9	—
2X-4	500	470	332	240	340	376	φ55	φ29	φ9	—
2X-15	660	620	400	326	560	490	φ90	φ42	φ9	φ9

注:北京北仪创新真空技术有限责任公司生产

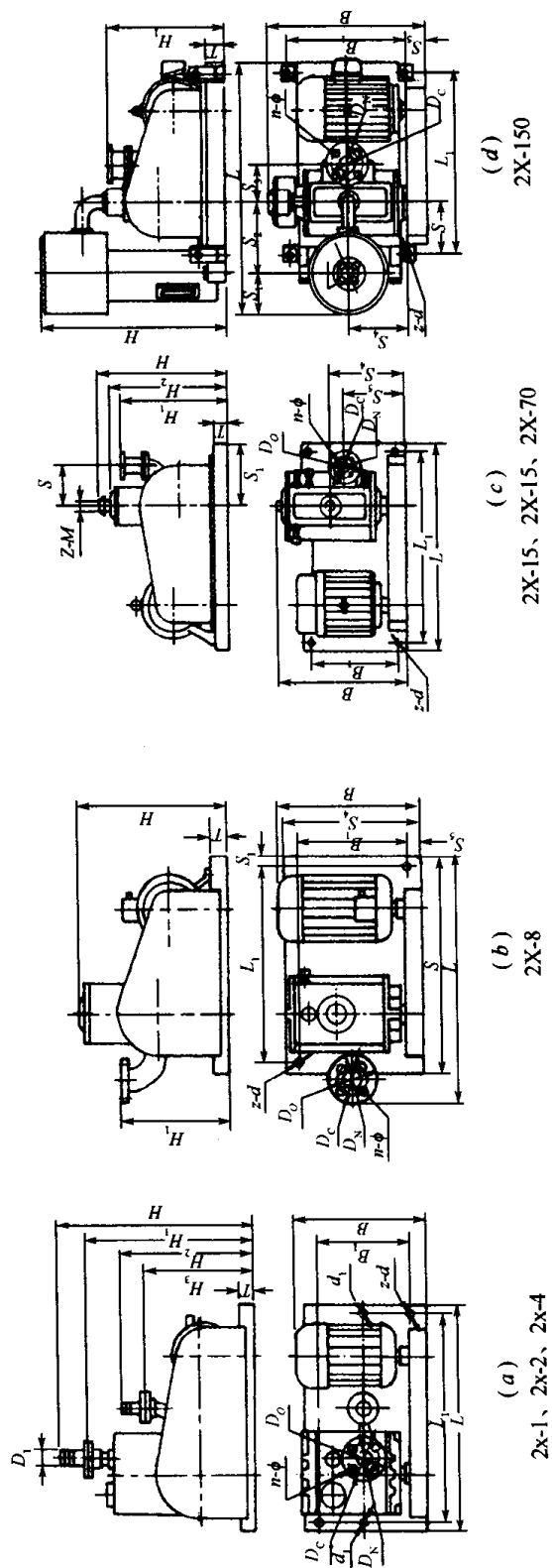
表 3-48 2X-0.5、2X-1 型旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

			型 号	2X-0.5	2X-1
			L	420	450
			L ₁	235	255
			L ₂	83	78
			B	274	260
			b	170	190
			B ₁	40	44
			B ₂	45	35
			H	270	270
			H ₁	69	69
			H ₂	30	35
			d	φ16×φ10	φ19×φ15
			d ₁	φ13×φ10	φ17×φ15

注:广东真空泵厂生产

表 3-49 2X 系列旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位: mm)



型 号	L	L ₁	S	S ₁	S ₂	S ₃	B	B ₁	S ₄	S ₅	H	H ₁	H ₂	H ₃	T	D _N	D _C	D ₀	n-φ	D ₁	z-M	z-d	D ₁	
2X-1	300	270					210	150			260		230	185	22	16	45	60	4-6	19			2-8	
2X-2	420	390					280				330				40					24.5			10	
2X-4	380	360					270	205			370	320			27	24	55	70	4-6	28			2-8	
2X-8	555	460	500	20			315	265	305	20	320	225			25	32	70	90	4-6				4-12	
2X-15	700	655	160	195			400	341	315	225	550	423	519		20	50	90	110	4-8		1-M60×1.5		4-13	
2X-30	900	845	160	250			570	425	380	290	602	475	554		40	65	105	125	4-8		1-M76×2		4-18	
2X-70	1000	935	225	350			772	585	470	385	755	625	706		40	90	125	145	4-8		1-M85×2		4-22	
2X-150	1365	955	257	225	400	213	945	630	335	165	1140	590			70	125	170		4-10	125	4-M8	4-20		

注: 沈阳真龙真空设备有限公司生产

⑧2X-15、2X-30、2X-70 型旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-50。

表 3-50 2X-15、2X-30、2X-70 型旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

Technical drawings of a vacuum pump assembly. The left drawing is a side view showing dimensions L_2 , L_1 , h_2 , h_1 , h , and H . The middle drawing is a top view (俯视图) showing dimensions $n-d$, b_3 , L , A , b_1 , b_2 , b , and R . The right drawing is a cross-section of the inlet flange (进气口法兰) showing dimensions $4-\phi 9$, D , b , D_2 , and D_3 .

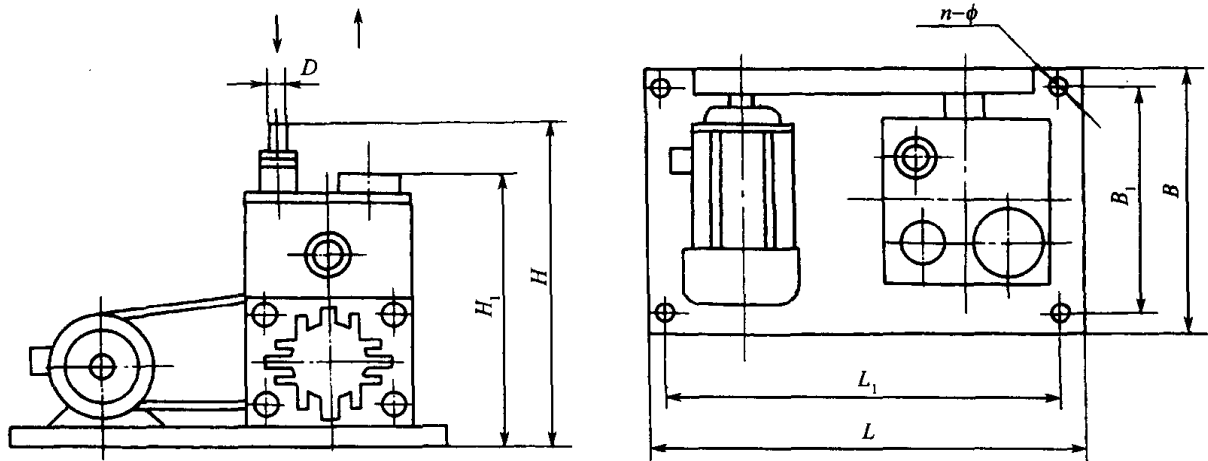
型 号	安装连接尺寸																	外形尺寸		
	L	L_1	L_2	b_1	b_2	b_3	h	h_1	h_2	$n-d$	D_1	D_2	D_3	D	b	t	M	A	B	H
2X-15	655	195	160	225	315	341	425	521	50	4- $\phi 13$	$\phi 50$	$\phi 90$	$\phi 110$	$\phi 61$	4	2.6	M60 \times 1.5	700	460	552
2X-30	845	250	155	290	385	425	471	557	38	4- $\phi 18$	$\phi 65$	$\phi 105$	$\phi 125$	$\phi 75$	5	3	M76 \times 2	900	575	594
2X-70	935	350	225	380	465	585	620	691	40	4- $\phi 21$	$\phi 90$	$\phi 125$	$\phi 145$	$\phi 100$	5	3	M85 \times 2	1000	762	755

注:沈阳恒星实业有限公司(沈阳真空设备厂)生产

⑨2X 系列旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-51、表 3-52。

⑩2XT-15、2XT-30、2XT-70 型旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-53。

表 3-51 2X-0.5、2X-1、2X-2、2X-4 旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

								
型 号	D	L	L ₁	B	B ₁	H	H ₁	n-φ
2X-0.5	19	300	270	190	154	180	190	2-φ8
2X-1	14	300	270	190	154	190	230	2-φ8
2X-2	22	380	360	220	184	340	250	2-φ7
2X-4	26.5	380	350	245	205	380	270	4-φ10

注:沈阳真空泵厂生产

五、油封式旋转机械真空泵

表 3-52 2X-8、2X-15、2X-30、2X-70 旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

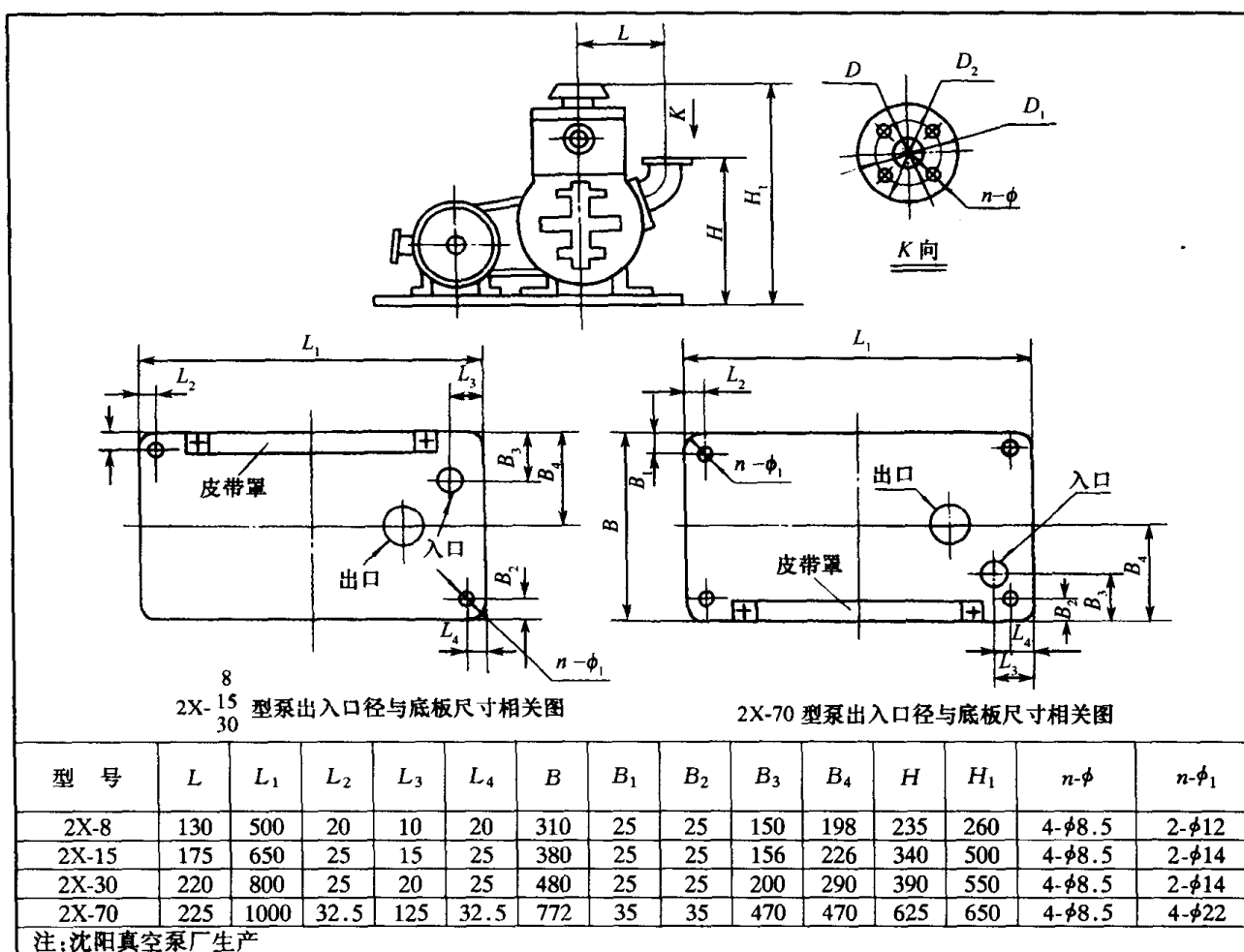
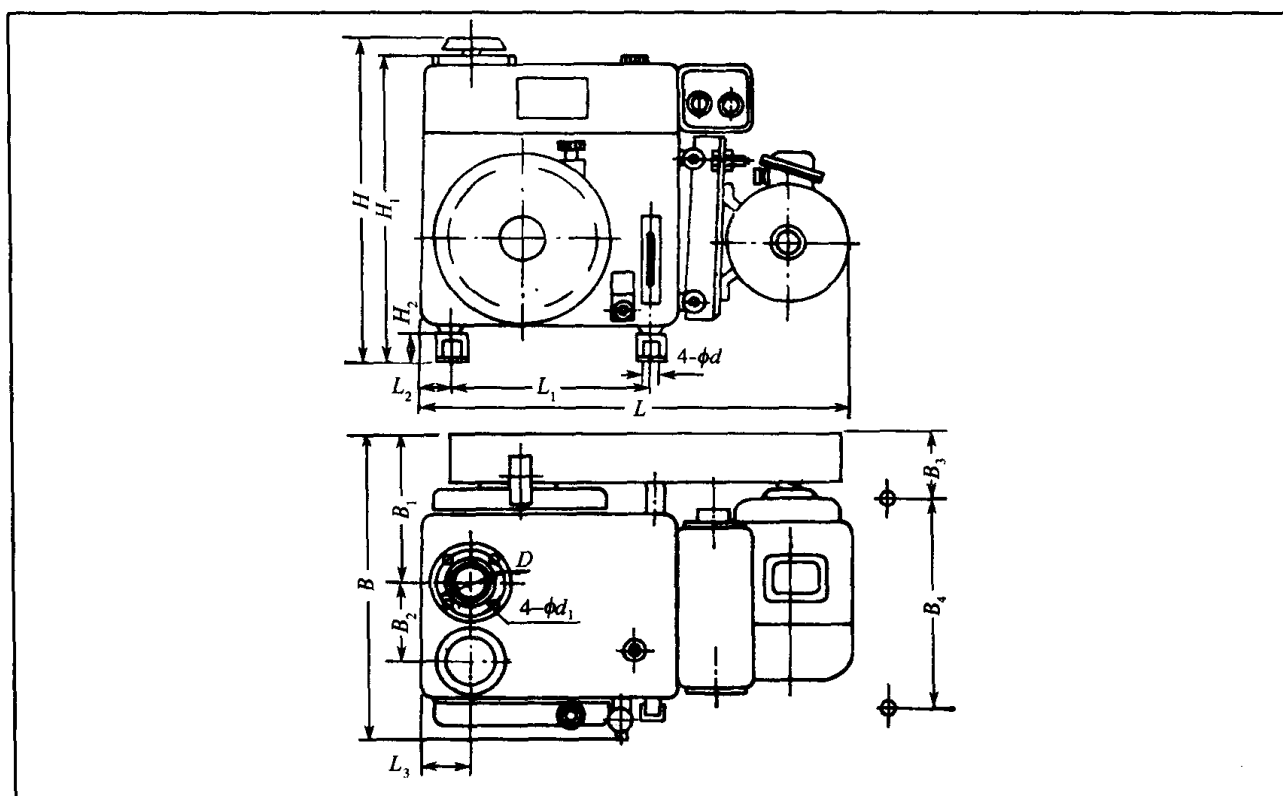


表 3-53 2XT-15、2XT-30、2XT-70 型旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



(续)

型 号	L	L1	L2	L3	B	B1	B2	B3	B4	H	H1	H2	D	d	d1
2XT-15	550	253	26	60	380	190	109	90	280	440	390	28	90	11	M6
2XT-30	655	322	40	70	500	240	135	170	360	520	477	40	110	9	M6
2XT-70	850	430	40	100	700	336	150	205	500	585	550	40	125	9	M8

注:沈阳真空机械三厂生产

(五) 国产 XD、X 系列单级旋片式真空泵技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. XD 系列单级旋片式真空泵

①技术性能。XD 系列单级旋片式真空泵技术性能见表 3-54 所示。

表 3-54 XD 系列单级旋片真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽速 /m ³ ·h ⁻¹	配有电机 功率/kW	泵转速 r·min ⁻¹	进气口尺寸 /mm(in)	装油量 /L	泵质量 /kg	生产厂家
XD-10	2×10 ²	10	0.37	1400	12.7(G1/2)	0.5	15	山东淄博真空 设备厂有限公司
XD-20		20	0.75	2800			20	
XD-40		40	1.10	1420	6.35(G1/4)	1	60	
XD-63		63	1.50	1420		2	65	
XD-100		100	3.00	1440		2	83	
XD-160		160	5.50	1440	50.8(G2)	5	132	
XD-250		250	7.50	1400	63.5(G2 1/2)		213	
XD-010	2×10 ²	10	0.37	1400				16
XD-020		20	0.75	2800	12.7(G1/2)	0.5	19	
XD-040		40	1.10	1420	6.35(G1/4)	1	60	
XD-063		63	1.50	1420		2	62	
XD-100		100	3.00	1440			75	
XD-160		160	4.00	1440	50.8(G2)	6	145	
XD-250		250	5.00	1400	76.2(G3)	9	230	

②外形及安装尺寸。XD-10、XD-20、XD-40、XD-63、XD-100 系列单级旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-55。XD-010、XD-020、XD-040、XD-063、XD-100、XD-160、XD-250 型单级旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-56。

五、油封式旋转机械真空泵

表 3-55 XD-10、XD-20、XD-40、XD-63、XD-100 型单级旋片式
真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

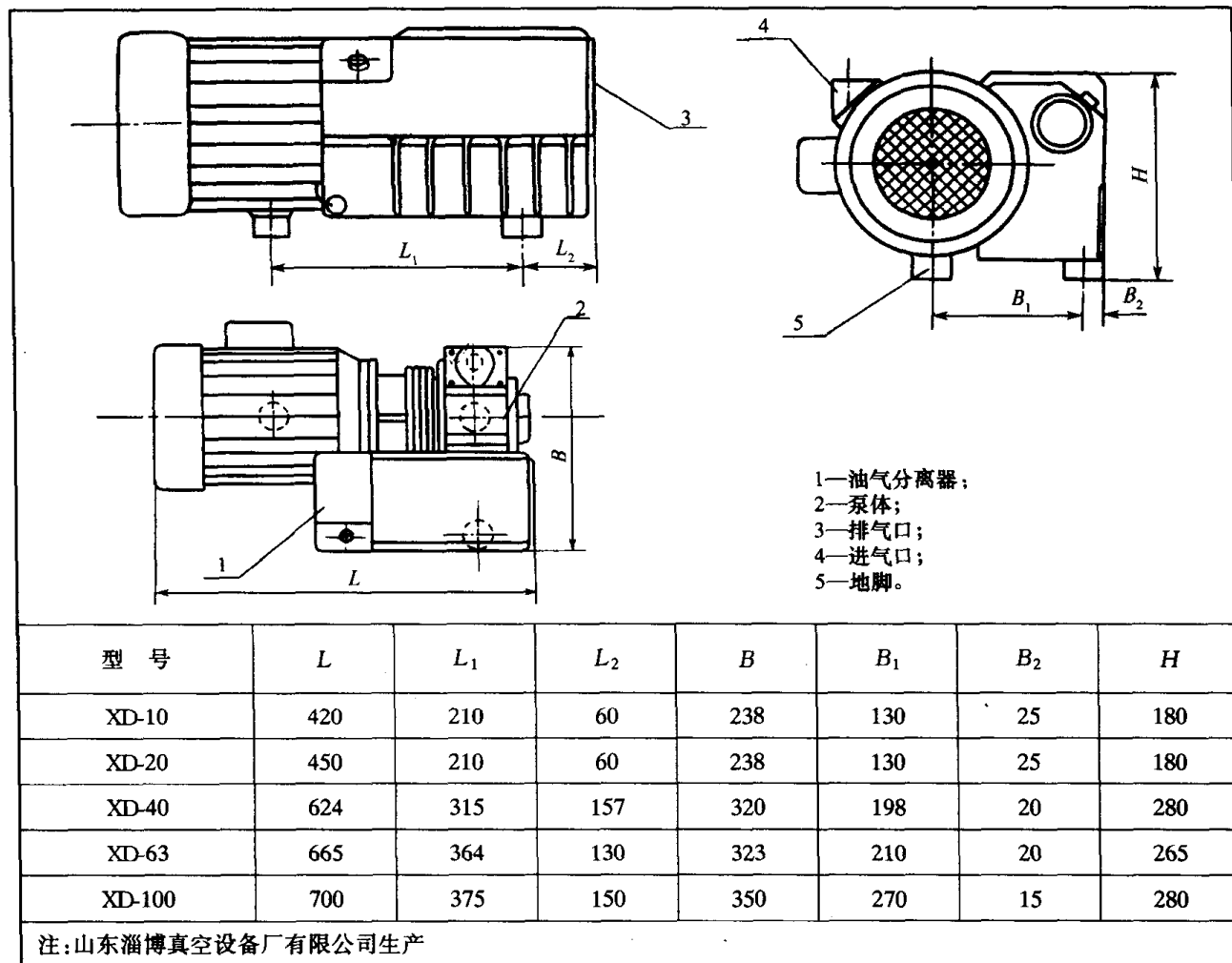
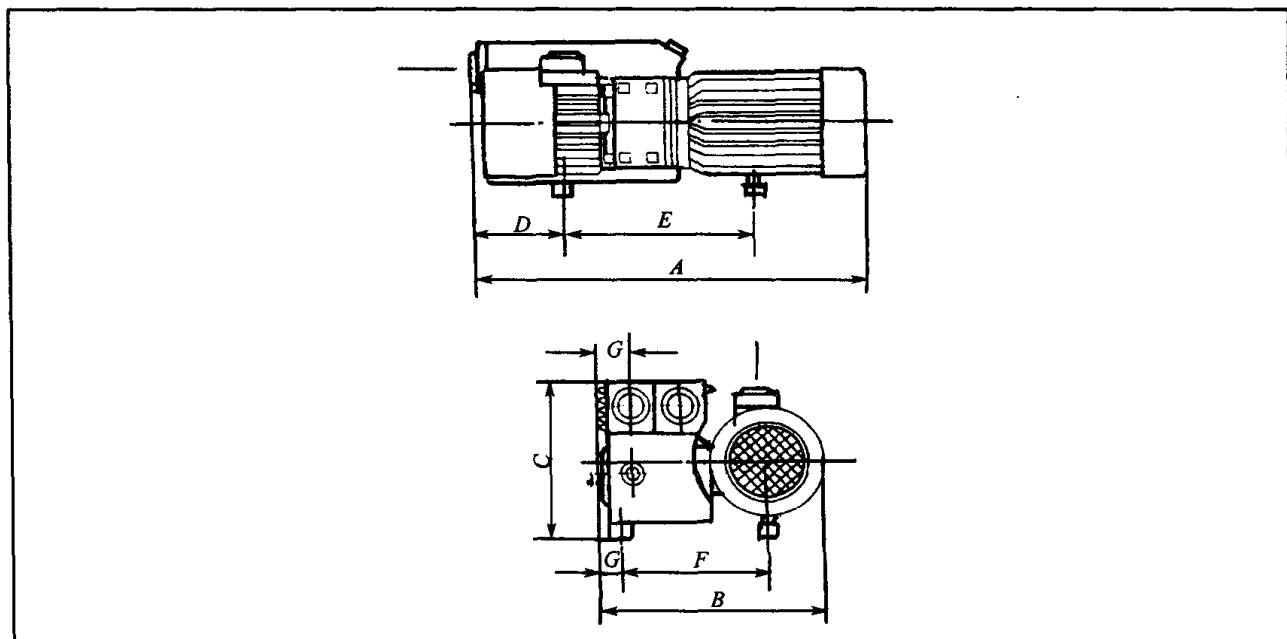


表 3-56 XD-010、XD-020、XD-040、XD-063、XD-100、XD-160、XD-250
型单级旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(续)

型 号	L	L_1	L_2	B	B_1	B_2	B_3	H
XD-010	410	210	60	230	115	40	45	180
XD-020	410	210	60	230	115	40	45	180
XD-040	600	330	123	230	189	23	/	280
XD-063	650	302	173	400	262	30	26	282
XD-100	725	359	170	425	232	60	54	285
XD-160	835	390	240	540	304	100	/	410
XD-250	1017	620	210	588	300	90	50	415

注:上海真空泵厂生产

2. X 系列单级旋片式真空泵

①技术性能。X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵技术性能见表 3-57。

表 3-57 X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa		抽 速 /L·s ⁻¹	水蒸气 允许入 口压力 /Pa	水蒸气 抽除量 /g·h ⁻¹	转 速 /r·min ⁻¹	配用 电机 功率 /kW	入口 公称 通径 /mm	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	生产厂家
	无气 镇时	有气 镇时								
X-30	≤6	≤90	30	<3000	2400	420	4.0	65	1090×545×626	山东淄博真空 设备厂有限公 司
X-70			70		5600	450	7.5	80	1620×695×950	
X-150			150		12000	360	15.0	100	1885×980×1095	
X-150	<2	<66	150	/	14000	345	15.0	100	1925×990×1130	上海真空泵厂

②特性曲线。X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵抽速曲线如图 3-30 所示。

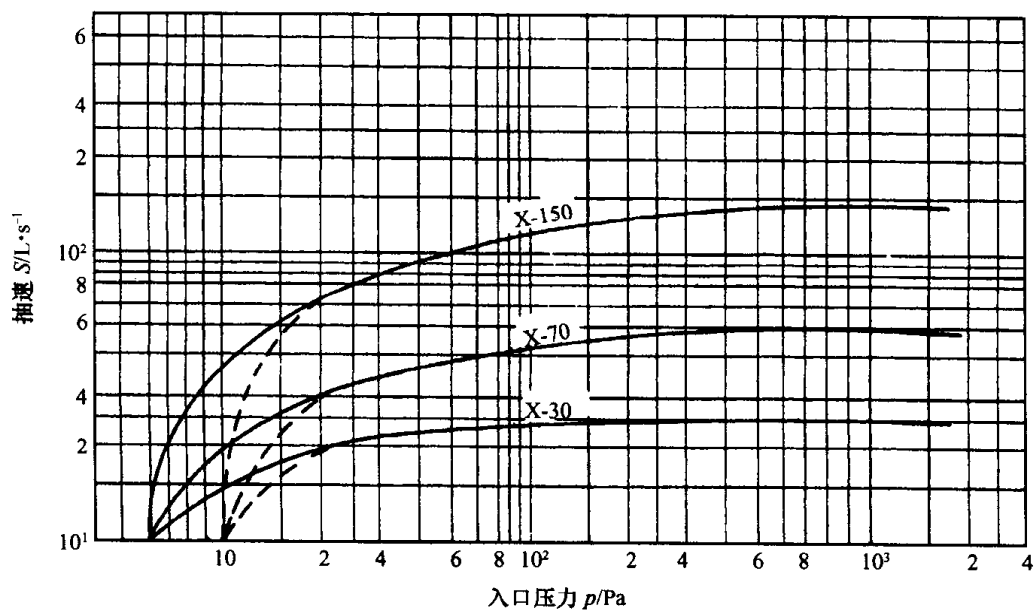


图 3-30 X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵抽速曲线
(山东淄博真空设备厂有限公司)

③外形及安装尺寸。X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-58。

表 3-58 X-30、X-70、X-150 型旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

型 号	D_N	L	L_1	L_2	L_3	B	B_1	B_2	B_3	H	H_1	H_2	d	L_4	生产厂家
X-30	65	1095	740	700	525	545	470	170	360	626	55	610	4- $\phi 18$	120	山东淄博真空设备厂有限公司
X-70	80	1620	1000	940	710	695	555	198	420	950	60	840	4- $\phi 18$	190	
X-150	100	1885	1235	1105	830	985	750	346	710	1095	100	1280	4- $\phi 18$	225	
X-150	100	1905	1260	1200	890	990	685	300	645	1130	100	1070	$\phi 18$	225	上海真空泵厂

3. 2XD-2 型十室真空泵

①技术性能。2XD-2 型十室真空泵用在电真空器件和灯泡制作的生产线上,作为这些生产线真空抽气系统的前级泵使用。同时多位抽气是它的特点,其技术性能见表 3-59。

表 3-59 2XD-2 型十室真空泵技术性能

型 号	工位数 /个	预真空室 /个	工作室 极限压力/ P_a	预真空室 极限压力/ P_a	各工作室 抽气速率 $/L \cdot s^{-1}$	泵转速 $/r \cdot min^{-1}$	用油量 $/L$	电机功率 $/kW$
2XD-2 型 十室	10	2	6×10^{-1}	2.6×10^3	2	500	12	1.5
注:成都国投南光有限公司生产								

②外形及安装尺寸。2XD-2 型十室真空泵外形及安装尺寸如图 3-31 所示。

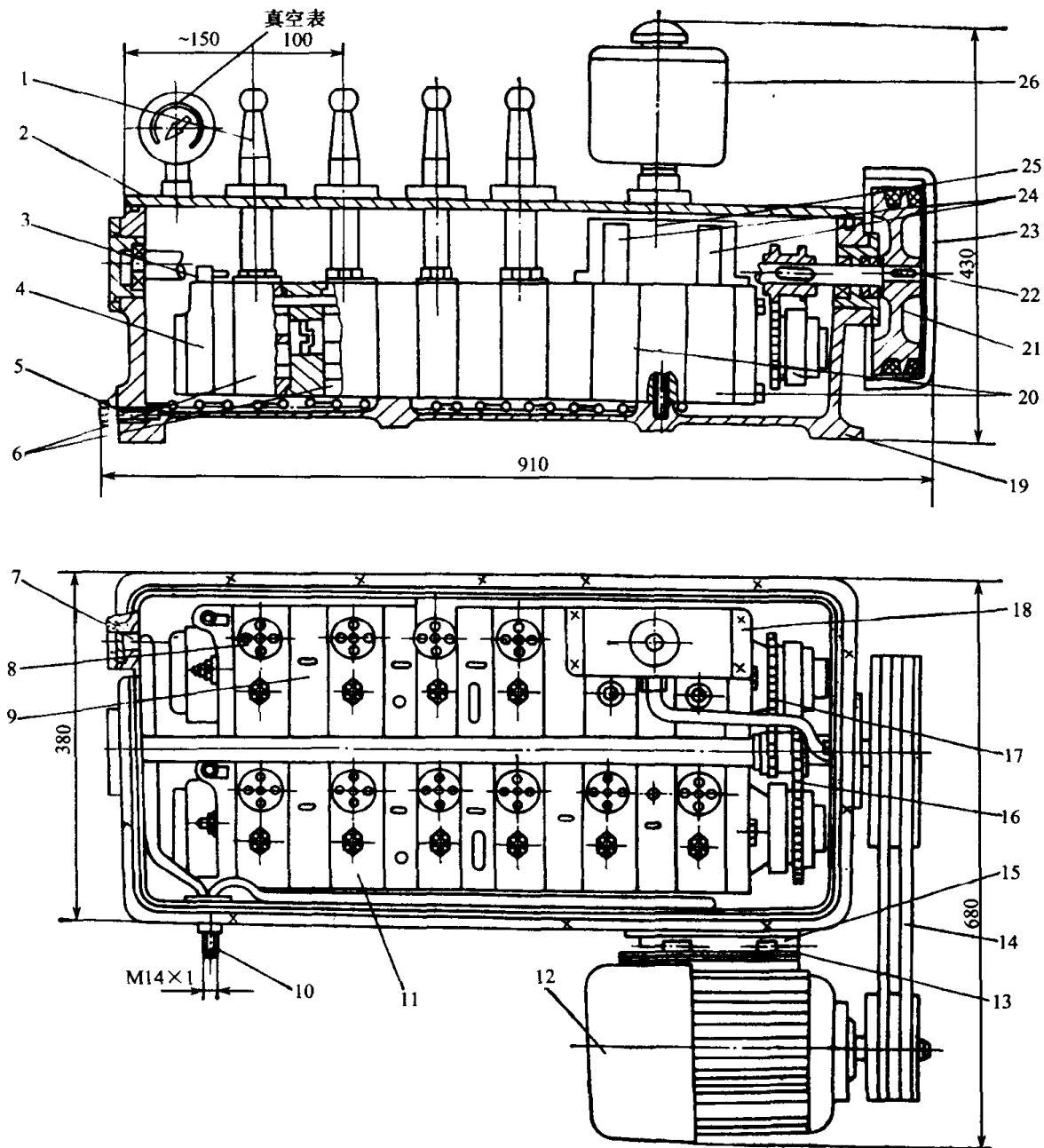


图 3-31 2XD-2 型十室真空泵外形结构及安装尺寸图

- 1—抽气管;2—箱盖;3—单向阀;4—油泵;5—放油塞;6—高真空室;7—视窗孔;
8—排气口;9—端板;10—蛇形水管;11—左机座;12—电机;13—电机板;14—三角皮带;
15—固定板;16、17—链轮;18—右机座;19—箱体;20—预真空室;21—大皮带轮;
22—主轴;23—护罩;24—进气嘴;25—预真空箱;26—排气管。

(六) 国产直联旋片式真空泵的技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. 技术性能

①国产 2XZ 型直联旋片式真空泵技术性能见表 3-60~表 3-62。

五、油封式旋转机械真空泵

表 3-60 国产 2XZ 型直联旋片式真空泵技术性能

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	进气口径 /mm	用油量 /L	噪声 /dB	外形尺寸(长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产厂家
2XZ-0.5	0.5	4×10 ⁻²	1400	0.18	15	0.55		445×130×254	13.5	上海真空 泵厂
2XZ-1	1	4×10 ⁻²	1400	0.25	15	0.55		445×130×254	15.0	
2XZ-2	2	4×10 ⁻²	1400	0.37	25	0.48		488×145×280	20.0	
2XZ-4	4	4×10 ⁻²	1400	0.55	25	0.80		528×145×280	23.0	
2XZ-8	8	6×10 ⁻²	1410	1.10	40	1.80		559×235×453 539×298×453	48.3 52.0	
2XZ-15	15	6×10 ⁻²	1420	2.20	40	2.20		688×280×453 688×300.5×45	67.5 74.5	
2XZ-2	2	4×10 ⁻²	1430	0.55	20	1.2		473×184×306	23	北京北仪 创新真空 技术有限 责任公司
2XZ-4	4	4×10 ⁻²	1430	0.75	25	1.4		502×184×306	25	
2XZ-8	8	4×10 ⁻²	1430	1.10	32	2.0		564×184×306	28	
2XZ-0.5	0.5	≤6×10 ⁻²	1400	0.18	15	0.8	<60	420×128×230		山东淄博 真空设备 厂有限公 司
2XZ-1	1		1400	0.25	15	0.9	<60	460×128×230		
2XZ-2	2		1400	0.37	25	0.6	<65	480×160×290		
2XZ-4	4		1400	0.55	25	1.1	<65	550×160×290		
2XZ-8	8		1410	1.10	40	2.1	<70	600×220×420		
2XZ-15	15		1420	2.20	40	2.5	<75	730×240×440		
2XZ-0.5	0.5	≤6×10 ⁻²	1400	0.18	16	16		单相 404×167×256 三相 416×130×256		南京真空 泵厂
2XZ-1	1			0.25	16	16		单相 495×193×266 三相 457×162×266		
2XZ-2	2			0.37	25	25		单相 520×220×310 三相 495×195×310		
2XZ-4	4			0.55	25	25		单相 530×230×320 三相 505×210×310		
2XZ-0.5	0.5	6×10 ⁻²	1400	0.18	10	0.7	68	480×130×266	20.0	广东真空 设备厂
2XZ-1	1			0.18	15	0.7	70	480×130×266	20.5	
2XZ-2	2			0.37	25	12	70	530×175×275	25.0	
2XZ-4	4			0.55	25	14	75	570×175×275	27.0	
2XZ-0.5	0.5	6×10 ⁻²	1400	0.18	16			445×130×255		沈阳真空 泵厂
2XZ-1	1			0.25	16			445×130×255		
2XZ-2	2			0.37	25			450×145×280		
2XZ-4	4			0.55	25			430×145×280		
2XZ-8	8			1.1.0	40			560×235×460		
2XZ-5	5			2.2.0	50			690×280×460		

表 3-61 2XZ-B 型直联旋片式真空泵技术性能

型 号		抽速 /L·s ⁻¹	极限压力/Pa		转速 /r·min ⁻¹	电机 功率 /kW	进气 口径 /mm	用油量 /L	噪声/dB (三相/单相)	泵温升 /℃	质量/kg (三相/单相)	生产 厂家
			关气镇	开气镇								
2XZ-1B	50Hz	1	4×10 ⁻²	4	1430	0.25	20	0.7	56/68	35	16/17	上海 真 空 泵 厂
	60Hz	1.2			1750					40		
2XZ-2B	50Hz	2	2×10 ⁻²	1-3	1430	0.37	25	1.1	54/67	35	24/26	
	60Hz	2.4			1750					40		
2XZ-4B	50Hz	4			1430	0.55	25	1.5	55/68	40	30/34	
	60Hz	4.8			1750					45		
2XZ-8B		8	4×10 ⁻²	连续工 作允许 压力 4000Pa	1420	1.1	40	4.5	≤78	最高工 作温度 100℃	75	
2XZ-15B		15		连续工 作允许 压力 4000Pa	1440	2.2	50	4.2	≤80	最高工 作温度 120℃	95	
注:泵的特点允许有较高的入口压力、工作温度;改进停泵返油,启动方便;采用油泵供油,可靠性提高												

表 3-62 2XZ-B、2XZ-D 直联旋片式真空泵技术性能

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力/Pa				转速 /r·min ⁻¹	电机 功率 /kW	水蒸气 容量 /g·h ⁻¹	工作 温度 /℃	噪声 /dB	进气 口径 /mm	质量 /kg	生产 厂家
		关气镇		开气镇									
		分压力	总压力	分压力	总压力								
2XZ-2B	2.3	2×10 ⁻²	6×10 ⁻¹	6×10 ⁻¹	4×10 ⁻¹	1420	0.37	360	90	65	25	23	成都国 投南光 有限公 司
2XZ-4B	4.5					1420	0.55	700		65	25	30	
2XZ-8D	9.0					1400	1.10	570		70	40	70	
2XZ-15D	18.0					1400	1.50	1150		70	40	90	

注:1. 采用 1992 年引进瑞士 Balzers 公司的 DO0016B 技术生产;

2. 只要改换进气口安装方式,即可实现抽气管道的立式或卧式安装;

3. 装有安全阀和气镇阀,泵停转后自动放气,可防止泵油返流时真空系统污染,并有助于排除水蒸气

五、油封式旋转机械真空泵

②国产 XZ 型直联旋片式真空泵技术性能见表 3-63。

表 3-63 XZ 型直联旋片式真空泵技术性能

型号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	进气 口径 /mm	用油量 /L	噪声 /dB	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产厂家
XZ-1	1	≤7	1480	0.18	16		≤80	390×138×255	17	南京真空泵厂
XZ-2	2	≤7	1480	0.25	25		≤82	410×138×255	25	
XZ-0.2	0.2	13	1400	0.03	6	0.1	60	145×110×120	5	广东真空设备厂
XZ-0.5	0.5	13	1400	0.12	10	0.5	65	165×130×145	8	
XZ-2	2	13	1400	0.37	25	0.3	70	395×220×240	23.5	
XZ-4	4	13	2800	0.55	25	0.3	72	395×220×240	23.5	成都无极科技有限公司
XZ-15B ^①	16	20	/	1.5	40	/	/	700×300×480	/	

注:①专利产品(专利号:ZL01213964.5),其进气口法兰为 KF。泵的特点是内置液压先导安全阀、停泵自动保护;泵温高,排水蒸气能力强,进口轴封,长期不漏油

③TRP 型直联旋片式真空泵技术性能见表 3-64。

表 3-64 TRP 型直联旋片式真空泵技术性能

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极限压力/Pa			允许水蒸气压力 /Pa	转 速 /r·min ⁻¹	电机 功率 /kW	进出口 D _N /mm	容油量 /L	噪声 /dB	质量 /kg	生产厂家	
		关气镇	开气镇 (1)	开气镇 (2)									
TRP-6	1.3	6.7×10 ⁻²	6.7×10 ⁻²	1.3	5320	1450	0.4	25	1.3	50	22.5	北京北 仪优成 真空技 术有限 公司	
TRP-12	2.8								1.1		24		
TRP-24	5.6								1.4		34		
TRP-36	8.3				3325		0.75		1.8	38			
TRP-48	11.1							5320	1.5	40	3.8		70
TRP-60	13.8										5.5		83
TRP-90	20.8										2.2		6.5

注:泵的特点:低噪声;国际标准法兰;便捷的气镇控制;方便的油标检测和更换、改进型截止阀系统,拆装方便;进出口
口法兰为 KF

2. 特性曲线

①2XZ 型直联真空泵抽气速率与进气口压力曲线如图 3-32 所示。

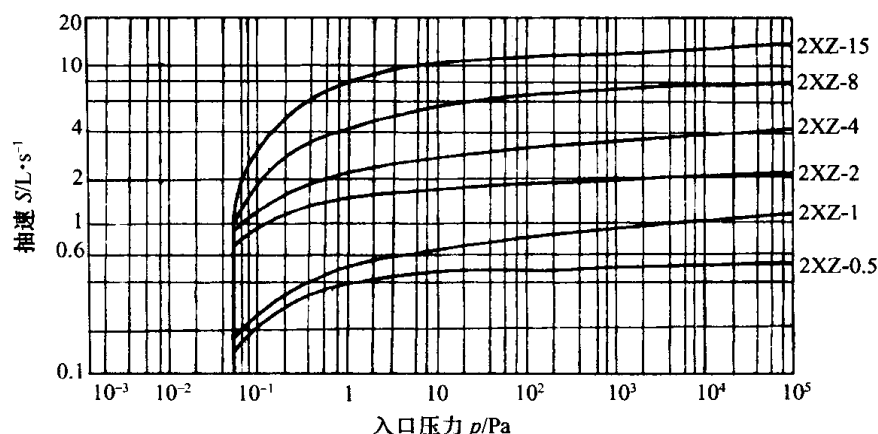


图 3-32 2XZ 型直联真空泵抽气速率与进气口压力曲线图
(上海真空泵厂生产)

②2XZ-B 型直联真空泵抽气速率与进气口压力曲线如图 3-33 所示。

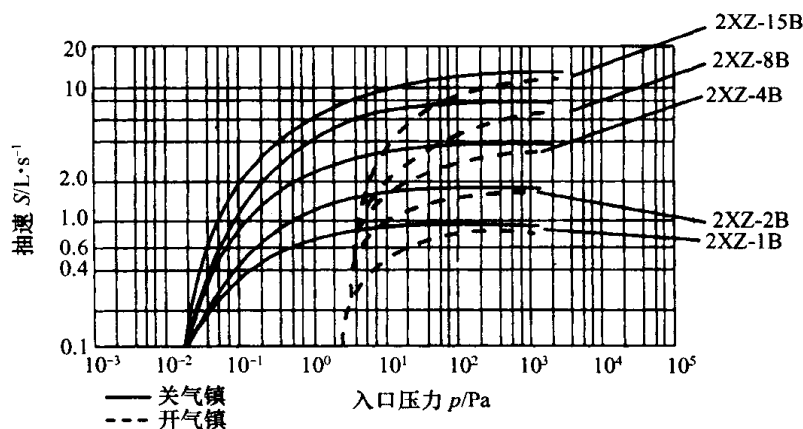


图 3-33 2XZ-B 型直联真空泵抽气速率与进气口压力曲线图
(上海真空泵厂生产)

③2XZ-2B、2XZ-4B、2XZ-8D、2XZ-15D 型直联旋片式真空泵特性曲线如图 3-34 所示。

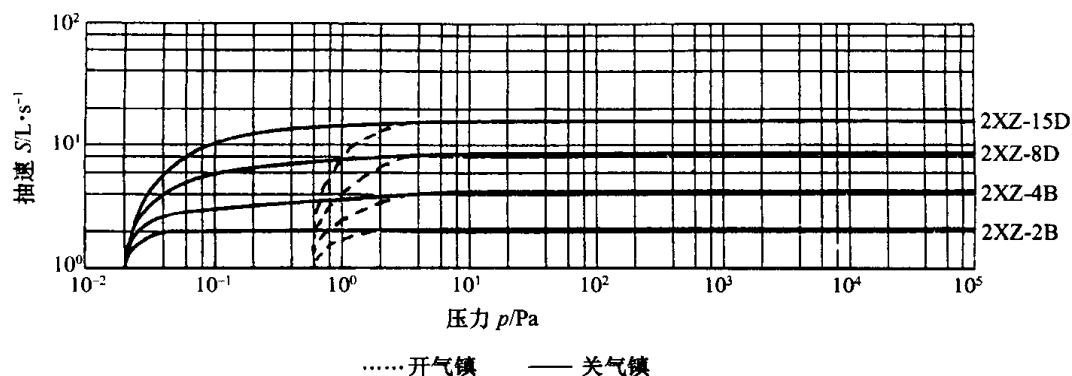


图 3-34 2XZ-2B、2XZ-4B、2XZ-8D、2XZ-15D 型直联旋片式真空泵特性曲线图
(成都国投南光有限公司生产)

3. 外形及安装尺寸

①2XZ-0.5、2XZ-1、2XZ-2、2XZ-4、2XZ-8、2XZ-15 型直联旋片式真空泵

2XZ-1B、2XZ-2B、2XZ-4B 和 2XZ-8B、2XZ-15B 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸(上海真空泵厂)见表 3-65~表 3-67。

表 3-65 2XZ-1、2XZ-4、2XZ-15 2XZ-0.5、2XZ-2、2XZ-8 型直联真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

型 号	L	H	B ₁	b ₁	b ₂	d ₂	d ₁	L ₁	L ₂	
2XZ-0.5 2XZ-1	445	254	116	65	65	23	18	166	80	
2XZ-2 2XZ-4	488 528	280	130	72.5	72.5	23	28	171 211	85	
2XZ-8	559	453	200/245	135	100	40	47	231.5	104	
2XZ-15	688	453	200/245	155	125	40	47	291.5	114	
型 号	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	b ₃	b ₄	h ₁	L ₉
2XZ-0.5 2XZ-1	192	29	34	220	70	180	15	16	12	10
2XZ-2 2XZ-4	222	39	47	270	109	191	20	20	12	10
2XZ-8	233	57	50	344	128	252	30	31	6	0
2XZ-15	282	57	50	344	128	252	30	31	6	0

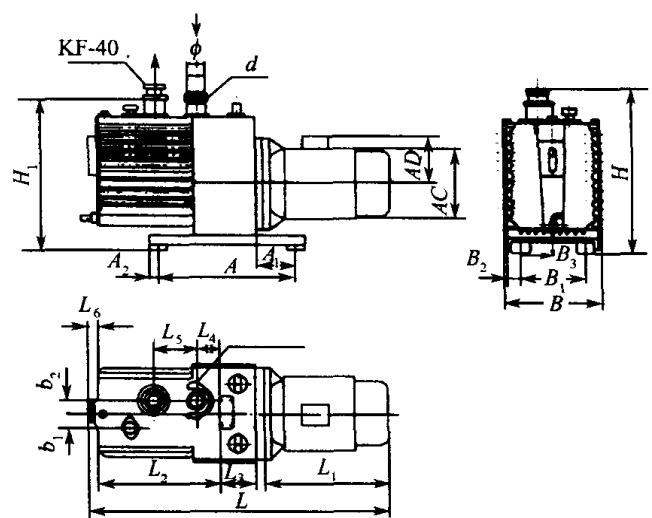
注:上海真空泵厂生产;2XZ-8/15,只供三相电机

表 3-66 2XZ-1B、2XZ-2B、2XZ-4B 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

型号	电机	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	AC	AD	b	A	A ₁	B	B ₁	B ₂	d ₁	d ₂	H	H ₁
2XZ-1B	JW6324	440	185	88	170	10	38	120	85	16	220	15	160	100	20	φ40	φ30	270	242
2XZ-2B	JW7114-B3	482	210	92	210	10	38	140	90	20	270	15	160	100	20	φ40	φ30	302	276
2XZ-4B	JW7124-B3	522	210	92	210	10	38	140	90	20	270	15	160	100	20	φ40	φ30	302	276
2XZ-1B	JY7124	470	215	88	170	10	38	140	95	16	220	15	160	100	20	φ40	φ30	270	242
2XZ-2B	JY7134-B3	482	210	92	210	10	38	140	95	20	270	15	160	100	20	φ40	φ30	302	276
2XZ-4B	CO-8014-B14	567	255	92	210	10	38	165	110	20	270	15	160	100	20	φ40	φ30	302	276

注:上海真空泵厂生产

表 3-67 2XZ-8B、2XZ-15B 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



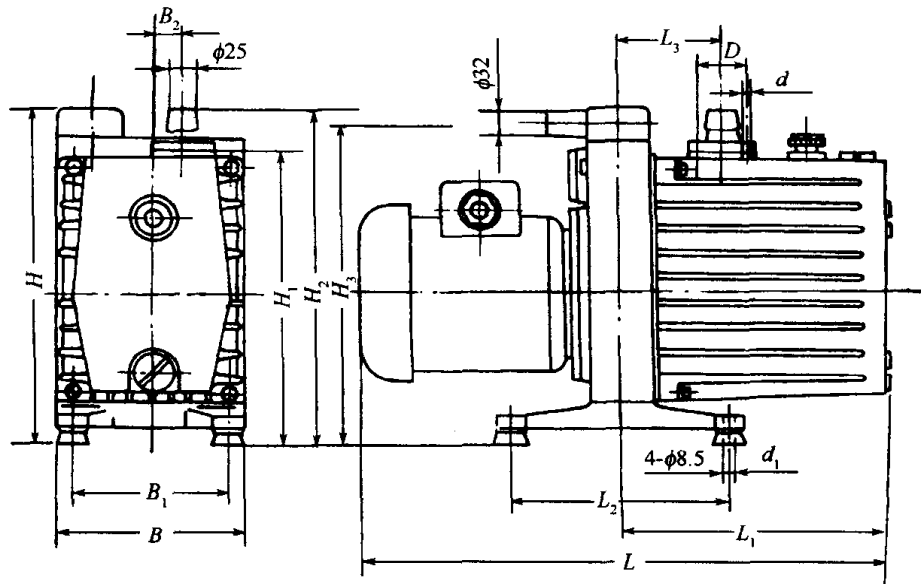
型号	ϕ	d	AD	AC	A	A_1	A_2	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	b_1	b_2	B	B_1	B_2	B_3	H	H_1
2XZ-8B	44.5	KF-40	160	195	350	129	25	650	265	245	92	55.5	110	11	42	33.5	240	175	30	87.5	450	405
2XZ-15B	55	KF-50	180	215	350	129	25	780	320	300	92	55.5	110	11	42	33.5	240	175	30	87.5	450	405

注:上海真空泵厂生产

②2XZ-2、2XZ-4、2XZ-8 型直联旋片式真空泵见表 3-68。

表 3-68 2XZ 系列直联真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



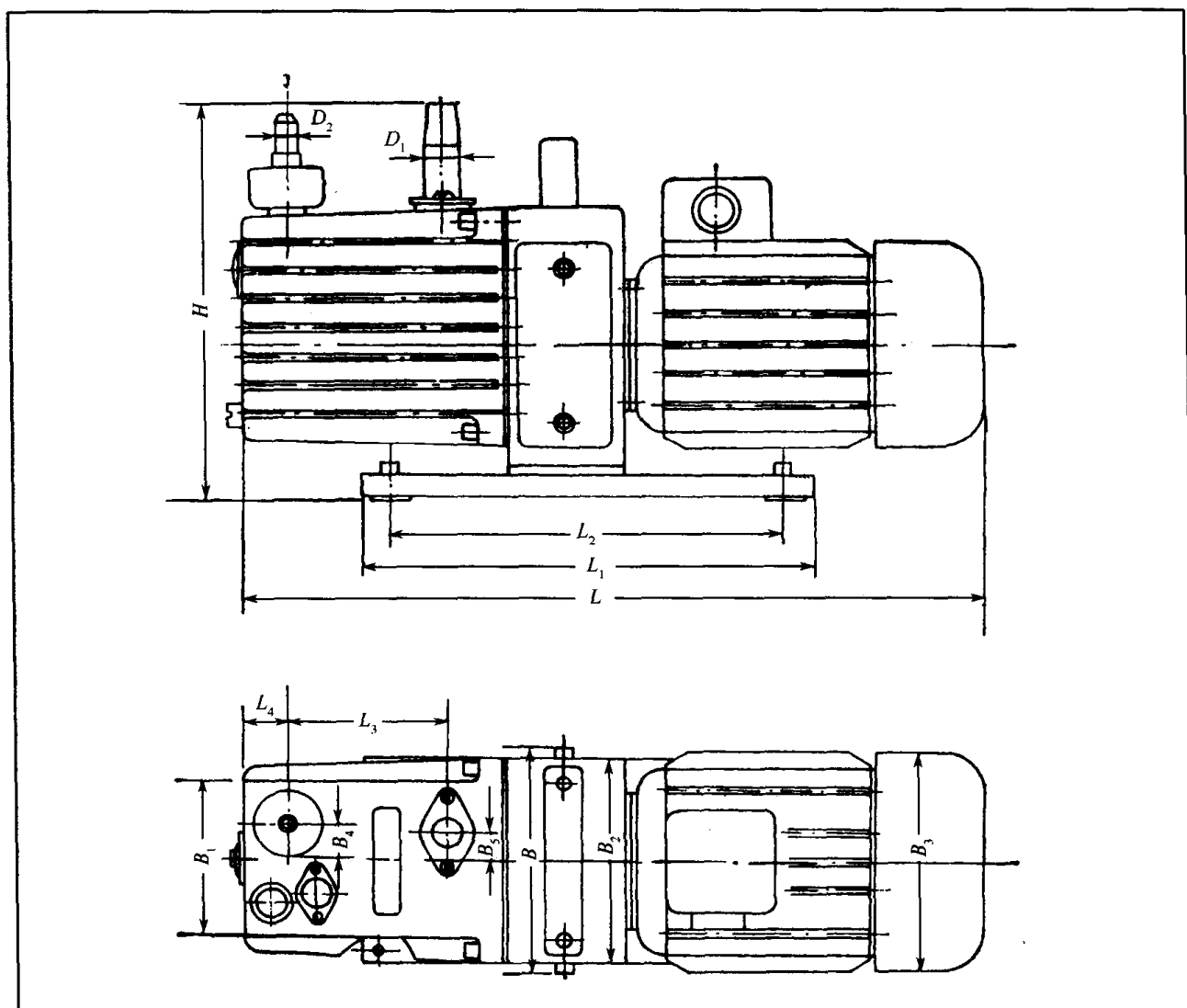
型号	L	L_1	L_2	L_3	B	B_1	B_2	H	H_1	H_2	H_3	D	d	d_1	进气口 内径
2XZ-2	473	190	220	76	184	150	20	306	261	301	289	/	/	4- ϕ 85	20
2XZ-4	502	220	220	85	184	150	20					52	4-M5		25
2XZ-8	564	280	220	120	184	150	78					64	4-M6		32

注:北京北仪创新真空技术有限责任公司生产

③2XZ-0.5、2XZ-12、XZ-2、2X-4、2XZ-8、2XZ-15 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-69。

表 3-69 2XZ 系列直联真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	B	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	H	D ₁	D ₂
2XT-0.5	420	250	220	95	25	128	85	120	130	20	16	230	20	12
2XT-1	460	250	220	110	25	128	85	120	145	20	16	230	20	12
2XT-2	480	300	270	110	25	160	100	150	145	25	20	290	28	23
2XT-4	550	300	270	150	25	160	100	150	165	25	20	290	28	23
2XT-8	600	400	300	150	40	220	165	205	180	40	30	420	45	45
2XT-15	730	400	300	200	45	240	185	225	210	45	35	440	57	57

注:山东淄博真空设备厂有限公司生产

④2XZ-2B、2XZ-4B 型和 2XZ-15D 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-70、表 3-71。

⑤2XZ 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸见表 3-72。

表 3-70 2XZ-2B、2XZ-4B 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

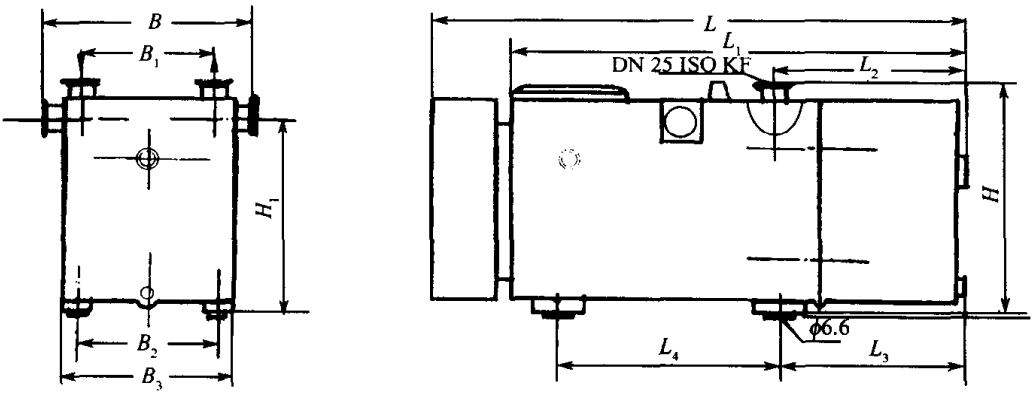
											
型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	B	B ₁	B ₂	B ₃	H	H ₁
2XZ-2B	/	424	200	192	192	190	110	122	150	222	180
2XZ-4B	/	460	206	198	216	232	152	164	192	244	200
注:成都国投南光有限公司生产											

表 3-71 2XZ-8D、2XZ-150D 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

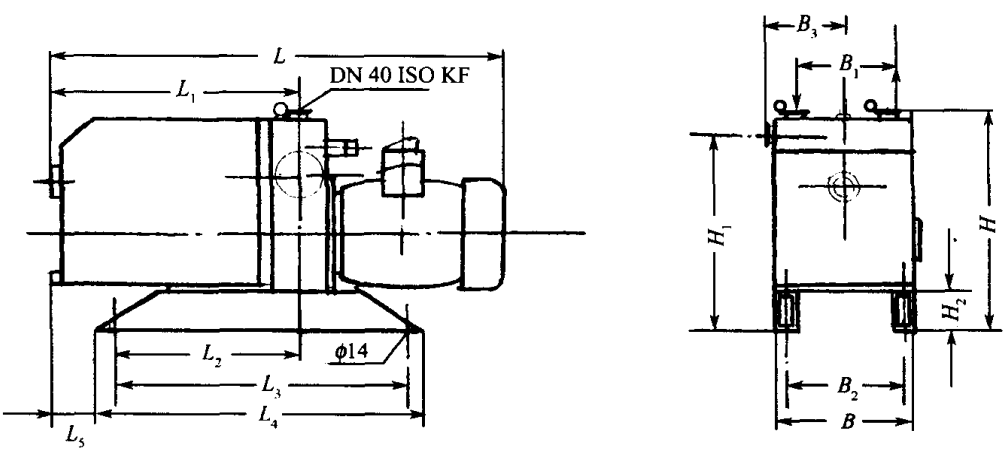
													
型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	B	B ₁	B ₂	B ₃	H	H ₁	H ₂
2XZ-8D	632	325	258	440	476	36	248	165	210	140	390	332	40
2XZ-15D	748	415	258	440	476	126	248	165	210	140	390	332	40
注:成都国投南光有限公司生产													

表 3-72 2XZ 型直联旋片式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

型 号	L	B	H	L_1	进气口径 d	排气口径 d_1
2XZ-0.5	445	130	255	250	16	23
2XZ-1	445	130	255	250	16	23
2XZ-2	445	145	280	300	25	23
2XZ-4	430	145	280	300	25	23
2XZ-8	560	235	460	380	40	40
2XZ-15	380	280	460	380	50	40
注:沈阳真空泵厂生产						

(七)国产 2H 型滑阀式真空泵技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. 技术性能

①H、2H 型滑阀式真空泵性能参数见表 3-73。

表 3-73 H、2H 型滑阀式真空泵性能参数

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	配用功率 /kW	进排气口径/mm		冷却水耗量 /kg·h ⁻¹	质量 /kg
				进气	排气		
2H-8	6×10^{-2}	8	1.1	50	32	风冷	100
2H-15		15	2.2	65	32	风冷	140
2H-30A		30	4	63	50	350	295
2H-70A		70	7.5	80	76	350	630
H-70B	1	70	7.5	80	76	315	450
H-25		25	2.2	50	40	风冷	340
H-50		50	5.5	80	50	480	350
H-150	0.6	150	15	100	80	700	720

(续)

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	配用功率 /kW	进排气口径/mm		冷却水耗量 /kg·h ⁻¹	质量 /kg
				进气	排气		
H-150D	1.3	150	11	105	80	450	896
H-150E	0.6	150	11	100	80	700	600
H-300	1.3	300	30	200	100	1500	1880
H-300A		300	30	200	100	1500	1520
H-600		600	55	250	150	2800	3300
H-1000		1000	115	300	200	5500	4500
1401*	1	54	5.5	G3	G2	480	450
H-7*	1.3	70	7.5	125	65	350	700
H-8A*		150	18.5	150	80	700	1960

注:浙江真空设备集团有限公司生产;*系老型号

②HG、HGL-150 型滑阀式真空泵性能参数见表 3-74。

表 3-74 HGL-150、HG-150 型滑阀式真空泵性能参数

型 号	极限压力/Pa		抽气速率 /L·s ⁻¹	电机功率 /kW	进排气口径/mm		冷却水量 /L·min ⁻¹	噪声 /dB	质量 /kg
	分压力	全压力			进气	排气			
HGL-150	0.3	2	150	11	100	80	450	90	680
HG-150	0.3	2	150	15	100	80	700	90	860

注:台州星光真空设备制造有限公司生产;泵的特点:单级单缸滑阀式,在原 H 型滑阀式真空泵基础上作了重大改进,综合性能有较大提高,申报四项国家专利

③H 型滑阀式真空泵性能参数见表 3-75。

表 3-75 H 型滑阀式真空泵性能参数

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	泵转速 /r·min ⁻¹	电机功率 /kW	进排气口径/mm		用油量 /L	冷却水耗量 /L·h ⁻¹	质量 /kg	生产厂家
					进气	排气				
H-15	0.6	15	450	2.2	50	25	/	/	/	上海真空 泵厂
H-70	1.3	70	490	7.5	80	63	/	/	/	
H-150B	1.3	150	490	15.0	100	80	30	当 $p < 10\text{Pa}$ 时 700 当 $p = 10^5\text{Pa}$ 时 2000	970	
H-150S	6.0	150	900	11.0	100	80	30	/	/	成都国投 南光有限 公司

注:H-150 型(三联)滑阀真空泵高转速,高运转效率,立式泵体结构紧凑、外观美观

④H、2H 型 DV 系列滑阀式真空泵性能参数见表 3-76 所示。

表 3-76 H、2H 型 DV 系列滑阀式真空泵性能参数

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	泵转速 /r·min ⁻¹	电机功率 /kW	进排气口径/mm		储油量 /kg	冷却水量 /kg·h ⁻¹	噪声 /dB	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg
					进气	排气					
2H-15DV	6×10 ⁻²	15	555	2.2	50	40	5	风冷	70	432×400×782	150
2H-30DV		30		4.0	63	50	8	135	72	545×525×928	325
2H-70DV		70		7.5	80	63	25	300	74	660×690×1125	615
2H-100DV		100		11.0	100	80	35	500	76	745×740×1272	850
2H-150DV		150		15.0	100	80	45	700	78	935×740×1272	1000
H-25DV	6×10 ⁻¹	25	615	2.2	50	40	5	风冷	72	432×400×782	150
H050DV		50		4.0	63	50	8	135	75	545×525×928	325
H-100DV		100	530	7.5	80	63	25	300	78	660×690×1125	615
H-150DV		150	555	11.0	100	80	35	500	81	745×740×1272	850
H-200DV		200	555	15.0	100	80	45	700	84	935×740×1272	1000

注：台州拓展真空设备有限公司生产

⑤H、2H 型滑阀式真空泵性能参数见表 3-77。

表 3-77 H、2H 型滑阀式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	电机功率 /kW	进排气口径/mm		外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
				进气口	排气口	
H-8	6.6×10 ⁻¹	8	1.1	50	25	1900×900×1983
2H-8	6.6×10 ⁻²					640×476×655
H-15	6.6×10 ⁻¹	15	2.2	50	25	/
2H-15	6.6×10 ⁻²					771×453×575
2H-30	6.6×10 ⁻¹	30	4.0	63	40	/
2H-30	6.6×10 ⁻²					918×648×837
H-70	6.6×10 ⁻¹	70	7.5	80	63	1030×784×962
2H-70	6.6×10 ⁻²					883×590×1258
H-150	1.33×10 ⁻¹	150	15.0	100	80	1580×826×1285
2H-150	6.6×10 ⁻²					

注：沈阳真空泵厂生产

2. 特性曲线

①HGL-150 型滑阀式真空泵抽气速率与进气口压力曲线如图 3-35 所示。

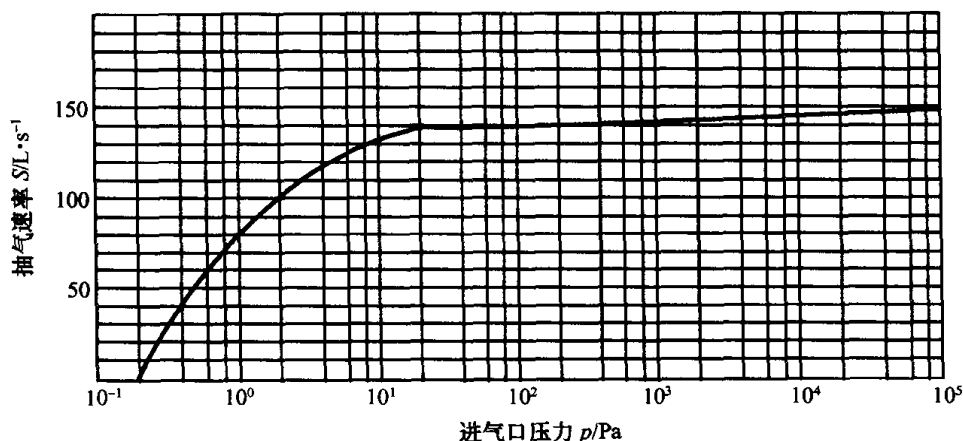


图 3-35 HGL-150 型滑阀式真空泵抽气速率与进气口压力曲线
(台州星光真空设备制造有限公司生产)

②2H 型双级滑阀泵抽速与进气口压力曲线如图 3-36 所示;H 型单级滑阀泵抽速与进气口压力曲线如图 3-37 所示。

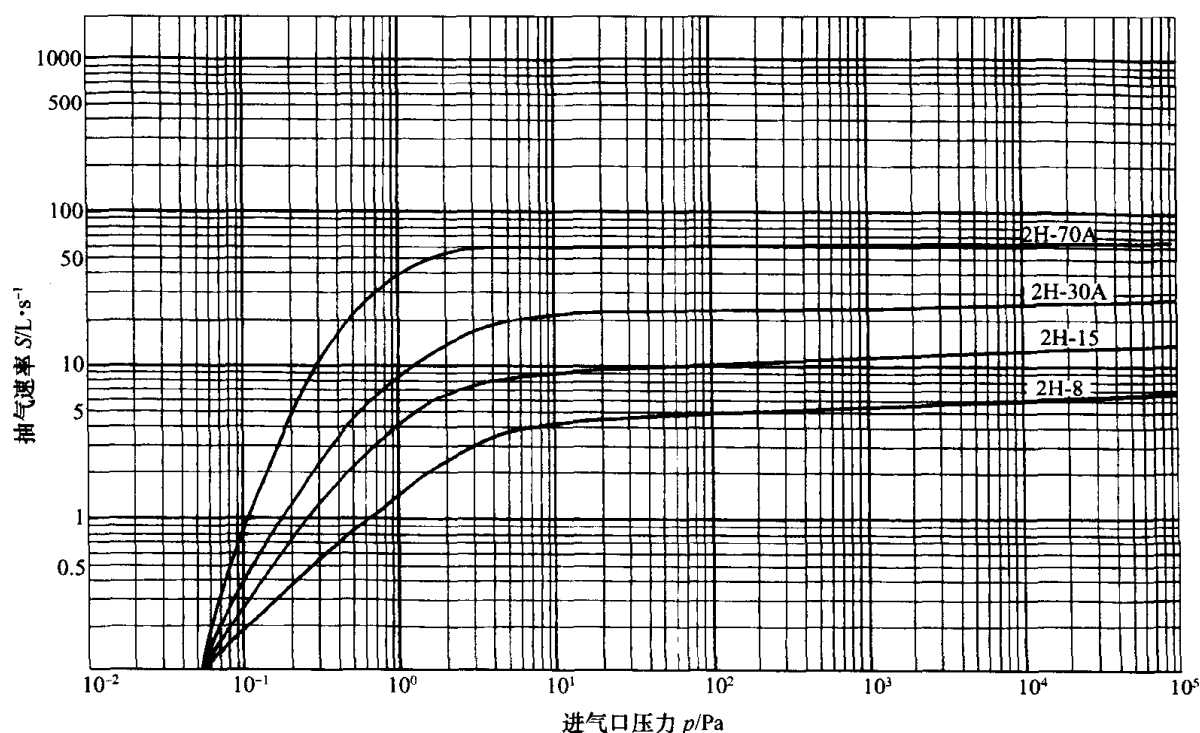


图 3-36 2H 型滑阀式真空泵抽速与进气口压力曲线图
(浙江真空设备集团有限公司生产)

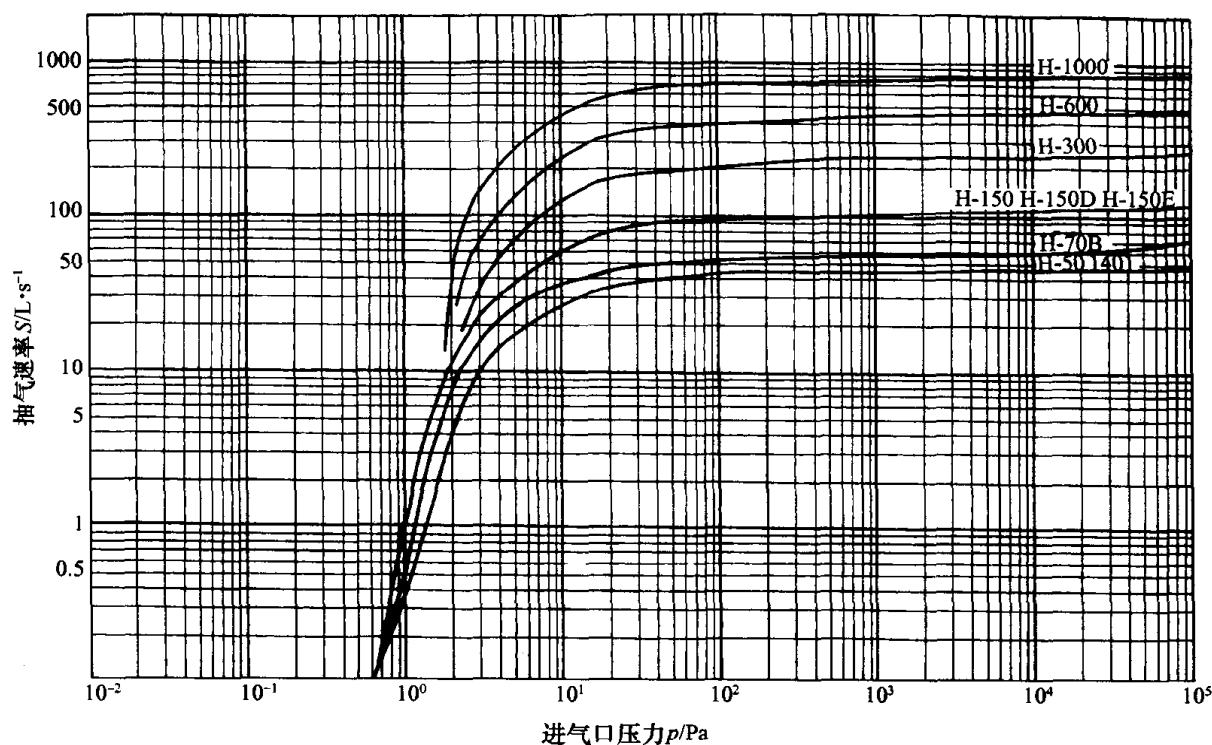


图 3-37 H 型滑阀式真空泵抽速与进气口压力曲线图
(浙江真空设备集团有限公司生产)

③H 型滑阀式真空泵抽速与进口压力曲线如图 3-38 所示。

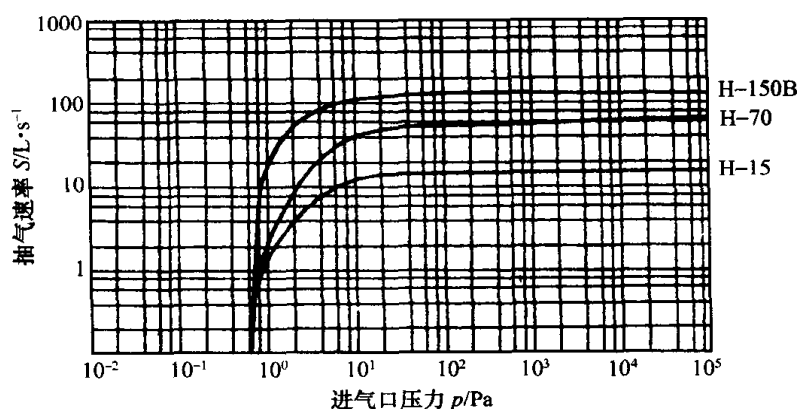


图 3-38 H 型滑阀式真空泵抽速与进气口压力曲线图
(上海真空泵厂生产)

④H 型滑阀式真空泵抽速与进气口压力曲线图如图 3-39 所示。

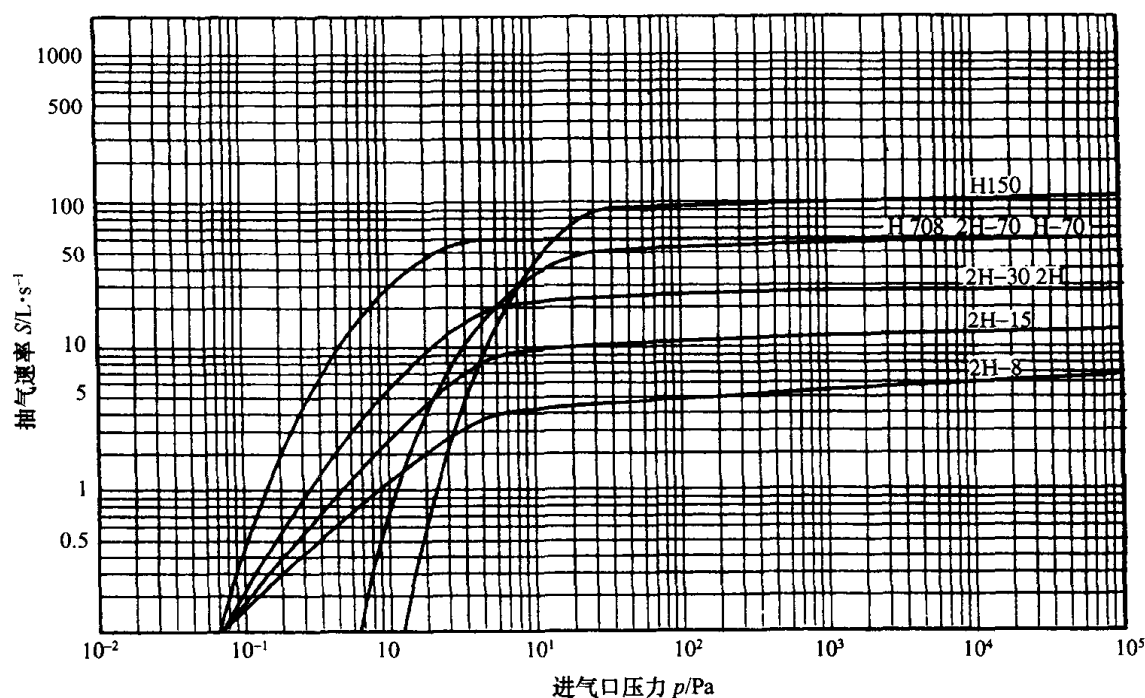


图 3-39 H 型滑阀式真空泵抽速与进气口压力曲线图
(沈阳真空泵厂生产)

⑤H、2H 型 DV 系列滑阀真空泵抽气速率与进气口压力曲线图如图 3-40 所示。

3. 外形及安装尺寸

①浙江真空设备集团有限公司生产的 H、2H 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸如图 3-41～图 3-50 所示。

②台州市星光真空设备制造有限公司生产的 HGL-150 型滑阀式真空泵结构示意图如图 3-51 所示,外形及安装尺寸图如图 3-52 所示;HG-150 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸如图 3-53 所示。

③H-150B 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸如图 3-54 所示。

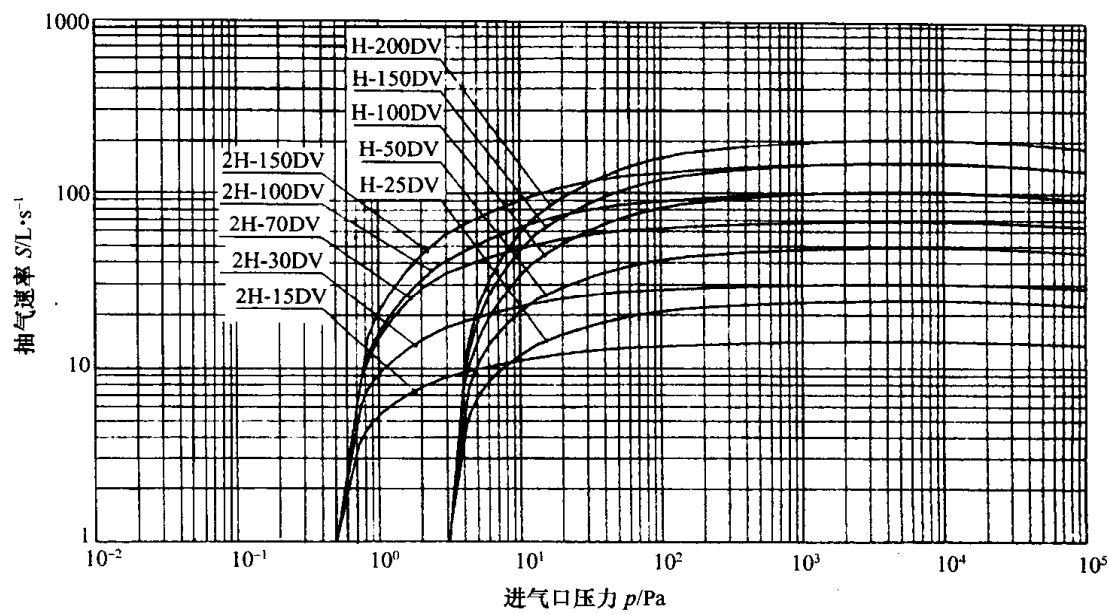


图 3-40 H、2H 型 DV 系列滑阀真空泵抽气速率与进气口压力曲线图
(浙江台州拓展真空设备厂)

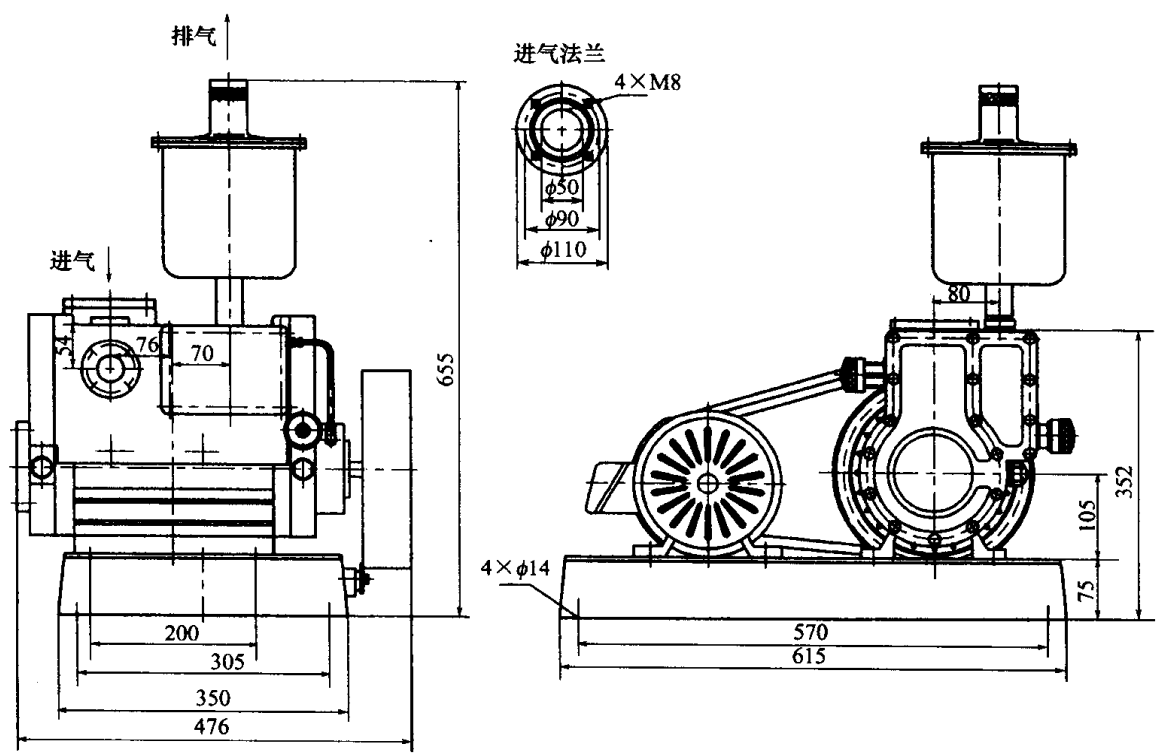


图 3-41 2H-8 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

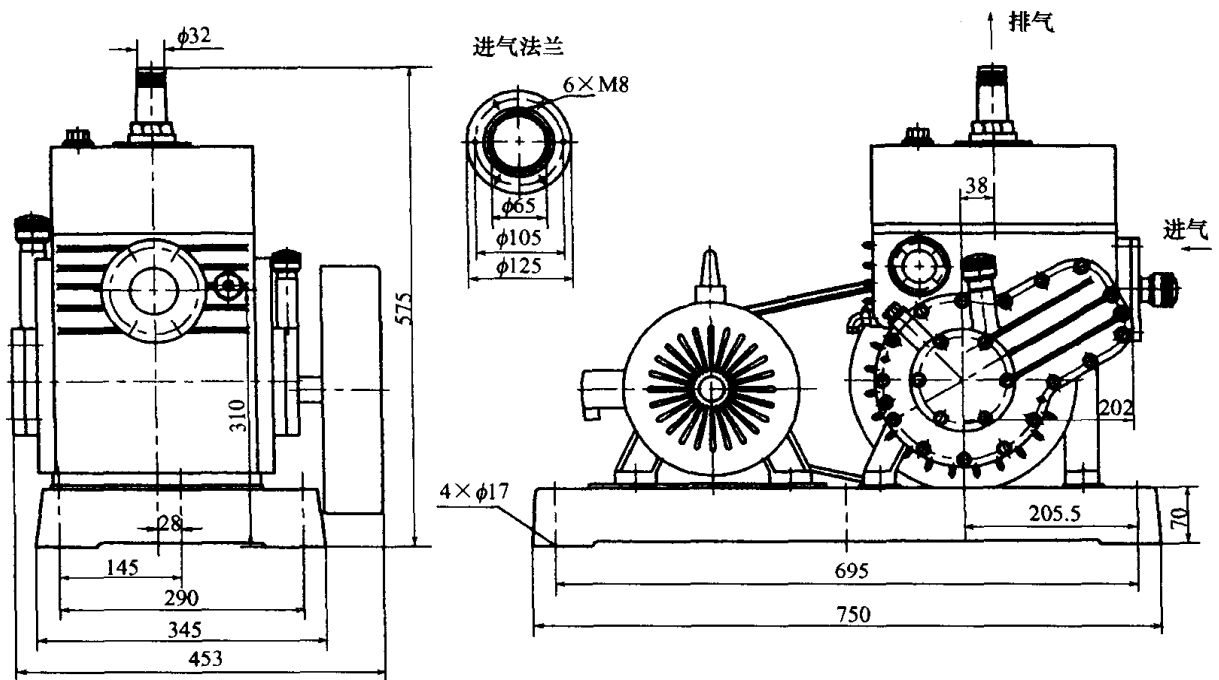


图 3-42 2H-15 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

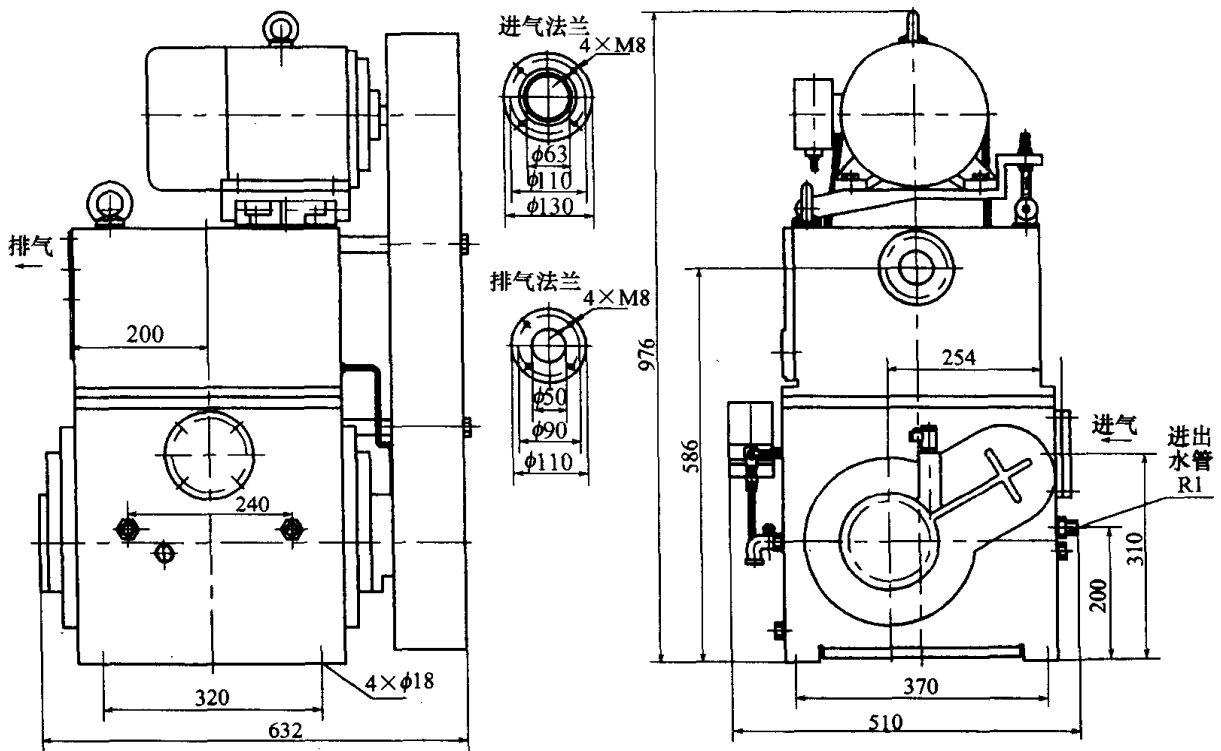


图 3-43 2H-30A 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

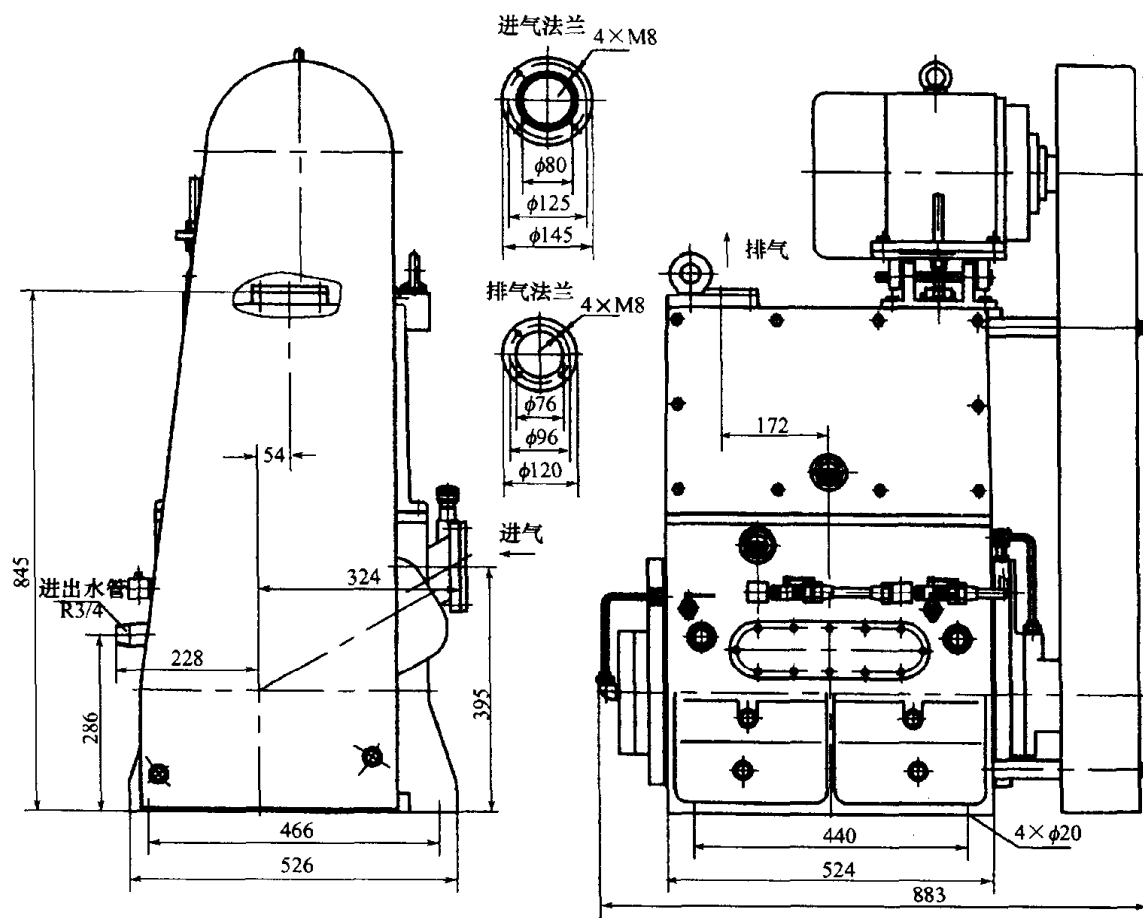


图 3-44 2H-70A 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

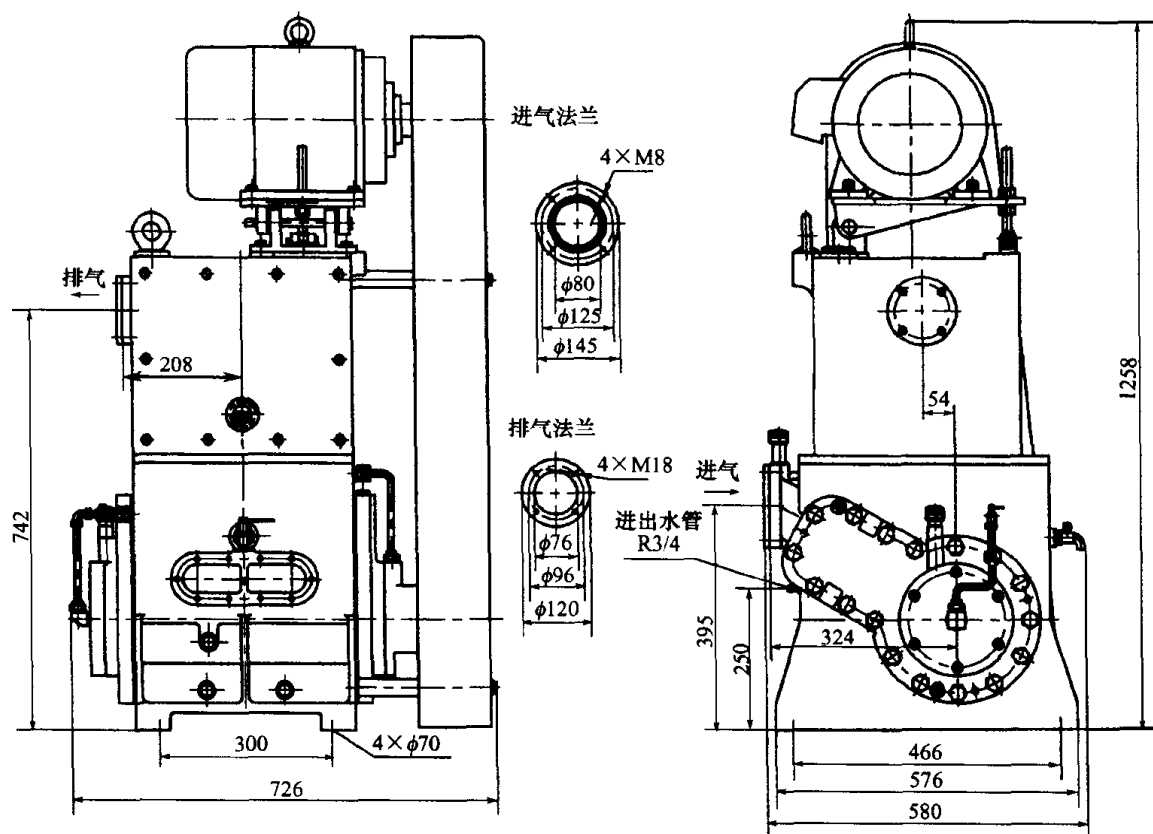


图 3-45 H-70B 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

五、油封式旋转机械真空泵

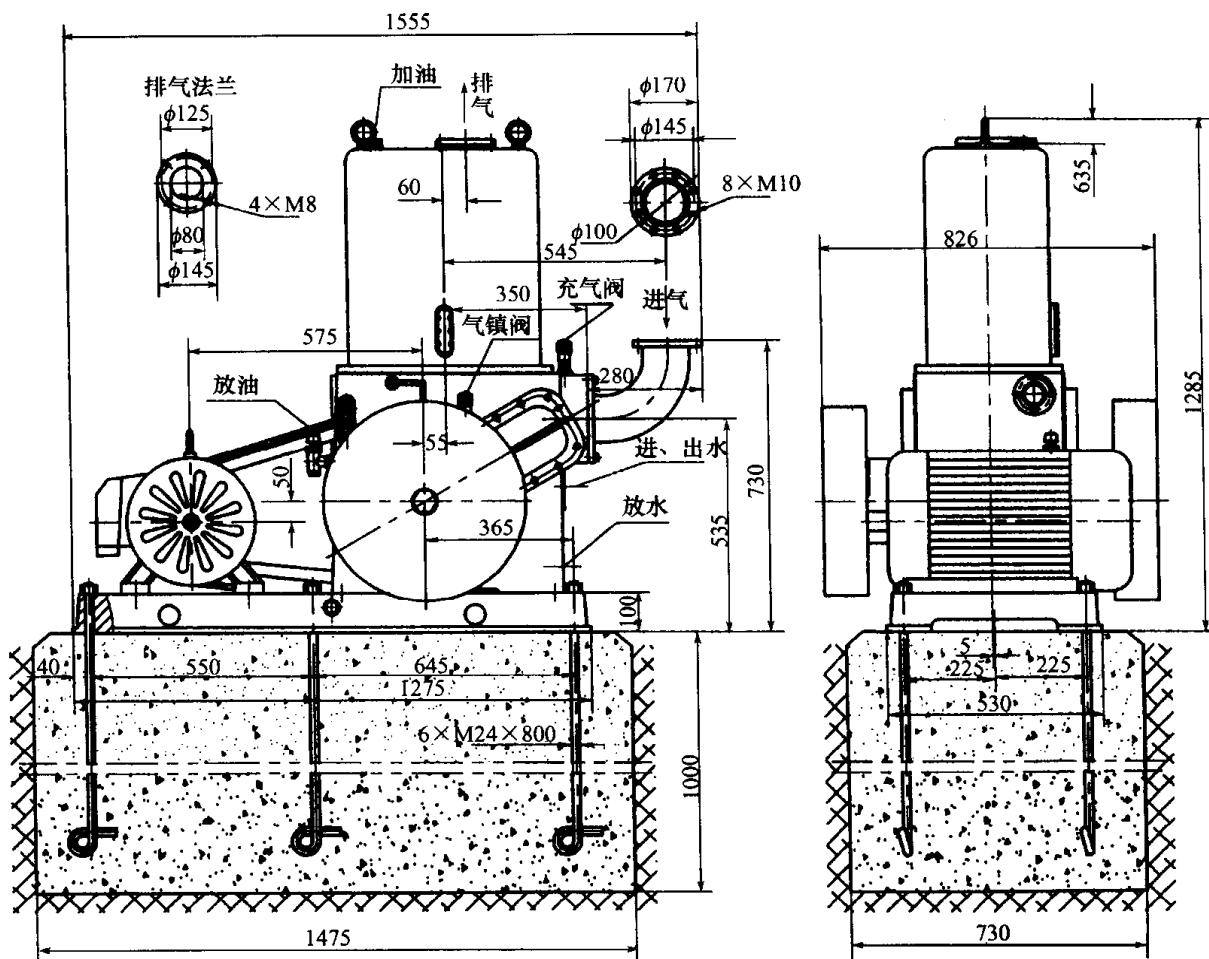


图 3-46 H-150 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

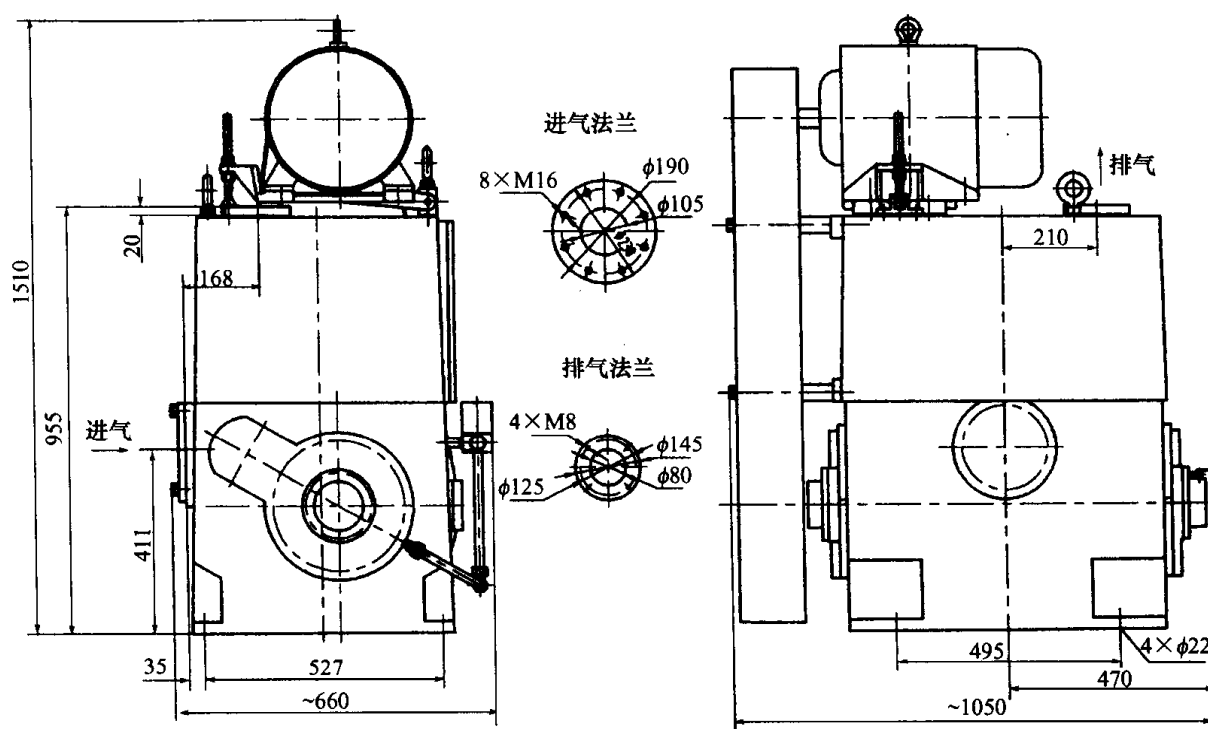


图 3-47 H-150D 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

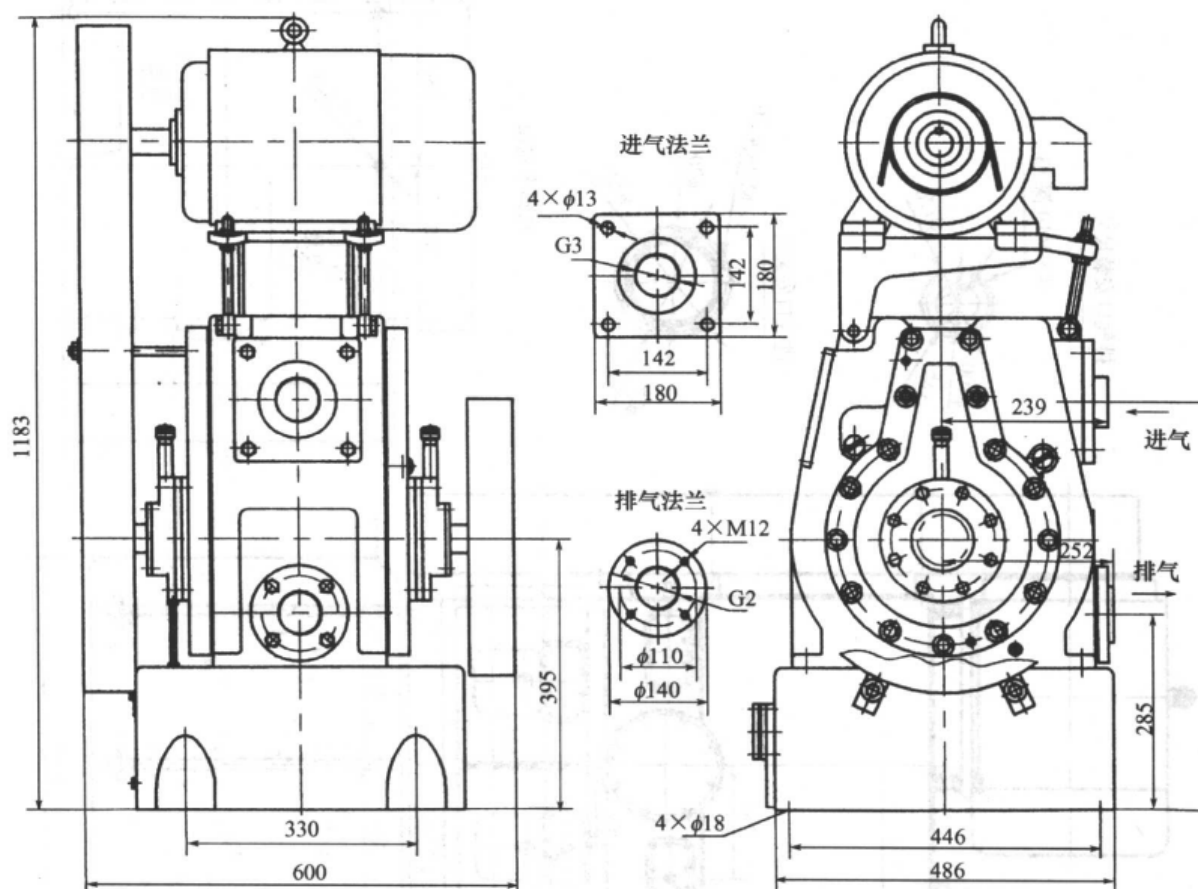


图 3-50 1401 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

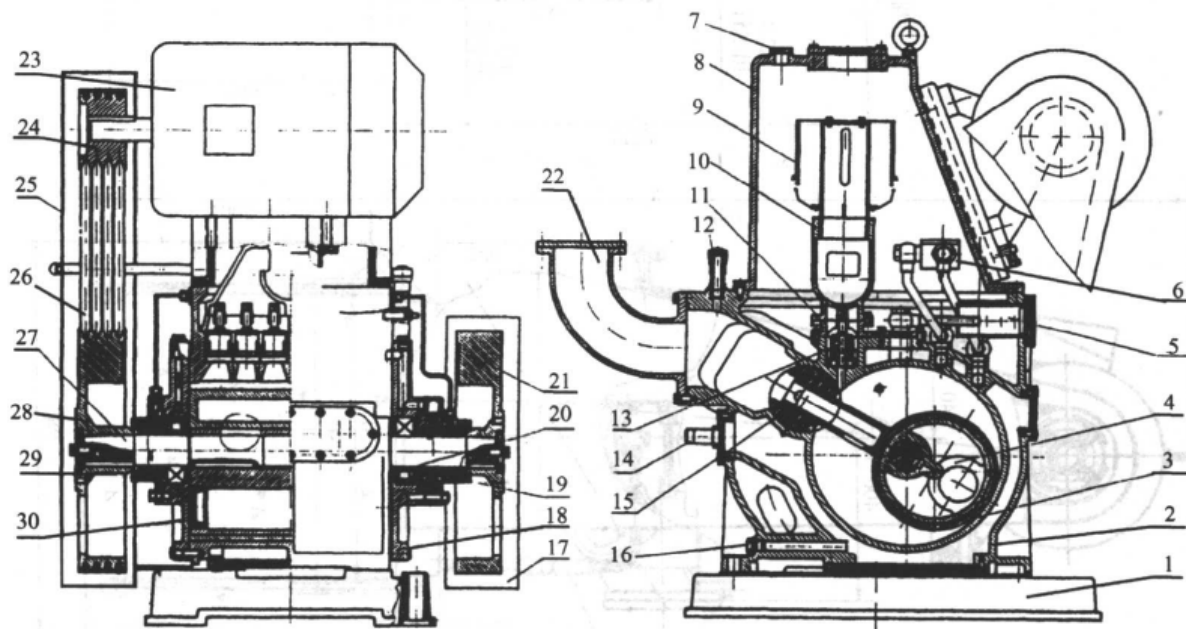


图 3-51 HGL-150 型滑阀式真空泵结构示意图

- 1—底盘;2—泵体;3—滑阀;4—偏心轮;5—滤油器组件;6—油路组件;7—加油塞;8—油箱;9—挡油帽组件;
10—排气罩;11—排气罩;12—充气阀;13—排气阀组件;14—进水管;15—导轨组件;16—放水螺塞;
17—平衡轮罩;18—泵盖乙;19—油泵组件;20—轴承(42312);21—平衡轮;22—进口弯管;23—电机;
24—电机带轮;25—皮带罩;26—三角胶带;27—轴;28—泵皮带轮;29—密封组件;30—泵盖甲。

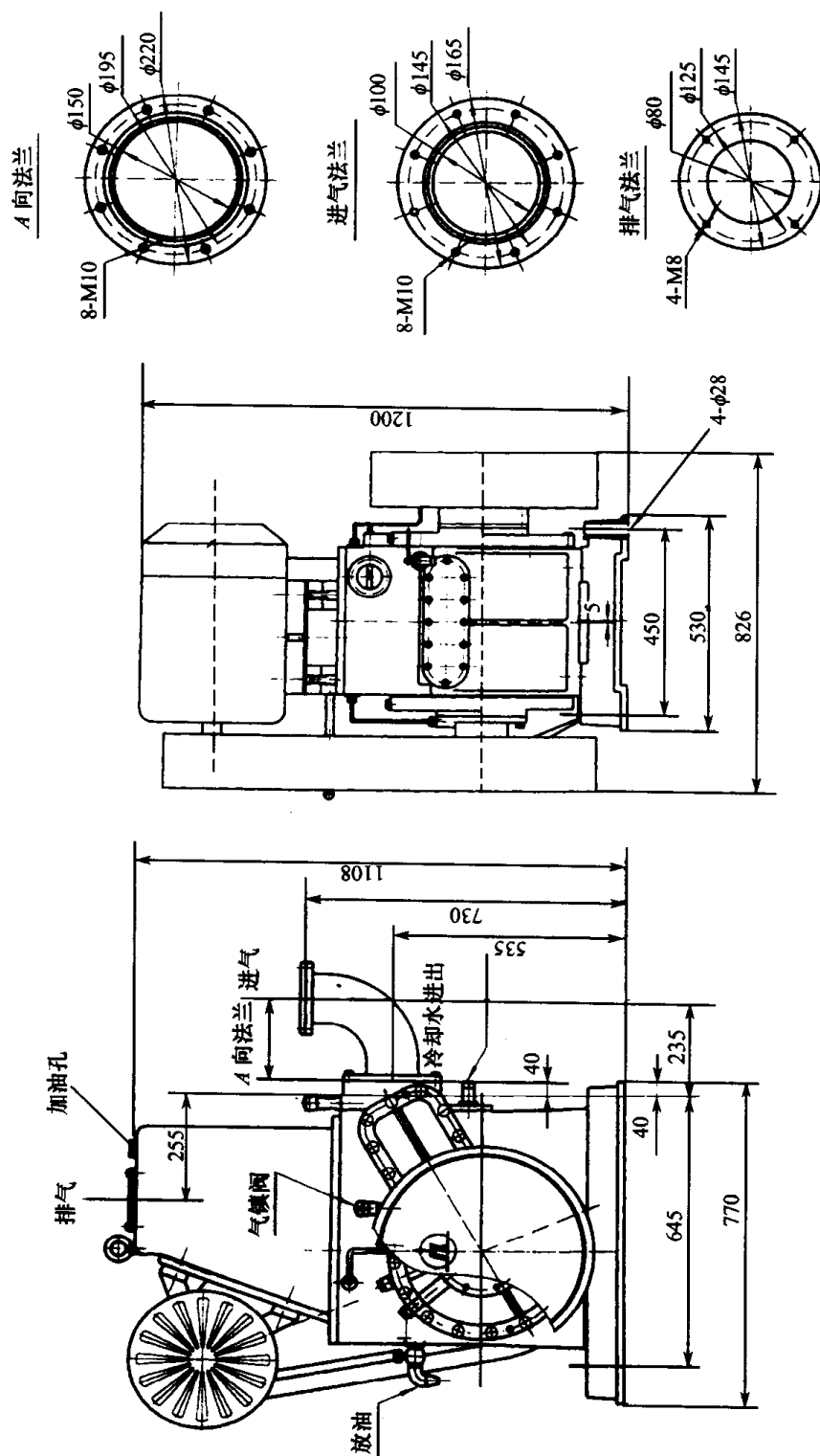


图 3-52 HGL-150 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

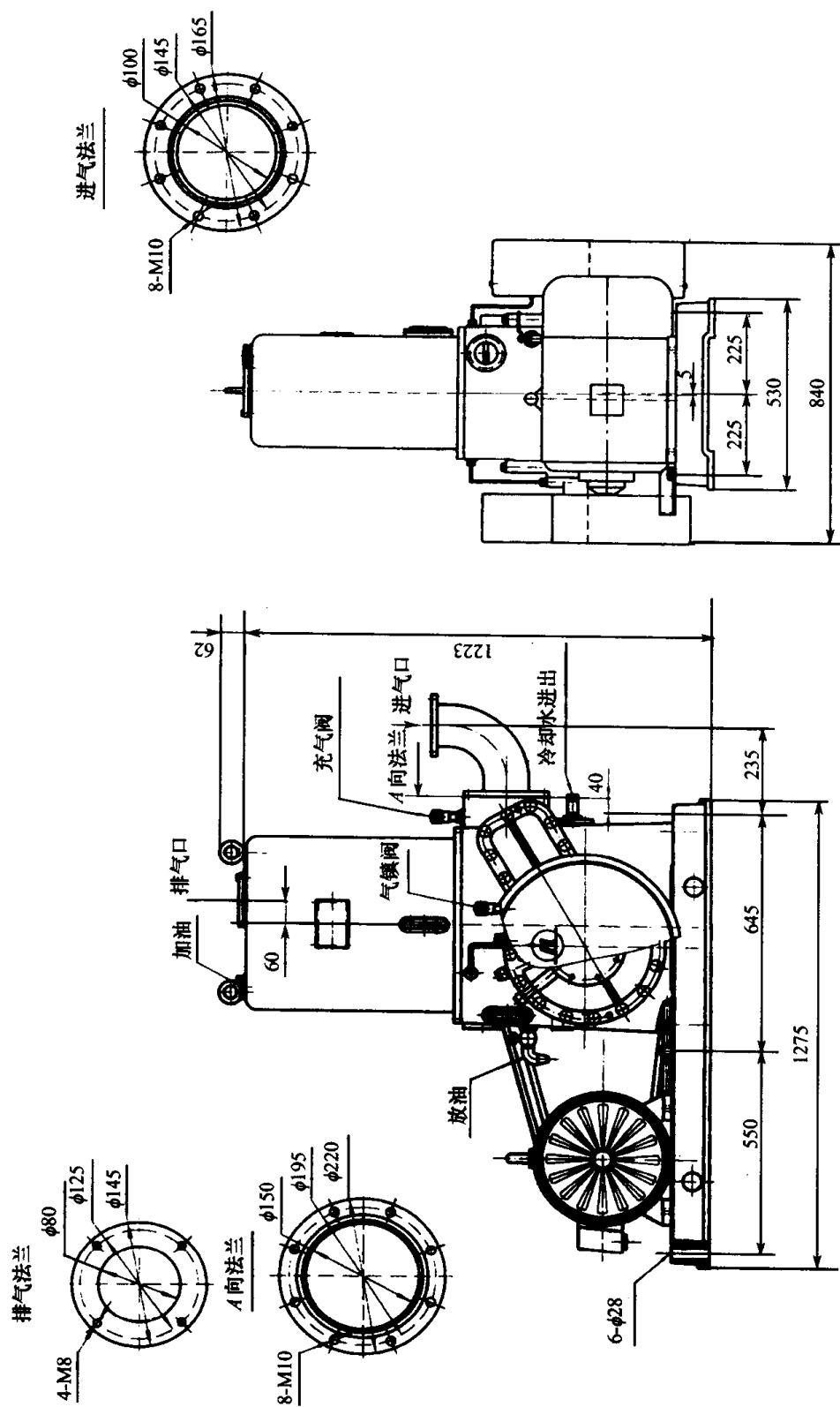


图 3-53 HG-150 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

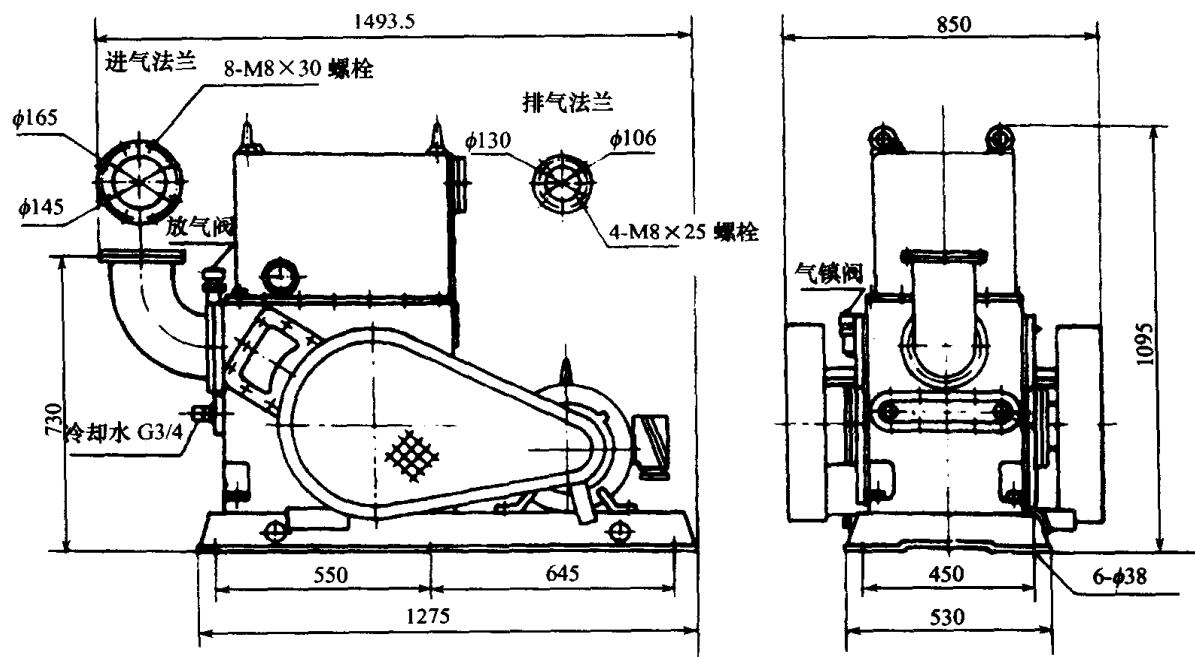


图 3-54 H-150B 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸图

(上海真空泵厂生产)

④H、2H 型 DV 系列滑阀式真空泵外形及安装尺寸见表 3-78。

表 3-78 H、2H 型 DV 系列滑阀式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)

型 号	H	B	L	BB	LB	NB	B ₁	L ₁	H ₁	B ₂
2H-15DV	782	400	432	344	160	4-φ14	28	102	220	3
H-25DV										
2H-30DV	928	525	545	390	160	4-φ16	60	140	280	40
H-50DV										

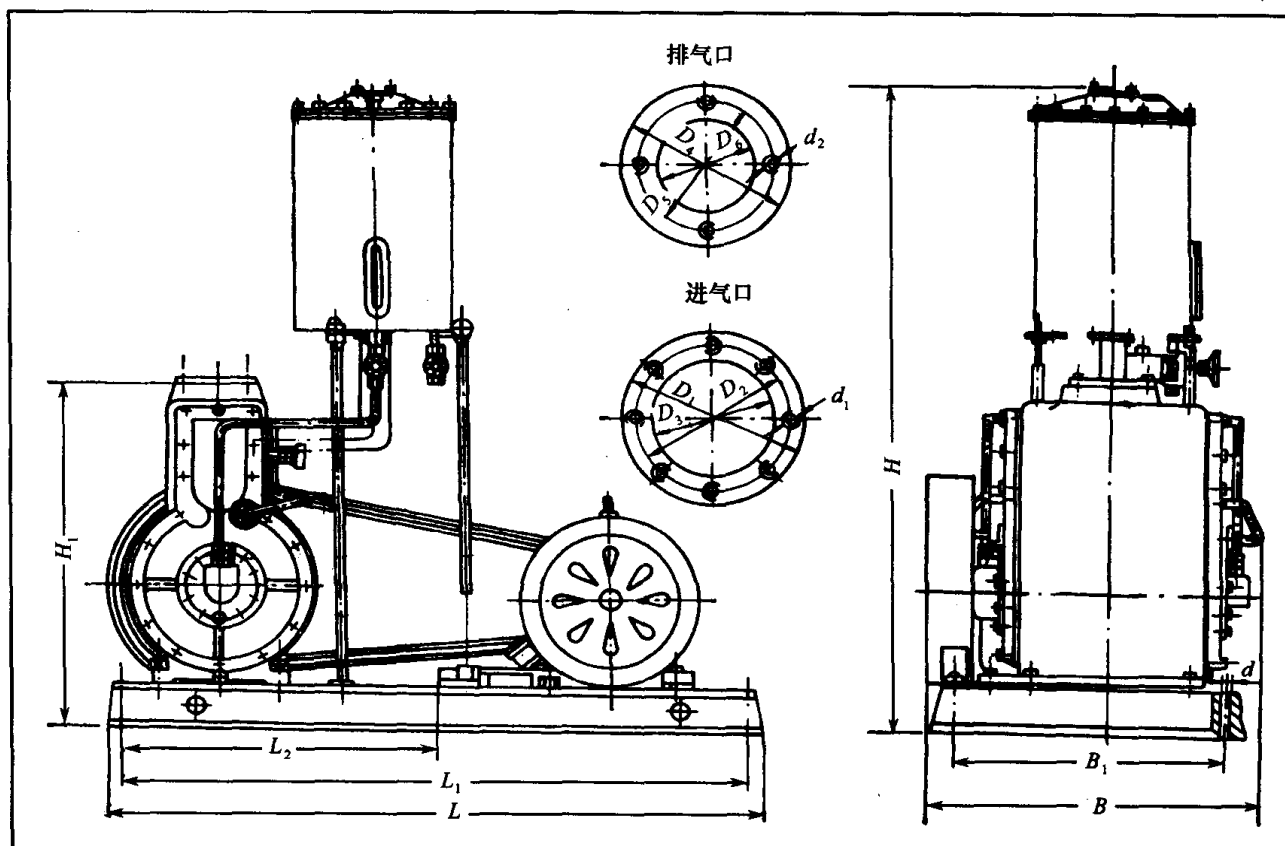
(续)

型 号	H	B	L	BB	LB	NB	B ₁	L ₁	H ₁	B ₂
2H-70DV	1125	690	660	484	250	4-φ18	62	155	328	44
H-100DV										
2H-100DV	1272	740	745	528	300	4-φ20	82	157	380	45
H-150DV										
2H-150DV	1272	740	935	528	490	4-φ20	82	157	380	45
H-200DV										
型 号	D ₁	D ₂	D ₃	N ₁	H ₀	B ₀	D ₁	D ₂	D ₃	N ₀
2H-15DV	φ50	φ90	φ110	4-M8	445	0	φ40	φ80	φ100	4-M8
H-25DV										
2H-30DV	φ63	φ110	φ130	4-M8	546	33	φ50	φ90	φ110	4-M8
H-50DV										
2H-70DV	φ80	φ125	φ145	4-M8	676	36	φ63	φ110	φ130	4-M8
H-100DV										
2H-100DV	φ100	φ145	φ170	8-M10	740	36	φ80	φ125	φ145	4-M8
H-150DV										
2H-150DV	φ100	φ145	φ170	8-M10	740	36	φ80	φ125	φ145	4-M8
H-200DV										

注:台州拓展真空设备有限公司生产

⑤H-70A、H-150A 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸见表 3-79。

表 3-79 H-70A、H-150A 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



(续)

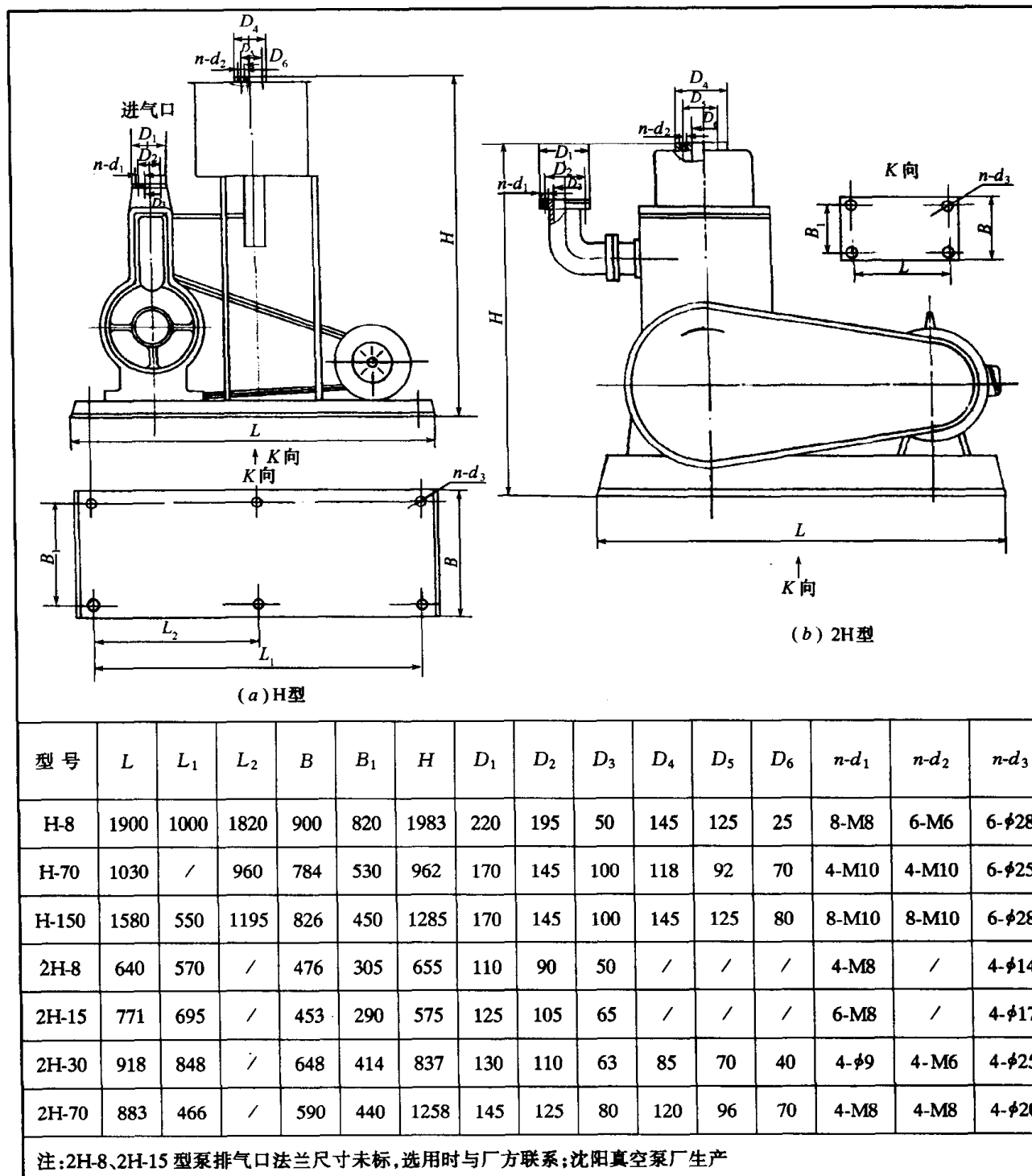
型号	L	L ₁	L ₂	B	B ₁	H	H ₁	d	d ₁	d ₂	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆
H-70A	1076	1010	—	837	605	1355	785	4-φ24	4-M10	4-M8	195	172	125	125	105	65
H-150A	1900	1820	100	1012	820	1783	1060	4-φ28	4-M10	4-M8	220	195	150	145	125	86

注:抚顺真空泵厂生产

⑥H、2H型滑阀式真空泵外形及安装尺寸见表 3-80。

表 3-80 H、2H 型滑阀式真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



六、罗茨式真空泵

(一) 概述

罗茨式真空泵(简称罗茨泵)是利用两个 8 字形转子在泵壳中旋转而产生吸气和排气作用的。其原理和罗茨鼓风机相似。由于它在低压力范围内工作,气体分子自由程较大,气体漏过微小缝隙的阻力很大,因而能获得较高的压缩比,可以作为增压真空泵使用。

罗茨式真空泵根据泵体结构可分为两类:一类为普通型,另一类为直排大气型。二者区别除结构之外,主要是普通型罗茨泵不能单独地把气体直接排入大气中去,需要和前级真空泵串联使用,被抽气体通过前级真空泵将气体排到大气中,其示意图如图 3-55 所示。而后者则可以。普通类泵又可分为一般型泵和带旁通阀型泵两种。这类泵已有系列标准及其产品。一般型泵的最大允许压差在 $2000\text{Pa} \sim 10000\text{Pa}$ 范围,而带旁通阀型泵的压差仅限于 $2000\text{Pa} \sim 4000\text{Pa}$ 。当压差超过每一规格泵的规定值时,旁通阀就会自动顶开,泵出口处的气体经旁通阀返流入泵进口处,以使泵安全运行。普通型带旁通阀的罗茨泵其结构示意图如图 3-56 所示。

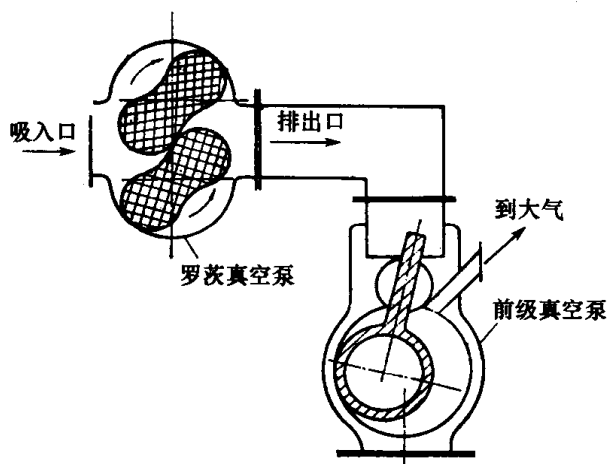


图 3-55 罗茨真空泵示意图

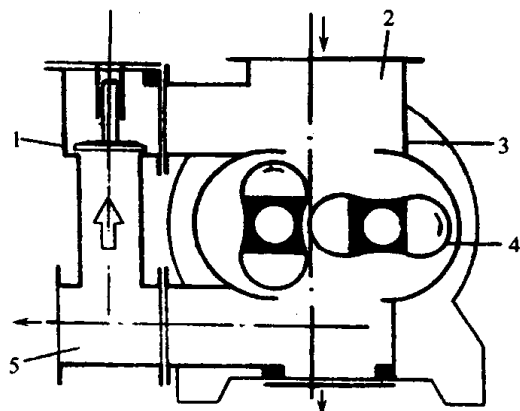


图 3-56 带有旁通阀罗茨真空泵示意图
1—溢流阀;2—泵入口;3—泵体;4—转子;5—泵出口。

直排大气型罗茨真空泵可分为气冷式和水冷式两种。独特的结构使此种泵的最大允许压差可达 88000Pa 。气冷式直排罗茨泵必须配置冷却器和消声器。因为被泵排出的气体有很高的温度,通过冷却器冷却后,少部分被冷却了的气体由管道返流到泵出口以冷却泵,而大部分由冷却器排出的气体排入大气或下一级泵。单台泵若与油封式机械泵串接,则其工作结果与普通罗茨泵相同。直排大气罗茨泵既可单台使用,亦可多台串联使用,以满足所需的工作压力;同时还可以作普通罗茨泵机组中的中间泵或前级泵使用,以满足不同压力下的大抽气量要求。对应不同的使用压差,电机功率就有一个对应值。即是说气冷式直排大气罗茨泵的电机功率,随使用压差的不同而有不同,在组成抽气机组中使用时,功率相对有一个固定值,并不像普通罗茨泵的电机功率只固定一个值(选用一种规格的电机)。气冷式直排大气罗茨泵有着广泛的市场前景。

根据罗茨泵工作压力范围不同,将它分为低真空的直排大气干式罗茨泵和湿式真空泵、中真空罗茨泵(机械增压泵)和高真空多级罗茨泵等。低真空的直排大气干式罗茨泵,小泵极限

压力为 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$, 大泵可达 $1 \times 10^4 \text{ Pa}$, 若两台串联, 可获得极限压力 $2 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。湿式罗茨泵可以吸入少量的水, 但吸入量过大时, 要在泵入口前设置分离器, 将水分离后, 再注入适量的水。这种泵直接向大气中排放时, 噪声较大, 故需加消声器。中真空罗茨泵出口压力在 $4 \times 10^3 \text{ Pa}$ 以下, 吸入压力在 $1 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ 范围, 若出口压力在 10^3 Pa , 入口压力在 $10^2 \text{ Pa} \sim 1 \text{ Pa}$ 范围内使用, 效率最高。

罗茨泵的特点是: ①转子与泵腔、转子与转子之间有一定的间隙, 互不接触, 不需要用油润滑。②转子具有良好的几何对称性, 可以提高转速, 从而能够制造出结构紧凑的大抽速泵来。③泵工作时振动小, 容积大, 容积利用系数 $\lambda_{np} = 0.5$ 左右。④在泵腔内并不发生像机械真空泵那样的压缩现象, 因此它不需要排气阀。也正因如此, 可抽除可凝性蒸气。⑤启动快, 能够在短时间内达到极限真空。功率小, 运转维护费用低。⑥在很宽的压力范围内 ($1 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 1 \text{ Pa}$) 有很大的抽速, 能迅速排出突然放出的气体, 弥补了扩散泵和油封机械泵在 ($1 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 1 \text{ Pa}$) 时抽速都很小的缺陷。因此, 它最适合作增压泵用。

罗茨泵的缺点是泵的转子制造较难, 抽除氢气的效果不如油增压泵高。

罗茨泵广泛用于真空冶金工业的真空脱气、真空熔炼、钢水真空处理, 以及空间模拟、低密度风洞等装置中抽除非腐蚀性气体。也可以用于化工、食品、医药、电机制造等工业的蒸馏、蒸发、干燥等生产过程。

(二) 工作原理

罗茨泵是按罗茨鼓风机的原理工作的, 如图 3-57 所示。

工作时, 被抽气体由进气口进入转子与泵体之间, 这时一个转子和泵体把气体与进气口隔开, 被隔开的气体 (如图上影线部分所示) 在转子连续不断的旋转过程中, 被送到排气口。在图 3-57(a) 中, V_0 空间是处在封闭状态的, 因此, 没有压缩和膨胀。但当转子的峰部转到排气口边缘时, 由于 V_0 部分的压力较之排气口处的压力低, 为了使相连体积内压力均匀, 气体就会从排气口处扩散到 V_0 区域, 其扩散方向与转子旋转方向相反。当转子再转动时, 把 V_0 处的气体压缩到排气口将其排出。这时转子的另一面与进气口相连部分则吸入气体, 当转子不断地旋转时, 重复上述抽气过程不断地排出流进来的气体。这种工作过程相当于转子空间由某一最小值增加到最大值, 然后再由最大值减小到最小值。这就是罗茨真空泵的容积作用原理。

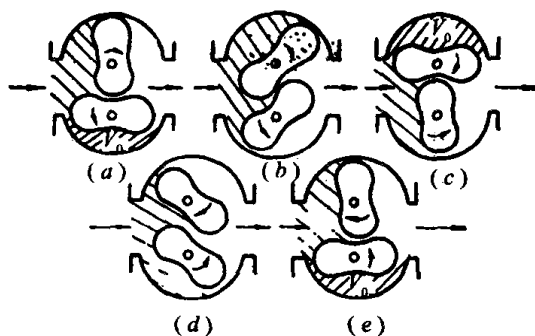


图 3-57 罗茨真空泵的工作
顺序位置图

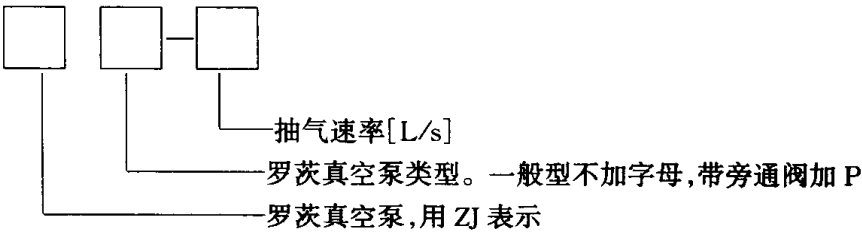
罗茨泵在入口压力很低情况下工作时, 由于转子转速很高 ($1000 \text{ r/min} \sim 3000 \text{ r/min}$), 转子表面的线速度接近于分子的热运动速度, 这时碰撞在转子上的气体分子被转子携带到压力较高的排气口, 再被预真空泵排除。这就是罗茨真空泵的分子作用原理。

(三) ZJ 型罗茨真空泵的型式和基本参数 (摘自 ZB/T7674-95)

本标准适用于抽速为 $30 \text{ L/s} \sim 20000 \text{ L/s}$, 工作时必须有前级泵的单级双叶罗茨真空泵 (以下简称泵)。

1. 型号

型号表示方法说明如下：



标记示例：

- ①抽气速率为 1200L/s 的罗茨真空泵,标记为:ZJ-1200。
- ②抽气速率为 300L/s 的带旁通阀罗茨真空泵,标记为:ZJP-300。

2. 基本参数

ZJ 型罗茨真空泵的基本参数应符合表 3-81 规定。

表 3-81 罗茨真空泵基本参数

型 号	抽气速率 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	最大允许压差 /Pa	进气口 通径 /mm	出气口 通径 /mm	零流量最大压缩比	噪声 /dB(A)	推荐配用电动机功率 /kW	推荐泵转速 /r·min ⁻¹	推荐配用前级泵
ZJ-30	30	≤1×10 ⁻²	≥8×10 ³	50	40	≥25	≤78	0.75	2 950	2X-8
ZJ-70	70		≥6×10 ³	80	50	≥25		1.1	2 950	2X-15
ZJ-150	150			100	80	≥30	≤82	2.2	2 950	2X-30
ZJ-300	300		≥5×10 ³	160	100	≥30	≤83	4	2 950	2X-70
ZJ-600	600		≥4×10 ³	200	160	≥35	≤86	7.5	2 950	ZJ-150, 2X-30
ZJ-1 200	1 200		≥3×10 ³	250	200	≥35	≤90	11	2 950	ZJ-300, 2X-70
ZJ-2 500	2 500			320	250	≥40		18.5	2 950	ZJ-600, H-150
ZJ-5 000	5 000			400	320	≥40	≤91	37	1 450	ZJ-1200 H-300
ZJ-10 000	10 000		≥2.5×10 ³	500	400	≥45	≤93	55	1 450	ZJ-2 500 ZJ-600, H-150
ZJ-20 000	20 000		≥2×10 ³	630	500	≥45	≤94	75	1 450	ZJ-5 000 ZJ-1 200 2×H-150

注:1. 表内各项性能指标,系指在推荐配用的前级泵下测得;ZJ600 以上的泵最大允许压差系指在前级泵抽速增大 1 倍的情况下测得;

2. 泵进、出口通径系指泵进、出口法兰公称通径,应符合 GB6070 规定,泵进口必须有密封槽;

3. 本标准推荐的配用前级泵适用于一般情况,但为满足用户的不同要求,也可选用其它的前级泵

(四) 国产罗茨泵技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. 技术性能

①ZJ 型罗茨真空泵技术性能见表 3-82。

六、罗茨式真空泵

表 3-82 ZJ 型罗茨真空泵技术性能

型 号	抽速 /L·s ⁻¹	极 限 压 力 /Pa	最大允 许压差 /Pa	转 速 /r·min ⁻¹	功 率 /kW	进排气口径 /mm		外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	推荐配用 前级泵	生 产 厂 家
						进 气	排 气				
ZJ-150A	150	5×10 ⁻²	8×10 ³	2840	2.20	100	100	885×408×380	195	2H-30A	浙江真空设备集团有限公司
ZJ-300	300		6×10 ³	2890	4.00	150	150	1100×408×380	270	2H-70A	
ZJ-600	600		4.5×10 ³	2900	7.50	200	200	1505×553×489	760	2H-70A 或 H-150	
ZJ-1200A	1200		4.5×10 ³	2930	11.00	250	200	1695×553×519	845	ZJ-300/ H-70B	
ZJ-2500	2500		3×10 ³	2940	22.00	320	320	2030×700×705	1360	ZJ-600/ H-150	
ZJ-5000	5000			1480	45.00	400	320	1774×1150×1050	3400	ZJ-1200A /H-300	
ZJ-10000	10000		4.5×10 ³	990	90.0	500	500/ 400	2240×1710×1440	6000	ZJP-2500 /H-600	
ZJ-1500	1500	5×10 ⁻²	3×10 ³	1460	11.0	250	200	1685×1000×850	/	ZJ-150 ZJ-30A	上海真空泵厂
ZJ-2500	2500			1470	18.5	320	250	2182×955×936	/	ZJ-300 ZX-70A	
ZJ-5000	5000	1×10 ⁻¹		1800	55.0	500	350	1886×1000×990	/	ZJ-600/ H-150	
ZJ-20000	20000		2×10 ³	1300	110.0	600	500	2886×1748×1500	/	25-5000/ ZJ-1500 2×H-150	
ZJ-30	30	≤5×10 ⁻²	8×10 ³	1450	0.75	50	40	/	66	2XZ-4 或 2X-8	南京真空泵厂
ZJ-70	70		6×10 ³	1450/ 2950	1.50	80	50	/	87	2X-8 或 2X-15	
ZJ-150A	150		6×10 ³		3.00	100	100	/	198	2X-15 或 2X-30	
ZJ-300	300		5×10 ³	2950	4.00	150	150	/	490	2X-30A 或 2X-70A	
ZJ-600	600		4×10 ³		5.50	150	150	/	490	2X-70 或 2X-100	
ZJ-70	70	5×10 ⁻²	6×10 ³	/	1.1	80	50	727×317×331	/	2X-8 2X-15	山东淄博真空设备厂有限公司
ZJ-150	150			/	2.2	100	80	865×317×331	/	2X-15 2X-30	
ZJ-300	300		5×10 ³	/	4.0	160	100	1070×411×342	/	2X-30 2X-70	
ZJ-600	600		4×10 ³	/	7.5	200	160	1315×156×416	/	2X-70 2X-30 ZJ-150	
ZJ-1200	1200			3×10 ³	/	11.0	250	200	1656×156×416	/	

(续)

型号	抽速 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	最大允 许压差 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	进排气口径 /mm		外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	推荐配用 前级泵	生产厂家
						进气	排气				
ZJ-150	150	5×10 ⁻²	10 ³	2840	2.2	100	80	939×320×480	200	2X-30	沈阳恒星实业有限公司
ZJ-300	300			2890	4.0	160	100	1107×408×410	290	2X-70	
ZJ-600	600			2900	505	200	160	1355×510×515	505	ZJ-150 2X-30	
ZJ-1200	1200			2930	11.0	240	200	1590×550×610	1000	ZJ-300	
ZJ-150	150	5×10 ⁻²	1333	2930	2.2	100	80	885×408×380	/	/	沈阳真空泵厂
ZJ-300	300			2900	4.0	160	100	1000×408×380	/	/	
ZJ-600	600			2890	5.5	200	160	1345×553×519	/	/	
ZJ-1200	1200			2840	11.0	250	200	1695×553×519	/	/	

②浙江真空设备集团有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵技术性能见表 3-83。

表 3-83 ZJP 型罗茨真空泵技术性能

型号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	最大允 许压差 /Pa	溢流阀 压 差 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	进排气口径 /mm		外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	推荐 前级泵
							进气	排气			
ZJP-30	30	5×10 ⁻²	/	6.7×10 ³	2830	0.75	50	40	720×252×286	60	2H-8
ZJP-70	70			6.7×10 ³	2830	1.10	80	50	830×252×269	75	2H-15
ZJP-150	150			6×10 ³	2840	2.20	100	100/100 (侧面)	875×500×510	210	2H-30A
ZJP-300	300			5.3×10 ³	2890	4.00	150	150/150 (侧面)	1090×500×555	290	2H-70A
ZJP-600	600			4.7×10 ³	2900	7.50	200	200/200 (侧面)	1385×685×711	790	2H-70A
ZJP-1200A	1200			4×10 ³	2930	11.00	250	200/200 (侧面)	1700×770×720	880	ZJ-300/ H-70B

③台州市星光真空设备制造有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵技术性能见表 3-84。

表 3-84 ZJP 型罗茨真空泵技术性能

型号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	长期运 转最大 压 差	转速 /r·min ⁻¹	功率 /kW	进排气口径 /mm		冷却 水量 /L·h ⁻¹	允许 温升 /℃	润滑 油牌 号	质量 /kg	推荐配用 前级泵
						进气	排气					
ZJP-70	70	5×10 ⁻²	1060	1400	1.5	100	100	120	120	机械 真空 泵油	/	2H-30
ZJP-150	150		8000	2860	2.2	100	100				/	2H-30
ZJP-300	300		6650		4.0	150	150				/	2H-30 2H-70
ZJP-600	600	8×10 ⁻²	6000	2860	7.5	200	200	/	40	机械 真空 泵油	790	HG-15 或 HGL-150
ZJP-1200	1200		5300		11.0	250					950	

注: ZJP-600、ZJP-1200 型泵噪声 83dB(在极限压力时测得);该型泵最大压差受配套电机功率限制,当被抽容器较小时,在电机允许的超载范围内,可适当允许提高罗茨泵的入口压力

六、罗茨真空泵

④成都国投南光有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵技术性能见表 3-85。

表 3-85 ZJP 型罗茨真空泵技术性能

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极 限 压 力 /Pa	最大允 许压差 /Pa	零流 量压 缩比	起动 压力 /Pa	转 速 /r·min ⁻¹	功 率 /kW	进排气口 径/mm		润 滑 油 量 /L	噪 声 /dB	质 量 /kg	推荐配用 前级泵
								进 气	排 气				
ZJP-30	30	5×10 ⁻²	8×10 ³	25	1×10 ³	2800	0.55	50	40	2.0	72	180	2X-8
ZJP-70	70		6×10 ³				1.10	80	50	2.5	73	130	2X-15
ZJP-150	150		5×10 ³	30		2840	2.20	100	80	2.8	78	175	2X-30
ZJP-300	300		4×10 ³			2890	4.00	160	100	2.8	80	315	2X-70
ZJP-600	600		3×10 ³	35		2900	5.50	200	160	4.0	80	465	ZJ-150 + 2X-30
ZJP-1200	1200		3×10 ³				11.00	250	200	5.0	83	750	ZJ-300 + 2X-70

⑤北京北仪创新真空技术有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵技术性能见表 3-86。

表 3-86 ZJP 型罗茨真空泵技术性能

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极 限 压 力 $/\text{Pa}$	最大允 许压差 $/\text{Pa}$	转 速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功 率 $/\text{kW}$	进排口直径 $/\text{mm}$		外形尺寸 (长 \times 宽 \times 高) $/\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$	质 量 $/\text{kg}$	推荐配用 前级泵
						进 气	排 气			
ZJP-30	30	5×10^{-2}	8×10^3	2830	0.8	50	50	$630\times 228\times 239$	56	2X-8
ZJP-70	70		6×10^3	2840	1.5	80	50	$728\times 374\times 355$	114	2X-15
ZJP-150	150		6×10^3	2840	2.2	100	100	$868\times 380\times 375$	137	2X-30
ZJP-300	300		5×10^3	2890	4.0	160	100	$1167\times 563\times 573$	183	2X-70
ZJP-600	600		4×10^3	2900	7.5	200	160	$1333\times 545\times 660$	475	ZJ-150 + 2X-30
ZJP-1200	1200		3×10^3	2930	11.0	250	200	$150\times 697\times 704$	650	ZJ-300 + 2X-70

⑥上海真空泵厂生产的 ZJB 型罗茨真空泵技术性能见表 3-87。

表 3-87 ZJB 型罗茨真空泵技术性能

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	最大允 许压差 /Pa	零流 量最 大压 缩比	控制 压差 /Pa	转 速 /r·min ⁻¹	功 率 /kW	进排气口直 径/mm		噪 声 /dB	推荐配用前级泵
								进 气	排 气		
ZJB-1500	1500	5×10 ⁻²	3×10 ³	35	2700	1460	11.0	250	200	85	ZJ-300、2X-70A
ZJB-2500	2500			40		1470	18.5	320	250	88	ZJ-600、H-150
ZJB-5000	5000			40		1800	55.0	500	350	90	ZJ-1200、2×H-150
ZJB-20000	20000	1×10 ⁻¹	2×10 ³	45	2000	1300	110.0	600	500	94	ZJ-2500、ZJ-600、H-150

⑦南京真空泵厂生产的 ZJP 型罗茨真空泵技术性能见表 3-88。

表 3-88 ZJP 型罗茨泵真空技术性能

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极 限 压 力 $/\text{Pa}$	最大允 许压差 $/\text{Pa}$	转 速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功 率 $/\text{kW}$	进排气口直径 $/\text{mm}$		质量 $/\text{kg}$	推荐配用前级泵
						进气	排气		
ZJP-30	30	$\leq 5 \times 10^{-2}$	8000	1450	0.75	50	40	75	2XZ-4 或 2X-8
ZJP-70	70		6000	1450/2950	1.50	80	50	100	2X-8 或 2X-15
ZJP-150	150		6000	1450/2950	3.00	100	80	215	2X-15 或 X-30A
ZJP-300	300		5000	2950	4.00	160	100	480	2X-30A 或 X-70A
ZJP-600	600		4000	2950	5.50	200	160	503	2X-70A 或 2X-100

⑧上海真空泵厂生产的 ZJL 型气体循环冷却罗茨泵技术性能见表 3-89。

表 3-89 ZJL 型气体循环冷却罗茨泵技术性能

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极 限 压 力 $/\text{Pa}$	最高出气 压力 $/\text{Pa}$	转 速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功 率 $/\text{kW}$	最大耗水量 $/\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	进排气口径 $/\text{mm}$	
							进气	排气
ZJL-70	70	1.3×10^4	1×10^5	2930	11.0	989	80	50
ZJL-150	150			1470	18.5	1600	100	/
ZJL-300	300			2950	37.0	3000	125	/
ZJL-600	600			1480	75.0	6000	200	160
ZJL-1200	1200			1480	132.0	14000	250	250
ZJL-2500	2500			986	250.0	20000	400	400
ZJL-3700	3700			1480	380.0	30000	400	400

⑨浙江真空设备集团有限公司生产的 LQ 型罗茨真空泵技术性能见表 3-90。

表 3-90 LQ 型罗茨真空泵技术性能

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$		转 速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功 率 $/\text{kW}$	进排气 口径 $/\text{mm}$	返气口 直径 $/\text{mm}$	零流量 最大压 缩比	外形尺寸 (长×宽×高) $/\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	质量 $/\text{kg}$
		配前 级 泵	直 排							
LQ-150	150	5×10^{-2}	1.6×10^4	2900	2.2-15	100	2- $\phi 63$	30	710×420×385	240
LQ-300	300			1490	4-30	160	2- $\phi 100$		925×550×470	490
LQ-450	450			990	5.5-45	200	2- $\phi 100$		1170×670×600	880
LQ-600	600		1.3×10^4	1490	75-60	200	2- $\phi 100$	35	1170×670×600	880
LQ-900	900			990	11-90	250	2- $\phi 160$		1360×900×750	1480
LQ-1200	1200			1490	11-132	250	2- $\phi 160$		1360×900×750	1480
LQ-1800	1800			1490	15-185	320	2- $\phi 160$		1610×900×750	2050
LQ-2500	2500			990	18.5-250	400	2- $\phi 160$	40	1920×1180×1060	4400
LQ-3750	3750			1490	30-250	400	2- $\phi 160$		1920×1180×1060	4400

⑩台州市星光真空设备制造有限公司生产的 ZJY 型罗茨真空泵技术性能见表 3-91。

表 3-91 ZJY 型带溢流阀罗茨真空泵技术性能

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	溢流阀 压 差 /hPa	进排气口径 /mm		电机 功率 /kW	冷却水量 /L·min ⁻¹	质量 /kg	配 用 前级泵	泵 的 特 点
				进气	排气					
ZJY-30	30	3×10 ⁻²	52	50	40	0.75	/	85	2H-8	1. 动密部位采用该公司专利技术,并采用进口油封,控制轴封处的跳动量≤0.02mm。 2. 泵的进气口和排气口之间装有自重阀,当排气口与进气口之间的压力超过阀的自重时,阀自动打开。这个压力差是泵能可靠运行的最大压差。为此,该泵具有自动防止过载功能。 3. 当泵根据实际需要选用液环泵作为前级泵时,特别适合于抽除大量可凝性气体的场合
ZJY-70	70			80	50	1.10	/	110	2H-15	
ZJY-70D	70		48	100	100	1.50	20	220	2H-15	
ZJY-150	150			100	100	2.20	25	220	2H-30	
ZJY-300	300		58	150	150	4.00	30	310	2X-70 2H-70	
ZJY-600	600	5×10 ⁻²	32	200	200	7.50	35	790	HG-150 HGL-150	
ZJY-1200	1200		44	250	200	11.00	40	950	HG-150 HGL-150	

2. 特性曲线

①ZJ 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线如图 3-58、图 3-59 所示。

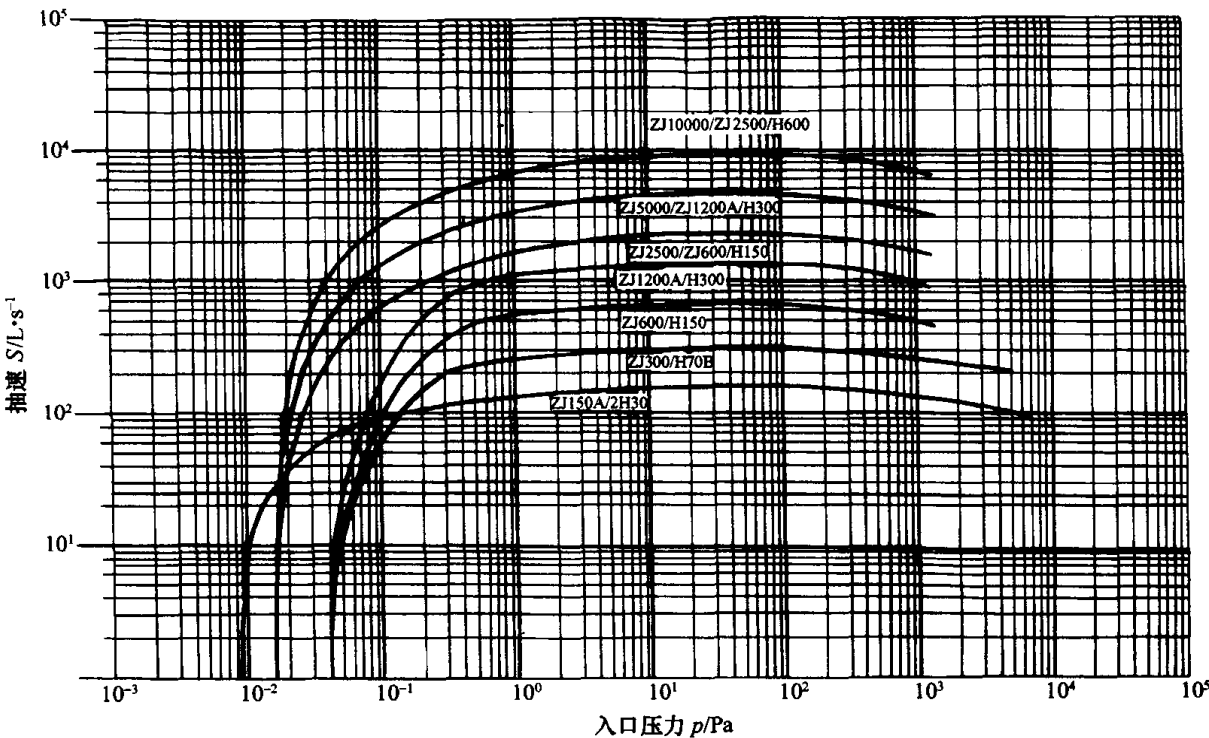


图 3-58 ZJ 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线
(浙江真空设备集团有限公司生产)

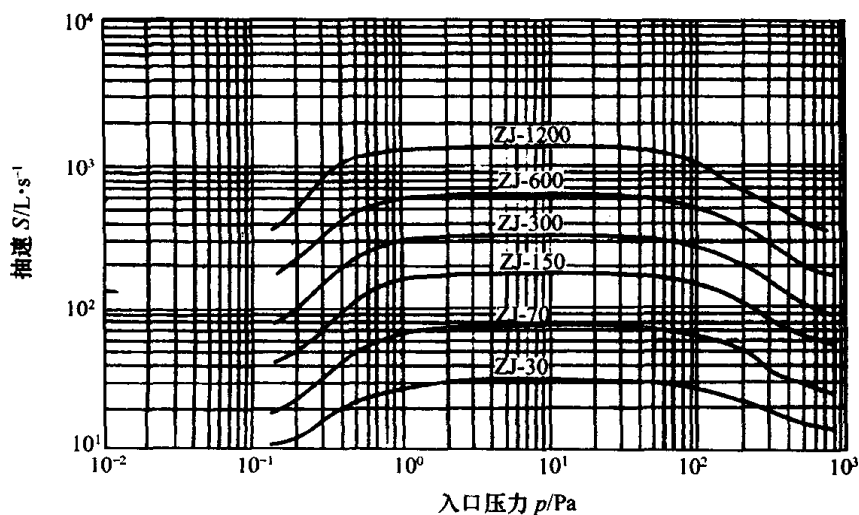


图 3-59 ZJ 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线
(成都国投南光有限公司生产)

②ZJL 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线如图 3-60 所示。

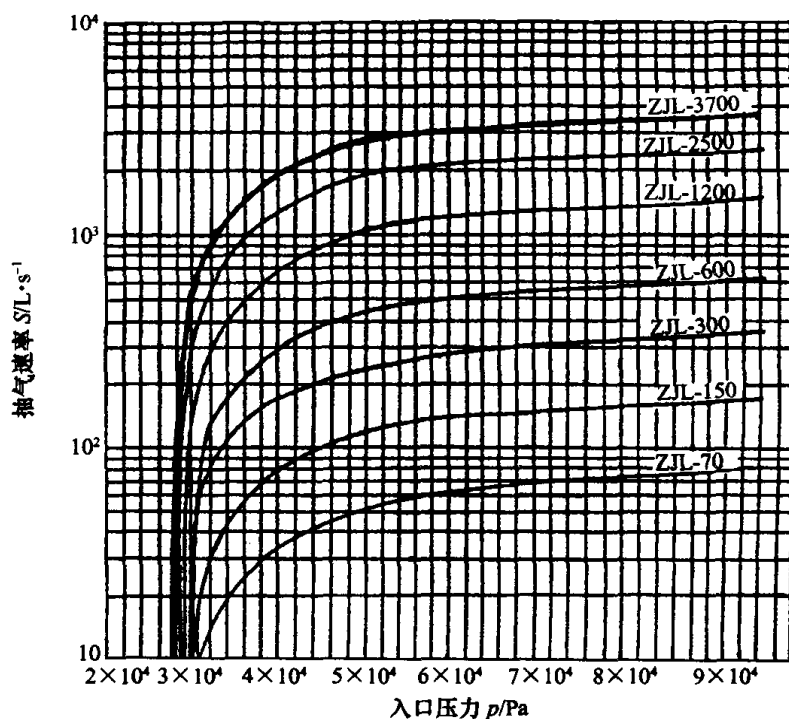


图 3-60 ZJL 型罗茨泵抽速与进气口压力性能曲线
(上海真空泵厂生产)

③LQ 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线如图 3-61 所示。

3. 外形及安装尺寸

①浙江真空设备集团有限公司生产的 ZJ 型、ZJP 型、LQ 型罗茨真空泵外形及安装尺寸见表 3-92~表 3-95。

六、罗茨式真空泵

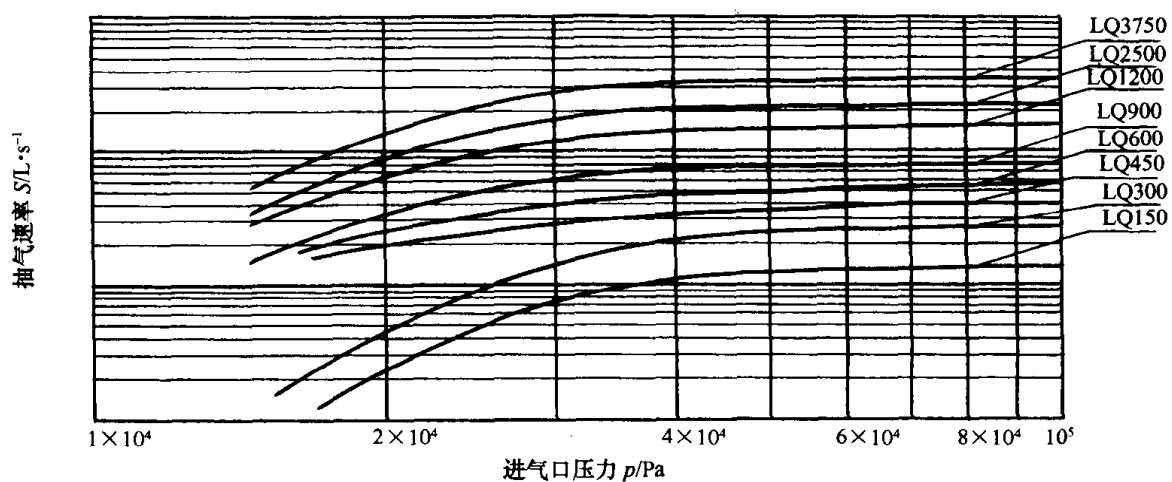
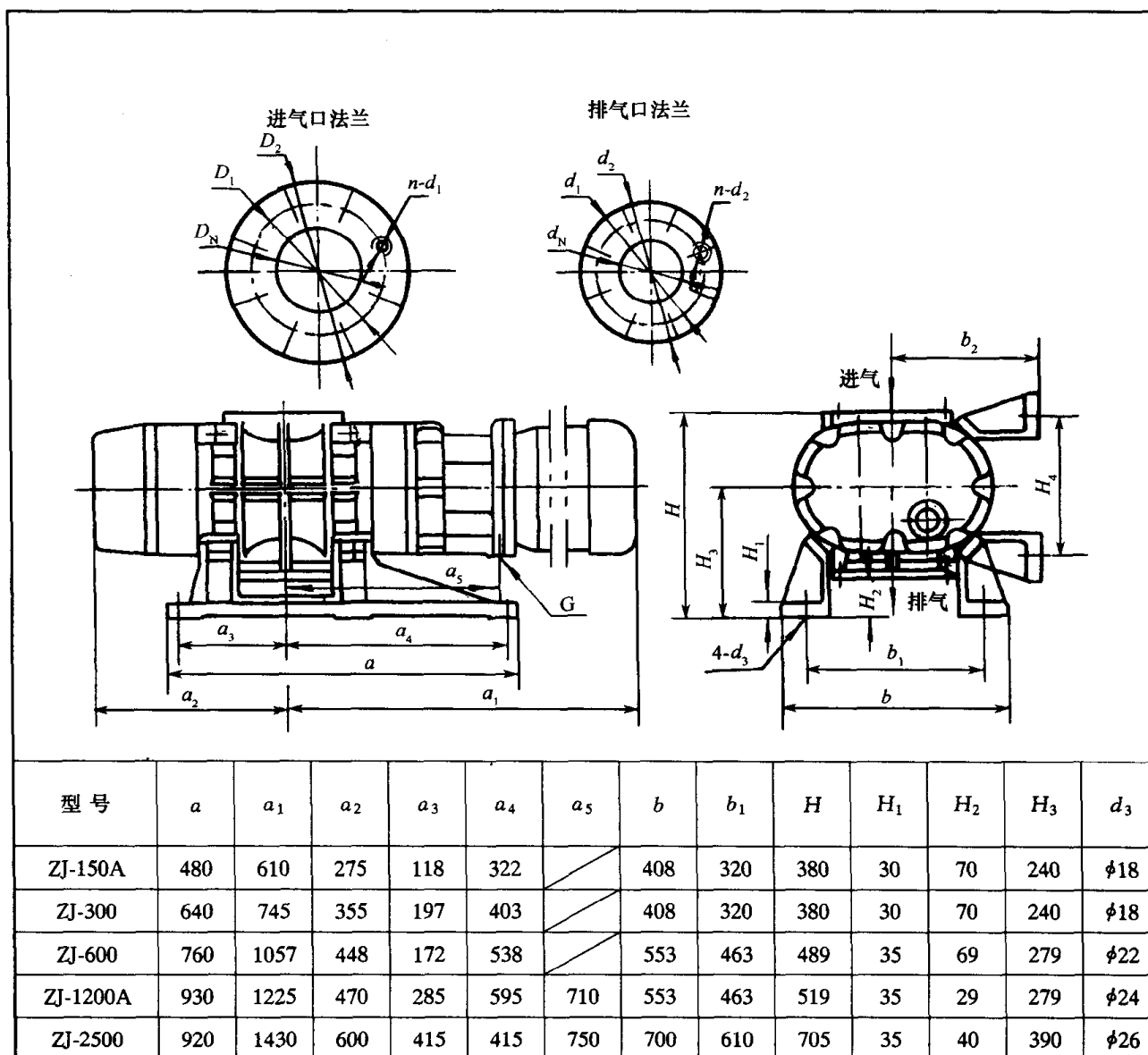


图 3-61 LQ 型罗茨真空泵抽速与进气口压力性能曲线

(浙江真空设备集团有限公司生产)

表 3-92 ZJ 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(续)

型 号	D_N	D_1	D_2	$n-d_1$	d_N	d_1	d_2	$n-d_2$	G	H_4	b_2
ZJ-150A	100	145	170	4-M10	100	145	170	4-M10	M16	260	270
ZJ-300	150	195	220	8-M10	150	195	220	8-M10	M16	260	270
ZJ-600	200	250	285	8-M10	150	195	220	8-M12	M20	323	349
ZJ-1200A	250	310	335	12-M10	200	260	285	12-M10	M20	—	—
ZJ-2500	320	395	425	12-M12	320	395	425	12-M12	M24	—	—

表 3-93 ZJ 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

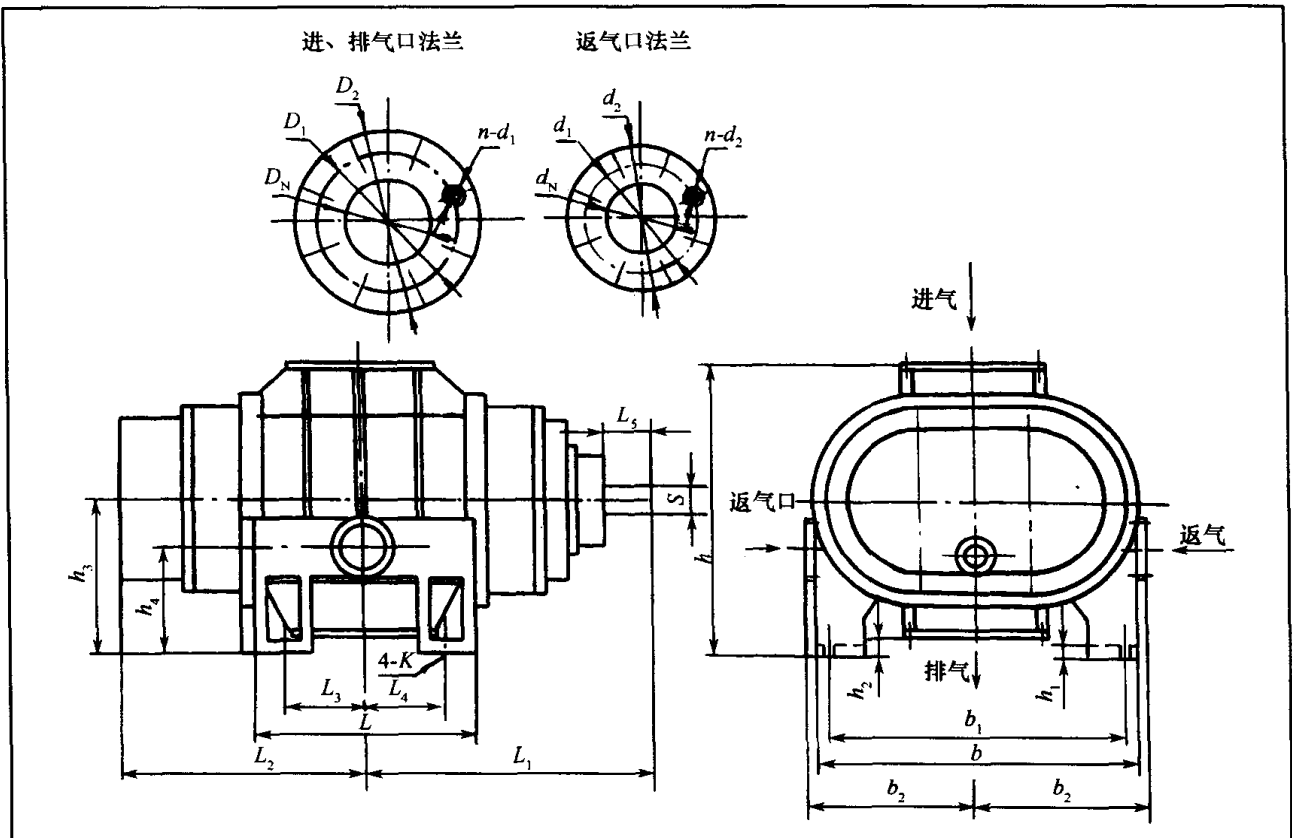
(单位:mm)

型 号	a	a_1	a_2	a_3	b	b_1	b_2	H	H_1	H_2	H_3	H_4	S	d_3
ZJ-5000	835	996	778	327.5	1140	1020	575	1050	50	40	600	250	75	$\phi 33$
ZJ-10000	1140	1235	1005	470	1660	1400	835	1440	60	50	800	300	95	$\phi 33$
型 号	L	D_N	D_1	D_2	$n-d_1$	d_N	d_1	d_2	$n-d_2$	N_N	N_1	N_2	$n-d_4$	
ZJ-5000	140	400	480	510	16-M12	320	395	425	12-M12	320	395	425	12-M12	
ZJ-10000	155	500	580	610	16-M12	500	580	610	16-M12	400	480	510	16-M12	

六、罗茨式真空泵

表 3-94 LQ 型罗茨泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



型 号	L	L_1	L_2	L_3	L_4	b	b_1	b_2	h	h_1	h_2	h_3
LQ-150	210	410	330	72.5	72.5	370	310	210	385	25	25	205
LQ-300	280	510	415	90	90	520	440	275	470	25	30	250
LQ-450	390	650	520	140	140	650	560	335	600	30	40	320
LQ-600	390	650	520	140	140	650	560	335	600	30	40	320
LQ-900	480	485	745	180	180	780	650	450	750	40	30	400
LQ-1200	480	485	745	180	180	780	650	450	750	40	30	400
LQ-2500	780	880	1040	290	290	1160	1060	590	1060	50	60	560
LQ-3750	780	880	1040	290	290	1160	1060	590	1060	50	60	560
型 号	h_4	K	D	D_1	D_2	$n-d_1$	d	d_1	d_2	$n-d_2$	S	L_5
LQ-150	165	$\phi 14$	100	145	165	8-M8	63	110	130	4-M8	42	60
LQ-300	168	$\phi 20$	160	200	225	8-M10	100	145	165	8-M8	50	80
LQ-450	235	$\phi 22$	200	260	285	12-M10	100	145	165	8-M8	60	100
LQ-600	235	$\phi 22$	200	260	285	12-M10	100	145	165	8-M8	60	100
LQ-900	270	$\phi 25$	250	310	335	12-M10	160	200	225	8-M10	75	130
LQ-1200	270	$\phi 25$	250	310	335	12-M10	160	200	225	8-M10	75	130
LQ-2500	390	$\phi 28$	400	480	510	16-M12	160	200	225	8-M10	100	170
LQ-3750	390	$\phi 28$	400	480	510	16-M12	160	200	225	8-M10	100	170

表 3-95 ZJP 型罗茨泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

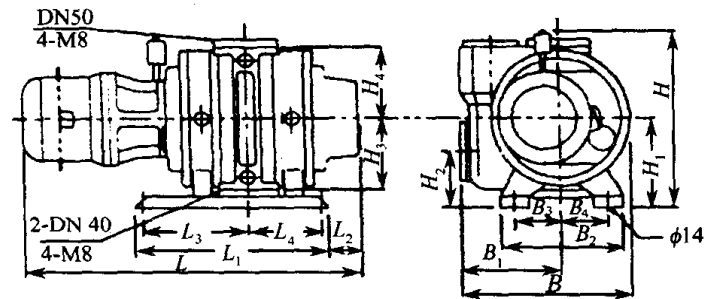
注: ZJP-30、ZJP-70 排气口没有带密封槽。														
型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	b	b ₁	b ₂	H	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄
ZJP-30	80	505	215	27	27	—	184	162	—	278	15	—	128	—
ZJP-70	188	557	270	83	83	304	184	162	—	240	22	17	125	—
ZJP-150	620	578	297	195	385	281	408	320	285	475	30	90	275	190
ZJP-300	780	756	334	275	465	364	408	320	285	525	30	90	315	215
ZJP-600	815	970	415	277.5	482.5	552	596	480	375	673	35	70	375	235
ZJP-1200A	1000	1230	470	316	632	710	650	520	430	675	35	65	395	250
ZJP-2500	920	1430	600	415	415	750	700	610	460	705	35	40	390	220
型 号	φ ₄	D	D ₁	D ₂	n-φ ₁	d	d ₁	d ₂	n-φ ₂	N	N ₁	N ₂	n-φ ₃	G
ZJP-30	φ9	50	90	110	4-M8	40	80	100	4-M6	—	—	—	—	—
ZJP-70	φ8	80	125	145	4-M8	50	90	110	4-M8	—	—	—	—	M10
ZJP-150	φ18	100	145	170	4-M10	100	145	170	4-M10	100	145	170	4-M10	M10
ZJP-300	φ18	150	195	220	8-M10	150	195	220	8-M10	150	195	220	8-M10	M10
ZJP-600	φ24	200	250	275	8-M10	200	250	275	8-M10	200	250	275	8-M10	M20
ZJP-1200A	φ24	250	310	335	12-M10	200	260	285	12-M10	200	260	285	12-M10	M20
ZJP-2500	φ26	320	395	425	12-M12	320	395	425	12-M12	250	310	335	12-M10	M24

六、罗茨式真空泵

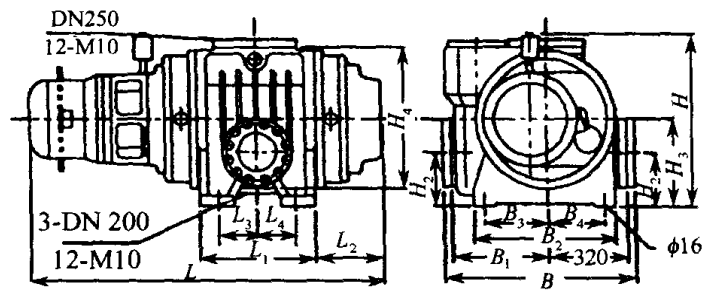
②成都国投南光有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵外形及安装尺寸见表 3-96。与 ZJP 型罗茨真空泵接口法兰尺寸见表 3-97。

表 3-96 ZJP 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(a) ZJP-30、ZJP-70、ZJP-150 型



(b) ZJP-300、ZJP-600、ZJP-1200 型

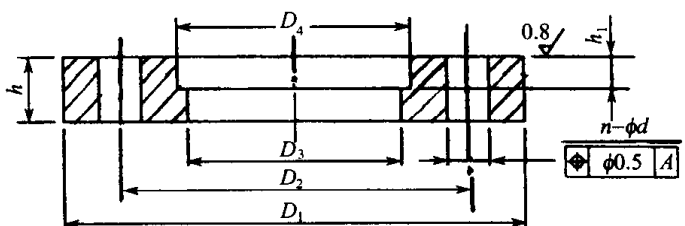
型 号	L	L_1	L_2	L_3	L_4	B	B_1	B_2	B_3
ZJP-30	600	330	70	190	110	265	145	170	65
ZJP-70	835	380	90	214	136	340	185	200	80
ZJP-150	875	230	120	100	100	440	245	310	140
ZJP-300	1075	360	140	160	160	515	340	215	150
ZJP-600	1250	350	190	140	140	606	275	460	210
ZJP-1200	1482	452	190	180	180	847	473	570	255

型 号	B_4	H	H_1	H_2	H_3	H_4	进排气口径/ D_N	
							进 气	排 气
ZJP-30	65	310	150	90	125	125	50	40
ZJP-70	80	390	180	110	142	142	80	50
ZJP-150	120	402	200	150	175	175	100	80
ZJP-300	130	500	240	120	200	200	160	100
ZJP-600	190	574	280	130	250	240	200	160
ZJP-1200	210	690	360	207	300	300	250	200

注:成都国投南光有限公司生产

表 3-97 ZJP 型罗茨真空泵接口尺寸

(单位:mm)

							
通 径	D_1	D_2	D_3	D_4	h	h_1	$n-\phi d$
40	100	80	41	41.2	12	2.5	4- $\phi 9$
50	110	90	51	52.2	12	2.5	4- $\phi 9$
80	145	125	83	83	12	4.5	8- $\phi 9$
100	165	145	102	102	12	4.5	8- $\phi 9$
160	225	200	153	153	16	4.5	8- $\phi 11$
200	285	260	213	213	16	4.5	12- $\phi 11$
250	335	310	261	261	16	4.5	12- $\phi 11$

注:成都国投南光有限公司生产

③台州星光真空设备制造有限公司生产的 ZJP 型罗茨真空泵外形及安装尺寸如图 3-62 ~3-65 所示,ZJY 系列罗茨泵外形及安装尺寸见表 3-98。

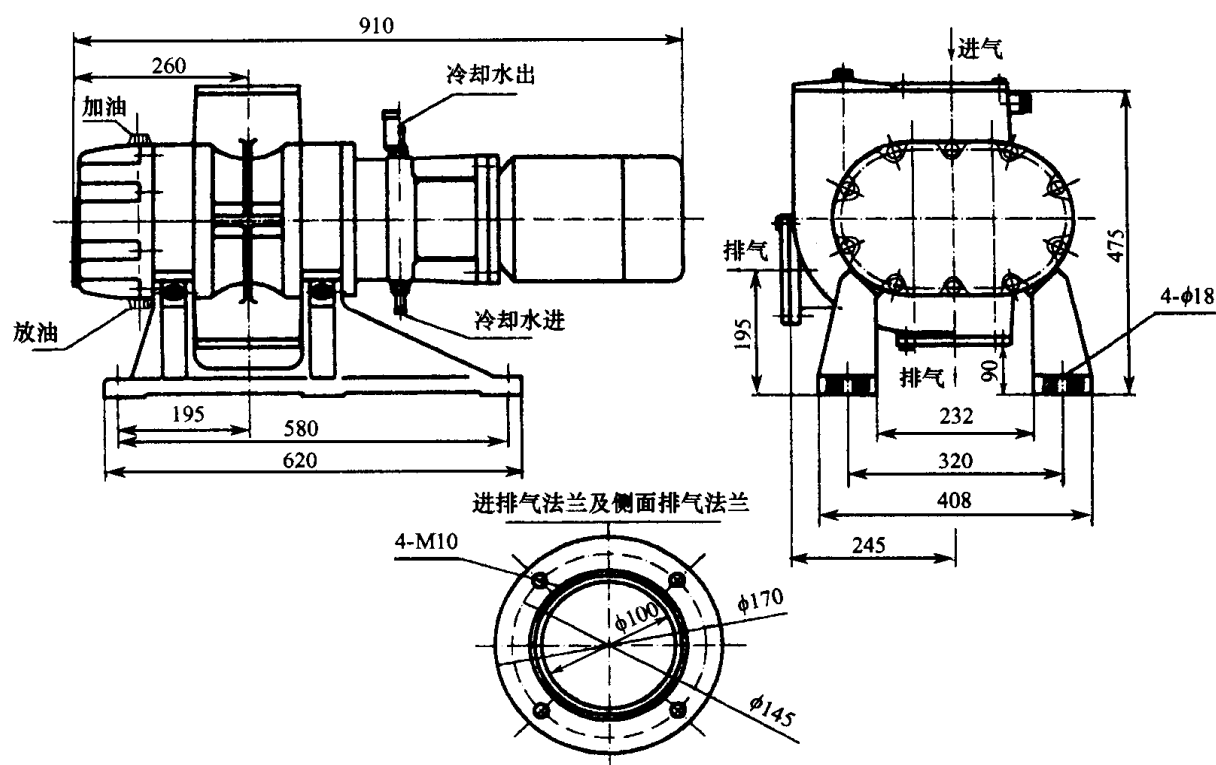


图 3-62 ZJP-70、ZJP-150 型罗茨泵外形及安装尺寸

六、罗茨式真空泵

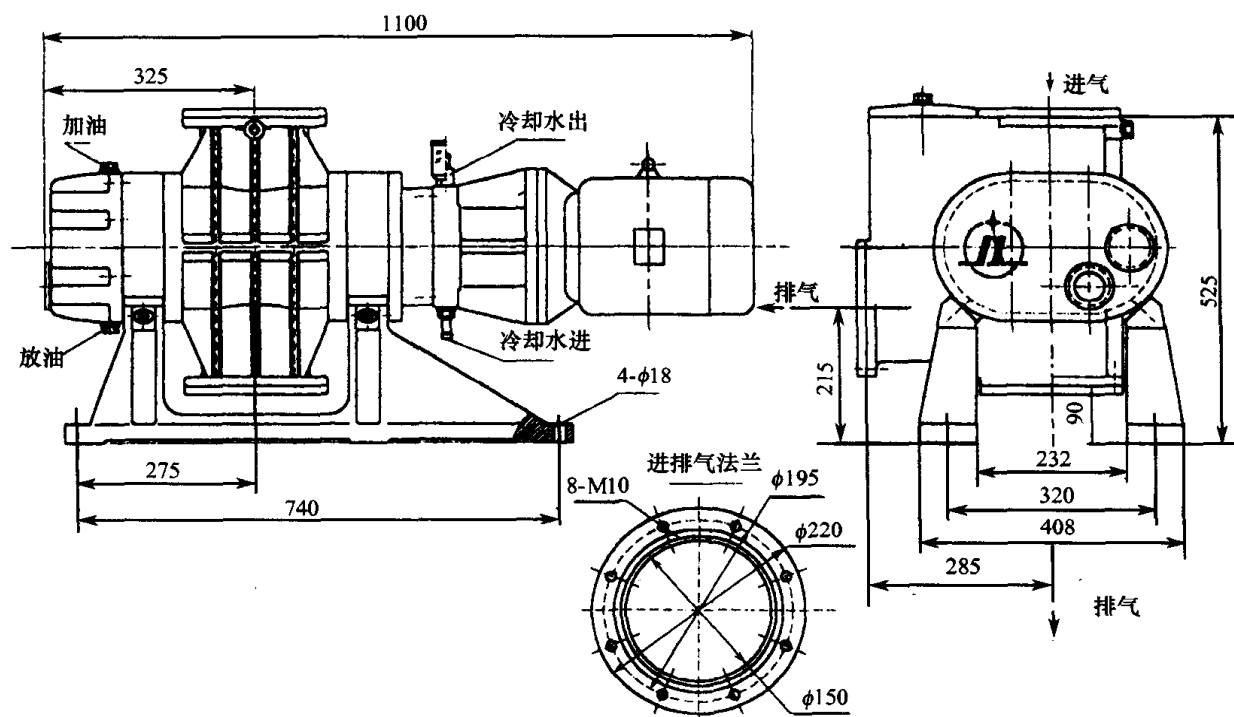


图 3-63 ZJP-300 型罗茨泵外形及安装尺寸

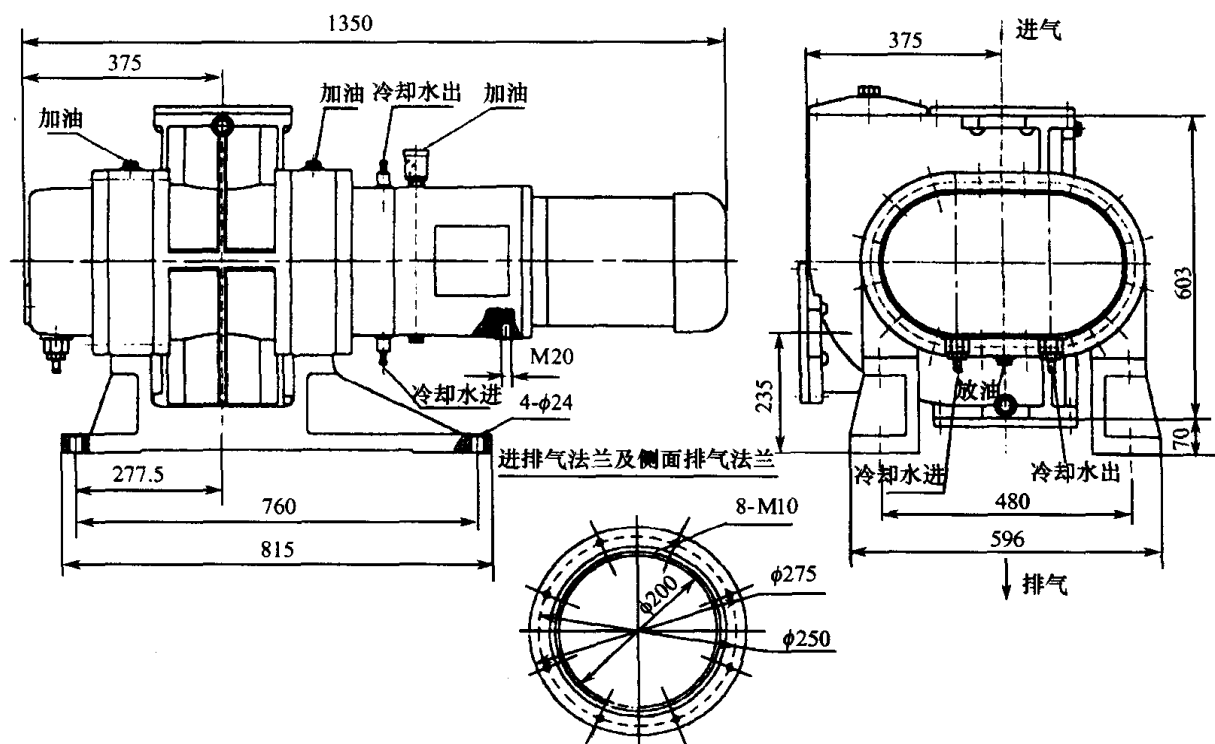


图 3-64 ZJP-600 型罗茨泵外形及安装尺寸

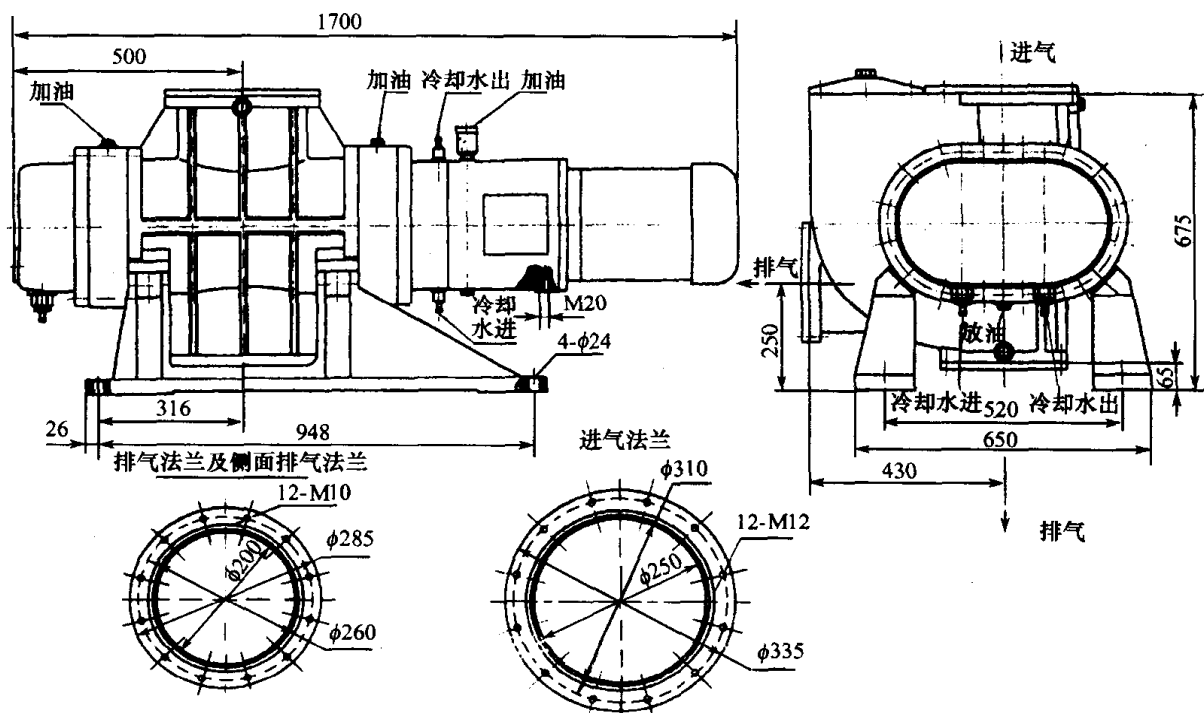
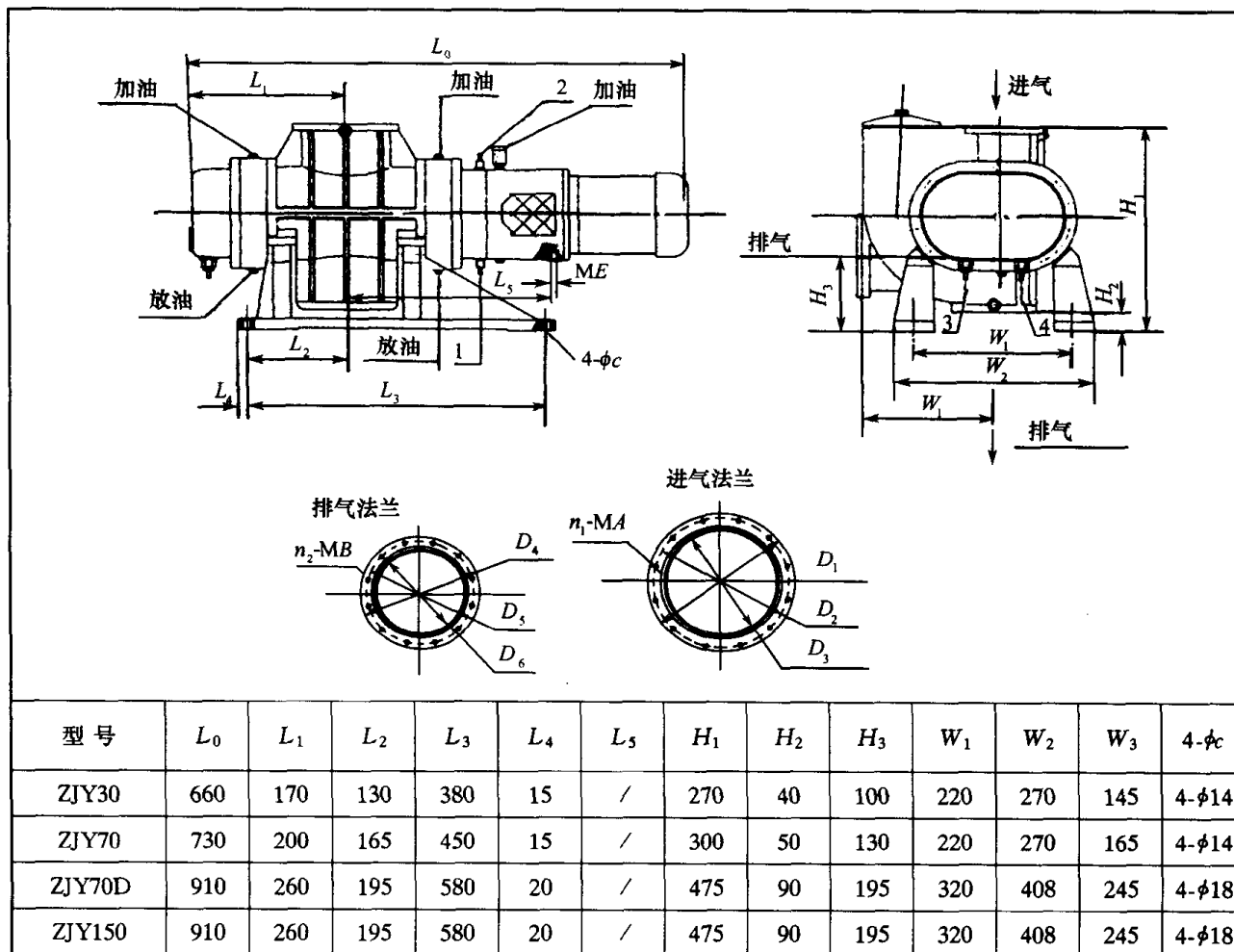


图 3-65 ZJP-1200 型罗茨泵外形及安装尺寸

表 3-98 ZJY 系列罗茨泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



六、罗茨式真空泵

(续)

型 号	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	H_1	H_2	H_3	W_1	W_2	W_3	4- ϕ_c
ZJY300	1100	325	275	740	20	/	525	90	215	320	408	285	4- $\phi 18$
ZJY600	1350	375	277.5	760	27.5	537	673	70	235	480	596	375	4- $\phi 24$
ZJY1200	1700	500	316	948	26	678	675	65	250	520	650	430	4- $\phi 24$
型 号	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	n_1 -MA	n_2 -MB	ME	冷却水进水软管冷却水出水软管			
										1	2	3	4
ZJY30	110	90	50	100	80	40	4-M8	4-M8	/		/	/	/
ZJY70	145	125	80	110	90	50	8-M8	4-M8	/	/	/	/	/
ZJY70D	170	145	100	170	145	100	4-M10	4-M10	/	$\phi 8$	/	$\phi 8$	/
ZJY150	170	145	100	170	145	100	4-M10	4-M10	/	$\phi 8$	/	$\phi 8$	/
ZJY300	220	195	150	220	195	150	8-M10	8-M10	/	$\phi 8$	/	$\phi 8$	/
ZJY600	275	250	200	275	250	200	8-M10	8-M10	M20	$\phi 8$	$\phi 12$	$\phi 8$	$\phi 12$
ZJY1200	335	310	250	285	260	200	12-M10	12-M10	M20	$\phi 8$	$\phi 12$	$\phi 8$	$\phi 12$

④山东淄博真空设备厂有限公司生产的 ZJ 系列罗茨泵外形及安装尺寸见表 3-99。

⑤上海真空泵厂生产的 ZJL 型罗茨真空泵外形及安装尺寸见表 3-100; 其外形及安装尺寸如图 3-66 所示。

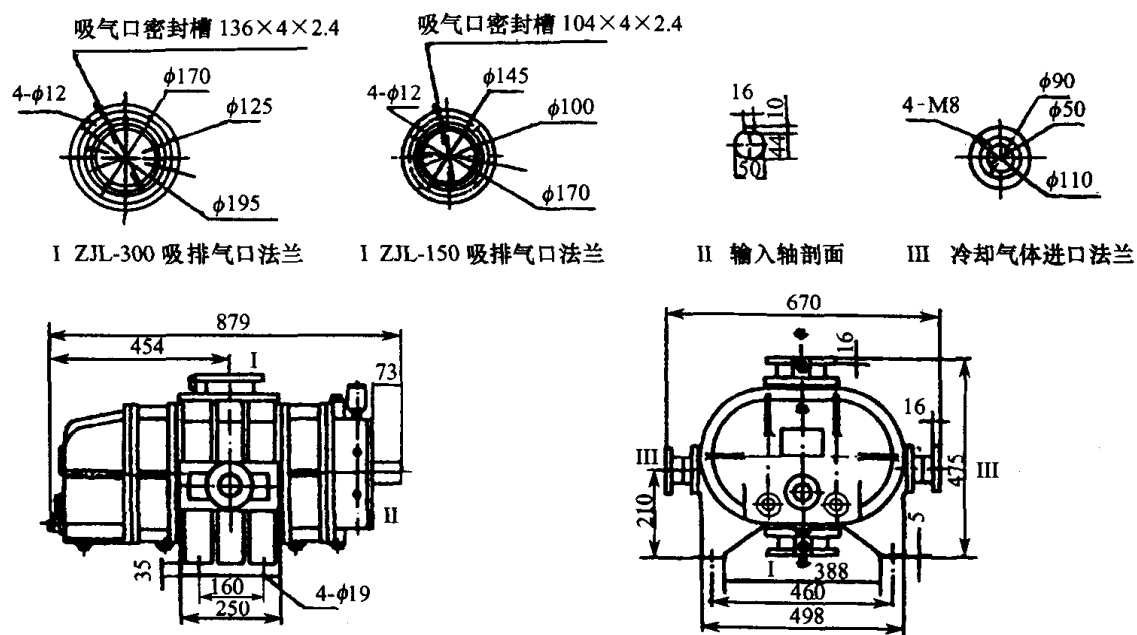
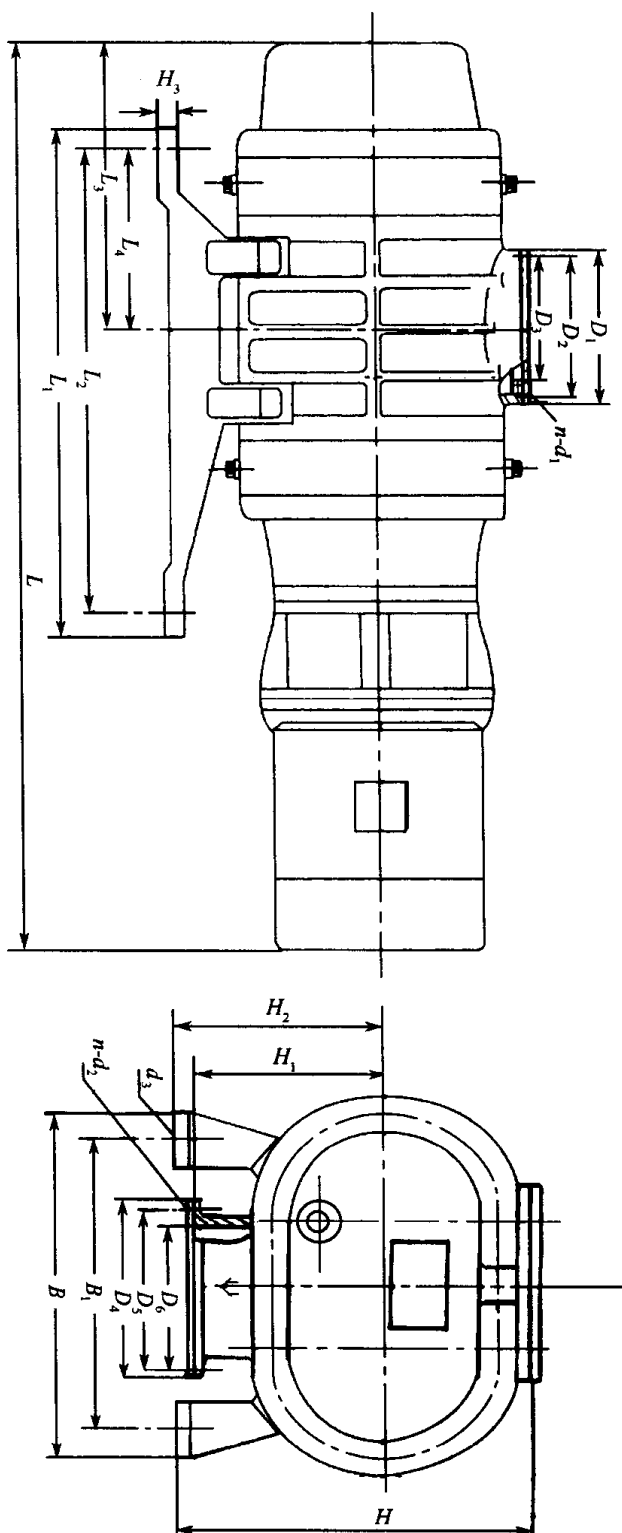


图 3-66 ZJL-150、ZJL-300 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

⑥沈阳恒星实业有限公司生产的 ZJ 型罗茨真空泵外形及安装尺寸如图 3-67 所示; 其外形及安装尺寸见表 3-101、表 3-102。

表 3-99 ZJ 系列罗茨泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



型 号	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	B	B ₁	H	H ₁	H ₂	H ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	n-d ₁	n-d ₂	d ₃
ZJ-70	727	380	340	205	105	317	257	331	191	126	20	145	125	80	110	90	50	8-M8	8-M8	18
ZJ-150	865	460	420	248	134	317	257	331	191	126	20	465	145	100	145	125	80	8-M8	8-M8	18
ZJ-300	1070	540	500	290	162	411	351	342	196	156	20	225	200	160	165	145	100	8-M10	8-M8	18
ZJ-600	1315	750	700	344	175	411	386	416	226	180	20	285	260	200	225	200	160	8-M12	8-M12	22
ZJ-1200	1656	910	860	454	285	411	386	416	226	180	20	335	310	250	285	260	200	8-M12	8-M12	22

六、罗茨式真空泵

表 3-100 ZJL 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

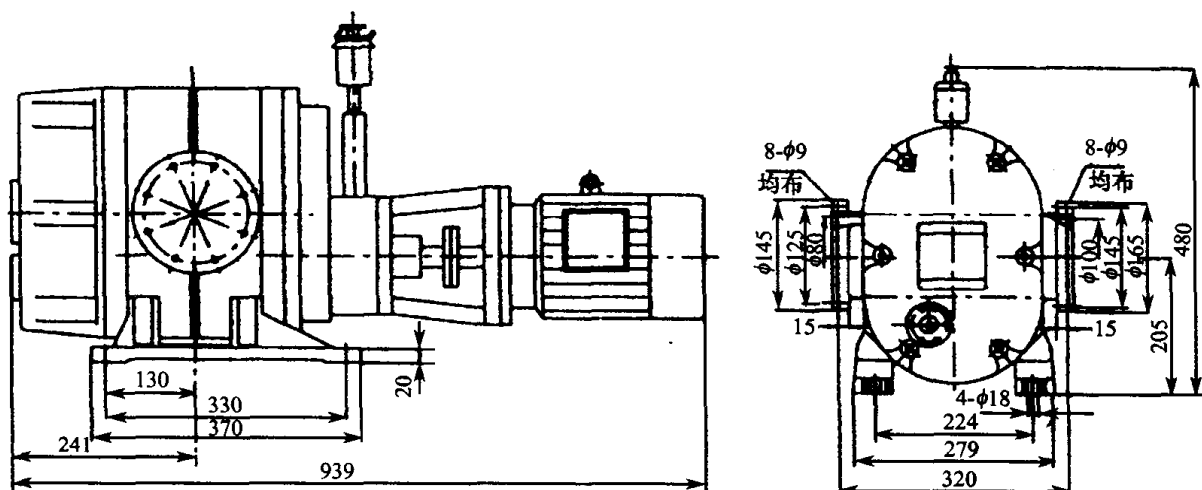
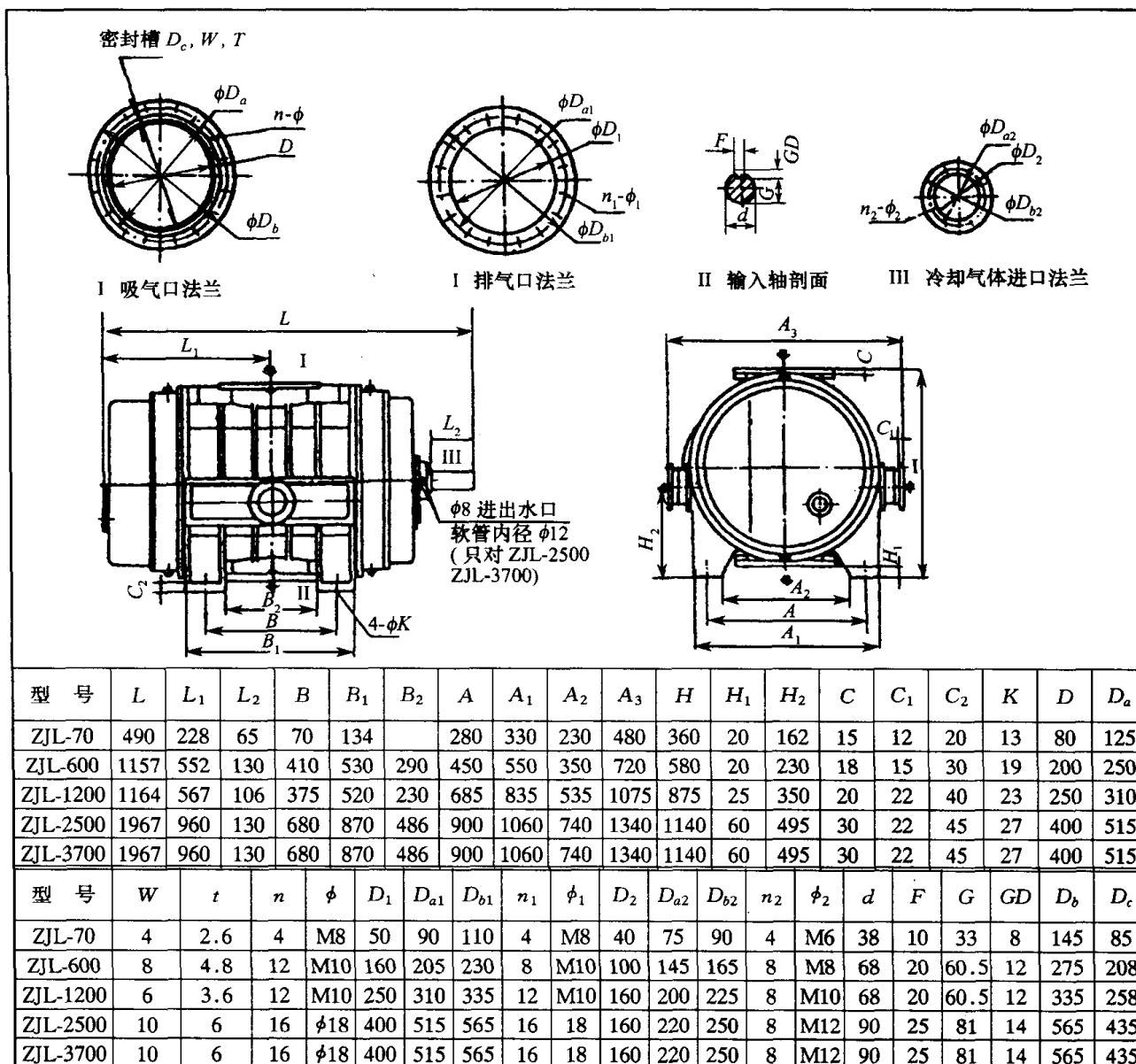


图 3-67 ZJ-150 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

表 3-101 ZJ 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

The image contains two technical drawings of a vacuum pump assembly. The top drawing is a front view showing the main body, motor, and various ports. Dimensions labeled include A (total height), B (height to top flange), C (flange thickness), R (radius), D (base width), E (base height), F (motor base height), G (total motor height), H (total assembly height), I (motor base diameter), J (motor base length), K (motor base width), L (motor base length), M (motor base length), N (motor base length), O (motor base length), P (motor base length), Q (motor base length), R (motor base length), S (motor base length), T (motor base length), V (motor base length), and W (motor base length). The bottom drawing is a side view showing the pump's profile and internal components. Dimensions labeled include Ø (overall diameter), f (flange thickness), M (flange width), L (flange length), S (flange thickness), I (flange length), N (flange length), O (flange length), K (flange length), P (flange length), and Q (flange length).

型号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	W
ZJ-150A	φ165	φ145	8-φ9	241	130	330	370	939	4-φ18	320	275	330	160	φ125	φ145	8-M9	340	φ100	20	15	φ80	15
ZJ-300	φ225	φ200	8-φ11	300	170	525	565	1107	4-φ18	380	333	408	190	φ145	φ165	8-M8	410	φ160	25	20	φ100	20
ZJ-600	φ285	φ260	12-φ11	397	222	660	704	1355	4-φ20	460	410	510	230	φ200	φ225	8-M10	515	φ200	35	25	φ160	25
ZJ-1200	φ335	φ310	12-φ11	436	285	860	910	1590	4-φ22	530	450	550	265	φ260	φ285	12-M10	610	φ240	35	28	φ200	25

注:沈阳恒星实业有限公司生产

(单位:mm)

表 3-102 ZJ-150B、ZJ-300A、ZJ-600A、ZJ-1200A 型罗茨真空泵外形及安装尺寸

The image contains two technical drawings of a vacuum pump assembly. The left drawing is a front view showing the pump body, motor, and various ports. Dimensions labeled include A (total width), B (motor width), R (port offset), C (port diameter), D (base width), E (base height), F (total height), G (motor height), H (total height), I (flange diameter), J (flange offset), K (flange width), L (flange offset), M (flange width), N (flange offset), O (flange width), P (flange offset), Q (flange width), R (flange offset), S (flange width), T (flange offset), V (flange width), and W (flange offset). The right drawing is a side view showing the pump body, motor, and various ports. Dimensions labeled include A (total width), B (motor width), R (port offset), C (port diameter), D (base width), E (base height), F (total height), G (motor height), H (total height), I (flange diameter), J (flange offset), K (flange width), L (flange offset), M (flange width), N (flange offset), O (flange width), P (flange offset), Q (flange width), R (flange offset), S (flange width), T (flange offset), V (flange width), and W (flange offset).

型号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	W
ZJ-150B	φ165	φ145	8-φ9	241	130	330	370	939	4-φ18	280	275	335	380	φ125	φ145	8-M8	357	φ100	20	15	φ80	15
ZJ-300A	φ225	φ200	8-φ11	300	185	480	535	1107	4-φ18	330	260	330	420	φ145	φ165	8-M8	425	φ160	25	20	φ100	20
ZJ-600A	φ285	φ260	12-φ11	397	222	660	704	1355	4-φ20	415	318	408	504	φ200	φ225	8-M10	550	φ200	35	25	φ160	25
ZJ-1200A	φ335	φ310	12-φ11	436	285	860	910	1590	4-φ22	485	450	550	610	φ260	φ285	12-M10	650	φ240	35	28	φ200	25

注:沈阳恒星实业有限公司生产

⑦抚顺真空设备厂生产的 ZJ-150C、ZJ-300、ZJ-600C 型罗茨泵外形及安装尺寸如图 3-68 ~ 图 3-71 所示。

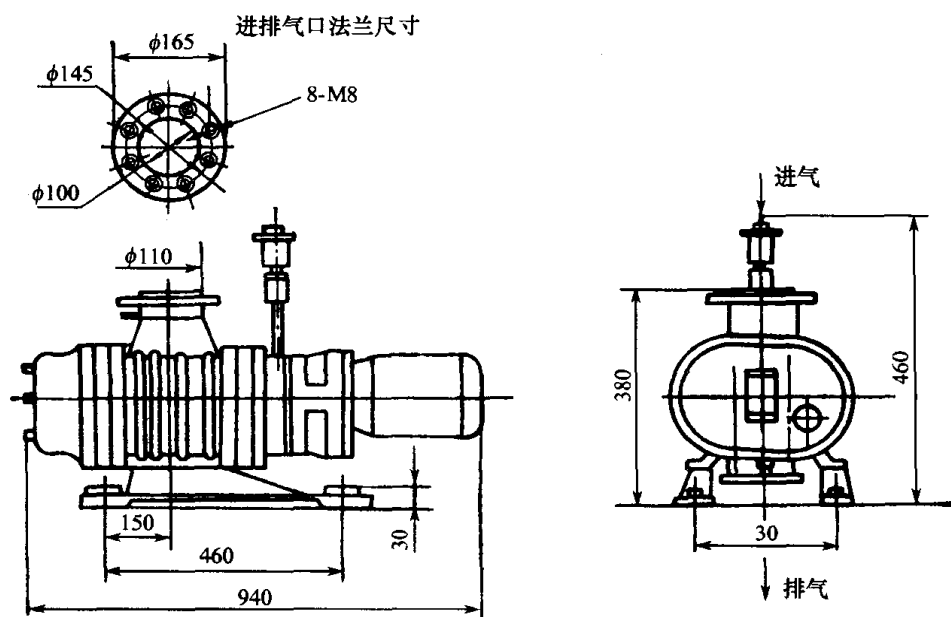


图 3-68 ZJ-150C 型罗茨泵外形及安装尺寸

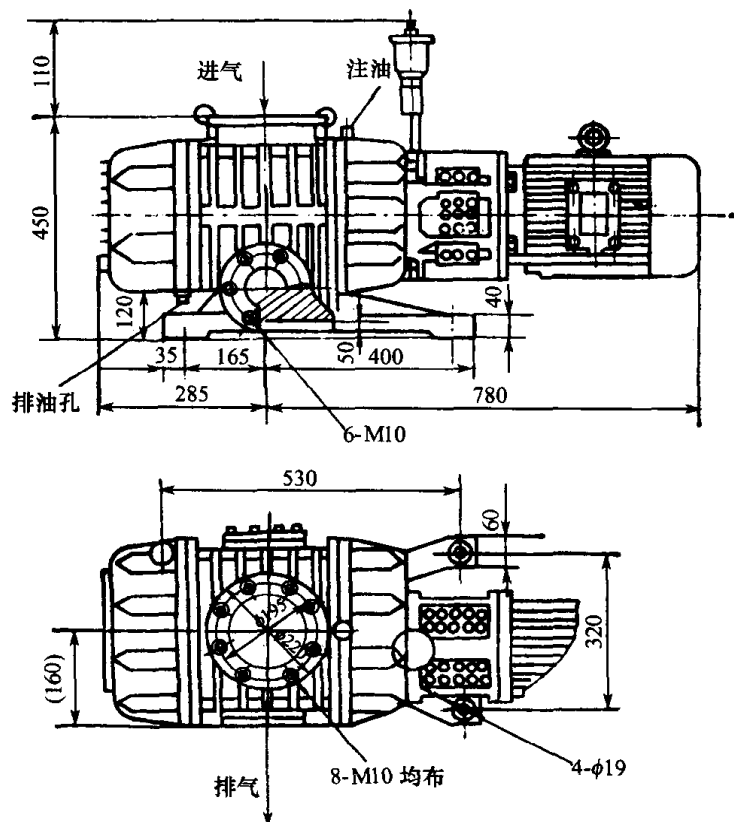


图 3-69 ZJ-300 型罗茨泵外形及安装尺寸

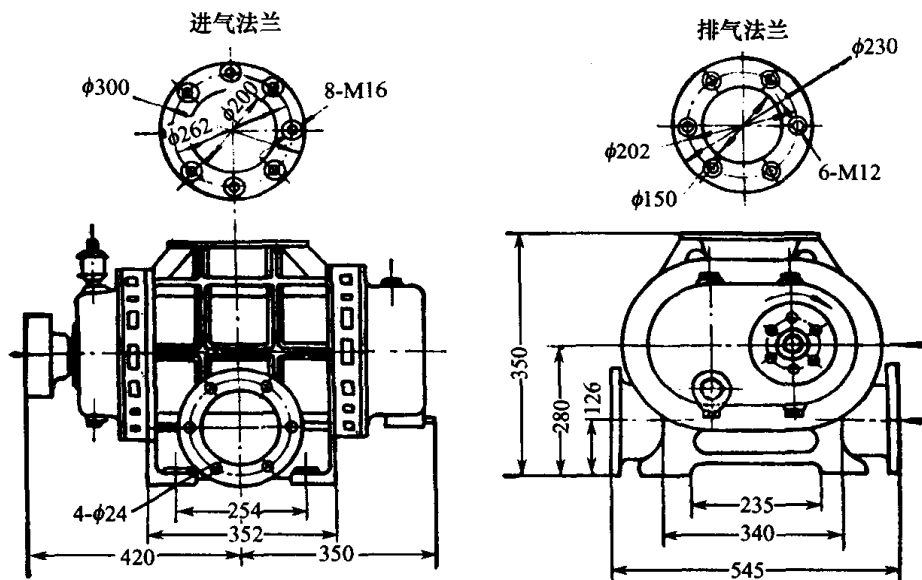


图 3-70 ZJ-600C 型罗茨泵外形及安装尺寸

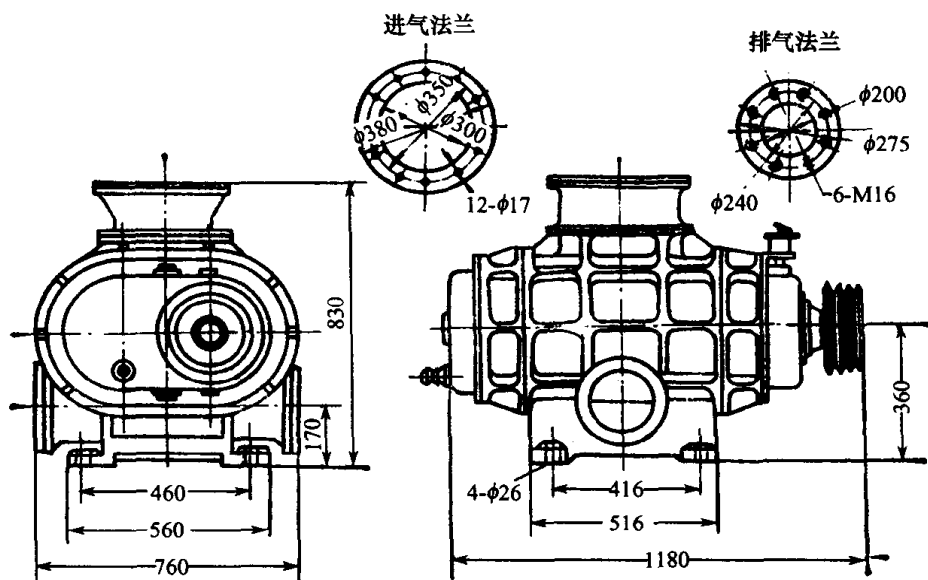


图 3-71 ZJ-1200 型罗茨泵外形及安装尺寸

七、涡轮分子泵

(一) 概述

涡轮分子泵是靠高速转动的转子携带气体分子获得超高真空的一种机械真空泵。工作压力范围为 $1\text{Pa} \sim 10^{-8}\text{Pa}$, 抽气速率一般在 5000L/s 以下。先进的泵可以获得 10^{-9}Pa 的极限压力, 泵的转速为 $10000\text{r/min} \sim 50000\text{r/min}$, 这种泵的抽速范围很宽, 在九个数量级间具有恒定的抽速。分子泵主要用作超高真空泵和高真空泵, 但它不能直接对大气排气, 需要配置前级泵, 并且其主要性能(如极限压力和抽速)都和配置的前级泵的容量、转数, 被抽气体的种类有关。分子泵对较轻的气体抽速较大, 对氢的抽速比对空气的抽速大 20%。

我国在涡轮分子泵的研究和生产方面进展很快。在 20 世纪 60 年代研制成功的卧式涡轮

分子泵的基础上,很快发展了铣制和扭制叶片的两种立式涡轮分子泵系列产品。抽速范围为 110L/s、150L/s、450L/s、550L/s、600L/s、1200L/s、1500L/s 和 3500L/s 等多种规格。我国制定了立式涡轮分子泵行业标准(JB/T 9125—95)和涡轮分子泵性能测试方法国家标准(GB7774-87),并将磁悬式轴承用于涡轮分子泵中。

近 10 年来,由于轴承和高速旋转以及数控加工技术的不断发展,使国际上涡轮分子泵的研制取得了长足的进步,抽速从 50L/s 已发展到 25000L/s(日本)甚至达 40000L/s(俄罗斯)。

在以机械运动的各类真空泵中分子泵是一种结构精密、工艺要求高的泵。泵的动、静叶片的几何形状与抽速有很大关系,需要特殊的工艺加工来保证叶片的尺寸和精度。同时要求转子有很好的动平衡,动叶片应具有高强度以承受高速转动产生的离心力,保证泵的运转可靠。

分子泵由置于泵体内的中频电机直接驱动,涡轮转子为整体式结构;该泵对大分子量的气体有较高的压缩比,且中频电机置于前级空间,能获得清洁的高真空和超高真空;它的性能特点是:结构紧凑,工作压力范围宽,在 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-7}\text{Pa}$ 范围内具有稳定的抽速;工作平稳,由于采用了精密轴承,严格的动平衡工艺和一系列的减振措施,因而泵的振动小、噪声低、启动时间短,一般在 4min~15min 内能达到满抽速;标准化的法兰连接尺寸,垂直结构,使其便于与真空系统连接。

随着涡轮分子泵的结构不断改善,用途越来越广。在某些应用领域已有代替油扩散泵的倾向。它适用于在要求清洁的高真空和超高真空的仪器设备上使用,如高能加速器、核聚变反应装置、宇航模拟、真空镀膜、真空冶炼、半导体提纯、大型电子管排气等。

目前磁悬浮式涡轮分子泵已达到实用化程度,使涡轮分子泵向高流量、高出口压力方向发展。这样分子泵不仅在极高和超高真空范围内应用,还可用于高真空和中真空范围。现已成为获得清洁真空的主要设备(如干式分子泵的出现),应用领域在不断扩大。

(二) 涡轮分子泵结构原理

涡轮式分子泵的结构示意图和涡轮叶片展开图,如图 3-72 及图 3-73 所示。

分子泵的转子和定子都装有多层涡轮叶片,转子与定片叶片的倾斜面方向相反,每一个转片处于两个定片之间。分子泵工作时,转子高速旋转,迫使气体分子通过叶片从泵的上部流向出口,从而产生抽气作用。排出的气体经排气管道由前级泵抽走。

(三) 立式涡轮分子泵行业标准(摘自 JB/T9125—99)

1. 范围

本标准适用于具有前级泵、变频电源的立式涡轮分子泵(以下简称泵)。

2. 定义

本标准采用下列定义。

①抽气速率。泵在正常工作条件下,单位时间内被抽气体通过测试罩流经分子泵进气口的体积,即气体流量与测试罩规定位置测得的平衡压力之商。

②极限压力。泵在规定的工作条件下,不向测试罩引入气体,泵壳和测试罩经烘烤后 48h 内在测试罩规定位置测得的平衡压力。

③压缩比。通过泵进气口的气流量为零,被抽气体在前级区的分压力至少占全压力的 90% 以上,泵的前级压力与进气口压力之比为分子泵对该气体的压缩比。

④启动时间。从接通电源到泵转速达到额定转速的 90% 所需的时间。

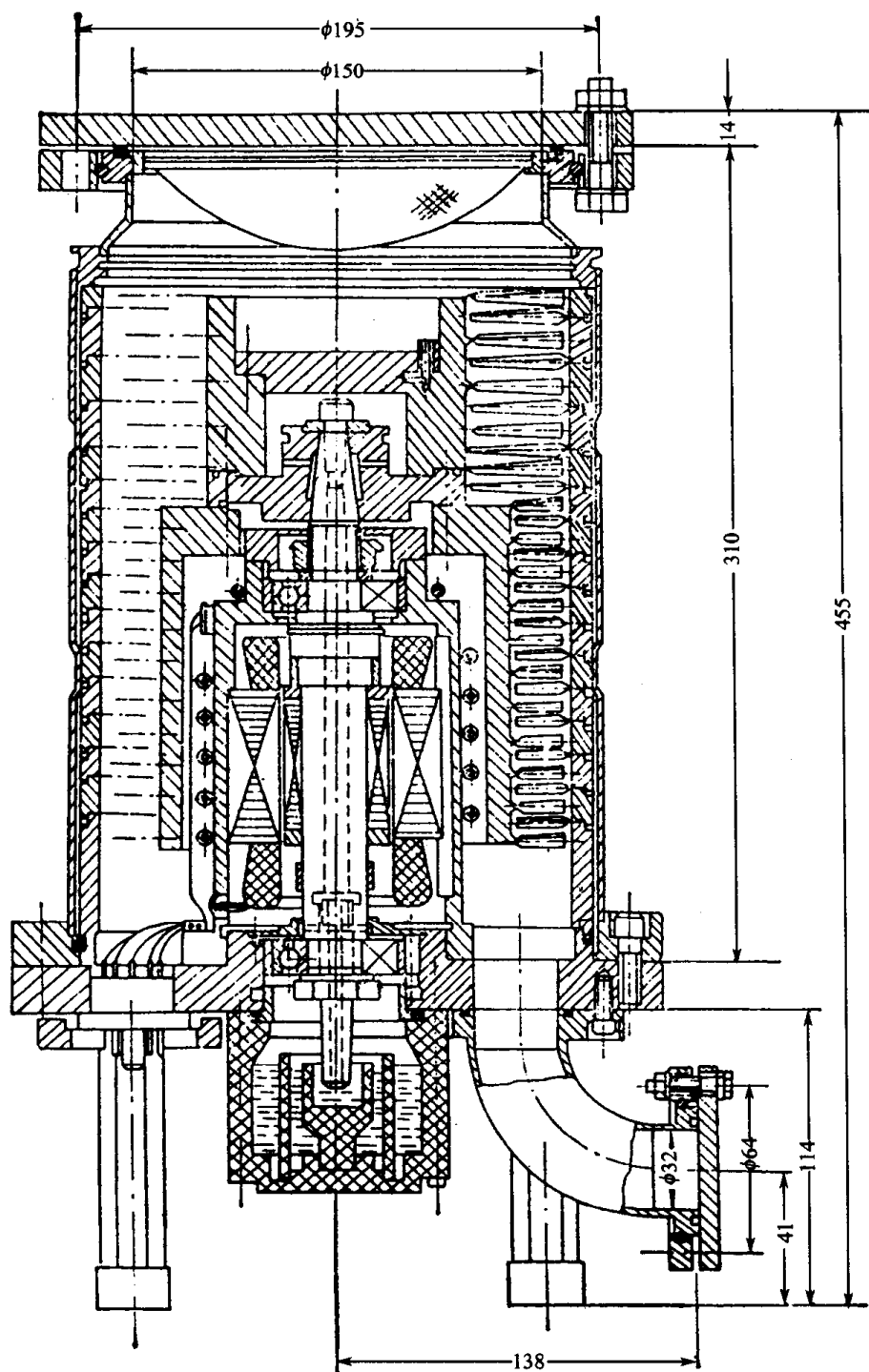


图 3-72 涡轮分子泵结构示意图

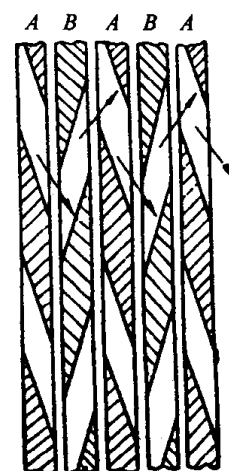
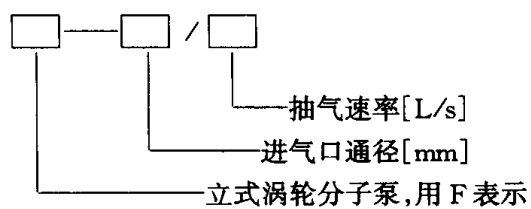


图 3-73 涡轮叶片
展开图

A—定片;B—转片。

3. 型式

①型号表示方法。泵型号按下列规定来表示:



②标记示例。进气口通径为 100mm,抽气速率为 220L/s 的立式涡轮分子泵,标记为:F-100/220。

4. 基本参数

泵的基本参数见表 3-103。

表 3-103 泵的基本参数

型 号		F-100/110	F-100/220	F-160/450	F-250/1400	F-320/2000	F-400/3500
抽气速率 /L·s ⁻¹		110	220	450	1400	2000	3500
极限压力 /Pa		<10 ⁻⁸					
压缩比	对 N ₂	10 ⁸	10 ⁸	3×10 ⁸	9×10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰
	对 N ₂	5×10 ²	2.5×10 ³	6.3×10 ²	4×10 ⁴	10 ⁻¹	
启动时间 /min		<3		<5	<10	<20	<30
振动 /μm		<0.5					
噪声 /dB(A)		<70				<72	
进气口通径 /mm		100		160	250	320	400
出气口通径 /mm		25		40	63		100
电源 ^① 输入电压 /V		220±10%(50Hz)或 380±10%(50Hz)					
电源消耗功率 /W		<220		<440		<500	
电源启动功率 /W		<500		<2000			
注:①电源有以下三种类型:电子模拟式自动变频电源;微机程控式自动变频电源;电机变频式电源							

5. 技术要求

①泵的主要技术性能应符合表 3-103 和按规定程序批准的设计图样要求。

②泵在下列环境条件下应能正常工作:

- 环境温度为 4℃~40℃;
- 空气相对湿度小于 85%;
- 冷却水进水温度不高于 25℃。

③泵应避免抽除带粉尘、腐蚀性或爆炸性气体。泵在正常运转时不允许直接引入大气,不允许有强烈径向振动。

④为了除气目的,对泵壳、测试罩和真空测量规管进行烘烤,其烘烤温度不得超过以下规定:

- a. 泵体及泵壳上法兰:120℃;
- b. 测试罩或真空容器:300℃;
- c. 真空测量规管:400℃。

⑤推荐前级泵应符合表 3-104 的要求:

表 3-104 推荐前级泵技术参数要求

分子泵的抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	110	220	450	1400	2000	3500
前级泵的抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	≥ 2	≥ 4	≥ 8	≥ 30	≥ 40	≥ 70
前 级 压 力 Pa	10~1					

(四) 国产 F 型立式涡轮分子泵技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

1. 技术性能

- ①F 型立式涡轮分子泵技术性能见表 3-105。
- ②F 型涡轮分子真空泵技术性能见表 3-106。
- ③FD 系列分子泵电源见表 3-107。
- ④FD-110、FD-110A 型涡轮分子泵电源技术性能见表 3-108。
- ⑤B 系列涡轮分子泵电源技术参数见表 3-109。

2. 特性曲线

- ①F 系列涡轮分子真空泵抽速与进气口压力曲线如图 3-74 所示。

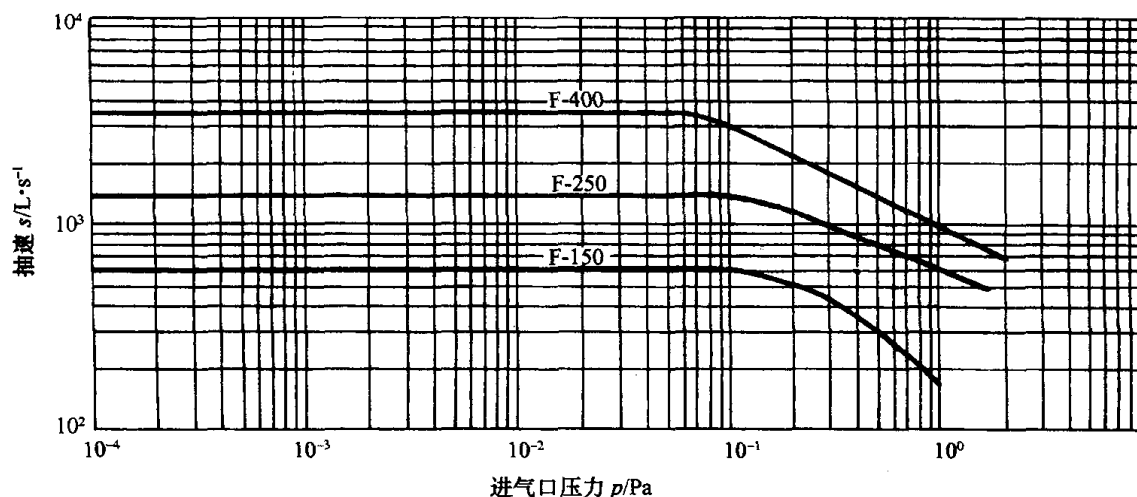


图 3-74 F 系列涡轮分子泵抽速与进气口压力曲线
(成都国投南光有限公司生产)

3. 外形及安装尺寸

①北京中科仪技术发展有限责任公司生产的 F 型涡轮分子泵外形及安装尺寸分别如图 3-75~图 3-77 所示;耐腐蚀涡轮分子泵 F-160/450N 如图 3-78 所示;FF 型复合分子泵外形及安装尺寸见表 3-111。

表 3-105 F 系列立式涡轮分子泵技术参数

型 号	F100/110	F160/450	FF160/500F	FF160/620	F160/800	FF200/1200	F250/1500	F400/3500
抽气速率 $/L \cdot s^{-1}$	110	450	500	600	800	1200	1500	3500
压缩比	10^8	10^8	10^9	10^9	$>10^9$	10^9	10^8	10^8
极限压力 $/Pa$	5×10^2	10^3	6×10^3	6×10^3	6×10^3	6×10^3	5×10^2	5×10^2
进气口法兰 $/mm$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$	$<6 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-7}$
排气口法兰 $/mm$	KF25	KF40	KF40	KF40	KF40	KF40	KF50	KF100
轴承	普通轴承	普通轴承	陶瓷	普通轴承或 油脂润滑轴承	普通轴承或 油脂润滑轴承	普通轴承或 油脂润滑轴承	普通轴承	陶瓷轴承
启动时间 $/min$	<2	<5	<5	<5	<5	<5	<8	<30
额定转速 $/r \cdot min^{-1}$	42300	24000	24000	27000	27000	24000	21000	13500
振动值 $/\mu m$	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.15
建议采用前 级泵 $/L \cdot s^{-1}$	2	4-8	4-8	4-8	4-8	4-8	15	30
充油量 $/mL$	2×6	110	150	150	150	150	150	150
安装方式	竖直或水平	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$	竖直 $\pm 5^\circ$
冷却方式	水冷	水冷	风冷, 室温 $<30^\circ C$	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷
冷却水温度 $/^\circ C$	≤ 25	≤ 25	/	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25
泵体烘烤温 度 $/^\circ C$	<120	<120	120	<120	<120	<120	<120	<80
环境温度 $/^\circ C$	$5 \sim 40$	$5 \sim 40$	<30	$5 \sim 40$	$5 \sim 40$	$5 \sim 40$	$5 \sim 40$	$5 \sim 40$
质量 $/kg$	8	31	29	29	29	40	60	120

注:北京中科科仪技术发展有限责任公司生产。产品均可以做耐腐蚀分子泵,适用于在腐蚀性气体或腐蚀环境中工作。型号为原有型号后加 N, 如: F160/800(普通型), F160/800N(耐腐蚀型)。

①测试条件:前级泵为二级旋片泵加扩散泵或涡轮分子泵

七、涡轮分子泵

表 3-106 F 型涡轮分子真空泵技术性能

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	压缩比		转速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	功率 $/\text{kW}$	启动 时间 $/\text{min}$	前级 压力 $/\text{Pa}$	进、排气口法兰	
			N_2	H_2					进气	排气
F-150/450	450	10^{-6} (不烘烤) 10^{-8} (烘烤)	10^8	10^2	24000	/	5	10	160CF	40KF
F-250/1400	1400		10^8	10^4	24000	/	10		250CF	63 ISO-K
F-400/3500	3500		10^{10}	10^4	15000	/	30		400CF	100 ISO-K
F-400/3600H	3600	1×10^{-5}	/	/	16000	1.5	20	/	400KF	100KF
型 号	冷却 方式	冷却水 温 度 $/^{\circ}\text{C}$	冷却水 压 力 $/\text{MPa}$	泵烘烤 温 度 $/^{\circ}\text{C}$	建议配用 前 级 泵 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	质量 $/\text{kg}$	生产厂家			
F-150/450	水冷却	16	0.196	120	8	35	成都国投南光 有限公司			
F-250/1400					15	70				
F-400/3500					70	160				
F-400/3600H	/	/	/	/	/	/	成都无极真空 科技有限公司			

注:F-400/3600H型涡轮分子泵特点:转速可调;变截面叶片,温度高;轴承独有设计,可现场更换轴承,轴承寿命长;国内最大抽速涡轮分子泵,适用于获得清洁高真空

表 3-107 FD 系列涡轮分子泵电源技术性能

型 号	FD-500K	FD-600K	FD-1200K	FD-1500K	FD-3500K
输入电压 $/\text{V}$	220 ± 22	220 ± 22	220 ± 22	220 ± 22	220 ± 22
最大输出功率/ W	1000	1000	1000	1000	1000
输出频率/ Hz	400 ± 10	450 ± 10	400 ± 10	350 ± 10	225 ± 12
输出电压/ V	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 55
工作电流/ A	≤ 4	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 6
最大电流/ A	≤ 14	≤ 15	≤ 16	≤ 16	≤ 20
启动加速时间/ min	≤ 4	≤ 5	≤ 6	≤ 7	≤ 30
电源正常显示频率 $/\text{Hz}$	400	450	400	350	225
关机减速时间/ min	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 10	≤ 35
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	$5\sim 40$	$5\sim 40$	$5\sim 40$	$5\sim 40$	$5\sim 40$
环境湿度/ $\%$	≤ 80	≤ 80	≤ 80	≤ 80	≤ 80
质量/ kg	12	12	13	13	16
体积(长 \times 宽 \times 高) $/\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$	$305\times 480\times 180$	$305\times 480\times 180$	$305\times 480\times 180$	$305\times 480\times 180$	$330\times 480\times 190$

注:北京中科科仪技术发展有限责任公司生产

表 3-108 FD-110、FD-110A 涡轮分子泵电源技术性能

型 号	FD-110	FD-110A
输入电压/V	220 ± 10%	220 ± 10%
输入频率 /Hz		47~63
最大输出功率 /W	300	250
启动电流 /A	≤6	≤7
最大加速电压 /V	≤42	≤40
输出电压 /V	38 ± 2	≤38
正常输出电流 /A	≤2.8	
加速时间 /min	≤3	≤3
质量 /kg	10	2
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	320×220×160	220×163×96
注:北京中科科仪技术发展有限责任公司生产		

表 3-109 B 系列涡轮分子泵电源技术参数

型 号		FD-150/450B	FD-250/1400B	FD-400/3500B
输出	额定输出容量 /kVA	0.75	1.0	1.5
	额定输出电压 /V			
	额定输出频率 /Hz	400	400	250
	最大启动电流 /A	<4	<5	<8
	正常工作电源 /A	<1	<1.2	<2.5
输入	额定输入电压 /V	220 ± 10%		
	额定输入频率 /Hz	50 ± 5% /60 ± 5%		
控制特性	控制方式	正弦波 PWM 方式		
	过负载耐量	输出最大启动电流的 140%, 1min		
	启动加速时间 /min	3	5	20
	停车减速时间 /min	5	10	40
保护功能		过电压、过电流、低电压、过负载、过热等		
冷却方式		强制风冷		
环境	使用场所	安装处所无腐蚀气液体,无尘垢		
	环境温度	-10℃~50℃(超过 40℃时须移至通风良好处)		
	环境湿度	90% RH 以下(无凝露)		
	振 动	20Hz 以下, 1G 时 9.80665m/s ² 20Hz~50Hz, 1G 时 5.88m/s ²		
质 量 /kg		20	23	27
注:成都国投南光有限公司生产				

七、涡轮分子泵

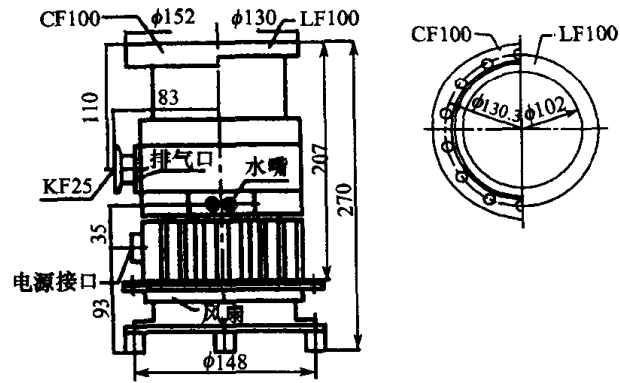


图 3-75 F-100/110 涡轮分子泵安装尺寸

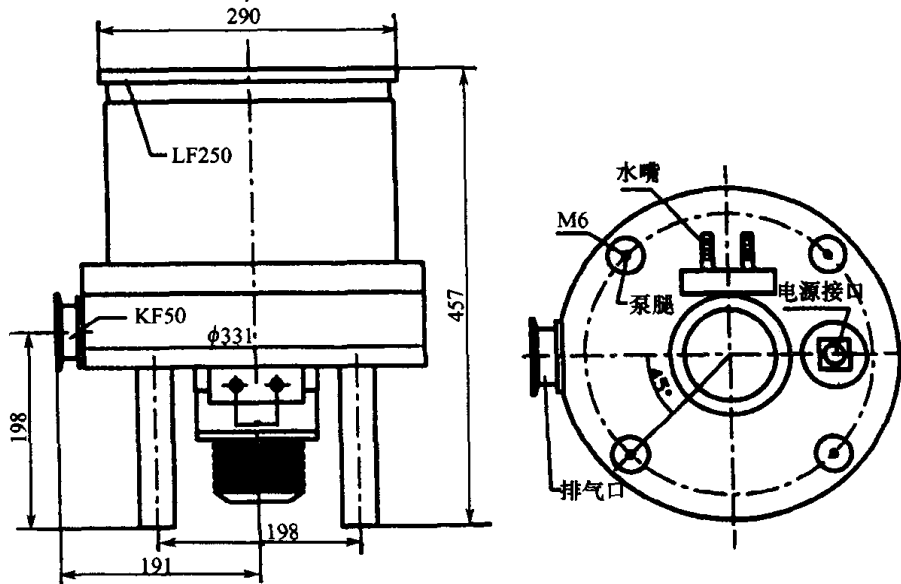


图 3-76 F-250/1500 涡轮分子泵安装尺寸

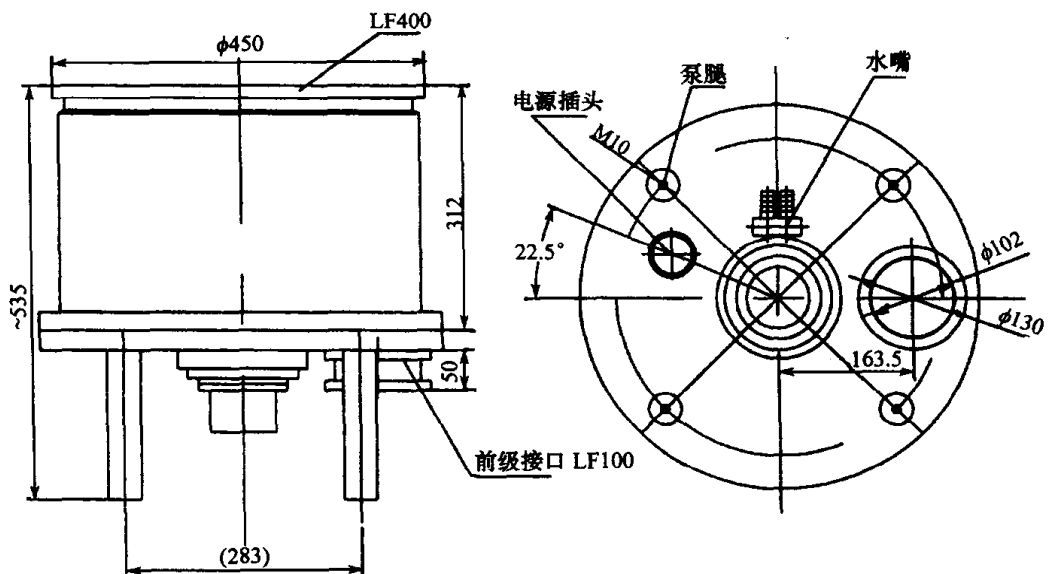


图 3-77 F400/3500 涡轮分子泵安装尺寸

表 3-110 FF 型复合分子泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

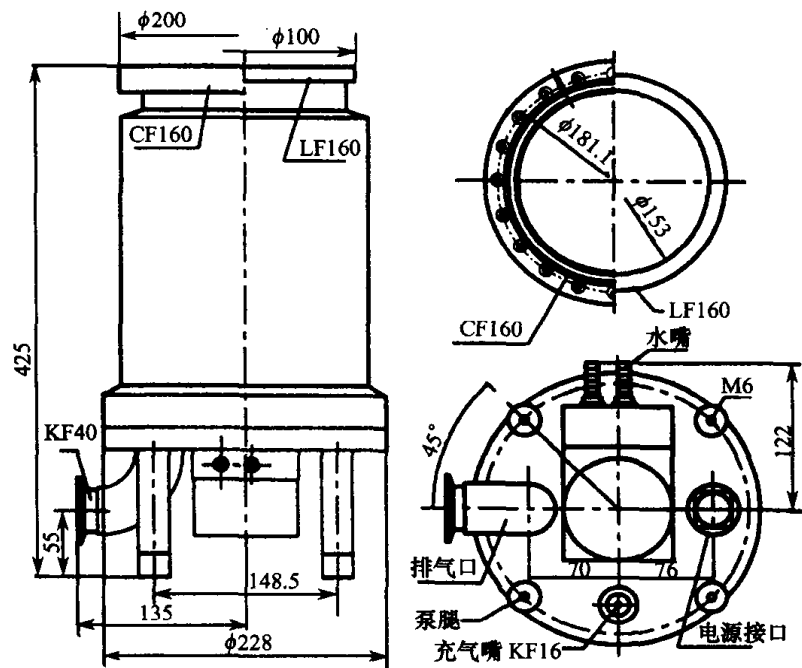
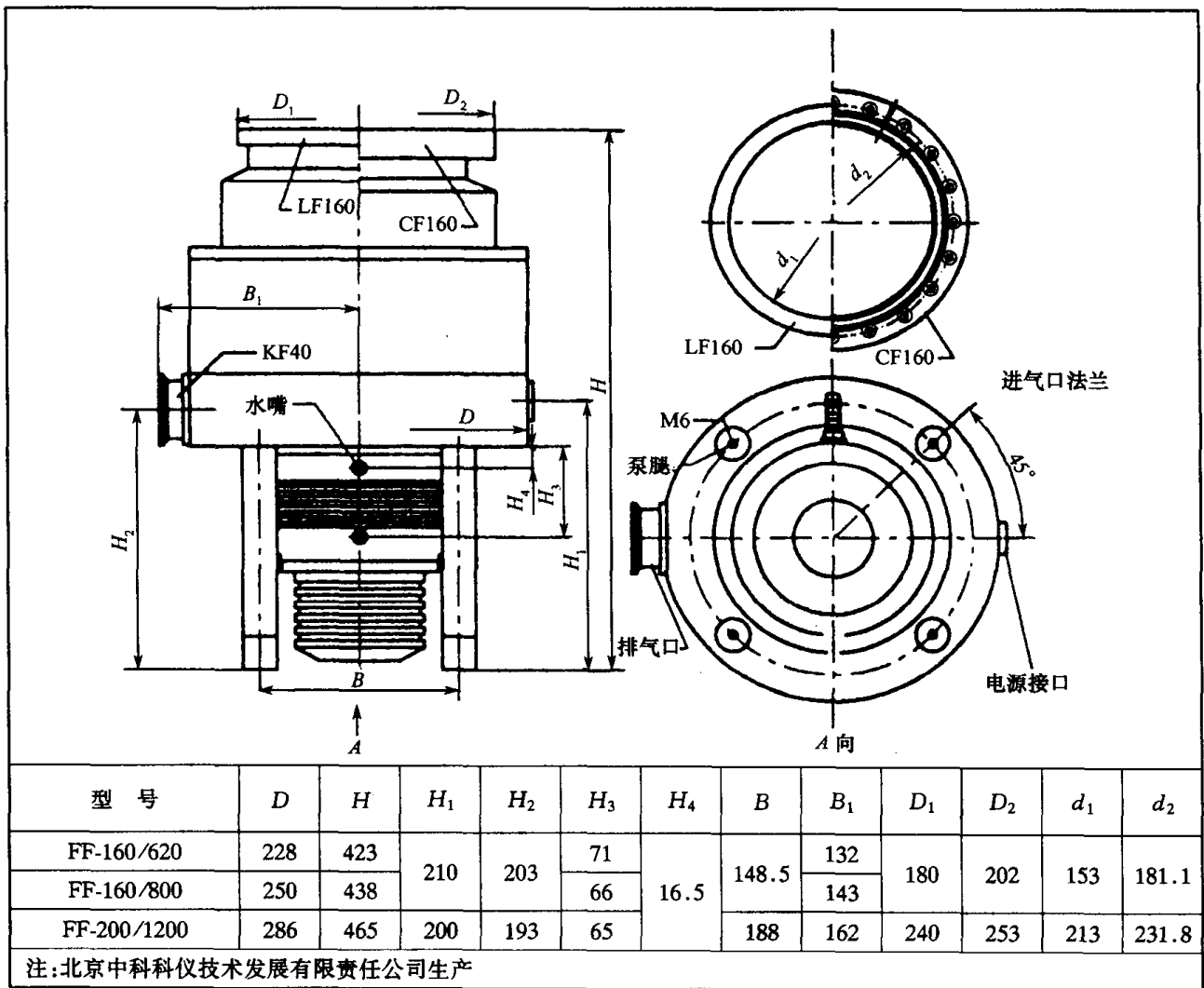
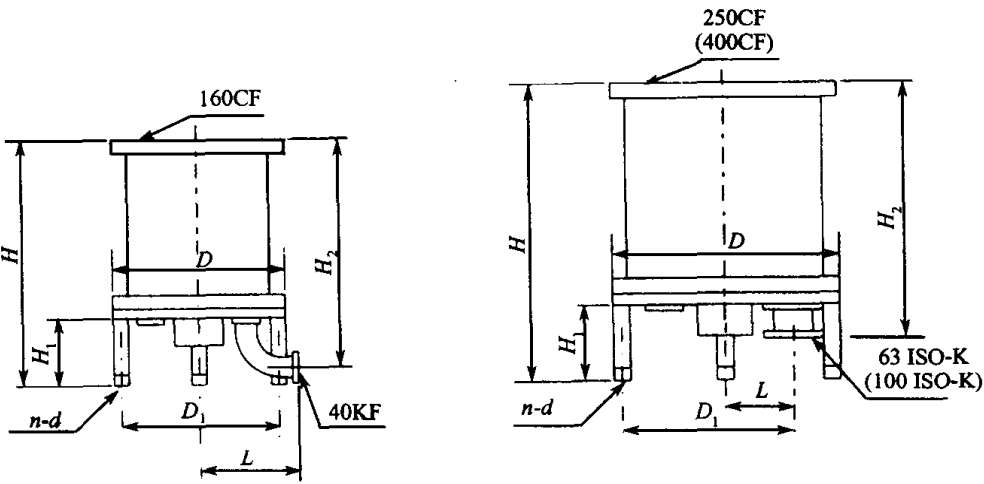


图 3-78 F-160/450N 耐腐蚀涡轮分子泵安装尺寸

②成都国投南光有限公司生产的 F 型涡轮分子泵外形及安装尺寸见表 3-111。与该系列泵连接的法兰尺寸见表 3-112。

表 3-111 F 型涡轮分子泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

							
型 号	H	H_1	H_2	D	D_1	L	$n-d$
F-150/450	440	117	393	240	217	153	4-M6
F-250/1400	467	132	395	325	300	90	
F-400/3500	605	155	504	500	475	150	3-M12
160CF	385		252	258	210	155	4-M6
150ISO-K	350		217				

③成都国投南光有限公司生产的 F 系列涡轮分子泵电源外形尺寸见表 3-113。

④北京中科科仪技术发展有限责任公司生产的 D-500K、D-600K、D-1200K 和 D-3500K 型分子泵电源外形如图 3-79 所示。

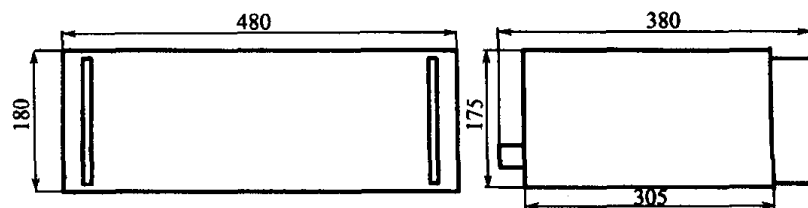
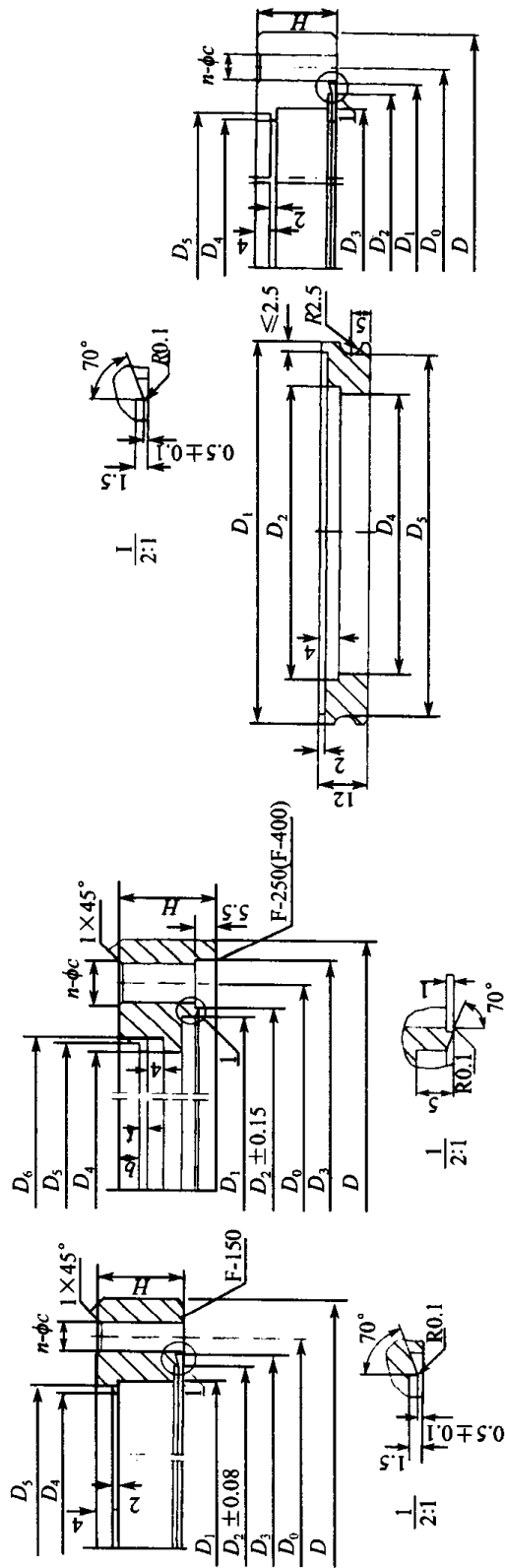


图 3-79 D-500K、D-600K、D-1200K、D-3500K 型分子泵电源外形图

表 3-112 F 型涡轮分子泵连接法兰尺寸

(单位:mm)



型 号	D	D ₀	D ₁		D ₂		D ₃		D ₄	D ₅		D ₆	H	b	t	n-φc
			尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差		尺寸	公差					
160CF	202	181	171.5	0 -0.10	165.5	0.08	153		150	153	+0.16 0	—	22	—	—	20-φ8.4
150ISO-K	—	—	290	0 -0.32	266	+0.13 0	—		261	285	0 -0.32	—	—	—	—	—
F-150/450	202	181	153	—	165.5		171.5	0 -0.10	150	153	+0.16 0	—	22	4	2	20-φ8.4
F-250/1400	312	288	269	+0.081 0	274		302	+0.32 0	250	254	+0.32 0	256	26	6	2	24-φ11
F-400/3500	476	444	421	+0.097 0	426		459	+0.40 0	400	405	+0.04 0	408	32	10	2.5	32-φ13

表 3-113 F 系列涡轮分子泵电源外形尺寸

(单位:mm)

型 号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	H_1	H_2	H_3	H_4	
FD-150/450B	480	462	440	360	* 25 (80)	40	170	120	25	164	
FD-250/1400B				400			180	130		174	
FD-400/3500B											

注: * 25 为插座尺寸; (80) 为输出插头尺寸

八、干式真空泵

(一) 概述

当代真空技术在半导体工业、电子工业、薄膜制备等工艺过程中的应用,迫切要求无油蒸气污染的清洁真空。此外在这些制造工艺中,被抽气体往往有腐蚀性蒸气或固体颗粒,严重影响油封泵的使用寿命。因此,近年来世界各国相继研制出工作在 $10^5\text{Pa} \sim 0.1\text{Pa}$ 区域内的干式真空泵,以满足对无油排气工艺的要求。

干式真空泵至今没有明确定义,就代替油封式机械泵而言,一般通用的说法是:能在 10^5Pa (1 大气压) $\sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的压力范围内工作;在泵腔内不使用任何油类和液体,排气口与大气相通,能直接向大气排气的泵称为干式真空泵,又称无油真空泵。

干式真空泵种类很多,按工作原理可分为两类:①容积式干式真空泵,例如:多级罗茨泵、爪型泵、往复式活塞泵、螺杆式泵和涡旋式泵等,这种干式泵的极限压力一般为 $0.1\text{Pa} \sim 10\text{Pa}$,抽速为 $0.01\text{m}^3/\text{s} \sim 0.04\text{m}^3/\text{s}$ 。②动量传递式干式真空泵,例如:涡轮式干泵。排气侧与大气相接,在粘滞流状态下压缩比较高。可从 10^5Pa (1 大气压) 抽到 10^{-2}Pa 。在结构上采用径向流和轴向流复合式结构,多级串联。这种涡轮式干泵的极限压力约为 10^{-2}Pa ,抽速为 $0.02\text{m}^3/\text{s} \sim 0.15\text{m}^3/\text{s}$ 。牵引型干泵也属于动量传输式干式泵。

这些干式泵和油封式机械泵相比,在各自的极限压力条件下,其残余气体成分全然不同。分析结果表明,油封泵的残余气体,主要成分为 C_nH_m (碳氢化合物),而干式泵的残余气体的主要成分为空气,这就证实了用干式泵抽气基本上不被油蒸气污染。

有些干式泵在结构设计上(例如泵的传动齿轮和轴承等)仍在用润滑油,也有用合成油如 PFPE 油和其它油脂,不过采取一定的措施可使油蒸气在泵腔内几乎不存在。严格来说这种泵不是全无油泵。经分析,这种合成油的成分在泵入口处是微乎其微的,对大多数电子产业来讲并无影响。

干式真空泵按转子接触与否又可分为非接触型(罗茨式、爪式、螺杆式)和接触式(叶片式、凸轮式、活塞式)两类。非接触型的泵可以高速旋转,但最大压缩比小。接触型的泵转速不能太高,但最大压缩比大,尤其在大气压附近,因返流变小使后者的压缩比为前者的 5 倍~8 倍。另外,干式真空泵的转速越高,其压缩比越大,因此非接触型干式真空泵的转速多为 3000r/min。

各种干式真空泵的极限压力、特点见表 3-114。

表 3-114 各类干式泵的原理及特点

型 式	极限压力 /Pa	抽气速率及范围 /m ³ ·h ⁻¹	特 点
膜片泵	665		不耐腐蚀,寿命低
多级活塞泵	1.33	8.4~16.8	非常清洁
多级螺杆泵	0.66		高速 10000r/min,小间隙 0.1mm
多级罗茨泵	0.53	60~500	5~6 级串联,气冷式
爪式	0.53	100~180	2~4 级爪型泵
螺旋泵	0.133		小间隙 0.2mm
涡轮泵	0.133	72~540	高速 30000r/min
螺杆泵+碳旋片泵	0.066	/	有碳旋片的剥脱
罗茨+爪泵	0.93	/	1 级罗茨+2~3 爪型
分子牵引泵+膜片泵	1.33×10^{-3}		高压时流量低

各种干式真空泵的典型抽气曲线如图 3-80 所示。

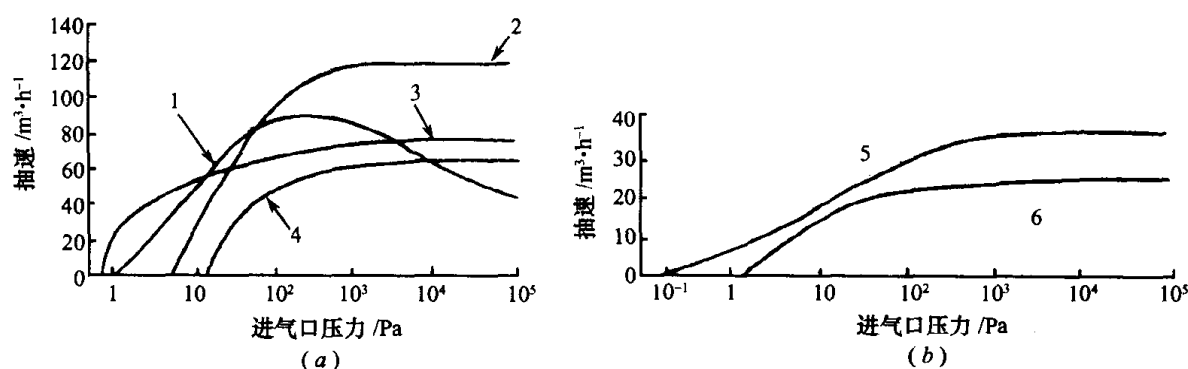


图 3-80 各种干式真空泵抽速与进气口压力曲线

1—4 级爪式泵;2—螺杆泵;3—矩形杆泵;4—5 级三叶罗茨泵;5—涡轮泵;6—往复式活塞泵。

一般对干式真空泵的要求为:①清洁;②安全;③耐磨;④造价低;⑤维修方便;⑥性能稳定;⑦振动小,噪声低。只有这样,干式真空泵才有使用和推广的价值。在清洁的要求方面,对于那些用油润滑的干式真空泵都有一个潜在的油蒸气的污染源存在,要采取一定措施加以解决。

在半导体产业为主要应用对象的干式泵,会在许多抽气工艺过程中出现一些颗粒物,一般

说来,在干式真空泵中出现颗粒物有下列三种情况:①当泵内压力增高时引起气固变相过程的发生;②在泵内产生反应气体的生成物;③抽气过程混入的颗粒物。防止颗粒物在泵中形成的最好措施有:①适当提高泵温。物质的升华、凝固是压力和温度的函数,(且函数关系随物质的不同而不同),所以调整泵的温度可避免气固变相过程的发生。例如:在 Al 刻蚀过程中,反应生成物为 AlCl_3 ,蒸气压曲线表明:温度 $> 80^\circ\text{C}$ 时, AlCl_3 就挥发为气态,如果能控制泵温, AlCl_3 的沉积就可避免。②降低参加化学反应气体的浓度。单位时间内气体反应生成物(颗粒)的数量可用反应率来表示,而反应率和反应气体浓度成指数关系,所以在生产工艺中充入惰性气体,减少反应气体浓度是降低生成颗粒物的最有效的方法。通常这类泵压缩气体之前就通入惰性气体,避免固体颗粒物的产生。此外,引入惰性气体使反应气体浓度降低到低于着火极限,也可以防止 CVD(化学气相沉积)过程中出现爆炸事故。③增加抽气通道中气流速度。为防止处于悬浮状态的固体颗粒物沉积,使气体的流动速度大于颗粒沉积的临界速度(即最大降落速度),在泵内及早充入适量的气体,使气流速率大于颗粒沉积临界速度,保证颗粒物实现气动输送。但是充入气量不能过大,过大的气量将影响泵的极限压力,在不同的抽气系统中,通过实验确定最佳充入气量。

由于在半导体工业使用的气体和反应物都要通过干泵排出,这些物质与空气和水蒸气混合,往往能形成氧化物,有些能自燃并可能引起爆炸,因此在半导体工业排气工艺中,使用的干式真空泵要经过这些恶劣环境的考验,这些在设计和选择使用干式真空泵时要引起足够的重视。

(二) 干式旋片真空泵

1. 工作原理

干式旋片真空泵属于变容式真空泵,其工作原理与有油的旋片真空泵基本一致。图 3-81 为干式旋片真空泵的工作原理图。

干式旋片泵的转子偏心地置于泵壳内,上端靠近泵壳内,形成进排气口间的密封。当电机带动转子转动时,旋片在离心力的作用下贴紧泵腔的内壁。在泵体内形成多个空腔,进气口侧的空腔容积,随转子的转动而增加产生真空而吸气;排气口侧的空腔容积随转子的转动而缩小,产生压力而排气。

由于干式旋片泵在无油状态下工作,所以旋片材料需具备自润滑功能。目前,国内外一般采用碳素材料;同时也因其无油,为减少气体的泄漏,该泵采用多个旋片结构。

2. XG-6 型干式旋片真空泵结构特点

XG-6 型干式旋片泵采用直联式,结构紧凑;在进排气口分别安装了过滤器网,保证了吸入和排出的气体干净。在吸气口处还安装了真空表和调节真空阀门,可根据需要调整泵的入口压力。

该泵的最大特点是可获得清洁的粗真空,适用于真空吸附、真空包装、食品加工、卷烟生产等行业。

3. XG-6 型干式旋片真空泵技术性能

XG-6 型干式旋片真空泵技术性能见表 3-115。

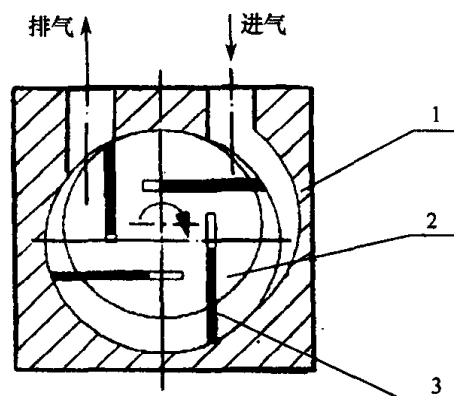


图 3-81 干式旋片真空泵工作原理图

1—泵体;2—转子;3—旋片。

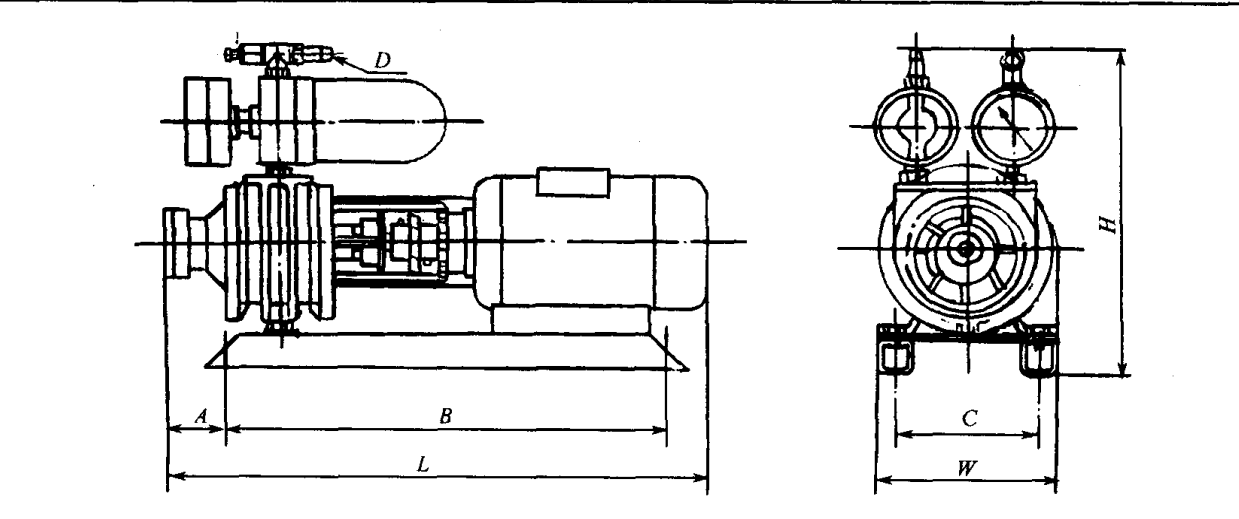
表 3-115 XG-6 型干式旋片真空泵技术性能

型 号	抽 速 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	极限压力 $/\text{MPa}$	转 速 $/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	电机功率 $/\text{W}$	进、排气口 内径/ mm	质量 $/\text{kg}$
XG-6	6	0.02	1400	250	10	16
注:成都无极真空科技有限公司生产						

4. XG-6 型干式旋片真空泵外形及安装尺寸

XG-6 型干式旋片真空泵外形及安装尺寸见表 3-116。

表 3-116 XG-6 型干式旋片真空泵外形及安装尺寸 (单位: mm)

							
型 号	A	B	C	D	L	W	H
XG-6	30	315	112	$\phi 10$	420	140	275
注:成都无极真空科技有限公司生产							

(三) 爪式真空泵

1. 结构原理

爪式真空泵属于变容式真空泵,从使用寿命所能达到的压缩比、转速及动平衡性等方面考虑,在结构上多采用多级爪式转子串联,或罗茨转子与多级爪式型转子串联,组合成多级爪式真空泵。多级爪式真空泵的抽气过程示意图如图 3-82 所示。

这种爪式泵由于沿轴向逆流少,所以压缩比在高压区较高。也因泵的吸排气口设置在泵腔的端壁上,多级连接很方便,气道流畅,故泵内腔压力变化平缓,有利于防止可凝性气体的凝结。目前爪式真空泵极限压力为 $1\text{Pa} \sim 10\text{Pa}$,抽速为 $100\text{m}^3/\text{h} \sim 180\text{m}^3/\text{h}$ 。

爪式真空泵的工作原理如图 3-83 所示。

具体抽气过程分四个冲程:第一冲程:如图 3-83(a)所示,开始转子对在初始位置, S 腔的体积最小,而且和吸气口接通, S 腔所处的容积不断增加,被抽气体进入 S 腔,体积较大的 T 腔则处于不断缩小状态。第二冲程:随着转子对的不断运动,如图 3-83(b)所示。 S 腔正在不断加大,吸入的气体也越来越多, T 腔正不断缩小,当和排气口刚好接通时开始排气。第三冲程:如图 3-83(c)所示,转子对继续运动,使 T 腔变得最小,气体得到最大限度压缩, S 腔变得最大,吸气排气快要结束。第四冲程:如图 3-83(d)所示, S 腔和 T 腔合为一体,泵腔不再吸

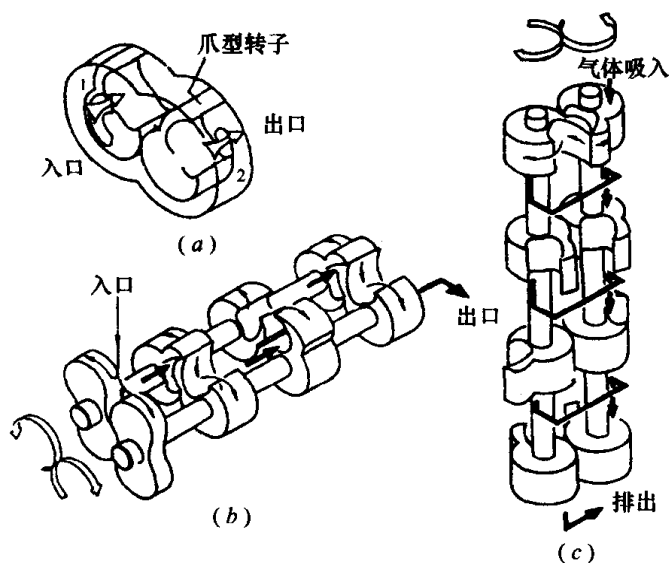


图 3-82 多级爪式真空泵抽气过程示意图

(a)单级爪式泵;(b)卧式罗茨转子与三级爪式转子串联的多级泵;
(c)立式四级爪式转子串联的多级泵。

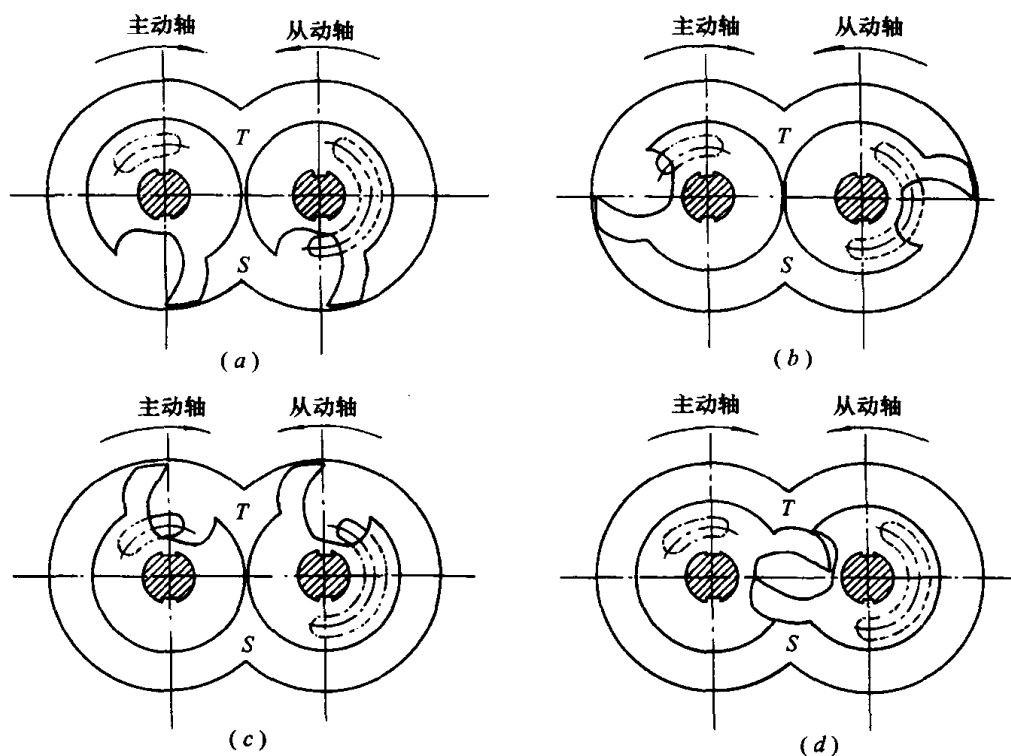


图 3-83 爪式真空泵工作原理图

(a)第一冲程;(b)第二冲程;(c)第三冲程;(d)第四冲程。

排气,进、排气口都自行关闭。这就是爪式真空泵抽气的工作全过程。

2. 爪式真空泵的特点

目前国内外爪式真空泵已有系列型号产品生产,其主要特点可概括为以下几个方面:①转子在泵腔内悬浮,无任何摩擦,泵腔内无任何润滑油,因而无返油现象发生,并可实现高速运转,一般为 3000r/min 。②可在 10^5Pa 压力下启动,可以独立工作,也可以和罗茨真空泵及分子泵组成无油泵机组使用。③多级自动气镇使爪式真空泵能抽除 100% 的可凝性气体,包括纯

溶剂气体,且能回收重复使用。④能抽除腐蚀性气体,如 F_2 、 FH 、 HCl 、 Cl_2 、 H_2SO_4 、 HNO_3 等,能抽除含有少量尘埃的气体。⑤能作气体传输泵用,使用压缩比达到 $10 \sim 10^5$ 。⑥爪式真空泵的型式多样,功能可进一步扩展。泵的主体上带有齿轮、电机和气体净化设备。配套件在入口处配有防返流的阀门,在出口处配有截流阀、电气监控及报警装置。⑦入口防返流阀能将抽容器与泵腔隔断。出口处截流阀能将泵的出口封闭起来,将泵通以净化气体。这些阀均可自动开关,用于对真空系统进行可靠的保护,防止向真空室的返流。多级泵从第二、三、四级起均有净化气体入口,以改善被抽介质顺利通过泵腔。若无此需要,可以不通入净化气体。净化气体用三个相互独立的流量计和电磁阀分别进行流量调节,用以节约惰性气体。⑧电气监控设备主要有电源、远距离操作和开关阀等。当泵出现故障时,泵能自动停车,返流阀和截流阀一齐关闭或仅有截流阀关闭。动力和遥控台有变压器和整流器,用以提供所需的电流电压,以满足监控过程的需要。

3. 国产爪式真空泵技术性能、特性曲线、外形及安装尺寸

(1) 技术性能

LH 系列爪式真空泵技术性能见表 3-117。LH-CC 系列气体传输爪式真空泵技术性能见表 3-118。LG 系列爪式真空泵技术性能见表 3-119。

表 3-117 LH 系列爪式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	功率 /kW	输入电压 /V	使 用 范 围
LH-4P LH-4PC	3	4	1.1	380	LH-P 系列爪式泵特别适用于真空和电子行业使用,它可以和罗茨泵和分子泵组成无油中真空机组和无油高真空机组。用于要求清洁、抽除空气的环境。 LH-P 系列爪式泵具有 P 系列爪式泵的一切优点,用于要求抽除腐蚀性气体的环境。防腐性能优越,能用于抽除含有 Cl_2 、 HCl 、 H_2SO_4 、 HNO_3 等气体环境,能长期可靠连续工作。 LH-PH 系列爪式泵适用于食品、制药、电子、化工等行业。它可以和罗茨泵及分子泵组成无油中真空和无油高真空机组。用于要求清洁、抽除空气的环境和抽除含有丰富水蒸气、汽油等可凝性气体的环境
LH-8P LH-8PC	3	8	1.1	380	
LH-15P LH-15PC	3	15	3.0	380	
LH-30P LH-30PC	3	30	4.0	380	
LH-70P LH-70PC	3	70	7.0	380	
LH-110PH	3	110	11.0		
LH-150PH	3	150	30.0		
LH-300PH	3	300	30.0		
LH-4H LH-4HC	500	4	1.1	380	LH-H 系列爪式泵特别适用于化工行业使用,即使抽除 100% 的有机溶剂(如酒精、汽油、丁烷等)也能确保长期可靠地连续工作;并且抽除的可凝气体可以实现 100% 回收后重复使用,同时可用于作气体传输泵使用。 LH-HC 系列爪式泵除具有 LH-H 系列泵的一切优点外,特别适用特殊环境使用。如抽除含有腐蚀性气体(如 HCl 等强酸和强碱)化工环境,防腐性能优越,且可以确保长期可靠地连续工作
LH-8H LH-8HC	500	8	1.1	380	
LH-15H LH-15HC	500	15	3.0	380	
LH-30H LH-30HC	500	30	4.0	380	
LH-70H LH-70HC	500	70	7.0	380	

注:北京朗禾科技有限公司生产

表 3-118 LH-CC 系列气体传输爪式真空泵技术性能

型 号	许用最大入口 压力 /kPa	抽气速率 /L·s ⁻¹	功率 /kW	压缩比	输入电压 /V	使 用 范 围
LH-4CC	10	4	1.1	100	380	本系列传输泵是国内新产品,在原有爪式泵基础上采用磁力传动电机等多项先进技术,使轴头动密封变成静密封。可以抽除和传输含有放射性物质的气体、有剧毒物质气体、高纯度气体等,应用在特气制造、核工业、化工、制药、航天、航空等领域
LH-8CC	10	8	1.1	100	380	
LH-15CC	10	15	3.0	100	380	
LH-30CC	10	30	4.0	100	380	
注:北京朗禾科技有限公司生产						

表 3-119 LG 系列爪式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	功率 /kW	连续工作 最高入口 压力 /Pa	转速 /r·min ⁻¹	入口内径 /mm	排口内径 /mm
4LG-15	3	15	3	5000	2800	50	40
4LG-30	15	30	4	5000	2900	50	40
型 号	齿轮箱 油 箱 /L	冷却水量 /L·h ⁻¹	频率 /Hz	质量 /kg	外 形 尺 寸(长×宽×高) /mm×mm×mm		
4LG-15	2	/	50	205	500×450×350		
4LG-30	2	/	50	215	500×450×500		
注:上海真空泵厂生产							

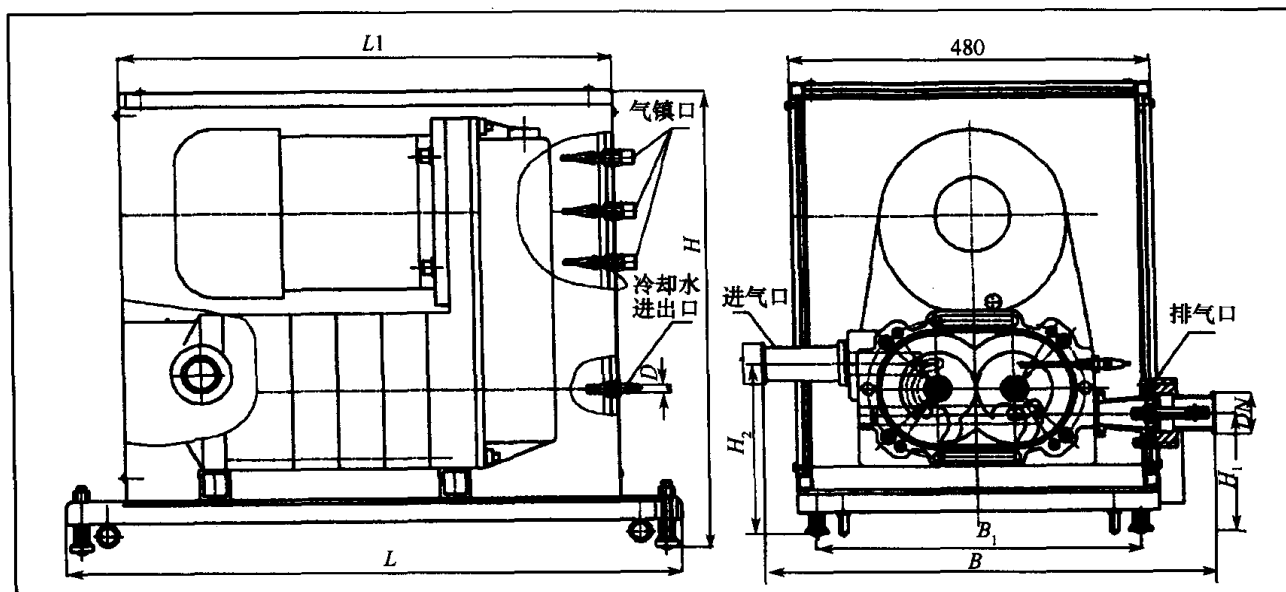
(2)特性曲线

LH-P(C)、LH-H(C)系列爪式真空泵抽速曲线如图 3-84 所示。

(3)外形及安装尺寸

北京朗禾科技有限公司生产的 LH-PH、LH-H 系列爪式真空泵外形及安装尺寸见表 3-120;上海真空泵厂生产的 LG 系列爪式真空泵外形及安装尺寸如图 3-85 所示。

表 3-120 LH-PH、LH-H 系列爪式真空泵外形及安装尺寸表 (单位:mm)



(续)

型 号		L	L_1	B	B_1	H	H_1	H_2	冷却水管外径 $\varnothing D$	标准真空快卸法兰通径 $\varnothing DN$
LH-4PH LH-8PH	LH-4H LH-8H	538	432	395	318	448	125	170	12	25
LH-15PH LH-30PH	LH-15H LH-30H	815	658	598	480	616	158	228	12	40

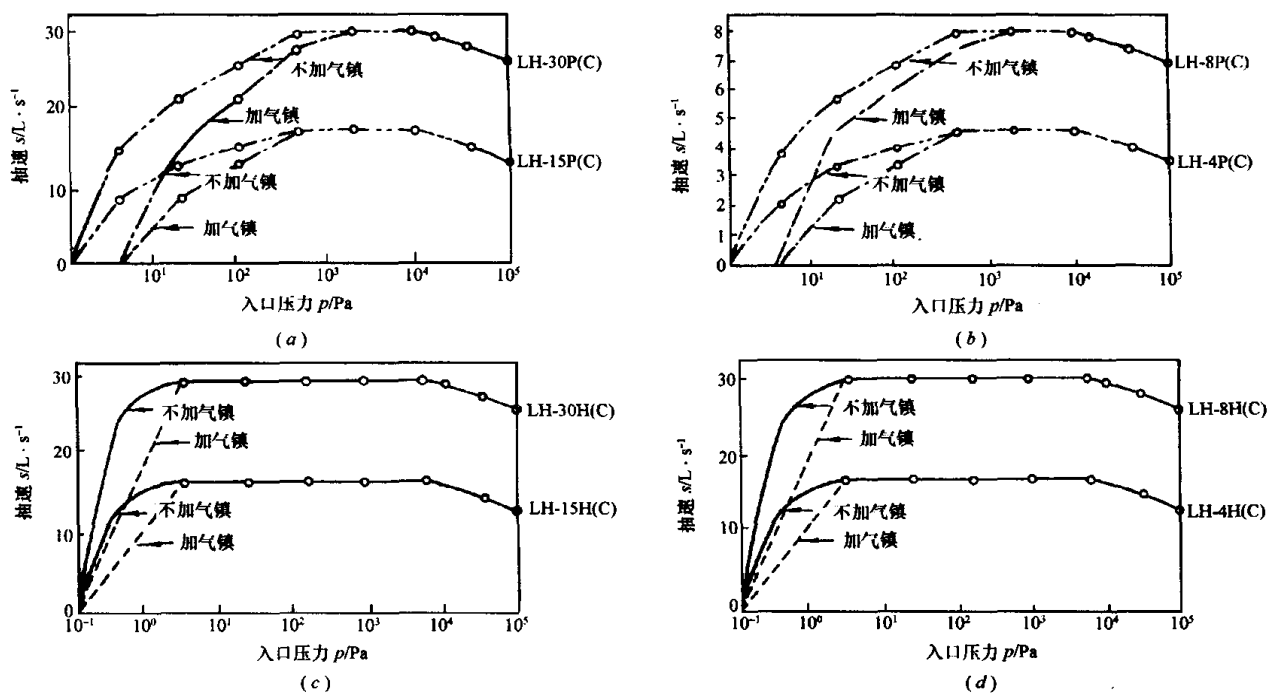


图 3-84 LH-P(C)、LH-H(C)系列爪式真空泵抽速曲线

(a) LH-30P(C)和 LH-15P(C)抽速曲线;(b) LH-8P(C)和 LH-4P(C)抽速曲线;
(c) LH-30H(C)和 LH-15H(C)抽速曲线;(d) LH-8H(C)和 LH-4H(C)抽速曲线;
(北京朗禾科技有限公司生产)

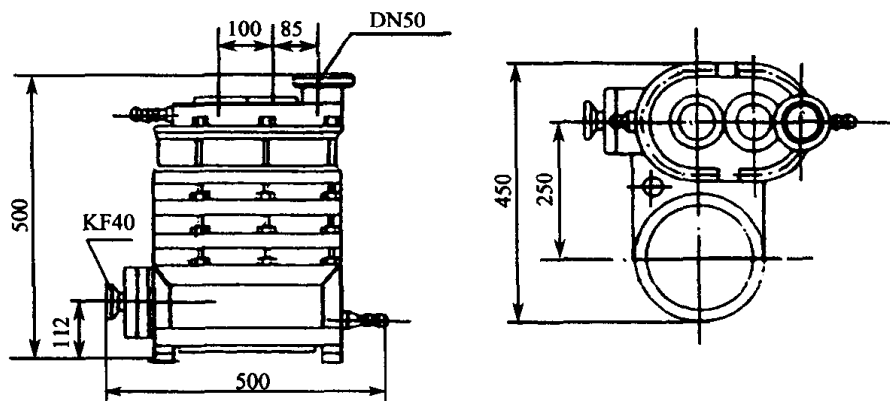


图 3-85 LG 型爪式真空泵外形尺寸图

(四) 涡旋式真空泵

1. 涡旋式真空泵的特点

涡旋式真空泵是一种新型干式真空泵,它是由涡旋式压缩机演化而来的。其特点:①间隙小,泄漏小,具有较高的压缩比,在较宽的工作压力范围内有稳定的抽速。②工作压力范围宽。由于压缩腔容积的变化是连续的,因而驱动扭矩和功率变化小。③动静涡旋形成的工作腔由于是对称的,而且泵的结构简单、零部件少,故工作平稳,振动小,噪声低,工作可靠性高。④涡旋型线从等截面优化为变截面,使抽除气体的能力大大增强。⑤能在大气压下(10^5Pa)启动,可直排大气独立工作。⑥对被抽容器无污染,可抽除可凝性气体。⑦主要部件采用复合高分子材料,可抽除腐蚀性气体。由于涡旋式真空泵性能优越,所以作为新型的无油真空泵在国内真空行业内越来越多引起人们的重视。

涡旋泵的基本结构(图 3-86 所示,主要包括左定子、右定子、转子、曲轴、防自转机构、进气口、排气口等部分。气体在由涡旋定子和涡旋转子组成的月牙腔内压缩,涡旋定子固定在机架的周边上,在涡旋定子的周边上开有吸气口,在转子和定子涡旋体中心部开有排气口。涡旋转子随着曲轴的回转以偏心量 R_{or} 作半径绕定子中心作公转运动。涡旋转子还受防自转机构的约束,不能自转,始终保持着一种固定的姿势,其中心绕涡旋定子的中心作半径为 R_{or} 的圆周运动。

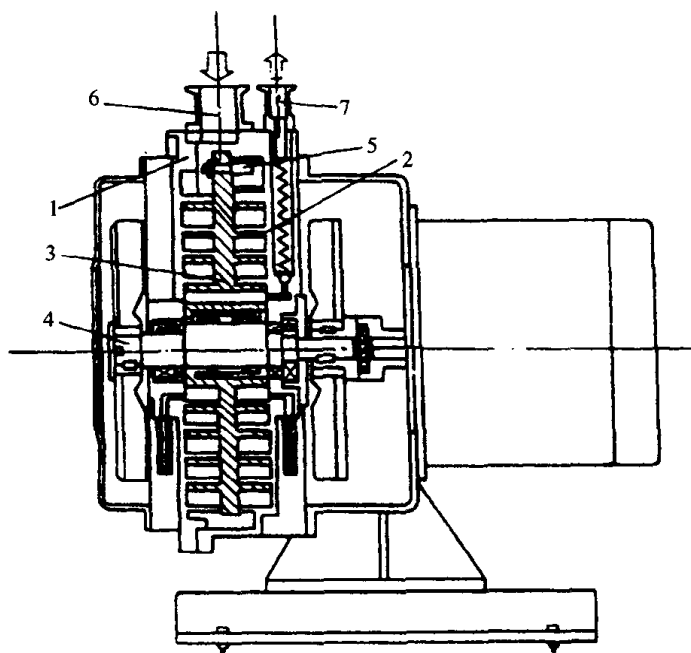


图 3-86 涡旋泵结构简图

1—左定子;2—右定子;3—转子;4—曲轴;5—防自转机构;6—进气口;7—排气口。

2. 涡旋式真空泵工作原理

涡旋泵的抽气原理,如图 3-87 所示。

两个涡旋定子和涡旋转子的涡线基本相同,只要将两者的相位错开 180° ,并且各自中心保持相距 R_{or} 即可组合而成。结果在两个涡旋体之间形成了一系列月牙形压缩腔。图 3-87 表示涡旋转子中心每回转 90° 按顺时针方向作圆周运动时的状态。图 3-86(a)表示吸气结束后,涡旋体外圆周的压缩室处于关闭状态。由此可以设想压缩机构是压缩腔一面向中心处移动,

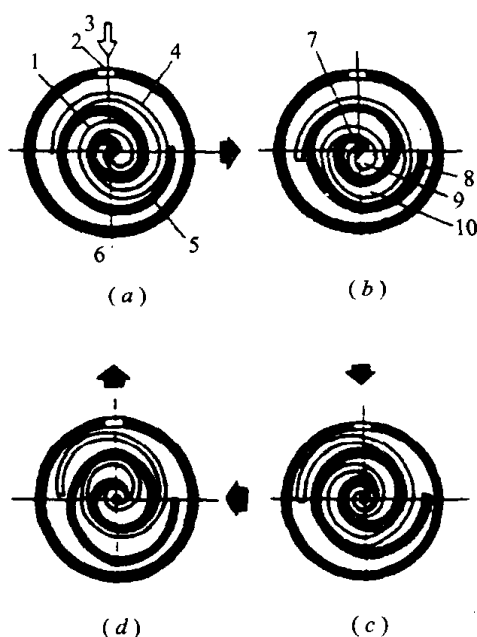


图 3-87 工作原理图

1—压缩室;2—吸气口;3—气体;4—涡旋转子;5—涡旋定子;6—吸气完了;
7—排气口;8—吸气行程;9—排气行程;10—压缩行程。

压缩腔的容积一面连续地逐渐变小,一个压缩腔从吸气,经压缩,最后排气的全过程。

3. 涡旋真空泵技术性能

①LH-SH、LH-SP 型涡旋真空泵。其技术性能见表 3-121。

②DVS-630、DVT-300 型涡旋式真空泵其技术性能见表 3-122。

表 3-121 LH-SH、LH-SP 型涡旋真空泵技术参数

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	电机功率 /kW	噪声 /dB	冷却方式
LH-4SH		4	1.1	60	风冷
LH-15S		15	2.2	65	
LH-30SH		30	3.0	65	
LH-4SP	3	4	1.1	60	风冷
LH-15SP		15	2.2	65	
LH-30SP		30	3.0	65	

注:北京朗禾科技有限公司生产

表 3-122 DVS-631、DVS-321 型涡旋式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	电机电压 /V	转速 /r·min ⁻¹	吸气口径 /mm	排气能力 /mm	噪声 /dB	抽水蒸气 能力 /g·h ⁻¹	使用温度 /℃
DVS-631	≤1.0(关气镇) ≤2.5(开气镇)	525	220 (单相 50Hz)	1425	φ40	φ25	≤58	23	5~35
DVS-321	≤1.5(关气镇) ≤3.0(开气镇)	265	220 (单相 50Hz)	1425	φ25	φ16	≤58	23	5~35

(续)

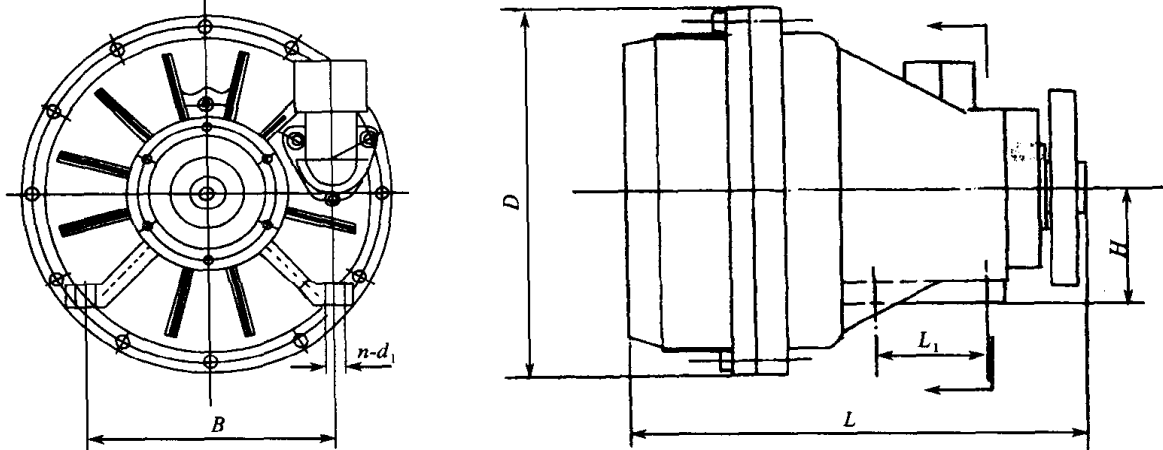
型 号	质量 /kg	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	标准附 属品	特 点	用 途	生产厂家
DVS-631	41	547×326×367	时间 计数器	无油、无污染、低噪声、低振动、使用寿命长、空气冷却、配有气镇阀、能抽水蒸气	半导体、离子刻蚀、氨检漏仪、真空离子注入设备、分析仪器、真空热处理、真空镀膜、生物制药、食品包装设备、电子束、激光束应用设备	日本 ULVAC 公司产品,中科院沈科仪研制中心有限公司
DVS-321	35	398×310×339	时间 计数器			

4. 涡旋真空泵外形及安装尺寸

5SH(SP)、15SH(SP)、30SH(SP)型涡轮真空泵外形及安装尺寸见表 3-123。

表 3-123 5SH(SP)、15SH(SP)、30SH(SP)型涡轮真空泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

						
型 号	L	L_1	B	D	H	$n-d_1$
5SH(SP)	287	70	154	236	73	4- $\phi 12$
15SH(SP)	380	97	220	340	100	4- $\phi 14$
30SH(SP)	518	116	276	416	130	4- $\phi 18$
注:北京朗禾科技有限公司生产						

(五) 螺杆式真空泵

1. 螺杆式真空泵的基本结构

螺杆式真空泵根据螺杆式压缩机的工作原理作成。国内外均有市售产品,特别适用于化工、制药、航天航空等需要清洁抽气的环境。其基本结构有两种型式:①螺杆式真空泵。其抽气原理如图 3-88 所示。在螺杆式压缩机中,螺旋转子的螺旋圈数在 1 圈以上,而螺杆真空泵的螺旋转子的螺旋圈数在 2 圈以上。这样可以减少返流量,提高压缩比。单级泵可从 10^5 Pa 抽到 1 Pa 的极限压力,抽速为 $60\text{m}^3/\text{h} \sim 120\text{m}^3/\text{h}$ 。②矩形螺旋式真空泵。其结构原理如图 3-89 所示。它由矩形断面的右螺旋和左螺旋的一对转子相啮合,由同步齿轮带动实现非接触式的高速运转,气体由上侧进入,在泵腔内压缩,由转子下端排除,转子旋转一周排气一次。由于转子和泵体内表面形成一种螺旋密封结构,矩形断面间隙泄漏较少,加上它的螺旋圈数多,故

可以得到比螺杆式泵较高的压缩比。这种泵可从 10^5Pa 抽到极限压力 10^{-1}Pa , 抽速为 $40\text{m}^3/\text{h} \sim 80\text{m}^3/\text{h}$ 。

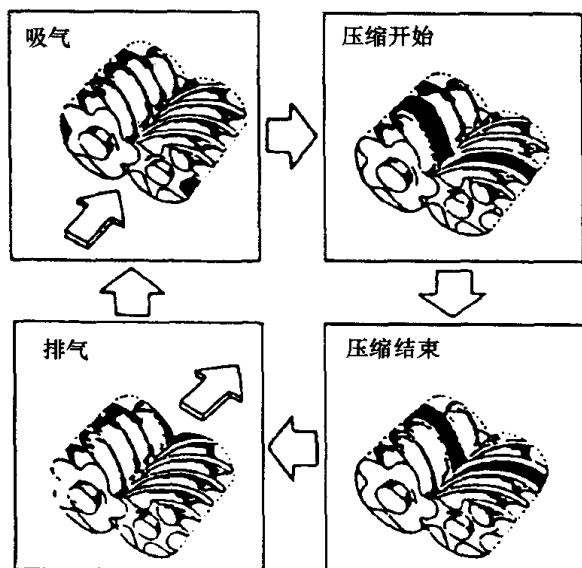


图 3-88 螺杆式真空泵的抽气原理

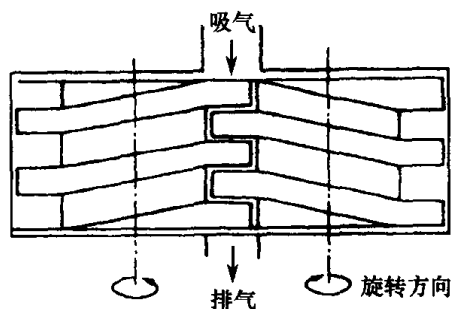


图 3-89 矩形螺旋真空泵原理示意图

2. 螺杆式真空泵的抽气原理

螺杆式真空泵的抽气过程分吸气、压缩开始、压缩结束、排气等四个过程。开始随着泵转子的转动,吸气过程开始。当吸气过程结束后,压缩过程开始,泵进入压缩阶段;当压缩过程结束时,泵排气过程开始,最后为排气过程。将被抽气体排出。

3. 螺杆真空泵技术性能

LH-LG 型螺杆式真空泵技术性能见表 3-124。

表 3-124 LH-LG 型螺杆式真空泵技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率 /L·s ⁻¹	满载功率 /kW	输入电压 /V	结 构 特 点	应 用 范 围
LH-150LG	<500	150	10	380	转子为不对称型线,大抽速,可直排大气,低噪声,具有较强的抽除含有粉尘气体能力	特别适用于化工、制药行业,也适用于航天航空等需要清洁抽气的洁净环境
LH-300LG	<500	300	20	380		

注:北京朗禾科技有限公司生产

九、机械真空泵性能测试标准

(一) 容积真空泵性能测试方法(摘自 JB/T 7266—94)

本标准等效采用国际标准 ISO 1607/I—1980《容积真空泵性能测量方法——第一部分:体积流率(抽速)的测量》和 ISO 1607/II—1980《容积真空泵性能测量方法——第二部分:极限压力的测量》。

1. 主题内容与适用范围

本标准规定了容积真空泵抽气速率、极限压力、消耗功率和工作温度的测量方法。

本标准适用于极限压力低于 100Pa ,并能直接向大气空间排气的容积真空泵(以下简称

泵)的性能测量。

2. 术语

①抽气速率(体积流率) 在理想状态下,单位时间内流经泵口的气体体积。实际应用中,抽气速率(S)定义为:泵按规定条件运转,从试验罩流过的气体流量(q)与规定位置上的平衡压力(p)的比值,简称抽速, $[L/s]$ 。即:

$$S = \frac{q}{p} \quad (3-1)$$

②极限压力 泵按规定条件运转,在不引入气体的试验罩内趋向稳定的最低压力。

③试验罩 指装在泵口上的具有规定形状和容积的容器。经过计量的试验气体通过它充入泵内,其上装有微调阀和真空计。

④消耗功率 泵按规定条件运转,泵温平衡后,对应于泵入口压力所需要的功率。

⑤工作温度 泵按规定条件运转并在极限压力下,在排气阀附近测得的平衡温度。

3. 测量装置

①测试罩 罩为圆筒形(如图 3-90(a)所示)。其内径为 D ,高为 $1.5D$,试验气体入口位于罩的轴线上并背向泵口,与法兰平面距离为 D 。真空计(或规管)连接管距法兰平面为 $0.5D$,并垂直于罩轴线。

罩的容积 V_D 至少应是泵的一个压缩周期扫过容积 V_p 的 5 倍。罩与泵口之间需要连接一个长度不超过 $0.5D$ 的异径管接头,如图 3-90(b)所示。不同规格的泵适用的试验罩由表 3-125 给出。

②真空计 根据所测压力,选用不同种类和精度的真空计。其校准精度为:压力高于或等于 $1Pa$,在 $\pm 5\%$ 以内;压力低于 $1Pa$,在 $\pm 10\%$ 以内。

表 3-125 不同规格的泵适用的试验罩参数

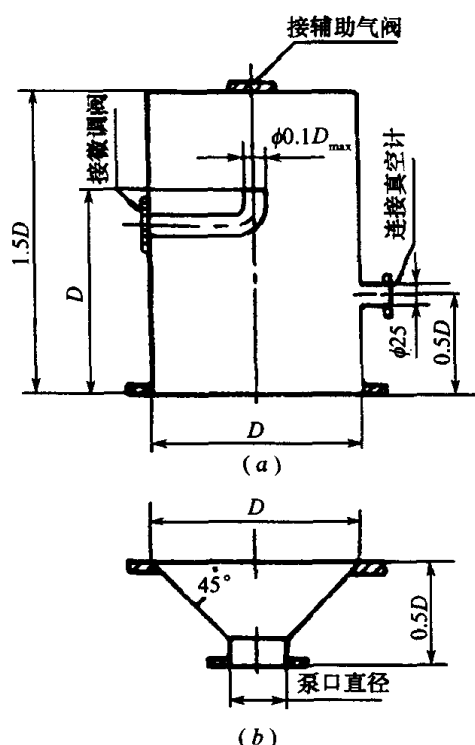


图 3-90 测试罩

编号	V_p/L	V_D/L	D/mm
1	0~0.26	1.3	100
2	0.26~1.1	5.4	160
3	1.1~4.2	21	250
4	4.2~17	84	400
5	17~65	325	630
6	65~260	1300	1000

③流量计 根据所测流量,选用不同种类和规格的流量计。其测量精度为:

流量大于 $1W$, 在 $\pm 3\%$ 以内;

流量介于 $1W \sim 10^{-4}W$ 之间, 在 $\pm 5\%$ 以内;

流量小于 $10^{-4}W$, 在 $\pm 10\%$ 以内。

④功率表和电流互感器 功率表和电流互感器应具有一级精度,并具有计量部门签发的有效证书。

⑤温度计 测量工作温度的温度计误差不大于 $\pm 1^\circ C$ 。

4. 测量条件

测量时应符合以下条件:

①泵实际转速与额定值之差应不大于 $\pm 3\%$;

②泵液种类和数量应符合设计要求;

③水冷泵的冷却水流量和温度应符合设计要求;

④环境温度在 $15^\circ C \sim 25^\circ C$ 之间,测量期间波动不大于 $\pm 1^\circ C$;

⑤测量气体为室内空气,相对湿度不大于 75% ;

⑥测气镇泵时,其掺气量应符合设计要求。

5. 测量方法

(1) 抽气速率测量

①原理 采用定压法测泵的抽气速率。即在测量流量过程中,罩内压力保持不变。

②步骤 抽气速率测量装置如图 3-91 所示。

为了测量抽气速率,测试罩、真空计和流量计应装配到泵上。

关闭微调阀,开泵运转,带气镇的泵充分气镇,关气镇阀,以 $1h$ 压力不进一步下降,泵达到平衡温度,开启微调阀,把测量气体放入罩内,以建立一个设定的平衡压力,同时测定气体流量,并按式(3-1)计算该压力下的抽气速率。

测量应从略高于极限压力的适当值开始,直至大气压或适合泵结构特点的其他压力。每个压力数量级内至少测三点,它们大致是 2.5 、 5 和 10 。若测一次流量时间较长,取 $60s$ 为一周期,压力应重复测量,并取其平均值。如果最高与最低之差大于平均值的 10% ,流量和压力都应重新测定。

对于气镇泵,应在上述测量之后完全打开气镇阀,待泵温再一次平衡后,重新测量气镇时的抽气速率。

(2) 极限压力测量

①原理 将规定的试验罩装在泵口上,在平衡温度下测罩内极限压力。

②步骤 极限压力测量装置如图 3-91 所示。

关闭微调阀,开泵运转,在气镇情况下运转至少 $1h$,然后再在关气镇下运转 $1h$,再间隔 $30min$ 进行压力测量。当连续三次测量结果表明压力不再变化,即算达到极限压力。分别记取压缩式真空计和全压真空计读数,保留两位有效数字。

对于气镇泵,应在上述测量后,完全打开气镇阀,待泵温再一次平衡后,重新测量气镇时的

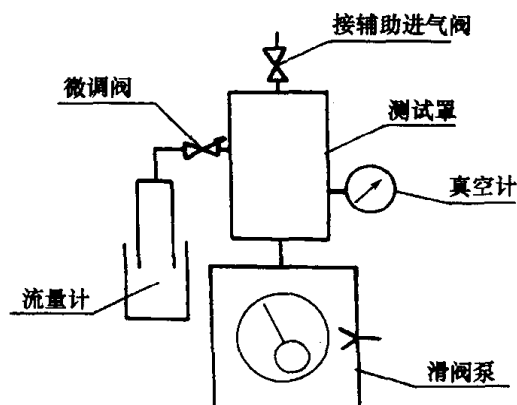


图 3-91 测试装置示意图

极限压力。

(3) 消耗功率测量

①方法 在各种不同入口压力下,用功率表测泵驱动电动机的输入功率,然后乘以其不同负荷下的效率,即为泵的消耗功率。

②步骤 关闭微调阀和辅助进气阀,开泵运转,待泵温平衡后,开启微调阀和辅助进气阀,使罩内压力由低至高,逐点稳定,同时测取功率值。为使测得值具有必要的精度,应避免功率表在量程的二分之一以下使用。测量值应具有两位有效数字。

对于气镇泵,应在上述测量后,完全打开气镇阀,待泵温再一次平衡后,重新测量气镇时的消耗功率。

(4) 工作温度测量

泵在极限压力下运转 1h 后,把温度计固定在排气阀附近成其它测温部位上,连续观察 30min,若温度变化不超过 1°C ,温度计指示的最终温度即为泵的工作温度。

对于气镇泵,应在上述测量以后,完全打开气镇阀,继续运转 1h,再行测量气镇时的工作温度。工作温度最好与极限压力同时测量。

6. 测量报告

将抽气速率、极限压力、消耗功率和工作温度测量结果填写《真空泵性能测量记录表》,并绘制抽气速率—压力曲线(如图 3-92 所示)及消耗功率—压力曲线(如图 3-93 所示)。

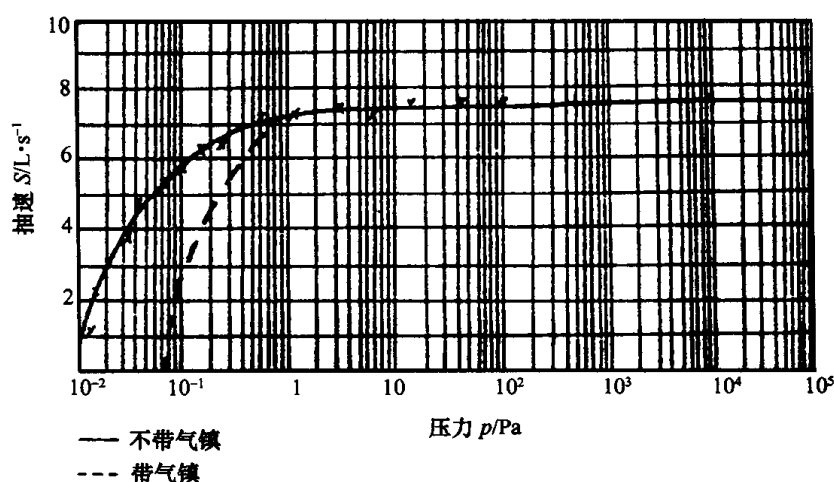


图 3-92 抽气速率—压力曲线

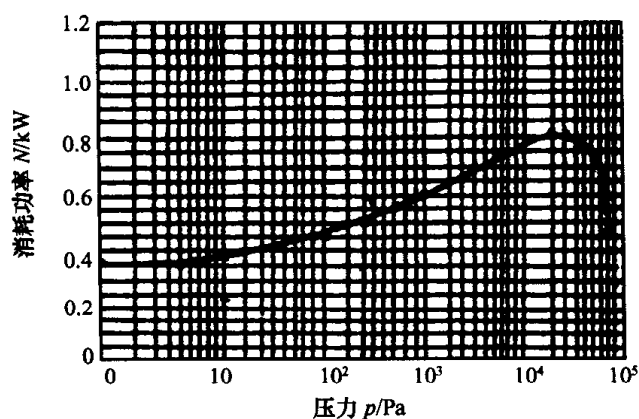


图 3-93 消耗功率—压力曲线

7. 附录 A 真空计和压力测量(补充件)

(1)真空计

根据 JB/T 7266—94 中对真空计精度的规定,应采用下列真空计:

压力低于 $1.3 \times 10^3 \text{ Pa}$, 用标准压缩式真空计;

压力介于 $5.3 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 5.3 \times 10^2 \text{ Pa}$ 之间, 用油 U 形管真空计;

压力介于 $1 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 5.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 之间, 用汞单管或 U 形管真空计。

(2)压缩式真空计

采用标准压缩式真空计必须具有计量部门签发的有效证书。

使用的汞必须具有 99.999% 的纯度, 并经过充分过滤、清洗和真空蒸馏, 不使用时计内应保持真空。

采用纯度不低于 99.9% 的氮气来提升计内的汞。

真空计与试验罩之间, 不得有橡胶管和带真空油脂的玻璃阀门。

真空计应装一只冷阱, 测抽气速率时, 允许不灌注冷剂。

压缩式真空计采用“无标定标法”。提升汞的速度不得太快, 提升结束, 至少稳定 1min 方可读数。

(3)油 U 形管真空计

油 U 形管真空计(如图 3-94 所示)应该管径均匀, 并具有 1mm 的分度标。

测量用油 20℃ 时, 蒸气压低于 0.133Pa, 运动粘度低于 $30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 密度应实际测量。

预抽泵的极限压力应低于 0.133Pa。

使用前, 先经过充分去气; 测量时, 待液柱稳定后方可读数。

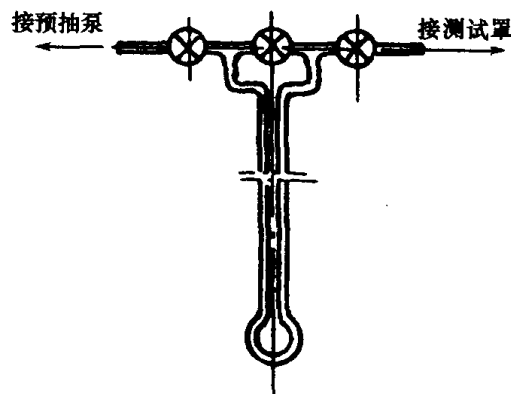


图 3-94 油 U 形管真空计

8. 附录 B 流量计和流量测试(参考件)

(1)流量计的选用

根据 JB/T 7266—94 对流量测试精度的规定, 推荐按表 3-126 选用流量计。

表 3-126 推荐选用流量计参数

型 式	规格或型号	流 量 范 围	
		$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
滴 管 式	$\phi 1.5$	$1.2 \times 10^{-4} \sim 1.33 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-1} \sim 1.3$
	$\phi 5$	$1.33 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-2}$	$1.3 \sim 13$
	$\phi 15$	$1.2 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-1}$	$12 \sim 1.3 \times 10^2$
	$\phi 50$	$1.33 \times 10^{-1} \sim 1.6$	$1.3 \times 10^2 \sim 1.6 \times 10^2$
	$\phi 150$	$1.2 \sim 14.3$	$1.2 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$

(续)

型 式	规格或型号	流 量 范 围	
		$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$
玻璃转子式	LZB-10	14.7~45.3	$1.5\times 10^4\sim 4.5\times 10^4$
	LZB-15	42.7~160	$4.3\times 10^4\sim 1.6\times 10^5$
	LZB-25	146.7~453	$1.5\times 10^5\sim 4.5\times 10^5$
	LZB-40	533.3~1 600	$5.3\times 10^5\sim 1.6\times 10^6$
	LZB-50	1 600~4 530	$1.6\times 10^6\sim 4.5\times 10^6$

(2) 滴管式流量计

滴管式流量计的结构如图 3-95 所示。测量段长度(从刻线 1 到 2)为 200mm。测量段容积的测量精度为 $\pm 1\%$ 。连接微调阀的橡胶管要尽量短而细。油槽截面积应大于 180cm^2 。测量用油 20°C 时的运动粘度应低于 $30\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$,其密度应实际测量。

滴管式流量计所测流量按式(3-2)计算

$$q = V p_{\text{at}} [1 + 133.32 (V_0 - V) h \gamma / V p_{\text{at}}] / t \quad (3-2)$$

式中 q ——所测流量 $[\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$;

V ——测量段容积 $[\text{m}^3]$;

p_{at} ——实测大气压 $[\text{Pa}]$;

V_0 ——测量前滴管内从油面至微调阀封口之间的总容积 $[\text{m}^3]$;

h ——油柱由刻线 1 升到刻线 2 的距离 $[\text{mm}]$;

γ ——用油实测密度与 0°C 汞的密度(13.59)之比;

t ——油柱从刻线 1 升到刻线 2 的时间,规定取 $t = 25\text{s} \sim 300\text{s}$ 。

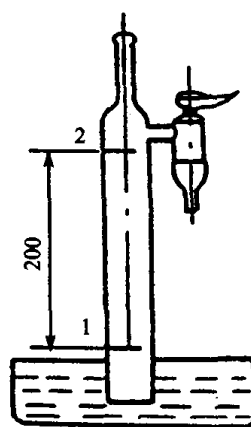


图 3-95 滴管式流量计

(3) 玻璃转子流量计

玻璃转子流量计应具有 1.5 级精度,并应在流量 $60\% \sim 100\%$ 段使用,其所测流量按式(3-3)计算

$$q = Q p_{\text{at}} / 3600 \times \left(\frac{p_1 \cdot T_2}{p_{\text{at}} \cdot T_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-3)$$

式中 q ——所测流量 $[\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$;

Q ——流量计示值 $[\text{m}^3/\text{h}]$;

p_{at} ——实测大气压 $[\text{Pa}]$;

p_1 ——流量计标定时的大气压力,取 $p_1 = 101325\text{Pa}$;

T_1 ——流量计标定时热力学温度,取 $T_1 = 293\text{K}$;

T_2 ——测量时的热力学温度 $[\text{K}]$ 。

(二) 容积真空泵噪声测量方法(摘自 JB/T8106—99)

本标准适用于极限压力低于 100Pa ,并能直接向大气空间排气的容积真空泵(以下简称

泵)噪声功率级的测量。

1. 测量项目及测量误差

(1) 测量项目

主要测量项目为附录 A 计权声功率级。在自由声场或半自由声场中,可以根据需要选择频带声功率或其它计权的声功率级。

(2) 测量误差

当测量环境符合附录 A 规定时,对于辐射频率为 100Hz~10000Hz,其频谱密度均匀的泵,测量 A 计权声功率级的标准偏差不大于 2dB;测量 1/1 倍频带或 1/3 倍频带声功率级标准偏差不大于表 3-127 所列数值。

表 3-127 测量频带声功率级的误差

1/1 倍频带中心频率 /Hz	1/3 倍频带中心频率 /Hz	标准偏差 /dB
125	100	3.0
250~500	200~630	2.0
1000~4000	800~5000	1.5
8000	6300~10000	2.5

注:63Hz 以下频带声功率的标准偏差约为 5dB

2. 声学测量环境

(1) 要求的测量环境

- ①一个反射面的自由声场实验室;
- ②坚硬、平坦的户外场所;
- ③满足附录 A 要求的房间。

当实际测量环境偏离理想状态时,应按附录 A 给出的方法确定环境修正值 K_2 ,对测量结果进行修正。

(2) 背景噪声

泵辐射噪声的 A 计权或频带声压级与在相同测点上测得的背景噪声声压级之差,应在 10dB 以上。当两者的差值在 6dB~10dB 时,测量值应按表 3-128 修正;若此差值小于 6dB,则测量无效。

表 3-128 背景噪声测量值修正表

(单位:dB)

泵辐射的声压级与背景噪声声压级之差	<6	6	7	8	9	10	>10
背景噪声修正值	测量无效	1.0			0.5		0

(3) 户外测量

户外测量时应使用防风罩。当风速大于 6m/s(相当于 4 级风)时,应停止测量。

3. 测量仪器

(1) 选择与要求

噪声测量仪器应选用 GB/T3785—1983 中规定的 I 型或 I 型以上的声级计,以及准确度相当的其它测量仪器,声级计或其它测量仪器和传声器之间最好使用延伸电缆或延伸杆联接。进行频谱分析时,使用 1/1 或 1/3 倍频程滤波器应符合 JB/T7861 的要求。

(2) 校准

为了保证测量仪器的准确度,每次测量前、后需用准确度优于 $\pm 0.5\text{dB}$ 的声级校准器,在一个或多个频率上对整个测量系统(包括电缆)进行校准。声级校准器可选用活塞发生器,并按 JJG176 定期检定。声级计及其它测量仪器应按 JJG188 定期检定。

4. 泵的安装和工况

(1) 泵的安装位置及要求

被测泵应放在试验场所地面的几何中心,不固定在基础上,或放在弹性物上。当泵的振动过大时,可采用固定安装,并在测量报告中注明。

采用上述安装时均应避免产生附加噪声。

(2) 泵的整机要求

在测量过程中,泵的完整性应符合真空泵技术条件的要求。

(3) 泵的工况

①被测泵不连接测试罩,直接封闭进气口,并在下列条件下运转:

- a. 泵的实际转速与额定值之差应不大于 $\pm 3\%$;
- b. 泵液种类和数量应符合设计要求;
- c. 水冷泵的冷却水量应符合设计要求;
- d. 测气镇泵时,关闭气镇阀。

②泵启动后,至少运转 30min,等泵温稳定或经测量达到泵的极限压力时,才能进行泵的噪声测量。

5. 噪声的测量

(1) 测量表面与测点位置

①基准体 以一个包络被测泵并终止于反射平面上的最小矩形六面体作为基准体。测量表面与测点以基准体为基础布置。在确定基准体大小时,泵的突出部位只要不是声能的主要辐射体,可以不予考虑。

②测量表面及测点位置

本标准采用各面平行于基准的矩形六面体作为测量表面,测量表面面积由式(3-4)计算

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (3-4)$$

式中 $a = L_1/2 + d$, $b = L_2/2 + d$, $c = L_3 + d$

L_1 、 L_2 、 L_3 分别为基准体的长、宽、高; d 为测量距离。本标准取 $d = 1\text{m}$ 。

测点位置及坐标如图 3-96 和表 3-129 所示。

③测点的减少 泵噪声对称辐射时可适当减少测点数,但必须保证测点的减少对计算声功率级的影响不大于 1dB。

(2) 测量

①测量用的传声器应正对被测泵。当泵辐射稳态噪声后,可用声级计的“慢”时间计权特性逐点进行测量。声级计读数在观察周期内波动幅度小于 $\pm 3\text{dB}$ 时,声压级的读数可取其平均值(对偶然出现的过大值或过小值不予考虑)。需要时,可对有关频带进行测量。

②观察时间

a. 计权声压级和中心频率在 200Hz 以上的频带,观察读数时间至少 10s;对于中心频率在 160Hz 以下的频带,观察读数时间至少 30s。

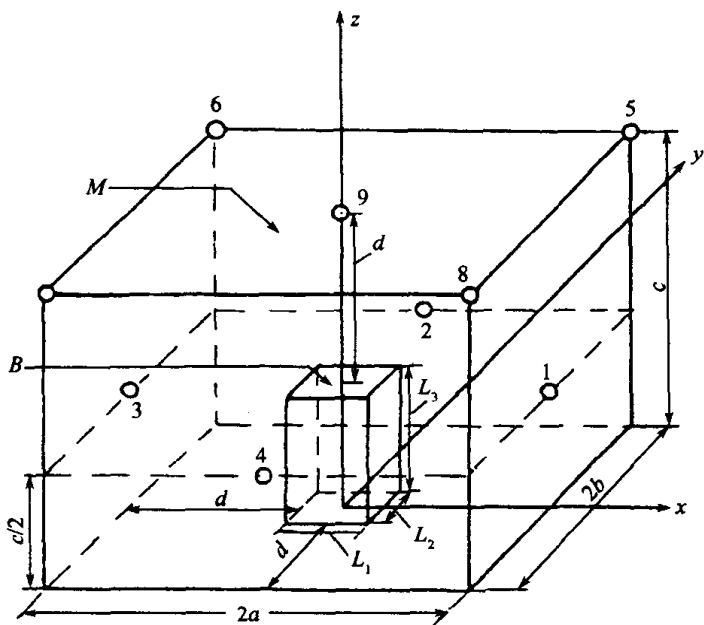


图 3-96 矩形六面体上传声器布点

M—测量区；B—基准体；O—测点。

表 3-129 矩形六面体测量表面上测点坐标

测点	x	y	z
1	a	0	c/2
2	0	b	c/2
3	-a	0	c/2
4	0	-b	c/2
5	a	b	c
6	-a	b	c
7	-a	-b	c
8	a	-b	c
9	0	0	c

b. 测试人员应尽可能远离声场,与传声器至少保持 0.5m 以上距离。

c. 测量前或后,应按上述方式测量背景噪声。

6. 计算

(1) 测量表面平均声压级的计算

测量表面 A 计权平均声压级或频带平均声压级由式(3-5)计算

$$\bar{L}_p = 10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{pi} - K_{fi})} \right] \quad (3-5)$$

 式中 \bar{L}_p ——测量表面 A 计权平均声压级或频点平均声压级[dB](基准值为 $20\mu\text{Pa}$)；

 L_{pi} ——第 i 测点测得的 A 计权声压级或频带声压级[dB](基准值为 $20\mu\text{Pa}$)；

 K_{fi} ——第 i 测点的背景噪声修正值[dB]；

 n ——测点总数。

 当 L_{pi} 值变化不超过 5dB 时,可采用算术平均值法计算 \bar{L}_p ,其值与式(3-5)计算值之差不大于 0.7dB。

(2) 声功率级的计算

① A 计权声功率级或频带声功率级由式(3-6)计算

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \lg \frac{S}{S_0} - K_2 \quad (3-6)$$

 式中 L_w ——A 计权声功率级或频带声功率级[dB](基准值为 1pW)；

 S ——测量表面面积[m²]；

 K_2 ——环境修正值[dB](按附录 A 给出的方法确定)。

② 由 1/1 倍频带或 1/3 倍频带声功率级合成 A 计权声功率级的方法,见附录 B。

7. 附录 A 测量环境鉴定

(1) 一般要求

①反射平面特性

反射平面的声学特性在有关频率范围内应近似完全的声反射面。平坦的水泥、沥青地面均能满足要求。

②反射平面尺寸

反射平面应大于测量表面在反射平面上投影以外 $\lambda/2$ 。 λ 是有关频率范围内最低频率的波长。

(2) 绝对比较法

在测试环境中,把标准声源放在被测泵的位置,即采用替代法,并采用与被测泵相同的测量方法测量其声压级。标准声源的声功率级按第六章规定的方法,在无环境修正的情况下计算得出。环境修正值 K_2 由式(3-7)计算

$$K_2 = L_w - L_{wi} \quad (3-7)$$

式中 L_w ——在测试环境中采用与被测泵相同的测量面测得的标准声源 A 计权或频带声功率级[dB](基准值 1pW);

L_{wi} ——标准声源标定的 A 计权或频带声功率级[dB](基准值 1pW)。

(3) 合格要求

按规定在给定的测量环境中确定的环境修正值 $K_2 \leq 2\text{dB}$ 时,则此测量环境满足本标准精度要求。

8. 附录 B 由 1/1 倍频带或 1/3 倍频带声功率级合成 A 计权声功率级的方法

(1)由 1/1 倍频带或 1/3 倍频带声功率级合成 A 计权声功率级 L_{wA}

按式(3-8)计算

$$L_{wA} = 10 \lg \sum_{j=1}^{j_{\max}} 10^{0.1(L_{wj} + c_j)} \quad (3-8)$$

式中 L_{wj} ——第 j 个 1/1 倍频带或 1/3 倍频带声功率级[dB](基准值 1pW)。

(2)使用 1/1 倍频带声功率级计算

式(3-8)中 c_j 由表 3-130 给出, $j_{\max} = 7$ 。

表 3-130 c_j 参数表(一)

j	1/1 倍频带中心频率 /Hz	c_j /dB	j	1/1 倍频带中心频率 /Hz	c_j /dB
1	125	-16.1	5	2000	-1.2
2	250	-8.6	6	4000	-1.0
3	500	-3.2	7	8000	-1.0
4	1000	0			

(3)使用 1/3 倍频带声功率级计算

式(3-8)中 c_j 由表 3-131 给出, $j_{\max} = 21$ 。

表 3-131 c_j 参数表(二)

j	1/3 倍频带中心频率 /Hz	c_j /dB	j	1/3 倍频带中心频率 /Hz	c_j /dB
1	100	-19.1	7	400	-4.8
2	125	-16.1	8	500	-3.2
3	160	-13.4	9	630	-1.9
4	200	-10.9	10	800	-0.8
5	250	-8.6	11	1000	0
6	315	-6.6	12	1250	-0.6

(三) 旋片式真空泵性能测试方法(摘自 JB/T 6533—97)

1. 抽气速率、极限压力、最大消耗功率、工作温度的测定

试验方法按 JB/T7266—94 规定的测试方法进行。

2. 噪声的测定

噪声的测定按 JB/T8016—99 规定的测试方法进行。

3. 不喷油的测定

泵按使用说明书和测定极限压力所加的油位加油。在极限压力下运转至稳定泵温,在泵的排气口垂直于排出气流的方向上,距排气口 200mm 的位置上放一张干白纸,然后,全开泵进气口抽大气,观察和测定在白纸上开始出现油点的时间,即为泵的不喷油时间。也可按上述条件到抽大气 1min 时停止抽气,观察白纸上是否有明显油点,如有 3 个以上直径大于 1mm 的小油点,即判为不合格,试前,允许擦净油箱外的零部件。

4. 最低启动温度的测定

①试验条件。应使泵处于最低启动温度下。在开始作启动试验时,如果泵由于温度过低而不能进行启动,可使用另一种粘度的真空泵油。在开始做启动试验时所用的真空泵油的粘度必须与泵制造厂规定的最低启动温度下的真空泵的相同。

②试验方法。将试验油注入泵后,泵应运转约 10min,接着泵停止运转至少 1h,然后检查泵是否还能启动。

5. 不漏油的测定

测试前,应将泵擦拭干净。

泵累计运转 6h 后,目看、手摸,无明显油迹,即判为合格。

测试应在 9h 内进行。

6. 最大允许水蒸气入口压力和水蒸气允许量的测定

按本标准附录 A 给出。

7. 附录 A 最大允许水蒸气入口压力和水蒸气允许量的测定

1) 计算方法

(1)最大允许水蒸气入口压力 p_{wo} 可从抽水蒸气的一般公式得到

$$p_{wo} = \frac{B}{S} \times \frac{p(p_s - p_b)}{p - p_s} \quad (3-9)$$

式中 p_{wo} ——最大允许水蒸气入口压力[Pa];
 B ——与 101325Pa 有关的气镇量[L/s];
 p_s ——在泵工作温度下,饱和水蒸气的压力[Pa];
 p_b ——随着气镇引进泵中的大气压力下气体的水蒸气分压力[Pa],通常 $p_b = 1333\text{Pa}$
 (对应于 20℃ 空气,58% 的湿度);
 S ——在入口压力 p_b 下泵的抽速(可从泵的抽速特性得到,如图 3-97 所示);
 p ——排气压力[Pa],取值 133300Pa。

该式用到这种情况:即油封泵排气阀在排气压力为 133300Pa 时打开,这个压力较环境大气压力 $p_b = 101325\text{Pa}$ 高,这考虑到阀板及油的质量。

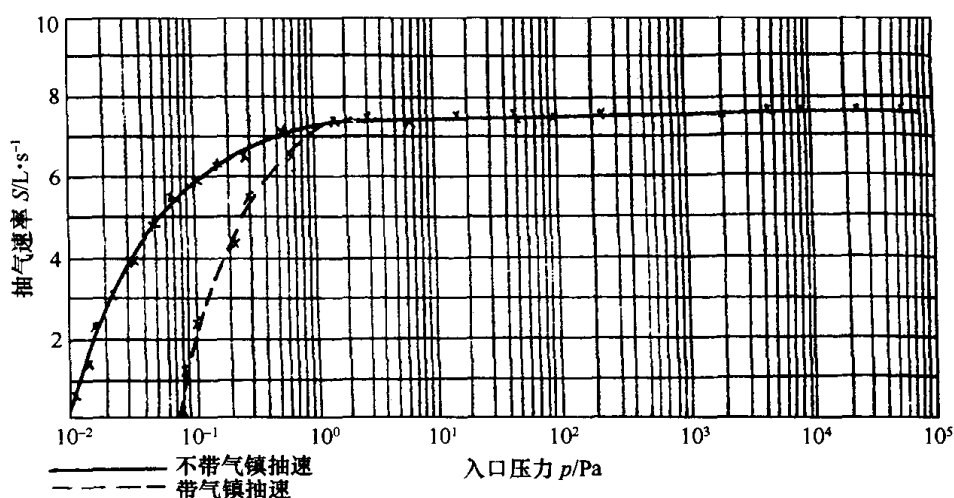


图 3-97 真空泵抽速 S 与入口压力 p 的关系曲线

(2) 水蒸气允许量 C_{wo}

根据理想气体定律,从最大允许水蒸气入口压力 p_{wo} 得出

$$C_{wo} = 7.8 \times \frac{S \cdot p_{wo}}{T} \quad [\text{g/h}] \quad (3-10)$$

式中 C_{wo} ——水蒸气允许量[g/h];

S ——在入口压力为 p_{wo} 下,开气镇时测得的真空泵的抽速[L/s];

p_{wo} ——按式(3-9)得到的最大允许水蒸气入口压力[Pa];

T ——在泵入口被抽水蒸气的热力学温度[K],常用值是 $T = 293\text{K}$ 。

2) 测量方法

(1) 原理

当抽水蒸气时,额外负载使泵温升高,确定最大允许水蒸气入口压力时必须考虑它。由于用水蒸气直接测量很困难,所以用空气测量,然后通过适当的修正,得出抽纯水蒸气情况下的 p_{wo} 值。

测量不同入口压力 p_b 下的排气温度 t_x ,测量环境温度 t_{amb} 和气镇值。

(2) 测量仪器

①测温计 测量排气和环境温度,使用水银温度计、电阻温度计等,其误差不应超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。排气温度测量是按照图 3-98 在弯管中进行的。尺寸 D 应等于泵排气口尺寸,但不能小于 20mm,温度传感器应装在测量值不受热传导明显影响的位置。

②真空计 用U型管真空计或校准的薄膜计测量入口压力,其误差不应超过 $\pm 5\%$ 。把真空计安到JB/T 7266规定的测试罩上,其间不装冷阱,泵排气口与大气压之间的压力差用校准精度为 $\pm 5\%$ 的U型管真空计测量。

③流量计 测量气镇量,应使用具有 $\pm 1\%$ 精度的气体流量计或玻璃转子流量计。

(3)测量程序

测量装置和温度计、真空计、流量计的安装如图3-99所示。

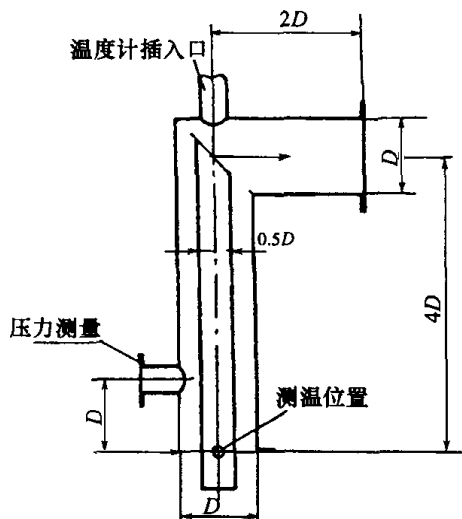


图 3-98 排气压力和温度测量管

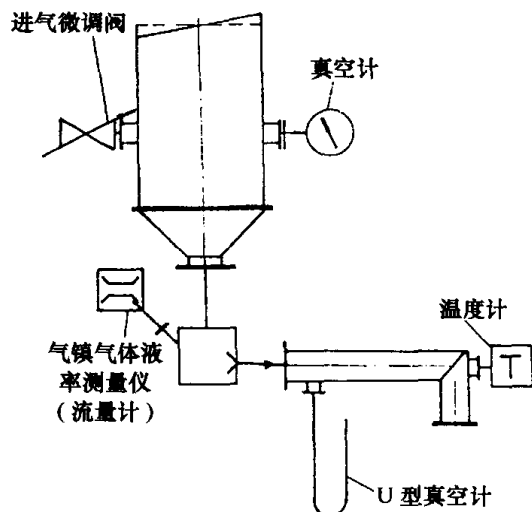


图 3-99 最大允许水蒸气入口压力测量装置

泵在关闭进气微调阀和全开气镇阀情况下,大约运转15min,在排气口规定的测量点测得的温度变化小于 0.5°C 时,测量气镇量 B ,在以下测量过程中 B 保持不变。通常气镇阀在全开情况下,气镇量 B 是被测泵几何抽速的0.1或0.15倍(即在大多数情况下, $B/S_N=0.1$ 或0.15)。为了使试验中至少有四个不同入口压力,调整进气微调阀(尽可能使各点压差相等),达到稳定状态后,测量排气温度,这些入口压力至少有一点较期望的最大允许水蒸气入口压力 p_{wo} 高。

对于每个入口压力,应测量下列数据:

排气温度 $t_x[^{\circ}\text{C}]$;

入口压力 $p_b[\text{Pa}]$ 。

测量只允许在大气压低于 $1.07 \times 10^5 \text{Pa}$ 时进行。此外,必须注意,排气压力与大气压力差不得超过1000Pa,否则排气管阻太大,应更换它。

(4)测量计算

测得的排气温度必须考虑修正:

①偏离 20°C 的环境温度 t_{amb} ,它与测量的最大允许水蒸气入口压力有关;

②为了满足最大允许水蒸气入口压力的定义,用温度为 t_{amb} 的干燥空气代替温度为 t_s 的饱和纯水蒸气测量。

在下式中包括了两者的修正

$$t_o = t_x - (t_{amb} - t) + \frac{t_s - t_{amb}}{1 + \frac{B}{S} \times \frac{p_1}{p_b} \times \frac{5}{6}} \quad (3-11)$$

式中 t_o ——修正后的排气温度 $[^{\circ}\text{C}]$;

t_x ——在(3)中测得的排气温度 $[^{\circ}\text{C}]$;

p_b ——在(3)中测得的入口压力[Pa];

p_1 ——在(3)中使用的大气压力[Pa],取值 101325Pa;

t_{amb} ——在(3)中测得的环境温度[℃];

t ——在(3)中的常温温度[℃],取值 20℃;

t_s ——在入口压力 p_b 下,饱和水蒸气温度[℃](见表 3-132)。

表 3-132 纯饱和水蒸气压力 p_s

t_s /℃	p_s /Pa	t_s /℃	p_s /Pa	t_s /℃	p_s /Pa	t_s /℃	p_s /Pa
0	610.8	20	2337	40	7378	60	19920
1	656.6	21	2486	41	7780	61	20860
2	705.5	22	2643	42	8202	62	21840
3	757.5	23	2809	43	8642	63	22850
4	812.9	24	2983	44	9103	64	23910
5	871.9	25	3167	45	9586	65	25010
6	934.7	26	3361	46	10090	66	26150
7	100.1	27	3565	47	10620	67	27330
8	107.2	28	3780	48	11170	68	28560
9	114.7	29	4006	49	11740	69	29840
10	1227	30	4243	50	12340	70	31160
11	1312	31	4493	51	12970	71	32530
12	1402	32	4755	52	13620	72	33960
13	1497	33	5031	53	14300	73	35430
14	1598	34	5220	54	15010	74	36960
15	1704	35	5624	55	15750	75	38550
16	1817	36	5942	56	16520	76	40190
17	1937	37	6276	57	17320	77	41890
18	2063	38	6626	58	18150	78	43650
19	2196	39	6993	59	19020	79	45470

作出 t_s 与入口压力 p_b 的函数关系曲线如图 3-100 所示,这条曲线与 B/S_N 特性曲线的相交点 P 的纵坐标即为要求的最大允许水蒸气入口压力 p_{wo} (图 3-100 示例: $B/S_N = 0.15$, $p_{wo} = 4200\text{Pa}$)。

(四) 滑阀式真空泵性能测试方法(摘自 JB/T 1246—97)

1. 抽气速率(体积流率)的测定

(1)原理

采用定压法测量泵的抽气速率,即在测试过程中测试罩内压力保持不变。

(2)测试装置

①测试罩。如图 3-90(a)所示,形状为圆筒形。其内径为 D ,高为 $1.5D$ 。试验气体入口位于罩的轴线上,并背向泵口,与法兰平面距离为 D 。真空计(或规管)连接管距法兰平面 $0.5D$,并垂直于罩的轴线。

罩的容积 V_D 至少应是泵一个压缩周期扫过容积 V_P 的 5 倍。罩与泵口之间必须连接一个长度不超过 $0.5D$ 的异径接头,如图 3-90(b)所示。不同规格的泵适用的测试罩由表 3-125 给出。

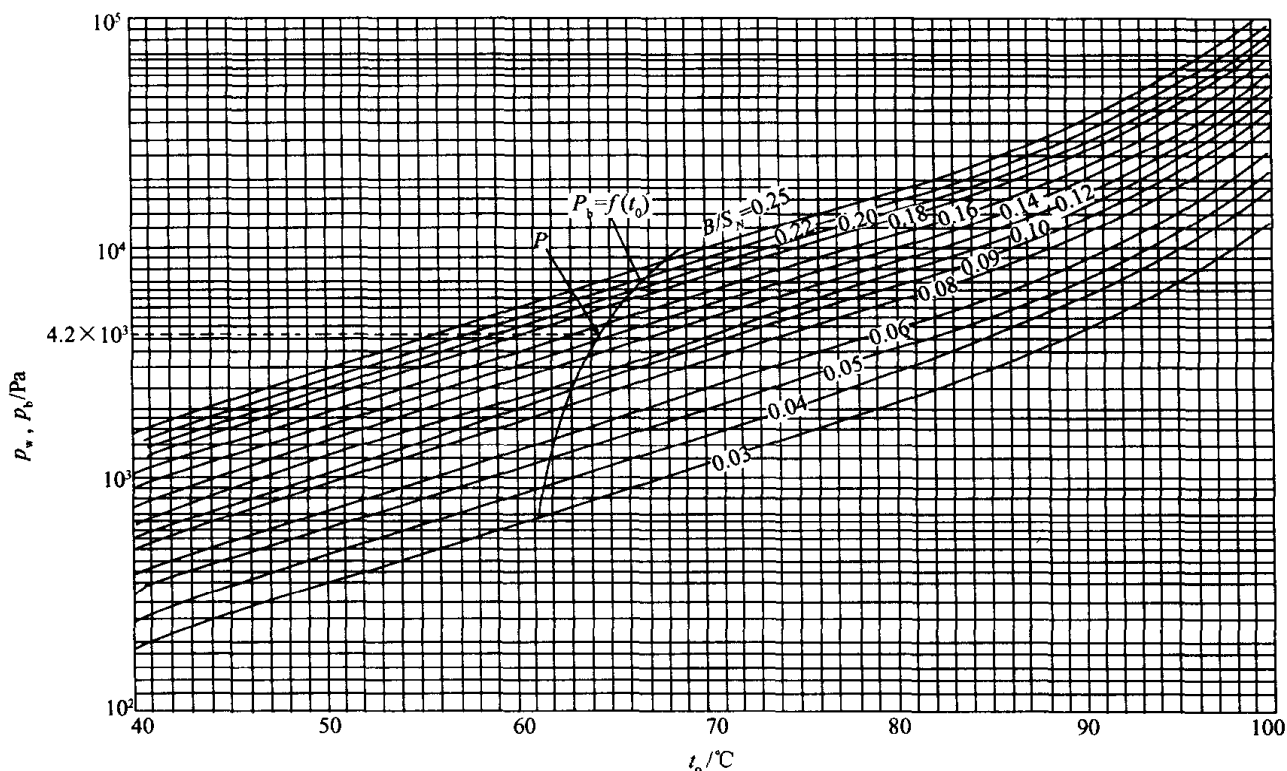


图 3-100 气镇泵最大允许水蒸气入口压力测定曲线

②真空计。根据所测压力,选用不同种类和精度的真空计。压力大于或等于 1Pa 时,校准精度在 $\pm 5\%$ 以内;压力小于 1Pa 时,校准精度在 $\pm 10\%$ 以内。

有关真空计的其它要求见附录 A。

③流量计。根据所测流量,选用不同种类和规格的流量计,其精度为:

流量大于 $9.9 \times 10^1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 在 $\pm 3\%$ 以内;

流量在 $9.9 \times 10^1 \text{ Pa} \cdot \text{L/s} \sim 9.9 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 之间, 在 $\pm 5\%$ 以内;

流量小于 $9.9 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 在 $\pm 10\%$ 以内。

有关流量计的其它要求和计算见附录 B。

(3) 试验条件

①泵实测转速与额定转速之差不大于 $\pm 3\%$, 并应进行修正;

②泵油种类和数量应符合设计要求;

③水冷泵的冷却水流量和温度应符合设计要求;

④环境温度在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 之间, 试验期间波动不大于 $\pm 1^\circ\text{C}$;

⑤试验气体为室内空气, 相对湿度不大于 75%;

⑥测气镇泵时, 其掺气量应符合设计要求。

(4) 测试程序

抽气速率(体积流率)测试装置如图 3-91 所示。

关闭微调阀, 开泵运转, 待罩内压力接近极限压力且泵温平衡时, 开启微调阀, 将试验气体放入罩内, 以建立一个设定的平衡压力, 同时测定气体流量。

测试应从略高于极限压力的适当值开始, 直至大气压或适合泵结构特点的其它压力。每个压力数量级内至少测三点(大致是 2.5、5、10)。若测一次流量时间较长, 压力应重新测量,

并取其平均值。若最高读数与最低读数之差大于平均值 10%，流量和压力都应重新测定。

对于气镇泵，应在上述测试之后关闭微调阀，全开气镇阀，待泵温再次平衡后，再测试气镇时的抽气速率（体积流率）。

根据测试结果计算出抽速，并给出抽气速率—入口压力曲线，如图 3-101 所示。

(5) 抽气速率计算

抽气速率 S_1 按下列公式计算

$$S_1 = 1000q/p \quad (3-12)$$

式中 S_1 ——实测转速下的抽速[L/s]；

q ——流量[Pa·m³/s]；

p ——平衡压力[Pa]。

当泵实测转速与额定转速间存在大于 ±3% 的差时，可以按公式(3-13)修正

$$S_{\text{修}} = S_1 n_0 / n_1 \quad (3-13)$$

式中 $S_{\text{修}}$ ——额定转速下的抽速[L/s]；

S_1 ——实测转速下的抽速[L/s]；

n_0 ——额定转速[r/min]；

n_1 ——实测转速[r/min]。

2. 极限压力的测定

(1) 原理

将规定的测试罩装在泵口上，在平衡温度下测量罩内压力。

(2) 测试装置

①测试罩。如图 3-90 所示。

②真空计。采用标准压缩式真空计测量泵的极限压力，其校准精度为：

压力大于或等于 1Pa 时，在 ±5% 以内；

压力小于 1Pa 时，在 ±10% 以内。

其它具体要求见附录 A。

采用灵敏度与气体（或蒸气）种类无关的其它全压力真空计，如薄膜计等测量泵的极限全压力。该真空计应以被测压力 ±10% 的精度校准。规管与测试罩之间不准接有冷阱。

③试验条件。环境温度在 15℃ ~ 25℃ 之间，其余测定同抽气速率的试验条件①~③，⑤，⑥。

④测试程序。极限压力测试装置如图 3-91 所示。

关闭微调阀，开泵后应在气镇下至少运转 1h，然后在关气镇下再运转 1h，泵温平衡后每 30min 测一次压力，当连续三次测试结果表明压力不再变化，即泵温再次平衡后，测试气镇时的极限压力。

3. 消耗功率的测定

(1) 原理

在各种不同入口压力下，用瓦特表测泵的驱动电机的输入功率，然后乘以其不同负荷下的效率，即为泵的消耗功率。

(2) 装置

①测试罩。如图 3-90 所示。

②真空计。对于测量压力大于或等于 1Pa 时,其校准精度为 $\pm 5\%$;对于更低压力,校准精度为 $\pm 10\%$ 。有关其它要求见附录 A。

③瓦特表和电流互感器。瓦特表和电流互感器应具有 0.5 级精度。

④试验条件。同测定极限压力的试验条件。

⑤测试程序。关闭微调阀和辅助进气阀,待泵温平衡后,开启微调阀或辅助进气阀,使罩内压力由低至高,逐点稳定,同时测取功率值,测试值应具有两位有效数字。

对于气镇泵,应在上述测试后完全打开气镇阀,等泵温再次平衡后,测试气镇时的消耗功率。

根据测量结果绘出消耗功率—入口压力曲线,如图 3-101 所示。

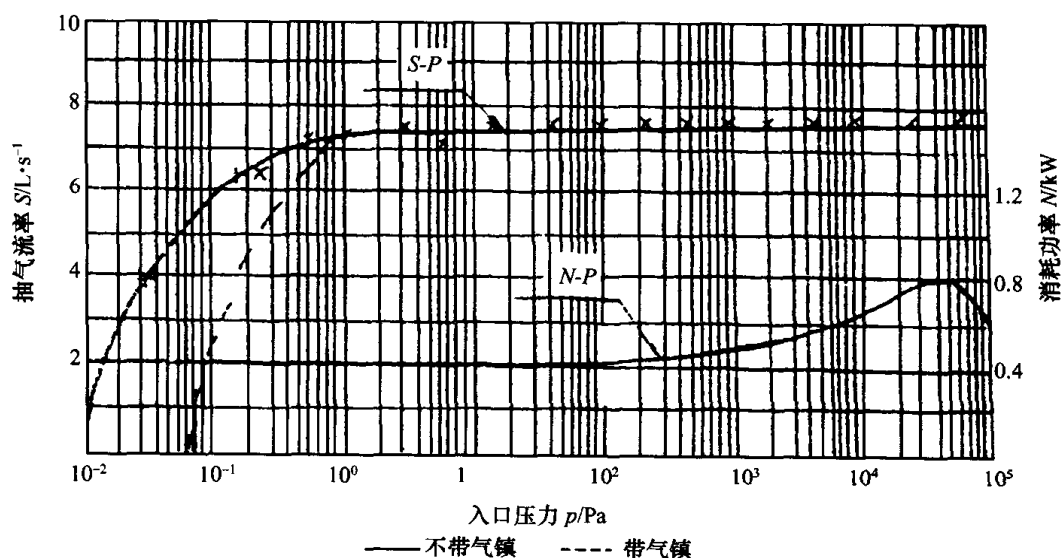


图 3-101 抽气流率、消耗功率与入口压力关系曲线

4. 工作温度的测定

(1) 装置

温度计:误差不大于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

(2) 试验条件

同测定极限压力的试验条件。

(3) 测试程序

泵在极限压力下运转 1h 后,连续测量排气阀附近或其它测温部位的温度。若在 1h 内温度变化不超过 1°C ,温度计的最终指示温度即为泵的工作温度。

对于气镇泵,应在上述测试后完全打开气镇阀,继续运转 1h,再测试气镇时的工作温度。工作温度最好与极限压力同时测量。

5. 噪声功率级的测定——简易法

(1) 测量项目

主要测量项目为 A 计权声功率级。

(2) 装置

①噪声测量仪器。选用 GB3785 规定的 2 型或 2 型以上的声级计,或准确度相当的其它测量仪器。声级计或其它测量仪器和传声器之间最好使用延伸杆连接。

②标准声源。应具有恒定的宽频带的声功率输出,并按 $1/3$ 倍频程和倍频程校准。

③校准。每次测量前、后需用准确度在 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内的声级校准器在某一个或多个频率上对整个测量系统(包括电缆)进行校准。可选用声级校准器或活塞发生器校准,声级计及其它测量仪器应定期检定。

(3) 试验条件

① 声学环境。

a. 测量环境:坚硬平坦的户外场所或满足附录 C 要求的环境。

b. 背景噪声:泵辐射噪声的 A 计权声压级与在相同测点上测得背景噪声声压级之差,应在 10dB(A) 以上。当二者差值在 $3\text{dB(A)} \sim 10\text{dB(A)}$, 测量值应按表 3-133 修正;若此差值小于 3dB(A) , 则测量无效。

表 3-133 背景噪声声压级修正值

泵辐射与背景噪声声压级之差	3	4	5	6	7	8	9	10	>10
修正值	3	2		1			0.5		0

②安装。被测泵应放在试验场所地面上或弹性物上,当泵振动过大时,可采用固定安装,并在测试报告中注明。

③运转条件。测气镇泵时,关闭气镇阀,其余按抽气速率(体积流率)的测定时的(3)试验条件中的①、②、③。

④工况。被测泵不连接测试罩,关闭进气口,泵至少运转 30min,等泵温平衡后并达到极限压力时方可进行噪声测量。

(4) 测试程序

①基准体。以一个包络被测泵并终止于反射平面上的最小矩形六面体作为基准体。测量表面与测点以基准体为基础布置,在确定基准体大小时,泵的突出部位只要不是声能的主要辐射体,可以不予考虑。

②测量表面及测点位置。

a. 测量表面。采用各面平行于基准体的矩形六面体作为测量表面。测量表面面积 S 由式(3-14)计算

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (3-14)$$

式中 $a = L_1/2 + d$, $b = L_2/2 + d$, $c = L_3 + d$

L_1 、 L_2 、 L_3 分别为基准体的长、宽、高, d 为测量距离,取 $d = 1\text{m}$ 。

b. 测点位置

测点位置及坐标如表 3-129 和图 3-96。

泵噪声对称辐射时可适当减少测点数,但必须保证测点减少对计算声功率级的影响不大于 1dB 。

③测量。

a. 测量时传声器应正对被测泵,声级计采用“慢”时间计权特性测量泵的 A 计权声压级。声级计读数在观察周期内波动幅度小于 3dB 时,声压级的读数可取平均值(对偶然出现的过大值或过小值不予考虑)。

b. A 计权声压级观察读数至少 10s。

c. 测量人员尽可能远离声场,与传声器保持 0.5m 以上距离。

d. 测量前或后,应按上述方法测量背景噪声。

(5) 计算和测量误差

① 测量表面 A 计权平均声压级的计算

$$\bar{L}_{pA} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1(L_{pAi} - K_{fi})} \right] \quad (3-15)$$

式中 \bar{L}_{pA} ——测量表面 A 计权平均声压级[dB(A)](基准值为 $20\mu\text{Pa}$);

L_{pAi} ——第 i 点测得的 A 计权声压级[dB(A)](基础值为 $20\mu\text{Pa}$);

K_{fi} ——第 i 点测得的背景噪声修正值[dB(A)];

N ——测点总数。

当 L_{pAi} 值的变化不超过 5dB 时,可用算术平均法计算 \bar{L}_{pA} ,其值与式(3-15)之差应不大于 0.7dB。

② A 计权声功率级的计算

$$L_{wA} = \bar{L}_{pA} - 10 \lg S/S_0 - K_2 \quad (3-16)$$

式中 L_{wA} ——A 计权声功率级[dB(A)](基准为 1pW);

S ——测量表面面积[m²];

S_0 ——基准面积[m²],取值 $S_0 = 1\text{m}^2$;

K ——环境修正值[dB(A)](按附录 C 确定)。

③ 测量误差。A 计权声功率级的标准偏差不大于 5dB(A)。

6. 不漏油的测定

测试前,应将泵擦拭干净。泵累计运转 6h 后,目看、手摸,无明显油迹即判为合格,测试应在 9h 内进行。

7. 附录 A 真空计和压力测量(见本章第九节的 6)。

8. 附录 B 流量计和流量测量(见本章第九节的 7)。

9. 附录 C 测量环境的确定

1) 概述

本附录规定用标准声源法来确定环境修正值 K_2 值不大于 7dB。

2) 环境修正值 K_2 的确定(1) 用标准声源法确定 K_2 值

将标准声源放置在与被测泵相同位置的测量环境中。按前述噪声声功率级的测定——简易法的程序测量和计算标准声源的声功率级(不需要环境修正)。环境修正值 K_2 由式(3-17)计算

$$K_2 = L_w - L_{w0} \quad [\text{dB}] \quad (3-17)$$

式中 L_w ——采用与被测泵相同的测量面测得的标准声源声功率级[dB(A)](基准值为 1pW);

L_{w0} ——标准声源标定的声功率级[dB(A)](基准值为 1pW)。

(2) 标准声源在测量环境中的放置

对于移动方便的泵可采用替代法,即将泵按前述噪声声功率级的测定——简易法的程序测量后移走,将标准声源放置在被测泵相同位置上按上述(1)的方法测量和计算。若受泵体积质量或其它条件的限制,不便将泵从测量现场移开时,可采用并列法,即将标准声源放置在四个位置上,这四个位置为:基准体在反射平面上投影的四条矩形边的中点上,并对四个标准声源位置求平均声压级。

(五) 涡轮分子泵性能测试方法(摘自 GB7774-87)

1. 本标准适用于涡轮分子泵极限压力、抽速及最大压缩比的测试

所用前级泵的抽速,应是分子泵名义抽速的 0.02 倍~0.1 倍。分子泵性能测试选定两个压力范围,即

- ① $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$;
- ② 低于 10^{-3}Pa 。

2. 测试装置

(1) 压力范围 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时的测试装置

① 测试罩。如图 3-102(a)所示。罩为圆筒形,其轴向尺寸为罩内径 D 的 1.5 倍。试验气体进气管口在测试罩轴线上,距泵入口法兰为 D ,测全压力的规管接头距泵口法兰为 $0.5D$,其轴线垂直于测试罩轴线;与此规管接头成 90° 另设一同样接头,用来连接残余气体分析仪。测试罩应配备烘烤装置。

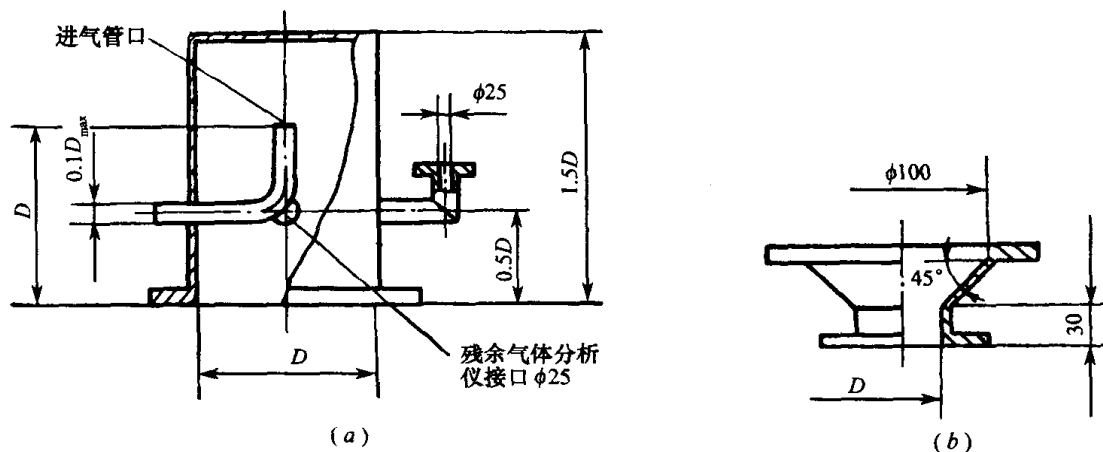


图 3-102 测试罩(压力范围 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$)

对于口径小于或等于 100mm 的泵,测试罩内径取 100mm。用图 3-102(b)所示的锥形连接管把泵与测试罩连接起来。

对口径大于 100mm 的泵,测试罩内径与泵口内径 D 相同。

② 真空计。真空计必须校准。对压力高于或等于 1Pa 的真空计,其校准精度应在 $\pm 5\%$ 以内;对压力低于 1Pa 的真空计,其校准精度应在 $\pm 10\%$ 以内。前级压力用带有液氮冷阱(流导不小于 2L/s)的高压热阴极电离计测量。分子泵入口压力用热阴极电离真空计——B-A 规测量。

③ 气体流量装置。根据所测流量大小选择测量气流量的方法。其精度为:

- a. 流量大于 $1\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 为 $\pm 3\%$;
- b. 流量在 $1\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 内为 $\pm 5\%$ 。

建议采用滴管式流量装置,参照 GB6307.1—86《蒸汽流真空泵 抽气速率测量方法》(见本书第四章)。气体流量测试装置如图 3-105 所示。

④ 分子泵出口至前级泵间的压力测量及进气装置。测试系统如图 3-103 所示,调节装在前级泵入口附近的微调阀,以得到前级区不同的压力值。分子泵与前级泵间采用一内径等于分子泵出口直径的圆管连接。规管用圆短管连接,其轴线垂直于分子泵与前级泵间接管的平

直部分,且规管应靠近分子泵出口。

(2) 压力范围低于 10^{-3} Pa 时的测试装置

测试罩如图 3-104 所示。罩为圆筒形,其轴向尺寸为罩内径 D 的 3 倍,被带有薄壁孔的中隔板分为 x 、 y 两部分。上部 x 的尺寸及布置形式与图 3-102(a) 测试罩相同;下部 y 除了去掉进气管外,其余尺寸及布置形式与上部 x 基本相同。测试罩应配备烘烤装置。

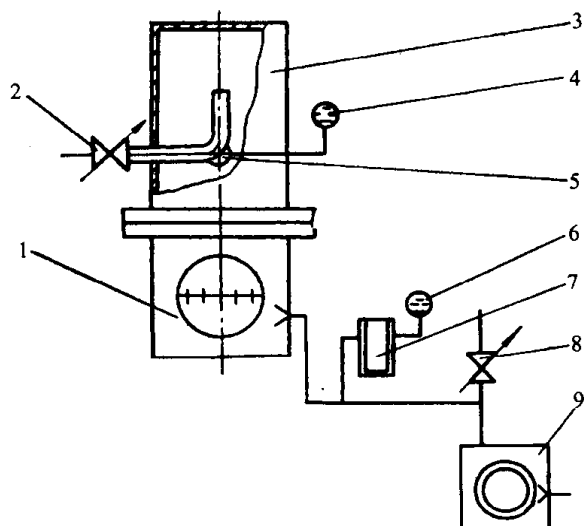


图 3-103 分子泵出口至前级泵间压力测量及进气装置

- 1—分子泵;2—微调阀;3—测试罩;4—超高真空计规管;
5—剩余气体分析仪接管;6—高压真空计;
7—液氮冷阱;8—微调阀;9—双级旋片泵。

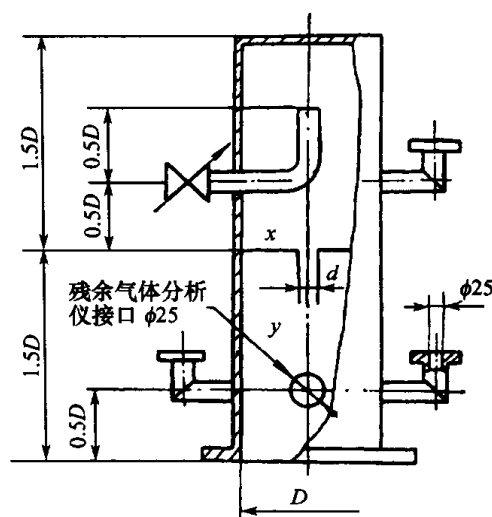


图 3-104 测试罩
(压力范围低于 10^{-3} Pa)

对口径小于或等于 100mm 的泵,测试罩内径取 100mm。用图 3-102(b) 所示的锥形连接管把泵与测试罩连接起来。

对口径大于 100mm 的泵,测试罩内径与泵口内径 D 相同。

真空计、分子泵出口至前级泵压力装置及进气装置同压力范围为 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时。

3. 测试方法

(1) 压力范围为 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时的测试方法

采用定压法测试。

将测试罩装在泵上,分子泵按规定条件运转。在整个测试过程中,室温应在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 之间的某一温度。测试时,温度允许变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。测试罩烘烤后,测试系统的温度应均匀,且在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 之间,温度变化不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

①极限压力测量。分子泵启动 1h 后,烘烤测试罩,烘烤温度不超过 120°C 。若泵备有烘烤装置,应按制造厂规定进行烘烤。烘烤持续时间不得超过 24h。

在烘烤期间及其以后,测量极限压力的热阴极电离计规管必须按制造厂规定进行去气,每 10h 进行一次,最末一次去气至少应在测量极限压力前 5h 进行。

烘烤结束后 48h 内用热阴极电离计测得的压力,即为分子泵极限压力。此时,压力与时间的关系曲线的斜率不应为正值。

②最大压缩比测量。取干燥空气、氢气为试验气体。当测试罩中达到极限压力 p_u 时,测量相应的前级压力 p_{b0} ,此 p_{b0} 值应低于 10^{-1}Pa 。调节图 3-103 中微调阀,试验气体进入前级区,使前级压力增大到某一欲测值 p_b ,待压力稳定后,测量分子泵入口压力 p_i ,对不同 p_b 值重

复上述程序,每一压力量级测三点。绘制分子泵入口压力 p_i 对前级压力 p_b 的关系曲线。

分子泵最大压缩比由下式给出

$$K = \frac{p_b - p_{b0}}{p_i - p_u} \quad (3-18)$$

测试时须接残余气体分析仪或其它能指示气体纯度的仪器。

应使用对试验气体校准过的真空计,测量分子泵入口压力及前级压力;在测试时,当连续使用氢、氮等气体进行测试时,在每一种试验气体通入之前,泵均应达到极限压力 p_u 。

③抽速测量。除非另有规定,一般取干燥空气为试验气体。在测试罩中达到极限压力之后,调节图 3-103 中微调阀,使试验气体经过流量测量装置进入测试罩。随着罩中压力的逐步升高进行测试。对名义抽速在 500L/s 以下的分子泵,从 10^{-3} Pa 开始测试;对名义抽速在 500L/s 以上的分子泵,从 10^{-4} Pa 开始测试。每取一测试点,至少应平衡 20min,再观察 10min,压力应稳定在 $\pm 5\%$ 以内,则此点有效。所取数值应为多次测试结果的平均值。重复上述程序,进行下一较高压力点测试。每一压力量级测三点。绘制分子泵入口压力与抽速的关系曲线。

(2)压力范围低于 10^{-3} Pa 时的测试方法

采用“压差法”测试,即“标准流导法”。

将测试罩装在泵上,分子泵按规定条件运转。在整个测试过程中,室温应在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 之间。测试罩烘烤后,测试系统的温度应均匀,且在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 之间,温度变化不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

①极限压力测量。分子泵启动 1h 后,烘烤测试罩,烘烤温度最高 300°C 。若泵备有烘烤装置,应按制造厂规定进行烘烤。烘烤持续时间不得超过 48h。

在烘烤期间及其以后,测量极限压力的热阴极电离计规管必须按制造厂规定进行去气,每 10h 进行一次。最末一次去气至少应在测量极限压力前 5h 进行。

烘烤结束后 48h 内用热阴极电离计测得的压力,即为分子泵的极限压力。此时,压力与时间的关系曲线的斜率不应为正值。

②最大压缩比测量。同前压力范围 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 的最大压缩比的测量。

③抽速测量。除非另有规定,一般取干燥空气、氢气为试验气体。在测试罩中达到极限压力之后,调节图 3-108 中微调阀。使试验气体进入测试罩。随着罩中压力的逐步升高,直到压力为极限压力的 10 倍,开始进行测试。每取一测试点,至少应平衡 20min,再观察 10min,压力应稳定在 $\pm 5\%$ 以内,则此点有效。重复上述程序进行一较高压力点测试,每一压力量级测三点。绘制分子泵入口压力与抽速的关系曲线。

在每一测点,用电离规 G_1 、 G_2 测得的压力分别为 p_1 和 p_2 [罩下部(y)压力],抽速由下式给出

$$S = U \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \quad (3-19)$$

式中 U ——薄壁孔对试验气体分子流流导。

记录前级压力和温度。

当分子泵入口压力达到 $7.5 \times 10^{-3}\text{Pa}$,或者当该气体分子的平均自由程小于测试罩直径的 20 倍时,停止测试。

4. 测试报告

(1)测试结果

在双对数坐标纸上绘制压缩比与前级压力的关系曲线。在单对数坐标纸上绘制分子泵抽速(线性刻度)与入口压力(对数刻度)的关系曲线。

(2)测试记录

除已得到测试结果外,还应包括下面的数据:

- ①测试罩的尺寸及所用小孔直径的数据;
- ②小孔流导及计算公式;
- ③烘烤最高温度和持续时间;
- ④所使用的全部测量仪表型号和操作条件;
- ⑤测试罩上各接头密封形式;
- ⑥所使用润滑油种类、数量;
- ⑦前级泵类别、型号及抽速;
- ⑧分子泵电机功率、消耗功率;
- ⑨分子泵额定转速;
- ⑩环境温度及大气压。

5. 附录 A 启动时间的测量(补充件)

将泵与测试罩连接,前级泵和分子泵均处于静止状态,测试罩内为大气压,两台泵同时接通电源,从两台泵接通电源的瞬间到分子泵达到额定转速的 90% 的时间,就是分子泵的启动时间。

6. 附录 B 薄壁孔流导计算(补充件)

薄壁孔对试验气体的分子流流导计算公式

$$U = \sqrt{\frac{\pi RT}{32M}} \frac{1}{\frac{3\delta}{4d} + 1} d^2 \quad (3-20)$$

式中 R ——摩尔气体常数, $8.31441[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$;

T ——热力学温度 $[\text{K}]$;

M ——气体摩尔质量 $[\text{kg}/\text{mol}]$;

δ ——孔板厚度 $[\text{m}]$;

d ——小孔直径 $[\text{m}]$ 。

7. 附录 C 气体流量测试装置(补充件)

气体流量测试装置如图 3-105 所示。

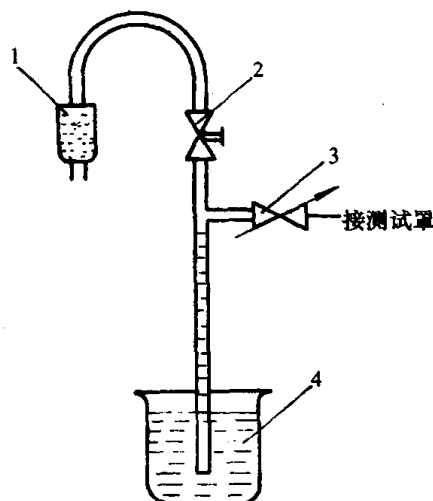


图 3-105 气体流量测试装置

- 1—干燥剂;2—玻璃旋塞;
3—微调阀;4—油杯。

(六) 罗茨真空泵性能测试方法(摘自 JB/T7674—95)

本标准适用于所规定的罗茨真空泵(以下简称“泵”)

1. 测试条件

- ①泵应配用表 3-81 推荐规定的前级泵。
- ②泵的转速及配用电机应符合产品设计规定,泵的实际转速与规定转速相差不得超过 $\pm 3\%$ 。
- ③泵采用水冷却时,冷却水流量、进口水温度应符合产品设计规定。
- ④测试的环境温度应为 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$,测试期间温度波动不大于 $\pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度不大于 75%。

⑤测试气体为室温干燥空气。

2. 测试装置

罗茨真空泵的测试装置如图 3-106 所示。

(1) 测试罩

同本章第九节(一)容积真空泵性能测试方法的测试罩。

(2) 前级管路及管路上的测试罩

被测试的罗茨泵出口与前级泵之间的管路,应按图 3-107 设计制作。管路上的测试罩按图 3-90(a)比例制作。

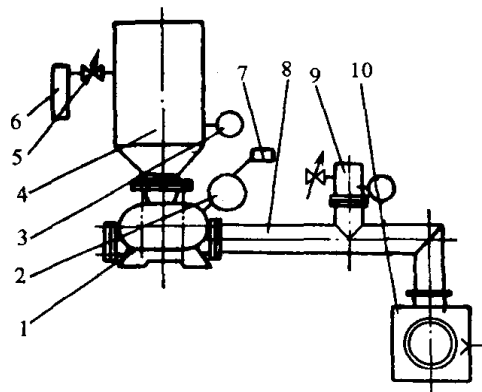


图 3-106 测试装置

- 1—罗茨真空泵;2—电动机;3—真空计;4—测试罩;
5—微调阀;6—流量测试装置;7—功率表;
8—前级管路;9—管路上的测试罩;10—前级泵。

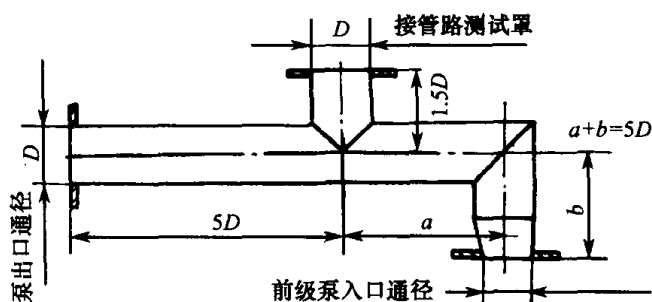


图 3-107 前级管路

(3) 真空计

根据所测压力,选用不同种类和精度的真空计:

- ①测量压力高于或等于 0.1Pa 时,测量精度在 $\pm 5\%$ 以内;
- ②测量压力低于 0.1Pa 时,测量精度在 $\pm 10\%$ 以内。

(4) 流量计

根据所测流量,选用不同种类和规格的流量计。一般推荐选用滴管式流量计,但流量太大时也可采用浮子流量计,流量计必须经计量部门检定,使其精度达到规定要求:

- ①流量大于 $1\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 为 $\pm 3\%$ 以内;
- ②流量在 $1\sim 10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 之间为 $\pm 5\%$ 以内;
- ③流量小于 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 为 $\pm 10\%$ 以内。

选用滴管式流量计时,应选用饱和蒸气压低、粘度低的油。推荐使用 2 号变压器油。

(5) 其它仪表

其它仪表如气压计、转速表、功率表、声级表、秒表等仪表,均应按有关标准规定。

3. 测试方法

(1) 泵的极限压力测试

极限压力是泵按规定条件运转,在不引入气体的测试罩内趋向稳定的最低压力。

测试装置如图 3-106 所示。关闭微调阀,开泵使其运转达到平稳之后(一般 15min 之后)即可用真空计测量压力。每隔 5min 测一次压力,当连续测试结果表明压力不再变化时,即达到极限压力。测得的极限压力采用两位有效数值表示。

(2) 抽气速率的测试

采用定压法测量泵的抽气速率。即在测量流量过程中试验罩内的压力保持不变。

抽气速率测量装置如图 3-106 所示。为了测量抽气速率,试验罩、真空计和流量计应与泵连接。

关闭微调阀,开泵运转,等泵运转稳定并达到极限压力后,开启微调阀,把试验气体引入罩内,建立一个设定的平衡压力,用真空计测其压力值,同时用流量计测量气体流量。按 JB/T7266 规定进行抽气速率的计算。测量应从接近极限压力的适当压力值开始,每个数量级至少测三点(其分布基本符合 2.5、5、10)。若测一次流量时间较长,取 60s 为一周期,压力应重复测量,并取其平均值。如果最高与最低之差大于平均值 10%,流量和压力都应重新测量。

(3) 最大允许压差的测量

最大允许压差系指泵入口压力低于 $1 \times 10^3 \text{Pa}$ 时,连续运转 40min,不发生故障所允许的出口压力与入口压力差值的最大值。

测量步骤为:泵吸气侧和前级真空管路都引入室温干燥空气,调节进气阀,使入口压力低于 $1 \times 10^3 \text{Pa}$,相应地调节前级管路上试验罩的压力,泵出口侧和入口侧之间产生一系列的压差,其中最大的压差即为最大允许压差。泵在此压差下,必须保证无故障运转 40min。测量的结果以两位有效数字表示。

(4) 消耗功率的测量

泵的消耗功率用电动机的输出功率表示。它等于电动机的输入功率乘以电动机的效率

$$N_{\text{消耗}} = N_{\text{输入}} \cdot \eta_{\text{电机}} \quad (3-21)$$

式中 $N_{\text{消耗}}$ ——泵的消耗功率[kW];

$N_{\text{输入}}$ ——电动机的输入功率[kW];

$\eta_{\text{电机}}$ ——电动机的效率。

电动机的输入功率测量应选用精度不低于 0.5 级的仪表,且需经计量部门的检定。

泵的消耗功率测量可和抽气速率测量同时进行。

(5) 零流量最大压缩比 $K_{0\text{max}}$ 测量

气体流量为零的压缩比 K_0 就是关闭进气管路、气体流量为零时,前级真空管路中的压力与入口压力之比,该压缩比的最大值用 $K_{0\text{max}}$ 表示,试验气体为非可凝性气体,一般指空气。其测量方法是在泵进气口上装一个试验罩,关闭进气阀,然后在前级真空侧用合适的方式(如充气)调节不同的压力。测量装置如图 3-106 所示。关闭微调阀,通过调节阀管路试验罩的进气阀,放入不同的气体量,试验罩 9 内就形成不同的压力。分别用真空计测量试验罩 4 和试验罩 9 内的压力,即可得到一系列零流量压缩比 K_0 值。

当在 15min 内两次连续测量压力读数的变化不大于 5% 时,测量才有效。

(6) 泵的噪声测量

① 泵的噪声测量按 JB/T5973 规定。

② 测量泵在极限压力下不带试验罩的噪声,测量时要停前级泵。

(七) 往复真空泵性能测试方法(摘自 JB/T7675—95)

本标准规定了单级往复真空泵的试验方法。

1. 测量条件

- ①测量时环境温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 测量期间温度波动不大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不大于 75%。
 ②试验气体为室温干燥空气。

2. 测量装置

测量装置如图 3-108 所示。

- ①试验罩。试验罩直径 $d \geq 4D$ (D 为喷嘴内径); 长度 $L \geq 10d$; 最小尺寸为: $d = 150\text{mm}$; $L = 3000\text{mm}$ 。
 ②储气罐。储气罐容积不小于泵腔容积的 20 倍。
 ③仪表。
 a. 喷嘴、温度计、转速表、气压计应经计量部门检定并在有效期内。
 b. 流量喷嘴按附录 A(补充件)制造。
 c. 单管水银压力计或 U 形水银压力计的精度为 $\pm 5\%$; 温度计精度不得低于 0.5°C ; 功率表精度不得低于 0.5 级, 气压计精度不得低于 $\pm 0.1\text{kPa}$ 。

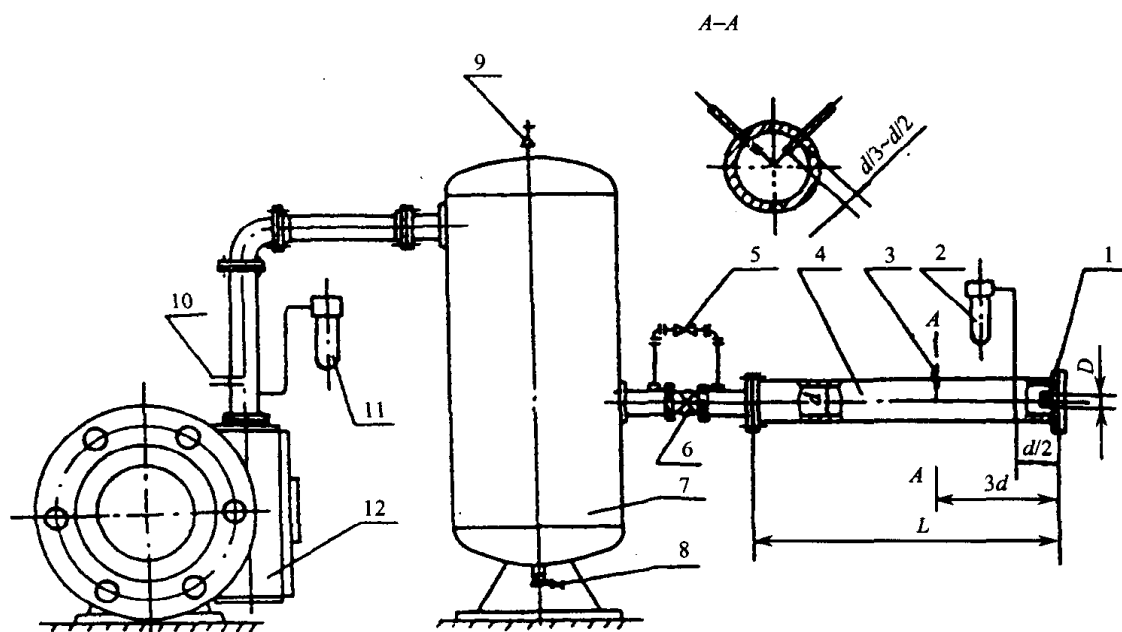


图 3-108 测量装置

- 1—喷嘴; 2—压差计(H); 3—水银温度计(T_1); 4—试验罩; 5—调节阀(微调); 6—调节阀;
 7—储气罐; 8—排水阀; 9—安全阀; 10—水银温度计(T_0); 11—水银压力计(p_c); 12—气缸。

3. 泵的极限压力测量

泵按图 3-108 所示测量装置连接, 关闭进气喷嘴, 经 2h 运转, 用压力计测得的稳定的最低压力即为极限压力。如压力不稳定, 泵可继续运转, 但不得超过 8h。

每间隔 15min 记录一次压力。当连续三次测量结果压力不再变化, 该压力即为极限压力。测得的极限压力采用两位有效数字表示。

4. 抽气速率的测量

采用定压法测量泵的抽气速率, 即在测量流量过程中试验罩内的压力保持不变。测量步骤如下:

首先将试验罩、各测量仪表、泵、流量喷嘴等装配到测量装置上, 如图 3-108 所示。启动真空泵, 等正常运转并达到极限压力后, 开始测量抽气速率。测量抽速的各点压力为: 16kPa ;

23kPa;40kPa;50kPa;60kPa;83kPa。

测各点压力的时间间隔不少于 10min,并应在压力稳定后读取数据。

根据各点所测数据,按式(3-22)~式(3-23)计算各点抽速,并绘制入口压力与抽气速率关系曲线。

$$S_0 = \frac{1.8809 \times 10^{-2} CD^2 T_0}{p_0} \sqrt{\frac{Hp_2}{T_1}} \quad (3-22)$$

$$p_2 = p_1 - H$$

$$S_0 = \frac{1.8809 \times 10^{-2} CD^2 T_0}{p_0} \sqrt{\frac{H}{T_1} (p_1 - H)} \quad (3-23)$$

式中 S_0 ——真空泵在吸入压力 p_0 条件下的抽气速率[L/s];

C ——喷嘴系数;

D ——喷嘴直径[mm];

T_0 ——吸入气体的热力学温度[K];

p_0 ——吸入气体的压力[Pa];

H ——喷嘴前后的压力差[Pa];

p_2 ——风管内气体的压力[Pa];

p_1 ——测量时的大气压力[Pa];

T_1 ——喷嘴前气体的热力学温度[K]。

5. 泵消耗功率的测量

用功率表测出泵正常运转时各压力点的电机输入功率,然后按公式(3-21)计算出电机输出功率,即为泵的消耗功率

6. 泵温升的测量

在轴承壳上测量轴承的温度,在最大消耗功率时测得的稳定的温度与环境温度之差即为温升。

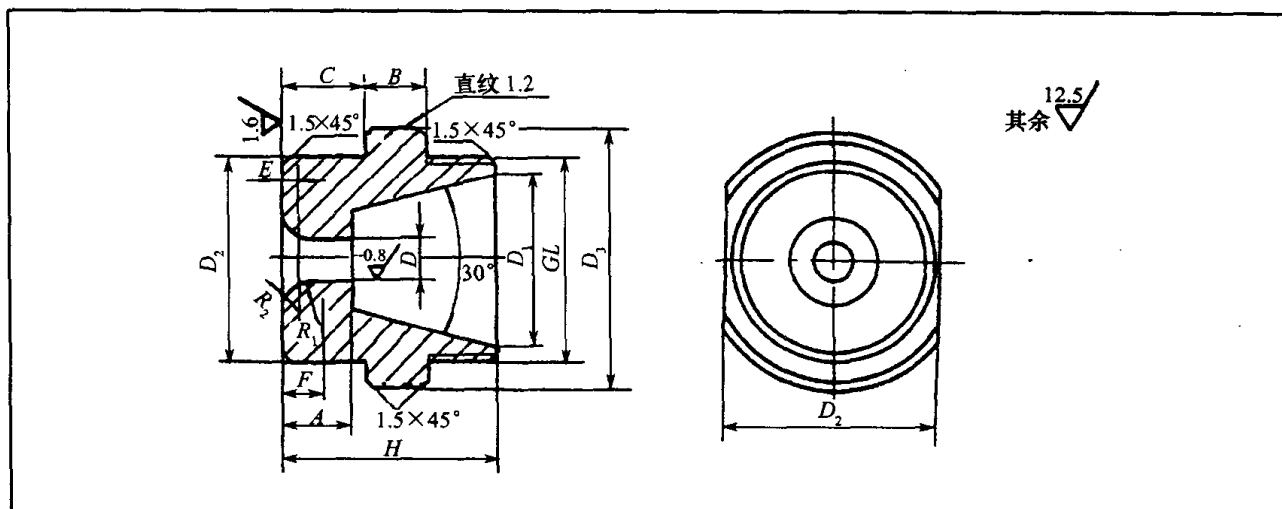
7. 附录 A 喷嘴(补充件)

(1) 喷嘴尺寸

标准喷嘴(一)尺寸见表 3-134。标准喷嘴(二)尺寸见表 3-135。

表 3-134 标准喷嘴(一)尺寸

(单位:mm)



九、机械真空泵性能测试标准

(续)

D	3.18	4.76	6.35	9.52	12.70	19.05	25.40	34.92
R_1	4.37	6.35	8.33	12.70	17.07	25.40	33.74	46.44
R_2	1.59	2.38	3.18	4.76	6.35	9.53	12.70	17.46
H	50.80	50.80	50.80	50.80	50.80	60.33	60.33	82.55
E	1.59	2.38	3.18	4.37	5.95	8.73	11.91	16.27
F	3.18	4.76	6.36	9.13	12.3	18.26	24.61	33.73
A	5.56	8.33	11.11	16.27	21.83	32.94	43.66	59.93
D_1	40					42		64
B	14							20
C	20					24		32
D_2	48					60		90
GL	$1\frac{1}{2}(38.1)$					2(50.8)		3(76.2)
D_3	60					70		100
可测最小抽气速率/ $L\cdot s^{-1}$	0.47	1.07	1.87	4.20	7.47	16.82	29.90	56.20
可测最大抽气速率/ $L\cdot s^{-1}$	0.93	2.10	3.73	8.40	14.93	33.63	60.00	112.83

表 3-135 标准喷嘴(二)尺寸

(单位:mm)

Technical drawing of a standard nozzle. The drawing shows a cross-section of the nozzle with various dimensions labeled. The main body has a diameter D_1 and a length D_0 . The nozzle tip has a diameter D_2 and a length H . The nozzle is mounted on a base with a diameter D and a length A . The nozzle is connected to a pipe with a diameter d_0 and a length N . The nozzle has a chamfer of $1 \times 45^\circ$ and a surface finish of 12.5 . The nozzle is shown in a cross-section view with a hatched area indicating the material.

其余 $\nabla 12.5$

$N-\phi d_0$

D	D_1	D_2	H	A	E	F	R_1	R_2	B	D_0	N	d_0	可测最小抽气 速率/ $L \cdot s^{-1}$	可测最小抽气 速率/ $L \cdot s^{-1}$
50.80	280	95	87.38	16	23.88	49.28	25.40	67.82	33	242	8	22	119.75	239.50
63.50		110	109.32		29.12	60.83	31.75	84.59	45	242			184.60	369.20
76.20	345	120	131.07		35.82	73.92	38.10	101.60	58	300			269.20	539.60
101.60		145	174.51		17.50	98.30	50.80	135.89	82	300			478.06	956.13

(2) 喷嘴系数

根据图 3-109,从表 3-136 查得。

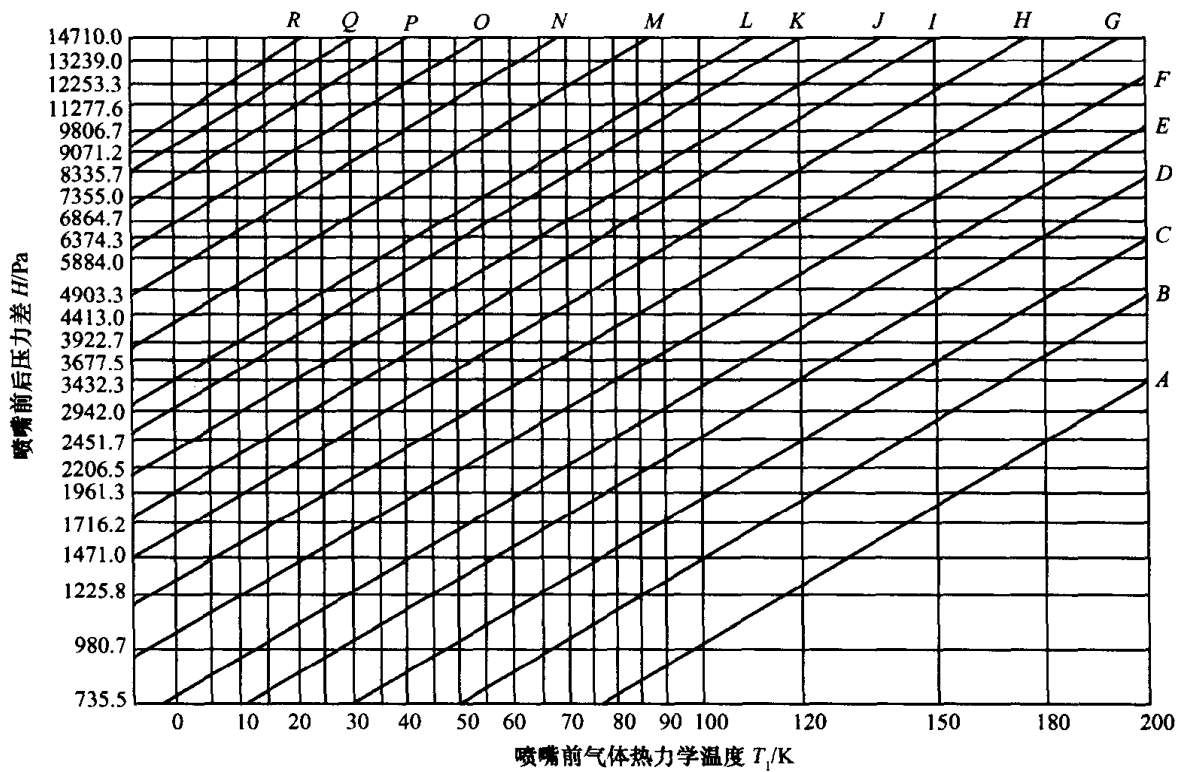


图 3-109 喷嘴特性曲线

表 3-136 喷嘴系数

特性 曲线	喷 嘴 直 径 /mm											
	3.18	4.76	6.35	9.53	12.70	19.05	25.40	34.93	50.80	63.50	76.20	101.00
A	0.920	0.934	0.943	0.950	0.956	0.961	0.965	0.969	0.974	0.977	0.980	0.983
B	0.928	0.940	0.947	0.954	0.958	0.963	0.967	0.971	0.977	0.980	0.982	0.986
C	0.933	0.944	0.950	0.957	0.960	0.965	0.969	0.973	0.979	0.982	0.984	0.988
D	0.936	0.947	0.953	0.958	0.961	0.967	0.971	0.975	0.981	0.983	0.986	0.990
E	0.940	0.949	0.955	0.960	0.963	0.969	0.973	0.977	0.982	0.985	0.988	—
F	0.943	0.951	0.956	0.961	0.965	0.970	0.974	0.979	0.983	0.986	0.990	0.992
G	0.945	0.953	0.957	0.963	0.966	0.972	0.976	0.980	0.984	0.988	0.992	0.993
H	0.947	0.955	0.958	0.964	0.968	0.973	0.977	0.681	0.986	0.990		0.994
I	0.949	0.956	0.959	0.965	0.969	0.974	0.979	0.983	0.988	0.991		
J	0.951	0.957	0.960	0.966	0.970	0.976	0.980	0.984	0.990	0.992	0.994	0.995
K	0.953	0.958	0.961	0.967	0.971	0.977	0.981	0.985				
L	0.955	0.960	0.963	0.969	0.973	0.978	0.982	0.986	0.991	0.993	0.995	
M	0.957	0.961	0.965	0.970	0.974	0.980	0.983	0.988	0.992	0.994		
N	0.958	0.963	0.966	0.972	0.976	0.982	0.985	0.990	0.993			
O	0.959	0.964	0.968	0.973	0.977	0.983	0.986	0.991	0.994	0.995		
P	0.960	0.965	0.969	0.975	0.979	0.984	0.988	0.992				
Q	0.961	0.966	0.970	0.976	0.980	0.985	0.990		0.993			
R	0.962	0.967	0.971	0.977	0.981	0.986						

第四章 蒸气流真空泵

一、概 述

蒸气流真空泵是一种用蒸气流体作为抽气介质来获得真空的装置。

蒸气流真空泵包括蒸气喷射泵、蒸气增压泵和蒸气扩散泵等。其抽气机理都是基于高速运动的蒸气流与被抽气体混合进行能量交换而实现抽气作用的。

在蒸气流真空泵内,蒸气由喷嘴喷射出的流动状态,可以是湍流的,也可以是粘滞流的,究竟是哪种流态主要取决于蒸气流的压力和流过喷嘴的蒸气流量。

蒸气流喷射泵的作用,是在湍流(紊流)的条件下依靠蒸气流表面大量的漩涡与被抽气体相互掺合而卷带气体。在此过程中,被抽气体分子在射流的方向上获得了由蒸气分子给予的冲量。除了湍流卷带气体之外,还有微弱的粘滞携带气体和扩散携带气体的作用。根据这种机理设计的泵叫蒸气流喷射泵。这种泵的工作范围为 $1 \times 10^4 \text{Pa} \sim 10^{-1} \text{Pa}$ (甚至到 10^{-2}Pa)。

如果由喷嘴喷射出来的工作流体为粘滞流(层流)流动状态,则工作流体依靠其边界层和被抽气体层之间的粘性摩擦而携带气体。除此之外,还有一定的扩散携带气体的作用。按此原理制成的泵称为蒸气流增压泵(简称增压泵),这类泵的工作范围为 $10 \text{Pa} \sim 10^{-2} \text{Pa}$ 级。

当被抽气体的压力很低时,由喷嘴喷射出的工作流体的密度进一步降低(速度较大),被抽气体分子扩散进入蒸气流中而被抽走。由此而设计的泵称为扩散泵,其工作范围为 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$ 。

二、水蒸气喷射真空泵

(一) 应用范围

水蒸气喷射泵的工作范围很宽($1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 10^{-2} \text{Pa}$),抽气量很大(质量流量从每小时几千克到每小时几百千克),对被抽介质无严格要求,不怕被抽介质的污染,不论被抽介质的温度高低,也不论有无尘埃杂质和腐蚀性都可以使用,工作安全可靠,运转费用低廉,操作维修方便。

由于水蒸气喷射泵具有以上优点,它广泛地被应用到真空冶金、真空脱氧、真空浸渍、真空冷冻干燥、真空浓缩、真空蒸馏、真空制冷、真空输送以及化学纤维的制造和现代宇航事业上。

(二) 结构简述

水蒸气喷射泵由喷射器、冷凝器、消声器等组成。

喷射器是由喷嘴、吸入室和扩压器三部分组成的。4级直冷型和间冷型蒸汽喷射真空泵外形示意图如图4-1所示。

冷凝器分大气冷凝器(又称混合式冷凝器或直接接触式冷凝器)和表面冷凝器(又称列管间接式冷凝器)两种,如图4-2所示。冷凝器的作用主要是用来冷凝工作蒸汽和被抽气体中的

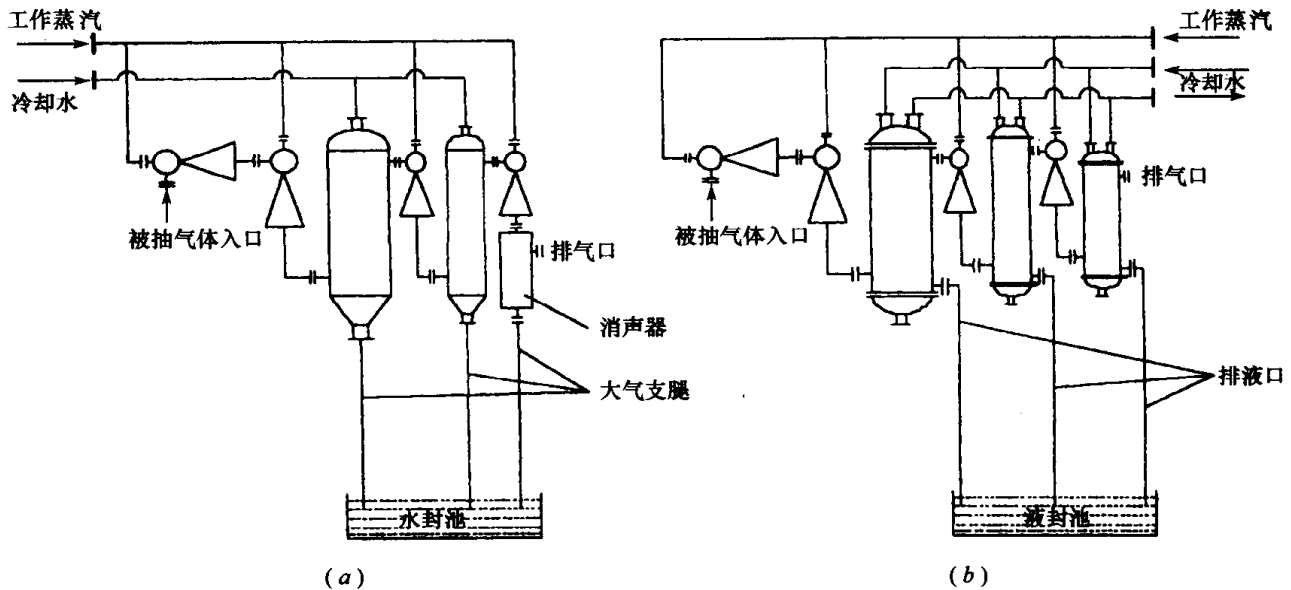


图 4-1 4 级蒸汽喷射真空泵示意图

(a)4 级直冷型; (b)4 级间冷型。

可凝蒸汽,以减低下级喷射器的抽气负荷。

大气冷凝器主要有分配盘式、孔板式(筛板式)和伞帽式三种,其作用是使冷却水成细柱状或降膜状降落,以增大热交换面积。杭州华达真空设备有限公司研制的强制膜喷淋式冷凝器,具有冷凝捕集和抽吸双重功能,使整机能耗大大下降。表面冷凝器的结构形式为列管式(管壳式)。冷却水和凝结水混合物必须通过 10m 高的排水管(大气腿)才能排向热水池。

消声器安装在第一级喷射器(排向大气的那级)上,以消除工作噪声。

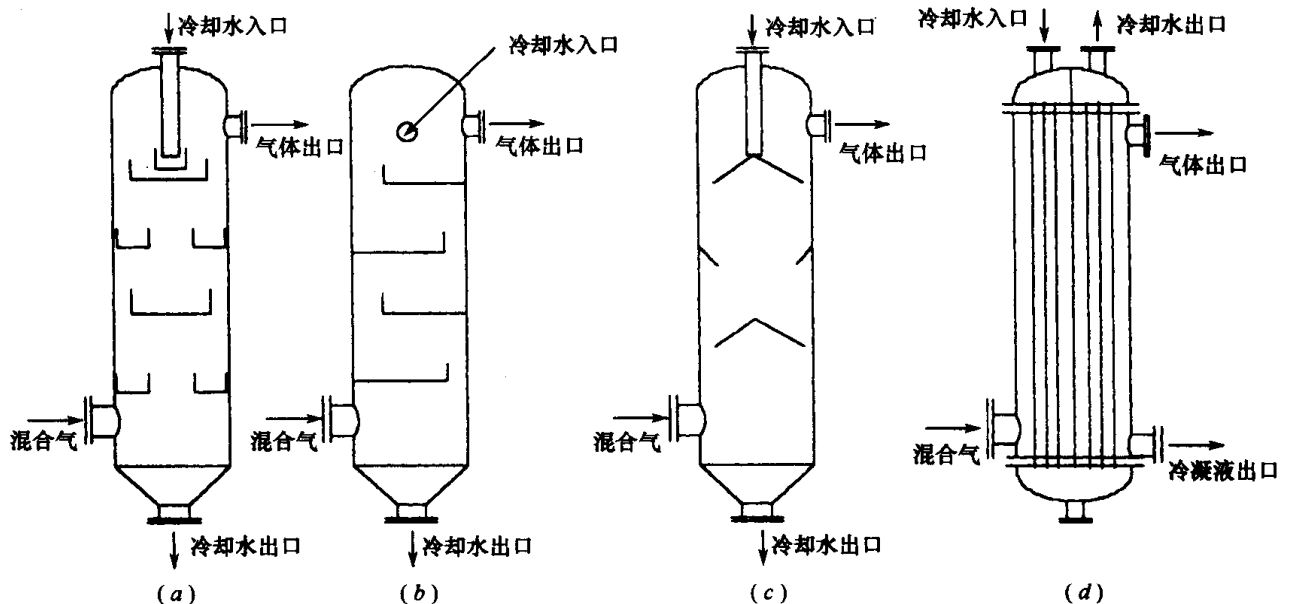


图 4-2 冷凝器

(a)、(b)、(c)大气冷凝器(混合式冷凝器);(d)表面冷凝器。

(三) 工作原理

图 4-3 表示喷射器的构造和抽气机理。工作蒸汽和被抽气体在喷射中的压力和速度的转

变如图 4-4 所示。

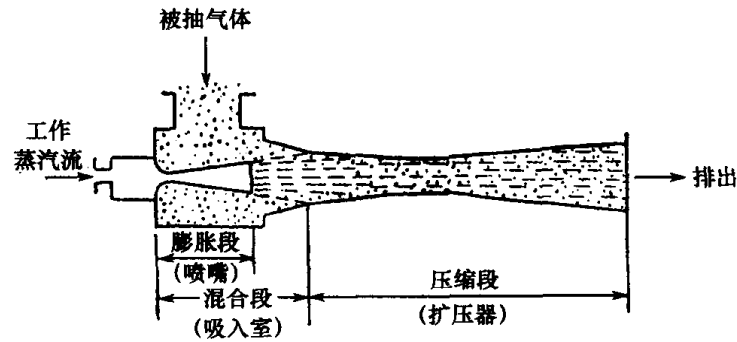


图 4-3 水蒸气喷射泵的基本原理

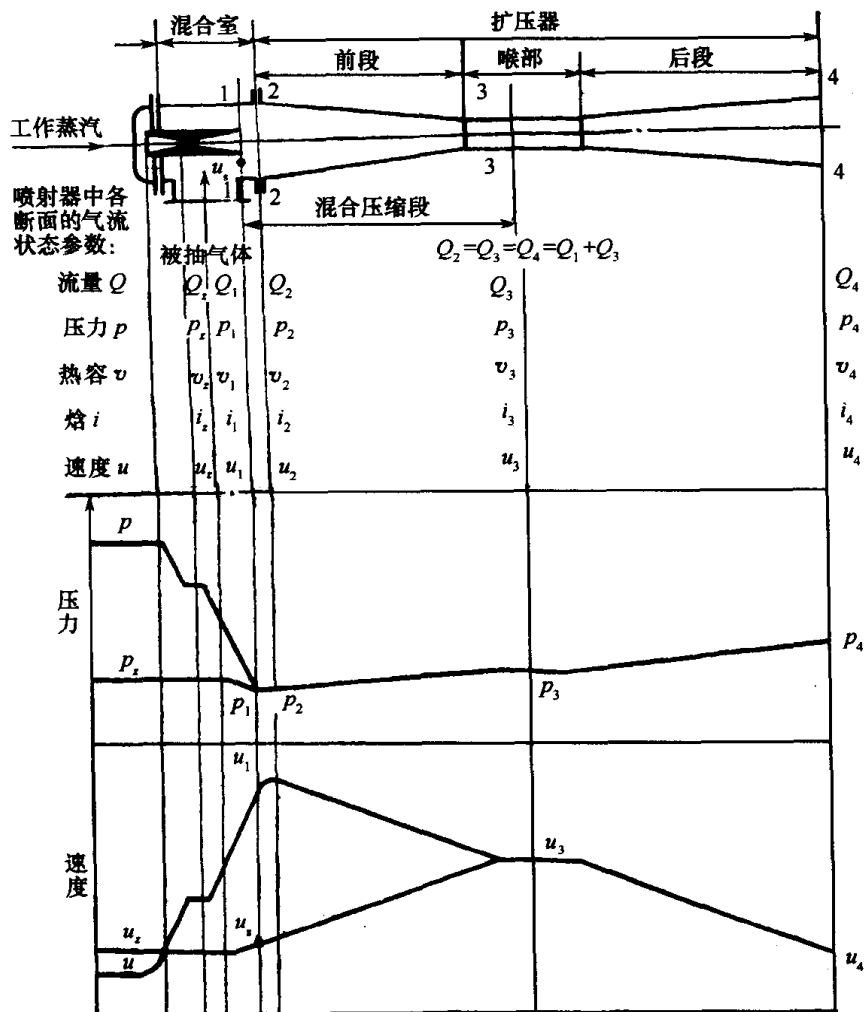


图 4-4 喷射器中工作蒸汽和被抽入气体的压力和速度

p, v, i, u —工作蒸汽进入喷嘴前的压力、热容、焓、速度等有关参数；

p_2, v_2, i_2, u_2 —被抽气体进入喷射器前的各有关参数；

p_1, v_1, i_1, u_1 —工作蒸汽在喷嘴出口处(1-1 断面)的各有关参数；

p_2, v_2, i_2, u_2 —工作蒸汽和被抽气体相混合后在扩压器 2-2 断面上的各有关参数；

p_3, v_3, i_3, u_3 —混合气体达到同一速度时在扩压器喉部 3-3 断面处的各有关参数；

p_4, v_4, i_4, u_4 —扩压器出口处(4-4 断面)混合气体的各有关参数。

喷射器的工作过程可分为三个阶段:①绝热膨胀阶段,即工作蒸汽通过喷嘴绝热膨胀(等熵膨胀)的过程——将压力能(位能)转化为速度能(动能),以高速射出,压力由 p 降至 p_1 ,焓由 i 降至 i_1 ,热容由 v 剧增至 v_1 ,速度 u 剧增至 u_1 (超声速);②混合阶段,工作蒸汽与被抽气流在混合室进行混合——两股气流进行能量交换,被抽气流的速度由 u_z 增加到 u_s ,工作气流携带着被抽气流进入扩压器;③压缩阶段,即在扩压器中气体与蒸汽一边继续进行能量交换,一边逐渐压缩,动能又转化为位能,到扩压器的喉部完成了混合过程,达到同一速度 u_3 (声速),压力也由 p_2 升至 p_3 ,再经过扩散段速度降至 u_4 (亚声速),压力进一步由 p_3 升至 p_4 ,从而将被抽气体排出喷射器。多级喷射泵就是多个喷射器串联,被抽气体逐级被喷射器压缩,在最后一级(即大气级)达到高于大气压力而被排出泵外。

(四)水蒸气喷射泵真空的几个重要参数

①吸入压力(泵进口压力)与级数的关系 水蒸气喷射泵的吸入压力由水蒸气喷射泵的级数来决定。图 4-5(a)中表明了二者的关系。

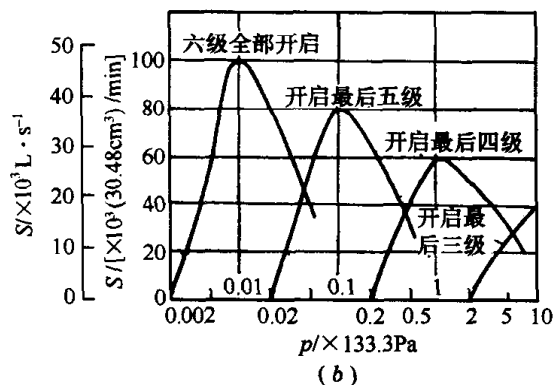
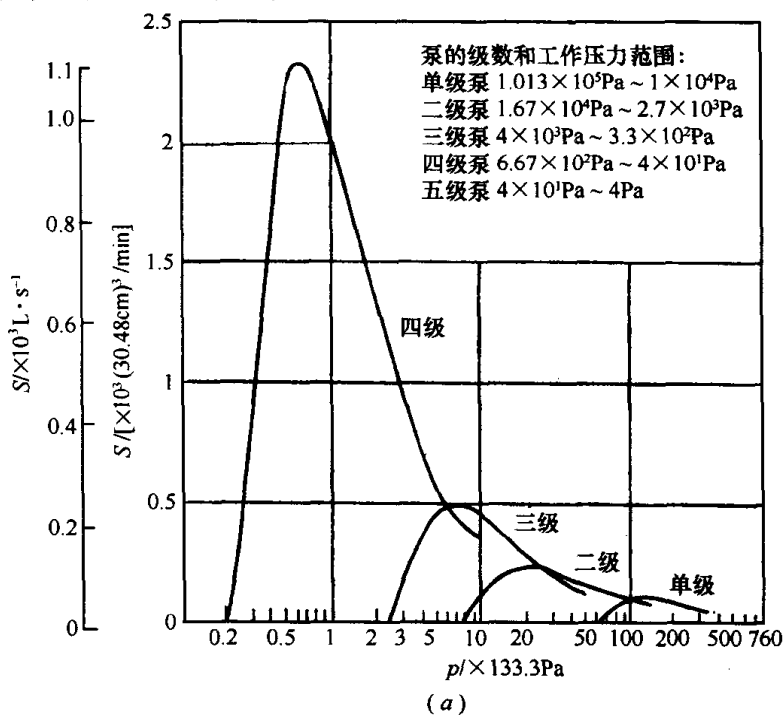


图 4-5 水蒸气喷射泵的进口压力、抽速和级数的关系

(a) 单级和多级水蒸气喷射泵的工作范围及抽气曲线;

(b) 小型六级水蒸气喷射泵部分喷射器工作时的抽气曲线。

②最大排气压力 水蒸气喷射泵的最大排气压力高于 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ (一个大气压)。

③抽气速率(抽速)和排气能力(排气量) 水蒸气喷射泵的抽速随进口压力而变,在工作区间有一最大抽速峰值。图 4-6 是一个小型六级泵的排气量、抽气速率和吸入压力的特性曲线。图 4-7 是多级水蒸气喷射真空泵的排气量、吸入压力和极限排气压力的关系曲线。

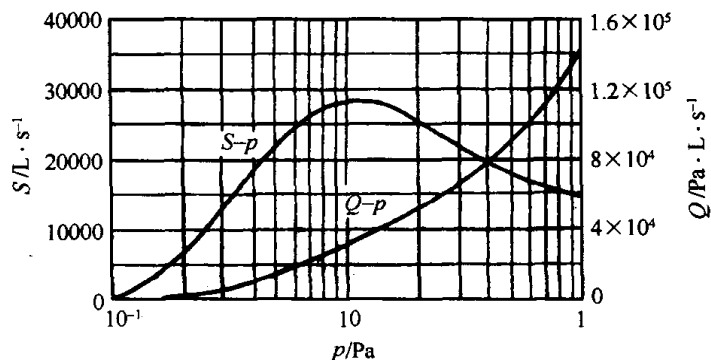


图 4-6 小型六级水蒸气喷射泵排气量、抽速和进口压力的特性曲线

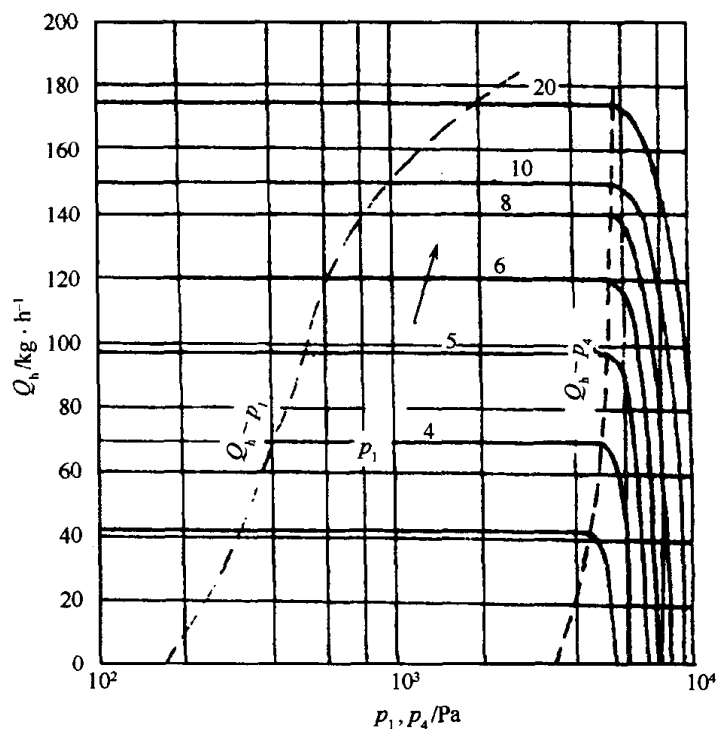


图 4-7 多级水蒸气泵排气量(Q_h)、吸气压力(p_1)和极限排气压力(p_4)关系曲线

④排气量与蒸汽消耗量的关系 在给定的吸入压力、排出压力和工作蒸汽压力条件下,蒸汽的消耗量随着排气量的增加而增加。

⑤冷却水 冷却水的消耗量与水的温度成正比,并且随排气量成比例地增加。水蒸气喷射泵与水射流泵或水环泵联合运转,可以减小蒸汽的消耗量。

(五)水蒸气喷射真空泵设计要点

1. 水蒸气喷射泵参数选择

(1)工作蒸汽压力

一般工作蒸汽压力越高,工作蒸汽与冷却水耗量越少。但当工作蒸汽压力过高时,会导致

膨胀增加、喷嘴长度增加,引起喷嘴损失增加,故上述规律并不明显。而且蒸汽压力越高,蒸汽生产费用和设备投资费用会越多。因此,一般工作蒸汽压力范围为 $0.4\text{MPa} \sim 1.6\text{MPa}$ (表压),在泵的工作压力较低(133Pa)时,工作蒸汽压力下限可选择为 0.25MPa 。

(2) 工作蒸汽干度及温度

一般无论是过热或者饱和工作蒸汽,对泵的性能都无太大影响。但是当蒸汽管道的散热及工作蒸汽在喷嘴中膨胀而变湿时,会使泵的性能不稳定。为此,一般选择工作蒸汽过热度为 $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 为宜,蒸汽干度为 96% 以上。工作蒸汽过热度太大,不仅浪费能源,还会使泵的性能不稳定。

(3) 冷却水

冷凝器的冷却水入口温度越低,冷却水的耗量越少。一般冷却水进出口温差可以取大些。一般北方地区取进水温度 $\leq 25^\circ\text{C}$,南方则选用 $\leq 32^\circ\text{C}$ 。循环用水一般选择 $\leq 32^\circ\text{C}$ 为妥。

(4) 多级泵级数与压缩比

多级蒸汽喷射泵的级数可以根据不同要求的吸入工作压力来选择。其多级蒸汽喷射泵的级数与工作压力关系见表 4-1。

表 4-1 多级蒸汽喷射泵的级数与工作压力的关系

级数 吸入压力	1	2	3	4	5	6
吸入压力 / Pa	$1.3 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$	$2.7 \times 10^3 \sim 2.7 \times 10^4$	$4 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$	$6.7 \times 10 \sim 6.7 \times 10^2$	$6.7 \sim 133.3$	$0.67 \sim 13.3$

压缩比的确定,可按下列公式和步骤进行。

① 泵总压缩比 Y 的确定

$$Y = \frac{p_4}{p_1} \quad (4-1)$$

式中 p_1 ——第一级喷射器的入口压力[Pa];

p_4 ——末级喷射器的出口压力, $p_4 = (1.05 \sim 1.1) \times 10^5 \text{Pa}$ 。

② 每一级平均压缩比 \bar{Y}_i 的确定

$$Y_i = \sqrt[n]{Y} \quad (4-2)$$

式中 n ——泵的级数;

\bar{Y}_i ——每一级平均压缩比。

以 \bar{Y}_i 为基准调整多级喷射器的压缩比时,应满足

$$p_1 \cdot Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \cdots > p_4$$

调整原则为:

① 从第一级到末级的压缩比一般应逐渐减少,最大压缩比 $Y_{\max} = 10 \sim 12$,最小压缩比 $Y_{\min} = 3 \sim 4$ 。压缩比太大或太小都会影响泵的性能稳定。

② 进入第一级冷凝器的混合物中的蒸汽分压力对应的饱和温度要比冷却水入口温度高 $8^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$ 。

③ 压力重叠度取 10% ,即相邻两级喷射器的前面一级的极限反压力应比后级的吸入压力高 10% 。

④ 冷凝器的阻力(压力降) 约为 $670\text{Pa} \sim 1330\text{Pa}$ 。位于高真空处的冷凝器的阻力取小值, 位于低真空处的冷凝器的阻力取大值。

(5) 泵抽气负荷的估算

① 当量换算。因喷射器的抽气机理主要是黏性携带作用, 所以引射系数与被抽气体的摩尔质量和温度有关。为了简化计算, 被抽气体均指 20°C 的空气。为此, 对于任意温度下的空气或非空气的被抽气体要进行当量换算, 通常用修正系数来校正, 如图 4-8 所示。

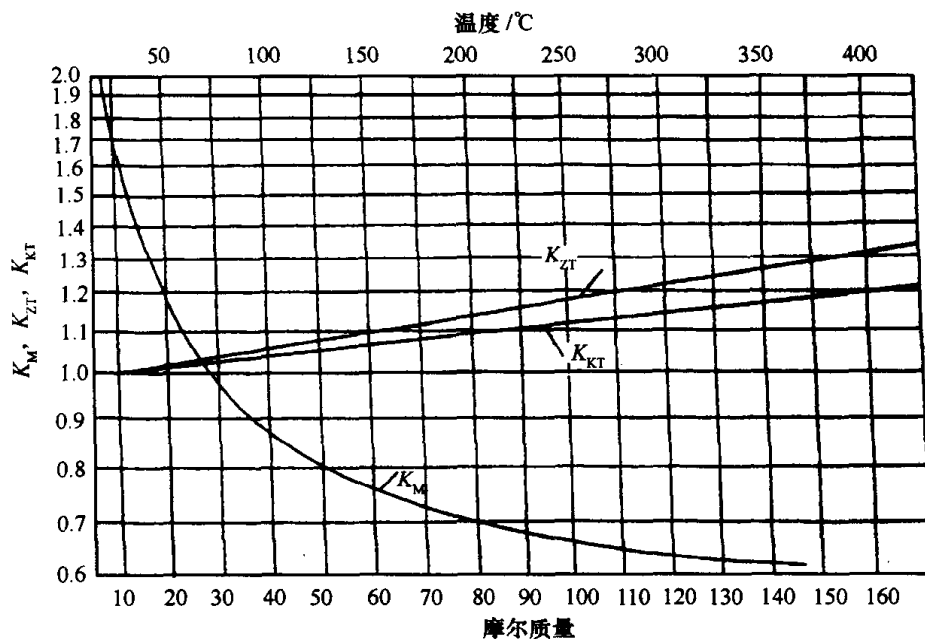


图 4-8 当量换算图表

首先设定一些符号:

K_{KT} ——空气温度修正系数;

K_{ZT} ——水蒸气温度修正系数;

K_M ——摩尔质量修正系数;

Q_K ——泵抽吸的空气量;

Q_Z ——泵抽吸的水蒸气量;

Q_{20} —— 20°C 空气当量;

Q_h ——泵抽吸的混合气体总量。

将被抽气体量都换成 20°C 的空气当量 Q_{20} , 有

对于温度超过 20°C 的空气

$$Q_{20} = Q_K \cdot K_{KT} \quad (4-3)$$

对于水蒸气

$$Q_{20} = Q_Z \cdot K_{ZT} \cdot K_M \quad (4-4)$$

对于水蒸气与空气的混合气体

$$Q_{20} = Q_K \cdot K_{KT} + Q_Z \cdot K_{ZT} \cdot K_M \quad (4-5)$$

对于其它混合气体先求出混合气体的平均摩尔质量, 然后再进行当量换算。

$$Q_{20} = Q_h \cdot K_M \cdot K_{KT} \quad (4-6)$$

平均摩尔质量的求法:

a. 若已知混合气体的流量,用混合气体中每种气体摩尔质量去除各自的流量,所得的商的总和再去除混合物的总流量即为平均摩尔质量;

b. 若已知混合气体中每种气体的各自含量百分比,应用每种气体的摩尔质量除各自含量的百分比,所得商的总和的倒数即为平均摩尔质量;

c. 若已知混合气体的体积分数时,应用混合气体中每种气体的体积分数乘以各自的摩尔质量,所得乘积的总和即为混合气体的平均摩尔质量。

② 其它被抽气体负荷。

a. 工作蒸汽放出的气体量

$$Q_{ok} = Q_0 \times 10^{-3} [\text{kg/h}] \quad (4-7)$$

式中 Q_0 ——工作蒸汽耗量[kg/h]。

b. 冷却水放出的气体量

$$Q_{sk} = W \times 10^{-2} [\text{kg/h}] \quad (4-8)$$

式中 W ——冷却水耗量[t/h]。

c. 喷射泵系统的漏气量 G_l ,按图 4-9 选取。工作压力低于 133Pa 时,图中给出的漏气量偏大,此时应根据经验选取适当值。

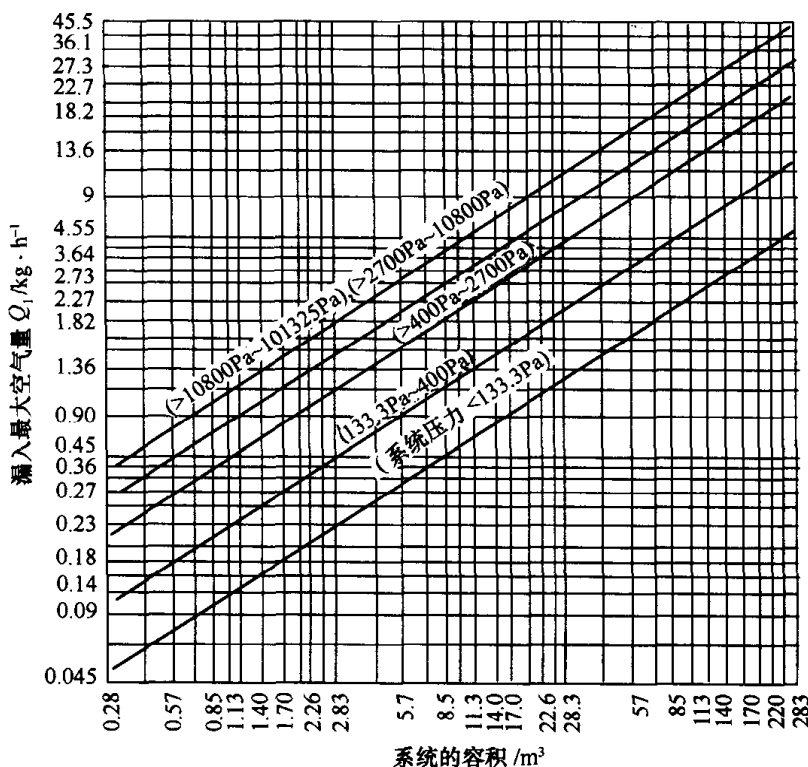


图 4-9 被抽系统漏入空气的最大量

泵抽吸气体总负荷 Q 为

$$Q = Q_{20} + Q_{ok} + Q_{sk} + Q_l \quad (4-9)$$

2. 简易算法

(1) 假定

① 喷嘴与扩压器喉部以临界工况工作(马赫数 $Ma = 1$);

② 影响引射系数的因素很多,在此引射系数可按表 4-2 中给出的实验数据选取;

③ 喷射器遵循几何相似原理;

④ 设计参数确定后,按下面近似公式进行核算

$$p_4 = \left(\frac{D_{kp}}{D_3} \right)^2 (1 + \mu_h) p_0 \quad (4-10)$$

式中 p_4 ——喷射器排出压力[Pa];
 p_0 ——工作蒸汽压力[Pa];
 D_{kp} ——喷嘴喉部直径[mm];
 D_3 ——扩压器喉部直径[mm];
 μ_h ——引射系数(按表 4-2 选取)。

⑤ 该计算方法对于被抽气体的相对分子量为 19 ~ 50,温度为 10℃ ~ 50℃ 的情况不需作当量换算。

表 4-2 引射系数选择表

$\mu_h \backslash B$ Y	10	15	20	30	40	60	80	100	150	200	300	400	600	800	1000	1500	2000	3000	4000
1.2	3.1	3.42	3.6	3.71	3.8	3.89	3.95	4.0	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.06	4.06	4.06	4.07	4.07	4.07
1.4	1.73	1.98	2.11	2.31	2.4	2.47	2.52	2.56	2.59	2.61	2.61	2.62	2.62	2.63	2.34	2.65	2.65	2.66	2.66
1.6	1.12	1.32	1.45	1.58	1.67	1.75	1.79	1.83	1.88	1.92	1.95	1.98	2.00	2.00	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01
1.8	0.81	1.00	1.11	1.23	1.29	1.36	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.61	1.64	1.66	1.67	1.67	1.69	1.70	1.71
2.0	0.58	0.76	0.87	0.98	0.05	1.12	1.17	1.20	1.24	1.28	1.32	1.35	1.38	1.40	1.42	1.44	1.45	1.46	1.47
2.2	0.46	0.60	0.71	0.82	0.89	0.07	1.01	1.05	1.10	1.13	1.17	1.20	1.23	1.20	1.26	1.28	1.30	1.32	1.33
2.4	0.37	0.48	0.55	0.68	0.72	0.82	0.86	0.90	0.94	0.98	1.02	1.05	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20	1.22	1.23
2.6	0.30	0.41	0.49	0.58	0.65	0.71	0.77	0.81	0.86	0.90	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.06	1.10	1.12	1.13
2.8	0.24	0.34	0.41	0.50	0.57	0.64	0.69	0.73	0.73	0.82	0.87	0.89	0.93	0.96	0.98	1.00	1.03	1.04	1.05
3.0	0.19	0.28	0.34	0.41	0.47	0.53	0.59	0.62	0.68	0.71	0.77	0.81	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98
3.2	0.17	0.25	0.31	0.38	0.43	0.50	0.54	0.57	0.62	0.67	0.71	0.75	0.79	0.82	0.84	0.86	0.89	0.91	0.92
3.4	0.16	0.22	0.27	0.35	0.40	0.46	0.50	0.52	0.58	0.62	0.67	0.70	0.73	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.85
3.6		0.19	0.24	0.31	0.36	0.42	0.46	0.49	0.54	0.59	0.63	0.65	0.69	0.71	0.73	0.75	0.76	0.78	0.79
3.8		0.17	0.22	0.23	0.33	0.39	0.43	0.45	0.50	0.53	0.57	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74
4.0			0.19	0.25	0.30	0.35	0.40	0.42	0.46	0.50	0.53	0.55	0.59	0.61	0.62	0.64	0.66	0.68	0.70
4.5			0.15	0.20	0.24	0.29	0.33	0.36	0.40	0.44	0.48	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63
5.0				0.16	0.19	0.24	0.28	0.31	0.35	0.38	0.41	0.43	0.46	0.48	0.50	0.51	0.53	0.55	0.56
5.5					0.16	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.37	0.40	0.42	0.44	0.45	0.47	0.49	0.51	0.52
6.0						0.18	0.20	0.23	0.26	0.30	0.33	0.36	0.39	0.41	0.42	0.43	0.45	0.46	0.47
7.0						0.15	0.17	0.19	0.22	0.25	0.29	0.31	0.34	0.36	0.37	0.39	0.41	0.42	0.43
8.0								0.16	0.19	0.22	0.25	0.27	0.30	0.32	0.33	0.35	0.36	0.38	0.39
9.0									0.16	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30	0.32	0.33	0.35	0.36
10.0											0.18	0.20	0.23	0.25	0.27	0.29	0.30	0.32	0.33

(2) 设计计算步骤

① 已知条件。 p_0 、 p_4 的符号意义及单位同式(4-10); p_1 为吸入压力[Pa]; t_1 为冷却水入口温度[℃]; Q_h 为被抽气体量[kg/h]; $B = \frac{p_0}{p_1}$ 为膨胀比; $Y = \frac{p_4}{p_1}$ 为压缩比。

② 引射系数 μ_h 。根据 B 与 Y , 从表 4-2 查得 μ_h

③ 泵需要的工作蒸汽耗量 Q_0

$$Q_0 = \frac{Q_h}{\mu_h} \quad [\text{kg/h}] \quad (4-11)$$

④ 喷嘴计算, 如图 4-10 所示。

a. 喷嘴喉部直径 D_{kp}

$$D_{kp} = 1.6 \sqrt{\frac{Q_0}{p_0 \times 10^{-5}}} \quad [\text{mm}] \quad (4-12)$$

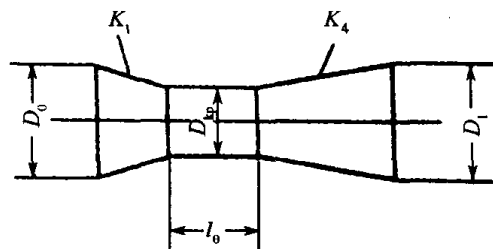


图 4-10 喷嘴计算尺寸图

b. 喷嘴出口直径 D_1

$$D_1 = C \cdot D_{kp} \quad [\text{mm}] \quad (4-13)$$

式中 C ——经验系数。选取原则为:

对于饱和水蒸气: 当 $B < 500$ 时, $C = 0.61(2.52)^{\lg B}$; 当 $B > 500$ 时, $C = 0.51(2.65)^{\lg B}$ 。

对于过热水蒸气: 当 $B < 500$ 时, $C = 0.67(2.77)^{\lg B}$; 当 $B > 500$ 时, $C = 0.56(2.36)^{\lg B}$ 。

c. 喷嘴入口直径 D_0

$$D_0 = (3 \sim 4) D_{kp} \quad (4-14)$$

d. 喷嘴喉部长度 l_0

$$l_0 = (1 \sim 2) D_{kp} \quad (4-15)$$

e. 喷嘴锥度 K

喷嘴渐缩段锥度 K_1 : 当 $p_1 > 133\text{Pa}$ 时, $K_1 = 1:4$; 当 $p_1 < 133\text{Pa}$ 时, $K_1 = 1:3$ 。

喷嘴渐扩段锥度 K_4

$$K_4 = 1:1.2$$

⑤ 扩压器计算, 如图 4-11 所示。

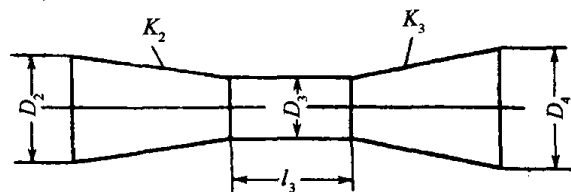


图 4-11 扩压器计算尺寸图

a. 扩压器喉部直径 D_3

$$D_3 = 1.6 \sqrt{\frac{\frac{18}{29}(Q_k + Q_{ok} + Q_{sk} + Q_1) + Q_z + Q_0}{p_4 \times 10^{-5}}} \quad (4-16)$$

当喷射器位于冷凝器之前时, $Q_{sk} = 0$ 。

b. 扩压器入口直径 D_2 :

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } p_1 > 13.3\text{kPa} \text{ 时, } D_2 = 1.5D_3; \\ \text{当 } p_1 < 13.3\text{kPa} \text{ 时, } D_2 = 1.7D_3。 \end{array} \right\} \quad (4-17)$$

c. 扩压器出口直径 D_4

$$D_4 \approx 1.8D_3 \quad (4-18)$$

d. 扩压器喉部长度 l_3

$$l_3 = (2 \sim 4)D_3 \quad (4-19)$$

e. 扩压器锥度:

渐缩段锥度 $K_2 = 1:10$

渐扩段锥度 $K_3 = 1:8 \sim 1:10$

⑥ 吸入混合室计算。

泵吸入口直径 D_h $D_h = (2 \sim 2.5)D_3$ (4-20)

⑦ 隔板混合式冷凝器的计算,如图 4-12 所示。

已知条件: t_1 、 p_4 、 Q_k (冷凝器入口处不可凝性气体含量)、 Q_{z4} (冷凝器入口处可凝性蒸汽含量)。

a. 冷却水耗量 W 。首先根据 p_4 查水蒸气对应的饱和温度 t_s ,求得冷却水出口温度 t_2 为

$$t_2 = \frac{1}{3}(t_s - t_1) + t_1 + (1 \sim 3) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4-21)$$

冷却水耗量 W 为

$$W = 0.6 \frac{Q_s}{t_2 - t_1} \text{ [t/h]} \quad (4-22)$$

式中 通过冷凝器的水蒸气凝结量,由下式求得

$$Q_s = Q_{z4} - Q'_{z4} \text{ [kg/h]}$$

式中 Q'_{z4} ——冷凝器出口处可凝性蒸汽的流量,由下式求得

$$Q'_{z4} = 18 \frac{Q_k}{M_k} \cdot \frac{p'_{z4}}{p'_4 - p'_{z4}} \text{ [kg/h]} \quad (4-23)$$

式中 p'_4 ——冷凝器出口处混合物全压力,由下式求得

$$p'_4 = p_4 - (670 \sim 1330)\text{Pa} \quad (\text{高真空取 } 670\text{Pa}, \text{低真空取 } 1330\text{Pa});$$

p'_{z4} ——冷凝器出口处蒸汽分压力[Pa],即由冷凝器出口处混合物温度 t'_4 查得的饱和蒸汽压力, $t'_4 = t_1 + (1 \sim 3)$;

M_k ——冷凝器出口处不可凝气体的相对分子量。

b. 冷凝器直径 D 。当蒸汽混合物通过冷凝器的速度为 $15\text{m/s} \sim 20\text{m/s}$ 时,冷凝器圆筒部分直径 D 为

$$D = (5 \sim 8) \sqrt{Q_{zh} \cdot V_{zh}} \text{ [mm]} \quad (4-24)$$

式中 Q_{zh} ——进入冷凝器的混合物流量[kg/h];

V_{zh} ——进入冷凝器的混合物的比容,可近似地用 p_4 查得的饱和蒸汽比容代替,单位

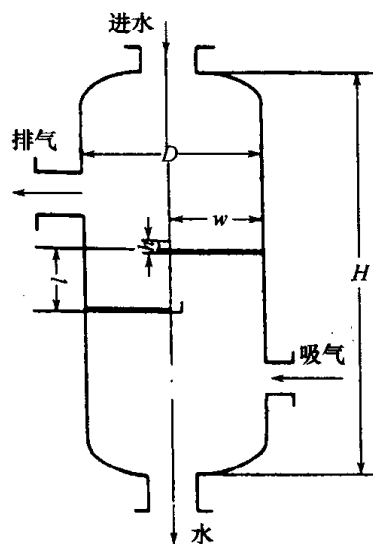


图 4-12 冷凝器尺寸计算图

为 m^3/kg 。

c. 冷凝器圆筒部分高度 H_1 由下式求得

$$H_1 = (4 \sim 6)D \quad [\text{mm}] \quad (4-25)$$

d. 冷凝器内部隔板:

隔板数目 n

$$n = 5 \sim 8$$

隔板间距 l : l 沿气流方向逐渐减少, 可按等差级数排列。

最大间距

$$l_{\max} \geq \frac{D}{3}$$

最小间距

$$l_{\min} \geq \frac{D}{6}$$

隔板宽度

$$w = \frac{D}{2} + 50 \quad [\text{mm}]$$

隔板上小孔直径

$$d = 4 \sim 8 \quad [\text{mm}]$$

中心距

$$T = (2 \sim 3)d \quad [\text{mm}]$$

隔板水膜厚度

$$h = (50 \sim 70) \quad [\text{mm}]$$

⑧ 喷淋混合式冷凝器设计计算。

a. 喷头孔板每个孔的水流量 Q

$$Q = 36.4 A \Phi_3 \sqrt{2gH} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4-26)$$

式中 A ——喷头孔板每个孔的截面积 $[\text{m}^2]$;

Φ_3 ——流量系数, 通常取 $\Phi_3 = 0.7 \sim 0.8$;

g ——重力加速度, $g = 9.8 \text{m/s}^2$;

H ——喷头进水压力与冷凝器内工作压力之差 $[\text{Pa}]$ 。

b. 喷头孔的数目 n

$$n = \frac{W}{Q} \quad (4-27)$$

式中 W ——冷却水流量 m^3/h , 由式(4-22)求得。

喷淋混合式冷凝器的其它参数计算与隔板混合式冷凝器相同。

3. 蒸汽喷射泵抽气时间的计算

对于某些工艺过程, 例如钢液真空精炼等, 要求喷射泵在短时间内迅速将某容器抽至需要的真空度, 为此, 必须根据工艺过程给定的负荷, 计算泵的抽气时间; 也可以根据要求的抽气时间核算泵的抽气量能否满足工艺要求。

泵对各种气体的抽气时间按下式计算

$$T = \frac{1.2 \times 10^{-4} \cdot \alpha \cdot V \cdot M(p_1 - p_2)}{(Q_2 - \alpha \cdot A)(273 + t)} \quad [\text{h}] \quad (4-28)$$

式中 T ——抽气时间 $[\text{h}]$;

V ——被抽容器的容积 $[\text{m}^3]$;

p_1 、 p_2 ——分别为抽气开始和终止时的压力 $[\text{Pa}]$;

Q_2 ——在 p_2 压力和温度 t 时, 泵对相对分子量为 M 的气体的抽气量 $[\text{kg}/\text{h}]$;

- t ——被抽气体的温度[℃];
 M ——被抽气体的相对分子量;
 A ——系统的漏气量[kg/h];
 α ——由泵性能决定的修正系数,由实验方法求得。

对于单级启动泵或对于后级喷射器的抽气能力远大于前级抽气能力的多级泵, α 可按图 4-13 选取。

对于常见的多级泵的设计, 各级泵在额定压力下的抽气能力基本平衡, 因此在计算抽气时间时, 除末级喷射器的修正系数 α 按图 4-13 选取之外, 其它各级喷射器的 α 值可近似取为 1。

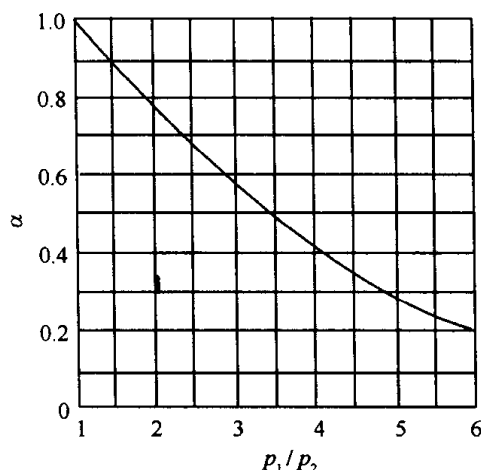


图 4-13 修正系数 α

(六) 水蒸气喷射真空泵型式及基本参数(摘自 JB/T8540—97)

本标准适用于获得压力为 $10^8 \text{ kPa} \sim 10^2 \text{ kPa}$ 的以水蒸气为工作介质的喷射真空泵(以下简称泵)

1. 定义

- ① 吸入压力。水蒸气喷射真空泵吸入口处的压力[kPa]。
- ② 当量空气。对非 20℃ 空气或其它气体, 按其相对分子量和温度折算成 20℃ 的空气质量流量[kg/h]。
- ③ 抽气量。单位时间通过泵入口处气体的质量流量, 常以当量空气标称[kg/h]。
- ④ 吸入温度。单位时间在泵吸入口处的温度[℃]。
- ⑤ 工作蒸汽耗量。在额定工况下, 单位时间通过喷嘴的工作蒸汽质量流量, 多级喷射泵则通过全部喷嘴的总质量流量[kg/h]。
- ⑥ 冷却水耗量。在额定工况下, 单位时间冷却水的流量, 多台冷凝器则指总体积流量 [m^3/h]。
- ⑦ 稳定性。当工作蒸汽压力降低, 排出压力升高和冷却水进水温度升高, 泵的吸入压力不发生剧烈波动时泵的稳定工作性能。
- ⑧ 破坏压力。使泵处于不稳定工作状态时的工作蒸汽压力或排出压力[kPa]。
- ⑨ 恢复压力。使泵恢复到稳定工作状态时的工作蒸汽压力或排出压力[kPa]。
- ⑩ 临界流量。喷嘴下游压力与上游压力比值低于临界值时, 通过喷嘴的质量流量。在标准状态下空气的临界值为 0.5283, 水蒸气临界值为 0.5457。
- ⑪ 亚临界流量。喷嘴下游压力与上游压力比值高于临界值时, 通过喷嘴的质量流量。

2. 型式与基本参数

① 型式。见表 4-3。

② 基本参数。见表 4-4。

工作蒸汽压力范围为 $0.2 \text{ kPa} \sim 1.6 \text{ kPa}$ 。推荐设计压力用 0.4 kPa 、 0.6 kPa 、 0.9 kPa , 冷却水进口设计温度为 25℃ 或 32℃。

③ 型号。

a. 表示方法。泵的型号表示应符合 JB/T7673 的规定。

第四章 蒸气流真空泵

表 4-3 水蒸气喷射真空泵型式

标 记	级 数	基 本 型 式
P	一级	— ⊗
2P	二级	— ○ — ⊗ 或 — — ⊗
3P	三级	— ○ — ○ — ⊗
4P	四级	— ○ — ○ — ○ — ⊗ 或 — — ○ — ○ — ⊗
5P	五级	— — ○ — ○ — ○ — ⊗ 或 — — — — ○ — ○ — ⊗
6P	六级	— — — — ○ — ○ — ○ — ⊗ 或 — — — — — — ○ — ○ — ⊗

注: — 喷射器; ○ 冷凝器; ⊗ 消声冷凝器

表 4-4 水蒸气喷射真空泵基本参数^①

抽气量/kg·h ⁻¹	吸 入 压 力/kPa										
	0.013	0.063	0.25	0.63	1.25	2.5	6.3/8 ^②	16	25	40	80
1	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	△	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	△	△	△	△	△	△	△	△	△	—	—
16	△	△	△	△	△	△	△	△	△	—	—
25	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
32	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
50	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
63	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
100	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
125	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
160	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
200	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
250	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
315	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
400	—	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
500	—	—	—	—	—	△	△	△	△	△	△
630	—	—	—	—	—	—	△	△	△	△	△
800	—	—	—	—	—	—	△	△	△	△	△
1000	—	—	—	—	—	—	△	△	△	△	△

注: ① △ 为有此规格; — 为无此规格。
② 6.3kPa 为 25℃ 冷却水温系列; 8kPa 为 32℃ 冷却水温系列

b. 示例。3P0.63-50/0.6-10。即: 三级水蒸气喷射真空泵, 吸入压力为 0.63kPa, 抽气量为 50kg/h, 其中可凝性气体量为 10kg/h, 工作蒸汽压力为 0.6kPa。

(七) 国产水蒸气喷射真空泵技术性能

① PB、P 型水蒸气喷射真空泵技术性能见表 4-5。

二、水蒸气喷射真空泵

表 4-5 水蒸气喷射真空泵技术性能

型 号	工作 真空度 /kPa	抽气量/kg·h ⁻¹		工作蒸汽 压力 /MPa	工作蒸汽 耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水 循环量 /t·h ⁻¹	设备 净重 /kg	生产 厂家
		不凝气	可凝气					
1PB10000-69/1.1	69	10000		1.1	15600		650	杭州 华达 真空 设备 有限 公司
1PB700-40/0.5	40	700		0.5	1950		60	
1PB60-30/1.1-WL	30	60		1.1	240	7	310	
1PB1500-30/0.9	30	1500		0.9	4000		200	
1PB40-26.7/0.9	26.7	40		0.9	170		20	
1PB110-26.7/0.9	26.7	110		0.9	490		37	
1PB30-17.3/0.9-H	17.3	30		0.9	158	5	160	
1PB90-17.3/0.9-H	17.3	90		0.9	410	10	160	
1PB100-34.7/0.9	34.7	100		0.9	300		37	
1PB267-23.3/1.1	23.3	267		1.1	965		80	
1PB50-40/1.1-L	40	50		1.1	125	7.5	1540	
1PB12.5-27.5/0.9-L	27.5	12.5		0.9	84	5	650	
1PB30-13.3/0.8	13.3	30		0.8	316		27	
2PB(10+15)-5.3/0.6-P/L	5.3	10	15	0.6	132	10	200/585	
2PB30-6.7/0.6-P/L	6.7	30			234	10	210/600	
2PB(10+20)-5.3/0.6-P/L	5.3	10	20		187	10	200/585	
2PB(20+25)-6.7/0.6-P/L	6.7	20	25		210	10	200/585	
2PB45-6.7/0.6-P/L	6.7	45			298	12	210/600	
2PB(10+40)-5.3/0.6-P/L	5.3	10	40		218	10/15	200/740	
2PB(15+35)-5.3/0.6-P/L	5.3	15	35		241	10/15	200/740	
2PB(20+40)-5.3/0.6-P/L	5.3	20	40		298	12/17	210/750	
2PB(20+65)-6.7/0.6-P/L	6.7	20	65		331	14/22	210/810	
2PB(30+35)-5.3/0.6-P/L	5.3	30	35		361	15/22	210/810	
2PB(30+50)-5.3/0.6-P/L	5.3	30	50		407	20/25	210/810	
2PB(30+65)-5.3/0.6-P/L	5.3	30	65		457	20/30	220/950	
2PB(30+80)-5.3/0.6-P/L	5.3	30	80		498	25/33	220/950	
2PB(30+100)-5.3/0.6-P/L	5.3	30	100		576	25/40	240/1090	
4PB(10+50)-0.26/0.6-P/L	0.26	10	50		540/680	65/84	880/4430	
4PB(10+80)-0.4/0.6-P/L	0.4	10	80		620/780	75/96	980/4900	
4PB(20+35)-0.133/0.6-P/L	0.133	20	35		840/1040	85/121	1185/6310	
4PB(20+120)-0.4/0.6-P/L	0.4	20	120		950/1150	95/136	1450/7160	
4PB(20+60)-0.133/0.6-P/L	0.133	20	60		1150/1410	105/166	1840/8100	
4PB(30+200)-0.53/0.6-P/L	0.53	30	200		1490/1750	130/203	2260/9050	
4PB(30+350)-0.67/0.6-P/L	0.67	30	350		1700/2050	150/233	2960/10360	
5PB1-0.0133/0.6-P/L	0.0133	1		0.6	156/176	18.5/30	434/1465	
5PB3-0.026/0.6-P/L	0.026	3			156/176	18.5/30	434/1465	
5PB4-0.026/0.6-P/L		4			218/245	23.5/45	527/1816	
5PB5-0.026/0.6-P/L		5			273/310	28.5/57	574/2395	
5PB6-0.026/0.6-P/L		6			300/339	28.5/57	626/2247	
5PB8-0.026/0.6-P/L		8			375/428	38.5/72	745/3050	
5PB9-0.026/0.6-P/L		9			437/490	45/80	956/2580	
5PB11-0.026/0.6-P/L		11			530/600	55/98	1010/4577	
5PB12-0.026/0.6-P/L		12			583/662	55/100	1013/4580	
5PB15-0.026/0.6-P/L		15			817/921	75/140	1236/5457	

注：(1)表中所示工作蒸汽耗量为冷却水温度 32℃ 时数据；

(2)表中数据□/□分别对应两种型号

(续)

型 号	抽气量/(kg/h)		吸入压力 /kPa	工作蒸汽 耗量 /kg·h ⁻¹	工作蒸汽 压力 /MPa	冷却水		设备净重 /kg	生产厂家
	不凝气	可凝气				温度 /℃	循环量 /M ³ ·h ⁻¹		
6P100-0.067/0.9-P	100		0.067	3200	0.9	≤35	300	12000	杭州隆达真空设备有限公司
6P200-0.067/0.9-P	200		0.067	6400	0.9	≤35	580	19000	
6P300-0.067/0.9-P	300		0.067	9000	0.9	≤35	800	23000	
6P500-0.067/0.9-P	500		0.067	15000	0.9	≤35	1300	30000	
5P1-0.013/0.6-L/H	1		0.013	156	0.6	≤35	18	430	
5P3-0.026/0.6-L/H	3		0.026	210	0.6	≤35	24	520	
5P6-0.026/0.6-L/H	6		0.026	300	0.6	≤35	28	620	
5P9-0.026/0.6-L/H	9		0.026	440	0.6	≤35	45	960	
5P11-0.026/0.6-L/H	11		0.026	530	0.6	≤35	55	1000	
5P15-0.026/0.6-L/H	15		0.026	800	0.6	≤35	75	1230	
4P(5+5)-0.133/0.6-L/H	5	5	0.133	267	0.6	≤35	31	750	
4P(10+35)-0.4/0.6-L/H	10	35	0.4	450	0.6	≤35	55	1300	
4P(10+50)-0.26/0.6-L/H	10	50	0.26	660	0.6	≤35	80	1600	
4P(20+50)-0.4/0.6-L/H	20	50	0.4	760	0.6	≤35	91	1600	
4P20-0.133/0.6-L/H	20		0.133	530	0.6	≤35	64	1300	
4P(30+130)-0.4/0.6-L/H	30	130	0.4	1460	0.6	≤35	175	3200	
4P(30+150)-0.26/0.6-L/H	30	150	0.26	2150	0.6	≤35	260	4100	
4P(30+300)-0.4/0.6-L/H	30	300	0.4	2840	0.6	≤35	340	4800	
3P(5+25)-1.07/0.6-L/H	5	25	1.07	172	0.6	≤35	13	300	
3P(10+25)-1.07/0.6-L/H	10	35	1.07	238	0.6	≤35	20	340	
3P(15+25)-1.07/0.6-L/H	15	25	1.07	386	0.6	≤35	45	650	
3P(15+50)-1.07/0.6-L/H	15	50	1.07	470	0.6	≤35	55	680	
3P(25+90)-1.07/0.6-L/H	25	90	1.07	650	0.6	≤35	78	750	
3P(50+80)-1.07/0.6-L/H	50	80	1.07	830	0.6	≤35	100	1250	
3P(20+320)-2.67/0.6-L/H	20	320	2.67	840	0.6	≤35	100	2650	
2P(10+25)-5.3/0.6-L/H	10	25	5.3	190	0.6	≤40	11	260	
2P(13+27)-5.3/0.6-L/H	13	27	5.3	200	0.6	≤40	13	270	
2P(20+60)-5.3/0.6-L/H	20	60	5.3	331	0.6	≤40	20	250	
2P(160+150)-5.3/0.6-L/H	160	150	5.3	1400	0.6	≤40	80	600	

②兰州真空设备有限责任公司生产的P系列水蒸气喷射泵主要技术性能见表4-6。

表4-6 P系列水蒸气喷射泵主要技术性能

型 号	泵入口	抽气量/kg·h ⁻¹		工作蒸汽	工作蒸汽	冷却水	泵级数	冷凝器级数	质量/kg	外形尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	备 注
	压力 /kPa	空气	水蒸气	压力 /MPa	消耗量 /kg·h ⁻¹	消耗量 /m ³ ·h ⁻¹					
6P ₃₅₀ -0.5/0.9	0.066	350/2800		0.9	15920	约 1100	6+3	4+3	约 43000	20×10×7	变量泵
6P ₃₀₀ -0.5/0.9		300/2400			13960	约 900			约 41000	20×9×7	变量泵
6P ₂₈₀ -0.5/0.9		280/2300			13600	约 850			约 39000	18×10×6	变量泵
6P ₂₀₀ -0.5/0.9		200/1500			8950	约 690			约 31000	20×9×6	变量泵
6P ₁₅₀ -0.5/0.9		150/1200			7700	600			约 29000	18×9×6	变量泵
5P ₃ -0.2/0.5	0.026	3		0.5	207	15	5	2	851	3×0.5×4	
5P _{5.4} -0.2/0.9		5.4		0.9	430	55		3	5500	5.5×3×2	表面式冷凝器
5P ₂₀ -0.1/0.8	0.013	20		0.8	启动 2499 工作 8425	211/244	5+3	3+3	15000	6×8×11	
5P ₁₀₀ -0.5/0.8	0.066	100			启动 6124 工作 3194	280/228		4+3	12000	5.5×4.5×10	
5P ₅₀ -1/0.4	0.133	50		0.4	1470	94	5	3	2500	5.5×2×4.5	
5P ₁₀₀ -1/0.7		100		0.7	2840	195			5600	6×4×7	
5P ₁₅₀ -1/0.7		150			启动 3600 工作 4300	300	5+2	4+2	7500	10×5×7	
5P ₃₀₀ -1/0.9		300		0.9	9000	500~600	5	3	30000	20×18×8	
4P ₈₀ -1/0.7	0.266	80		0.7	1680	120	4	2+1	4900	4×2.5×5	
4P ₆₀ -1/0.7		60			1360	90			1350	4×2×4.5	
4P ₂₀ -1/0.7		20			440	17		2	1291	4×1×2.8	
4P ₄₀ -2/0.7		20	20		0.6	800		48	2+1	2900	6×1.5×3
4P ₂₀ -2/0.6	20	10	600	40		2750	4×1×4	表面式冷凝器			
4P ₁₂₀ -2/0.6	120		1790	130		1960	4×2.5×6				
3P ₁₀₀ -7/0.9	0.933	100		0.9	900	50	3	2	1000	2.2×1×.3.8	
3P ₅₀ -8/0.6	1.066	50		0.6	800	28			885	3×1×3	
3P ₃₀ -5/0.6	0.666	30			625	20			600	2×0.8×2.5	
3P ₁₅ -8/0.6	1.066	15			300	15			560	2.5×1×2.5	
3P ₅ -8/0.4		5		0.4	125	4		170	1.3×0.5×2		
3P ₆₀ -10/0.6	1.333	60		0.6	430	32		2+1	1670	4×1×2.5	表面式冷凝器
3P ₂₀ -10/0.6		20			180	15			1200	4×1×2	表面式冷凝器
3P ₁₀₀ -30/0.6	4.0	100			950	38		1+1	850	3×1×2.5	
3P ₈₀ -30/0.4		80			735	30	770		2.5×1×2		
2P _{17N} -30/0.5		17		0.5	165	13	1		100	0.8×0.4×1.5	
2P ₂₅ -55/0.55	7.3	10.65	45	0.55	287	33.5	2	2	1500	3×2×5	
2P ₇₀₀ -27/1.6	3.6	700		1.6	11810	27		1	5000	3.6×2×5	
2P _{15N} -1/0.4	0.133	2	3	0.4	100	14			370	2.9×1×4.8	

注:表中数据□/□分别对应两种型号

注:表中数据□/□分别对应两种型号

③浙江四海喷射真空技术公司生产的 P 型水蒸气喷射泵主要技术性能见表 4-7。

表 4-7 P 型系列水蒸气喷射泵主要技术性能

型 号	吸入压力 /kPa	抽气量/kg·h ⁻¹	工作蒸汽压力 /MPa	工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水温 /℃	冷却水循环量 /m ³ ·h ⁻¹
		空气 + 水蒸气				
2P6.67 10/0.9	6.67	10	0.9	54	32	3
2P6.67 (10+10)/0.9	6.67	10+10	0.9	76	32	4
2P6.67 (10+20)/0.9	6.67	10+20	0.9	97	32	5
2P6.67 20/0.9	6.67	20	0.9	108	32	4
2P6.67 (20+10)/0.9	6.67	20+10	0.9	130	32	5
2P6.67 (20+40)/0.9	6.67	20+40	0.9	195	32	8
2P6.67 40/0.9	6.67	40	0.9	217	32	7
2P6.67 (40+20)/0.9	6.67	40+20	0.9	260	32	9
2P6.67 (40+50)/0.9	6.67	40+50	0.9	325	32	13
2P6.67 (40+80)/0.9	6.67	40+80	0.9	412	32	17
2P6.67 60/0.9	6.67	60	0.9	325	32	11
2P6.67 (60+30)/0.9	6.67	60+30	0.9	391	32	14
2P6.67 (60+60)/0.9	6.67	60+60	0.9	455	32	17
2P6.67 (60+100)/0.9	6.67	60+100	0.9	541	32	21
2P4 10/0.9	4	10	0.9	74	32	3
2P4 (10+10)/0.9	4	10+10	0.9	110	32	5
2P4 (10+20)/0.9	4	10+20	0.9	143	32	8
2P4 (10+40)/0.9	4	10+40	0.9	196	32	10
2P4 20/0.9	4	20	0.9	148	32	6
2P4 (20+20)/0.9	4	20+20	0.9	220	32	9
2P4 (20+40)/0.9	4	20+40	0.9	285	32	13
2P4 (20+80)/0.9	4	20+80	0.9	393	32	20
2P4 40/0.9	4	40	0.9	297	32	12
2P4 (40+40)/0.9	4	40+40	0.9	440	32	20
2P4 (40+100)/0.9	4	40+100	0.9	629	32	29
3P1.33 5/0.9	1.33	5	0.9	51	32	3
3P1.33 (5+5)/0.9	1.33	5+5	0.9	61	32	5
3P1.33 (5+10)/0.9	1.33	5+10	0.9	72	32	7
3P1.33 10/0.9	1.33	10	0.9	104	32	5
3P1.33 (10+10)/0.9	1.33	10+10	0.9	125	32	9
3P1.33 (10+20)/0.9	1.33	10+20	0.9	146	32	12
3P1.33 15/0.9	1.33	15	0.9	154	32	7
3P1.33 (15+20)/0.9	1.33	15+20	0.9	196	32	13
3P1.33 (15+30)/0.9	1.33	15+30	0.9	217	32	16
3P1.33 20/0.9	1.33	20	0.9	207	32	9

二、水蒸气喷射真空泵

(续)

型 号	吸入压力 /kPa	抽气量/kg·h ⁻¹	工作蒸汽压力 /MPa	工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水温 /℃	冷却水循环量 /m ³ ·h ⁻¹
		空气 + 水蒸气				
3P1.33 (20+20)/0.9	1.33	20+20	0.9	249	32	15
3P1.33 (20+30)/0.9	1.33	20+40	0.9	292	32	20
3P1.33 30/0.9	1.33	30	0.9	306	32	11
3P1.33 (30+20)/0.9	1.33	30+20	0.9	348	32	19
3P1.33 (30+50)/0.9	1.33	30+50	0.9	412	32	30
3P2 5/0.9	2	5	0.9	44	32	2
3P2 (5+5)/0.9	2	5+5	0.9	54	32	4
3P2 (5+10)/0.9	2	5+10	0.9	62	32	5
3P2 10/0.9	2	10	0.9	88	32	4
3P2 (10+10)/0.9	2	10+10	0.9	111	32	8
3P2 (10+20)/0.9	2	10+20	0.9	125	32	9
3P2 15/0.9	2	15	0.9	135	32	6
3P2 (15+20)/0.9	2	15+20	0.9	171	32	11
3P2 (15+30)/0.9	2	15+30	0.9	185	32	13
3P2 20/0.9	2	20	0.9	175	32	7
3P2 (20+20)/0.9	2	20+20	0.9	222	32	14
3P2 (20+30)/0.9	2	20+30	0.9	248	32	16
3P2 30/0.9	2	30	0.9	269	32	10
3P2 (30+20)/0.9	2	30+20	0.9	314	32	16
3P2 (30+50)/0.9	2	30+50	0.9	355	32	20
3P4 (20+200)/0.6	4	20+200	0.6	385	32	50
3P4 (20+250)/0.6	4	20+250	0.6	449	32	62
3P4 (30+300)/0.6	4	30+300	0.6	577	32	76
3P4 (30+400)/0.6	4	30+400	0.6	706	32	99
3P4 (40+400)/0.6	4	40+400	0.6	770	32	103
3P4 (40+500)/0.6	4	40+500	0.6	898	32	123
3P4 (20+200)/0.9	4	20+200	0.9	357	32	48
3P4 (20+250)/0.9	4	20+250	0.9	418	32	60
3P4 (30+300)/0.9	4	30+300	0.9	535	32	75
3P4 (30+400)/0.9	4	30+400	0.9	658	32	97
3P4 (40+400)/0.9	4	40+400	0.9	713	32	98
3P4 (40+500)/0.9	4	40+500	0.9	837	32	120
3P1.07 5/0.9	1.07	5	0.9	53	32	4
3P1.07 (5+5)/0.9	1.07	5+5	0.9	67	32	5
3P1.07 (5+10)/0.9	1.07	5+10	0.9	81	32	7

第四章 蒸气流真空泵

(续)

型 号	吸入压力 /kPa	抽气量/kg·h ⁻¹	工作蒸汽压力 /MPa	工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水温 /℃	冷却水循环量 /m ³ ·h ⁻¹
		空气+水蒸气				
3P1.07 10/0.9	1.07	10	0.9	110	32	6
3P1.07 (10+10)/0.9	1.07	10+10	0.9	137	32	9
3P1.07 (10+20)/0.9	1.07	10+20	0.9	165	32	13
3P1.07 15/0.9	1.07	15	0.9	162	32	8
3P1.07 (15+20)/0.9	1.07	15+20	0.9	217	32	15
3P1.07 (15+30)/0.9	1.07	15+30	0.9	245	32	19
3P1.07 20/0.9	1.07	20	0.9	218	32	10
3P1.07 (20+20)/0.9	1.07	20+20	0.9	273	32	17
3P1.07 (20+30)/0.9	1.07	20+30	0.9	329	32	25
3P1.07 30/0.9	1.07	30	0.9	322	32	13
3P1.07 (30+20)/0.9	1.07	30+20	0.9	378	32	21
3P1.07 (30+50)/0.9	1.07	30+50	0.9	461	32	32
4P0.13 2/0.9	0.13	2	0.9	42	32	4
4P0.13 5/0.9	0.13	5	0.9	92	32	7
4P0.13 (5+5)/0.9	0.13	5+5	0.9	153	32	14
4P0.13 (5+10)/0.9	0.13	5+10	0.9	215	32	21
4P0.13 10/0.9	0.13	10	0.9	187	32	15
4P0.13 (10+10)/0.9	0.13	10+10	0.9	309	32	27
4P0.13 (10+20)/0.9	0.13	10+20	0.9	432	32	40
4P0.13 15/0.9	0.13	15	0.9	277	32	19
4P0.13 (15+20)/0.9	0.13	15+20	0.9	523	32	45
4P0.13 (15+30)/0.9	0.13	15+30	0.9	646	32	63
4P0.13 20/0.9	0.13	20	0.9	372	32	25
4P0.13 (20+20)/0.9	0.13	20+20	0.9	618	32	51
4P0.13 (20+30)/0.9	0.13	20+40	0.9	863	32	78
4P0.13 30/0.9	0.13	30	0.9	554	32	36
4P0.13 (30+20)/0.9	0.13	30+20	0.9	800	32	62
4P0.13 (30+50)/0.9	0.13	30+50	0.9	1168	32	102
4P0.27 (15+150)/0.9	0.27	15+150	0.9	1204	32	127
4P0.27 (15+180)/0.9	0.27	15+180	0.9	1405	32	150
4P0.27 (20+120)/0.9	0.27	20+120	0.9	1070	32	111
4P0.27 (20+200)/0.9	0.27	20+200	0.9	1603	32	170
4P0.27 (20+250)/0.9	0.27	20+250	0.9	1934	32	208
4P0.67 (5+15)/0.9	0.67	5+15	0.9	118	32	11
4P0.67 (5+20)/0.9	0.67	5+20	0.9	137	32	13

二、水蒸气喷射真空泵

(续)

型 号	吸入压力 /kPa	抽气量 /kg·h ⁻¹	工作蒸汽压力 /MPa	工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水温 /℃	冷却水循环量 /m ³ ·h ⁻¹
		空气 + 水蒸气				
4P0.67 (10+20)/0.9	0.67	10+20	0.9	201	32	16
4P0.67 (10+32)/0.9	0.67	10+32	0.9	245	32	21
4P0.67 (10+40)/0.9	0.67	10+40	0.9	274	32	25
4P0.67 (10+60)/0.9	0.67	10+60	0.9	347	32	34
4P0.67 (10+80)/0.9	0.67	10+80	0.9	420	32	44
4P0.67 (10+100)/0.9	0.67	10+100	0.9	493	32	53
4P0.67 (15+80)/0.9	0.67	15+80	0.9	464	32	45
4P0.67 (15+100)/0.9	0.67	15+100	0.9	537	32	55
4P0.67 (15+120)/0.9	0.67	15+120	0.9	610	32	64
4P0.67 (15+150)/0.9	0.67	15+150	0.9	719	32	78
4P0.67 (20+120)/0.9	0.67	20+120	0.9	663	32	67
4P0.67 (20+150)/0.9	0.67	20+150	0.9	767	32	80
4P0.67 (20+200)/0.9	0.67	20+200	0.9	954	32	104
4P0.67 (20+250)/0.9	0.67	20+250	0.9	1137	32	127
5P0.013 0.5/0.6	0.013	0.5	0.6	40	32	6
5P0.013 1/0.6	0.013	1	0.6	70	32	9
5P0.013 2/0.6	0.013	2	0.6	133	32	16
5P0.013 5/0.6	0.013	5	0.6	332	32	30
5P0.013 10/0.6	0.013	10	0.6	660	32	60
5P0.027 1/0.6	0.027	1	0.6	70	32	7
5P0.027 2/0.6	0.027	2	0.6	110	32	10
5P0.027 3/0.6	0.027	3	0.6	155	32	14
5P0.027 5/0.6	0.027	5	0.6	254	32	22
5P0.027 6/0.6	0.027	6	0.6	305	32	27
5P0.027 8/0.6	0.027	8	0.6	405	32	35
5P0.027 10/0.6	0.027	10	0.6	508	32	43
5P0.027 12/0.6	0.027	12	0.6	610	32	53
5P0.027 15/0.6	0.027	15	0.6	760	32	65
5P0.067 5/0.6	0.067	5	0.6	400	32	50
5P0.067 10/0.6	0.067	10	0.6	750	32	75
5P0.067 15/0.9	0.067	15	0.9	680	32	70
5P0.067 30/0.9	0.067	30	0.9	1200	32	110
6P0.067 60/0.9	0.067	60	0.9	2110	32	170
6P0.067 100/0.9	0.067	100	0.9	3380	32	270
6P0.067 120/0.9	0.067	120	0.9	4200	32	340

(续)

型 号	吸入压力 /kPa	抽气量/kg·h ⁻¹	工作蒸汽压力 /MPa	工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水温 /℃	冷却水循环量 /m ³ ·h ⁻¹
		空气+水蒸气				
6P0.067 150/0.9	0.067	150	0.9	4800	32	385
6P0.067 200/0.9	0.067	200	0.9	6760	32	540
6P0.067 250/0.9	0.067	250	0.9	8450	32	680
6P0.067 300/0.9	0.067	300	0.9	8870	32	715
6P0.067 400/0.9	0.067	400	0.9	11990	32	925
6P0.067 450/0.9	0.067	450	0.9	13470	32	1050
6P0.067 500/0.9	0.067	500	0.9	15000	32	1180
6P0.067 600/0.9	0.067	600	0.9	18000	32	1400

注:1.2P、3P、4P 型系列产品在吸入压力、抽气量相同的条件下,工作蒸汽压力为 0.6MPa 时,泵的技术性能未列出。用户需要,可与厂方联系。

2. 各种系列泵的配置:泵的级数、冷凝器个数可参照表 4-11

④浙江四海喷射真空技术公司生产的 CLS 型水喷射真空冷凝泵主要技术性能见表 4-8。

表 4-8 CSL 型水喷射真空冷凝泵主要技术性能

型 号	吸入工作 压力 /kPa	冷凝蒸气量 /kg·h ⁻¹	吸入口 /mm	冷却水入口 /mm	进出水温差 /℃	安装高度 /m	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
CSL-100	43	100	80	25	15~30	0	750×200×140
CSL-200		200	125	50			1000×250×200
CSL-400		400	150	65			1500×300×250
CSL-800		800	200	80			1900×350×300
CSL-1000		1000	250	80			2050×410×320
CSL-1200		1200	300	100			2450×440×370
CSL-1600		1600	300	100			2900×700×550
CSL5-100	43	100	80	32	15~30	5	
CSL5-200		200	100	50			670×380×320
CSL5-300		300	150	65			950×400×350
CSL5-400		400	150	65			
CSL5-500		500	200	80			1000×400×350
CSL5-700		700	250	80			1150×450×400
CSL5-1000		1000	250	100			1400×700×500
CSL5-1200		1200	250	100			1000×700×500
CSL5-1500		1500	300	125			1500×750×500
CSL5-2000		2000	300	125			1800×800×500
CSL5-2500		2500	300	150			2300×800×500
CSL5-3000		3000	300	150			2650×800×500

二、水蒸气喷射真空泵

(续)

型 号	吸入工作 压力 /kPa	冷凝蒸气量 /kg·h ⁻¹	吸入口 /mm	冷却水入口 /mm	进出水温差 /℃	安装高度 /m	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm
CSL10-100	43	100	100	40	10~15	≥10	850×300×240
CSL10-200		200	125	50			1020×370×300
CSL10-300		300	125	50			1150×410×330
CSL10-400		400	150	65			1340×460×380
CSL10-500		500	150	65			1460×460×380
380CSL10-600		600	200	80			1560×510×440
CSL10-800		800	200	80			1700×510×440
CSL10-1000		1000	250	100			1870×560×480
CSL10-1200		1000	250	100	15~30		1800×900×600
CSL10-2400		2000	400	150			2250×1100×750
CSL10-3600		3600	500	200			2450×1200×800
CSL10-4800		4800	600	200			2550×1200×900
CSL10-6000		6000	700	250			2600×1300×1000
CSL10-7200		7200	700	250			2700×1300×1000
CSL10-8400		8400	800	250			2950×1400×1100
CSL10-9000		9000	800	250			3000×1400×1100
CSL10-10000		10000	900	300			3100×1550×1100
CSL10-12000		12000	900	300			3100×1650×1200

⑤航天科技集团西安向阳喷射技术有限责任公司生产的 ZP 型低架式水蒸气喷射泵主要技术性能见表 4-9。

表 4-9 ZP 型低架式水蒸气喷射真空泵主要技术性能

型 号	泵入口 压力 /kPa	抽速/kg·h ⁻¹		工作蒸汽 压力 /MPa	工作蒸汽 消耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水 用量 /m ³ ·h ⁻¹	泵 级 数	冷 凝 器 级 数	外形尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	质量 /kg
		空气	水 蒸 气							
6P0.012-3/0.5	0.012	3		0.5~1.2	473	42	6	2	6×1.5×5.5	2250
6P0.012-5/0.5	0.012	5		0.5~1.2	615	44	6	2	6×2.0×6.0	4700
6P0.012-8/0.5	0.012	8		0.5~1.2	779	73	6	2	8×2.0×6.0	6100
6P0.012-10/0.5	0.012	10		0.5~1.2	961	94	6	2	8×2.0×7.0	7200
6P0.012-15/0.5	0.012	15		0.5~1.2	1297	108	6	2	9×2.5×8.0	8500
6P0.012-25/0.5	0.012	25		0.5~1.2	2178	155	6	2	12×3.0×9.5	12600
5P0.267-3/0.5	0.267	3		0.5~1.2	187	21	5	3	3.0×1.2×4.2	2500
5P0.267-6/0.5	0.267	6		0.5~1.2	324	32	5	3	3.5×1.4×4.5	3250

第四章 蒸气流真空泵

(续)

型 号	泵入口 压力 /kPa	抽速/kg·h ⁻¹		工作蒸汽 压力 /MPa	工作蒸汽 消耗量 /kg·h ⁻¹	冷却水 用量 /m ³ ·h ⁻¹	泵 级 数	冷凝 器级 数	外形尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	质量 /kg
		空气	水 蒸 气							
5P0.267-8/0.5	0.267	8		0.5~1.2	426	36	5	3	4.0×1.6×5.0	4900
5P0.267-10/0.5	0.267	10		0.5~1.2	559	47	5	3	4.5×1.8×5.0	5100
5P0.267-13/0.5	0.267	13		0.5~1.2	682	59	5	3	5.0×2.0×5.0	6200
5P0.267-16/0.5	0.267	16		0.5~1.2	982	85	5	3	5.5×2.2×5.0	6660
5P0.067-100/0.5	0.067	100		0.5~1.2	3600	220	5	3	12×6×6.5	18700
5P0.067-200/0.5	0.067	200		0.5~1.2	7000	420	5	3	15×5×8.5	20800
5P0.067-250/0.5	0.067	250		0.5~1.2	8500	500	5	3	18×8×9.0	25000
5P0.067-300/0.5	0.067	300		0.5~1.2	9900	600	5	3	19×8.5×10.0	26800
5P0.067-400/0.5	0.067	400		0.5~1.2	12000	750	5	3	24×8.5×12.5	36900
5P0.067-600/0.5	0.067	600		0.5~1.2	16884	1074	5	3	29×9.0×14.0	46000
4P0.133-10/0.5-60	0.133	10	60	0.5~1.2	787	60	8	3	3.5×2.0×5.5	1340
4P0.133-20/0.5-120	0.133	20	120	0.5~1.2	997	105	8	3	5.0×2.5×6.5	2900
4P0.133-30/0.5-200	0.133	30	200	0.5~1.2	1190	175	8	3	5.5×3.0×7.0	3400
4P0.133-40/0.5-300	0.133	40	300	0.5~1.2	1395	237	8	3	6.0×3.5×7.5	3960
4P0.133-50/0.5-500	0.133	50	500	0.5~1.2	1978	412	8	3	6.5×4.0×8.0	4020
4P0.133-60/0.5-600	0.133	60	600	0.5~1.2	2235	501	8	3	7.0×4.5×9.0	4370
4P0.267-10/0.5-60	0.267	10	60	0.5~1.2	475	49	4	3	3.5×1.5×5.5	940
4P0.267-20/0.5-120	0.267	20	120	0.5~1.2	997	100	4	3	5.0×2.0×6.5	1600
4P0.267-30/0.5-200	0.267	30	200	0.5~1.2	1588	125	4	3	6.0×2.5×7.5	2900
4P0.267-40/0.5-300	0.267	40	300	0.5~1.2	1896	130	4	3	6.5×2.5×7.5	3280
4P0.267-50/0.5-500	0.267	65	600	0.5~1.2	3187	270	4	3	7.0×3.0×8.0	4200
4P0.267-60/0.5-600	0.267	60	600	0.5~1.2	3825	325	4	3	7.5×3.5×9.0	4200

⑥沈阳真空泵厂生产的 PS 型水蒸气喷射泵型号与工作参数见表 4-10。

表 4-10 PS 型水蒸气喷射泵型号与工作参数

型 号		在以下冷却水温时的工作蒸汽耗量 /kg·h ⁻¹						冷却水 循环量 /t·h ⁻¹	设备 质量 /kg
		≤25℃	≤28℃	≤32℃	≤35℃	≤38℃	≤42℃		
3PB(5+15)-0.67/0.6-P	3PB(5+25)-1.07/0.6-P	132	139	155	172	178	192	13	295
3PB(5+35)-1.6/0.6-P	3PB(5+50)-2.0/0.6-P	120	126	147	155	172	192	13	295
3PB(10+15)-0.67/0.6-P	3PB(10+30)-1.07/0.6-P	153	161	218	238	245	260	20	345
3PB(10+40)-1.6/0.6-P	3PB(10+55)-2.0/0.6-P	139	146	209	218	238	260	20	345
3PB(10+20)-0.67/0.6-P	3PB(10+40)-1.07/0.6-P	208	218	242	268	277	298	25	410
3PB(10+55)-1.6/0.6-P	3PB(10+70)-2.0/0.6-P	189	198	230	242	268	298	25	410
3PB(15+25)-0.67/0.6-P	3PB(15+45)-1.07/0.6-P	271	275	304	338	348	375	30	435
3PB(15+70)-1.6/0.6-P	3PB(15+85)-2.0/0.6-P	237	249	289	304	338	375	30	435
3PB(15+35)-0.6/0.6-P	3PB(15+60)-1.07/0.6-P	280	297	333	375	388	421	40	485
3PB(15+85)-1.6/0.6-P	3PB(15+110)-2.0/0.6-P	251	265	315	333	375	421	40	485
3PB(15+45)-0.67/0.6-P	3PB(15+80)-1.07/0.6-P	302	322	367	417	433	473	45	645
3PB(15+110)-1.6/0.6-P	3PB(15+135)-2.0/0.6-P	266	284	344	367	417	473	45	645
3PB(15+65)-0.67/0.6-P	3PB(15+100)-1.07/0.6-P	325	350	402	461	480	528	45	685
3PB(15+135)-1.6/0.6-P	3PB(15+165)-2.0/0.6-P	283	304	375	402	461	528	45	685
3PB(20+60)-0.67/0.6-P	3PB(20+110)-1.07/0.6-P	402	430	489	556	578	632	55	695
3PB(20+150)-1.6/0.6-P	3PB(20+190)-2.0/0.6-P	354	378	459	489	556	632	55	695
3PB(20+70)-0.67/0.6-P	3PB(20+130)-1.07/0.6-P	429	461	530	609	634	696	65	730
3PB(20+180)-1.6/0.6-P	3PB(20+230)-2.0/0.6-P	374	401	495	530	609	696	65	730
3PB(20+90)-0.67/0.6-P	3PB(20+160)-1.07/0.6-P	465	504	586	679	709	783	75	740

(续)

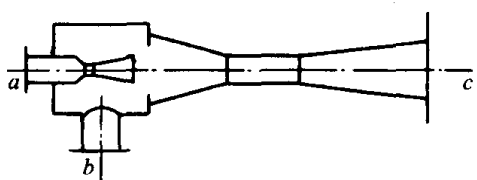
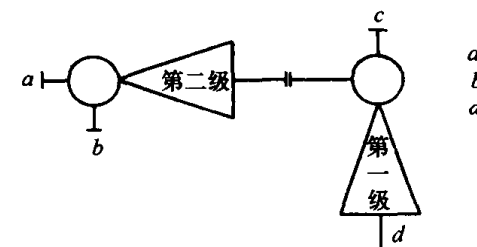
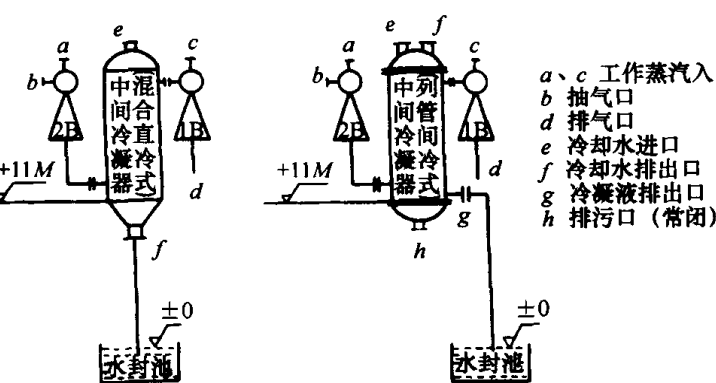
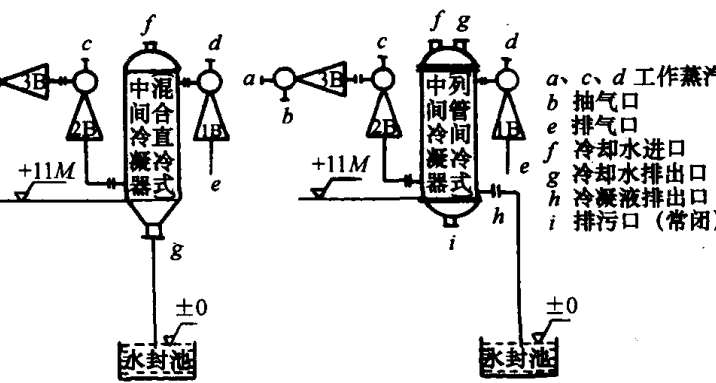
型 号 /		在以下冷却水温时的工作蒸汽耗量 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$						冷却水 循环量 $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	设备 质量 kg
		$\leq 25^\circ\text{C}$	$\leq 28^\circ\text{C}$	$\leq 32^\circ\text{C}$	$\leq 35^\circ\text{C}$	$\leq 38^\circ\text{C}$	$\leq 42^\circ\text{C}$		
3PB(20+210)-1.6/0.6-P	3PB(20+270)-2/0.6-P		400	433	544	586	679	75	740
3PB(25+95)-0.67/0.6-P	3PB(25+175)-1.07/0.6-P	3PB(25+200)-1.4/0.6-P	549	591	681	783	816	87	860
3PB(25+230)-1.6/0.6-P	3PB(25+295)-2/0.6-P		477	513	635	681	783	87	860
3PB(25+115)-0.67/0.6-P	3PB(25+200)-1.07/0.6-P	3PB(25+235)-1.4/0.6-P	591	640	745	864	903	87	870
3PB(25+270)-1.6/0.6-P	3PB(25+250)-2/0.6-P		507	549	691	745	864	87	870
3PB(30+130)-0.67/0.6-P	3PB(30+230)-1.07/0.6-P	3PB(30+260)-1.4/0.6-P	691	746	865	999	1042	100	1100
3PB(30+300)-1.6/0.6-P	3PB(30+380)-2/0.6-P		597	644	804	865	999	100	1100
3PB(30+170)-0.67/0.6-P	3PB(30+290)-1.07/0.6-P	3PB(30+330)-1.4/0.6-P	769	837	983	1149	1202	110	1480
3PB(30+380)-1.6/0.6-P	3PB(30+470)-2/0.6-P		652	710	908	983	1149	110	1480
3PB(30+210)-0.67/0.6-P	3PB(30+350)-1.07/0.6-P	3PB(30+400)-1.4/0.6-P	854	937	1114	1314	1378	130	1790
3PB(30+470)-1.6/0.6-P	3PB(30+570)-2/0.6-P		713	784	1023	1114	1314	130	1790
3PB(35+245)-0.67/0.6-P	3PB(35+415)-1.07/0.6-P	3PB(35+470)-1.4/0.6-P	1016	1114	1324	1562	1638	150	2420
3PB(35+550)-1.6/0.6-P	3PB(35+700)-2/0.6-P		848	932	1216	1324	1562	150	2420
3PB(40+315)-0.67/0.6-P	3PB(40+560)-1.07/0.6-P	3PB(40+610)-1.4/0.6-P	1199	1323	1589	1890	1988	175	2560
3PB(40+660)-1.6/0.6-P	3PB(40+900)-2/0.6-P		986	1092	1452	1589	1890	175	2560
3PB(50+360)-0.67/0.6-P	3PB(50+610)-1.07/0.6-P	3PB(50+700)-1.4/0.6-P	1425	1569	1876	2224	2336	215	2750
3PB(50+800)-1.6/0.6-P	3PB(50+1000)-2/0.6-P		1180	1303	1718	1876	2224	215	2750

注:最低工作蒸汽压力可在 0.4MPa~1.3MPa 之间任选

二、水蒸气喷射真空泵

⑦水蒸气喷射真空泵组成与样式、特点见表 4-11。

表 4-11 水蒸气喷射真空泵组成与样式、特点

组成	样 式	特 点
单级蒸汽喷射泵 (恒背压喷射器)	 <p> a 工作蒸汽入口 b 抽气口 c 排气口 </p>	单级泵是排、出背压为一个绝对大气压的恒背压喷射器。 (1) 工作真空度: $1.3 \times 10^4 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ (2) 极限压力: $1 \times 10^4 \text{ Pa}$ (3) 排出压力: $1 \times 10^5 \text{ Pa}$
双级蒸汽喷射泵	<p>(1) 直接串联结构</p>  <p> a, c 工作蒸汽入口 b 抽气口 d 排气口 </p> <p>(2) 间接串联结构</p>  <p> a, c 工作蒸汽入口 b 抽气口 d 排气口 e 冷却水进口 f 冷却水排出口 g 冷凝液排出口 h 排污口 (常闭) </p>	(1) 由两个蒸汽喷射器组成。第一级为恒背压喷射器 (2) 工作真空度: $4 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ (3) 极限压力: $6.6 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 2.6 \times 10^3 \text{ Pa}$
三级蒸汽喷射泵 (两种组合结构)	<p>(1) 第二、第三级直接串联</p>  <p> a, c, d 工作蒸汽入口 b 抽气口 e 排气口 f 冷却水进口 g 冷却水排出口 h 冷凝液排出口 i 排污口 (常闭) </p>	由三个蒸汽喷射器组成。第一级为恒背压喷射器。 (1) 工作真空度: $6.5 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 4 \times 10^3 \text{ Pa}$ (2) 极限压力: $2.6 \times 10^2 \text{ Pa}$ (3) 第二、第三级直接串联结构, 常被用于抽除气体中, 不凝性气体较多, 而可凝性气

(续)

组成	样 式	特 点
三级蒸汽喷射泵 (两种组合结构)	<p>(2)间接串联结构</p>	<p>体较少的场合</p> <p>(4)间接串联结构是目前常用结构。其中中间冷凝器分别为混合直冷式和列管间冷式</p>
四级蒸汽喷射泵		<p>由四个蒸汽喷射器组成。其第一级为恒背压喷射器。</p> <p>(1)工作真空度: $133\text{Pa} \sim 6.6 \times 10^2\text{Pa}$</p> <p>(2)极限压力:53.2Pa</p> <p>(3)中间冷凝器分别为混合直冷式和列管间冷式</p>
五级蒸汽喷射泵		<p>由五个蒸汽喷射器组成。其中第一级为恒背压喷射器。</p> <p>(1)工作真空度: $13.3\text{Pa} \sim 133\text{Pa}$</p> <p>(2)极限压力:5Pa 以下</p> <p>(3)中间冷凝器为混合直冷式,也可以是列管间冷式</p>
六级蒸汽喷射泵		<p>由六个蒸汽喷射器(主泵系列)组成。其中一级为恒背压喷射器。</p> <p>(1)工作真空度:66.5Pa</p> <p>(2)极限压力:13.3Pa</p> <p>(3)该泵(主泵)一般需加3级辅助泵使用,常用在真空浇铸行业</p>

注:水蒸气喷射真空泵组成与样式选自杭州华达真空设备制造有限公司产品样本

三、油扩散喷射真空泵

(一) 概述

油扩散喷射真空泵又称油增压泵。其工作压力范围为 $10\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$, 在此工作压力范围内油扩散喷射真空泵具有较大的抽速和最大出口压力。通常它比同口径的油扩散泵的抽气量高 4 倍~20 倍, 加热功率高 2 倍~5 倍。按其工作范围, 它介于油封机械泵 ($1 \times 10^5\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$) 和油扩散泵 ($10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-6}\text{Pa}$) 的工作压力范围之间。该泵的优点是在 $1\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 压力范围内有较大的抽速, 可以弥补油封机械泵和高真空油扩散泵在此区间抽速较小的缺点 (因为在 10^{-1}Pa 低压力范围油封机械泵的抽速有明显的降低, 而大多数高真空油扩散泵在此压力范围内的抽速也较小)。此外, 它的最大反压力较油扩散泵高 (大于 10^2Pa), 所以油扩散喷射泵除可用作真空系统主泵使用之外, 还可以用到油扩散泵的出口处来增加其出口压力, 在排除一定量的气体时, 能相对地减少所配置的前级泵的容量, 使前级机械泵能有效地工作, 故油扩散喷射泵又称为油增压泵。

油扩散喷射泵与罗茨式真空泵相比较, 结构简单, 无机械转动部分, 运转可靠, 维护方便, 使用寿命长, 广泛用于真空冶金炉, 如真空感应炉, 真空电弧炉, 电容器的真空干燥和浸渍, 真空蒸馏设备, 石油化工、塑料连续喷镀, 低密度风洞设备, 固体火箭发动机点火模拟设备和固体发动机高空试车台等设备中。

但是, 油扩散喷射泵不适用于抽除对金属有腐蚀作用或与泵油产生化学反应的气体。

(二) 结构原理

油扩散喷射泵的主要抽气部件是泵体、喷射器、导流管、锅炉和回油管 (如图 4-14 所示)。喷射器由拉瓦尔喷管和超声速扩压管组成。

油扩散喷射泵锅炉中产生的油蒸气 ($2.6 \times 10^3\text{Pa} \sim 6.6 \times 10^3\text{Pa}$) 经导流管输送到拉瓦尔喷管加速, 在喷管的出口处速度达到超声速 (马赫数 $Ma > 1$), 油蒸气流的位能 (热能和压力能) 转变为动能 (速度能)。这个超声速流依靠它的表面层的作用 (裹挟和扩散) 和被抽气体混合进行能量交换, 这种混合气流的扩压器的收敛段继续混合并被逐步滞止在扩压器喉部, 产生正激波, 得到压力和温度的恢复, 速度降低为亚声速流 (马赫数 $Ma < 1$), 再经过亚声速扩散段 (扩压管的发散段), 进一步得到压力和温度的恢复, 速度进一步降低, 使动能转化为位能, 在扩压管出口处压力达到等于或高于其周围的压力而排至下一个抽气级 (下一级喷射器或前级泵入口级)。各级工作的油蒸气被器壁上的冷却水管冷凝, 经过回油管回流到锅炉中, 再重新加热成油蒸气, 如此循环进行抽气。

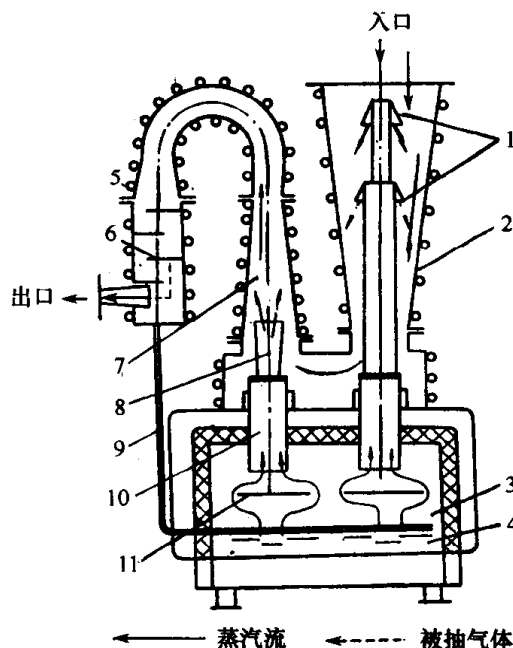


图 4-14 油扩散喷射泵工作原理图

- 1—伞型扩散喷嘴；2—泵体；3—锅炉；4—工作液；
5—冷却系统；6—油分离器；7—扩压管；
8—拉瓦尔喷管；9—回油管；10—导流管；11—挡片。

为提高油扩散喷射泵在低压力($10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$)下的抽速,扩展它的工作下限,油扩散喷射泵的高真空级(第一、二级)采用与油扩散泵相同的伞形喷口。油扩散喷射泵综合了扩散泵和喷射泵的工作特点,它是介于这两类泵之间的一种特殊抽气泵。

(三) 油扩散喷射真空泵的抽气特性

1. 泵的抽速特性

(1) 泵的抽速与加热功率的关系

加热功率是影响油扩散喷射泵抽速特性的主要因素之一。由于加热不同而使泵的蒸气射流的密度不同,因而使泵的抽速最大值所对应的工作压力值也不同。加热功率增加,蒸气射流密度大,抽速最大值所对应的工作压力值也高。反之亦然。因此,对油扩散喷射泵而言,当提高加热功率时,泵的抽速最大值向高入口压力方向移动;降低泵加热功率时,泵的抽速最大值向低入口压力方向移动。图 4-15 给出了改变加热功率时,泵抽速与入口压力之间的关系曲线。图 4-16 给出了不同锅炉温度时泵的抽气量与入口压力关系。

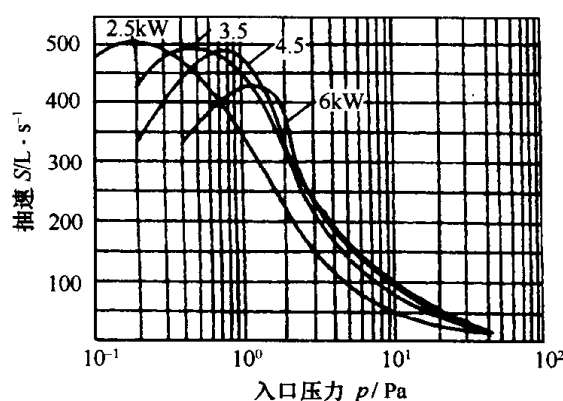


图 4-15 改变加热功率时泵抽速与入口压力之间的关系

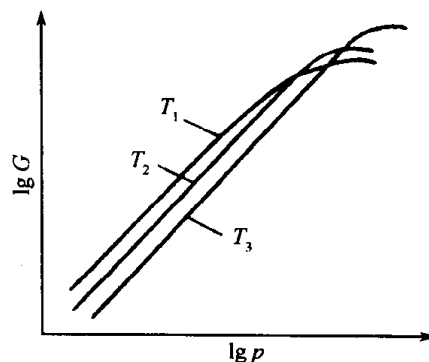


图 4-16 不同锅炉温度($T_1 < T_2 < T_3$)时泵(前级)的抽气量与入口压力关系

实验得出:当降低加热功率时(锅炉温度低),蒸气射流的密度降低,相应增加了被抽气体向蒸气射流内部的扩散,结果使低压力范围的抽气量有所增加,而高压范围范围的抽气量有所降低。

(2) 泵的抽速与喷嘴级数的关系

泵的抽速与喷嘴级数有很大关系。在泵体直径给定的条件下,增加喷嘴与泵壁之间的环形通道面积可以增加泵的抽速。为了增加喷嘴与原壁的环形通道面积,可以缩小喷嘴帽的直径,但这样做会引起喷嘴级的最大出口压力降低。这时可用增加泵内喷嘴级数来弥补喷射级压缩比的降低。图 4-17 给出了多级泵的典型特性曲线,以抽气量 G 为常数,画出点划线可得出各级喷嘴对应的入口压力和上一级喷嘴的出口压力。

(3) 泵的抽速与泵出口压力关系

图 4-18 给出了单级喷嘴的抽速与喷嘴出口压力的关系。从图上可以看出,当喷嘴级的出口压力逐渐提高时,抽速先保持不变;当出口压力一旦达到最大出口压力,抽速则开始急剧地下降。

(4) 泵的抽速与入口压力关系

①不同蒸气流量 G_n 下的单级泵抽气量 G 与入口压力 p_1 的关系。图 4-19 给出了不同蒸气流量 G_n 下单级泵的抽气量 G 与入口压力 p_1 的关系。从图中可知,如果保持喷射嘴的扩张

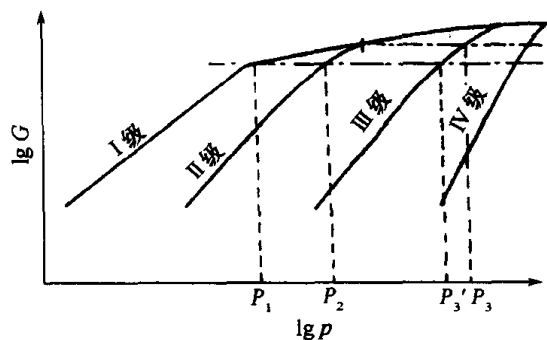


图 4-17 多级泵的抽气特性曲线

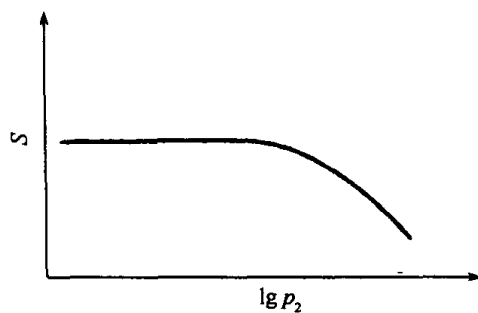


图 4-18 单级喷嘴的抽速与出口压力关系

度 A 和供应给喷嘴的蒸气温度 T 不变, 而用增加喷嘴喉部断面方法来改变蒸气的耗量 G_n , 则在不改变喷嘴与泵壁之间环形流疲乏面积的条件下, 喷嘴的抽气特性是按图 4-19 所示的关系来变化的。

②抽氢气和空气时, 泵抽速与入口压力关系。图 4-20 给出了抽氢气和空气时, 泵抽速与入口关系。从图中可知, 泵抽除氢气时的抽速比抽除空气时的抽速要高, 这是因为从扩散喷射喷嘴出来的蒸气射流的密度相当大, 能很好地抽除轻的气体所致。

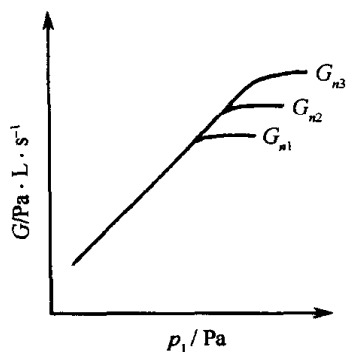


图 4-19 不同蒸气流量 G_n 下单级泵的抽气量 G 与入口压力 p_1 关系

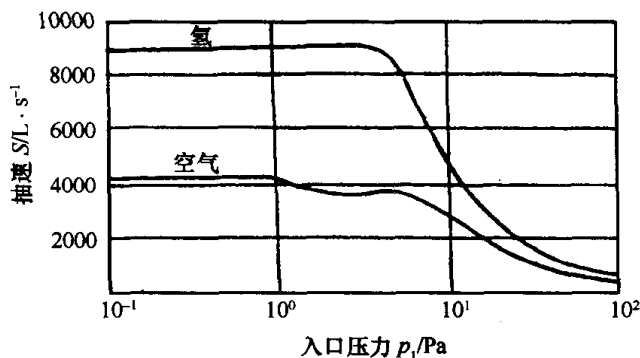


图 4-20 抽氢气和空气时, 泵抽速与入口压力关系

2. 泵的最大出口压力(或泵某级喷嘴的最大出口压力)

泵的最大出口压力取决于泵的加热功率和喷嘴的扩张度。提高加热功率和降低喷嘴的扩张度都能提高泵的最大出口压力。图 4-21 给出了泵的加热功率与最大出口压力的关系; 图 4-22 给出了喷嘴不同扩张度 ($A_1 > A_2 > A_3$) 下单级泵的入口压力与出口压力的关系。

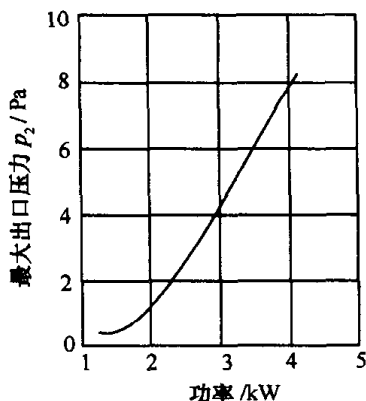


图 4-21 泵加热功率与最大出口压力的关系

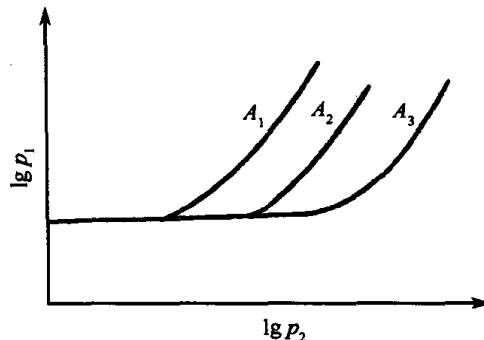


图 4-22 不同扩张度 ($A_1 > A_2 > A_3$) 下单级泵的入口压力与出口压力的关系

(四) 油扩散喷射真空泵的设计计算

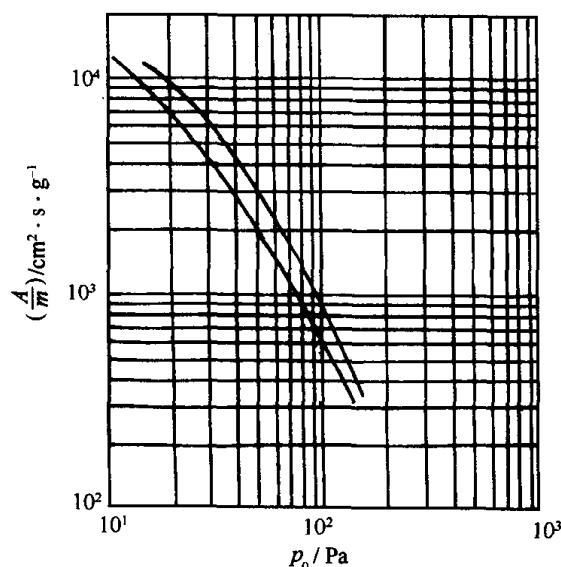
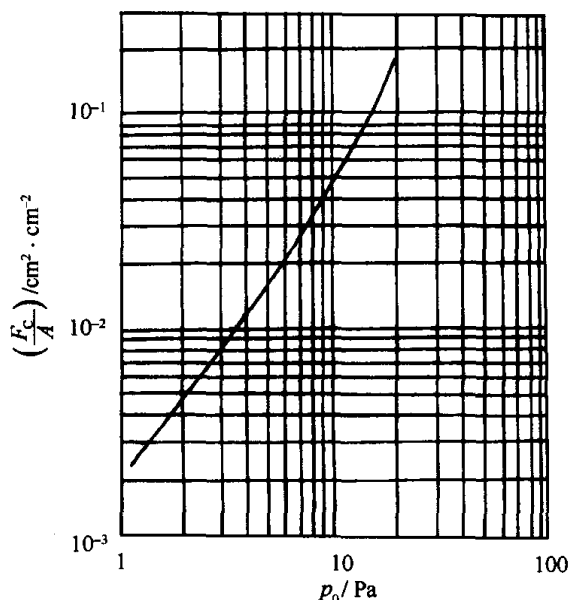
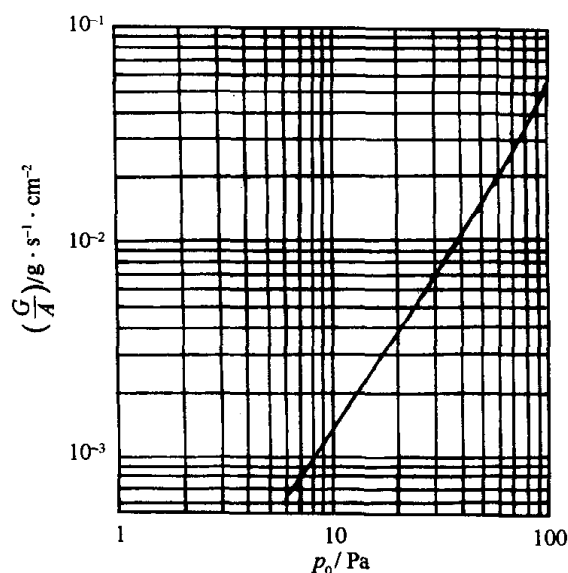
1. 各级喷嘴的工作点和 A/m 、 F_c/A 和 G/A 比参数的确定

具有两级扩散喷嘴、两级喷射喷嘴的四级油扩散喷射泵, 在它的工作压力 (10^{-2} Pa ~ 10 Pa) 范围内, 各级喷嘴出口平面上的蒸气流压力值按表 4-12 选取。

油扩散喷射泵在不同喷嘴出口平面上的蒸气射流压力下, 比参数 A/m 、 F_c/A 和 G/A 的变化关系如图 4-23、图 4-24 和图 4-25 的曲线所示。图中, A ——喷嘴出口平面上的环形抽气面积 [cm^2]; F_c ——喷嘴的喉部面积 [cm^2]; G ——喷嘴在单位时间内的蒸气喷射量 [g/s]; m ——泵能抽除的最大的空气的质量流量 [g/s].

表 4-12 各级喷嘴的工作点

喷嘴级数	喷嘴出口平面上的蒸气射流压力/Pa
第一级	2.7~5.4
第二级	6.7~13.3
第三级	20~26.7
第四级	40~67

图 4-23 A/m 与 p_0 关系曲线图 4-24 $\frac{F_c}{A}$ 与 p_0 关系曲线图 4-25 $\frac{G}{A}$ 与 p_0 关系曲线

对于 20℃ 的被抽空气, 其泵的抽气量为

$$m = 1.185 \times 10^{-5} p S \quad [\text{g/s}] \quad (4-29)$$

式中 m ——泵口流量 [g/s];

p ——泵的入口空气压力 [Pa];

S ——入口空气压力为 p 时泵的抽速 [L/s].

由各级喷嘴的工作点和图 4-23、图 4-24、图 4-25 的曲线可以求出各级喷嘴的 A 、 F_c 及 G 值。

2. 扩散喷嘴的直径、角度、导流管直径及喷嘴间距的确定

根据空气动力学理论,扩散喷嘴在单位时间内喷出的蒸气量 G 为

$$G = F_c \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2Kg}{(K+1)R}} \cdot \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \quad [\text{g/s}] \quad (4-30)$$

式中 F_c ——扩散喷嘴的喉部面积[cm²];

p_0 ——扩散喷嘴喉部中心平面处导流管内的蒸气流压力[Pa];

T_0 ——压力 p_0 所对应的蒸气流温度[K];

K ——绝热指数;

g ——重力加速度[cm/s²];

R ——摩尔气体常数[J/mol·K]。

对于相对分子量 $M=330$, 绝热指数 $K=1.02$ 的增压泵油, 式(4-30)可写为

$$G = 1.219 \times 10^{-2} F_c \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \quad [\text{g/s}] \quad (4-31)$$

或

$$\frac{p_0}{\sqrt{T_0}} = \frac{G}{1.219 \times 10^{-2} F_c} \quad (4-32)$$

根据式(4-32) 求得的 $\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}$ 值, 可由图 4-26 可查出 p_0 值来。 p_0 值应小于油锅中的油蒸气压力。

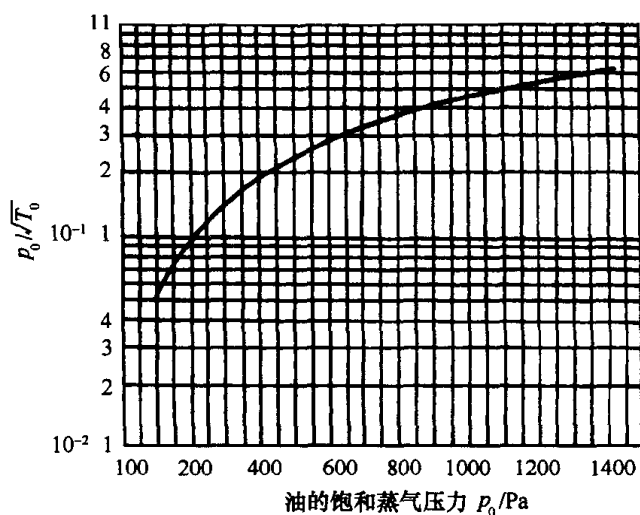


图 4-26 $\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}$ 与 p_0 关系曲线图

选定 p_0 和喷嘴出口平面上的蒸气射流压力 p_i 以后, 由式(4-33) 就可以算出喷嘴的扩张率 B_i 来, 即

$$B_i = \frac{F}{F_c} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{K-1}{K+1}} \left[\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4-33)$$

式中 F ——扩散喷嘴的出口面积[cm²];

p_i ——扩散喷嘴出口平面上的蒸气射流压力[Pa];

T_0 ——压力 P_0 所对应的蒸气流温度[K];

K ——绝热指数;

F_c ——扩散喷嘴的喉部面积[cm²];

p_0 ——扩散喷嘴喉部中心平面处导流管内的蒸气流压力[Pa]。

对于两级扩散喷嘴的四级油扩散喷射泵,扩散喷嘴的扩张率 B_i 和喷嘴角度 α 通常按表 4-13 选取。

表 4-13 扩散喷嘴的扩张率 B_i 和喷嘴角度 α

喷嘴级数	扩张率 B_i	喷嘴角度 α
第一级	25 ~ 30	60° ~ 65°
第二级	18 ~ 25	65° ~ 70°

第一、二级喷嘴喉部中心平面处导流管内的蒸气射流压力 p_{10} 和 p_{20} 的关系为

$$p_{10} = p_{20} \left\{ \frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} \cdot \frac{F_{c_2}}{F_{c_1}} \right\}^{\frac{2K}{K+1}} \quad [\text{Pa}] \quad (4-34)$$

或

$$\frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} = \left(\frac{p_{10}}{p_{20}} \right)^{\frac{K+1}{2K}} \frac{F_{c_1}}{F_{c_2}} \quad (4-35)$$

式中 F_{c_1} 、 F_{c_2} ——分别为第一级、第二级喷嘴喉部面积[cm²];

r_1 、 r_2 ——分别为第一级、第二级导流管的内径[cm²]。

油扩散喷射泵的第一级喷嘴直径 d_1 较大, $d_1 = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{3.5} \right) D$ (D 是泵的入口直径)。兰州真空设备有限责任公司生产的油扩散喷射泵,选取 $d_1 = 0.3D$ 。

根据第二级喷嘴喉部中心平面处的导流管内的蒸气流压力 p_{20} 和油锅中油蒸气压力 p 的关系

$$p_{20} = \frac{p}{1 + \left\{ \left[\frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} \cdot \frac{F_{c_2}}{F_{c_1}} \right]^{\frac{3-K}{K+1}} - \left[\frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} \cdot \frac{F_{c_2}}{F_{c_1}} \right]^{\frac{3+K}{K+1}} \right\} \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{1}{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}} \quad (4-36)$$

可得出喷嘴的间距

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{\left(\frac{p}{p_{20}} - 1 \right) \left[2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]}{1 + \left\{ \left[\frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} \cdot \frac{F_{c_2}}{F_{c_1}} \right]^{\frac{3-K}{K+1}} - \left[\frac{2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^2} \cdot \frac{F_{c_2}}{F_{c_1}} \right]^{\frac{3+K}{K+1}} \right\}} \quad (4-37)$$

式中 l_1 ——第一级与第二级喷嘴喉部中心平面间的距离[cm];

l_2 ——第二级导流管入口平面与该级喷嘴喉部中心平面间的距离[cm];

p ——油锅中的油蒸气压力[Pa]。

3. 喷射喷嘴喉部直径的确定

已知喷射喷嘴喉部面积, 喷嘴喉部直径 d_c 可由公式 $d_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_c}$ [cm] 算出。已知油锅中的油蒸气压力 p_0 和喷嘴出口平面上的蒸气射流压力 p_i , 根据(4-33) 式就可计算出喷射喷嘴的扩张率 B_i 。图 4-27 为喷射喷嘴结构示意图。

两级喷射喷嘴的四级油扩散喷射泵喷嘴的扩张率 B_i 和喷嘴角度 2α 亦可按表 4-14 选取。

表 4-14 喷射喷嘴的扩张率 B_i 和喷嘴角度 2α

喷嘴级数	扩张率 B_i	喷嘴角度 2α
第三级	10 ~ 15	$\leq 16^\circ$
第四级	5 ~ 7	$8^\circ \sim 12^\circ$

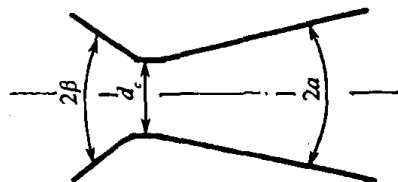


图 4-27 喷射喷嘴结构示意图

喷嘴的收缩角一般取 $2\beta = 60^\circ \sim 90^\circ$ 。喷射喷嘴的扩张率 B_i 与喷嘴出口平面上的蒸气射流马赫数 Ma 的关系表示如下

$$B_i = \frac{1}{Ma} \left[\frac{2}{K+1} \left(\frac{2}{K+1} Ma^2 + 1 \right) \right]^{\frac{K+1}{2(K-1)}} \quad (4-38)$$

4. 喷射级扩压器的喉部直径的确定

油扩散喷射泵的喷射级扩压器的喉部直径 d'_c 是根据喷射喷嘴出口平面上的蒸气射流马赫数 Ma , 由图 4-28 的 $F'_c/F_c \sim Ma$ 曲线得出 F'_c/F_c 值, 再求出 d'_c 来。

由图 4-28 知, 喷嘴与扩压器喉部面积的比值 F'_c/F_c 随着蒸气射流马赫数 Ma 的增大而逐渐增大。喷射级的 F'_c/F_c 和扩散压器的收缩角 2β 按表 4-15 选取。

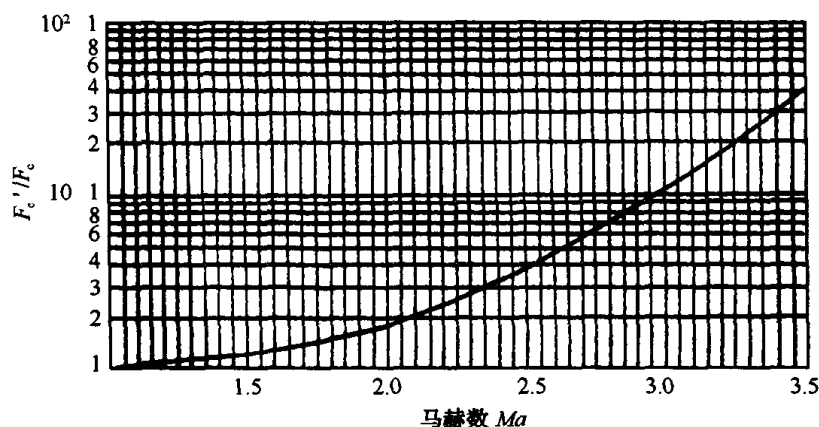


图 4-28 F'_c/F_c 与 Ma 关系曲线

F'_c ——扩压器的喉部面积[cm²]; F_c ——喷射喷嘴喉部面积[cm²];

Ma ——喷射喷嘴出口平面上的蒸气射流马赫数。

表 4-15 喷射级的 F'_c/F_c 和扩散压器的收缩角 2β

喷嘴级数	F'_c/F_c	扩散压器的收缩角 2β
第三级	8 ~ 12	$10^\circ \sim 14^\circ$
第四级	5 ~ 7	$4^\circ \sim 6^\circ$

5. 泵的加热功率的确定

油扩散喷射泵所需要的加热功率 N 为

$$N = \frac{G_t}{1005\eta} [C(t_2 - t_1) + L] \quad [\text{kW}] \quad (4-39)$$

式中 G_t ——泵的各级喷嘴在单位时间内的蒸气喷射量之和 $[\text{g/s}]$;

η ——热效率;

C ——泵油的比热容 $[\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}]$;

t_2 ——泵油的工作温度 $[\text{}^\circ\text{C}]$;

t_1 ——泵油的回油温度 $[\text{}^\circ\text{C}]$;

L ——泵油的蒸发潜热 $[\text{J/g}]$ 。

国产扩散喷射泵油在正常工作温度下的油蒸气压力选取 $1330\text{Pa} \sim 2000\text{Pa}$ 为宜。用石棉作保温材料的油扩散喷射泵油锅的蒸气压力 $p_0 = 1330\text{Pa}$, 式(4-39) 中各参数为:

$$\eta = 0.45 \sim 0.50;$$

$$C = 2.129\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 226^\circ\text{C} \text{ (扩散喷射泵油的常数 } A = 9.52, B = 4250);$$

$$t_1 = 80^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C};$$

$$L = 188.4\text{J/g}。$$

(五) 国产 Z 型系列油扩散喷射真空泵主要技术性能、特性曲线及外形尺寸

1. 主要技术性能

①Z 型系列油扩散喷射泵主要技术性能见表 4-16。

表 4-16 Z 型系列油扩散喷射泵主要技术性能

型 号	抽率 $/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	最大排 气压力 $/\text{Pa}$	加热 功率 $/\text{kW}$	泵用油量 $/\text{kg}$	冷却水 用量 $/\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	排气口 直径 $/\text{mm}$	推荐前级 泵抽速 $/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	外形尺寸 (长×宽×高) $/\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	质量 $/\text{kg}$	生产厂家
Z-150	450	7×10^{-2}	≥ 133	2.4	2.8	250	150	130	$350 \times 320 \times 780$	50	兰州真空设备有限责任公司
Z-300	2000			6.6	8.5	360	300	70	$620 \times 620 \times 1390$	240	
Z-400	4000			14-15	33.5	800	400	150	$690 \times 650 \times 1670$	600	
Z-500	5000~5500			14.4-21.6	35~40	1000	500	210	$1600 \times 820 \times 2500$	680	
Z-600	8000			20	75	1300	600	300	$1180 \times 990 \times 2390$	1360	
Z-800	13000			30	105	1500	800	450	$1480 \times 1230 \times 3020$	2010	
Z-1000	23000			60	160	5000	1000	1200	$1790 \times 1550 \times 3720$	3810	
Z-320	2500	7×10^{-2}	160	7.2	10.5	/	320	70	$1541 \times 577 \times 1747$	/	上海曙光机械制造有限公司
Z-400	4000			10.8	20	/	400	140	$1040 \times 405 \times 1720$	/	
Z-500	6000			15	25	/	500	220	$1340 \times 405 \times 1850$	/	
Z-630	9000			24	53	/	630	350	$1614 \times 940 \times 2780$	/	

(续)

型 号	抽率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 Pa	最大排 气压力 Pa	加热 功率 kW	泵用油量 kg	冷却水 用量 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	排气口 直径 mm	推荐前级 泵抽速 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	外形尺寸 (长 \times 宽 \times 高) $\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$	质量 kg	生产厂家
Z-320	≥ 2500	7×10^{-2}	≥ 180	15.0	20	800	320	2X-70		/	沈阳恒星实业有限公司
Z-400	≥ 4000	2×10^{-2}		18~22.5	35	1200	400	2X-70 (二台)		/	
Z-320	≥ 4000			31.5~46.5	75	2500	630	2X-70 (二台) ZJ-600		/	
Z-800	≥ 13000	3×10^{-2}		70	122	3500	800	/			
Z-150	450	7×10^{-2}	≥ 133	1.8	2.45	150	150	30	350 \times 310 \times 782	51	沈阳真龙真空设备有限公司
Z-300	2000			6.6	11	360	300	60	620 \times 621 \times 1394	240	
Z-400	4000			14~15	33.5	800	400	150	770 \times 678 \times 1675	600	
Z-600	8000			20~21	75	1300	600	300	1178 \times 990 \times 2395	1360	
Z-800	13000			30	105	1600	800	600	1482 \times 1230 \times 3022	2000	
Z-1000	23000			55	160	3000	1000	1200	1785 \times 1350 \times 3720	3800	

②WZ 系列卧式扩散喷射泵技术性能见表 4-17。

该系列卧式扩散喷射泵为新型泵,具有先进的结构和优良的技术性能。主要特点:a.主泵扩散级为立式结构,喷射级为卧式;能量损失小,装拆维修方便。b.采用圆筒卧式油锅,相对方形油锅而言,油锅压力稳定。c.油锅内设有不锈钢快速水冷管,停止加热 60min 后,通水冷却 60min 即可关闭前级泵,节能降耗显著。d.设有油标观察装置,可直观地观察油量、油清洁度、油氧化程度,以便及时添加或更换油。e.特殊的前级冷凝结构,使冷凝效果好,前级反压力高。f.泵配有三点测温孔,可对该泵或真空系统实现自动启动和停泵的自动化控制。

表 4-17 WZ 系列卧式扩散喷射泵技术性能

型 号	抽气速率 (1.33Pa) $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	临界前 级压力 $/\text{Pa}$	加热 功率 $/\text{kW}$	泵用油量 $/\text{kg}$	排气口 直径 $/\text{mm}$	推荐前级 泵抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	外形尺寸 (长×宽×高) $/\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$
WZ-300	2000	6.7×10^{-2}	133	6.0	25	300	70	1200×700×1600
WZ-400	4400			12	30	400	70	1400×700×1800
WZ-500	8000			21	40	500	140	1660×820×2500
WZ-600	9000			23	70	600	140	1660×820×2600
WZ-800	14000			27	100	800	300	2000×1000×2900

注:甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产

③ZL 系列油扩散喷射泵技术性能见表 4-18。

表 4-18 ZL 系列油扩散喷射泵技术性能

型号	极限压力 /Pa	抽速 (在 1Pa 时,对空气的值) /L·s ⁻¹	最大排 气压力 /Pa	加热 功率 /kW	接线 方式	泵油 牌号	泵油用量 /kg	冷却水耗量 (进水温度 20℃ ± 5℃) /L·h ⁻¹	进气口 直径 /mm	推荐使用 前级泵 型号	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg
ZL-150	7×10 ⁻²	450	133	1.8	单相	玉门 增压 泵油	2.45	150	150	2X-30	350×315×782	51
ZL-300		2000		6.6	三相 星形		11	300	300	2X-70	621×620×1394	240
ZL-320		4000		6			10	345	320	2X-70	1513×500×1780	/
ZL-400		5000		14-15			33.5	800	400	2X-70 (二台)	770×678×1675	600
ZL-600		8000		20-21			75	1300	600	2X-70 (二台)	1178×990×2395	1360
ZL-800		13000		30			105	1600	800	2X-70 (三台)	1477×1230×3022	2000
ZL-1000		23000		45	150		3000	1000	H-150 (二台)	1780×1550×3520	3800	
注:甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产。外形尺寸中的高度,包括了泵进口盖板厚度及螺栓的相应尺寸												

2. 特性曲线

Z 系列油扩散喷射泵抽气速率与入口压力关系曲线如图 4-29 所示。

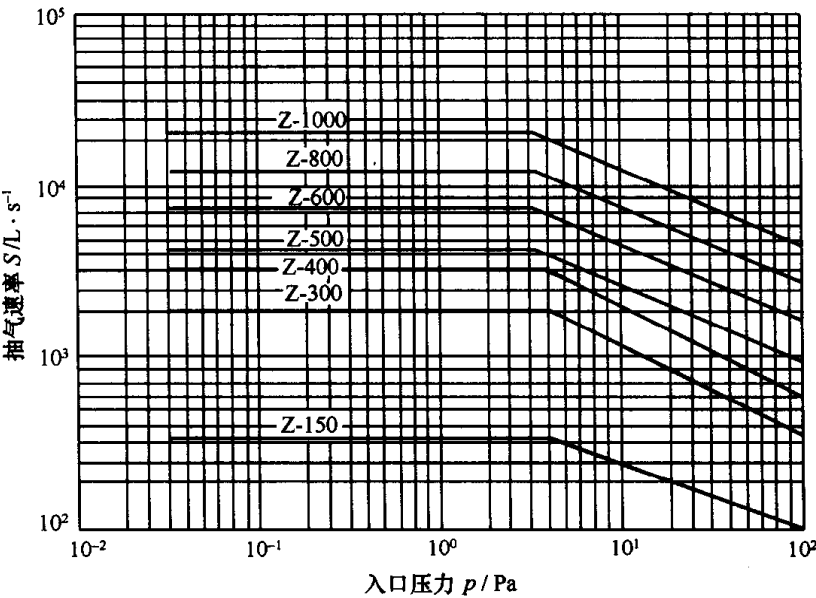


图 4-29 Z 系列油扩散喷射泵抽气速率与入口压力关系曲线
(兰州真空设备有限责任公司)

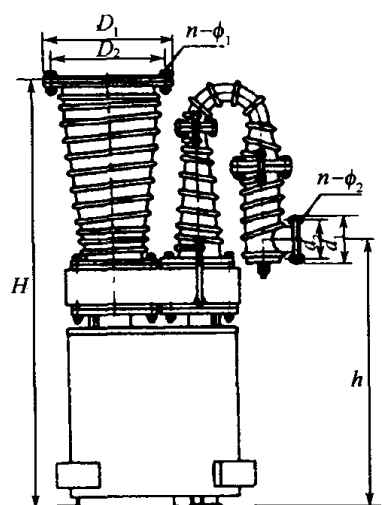
3. 外形及安装尺寸

①兰州真空设备有限责任公司生产的 Z 系列油扩散喷射泵外形及安装尺寸见表 4-19。

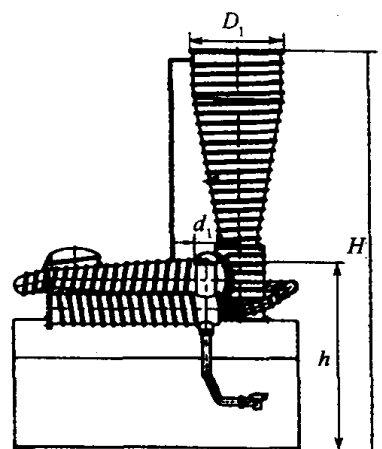
三、油扩散喷射真空泵

表 4-19 Z 系列油扩散喷射泵外形及安装尺寸

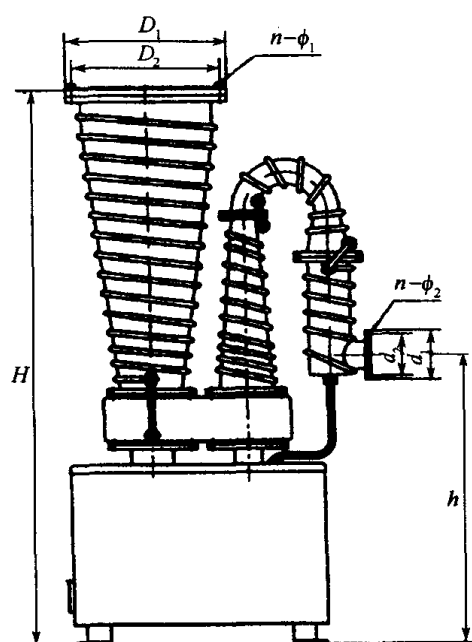
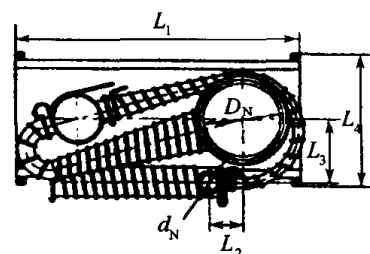
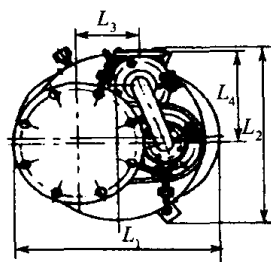
(单位:mm)



(a) Z-150 型 (前级管方向以俯视图为准)

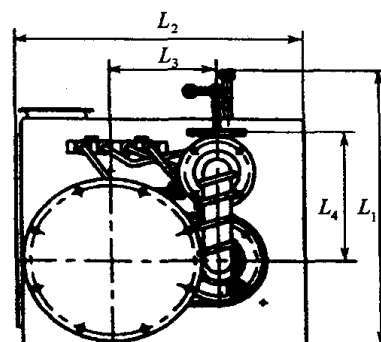


(b) Z-500 型 (前级为卧式)



(c) Z-300 型 ~Z-1000 型

Z-300 ~ Z-1000 外形尺寸图
1. 前级管方向以俯视图为准。
2. Z-400 以上泵多一组回油箱，
但外形尺寸仍可参考此图。



(续)

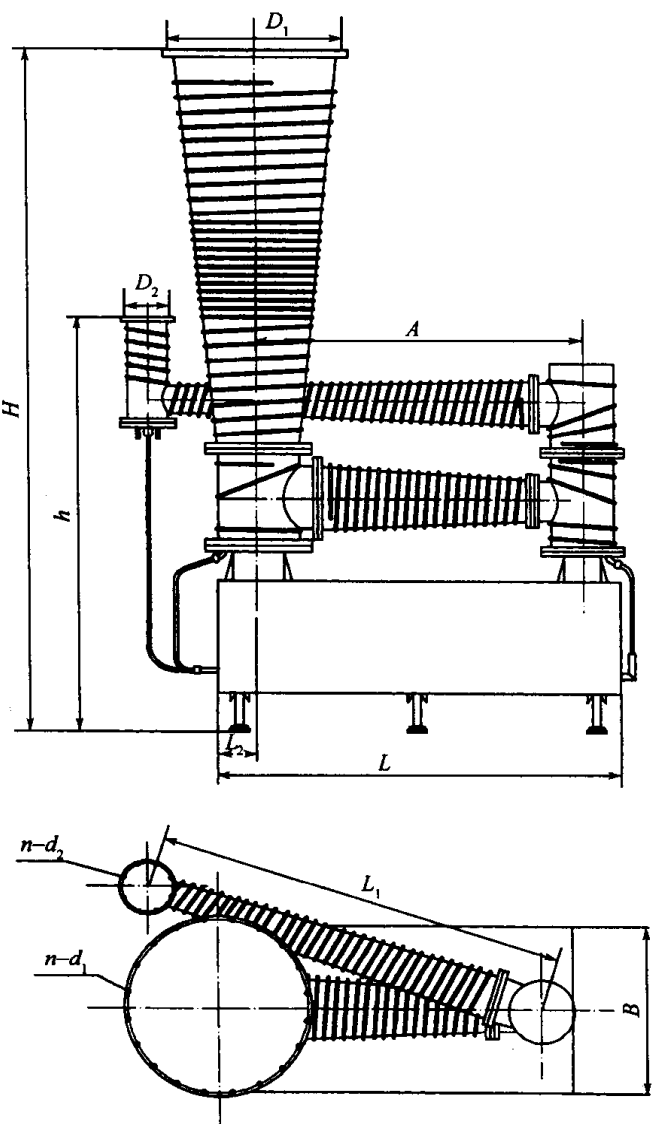
型 号	H	h	L_1	L_2	L_3	L_4	D_1	D_2	D_N	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$	d_1	d_2	d_N
Z-150	767	475	350	310	107	165	220	195	150	8- $\phi 12$	4- $\phi 7$	85	70	40
Z-300	1374	695	621	620	225	300	380	350	300	8- $\phi 14$	4- $\phi 9$	125	105	65
Z-400	1651	900	770	678	40	388	500	465	400	8- $\phi 18$	4- $\phi 12$	170	145	100
Z-500	2500	1200	1660	260	390	820	550	/	500	/	/	130	/	100
Z-600	2363	1290	1178	990	115	580	710	670	600	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$	220	195	150
Z-800	2985	1385	1482	1230	140	730	920	880	800	20- $\phi 21$	8- $\phi 12$	275	250	200
Z-1000	3680	1630	1785	1550	170	875	1140	1090	1000	24- $\phi 23$	8- $\phi 14$	380	350	300

注:兰州真空设备有限责任公司生产

②上海曙光机械制造厂生产的 Z 型油扩散喷射泵外形及安装尺寸见表 4-20。

表 4-20 Z 型油扩散喷射泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

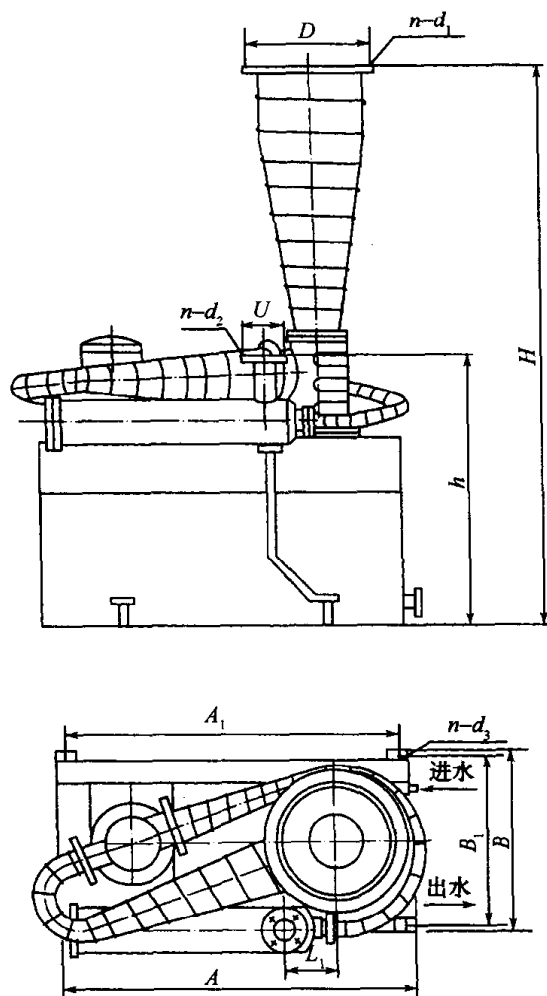
	型 号	Z-320	Z-400	Z-500	Z-630
	D_1	395	480	580	720
	D_2	110	145	175	200
	A	1220	800	1000	1300
	B	577	405	405	940
	L	1541	1040	1340	1614
	L_1	/	1120	1410	1650
	L_2	/	150	170	173
	H	1747	1720	1850	2780
	h	937	1090	1350	1680
	$n-d_1$	12- $\phi 14$	16- $\phi 14$	16- $\phi 14$	20- $\phi 14$
	$n-d_2$	4- $\phi 10$	8- $\phi 10$	8- $\phi 12$	8- $\phi 14$

三、油扩散喷射真空泵

③WZ 系列卧式扩散喷射泵和 ZL 系列油扩散喷射泵外形及安装尺寸分别见表 4-21、表 4-22。

表 4-21 WZ 系列卧式扩散喷射泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

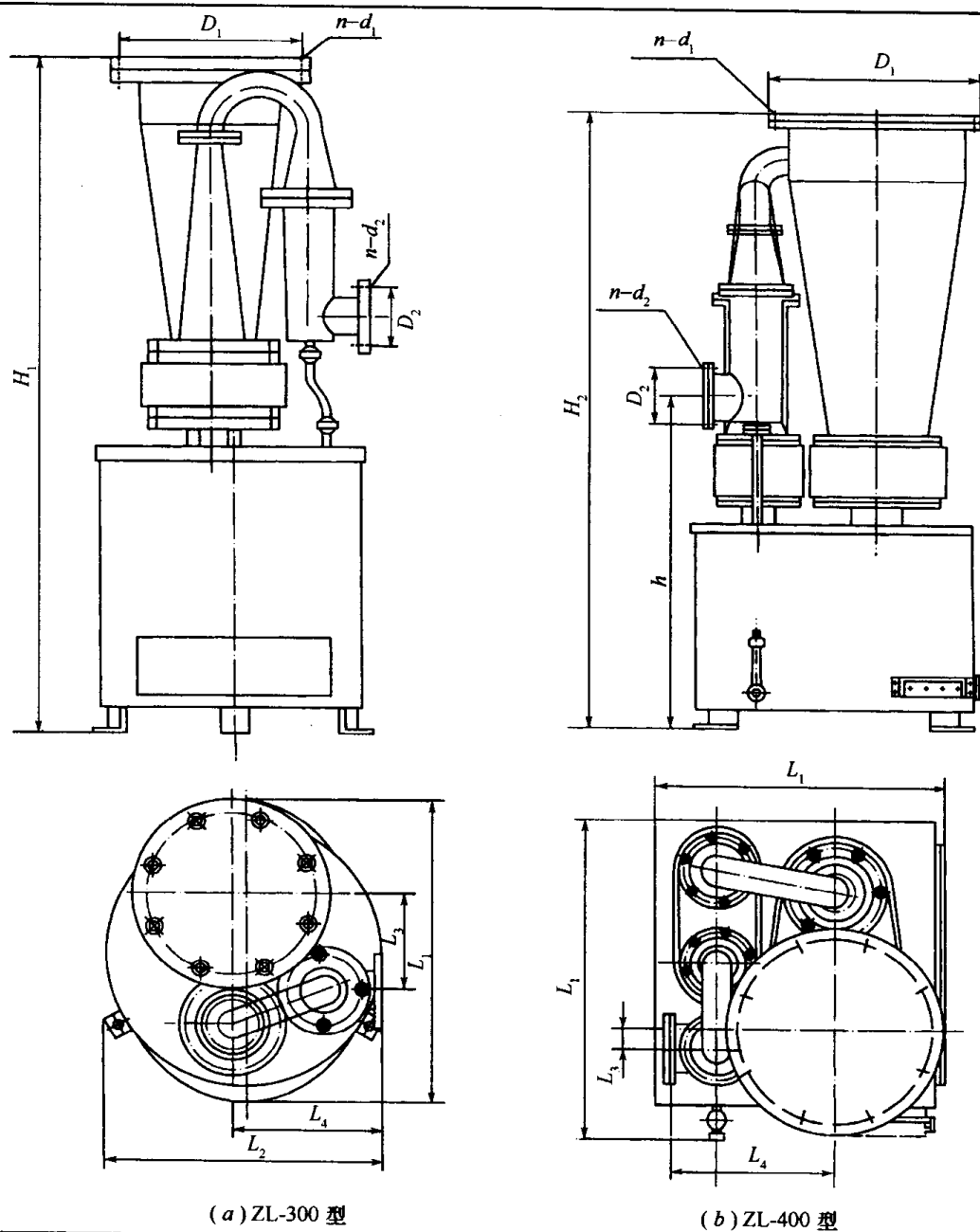


型 号	L_1	L_2	A	A_1	B	B_1	H	h	D	d	$n-d_1$	$n-d_2$	$n-d_3$
WZ-300	260	200	1200	1200	700	650	1600	900	350	125	8- $\phi 14$	4- $\phi 9$	4- $\phi 14$
WZ-400	360	250	1400	1400	700	650	1800	900	480	145	16- $\phi 12$	8- $\phi 8$	4- $\phi 16$
WZ-500	390	260	1660	1560	820	770	2500	1200	580	145	16- $\phi 12$	8- $\phi 8$	4- $\phi 18$
WZ-600	390	260	1660	1560	820	770	2600	1200	670	195	16- $\phi 21$	8- $\phi 12$	4- $\phi 18$
WZ-800	500	400	2000	1900	1000	940	2900	1300	890	260	24- $\phi 12$	12- $\phi 10$	4- $\phi 22$

注:甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产

表 4-22 ZL 系列扩散喷射泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



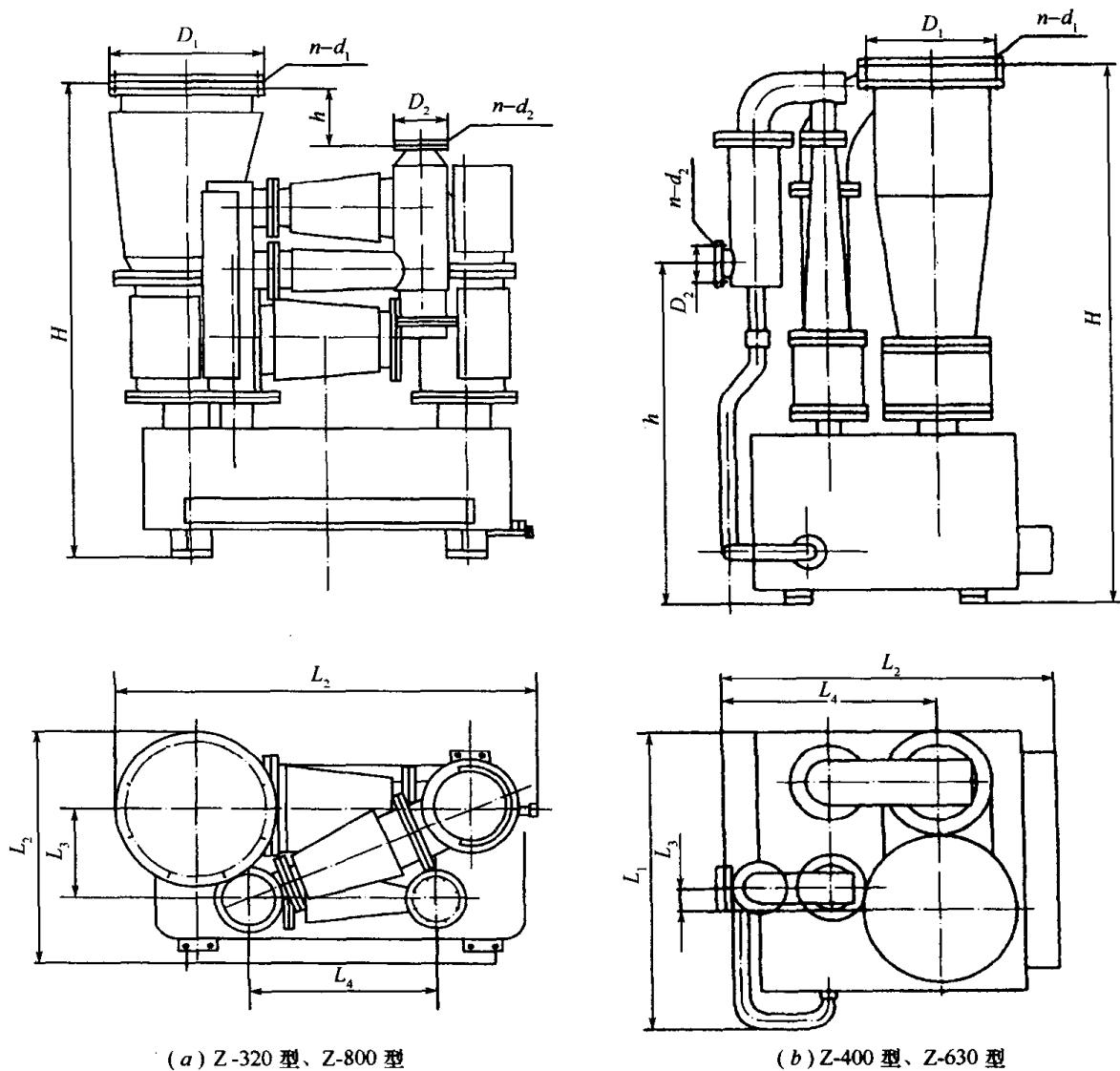
型 号	L_1	L_2	L_3	L_4	H_1	H_2	D_1	D_2	$n-d_1$	$n-d_2$
ZL-150	350	310	107	165	767	475	195	70	8- $\phi 12$	4- $\phi 7$
ZL-300	621	620	225	300	1374	695	350	125	8- $\phi 18$	4- $\phi 9$
ZL-400	770	678	40	388	1651	900	465	145	8- $\phi 18$	8- $\phi 12$
ZL-600	1118	990	115	580	2363	1290	670	195	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
ZL-800	1482	1230	140	730	2985	1385	880	250	20- $\phi 21$	8- $\phi 12$
ZL-1000	1785	1550	170	875	3480	1430	1090	300	23- $\phi 24$	8- $\phi 14$

注:甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产

④沈阳恒星实业有限公司生产的 Z 型扩散喷射泵外形及安装尺寸见表 4-23。

表 4-23 Z 型扩散喷射泵外形及安装尺寸

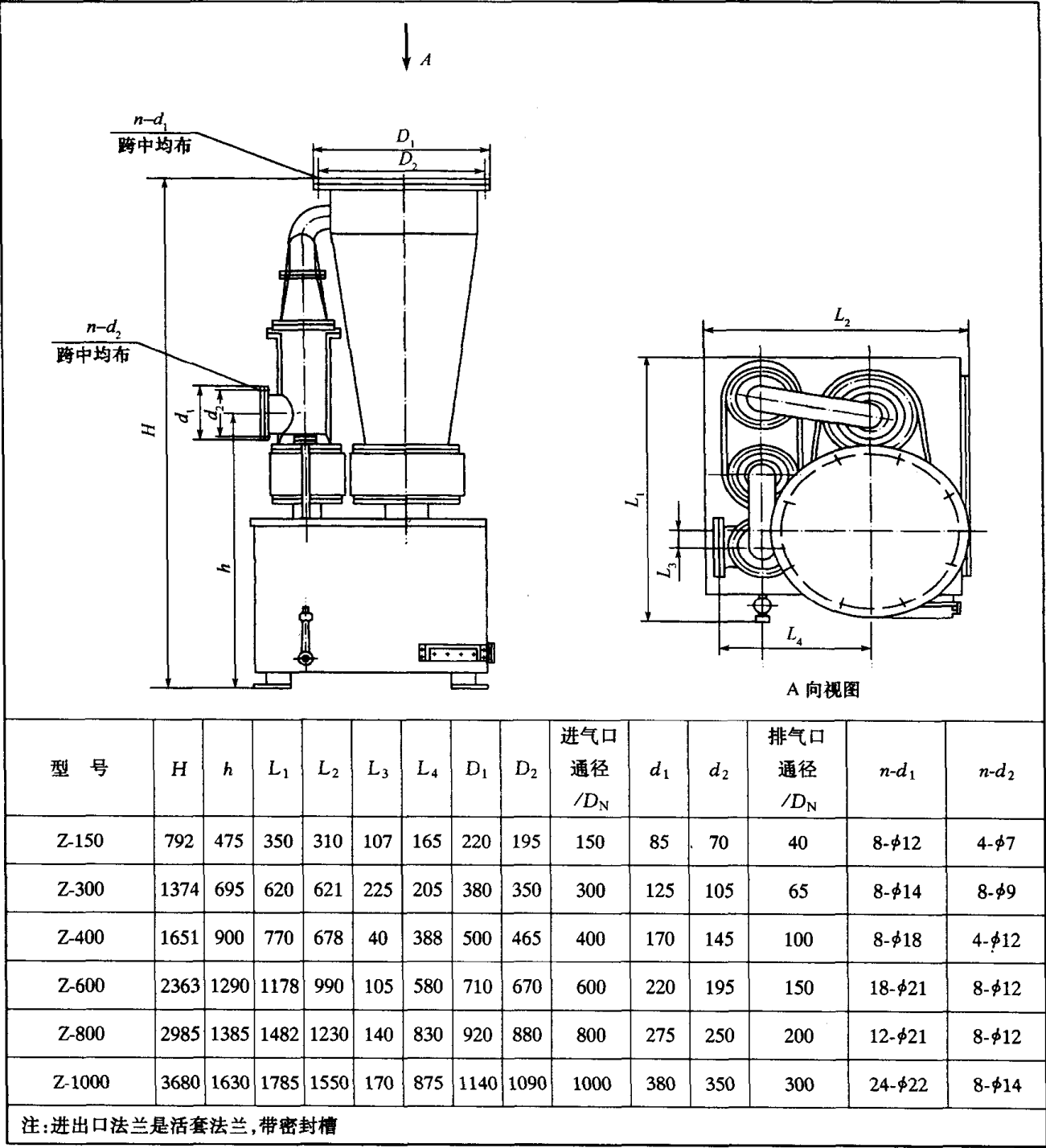
(单位:mm)



型 号	H	h	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	D ₁	D ₂	n-d ₁	n-d ₂
Z-320	1610	1000	950	1000	70	620	395	125	12-φ16	4-φ9
Z-400	1678	304	810	1350	297.2	750.7	465	145	8-φ18	8-φ9
Z-630	2425	665	1084	1822	450	1046.3	720	160	20-φ14	8-φ11
Z-800	3000	1405	/	/	/	/	890	260	24-φ14	12-φ11

⑤沈阳真龙真空设备有限公司生产的 Z 系列扩散喷射泵外形及安装尺寸见表 4-24。

表 4-24 Z 系列扩散喷射泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



四、油扩散真空泵

(一) 概述

油扩散真空泵(简称油扩散泵)是用来获得高真空或超高真空的主要设备。它广泛用于电子工业、化学工业、真空冶金、真空热处理、真空镀膜设备、原子能工业以及空间模拟设备等高科技领域中。

油扩散泵的工作压力范围为 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-5}\text{Pa}$, 极限压力一般为 $7\times 10^{-6}\text{Pa}$ 。若通过高温烘烤除气后更可获得 10^{-8}Pa 的真空度。泵的抽速大, 抽速范围宽(几升每秒至十几万升每秒)。其特点是结构简单, 没有机械运动部件, 使用寿命长, 可靠性高, 操作与维护方便等。

我国制订有油扩散泵行业标准。标准规范了泵的技术性能、型式、参数、测试方法等。国内很多真空生产厂家都有定型的系列(K、KT)产品。新的 KTD 系列高真空低返油扩散泵具有抽速大($300\text{L/s}\sim 55000\text{L/s}$), 返油率低[$\leq 6\times 10^{-4}\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$]的优点, 该泵将水冷挡油帽和泵体组成一个整体, 简化了结构, 并提高了真空抽气系统的有效抽速。ZK 系列高真空油增扩泵按抽气机理仍属油扩散泵, 它的特点是在 $1.3\times 10^{-1}\text{Pa}$ 时仍有较大的抽速, 并采用内加热方法, 缩短了泵的启动时间。

(二) 结构原理

高真空油扩散泵的主要部件有泵体、冷却帽、喷嘴、蒸气流导管和加热器等, 如图 4-30 所示。

扩散泵油锅中的泵油在真空中加热到沸腾温度(约 200°C), 产生大量的油蒸气, 油蒸气经导管由各级喷嘴定向高速喷出。由于扩散泵进气口附近被抽气体的分压力高于蒸气流中该气体的分压力, 所以被抽气体分子就不断地扩散到蒸气流中。油蒸气撞击被抽气体分子, 使被抽气体分子沿蒸气流束的方向高速运动。气体分子碰到泵壁又反射回来, 再受到蒸气流束的碰撞而重新沿蒸气流方向流向泵壁。经过几次碰撞后, 气体分子被压缩到低真空端, 再由下几级喷嘴喷出的蒸气流进行多级压缩, 最后由前级真空泵抽走。而油蒸气在冷却的泵壁上被冷凝后又返回到油锅中重新被加热, 如此循环工作。

(三) 影响油扩散泵性能的因素

1. 扩散泵油蒸气的返流

扩散泵油蒸气的返流可归结为五种原因(如图 4-31 所示):

- ① 泵壁表面油膜和油滴的蒸发(如图 4-31①所示);
- ② 喷嘴喷出的高速油蒸气流碰到泵壁后的反射(如图 4-31②所示);
- ③ 一级喷口表面的油膜及油滴的蒸发(如图 4-31③所示);

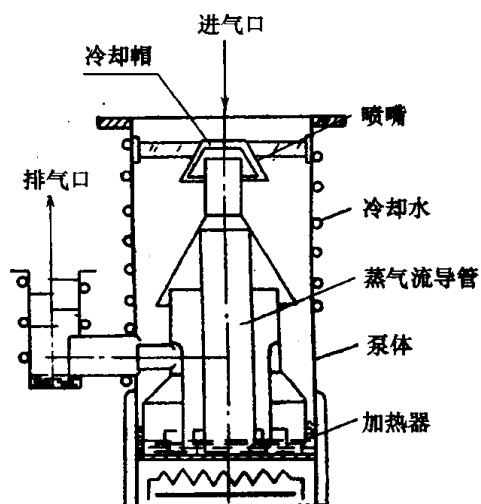


图 4-30 油扩散泵结构示意图

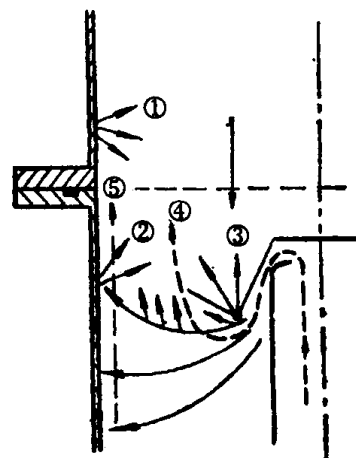


图 4-31 返流示意图

④喷口边缘高速油蒸气流的散射(如图 4-31④所示);

⑤室温下油沿泵壁的表面迁移(爬移)(如图 4-31⑤所示)。

2. 气体分子的反扩散

在扩散泵中,低真空端的气体分子总有一些会进入到高真空端,特别是某些质量较轻的气体,如氢、氦、氖等反扩散较大,其中氢的反扩散最大,可达 10^{-3}mg/h ,氮的反扩散较小,约为 10^{-7}mg/h 。

3. 扩散泵油的裂化分解

扩散泵油分为两种:矿物油,此种油热稳定性及抗氧化能力都较差,在室温下的饱和蒸气压为 $10^{-5}\text{Pa}\sim 10^{-7}\text{Pa}$ 。另一种是硅油,热稳定性及抗氧化性都较好,室温下的饱和蒸气压为 $10^{-6}\text{Pa}\sim 10^{-8}\text{Pa}$ 。

在金属油扩散泵的锅炉中,由于高温、金属催化作用以及油爆发式沸腾,使高分子的油裂化成低分子的碳氢化合物及轻的气体(H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 等)。这些裂化后的氢和碳氢化合物的蒸气压很高,限制了扩散泵的极限真空。

此外,机械泵油返流到扩散泵中,也产生分裂物,使扩散泵的真空度受到影响。

4. 真空泵的清洁度

清洗不干净的真空泵,污染物质会留在泵内并重复循环,影响泵的极限真空。

(四) 提高油扩散泵极限真空的方法

1. 扩散泵结构设计上的改进

改进扩散泵的结构,如加分馏装置;合理分配锅炉加热功率,增大锅炉中心区;改进喷嘴角度设计;在一级导流管中加装加热器进行气相加热,以增加蒸气流速度减少蒸气流的散射。上述措施也以减少油的裂化、返流,提高扩散泵的极限真空。

2. 减少油蒸气的返流

(1) 加挡油帽

在第一级喷嘴上面,加水冷挡油帽,通常可使返油量降低半个到二个数量级。

(2) 障板

使用水冷或低温介质冷却的各种挡板,可使返油量大大降低。

(3) 冷阱

使用液氮冷阱捕集返流蒸气。液氮冷阱不能全部把油蒸气挡住,仍有少量的油蒸气分子通过冷阱进入被抽容器中,其途径如图 4-32 所示:①两个油分子之间的碰撞;②油分子和气体分子的多次碰撞;③没被捕获的油分子反弹到高真空的区域中;④室温下油从泵壁表面迁移。扩散泵系统采用液氮冷阱后可获得 $10^{-8}\text{Pa}\sim 10^{-9}\text{Pa}$ 的极限真空。

(4) 吸附阱

扩散泵进气口安装 13X 型分子筛或氧化铝吸附阱吸附返流的油蒸气后,可以获得 $10^{-8}\text{Pa}\sim 10^{-9}\text{Pa}$ 的真空度。这种阱有如下缺点:①吸附剂易粉末化;②吸附剂要再活化;③需经常更换吸附剂,操作不便。

(5) 钛升华阱

扩散泵和真空室之间装上用液氮冷却的钛升华阱,既可以消除有机物蒸气对系统的污染,又能降低 CO 、 CO_2 和 H_2 的分压。表 4-25 表示了典型油扩散泵系统加上冷冻钛升华阱后,性能进一步提高的情况。

(6) 阀门

扩散泵油的返流,在泵启动和停止后的一段时间内有两个最大峰值(图 4-33),泵运转时可利用阀门的关闭避开这两个最大返油区。

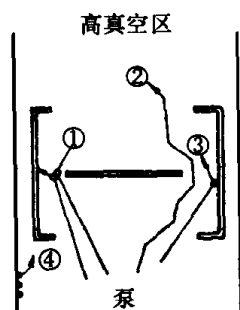


图 4-32 通过液氮冷阱返油的途径

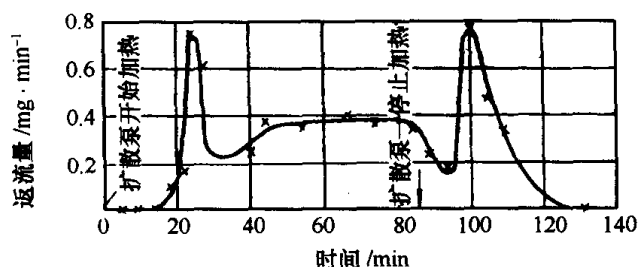


图 4-33 泵的返流与抽气时间关系曲线

3. 减少气体的反扩散

反扩散过去的气体的分压 p_f 和扩散泵前级排气口处该气体的分压 p_j 成正比,即 $p_f = \gamma p_j$ 。降低前级压力 p_j 和压缩比 γ 可以降低 p_f 。

扩散泵的前级再串接一台扩散泵可以降低前级气体分压 p_j 。采用多级泵(目前多采用四级泵代替原来的三级泵),则可以降低压缩比 γ ,使反扩散减少。

(五) 用油扩散泵获得超高真空的方法

油扩散泵是高真空系统经常使用的泵种,采取某些技术措施,可以获得超高真空,其方法有:

1. 选用性能好的扩散泵油

泵油对油扩散泵极限压力的影响很大。如使用 3 号扩散泵油,其极限压力只能达到 10^{-5} Pa;而改用 275 硅油,其极限压力能达到 10^{-7} Pa,极限压力提高 2 个数量级。其次被抽气体的分压力也随泵油的不同而变化,这就是泵油成分带来的影响。为此用油扩散泵获得超高真空,必须选择性能好的扩散泵油。对扩散泵油的要求是:泵油的相对分子量要大,常温下的蒸气压要低,热稳定性和抗氧化性要好,凝固点和低温粘度要低,要无毒,耐腐蚀,成本要低。扩散泵油的性能参数见表 14-39。

现在高真空油扩散泵普遍采用 3 号扩散泵油,超高真空采用硅油,要求不含碳氢化合物的超高真空系统,扩散泵采用氟油。

2. 采用合理的烘烤技术

用油扩散泵获得超高真空系统都要进行高温烘烤,目的是减少材料的出气速率。材料在大气下都能吸收和吸附一些气体,当处于真空中时,便产生解吸,使气体缓慢地释放出来,为了加速解吸,采用烘烤。

材料不同,选择的烘烤温度也不同。原则是温度高一些好,可以加速出气,但还要考虑到材料是否能经受得住高温。烘烤温度要选择合适的。通常金属材料,如不锈钢,烘烤温度为 $250^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$;非金属材料烘烤温度为 $80^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。烘烤时间 4h~8h 以上。极高真空的烘烤时间在 24h 以上。典型金属油扩散泵系统(烘烤后)的性能和金属油扩散泵超高真空系统中剩余气体组分,见表 4-25、表 4-26。

表 4-25 典型金属油扩散泵系统(烘烤后)的性能

系 统	全压力 /Pa	油分压 /Pa	对氮的抽速 /L·s ⁻¹	对氢的抽速 /L·s ⁻¹	对氦的抽速 /L·s ⁻¹
6 英寸扩散泵	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶	1500	3000	1200
加液氮阱	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	<10 ⁻¹³	600	1800	500
加 12 英寸钛升华阱	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹⁰	0	5000	15000	300
注:1 英寸=25.4mm					

表 4-26 金属油扩散泵超高真空系统中剩余气体组分

气 体	分压力(等效为 N ₂ 的压力)/Pa	气 体	分压力(等效为 N ₂ 的压力)/Pa
H ₂	3.06×10 ⁻⁸	CO	4.4×10 ⁻⁸
CH ₄	6.6×10 ⁻⁹	CO ₂	1.6×10 ⁻⁸
H ₂ O	3.2×10 ⁻⁸		

3. 增加冷阱装置,防止泵油返流和迁移

泵油通过泵的入口流到被抽容器的现象叫做返流。油分子沿着器壁移动进入被抽容器的现象,叫做反迁移。无论返流,还是反迁移,都影响真空系统的极限压力。冷阱广泛用于超高真空系统,它装在泵入口和真空室之间,不仅能有效地捕集扩散泵的返流蒸气及部分分裂解物,而且可抽除来自真空室的蒸气。装有各类阱的超高真空系统。经过彻底的高温烘烤去气后,可获得 10⁻⁸Pa~10⁻¹⁰Pa(或更高)的超高真空度。常用的冷阱是液氮冷阱,因为在液氮温度下,泵油的蒸气压力大大低于超高真空度的要求。设计液氮冷阱必须保证通过阱的分子都会碰到冷面上,同时结构要合理。装上液氮冷阱后,油扩散泵的抽速降低不高于 40%。常见的金属冷阱结构见第七章。

4. 减少被抽气体反扩散

被抽气体反扩散是限制扩散泵获得超高真空因素之一。气体反扩散和分子质量有关,质量愈小,愈易反扩散。扩散泵抽氢易反扩散,防止氢反扩散方法有两种:其一,降低扩散泵出口排气压力,采用两个扩散泵串联来实现;其二,是在扩散泵进气口管路上安装液氮冷却的钛升华阱来捕集反扩散的氢。

(六) 金属油扩散泵的设计

金属油扩散泵是当前获得高真空、超高真空的主要抽气设备,但如何设计扩散泵,理论上还不太成熟。现综合国内有关扩散泵设计方面的经验,给出立式、直腔式油扩散泵设计的基本参数,供设计时参考。

1. 扩散泵的总压缩比 σ 和各级压缩比 σ_n

$$\sigma = \frac{p_e}{p_0} \quad (4-40)$$

式中 p_e ——泵的临界前级压力,取 40Pa;

p_0 ——泵的最大入口压力,取 6.7×10^{-2} Pa。

扩散泵各级压缩比要满足下列关系式:

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \cdots \quad (4-40a)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots$ ——第一、二、三…级压缩比。根据实践经验,扩散泵各级压缩比推荐采用表 4-27 数值。

表 4-27 扩散泵各级压缩比推荐数据

级 数	压缩比	兰州真空设备 有限责任公司 ^①	北京北仪创新真空技术 有限责任公司 ^②
第一级	σ_1	1.5 ~ 2	1.2 ~ 2.5
第二级	σ_2	4 左右	3 ~ 7
第三级	σ_3	7 左右	6 ~ 10

注:① 原名为兰州曙光机械厂;② 原名为北京仪器厂

扩散泵各级喷嘴处最小环形面积(抽气面积)之比等于各级压缩比,即

$$\sigma_1 = A_1/A_2; \sigma_2 = A_2/A_3; \sigma_3 = A_3/A_4 \quad (4-40b)$$

式中 A ——环形面积,角码为各级序数。第 1 级压缩比 σ_1 应选小些,这样便于气体扩散,提高抽速和极限压力,减少返油。

2. 各级喷嘴的尺寸和角度

(1) 各级喷嘴的角度

兰州真空设备有限责任公司采用的方法是:由 R·亚开尔推导出的扩散泵二次近似之比抽气速率计算公式进行计算。在 $0 \leq z \leq l$ 时,有

$$S = \frac{1}{4} \bar{C} \frac{1 - \frac{n_g^S(L)}{\nu} e^{-\frac{W'}{D'}(L-l)} e^{\frac{W''}{D''}L}}{1 + \frac{\bar{C}}{4} \left\{ -\frac{1}{W''} + e^{\frac{W''}{D''}l} \left[\frac{1}{W'} - \frac{1}{W'} e^{-\frac{W'}{D'}(L-l)} + \frac{1}{W''} \right] \right\}} \quad (4-41)$$

式中 S ——比抽速, $[\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2]$;

\bar{C} ——空气分子热运动平均速度, 20°C 时 $\bar{C} = 4.62 \times 10^4 [\text{cm/s}]$;

n_g^S ——抽速为 S , 在 $Z = L$ 处的分子密度, $[\text{cm}^{-3}]$;

ν ——被抽容器中单位体积中的分子数, $[\text{cm}^{-3}]$;

W' ——向下运动的蒸气速度, $[\text{cm/s}]$;

D' ——蒸气边层内气体向下的扩散系数;

W'' ——向上运动的蒸气速度, $W'' = 1.25 \times 10^4 [\text{cm/s}]$;

D'' ——蒸气边层内气体向上的扩散系数, $D'' = 7.25 \times 10^4$;

L ——从进气口到排气截面之间的距离, $[\text{cm}]$;

l ——从进气口到喷嘴出口截面之间的距离, $[\text{cm}]$ 。

从工程设计角度来看,泵的抽速是喷嘴角度 α 的最小环面积宽度 t 的函数。将式(4-41)简化后可得

$$f(\alpha) = \alpha \left(D - m \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{E^2}{F} \right) + \frac{B}{\sin \alpha} \left[\frac{D}{W} \left(F - \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \cdot E \right) + n \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \cdot E^2 \left(\frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{E}{F} - 2 \right) \right] = 0 \quad (4-42)$$

$$t = \frac{m}{2} \cdot \frac{\cos \alpha E^2}{\sin^2 \alpha F} \quad (4-42a)$$

上述二式中

D ——泵口直径[cm];

$$E = \cos\alpha + \frac{\bar{C}_d}{W};$$

$$F = 1 + \frac{W}{W''}\sin\alpha;$$

$$B = \exp \frac{\cos\alpha \cdot E^2}{\sin^2\alpha \cdot F};$$

$$m = \frac{4D''W}{W''^2};$$

$$n = \frac{2D''}{W''^2};$$

$$\alpha = \left(\frac{4}{C} - \frac{1}{W''} \right);$$

W ——蒸气流速度, $W = (3 \sim 4) \times 10^4$ [cm/s];

\bar{C} ——空气分子热运动平均速度, 20℃ 时 $\bar{C} = 4.62 \times 10^4$ [cm/s];

\bar{C}_d ——蒸气分子热运动平均速度, 对相对分子量 $M = 460$, $T = 414\text{K}$ 的油来说, $\bar{C}_d = 1.38 \times 10^4$ [cm/s];

W'' ——向上运动的蒸气速度, $W'' = 1.25 \times 10^4$ [cm/s];

D'' ——蒸气边层内的扩散系数, $D'' = 7.25 \times 10^4$ 。

由式(4-41)和式(4-42)可以计算出第一级喷嘴角度 α_1 和环缝宽度 t_1 , 并由 $d_1 = D - 2t_1$ 可以计算出第一级喷嘴直径 d_1 。

北京北仪创新真空技术有限责任公司根据国内外先进泵, 各级喷嘴角度推荐采用表 4-28 的值。

表 4-28 各级喷嘴 α 的推荐值

级 数	角 度	兰州真空设备 有限责任公司	北京北仪创新真空技 术有限责任公司
第一级	α_1	60° ~ 65°	50° ~ 60°
第二级	α_2	55° 左右	60° ~ 65°
第三级	α_3	65° 左右	70° ~ 75°

(2) 各级喷嘴直径 d_n 的计算

第一级喷嘴直径 d_1 , 北京北仪创新真空技术有限责任公司搜集整理出的经验公式为

$$d_1 = 1 + 0.22D \quad (4-43)$$

兰州真空设备有限责任公司从式(4-40b) 和表 4-41 导出

$$d_1 = \left(\frac{1}{3.5} \sim \frac{1}{4} \right) D \quad (4-44)$$

第二、三级喷嘴直径 d_2 、 d_3 和第四级喷嘴面积 A_4 可根据压缩比 σ_1 、 σ_2 和第一级喷嘴直径 d_1 逐级计算出来

$$d_2 = \left(D^2 - \frac{D^2 - d_1^2}{\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-45)$$

$$d_3 = \left(D^2 - \frac{D^2 - d_2^2}{\sigma_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-46)$$

$$A_4 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_3^2) \frac{1}{\sigma_3} \quad (4-47)$$

图 4-34 为扩散喷嘴结构简图。

(3) 各级喷嘴扩张率的选定

喷嘴出口面积 F_1 与喷嘴喉部面积 F_0 之比称为扩张率 B , 计算公式为

$$B = \frac{F_1}{F_0} = \frac{1}{\left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{K+1}{K-1} \left[\left(\frac{p_d}{p_0}\right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_d}{p_0}\right)^{\frac{K+1}{K}} \right]}} \quad (4-48)$$

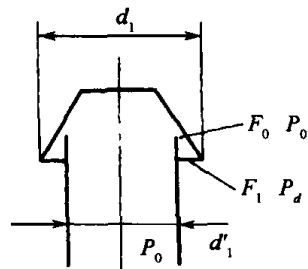


图 4-34 扩散喷嘴结构简图

喷嘴出口的蒸气速度 W_1 与临界速度 W_0 (喉部断面处速度) 之比为

$$\frac{W_1}{W_0} = \sqrt{\frac{K+1}{K-1} \left(1 - \frac{p_d}{p_0}\right)^{\frac{K-1}{K}}} \quad (4-49)$$

扩散泵喷嘴喉部断面处蒸气流速度为声速, 即

$$W_0 = \sqrt{\frac{K}{K+1} 2gRT_0} \quad (4-50)$$

式中 W_0 ——喷嘴喉部断面处的蒸气流速度;

W_1 ——第一级出口处的蒸气速度;

K ——扩散泵油的绝热指数(对 KS—3 油, 取 1.1);

p_d ——喷嘴出口处蒸气压力, 一般 $p_d \gg$ 该级被抽气体压力 p_g , $p_g = p \cdot \sigma_n$;

p_0 ——未进入喷嘴前的蒸气滞止压力(可视为锅炉中油蒸气的压力。国产 KS—3 扩散泵油, 工作温度 495K 时饱和蒸气压约为 160Pa)。

表 4-29 沈阳真空技术研究所推荐的喷嘴扩张率 B 和 p_d/p_g 值

喷嘴级数	B	p_d/p_g	喷嘴级数	B	p_d/p_g
第一级喷嘴	10 ~ 20	10 ~ 15	第三级喷嘴	3 ~ 5	2 ~ 3
第二级喷嘴	6 ~ 10	4 ~ 8	第四级喷嘴	1.5 ~ 2.0	> 2

表 4-30 北京北仪创新真空技术有限责任公司采用的 p_d 值

级数	第一级	第二级	第三级	第四级
p_d	$(10 \sim 15)p_g$	$(4 \sim 8)p_g$	$(2 \sim 3)p_g$	$> 2p_g$

(4) 各级喷嘴的喉部面积

① 根据北京北仪创新真空技术有限责任公司的实践经验, 1cm^2 的喉部面积可抽除 $133\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的气体流量。因此, 第一级喷嘴咽喉面积可根据扩散泵最大气体流量 Q 来计算。公式为

$$F_{01} = \frac{Q}{Q_g} \quad (4-51)$$

式中 F_{01} ——第一级喷嘴喉部面积 [cm^2];

Q_g ——扩散泵最大抽气量 [$\text{Pa} \cdot \text{L/s}$];

Q_g ——第一级单位面积抽出的气体流量 $[\text{Pa} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2]$;
第二级喷嘴的咽喉面积 F_{02} (忽略角度所引起的速度变化量) 为

$$F_{01} = F_{02} \frac{\lg \sigma_2}{\lg \sigma_1} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{W_1 - W_2}{W_1}\right)^2} \quad (4-52)$$

式中 σ_1, σ_2 分别为第一、二级压缩比; $\frac{1}{\left(1 - \frac{W_1 - W_2}{W_1}\right)^2}$ 为修正项, 第一、二级喷嘴出口处蒸气流速度 W_1, W_2 用式(4-49) 计算, 其余第三、四级喷嘴的喉部面积的计算按式(4-55) 类推。

② 兰州真空设备有限责任公司利用蒸气消耗量公式来确定各级喷嘴喉部面积。

单位时间内该级喷嘴需要消耗的总蒸气量 Q_d 为

$$Q_d \geq C \frac{M}{m} (1 + \beta) Q_g \quad (4-53)$$

式中 M ——扩散泵油的分子量, KS-3 扩散泵油 $M = 460$;

m ——被抽气体的分子量;

Q_g ——泵的最大排气量;

C ——计算常数, 一般 $C \geq 2.5$;

β ——用于压缩气体的蒸气量 Q_{d2} 和用于带走气体但不压缩气体的蒸气量 Q_{d1} 的比值, 即 $\beta = Q_{d2}/Q_{d1}$ (见表 4-31)。

表 4-31 不同压缩比 σ 下的 β 值

σ	1	1.5 ~ 2	4	7 ~ 8	10
β	0	0.25 ~ 0.5	~ 3	~ 8	~ 11

当喷嘴喉部中蒸气流速度达到声速时, 单位喉部断面积上蒸气消耗量 G 为常数

$$G = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1} g P_0 \gamma_0} \quad (4-54)$$

当 $p_0 = 133\text{Pa}$ 时, 对 KS-3 扩散泵油, $G = 8 \times 10^{-2} [\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。因此各级喷嘴咽喉面积 F_{0n} 为

$$F_{0n} \geq \frac{Q_d}{G} = \frac{\frac{CM}{m} (1 + \beta) Q_g}{\left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1} g P_0 \gamma_0}} \quad (4-55)$$

式中 p_0 ——锅炉蒸气压力;

γ_0 ——锅炉中的蒸气密度。

喷嘴喉部面积 F_0 确定后, 根据喷嘴扩张率 B 和喷嘴直径可计算出该级的导流管直径 d'_n

$$d'_n = \left(d_n^2 - \frac{4F_n B_n}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-56)$$

式中 d_n ——第 n 级喷嘴直径;

F_n ——第 n 级蒸气出口面积;

B_n ——第 n 级喷嘴扩张率。

3. 各级喷嘴间距和泵的总高度

泵的各级喷嘴间距, 如图 4-35 所示。计算公式为

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= K_1 \frac{D - d_1}{2} \tan \alpha_1 \\ h_2 &= K_2 \frac{D - d_2}{2} \tan \alpha_2 \\ h_3 &= \left(\frac{D - d_3}{2} \right) \tan \alpha_3 + \frac{d_5}{2} + (10 \sim 15) \end{aligned} \right\} \quad (4-57)$$

h_4 根据回油高度确定。

式中 d_1, d_2, d_3 ——分别为第一、二、三级喷嘴直径;
 K_1, K_2 ——分别为第一、二级喷嘴修正系数, $K_1 = 1.7, K_2 = 1.15$;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ——分别为第一、二、三级喷嘴角度;
 d_5 ——最后一级扩压管进口直径。

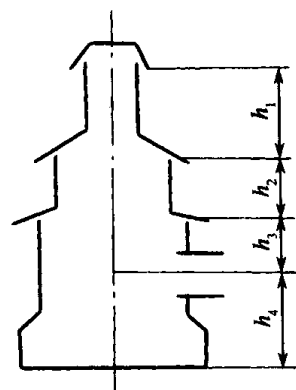


图 4-35 泵的各级喷嘴间距

用作图法可以确定各级喷嘴距离。各级喷嘴距离以各级蒸汽射流互不干涉为原则。喷嘴的延长线交于泵体上的交点要比下一级喷嘴出口平面高 10mm 以上,并推荐选用

$$h_1 \approx 0.85D; h_2 \approx 0.4D; h_3 \approx 0.25D$$

泵体总高度 $h \approx (2 \sim 2.5)D$

回油高度(包括泵油高度)要大于 30mm。

4. 各级锅炉面积

根据式(4-53)首先计算出各级喷嘴的蒸气量 $Q_d \geq C \frac{M}{m} (1 + \beta) Q_g$, 再按式(4-59)计算出对应的蒸发面积(锅炉面积) A 。

由于

$$Q_d = 4.37 \times 10^{-4} \cdot \alpha \cdot A \cdot P_0 \sqrt{\frac{M}{T}} \quad [\text{g/s}] \quad (4-58)$$

所以

$$A = 2.288 \times 10^3 \frac{Q_d}{\alpha p_0} \sqrt{\frac{T_0}{M}} \quad [\text{cm}^2] \quad (4-59)$$

式中 α ——蒸气冷凝系数, $\alpha = 0.05 \sim 0.08$;

p_0 ——油锅中油的蒸气压力, $p_0 \approx 160\text{Pa}$;

T_0 ——油锅中油的温度, $T_0 \approx 49\text{K}$;

M ——扩散泵油的相对分子量, $M = 460$ 。

当 $\alpha = 0.08$ 时,式(4-59)可简化为

$$A = 1.83 \times 10^2 Q_d \quad (4-60)$$

锅炉面积的分配可参考表 4-32。

表 4-32 锅炉面积分配百分比

兰州真空设备有 限责任公司		北京北仪创新真空 技术有限责任公司		北京北仪创新真 空技术有限责任公司	
第一级	12% ~ 15%	第一级	9%	第一级	10%
第二级	25% ~ 30%	第二级	17%	第二级	18%
第三、四级	55% ~ 63%	第三、四级	69%	第三级	25%
				第四级	43%

5. 泵的加热功率

扩散泵的加热功率主要由油的加热温度和油的蒸发潜热来确定,同时也要考虑各种原因引起的锅炉的热损失。泵的加热功率为

$$N = \frac{G}{1005\eta} [L + C(t_2 - t_1)] \quad [\text{kW}] \quad (4-61)$$

式中 G ——单位时间内总的蒸气消耗量 $[\text{g/s}]$;

C ——油的比热,对于 KS-3 扩散泵油, $C = 2.26[\text{J/g} \cdot \text{K}]$;

t_1 ——回油温度,一般为 $50^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$;

t_2 ——油的工作温度, $t_2 = 222^\circ\text{C}$;

η ——热效率, $\eta = 0.7 \sim 0.8$;

L ——油的蒸发潜热,对于 KS-3 扩散泵油, $L \approx 209.34[\text{J/g}]$, L 可根据下式算出

$$L = 19.13 \frac{B}{M} \quad (4-62)$$

式中 M ——油相对分子量,KS-3 扩散泵油为 $460 \sim 480$;

B ——与油的种类有关的常数,对于 KS-3 扩散泵油, $B = 5500 \sim 5960$ 。

(七) 蒸气流真空泵行业标准(摘自 JB/T 7265—2003)^①

本标准适用于以油蒸气作为工作介质的扩散真空泵及扩散喷射真空泵。

1. 型式

- ①本标准所规定的蒸气流真空泵是用水冷却泵壁的金属制多级泵。
- ②蒸气流真空泵的进气口和排气口法兰结构型式应符合 GB 6070 的规定。
- ③在扩散真空泵的俯视图进气口与排气口中心连线上,不应有法兰螺栓孔。
- ④蒸气流真空泵的型号应符合 JB/T 7673 规定。

2. 规格与基本参数

- ①扩散真空泵按进气口径分为 16 种规格,其基本参数应符合表 4-33 的规定。
- ②扩散喷射真空泵按进气口径分为 12 种规格,其基本参数应符合表 4-34 的规定。

表 4-33 扩散泵性能参数

参 数 项 目		进 气 口 公 称 通 径								
		/mm								
		80	100	(150)	160	200	250	(300)	320	400
抽气速率 ^① /L·s ⁻¹	直筒式	≥170	≥280	≥750	≥850	≥1 400	≥2 200	≥3 000	≥3 400	≥6 000
	凸腔式	≥210	≥320	≥900	≥1 000	≥1 800	≥2 600	≥3 800	≥4 200	≥7 500
极限压力 /Pa		≤5×10 ⁻⁵								
临界前级压力 /Pa		≥30				≥40				
泵液返流率 mg/(cm ² ·min)		≤3×10 ⁻²								

① 本标准 JB/T 7265—2003 正式号待批。

四、油扩散真空泵

(续)

参 数 项 目		进气口公称通径 /mm								
		80	100	(150)	160	200	250	(300)	320	400
加热时间 /min		≤30		≤35			≤40			≤45
推荐加热功率 /kW		0.4~1.0	0.5~1.0	0.9~1.5	1.0~2.0	1.5~2.5	2.0~3.0	2.0~3.0	3.0~4.0	3.5~5.0
加热器电源电压 /V		220 或 380								
推荐泵油用量 /L		0.08~0.10	0.1~0.18	0.3~0.6	0.4~0.6	0.5~0.8	1.0~1.5	1.2~1.6	1.4~2.0	3.0~4.0
推荐冷却水流量 ^② /L·h ⁻¹		≤100		≤150	≤200	≤250	≤280		≤400	≤600
推荐前级泵抽气速率 /L·s ⁻¹		4		8		15		30		60
参 数 项 目		进气口公称通径 /mm								
		500	(600)	630	800	(900)	1000	(1 200)		
抽气速率 ^① /L· s ⁻¹	直筒式	≥9 000	≥13 000	≥15 000	≥22 000	≥30 000	≥35 000	≥50 000		
	凸腔式	≥11 000	≥16 500	≥18 000	≥25 000	≥36 000	≥40 000	≥60 000		
极限压力 /Pa		≤5×10 ⁻⁵								
临界前级压力 /Pa		≥40								
泵液返流率/ mg·cm ⁻² ·min ⁻¹		≤5×10 ⁻²								
加热时间 /min		≤45	≤50	≤55	≤60		≤65			
推荐加热功率 /kW		5.0~12	6.0~12	8.0~15	10~20	14~25	20~25	20~30		
加热器电源电压 /V		220 或 380								
推荐泵油用量 /L		5.0~6.0	6.0~9.0		8.0~10	10~13	14~16	16~20		
推荐冷却水流量 ^② /L·h ⁻¹		≤700	≤850		≤1 200	≤1 350	≤1 600	≤2 000		
推荐前级泵抽气速率 /L·s ⁻¹		70	150		240	300				
注:表中带括号的规格不鼓励优先选用。										
①当进气口压力在 1.3×10 ⁻³ Pa~7×10 ⁻² Pa 范围时,对空气所测得的平均值。										
②冷却水温为 20℃±5℃										

表 4-34 扩散喷射泵性能参数

参 数 项 目	进 气 口 公 称 通 径											
	/mm											
	(150)	160	200	250	(300)	320	400	500	(600)	630	800	1 000
抽气速率 ^① /L·s ⁻¹	≥450	≥550	≥900	≥ 1 500	≥ 2 000	≥ 2 300	≥ 4 000	≥ 5 500	≥ 8 000	≥ 9 000	≥ 13 000	≥ 22 000
极限压力 /Pa	≤7×10 ⁻²											
临界前级压力 /Pa	≥140											
推荐加热功率 /kW	≤3.0		≤5.0	≤10			≤20	≤25	≤30		≤50	≤70
加热器电源电压 /V	220 或 380											
推荐泵油用量 /L	1.5~3.0		2.5~ 5.0	5.0~20			20~50		50~100		100~ 150	150~ 180
推荐冷却水流量 ^② /L·h ⁻¹	≤300		≤400	≤600	≤700		≤800	≤1 200	≤1 500		≤2 000	≤6 000
推荐前级泵抽气速率 /L·s ⁻¹	≥30			≥60	≥70		≥140	≥210	≥300		≥450	≥1 200

注：表中带括号的规格不鼓励优先选用。

①在进气口压力为 1.3Pa 时，对空气所测得的值；

②冷却水温为 20℃ ± 5℃

3. 技术要求

- ①产品应符合本标准要求，并按经规定程序批准的图样和技术文件制造。
- ②产品的主要性能参数和技术参数应符合表 4-33 和表 4-34 的规定。
- ③在下列条件下蒸气流真空泵应连续可靠地工作：
 - a. 工作环境温度 5℃~30℃；
 - b. 相对湿度不大于 80%；
 - c. 冷却水出水温度不超过 40℃。
- ④蒸气流真空泵用油应符合 SH 0529 及有关标准的规定。
- ⑤泵用的真空橡胶密封圈应符合 GB/T 6070—95 第 2.5 条的规定。
- ⑥加热器的带电部分与其外壳应绝缘可靠，其绝缘电阻应大于 5MΩ，并能耐 50Hz、1 000V 交流电压在 1min 内不被击穿。
- ⑦加热器的非加热面部分与锅炉四周应采取可靠的保温绝热措施。
- ⑧每台产品均应配齐下列易损备件：
 - a. 密封件一套；
 - b. 按用户需要，提供适量的电热元件，并在订货合同中注明。
- ⑨在用户遵守保管和使用规则的条件下，从制造厂发货之日起一年内，产品因制造质量不良而发生损坏或不能正常工作时，制造厂应免费为用户修理或更换。

4. 连接法兰

带括号规格泵的进、出气口法兰连接尺寸见表 4-35(摘自本标准附录 A)。

表 4-35 法兰连接尺寸

(单位:mm)

The diagram illustrates a cross-section of a flange assembly. Key dimensions are labeled as follows:

- D_1 : Overall outer diameter of the flange.
- D_2 : Diameter of the bolt circle.
- d_0 : Inner diameter of the flange face.
- δ : Thickness of the flange.
- h_2 : Height of the flange face.
- h_3 : Height of the sealing groove.
- D_N : Nominal diameter of the pipe.
- D_3 : Inner diameter of the pipe.
- D_4 : Outer diameter of the pipe.
- b : Width of the sealing groove.
- h_1 : Height of the pipe.
- $n-\phi c$: Number and diameter of bolt holes, labeled as '均布' (uniformly distributed).

法兰形式

公称 通径 D_N	管子		法 兰					密 封 槽				螺 栓 孔			
	外径 D_0	壁厚 δ	外径 D_1	厚度 h	焊接 高度 h_2	凸台 直径 D_4	凸台 高度 h_1	内径 D_3		槽宽 b	槽深 h_3	b, h_3 公差	螺孔中心 圆直径 D_2	孔数及 孔径 $n-\phi c$	
								尺寸	公差						
25	30	2.5	70	8	2			29	+0.2	4	2.4	+0.1	55	4- $\phi 7$	
32	38	3	78	8				36					64	4- $\phi 7$	
40	45	2.5	85	8				44					70	4- $\phi 7$	
50	57	3.5	110	10	3			55	+0.5	6	3.6		90	4- $\phi 9$	
65	73	4	125	10				70					105	4- $\phi 9$	
80	89	4.5	145	10				85					125	4- $\phi 9$	
100	108	4	170	12	4			105	+1.0	8	4.8		145	4- $\phi 12$	
125	133	4	195					131					170	4- $\phi 12$	
150	159	4.5	220					156					195	8- $\phi 12$	
200	208	4	275	14	5	233	1	208	+1.5	10	6		250	8- $\phi 12$	
250	258		330			282		258					300	8- $\phi 14$	
300	308		380			332		308					350	8- $\phi 14$	
350	360	5	435	16	6	336	1.5	358	+2.0	12	6		405	8- $\phi 14$	
600	612	6	710			645		610					670	12- $\phi 21$	
900	916	8	1040	28	8	960	1.5	915	+2.0	10	6		990	24- $\phi 23$	
1200	1220	10	1360	30	10	1270		1220					1310	28- $\phi 25$	

(八) 国产 K、KT 型系列高真空油扩散泵主要技术性能、特性曲线及外形连接尺寸

1. 主要技术性能

① K、KT 型系列高真空油扩散泵主要技术性能见表 4-36。

第四章 蒸气流真空泵

表 4-36 K、KT 型系列高真空油扩散泵主要技术性能

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限 压力 $/\text{Pa}$	最大反 压力 $/\text{Pa}$	加热 功率 $/\text{kW}$	泵油 用量 $/\text{L}$	冷却水 用量 $/\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	进气口 直径 $/\text{mm}$	推荐 前级泵 抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	外形尺寸 ^① (长×宽×高) $/\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$	质量 $/\text{kg}$	生产 厂家
K-80	180	$\leq 6.7 \times 10^{-5}$	30	0.45	0.10	40	80	2	213×108×320	7	兰州真空设备有限责任公司
K-100	300			0.55	0.15	100	100	4	253×218×327	11	
K-150	800			0.95	0.40	140	150	8	345×240×492	23	
K-200	1500		40	1.50	0.50	260	200	8	440×310×510	29	
K-300	3000			2.40	1.30	450	300	15	593×415×780	73	
K-320	3500			3.00	1.80	480	320	15	578×427×645	85	
K-400	6000			3.50	3.50	600	400	30	830×530×986	140	
K-500	8000~9000			9~12	4~6	530	500	70	980×660×1120	200	
K-600	12500			8.40	7.00	770	600	70	1175×780×1365	340	
K-630	16000			9.00	8.00	810	630	140	1115×792×1060	380	
K-800	21000			8.40	10.00	1230	800	150	1520×920×1480	550	
K-1000	35000~40000			24.00	15.00	1546	1000	300	1200×1490×1900	1060	
K-1200	50000			24.00	20.00	1900	1200	300	2200×1400×2465	1430	
K-150T	1100	$\leq 6.7 \times 10^{-5}$	40	1.20	0.40	140	150	8	345×240×490	28	
K-200T	2100			1.80	0.55	260	200	15	440×315×575	37	
K-300T	4500			3.00	1.5	480	300	30	600×430×745	85	
K-400T	7800			4.50	3.2	620	400	70	910×770×555	170	
K-600T	17000			8.40	7.0	850	600	150	1200×780×1360	400	
K-200A	>1500	$\leq 6.7 \times 10^{-5}$	40	1.80	0.55	300	200	15	420×330×490	25	
K-400A	>7200			5.40	3.00	600	400	70	700×505×725	120	
K-600A	≥ 14000			8.40	7.00	800	600	140	950×760×1070	300	
K-630A	≥ 14000			11.00	7.00	930	630	140	980×550×1200	320	
K-400C	≥ 6500	$\leq 6.7 \times 10^{-5}$	≥ 60	4~5	4~4.5	420	410	70	770×510×800	80	
K-500C	≥ 1200			12	4~6	860	540	140	1100×700×1220	260	
K-800C	≥ 22000			15	10	1180	810	300	1300×970×1680	700	
K-900C	≥ 32000			24	11~12	1330	890	300	1760×1100×1830	910	
K-100TD	300 (240)	$\leq 6.7 \times 10^{-5}$	35	0.3	0.12	120	112	15	305×108×385	10	
K-320TD	4200 (3500)			4.0	1.8~2	500	320	30	730×500×890	70	
K-500TD	10000 (8000)			6.9	4.4~5	750	500	70	1065×680×1765	125	
K-800TD	24000 (20000)			15.0	10	1200	800	300	1700×1000×1900	850	
K-1000TD	38000 (32000)			24.0	16	1500	1000	300	2020×1290×2310	980	
K-1200TD	55000 (5000)			27.0	16~20	2400	1200	500	2300×1550×2600	1640	

四、油扩散真空泵

(续)

型 号	抽气 速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限 压力 $/Pa$	最大反 压力 $/Pa$	加热 功率 $/kW$	泵油 用量 $/L$	冷却水 用量 $/L \cdot h^{-1}$	进气口 直径 $/mm$	推荐 前级泵 抽速 $/L \cdot s^{-1}$	外形尺寸 ^① (长×宽×高) $/mm \times mm \times mm$	质量 $/kg$	生产 厂家
K-63B	125	7×10^{-5}	27	0.45	0.06		63	2	(86×125×216)		上海曙光机械 制造厂
K-100B	310		35	0.80	0.14		100	4	(140×144×305)		
K-160B	810			1.20	0.36		160	10	(165×180×405)		
K-250B	2100			2.00	0.90		250	20	(250×240×510)		
K-320B	3450			3.00	1.50		320	45	(280×338×640)		
K-400B	5500			4.50	2.3		400	60	(298×345×800)		
K-500B	9500			7.00	3.5		500	100	(375×400×830)		
K-600B	1300			8.40	5.0		600	150	(470×500×1059)		
K-630B	15000			9.00	6.0		630	150	(798×580×1394)		
K-800B	23500			12.60	9.0		800	240	(1000×700×1666)		
K-1000B	45000			20.10	14.5		1000	350	(1245×850×2019)		
K-100	300	7×10^{-5}	40	0.65	0.11	160	100	2	260×170×316	9	甘肃腾飞真 空泵制造有 限公司
K-150	800			1~1.2	0.30	180	150	4	350×220×480	17	
K-200	1500			1.5~ 1.6	0.50	250	200	8	400×280×550	22	
K-630A	14000			14.4	8.00	760	630	70	1100×720×1260	/	
K-800	22000			19.8	15.00	960	800	140	×1500	/	
K-1000	4000			26	20.22	2000	1000	210	×2000	/	
TK-150	1000	7×10^{-5}	40	1.2	0.3	180	150	4	356×240×490	20	
TK-200	2000			1.5	0.5	250	200	8	455×290×550	25	
TK-300	4000			3.0	1.3	400	300	15	625×450×720	75	
TK-400	7000			4.5	2.4	600	400	30	800×560×900	100	
TK-500	10000			6.0	3.7	700	500	70	900×700×1050	120	
KT-200	2000			1.6	0.55	250	200	8	440×290×550	25	
KT-400	7000			4.5	3.5	600	400	30	750×560×890	100	
K-150T	1000	6.7×10^{-5}	40	0.8	0.55	180	150	8	(165×180×490)	/	
K-200T	2000			1.2	1.0	250	200	15	(200×240×550)	/	
K-300T	4400			2.2	2.0	400	300	30	(280×330×700)	/	
K-400T	7500			3.5	4.0	600	400	70	(360×440×880)	/	
K-500T	10000			5.0	6	700	500	70	(500×610×1260)		
K-600T	16000			6.0	8	760	600	150	(600×660×1330)		
K-800T	24000			9.0	14	960	800	210	(800×920×1800)		

(续)

型 号	抽气 速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限 压力 $/Pa$	最大反 压力 $/Pa$	加热 功率 $/kW$	泵油 用量 $/L$	冷却水 用量 $/L \cdot h^{-1}$	进气口 直径 $/mm$	推荐 前级泵 抽速 $/L \cdot s^{-1}$	外形尺寸 ^① (长×宽×高) $/mm \times mm \times mm$	质量 $/kg$	生产厂家
K-200	1500	6.6×10^{-5}	40	1.0	0.5	300	200	15	450×280×550		沈阳兰菱真空设备厂
K-200T	1750			1.0	0.8				460×290×594		
K-300	3000			2.0	1.2	400	300	30	593×390×690		
K-300T	3500			3.0	1.6				615×420×735		
K-320	3500			2.2	1.4	500	320	45	635×435×735		
K-320T	4050			3.2	1.8				645×445×785		
K-400	6000	6.6×10^{-5}	40	3.0	3.0	600	400	60	775×510×945		
K-400T	7000			4.0	4.0				810×560×995		
K-600	14000			6.0	6.0	800	600	120	1125×720×1370		
K-600T	16000			7.0	7.0				1185×825×1440		
K-630	16000			6.2	6.2	850	630	150	1180×760×1420		
K-630T	18500			7.2	7.2				1230×845×1480		
K-800	25000			11.0	12.0	1200	800	240	1485×930×1650		
K-800T	29000			13.0	14.0				1550×1050×1750		
K-1000	40000			14.0	14.0	1500	1000	350	1840×1150×1930		
K-1000T	46000			16.0	16.0				1920×1310×2060		
K-80	180	7×10^{-5}	40	0.5~0.8	0.1	100	80	2X-2	(100×105×300)		沈阳真空泵厂
K-100	300			1.0	0.3	120	100	2X-4	(125×130×310)		
K-160	800			1.0~1.5	0.5	200	160	2X-8	(165×180×470)		
K-200	1500			2.0	0.8	300	200	2X-15	(200×240×550)		
K-400	6000			4.0	4.0	600	400	2X-30 或 2X-70	(500×465×1375)		
K-600	12000			7.0	7.0	800	600	2X-150	(495×520×1160)		
K-800	23000			12.0	14.0	1200	800	H-80 2台	(800×880×1450)		
KT-200	1750						200		(200×240×550)		
KT-320	4250						320		(240×350×890)		
KT-400	7500						400		(360×440×900)		
KT-630	16500						630		(600×660×1336)		
KT-800	28750						800		(800×880×1830)		

四、油扩散真空泵

(续)

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	最大反 压力 /Pa	加热 功率 /kW	泵油 用量 /L	冷却水 用量 /L·h ⁻¹	进气口 直径 /mm	推荐 前级泵 抽速 /L·s ⁻¹	外形尺寸 ^① (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
K-100	300	6.7×10 ⁻⁵	26	0.8~ 1.0	0.15	120	100	2	254×170×350	/	北京北仪创新真空技术有限公司
K-150	800		40	1.0	0.5	200	150	4	345×220×465	/	
K-200	1500			1.8	0.7	300	200	8	440×275×522	/	
K-300	3000			3.0	1.6	400	300	15	593×380×725	/	
K-320	3500	10 ⁻⁶		4.5	1.5	500	318	30	511×370×606	/	
K-400A	6000			5.5	3.0	500	400	30	620×556×690	/	
K-500	9000	7×10 ⁻⁵		7.5	4.0	550	501	30	812×570×885	/	
K-630	14000		35	9.6	7.0	800	651	150	995×830×1142	/	
K-800	22000		40	12.0	11.0	1032	800	150	1477×920×1860	/	
KT-200	2000			2.0	0.65	300	213	8	390×275×495	/	
KT-320	4500	10 ⁻⁶	4.0	1.5	300	318	30	/	/		
K-100	300	7×10 ⁻⁵	26.7	0.6~ 0.8	0.15	100~ 120	100	2	299×227×367	10	沈阳市真空机械三厂
K-150	800			0.8~1	0.5~ 0.2	300~ 500	150	4	320×284×520	20	
K-200	1200~1600			1.5	0.5~ 0.8	250~ 300	200	8	399×336×596	30	
K-300	6000	40	3	1.2~ 1.6	400	300	8 15	575×490×754	67		
K-400	1200	7×10 ⁻⁵	26.7	4	3~4	600	400	15 30	780×555×1016	140	
K-600	6000			7	6~7	800	600	70	1310×823×1487	330	
K-800	23000			12	12~14	1200	800	150	1600×1000×1830	600	
KT-200	200	6.7×10 ⁻⁵		1.8	1.8	350	200	8	899×336×596	36	
KT-300	4250			3.5	2	500	300	15	575×490×754	86	
KT-400	7500			5	5	700	400	30	780×555×1016	173	
KT-600	16500			9	9	1000	600	70	1310×823×1487	360	
KT-800	28750			18	16	1500	800	150	1600×1000×1830	650	

第四章 蒸气流真空泵

(续)

型 号	抽气 速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限 压力 Pa	最大反 压力 Pa	加热 功率 kW	泵油 用量 L	冷却水 用量 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	进气口 直径 mm	推荐 前级泵 抽速 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	外形尺寸 ^① (长×宽×高) $\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$	质量 kg	生产 厂家
K-100	310	7×10^{-5}	40	0.8~1	0.15	180	100	4	(320×260×286)	12	沈阳真空设备有限公司
KT-100	390									14	
K-150	900			1.2~1.5	0.4	200	150	8	(410×305×430)	24	
KT-150	1200									28	
K-200	1600			1.6~1.8	0.55	300	200	8	(530×390×575)	32	
KT-200	2200							15		39	
K-300	3100			2.4~3	1.2~1.3	400	300	15	(695×505×726)	76	
KT-300	4600							30		89	
K-320	3600			3.5~3.8	1.4~1.8	420	320	15	(725×525×830)	85	
KT-320	4700							30		100	
K-400	6100			4.5	3~4	500	400	30	(885×665×925)	150	
KT-400	8100							70		175	
K-500	9500			7.0	4.0	600	500	70	(1010×815×957)	165	
KT-500	12000							150	(1010×815×1165)	185	
K-600	14500			9.0	6~7	800	600	70	(1145×975×1179)	345	
KT-600	17000							150	(1145×975×1444)	375	
K-630	16500			10.0	7~8	850	630	150	(1170×1010×1275)	390	
KT-630	18600							150		420	
K-800	26000			13~13.5	12~14	1200	800	240	(1520×1275×1440)	620	
KT-800	30000							300	(1520×1275×1870)	670	
K-1000	41000			17~20	15~16	1500	1000	350	(1990×1290×2220)	940	
KT-1000	47000							600		990	
K-1200	50000			28~30	22	2600	1200	350	(2235×1750×2465)	1450	
KT-1200	53500							600		1500	
KN-100	310	7×10^{-5}	40	0.8~1	0.15	180	100	4	(320×260×250)	/	
KTN-100	390									/	
KN-150	900			1.2~1.5	0.4	200	150	8	(410×305×375)	/	
KTN-150	1200									/	

四、油扩散真空泵

(续)

型 号	抽气 速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限 压力 $/Pa$	最大反 压力 $/Pa$	加热 功率 $/kW$	泵油 用量 $/L$	冷却水 用量 $/L \cdot h^{-1}$	进气口 直径 $/mm$	推荐 前级泵 抽速 $/L \cdot s^{-1}$	外形尺寸 ^① (长×宽×高) $/mm \times mm \times mm$	质量 $/kg$	生产 厂家
KN-200	1600	7×10^{-5}	40	1.6~ 1.8	0.55	300	200	8	(530×390×492)	/	沈阳真龙真空设备有限公司
KTN-200	2200							15		/	
KN-300	3300			2.4~3	1.3~ 1.4	400	300	15	(695×505×610)	/	
KTN-300	4600							30		/	
KN-320	3600			3.5~ 3.8	1.6~ 1.8	420	320	15	(725×525×660)	/	
KTN-320	4800							30		/	
KN-400	6100			4.5	3~4	500	400	30	(885×665×785)	/	
KTN-400	8000							70		/	
KN-500	9500			7	5~6	600	500	70	(1010×815×940)	/	
KTN-500	12000							150		/	
KN-600	14500			9	6~7	800	600	70	(1145×975×1130)	/	
KTN-600	17000							150		/	
KN-630	16500	7×10^{-5}	40	10	7~8	850	630	150	(1170×1010×1130)	/	
KTN-630	20000							150		/	
KN-800	26000			13~ 13.5	14~15	1200	800	240	(1520×1275×1450)	/	
KTN-800	30000							300		/	
KN-1000	41000			17~20	20	1500	1000	350	(1990×1290×1880)	/	
KTN-1000	50000							600		/	
KN-1200	50000			28~30	25	2600	1200	350	(2235×1750×2130)	/	
KTN-1200	58600							600		/	
KA-400	7000	7×10^{-5}	40	4	3~4	500	400	70 30	(885×665×830)	135	
KA-500	9000			6	4	600	500	150 70	(1010×815×957)	150	
KA-600	14500			8	6~7	800	600	15 70	(1145×975×1160)	310	
KA-630	16500			9	7~8	850	630	150 150	(1170×1010×1200)	350	
KA-800	22000			12	12~14	1200	800	300 240	(1520×1275×1440)	560	
KA-1000	36000			17	15~16	1500	1000	600 350	(1990×1290×1890)	850	
KA-1200	48000			28	22	2600	1200	600 350	(2235×1750×2230)	1300	

第四章 蒸气流真空泵

(续)

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹	极限 压力 /Pa	最大反 压力 /Pa	加热 功率 /kW	泵油 用量 /L	冷却水 用量 /L·h ⁻¹	进气口 直径 /mm	推荐 前级泵 抽速 /L·s ⁻¹	外形尺寸 ^① (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
K-200	1400	1.5×10 ⁻⁴	35	2.5	0.5~ 0.8	300	200	2X-15	210×250×550	/	沈阳恒星实业有限公司
KT-200	1600								210×250×610	/	
K-300	3000			4.0	1.4~ 1.8	500	300	2X-30	285×330×690	/	
KT-300	3450								285×330×740	/	
KT-320	3900								280×390×788	/	
K-400	5400			6.0	3~4	600	400	2X-70	360×440×1010	/	
KT-400	6200								360×440×1015	/	
KT-600	12500			12	6.3~ 7.3	850	600	2X-70 2台	600×660×1470	/	
K-630	14000						630		495×520×1160	/	
KT-630	16100							560×745×1465	/		
K-800	22000			14	12~14	1200	800	2X-70 ZJ-300	800×880×1780	/	
KT-800	25300			16					800×880×1776	/	
KT-1000	35000	26	16	240	1000	2X-70 ZJ-600	1000×1100×2300	/			
K-150	800	6.7×10 ⁻⁵	40	1	0.4	150	150	4			广东真空设备厂
K-200	1500		40	1.5	0.8	200	200	8			
KT-300	3000		40	2.5	1.5	300	300	8 15			
K-400	5600	6.7×10 ⁻⁵	40	4.5	3	500	400	15 30			
KT-400	5600			4.5	3	500	400	15 30			
K-600	12000			6	7	700	600	30			
KTD-80	150	2.7×10 ⁻⁵	40	0.45	0.065		80				
KTD-110	300			0.65	0.13		110				
KTD-160	700			1.2	0.20		160				

注:①加括号数字为连接尺寸 $L \times A \times h$ 。

②KTD 型系列高真空油扩散泵主要技术性能见表 4-37。

表 4-37 KTD 型系列高真空油扩散泵主要技术性能

型 号	抽气 速率 /L·s ⁻¹		极限 压力 /Pa	临界前 级压力 /Pa	返油率 /mg·cm ⁻² ·min ⁻¹		加热 功率 /kW	泵油 用量 /L	冷却水用量 /L·h ⁻¹	推荐前级 泵抽速 /L·s ⁻¹	质量 /kg	生产厂家
K-320TD	单泵	4400	6.7×10 ⁻⁵	40	单泵	4×10 ⁻³	4.0	1.8~2	500	45	70	甘肃腾飞真空泵制造有限公司
	挡板	3500			挡板	8×10 ⁻⁵						
K-400TD	单泵	7500			单泵	4×10 ⁻³	4.8	4.0	600	70	150	
	挡板	5400			挡板	8×10 ⁻⁵						
K-500TD	单泵	11000			单泵	4×10 ⁻³	6.9	5.5	750	70	350	
	挡板	9000			挡板	8×10 ⁻⁵						
K-630TD	单泵	18000			单泵	3×10 ⁻³	9.6	7.5	900	150	400	
	挡板	13000			挡板	6×10 ⁻⁵						
K-800TD	单泵	24000			单泵	3×10 ⁻³	15	10	1200	240	850	
	挡板	21000			挡板	6×10 ⁻⁵						
K-1000TD	单泵	38000		35	单泵	2×10 ⁻³	25	16	1500	350	980	
	挡板	32000			挡板	4×10 ⁻⁵						
K-100TD	单泵	300	6.7×10 ⁻⁵	35			0.3	0.12	120	15	10	兰州真空设备有限责任公司
	挡板	240										
K-320TD	单泵	4200			单泵	≤5×10 ⁻³	4.0	1.8~2	500	30	70	
	挡板	3500			挡板							
K-500TD	单泵	11000					6.9	4.4~5	750	70	125	
	挡板	8000										
K-8000TD	单泵	24000					15	10	1200	300	850	
	挡板	20000										
K-1000TD	单泵	38000					24	16	1500	300	980	
	挡板	32000										
K-1200TD	单泵	55000					27	16~20	2400	500	1640	
	挡板	50000										
注:泵的特点是,抽速大、返油率低;水冷挡油帽与泵体组为一体,结构简单												

③ZK 型系列高真空油增扩泵主要技术性能见表 4-38 所示。

表 4-38 ZK 型系列高真空油增扩泵主要技术性能

型 号	极限压力 /Pa	抽气速率/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$		临界前 级压力 /Pa($1\times 10^{-1}\text{Pa}$)	加热 功率 /kW	电源 电压 /V	泵油 牌号	泵油 用量 /L	推荐前级 泵抽速 / $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	连接尺寸 ($L\times A\times H$) /mm \times mm \times mm	生 产 厂 家
		$4\times 10^{-3}\text{Pa}$ $\sim 1\times 10^{-1}\text{Pa}$	$1\times 10^{-1}\text{Pa}$								
ZK-200T	2×10^{-4}	2000	1600	40	1.8	220	KS-3 KS-2	1.2	15		甘肃腾 飞真空 泵制造 有限公 司
ZK-300T		4000	3200		3.0	220		3.0	30		
ZK-400T		6000	4800		4.0	380		5.0	70		
ZK-500T		10000	8000		6.0	380		8.0	70		
ZK-600T		14000	11000		9.0	380		10.0	150		
ZK-800T		20000	16000		12.0	380		15.0	150-210		
ZK-600T	4×10^{-4}	13500		15.0	220	KS-3	16.0	150			兰州真 空设备 有限责 任公司
ZK-600	7×10^{-4}	13000		50	15.0	380	/	20.0	150	$1700\times 680\times 1672$	上海曙 光机械 制造厂
ZK-630		14500			18.0		/	21.0	15	$1700\times 744\times 1672$	
ZK-800		2200			21.6		/	35.0	300	$2042\times 1300\times 1935$	

2. 特性曲线

①兰州真空设备有限责任公司生产的 K、KT、KC、KA、KTD 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线分别如图 4-36、图 4-37、图 4-38、图 4-39、图 4-40 所示。

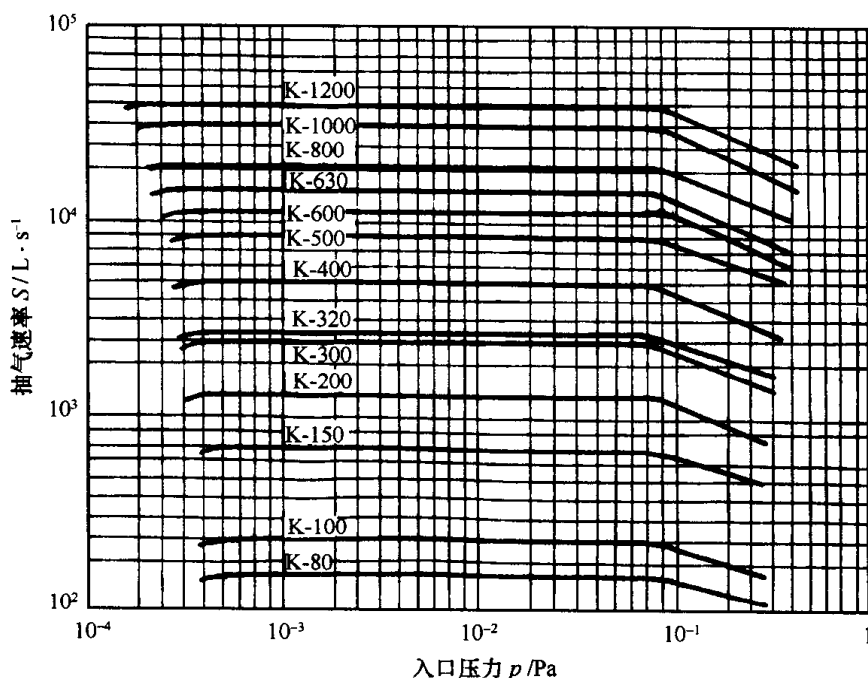


图 4-36 K 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

②成都南光实业有限公司生产的 K、TK、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线分别如图 4-41、图 4-42 所示。

③沈阳真龙真空设备有限公司生产的 KA、K、KT、KTN 型系列油扩散泵抽气速率与入口

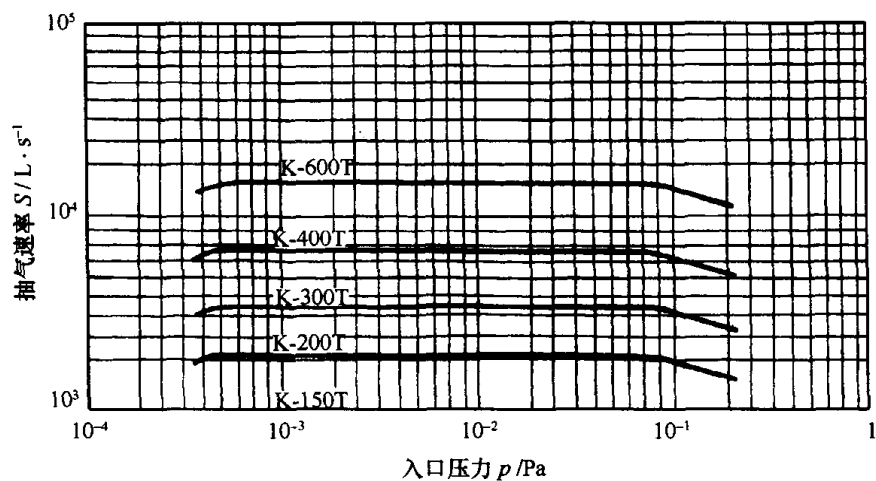


图 4-37 KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

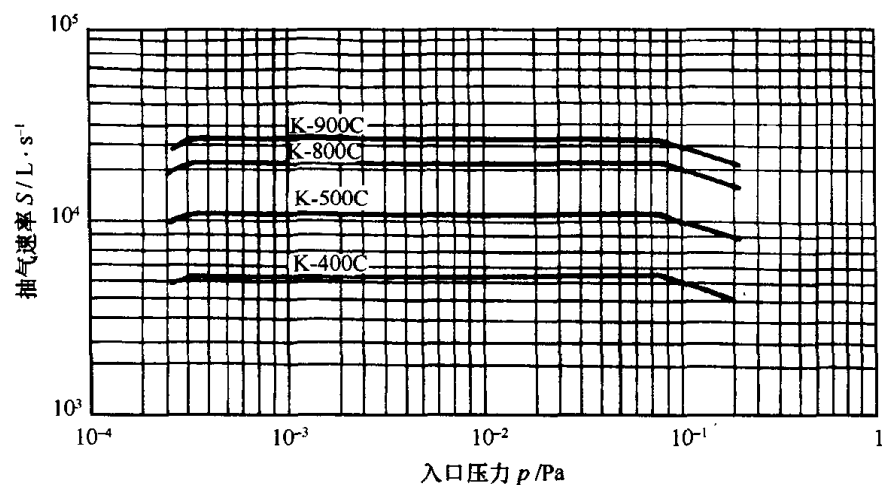


图 4-38 KC 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

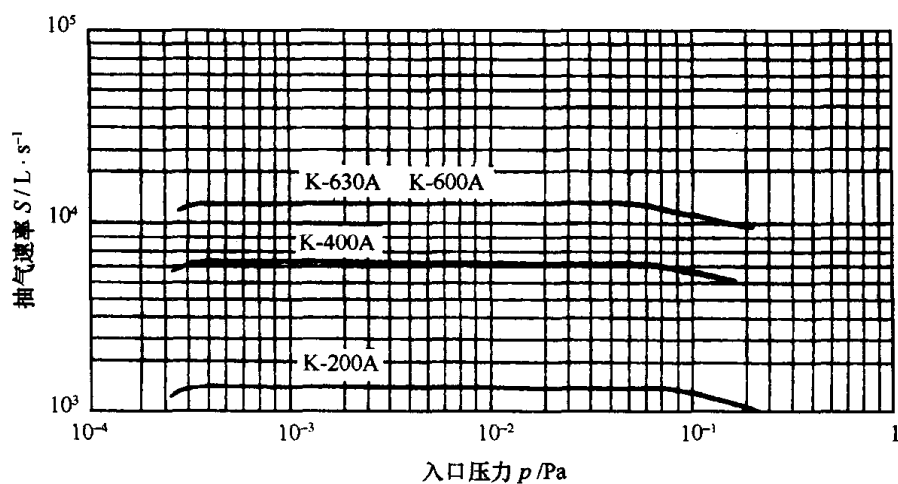


图 4-39 KA 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

压力关系曲线分别如图 4-43、图 4-44、图 4-45 所示。

④沈阳兰菱真空设备制造公司生产的 K、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线如图 4-46 所示。

⑤沈阳真空泵厂生产的 K、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线如图 4-47

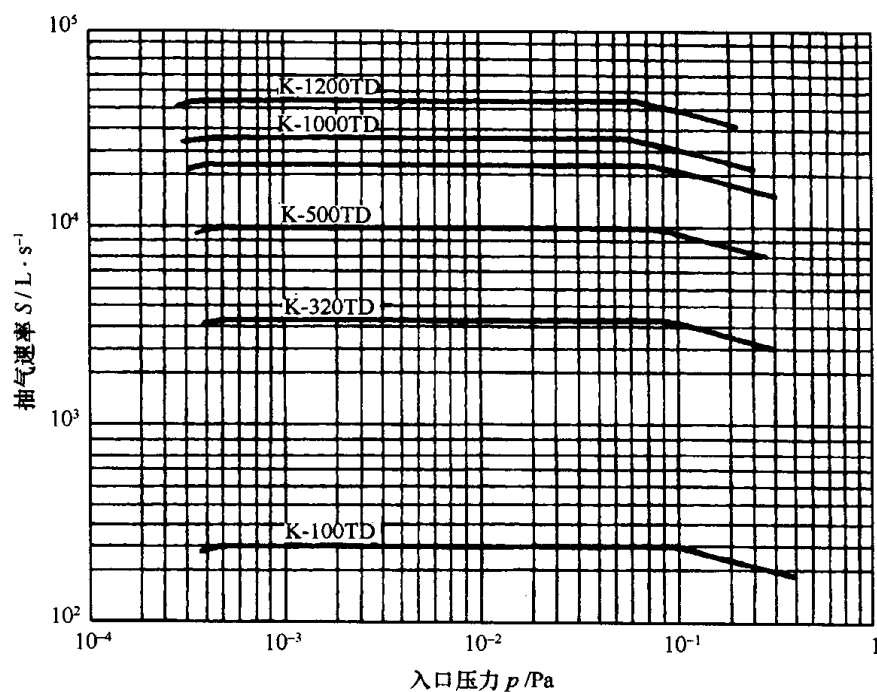


图 4-40 KTD 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

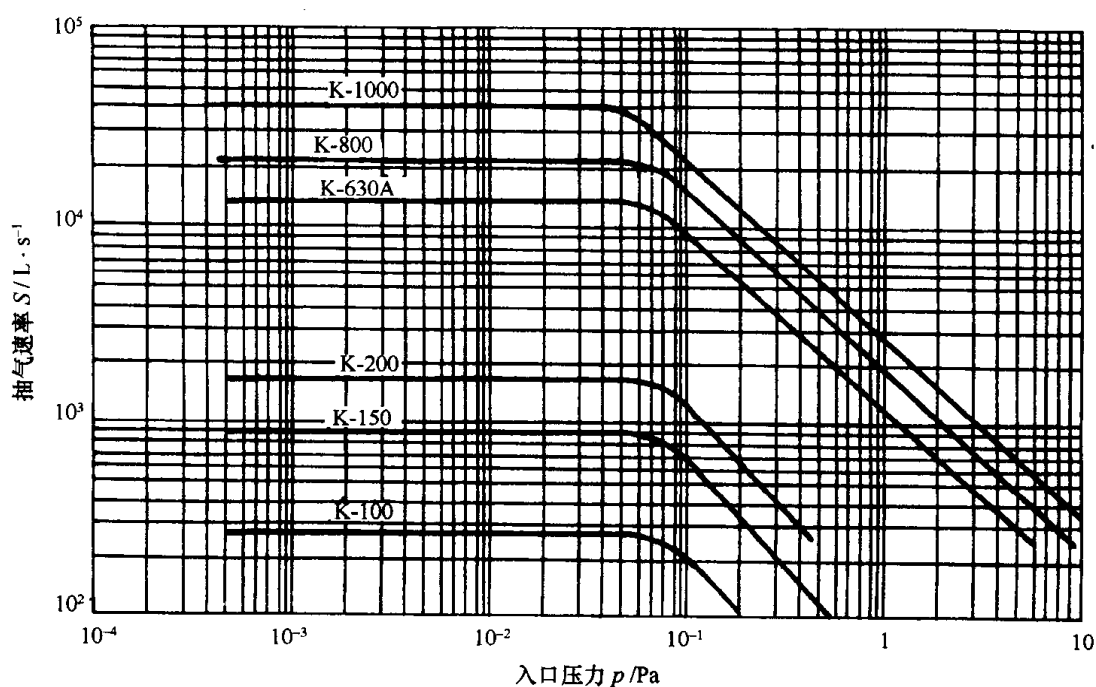


图 4-41 K 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

所示。

3. 外形及安装尺寸

①K、KT、KA 型系列油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-39。

四、油扩散真空泵

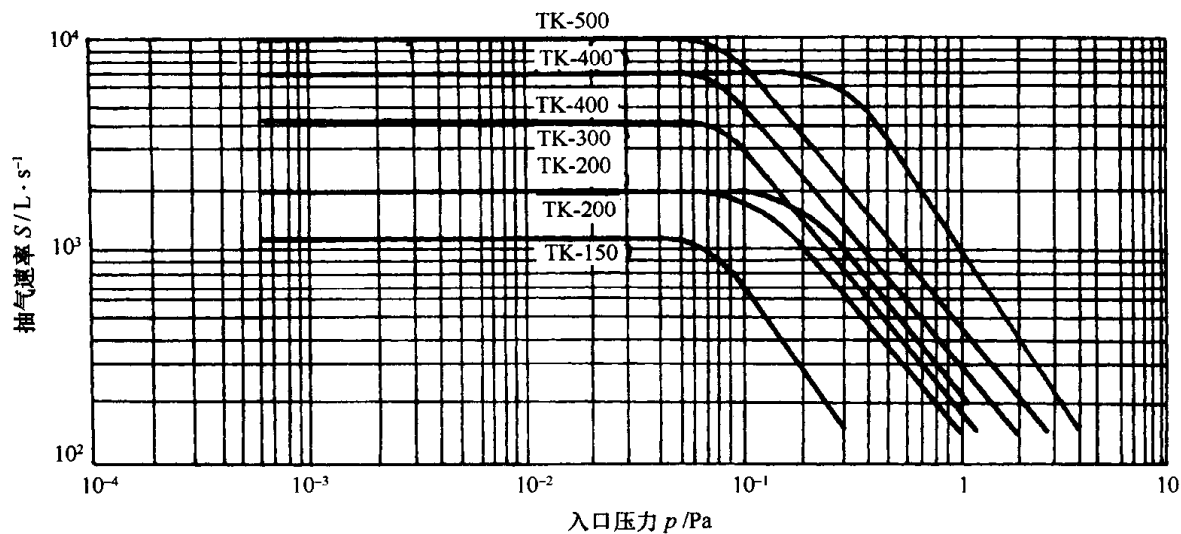


图 4-42 KT、TK 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

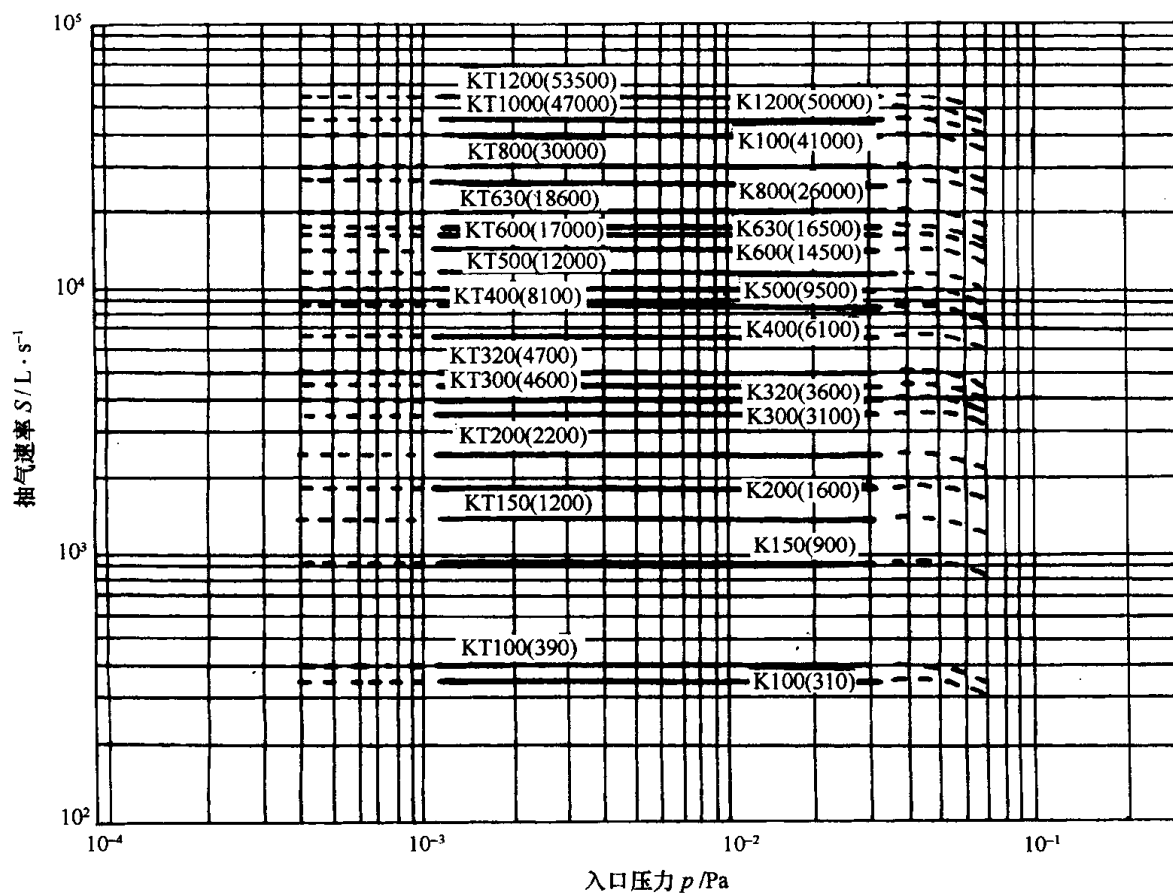


图 4-43 K、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

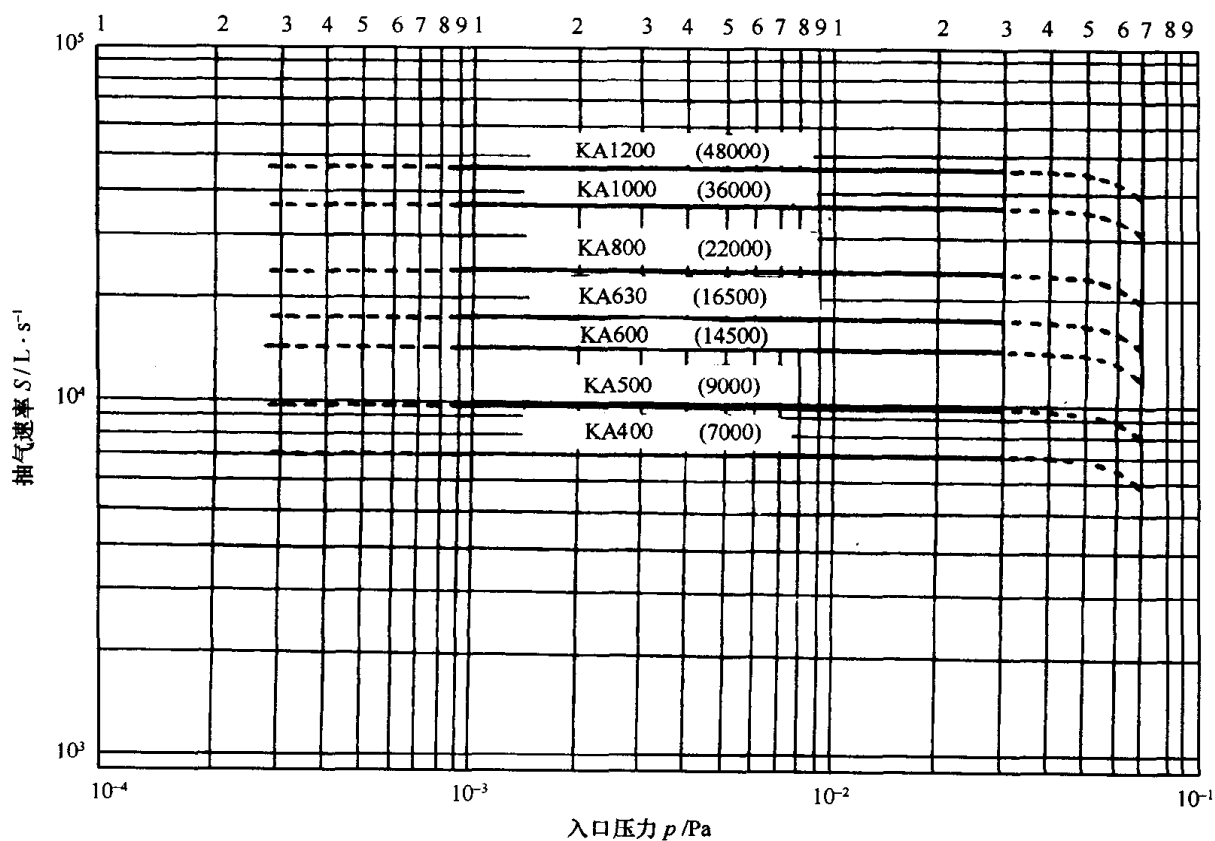


图 4-44 KA 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

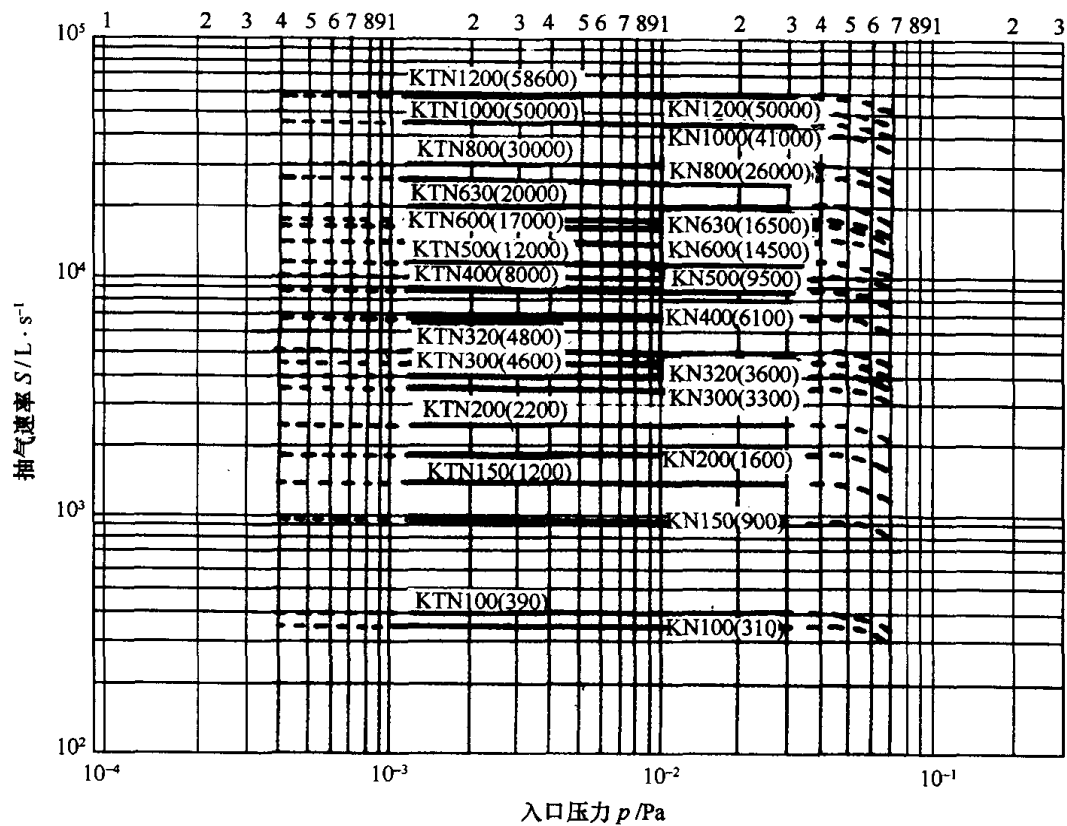


图 4-45 KTN 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线

四、油扩散真空泵

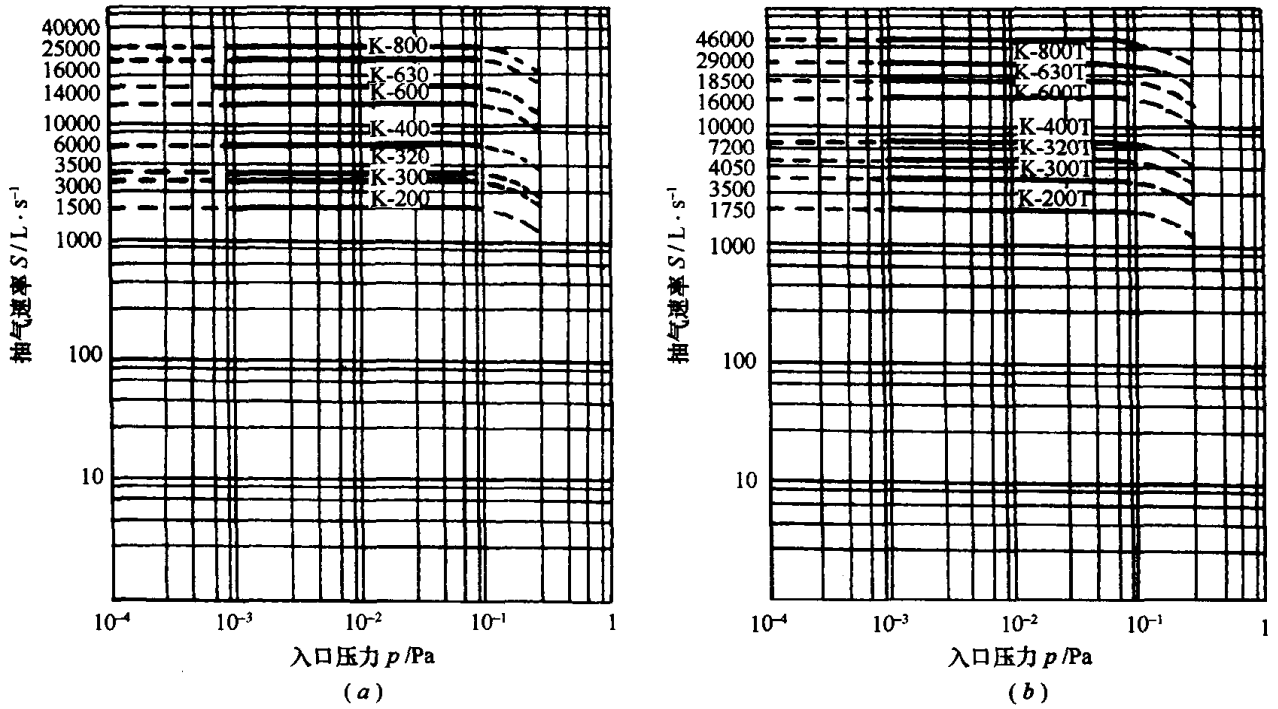


图 4-46 K、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线
(a) K 型; (b) KT 型。

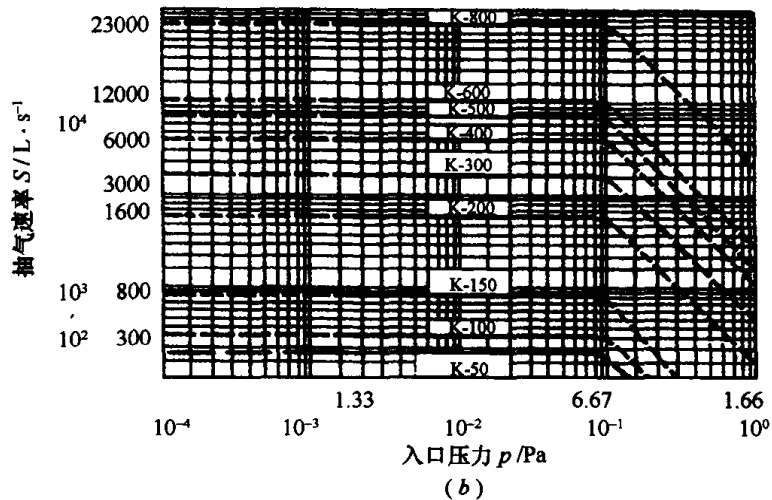
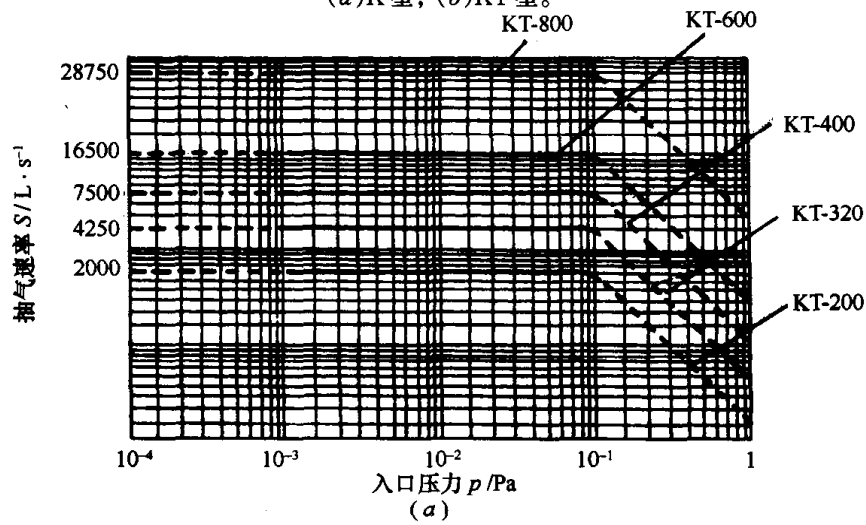
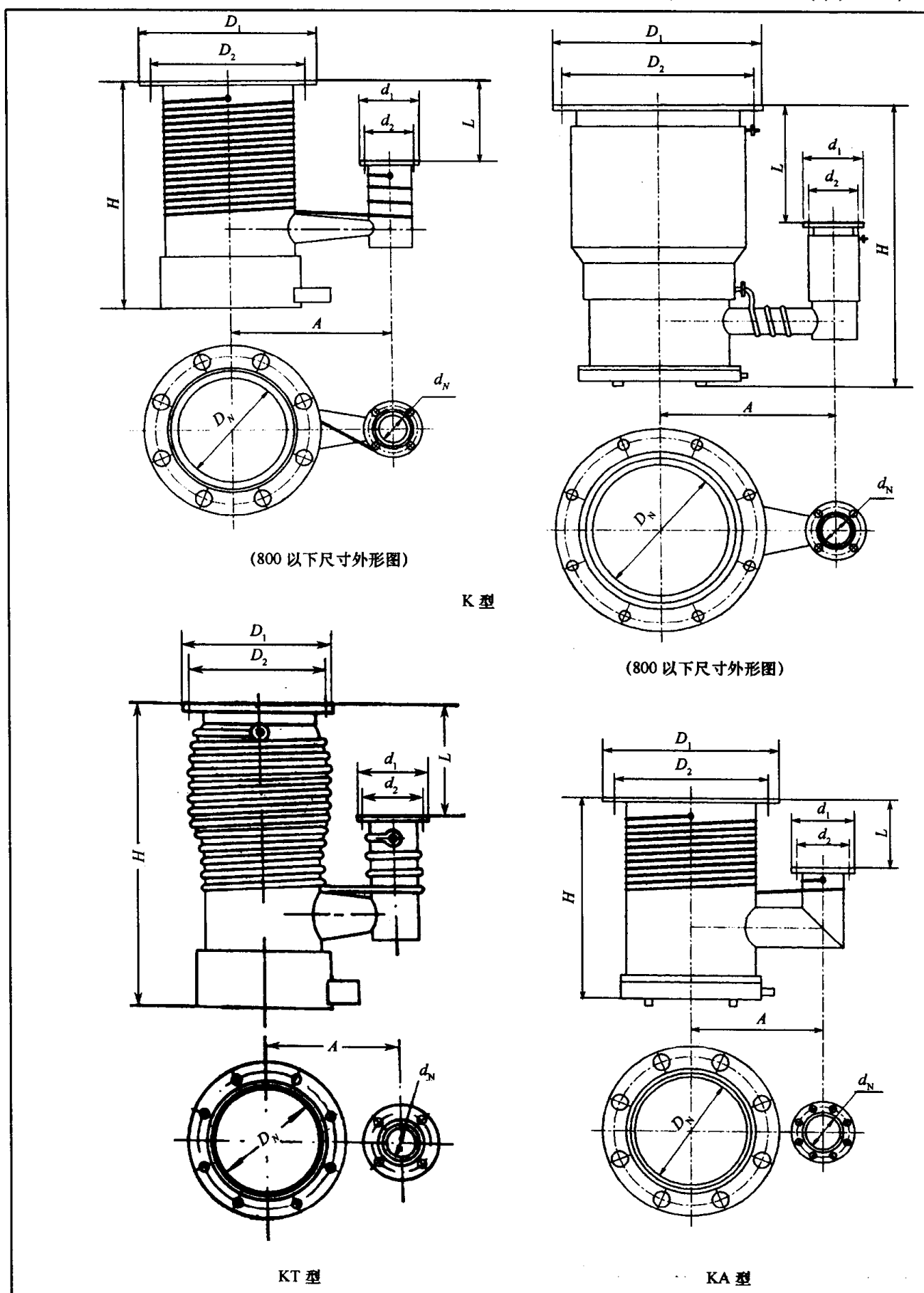


图 4-47 K、KT 型系列油扩散泵抽气速率与入口压力关系曲线
(a) K 型; (b) KT 型。

表 4-39 K、KT、KA 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



四、油扩散真空泵

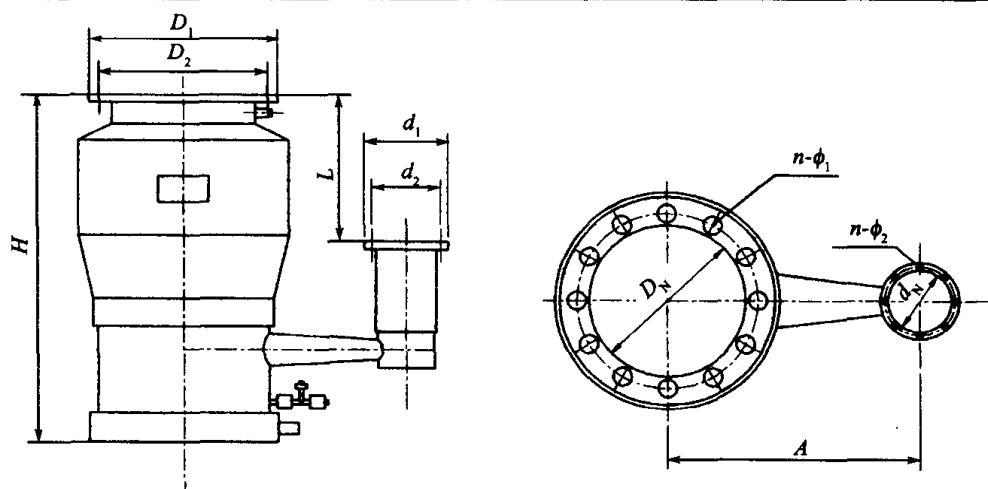
(续)

型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	L	A	H	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$
K-80	80	145	125	25	70	55	100	105	267	4- $\phi 9$	4- $\phi 7$
K-100	100	170	145	32	78	64	125	130	310	4- $\phi 12$	4- $\phi 7$
K-150	150	220	195	50	110	90	165	180	390	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-200	200	275	250	65	125	105	200	240	496	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-300	300	380	350	80	145	125	280	330	755	8- $\phi 14$	4- $\phi 9$
K-320	320	370	/	80	110	/	240	290	645	/	/
K-400	400	500	465	100	170	145	360	440	960	8- $\phi 18$	4- $\phi 12$
K-500	500	550	/	125	155	/	550	630	1200	/	/
K-600	600	710	670	150	220	195	600	660	1365	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-630	630	720	/	160	200	/	450	550	1115	/	/
K-800	800	920	880	200	275	250	800	880	1480	20- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-1000	1000	1140	1090	200	275	250	850	780	1900	24- $\phi 23$	8- $\phi 12$
K-1200	1200	1360	1310	300	380	350	1200	1300	2455	28- $\phi 25$	8- $\phi 14$
K-150T	150	170	145	32	78	64	125	130	490	4- $\phi 12$	4- $\phi 7$
K-200T	200	275	250	65	125	105	200	240	550	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-300T	300	380	350	80	145	125	280	330	720	8- $\phi 14$	4- $\phi 9$
K-400T	400	500	465	100	170	145	360	440	890	8- $\phi 18$	4- $\phi 12$
K-600T	600	710	670	150	220	195	600	660	1340	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-200A	200	275	250	65	125	105	200	220	470	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-400A	400	500	465	100	170	145	285	324	694	8- $\phi 18$	4- $\phi 12$
K-600A	600	710	670	150	220	195	440	480	1064	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-630A	630	750	720	150	220	195	440	480	1100	12-M8	8- $\phi 12$

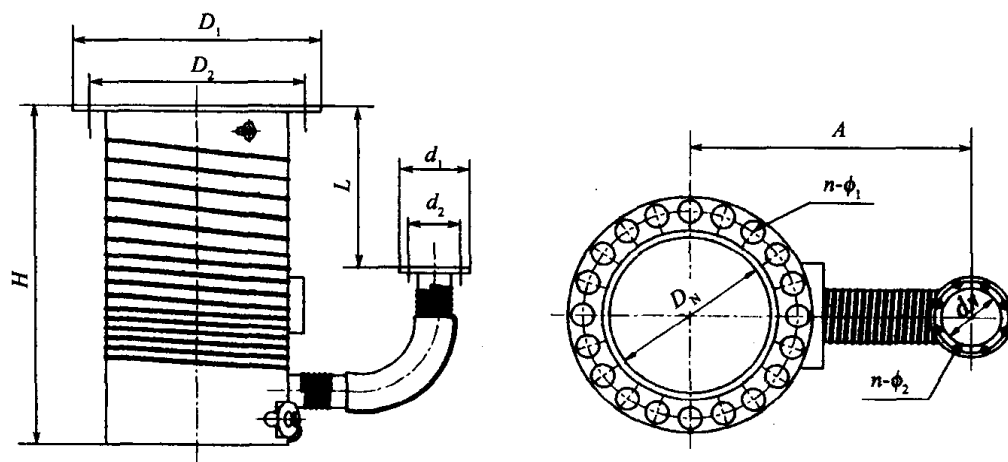
注：兰州真空设备有限责任公司生产

②KTD、KC 型系列高真空低返油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-40。

表 4-40 KTD 型、KC 型系列高真空低返油扩散泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



(a) KTD 型



(b) KC 型

型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	L	A	H	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$	生产厂家
K-100TD	112	160	145	24	40	/	150	145	365	8-M8	/	兰州真空设备有限责任公司
K-320TD	320	425	395	100	165	145	240	400	890	12- $\phi 14$	8- $\phi 9$	
K-500TD	500	610	580	160	225	200	500	610	1270	16- $\phi 14$	8- $\phi 12$	
K-800TD	800	920	880	300	380	350	800	920	1850	20- $\phi 21$	8- $\phi 14$	
K-1000TD	1000	1140	1090	350	435	405	1060	1150	2310	24- $\phi 23$	8- $\phi 14$	
K-1200TD	1200	1360	1310	300	380	350	1200	1300	2650	28- $\phi 25$	8- $\phi 14$	
K-400C	410	600	465	75	150	120	610	610	1090	16- $\phi 18$	4- $\phi 14$	
K-500C	540	700	635	128	230	190	584	635	1200	20- $\phi 18$	8- $\phi 14$	
K-800C	810	970	920	170	280	240	1190	670	1680	16- $\phi 22$	8- $\phi 20$	
K-900C	890	1060	980	200	280	240	810	1075	1830	28- $\phi 22$	8- $\phi 20$	

四、油扩散真空泵

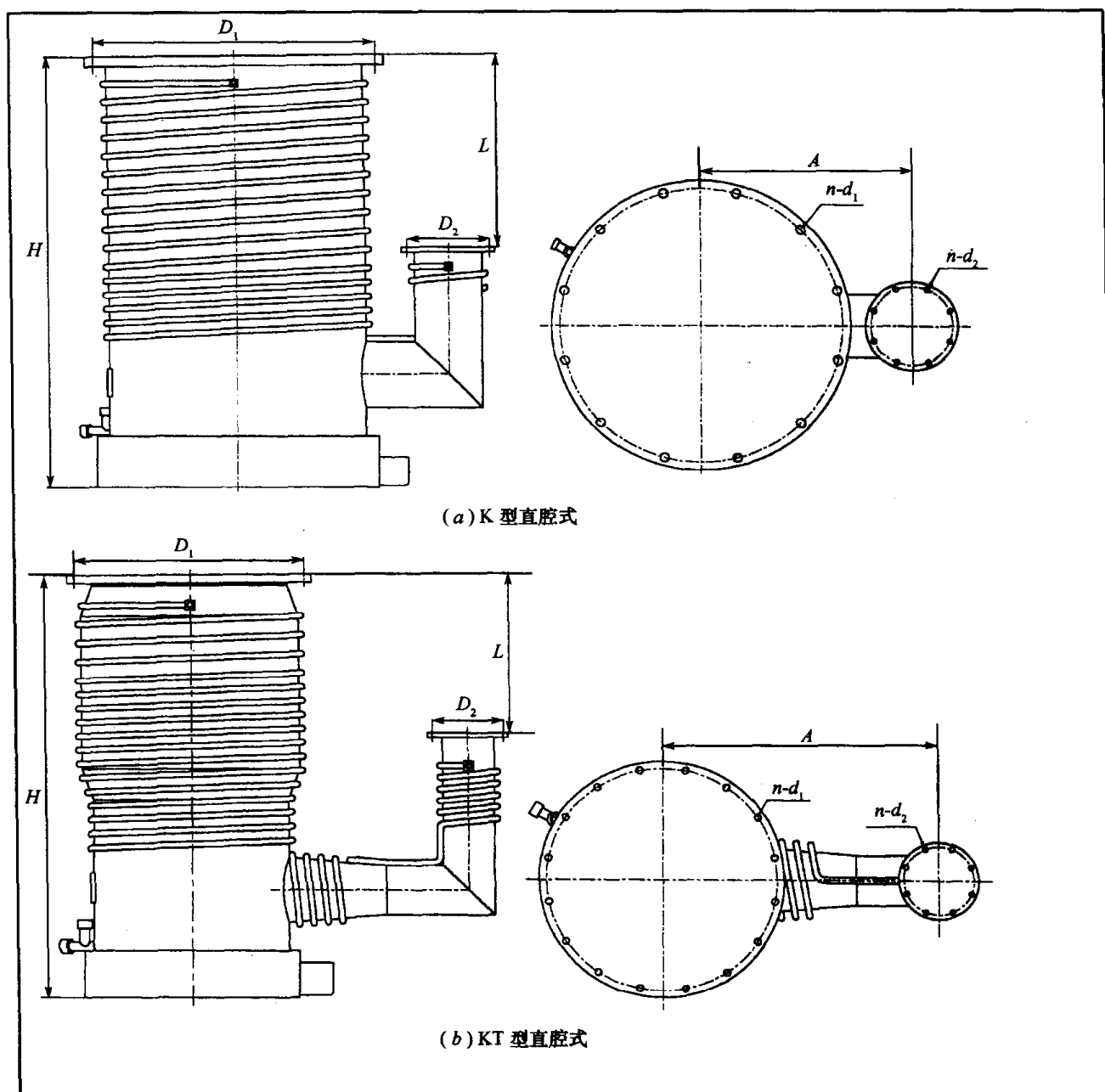
(续)

型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	L	A	H	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$	生产厂家
K-320TD	320	425	395	100	170	145	240	400	890	12- $\phi 14$	4- $\phi 10$	甘肃腾飞真空泵制造有限公司
K-400TD	400	500	480	100	170	145	360	440	900	8- $\phi 18$	4- $\phi 10$	
K-500TD	500	600	580	160	225	200	500	610	1265	16- $\phi 14$	8- $\phi 12$	
K-630TD	630	750	670	160	225	200	600	660	1400	20- $\phi 14$	8- $\phi 12$	
K-800TD	800	920	880	300	380	350	800	920	1900	20- $\phi 21$	8- $\phi 14$	
K-1000TD	1000	1140	1090	300	380	350	1060	1150	2300	24- $\phi 22$	8- $\phi 14$	

③K型、KT型系列油扩散泵外形及安装尺寸见表4-41。

表4-41 K型、KT型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(续)

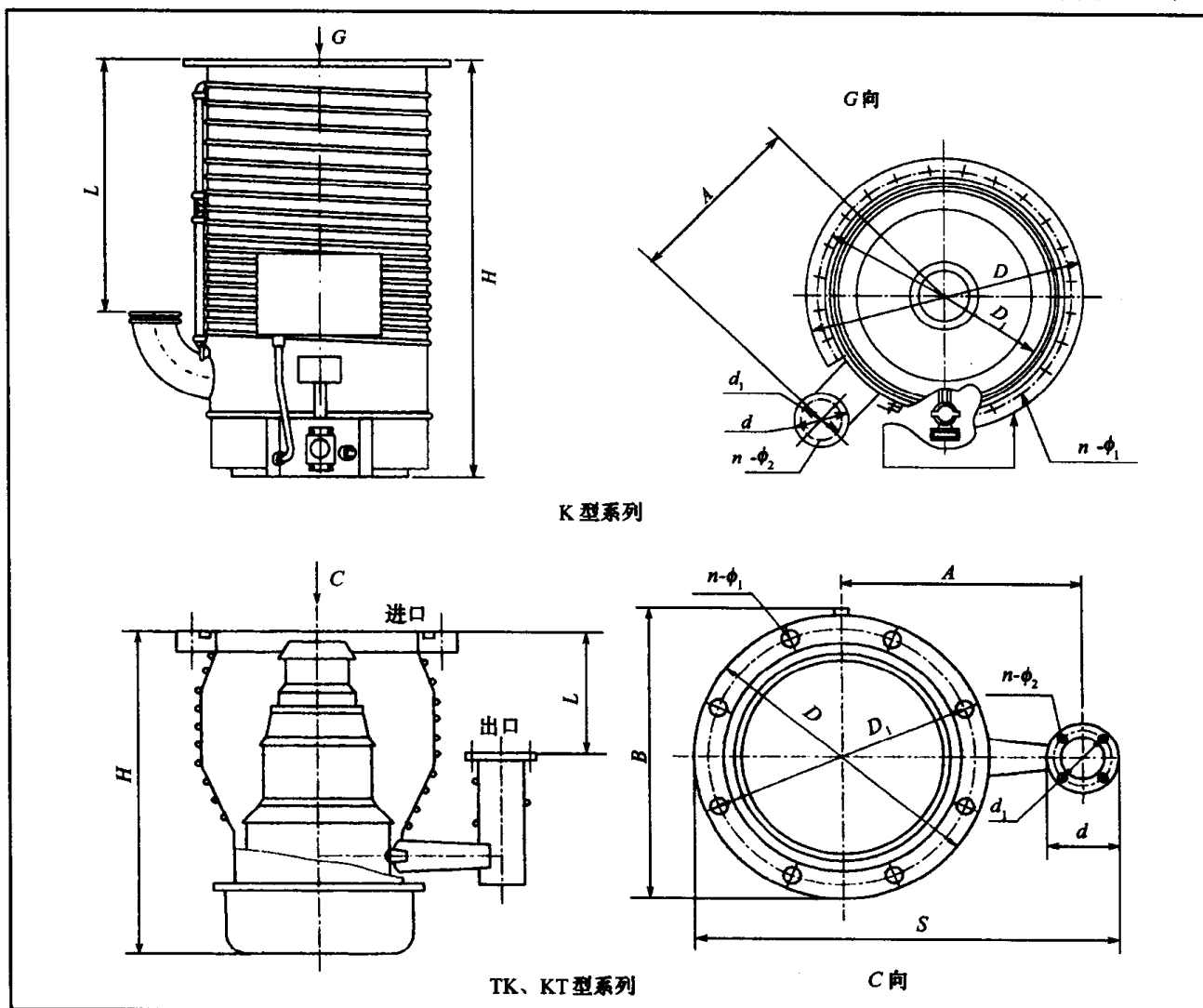
型 号	L	A	H	D_1	D_2	$n-d_1$	$n-d_2$
K-63B	86	125	216	110	/	4- $\phi 10$	/
K-100B	140	144	305	145	55	8- $\phi 10$	4- $\phi 7$
K-160B	165	180	405	200	80	8- $\phi 12$	4- $\phi 10$
K-250B	250	240	510	310	110	12- $\phi 12$	4- $\phi 10$
K-320B	280	338	640	395	110	12- $\phi 14$	4- $\phi 10$
K-400B	298	345	800	480	145	16- $\phi 14$	8- $\phi 10$
K-500B	375	400	830	580	145	16- $\phi 14$	8- $\phi 10$
K-600B	471	500	1059	670	195	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-630B	798	580	1394	720	200	20- $\phi 14$	8- $\phi 12$
K-800B	1000	700	1666	890	200	24- $\phi 14$	8- $\phi 12$
K-1000B	1245	850	2019	1090	260	32- $\phi 14$	12- $\phi 12$
KT-200	198	350	583	260	63	12- $\phi 12$	4- $\phi 10$
KT-300	296	471	801	350	105	8- $\phi 14$	4- $\phi 10$
KT-400	340	575	908	480	145	16- $\phi 14$	8- $\phi 10$
KT-500	425	670	1095	580	145	16- $\phi 14$	8- $\phi 10$
KT-600	510	803	1280	670	195	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$

注:上海曙光机械制造厂生产

④K、TK、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-42。

表 4-42 K、TK、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



四、油扩散真空泵

(续)

型号	K-100	K-150	K-200	K-630A	K-800	K-1000	TK-100	TK-150	TK-200	TK-300	TK-400	TK-500	KT-200	KT-400
D	170	220	275	750	920	1120	170	220	275	380	500	600	275	510
D_1	145	195	250	720	890	1090	145	195	250	350	465	565	250	480
d	78	110	125	165	225	225	78	110	125	145	170	195	125	165
d_1	64	90	105	145	200	200	64	90	105	125	145	1170	105	145
A	130	180	240	510	600	815	130	180	240	330	440	500	240	440
L	125	165	200	770	965	1275	125	165	200	280	360	500	200	360
H	316	480	550	1260	1560	2000	365	480	550	720	900	1050	550	890
S	/	/	/	/	/	/	260	356	455	625	800	900	440	750
B	/	/	/	/	/	/	170	240	290	450	560	700	290	560
$n-\phi_1$	4-M10	8-M10	8-M10	20-M12	24-M12	32-M12	4-M10	8-M10		8-M12	16-M16	12-M16	8-M10	16-M12
$n-\phi_2$	4-M6	4-M6	4-M8	8-M10	8-M10	8-M10	4-M6	4-M8			4-M10	8-M10	4-M8	4-M8

注:成都国投南光实业有限公司生产

⑤KT 型系列高真空油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-43。

表 4-43 KT 型系列高真空油扩散泵外形及安装尺寸

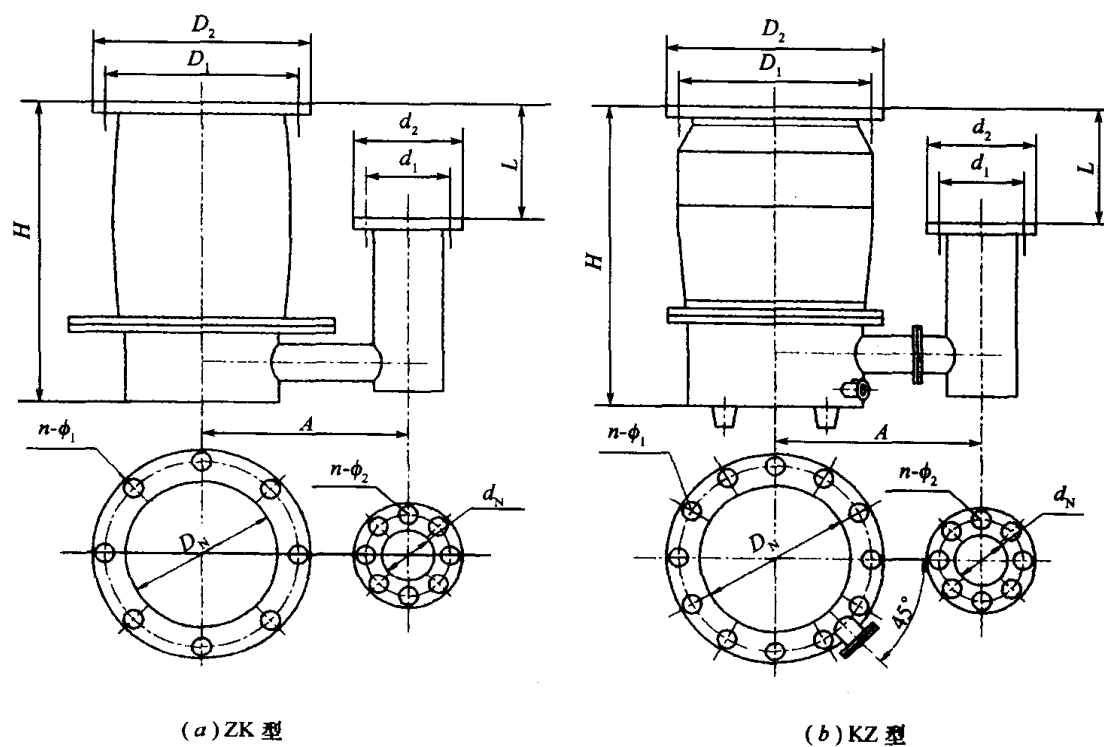
(单位:mm)

	型号	K-150T	K-200T	K-300T	K-400T	K-500T	K-600T	K-800T
	D_N	150	200	300	400	500	600	800
	D_1	220	275	380	500	600	920	980
	D_2	195	250	350	480	580	670	880
	d_N	50	65	80	100	150	150	250
	d_1	110	125	145	170	220	220	330
	d_2	90	105	125	145	195	195	310
	L	165	200	280	360	500	600	800
	A	180	240	330	440	610	660	920
	H	490	550	700	880	1260	1330	1800
	$n-\phi_1$	8- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 14$	8- $\phi 18$	16- $\phi 12$	12- $\phi 21$	20- $\phi 21$
	$n-\phi_2$	4- $\phi 9$	4- $\phi 9$	4- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 14$
	注:该泵由甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产,其特点:(1)内加热型式。提高热效率 30% 以上,泵启动快,小泵 20min,大泵 50min;节能降耗效果明显,功率降低 20%;(2)配有可靠的观察窗,直接观察油是否氧化及损耗情况,以便及时添加或更换油;(3)油锅底部设有不锈钢快速水冷却管,小泵停泵 20min,大泵停泵 30min,即可通水冷却,30min 后就可停前级泵;(4)配有温度显示和温度测试传感元件,用户可根据自己情况、季节变化,对加热功率进行控制,选择最佳工作温度,保证泵常年稳定工作							

⑥ZK 系列高真空油增扩泵外形及安装尺寸见表 4-44。

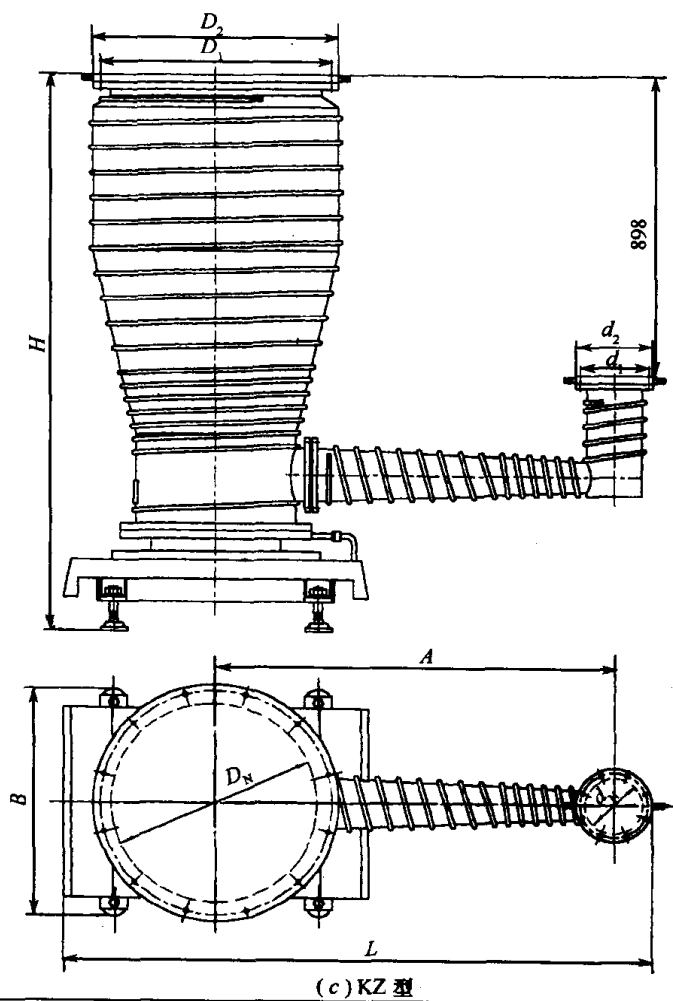
表 4-44 ZK 型系列高真空油增扩泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(a) ZK 型

(b) KZ 型



(c) KZ 型

四、油扩散真空泵

(续)

型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	L	A	H	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$	生产厂家
ZK-200TD	200	250	275	65	105	125	200	240	550	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$	甘肃腾飞 真空泵制 造有限公 司
ZK-300TD	300	350	380	80	125	145	280	330	720	8- $\phi 14$	8- $\phi 9$	
ZK-400TD	400	480	510	100	145	165	360	460	980	16- $\phi 12$	8- $\phi 8$	
ZK-500TD	500	580	610	155	200	225	500	616	1250	16- $\phi 12$	8- $\phi 10$	
ZK-600TD	600	670	710	150	195	220	600	660	1480	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$	
ZK-800TD	800	880	920	250	300	330	800	920	1980	20- $\phi 21$	8- $\phi 14$	
ZK-600T	600	670	710	150	195	220	700	660	1480	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$	兰州真空 设备有限 责任公司
KZ-600	600	670	710	150	195	220	1700	1150	1672	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$	上海曙 光机械 制造厂
KZ-630	630	720	750	160	200	220	1700	1150	1672	20- $\phi 14$	8- $\phi 12$	
KZ-800	800	890	920	250	260	330	2042	1250	1935	24- $\phi 14$	12- $\phi 12$	

⑦沈阳兰菱真空设备厂生产的 K、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-45。

表 4-45 K、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

K 型							KT 型						
型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	H	A	L	B	C	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$
K-200	200	250	275	65	105	125	550	250	200	280	450	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-200T							594			290	460		
K-300	300	350	380	80	125	145	690	330	286	390	593	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-300T							735			420	615		

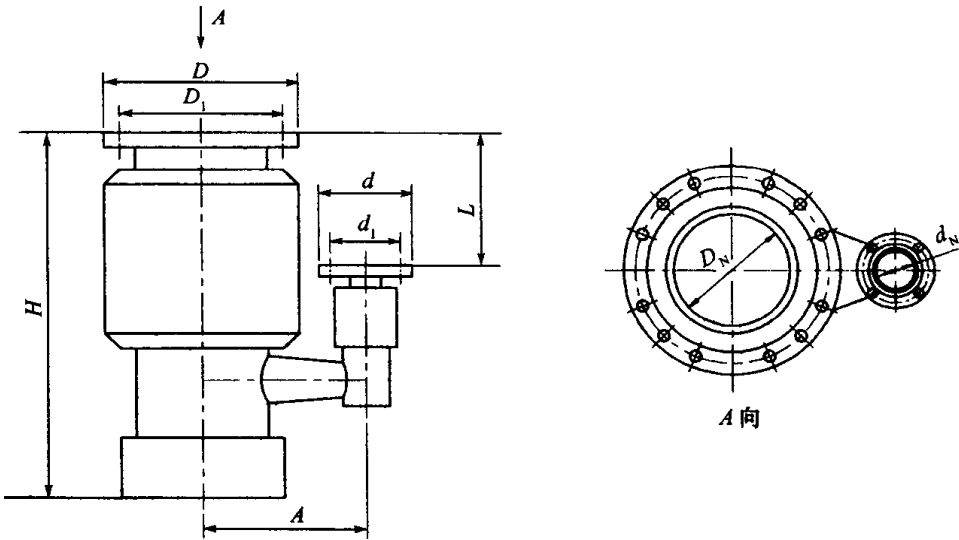
(续)

型号	D_N	D_1	D_2	d_N	d_1	d_2	H	A	L	B	C	$n-\phi_1$	$n-\phi_2$
K-320	320	395	425	80	125	145	735	350	310	435	635	8- $\phi 12$	4- $\phi 9$
K-320T							785			445	645		
K0400	400	465	500	100	145	170	945	440	380	510	775	8- $\phi 12$	4- $\phi 12$
K-400T							995			560	810		
K-600	600	670	710	150	195	220	1370	660	600	720	1125	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-600T							1440			825	1185		
K-630	630	720	750	160	200	225	1420	690	650	760	1180	20- $\phi 14$	8- $\phi 12$
K-630T							1480			845	1230		
K-800	800	880	920	200	250	275	1650	880	820	930	1485	20- $\phi 21$	8- $\phi 12$
K-800T							1750			1050	1550		
K-1000	1000	1090	1140	250	300	330	1930	1100	1040	1150	1840	24- $\phi 23$	8- $\phi 14$
K-1000T							2060			1310	1920		

⑧沈阳恒星实业有限公司生产的 K、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-46。

表 4-46 K、KT 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

									
型 号	L	A	H	D_N	D	D_1	d_N	d	d_1
K-200	210	250	550	200	275	250	63	125	105
KT-200			610						
K-300	285	330	690	300	380	350	80	145	125
KT-300			740						
KT-320	280	390	788	320	425	395	80	145	125
K-400	360	440	1010	400	500	465	100	170	145
KT-400			1015						

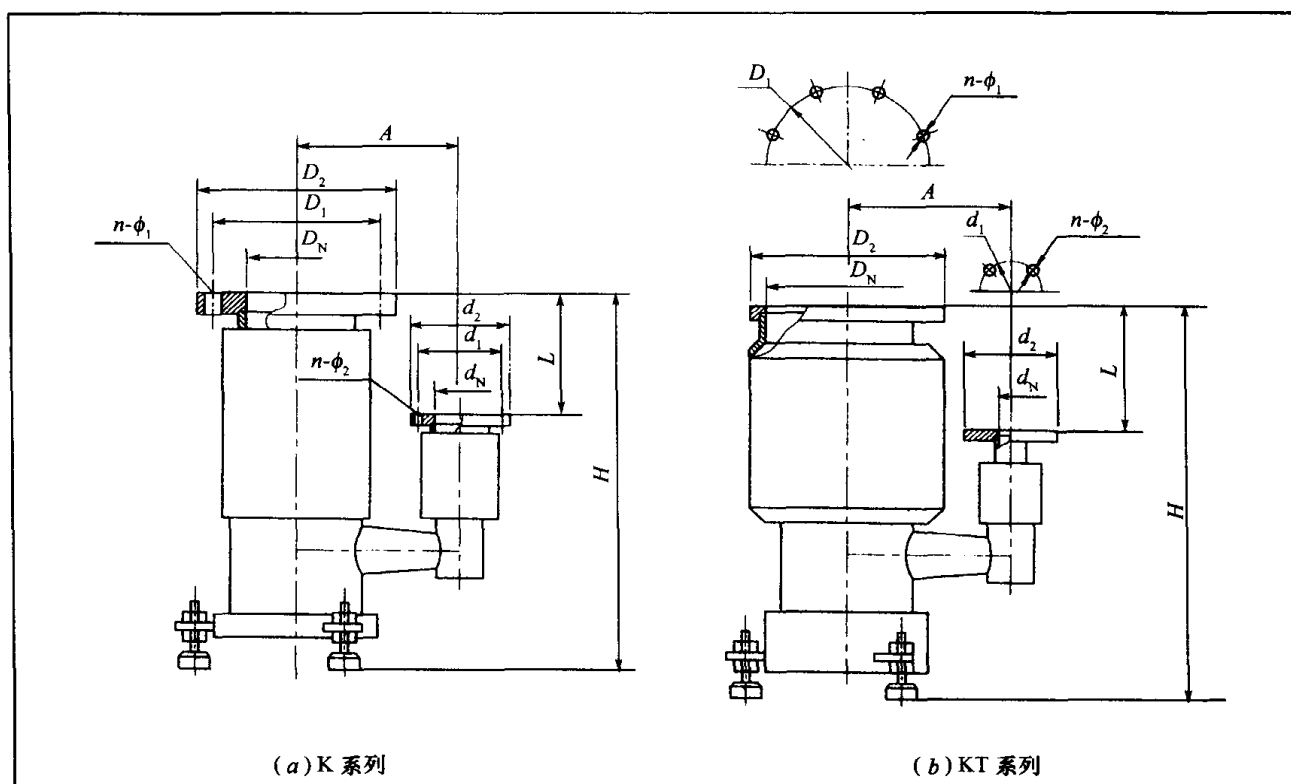
四、油扩散真空泵

(续)

型号	L	A	H	D_N	D	D_1	d_N	d	d_1
KT-600	600	660	1470	600	710	670	150	200	195
K-630	495	520	1160	630	750	720	160	225	200
KT-630	560	745	1465						
K-800	800	880	1465	800	920	890	200	285	260
KT-800			1780						
KT-1000	1000	1100	2300	1000	1120	1090	320	425	395

⑨沈阳真空泵厂生产的 K、KT 系列油扩散泵外形及安装尺寸见表 4-47。

表 4-47 K、KT 系列油扩散泵外形及安装尺寸 (单位:mm)



(a) K 系列

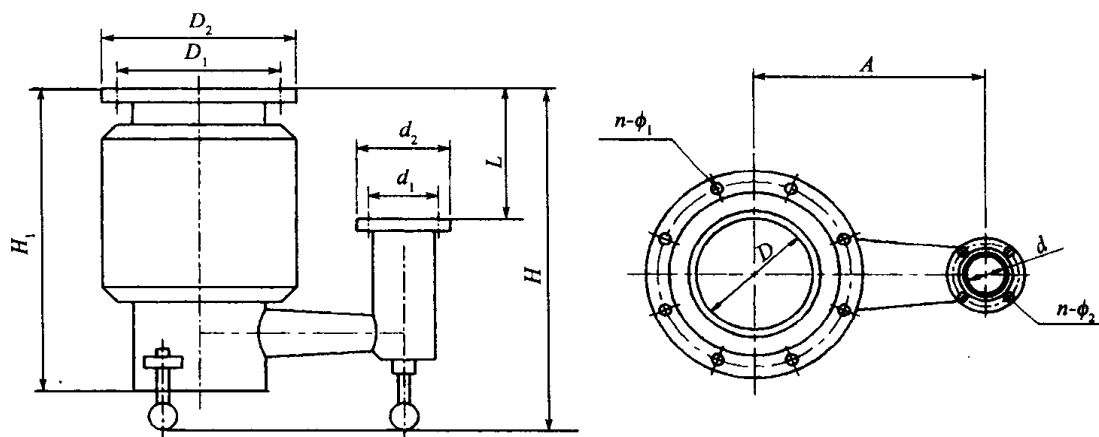
(b) KT 系列

型号	K-80	K-100	K-160	K-200	K-400	K-630	K-800	KT-200	KT-320	KT-400	KT-630	KT-800
D_N	80	100	160	200	400	630	800	200	320	400	630	800
d_N	25	32	50	65	100	160	200	65	80	100	150	200
A	105	130	180	240	465	520	880	240	350	440	660	880
L	100	125	165	200	500	495	800	200	240	360	600	800
H	300	310	470	550	1375	1160	1450	550	890	900	1336	1830
D_1	125	145	195	250	465	750	880	275	425	500	710	920
D_2	145	170	220	275	500	720	920	250	395	465	670	880
$n-\phi_1$	8- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 18$	12- $\phi 21$	8- $\phi 12$	8-12	12- $\phi 12$	8- $\phi 18$	12- $\phi 20$	20- $\phi 2$
d_1	55	64	90	105	145	200	250	125	145	170	220	385
d_2	70	78	110	125	170	225	275	105	125	145	195	260
$n-\phi_2$	4- $\phi 6.5$	4- $\phi 7$	4- $\phi 9$	4- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 11$	—	4- $\phi 9$	8- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 12$	8- $\phi 14$

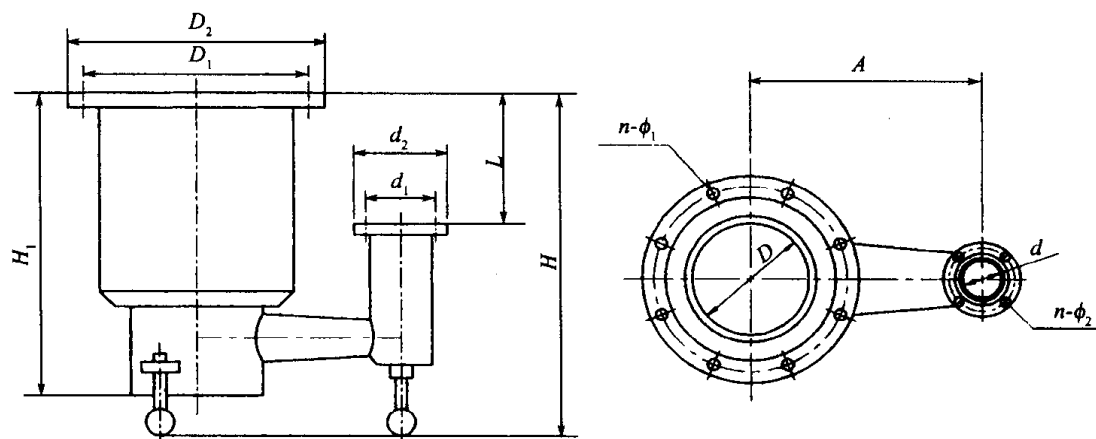
⑩沈阳真龙真空设备有限公司生产的 K、KT、KA 型和 KN、KTN 型系列油扩散泵外形及安装尺寸分别见表 4-48、表 4-49。

表 4-48 K、KT、KA 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)



(a) K、KT 型



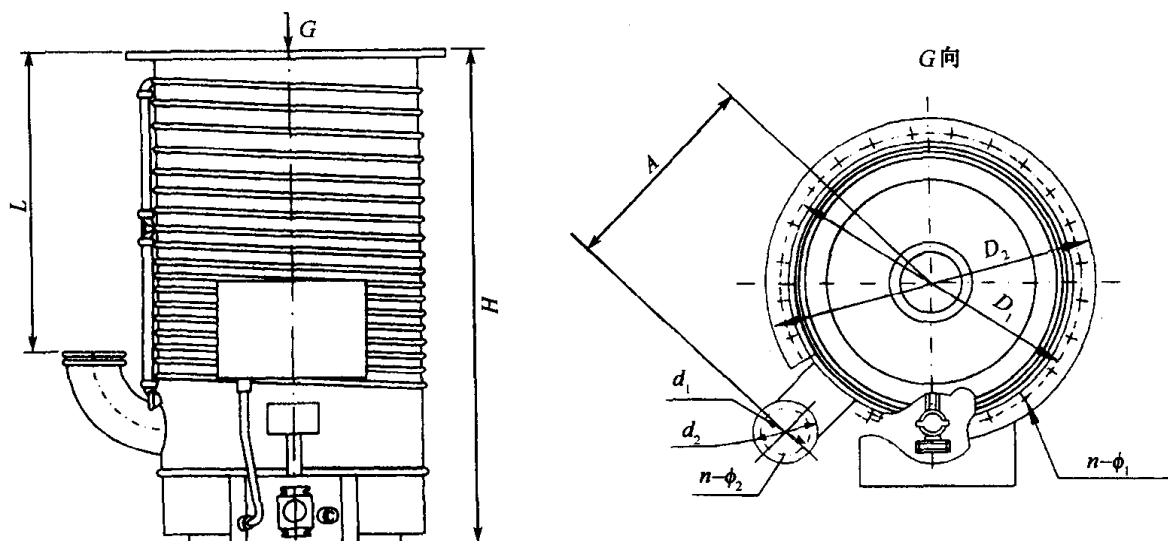
(b) KA 型

型 号	A	L	D	D ₁	D ₂	n-φ ₁	d	d ₁	d ₂	n-φ ₂	H ₁		H	
											KT	K	KT	K
KT-100 K-100	130	125	100	145	170	4-φ12	32	64	78	4-7	286			
KT-150 K-150	180	165	150	195	220	8-φ12	50	90	110	4-9	431			
KT-200 K-200	240	200	200	250	275	8-φ12	65	105	125	4-9	565		575	
KT-300 K-300	330	280	300	350	380	8-φ14	80	125	145	4-9	706		726	
KT-320 K-320	350	310	320	395	425	12-φ14	80	125	145	8-9	760		830	
KT-400 K-400	440	360	400	465	500	8-φ18	100	145	170	4-12	875		925	
KT-500 K-500	500	500	500	565	600	12-φ18	100	145	170	4-12	1076	868	1165	957
KT-600 K-600	660	600	600	670	710	12-φ21	150	195	220	8-12	1305	1040	1444	1179
KT-630 K-630	660	600	630	720	750	20-φ14	160	200	225	8-12	1214			
KT-800 K-800	880	800	800	880	920	20-φ21	200	250	275	8-12	1750	1320	1870	1440
KT-1000 K-1000	1150	1060	1000	1090	1140	24-φ23	300	350	380	8-14	2090		2220	
KT-1200 K-1200	1300	1200	1200	1310	1360	28-φ25	300	350	380	8-14	2370		2465	
KA-400	400	300	400	465	500	8-φ18	100	145	170	4-12	783		830	
KA-500	450	500	500	565	600	12-φ18	100	145	170	4-12	880		957	
KA-600	600	600	600	670	710	12-φ21	150	195	220	8-12	1055		1160	
KA-630	600	600	630	720	750	20-φ14	160	200	225	8-12	1080		1200	
KA-800	800	800	800	880	920	20-φ21	200	250	275	8-12	1335		1440	
KA-1000	1000	1060	1000	1090	1140	24-φ23	300	350	380	8-14	1760		1890	
KA-1200	1200	1200	1200	1310	1360	28-φ25	300	350	380	8-14	2100		2230	

生产厂:沈阳真空真龙设备有限公司

表 4-49 KN、KTN 型系列油扩散泵外形及安装尺寸

(单位:mm)

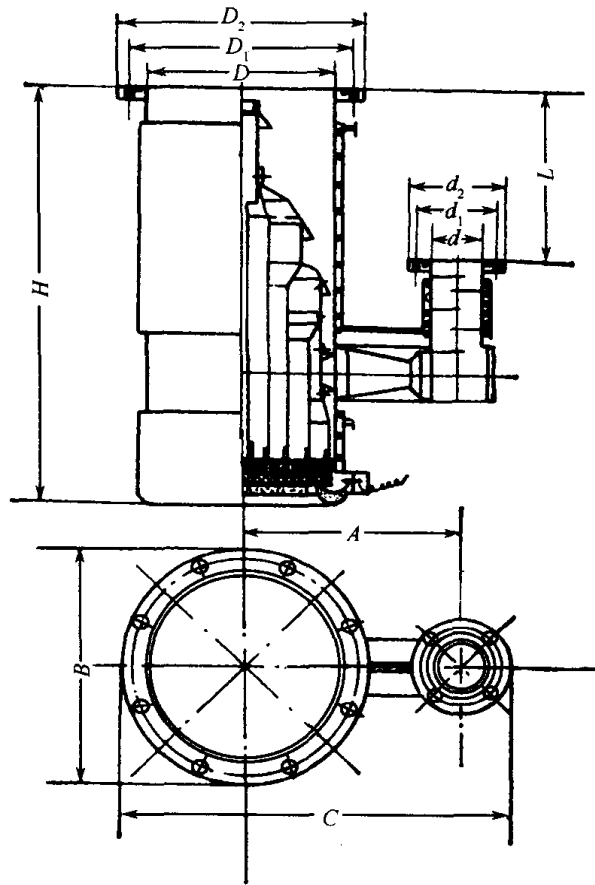


型 号	A	L	D	D ₁	D ₂	n-φ ₁	d	d ₁	d ₂	n-φ ₂	H
KN-100 KTN-100	104	125	100	145	165	8-10	32	70	90	4-9	250
KN-150 KTN-150	146	188	150	195	220	8-12	50	90	110	4-9	375
KN-200 KTN-200	196	246	200	260	285	12-12	63	110	130	4-9	492
KN-300 KTN-300	265	305	300	350	380	8-14	63	110	130	4-9	610
KN-320 KTN-320	280	330	320	395	425	12-14	63	110	130	4-9	660
KN-400 KTN-400	350	400	400	480	510	16-14	63	110	130	4-9	785
KN-500 KTN-500	420	470	500	580	610	16-14	100	145	165	8-10	940
KN-600 KTN-600	540	620	600	670	710	12-21	100	145	165	8-10	1130
KN-630 KTN-630	540	620	630	720	750	20-14	100	145	165	8-10	1130
KN-800 KTN-800	600	870	800	890	920	24-14	160	200	225	8-12	1450
KN-1000 KTN-1000	800	1275	1000	1090	1120	32-14	160	200	225	8-12	1880
KN-1200 KTN-1200	905	1445	1200	1310	1360	28-25	200	260	285	12-12	2130

①沈阳真空机械三厂生产的 K、KT 系列扩散泵。

表 4-50 K、KT 系列高真空扩散泵外形及连接尺寸

(单位:mm)



型 号	D	D_1	D_2	d	d_1	d_2	A	L	H	B	C
K-100	100	145	170	32	64	78	130	125	367	227	299
K-150	150	195	220	50	90	110	180	165	520	284	320
K-200	200	250	275	65	105	125	240	200	596	336	399
K-300	300	350	380	80	125	145	330	280	754	490	575
K-400	400	465	500	100	145	170	440	360	1016	555	780
K-600	600	670	710	150	195	220	660	600	1487	823	1310
K-800	800	880	920	200	250	275	880	800	1830	1000	1600
KT-200	200	250	275	65	105	125	240	200	596	336	399
KT-300	300	350	380	80	125	145	330	280	754	490	575
KT-400	400	465	500	100	145	170	440	360	1016	555	780
KT-600	600	670	710	150	195	220	660	600	1487	823	1310
KT-800	800	880	920	200	250	275	880	800	1830	1000	1600

(九) 蒸气流真空泵性能测试方法(摘自 JB / T 8272.1—96)

1. 抽气速率(体积流率)的测定

(1) 定义

本标准采用下列定义:

①抽气速率(体积流率)。理论概念是指单位时间内通过标准测试罩流经泵入口截面的气体体积,简称为抽速。其单位是 L/s。

实际计算泵按规定条件工作时,对给定气体的抽气速率 S ,是通过测试罩的气体流率 Q 除以测试罩指定位置平衡压力 p 所得之商确定:

$$S = Q/p$$

对蒸气流泵来说,只有当 p 超过 10Pa 时,抽气速率的计算才接近真实值。此处 p 是用相同的真空计测得的极限压力。

②测试罩。装在泵入口处的具有规定的型式和尺寸的组件。试验气体通过罩进入泵内,其侧壁装有进气微调阀和真空计规管。

③极限压力。泵按规定条件工作,关闭进气阀门,在测试罩内趋向稳定的最低压力。

(2) 测试装置

①装置的组成 与被测泵相连接的测试罩侧壁,装有真空计规管和进气微调阀,通过微调阀与气体流率测试装置相连接。

②测试罩 如图 4-48 所示,测试罩为一圆形钟罩式组件,其内径 D 与泵入口内径以及挡板、冷阱的进口内径相同。罩体上盖为与水平面呈 10° 角的斜面,斜面截中轴线高为 $1.5D$ 。试验气体通过弯管进入罩内,弯管开口向上,即背离泵口,且位于中轴线上,距泵入口法兰高为 D 。真空计规管连接管在罩壁距泵入口法兰 $0.5D$ 处,其轴线垂直于测试罩轴线,罩轴线垂直于泵入口法兰平面。

注:如果泵内的零件超出了泵入口法兰平面,这些伸出零件最高点的参考平面及在这个平面距泵口距离由制造厂确定。

③真空计 规管与测试罩间连接管的流导,至少应为 3L/s 。连接管端突出于罩内壁长度不超过连接管内径的 0.5 倍,一般可取 5mm ,开口平面应平行于气流流动方向。如果使用冷

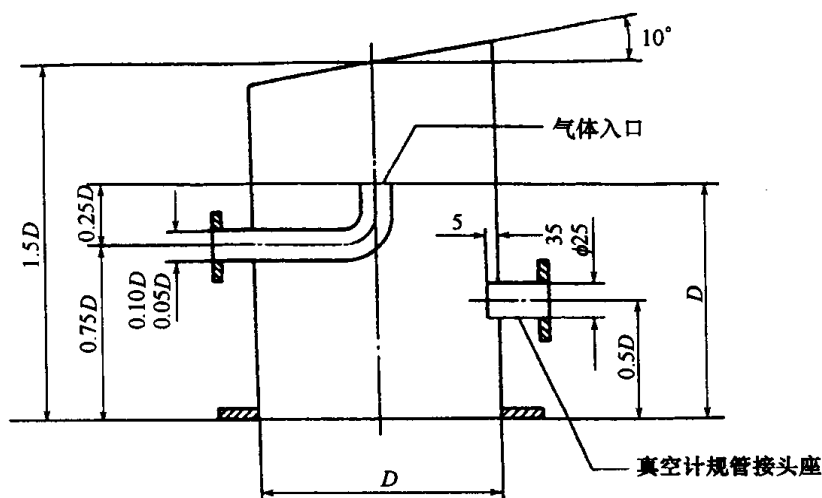


图 4-48 测试罩

阱,则应放置于规管与测试罩之间,且保持冷剂的液位不变。

测试过程中真空计压力读数取二位有效数字,并注明真空计种类。所用真空计必须经过国家计量部门承认的校准单位对于干燥空气进行校准。

当压力高于或等于 1Pa 时,校准精度应在 $\pm 5\%$ 以内。压力更低时,校准精度应在 $\pm 10\%$ 以内。

④气体流率测量方法及装置 根据气体流率选用测量方法及装置。通常大多采用滴管式测量装置,由倒置滴管、测量液、贮液槽以及连接胶管等组成。圆形贮液槽直径应大于滴管直径的 5 倍。滴管容量可根据被测泵气体流率选择。详见本标准的附录 A。

气体流率的测量精度规定如下:

- a. 流率大于 $9.9 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 为 $\pm 3\%$;
- b. 流率范围 $9.9 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 9.9 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 为 $\pm 5\%$;
- c. 流率更小时, 为 $\pm 10\%$ 。

注:理想气体情况,假设为 20°C 。

(3)测试条件

①试验气体 除另有规定外,应使用环境干燥空气。

②环境温度 除另有规定外,测试过程应在 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 的某一温度下进行,允许在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内变动。

③泵的加热和冷却 泵的加热功率及冷却条件,应符合制造厂的规定。测量前 30min 起,加热功率的变化应在 $\pm 5\%$ 以内。

④泵液及前级泵 泵液的种类、牌号和用量以及配用前级泵,均应符合制造厂的规定。

(4)测试方法和程序步骤

①原理 所采用的方法是定压法。在测试过程中,泵口吸入压力保持不变。实际上,测试罩内测得的压力保持不变,就认为这个条件满足了。

②程序步骤 为测试抽气速率,应将测试罩、真空计和气体流率测量装置,按(2)中④的要求装配到被测泵上。在气体流率测量装置与测试罩之间,设置一个具有适当调节范围的进气微调阀。

按第(3)条规定测试条件泵正常工作,关闭进气微调阀,抽空测试罩。达到或接近极限压力,并且泵达到平衡温度。

测量气体流率之前,应先通过滴管内液位的升降动作,使内壁润滑,并进行测试装置的气密封检漏试验。微调阀到滴管之间不得漏气。

开启微调阀,使气体进入测试罩内。在所需的泵口吸入压力范围调节压力,按算术平均值读取压力值。流率测试前应使系统达到压力平衡状态。

抽气速率(体积流率)测试过程,应从最低吸入压力开始逐点进行(每个数量级内至少测五点,约在 1.6, 2.5, 4, 7 和 10)。但对增压泵,则从最高吸入压力开始进行系列测量。对每个测量点,应尽可能同时测得泵口吸入压力、环境大气压力和气体流率。如果向测试罩输入气体时间超过 60s,则压力测量应以 60s 为一个周期,取平均值。如果输入气体进行中的压力读数波动过大,最高与最低值之差超过 10%,则测量操作应重新进行。

不同压力点两次气体流率测量之间的时间间隔,最小为 2min。

气体流率及抽气速率的测试与计算方法详见本标准的附录 A。

(5)测试结果

测试结果以坐标曲线表示:

①抽气速率(体积流率)与吸入压力的关系曲线。横坐标为对数坐标,表示吸入压力。其范围从极限压力直到大气压力或适合于泵的设计要求的其它压力范围。纵坐标为直线坐标,表示抽气速率。

②气体流率与吸入压力的关系曲线。在对数坐标图上,横坐标表示吸入压力,纵坐标表示气体流率。

(6)测试报告

测试报告应包括下列内容:

- ①所用测量仪器的型号及工作条件;
- ②用于泵入口法兰密封垫类型;
- ③所用挡板和(或)阱的类型及其测试时的温度;
- ④测试时泵的冷却水或冷剂最高与最低进、出口温度;
- ⑤冷却水流率;
- ⑥泵工作液的牌号及用量;
- ⑦所用前级泵的型号及抽气速率;
- ⑧测试时,泵的加热功率及其波动范围;
- ⑨用以测量前级压力的仪器及类型;
- ⑩环境温度。

2. 极限压力的测定

扩散泵的抽速只能在高真空范围测量。因此制造厂的样本中可以列出或不列出极限压力值。如果制造厂对极限压力加以说明,则必须给出获得测量结果的操作条件与测量方法。为使各厂测量结果具有可比性,规定了统一的方法,详见本标准的附录 B。

3. 附录 A 气体流率及抽气速率的测试与计算(标准的附录)

(1)采用滴管装置进行测试与计算

按本标准(1)所述,泵按规定条件工作时对给定气体的抽气速率 S ,是通过测试罩的气体流率 Q 除以测试罩指定位置平衡压力 p 所得之商确定

$$S = \frac{Q}{p} \quad [\text{L/S}] \quad (4-63)$$

按《真空泵抽速测试的理论分析与实用计算》文中推导的计算公式,如图 4-49 所示,有

$$Q = \frac{Kh}{t} \quad (4-64)$$

$$\text{则} \quad S = \frac{Q}{p} = \frac{Kh}{pt} \quad (4-65)$$

式中 S ——被测真空泵抽气速率[L/s];
 Q ——单位时间流过泵口的气体流率[Pa·L/s];
 p ——测试罩指定位置的平衡压力[Pa];
 h ——滴管内液柱所测净升高度[mm];
 t ——液柱净升高度 h 所需时间[s];
 K ——滴管函数[Pa·L/mm]。

$$K = p_{a1} \cdot \Delta V_1 \left[1 + \frac{9.80665 \rho (V_0 - 2h_0 \cdot \Delta V_1 - \Delta V_1 \cdot h)}{p_{a1} \cdot \Delta V_1} \right] \quad (4-66)$$

式中 p_{a1} ——测试当地大气压力[Pa];
 ΔV_1 ——沿铅垂方向,滴管每升高 1mm 相应容积增量[L/mm];
 V_0 ——测试前,滴管内从液面到微调阀间原始容积[L];
 h_0 ——测试计时开始时刻,滴管内部液位已升高高度[mm];
 h ——从 h_0 算起,在时间 t 内液位净升高高度[mm];
 ρ ——贮液槽所装液体(如变压器油)的密度[g/cm³].

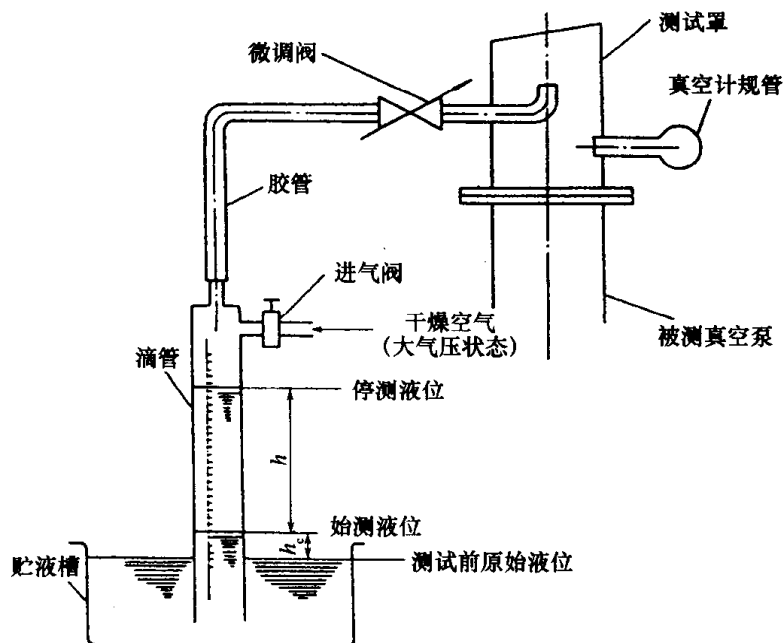


图 4-49 气体流率测试装置

(2) 滴管容量的选择及其与贮液槽的关系

不失一般性,圆形贮液槽与滴管直径之比值应足够大,该比值至少应大于 5。

滴管容量可根据被测泵所抽气体流率参照表 4-51 选择。

表 4-51 滴管容量的选择

气体流量 /Pa · L · s ⁻¹	< 10	10 ~ 50	> 50 ~ 100	> 100 ~ 500	> 500 ~ 1000	> 1000
滴管容量 /mL	5 ~ 10	10	20	50	100 ~ 200	> 200

4. 附录 B 极限压力的测定(标准的附录)

如果极限压力作为泵的独立测试项目测试时,需按下述规定进行:

①扩散泵自加热开始,连续工作不超过 8h,读取极限压力值。读表记数之前,应按真空计的操作要求,对真空规管除气 8min。除气后 1h 开始记录读数,并保持规管连续工作,每隔 10min 记录一次。最后 1h 内各次数的平均值,作为泵的极限压力。

扩散喷射泵(油增压泵)自加热开始,连续工作 5h,便可读取极限压力值。

②测量极限压力所用真空计及其规管,应符合本标准(2)中③的规定,但不用冷阱。

5. 临界前级压力的测定(摘自 JB/T8472.2—96)

(1)定义

本标准采用下列定义:

①临界前级压力 一般工况,对于泵稳定工作时相应的气体流率,临界前级压力是符合下述条件的诸前级压力的最小值:这些前级压力微小的增高率都使吸入压力产生规定的增高率。实际应用中,此规定的增高率的最小值是 10%。

若相应的气体流率为零,即泵口为极限压力,则称为空载临界前级压力。

若相应的气体流率为最大,即泵口为最大吸入压力,则称为满载临界前级压力,代表泵的临界前级压力值。这是泵维持正常工作所允许的最高前级压力。

②测试罩 指装在泵入口处的具有规定的型式和尺寸的组件。试验气体通过罩进入泵内,其侧壁装有进气微调阀和真空计规管。

③极限压力 泵按规定条件工作,关闭进气阀门,在测试罩内趋向稳定的最低压力。

(2)测试装置

①测试罩 如图 4-48 所示,应符合 JB/T 8472.1—96(2)中测试罩的规定。

②测试装置的组成 测试装置如图 4-50 所示,需要下列设备:

a. 将气体引入测试罩的进气微调阀(A)与适宜的气体流率测量仪相连接。

b. 设于前级泵入口附近的进气微调阀(B),该阀(B)与规管(对应于 C)之前相应前级管路长度应大于 200mm。

c. 用以测量前级管路压力的真空计(C)的规管靠近蒸气流泵出口。该规管装于前级管路直的、内径均匀的部位。前级管路内径与蒸气流泵出口内径相等。规管接管应与该部位前级管路轴线垂直,接管管端与前级管路内表面平齐。

真空计(C)的规管的接管尺寸应保证其最大流导。规管与前级管路之间的接管长度应不超过 150mm。

d. 测量测试罩压力的真空计(D)的规管接管插入罩内的长度,不得超过连接管内径 d_2 的 0.5 倍。

测试过程中,真空计压力读数取两位有效数字,并注明真空计种类。所用真空计必须经过国家计量部门承认的校准单位对干燥空气进行校准。

当压力高于或等于 1Pa 时,其校准精度在 $\pm 5\%$ 以内。压力更低时,校准精度在 $\pm 10\%$ 以内。

③试验气体 除另有规定外,应使用干燥空气。

注:一般采用硅胶使空气干燥是适宜的。

(3)测试条件

测试报告应包括测试期间下列条件的说明:

①全部试验仪器的类型和工作条件;

②泵的加热功率及测试过程中的变化情况;

③在测试期间如果用水或冷剂冷却蒸气流泵,其最高与最低进、出口温度;

④如果用水冷却,其流率;

⑤测试时最高与最低环境温度;

⑥蒸气流泵泵液的种类和数量;

⑦对环境某种特殊热传导特征。

(4)测试程序

①概述 为了测量临界力前级压力,蒸气流泵应按制造厂规定的泵液种类及用量、加热功率以及冷却条件进行正常工作。

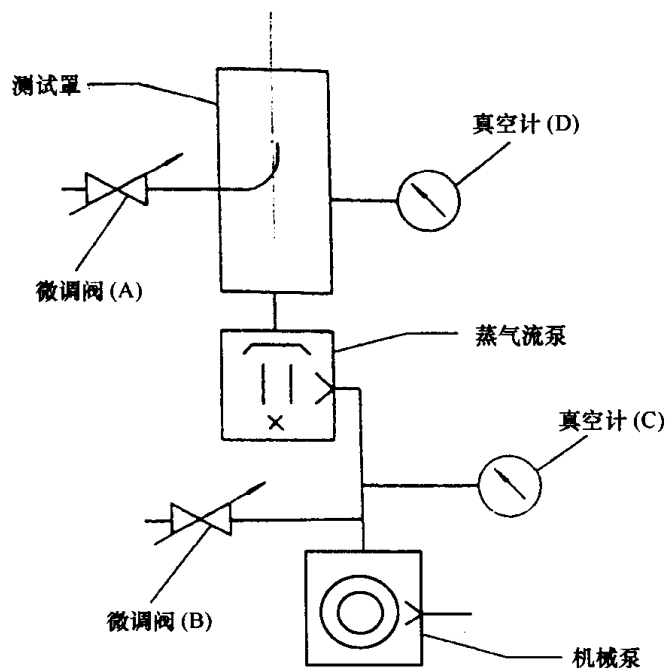


图 4-50 测试装置

测试过程中,室温应在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,测量前,泵应达到热平衡并抽至极限压力。

在这些条件下,泵入口以上装置温度(如图 4-50 所示)和泵出口法兰与进气微调阀(B)(如图 4-50 所示)间连管的温度,应稳定在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,且应在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间。

注:可以在其它室温下测量临界前级压力,如果在其它室温下测量,应适当提供所用测量仪表工作条件。

②“空载”程序 当测试罩达到极限压力时,逐渐开启前级管路进气微调阀(B),使前级管路压力以微小增量逐步升高并同时观测测试罩压力的变化,直至前级压力微小增高率使泵口吸入压力增高率达到或超过 10%。然后,通过进气微调阀(B)的控制,在此临界区域进行详细探测,从而得出随前级压力而变化的泵口吸入压力函数曲线。在该曲线上符合(1)中①所规定的增高率变化的点,便确定为“空载”临界前级压力。在气体流率为零时前级管路中的初始压力应小于测得的临界前级压力的 10%。

③“满载”、中间载程序

a. 开启测试罩侧壁的进气微调阀(A),使泵口吸入压力在符合要求的范围内测量气体流率。并重复进行空载程序所叙述的气流通过进气微调阀(B)的操作程序,测得中间载若干点的临界前级压力。在连续操作之间关闭阀(B),直至达到泵稳定正常工作最大气体流率。

注:泵稳定正常工作最大气体流率有时受前级泵抽气速率的限制,当前级泵抽气速率小于蒸汽流泵正常工作最大气体流率除以前级压力所得之商时,需要更换前级泵。直到满足蒸汽流泵最大气体流率的要求为止。

通过进气微调阀(A)控制测试罩压力,稳定在最大吸入压力附近。例如,油扩散泵为 $3 \times 10^{-1}\text{Pa}$,油扩散喷射泵为 $7 \times 10^{-1}\text{Pa}$,按上述程序便可测得相应的“满载”临界前级压力值,代表被测泵的临界前级压力。此值即为蒸汽流泵所允许的最高前级压力值,超过此值便破坏了正常工作。

b. 在进行(4)中②“空载”程序和(4)中③“满载”中间载程序所述试验时,从测量前 3min 开始,蒸汽流泵的加热功率应保持在正常值的 $\pm 4\%$ 。冷却波动率在制造厂推荐值的 $\pm 10\%$ 内保

持恒定。

(5) 测试报告

在测试结果中,临界前级压力的单位是 Pa,气体流率的单位是 $\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。除另有规定外,临界前级压力与气体流率间的关系曲线应在坐标图中表示。(1)中的①所述以确定临界前级压力的泵口吸入压力增高率,应在图中表示出来。

在高真空侧压力没有突然升高的情况下,应该提供气体流率为零时,表示前级压力与高真空的关系曲线。

6. 加热时间和加热功率的测试方法(摘自 GB7775—87)

(1) 术语

①加热时间 指开始接通泵的加热电源到泵起抽气作用时的时间间隔。

②加热功率 指泵在正常工作时,其加热器所消耗的电功率。

③测试罩 指装在泵入口处的、具有规定的型式和尺寸的容器。测试气体通过罩充入泵内,其侧壁装有微调阀及真空计规管。

(2) 测试装置

①测试装置的组成 测试装置如图 4-51 所示,与被试泵相连接的测试罩侧壁装有真空计规管和微调阀。

②测试罩 测试罩为如图 4-48 所示的圆形容器的。罩的内径 D 与泵口内径相等,顶部具有 10° 斜面,轴线高度为 $1.5D$ 。气体通过弯管充入罩内,弯管开口向上,且位于测试罩轴线上。弯管开口平面与泵口法兰平面的距离为 D ,规管与罩的连接管在距泵口法兰平面 $0.5D$ 处,其轴线垂直于测试罩轴线。

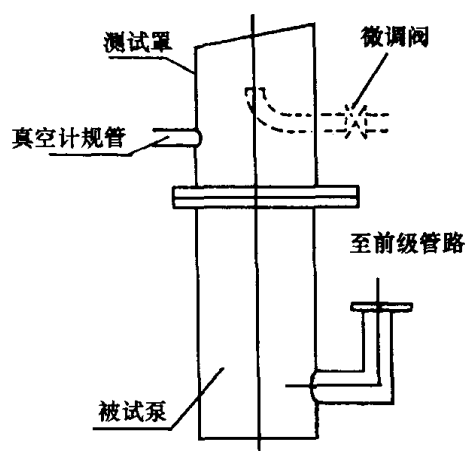


图 4-51 测试装置图

③真空计规管与测试罩间连接管的流导至少应为 3L/s 。连接管端应突出于罩内壁 5mm 。开口平面应平行于气流流动方向。如果使用冷阱,则应放置于规管与测试罩之间,且保持冷剂的液位不变。

注:使用固体二氧化碳(干冰)和乙醇的混合物,将冷阱冷却到 $-10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$,不得使用液氮。

测试过程中真空计压力读数取两位有效数字,所用真空计,应经过国家计量部门承认的校准单位使用干燥空气进行校准。

当压力高于或等于 1Pa 时,校准精度应在 $\pm 5\%$ 以内;压力低于 1Pa 时,校准精度应在 $\pm 10\%$ 以内。

④瓦特表(功率表) 根据泵的加热器功率及接线方式,选用适当的瓦特表。所用单相瓦特表精度不低于 0.5 级,三相瓦特表不低于 1.0 级。

⑤电流互感器 当泵加热器每相电流强度超过 5A 时,使用瓦特表测量功率必须配用电流互感器,其变比应能保证瓦特表的读数大于满刻度的二分之一。互感器精度应不低于 0.5 级。

(3) 测试条件

①测试气体 除另有规定外,应使用干燥空气。

②环境温度 除另有规定外,测试过程应在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的某一温度下进行,并允许波动 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

③泵的加热和冷却 泵的加热功率及冷却条件按制造厂的规定。加热功率的变化应在 $\pm 5\%$ 以内。

④泵液及前级泵 泵液的种类、牌号和用量以及配用前级泵,均按制造厂的规定。

(4)测试方法及步骤

①加热时间的测试 启动并接通前级泵,预抽被试泵及测试装置系统。经微调阀控制测试罩内压力为 10Pa ,然后测得自接通被试泵加热器电源到罩内压力降至 10^{-1}Pa 所需的时间,这段时间即为泵的加热时间。

②加热功率的测试

用瓦特表及电流互感器测量被试泵加热器电功率。

在加热功率测试过程中允许使用交流稳压器,以维持稳定的电功率。

(5)测试报告

测试报告内容如下:

①列出加热时间及加热功率的测试数据。如果被试泵采用大小不同的两种功率分别作为启动功率及正常运行功率,则应特别说明。

②注明下列测试条件:

- a. 真空计及其规管的型号和校准情况;
- b. 泵的加热功率及其在测试过程中的变化情况;
- c. 泵液的牌号及数量;
- d. 泵的冷却水进、出口温度及流量;
- e. 配用前级泵的型号及抽速;
- f. 环境温度及大气压。

7. 泵液返流率测试方法(摘自 GB7776—87)

(1)术语

①泵液返流率 泵按规定条件工作时,在单位时间内通过泵入口单位面积并与被抽气体流动方向相反的泵液质量流量。

②测试罩 指装在泵入口处的,具有规定的型式和尺寸的容器。测试气体通过罩充入泵内,其侧壁装有充气阀、真空计规管。

(2)测试装置

①测试装置的组成 测试装置如图 4-52 所示,测试法兰装配在被泵与测试罩之间,集液管经真空胶管与测试法兰相连接。

②测试罩 测试罩为如图 4-48 所示的圆筒形容器,罩的内径 D 与泵口内径相等,顶部具有 10° 斜面,轴线高度 $1.5D$ 。气体通过弯管充入罩内,弯管开口向上,且位于测试罩轴线上。弯管开口平面与泵口法兰平面的距离为 D ,规管与罩的连接管在距泵口法兰平面 $0.5D$ 处,其轴线垂直于测试罩轴线。

测试罩外表面绕焊水冷管或其它水冷装置,专用于泵液返流率的测试。

③测试法兰 如图 4-52 所示,用一个内表面开设有斜槽的法兰收集返流的泵液。法兰内径与泵口及测试罩内径相同。

④集液管 如图 4-52 所示,为一下端封闭、竖直安装且带有 1/10mL 刻度的玻璃管。经真空胶管将集液管上端与测试法兰相连接,用以收集返流的泵液。管的刻度误差应不大于 $\pm 5\%$ 。

⑤真空计 规管与测试罩间连接管的流导至少应为 3L/s。连接管端应突出于罩内壁 5mm。开口平面应平行气流流动方向。

在测试过程中,真空计压力读数取两位有效数字。所用真空计,必须经过国家计量部门承认的校准单位使用干燥空气进行校准。

当压力高于或等于 1Pa 时,校准精度应在 $\pm 5\%$ 以内;压力低于 1Pa 时,校准精度应在 $\pm 10\%$ 以内。

如果真空计规管与测试罩之间已装设冷阱,则在泵液返流率的测试过程中不许装添冷剂。

(3)测试条件

①测试气体 除另有规定外,应使用干燥空气。

②环境温度 除另有规定外,测试过程应在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 内的某一温度下进行,并允许波动 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

③泵的加热和冷却 泵的加热功率和冷却条件,按制造厂的规定。加热功率应维持稳定,其变化应小于 $\pm 5\%$ 。

④泵液及前级泵 泵液的种类、牌号和用量以及配用前级泵,均按制造厂的规定。

(4)测量过程及计算步骤

如图 4-52 所示,将测试罩、真空计、测试法兰以及集液管装配到被试泵上。

在第(3)条规定测试条件下,泵接通后抽空测试罩。当集液管内出现返流的泵液时,开始记录时间、测试罩内的压力及集液管内积存的泵液体积。在测试过程中,测试罩应在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 内的某一温度下保持稳定,并允许波动 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

所需的测试时间,取决于泵的规格及泵液返流率。

集液管内积存的泵液体积随着时间的延长而增多。应用下式将泵液体积进行换算

$$G = \frac{V\rho}{F} \times 1000 \quad (4-67)$$

式中 G ——集液管内积存的泵液质量与泵入口面积之比 [mg/cm^2];

V ——集液管内积存的泵液体积 [cm^3];

ρ ——泵液的密度 [g/cm^3];

F ——泵入口面积 [cm^2]。

以时间变量 t 与相应的一系列 G 作为横、纵坐标点 (t, G), 绘制 $G-t$ 关系曲线, 如图 4-53 所示。如果某一时刻后, 与连续测得的多数坐标点对应的直线的斜率保持不变, 则该斜率即为被试泵的泵液返流率 R

$$R = \frac{\Delta G}{\Delta t} \quad [\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})] \quad (4-68)$$

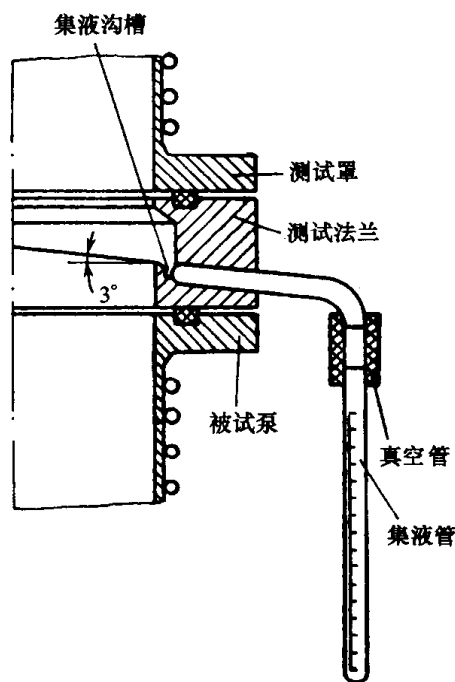


图 4-52 测试装置

式中 Δt ——测试时间[min]。

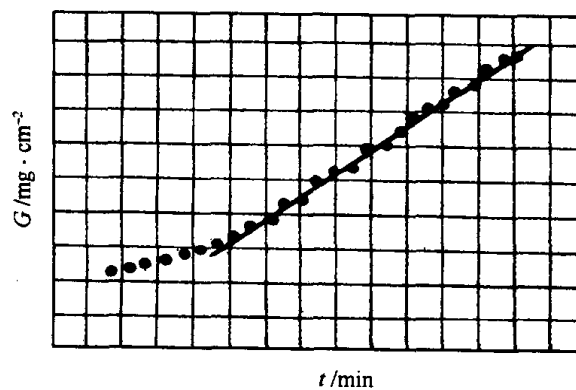


图 4-53 泵液返流率

(5)测试报告

测试报告内容如下：

①注明下列测试条件：

- a. 真空计及其规管的型号和校准情况；
- b. 泵的加热功率及其在测试过程中的变化情况；
- c. 泵液的牌号及数量；
- d. 泵的冷却水进、出温度及流量；
- e. 配用前级泵的型号及抽速；
- f. 环境温度及大气压。

②列表说明测试过程中所记录的时间 t 、测试罩内的压力 p 以及集液管内积存的泵液质量与泵口面之比 G 。

③绘制 $G-t$ 关系图,示出表示泵液返流率的直线的斜率 R 值。

第五章 气体捕集真空泵

一、钛 泵

(一) 概述

许多化学性质活泼的金属元素,如钛、钨、钽、钼、锆、钽、钙、钡等都具有很强的吸气能力。其中由于钛有强烈的吸气能力,在室温下性质稳定、不易燃烧爆炸、易于加工成形,所以近来广泛地用于真空技术中,并逐渐发展成为一种无污染的(指碳氢化合物而言)超高真空泵——钛泵。在可控热核反应装置、各种加速器装置、空间环境模拟、半导体元件的镀膜技术、电真空工业以及其它要求无污染的真空设备中,各类钛泵的应用越来越广泛。

目前钛泵的抽气机理的主要论点是:

① 活性气体分子碰撞在新鲜的钛膜上,由于化学吸附,形成稳定的化合物;随后它又被不断蒸发(溅射)而形成的新钛膜所覆盖,新鲜钛膜又继续吸附气体分子,形成稳定的抽气。

② 非活性气体分子(Ar、He等惰性气体)被电离后,在电场力的作用下打在钛膜上,随之又被蒸发的新钛膜“掩埋”掉。能量特别大的离子可直接打入钛膜内被清除掉。没有电离作用的蒸发钛泵,对惰性气体几乎没有抽气作用。

③ 活性气体分子离子化后,激发为亚稳态(或解离为单个离子)增加化学活性,使泵的抽速增加。

由于钛泵属于表面吸附泵,被抽气体没有排除到泵外。它有以下几个突出特点:

① 钛泵对被抽气体有明显的选择性。对活性气体抽速很大,对惰性气体抽速很小,因而往往需要其它类型的泵(如涡轮分子泵、扩散泵等)作为辅助泵。

② 钛泵的抽速取决于被抽气体的种类、钛蒸发速率、钛膜温度以及泵口和挡板流导等。蒸发钛泵的抽速可达百万升每秒,冷阴极溅散离子泵的抽速最大约 5000L/s。

③ 钛泵的极限真空(无气体负荷)除取决于惰性气体的分压力外,主要受钛材在高温下的出气和钛膜再解析的限制。蒸发钛泵的极限真空一般为 $10^{-6}\text{Pa} \sim 10^{-9}\text{Pa}$,冷阴极溅射离子泵为 $10^{-8}\text{Pa} \sim 10^{-10}\text{Pa}$ 。

④ 蒸发钛泵的寿命由过厚的钛膜起皮剥落、蒸发器的钛贮藏量和灯丝寿命等因素决定。为避免钛膜起皮,钛膜沉积面要经严格的化学清洗或打毛喷砂处理,钛泵泵壁冷却要良好,因为温度过高将引起钛膜脱落,抽速下降,真空度变坏。第一次使用钛泵,最好用高温烘烤来清除泵壁油膜或其它脏物,否则钛膜容易脱落。

钛泵可分为蒸发钛泵、升华钛泵、轨旋式钛泵和溅射离子泵。蒸发钛泵的蒸发量可以做得很大(目前已达 500g/h),排气量也很大(最大达 $3.5 \times 10^3\text{Pa} \cdot \text{L/s}$,对氮气),但操作维护较复杂,极限真空稍低于溅射离子泵。溅射离子泵极限真空高,操作方便,不易出故障,但钛淀积率

小,故排气量也小。真空度很高时,抽速严重下降。

(二) 升华钛泵和蒸发钛泵

蒸发钛泵和升华钛泵的缺点是工作的不稳定性带来的操作维护困难,并且要定期清洗沉积的钛膜,更换钛蒸发泵芯(升华器)。这类泵目前已属于逐渐淘汰的泵种,除少数实验室作为辅助用泵外,很少用于工业生产排气系统中。

1. 钛升华器结构

用于升华钛泵和蒸发钛泵的钛升华器性能直接影响到钛泵的工作稳定性和使用寿命,也是升华钛泵的核心。目前应用最多而且比较成熟的钛升华器结构,有下列几种形式:

(1) 缠绕钛丝式

缠绕式钛升华器的结构如图 5-1 所示。缠绕方式有:

- ① 钨或钽杆做芯金属,上面密绕一层至两层钛丝;
- ② 钨或钽杆做芯金属,上面密绕钼丝或铌丝,再在上面密绕一层钛丝;
- ③ 钨或钽杆做芯金属,上面间绕一层两根钛丝和一根钼丝。

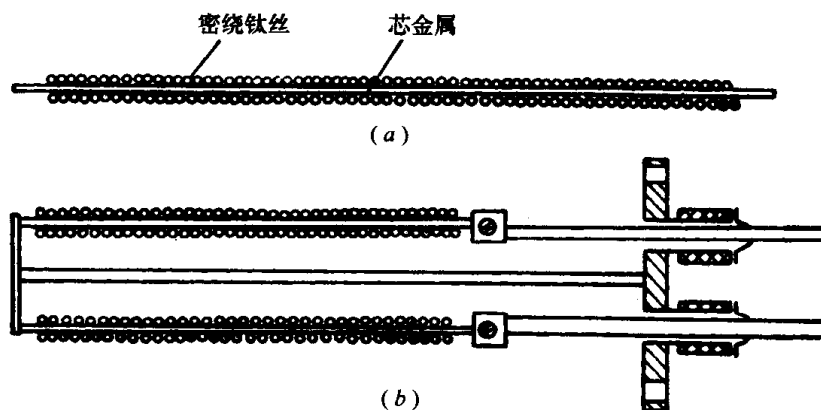


图 5-1 缠绕式钛升华器

(a) 单根缠绕钛丝升华器;(b) 带有备用的双根缠绕钛丝升华器。

典型的缠绕钛丝式升华器的电参数为:

- ① $\phi 2\text{mm}$ 钽杆上密绕一层 $\phi 0.6\text{mm}$ 钼丝,再在钼丝上密绕一层 $\phi 0.8\text{mm}$ 钛丝。

电参数:

加热电流 /A	140 ~ 160
工作温度下热电阻 $/\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	0.14 ~ 0.17
钛贮藏量 $/\text{mg} \cdot \text{cm}^{-1}$	500
可利用的钛量 $/\text{mg} \cdot \text{cm}^{-1}$	370

- ② 在直径为 $\phi 3.18\text{mm}$ 的钽杆上密绕一层 $\phi 0.76\text{mm}$ 铌丝,再绕二层 $\phi 0.76\text{mm}$ 钛丝。

电参数:

加热电流 /A	500
平均钛升华率 $/\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	46(开始蒸发的头 15min)
升华能量 $/\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	1.8×10^6
可利用的钛量 $/\text{mg} \cdot \text{cm}^{-1}$	700

- ③ 在直径为 $\phi 0.76\text{mm}$ 钨芯上间绕一层两根直径为 $\phi 0.076\text{mm}$ 钛丝和一根直径为

φ0.38mm 钼丝。

电参数:

加热电流 /A	45 ~ 48
开始升华的头 15min 平均钛升华能量 /J · g ⁻¹	3 ~ 1.3 × 10 ⁶
可利用的钛量 /mg · cm ⁻¹	60

缠绕式钛升华器结构简单,容易制作,使用维修方便,去气较彻底,易于控制钛升华率。在小型钛泵中,升华率容易做到 1mg/h ~ 100mg/h,低升华率使用时,寿命可达 400h ~ 500h。

缺点是绕制的钛丝其紧密程度很难一致,因而各段的电阻有差异。长期工作后,容易局部升华率过大,使钛丝局部温升过高以致烧断,影响使用寿命。另外过长的升华器缠制有困难。

钛泵升华率与温度的关系如图 5-2 所示,功率与温度的关系如图 5-3 所示。

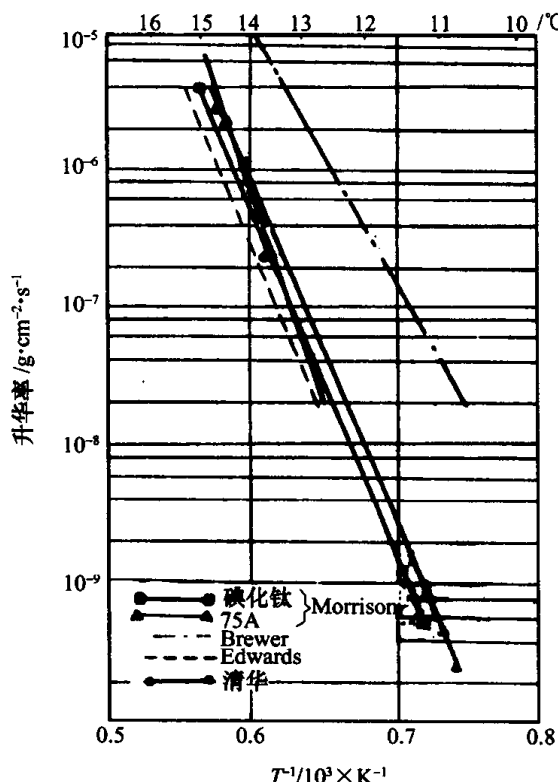


图 5-2 钛泵升华率与温度的关系
(2) 钛钼合金丝

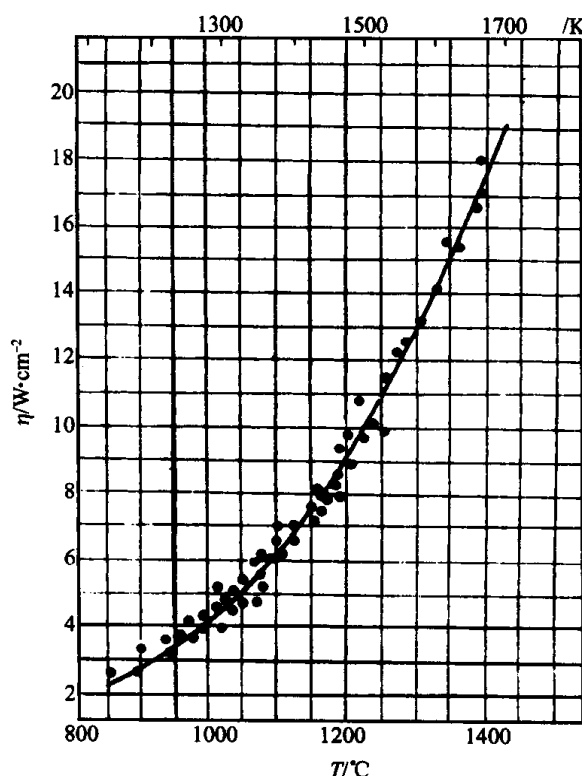


图 5-3 缠绕式钛升华器(钨芯直径 0.3mm ~ 0.74mm) 功率与温度的关系曲线

图 5-4 是一种钛钼合金丝升华器的结构示意图。

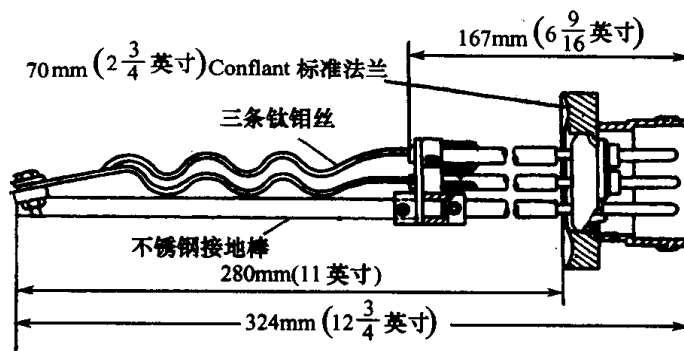


图 5-4 可拆式钛钼合金丝升华器

钛钼合金丝(85% 钛, 15% 钼) 在恒定电压下工作时, 由于不断升华, 丝逐渐变细, 引起电流和功率下降, 但又由于表面积不断减少, 温度稍微上升, 这样钛升华率大体上能保持一常数, 直到合金丝中出现大晶粒时为止。钛钼合金丝在恒定电压下工作时, 大约有 24% 的钛能以恒定的升华率升华掉。寿命终止时, 在合金中大约有 40% 的钛已升华掉。钛钼合金丝适宜的工作温度在 $1200^{\circ}\text{C} \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 之间。使用中其成分变到含 74% 钛及 26% 钼时, 晶粒开始增大, 电阻率和热辐射系数随之增加, 要维持恒定的升华率, 必须增加功率, 在寿命终了时, 电压大约增加到最初值的两倍, 电流增加一倍半左右。

钛钼合金丝有关参数如图 5-5 ~ 图 5-8 所示。

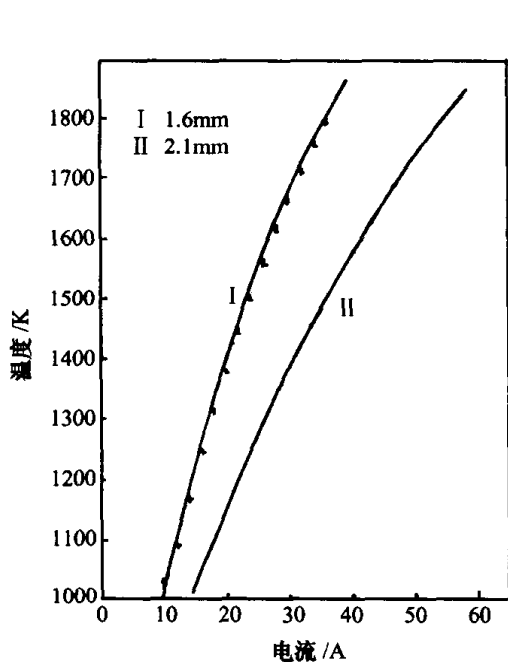


图 5-5 钛钼合金丝加热电流与温度的关系曲线

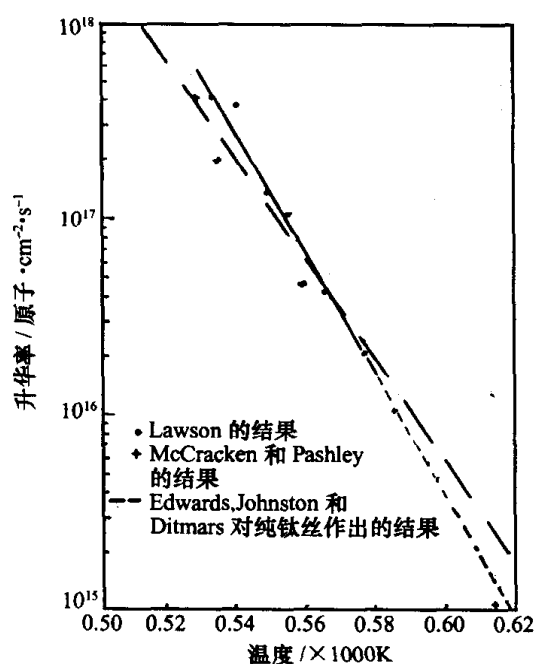


图 5-6 钛钼合金丝温度与升华速率的关系曲线

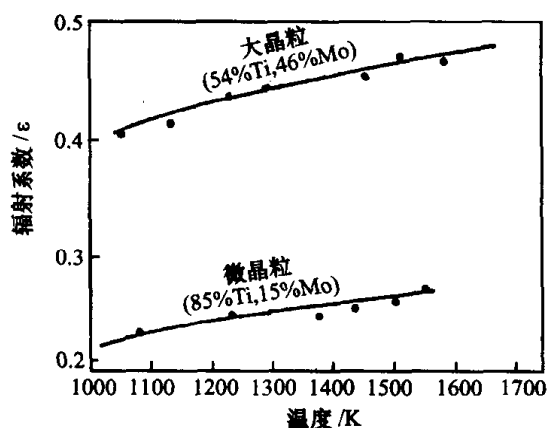


图 5-7 温度与总辐射系数的曲线

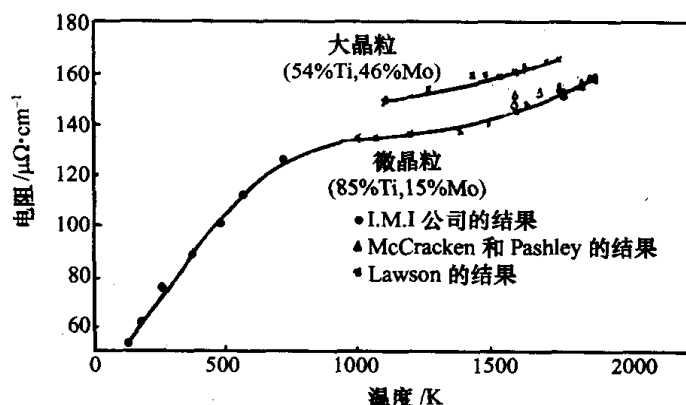


图 5-8 钛钼合金丝电阻对温度的关系曲线

假定钛钼合金丝的热损耗全部是由辐射引起的, 则在给定的温度下, 合金丝所需要的电流值与合金丝直径 d 有下列关系

$$I = Kd^{3/2} \quad [\text{A}] \quad (5-1)$$

式中 K ——给定温度下的换算系数;

d ——钛钼合金丝直径[mm]。

根据图 5-5 曲线 I 和式(5-1),可以绘出不同直径的合金丝温度—电流曲线。

钛钼合金丝的计算要点:

① 确定工作温度

钛钼合金丝工作温度 T 应低于 1830K,一般在 1200K ~ 1500K 范围内,在此温度区间,当微晶粒结构的钛钼合金丝的温度发生变化时,其电阻变化率最小(图 5-8)。过高的蒸发温度会很快形成大晶粒,使之断裂。

② 由图 5-6 可以确定升华率 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$],然后确定总升华率并计算出相应的表面面积,选定合金丝的直径、长度、根数以及支撑方式等。

③ 由图 5-7 查出在工作温度 T 下的总辐射系数 ϵ ,并计算每根丝的辐射功率 P_0

$$P_0 = \epsilon \cdot K \cdot F_0 \cdot T^4 / n \quad [\text{W}] \quad (5-2)$$

式中 K ——辐射常数 [$5.67 \times 10^{-12} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$];

ϵ ——辐射系数,取 0.24;

F_0 ——合金丝的表面积 [cm^2];

T ——工作温度[K];

n ——合金丝根数。

④ 因钛钼合金丝各端及支架、引线等传热损失的功率 P' 为

$$P' = \alpha \frac{A}{L} (\Delta T) \quad (5-3)$$

式中 α ——导热材料热导率(见表 5-1) [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$];

A ——导热材料截面面积 [m^2];

L ——导热材料长度[m];

ΔT ——导热材料两端温差[K]。

表 5-1 钛、钼合金在不同温度下热导率 α (单位: $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

T/K	400	500	700	800	900	1100	1300	1800
钛合金	15.1	14.7	13.9	—	13.4	12.6	—	—
钼合金	139	—	—	122	—	—	105	84

⑤ 计算每根丝的总加热功率 ($P = P_0 + 2P'$),并根据电阻值计算出加热电压、电流值,确定电路连接方式(串、并联)。

⑥ 估算恒定升华率下的钛钼合金丝寿命(按合金中大约 40% 的钛能升华掉来估算)

$$t = 9.44 \times 10^{-5} \frac{nG_0}{G} \quad [\text{h}] \quad (5-4)$$

式中 G_0 ——每根钛钼合金丝的质量[g];

G ——平均升华率[g/s];

n ——钛钼合金丝的根数。

钛钼合金丝升华器使用简便,在一定的工作时间内能自动调节加热电流,不致烧断。假若整个工作时间始终维持升华率不变,那就需要较复杂的电流控制程序。由于升华器钛贮量和升华率受到限制,故钛钼合金丝升华器和缠绕式钛升华器一样,不适用于在大排气量和大升华率下使用。这种升华器在长期工作之后,大晶粒开始增长(丝成分变为 74% 钛,26% 钼)。在 1550K ~ 1800K 温度范围内大晶粒生长时其丝的成分与升华温度无关。

(3) 热辐射球式

热辐射球式升华器的结构,如图 5-9 所示。钛球壳体半径 31.5mm,球壳厚度 3.8mm,球体中间有一段长度为 7.6mm 的圆柱,下部的孔是用来安放螺旋状钨热丝的[螺旋状热丝的长度和内径均为 16.5mm]。热丝一端焊在金属杆上,另一端用钼衬套与上半球相连接。钛球下半部均匀地支撑在四根钼杆上。热丝加热电流从中心金属杆经热丝、钛球和四根钼杆构成回路。当输入功率为 450W 时,钛球的升华率为 0.01g/h,而输入功率为 710W 时,钛球的升华率可达到 0.5g/h。钛重 36.8g,利用率达 71%。它的优点是在给定的输入功率下,升华率保持恒定,操作方便可靠,制作也不困难。缺点是钛储量不多,加热丝固定困难而且容量烧断。

(4) 电子轰击式

电子轰击式蒸发器是利用灯丝发射的电子经电场加速轰击钛棒使之受热蒸发。结构如图 5-10 所示,钛棒质量为 680g,直径 27mm,长度 190mm,其中只有 25.4mm 的长度可暴露在电子束下,暴露部分可以连续工作 90h。若要蒸发器继续工作,可利用螺杆推动波纹管使钛棒上升到电子束轰击区。钛棒可利用的有效长度为 114mm(质量为 400g)。轰击钛棒用的灯丝共八根,每次使用四根,剩下四根备用。灯丝工作温度为 2500K,寿命达 10000h 以上,灯丝电源电压为 6V,电流为 50A。轰击高压为 6.3kV,电流为 325mA。当轰击功率为 875W 时,升华率约为 1mg/h,另一种结构形式是在钽杯中用钨杆穿一串直径为 76mm 的钛薄片,钛片总高为 38mm。钽杯既是贮槽又是辐射屏,其上方为环状灯丝,轰击功率可在 0.6kW ~ 3kW 之间调节。轰击时上面的钛片中心局部熔化,熔化面积的大小取决于轰击功率。钛储量为 200g。当轰击功率为 1.5kW 时,升华率为 1g/h;轰击功率为 2.6kW ~ 2.7kW 时,升华率可高达 8g/h。另外还有一种用电子枪加速电子进行轰击的蒸发器,这种钛蒸发器本身不带高压,也不需要调节,装卸方便,钛储量大。缺点是必须在低于 10^{-2} Pa 压力下才能使用,否则会烧坏灯丝,此外增加了高压供电部分,体积庞大。

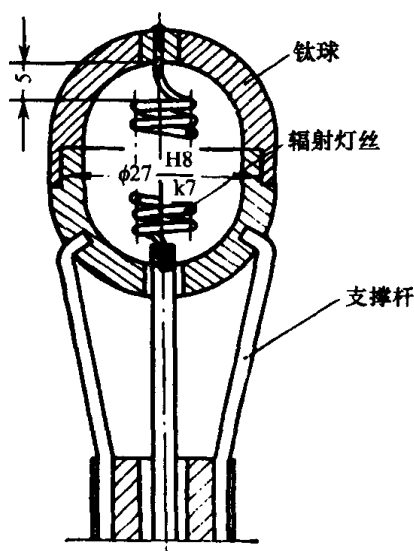


图 5-9 热辐射球式钛升华器

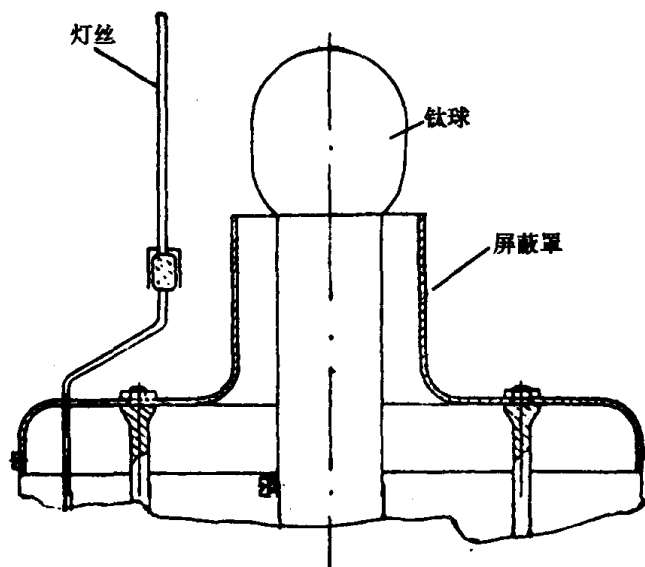


图 5-10 电子轰击式钛蒸发器

2. 国产钛升华泵主要技术性能参数

(1) 热辐射球式蒸发钛泵

上海真空泵厂、成都国投南光机器厂生产的 S 型、SP 型两种规格的钛球升华泵,采用热辐

射球式钛升华器做泵芯,泵壁水冷,靠热丝辐射加热钛球,具有蒸发面积大、升华均匀、操作方便、寿命长等特点。其主要技术性能参数见表 5-2。

表 5-2 S 型、SP 型热辐射钛球升华泵性能参数

型号	通径 D_N/mm	抽速 $/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	启动压力 $/\text{Pa}$	额定功率 $/\text{W}$	泵壁温度 $/^\circ\text{C}$	质量 $/\text{kg}$	外形尺寸 (长 \times 宽 \times 高 ^①) $/\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	生产厂家
S-175	175	750	6.7×10^{-8}	2.6	1000	< 20	27	$529 \times 177 \times 275$	成都国投 南光机器厂
S-250	250	1500					38	$365 \times 340 \times 460$	
S-350	350	3000						$752 \times 549 \times 460$	
SP-200	200	1000	10^{-8}	1.3	750	—	40	$\phi 200 \times 550$	上海真空泵厂
SP-300	300	4000					70	$\phi 300 \times 650$	

注:①上海真空泵生产的 SP 型升华泵外形尺寸为直径 \times 长度

(2) 钛钨合金丝式钛升华器

①北京中科科仪发展有限责任公司生产的 TSB 型钛升华器泵芯,主要由装有钛钨丝的支座构成。钛钨丝用螺钉固定,便于移动和更换,芯柱安装在陶瓷密封法兰上,可烘烤至 400°C 。外型尺寸图如图 5-11、5-12 所示。

②中国科学院沈阳科学仪器研制中心有限公司生产的 TSB 型钛升华泵芯外形及供电电源参数见表 5-3。

表 5-3 TSB 型钛升华泵芯供电电源性能参数

输入电压	输入电流 /A	输出功率 /W	质量 /kg
220V 50(Hz)	0 ~ 60	500	18

钛升华泵芯的规格如下:

每根钛钨丝的质量 /g	3.84
每个泵芯中的钛钨丝根数 /根	3
每根钛钨丝的含钛量 /g	$3.84 \times 85\%$
工作压力范围 /Pa	$2 \sim 1 \times 10^{-9}$

TSB 型钛升华泵其每平方厘米钛升华表面对各种气体的抽速见表 5-4。

表 5-4 1cm^2 钛升华表面对各种气体的抽速

(单位:L/s)

表面温度	H_2	N_2	O_2	CO	CO_2	H_2O	CH_4	Ar	He
20°C	3	5	9	9	8	3	0	0	0
-195°C	10	10	11	11	9	4	0	0	0

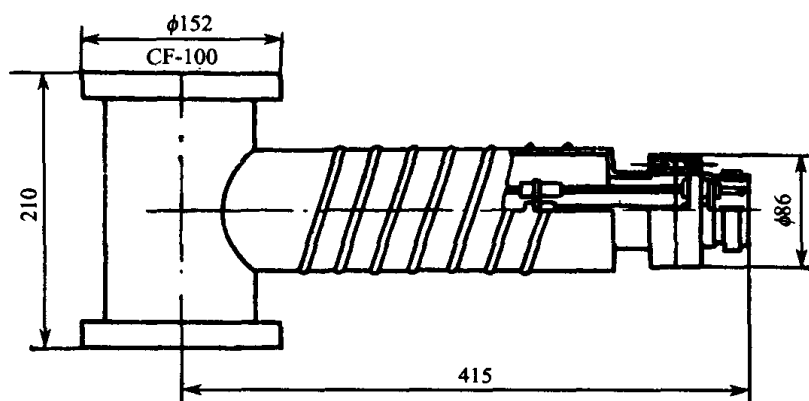


图 5-11 TSB-350 钛升华泵外形图
(北京中科科仪发展有限责任公司生产)

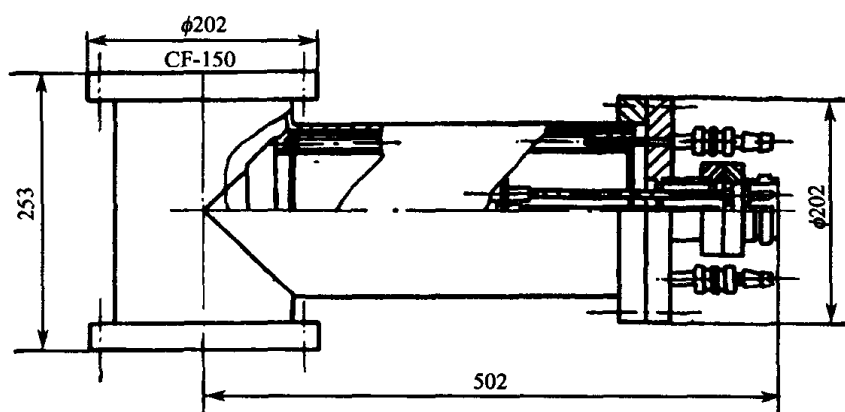


图 5-12 TSB-700 钛升华泵外形图
(北京中科科仪发展有限责任公司生产)

TSBD 型钛升华泵电源可方便有效地控制泵的工作。它分“手动模式”和“自动模式”两种。对前者,操作者可根据系统真空度,任意调节钛丝加热电流(此电流值指示在面板的电流表上)和加热时间。对后者,操作者只要旋转面板上的时间继电器,确定好钛钼丝加热的间隔时间和加热电流值,控制电源就可连续工作下去,自动控制钛丝的升华量。其技术规格见表 5-5。

表 5-5 TSBD 型电源技术性能

输入电压	220V, 50Hz
输出电流 /A	0 ~ 50
输出功率 /W	400(最大值)
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	450×405×225
质量 /kg	25

(三) 弹道式钛泵

1. 结构原理

弹道式钛泵的结构如图 5-13、图 5-14 所示。泵由处于泵壳中心的阳极(钨杆上安装 1 个 ~ 3 个钛圆柱)、接地的不锈钢外壳和发射电子的灯丝组成。两组灯丝位于阳极的侧下方(一组备用)。灯丝朝向阳极的一面设置有屏蔽片(或杆)。阳极和泵壳构成了一个同轴的径向电位为对

数分布的静电场。灯丝和屏蔽片的引入使电场产生局部畸变。只要灯丝的位置和电位(灯丝电位高于泵壳)调整得合适,就能使灯丝发射的电子以一定的角动量作圆周(或沿其它特定的轨道)运动,并沿着泵轴螺旋前进(如图 5-15 所示),最后落在阳极上。因此电子在空间有很长的平均自由程,可电离较多的气体分子,并能以很大的能量轰击钛柱,使钛柱温度升高并大量升华,升华的钛淀积在泵壁上形成吸气薄膜。活性气体被新鲜钛膜吸附。惰性气体经电离后,以离子态打在钛膜上被“埋葬”掉。

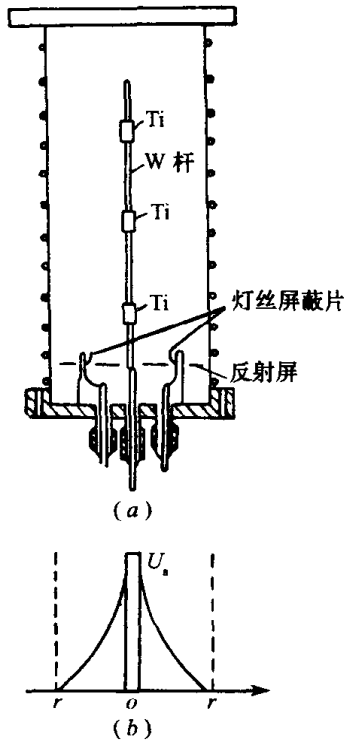


图 5-13 弹道式钛泵结构示意图

(a) 轨旋式钛泵结构示意图;

(b) 泵的静电场沿半径方向电位变化规律。

2. 电参数的近似计算

在弹道式钛泵的同轴静电场中,由于电子角动量的差异,电子运动的轨道是无穷的。在实际设计中将电子运动的轨道视为圆轨道,以确定电子发射极的位置和工作电压。这种近似计算的结果与实验的最佳值很接近。

令 V 为阳极电压, r 为阳极半径, R 为泵壳半径, R_i 为电子发射极的径向位置。

在静电场中,半径为 ρ 处的电位为

$$\phi(\rho) = V \ln \frac{R}{\rho} / \ln \frac{R}{r} \quad (5-5)$$

对一个以 ρ 为半径作圆周运动的电子有

$$\frac{mv^2}{\rho} = -e \frac{d\phi}{d\rho} \quad (5-6)$$

式中 m ——电子质量;
 e ——电子的电荷。

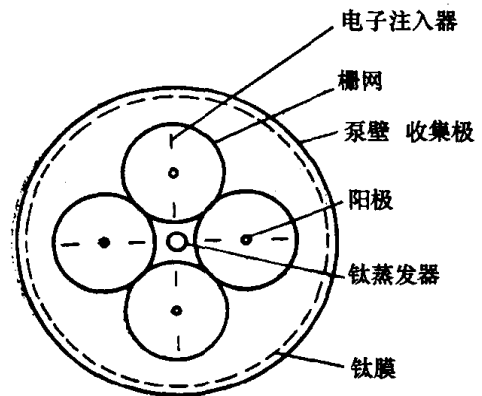


图 5-14 四芯轨旋式(复合式)钛泵结构示意图

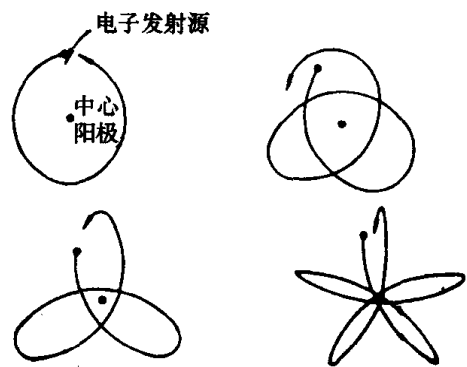


图 5-15 电子在泵内对数场中的运动轨迹

由此得出

$$\frac{mv^2}{\rho} = \frac{eV}{\rho \ln \frac{R}{r}} \text{ 或 } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{eV}{2 \ln \frac{R}{r}} \quad (5-7)$$

当电子发射极处于 bV 电位时 (b 为发射极电位对阳极电位的比值), 作圆周运动的电子的能量应是

$$\frac{1}{2}mv^2 = e[\phi(R_f) - bV] \quad (5-8)$$

由式(5-5)、(5-7) 和式(5-8) 得

$$\ln \frac{R}{R_f} = \frac{1}{2} + b \ln \frac{R}{r} \quad (5-9)$$

当 $b = 0$ 时, 即电子发射极处于零电位时, 则

$$\ln \frac{R}{R_f} = \frac{1}{2} \text{ 或 } R_f = e^{-1/2}R \quad (5-10)$$

式(5-10) 给出了发射极的最大径向位置, 设计时要取得小些, 以保证发射极正常工作。

3. 供电线路(如图 5-16 所示)

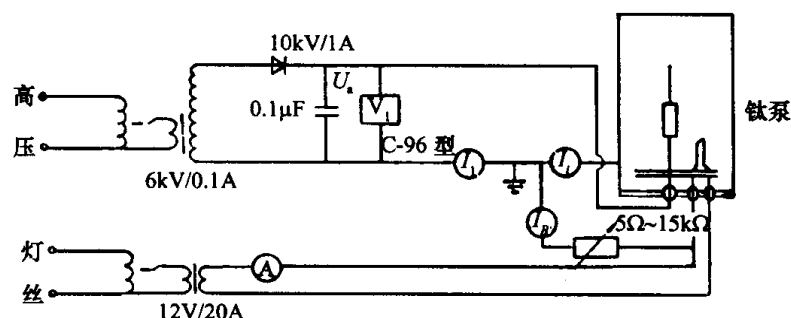


图 5-16 弹道式钛泵调试电路图

4. 弹道式钛泵的优缺点

弹道式钛泵的优点是: ① 结构简单, 体积小, 不需要磁场; ② 记忆效应和氩的不稳定性降低了; ③ 因低压下放电强度不降低, 故使泵的抽速不降低, 并能抽氩气; ④ 灯丝发射的电子除轰击钛块使之升华外, 又可用来电离气体分子, 因而它比一般升华式钛泵的抽气效果好。缺点是: ① 启动压力过低; ② 工作性能不稳定; ③ 随压力变化控制钛的升华率比较困难; ④ 制做直径大的泵有困难; ⑤ 工作电压参数不是电离的最佳参数。

(四) 溅射离子泵

1. 基本结构和工作原理

(1) 二极溅射离子泵的结构

最简单的二极溅射离子泵是由一个厚为 $0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ 、直径为 $12\text{mm} \sim 40\text{mm}$ 的不锈钢薄壁圆筒阳极(也有用六方格子、四方格子的)和在阳极两端的两个相对的钛阴极(厚度为 $1\text{mm} \sim 3\text{mm}$) 组成(如图 5-17 所示)。阳极与钛

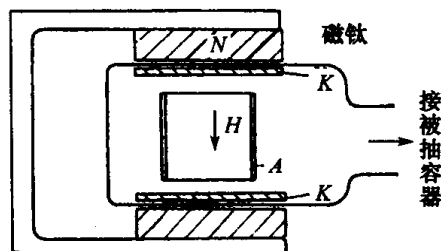


图 5-17 二极溅射离子泵简图

阴极之间加 $3\text{kV} \sim 7\text{kV}$ 电压。阳极筒的轴向方向上加 $6.4 \times 10^{-4}\text{A/m} \sim 2.4 \times 10^5\text{A/m}$ 的磁场。由于磁场强度的限制,两块阴极之间的距离不超过 60mm (一般为 $30\text{mm} \sim 60\text{mm}$)。为了保证一定的流导,阳极与阴极间的气隙一般为 $4\text{mm} \sim 8\text{mm}$ 。这种溅射离子泵的抽速范围为 $0.2\text{L/s} \sim 3\text{L/s}$ (它与阳极的结构、电压、磁场等有关)。很多阳极筒并联在一起,可组成抽速为 $10\text{L/s} \sim 3000\text{L/s}$ 的各种溅射钛泵。图 5-18 是由 8 个和 28 个排气部件组成的溅射离子泵,泵的抽速为 3000L/s 。

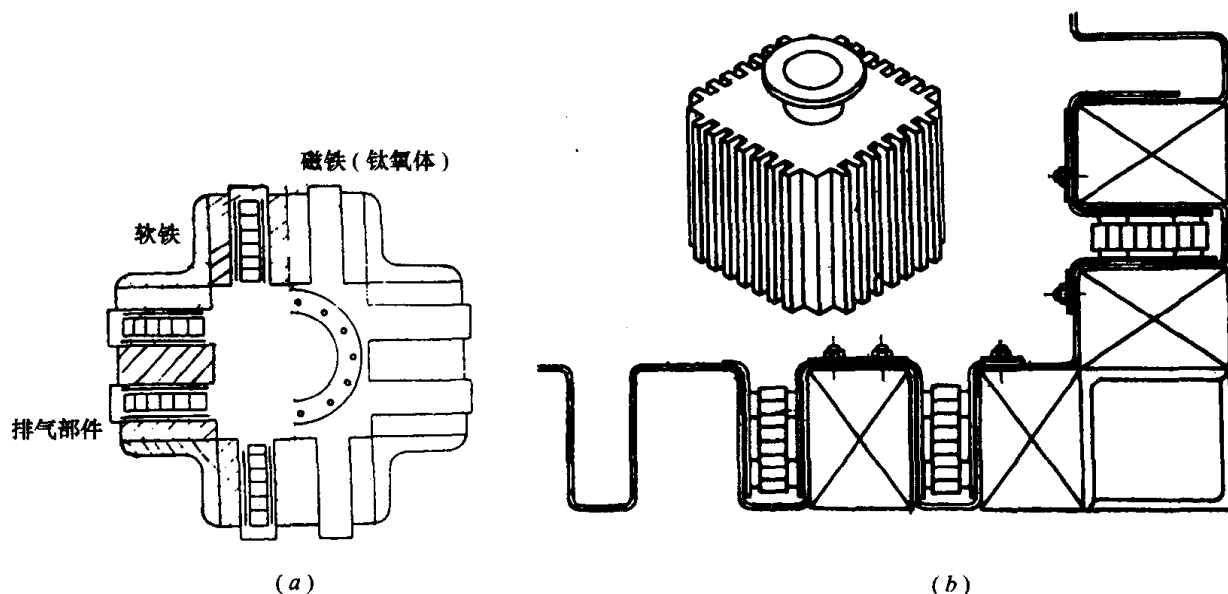


图 5-18 大抽速二极溅射离子泵

(a) 装有 8 个抽气部件的溅射离子泵; (b) 装有 28 个抽气部件的大型溅射离子泵。

(2) 二极溅射离子泵中的潘宁放电

二极溅射离子泵中的潘宁放电示意图如图 5-19 所示。空间中的自由电子在电场的作用

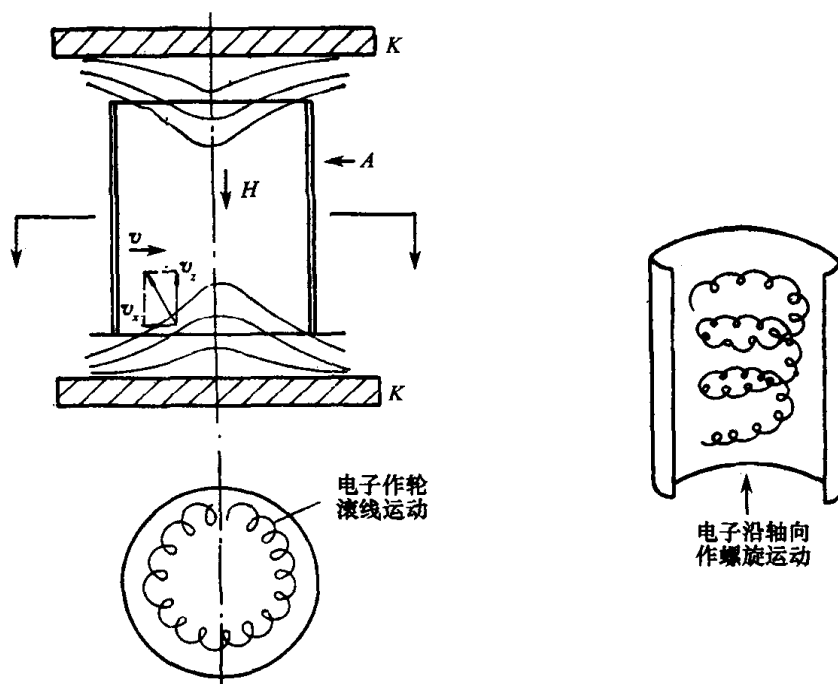


图 5-19 溅射离子泵的潘宁放电

下,有一轴向速度分量 v_z 和横向速度分量 v_x 。由于 v_x 与磁场垂直,因而有作用力 $e v_x \times B$ 使电子在横截面上作轮滚线运动。轮滚线的大小是电子速度和磁场强度的函数。电子速度愈大(即电压愈高),轮滚线的圈也愈大,大到一定程度时电子就落到阳极上。磁场愈强,轮滚线的圈愈小。所以,阳极电压高时需加一个较强的磁场,以免电子直接“滚”到阳极上。轴向电场使电子沿轴向运动。当电子向阳极中心线运动时,速度越来越大,跨过阳极的中心水平线后又受斥力作用而减速运动。靠近阴极时 v_z 为零而反转重新受轴向电场的作用而反向加速,过中心水平线后又开始减速,快到阴极板前 v_z 又变为零而反转,如此不停地重复上述运动。这样电子经过很长的路程后才落到阳极上(10^{-8} Pa 时约为 1Mm)。很多电子受磁场约束,以轮滚线的形式贴近阳极筒旋转,形成一层旋转电子云。旋转电子云的旋转频率约为 100MHz 数量级,贮存的电荷密度可达 10^{10} 个/cm³ 量级。

气体分子和旋转的电子碰撞而被电离。离子在电场的作用下,飞向并轰击阴极钛板产生两种作用,溅射钛和打出二次电子。

溅射出来的钛原子,淀积在阳极内壁和阴极板上,形成新鲜钛膜维持泵的抽气能力。离子的溅射系数(一个离子轰击钛板所能溅射出来的钛原子数)随入射离子的能量、质量和入射角而异。能量大、质量大的离子溅射率也大;斜射比正面轰击其效果要好。为了保证阳极筒上的钛膜的吸气能力,必须保证足够的溅射率,即要求有足够的电压,以保证离子得到足够的轰击能量。

离子轰击钛板,可打出二次电子。二次电子受电磁场作用进入旋转电子云里,以补充失去的电子。每个气体分子被电离的同时,都至少放出一个电子。这些电子也都受电磁场的约束而进入旋转电子云,当它电离气体分子时又产生新的电子,这种电子叫繁流二次电子。繁流二次电子和离子轰击阴极产生的二次电子两者补偿了因跑到阳极上而损失的旋转电子,从而能不断地维持潘宁放电。

(3) 二级溅射离子泵对各种气体的抽气机理

溅射离子泵对 N_2 、 O_2 、CO 和 CO_2 等气体的排除主要靠由于离子溅射而淀积于阳极筒内壁上的钛膜的化学吸附。对 CO 的吸附最快;对于 N_2 ,因旋转电子云的存在使部分 N_2 电离或激发为亚稳态,因而增大了对它的抽速, N_2^+ 轰击钛板可生成稳定的 TiN 附在阴极面上或溅射到阳极内表面上。

对 H_2 的抽除有化学吸附,也有扩散、吸收、溶解作用。当抽除纯 H_2 时,有时抽速会迅速衰减,这主要是由于 H_2 的质量小,轰击钛板后,钛的溅射率太低,阳极内表面的钛膜很快被 H_2 所饱和而又得不到足够的钛沉积来补充,因而抽速下降。此时可放入少量氩气,利用氩质量大、溅射率高的特点,来维持抽 H_2 时需要的新鲜钛膜。此外,阳极板在 $20^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 内能溶解 H_2 ,少量的 H_2 可以扩散溶解于钛板内形成固溶体而被除掉。氢离子轰击钛板时,复合过程中往往被解离为氢原子,更容易扩散溶解于钛板内。由于这是一种放热反应,加之 TiH 的体积较大,容易引起钛板的龟裂和翘变(专为抽氢而设计的溅射泵,阴极板散热是一个重要问题)。这种 TiH 固溶体是不稳定的,它会因温度升高、受离子轰击等原因放出氢来,这是影响泵的极限真空的一个主要因素。

对 He、Ar、Ne、Kr、Xe 等惰性气体的排除,主要靠离子“掩埋”。被电离的惰性气体的离子轰击阴极时,有三种情况:

- ① 离子直接打入阴极内,或打入阴极边缘对面的阴极板上的钛淀积层内,如图 5-20 中 a 点;
- ② 斜射的离子切入阴极表层,离子和钛一起被掀掉而沉积在阴极板的周围或其它地方,

如图 5-20 中 b 点;

③ 离子没打入板内,但是从阴极得到电子而复合为中性原子,然后又反射到阳极内表面的钛膜中,这叫做“能量原子反射”,如图 5-20 中 c 点。

用示迹原子做的实验证明,在二极溅射离子泵中,大部分(达 70% 以上)的惰性气体被埋在靠阴极边缘的环形部分。

二极型溅射离子泵的结构、加工工艺和电源都比较简单,制造容易。但启动压力低,性能不够稳定(氩的不稳定性),特别是对惰性气体的抽速小,对 Ar 的抽速只有对 N_2 的 1% 左右。不宜用于大量排除惰性气体的真空系统中。

2. 溅射离子泵的改进

(1) 结构改进

二极溅射离子泵对氩抽速小且不稳定,主要是由于溅射区与惰性气体掩埋区都在同一块阴极板上,被掩埋的惰性气体往往被后来的离子再轰击出来。为了克服二极型泵存在的上述缺点,在二极型泵结构上作了一些改进,由此而发展了种种结构的冷泵,如图 5-21 所示。

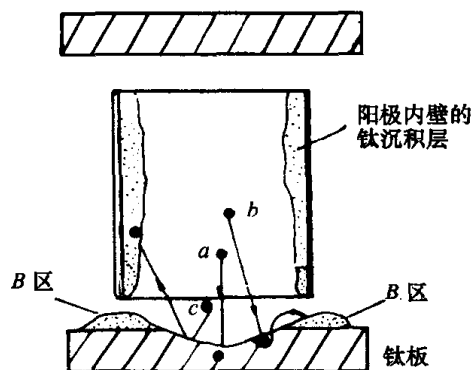


图 5-20 二极溅射离子泵抽气机理示意图

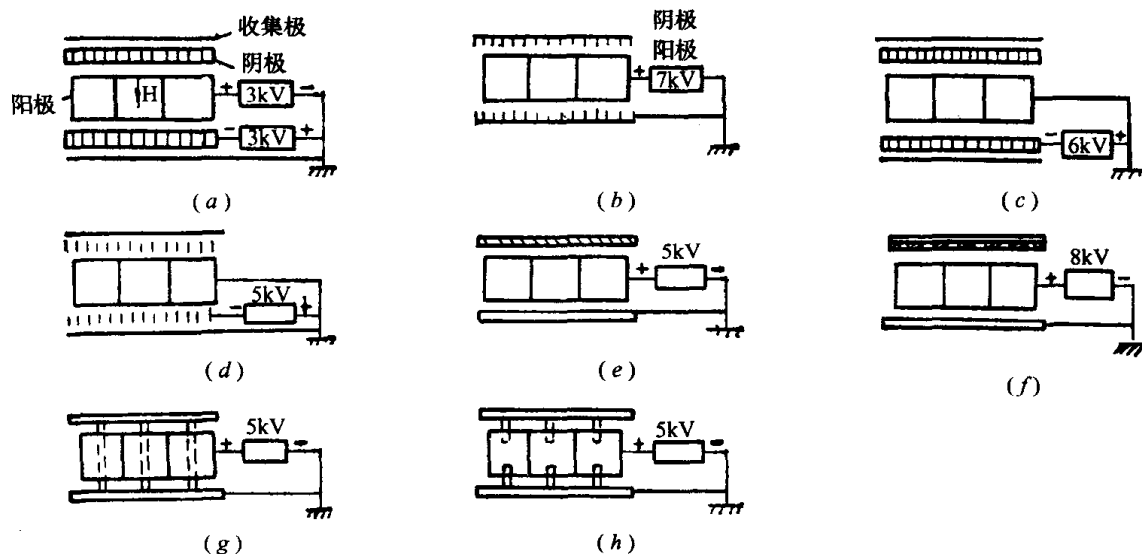


图 5-21 改进型溅射离子泵结构型式

(a) 三电位三极型;(b) 阴极开槽二极型;(c) 二电位三极型;(d) 条网状阴极三极型;
(e) 非对称阴极型;(f) 非对称多孔阴极型;(g) 磁控管型;(h) 阴极短柱型。

① 在阴极上开槽,如图 5-21(b) 所示。槽的凸部相应于溅射部分,而槽底凹部则用以捕获气体,因为在槽的侧面,离子斜射而入。我们知道,斜射时的钛溅射率远大于正射时的钛溅射率,这种结构将冷泵的溅射部分和埋掉气体的部分分开,因此提高了对氩的抽速,一般可以达到相当于对氮抽速的 6%。

② 在泵内用钽板来代替其中一块钛阴极,而另一块阴极仍然用钛板,这就是非对称阴极型冷泵,如图 5-21(e) 所示。由于钽比钛溅射率高些,对氩的抽气稳定性好,因此能提高对氩的抽速。

③ 在钛阴极的上面放一块钻了许多小孔的钽板,如图 5-21(f) 所示。这样既有二元金属系(非对称阴极)的效果,又有开槽阴极的效果,因而使泵对氩的抽速提高到相当于对氮抽速的 40%。缺点是加工工艺复杂。为了进一步简化结构,可在钛板上平行地焊上一行行钽丝。这样对氩的抽速也可提高到相当于对氮抽速的 25% ~ 30%。

④ 将冷泵的钛溅射和掩埋气体两部分机构分离。用二个电极代替二极泵中的阴极,一个专门用来溅射,仍称阴极,另一个专门用来收集惰性气体,称为收集极,这就是三极型冷泵。阴极可以做成蜂窝型[如图 5-21(a) 所示]、也可以做成格子型或网型[如图 5-21(d) 所示]、阴极上加 -3kV 电压,阳极加 +3kV 电压,收集极接地,构成三电位三极泵。在电场作用下电子斜打在阴极侧面,溅射效率比较高,钛溅射到阳极筒内壁和收集极上形成钛膜。此外,打到收集极上的离子能量比打到阴极上的离子能量低,因此在收集极上的溅射远没有阴极那样激烈,氩一类惰性气体被收集极上沉积的钛膜掩埋掉而不会再放出来,对氩的抽速可以提高到相当于以氮的 12% ~ 20%。

三电位三极型泵虽然提高了对氩的抽速,但需要用二个高压电源,结构复杂,大大增加了泵的质量。将供电电压改为阴极加 -6kV,阳极和收集极都接地,省掉一个高压电源,这就构成了二电位三极型泵,如图 5-21(c) 所示。这种泵对氩的抽速提高到相当于氮抽速的 30% 左右。

⑤ 在两块阴极板上穿上一根钛柱,位于阴极的中心位置,形成一个简单的磁控管,如图 5-21(g) 所示,由于钛柱的强烈溅射,在阴极面上钛原子的淀积速率可以达到一般二极型的 30 倍 ~ 40 倍,使氩离子可以充分埋入阴极平面上,由于阴极的溅射部分和对气体的掩埋部分明显地分开,使对氩的抽速可以达到对氮的 20% (在 10^{-3} Pa 下) 或 12% (在 10^{-2} Pa 下)。

⑥ 把阴极柱断开为两段,如图 5-21(h) 所示。阴极柱用钛或钽制成,它兼有二元金属型和磁控管型的一些特点。该泵对氩的抽速比对氮的抽速大,对氩的抽速为对氮抽速的 25% ~ 30%,而对氮的抽速为对氮抽速的 12% ~ 13%,这与一般三极型冷泵抽速的顺序刚好相反。

各种溅射离子泵的抽速见表 5-6。

表 5-6 各种溅射离子泵抽速的相对值(对空气抽速为 100)

被抽气体 \ 泵型	二极型	三电位 三极型	阴极开槽 二极型	二电位 三极型	条网状阴 极三极型	非对称 阴极型	非对称多 孔阴极型	磁控管型	阴极短 柱型
H ₂ (10^{-3} Pa 以下)	270			270		160 ~ 200	225		140
CO, 水蒸气, N ₂ , CO ₂	100			100		95	100		105
碳氢化合物	90 ~ 160			90 ~ 160			150		
O ₂	57			57					62
He	10			30		25 ~ 35	30		13
Ar	1	25	10	21	21	20 ~ 27	40	12 ~ 20	30

(2) 提高抽速和增大启动压力的途径

溅射离子泵的抽速较低,特别是对惰性气体的抽速更低,此外受油蒸气污染后(连续抽油蒸气 30min)会造成启动困难。提高泵的抽速和改善启动特性的方法有:

① 提高对惰性气体的抽速。

采用三极型、非对称型、磁控型和阳极短柱型都能有效地提高对惰性气体的抽速(如表 5-6 所示)。目前广泛采用的为三极型和选用钽、钛做阴极的非对称阴极型。但三极型体积和质量都大,且结构较复杂。非对称阴极型不但结构简单,而且体积小。其缺点是要耗费大量贵重的

钽,成本费较高。

② 改善启动压力。

溅射离子泵不适宜在高于 1×10^{-2} Pa 压力下连续工作,如果在高于此压力下连续工作,阴极寿命只有数周;另外在高压下,泵的抽速较低。所以除小系统外,泵的启动压力一般应低于 1×10^{-1} Pa。此外,溅射离子泵对油类蒸气的污染很敏感,因此,对于不太清洁的系统,泵的启动压力应不高于 1×10^{-2} Pa。对于无油抽气机组中的溅散离子泵,如果需要在 1 Pa 启动,可采取以下措施:

- 设计特殊夹具,使抽气单元和泵壁接触良好,增大导热率。
- 在二极泵的每一抽气单元的抽气口上装上与泵壳连接的金属丝网,以限制放电蔓延。
- 三极泵中采用阴极加负电位并且与泵壳绝缘的方法,使泵易于启动。
- 泵内增设加热器(或采用外部烘烤法)对泵进行烘烤去气,以改善启动特性。
- 采用具有陡降特性的大功率电源变压器。
- 对于多组元的大抽速溅射离子泵,可分组轮流启动。启动后再将各组元电路连接在一起。

③ 改善对活性气体的抽速

提高溅射离子泵对活性气体的抽速,目前采用的方法有:

- 在溅射离子泵中装入钛升华器,不仅弥补了溅射率不足的缺点,并且可以改善启动特性。
- 在泵口上部接上冷阱可以提高对蒸气的抽速。
- 泵的一部分阴极材料改为镁,镁溅射后对空气的抽速可提高 50%。
- 充氩处理,利用氩的冲刷作用,可使泵的抽速增大 1.5 倍 ~ 3 倍。

3. 溅射离子泵的型式与基本参数(摘自 JB/T4081-91)

本标准规定了普通型式的溅射离子泵的型式与基本参数。适用于二电位的二极型和三极型溅射离子泵。

本标准使用的术语应符合 GB3163 的规定。使用的符号、代号应符合 JB/T7673-95。

(1) 型式

① 本标准把二电位普通型式的溅射离子泵分为二极型泵和三极型泵。

二极型泵的抽气单元由阳极筒和阴极板组成,阳极接数千伏正电位,阴极连同泵体接地。

三极型泵的抽气单元由阳极、阴极和收集极组成。阳极和收集极连同泵体接地,阴极接数千伏负电位。

② 型号表示方法须符合 JB/T7673-95 真空泵型号编制方法。

(2) 基本参数

① 二极型溅射离子泵的基本参数应符合表 5-7 的规定。

表 5-7 二极型溅射离子泵基本参数

型 号	L-15	L-30	L-50	L-100	L-200	L-300	L-400	L-500	L-600	L-700
泵口内径/mm	40		100		160			200		
抽气速率/L·s ⁻¹	15	30	50	100	200	300	400	600	800	1000

(续)

型 号	L - 15	L - 30	L - 50	L - 100	L - 200	L - 300	L - 400	L - 500	L - 600	L - 700
极限压力 /Pa	3×10^{-8}									
启动压力 /Pa	5×10^{-1}									
电源电压 /V	220									
注:泵口法兰应符合 GB6071 规定										

② 三极型溅射离子泵的基本参数应符合表 5-8 的规定。

表 5-8 三极型溅射离子泵基本参数

型 号	3L - 10	3L - 20	3L - 40	3L - 80	3L - 160	3L - 360	3L - 480	3L - 600
泵口内径 /mm	40		100		160		200	
抽气速率 /L · s ⁻¹	10	20	40	80	160	360	480	640
极限压力 /Pa	3 × 10 ⁻⁸							
启动压力 /Pa	5 × 10 ⁻¹							
电源电压 /V	220							
注:1. 泵口法兰应符合 GB6071 规定; 2. 泵对氩的抽速应小于其名义抽速的 20%								

4. 溅射离子泵性能测试方法(摘自 JB/T2965—92)

本标准规定了溅射离子泵(以下简称离子泵)性能测试方法。本标准适用于抽速大于 10L/s 的溅射离子泵。

(1) 术语、符号

① 抽气速率 本标准定义的离子泵的抽速是把按照标准规定的试验程序,在规定的抽速测试罩上指定位置测得的压力,代入指定公式的计算结果。

② 极限压力 本标准定义的离子泵的极限压力是按标准规定的试验方法测得的稳定最低压力。

③ 测试罩 是一个具有指定形状和尺寸的容器,其上的指定位置装有真空计。本标准规定了极限压力测试罩和抽速测试罩。

(2) 测试条件

① 测试气体:本标准规定以干燥空气为测试气体。

② 压力测试仪器:使用热阴极电离真空计,发射电流在 1mA ~ 10mA 范围内;压力以等效氮压表示,测量范围为 4×10^{-2} Pa ~ 1×10^{-8} Pa。电离计的校准曲线读数误差不得大于 $\pm 10\%$ 。离子泵磁钢杂散磁场对电离计灵敏度的影响不超过 $\pm 3\%$ 。

(3) 极限压力测量

① 测量极限压力测试罩 极限压力测试罩结构尺寸如图 5-22 所示。测试罩内径为 D ,高度为 $3D/2$ 。对于离子泵入口连接法兰内径 ≥ 100 mm,测试罩内径 D 等于离子泵入口直径,泵口直径小于 100 mm,其测试罩内径 D 一律为 100 mm。

测试罩材料,应能承受 400℃ 真空烘烤。罩上的两个联管,一个接电离真空计(带有直角的联管),另一个经过可烘烤截止阀接带有捕集器的粗抽泵。

② 极限压力测量程序 第一步再生烘烤。启动粗抽泵对离子泵和测试罩预抽,同时接通烘烤电源,对离子泵和测试罩进行 4h 烘烤去气,烘烤温度 300°C (或采用厂家推荐的烘烤温度)。预去气结束后,启动离子泵,关闭粗抽阀和粗抽泵,在离子泵工作的条件下继续烘烤 10h。烘烤中如果罩内压力超过 $5 \times 10^{-2}\text{Pa}$,需切断烘烤加热电源,暂停烘烤,待压力降到 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 以下时再重开加热器。

第二步测定离子泵极限压力。停止烘烤让泵和测试罩冷到室温(或 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$),离子泵继续抽气 48h,此期间应反复对电离计进行电子轰击去气,最后一次去气应在结束测量前 5h 进行,如果压力无显著变化,此时测得的压力值就作为离子泵的极限压力。

(4) 抽速测量

① 测量抽速测试罩。抽速测试罩的结构尺寸如图 5-23 所示。测试罩内径 D 的取值和极限压力测试罩相同。高度 $3D$,在 $3D/2$ 高度处装有一与罩壁紧接的薄金属板,中心有直径为 d 的小孔 O ,小孔边缘厚度应不大于 0.5mm 。对于泵入口内径 D 在 100mm 及以上的离子泵,小孔 d 的值应在 $0.05D \sim 0.1D$ 之间选取。对于入口直径小于 100mm 的离子泵, d 值要根据离子泵估算的抽速值选取,选取的 d 值应使抽速测量中罩内上、下两室的压力比值(p_y/p_x) 在 $5 \sim 100$ 范围内。

测试罩的上室 Y 具有两个垂直罩壁向外伸出的圆管,其轴线在薄孔板上方 $D/2$ 处。其中之一向上弯成直角以便安装电离计。另一圆管安装进气管,进气管沿罩轴线向上弯成直角,其端部为出气口,距罩顶 $D/2$,进气管入口端联接一只可烘烤控制阀。

测试罩的下室 X 具有三个垂直罩壁向外伸出的圆管,其轴线在罩底部法兰面上方 $D/2$ 处,其一经过可烘烤截止阀联接粗抽泵,其二向上弯成直角以便安装电离计,其三备用。

② 抽速测量程序:

第一步:将抽速测试罩装在离子泵上,进行与测量极限压力相同的烘烤程序。

第二步:停止烘烤后离子泵继续抽气,待离子泵与测试罩冷到室温($15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$)后,缓慢调节上室进气控制阀放入干燥空气,使下室压力 p_x 稳定在 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$,在此气量下抽气 100min,用以稳定离子泵抽气性能。

第三步:关闭进气阀,让离子泵继续长时间运转,直至下室 p_x 稳定在某一压力值不再降低时,可将这一压力值视为系统的本底压力 $p_{x\min}$ 。

第四步:开启放气阀放入干燥空气。在 $1 \times 10^{-6}\text{Pa} \sim 1.5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ (下室 p_x 值) 之间由低到高逐步增加气量选取测量点测量泵的抽速。每个数量级至少选取两个测量点,每个测量点上的

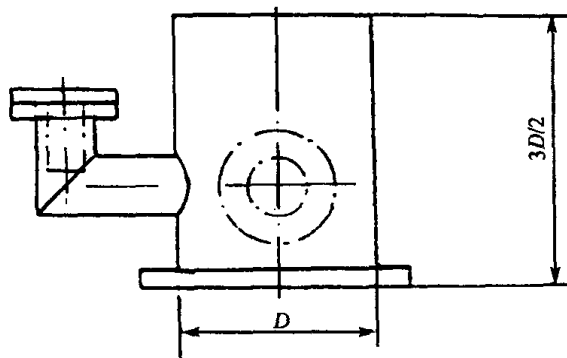


图 5-22 极限压力测试罩

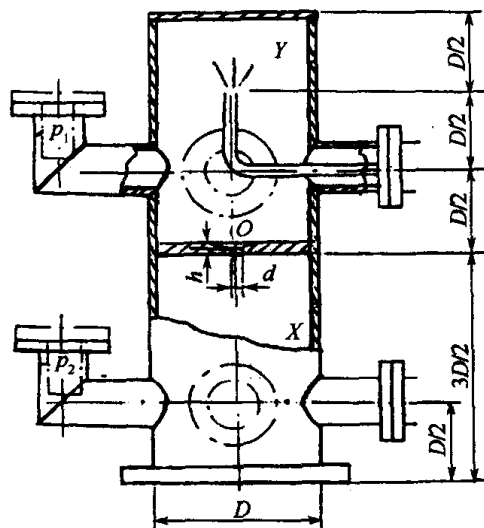


图 5-23 抽速测试罩

p_y 、 p_x 值至少应观察 30min, 要求压力稳定度为每小时变化不超过 $\pm 5\%$ 。

接近本底压力的第一个选取点 p_x 的压力值应不小于 5 倍的本底压力值, 即 $> 5p_{x\min}$, 此值和低压上限 $1 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 相比, 选其中最大者作为第一个取点值。

为了保证从上室经小孔进入下室的气体为分子流, 测试过程中选取压力变化的最高取值, 要求上室压力值 p_y 不能大于 $p_{y\max}$ 。上室允许的最高压力 $p_{y\max}$ 由下式给出

$$p_{y\max} = 0.5/d \quad [\text{Pa}] \quad (5-11)$$

式中 d ——图 5-23 中隔离板小孔直径。

将上室压力 $p_{y\max}$ 相对应的下室 p_x 与高压限 $1.5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 相比, 取其中的较小者作为最高压力端的最后一个取值点。

上述规定的 p_x 值范围内各取点测得的 p_y 、 p_x 稳定值代入下式计算抽速

$$S = C(p_y/p_x - 1) \quad (5-12)$$

式中 C ——小孔的流导, 推荐下面公式计算 C 值

$$C = 0.091[d^2/(1 + h/d)] \quad (5-13)$$

上述诸式中:

d ——小孔直径[mm];

h ——小孔边缘处板厚[mm];

S ——离子泵抽速[L/s];

C ——小孔分子流流导[L/s]。

按上述程序测得抽速亦称饱和抽速。

③ 检查再生烘烤程序的重复性。测完抽速之后, 重复再生烘烤程序, 并测量极限压力(以 p_x 值为准), 此压力不应大于以前测得极限压力值的 3 倍。

再重复上述抽速测量全部程序, 至少应对前次测量点总数的 1/3 进行复测。

本测试项目是为了验证本标准规定的再生烘烤程序能够使离子泵的稳定性能重复出现。

5. 国产溅射离子泵技术性能参数

① 北京中科科仪发展有限责任公司生产的 2L 型、3L 型溅射离子泵, 外形尺寸如图 5-24 ~ 图 5-27 所示, 性能参数见表 5-9。

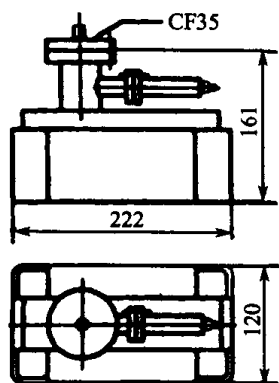


图 5-24 2L-25、3L-25 溅射离子泵外形尺寸

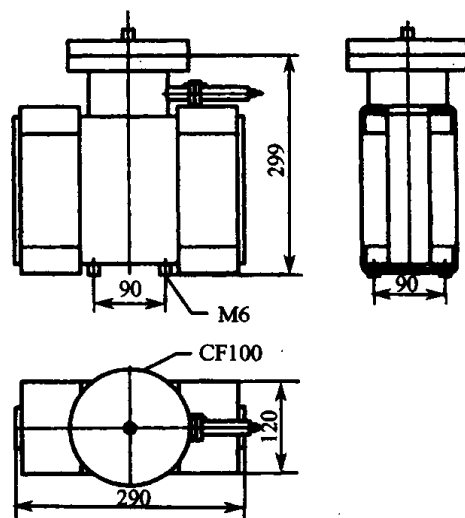


图 5-25 2L-50、3L-50 溅射离子泵外形尺寸

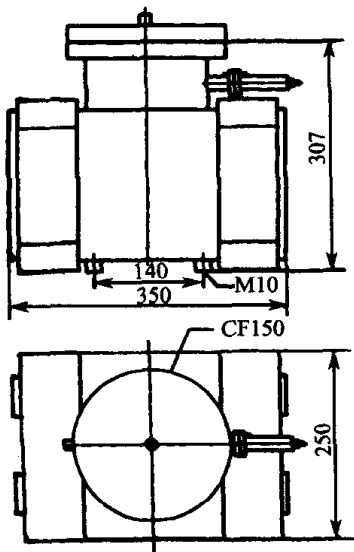


图 5-26 2L-100、3L-100 溅射离子泵外形尺寸

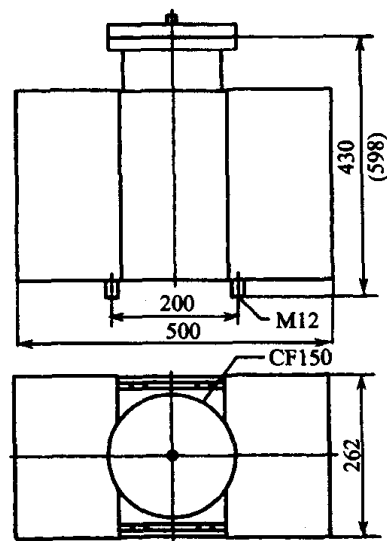
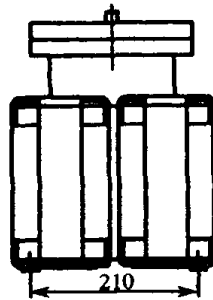


图 5-27 2L-200B、2L-200C、3L-200B、
3L-200C 溅射离子泵外形尺寸

表 5-9 2L 型、3L 型溅射离子泵性能参数

型号 ^①	法兰	抽速 /L · s ⁻¹		启动压力 /Pa	极限压力 /Pa	烘烤温度 /℃		工作 电压 /kV	抽气单 元 / 个	质量 /kg	加热罩			
		N ₂	Ar			带磁铁	不带磁铁							
2L - 25	CF35	22	0.3	≤ 5 × 10 ⁻⁴	< 7 × 10 ⁻⁸	200	300	+ 7	1	7	无			
3L - 25		21	6					- 5						
2L - 50	CF100	65	0.6					+ 7	2	16				
3L - 50		55	12					- 5						
2L - 100	CF150	120	1.2		< 2.7 × 10 ⁻⁸			+ 7	4	30	有			
3L - 100		110	24					- 5						
2L - 200B		220	2.4		< 1.0 × 10 ⁻⁸			+ 7		100				
3L - 200B		200	5.0					- 5						
2L - 200C		220	2.4		< 2.7 × 10 ⁻⁸			+ 7		220				
3L - 200C		200	5.0					- 5						
2L - 400		450	4.5		< 1.0 × 10 ⁻⁸			+ 5						
3L - 400		420	85					- 5						
2L - 400C		450	4.5					+ 5						
3L - 400C		420	85					- 5						

注：①2L 为两极泵，3L 为三极泵。加 B 的为新型泵，加 C 的为高指标泵

2L 型、3L 型配用电源外形尺寸如图 5-28 所示，技术性能参数见表 5-10。

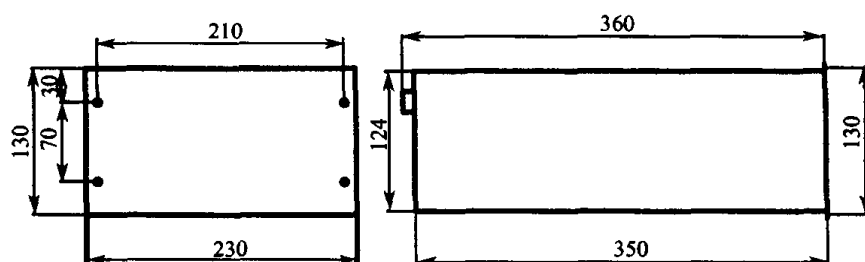


图 5-28 离子泵 2LD/3LD-400B 电源外形尺寸图

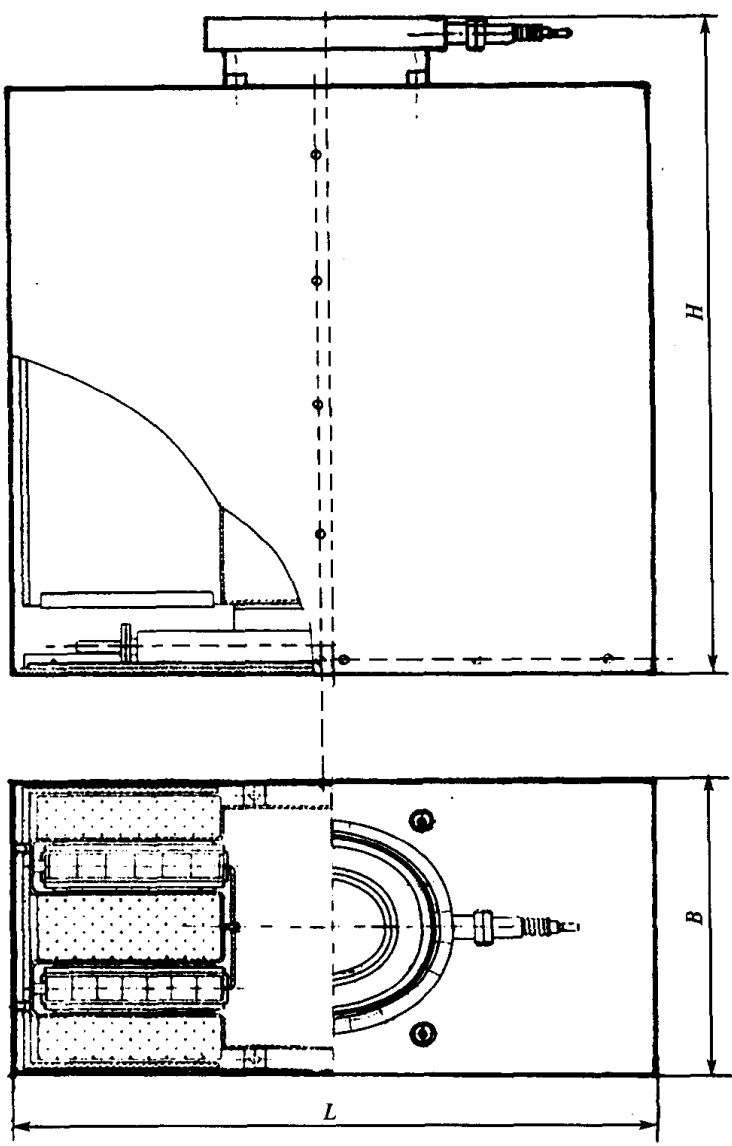
表 5-10 溅射离子泵配用电源技术性能参数

型 号		2LD-400B	3LD-400B
适用泵种		2L-25、2L-50、2L-100、2L-200、2L-400	2L-25、2L-50、3L-100、3L-200、3L-400
输入	电压 /V	$\sim 220 \pm 22$	$\sim 220 \pm 22$
	频率 /Hz	47 ~ 63	47 ~ 63
输出电压 /kV		+ 7、+ 5、+ 3	- 7、- 5、- 3
最大输出功率 /W		120(3kV/40mA)	120(3kV/40mA)
最大输出电流 /mA		100	100
最小输出电流检测 /A		8.0×10^{-8}	8.0×10^{-8}
最小检测电流分辨率 /A		1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
环境温度 /℃		0 ~ 40	0 ~ 40
环境湿度		$\leq 90\%$ (非凝结)	$\leq 90\%$ (非凝结)
电磁兼容性		符合 IEC1000	符合 IEC1000
安全防护		符合 EN61010	符合 EN61010
质量 /kg		5	5
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm		350×230×130	350×230×130
注:北京中科科仪发展有限责任公司生产			

② 中科院沈阳科学仪器研制中心生产的 3L 型溅射离子泵,具有工作压力范围宽、惰性气体抽速大、无噪声、工作寿命长等优点。其外形尺寸及性能参数见表 5-11。

③ 上海真空泵厂生产的 L 系列溅射离子泵有 L 型二极式、3L 型三极式和 LH 型三种型号,泵口法兰有国际标准 CF 法兰和厂标阶梯法兰二种,L 系列溅射离子泵均附有电源控制箱,烘烤装置与泵体合为一体,不卸磁钢可烘烤至 250℃。采用全封闭结构形式,磁钢不外裸,因此不仅可缩小体积,而且可减少杂散磁场对外界的影响。外形尺寸如图 5-29 ~ 图 5-37 所示,性能参数见表 5-12。

表 5-11 3L 型三极溅射离子泵外形尺寸、性能参数

											
型号	通径 D_N/mm	抽速 $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	极限压力 Pa	启动压力 Pa	工作电压 kV	启动电流 A	外形尺寸 /mm			螺孔 /mm	
							L	B	H	数量	直径
3L-110	150	110	6.6×10^{-9}	6.6×10^{-5}	5.5	2	452	248	347	20	8.4
3L-220		220					416	416	337		
3L-300		300					540	300	540		
3L-400		400					534	276	640		
3L-600	200	600					551	551	508	24	

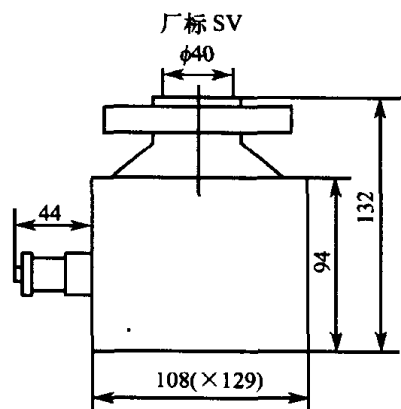


图 5-29 3L-15 溅射离子泵

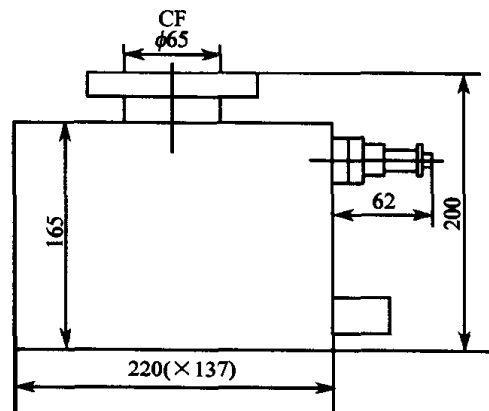


图 5-30 3L-30 溅射离子泵

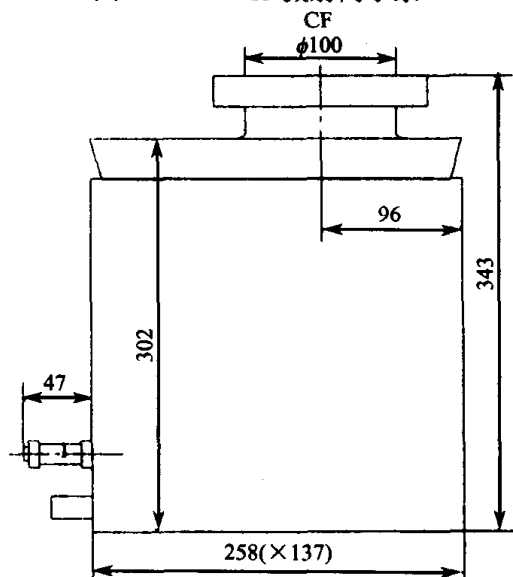


图 5-31 3L-70 溅射离子泵

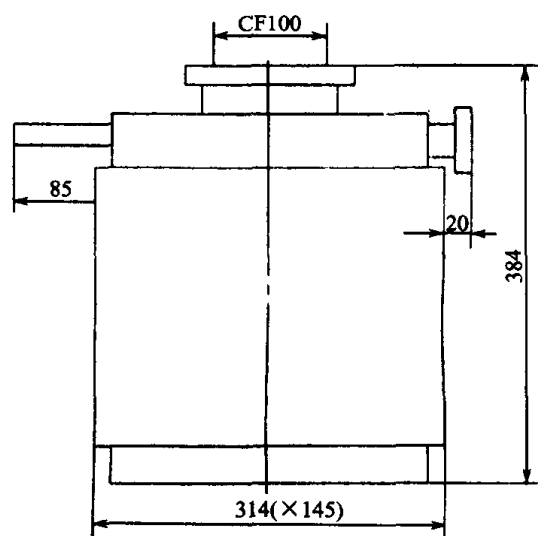


图 5-32 L-100B 溅射离子泵

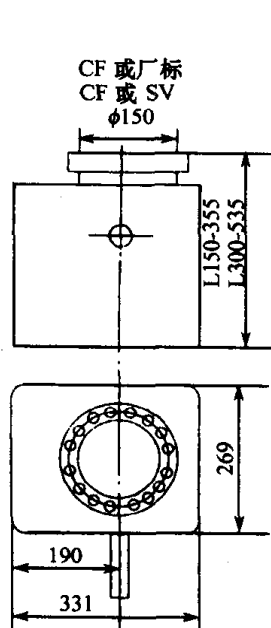


图 5-33 L-150、L-300、
3L-150、3L-300、LH-150、
LH-300 溅射离子泵

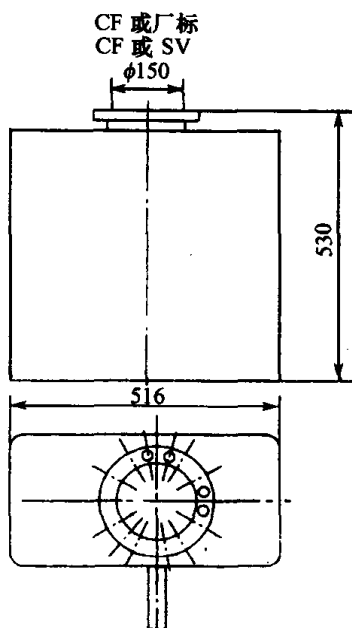


图 5-34 L-600、3L-600、LH-600
溅射离子泵

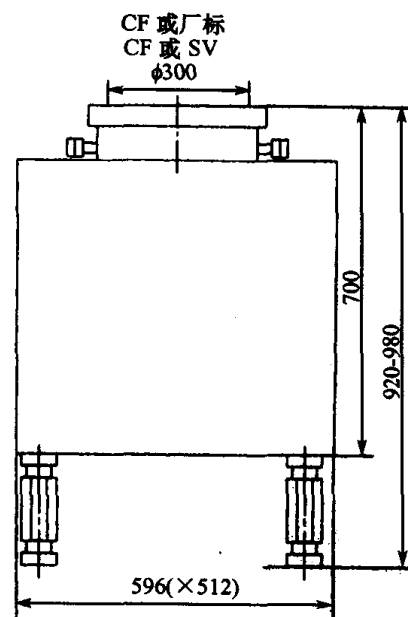


图 5-35 L-1200、3L-1200、LH-1200
溅射离子泵

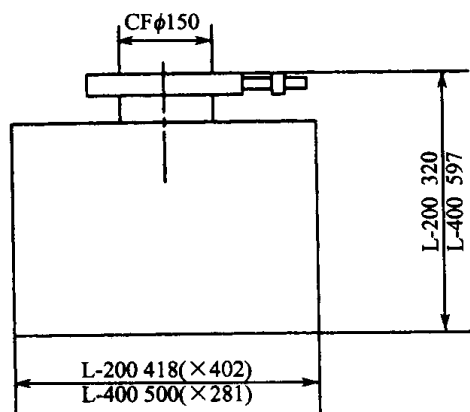


图 5-36 L-200、3L-200、L-400 溅射离子泵

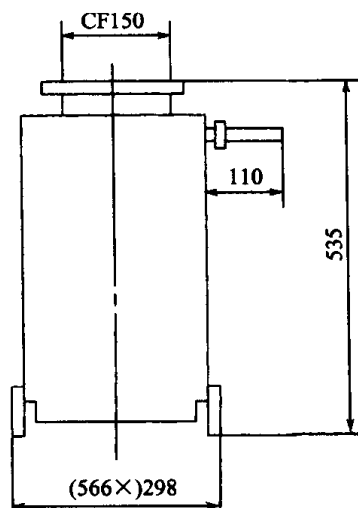


图 5-37 L-500B 溅射离子泵

表 5-12 L 型、3L 型、LH 型溅射离子泵性能参数

型 号	通 径 D_N/mm	抽速 $/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	工作电压 $/\text{kV}$	启动电流 $/\text{A}$	烘烤功率 $/\text{W}$	外 形 尺 寸 (长×宽×高)/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$
3L-15	40	11	$< 6.7 \times 10^{-8}$	- 6	0.15	-	$129 \times 108 \times 132$
3L-30	65	25				300	$220 \times 137 \times 240$
3L-70	100	50			0.3	500	$258 \times 137 \times 343$
3L-150	150	150				400	$269 \times 120 \times 355$
3L-200	150	200	$\leq 6.7 \times 10^{-9}$		0.5	1200	$418 \times 402 \times 320$
3L-300	150	240	$< 6.7 \times 10^{-8}$		1.0	900	$331 \times 269 \times 535$
3L-600	150	440				1800	$516 \times 269 \times 535$
3L-1200	300	880			2.0	4000	$596 \times 512 \times 980^*$
L-100B	100	100	$\leq 6.7 \times 10^{-9}$	+ 6	0.3	660	$314 \times 145 \times 384$
L-150	150	190	$< 6.7 \times 10^{-8}$			900	$331 \times 269 \times 355$
LH-150	150	190					$331 \times 269 \times 355$
L-220	150	220	$\leq 6.7 \times 10^{-9}$		0.5	1200	$441 \times 256 \times 380$
L-300	150	300	$< 6.7 \times 10^{-8}$		1.0	900	$331 \times 269 \times 535$
LH-300	150	300					$331 \times 269 \times 535$
L-400	150	400	$\leq 6.7 \times 10^{-9}$			1800	$500 \times 281 \times 597$
L-500B	150	500	$< 6.7 \times 10^{-8}$			2000	$566 \times 298 \times 535$
L-600	150	540				1800	$516 \times 269 \times 535$
LH-600	150	540					$516 \times 269 \times 535$
L-1200	150	1100			2.0	4000	$596 \times 512 \times 980^*$
LH-1200	300	1100	$596 \times 512 \times 980^*$				

注: 1. L 型为二极式, 3L 型为三极式, LH 型为二极式抽氢泵;

2. * 可调高度: 920mm ~ 980mm;

3. 烘烤温度: $\leq 250^\circ\text{C}$;

4. 烘烤电压: 220V

④成都国投南光有限公司生产的JT型和3L型溅射离子泵外形尺寸及主要性能参数见表5-13。

表 5-13 JT、3L 型溅射离子泵主要技术性能表

型号	通径 /mm	性 能 参 数							外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm				
		极限压力 /Pa	抽速 /L·s ⁻¹	前级压力 /Pa	工作电压 /kV	输入电源		磁场强度 /A·m ⁻¹					
						电压 /V	频率 /Hz						
JT-25	75	6.7×10 ⁻⁷	25	1.3	4.5～5	～220	50	1.1×10 ⁻⁵	235×140×310				
JT-50	150	6.7×10 ⁻⁸	50	1.3～0.13					300×213×280				
JT-100	150		100							400×213×280			
JT-200	150		200								420×213×280		
JT-400	150		400									420×420×430	
JT-600	200		600										500×500×865
JT-800	250		800										
3L-25	65	25	1.3	-4.5 --7	290×160×255								
3L-50	125	50				326×190×270							
3L-100	125	100					378×263×495						
3L-200	150	200						427×427×364					
3L-400	150	400							427×427×539				
3L-800	250	800								592×592×494			
3L-1000	250	1000									590×490×560		
		6.7×10 ⁻⁸											

二、低 温 泵

(一) 概述

用低温介质将抽气面冷却到 20K 以下,抽气面就能大量冷凝沸点温度比该抽气面温度高的气体,产生很大的抽气作用。这种用低温表面将气体冷凝而达到抽气目的的泵叫做低温泵,或称冷凝泵。

低温泵的抽气能力和所能达到的极限压力,和低温板的温度以及被抽气体的饱和蒸气压有关。常见气体的蒸气压、蒸发潜热和熔点见表 5-14。

表 5-14 气体的蒸气压、蒸发潜热和熔点

气体 种类	处于各蒸气压下的平衡温度 /K													蒸发 潜热 /kJ· mol ⁻¹	熔点 /℃
	/× 133Pa														
	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻²	1	10	100	760		
H ₂	2.67	2.88	3.01	3.21	3.45	3.71	4.40	5.38	6.90	9.55	11.70	15.10	20.36	0.9	- 259.1
He										1.268	1.738	2.634	4.2		- 269.65
Ne	5.50	5.7	6.11	6.47	6.88	7.34	8.48	10.05	12.30	15.80	18.45	22.1	27.2	1.3	- 248.7
Ar	20.3	21.3	22.5	23.7	25.2	26.8	30.6	35.9	43.2	54.4	62.5	73.4	87.2	6.53	- 189.4

(续)

气体的种类	处于各蒸气压下的平衡温度 /K													蒸发潜热 /kJ·mol ⁻¹	熔点 /℃
	/× 133Pa														
	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻²	1	10	100	760		
Kr	27.9	29.4	30.9	32.7	34.6	36.8	42.2	49.4	59.4	74.8	85.9	101.0	120.2	9.04	- 156.7
Xe	38.5	40.5	42.7	45.1	47.7	50.8	58.2	68.1	82.1	103.5	118.5	139.5	164.0	12.66	- 111.6
N ₂	18.1	19.0	20.0	21.1	22.3	23.7	27.0	31.4	37.5	47.0	54.0	63.4	77.3	5.59	- 210.0
O ₂	21.8	22.8	24.0	25.2	26.6	28.2	31.9	36.7	43.3	54.1	62.2	74.5	90.15	6.83	- 218.7
CO	20.5	21.5	22.66	23.8	25.2	26.7	30.3	35.0	41.5	51.1	57.9	67.3	81.0	6.05	- 205.0
CO ₂	59.5	62.2	65.5	68.4	72.1	76.1	85.7	98.1	114.5	137.5	153.5	173.0	194.7	25.27	- 57.5
NH ₃	70.9	74.1	77.6	81.5	85.8	90.6	102.0	116.5	136.0	163.0	181.0	206	240	23.38	- 77.7
CH ₄	24.0	25.3	26.7	28.2	30.0	32.0	36.9	43.5	52.9	67.3	77.7	91.7	111.6	8.19	- 182.5
H ₂ O	113.0	118.5	124.0	130.0	137.0	144.5	162.0	185.0	215	256	284	325	373	40.71	0.0

(二) 低温泵的分类

按照低温介质的供给方式,低温泵分为三种类型:

① 流程低温泵(图 5-38) 泵中低温板冷却管和制冷膨胀机相联接,低温介质(气氮)通过外管路供给低温泵,吸收低温板热量后再回到制冷压缩机,形成封闭循环,这种低温泵的体积庞大、管路复杂、管路冷损较大。优点是制冷功率大,最适宜抽除大气量或大型真空室,广泛用于空间环模设备、受控热核反应装置、火箭发动机高空点火试验以及低压空气动力学试验等。

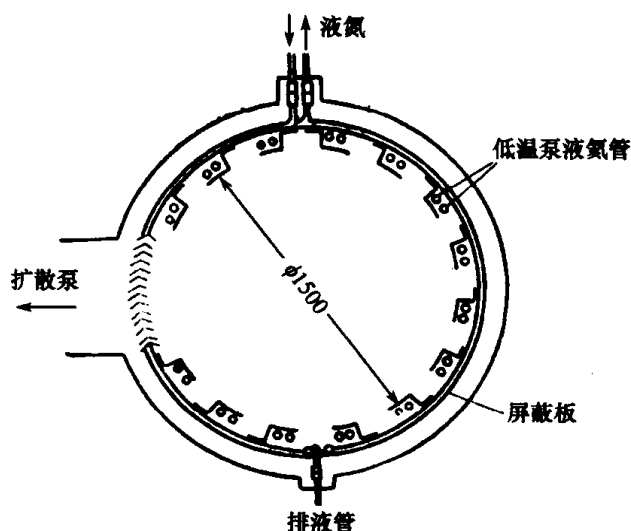


图 5-38 环境模拟流程低温泵

② 贮槽式低温泵(图 5-39) 低温介质(液氮)直接注入泵内贮槽,使气体冷凝达到抽气目的。其优点是泵的体积小、无振动、无噪声、操作简便,适用于大专院校及科研单位和高能加速器等大型真空工程。缺点是运转费用高,每次加注低温介质的使用时间短,需长期连续运转的真空系统要定期补充工作介质,并且受到低温介质供应条件的限制。

③ 小型制冷机低温泵(图 5-40) 闭循环小型制冷机低温泵是由低温泵体、抽气低温板、辐射屏蔽板、制冷机和压缩机等部分组成。和流程低温泵的最大区别是制冷机一、二级冷头直接和辐射屏、冷板相连,在制冷机与压缩机连接管路中流动的是常温、高(或低)压气体介质,不存在低温介质的输送问题,兼有流程低温泵和贮槽式低温泵的优点,是目前比较理想的清洁超高真空泵。广泛用于薄膜制备、微电子学技术、高能物理、小型环模设备以及其它各工业领域。

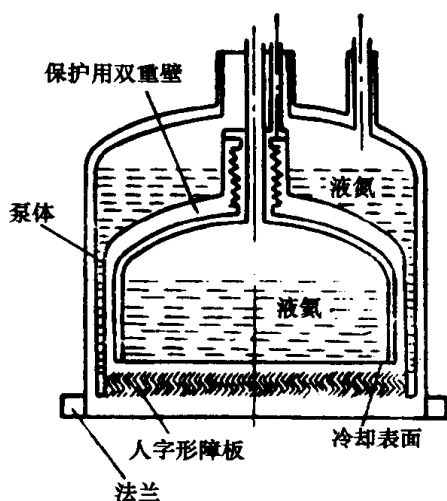


图 5-39 贮槽式低温泵

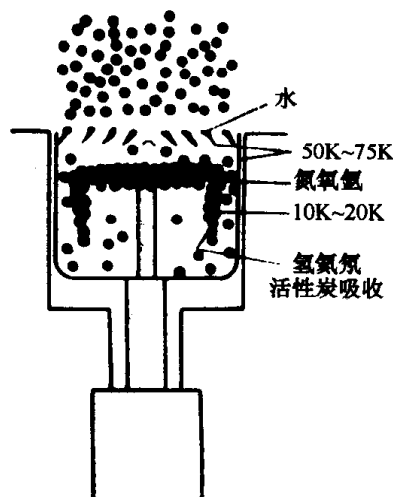


图 5-40 小型制冷机低温泵

(三) 低温泵的抽速

1. 低温冷凝面的理想抽速

温度为 T [K]、相对分子量为 M [g/mol]、平均速度为 \bar{v} [cm/s] 的气体分子全部被冷凝在深冷面上时, 冷凝面单位面积的理想抽速应为

$$S_0 = \frac{1}{4} \bar{v}_g = \sqrt{\frac{RT_g}{2\pi M}} = 3.64 \sqrt{\frac{T_g}{M}} \quad [\text{L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (5-14)$$

如以下角 g, s 分别表示气相和液相, 当冷凝面上的饱和蒸气压 p_s 和气体压力 p_g 相比较不能忽略时, 冷凝面的抽气速率和理想抽速有差别。令蒸发系数为 1。此时的比抽气速率为

$$S' = \frac{\frac{1}{4} n_g \bar{v}_g - \frac{1}{4} n_s \bar{v}_s}{n_g} = \sqrt{\frac{RT_g}{2\pi M}} \left[1 - \frac{\sqrt{T_g}}{\sqrt{T_s}} \cdot \frac{p_s}{p_g} \right] \quad [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] \quad (5-15)$$

图 5-41 给出了由公式(5-15) 计算得来的在 20K 温度下对氮气的理想抽速曲线。

事实上, 气体分子在某一冷凝面上不可能全部被冷凝。总有一部分能量特别大的分子还会从冷凝面上返回到空间中去。这种被冷凝了的气体分子和碰撞在低温表面上的气体分子之比称为冷凝系数 α 。Bachler 等人通过实测验证了 N_2 和 H_2 在饱和蒸气压附近, 抽速有所降低。处

理他们的实验数据, 并使 $\sqrt{\frac{T_g}{T_s}} = 1$, 则此时单位面积的抽速公式变为

$$S = \alpha \cdot S_0 \left(1 - \frac{p_s}{p_g} \right) \quad [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] \quad (5-16)$$

在 20K 冷凝面温度下, 除 $\text{He}, \text{Ne}, \text{H}_2$ 外, 其它气体分压都可降低到 $10^{-8} \text{Pa} \sim 10^{-9} \text{Pa}$, 即 $p_s \ll p_g$ 。此时, 对于 300K 的气体的抽速约为

$$S' = 63\alpha / \sqrt{M} \quad [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] \quad (5-17)$$

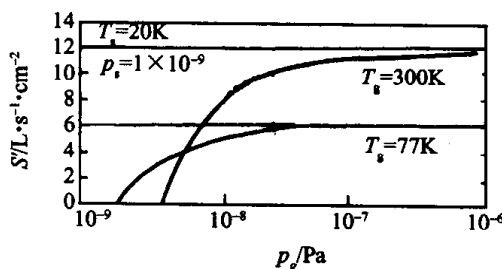


图 5-41 20K 低温泵对氮气的理想抽速曲线

图 5-42 表示在不同冷冻面的温度下, 氮的冷凝系数 α 与压力比 $\frac{\Delta p}{p_s}$ 的曲线。其中 $\Delta p = p_g$

$-p_s$, 即横轴为 100% 的时候, 相当于该温度下饱和蒸气压两倍的压力。从他们的测试结果看, 在超过饱和蒸气压 11 倍的气压下, 冷凝系数为 1。而在这以下, 冷凝系数的大小和冷冻泵温度有关。

图 5-43 表示在 4.4K ~ 3.6K 下对 H_2 的实验数据。在 3.8K 以下, α 不依赖于气压, 而且为 0.5。在 4.4K, 随气体压力增加, α 从 0.01 增加到 0.02。各种气体在不同深冷温度下的冷凝系数见表 5-15。

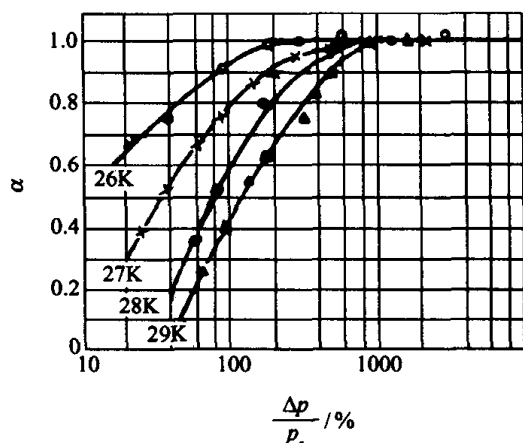


图 5-42 N_2 的冷凝系数和冷凝面温度的关系

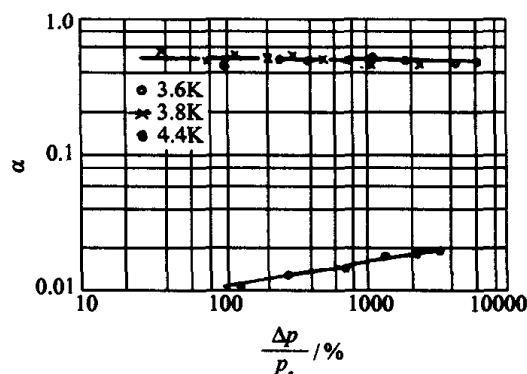


图 5-43 H_2 的冷凝系数和冷凝面温度的关系

表 5-15 300K 的气体在各种冷凝面温度下的冷凝系数 α

气 体	表面温度 /K	冷凝系数 α	气 体	表面温度 /K	冷凝系数 α
Ar	10	0.68	N_2O	10	0.63
Ar	20	0.66	N_2O	20, 77	0.61
N_2	10	0.65	NH_3	77	0.45
N_2	20	0.60	CH_3OH	77	1.0
CO	10	0.90	C_2H_5OH	77	1.0
CO	20	0.85	CCl_4	77	1.0
O_2	20	0.86	CH_3Cl	77	0.93
CO_2	10	0.75	CH_2Cl_2	77	0.83
CO_2	20, 77	0.63	CF_2Cl_2	77	0.76
H_2O	77	0.92	CH_3COCH_3	77	0.55
SO_2	77	0.74	H_2	3.6 ~ 3.8	0.50

2. 屏蔽挡板对低温泵抽速的影响

降低低温泵消耗的能量是低温泵设计中的一个重要问题。用于环模设备中的低温泵都用 77K 屏蔽板将 20K 低温板屏蔽起来, 以减少低温泵的功率损耗。但屏蔽板却增大了气体的流阻, 降低了气体温度, 影响了低温冷凝面的抽速。带有液氮屏蔽板的低温泵的抽气速率公式为

$$S = \frac{\bar{v}_w A_B}{4} \left[1 - \frac{p_C A_C}{p_w A_B} \left(\frac{T_w}{T_C} \right)^{1/2} \right] U_B \quad (5-18)$$

式中 S ——泵的抽气速率 [m^3/s];

\bar{v} ——气体分子的平均速度 [m/s];

p ——气体压力 [Pa];

T ——气体温度 [K];

U_B ——屏蔽板的流导概率;

A ——冷凝板、屏蔽板的面积 $[\text{m}^2]$;

W 、 B 、 C ——分别表示真空规、屏蔽板、冷凝板(如图 5-44 所示)。

当低温冷凝板的温度 T_C 为 $8\text{K} \sim 12\text{K}$ 时,氮分压 p_C 小于 $10^{-9}\text{Pa}(12\text{K})$, 设 $A_C/A_B < 1$, $10^{-7} < p_W < 10^{-1}$, $p_C/p_W < 10^{-2}$ 。若 $(T_W/T_C)^{1/2} \approx 6$, 则

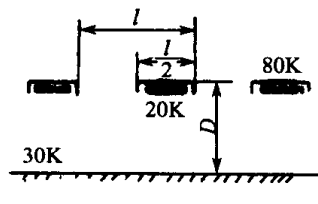
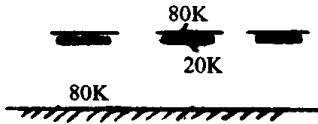
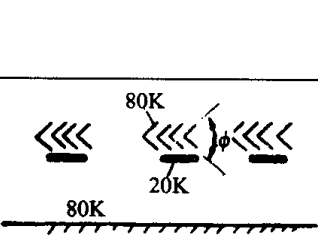
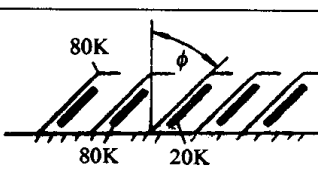
$$\frac{p_C A_C}{p_W A_B} \left(\frac{T_W}{T_C} \right)^{1/2} < 6 \times 10^{-2}$$

可以忽略,因此,由式(5-18)可以得到

$$S = \frac{\bar{v}_W A_B}{4} U_B \quad (5-19)$$

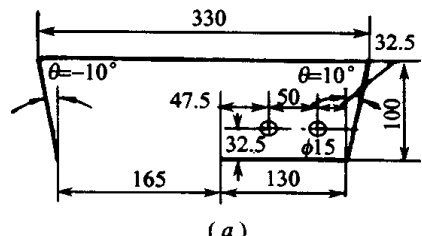
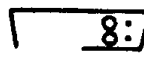
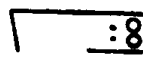
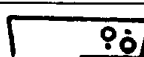
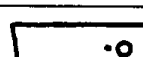
屏蔽板的流导概率 U_B 由屏蔽板的几何形状决定,流导概率大、热负荷又小的最佳尺寸可用蒙特卡罗方法计算出来(见表 5-16、5-17)。

表 5-16 低温泵的各种排列

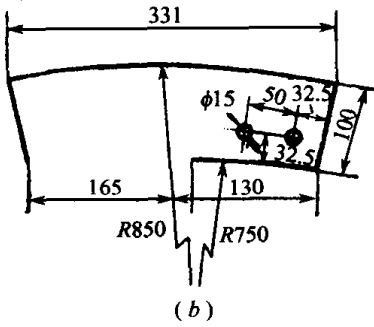
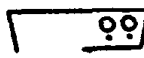
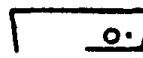
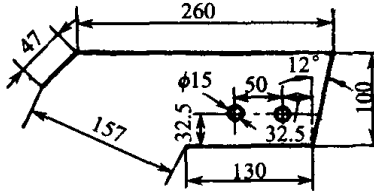
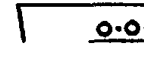

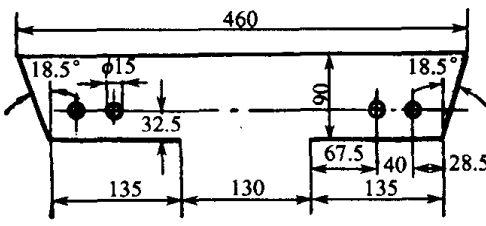

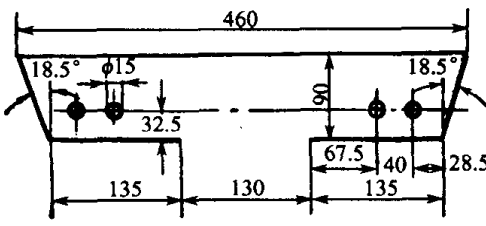
	D/e	0.16	0.25	0.50
	U_B	0.16	0.21	0.23
	$\frac{Q_i}{Q_i \alpha}$	0.009	0.041	0.015
	$\frac{R_1}{R_2}$	0.63	0.52	0.31
	U_B	0.30	0.34	0.44
	$\frac{Q_i}{Q_i \alpha}$	0.017	0.017	0.016
	ϕ	60°	90°	120°
	U_B	0.44	0.48	0.52
	$\frac{Q_i}{Q_i \alpha}$	0.020	0.022	0.022
	$U_B = 0.51$ $\frac{Q_i}{Q_i \alpha} = 0.031$ $\phi = 45^\circ$			

注: α —低温板的吸收率; Q_i —入射到冷冻面的热量; $Q_i \alpha$ —对低温板所产生的热负荷

表 5-17 各种屏蔽板的 U_B 值

 <p>(a)</p> <p>$U_B = 0.398$</p>	 <p>$U_B = 0.412$</p>	 <p>$U_B = 0.363$</p>
	 <p>$U_B = 0.394$</p>	 <p>$U_B = 0.280$</p>

(续)

 <p>(b)</p> <p>$U_B = 0.398$</p>	 <p>$U_B = 0.392$</p>	 <p>$U_B = 0.276$</p>
 <p>$U_B = 0.489$</p>	 <p>$U_B = 0.386$</p>	 <p>$U_B = 0.432$</p>
 <p>$U_B = 0.806$</p>	 <p>$U_B = 0.362$</p>	 <p>$U_B = 0.806$</p>
<p>注:表中“·”表示冷凝管可能放置的位置; 表中“○”表示冷凝管所在位置</p>	<p>$W_2 = 172\text{mm}$ $b = 49\text{mm}$ $W_2 = 160\text{mm}$ $c = 37$ $h = 100$ $e = 37$ $\theta = 12^\circ$ $f = 63$ $\theta' = 12^\circ$ $d = \phi 15$</p>	

3. 抽气口对抽速的影响

生产厂提供的低温泵,大都将低温板和防辐射屏装在泵壳内,通过泵口 A 对真空容器抽气(图 5-44)。设泵内 W 截面上的抽速为 S_p ,泵口的流导为 U ,这时低温泵泵口的有效抽速 S 为

$$S = \frac{S_p U}{S_p + U} \quad (5-20)$$

泵内 W 截面抽速 S_p 用公式(5-19)计算。可以看出,外装式低温泵的有效抽速总是低于内装式低温泵的抽速(泵的内芯结构相同)。大型真空设备(环模、受控热核反应装置等)采用内装式低温泵,能获得更大的抽速。

图 5-45 是低温泵对 N_2 的典型抽速曲线。高压下(10^{-2}Pa 以上)低温泵的抽速升高(制冷功率足够大)的原因是由于泵口和屏蔽板在粘滞流时流导增大,抽速、抽气量随之增大,当抽气量增大到一定值时,气体的冷凝热导致低温板温度升高,引起抽速下降。

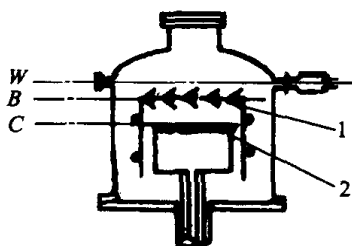


图 5-44 低温泵结构简图
1—屏蔽板；2—20K 表面。

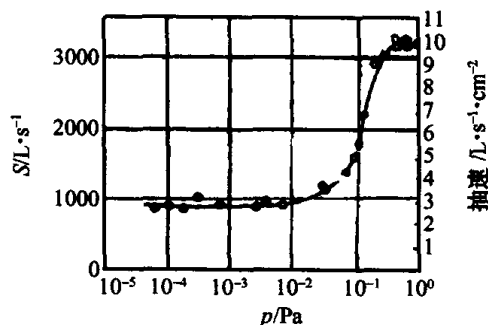


图 5-45 低温泵对氮的抽速

(四) 低温泵的极限压力

低温板凝结气体分子的示意图如图 5-46 所示。入射到低温板的气体分子绝大部分被吸附或冷凝在低温板表面，少部分被弹回或再蒸发(脱附)到空间中去。设气体分子打到低温板的

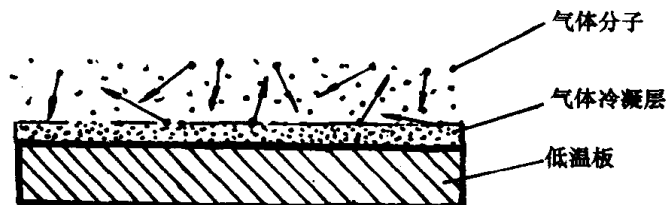


图 5-46 低温板冷凝气体分子示意图

粘附概率为 α_c ，则在单位时间单位表面上冷凝吸附分子的速率为

$$N_1 = \frac{p_a}{\sqrt{2\pi mkT_g}} \alpha_c \quad (5-21)$$

式中 N_1 ——单位面积上冷凝吸附分子的分子数 [$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];
 p_a ——空间的气体压力 [Pa];
 m ——气体分子质量 [kg];
 k ——玻尔兹曼常数 1.381×10^{-23} [J/K];
 α_c ——气体分子的冷凝系数;
 T_g ——入射气体温度 [K]。

冷凝层(远远超过单分子层)面上,单位时间、单位面积上蒸发的分子数(蒸发速率)为

$$N_2 = \frac{p_s}{\sqrt{2\pi mkT_s}} \quad (5-22)$$

式中, T_s 和 P_s 各为冷凝层表面温度和该温下的冷凝气体饱和蒸气压。

不考虑容器和泵壁的放气量,冷凝速率和蒸发速率达到稳态平衡时(即 $N_1 = N_2$) 就是理论上低温泵达到的极限压力

$$p_u = \frac{p_s}{\alpha_c} \cdot \sqrt{\frac{T_g}{T_s}} \quad (5-23)$$

式中 p_u ——极限压力 [Pa];
 p_s ——冷板温度 T_s 下的气体饱和蒸气压 [Pa];
 α_c ——气体分子的冷凝系数;

T_g ——入射气体温度[K]。

设 $T_g = 300\text{K}$, 冷凝层表面温度 $T_s = 10\text{K}$, 对氮、氧(H_2 、 Ne 、 He 除外) 等大多数气体而言, 冷凝系数 $\alpha_c \approx 1$, 代入上式则有

$$p_u = 5.5 p_s$$

表 5-18 给出了不同温度的低温板抽除 300K 气体的条件下, 按公式(5-23) 计算的理论极限压力。

表 5-18 不同温度的低温板抽除 300K 气体理论极限压力

低温板温度 T_k/K	极限压力 p_u/Pa (按公式(5-23) 计算值)	气体饱和蒸气压 p_s/Pa		
		H_2	N_2	O_2
2.5	$10.95 p_s$	3.28×10^{-12}	低到无法测量	低到无法测量
4.2	$8.66 p_s$	4.33×10^{-9}		
2.0	$3.87 p_s$	3.85×10^{-5}	3.87×10^{-9}	2.32×10^{-12}

从表 5-18 可以看出, 抽除 300K 的氢, 低温板温度 $T_k < 3\text{K}$ 时方可获得很低的极限压力。现代低温泵为了有效抽除 H_2 、 Ne 、 He 等气体, 在低温冷凝板上都粘有活性炭、分子筛等吸气剂材料, 其抽气机理是低温捕集(冷凝) 和低温吸附两种方式综合抽气的结果, 对被抽容器不进行烘烤除气, 一般都能获得低于 10^{-8}Pa 极限压力。

(五) 低温泵的热负荷

1. 冷凝板的热负荷

低温泵中冷凝板的热负荷来源于三个方面:

(1) 气体冷凝的热负荷

$$Q_c = q \cdot p \cdot S \frac{M}{RT} \approx 5 \times 10^{-4} q \cdot p \cdot S \frac{M}{T} \quad [\text{W}] \quad (5-24)$$

式中 q ——温度为 T 的每克气体降到冷凝板温度 T_c 时放出的热量[J/g];
 p ——气体压力[Pa];
 S ——低温泵抽速[L/s];
 M ——气体的摩尔质量[g/mol];
 T ——气体温度[K];
 R ——摩尔气体常数 [$8314.25\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$].

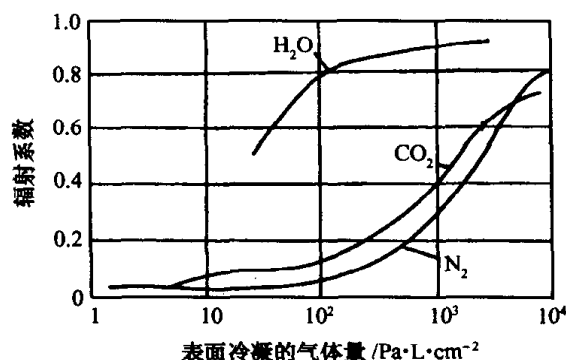


图 5-47 为气体冷凝量对辐射系数的影响。

图 5-47 气体冷凝量对辐射系数的影响

(2) 周围壁板的辐射热负荷

① 没有屏蔽板时, 在分子流状态下冷凝板上的热负荷为

$$Q_c = A_c \cdot \epsilon_c \cdot \sigma (T_w^4 - T_c^4) \quad (5-25)$$

式中 A_c ——冷凝板面积[cm^2];
 ϵ_c ——冷凝板辐射系数;
 σ ——黑体辐射常数 [$5.67 \times 10^{-12}\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$];
 T_w ——容器壁温度[K];
 T_c ——冷凝板温度[K].

若 $T_w \gg T_c$, 上式可简化为

$$Q_c = A_c \epsilon_c \sigma T_w^4 \quad (5-26)$$

σ 的选取, 要考虑长期抽气后霜层所引起的吸收系数的变化。Moore 给出 N_2 霜厚度为 0.5mm 时, ϵ_c 值为 0.5。

设 $T_w = 300K$, $T_c = 20K$, $\epsilon_c = 0.5$, 则单位面积的热负荷

$$\frac{Q_c}{A_c} = 2.3 \times 10^{-2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (5-27)$$

② 有屏蔽板时, 在分子流状态下冷凝板上的辐射热负荷。

屏蔽板的辐射热负荷按公式(5-26) 计算。

冷凝板的辐射热负荷为

$$Q_c = A_c \frac{\sigma(T_B^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \left(\frac{1}{\epsilon_B} - 1\right)} + A_c \beta \epsilon_c \sigma (T_w^4 - T_c^4) \text{ [W]} \quad (5-28)$$

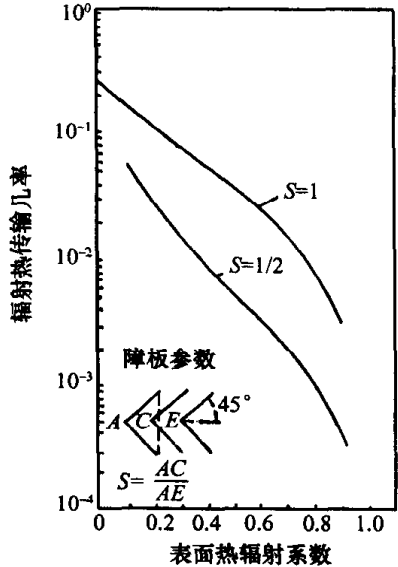
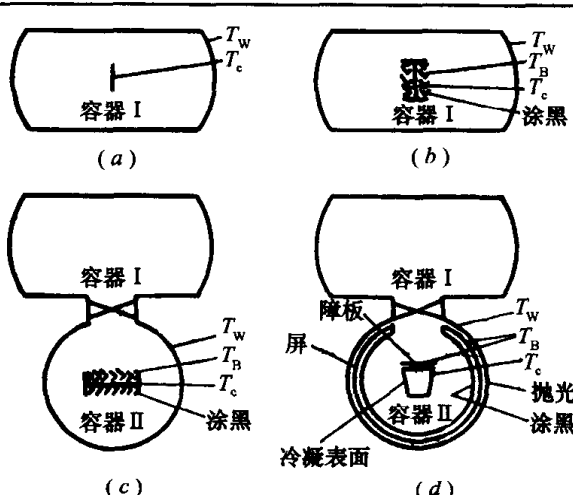
式中 ϵ_B ——屏蔽板辐射系数;

T_B ——屏蔽板温度;

β ——屏蔽板的辐射热传输概率, 它由屏蔽板的几何形状与表面加工的光亮程度来决定, 图 5-48 为山型屏蔽板的辐射系数曲线。

四种低温泵的辐射热负载计算值比较见表 5-19。

表 5-19 四种结构低温泵参数(计算值)

			
图 5-48 山型屏蔽板的辐射系数			
			
结构类型	$A_c/S_e (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_c/S_e (10^{-3} \text{ W/L} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_B/S_e (10^{-3} \text{ W/L} \cdot \text{s}^{-1})$
a	86	1.98	0
b	400	0.102	16.8
c	800	0.200	33.2
d	172	0.034	15.8
注: A_c — 冷凝板面积[cm ²]; Q_B — 屏蔽板辐射热负荷[W]; Q_c — 冷凝板的辐射热负荷[W]; S_e — 低温泵的有效抽速[L/s]			

冷凝板支撑结构传走的热量可根据具体支撑结构、支撑材料及支撑板数目去计算。为了减少热传导,要求支撑板截面尽可能小(最好设计成点接触),支撑材料的热导率小,其长度尺寸尽可能大。由支撑板导走的热量为

$$Q_D = K \frac{A_0(T_1 - T_2)}{L} \quad [\text{J}] \quad (5-29)$$

式中 K ——支撑材料的热导率 $[\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})]$;
 A_0 ——传导热量的截面面积 $[\text{cm}^2]$;
 T_1, T_2 ——支撑板两端的温度 $[\text{K}]$,且 $T_1 > T_2$;
 L ——支撑板长度 $[\text{cm}]$ 。

(六) 低温泵的启动时间

低温泵启动时,通常先将液氮屏蔽板温度降低到工作温度 T_B 。设 $t = 0$ 时,屏蔽板和周围表面均处于温度 T_W ,利用制冷机冷冻介质的循环,经过时间 t_c 后使屏蔽板的温度降到工作温度 T_B ,周围环境温度仍为 T_W 。 t_c 便为启动时间,可以从下式得到

$$\int_0^{t_c} Q_B dt = m_B \cdot C(T_W - T_B) + Q_c + \int_0^{t_c} A_B \epsilon_B \sigma (T_W^4 - T_B^4) dt + \int_0^{t_c} Q_D dt \quad (5-30)$$

式中 m_B ——屏蔽板质量;
 C ——屏蔽板材料热容;
 A_B ——屏蔽板热辐射面积;
 Q_B ——屏蔽板总的热负荷;
 Q_c ——气体冷凝的热负荷;
 Q_D ——支撑板导走的热负荷。

(七) 低温泵的工作时间

低温泵长期工作会因霜层过厚,产生较大的温度梯度。随着温度梯度增加,泵的抽速将迅速衰减。霜层温度高于 20K 时对 N_2 的抽气效果影响很大。温度在 23.7K 时, N_2 的饱和蒸气压为 10^{-6}Pa , 27K 时为 10^{-4}Pa ,而要获得 10^{-8}Pa 的真空度,温度不能高于 21.1K 。由此可见,低温泵的工作时间受霜层厚度的限制。

霜层厚度 $b[\text{cm}]$ 可用下面公式计算

$$b = \frac{q}{\rho A} \quad (5-31)$$

式中 q ——低温泵所抽走的总气量(包括将容器从 p_1 抽到 p_2 所排走的气量和在动态平衡条件下,工作时间 t 后抽走的总气量) $[\text{g}]$;
 ρ ——霜的密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$,见表 5-20;
 A ——冷凝面积 $[\text{cm}^2]$ 。

表 5-20 霜的密度

气 体	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	成霜条件 /K	固态密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
N_2	0.9	20	1.026
CO_2	0.765	77	1.53
O_2	1.3 ^①	20	1.425

注:①按固态密度的 88% 计算

在热平衡条件下,厚度为 b 的霜层所引起的温差为

$$\Delta T = \frac{Qb}{K} \quad (5-32)$$

式中 Q ——霜层表面单位时间单位面积上所吸收的热量(气体凝结热和辐射热)[J/cm²s];
 K ——霜层热导率[W/(cm²·K)]。

(八) 深冷霜吸气现象

1961年,有人发现低温泵在抽除冷凝气体的同时,残余的非冷凝气体也一起被排除了,而且非冷凝气体的排除量比物理吸附的量还大。后来又有人发现,用 77K 冷冻面抽除冷凝气体 CO₂ 时,非冷凝性气体 N₂ 也被抽除了。如果用 77K 的冷冻面来抽水蒸气时,伴之对氮的抽气效果更好。这是由于在深冷条件下形成的深冷霜对非冷凝气体有一定的抽气能力,这种现象称为深冷霜吸气现象。深冷霜的吸附实验曲线如图 5-49 ~ 图 5-52 所示。图中曲线和斜直线说明详见参考文献[33]第 180 页。

深冷霜抽气的实验结果见表 5-21 ~ 表 5-23。

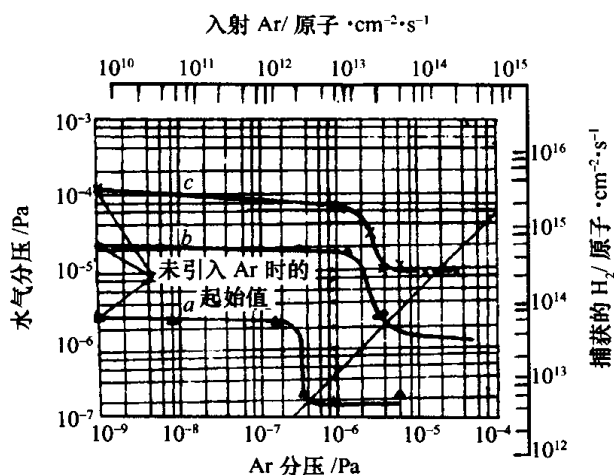


图 5-49 4.2K 下,Ar 霜对 H₂ 的吸附效应

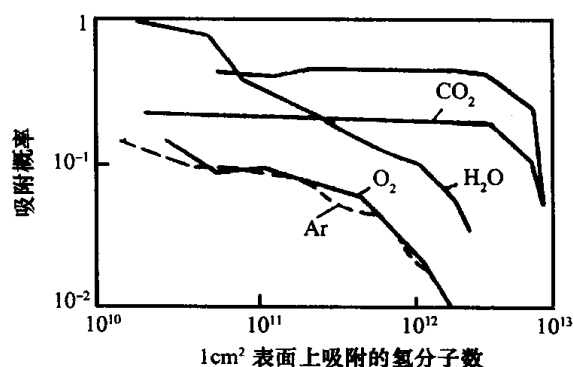


图 5-50 11K 冷冻面上的 Ar, O₂, H₂O, CO₂ 霜层对氢的吸附概率

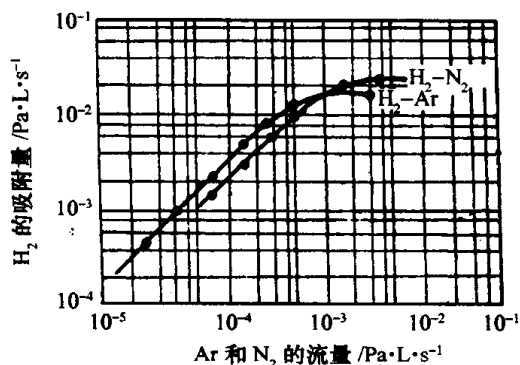


图 5-51 Ar 和 N₂ 的流量以 H₂ 的吸附量的影响

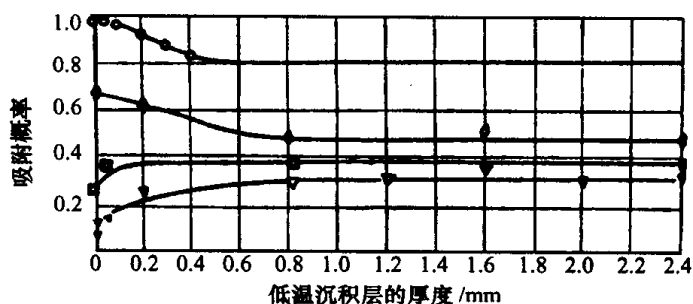


图 5-52 CO₂ 霜层的厚度对吸附概率的影响

表 5-21 各种气体开始结霜的温度

压 力	结霜温度 /K	气体种类	N ₂	O ₂	Ar	CO	CO ₂	SO ₂	N ₂ O	H ₂ O
			20 ~ 30	25	25	20 ~ 30	80	70 ~ 80	70 ~ 80	> 80

表 5-22 深冷霜抽氢的实验结果

形成霜的气体	比抽速 /L · s ⁻¹ · cm ⁻²	冷凝面温度 /K	被抽气体温度 /K
CO ₂	12.3	11	300
CO ₂	21.6	16.3	77
CO ₂	23.4	15.3	77
CO ₂	28	12	300
CO ₂	19	16	300
CO ₂	14	20	300
CO ₂	30	20	300
CO ₂	20	20	78
CO ₂	20	20	78
H ₂ O	9.5	11	300
H ₂ O	39.1	21.3	300
H ₂ O	24.4	20	78
N ₂ O	15.1	11	300
O ₂	2.3	11	300
O ₂	20	20	20
N ₂	1.5	11	300
N ₂	5.2	20	20
Ar	2.3	11	300

表 5-23 深冷霜抽 He、Ne 的实验结果

被抽气体	形成霜气体	抽速 /L · s ⁻¹ · cm ⁻²	冷凝面温度 /K
He	N ₂	3.2	4.2
	Ar	3.0	4.2
	CO ₂	4.5	4.2
Ne	CO ₂	~ 2.0	14

(九) 小型制冷机低温泵

小型制冷机低温泵采用两级制冷的氦封闭循环制冷机。选用这种制冷机的原因是它在 77K 和 15K 时能提供抽除真空室所必需的制冷功率。适合小型制冷机的制冷循环如图 5-53 所示。现代小型制冷机低温泵用得最多的是 G—M 循环, 无负荷时可获得 7K 的低温, 20K 时制冷功率为 1W ~ 20W。另一类是斯特林(Stirling) 循环, 最低温度为 12K, 20K 时制冷功率 10W ~ 400W, 但斯特林循环制冷机的振动较大, 很少选用。

1. G—M 循环制冷机的工作原理

G—M 循环制冷机将压缩机和膨胀机分开, 前者作为气源, 后者产生制冷效应。中间用阀

门控制膨胀机的工作。与斯特林制冷机相比,效率低、体积和质量大。但它的主要优点是压缩机的机械振动传不到冷头,并且两部分分开后制造容易。膨胀机部分很紧凑,使用方便。由于活塞运动速率很低($50\text{r/min} \sim 500\text{r/min}$),汽缸和膨胀活塞之间的间隙大,膨胀活塞两面的压差小,对密封要求低,压缩机用油润滑,这就大大提高了膨胀机的使用寿命。目前这种制冷机的维修周期可达3000h,寿命上万小时。

G—M循环制冷机的工作原理由吉福特(Gifford)和麦克马洪(McMahon)于1959年提出,其基本组成部分是压缩机及油吸附器等附属装置。压缩机的作用是将从膨胀机来的低压气体进行压缩,提供高压力的纯净工质(氦气)。现在大都使用油冷却和润滑的旋片式压缩机,并带有必要的冷却和过滤净化装置。膨胀机的作用是使高压气体在它内部绝热膨胀制冷。为使它有效地工作,除膨胀机汽缸要有真空绝热外,还要使膨胀机内的活塞运动和进、排气阀门的启闭成合适的关系。可用启动阀门的电机带活塞运动,也可做成气动式的,即利用高压气体的能量,使活塞两面的压力不同,迫使活塞运动。基本流程示意图如图5-54所示。工质(氦气)经压缩机压缩为高压高温气体,与冷却器热交换为常温高压氦气,经油分离器、油吸附器成为高纯度氦气。由进气阀进入制冷机汽缸绝热膨胀做功后,再经排气阀流入压缩机,形成封闭循环。汽缸中的活塞驱动方式有气动和机械驱动二种。机械驱动采用低速电机带动二个偏心轮(按一定角度配置)和活塞曲轴,使进、排气阀按一定的配气角交替开启、关闭,同时曲轴带动活塞作上下往复运动,使G—M循环制冷系统内的压力产生周期性变化(图5-55)。制冷原理如下:当活塞运

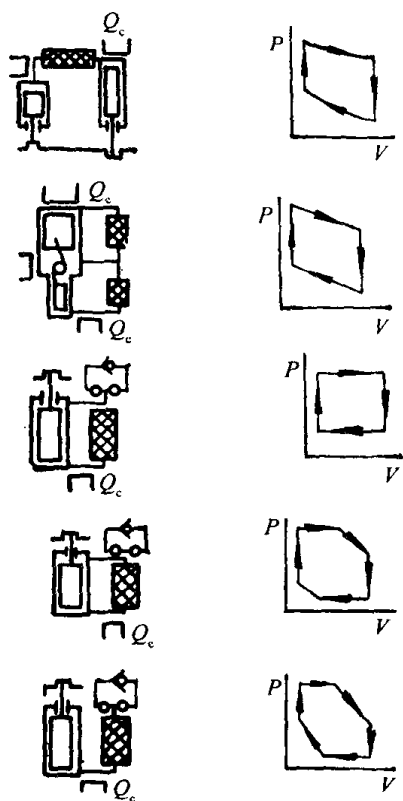


图 5-53 小型制冷机的制冷循环

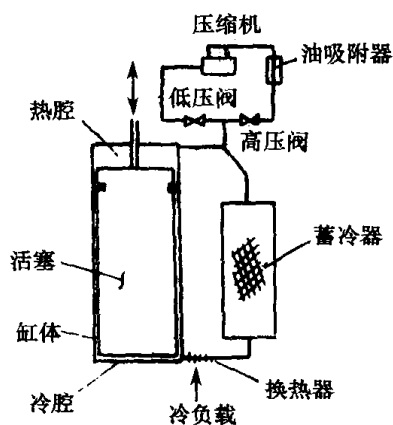


图 5-54 单级 G—M 循环制冷机流程示意图

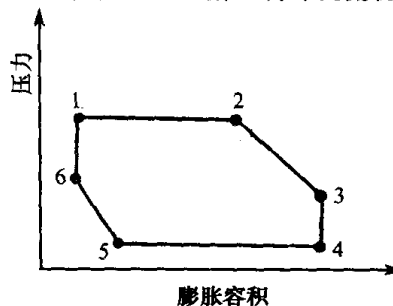


图 5-55 制冷流程压力—容积关系曲线
(每一循环周期)

动到下死点(冷腔体积近于零、热腔体积最大)位置6时,进气阀打开(排气阀关闭),常温高压氦气充入热腔和蓄冷器,气体压力从6位置突然升高到位置1,气体压缩热在冷腔接近于零。接着活塞变为向上运动,热腔中的常温高压氦气经过蓄冷器被冷却后进入冷腔,这时气体比容随之减小,压力降低,常温高压氦气经进气阀不断补入,气体压力如线段1-2、维持压力不变。当活

塞运动到接近上死点位置 2 时,进气阀关闭,充气结束。活塞继续向上运动,工质压力沿曲线 2-3 下降,直到活塞运动到上死点位置 3,排气阀打开,冷腔中的低温高压氦气与压缩机进气端接通,氦气绝热膨胀制冷,获得净冷量,压力变化为 3-4。之后,活塞向下运动,冷腔中的低压冷氦气经过蓄冷器、使蓄冷器内的填料温度进一步降低后分别流入热腔和压缩机的进气端,压力维持不变(4-5)。当活塞接近最低位置时,排气阀门关闭,气体压力沿 5-6 升高,活塞回到位置 6 时,进气阀门打开,开始下一个循环。

每次循环中,通过进气阀经过蓄冷器冷却流入冷腔的高压氦气的初温比上个循环中更低,在冷腔中绝热膨胀阶段后的温度也就更低,进一步冷却冷腔壁和蓄冷器内填料,这样经过多次循环不断降温,直到热量的动平衡建立为止。

为了使结构紧凑,实用的 G—M 循环制冷机中的蓄冷器放在活塞内。二级制冷的 G—M 制冷机的缸体内部结构如图 5-56 所示。G—M 循环小型制冷机性能参数见表 5-24。

表 5-24 G—M 循环小型制冷机性能参数^①

型 号	制冷功率 ^②		降温时间 (至 20K) /min	温度范围 /K	整机质量			维修时间 /h	整机功率 /kW
	二级 /W	一级 /W			压机 /kg	制冷机头 /kg	总质量 /kg		
CS-202	$\frac{2}{(20K)}$	$\frac{7}{(77K)}$	40	10 ~ 300	56.7	6.8	68	9×10^3	1.5
CS-208R	$\frac{5}{(20K)}$	$\frac{65}{(77K)}$	30		113.4	13.6	136	9×10^3	5
CS-208L	$\frac{10}{(20K)}$	$\frac{30}{(77K)}$	30		113.4	13.6	136	9×10^3	5
CS-227	$\frac{40}{(20K)}$	$\frac{150}{(77K)}$	80		—	56.7	—	9×10^3	25
CS-101	$\frac{25}{(77K)}$	—	10	35 ~ 300	56.7	4.5	63.5	9×10^3	1.5
CS-102	$\frac{17}{(77K)}$	—	15		56.7	4.5	63.8	9×10^3	1.5
CS-108	$\frac{100}{(77K)}$	—	15		113.4	13.6	136	9×10^3	5
CS-1003	$\frac{1}{(77K)}$	—	10		18.1	2.3	22.7	9×10^3	0.5

注:① 摘自美国空气产品公司产品样本;
②() 内数值为制冷温度

2. 小型制冷机低温泵结构

典型的小型制冷机低温泵的泵体结构如图 5-57 所示。两级制冷机冷头通过法兰直接插入到泵壳内。屏蔽板及入口障板与制冷机一级冷头相连,工作温度在 70K ~ 80K。屏蔽板的作用有二:除可以冷凝抽除 H_2O 、 CO_2 等气体外,主要是为低温抽气板提供隔热屏蔽。屏蔽板顶端或侧壁装有障板。向着低温板的一面涂(镀)黑,外面镀银抛光,用以降低二级制冷机头的热负荷。主抽气低温板用铜垫片连接到制冷机二级头上,外表面镀银抛光,内壁粘活性炭。低温板工作温度低于 20K,通常为(14K ~ 15K),能大量冷凝吸附除氢、氦、氩以外的其它常见气体。低温活性炭用以吸附氢、氦、氩等难凝气体。

氢是真空系统中分压较高的气体,氦和氩的气量很小。在各种吸附材料中,活性炭对氢的吸附能力最强,见表 5-25。

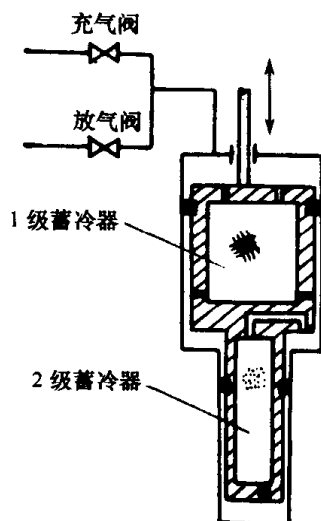


图 5-56 G—M 制冷机缸体内部结构图

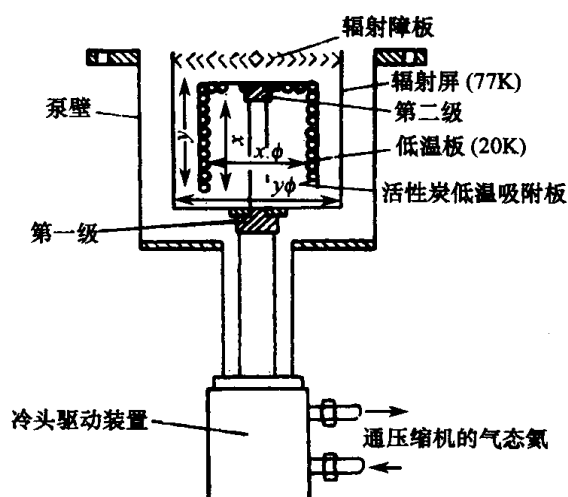


图 5-57 小型制冷机低温泵泵体结构

表 5-25 各种吸附材料对氢的吸附能力

材 料	微孔面积 $/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	工作压力 $/\text{Pa}$	到达饱和时间 $/\text{h}$	饱和吸附量 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1}$
分子筛 3A、5A、13X	700 ~ 800	2×10^{-4}	1	2
活性氧化铝	230 ~ 280	5×10^{-4}	6	40
活性炭	500 ~ 2500	5×10^{-2}	1	700
		2×10^{-3}	130	3500

活性炭以椰壳活性炭最好。微孔面积为 $10^3 \text{m}^2/\text{g}$ 的椰壳活性炭，在工作真空 10^{-4}Pa 时的饱和吸附量为 $200(\text{STP})\text{cm}^3/\text{g}$ 。

泵芯结构通常使 $x = 0.75y$ ，第二级对第一级的制冷功率比为 $1:3.5 \sim 1:11$ ，而在低压下(分子流态) $1:100 \sim 1:200$ 是最佳值。低温泵的抽速随泵口横截面的增加而增加，泵体高度的变化对抽速影响较小。

小型制冷机低温泵外壳结构分为三种类型，如图 5-58 所示。① 裸式泵。将泵芯直接插入真空室中。② 直筒泵。泵体外形为直筒形，是最常见的一种泵。③ 凸腔泵。泵腔部分扩大，提高泵的抽速。

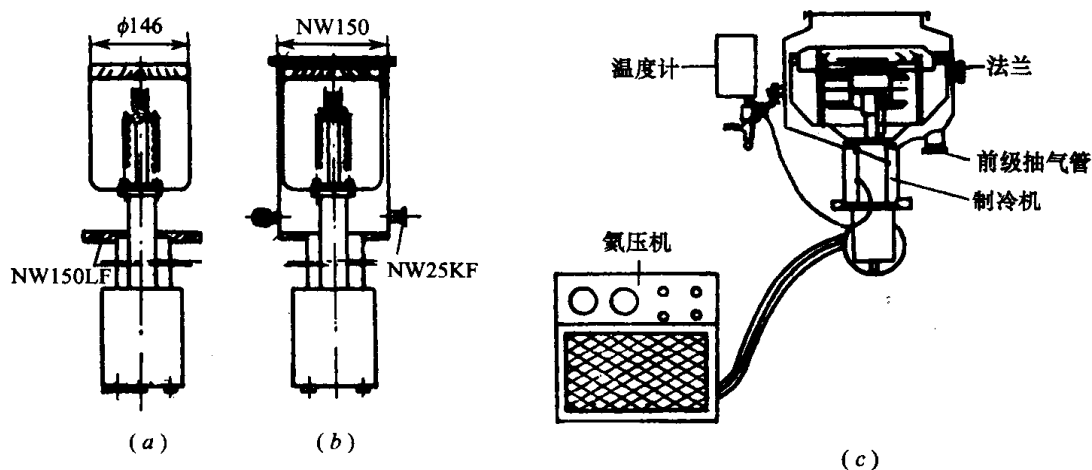


图 5-58 小型制冷机低温泵结构图

(a) 裸式泵；(b) 直筒式泵；(c) 凸腔式泵。

二、低温泵

图 5-59 是日本 ULNAC 公司生产的 CRYO - U12H 型低温泵。图 5-60 是一台制冷机带三个低温板的扁窄型低温泵。图 5-61 是外加液氮杜瓦的凸腔式低温泵。

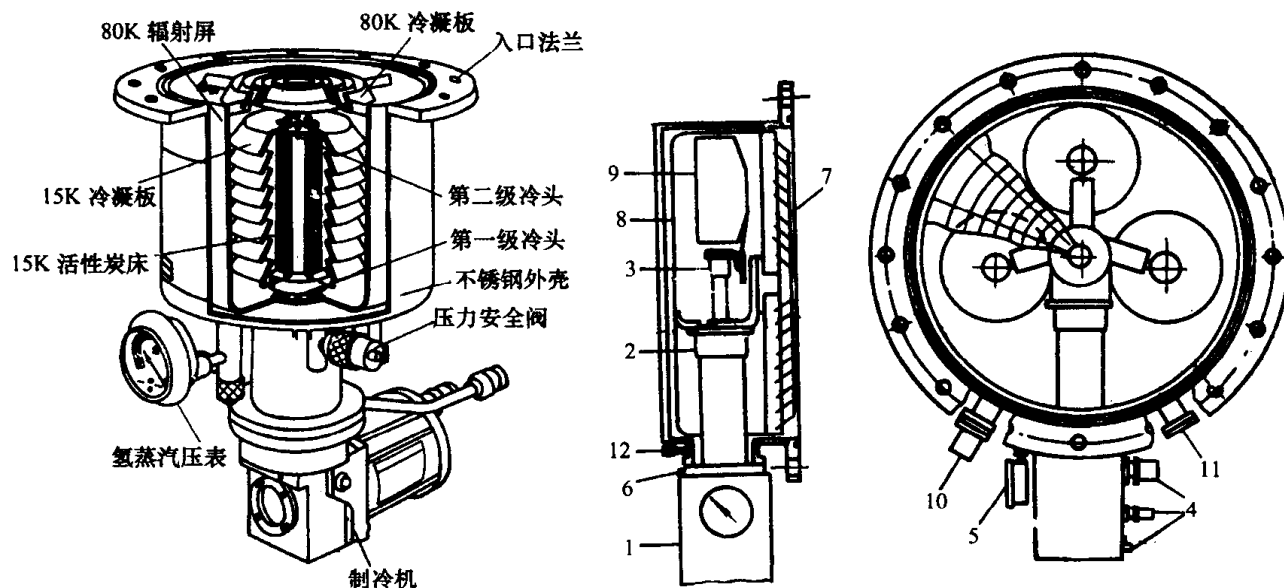


图 5-59 CRYO - U12H 型低温泵

图 5-60 窄型制冷机低温泵结构
1— 致冷膨胀机; 2— 一级冷头; 3— 二级冷头; 4— 气、电接头;
5— H_2 蒸气温度计; 6— 排水口;
7— 百叶窗式入口障板; 8— 热板; 9— 冷板(三个);
10— 压力安全阀; 11— 排气口; 12— 清洗口。

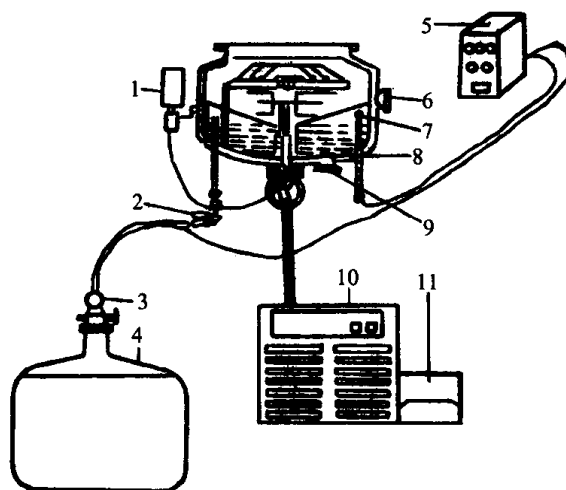


图 5-61 凸腔型制冷机低温泵
1— 温度计; 2— 低温阀; 3— 接头; 4— 液氮瓶; 5— 控制仪;
6— 法兰; 7— 液位计; 8— 液氮; 9— 前级抽气管; 10— 压机; 11— 吸附桶。

3. 小型制冷机低温泵的抽气特性

(1) 制冷机低温泵的极限压力

制冷机低温泵的极限压力如同上节所述, 取决于低温冷凝板温度和吸附剂的吸附特性。用制冷机低温泵的抽气系统, 普通碳钢容器不经烘烤可以获得低于 10^{-6} Pa 的真空度, 不锈钢容

器经 300℃ 高温除气,能获得 10^{-8} Pa 的超高真空。

(2) 制冷机低温泵的抽速

低温泵属于选择性抽气泵,对各种气体的抽速差异很大,如图 5-62 所示。 H_2 、Ne、He 等气体是靠二级冷头低温板(20K) 内壁粘附的活性炭吸附抽除,因而有效抽速很低。对于 H_2O 、 CO_2 等饱和蒸气压很高的气体,可直接冷凝在入口的低温板(77K) 上,其抽速值最高。泵对各种气体的比抽速,见表 5-26。

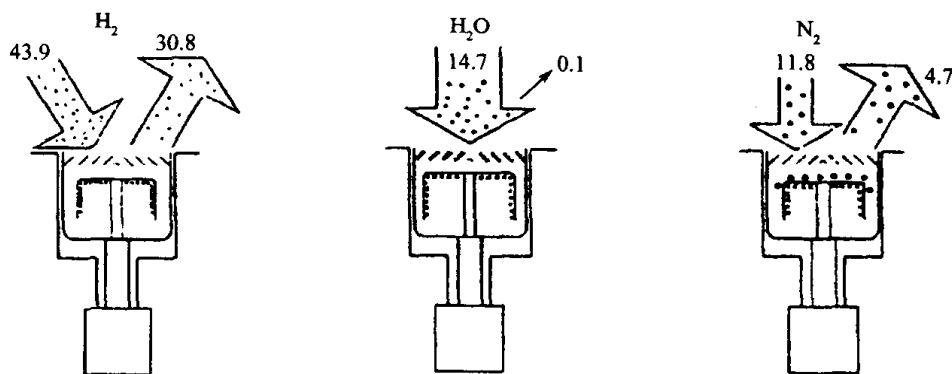


图 5-62 制冷机低温泵捕获各种气体效率

表 5-26 制冷机低温泵对各种气体的有效抽速

气 体 种 类	H_2	N_2	H_2O
进气口单位面积上理论抽速 $/L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$	43.9	11.8	14.7
进气口单位面积的实际抽速 $/L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$	13.1	7.1	14.6
实际抽速与理论抽速之比 /%	30	60	99.3

兰州物理研究所研制的 ZDB500 型制冷机低温泵对空气、氢气、氮气的抽速曲线如图 5-63 所示。当压力高于 10^{-1} Pa 时,可以看到对空气、氢气的抽速明显增加,在 1Pa 附近,有一最高峰值,压力过高时,抽速逐渐衰减。

(3) 允许的最大抽气量(饱和抽气容量)

低温泵长期连续运转,泵的抽速随抽气时间延长而逐渐衰减,当抽速下降到初始抽速的 80% 时,所累积抽除的气量定义为泵的“饱和抽气容量”。图 5-64 给出 ZDB500 型制冷机低温泵抽氢的吸附容量曲线,达到饱和容量后,抽速衰减速度增加很快,这时,需要停泵再生,用以恢复泵的抽气性能。

低温冷凝抽除水、空气、二氧化碳等气体的容量很大,冷凝的气体霜层可厚达数毫米而不影响泵的抽速。制冷机低温泵饱和抽气容量主要是由活性炭的低温吸气容量所决定,粘贴在二级冷板内壁的活性炭材质(椰壳活性炭最好)、质量和活化工艺,都影响制冷机低温泵的饱和吸附容量。生产厂家通常提供低温泵在给定的压力下(例如 10^{-4} Pa) 对空气 N_2 、Ar、 H_2 、He 等气体的最大抽气容量,供用户参考。

(4) 转换压力

小型制冷机低温泵选用的制冷机的制冷功率很低,二级冷头制冷功率一般只有 3W ~ 10W,一般不超过 30W,所以它不能直接在大气压力下工作,需要用粗抽泵将被抽容器压力降到能够启动时才开启高真空阀让低温泵抽气。允许启动低温泵的启动压力和被抽容器的体积

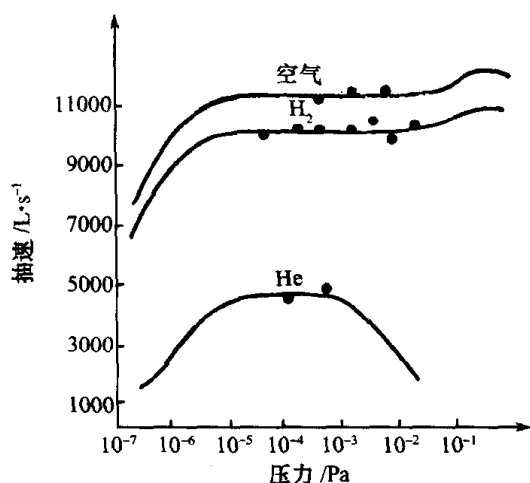
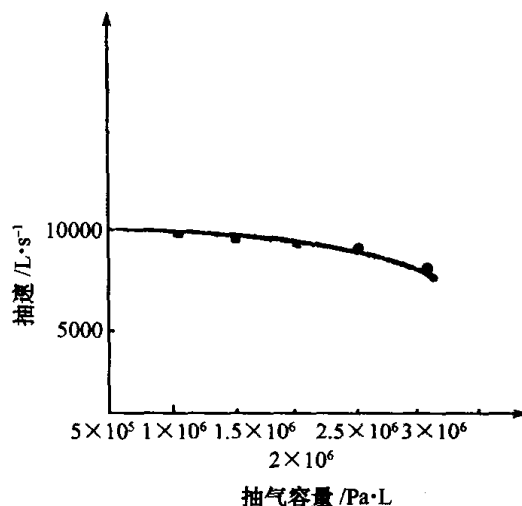


图 5-63 ZDB500 小型制冷机低温泵抽速曲线

图 5-64 ZDB500 小型制冷机低温泵
抽氢吸附容量曲线

有关。关闭粗抽泵,打开高真空阀,允许低温泵开始抽气时容器内的最高压力称为转换压力。它由下式确定

$$P \leqslant 3.5 \times 10^{-3} \frac{W}{V} \quad (5-33)$$

式中 P ——转换压力[Pa];

V ——被抽容器体积[L];

W ——制冷机二级冷头(20K)制冷功率[W]。

由于气体在二级冷板上释放的热量主要是冷凝潜热(气体温度变化的显热和潜热相比可以忽略不计),另一方面,被抽气体先到达泵口的挡板上进行热交换,然后再被二级冷板抽除,此时气体温度已接近 80K。所以抽除的气体高于或低于室温的气体,不需要对上述公式进行修正。

(5) 制冷时间

低温泵的制冷时间是指从启动低温泵的制冷机到低温泵能正常工作所需要的时间,有时也称启动时间。在制冷机低温泵中是指一级和二级冷板从室温分别降到 80K 和 20K 以下的时间。

(6) 制冷功率

制冷机的制冷功率是指制冷机一级和二级冷头在给定的温度下所能承受的焦耳热流率,单位为 W。测定时,在制冷机一、二级冷头上装上加热带,分别控制加热功率,使一级冷头达到 80K、二级冷头达到 20K,测出的功率作为一、二级冷头的制冷功率,它是衡量制冷机性能的重要参数。制冷机一、二级冷头,不加任何热负载,达到的最低温度称为零负载的极限温度。装上抽气低温板的条件下,控制一级冷板温度 $T_1 \leqslant 80\text{K}$,二级冷板温度 $T_2 \leqslant 20\text{K}$ 时,测得的制冷功率称为净制冷功率,它决定了低温泵冷板结构面积的配置以及抽气容量和转换压力。

(7) 启动压力

受制冷功率的限制,制冷机低温泵不能在大气压下启动,气体冷凝的热负荷和气体对流换热使低温板温度达不到工作温度而不能启动。此外,高压下启动时,大量气体冷凝在低温板上,影响低温泵的再生时间,严重时冷凝的冰晶会堵塞活性炭微孔,影响低温泵对氢、氦、氮的抽气

能力。低温泵允许启动的最高压力称为启动压力。通常用旋片泵或干式泵将真空室和低温泵预抽到数十帕就可以启动制冷压缩机。为了避免油蒸气的污染,用旋片泵预抽时需加冷阱,或在压力低于 10Pa 时关闭预抽阀门停止抽气。

(8) 再生时间

低温泵长期运转达到饱和容量时,其抽速急剧下降(图 5-64),这时需停泵升温,使先前冷凝的气体释放出来,恢复原来的抽气性能。升温并抽除释放出冷凝吸附的气体称为“再生”。再生方式有两种:全部再生(一、二级冷板升至室温,释放出低温板冷凝的全部气体)和部分再生(仅放出二级冷板吸附的气体)。

全部再生法有下面几种方式:

① 自然升温法:关掉制冷机电源,利用泵壁的热量使低温泵缓慢升温,开始时升温很慢,当泵内压力升到对流换热起作用时,升温速率加快,最后达到稳定的升温值。

② 放气升温法:停掉制冷机后,打开放气阀放入清洁、干燥的空气使低温泵冷板快速升温。

③ 电加热法:低温泵中的一、二级冷板上加装电加热器,再生时通电加热使低温板快速升温,缩短再生时间。

自然升温适用于抽除少量气体,并且不是连续长期排气的真空系统,关掉制冷机后让其自然升温再生,一次再生需要 5h ~ 6h。要求快速再生的工艺流程作业场所,可采用后两种再生方式。

部分再生和全部再生的不同之处是升温温度控制在 140K(一级冷板温度)以下,而不是室温。该温度下水的饱和蒸气压低于 10^{-6} Pa,冷凝在一级冷板的水基本上没有被再生排除,这样就大大缩短了再生时间。部分再生时间一般只需要 40min ~ 60min,而全部再生要长达 5h ~ 6h(自然升温法)。

显然,部分再生若干次(20 次 ~ 25 次)以后,还需要全部再生一次,用以彻底清除冷板捕集的所有气体。

再生低温泵要特别注意安全问题。低温泵再生释放出来的气体如果不及时抽除,容器内压力很高,有可能引起爆炸,破坏泵体或真空计玻璃管壳壳体。如果低温泵运转时间很短,抽除气量很少,停泵再生时可以不用预抽泵抽气,等下次启动低泵时再预抽释放出的气体。如果抽气时间很长或抽除气量很大(例如测定抽气容量),再生时必须启动预抽泵抽除释放气体。要求低温泵体上要装有可靠的安全阀,并注意定期检查。升温到某一温度时永久性气体的解吸速度很快(潜热和显热值很小)数分钟之内便可使泵体内压力升高到一个大气压以上,稍有疏忽就可能造成事故。

三、低温容器

(一) 概述

用来贮存和运输沸点温度低于 120K 液态气体的设备均称为低温容器。真空技术中最常用的低温容器是液氮容器和液氦容器。

低温容器的分类见表 5-27。

表 5-27 低温容器的分类

分类方式	低温容器类型
按贮存介质分	1. 液氦(4.2K) 容器; 2. 液氢(20.4K) 容器; 3. 液氮(27.3K) 容器; 4. 液氮(77.3K) 容器; 5. 液氩(87.3K) 容器; 6. 液氧(90.17K) 容器; 7. 液化天然气(112K) 容器
按绝热方式分	1. 堆积绝热低温容器; 2. 高真空绝热低温容器; 3. 真空粉末绝热低温容器; 4. 高真空多层绝热低温容器; 5. 多屏真空绝热低温容器
按用途分	1. 小型容器(杜瓦瓶); 2. 液氮生物容器; 3. 固定式低温贮槽; 4. 运输式低温贮槽; 5. 玻璃低温容器; 6. 自增压式液氮容器; 7. 医用液氧容器; 8. 高压汽化式低温容器

(二) 低温容器的热流量计算

热量通过气体对流、固体传导和辐射等途径传入低温容器,其传热流量在工程设计中按以下方法计算。

1. 气体分子在高压下的对流传热流量

在低温容器夹层真空破坏或充气冷却试件时,多数气体的传热流量可按下式计算

$$\Phi = \lambda \cdot A \cdot \Delta T = C \cdot T^n \cdot c_v \cdot A \cdot \Delta T \quad (5-34)$$

式中 Φ ——残余气体分子的传热流量[W];

A ——传热面积[m²];

λ ——导热系数[W/m·K];

c_v ——气体分子的比定容热容;

ΔT ——温差[K];

$C = 1.5 \sim 2.5$;

$n = 0.6 \sim 0.9$ 。

2. 气体分子在高真空下的对流传热流量

高真空状态下,两个同轴圆筒间的残余气体分子的对流传热流量 Φ 按下式计算

$$\Phi = Kap(T_2 - T_1)A \quad [\text{W}] \quad (5-35)$$

式中 A ——传热面积[m²];

T_2, T_1 ——热壁、冷壁的温度[K];

p ——气体压力[Pa];

a ——气体分子在 T_1, T_2 表面的总的适应系数, a 值由表 5-28 给出;

K ——系数,数值见表 5-29。

表 5-28 不同温度下几种气体的 α 值

温度 /K	气体种类	氮 气	氢 气	空 气
300		0.3	0.3	0.8 ~ 0.9
77		0.4	0.5	1
20		0.6	1	—
4		(1)	—	—

表 5-29 K 值(单位: $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{Pa}$)

气体种类	氮(N_2)	氧(O_2)	氢(H_2)	氖(Ne)	氦(He)
T_1 与 T_2 的范围	$< 400\text{K}$	$< 360\text{K}$	$300\text{K} \sim 77\text{K}$	$77\text{K} \sim 20\text{K}$	任意
K	1.193×10^{-4}	1.118×10^{-4}	3.961×10^{-4}	2.986×10^{-4}	2.101×10^{-4}

3. 绝热空间及管口的辐射传热流量

高真空绝热容器和大口径低温容器,在不考虑气体辐射热时,低温面的净辐射传热流量 Φ 由下式计算

$$\Phi = C_0 \epsilon_n F_1 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] F_{1-2} \quad (5-36)$$

式中 Φ ——高温面传向低温面的净辐射热流量[W];

C_0 ——黑体辐射常数, $C_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$;

F_1 ——低温面的面积 $[\text{m}^2]$;

T_2, T_1 ——高、低温表面的温度[K];

F_{1-2} ——冷表面对热表面的辐射角系数,在冷表面被热表面包围时,一般取 1,不同几何形状表面之间的角系数见参考文献[52];

ϵ_n ——有效辐射系数,不同情况的 ϵ_n 值见表 5-30。

表 5-30 在 $F_{1-2} = 1$ 时,不同情况下的 ϵ_n

序号	两表面的形状	ϵ_n
1	无限长的同心圆筒,半径为 r_1, r_2 ,内圆筒记为 1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)\left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$
2	半径为 r_1, r_2 的同心球面,内球面记为 1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$
3	无限长的两平行平面	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$
4	两个任意形状的表面	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$
5	面 1 被比它大得多的面 2 所包围,1、2 表面形状不定	ϵ_1
6	介于序号 4、5 之间的情况	$\epsilon_1 > \epsilon_n > \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$

某些材料在不同温度下的辐射率 ϵ 列于表 5-31 中。

表 5-31 某些材料在低温下的辐射率 ϵ

材料名称	表面与加工情况	4K	20K	77K ^①	90K	300K ^②
铝	抛光的光净表面	0.011		0.018		0.03
	粗糙表面					0.055
	氧化层厚度 $1\mu\text{m}$					0.03
	涤纶薄膜双面喷铝			0.06		
	板	0.012		0.013		0.05
	箔	0.013		0.013	0.038	0.06
	镀在玻璃表面				0.038	
	镀在铜表面					0.02
铜	抛光的干净表面	0.006 ~ 0.015	0.015 ~ 0.019	0.019 ~ 0.029	0.019 ~ 0.035	0.03
	箔			0.011		
金	板			0.026	0.026	0.02 ~ 0.03
	箔			0.012 ~ 0.027		
	涤纶薄膜双面喷金			0.02		
	不锈钢镀金			0.025 ~ 0.027		
	铜镀金			0.025		
银	板	0.004		0.008	0.023 ~ 0.036	0.02 ~ 0.03
	镀金			0.008		
铬	板			0.08	0.065 ~ 0.08	0.08
	镀层			0.08		
镍	抛光			0.022		0.04
	镀在抛光的铁上 箔(0.1mm)			0.03		0.045
铅	板	0.012		0.036		0.05
	氧化 箔	0.011		0.036		0.28
锌	板			0.026		0.05
	箔			0.02		
钛		0.012		0.013		0.05
铸铁	抛光					0.21
不锈钢				0.048		0.08
蒙乃尔合金				0.11		0.20

(续)

材料名称	表面与加工情况	4K	20K	77K ^①	90K	300K ^②
黄铜	抛光后的干净表面 板 严重氧化	0.018		0.029	0.046	0.03 0.06 0.60
焊锡				0.032		0.047
伍德合金						0.16
铜镀镍			0.027	0.033		
铜镀银			0.013	0.017		
塑料	硬的光滑板					≥ 0.945
石英						≥ 0.932
水						≥ 0.920
冰						≥ 0.960
大部分非金属						≥ 0.8
玻璃					0.87	≥ 0.90
漆	白色 黑色无光泽					≥ 0.925 ≥ 0.97
油漆	各种颜色					≥ 0.92 ~ 0.96
纸						≥ 0.92

注:① 某些文献中注明 78K 或 76K;
② 指室温范围 273K ~ 300K

4. 通过多层绝热体的综合导热流量

在多层绝热体中,以辐射、固体传导和气体传导综合方式传递的热流量可由下式计算

$$\Phi = \frac{K}{l} F_m \Delta T [\text{W}] \quad (5-37)$$

式中 K ——绝热材料的总的表观导热系数[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$];

F_m ——计算传热面积[m^2];

ΔT ——层间温度差[K];

l ——厚度[m]。

K 值通常用实验方法测定,其值参见表 5-32。

表 5-32 多层绝热材料的表观导热系数和热流密度

材料名称及组合方式	层数	总厚度 /mm	真空度 /Pa	温度范围 /K	表观导热系数 $K/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	热流密度 $q/W \cdot cm^{-2}$
0.04mm 厚 铝 箔 + 0.025mm 厚玻璃纤维 布	129	26.5	18.7	77 ~ 300	0.971×10^{-4}	0.416×10^{-4}
0.02mm 厚 铝 箔 + 0.15mm 厚玻璃纤维布	50	30	2.27	77 ~ 300	2.51×10^{-4}	5.38×10^{-4}
0.002mm 双面喷铝涤 纶 薄膜 + 20 目尼龙头 巾	71	24.4	6.68	77 ~ 300	1.67×10^{-4}	4.29×10^{-4}
0.001mm 单面喷铝涤 纶薄膜 + 0.05mm 植物 纤维板	31	8.9	5.34	77 ~ 300	1.09×10^{-4}	7.58×10^{-4}
0.002mm 双面喷铝涤 纶薄膜 + 0.012mm 玻 璃纤维纸	71	25.6	6.68	77 ~ 300	2.03×10^{-4}	4.91×10^{-4}
GS - 80(一面涂 SiO ₂ 的喷铝涤纶薄膜)	10	2.55	14.7	77 ~ 381	2.48×10^{-5}	2.04×10^{-4}
GS - 80	30	2.00	12.8	77 ~ 310	6.77×10^{-6}	8.05×10^{-5}
铝箔纸(日本产)	10	2.70	14.9	77 ~ 303	3.83×10^{-5}	3.10×10^{-4}
0.02mm 铝箔 + 0.12mm 填炭纸(含 炭 34%)	10	9.5	4.0	77 ~ 293	7.14×10^{-6}	1.163×10^{-4}
0.01mm 双面喷铝涤纶 薄膜 + 0.12mm 填炭纸	10	8.5	1.87	77 ~ 293	7.86×10^{-6}	1.42×10^{-4}
0.0087mm 铝箔 + 机制 填炭纸(进口)	10	3.24	—	77 ~ 300	1.53×10^{-6}	1.09×10^{-4}

5. 机械构件的传导热流量

没有冷气冷却的构件传导热流量由下式计算

$$\Phi = \frac{\bar{\lambda} A}{L} (T_2 - T_1) \quad [W] \quad (5-38)$$

式中 A —— 截面积[cm²]; L —— 构件长度[cm]; T_1 、 T_2 —— 分别为冷、热端温度[K]; $\bar{\lambda}$ —— 构件在 $T_1 \sim T_2$ 温区的平均导热系数,一些材料的 $\bar{\lambda}$ 值列于表 5-33 中。

表 5-33 一些材料的平均导热系数 $\bar{\lambda}$ (单位: $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

温度范围 /K 材料名称	300 ~ 77	300 ~ 20	300 ~ 4	77 ~ 20	77 ~ 4	20 ~ 4	4 ~ 2
派瑞克斯玻璃	0.0082	0.0071	0.0068	0.0028	0.0025	0.0012	0.0007
不锈钢	0.123	0.109	0.107	0.055	0.045	0.0097	0.0022
蒙乃尔合金	0.207	0.192	0.183	0.133	0.11	0.040	0.007
退火的德银	0.20	0.19	0.18	0.14	0.12	0.03	0.005
康铜	0.22	0.21	0.20	0.16	0.14	0.046	0.006
黄铜	0.81	0.70	0.67	0.31	0.26	0.078	0.015
无氧铜	1.91	1.71	1.63	0.95	0.80	0.25	0.07
电解铜	4.1	5.4	5.7	9.7	9.8	10	4

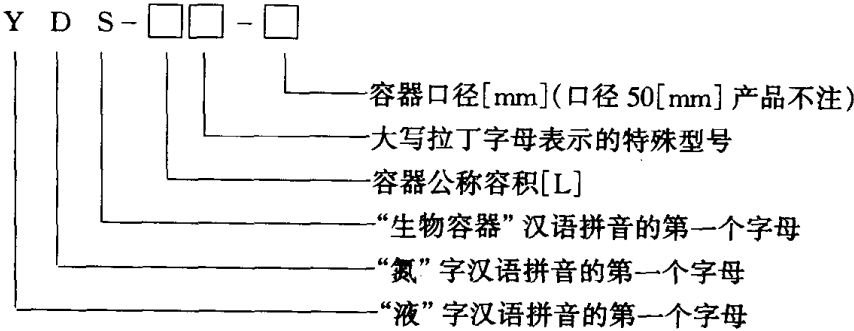
有冷气冷却的构件(如颈管)传热情况复杂,是冷热两端之间的热传导、冷蒸气与颈管内壁的对流换热、颈管外壁与绝热层之间的换热,以及颈管口对液体的辐射热等的综合效应。因此,要精确计算颈管漏热流量是很困难的,通常由实验确定。不锈钢颈管导热流量计算可参考文献[52]。

(三) 液氮生物容器(摘自 GB5458—85)

本标准规定了液氮生物容器产品型号、规格、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存。

本标准适用于以液氮为冷剂保存各种活性生物材料和贮存、运输液氮的铝制液氮生物容器。

1. 型号编制方法



示例 1: YDS - 30 表示公称容积 30L, 口径 50mm 的液氮生物容器。

示例 2: YDS - 50B - 80 表示公称容积 50L, 口径 80mm 的液氮生物运输容器。

2. 产品结构示意图(如图 5-65 所示)

3. 产品规格及性能参数(见表 5-34)

表 5-34 液氮生物容器规格及性能参数

项目 型号 ^①	几何容积 /L	口径 /mm	外径(上限) /mm	高度(上限) /mm	空容器质量 (上限)/kg	静态液氮 保存期 /d
YDS - 1	1	50	180	335	1.6	7
YDS - 3	3.15		224	425	3	22

三、低温容器

(续)

型号 ^①	几何容积 /L	口径 /mm	外径(上限) /mm	高度(上限) /mm	空容器质量 (上限)/kg	静态液氮 保存期 /d
YDS - 10	10	50	305	530	5.6	70
YDS - 10A				600	7.1	100
YDS - 15	16		355		8.5	112
YDS - 30	31.5		455	670	15	220
YDS - 30B				710	16.5	127
YDS - 30 - 80		80		680	15.5	115
YDS - 30 - 125		125		690	16	85
YDS - 35	35.5	50	670	240		
YDS - 35 - 125		125	475	690	16.5	95
YDS - 35 - 200		200	700	17	50	
YDS - 50B - 80	50	80	500	850	21	125
YDS - 50B - 125		125			21.5	105
YDS - 50B - 200		200			22	55
YDS - 60 - 200	63		560	900	32	63
YDS - 120 - 315	125	315	710	1000	63	71
YDS - 250 - 400	250	400	900	1120	140	80

注:①A 表示外形尺寸增高、静态液氮保存期长的高效容器;B 表示内胆底部或侧面有支撑,耐倾倒、耐运输的容器

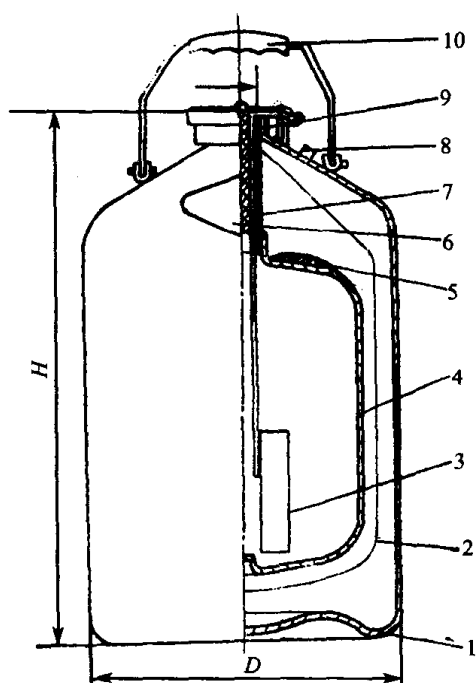


图 5-65 液氮生物容器产品结构示意图

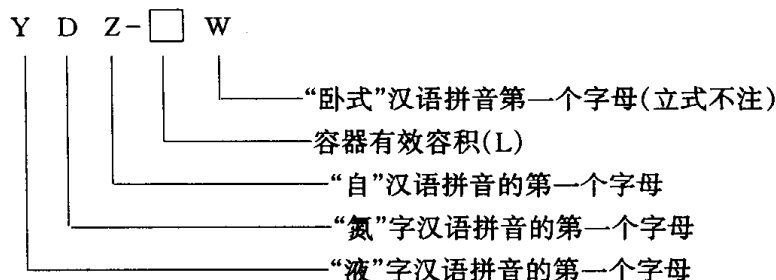
1—外壳;2—多层绝热体;3—提筒;4—内胆;5—低温吸附剂;6—标牌;
7—颈管;8—真空抽气嘴;9—盖塞;10—提手。

(四) 自增压式液氮容器(摘自 ZBB42004—87)

本标准规定了自增压式液氮容器产品型号、规格、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本标准适用于贮存和运输液氮的中型不锈钢制自增压式液氮容器。

1. 型号编制方法



示例 1: YDZ-50 表示有效容积 50L 的立式自增压式液氮容器。

示例 2: YDZ-200W 表示有效容积 200L 卧式自增压式液氮容器。

2. 产品结构示意图(如图 5-66 所示)

(五) 国产低温容器的技术性能

1. 液氮容器技术性能

①成都金凤液氮容器有限公司生产 GB-ZC(QB-ZC)、GB-YS(QB-YS)和 GB-YDZ 三种系列液氮容器。GB-ZC 系列液氮容器,筒体材料采用高强度铝合金,是专门为在静态条件下长期贮存样品或液氮而设计的产品。盛装液氮内筒容器采用悬吊结构,静态液氮日蒸发量极低,但不适用于装满液氮后长途运输。外形尺寸及技术性能参数见表 5-35。

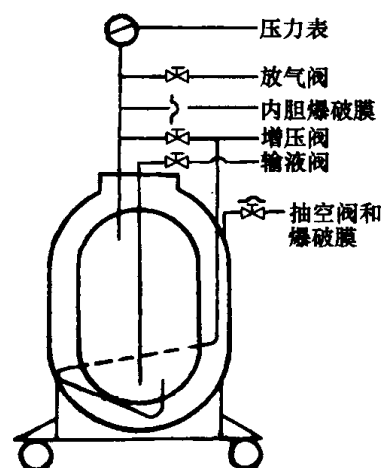


图 5-66 自增压式液氮容器
产品结构示意图

表 5-35 GB-ZC 系列液氮容器外形尺寸及性能参数

型 号	容积 /L	颈管内径 /mm	静态日蒸发量 /L·d ⁻¹		静态保存期 /d		质 量 /kg		外形尺寸 /mm		提筒尺寸/mm			提筒 数量
			合格品	优等品	合格品	优等品	空载	满载	外径	高度	外 径	高 度		
YDS-1	1	50	0.14	0.11	7	9	1.8	2.6	178	315	38	120	—	1
YDS-3	3.15	50	0.14	0.12	22	27	3.4	5.9	215	420	38	120	—	3
YDS-10	10	50	0.14	0.12	70	85	6.3	14.4	300	350	38	120	—	3~6
YDS-10A	10	50	0.11	0.09	95	110	7.1	15.2	300	575	38	120	—	
YDS-15	16	50	0.14	0.11	112	140	9	21.9	354	600	38	120	—	
YDS-30	31.5	50	0.14	0.12	220	270	15	40.5	446	668	38	120	276	
YDS-30-80	31.5	80	0.27	0.22	115	142	15	40.5	446	676	60	120	—	
YDS-30-125	31.5	125	0.37	0.30	85	105	15	40.5	446	685	95	120	276	3~6
YDS-35	35.5	50	0.15	0.13	240	280	16	44.7	472	668	38	120	276	

三、低温容器

(续)

型 号	容积 /L	颈管内径 /mm	静态日蒸发量 /L·d ⁻¹		静态保存期 /d		质 量 /kg		外形尺寸 /mm		提筒尺寸/mm			提筒 数量
			合格品	优等品	合格品	优等品	空载	满载	外径	高度	外 径	高 度		
												单层	双层	
YDS-35-125	35.5	125	0.37	0.31	95	115	17	45.7	472	690	95	120	276	3~6
YDS-35-200	35.5	200	0.71	0.59	50	60	17	45.7	472	670	—	—	—	
YDS-60-200	63	200	1.00	0.85	63	74	32	82.9	560	900	—	—	—	
YDS-120-315	125	315	1.76	1.49	71	84	63	164	710	1000	—	—	—	

GB-YS系列液氮容器是专门为运输使用条件下设计的,盛装液氮内筒容器底部及侧壁均加有支撑结构,液氮日蒸发率较ZC系列高,适用于盛装液氮后中远距离运输和倾倒灌注液氮。外形尺寸及技术性能参数见表5-36。

表 5-36 YS系列液氮容器外形尺寸及技术性能参数

型 号	容积 /L	颈管内径 /mm	外形尺寸 /mm		静态日蒸发量 /L·d ⁻¹		静态保存期 /d		质 量 /kg		提筒尺寸/mm			提筒 数量
			外径	高度	合格品	优等品	合格品	优等品	空载	满载	外 径	高 度		
												单层	双层	
YDS-30B	31.5	50	446	688	0.25	0.21	127	154	16	41.5	38	120	276	3~6
YDS-50B-80	50	80	498	800	0.40	0.33	125	150	22	62.4	60	120	—	
YDS-50B-125	50	125	498	800	0.48	0.40	105	125	22	62.4	95	120	276	
YDS-50B-200	50	200	498	800	0.91	0.77	55	65	22	62.4	—	—	—	—

GB-YDZ系列液氮容器采用奥氏体不锈钢,内胆允许消耗自贮存液氮,升压0.05MPa开启排液阀后,靠此压力可将液氮灌注入其它液氮容器中。容器底部装有脚轮,便于室内短距离移动。外形尺寸及技术性能参数见表5-37。

表 5-37 GB-YDZ系列液氮容器性能参数及外形尺寸

型 号	容器 口径 /mm	几何 容积 /L	有效 容器 /L	外形尺寸/mm			容器 空重 /kg	日蒸 发率 /%	工作压力 /MPa		安全阀开启 压力/MPa		排液 速度 /L·min ⁻¹	爆破 压力 /MPa
				外径	总高	容器高			标准	最高	一次	二次		
YDZ-100	34	110	100	606	1250	1120	80	≤1.3	0.05	0.09	0.09	0.13	≥4	0.24
YDZ-150	37	160	150	708	1350	1220	131	≤1.2					≥6	
YDZ-200	37	220	200	808	1380	1250	151	≤1.1					≥8	
YDZ-500W	—	550	500	810	1050	—	385	≤1.4			0.13	0.17	≥12	—

注:1. 容器总高、容器空重包括脚轮,不含机架。

2. 压力表读数指示范围:YDZ-500W 为 0~0.25MPa,其余产品为 0~0.16MPa。

3. 液氮日蒸发率为静置状态下的蒸发率

②宁波明欣化工机械有限公司生产DP系列移动式低温容器,采用多层绝热技术,内外筒体均为不锈钢材料,适用于运输和贮存低温液体(液氮、液氧、液氩),壳体夹壁装有内置式气化器,允许最高工作压力1.4MPa,除了供应低温液体外,装入液态氧可取代普通的焊接用氧气钢瓶和用于医院呼吸用高纯氧。其外形尺寸及技术性能参数见表5-38。

表 5-38 DP 系列低温容器技术性能参数及外形尺寸

型 号	容积/L		外形尺寸/mm		日蒸发率/%		最高工作 压力/MPa	安全阀设定 压力/MPa	输气量 /Nm ³ ·h ⁻¹	空载 /kg
	有效	几何	外径	高度	N ₂	O ₂ 、Ar				
DP160MP	160	176	506	1513	2.2	1.5	1.4	1.6	10	125
DP180MP	180	196	506	1613	2.0	1.4	1.4	1.6	10	135
DP200MP	200	209	506	1671	1.9	1.2	1.4	1.6	11	145

③兰州真空设备有限责任公司生产 YN 型、YH 型和 YHe 型三种低温液体容器,全不锈钢结构,采用高真空多层绝热材料,绝热性能好,蒸发损失少,广泛用于工业生产、国防、科研等领域。主要技术性能参数及外形尺寸见表 5-39。

表 5-39 YN、YH、YHe 型低温容器技术性能参数及外形尺寸

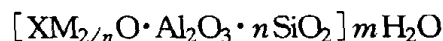
名 称	型 号	有效容积 /L	工作压力 /MPa	日蒸发率 /%	空 载 /kg	外 形 尺 寸/mm×mm (长×宽×高)或(直径×高)
液氮 容器	YN-15	15	0.07	3.5	12	φ303×659
	YN-30	30	0.07	2.5	22	φ403×740
	YN-50	50	0.07	2.2	31	φ450×825
	YN-100	100	0.07	1.3	72	φ590×1205
	YN-200	200	0.07	1.1	143	φ900×1470
	YN-500	500	0.07	1.0	450	φ1010×1780
液氢 容器	YH-750	750	0.8	1.0	1500	2200×1500×1700
	YH-6000	6000	0.8	0.8	6000	4900×2200×3750
液氦 容器	YHe-50	50	0.2	2	85	φ710×1145
	YHe-100	100	0.2	1.5	112	φ710×1450

四、分子筛吸附泵

(一)概述

分子筛(人造沸石)属于微孔型结构的碱金属铝硅酸盐。体内有许多空腔状晶胞,晶胞之间有窗口相通,气体分子可以通过窗孔吸附于晶胞空腔的内表面。分子筛有很大的比表面积(A型分子筛为 800m²/g,X型为 1000m²/g),因而在液氮温度下,吸气能力很强,每一千克分子筛能把 50L~100L 的容器从大气抽到 1Pa。

分子筛因其窗孔直径大小不同而分为不同型号。真空技术中,一般使用 13X 型和 5A 型两种分子筛作吸附泵的吸气剂。分子筛的通用分子式为



其中 M——正离子;

n ——价数。

几种分子筛的特性和常见的吸附剂性能见表 5-40~表 5-44。

分子筛对气体分子的吸附具有很强的选择性,它只能吸附分子直径小于其窗口孔径的气体分子。由于分子筛晶体是离子型的,所以它对于极性分子具有优先吸附的能力,对惰性气体的吸附能力很小,只有对活性气体吸附能力的几十万分之一。温度对分子筛的吸附能力影响

四、分子筛吸附泵

很大,室温下对活性气体的吸附能力,只有液氮温度下的几十万分之一。

表 5-40 分子筛的结晶特征

型 号	M	晶胞空腔直径/nm	窗口直径/nm
3A	K ⁺	约 120	32~33
4A	Na ⁺	约 120	42~47
5A	Na ⁺ + Ca ⁺⁺	约 120	49~56
10X	Ca ⁺⁺	约 250	10
13X	Na ⁺	约 250	13

表 5-41 常见的几种吸附剂性能

吸 气 剂	形 状	大 小	表面积 /m ² ·g ⁻¹	微孔体积 /cm ³ ·g ⁻¹	疏松密度 /g·cm ⁻³	微孔平均直径 /nm
硅胶	微粒	10 目~20 目	311~784	0.45~1.16	0.50~0.72	220~1400
活性氧化铝	小球	φ3	287	0.36	0.86	500
活性碳(椰壳)	微粒	6 目~10 目	889	0.54	0.49	100~300
分子筛 13X	粉末	1μm~5μm	514	1.32	0.53	90~120
分子筛 5A	小球	φ4	600	0.75	0.69	50

表 5-42 A 型 X 型分子筛质量指标

型 号			5A(CaA)			4A(NaA)		3A(KA)		13X(NaX)		
形 状			粉末	球形	条形	球形	条形	球形	条形	粉末	球形	条形
粒 度			1~4 (μm)	φ4~6	φ4	φ4~6	φ4	φ4~6	φ4		φ4~6	φ4
堆密度/kg·L ⁻¹				0.80	0.53	0.80	0.53	0.80	0.53		0.80	0.53
吸水量/g·g ⁻¹			>0.25	>0.21	>0.21	>0.21	>0.21	>0.21	>0.21	>0.30	>0.21	>0.21
吸乙醇/mL·g ⁻¹						>0.10	>0.10					
吸正庚烷/mL·g ⁻¹			>0.20	>0.10	>0.10							
吸邻二甲苯/g·g ⁻¹										>0.18	>0.10	>0.10
气体保留值 ^① /cm ³ ·g ⁻¹	42℃	O ₂		>2.7	>2.7						>1.4	>1.4
		N ₂		>8.0	>8.0						>2.4	>2.4
	70℃	CH ₄									>4.0	>4.0
		CO									>6.0	>6.0
耐磨强度 (重量%)				>95	>90	>95	>90	>95	>90		>95	>90

注:①13X 型分子筛的气体保留值系 70℃测得

分子筛对气体的吸附是物理吸附,过程是可逆的。低温下吸附的气体,当温度回升时,将如数释放出来。升温使分子筛吸附的气体再脱附的过程,称为再生活化。再生活化温度不能超过 600℃,否则将因粘结剂挥发而粉碎。一般为 200℃~500℃。

对真空吸附泵使用的分子筛的要求是:①吸气量大;②高的物理稳定性和化学惰性;③导热性好;④再生容易。

表 5-43 分子筛的规格及技术特性

型号	形状	粒度 /mm	晶穴直径 /nm	晶孔直径 /nm	堆密度 /kg·L ⁻¹	化学组成	吸附特性	
							吸水量 /g·g ⁻¹	吸附其它物质的特性
3A	球形 条形	φ4~6 φ4	约 1.2	0.32~0.33	0.8 0.53	0.4K ₂ O·0.6Na ₂ O·Al ₂ O ₃ · (2±0.08)SiO ₂ ·4.5H ₂ O	>0.21	只吸附 H ₂ O, 不吸附 C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₄ 、NH ₃ 、CO ₂ 和更大的分子
4A	球形 条形	φ4~6 φ4	约 1.2	0.42~0.47	0.8 0.53	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·(2±0.08)· SiO ₂ ·4.5H ₂ O	>0.21	吸附 H ₂ O、Ar、Kr、Xe、 H ₂ 、N ₂ 、CO、O ₂ 、NH ₃ 、 CO ₂ 、CS ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₂ 、 C ₂ H ₆ 、CH ₃ OH、CH ₃ CN、 CH ₃ NH ₂ 、CH ₃ Cl、CH ₃ Br, 不吸附丙烷及更大的 分子
5A	粉末 球形 条形	1~4μm φ4~6 φ4	约 1.2	0.49~0.5	0.8 0.53	0.7CaO·0.3Na ₂ O· Al ₂ O ₃ ·(2±0.08)SiO ₂ · 4.5H ₂ O	>0.25 >0.21 >0.21	吸附正构烃类, 直径小 于 5×10 ⁻¹⁰ m 的分子, 吸附的主要分子与 4A 型分子筛相同; 不吸附 异构烃、环烷烃及芳烃 类
10X	粉末 条形 或 球形	φ2~4 及 φ4~9	约 2.5	0.8~0.9	0.5~0.6	0.7CaO·0.3Na ₂ O· Al ₂ O ₃ ·(2.45±0.05)SiO ₂ ·6H ₂ O	>0.26 >0.23	吸附异构烷烃、环烷烃、 芳烃, 吸附的主要分子 与 4A 型分子筛相同; 不吸附异构烃、环烷烃 及芳烃类
13X	粉末 球形 条形	φ4~6 φ4	约 2.5	0.9~1.0	0.8 0.53	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ (2.45± 0.05)SiO ₂ ·6H ₂ O	>0.23	吸附小于 10×10 ⁻¹⁰ m 的各种分子, 吸水量 35.5% (质量分数), 吸 附的主要分子同 10X 型分子筛; 不吸附含氟 三丁胺

表 5-44 常见吸气剂的吸附热

(单位: kJ·mol⁻¹)

吸附的气体 吸附剂	He	H ₂	Ne	H ₂	Ar	Kr	Xe
多孔玻璃	2.85	8.25	6.45	17.85	15.84		
天然活性炭	2.64	7.84	5.36	15.5	15.34		
碳黑	2.51		5.7		18.2		
氧化铝					11.7	14.5	
石墨化碳黑					10.31	13.8	17.72
钨					7.96	18.6	33.5~37.7
钼							33.5
钽							22.2
液化热/kJ·mol ⁻¹	0.08	0.9	1.8	5.6	6.53	9.04	12.66

5A、13X 分子筛和活性炭是真空技术中最常用的吸附剂材料。5A 分子筛的吸收容量大,但必须经常再生活化;13X 的吸收容量虽比 5A 小,但能吸收油蒸汽。至于活性炭,其导热性虽好,但有再生除气时间长、吸收容量小的缺点。

(二)分子筛吸附泵的结构

分子筛吸附泵有内冷式与外冷式,其结构如图 5-67、图 5-68 所示。

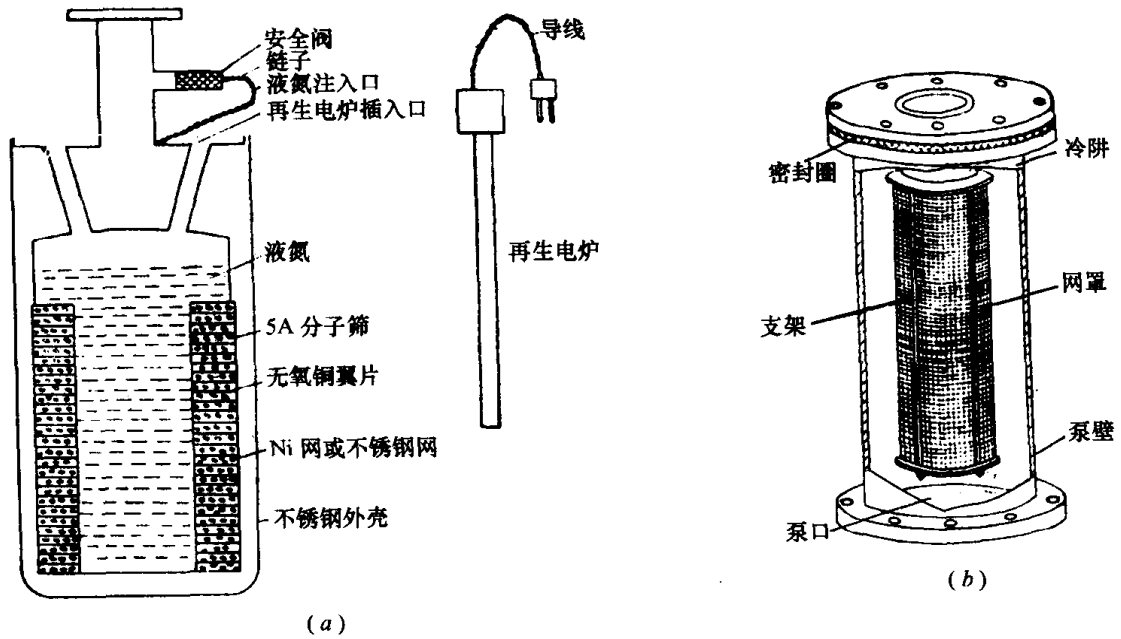


图 5-67 内冷式分子筛吸附泵结构图

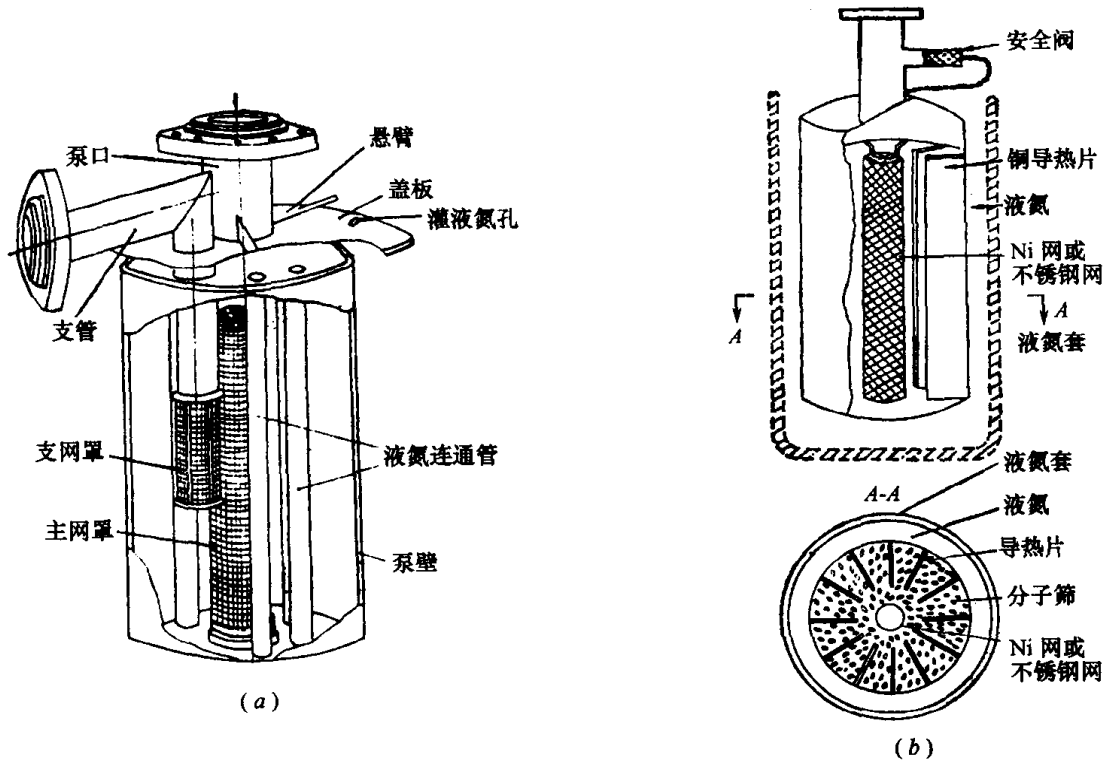


图 5-68 外冷式分子筛吸附泵结构图

内冷式吸附泵的优点是:分子筛能充分冷却,极限真空高,吸附容量大,消耗液氮少,不需另附液氮套。缺点是结构复杂,加工较困难。外冷式吸附泵结构简单,加工较容易;漏气可能性小。缺点是液氮消耗量大,分子筛的冷却效果差,需另附液氮套。

分子筛泵结构设计中必须特别注意的是,需要设计一个简单可靠的安全阀,否则再生活化时,由于温度高,泵内形成几十个大气压,会造成爆炸危险。

(三)分子筛吸附泵的计算

当分子筛吸附泵用作预抽泵时,可利用分子筛吸附等温线(图 5-69)或负荷曲线(图 5-70)来确定需要的分子筛用量。

例 1 将 1L 容器的氮从 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 抽到 10^{-1} Pa ,需要多少 5A 分子筛?

由图 5-69 中查出在 10^{-1} Pa 平衡压力下,5A 分子筛的吸附量为 $2.6 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{L/g}$,而 1L 容器从 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 抽到 10^{-1} Pa 需要抽走的气体量为

$$Q = (p_1 - p_2) \cdot V = (1 \times 10^5 - 10^{-1}) \times 1 = 1 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{L}$$

因此,所需分子筛的量应为

$$W = \frac{1 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{L}}{2.6 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{L/g}} = 385 \quad [\text{g}]$$

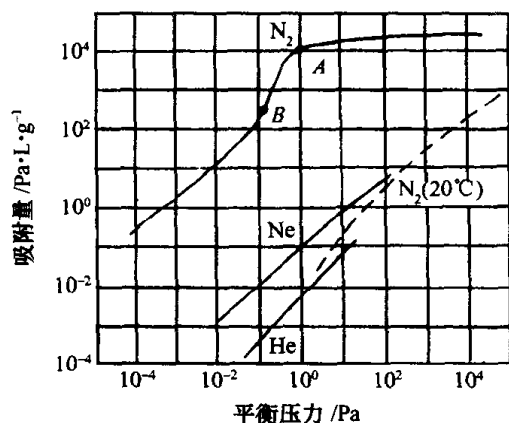


图 5-69 5A 分子筛在液氮温度下对氮、氖、氦的吸附等温线(虚线是室温下对氮的吸附等温线)

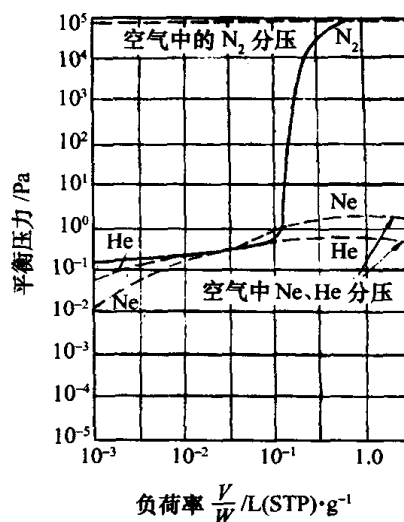


图 5-70 5A 分子筛在液氮温度下的负荷与平衡压力关系曲线

例 2 将 45L 的容积从大气抽至 $4 \times 10^{-1} \text{ Pa}$,需要分子筛多少克?

利用公式

$$W = \frac{V \cdot p}{Q_T} \quad (5-39)$$

式中 W ——分子筛用量[g];
 V ——被抽容器的体积[L];
 p ——被抽容器内的压力差[Pa];

Q_T ——液氮温度下负荷率[Pa·L/g]。

由图 5-70 查出:氮的平衡压力为 4×10^{-1} Pa 时,负荷率 $Q_T = 5 \times 10^3$ Pa·L/g,代入式(5-39),得

$$W = \frac{45 \times 10^5}{5 \times 10^3} = 900 \quad [\text{g}]$$

由计算得到的分子筛用量只能作为设计时参考。因为实际使用时,还要考虑分子筛的预处理条件、冷却效果、反复再生后抽气性能的衰减等因素。一般负荷率在 5×10^3 Pa·L/g ~ 1.2×10^4 Pa·L/g 之间选取。

若已知分子筛用量为 W ,起始压力为 p_0 ,抽除某一容器时所能达到的平衡压力可由下式求出

$$(p_0 - p_1) \frac{V}{W} = Q_T \quad (5-40)$$

式中 Q_T ——在平衡压力 p_1 时的吸附量,可由吸附等温线求得。

由式(5-40)可得

$$p_0 \frac{V}{W} = p_1 \frac{V}{W} + Q_T \quad (5-41)$$

一般用图解法求平衡压力,其方法如下:

首先根据系统体积 V 和分子筛质量 W 作一条负荷线 $\frac{pV}{W} - p$,再在同一图上作一条 $\left(\frac{pV}{W} + Q_T\right) \sim p$ 的曲线。然后从起始压力 p_0 点作坐标 p 的垂直线交 $\frac{pV}{W} \sim p$ 曲线于 A 点,再由 A 点作水平线交曲线 $\left(\frac{pV}{W} + Q_T\right) \sim p$ 于 B 点, B 点所对应的坐标 p_1 便是所求的平衡压力(极限真空)值,如图 5-71 所示。

用两级分子筛泵串联抽气时,平衡压力的求法同上,只是需将第一级达到的平衡压力作为第二级的起始压力。第二级泵的 $\frac{pV}{W}$ 值不同时,需要另外作图。

应用图解法求平衡压力,忽略了泵在冷冻前就已吸附气体(主要是水气)和分子筛温度的不均匀性,因此对其结果必须作适当的修正。

当 $\frac{pV}{W}$ 值较小时(1×10^4 Pa·L/g 以下),若 $p_0 \gg p_1$,则式(5-40)变为

$$p_0 \frac{V}{W} \approx Q_T \quad (5-42)$$

从等温线中查出的平衡压力就是系统的极限压力。

(四)影响分子筛吸附泵性能的因素

(1)惰性气体分压的影响

分子筛吸附泵从大气开始抽气所能达到的极限压力,受到 He、Ne 等惰性气体的分压限制。干燥大气成分和经过分子筛泵抽气后的残余气体成分,见表 5-45 和表 5-46。

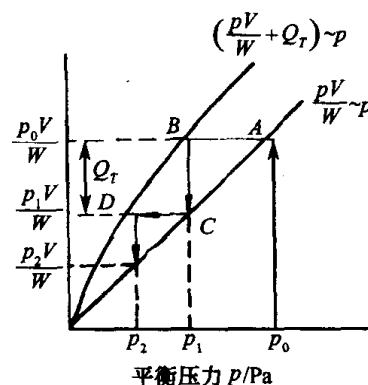


图 5-71 $\frac{pV}{W}$ 和 $\frac{pV}{W} + Q_T$ 曲线图

表 5-45 干燥大气成分

气体	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	He	Kr	H ₂	Xe	Rn	水蒸气
分压/Pa	79460	21198	946.6	30.7	1.87	0.51	0.1	0.051	9.07×10^{-3}	微量	933 ^①

注:①水蒸气分压随各地区湿度而变

表 5-46 5A 分子筛吸附泵从大气开始抽气后的残余气体成分(起始温度为 20℃)

$\frac{p \cdot V}{W}$ /Pa·L·g ⁻¹	压力/Pa	组分 $\left[\frac{\text{分压/Pa}}{\text{所占百分数/\%}} \right]$								抽气时间 /min
		Ne	He	N ₂	O ₂	H ₂ O (蒸汽)	CO ₂	H ₂	Ar	
2×10^2	1	6.3×10^{-1}	7.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}	2.0×10^{-3}	2.5×10^{-3}	3.0×10^{-3}	10
		68	7	10	5	10	<1	<1	<1	
2×10^3	1.5	9.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	1.1×10^{-1}	1.8×10^{-1}	1.5×10^{-1}	1.6×10^{-2}	6.0×10^{-3}	3.5×10^{-2}	10
		60	6.7	7.3	12	10	1	<1	2.3	
3×10^4	2×10^3			2×10^3						24
				100						
2×10^3	9.0×10^{-1}	4.8×10^{-1}	6.0×10^{-2}	1.5×10^{-1}	1.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	25
		53.4	6.7	16.7	11.1	3.3	4.4	1.1	3.3	

采用两级分子筛串联抽气或用其它手段降低惰性气体分压,可提高极限真空。

预先用机械泵抽气是降低惰性气体分压的最简便方法。例如 1L 的玻璃容器先用机械泵预抽到 10^{-1} Pa,然后用负荷率为 0.055L/g 的分子筛泵抽气,30min 压力可降到 1×10^{-4} Pa;再用第二个分子筛泵继续抽气,10min 后可获得 2×10^{-5} Pa 的极限真空。240L 的金属容器,用机械泵预抽到 1.6Pa 后,再用两台负荷率为 1.4×10^4 Pa·L/g 的分子筛泵施行“二级抽气”,2h 后可达到 9.6×10^{-4} Pa 的真空度。但是,利用机械泵进行预抽会带来机械泵油的污染问题,将丧失“无油”的优点。

用高纯度氮气冲洗被抽系统,可降低惰性气体分压,提高极限真空。经氮气冲洗过的系统,用二级分子筛抽气,能获得 10^{-3} Pa 数量级的真空。但比较麻烦,抽气时间也相应地增长。

用“二级抽气”法也能降低惰性气体的分压。所谓“二级抽气”就是先用第一级分子筛泵将容器抽到 100Pa 左右(一般为 80Pa~600Pa),关闭第一级分子筛的阀门,然后再启动第二级分子筛泵。这样,容器中一部分惰性气体被“席卷”到第一级泵中,从而降低容器中的惰性气体的分压,使第二级泵可达到 10^{-2} Pa 的极限真空。这是一种不增加其它辅助设备的简单易行的办法,但效果不如前两种方法显著。

(2) 起始压力的影响

实验证明,分子筛在 $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \sim 10^{-9} \text{Pa}$ 压力范围内,都有显著的抽气作用,但是在超高真空范围内工作时,分子筛的起始压力对极限真空的影响非常显著,如图 5-72 所示。

(3) 水气对分子筛吸附泵的影响

分子筛暴露在潮湿空气中能大量吸收水分,1g5A 分子筛可吸收 $0.1\text{g} \sim 0.2\text{g}$ (相当于 $1.3 \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{L} \sim 2.6 \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{L}$) 的水气。吸附了大量水气的分子筛,其吸气能力大大降低。图 5-73 为分子筛吸水后对剩余压力的影响。

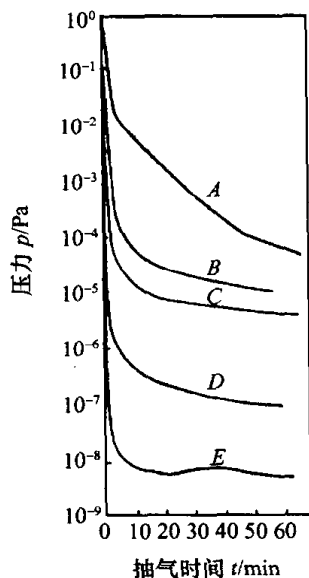


图 5-72 不同起始压力下,分子筛泵的抽气性能

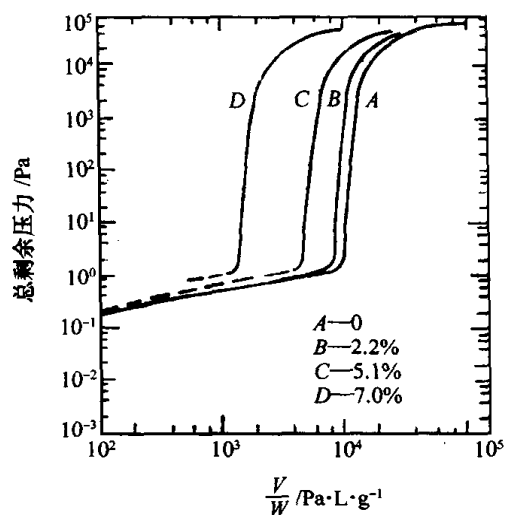


图 5-73 5A 分子筛预吸不同质量分数的水气后,对剩余压力的影响

为除去分子筛中已吸附的水气,可采用在 $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 下加热再生的方法。再生时间为 $0.5\text{h} \sim 2\text{h}$ 左右。分子筛在 $300^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 下反复再生 200 次左右,其吸气能力将下降为原先吸气能力的 70% 左右。此后,继续再生 2000 次左右,性能不变。如图 5-74 所示。

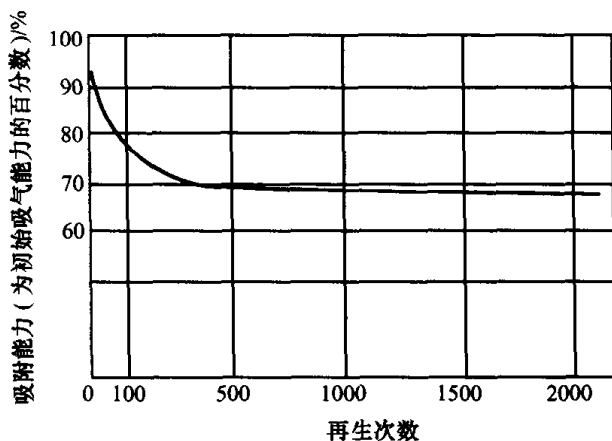


图 5-74 分子筛再生次数对其吸气性能的影响

(五) 分子筛在温度 20K 以下工作时的吸附性能

分子筛冷却到 20K 以下,可以吸附氢、氮、氦等气体。假如把 20K 分子筛在 $10^{-5} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$ 压力范围内对氢的吸附概率设为 1,它在 4.2K 对氮的吸附概率则为 $0.7 \sim 0.91$ 。如图

5-75、图 5-76 所示。

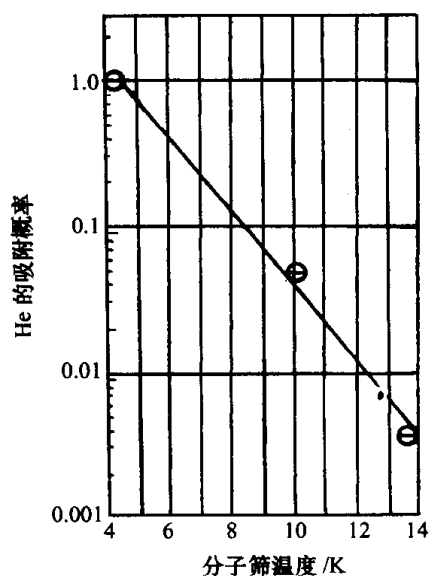


图 5-75 分子筛在低温下对氦的吸附性能

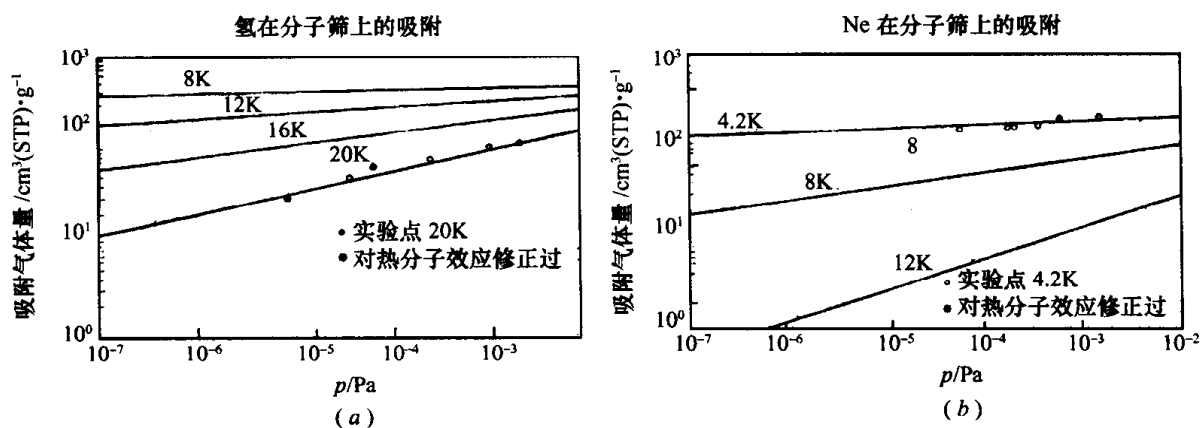


图 5-76 分子筛在低温下对氢、氦的吸附性能

(六)分子筛用作干燥剂的性能

分子筛是一种良好的干燥剂,即使对大流速的潮湿气体,也能达到深度干燥的要求。经干燥后的气体,露点可达到 $-70^{\circ}\text{C} \sim -80^{\circ}\text{C}$,其干燥性能如图 5-77~图 5-79 所示及见表 5-47。

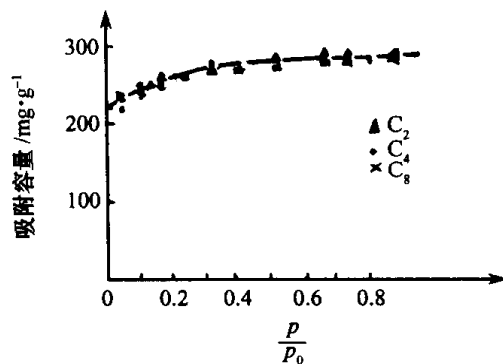


图 5-77 20°C 时, H_2O 在 5A 分子筛上的吸附等温线

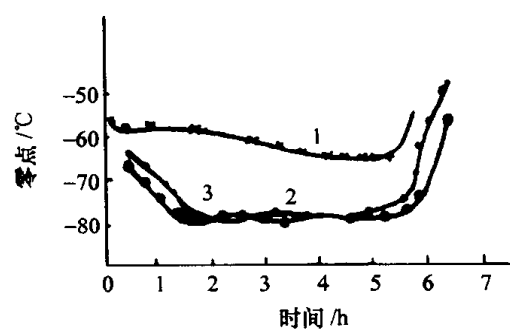


图 5-78 再生温度与出口处露点的关系

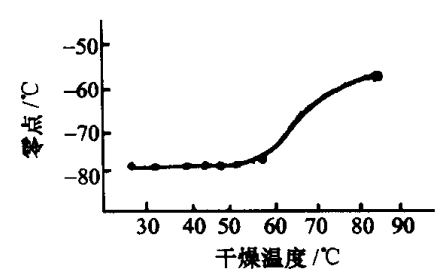


图 5-79 干燥温度与出口处气体露点的关系

表 5-47 流速、接触时间和干燥效果的关系

被干燥的气体	流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	接触时间/s	出口处气体的露点/℃	干燥柱的特征
氮(-40°C)	0.041	2.93	-80	层高 120mm 直径 40mm 分子筛曾在 $550^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 预烘
	0.069	1.75	-79	
	0.12	1.00	-78	
	0.189	0.68	-74	
	0.245	0.49	-70	
	0.28	0.43	-66	
空气(湿度 65%)	0.067	4.17	-80	层高 280mm 直径 100mm 分子筛未经预烘处理
	0.076	3.69	-80	
	0.092	3.04	-80	
	0.12	2.33	-79	
	0.14	2.00	-79	

(七)国产分子筛吸附泵主要技术参数

国产分子筛吸附泵主要技术参数见表 5-48。

表 5-48 国产分子筛吸附泵主要性能参数

型 号	法兰口径 /mm	极限压力 /Pa	每台泵可抽真 空室最大体积 /L	5A 或 13X 型 分子筛装填量 /kg	一次充满 液氮量 /L	再生最大 加热功率 /W	泵体允许量 高烘烤温度 /℃	生产厂家
XB-1	35	1 ^①	100	1.1	3.5	300	250	北京中科科仪 发展有限责任 公司
FX-1.5		$\leq 1 \sim 10^{-1}$ ^②	100	1.5	—	—	—	上海真空泵厂
FX-5		$\leq 6.7 \times 10^{-3}$	700	5	—	—	—	上海真空泵厂

注:XB-1 型进气口法兰为 CF-35 标准法兰。
①、②为从 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 下开始抽气所能达到的极限压力

五、锆铝吸气泵

(一)概述

锆铝吸气泵(简称锆铝泵)是用锆铝合金吸气材料(84%锆、16%铝,简称锆铝 16)在高温下吸附活性气体的新型泵。对活性气体尤其是对氢具有很高的抽气能力,但不能抽惰性气体。

对氢及其同位素氘、氚的吸气是可逆的,而对其它活性气体如 CO 、 CO_2 、 O_2 、 N_2 、 H_2O 等的吸气是以稳定的化合物扩散到吸气剂体内,但存在饱和寿命问题。在 $10^{-8}\text{Pa}\sim 1\text{Pa}$ 的压力范围内抽氢速率几乎保持恒定。对其它活性气体吸气速率,在压力低于 10^{-3}Pa 、工作温度 400°C 时达到饱和。该泵对各种活性气体的吸气速率随着吸气剂吸气量的增加而降低。当吸气速率随吸气量的增加而达到名义抽速的 80% 时,要在高温下进行再激活处理。再激活的次数一般可达 20 次。

锆铝泵结构简单、体积小、造价低、操作安全可靠、维修方便,清洁无油。特别适用于抽除以氢为主的抽气系统。在受控热核反应装置中用来贮存和释放氢、氘、氚。在高速加速器的真空系统中与涡轮分子泵或溅射离子泵同时工作,能提高系统的极限真空。用在超高真空装置时可连同装置一起放进烘烤箱中,不用外加电源便可作烘烤时的维持泵。此外还可用于溅射离子泵的启动。

(二) 锆铝吸气剂泵结构及抽气原理

1. 锆铝泵的结构

锆铝泵的结构如图 5-80 所示。由不锈钢泵壳、锆铝吸气带泵芯、加热器及测温装置等组成。根据泵芯的加热方式,可分为直接加热和间接加热两种型式。法兰连接均采用金属密封。

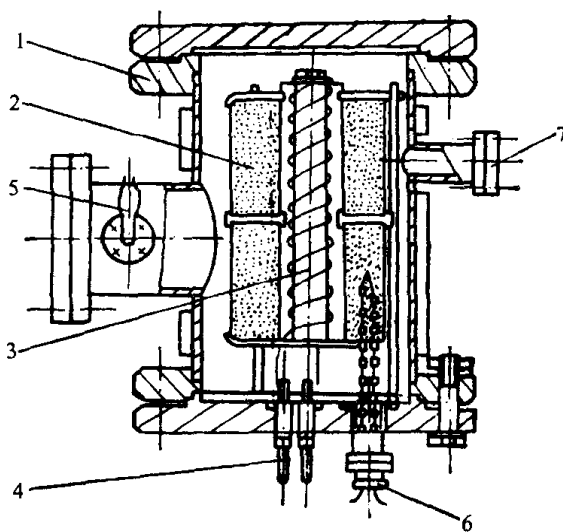


图 5-80 锆铝泵结构图

1—泵壳;2—泵芯;3—加热器;4—电极;5—真空规;6—热电偶;7—气体分析器接头。

锆铝泵的间接式泵芯如图 5-81 所示。根据所要求的一次吸气量计算出吸气带的实际装量,按照装量把锆铝 16 合金带折叠成皱纹状或单个折叠片,装架成环形圆柱体,再用不锈钢盘压紧固定在三根支柱上。每一层环形圆柱体的高度相当于吸气带宽度。间接式泵芯靠位于泵中心的由 95% 的 Al_2O_3 制成的螺纹管上缠绕的钨丝通电发热来获得激活温度和工作温度。

直热式泵芯结构如图 5-82 所示。不锈钢支架由一支不锈钢管上、下各焊多根放射状钢条制成。将吸气带上、下绕在装有绝缘套的放射状不锈钢条上。为了防止基带受热伸长,导致相邻锆铝片接触而引起短路造成温度不均,用拉紧装置将吸气带张紧。吸气带可以分段并联。直热式泵芯以向吸气带上通电来获得吸气带的自身升温。

锆铝泵的吸气剂在激活和工作时都需要加热。导电极用无氧铜、95% Al_2O_3 和可伐合金做成的组件,如图 5-83 所示。

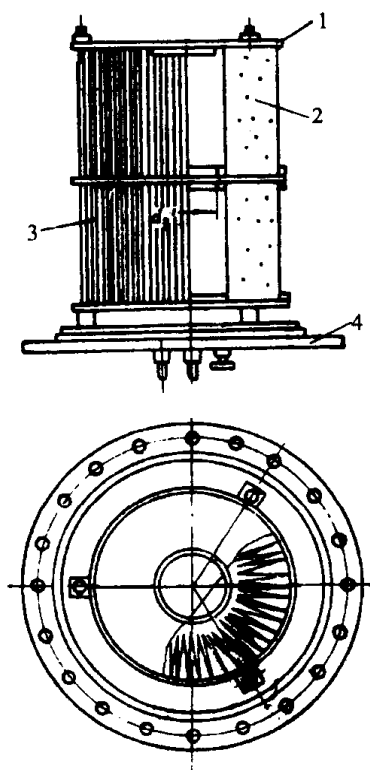


图 5-81 间接式锆铝泵芯

1—托盘;2—锆铝吸气片;
3—支柱;4—底法兰。

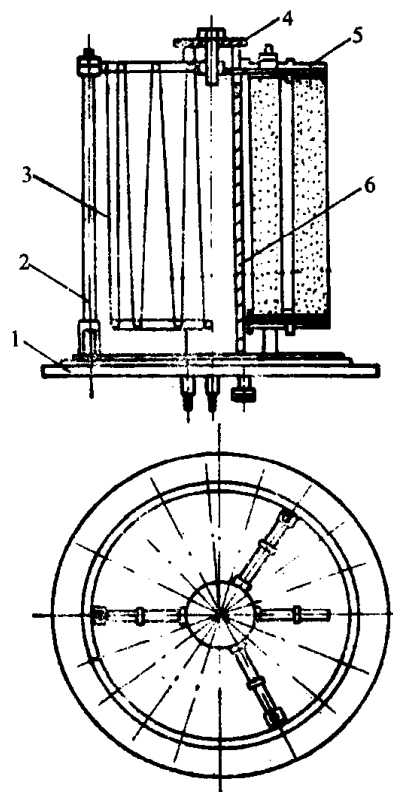


图 5-82 直热式泵芯

1—泵芯法兰;2—支柱;3—锆铝吸气带;
4—拉紧装置;5—绝缘套管;6—不锈钢支架。

2. 工作原理

锆铝的抽气作用,主要是 84% 锆和 16% 铝组成的合金对活性气体的化学吸附。合金的主要成分是 Zr_5Al_3 及 Zr_3Al_2 , 合金结构是铝进入锆晶格中,使晶格间形成很多孔穴,增大锆的吸气面,提高气体在合金内的扩散速率。吸气作用首先在合金颗粒表面进行,然后向体内扩散。在 180°C 以下以表面吸附为主,在 180°C 以上,以体内扩散为主。所以这种合金在 $350^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 范围内对所有活性气体都具有很大的抽气能力。在温度低于 200°C 时,对 CO 、 CO_2 、 O_2 、 N_2 、 H_2O 等活性气体不吸附,只在表面上与合金形成稳定的化合物,产生一层很薄的钝化层,阻止气体继续往体内扩散。在温度高于 350°C 时,这些活性气体在合金体内具有很大的扩散速率。在高于 750°C 时,钝化层很快被消除。在 $350^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 时,体内扩散速率不如高温时大,但仍能以足够的扩散速率清洗合金颗粒表面,获得满足吸气速率所需要的清洁吸气表面。

将锆铝合金粉末涂敷在金属带上制成锆铝金属吸气带,这种锆铝 16 合金涂敷带可在常温下长期暴露在湿度 80% 的大气中,工作时将锆铝带加热到 400°C 左右,就能稳定地抽除活性气体。当合金表面吸气呈饱和状态时,就不再吸气,需进行高温激活处理,重新产生新鲜的吸气表面。锆铝吸气剂带可反复多次激活,直到吸气带上涂敷的吸气剂全部饱和为止。此时带的寿命已到,需更换新的锆铝吸气带。

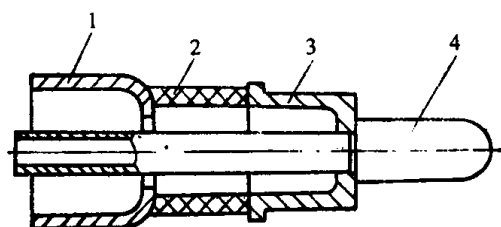


图 5-83 锆铝泵电极

1—可伐合金管;2—95% Al_2O_3 管;
3—可伐合金帽;4—铜电极杆。

(三) 锆铝吸气带的工作特性

锆铝泵的工作条件,主要是根据锆铝合金吸气带的吸气特性,对不同的工作情况选择最适宜的工作温度。因此在设计或使用锆铝泵时,要了解泵内使用锆铝吸气带的吸气特性。

1. 基带涂层厚度和吸气性能

基带上的吸气剂涂敷层很薄。意大利产品的涂敷层厚度为 $50\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$, 合金量为 $15\text{mg}/\text{cm}^2 \sim 20\text{mg}/\text{cm}^2$, 涂敷层里的通孔组织占总涂敷层体积的 $20\% \sim 30\%$ 。日本产品的涂敷层厚度为 $50\mu\text{m}$, 合金量为 $17.1\text{mg}/\text{cm}^2$, 国产 Ni 基涂敷带的厚度为 $100\mu\text{m}$, 合金量为 $32\text{mg}/\text{cm}^2 \sim 35\text{mg}/\text{cm}^2$ 。这些涂敷层中的通孔足够使分子流状态的气体与涂敷层中的所有合金颗粒表面接触。用 $17\text{mg}/\text{cm}^2$ 的吸气带的试验结果表明, 锆铝 16 合金吸气剂涂敷带的抽气速率随吸气量的增加而降低, 如图 5-84、图 5-85、图 5-86 所示。

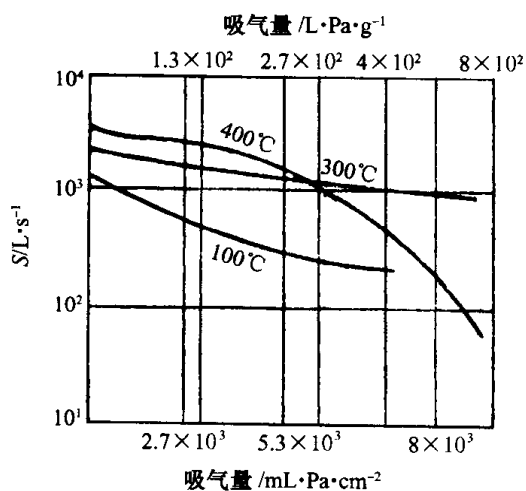


图 5-84 锆铝 16 合金涂敷带
在 400°C 、 300°C 、 100°C 时 $4 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 下
吸 H_2 量与抽速的关系

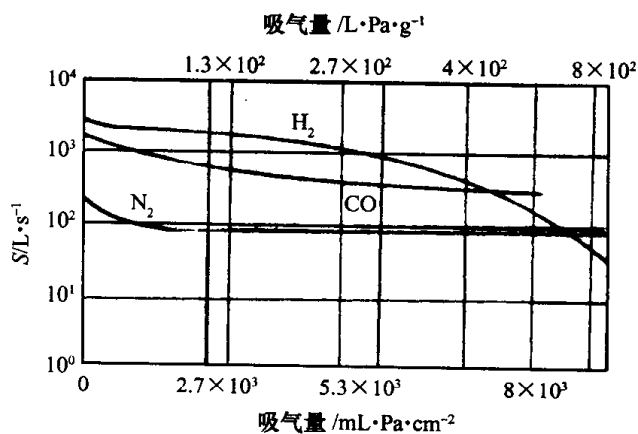


图 5-85 锆铝 16 合金涂敷带在 400°C 和 $4 \times 10^{-4}\text{Pa}$
时吸气量与抽速的关系

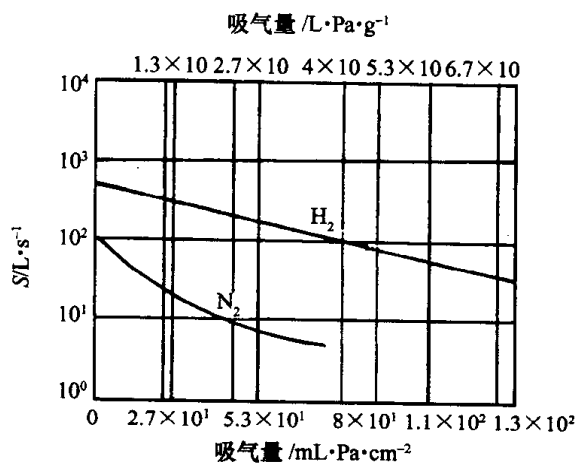


图 5-86 锆铝 16 合金涂敷带在 100°C 和 $4 \times 10^{-4}\text{Pa}$
时吸气量与抽速的关系

2. 锆铝吸气带的再生激活

当吸气剂长时间工作在高温下出现“饱和”,使吸气速率降低到原来的 80% 时,或吸气剂表面形成氧化膜使吸气速率消失等情况,都必须进行再激活处理,也就是高温处理(700℃ ~ 900℃,压力低于 1Pa),使吸气剂表面的固体氧化膜(和其它化合物膜)进行分解,使金属和气体的生成物向更深的体内扩散,生出高度活泼清洁的金属表面,同时还可以除去过量的氢。锆铝吸气剂对氢的吸收和其它气体不同。大多数活性气体如 O_2 、 CO 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 等同吸气剂形成热稳定性化合物,在激活时,主要是向体内扩散。而氢却不同,它在吸气剂内呈固溶体吸收,吸附特性对温度的依赖性很强。对氢的吸气是物理吸附,在温度为 200℃ ~ 350℃ 时,大量吸 H_2 ;在 350℃ ~ 400℃ 时, H_2 能渗透到合金里面;而在 500℃ 以上时,有些 H_2 就释放出来。对 H_2 的吸附平衡等温线符合下列关系式

$$\lg p = 2.28 + \lg Q^2 - \frac{700}{T} \quad (5-43)$$

式中 p —— H_2 平衡压力[Pa];

Q —— H_2 的吸附量[Pa·L/g];

T ——工作温度[K]。

在高温激活时,主要是释放氢气。锆铝 16 合金对 H_2 有大的抽气速率,在一定温度下有一定的平衡压力,如图 5-87 所示。

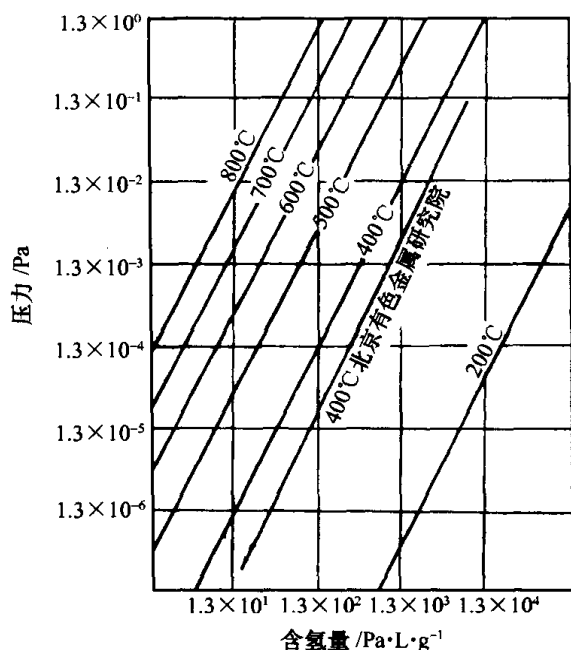


图 5-87 锆铝 16 合金在不同温度下含 H_2 量与 H_2 的平衡压力的关系

有一定的平衡压力,如图 5-87 所示。

激活效率与激活温度、时间有关,如图 5-88 所示。从图中可看出,激活温度高,则激活时间短,反之激活时间就长。但当激活温度低于 730℃ 时,无论激活多久也不能得到全激活。全激活和部分激活只能影响吸气剂的抽气速率和一次吸气量,而不影响总的吸气量。

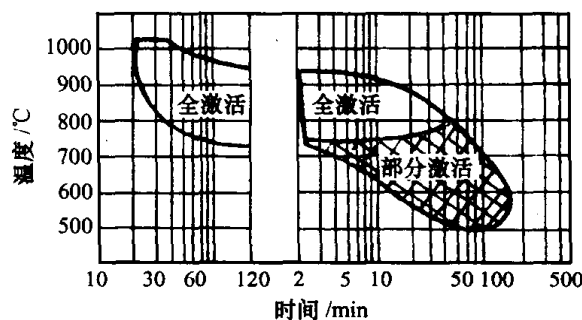


图 5-88 锆铝 16 合金激活效率与激活条件

3. 锆铝吸气带的工作温度

锆铝吸气带的工作温度应随不同的工作情况按下列要求选用不同的工作温度:

①压力低于 10^{-3} Pa,抽活性气体(如 CO 、 CO_2 、 N_2 、 O_2)时,工作温度为 400℃。因这时体内扩散速率使合金表面维持足够的吸气速率而不能释放 H_2 。

②在 10^{-3} Pa ~ 1Pa 压力范围内,抽活性气体(如 CO 、 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 H_2O 、 CH_4 等时),工作温度用 750℃。这时需要提高温度加快体内扩散速率,进而加速清洗吸气剂表面。

③对 H_2 要求高抽速,并在系统中出现活性气体杂质 1% 的环境中用 400℃。

④对纯 H_2 要求大抽速和大吸气量时,工作温度为 $200^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 。

⑤抽纯 H_2 要求尽可能大的吸气量而对抽速要求不高时,可在 25°C 常温下工作。

在高真空或超高真空系统中使用,工作温度一般为 400°C 。

(四) 锆铝吸气泵性能参数的选择

设计泵时,首先确定泵的工作温度、工作压力下对给定气体的抽速、一次吸气量的最大值和达到此吸气量时的最低抽速。

1. 锆铝泵结构尺寸的确定

(1) 泵口直径 D

$$D = \sqrt{\frac{S}{K}} \quad [\text{cm}] \quad (5-44)$$

式中 S ——泵对给定气体的抽速 $[\text{L/s}]$;

K ——系数,小泵取小值,在 400°C 时,对 H_2 , $K = 4.5 \sim 6.5$; 对 N_2 , $K = 1.1 \sim 1.3$; 对 CO , $K = 1.7 \sim 2$ 。

(2) 泵芯吸气面积

$$F = \frac{1000 Q_i}{m_i q_i K_i} \quad [\text{cm}^2] \quad (5-45)$$

式中 F ——吸气带实际装置的涂敷层表面积 $[\text{cm}^2]$;

Q_i ——对特定气体要求的一次吸气量 $[\text{Pa} \cdot \text{L}]$;

m_i ——单位面积上的吸气剂量 $[\text{mg}/\text{cm}^2]$;

K_i ——系数,单面的取 0.9 ,双面的取 0.55 ;

q_i ——在工作温度和工作压力下抽速降至名义抽速的 80% 时,吸气剂吸附的吸气量 $[\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{g}]$ 。在 400°C , $4 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时,对 H_2 取 2.5 ; 对 N_2 取 1.2 ; 对 CO 取 2.2 。

(3) 泵芯环形圆柱体外径 d_1

$$d_1 \approx 0.6D \quad [\text{cm}] \quad (5-46)$$

(4) 泵芯环形圆柱体内径 d_2

$$d_2 \approx 0.4D \quad [\text{cm}] \quad (5-47)$$

式中 D ——泵口内径 $[\text{cm}]$ 。

(5) 泵芯有效吸气高度 H_1

对单个折叠片按下式求得

$$H_1 = F_K \left[\frac{\alpha}{2} - \arcsin\left(\frac{d_2}{d_1} \sin \frac{\alpha}{2}\right) \right] / 180 (d_1 - d_2) \quad [\text{cm}] \quad (5-48)$$

式中 F_K ——吸气带占有面积 $[\text{cm}^2]$ 。对单面吸气带 $F_K = F$, 对双面吸气带 $F_K = F/2$ 。

以上各几何尺寸见图 5-89, α 为折叠角, 取 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

(6) 泵芯外圆侧总吸气单元数

$$n = \frac{F_K}{h_1 (d_1 - d_2)} \quad (5-49)$$

式中 h_1 ——吸气带宽度 $[\text{cm}]$ 。

若计算的 $H_1 > 2d_1$ 时,要重新考虑泵口直径 D 或折叠角 α , 否则影响抽速。如果要求尽可能大的吸气量而对抽速要求不高时, α 角可以再小些。

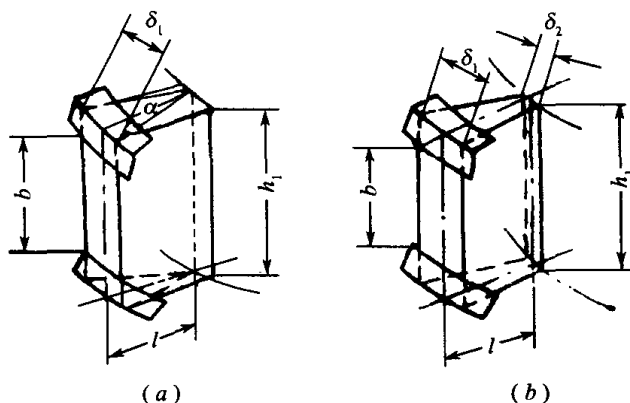


图 5-89 吸气带吸气单元

(a)连续吸气带芯子的吸气单元;(b)间断折叠片芯子的吸气单元。

2. 抽速验算

根据上述计算求得的尺寸,是否能满足所要求的抽速,需要验算。吸气面积确定之后,泵的抽速取决于泵内各部分的流导。泵的结构决定了泵芯内圆侧的抽气作用对泵口抽速影响很小,所以验算时只考虑外圆侧的抽气作用。计算公式如下

$$\frac{1}{S_1} = \frac{1}{S_F} + \frac{1}{\sum U_i} + \frac{1}{U_r} \quad (5-50)$$

式中 S_1 ——由泵芯外圆侧抽气获得的泵口抽速[L/s];

S_F ——泵芯外圆侧有效吸气面积的抽速[L/s],

$$S_F = F_1 S_i \quad (5-51)$$

F_1 ——泵芯外圆侧有效吸气面积[cm²],取 $0.9 F_K$;

S_i ——单位面积上的吸气速率[L/(s·cm²)], H_2 取 1, N_2 取 0.15;

$\sum U_i$ ——泵芯外圆侧,每个吸气单元深度中间到外圆表面的流导总和[L/s],对于连续折叠片的芯子结构,吸气单元形状如图 5-88 所示, $\sum U_i$ 按下式近似计算。

$$\sum U_i = 9.62 n K_b \frac{b \delta_1^2}{2l} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{L/s}] \quad (5-52)$$

对于单面涂敷带、单个折叠片芯子结构,无涂敷层面夹角几乎等于零的吸气单元,形状如图 5-89 所示。 $\sum U_i$ 按下式近似计算

$$\sum U_i = 9.62 n K_b \frac{b(\delta_1 + \delta_2)}{2l} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{L/s}] \quad (5-53)$$

式中 δ_1 ——吸气单元在泵芯内圆处的实际隙宽度[cm];

$$\delta_1 = \frac{\pi d_1 H_1}{h_1 n} - 2.5 \delta \quad [\text{cm}] \quad (5-54)$$

δ_2 ——吸气单元在泵芯内圆处的实际隙宽度[cm];

$$\delta_2 = \frac{\pi d_2 H_1}{h_1 n} - 2.5 \delta \quad [\text{cm}] \quad (5-55)$$

d_1 、 d_2 、 H_1 、 h_1 、 n 等符号含义与单位同前;

δ ——锆铝吸气带厚度[cm];

b ——吸气单元在泵芯内,外圆处暴露在外的高度[cm];

l ——吸气单元的径向长度,即

$$l = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad [\text{cm}] \quad (5-56)$$

U_r ——泵体与泵芯外圆柱之间环形圆柱空间高度中间到泵口的流导[L/s];可按环形圆柱流导公式近似计算

$$U_r = 3.78 K_a \frac{(D - d'_1)^2 (D + d'_1)}{l_1} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{L/s}] \quad (5-57)$$

式中 d'_1 ——泵芯装配外径[cm];
 l_1 ——环形空间高度[cm];
 T ——环形空间的平均温度[K];
 M ——气体的摩尔质量[g];
 K_a 、 K_b ——系数,查表 5-49、表 5-50。

以上计算抽速的结果满足下式即可,

$$S_1 \geq K_b S \quad (5-58)$$

式中 K_b ——系数,双面的取 0.9,单面的取 1。

表 5-49 K_a 值

d'_1/D	0	0.259	0.5	0.707	0.866	0.966
K_a	1	1.072	1.154	1.254	1.430	1.675

表 5-50 K_b 值

$\frac{1}{\delta_1 + \delta_2}$ 或 $\frac{1}{\delta_1}$	4	5	6	7	8	9	10	>10
K_b	0.6	0.67	(0.74)	(0.80)	(0.85)	(0.9)	0.94	1
注:表中括号内为推算值								

第六章 真空密封

一、概 述

真空设备为了隔绝大气,它的各个部件的连接处、电源和信号的引入端、转动轴、观察窗、大门、盖等地方,都应有可靠的真空密封。真空设备的密封性能是真空设备的重要指标,要求通过各种密封途径将漏气率限制在允许的范围之内。正确地设计各种密封结构、选择适当的密封材料是决定真空设备质量好坏的关键之一。

真空密封通常可分为可拆密封和不可拆密封(又称永久密封,如各种焊接、封接)。可拆密封中又有静密封和动密封的区别。

二、静 密 封

静密封是指连接件不能做相对运动的密封。对于低真空和高真空,可拆静密封一般采用弹性很大的橡胶做密封材料。超高真空的可拆静密封由于受高温烘烤和出气率的限制,通常都使用软金属做密封材料。

(一) 橡胶密封

在真空设备中,橡胶作为密封材料的应用最为普遍,主要是由于它具有高弹性,较高的耐磨性和适宜的机械强度,因而具有在常温下密封可靠,可反复拆卸安装,易于加工,价格低廉的优点。缺点是不能承受高温和低温的环境条件,与金属材料密封相比有较大的出气率和渗透率,通常只能用于低真空和高真空系统,不采取一定的措施不适用于超高真空和极高真空系统和设备中。

1. 橡胶的一般特性

橡胶的种类很多,性质各有不同,但都具有很大的弹性,在很小的作用力下能产生很大的形变。图 6-1 给出了硫化橡胶的张力与伸长关系曲线。

橡胶的体积是很不容易被压缩的。在某一方向上受压就在另一方向上伸长,总体积几乎不变。因此,橡胶不仅可以用作压紧密封,而且还可以用作胀紧密封。

橡胶长期处于压缩状态,会发生永久变形,即残余变形。残余变形的大小随温度升高而急剧增加。如果橡胶试样的原高为 d_0 ,对每种橡胶试样都压缩到同一高度 d_s ,在一定温度下保持一定时间(例如 22h 或 70h),然后经 30min 卸载并冷却到室温 25℃,此时测得试样的高度为 d_1 ,则橡胶试样的残余变形为

$$C_K = \frac{d_0 - d_1}{d_0 - d_s} \times 100\% \quad (6-1)$$

C_K 表征了残余变形的程度,称为橡胶的收缩比。常用橡胶收缩比的试验结果如图 6-2 所

示。

密封法兰的槽沟容积如果小于橡胶密封圈的体积,两个法兰表面就压不到一起。使用这种法兰时,螺栓如果拧得过紧,橡胶圈就会产生永久变形甚至被压坏而影响密封性能。密封槽容积大于橡胶密封圈体积的法兰,可部分地避免这种情况。

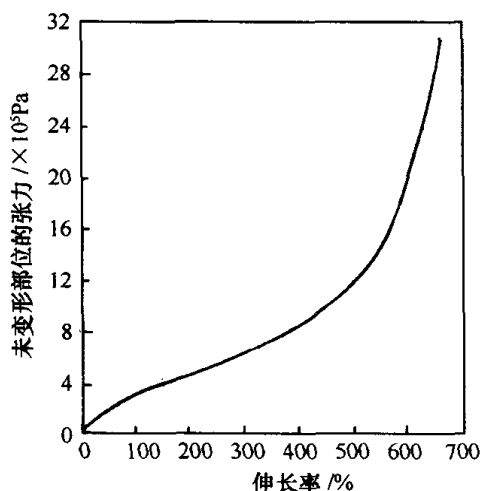


图 6-1 硫化橡胶张力—伸长曲线

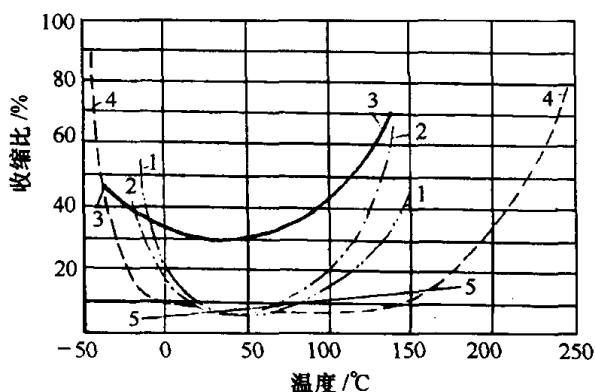


图 6-2 经过 22h 的压缩后各种橡胶的收缩比

1—丁腈橡胶；2—丁烯橡胶；3—氯丁橡胶；
4—硅橡胶；5—牌号为 R20V 的硅橡胶。

(1) 温度对橡胶的影响

温度对橡胶的性能影响很大。高温容易使橡胶产生残余变形,加速橡胶的老化;低温容易使橡胶发生结晶硬化,丧失弹性。因此,橡胶都有一定的使用温度范围。普通橡胶的使用温度范围为 $-30^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$; 氟橡胶的使用温度范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$; 丁腈橡胶的使用温度范围为 $-25^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。各类橡胶的性质见表 6-1。

表 6-1 国产真空橡胶一般物理机械性能

胶 种	色 别	扯断力 ≥/10 ⁵ Pa	伸长率 ≥/%	永久 变形 ≤/%	硬度 HS (±5)	脆性 温度 ≤/℃	压缩变形≤/℃			备 注
							70℃×24h			
							介质	收缩比/%	永久变形	
烟片胶	白	170	550	20	50	-50	空气	30	32	真空橡胶制品,供真空系统的密封垫圈等用
丁腈-26	黑	100	400	17	65	-40	空气	30	28	耐氟真空橡胶制品,供温度-30℃~+90℃真空密封用
烟片	黑	200	600	24	55	-52	空气	30	40	低硬度、耐气候
丁腈胶	黑	120	600	20	58	-33				耐油、氟、耐热
烟片氯丁	黑	160	800	18	38	-52	空气	30	40	低硬度、耐气候
硅胶	灰	50	450	8	33	-65				压缩变形要求低
硅胶	棕灰	40	200	6	65	-65				压缩变形要求低
氟胶 26-41	黑	70~120	225	15	75		150℃ 真空	20	70	耐 高 温 (200℃ ~ 300℃)耐油、酸、碱制品
氟胶 23-11	白	100	300	25	72	-34				耐强酸、耐高温(200℃)

(2) 橡胶的渗漏性能

气体能够通过橡胶等密封材料向真空一侧渗漏。不同橡胶在不同温度下对空气的透气性不尽相同,天然橡胶透气率很大,丁基橡胶含有甲基基团,透气率较低,并且随丙烯腈的含量增高而降低;氟橡胶十分致密,加入炭黑之后,透气率更小。气体经橡胶的渗漏速度,开始时很快,然后逐渐降低,经一定时间后,达到一稳定的渗透值。

增塑剂对橡胶的透气性影响很大,因为加入增塑剂之后,使聚合物的间距加大,气体的渗透率随之增加。另外,增塑剂大多是在高温下容易挥发的蜡类、酯类,在真空烘烤过程中容易挥发出来,并使橡胶老化变脆,所以用于真空系统中的密封橡胶,尽量选用含量少或不含任何增塑剂的品种。

在室温条件下,空气对部分橡胶的透气性见表 6-2、表 6-3。

表 6-2 部分橡胶对空气的渗透系数 (单位: $\text{cm}^3(\text{STP})\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)

橡胶种类	丁基橡胶	腈橡胶(高腈)	腈橡胶(低腈)	聚氯丁橡胶	天然橡胶	硅橡胶
渗透系数	0.32×10^{-7}	0.41×10^{-7}	0.80×10^{-7}	0.98×10^{-7}	4.4×10^{-7}	4.5×10^{-6}
橡胶种类	聚硫橡胶	聚氨酯橡胶	氯丁橡胶	丁苯橡胶	氟橡胶 23	氟橡胶 26
渗透系数	0.37×10^{-7}	0.97×10^{-7}	0.98×10^{-7}	2.9×10^{-7}	0.8×10^{-7}	0.88×10^{-7}

注:在压力差为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度为 80°C 时测定;体积值(单位为 cm^3)为标准状态下换算的

表 6-3 部分橡胶在不同温度下对空气的透气性

橡胶种类	透气率	渗透系数/ $\times 10^{-6} \text{cm}^3(\text{STP})\text{cm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			
	温度	23.5 $^\circ\text{C}$	75 $^\circ\text{C}$	120 $^\circ\text{C}$	177 $^\circ\text{C}$
丁基橡胶		0.2	3.2	1.3	—
低丙烯腈丁腈胶		1.3	8.0	22	—
高丙烯腈丁腈胶		极微	4.1	15	—
丁苯橡胶		2.5	29	47	—
天然橡胶		4.9	44	71	—
氯丁橡胶		1.0	9.8	26	—
聚丙烯酸酯橡胶		1.9	18	48	94
聚氨酯橡胶		0.5	9.7	31	—
氟硅橡胶			128	—	—
硅橡胶		115	350	—	690
维通 A 橡胶		—	8.8	36	146

注:辽宁铁岭橡胶工业研究所设计院测定值

(3) 橡胶的出气速率

橡胶的出气速率是影响真空系统性能的一个重要参数。特别是超高真空系统的密封,一般要求采用出气速率低的氟橡胶,并且要用制冷机冷冻橡胶以降低出气速率。获得 10^{-9}Pa 以上的超高真空,不宜用橡胶做密封材料。各种橡胶材料的出气速率见表 6-4、表 6-5。

表 6-4 各种橡胶的出气速率(一)

名 称	出气速率/ $\times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$							双对数坐标 上的斜率
	7.5min	12min	18min	27min	42min	1h	1.5h	
乙烯基硅橡胶			135.7	110.3	87.1	72.1	57.7	-0.52
二甲基硅橡胶	116.5	87.1	69.2	54.5	41.8	33.5	26.3	-0.58
丁腈橡胶甲	40.6	32.6	26.5	21.2	17.2	14	10.8	-0.53
丁腈橡胶乙	27	21.6	17.6	15	11.7	10	8.4	-0.48
天然橡胶	31.9	24.3	19.3	15.7	12.9	10.6	—	-0.53
Kel-F 橡胶	24.2	20	16.8	13.8	11.2	9.4	7.8	-0.43
Viton 橡胶	10.7	8.5	6.8	5.6	4.5	3.8	3.1	-0.50

表 6-5 各种橡胶的出气速率(二)

橡 胶 种 类	出气速率/ $\times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} (25^{\circ}\text{C})$							
	5min	10min	15min	20min	30min	40min	1h	1.5h
天然橡胶	25	22	20	19	16	14	11	8.4
丁腈橡胶	25	19.5	18.5	17	14	12	9.2	7.0
氟橡胶 26	13.5	9.6	8.0	7.0	5.8	5.0	4.2	3.5
氟橡胶 246	10	6.4	6.1	5.2	4.4	3.9	8.2	2.7
氯丁橡胶	19	17	15	13.2	10.7	8.8	6.2	4.0
乙烯基硅橡胶	95	62	47	38	31	26	19.5	15.5
共聚氯乙醇胶	—	—	—	80	63	54	42	33

注:辽宁铁岭橡胶工业研究设计院实测数据

(4) 橡胶在真空条件下的质量损失(质损)

橡胶在常温常压下长期存放或在真空中使用会逐渐老化变脆,填料和易挥发成分的丧失,使其质量逐渐减少的现象称为质损。卫星、飞船等航天器在宇宙空间条件下的质损造成的污染,是一个不可忽视的问题。真空用密封橡胶的选用,除了考虑其弹性、耐油性、机械强度、压缩永久变形和出气率等因素外,用于空间的橡胶,还要选择较小的质损率。表 6-6 给出了国产常用橡胶的质损率。

表 6-6 7 种橡胶的真空($10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-3} \text{Pa}$)质损率

(单位:%)

橡胶种类 \ 时间/h	0.1	1	3	5	10	15	20	25
天然橡胶	0.42	1.95	3.92	4.70				
氯丁橡胶	0.26	1.20	2.10	3.60				
丁腈橡胶	0.38	1.09	3.30	4.18				
共聚氯醇橡胶	0.34	0.99	1.12	1.17	1.26	1.33	1.33	1.34
乙烯基硅橡胶	0.17	0.36	0.43	0.45	0.46	0.48	0.50	0.50
氟橡胶 26	0.10	0.22	0.28	0.30	0.32	0.37	0.38	0.39
氟橡胶 246	0.06	0.14	0.16	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20

注:辽宁铁岭橡胶工业研究设计院提供

(5) 橡胶密封的预压力

为了保证真空密封,橡胶密封垫圈上要施加一定的预压力。橡胶密封圈的压缩量与橡胶的硬度有关(如图 6-3 所示)。例如,对直径 72mm、截面直径(或高度)为 4mm 的各种橡胶垫圈作渗漏试验所得的结果表明,如果橡胶硬度大于 50(HS),密封表面没有径向擦伤,当压缩量为 15% 时,不论垫圈形状如何,其渗漏量都小于 $10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

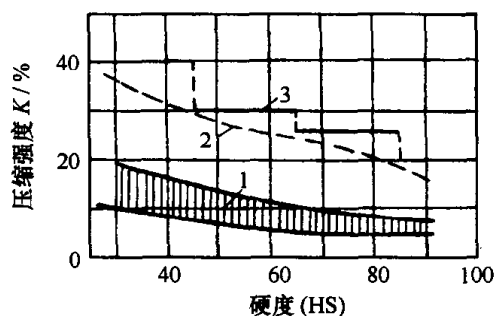


图 6-3 橡胶圈压缩量与硬度的关系

1—真空密封必须的最大压缩量；2—压缩量的许用值；3—根据美国 ASTM395-497 标准试验,收缩比的最大压缩量。

表 6-7 橡胶的永久变形、硬度与温度的关系

橡胶种类 \ 参数	25		50		70		100	
	永久变形 /%	硬度 (HS)	永久变形 /%	硬度 (HS)	永久变形 /%	硬度 (HS)	永久变形 /%	硬度 (HS)
丁基橡胶	8	105	4	53	7	57	11	66
天然橡胶	14	115	14	54	11	61	40	69
GR-S 橡胶	15	129	20	55	14	69	47	77
氯丁橡胶	65	143	97	60		68	98	83

2. 真空密封用橡胶

用于真空密封的橡胶(塑料)材料,除要求具有光洁表面、无划伤、无裂纹外,还要有低的出气率、挥发率和透气率,良好的耐热性、耐油性,抗老化和适宜的耐压缩变形值(小于 35%)及压力松弛系数(不小于 0.65)。最常用于真空密封的橡胶材料有下列几种:

(1) 天然橡胶

天然橡胶是最早使用的一种真空用密封材料,但它的透气率很大(大约为丁腈橡胶的 10 倍),耐油性、抗老化性能都较差,一般只用于粗真空、低真空密封。

天然橡胶使用温度在 100℃ 以下。提高天然橡胶的耐热性,可采用无硫硫化,用 2~4 份的促进剂 TMTD 硫化,配方见表 6-8。

表 6-8 无硫硫化天然橡胶配方示例(质量分数)

天然纯胶	氧化锌	硬脂酸	炭黑	防老剂 D	松焦油	促进剂 TMTD
100	5.0	3.0	50	1.0	/	3.0

注:硫化条件:138℃ × 1min

(2) 丁基橡胶

丁基橡胶的透气率很小,可用于 10^{-5}Pa 的真空密封。但在超高真空环境下(低于 10^{-6}

Pa)材料出现升华现象,其质量损失可达 30%,因此不适用于 10^{-6} Pa 以上的超高真空。

(3) 丁腈橡胶

丁腈橡胶是耐油性和其它各种性能都较好的一种橡胶,在高真空范围内广泛用于烘烤温度 150℃ 以下的各类真空密封。

丁腈橡胶是耐油合成橡胶,有 100 多个牌号,品种主要是低温聚合丁腈橡胶、易加工的软橡胶及改性丁腈胶。丁腈 18-26-40 是按丙烯腈含量多少而分,丙烯腈含量越高,耐油性、耐水性越好;含量越低,耐寒性越好,弹性也随之增加。

丁腈橡胶可以加入其它材料改进其性能,常见的混用材料有:尼龙、聚乙烯、ABS 树脂、DAP 树脂、氯化聚醚、聚四氟乙烯等。和尼龙并用以三元尼龙效果最好,尼龙用量控制在 10%~25%,温度控制在 150℃~160℃。与尼龙并用的丁腈橡胶具有耐磨、耐寒、耐热、耐臭氧等特点,适宜制作各类密封件。丁腈胶混入 30% 聚氯乙烯,不仅保持了丁腈胶的耐热性、耐透气性,而且提高了耐臭氧性、耐磨性、耐油性和抗撕裂性能,改善了加工性能,使用温度提高到 150℃~160℃。丁腈橡胶与氯化聚醚并用,压缩永久变形最小,在橡胶“O”形圈中应用最为合适。

丁腈橡胶具有优异的耐油性、耐水性、耐热性和较低的透气性,压缩永久变形小,使用寿命长、价格便宜,在高真空范围内广泛用于烘烤温度在 150℃ 以下的各类真空密封中。

(4) 聚氨酯橡胶

聚氨酯橡胶是由聚酯与二异氰酸酯共聚制成的一种新颖的弹性体。按加工方法可分为混炼型聚氨酯、浇注型聚氨酯和热塑型聚氨酯,目前浇注型产量占 50% 以上,混炼型仅占 5%。热塑聚氨酯不需要固化和交炼,也不需混合,成型后处理加工,和热塑料一样,可采用挤出、注塑等方法加工成各种形状的密封条,但不宜制造截面直径大于 300mm 的密封圈,同时粗细不均也会影响密封性能。

聚氨酯橡胶能达到 20MPa~74MPa 的机械强度,是丁腈胶的 1 倍~4 倍,耐磨性能优异,是天然橡胶的 5 倍~10 倍;具有较强的抗撕裂强度,较高的耐油、耐磨、耐臭氧、耐辐照、耐冲击性等优点。聚氨酯橡胶在真空设备、各类真空阀门、真空低速传动部件上,可获得良好的密封效果。

聚氨酯橡胶的主要缺点是不耐高温,不耐水,特别不宜在高温、湿度大的环境中使用,易水解乳化,使用温度范围为 -30℃~100℃,最好在 70℃~80℃ 使用。不宜长期在高速转动或摩擦力大的动态下使用。只能在低速和良好的散热条件下使用。此外,聚氨酯橡胶不耐酸碱,不能用于带有酸碱的介质中。

(5) 氟橡胶

氟橡胶是一种耐高温、耐各种介质的密封材料。各种气体在维通(Viton)型氟橡胶中有较小的扩散速度和较大的溶解度,透气性很小,与丁基橡胶相当,在高温、真空中出气率很低(在 2.6×10^{-7} Pa 的失重为 2.3%),可用于 10^{-5} Pa~ 10^{-7} Pa 的真空密封;采用双“O”圈密封结构,烘烤到 200℃,并加上冷却措施,可达到 10^{-8} Pa 的超高真空。缺点是价格昂贵,通常只限于需要烘烤的高真空及超高真空系统中。

氟橡胶具有较高的扯断强度,但在高温下扯断强度明显降低,在常温下扯断强度为 15.1MPa,205℃ 高温下扯断强度仅为 2.25MPa,所以,氟橡胶不能用在应力集中的地方,否则容易过早损坏。氟橡胶的物理机械性能见表 6-9。

二、静密封

表 6-9 氟橡胶一般物理机械性能

橡胶品种	抗张强度/MPa	伸长率/%	硬度(HS)	撕裂强度/MPa
26 型氟橡胶	10.0~16.0	150~300	70~85	2.5~4.0
23 型氟橡胶	13.0~25.0	200~600		2.0~7.0

氟橡胶的耐高温性能特别优异,F26 氟橡胶可在 250℃ 温度下长期工作,在 300℃ 温度下短期工作。

氟橡胶的耐热老化性及在各温度下的使用寿命见表 6-10、表 6-11。

表 6-10 各种橡胶的耐热老化性

橡胶名称	具有工作能力 ^① 的极限温度/℃
26 型氟橡胶	320
硅橡胶	320
23 型氟橡胶	250
丁腈橡胶	180
天然橡胶	130

注:①橡胶在该温度下经 24h~36h 老化后,抗张强度 ≥ 7.0 MPa,伸长率 $\geq 100\%$,就称为具有工作能力

表 6-11 氟橡胶(Viton A-HV)在各温度下的使用寿命

温度/℃	200	230	260	290	320
使用寿命/h	很长	>2500	500	140	36

F26 氟橡胶的压缩永久变形较其它氟橡胶好,压缩率 30% 的条件下,经 200℃,24h 热压缩后,永久变形为 40%~50%,采用硫化体系和优化配方,经过近 20 年的改进,F26 的永久压缩变形数值可降到 11% 以下。氟橡胶在空气中的高温压缩永久变形见表 6-12。

表 6-12 氟橡胶在空气中的高温压缩永久变形

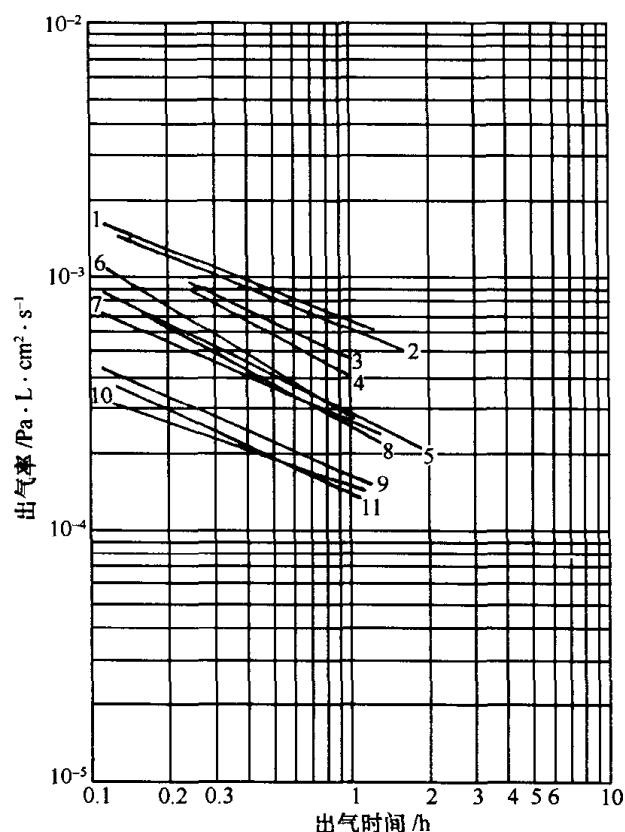
永久变形/% 试验温度×时间/℃×h	橡胶品种 氟橡胶-246	Viton A	Viton A-HV
150×24	38	49	—
200×24	48	50	45
200×200	72	84	—
230×24	65	75	—
250×24	77	90.5	78
300×24	100	>100	>100

氟橡胶的透气性较低,气体在氟橡胶中的溶解度较大,但扩散速率较慢。另外,氟橡胶对日光、臭氧和气候的作用十分稳定。氟橡胶与其它橡胶透气性比较见表 6-13,其出气速率与出气时间的关系如图 6-4 所示。

表 6-13 氟橡胶与其它橡胶透气性比较(温度 30℃)

性能	气体	天然胶	氯丁胶	丁腈胶	丁基胶	Viton A	
						30℃	60℃
渗透系数/ $10^{-8} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	N ₂	8.7	1.0	0.3	0.4	0.33	2.60
	O ₂	23	8	1	1.3	1.09	6.60
	CO ₂	123	25	8	5.2	5.87	29.8
	He	28	—	6	8	16	—
扩散常数/ $10^{-6} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	N ₂	1.6	—	—	0.063	0.039	0.33
	O ₂	2.2	—	—	0.11	0.082	0.66
	CO ₂	1.4	—	—	0.081	0.033	0.25
溶解度/ $10^{-2} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}^{-3}$	N ₂	5.7	—	—	5.6	8.4	8.0
	O ₂	10.3	—	—	11.8	13.3	10.1
	CO ₂	90	—	—	65	117	177

注:在压差为 101325Pa(1 大气压),温度为 30℃ 时的测定值



曲线号	橡胶名称	生产厂家
1	开尔-氟橡胶, 65G-5, 氟 5 型	上海橡胶工业制品所
2	开尔-氟橡胶, 65G-5, 氟 3 型	上海橡胶工业制品所
	氟橡胶, Fz-16 型	西北橡胶工业制品所
3	开尔-氟橡胶, 65G-5, 氟 3 型*	上海橡胶工业制品所
4	开尔-氟橡胶, 65G-5, 氟 4 型	上海橡胶工业制品所
5	开尔-氟橡胶, 65G-5, 氟 6 型	上海橡胶工业制品所
	维通氟橡胶	上海橡胶工业制品所
	氟橡胶, F26-41 型	上海橡胶工业制品所
6	氟橡胶, 81512×40 型	西北橡胶工业制品所
7	氟橡胶, 81501×40 型	西北橡胶工业制品所
8	维通 26, 超 26-01-1 型	辽宁铁岭橡胶工业研究设计院
9	氟 23, 超 23-03 型	辽宁铁岭橡胶工业研究设计院
10	氟 23, 超 K-5501 型	辽宁铁岭橡胶工业研究设计院
	维通 26, 超 26-04 型	辽宁铁岭橡胶工业研究设计院
11	氟橡胶, 81506 型	西北橡胶工业制品所
	再生氟橡胶, 81506 型再生 82	西北橡胶工业制品所

注: * 号表示用乙醚擦洗过;

测试前,先后在 20% NaOH、蒸馏水中煮洗,45% 湿度下放置三天以上。出气温度 20℃ ~ 25℃。实际使用中环境湿度如不同,应把查得的出气速率乘以湿度校正系数 η

$$\eta = \frac{\text{实际湿度}}{45\%}$$

图 6-4 氟橡胶的出气率(图中曲线的说明见右表)

Viton 型氟橡胶的玻璃化温度(由玻璃态向高弹性态转变的温度),是影响氟橡胶在低温使用的重要性能参数。VitonA 的玻璃化温度为 -20°C , (在动态下使用温度极限为 -29°C), 国产氟橡胶 26-41 为 -17°C , VitonB 为 0°C 。

Viton 型氟橡胶的脆性温度是指试件在一定的条件下受冲击产生破坏时的最高温度,它是碳化橡胶的特性温度,并不代表碳化温度及其制品工作温度下限。国产氟橡胶 26-41 的脆性温度为 $-30^{\circ}\text{C} \sim -34^{\circ}\text{C}$ 。氟橡胶的脆性温度与试样的厚度关系很大,表 6-14 是不同厚度的 VitonA 试样的脆性温度。

表 6-14 不同厚度 Viton A 试样的脆性温度

试样厚度/mm	2.0	1.87	0.63	0.25
脆性温度/℃	-32	-45	-53	-69

我国生产的氟橡胶有两种:F26 型氟橡胶(相当国外的 Viton A)是最通用的氟橡胶品种,占氟橡胶总用量的 90% 以上。F23 型氟橡胶仅用于强酸介质的密封(特别是发烟硝酸),由于加工困难,发展受到限制,现已被 F26 代替。国产氟橡胶性能见表 6-15,表 6-16。

表 6-15 国产氟橡胶性能(一)

抗张强度 /MPa	伸长率 /%	脆化温度 /℃	邵氏硬度	真空透气率 (25℃) /Pa·L·cm ⁻¹ ·s ⁻¹	真空质损 (50℃, 10 ⁻² Pa ~10 ⁻³ Pa)/%	压缩变形 (200℃, 24h) /%	使用寿命 (200℃) /h
10~17	150~210	-30	70±5	3.6×10 ⁻⁴	<0.2	<25	10000

注:辽宁铁岭橡胶工业研究设计院生产

表 6-16 国产氟橡胶性能(二)

密度/g·cm ⁻³	伸长率/%	脆化温度/℃	抗张强度/[MPa]	硬度(HS)	工作温度/℃	出气率(室温) /Pa·L·s ⁻¹ ·cm ⁻²
1.82	150~250	-35~45	10.0~15.0	70±5	250(200h)~20 (B型比A型为好)	1~3×10 ⁻⁵

低温性能: -40℃左右脆化,结晶为玻璃状排列,恢复到室温性能不变, -20℃时具有弹性,可保证密封性能。
 高温性能: 250℃下, 200h, 然后恢复到室温, 抗张系数 0.8, 伸长率系数 0.8;
 250℃下, 24h, (压缩 20%) 室温, 压缩永久变形为 50%~70%;
 200℃下, 24h, (压缩 20%), 压缩永久变形为 70%~90%。

注:上海橡胶制品研究所生产

(6) 硅橡胶

硅橡胶是一种耐热橡胶。在各种橡胶中,它的工作温度范围最宽(-100℃~350℃),即使在 200℃ 高温下也可长期使用。缺点是气体渗透率较普通橡胶大数十至数百倍,线膨胀系数也比其它橡胶大($250 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。因此,设计密封槽要留有足够的余地。图 6-5 为三种硅橡胶密封槽尺寸。国产硅橡胶性能见表 6-17、表 6-18。

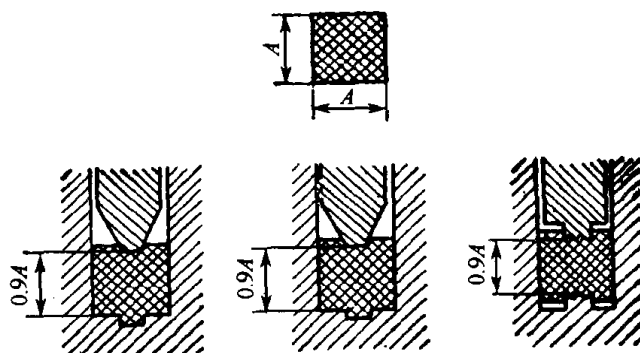


图 6-5 耐 150℃ 加热烘烤温度的硅橡胶垫圈及槽沟
 橡胶: Silastic 160; 截面 $A \times A = 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。

表 6-17 国产硅橡胶性能(一) (HG6-677-67)

胶料 牌号	抗张力 不小于 /MPa	伸长率 不小于 /%	硬度 (HS)	脆性温度 不高于 /℃	200℃, 200h 老化后		250℃, 200h 老化后		8 号滑油 150℃, 24h 质量变化 不大于 /%	击穿电压 不小于 /kV·mm ⁻¹	体积电阻 系数 不小于 /Ω·cm
					抗张力 不小于 /MPa	伸长率 不小于 /%	抗张力 不小于 /MPa	伸长率 不小于 /%			
6141	2.5	160	45~65	-65	—	—	2.5	100	45	12	10 ¹²
6142	3.0	170	40~60	-65	—	—	2.5	100	—	—	—
6143	3.0	200	40~60	-65	3.0	160	—	—	—	15	10 ¹⁴
6144	4.0	200	40~60	-65	—	—	3.5	180	—	20	10 ¹⁴
6145	6.0	200	45~65	-60	5.0	170	—	—	—	20	10 ¹⁴

表 6-18 国产硅橡胶性能(二)

抗张强度 /MPa	扯断伸长率 /%	脆性温度 /℃	硬度 (HS)	真空密气率 (25℃) /Pa·L·cm ⁻¹ ·s ⁻¹	真空质损(25h) (50℃, 10 ⁻² Pa ~10 ⁻³ Pa)/%	压缩变形 (175℃×24h) /%	使用寿命 (200℃) /y
5~7	200~350	-70	60°±10°	2×10 ⁻³	≤0.2	<30	1~2

注: 辽宁铁岭橡胶工业研究设计院生产

3. 橡胶的深冷应用

橡胶在低温下弹性消失, 变得硬而脆。氟橡胶玻璃化温度 T_g 值: 维通 A 为 -20°C (在动态下的使用温度下限为 -29°C), 国产氟橡胶 26-41 为 -17°C ; 而脆性温度 T_b 值与试样厚度有关, 维通 A 在厚度为 1.87mm、0.63mm、0.25mm 时分别为 -45°C 、 -53°C 、 -69°C , 国产氟橡胶 26-41 和 264 的 T_b 值分别为 $-40^\circ\text{C} \sim -55^\circ\text{C}$ 和 $-45^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 。因此, 维通型氟橡胶的薄膜制品可以使用的温度下限不超过 -50°C 。然而, 橡胶如果仅仅受静负荷作用, 它能在远低于其极限使用温度下工作。橡胶密封圈能在 $-50^\circ\text{C} \sim -268^\circ\text{C}$ 的温度范围内用于静密封, 密封压力通常不超过 7MPa。

深冷用橡胶通常制成 O 形圈。O 形圈的密封性取决于二级转变状态下的抗收缩能力, 可将它的断面直径压缩 25%~15%, 再使之处于低温下, 弹性体产生的力大于任何给定低温下的收缩力, 于是形成可靠密封。

压缩弹性密封件通常采用有限制和无限制二种方法。限制压缩是将 O 形圈放入沟槽中靠沟槽深度限制其压缩变形量。无限制压缩是 O 形圈放在两个法兰表面间冷冻并允许其侧面自由膨胀。室温下无限制压缩的密封寿命是 72h~76h。密封件保持在液氮温度下 (-196°C) 72h 以上, 没有破坏痕迹。

4. 国产真空胶管、胶棒、胶板制品

普通真空胶管、胶棒和胶板适用的温度范围为 $-40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$, 真空度为 10^{-4}Pa 。尺寸规格见表 6-19、表 6-20。

表 6-19 真空胶管、胶棒尺寸规格

(单位:mm)

胶管内径	公差	公称厚度	公差	长度及公差
3	± 0.5	3	± 0.5	500 以下 ± 20
4	± 0.5	4	± 0.75	
6	± 0.5	6	± 0.75	
8	± 0.5	8	± 1.0	(500~1000) ± 50
9	± 0.5	9	± 1.0	
10	± 0.5	10	± 1.2	1000 以上 ± 100
12	± 0.75	10	± 1.2	
14	± 0.75	12	± 1.2	
15	± 0.75	12	± 1.2	
16	± 0.75	13	± 1.2	
胶棒直径	公差	胶棒直径	公差	
2,3,4,5,6,7	± 0.5	25,28,30	± 1.5	
8,9,10,12	± 0.75	32,35,38	± 2.0	
15,16,18,20,22	± 1.0	45,48,51	± 2.5	

表 6-20 真空胶板的尺寸规格

(单位:mm)

公称厚度	公差	公称宽度	公差	公称长度	公差
2,2.5,3	± 0.3	250	± 5	250	± 5
4,5,6	± 0.5	500	± 10	500	± 10
7,8,9,10,12	± 0.8	500	± 10	500	± 10
15,20,25,30	± 1.0	500	± 10	500	± 10

5. 真空密封的设计

(1) 密封槽的设计

真空橡胶密封槽有各种形式,如图 6-6 所示,其中(a)、(b)、(f)、(i)、(j)为最常用的形式。设计密封槽的截面面积要求稍大于橡胶密封圈的截面面积,橡胶压缩后的充填因数 $\phi > 1$,橡胶的压缩量通常为 15%~30%。

①密封槽深度。设计橡胶密封槽,要充分考虑橡胶密封圈(截面为圆形或矩形)的特点,橡胶圈受力后形状改变而保持体积不变,即不可压缩的弹性压缩能力,超过这种能力就会产生塑性变形,严重时造成表皮破损,因此,确保橡胶密封圈最适宜的压缩量是密封槽设计中重要的参数之一。过小不能形成长期稳定的可靠密封,过大会影响橡胶圈的使用寿命。静密封法兰连接矩形密封槽深度和橡胶圈压缩率参数见表 6-21。

表 6-21 矩形密封槽深度和 O 形密封圈压缩率

(单位:mm)

密封圈截面直径 d	1.9	2.4	3.1	4	5.7	6	8	8.6	10	14	18	20
密封槽深 h	1.4	1.8	2.4	2.6	4.5	3.6	4.8	6.9	6.0	9.0	12.0	13.0
压缩量 Q	0.5	0.6	0.7	1.4	1.2	2.4	3.2	1.7	4.0	5.0	6.0	7.0
压缩率/%	26.3	25	22.5	35	21	40	40	19.8	40	35.7	33.3	35

注:1. 截面直径 4、6、8、10、14、18、20 几种规格为我国法兰标准。
2. 密封槽深数据是按 O 形圈压缩量给出的,如果法兰坚固后留有间隙,需相应减少密封槽的深度值

②密封槽宽度。密封槽宽度是密封槽设计中另一重要参数。由于安装在密封槽里的橡胶圈受压前后,形状发生变化而体积不变(橡胶本身不可压缩),因此,密封槽要有容纳密封圈变

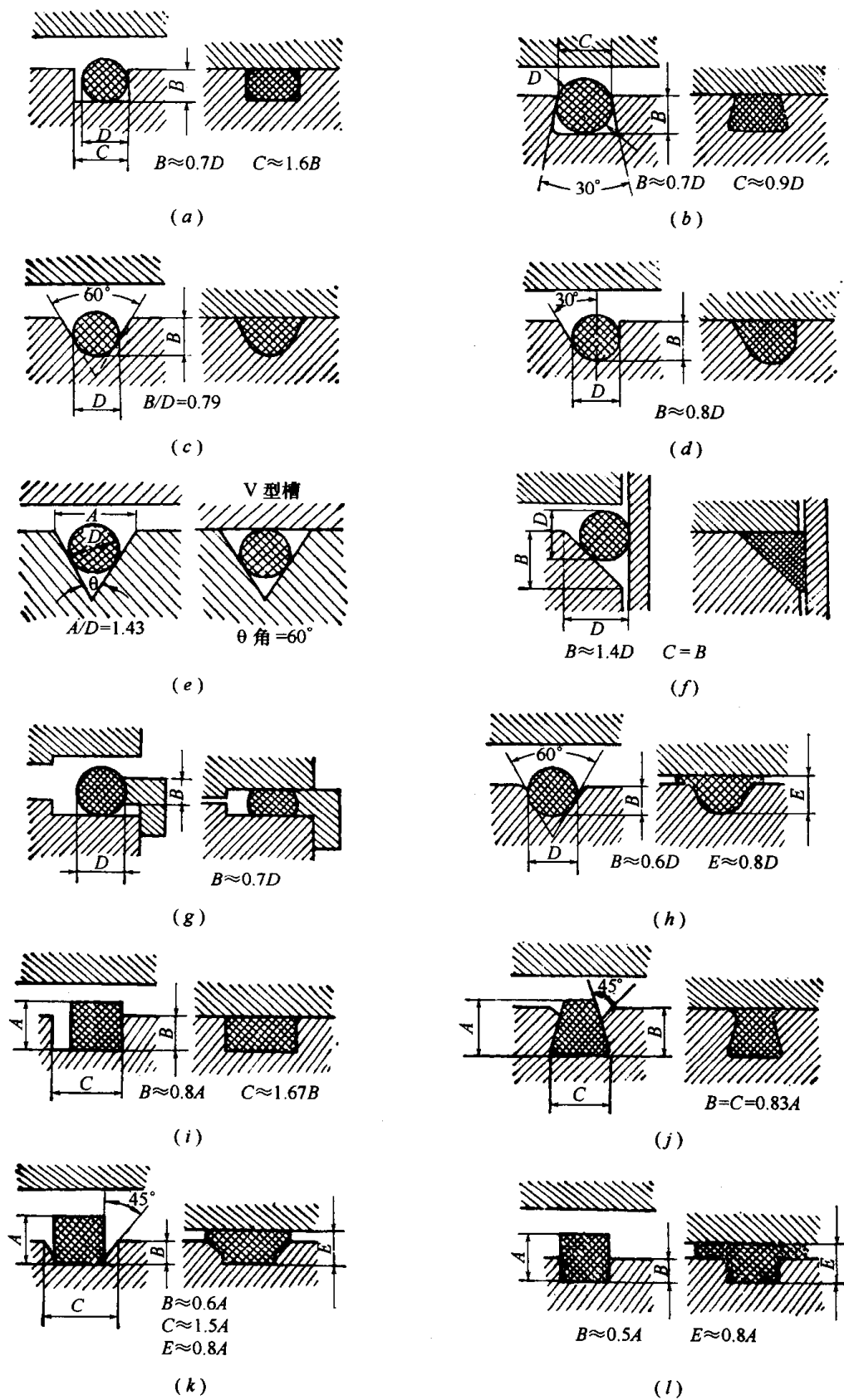


图 6-6 橡胶密封槽的形式

形的空间。在受压密封状态下,密封圈不可能将密封槽完全允满,在不同的介质和温度下,橡胶圈会出现一定的膨胀,密封槽容积应有相对的余量。此外,在动密封条件下,要求 O 形密封

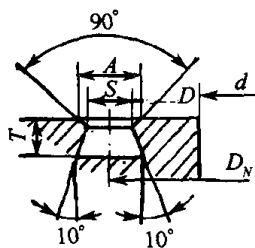
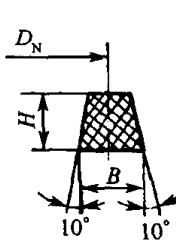
圈产生轻微的滚动,因此,通常要求矩形密封槽的容积比密封圈的体积大 15% 左右。

③ 梯形密封槽尺寸:

a. 梯形密封圈用梯形槽尺寸见表 6-22。

表 6-22 梯形圈梯形槽尺寸^①

(单位:mm)

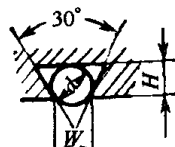
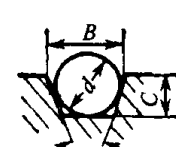
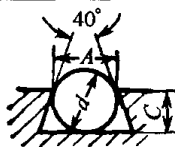
							
法兰内径 d	垫圈直径 D_N	垫圈槽				垫圈	
		A	D	S	T	H	B
20	26	5	23	3	4	4.8	4
50	60	9.5	54.7	5.3	7	9	7
100	115	11	107.7	7.3	8	10	9.5
200	220	13	212.5	7.5	10	12	10
300	330	13		7.5	10	12	10

注:①德国莱宝尔厂标

b. O 形密封圈用梯形槽有三种型式,其尺寸见表 6-23。

表 6-23 O 形圈梯形槽尺寸

(单位:mm)

<div></div> <div>(a) 燕尾槽, $C/d=0.75\sim0.80$ (b) 开口槽, $B/d=1.37\sim1.67$ (c) 窄口槽, $H/d=0.74\sim0.75$</div>					
O形圈截面名义直径 d	40°角			30°角	
	A	B	C	W	H
1.78	1.50	2.92	1.24	1.60	1.34
2.62	2.24	3.60	1.88	2.36	1.93
3.0	2.56	4.15	2.15	2.70	2.25
3.53	3.06	4.92	2.54	3.17	2.65
4.0	3.50	5.53	2.85	3.60	3.00
5.0	4.38	6.90	3.58	4.50	3.75
5.33	4.70	7.40	3.78	4.80	4.0
6.0	5.30	8.40	4.35	5.40	4.5
7.0	6.15	10.0	5.15	6.30	5.25
8.0	7.00	10.9	5.82	7.20	6.00
10.0	8.90	14.0	7.40	9.0	7.50
12.7	11.30	18.2	9.45	11.4	9.55

④矩形密封槽尺寸(GB6070—85)见表 6-24、表 6-25。

表 6-24 标准矩形密封槽尺寸

(单位:mm)

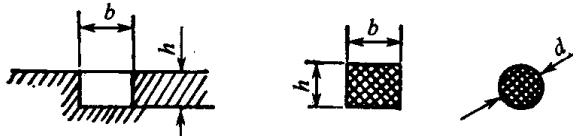
						
橡胶密封圈			矩形密封槽			
○形圈	矩形圈		槽深 h		槽宽 b	
截面直径 d	高 h	宽 b	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差
4	4	4	2.6		4	
6	6	6	3.6		6	
8	7	8	4.8		8	
10	8	10	6.0	+0.1	10	+0.1
14	12	14	9.0	0	14	0
18	16	18	12.0		18	
20	18	20	13.0		20	

表 6-25 宽槽型矩形密封槽尺寸

(单位:mm)

JISB 2406			GB/T6070—95			
○形圈	密封槽		○形圈	矩形圈	密封槽	
截面直径 $d_{\pm 0.07}$	槽深 $h_{\pm 0.5}$	槽宽 $b_{+0.25}^0$	截面直径 d	$h \times b$	槽深 h	槽宽 b
1.9	1.4	2.5	$4_{\pm 0.1}$	$4_{\pm 0.1} 4_{\pm 0.1}$	3	5.3
2.4	1.8	3.2	$6_{\pm 0.15}$	$6_{\pm 0.15} 6_{\pm 0.15}$	4.5	8
3.1	2.4	4.1	$8_{\pm 0.2}$	$7_{\pm 0.2} 8_{\pm 0.2}$	5.5	10
3.5	2.7	4.7	$10_{\pm 0.3}$	$8_{\pm 0.3} 10_{\pm 0.3}$	7	12
5.7	4.6	7.5				
8.4	6.9	11.0				

注:JISB 为日本标准

○形圈位于矩形槽中受到槽宽的限制时,密封的压力随压缩量增加而急剧增加,如图 6-7 所示。设计密封槽时,除考虑 ○形圈截面直径 d 的公差的影响外,还需要考虑 ○形圈装配在密封槽中,○形圈直径 D 伸展的影响。密封槽的深度 H_{\max} ,宽度 C 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} H_{\max} &= \beta \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} (d - \text{公差}) \\ C &= \rho \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} (d - \text{公差}) \end{aligned} \right\} \quad (6-2)$$

式中 H_{\max} ——允许的最大槽深[mm]；
 D_1 ——自由状态下O形圈内径；
 D_2 ——受力状态下O形圈内径；
 d ——O形圈截面直径；
 β ——槽深系数(其值同橡胶高度系数)；
 C ——对应于 H_{\max} 的槽宽[mm]；
 ρ ——槽宽系数

$$\rho = \frac{C}{d}$$

设计举例:橡胶硬度 HS55,O形圈截面直径 $d=6(\pm 0.15)\text{mm}$,O形圈内径 $D_1=154\text{mm}$ 。放入内径为 156.5mm 的矩形槽内,O形圈受压后外侧为自由状态,比压力取 1.3MPa ,计算槽深。

首先从图中查 δ' 和 β 值。硬度 HS 为 65 时,由图 6-8 查得 $\delta'=0.3, \beta=0.74$ 。

已知 $D_1=154, D_2=156.5, d=6$, 公差 $=0.15$ 代入式(6-5)得

$$H_{\max} = 0.74 \sqrt{\frac{154}{156.5}} (6 - 0.15) = 4.3 \quad [\text{mm}]$$

即最大矩形槽的槽深不能超过 4.3mm ,超过时 O 形圈所受的力达不到 1.3MPa 的压力。

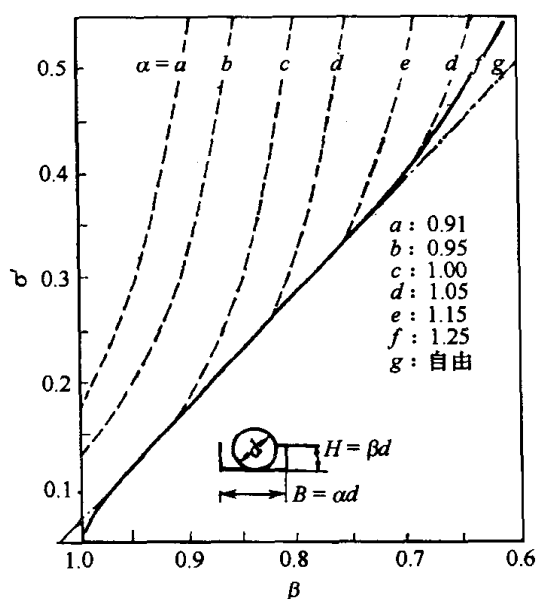


图 6-7 相对比压力 $\sigma' = \sigma/E$ 与高度系数 β 的关系

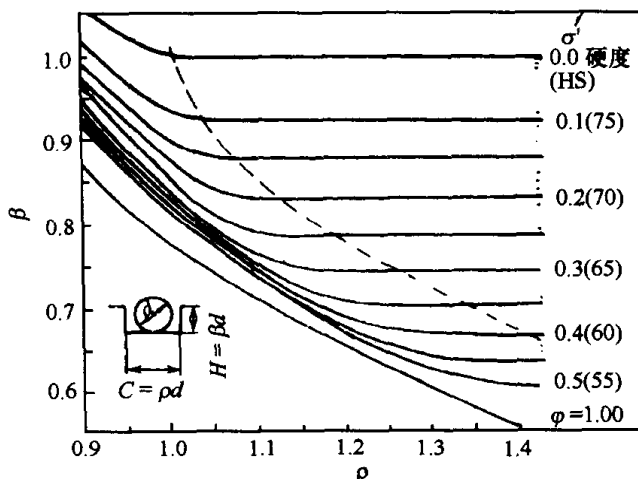


图 6-8 σ' 值为 1.3MPa 时各种比压力系数

$\sigma' = \frac{\sigma}{E}$ 所决定的 β 和 ρ 关系曲线

图中虚线是 O 形圈受压后的换算宽度,

其右侧 O 形圈处于自由态;最下面一条曲线为装填因数

$$\varphi = 1.00 \left(\varphi = \frac{\text{O形圈截面面积}}{\text{密封槽断面面积}} \% = \frac{\pi}{4} / \beta \rho \right)$$

(2) 密封圈的设计和选用

① O形圈密封接触面宽度的计算。O形圈受压后可以自由向两侧伸展。压缩后的宽度系数 α 和高度系数 β 的试验关系曲线如图6-9所示。

当 $0.7 < \beta < 0.95$ 时, α 与 β 近似于直线。

O形圈实际接触面 B 可用下式近似计算

$$B = 2.2(1.02 - \beta)d \quad (6-3)$$

式中 B ——密封圈压缩后接触面宽度;

β ——密封圈压缩后的高度系数 $\beta =$

$$\frac{H}{d};$$

H ——密封圈压缩后的高度;

d ——O形圈截面直径。

② O形圈压缩到一定高度时所需要的密封力的计算。

O形圈压缩到一定高度时所需要的密封力 F ,可用下式计算

$$F = fd\pi DE \quad [N] \quad (6-4)$$

式中 d ——O形圈截面直径[m];

D ——O形圈内径[m];

E ——弹性模量[MPa],与橡胶的硬度有关,如图6-10所示;

f ——压力系数,它是高度系数的函数,其数值由图6-11查得。

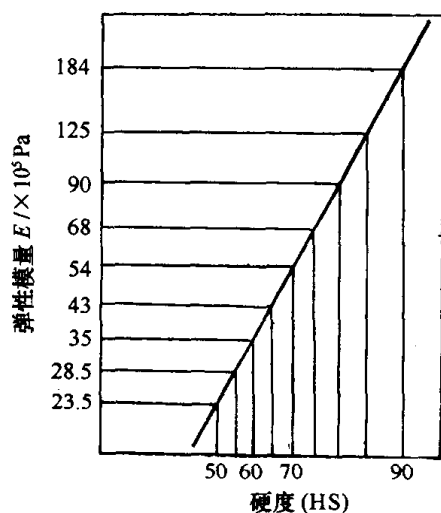


图 6-10 杨氏模数与橡胶硬度关系

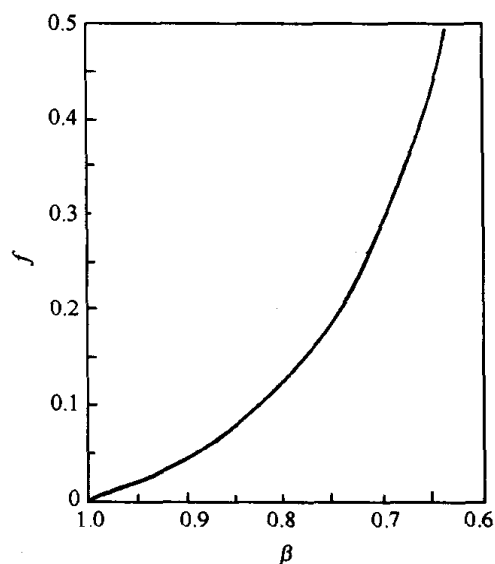


图 6-11 压力系数 f 与高度系数 β 的关系曲线

③ O形圈压缩到一定高度时需要的压力的计算。

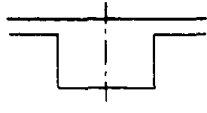
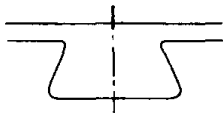
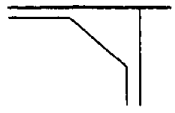
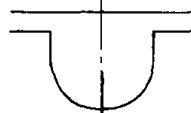
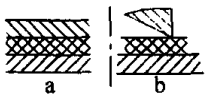
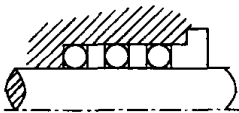
密封的压力 σ 是指和法兰相接触的O形圈压缩处的单位面积上所受的力。当 $0.7 < \beta < 0.95$ 时可近似用下式计算

$$\sigma = 1.1(1.02 - \beta)E \quad [\text{MPa}] \quad (6-5)$$

经验证明,对于普通橡胶,压力取1.3MPa为宜。

④ O形密封圈适用的密封槽见表 6-26。

表 6-26 O形密封圈适用的各种沟槽形状

沟槽形状	名 称	特 点
	矩形槽	最普遍的槽,适用方的和圆的密封件,缺点是密封件安装时易跑出槽
	燕尾槽 梯形槽	用得最多的槽,密封件不会跑出槽,O形圈直径小于槽径也好用,安装方便
	三角形槽	可用于小尺寸处
	半圆槽	用于旋转运动
	平面形槽	a 密封力大,b 密封力小
	圆桶形槽	用于转动轴或直径运动轴

(3) 配偶件密封面精度及装配要求

为了保证可靠的真空密封,对配偶件密封面精度及装配都有一定的要求。图 6-12 为密封结构图。

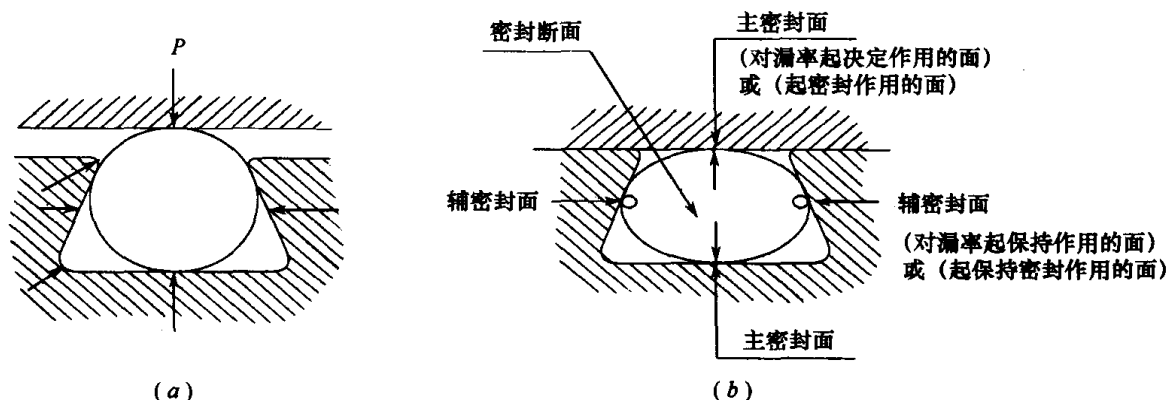
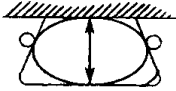
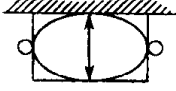
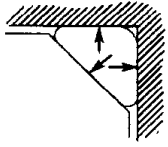
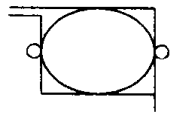
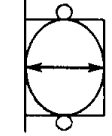
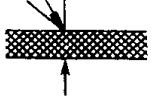
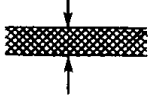
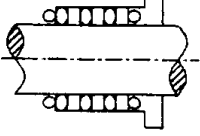


图 6-12 密封结构图

(a)自由状态;(b)工作状态。

密封件的各密封面(包括橡胶圈)的表面粗糙度对密封性能和动密封产生的焦耳热影响很大。要求主密封面粗糙度优于 $R_a 1.6$,次密封面粗糙度优于 $R_a 3.2$ 。各类密封形式中密封面的加工精度,见表 6-27。

表 6-27 配偶件加工表面的基本图形及加工精度

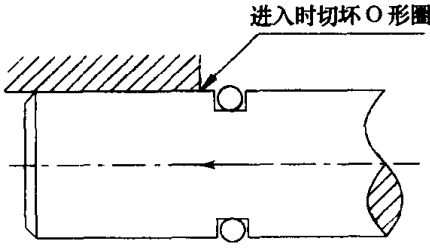
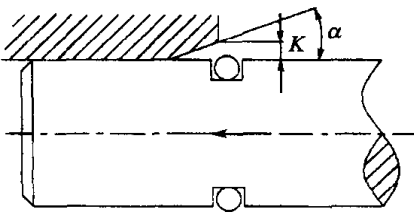
配偶件基本图形	主密封面代号	辅助密封面代号	加工粗糙度
	↓	○	↓ $R_a 1.6$ ○ $R_a 3.2$
	↓	○	↓ $R_a 1.6$ ○ $R_a 3.2$
	↓		↓ $R_a 1.6$
	↓	○	↓ $R_a 1.6$ ○ $R_a 3.2$
	↓	○	↓ $R_a 1.6$ ○ $R_a 3.2$
	↓		↓ $R_a 1.6$
	↓		↓ $R_a 1.6$
	↓	○	↓ $R_a 1.6$ ○ $R_a 3.2$

密封槽和转轴的端角处应有 $15^\circ \sim 30^\circ$ 的倒角,避免尖锐的棱角在装配时划伤密封圈,密封圈一旦被划伤,划伤处不仅存在漏气隐患,更主要的是密封圈的损伤在受力后会在蔓延扩大,导致密封失效。运动部件各端部倒角见表 6-28。

为了避免损坏密封圈和改善密封性能,安装密封圈时应涂高真空润滑油脂,特别是传动轴进入内孔前,在轴、密封圈和内孔表面要均匀涂上油脂,便于安装。带有螺纹端的传动轴,应采用导套管(如图 6-13 所示),避免螺纹划伤密封圈表面。

图 6-14 给出了方形、长方形密封槽在转角处的密封及加工的结构形式,密封槽底部的锉铰接缝要求控制在一个平面上。

表 6-28 密封槽沟端部倒角及 K 值

 								
○形圈截面直径 d/mm	1.9	2.4	3.1	3.5	4.6	5.7	8.6	10
K 值/mm	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	2.0
注:端面倒角 $\alpha=20^\circ$								

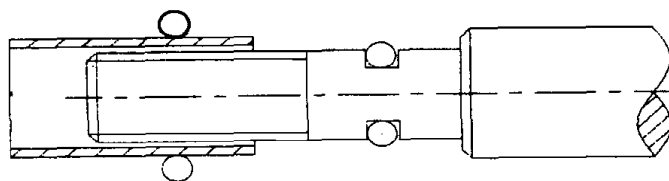


图 6-13 O 形圈通过螺纹的安装

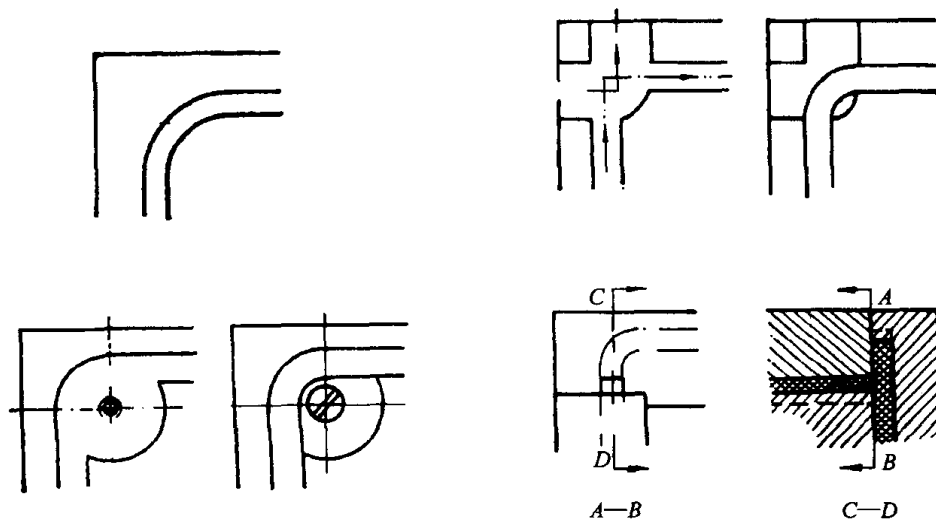


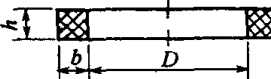
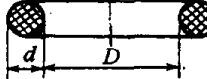
图 6-14 方形、长方形金属板和角密封结构

6. 真空法兰用橡胶密封圈(摘自 GB/T 6070-1995)

本标准适用于真空法兰密封的橡胶密封圈。橡胶材料在 $-30^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 使用应满足下列要求:硬度(HS):40~60;抗油强度:中等;放气率小于 $5 \times 10^{-4} \text{PaL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 尺寸见表 6-29。

表 6-29 标准密封圈及密封槽尺寸

(单位:mm)

	
---	--

(续)

公称通径 D_N	密封圈内径 D		矩 形				圆 形	
			b		h		d	
	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差
10	17	+0.2 0	4	± 0.10	4	± 0.10	4	± 0.10
16	22							
20	24							
25	29	+0.5 0						
32	36							
40	44							
50	55							
63	67	+1.0 0						
80	84							
100	104							
125	129							
160	165							
200	205	+2 0	6	± 0.15	6	± 0.15	6	± 0.15
250	255							
320	325	+3 0	7	+0.20	8	+0.20	8	± 0.2
400	405							
500	505							
630	635	+5 0	8	± 0.2	10	± 0.30	10	± 0.30
800	805							
1000	1005							
1250	1260							
1600	1620							
1800	1830	+8 0	18	± 1.00	20	± 1.00	20	± 1.00
2000	2030		18	± 1.00	20	± 1.00	20	± 1.00

(二) 氟塑料密封

氟塑料是四氟乙烯的聚合物,为白色或灰白色的半透明物质;化学稳定性好,不被酸碱腐蚀,不燃烧,不溶于任何一种溶液,不吸水也不被浸润;有优良的电绝缘性能,可以高速切削加工;能耐 200℃ 工作温度,在 100℃ ~ 120℃ 温度范围内(但要定期拧紧螺钉)可长时间工作,室温下出气率较普通橡胶小,25℃ 时的蒸气压为 10^{-4} Pa, 350℃ 时为 4×10^{-3} Pa;对钢的摩擦系数为 0.02~0.1,可用于真空动密封;氟塑料做轴密封填料必须加润滑剂,以降低氟塑料对金属的摩擦系数,不加润滑剂时必须保证有良好的导热性,以避免因摩擦过热而损坏。

氟塑料的塑性随温度升高而增加,而机械性能则急剧变坏。当加载高于 3MPa 时,产生残

余变形;加载在 20MPa 左右时,氟塑料会被压碎。工作温度超过 400℃ 时,氟塑料开始分解,并放出化学性质活泼的剧毒气态氟。氟塑料的低温性能良好,温度低于 -80℃ 时仍能保持其柔性。氟塑料有较大的残余变形,通常使用时要注意定期拧紧螺母,同时要考虑它的相对柔性(温度高柔软性增加)和冷流动等特性。

氟塑料的弹性较差,但可以用橡胶或弹簧补偿器加以弥补。用氟塑料作胀圈的结构材料时,不仅要靠被密封的介质压力,而且还要靠密封衬套的外部压紧力方能形成可靠的密封。氟塑料用于静密封的结构型式如图 6-15、图 6-16 所示。图 6-16(b)中氟塑料厚度为 0.3mm;(c)图为(b)的放大。

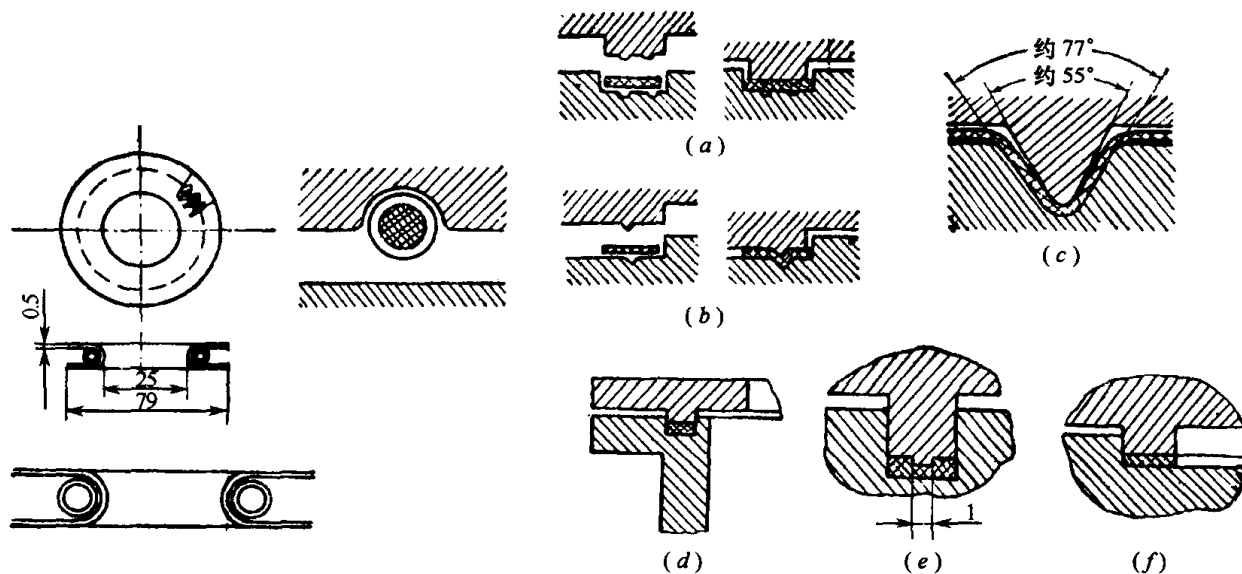


图 6-15 带有弹簧补偿器和
橡胶内芯的氟塑料垫圈

图 6-16 氟塑料的各种密封型式

膨胀聚四氟乙烯是目前一种独特的新型材料,它克服了普通聚四氟乙烯的硬度过硬,恢复性差,热膨胀系数大,蠕变后易发生密封失效等缺点。经特殊处理制成的如棉似锦的柔韧性极佳的膨胀聚四氟乙烯,具有高度可压缩性,优异的抗碱耐腐蚀性、耐蠕变性、自润滑性、低摩擦系数、高抗张强度和抗老化性。技术性能参数见表 6-30。

表 6-30 膨胀聚四氟乙烯性能参数

使用温度/℃	使用压力/MPa	压缩比率/%	压缩变形率/%	回弹性/%
-218~320	<20	50~80	40	17

注:北京中和达新技术公司提供产品

膨胀聚四氟乙烯制成的密封材料可在 -218℃ 到 320℃ 的温度范围内安全使用,除熔融碱金属和游离氟离子外,不受绝大多数化学物质的腐蚀。抗拉强度可承受 20MPa 的内部压力,符合 FDA/USDA 规范。具有良好的耐蠕变性和抗冷流特性,经久耐用,使用寿命是普通橡胶工作寿命的 7 倍以上。

膨胀聚四氟乙烯的密封性能卓越,制成的密封垫片具有高可压缩性,很容易填满密封界面上的裂纹、空洞和划痕,堵塞界面泄漏,补偿刚性变形产生的误差。受到张力作用时有回弹膨胀的特性,因此内部介质压力越高,密封力越大,是膨胀聚四氟乙烯密封垫片最神奇之处。

膨胀聚四氟乙烯除了制成一定规格的密封垫圈(片)外,可根据需要剪取一定长度的垫片,只要两端交叉相叠,即可构成任意尺寸任意形状的密封圈,附在密封垫片上的不干胶能使垫片

定位。一次加压形成密封面后,可获得良好的可靠密封。

膨胀聚四氟乙烯为白色纯聚四氟乙烯制品,无毒、无污染、耐老化,目前已广泛用于石油化工、生物化工、航天、制药、食品、饮料和低温设备等行业,是现代工业领域开发的一种新型密封材料。

(三) 金属密封

1. 金属密封的一般特性

橡胶密封圈的主要缺点是不耐烘烤且在室温下放气量大,所以许多要求高温烘烤($>200^{\circ}\text{C}$)和只准使用低蒸气压(室温时蒸气压 $<10^{-10}\text{Pa}$)材料的超高真空系统装置,不能使用橡胶密封,而需用金属密封圈密封。

金属密封圈有两个突出的优点:①放气远比橡胶少;②用它密封的系统 and 装置可以在高温下烘烤去气,因此能满足超高真空的要求。

任何事物都是一分为二的。金属密封也有很多缺点:

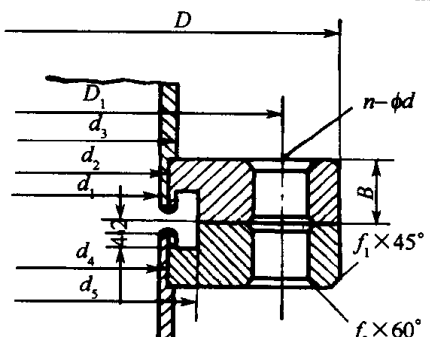
- ①金属密封圈弹性差,需要很大的密封力才能保障可靠的真空密封;
- ②重复使用性很差,有些金属密封圈只能使用一次;
- ③法兰密封面和刀口的粗糙度和配合精度要求高,很小的伤痕都能破坏密封,特别是大尺寸法兰加工很困难;
- ④密封圈和法兰材料的热膨胀系数相差较大,加热不均匀或密封结构设计得不正确,会引起局部变形而造成漏气。

2. 常用金属密封法兰型式、尺寸

(1)平面法兰密封(见表 6-31)

表 6-31 超高真空平面法兰尺寸

(单位:mm)

											
公称通径	管子			法 兰						螺 栓	
	内径	切削外径	外径	外径	厚度	螺栓孔中心直径	螺栓孔直径	焊槽内径	焊槽外径	螺纹	数量
D_N	d_1	d_2	d_3	D	B	D_1	d	d_4	d_5	M	n
25	25	28	30	90	12	70	9	31	39	8	6
32	32	35	37	96	12	76	9	38	46	8	6
40	40	43	45	104	12	84	9	46	54	8	6
50	50	53	55	116	12	96	9	56	64	8	8
65	65	69	71	132	14	112	12	73	81	10	8
80	80	84	86	146	14	126	12	88	96	10	12
100	100	104	106	166	14	146	12	108	116	10	12
125	125	129	131	195	14	175	12	131	139	10	12
150	150	154	156	220	14	200	12	151	166	10	16

平面法兰是金属密封法兰型式中最简单的一种,如图 6-17 所示,其密封面没有配合问题,表面粗糙度($R_a1.6 \sim R_a0.25$)容易达到。主要缺点是密封圈的定位问题不易解决,另外由于接触面较大需要很大的密封力。一般只适用于小直径的法兰连接密封。

平面法兰常用的密封材料有铝、铜和金。

在制作纯度为 99.99%、直径小于 1mm 的铝丝 O 形圈时,须在 350℃ 退火 1h,使用前要用 NaOH 或稀硝酸清洗。 $\phi 0.92\text{mm}$ 的铝丝压缩到 0.28mm 时须施加 1600MPa 的压力,在这种情况下可以和不锈钢形成冷焊,并能耐 250℃ ~ 370℃ 的高温烘烤。铝丝 O 形圈的价格虽然便宜,但只能使用一次。另外铝丝表面有一层氧化膜,因而焊接困难,为了避免铝的氧化,可在铝表面镀银或改用 Al-Si 合金(Si(3~5)%)。Al-Si 合金垫圈不仅能耐 400℃ ~ 500℃ 高温,而且不怕水银,可用于水银扩散泵系统。

铜丝 O 形圈常使用直径为 1.5mm 的无氧高导铜(OFHC),它在氢气中熔焊后,放入温度为 950℃ 烧氢炉中烧氢处理。铜丝 O 形圈能耐 450℃ 高温烘烤,但铜在高温烘烤中容易产生硬的氧化层。铜圈表面镀银(银层厚度不小于 $5\mu\text{m}$)就可以避免氧化。铜比铝和金的硬度大,需要的密封力更大,为了克服这一缺点做成特殊形状的垫圈如图 6-18 所示。

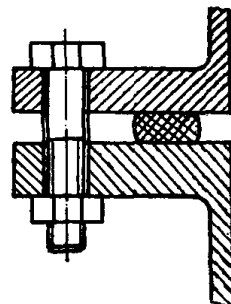


图 6-17 圆截面金属垫圈

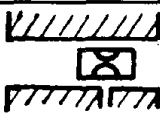
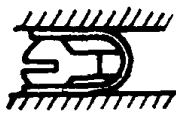
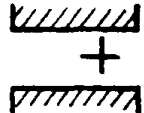
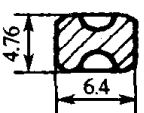

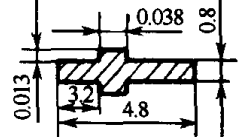
形 式			
尺 寸			

图 6-18 鼓形、U 形和十字形铜垫圈密封型式

金丝 O 形圈材料为 99.7% 纯金。黄金的突出优点是化学稳定性好,耐腐蚀,长期暴露在空气中不氧化,质软容易加工,延展性特别好。用过的金丝可回收重新拉丝使用、损耗很少。缺点是价格昂贵。常用的金丝直径为 0.5mm ~ 2mm,压缩量取 50% 左右,按 20MPa 的压紧力来确定螺栓数目。金丝 O 形圈接头处可采用图 6-19 中专用夹具熔接。

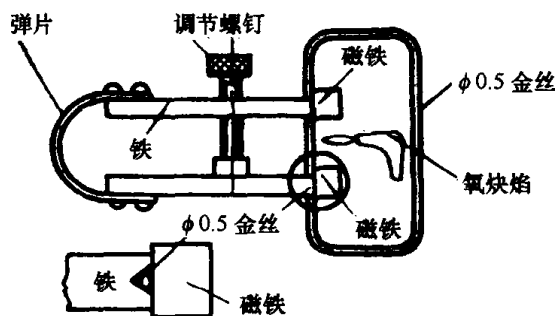


图 6-19 金丝熔接夹具

(2)圆锥端面密封(见表 6-32)

密封面的表面粗糙度要优于 $R_a1.6$,上、下两个锥面角度要吻合一致才能保证可靠密封。

常用密封圈的材料有铜、镍、铝、不锈钢(适用不锈钢法兰)。法兰材料可用碳钢、不锈钢。

表 6-32 圆锥端面密封法兰尺寸

(单位:mm)

公称通径 D_N	管外径	F	t	D	d	R_1	R_2	螺栓	螺栓孔中 心直径	螺栓数
25	30	74	13	3.2	1.6	42	41.2	M8	58	4
40	45	100	13	3.2	1.6	68	67.2	M8	84	6
100	108	158	14	3.2	1.6	120	119.2	M10	138	12
150	159	210	16	6.4	3.2	172	170.4	M10	190	12
225	233	310	16	6.4	3.2	266	264.4	M12	286	24

(3) 直角形密封(见表 6-33)

图 6-20 为 L 型密封。密封台阶间隙 0.025mm, 以保证密封圈受压后呈 L 形。下法兰台阶利于 O 形圈定位, 表面粗糙度优于 $R_a 1.6$, O 形圈压缩量为 50%, 常用 O 形圈金属丝直径为 0.5mm、0.6mm、0.8mm、1mm、1.5mm 五种。

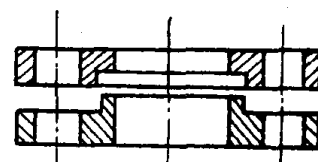


图 6-20 L 形密封

表 6-33 L 形密封法兰尺寸^①

(单位:mm)

公称通径	管子		法兰							螺栓		金 丝 线径×内径
	内径	切削 外径	焊槽 内径	焊槽 外径	凸台 直径	外台阶 直径	螺栓孔中 心直径	外 径	螺孔直径	螺 纹	数 量	
D_N	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	C	D	d	M	n	
25	25	28	31	37	46	52	70	90	9	8	6	0.5×46
32	32	35	38	44	53	59	76	96	9	8	6	0.5×53
40	40	43	46	52	61	67	84	104	9	8	6	0.5×61
50	50	54	58	64	73	79	96	116	9	8	8	0.5×73
65	65	69	73	79	88	94	112	132	9	10	8	0.5×88
80	80	84	88	94	103	109	126	146	9	10	12	0.5×103
100	100	104	108	114	123	129	146	166	9	10	12	0.5×123
125	125	130	135	143	152	158	175	195	9	10	12	0.5×152
150	150	155	160	168	177	183	200	220	9	10	16	0.5×177
175	175	180	185	193	202	208	225	245	9	10	16	0.5×202
200	200	205	210	218	227	233	250	270	9	12	16	0.5×227
225	225	230	235	243	252	258	278	300	11	12	24	0.5×252
250	250	255	260	268	277	283	302	324	11	12	24	0.5×277

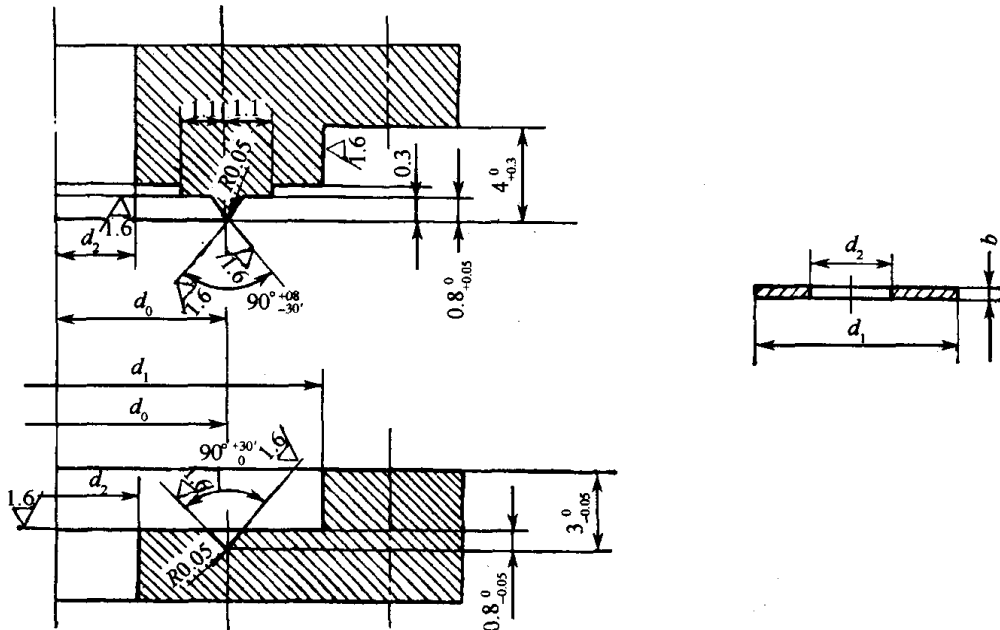
注: ①为了拆卸法兰方便, 在上法兰(或下法兰)攻 2 个~4 个 M6 的顶丝螺孔, 顶丝螺孔中心圆直径同 C 值

(4) 刀口密封(见表 6-34)

密封圈为 0.5mm 的环形铜皮或铝片,密封力为 280MPa,能耐 450℃ 烘烤,可承受多次加热——冷却循环而不漏气。但配合精度要求高,只用于小尺寸法兰密封。

表 6-34 超高真空刀口密封法兰及垫圈尺寸

(单位:mm)



导管公称直径 D_N	尺寸				导管公称直径 D_N	尺寸			
	上楔与下槽 中心直径 d_0	法兰止口 外径和填料 料外径 d_1	法兰和填 料内径 d_2	密封垫厚 b		上楔与下槽 中心直径 d_0	法兰止口 外径和填 料外径 d_1	法兰和填 料内径 d_2	密封垫厚 b
10	15 ± 0.1	20	10	0.3	150	170 ± 0.2	180	160	0.4
13	20 ± 0.1	25	15	0.3	175	190 ± 0.2	200	175	0.4
15	20 ± 0.1	25	15	0.3	200	210 ± 0.2	220	200	0.5
20	25 ± 0.1	30	20	0.3	225	235 ± 0.2	245	225	0.5
25	30 ± 0.1	35	25	0.3	250	260 ± 0.2	275	250	0.5
32	37 ± 0.1	42	32	0.3	275	285 ± 0.2	295	275	0.5
40	45 ± 0.1	50	40	0.3	300	310 ± 0.25	320	300	0.5
50	55 ± 0.15	60	50	0.4	325	340 ± 0.25	350	325	0.5
60	65 ± 0.15	70	60	0.4	350	360 ± 0.25	380	350	0.5
70	75 ± 0.15	80	70	0.4	375	385 ± 0.25	400	375	0.5
80	92 ± 0.15	98	86	0.4	400	420 ± 0.25	440	400	0.5
100	110 ± 0.15	120	100	0.4	450	470 ± 0.25	490	450	0.5
125	135 ± 0.15	145	125	0.4	500	520 ± 0.25	540	500	0.5

(5) 斜楔密封(如图 6-21 所示)

斜楔密封(conflat)的刀口角度为 70° , 高度为 1mm~1.5mm, 深度公差为 $\pm 0.075\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$, 刀尖圆角半径为 0.1mm, 刀口直径误差为 0.05mm, 垫圈材料为宽 6mm、厚 2mm~3mm 的无氧高导铜。采用这种密封结构的真空系统, 经 250℃ 5h 高温烘烤后, 能使真空系统获得 $2.6 \times 10^{-9}\text{Pa}$ 的真空度。

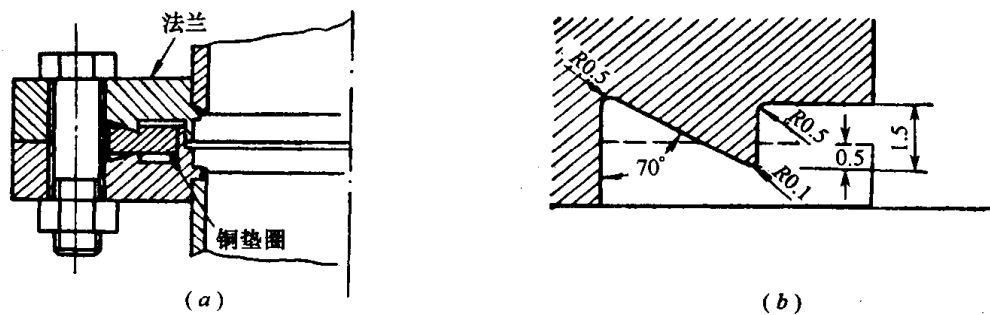


图 6-21 斜楔密封

(a)结构示意图; (b)刀口尺寸。

表 6-35 斜楔密封标准

(单位:mm)

																	螺栓孔	
法兰 种类	D_N	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R		
		公差 ± 0.4	公差 ± 0.4	公差 ± 0.05	公差 ± 0.05	公差 ± 0.05	公差 ± 0.05	公差 ± 10	公差 ± 0.05	公差 ± 0.13	公差 ± 0.13	公差 ± 0.05	公差 0.05	min/ max	公差 ± 0.13	公差 ± 0.13	直径	数量
F	CF16	33.8	7.2	—	21.4	18.3	—	20	0.7	1.17	—	—	—	—	2.7	1.5	4.4	6
I	CF16	—	—	5.2	—	18.3	21.3	20	—	—	0.6	—	—	—	2.7	1.5	—	—
R	CF16	33.8	7.2	—	—	—	—	—	—	—	—	21.4	5.8	—	—	—	4.4	6
F	CF38	69.4	12.7	—	48.3	41.9	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	3.8	7.4	6.7	6
I	CF38	—	—	7.0	—	41.9	48.1	20	—	—	0.6	—	—	—	3.2	2.5	—	—
R	CF38	69.85	12.7	—	—	—	—	—	—	—	—	48.3	7.6	1.3	—	—	6.7	6
F	CF50	85.9	15.9	—	61.7	55.3	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	4.2	5.2	8.5	8
I	CF50	—	—	8.9	—	55.3	61.5	20	—	—	0.6	—	—	—	3.6	3.8	—	—
R	CF50	85.9	17.4	—	—	—	—	—	—	—	—	61.7	9.7	1.3	—	—	8.5	8
F	CF63	113.5	17.4	—	87.5	77.2	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	8.0	8.0	8.5	8
I	CF63	—	—	12.1	—	77.2	82.3	20	—	—	0.6	—	—	—	7.4	3.2	—	—
R	CF63	113.5	19.0	—	—	—	—	—	—	—	—	82.5	12.7	1.3	—	—	8.5	8

(续)

法兰 种类	D_N	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	螺栓孔	
		公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	公差	min/ max	公差	公差	直径	数量
		± 0.4	± 0.4	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 10	± 0.05	± 0.13	± 0.13	± 0.05	0.05		± 0.13	± 0.13		
F	CF100	151.6	19.8	—	120.6	115.3	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	8.8	9.0	8.5	16
I	CF100	—	—	13.1	—	115.3	120.4	20	—	—	0.6	—	—	—	8.2	3.5	—	—
R	CF100	151.6	21.4	—	—	—	—	—	—	—	—	120.6	14.3	1.3	—	—	8.5	16
F	CF150	202.4	22.2	—	171.4	166.1	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	10.2	10.0	8.5	20
I	CF150	—	—	15.2	—	166.1	171.2	20	—	—	0.6	—	—	—	9.6	3.6	—	—
R	CF150	202.4	23.8	—	—	—	—	—	—	—	—	171.4	15.8	1.3	—	—	8.5	20
F	CF200	253.2	24.6	—	222.2	216.9	—	20	0.66	1.17	—	—	—	1.3/3.6	9.6	12.0	8.5	24
I	CF200	—	—	16.5	—	216.9	222	20	—	—	0.6	—	—	—	9.0	4.5	—	—
R	CF200	253.2	24.6	—	—	—	—	—	—	—	—	222.2	17.2	1.3	—	—	8.5	24

注: F—固定法兰; I—垫块法兰; R—活套法兰

(6) 台阶密封(如图 6-22 所示)

台阶密封是利用两直角的剪切力剪切出新鲜金属面造成密封的。两直角的剪切有两种基本形式,即相叠(左图)和相隔(右图)。垫圈材料是无氧高导铜,厚度为 1mm~3mm。制作时在 950℃ 的烧氢炉中退火处理,可 450℃ 温度下反复烘烤使用。上下两直角的公差较大,没有配合问题,因此加工比较容易。

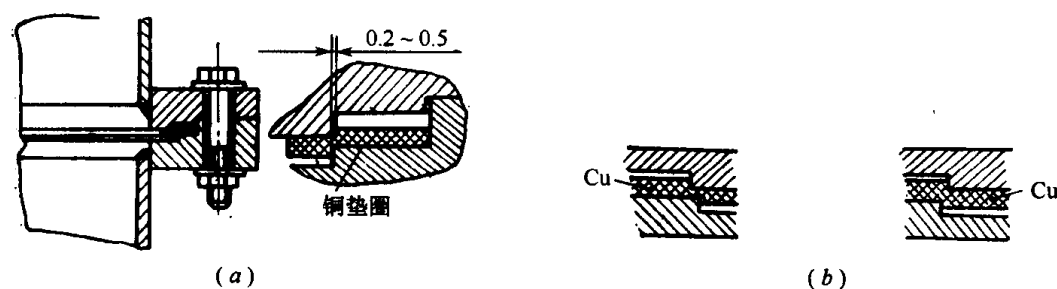


图 6-22 台阶法兰密封结构

(7) 铝箔密封(Alfoil)

图 6-23 是铝箔密封法兰的剖面图。A 部放大图所示为压紧后的剖面形状。当外密封面以相同的压缩量(30%)压紧时,中间铝箔被封入,两端保持很大的压力,形成密封。加工的挠

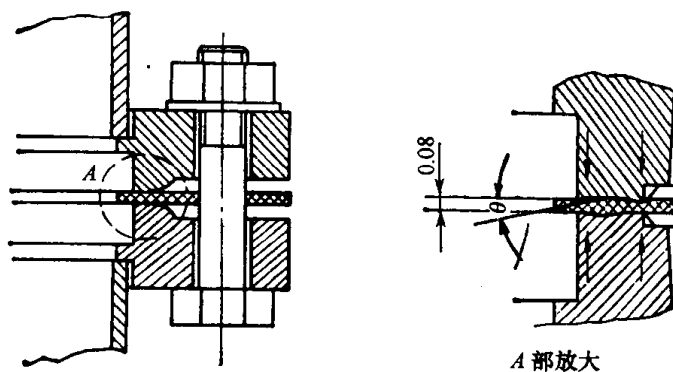


图 6-23 铝箔密封法兰

曲角比螺栓所引起的角度要大些。挠曲角 θ 和最大应力 σ_{\max} 可由下式求出

$$\theta = \frac{MR^2}{EI} \quad (6-6)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{MR}{Z} \quad (6-7)$$

式中 M ——锁紧螺栓引起的挠矩 [$\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}$];

E ——弹性模量 [Pa];

I ——截面惯矩 [m^4];

Z ——截面模量 [m^3];

R ——法兰半径 [m].

一般铝箔密封所需的锁紧力矩为 $40\text{N}\cdot\text{m} \sim 50\text{N}\cdot\text{m}$ 。当密封面粗糙度在 $0.5\mu\text{m} \sim 4.4\mu\text{m}$ 范围内、垫片厚度为 $40\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 时,铝箔密封能承受 $250^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 反复烘烤。当锁紧力矩为 $45\text{N}\cdot\text{m}$,烘烤温度为 300°C 以上时,铝箔垫圈会熔结在密封面上,可以获得更好的真空密封,但下次使用时要将熔化的铝箔清除掉。

(8) 惠勒密封(Wheeler)

惠勒密封的原理如图 6-24 所示。刀口宽度 W 等于密封圈的线径 d (2mm)。密封圈材料为无氧高导铜。压紧后使垫圈产生塑性变形充满左侧空间,多余部分从右侧挤出,从而形成可靠的密封。垫圈材料也可以用聚四氟乙烯。300mm 直径惠勒密封性能曲线如图 6-25 所示。

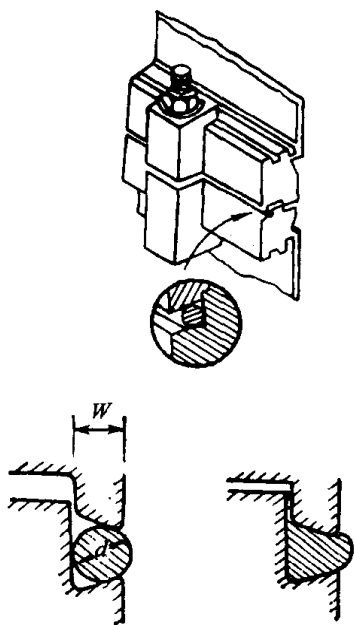


图 6-24 惠勒密封原理及结构图

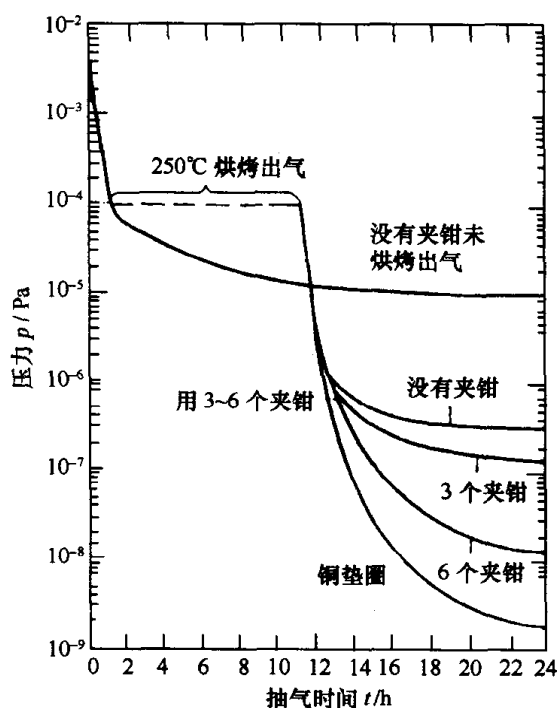


图 6-25 300mm 直径惠勒密封性能曲线

(四) 真空法兰、真空规管接头

1. 橡胶密封真空法兰

(1) 真空法兰(摘自 GB /T 6070—95)

本标准规定了低、中、高真空设备所用法兰尺寸及密封结构。本标准适用于低、中、高真空

设备的连接法兰。

①公称通径尺寸的规定见表 6-36。

表 6-36 真空法兰公称通径

(单位:mm)

公称通径 D_N	公称通径 D_N	公称通径 D_N	公称通径 D_N
10	50	200	800
16	63	250	1000
20	80	320	1250
25	100	400	1600
32	125	500	1800
40	160	630	2000

②法兰连接形式如图 6-26~图 6-29 所示。法兰密封结构为法兰开槽用矩形或圆形断面密封,密封槽应开在迎着气流方向的法兰面上。

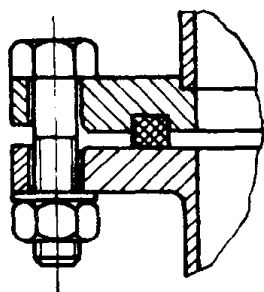


图 6-26 固定法兰与固定法兰连接

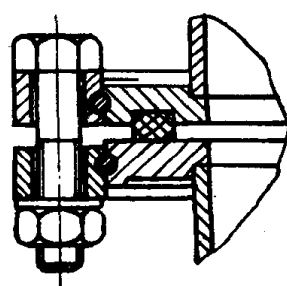


图 6-27 活套法兰与活套法兰连接

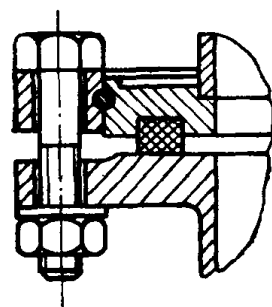


图 6-28 固定法兰与活套法兰连接

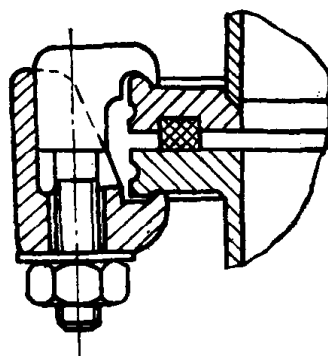


图 6-29 活套法兰用钩形螺栓连接

③固定真空法兰按表 6-37 包括表图要求加工(平法兰不开密封槽)。表中所列尺寸不包括加工余量,如工艺需要,应留出加工余量。

法兰用材料一般为 Q235-A,要求防磁或用于腐蚀介质的用 1Gr18Ni9Ti,选用其它材料时应满足附录 A(参考件)线密封载荷和焊接性能的要求。

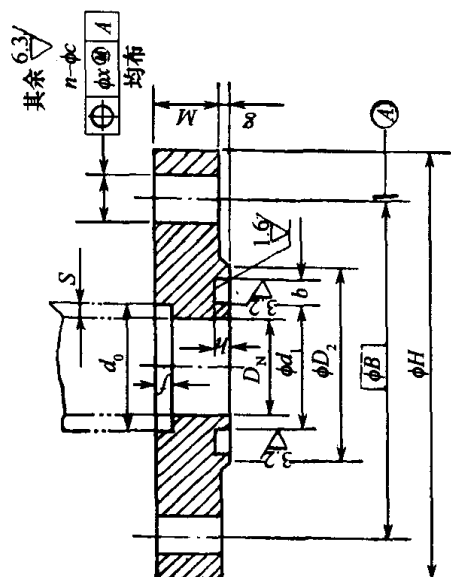
④活套法兰按表 6-38 包括表图的要求加工(平法兰不开槽),活套法兰套环按表 6-39 及其图的要求加工。

密封槽应开在迎着气流方向的法兰平面上。

表 6-38 及表 6-39 中所列尺寸不包括加工余量,如工艺需要应留出加工余量。

活套法兰及法兰套环所用材料一般为 A3,要求防磁或用于腐蚀性介质的用 1Cr18Ni9Ti,选用其它材料时应满足附录 A(补充件)线密封载荷和焊接性能的要求。

表 6-37 固定真空法兰尺寸



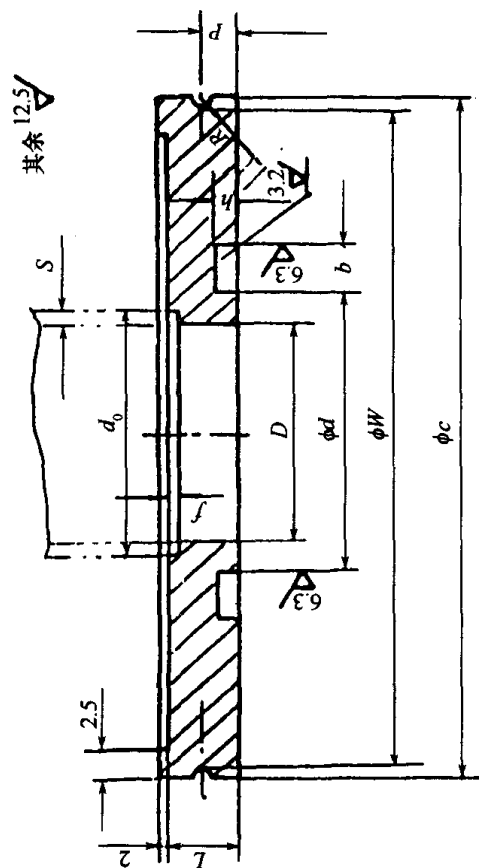
接 管		法 兰										密 封 槽				螺 栓			
公称通径 D_N	d_0	S	ϕH	M	ϕB	c		ϕD_2	g	ϕr	f	ϕd_2		h		b		ϕ	n
						基本尺寸	公差					基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差		
10	14	2.0	55	8	40	6.6					1	17						6	4
16	20	2.0	60	8	45	6.6				0.6	2	22						6	4
20	25	2.5	65	8	50	6.6						24						6	4
25	30	2.5	70	8	55	6.6						29						6	4
32	38	2.5	90	8	70	9.0		—	—		1.0	36	+0.2 0					8	4
40	45	2.5	100	12	80	9.0						44						8	4
50	57	3.5	110	12	90	9.0						55						8	4
63	70	3.5	130	12	110	9.0					3	68	+0.5 0					8	4
80	89	4.0	145	12	125	9.0						85						8	8

(续)

接 管		法 兰										密 封 槽				螺 栓												
公称通径 D_N	d_0	S	ϕH	M	ϕB	c		ϕD_2	g	ϕx	f	ϕd_2		h		b		ϕ	n									
						基本尺寸	公差					基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差											
100	108	4.0	165	12	145	9.0	+0.22 0	—	—	1.0	4	105	+0.5 0	2.6	4	4		8	8									
125	133	4.0	200	16	175	11.0	+0.27 0	233	1.0			5						6	130	+0.1 0	6	6	6	10	8			
160	170	4.0	225	16	200	11.0													282					1.0	6	8	10	165
200	208	4.0	285	16	260	11.0				352	1.0		2.0	8	12	208	+2.5 0											9.0
250	258	4.0	335	16	310	11.0		440	1.5			2.5				16		20		258	+3.0 0	12.0	18					
320	330	5.0	425	20	395	14.0													540	2.0				2.5	20	20	328	
400	410	5.0	510	20	480	14.0	675			2.5	2.5		20	20	410		+0.33 0										13.0	20
500	510	5.0	610	20	580	14.0		855	2.0			2.5			20	20		510			+0.33 0	13.0	20					
630	642	6.0	750	24	720	14.0												1060	2.0	2.5				20	20	640		
800	816	8.0	920	24	890	14.0	1340			2.0	2.5		20	20			815									+0.33 0	13.0	20
1000	1020	10.0	1120	26	1090	14.0		1705	2.0			2.5			20	20	1015				+0.33 0	13.0	20					
1250	1274	12.0	1440	28	1404	19.0											1920	2.0	2.5	20				20	1280			
1600	1628	14.0	1800	30	1760	23.0	2140			2.0	2.5		20	20											1630	+0.33 0	13.0	20
1800	1832	16.0	1990	34	1947	27.0		2210	2.0			2.5			20	20					1840	+0.33 0	13.0		20			
2000	2036	18.0	2254	36	2210	27.0											2210	2.0	2.5	20	20			2040				

(单位:mm)

表 6-38 真空活套法兰尺寸



法 兰

法 兰																		
公称通径 D_N	接管①		d_0	S	U		L		W	R		P		密 封 槽				f
	基本尺寸	公差			基本尺寸	公差	基本尺寸	公差		基本尺寸	公差	d_1		h		b		
												基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	
10	14	2.0	30	0	6	± 0.45	28	1.0	$+0.180$ $+0.140$	3.0	$+0.25$ 0	17	$+0.2$ 0	2.4	$+0.1$ 0	4	$+0.1$ 0	1
16	20		35				33					22						
20	25	40	38	24			2											
25	30	45	43	29														
32	38	55	53	36														
40	45	65	62	44			3											
50	57	75	72	55	$+0.30$ 0	5.0		$+0.5$ 0	85									
63	70	95	92	68														
80	89	110	107	85														

(续)

法 兰																							
公称通径 D_N	接管 ^①		U		L		W	R		P		密 封 槽				f							
	d_0	S	U		L		W	R		P		d_1		h			b						
			基本尺寸	公差	基本尺寸	公差		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差		基本尺寸	公差					
100	108	4.0	130	0 -0.25	10	± 0.55	125	1.5	+0.180 +0.140	5.0	+0.30	105	+0.5 0	2.4	+0.1 0	4	4	4					
125	133		150				2.5	208				258							328	410	4.8	510	642
160	170		175					235				285											
200	208	5.0	240	0 -0.29	15	± 0.55	442	4.0	7.5	+0.36 0	328	+1.5 0	4.8	+0.1 0	8	6	5	6					
250	258		290																285	365	442	542	680
320	330		370																442	542	680		
400	415	6.0	450	0 -0.40	20	± 0.55	442	4.0	7.5	+0.36 0	328	+1.5 0	4.8	+0.1 0	8	6	5	6					
500	510		550																442	542	680		
630	642		690																442	542	680		

注:①采用其它接管时,其实际通径应等于或稍大于公称通径

注:①采用其它接管时,其实际通径应等于或稍大于公称通径

(单位: mm)

表 6-39 活套法兰套环尺寸

法 兰 套 环												螺 栓			
公称通径 D_N	ϕH	M		ϕB	ϕV		ϕT		R		K	ϕr	ϕ		n
		基本尺寸	公差		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差			基本尺寸	公差	
10	55	8		40	32.1	+0.62 0	30.1	+0.16 0	1.0		2	0.6	6.6	3.0	6
16	60	8		45	37.1		35.1								
20	65	8		50	42.1		40.1								
25	70	8		55	47.1		45.1								
32	90	8	± 0.55	70	57.5	+0.74 0	55.5	+0.19 0	1.5	+0.180 +0.140	3	1.0	9.0	5.5	8
40	100	12		80	68.5		65.5								
50	110	12		90	78.5		75.5								
63	130	12		110	98.5		95.5								
80	145	12		125	113.5	+1.00 0	110.5	+0.25 0	2.5		5	1.0	11.0	6.5	10
100	165	12		145	133.5		130.5								
125	200	16		175	160.7		155.7								
160	225	16		200	185.7		180.7								
200	285	16	± 0.65	260	245.7	+1.30 0	240.7	+0.29 0	4.5	+0.188 +0.140	8	2.0	14.0	8.5	12
250	335	16		310	295.7		290.7								
320	425	20		395	375.8		370.8								
400	510	20		480	458.8		450.8								
500	610	20		580	558.8	+1.75 0	550.8	+0.44 0	5	+0.196 +0.140	10	2.0	10.0	10.0	16
630	610	24		720	701		691.0								

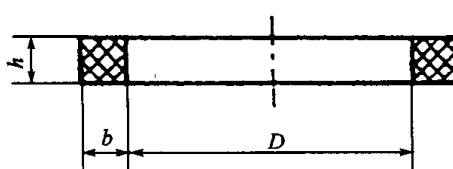
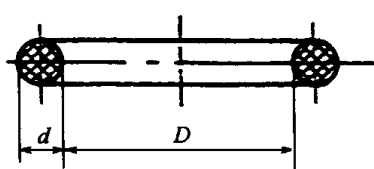
Technical drawing of a flange sleeve. The drawing shows a cross-section of the sleeve with various dimensions and labels. Key dimensions include: M (total length), R (radius of the flange), ϕV (flange outer diameter), ϕT (flange inner diameter), ϕB (sleeve outer diameter), ϕH (sleeve inner diameter), and ϕ (thread diameter). Labels include: 挡圈 (locking ring), 其余 (the rest), 12.5 (thread pitch), $n-\phi$ (number of threads), ϕ (thread diameter), and A (section line).

⑤真空法兰用橡胶密封圈形状应符合表 6-40 的规定。密封圈的断面高度或直径的不均匀性,应在公差范围内。

橡胶材料在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 使用时应满足下列要求:硬度(HS):40~60;抗油强度:中等;放气速率小于 $5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

橡胶密封圈内、外定位圈见附录 B(补充件)、附录 C(补充件)。

表 6-40 固定真空法兰用橡胶密封圈尺寸

														
公称通径 D_N	内径 D		矩 形		圆形 d	公称通径 D_N	内径 D		矩 形		圆形 d			
	尺寸	公差	b	h			尺寸	公差	b	H				
10	17	$+0.2$ 0	4 ± 0.10	4 ± 0.10	4 ± 0.10	200	205	$+2$ 0	6 ± 0.15	6 ± 0.15	6 ± 0.15			
16	22					250	255							
20	24					320	325	$+3$ 0	7 ± 0.20	8 ± 0.20	8 ± 0.20			
25	29	400				405								
32	36	500				505								
40	44	$+0.5$ 0				4 ± 0.10	4 ± 0.10	4 ± 0.10	630	635	$+5$ 0	8 ± 0.20	10 ± 0.30	10 ± 0.30
50	55								800	805				
63	67								1000	1005				
80	84	1250							1260	12 ± 0.50		14 ± 0.40	14 ± 0.40	
100	104	1600							1620					
125	129	1800							1830	16 ± 0.50		18 ± 0.40	18 ± 0.40	
160	165	2000							2030					
		$+1.0$ 0							4 ± 0.10	4 ± 0.10	4 ± 0.10			18 ± 1.00

注:仅限开槽法兰用

⑥附录 A 法兰线密封载荷(参考件)。

在使用条件下,法兰的线密封载荷为 δ 值(如图 6-30 所示和见表 6-41)

$$\delta = \frac{200nS}{\pi(d_1 + d_2)} \quad (6-8)$$

式中 δ —— n 个螺栓以 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 应力均布施压在胶圈上的线密封载荷 $[\text{N}/\text{mm}]$;

n ——螺栓数目;

S ——螺栓截面 $[\text{mm}^2]$;

d_1 ——密封圈内径 $[\text{mm}]$;

d_2 ——压缩前密封圈断面直径 $[\text{mm}]$ 。

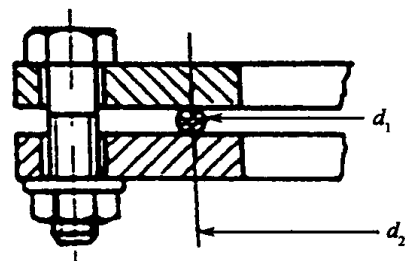


图 6-30 密封圈断面示意图

表 6-41 法兰线密封载荷

公称通径 /mm	标准值 /N·mm ⁻¹	公称通径 /mm	标准值 /N·mm ⁻¹	公称通径 /mm	标准值 /N·mm ⁻¹
10	343	80	291	500	224
16	277	100	237	630	224
20	257	125	301	800	212
25	218	160	232	1000	227
32	320	200	284	1250	362
40	267	250	230	1600	537
50	217	320	257	1800	747
63	180	400	280	2000	730

⑦附录 B 平面真空法兰橡胶密封圈内定位圈(补充件)。

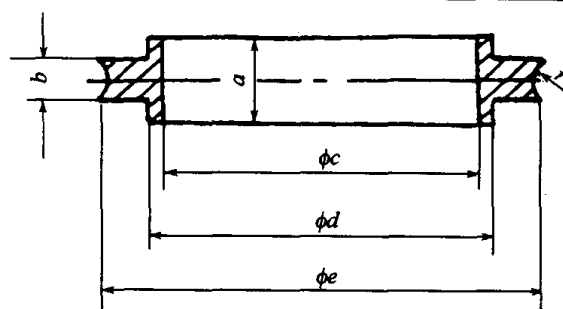
内定位圈的几何形状及尺寸见表 6-42。

内定位圈材料选用硬聚氯乙烯,放气速率小于 $5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$ 。

内定位圈可加工成长条,用粘接剂粘合成规定尺寸。

表 6-42 平面法兰橡胶密封内定位圈

(单位:mm)

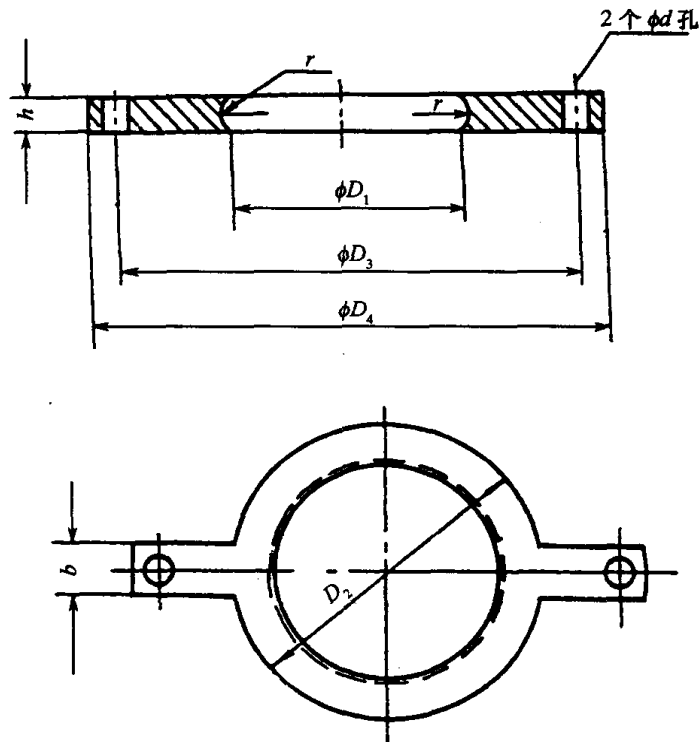


公称通径	a	b	c	d	e	r
200	24	4.2	197	200	210	3
250			247	250	250	
320	36	5.6	316	320	332	4
400			396	400	412	
500			496	500	512	
630	47	7.0	626	630	642	5
800			796	800	813	
1 000			996	1 000	1 013	
1 250	59	9.0	1 246	1 250	1 284	7
1 600	62	12.6	1 596	1 600	1 634	9
1 800	64	14	1 796	1 800	1 845	10
2 000			1 996	2 000	2 045	

⑧附录 C 平面真空法兰用橡胶密封圈外定位圈(补充件)。
外定位圈的几何形状及尺寸见表 6-43。

表 6-43 平面法兰橡胶密封外定位圈

(单位:mm)



公称通径	D_1	D_2	D_3	D_4	h	d	b	r
10	23	32	40	55	2.8	6.6	12	2
16	28	36	45	60				
20	30	38	50	65				
25	35	45	55	70				
32	42	52	70	90		9	15	
40	50	60	80	100				
50	61	71	90	110				
63	74	84	110	130				
80	91	102	125	145				
100	111	122	145	165				
123	136	148	175	200		11	20	
160	171	184	200	225				

外定位圈材料选用硬聚氯乙烯,放气速率小于 $5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

外定位圈可整体压制也可加工成长条按尺寸粘合。

(2) 氟橡胶密封超高真空法兰规范(摘自 QJ2695—97)

本标准规定了氟橡胶密封超高真空法兰(以下简称法兰)的技术要求、质量保证规定。

本标准适用于各类超高真空装置及管路连接用不锈钢法兰的设计、制造。

法兰结构形式和尺寸按图 6-31、图 6-32 和表 6-44、表 6-45 的规定。

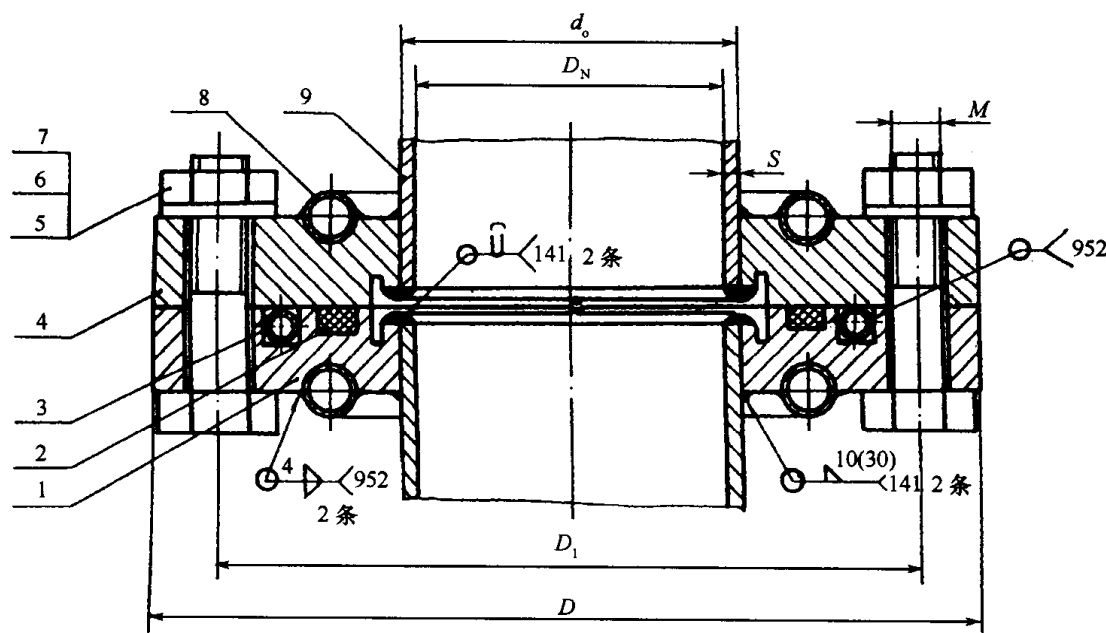


图 6-31 氟橡胶密封的超高真空法兰连接图

1—下法兰；2—氟橡胶密封圈；3—冷冻管；4—上法兰；5—六角螺母(GB52-86)；

6—螺栓(GB 30-86)；7—垫圈(GB 93-86)；8—冷水管；9—管道。

表 6-44 法兰螺栓孔数目与 α 角的关系

螺栓孔数目 n	6	8	12	16	20	24
α	60°	45°	30°	$22^\circ 30'$	18°	15°

①标记示例。公称通径 D_N 为 50mm 法兰的标记为：

法兰 FC-DN50 QJ 2965—97

②法兰及密封件：

a. 法兰的原材料均应附有质量证明文件。

b. 法兰组件及钎焊材料按表 6-46 的规定。

c. 氟橡胶密封圈的材料应符合 HG2—530 中牌号 26—41 的规定。

③加工要求：

a. 法兰和管道一般应采用双面焊接(当 $D_N < 400\text{mm}$ 时,外焊缝可不焊),其中真空侧的内焊缝采用连续钨极氩弧焊,外焊缝采用断续焊。

b. 水冷管和冷冻管与法兰之间采用锡铅焊料钎焊。冷冻管焊后铲平。

c. 法兰的螺栓孔中心圆直径的极限偏差及相邻两孔间弧长的极限偏差均为螺栓与螺栓孔间隙的 $\pm 1/4$ 。

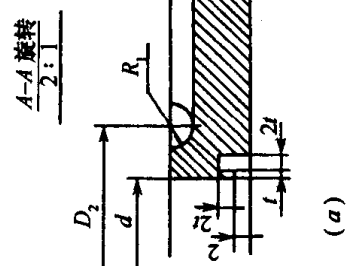
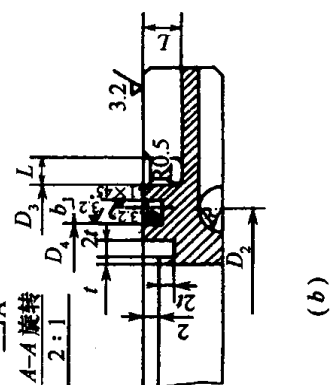
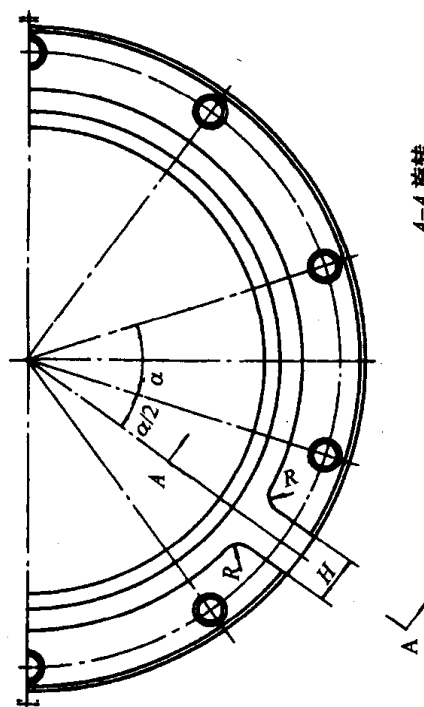
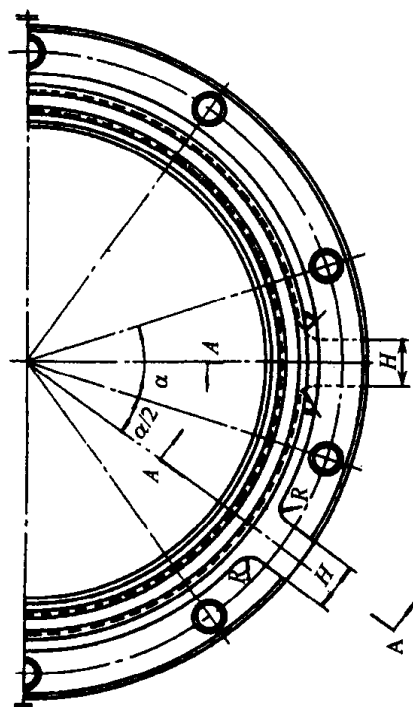
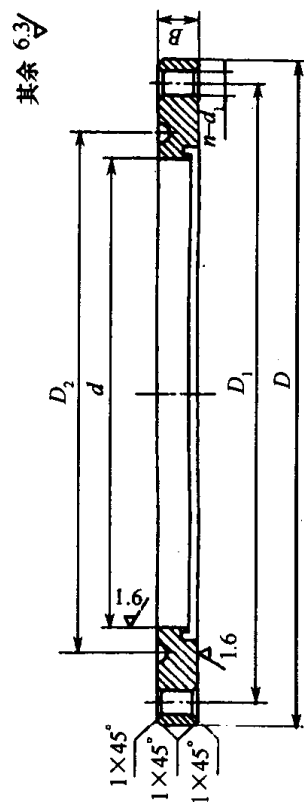
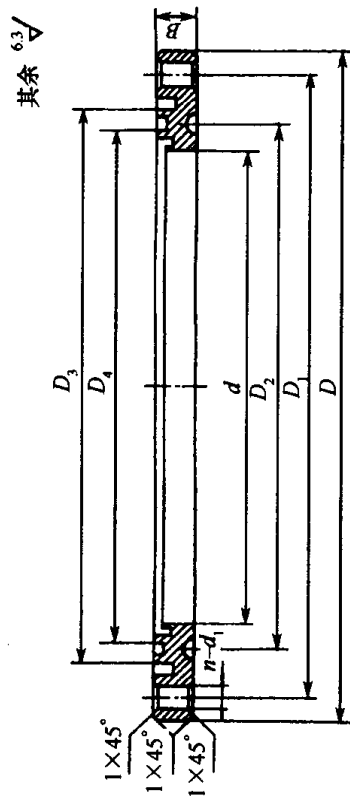


图 6-32 氟橡胶密封超高真空
(a) 上法兰; (b) 下法兰。

(单位:mm)

表 6-45 氟橡胶密封超高真空法兰尺寸

管子		法 兰														螺栓																							
公 称 通 径 D_N	外 径 d_0	壁 厚 S	内 径 d	厚 度 B	螺 栓 孔 中 心 直 径 D_1	螺 栓 孔 直 径 d_1	焊 接 区 宽 度 t	水 冷 槽		冷 冻 槽		冷 冻 槽 及 水 冷 槽 出 口		密 封 槽						螺 纹 M	数 量 n																		
								中 心 圆 直 径 D_2	半 径 R_1	内 径 D_3	宽 深 度 L	宽 度 H	半 径 R	内 径 D_4	槽 宽 b		槽 深 c		倒 角 f			内 圆 角 r																	
															基 本 尺 寸	极 限 偏 差	基 本 尺 寸	极 限 偏 差					基 本 尺 寸	极 限 偏 差															
50	54	2	130	54	112	9	2	74	3	86	7	16	8	70	+0.2 0	5.3					0.5	0.5	8	6															
63	68	2.5	150	68	133	12	2	90	3	100	7	20	12	84	+0.5 0	3	4.5	+0.1 0	1	1	10	8	12	16															
80	85		148	120	105			105		105				105											105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
100	105		170	137	122			122		122				122											122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
125	130	3	220	130	195	14	2	152	6	163	11	36	20	148	+1.0 0	8	+0.1 0	1	1	10	8	12	16	8															
160	166		244	206	184			224		274				344											424	530	664	838	1040										
200	206		285	206	224			274		344				424											530	664	838	1040											
250	256	4	370	256	340	18	3	356	6	374	11	38	20	344	+1.5 0	12	+0.1 0	1	1	10	8	12	16	20															
320	326		414	206	274			344		424				530											664	838	1040												
400	406		500	206	274			344		424				530											664	838	1040												
500	508	5	646	508	610	20	3	538	6	560	13	42	20	530	+2.0 0	14.5	+0.1 0	1	1	10	8	12	16	20															
630	638		746	24	676			700		876				1078																									
800	810		935	26	848			876		1078																													
1000	1012	6	1180	1012	1135	22	3	1050	7	1078	13	42	20	1040	+2.0 0	14.5	+0.1 0	1	1	20	20	24	24																

二、静密封

表 6-46 法兰组件及钎焊材料

序 号	零件名称 及选用标准	材 料		
		牌 号	种 类	选 用 标 准
1	下法兰	1Cr18Ni9Ti	圆钢、钢板	GB 702、GB 4237
2	冷冻管	紫铜	管材	GB 1527
3	上法兰	1Cr18Ni9Ti	圆钢、钢板	GB 702、GB 4237
4	螺母 GB 6170	1Cr18Ni9Ti	圆钢或型材	GB 702、GB 905、GB 1221
5	螺栓 GB 5782	1Cr18Ni9Ti	圆钢或型材	GB 702、GB 905、GB 1221
6	垫圈 GB 97.2	1Cr18Ni9Ti	圆钢	GB 702、GB 905、GB 1221
7	水冷管	紫铜	管材	GB 1527
8	管道	1Cr18Ni9Ti	无缝钢管、钢板	GB 2270、GB 4237
9	锡铅焊料	—	—	GB 3131

d. 法兰各零件的未注公差应符合 GB/T 1804 中 m 级的规定。

e. 法兰密封面和密封槽一般在焊接后精加工。密封面和密封槽表面应光滑,不得有气孔、裂纹、斑点、毛刺、锈迹及其它降低强度和密封性能的缺陷。

f. 法兰焊接前,零、部件应除油清洗,并吹干。

g. 焊接部位要清洗,并除油污。焊缝应平整、光滑、无气孔、裂纹和毛刺。焊后应进行检漏。

h. 氟橡胶密封圈应符合 GB 6070.5 的规定,本规范所用氟橡胶密封圈的规格见附录 A(补充件)。

i. 法兰外观应无毛刺、锈蚀、划伤和焊渣等缺陷。

(3)附录 A 氟橡胶密封圈(补充件)

氟橡胶密封圈的形式与尺寸见表 6-47。

表 6-47 氟橡胶密封圈尺寸

(单位:mm)

The diagram illustrates an O-ring, a common type of mechanical seal. It is shown in a side view with a dashed centerline. The inner diameter is labeled D_5 with a dimension line. The cross-section diameter is labeled d_2 with a dimension line across the width of the ring.

公称直径

D_N

密封圈内径 D_5

基本尺寸

极限偏差

截面直径

d_2

50

69

+0.05
0

4 ± 0.10

63

83

80

104

100

121

125

147

+1.0
0

160

183

200

223

250

273

6 ± 0.15

320

343

400

422

10 ± 0.2

500

528

+2.0
0

630

662

800

836

12 ± 0.3

1000

1038

(3) 双重橡胶密封法兰

橡胶的出气和渗漏会影响超高真空的获得,通常采用双重橡胶密封法兰来消除这些影响。图 6-33 双重橡胶密封法兰的冷却管中通冷冻剂来冷冻橡胶,以降低橡胶材料的出气率;双重橡胶圈中间可以抽真空,以减少渗漏的影响,如图 6-34 所示。

橡胶温度对真空度的影响见表 6-48。

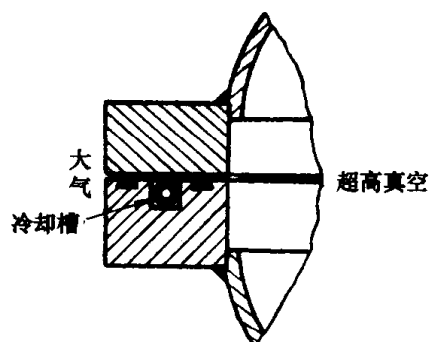


图 6-33 带冷却槽的双重橡胶圈密封法兰

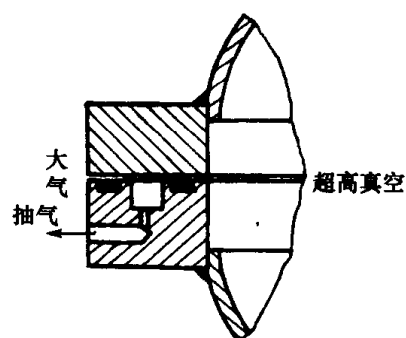


图 6-34 中间抽气的双重橡胶圈密封法兰

表 6-48 橡胶温度对获得真空度的影响

橡胶种类	法兰温度 6℃			法兰温度 -25℃		
	获得的平均最低压力 /Pa	试验 次数	压力范围 /Pa	获得的平均最低压力 /Pa	试验 次数	压力范围 /Pa
异丁烯橡胶	1.3×10^{-7}	5	$1.1 \sim 1.6 \times 10^{-7}$	2.3×10^{-8}	2	$2 \sim 2.7 \times 10^{-8}$
天然橡胶	6.0×10^{-7}	2	$5.3 \sim 6.7 \times 10^{-7}$	1.6×10^{-7}	2	$1.3 \sim 1.9 \times 10^{-7}$
氟丁橡胶	2.8×10^{-7}	6	$2.7 \sim 3.2 \times 10^{-7}$	2.8×10^{-8}	2	$2.7 \sim 2.9 \times 10^{-8}$
布纳-N	5.1×10^{-7}	4	$4.8 \sim 5.3 \times 10^{-7}$	6.4×10^{-8}	2	$6.1 \sim 6.7 \times 10^{-8}$
硅橡胶(红)	2.9×10^{-5}	2	$2.8 \sim 3.1 \times 10^{-5}$	—		—
硅橡胶(绿)	4.3×10^{-5}	2	$3.2 \sim 5.3 \times 10^{-5}$	—		—
氟橡胶 A	1.7×10^{-7}	3	$1.6 \sim 1.9 \times 10^{-7}$	7.5×10^{-8}	2	$7.3 \sim 7.6 \times 10^{-8}$
聚四氟乙烯	5.6×10^{-7}	4	$5.3 \sim 5.9 \times 10^{-7}$	1.3×10^{-7}	2	$1.2 \sim 1.5 \times 10^{-7}$

(4) 夹紧型真空快卸法兰 $\left(\begin{matrix} \text{GB4982—85} \\ \text{ISO2861/1—74} \end{matrix} \right)$

本标准适用于低、中、高真空管路,其公称通径为 10mm~40mm,用 O 形橡胶密封圈的夹紧型真空快卸法兰。

① 夹紧型真空快卸法兰结构型式及通径按图 6-35 及表 6-49 规定。

表 6-49 夹紧型真空快卸法兰通径

(单位:mm)

公称通径 D_N	10	16	25	40
------------	----	----	----	----

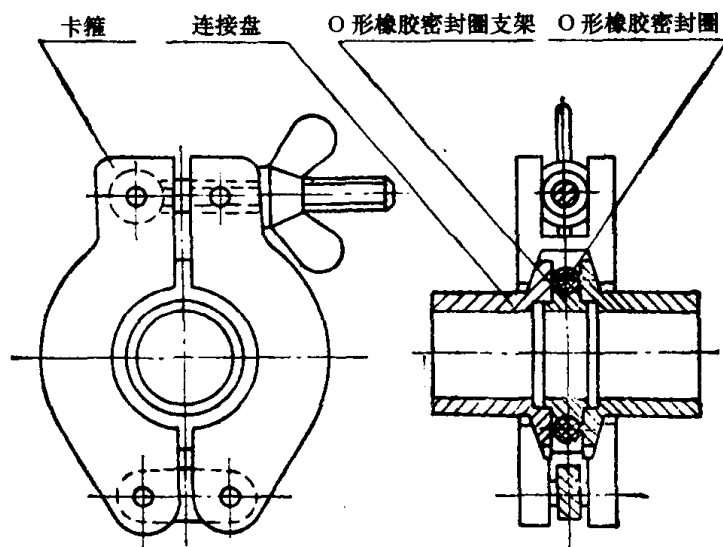


图 6-35 夹紧型真空快卸法兰结构型式

②夹紧型真空快卸法兰公称通径标记方法：

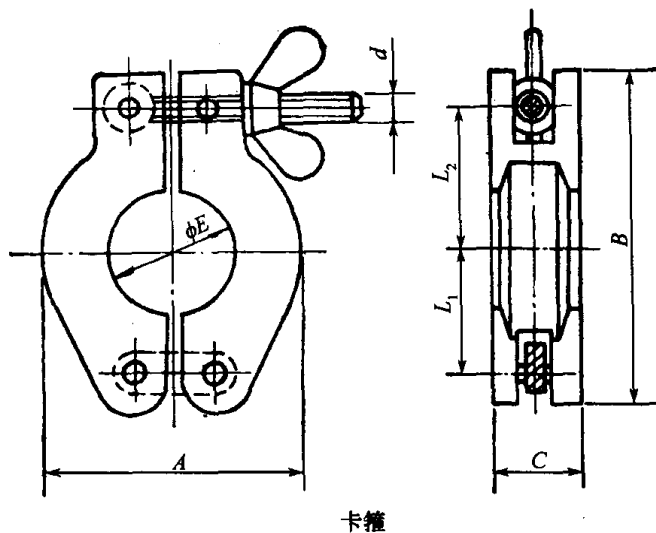
例：公称通径为 25mm 的夹紧型真空快卸法兰标记为

夹紧型 D_N25

③卡箍型式及尺寸系列按表 6-50 规定。卡箍材料推荐采用铸铝 ZL7。

表 6-50 卡箍尺寸

(单位:mm)

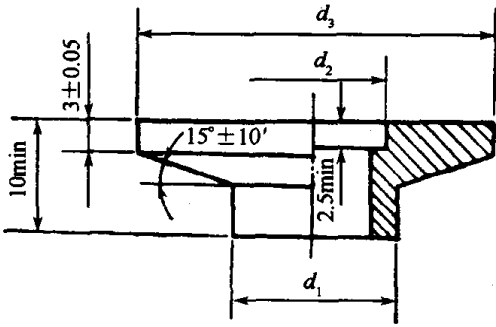


公称通径 D_N	A	B	C	E	L_1	L_2	d
10	45	61	16	22	21.5	27.5	M5
16	45	61	16	22	21.5	27.5	M5
25	55	72	16	32	26.5	33.5	M5
40	70	90	18	47	34.0	44.0	M5

④连接盘型式及尺寸系列按表 6-51 规定。

表 6-51 连接盘尺寸

(单位:mm)

					
公称通径 D_N	d_{1max}	d_2		d_3	
		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差
10	14.0	12.2	+0.2 0	30.0	0 -0.084
16	20.0	17.2		30.0	0 -0.084
25	28.0	26.2		40.0	0 -0.100
40	44.5	41.2		55.0	0 -0.120

连接盘材料推荐采用 A3、A20、A25 或 1Cr18Ni9Ti。若采用 A3、A20、A25 时,则表面需要镀镍。连接盘的密封面粗糙度为 $R_a 2.0$,不得有明显的径向凹沟和刻痕。

⑤O 形橡胶密封圈支架型式及尺寸系列按表 6-52 规定。

表 6-52 O 形橡胶密封圈支架尺寸

(单位:mm)

公称通径 D_N	d_{4max}	d_5		d_6	
		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差
10	10	12.0	0 -0.1	15.3	0 -0.1
16	16	17.0		18.5	
25	25	26.0		28.5	
40	40	41.0		43.0	

O 形橡胶密封圈支架材料推荐采用 A3、A20、A25、1Cr18Ni9Ti 或铝合金。若采用 A3、A20、A25 时,则表面需要镀镍。

⑥O 形橡胶密封圈型式及尺寸系列按表 6-53 规定。

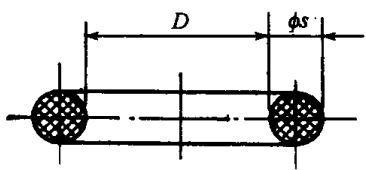
O 形橡胶密封圈材料推荐采用丁腈橡胶或氟橡胶等。

O 形橡胶密封圈材料性能必须满足以下要求:

工作温度范围: $-30^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$;

表 6-53 O 形橡胶密封圈尺寸

(单位:mm)

	公称通径 D_N	D	s
	10	15	5
	16	18	5
	25	28	5
	40	42	5

抗油强度:中等;

硬度(HS):40~60;

出气率小于 $1.33\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ 。

O形橡胶密封圈工作表面不准有气孔、裂纹和杂质等。

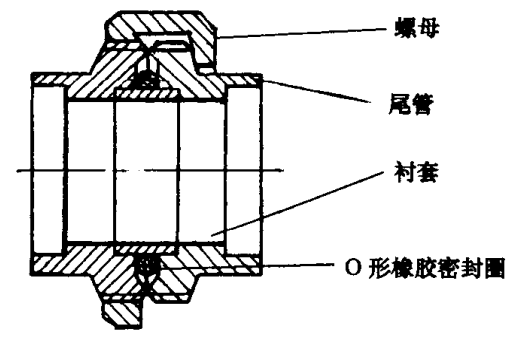
(5)拧紧型真空快卸法兰(GB4983—85)

本标准适用于低、中、高真空管路,其公称通径为 10mm~40mm,用 O 形橡胶密封圈密封的拧紧型真空快卸法兰。

①拧紧型真空快卸法兰结构型式及通径按表 6-54 规定。

表 6-54 拧紧型真空快卸法兰通径

(单位:mm)

				
公称通径 D_N	10	16	25	40

②拧紧型真空快卸法兰公称通径标记方法:

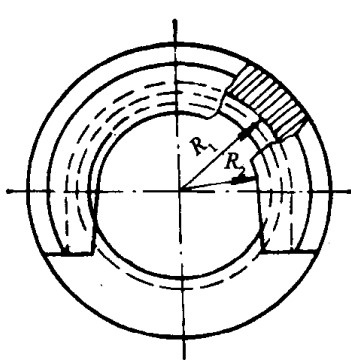
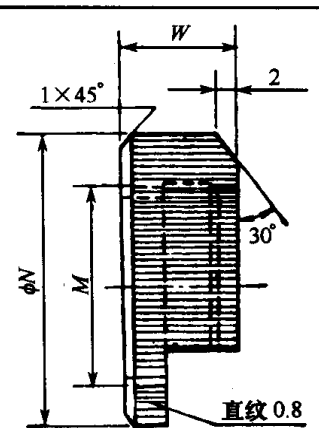
例:公称通径为 25mm 的拧紧型真空快卸法兰标记为拧紧型 D_N25

③螺母型式、尺寸及材料[推荐采用 20,1Cr18Ni9Ti, 铝合金或硬塑料 ABS(黑色)等]。

a. 螺母采用金属材料制造时,其结构型式及尺寸按表 6-55 规定。

表 6-55 金属材料螺母尺寸

(单位:mm)

	
---	--

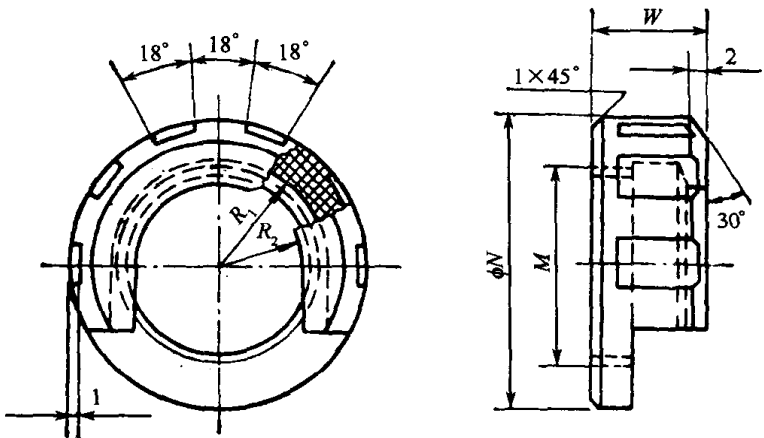
(续)

公称通径 D_N	R_1		R_2		N	M	W
	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差			
10	17.0	+0.260 +0.150	12.0	+0.260 +0.150	40	25.4 (G1—2)	18
16	17.0	+0.260 +0.150	12.0	+0.260 +0.150	40	25.4 (G1—2)	18
25	21.0	+0.290 +0.160	17.5	+0.260 +0.150	50	31.75 (G1 1/4—2)	19
40	30.0	+0.290 +0.160	24.0	+0.290 +0.160	70	50.8 (G2—2)	19

b. 螺母采用硬塑料 ABS 材料制造时,其结构型式及尺寸按表 6-56 规定。

表 6-56 ABS 材料螺母尺寸

(单位:mm)

							
公称通径 D_N	R_1		R_2		N	M	W
	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差			
10	17.0	+0.260 +0.150	12.0	+0.260 +0.150	44.0	25.4 (G1—2)	18
16	17.0	+0.260 +0.150	12.0	+0.260 +0.150	44.0	25.4 (G1—2)	18
25	21.0	+0.290 +0.160	17.5	+0.260 +0.150	56.0	31.75 (G1 1/4—2)	19
40	30.0	+0.290 +0.160	24.0	+0.290 +0.160	74.5	50.8 (G2—2)	19

④尾管型式及尺寸按表 6-57 规定。

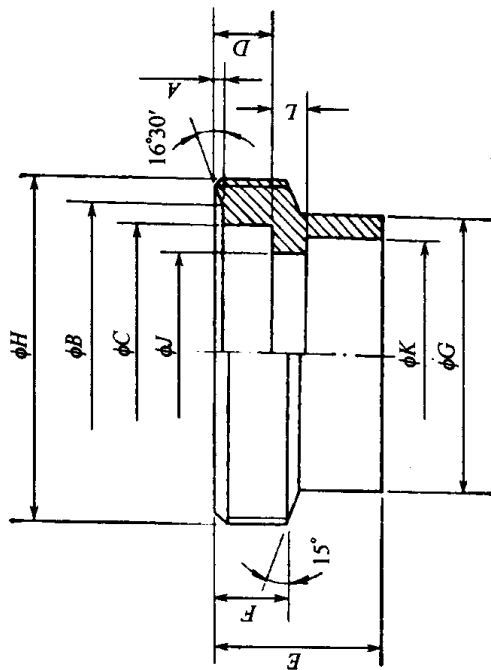
尾管材料推荐采用 A3、A20、A25 或 1Cr18Ni9Ti。若采用 A3、A20、A25 材料时,则表面需要镀镍。

尾管密封面粗糙度为 Ra2.0,不得有明显的径向凹沟和刻痕。

⑤衬套型式及尺寸按表 6-58 规定。

表 6-57 尾管尺寸

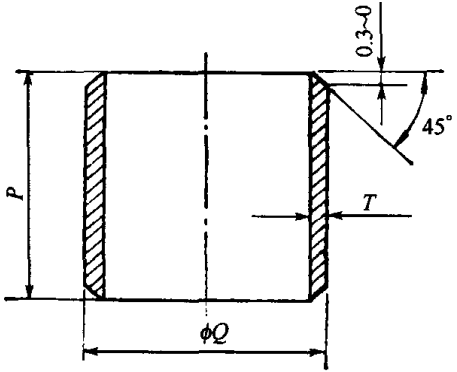
(单位:mm)



公称通径 D_N	A		B		C		D	E_{\min}	F	G_{\max}	H	J	K		L	导管 外径 ^①
	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差							基本 尺寸	公差		
10	0.90	0 -0.060	17.5	± 0.135	15.0	+0.260 +0.150	6	16	7.5	18	25.4 (G1-2)	13	14.0	+0.260 +0.150	4	14.0
16	0.90	0 -0.060	22.5	± 0.165	20.0	+0.290 +0.160	6	16	7.5	23	25.4 (G1-2)	18	20.0	+0.290 +0.160	4	20.0
25	1.15	0 -0.060	31.0	± 0.195	28.0	+0.290 +0.160	6	19	7.5	32	31.75 (G1 1/4-2)	26	28.0	+0.290 +0.160	7	28.0
40	1.15	0 -0.060	46.0	± 0.195	42.5	+0.340 +0.180	6	22	7.5	46	25.4 (G1-2)	40	42.5	+0.340 +0.180	10	42.0

注:①导管外径仅供参考

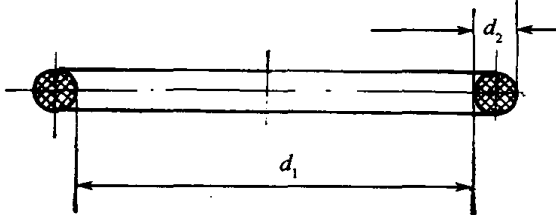
表 6-58 衬套尺寸 (单位:mm)

	公称通径 D_N	P	Q		T_{min}
			基本尺寸	公差	
	10	11.0	14.9	± 0.0055	0.50
	16	11.0	19.9	± 0.0065	0.75
	25	11.0	27.9	± 0.0065	0.75
	40	11.0	41.9	± 0.0080	1.00

衬套材料推荐采用硬铝 Ly11 或 1Cr18Ni9Ti。

⑥O 形橡胶密封圈型式及尺寸按表 6-59 规定。

表 6-59 O 形橡胶密封圈尺寸 (单位:mm)

	公称通径 D_N	d_1	d_2
	10	14.6	2.4
	16	19.6	2.4
	25	27.5	3.0
	40	41.5	3.0

O 形橡胶密封圈材料推荐采用丁腈橡胶或氟橡胶等。

O 形橡胶密封圈的材料性能必须满足以下要求：

工作温度范围： $-30^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ ；

硬度：HS40~60；

抗油强度：中等；

出气率小于 $1.33/\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ 。

O 形橡胶密封圈工作表面不准有气孔、裂纹和杂质等。

⑦附录 A （参考件）

同一公称通径的拧紧型真空快卸法兰尾管可以直接连接夹紧型真空快卸法兰连接盘上。

拧紧型与夹紧型组合的真空快卸法兰的装配如图 6-36 所示。

(6)卡钳法兰(选自北京北仪创新真空技术有限责任公司厂标 0309-83 卡钳螺钉连接)

卡钳法兰采用橡胶密封,用于真空管路连接。

本标准所列零部件的公称通径和主要连接尺寸完全符合 ISO/DIS,可与国际上的通用互换。

①卡钳法兰连接型式。卡钳法兰连接有三种型式:图 6-37 为卡钳垫块连接;图 6-38 为卡钳螺钉连接;图 6-39 为卡钳活螺栓连接。

②卡钳法兰零件尺寸:

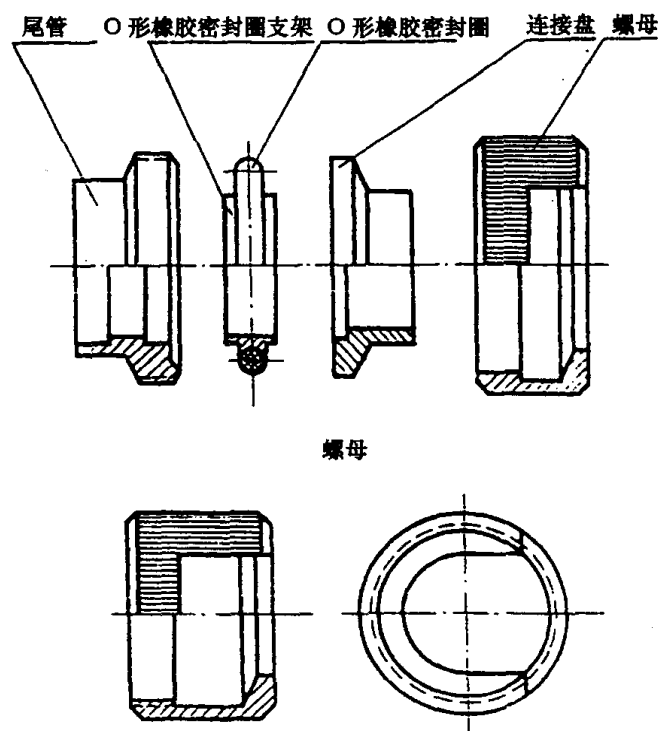


图 6-36 拧紧型真空快卸法兰装配示意图

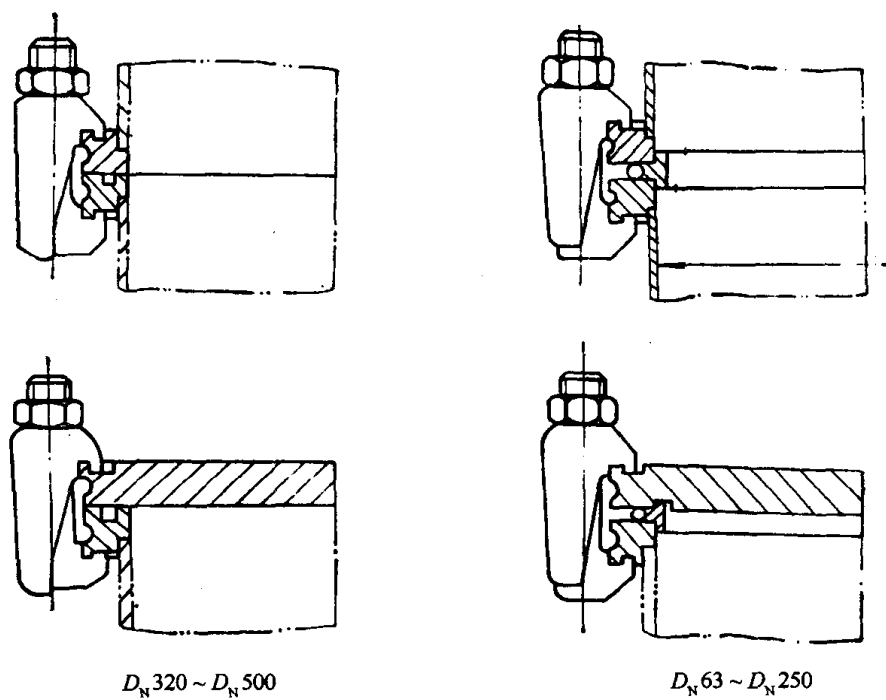


图 6-37 卡钳垫块连接

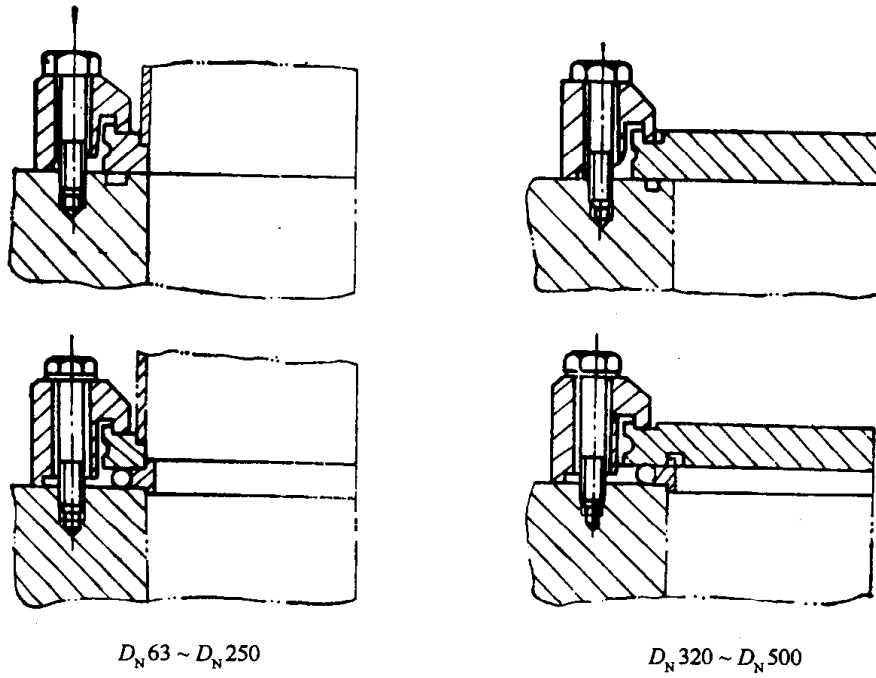


图 6-38 卡钳螺钉连接

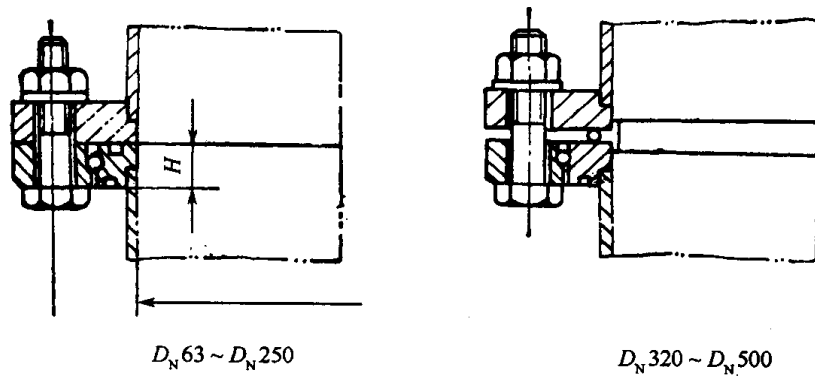


图 6-39 卡钳活螺栓连接

a. I 型肩圈尺寸见表 6-60。

表 6-60 卡钳法兰肩圈尺寸

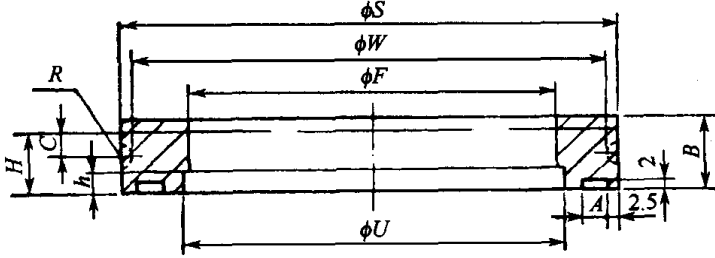
(单位:mm)

公称通径 D_N	F	S	$U(H10)$	H	h
63	70	95	73	12	3
100	102	130	107	12	3
160	153	180	157	12	3

b. II型肩圈尺寸见表 6-61。

表 6-61 II型肩圈尺寸

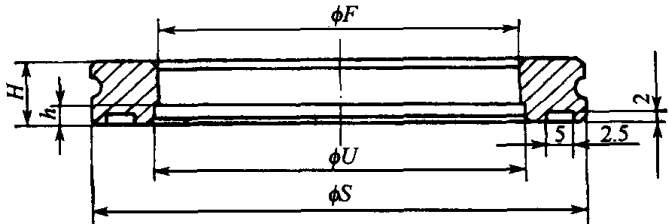
(单位:mm)

										
公称通径 D_N	F	S ($h11$)	U ($H10$)	h	A	B	焊后加工尺寸			
							W	C	R	H
200	213	240	218	4	5	14	235	5	2.5	12
250	261	290	265	4	5	14	285	5	2.5	12
320	318	370	323	6	7	19	365	7.5	2.5	17
400	400	450	405	6	7	19	442	7.5	4	17
500	501	550	507	6	7	19	542	7.5	4	17

c. III型肩圈尺寸见表 6-62。

表 6-62 III型肩圈尺寸

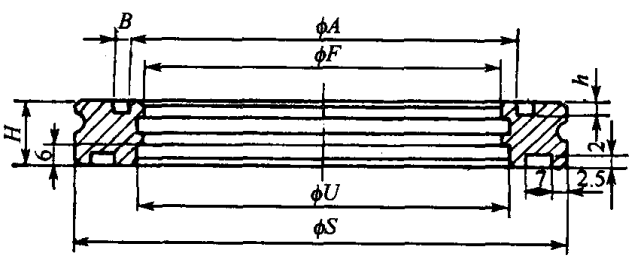
(单位:mm)

					
公称通径 D_N	F	S	$U(H10)$	h	H
63	70	95	73	4	12
100	102	130	107	4	12
160	153	180	157	4	12
200	213	240	235	4	12
250	261	290	265	4	12
320	318	370	323	6	17
400	400	450	405	6	17
500	501	550	507	6	17

d. IV型肩圈尺寸见表 6-63。

表 6-63 IV型肩圈尺寸

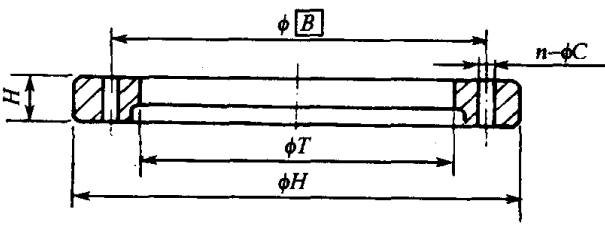
(单位:mm)

							
公称通径 D_N	ϕF	ϕS	$\phi U(H10)$	ϕA	B	h	H
320	318	370	323	328	7	5.2	17
400	400	450	405	408	8	6	17
500	501	550	507	512	8	6	17

e. 活法兰尺寸见表 6-64。

表 6-64 活法兰尺寸

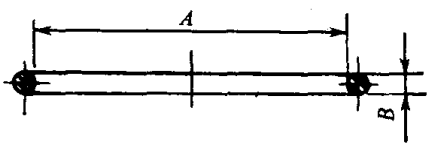
(单位:mm)

						
公称通径 D_N	$T(H11)$	B	n	C	H	H
63	95.5	110	4	9	130	12
100	130.5	145	8	9	165	12
160	180.7	200	8	11	225	16
200	240.7	260	12	11	285	16
250	290.7	310	12	11	335	16
320	370.8	395	12	14	425	20
400	450.8	480	16	14	510	20
500	550.8	580	16	14	610	20

f. 弹性卡圈尺寸见表 6-65。

表 6-65 弹性卡圈尺寸

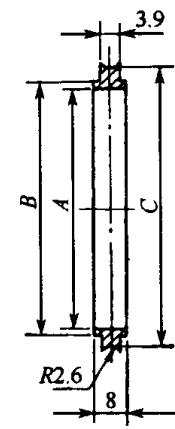
(单位:mm)

								
公称通径 D_N	63	100	160	200	250	320	400	500
A	$\phi 91$	$\phi 126$	$\phi 174$	$\phi 234$	$\phi 284$	$\phi 363$	$\phi 440$	$\phi 540$
B	$\phi 3$	$\phi 3$	$\phi 5$	$\phi 5$	$\phi 5$	$\phi 5$	$\phi 8$	$\phi 8$

g. 中心圈尺寸见表 6-66。

表 6-66 中心圈尺寸

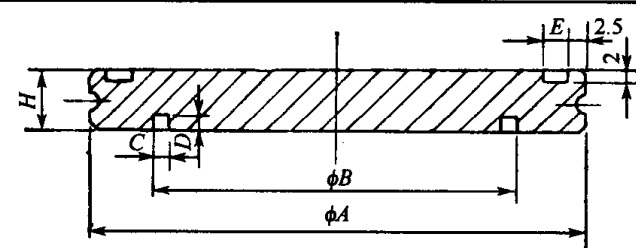
(单位:mm)

					
公称通径 D_N	63	100	160	200	250
A	$\phi 67$	$\phi 99$	$\phi 150$	$\phi 210$	$\phi 258$
B(h11)	$\phi 70$	$\phi 102$	$\phi 153$	$\phi 213$	$\phi 261$
C	$\phi 76$	$\phi 108$	$\phi 159$	$\phi 219$	$\phi 267$

h. 法兰盖尺寸见表 6-67。

表 6-67 法兰盖尺寸

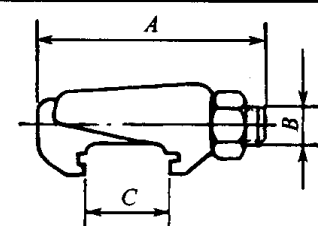
(单位:mm)

								
公称通径 D_N	63	100	160	200	250	320	400	500
ϕA (h11)	95	130	180	240	290	370	450	550
ϕB	70	102	153	213	261	—	—	—
C	3	3	3	3	3	—	—	—
D	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	—	—	—
H	12	12	12	12	12	17	17	17
E	5	5	5	5	5	7	7	7

i. 卡钳螺钉组件尺寸见表 6-68。

表 6-68 卡钳螺钉组件

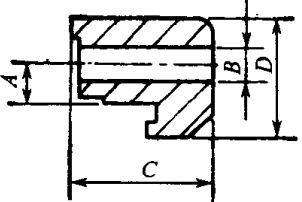
(单位:mm)

			
公称通径 D_N	A	B	C
63~250	60	M10	18~28
320~500	78	M12	28~38

j. 卡钳垫块尺寸见表 6-69。

表 6-69 卡钳垫块

(单位:mm)

	公称通径 D_N	A	B	C	D
	63~100	7.5	$\phi 9$	23	24
	160~250	10	$\phi 11$	26	28
	320	12.5	$\phi 13$	31	32.5
	400~500	15	$\phi 13$	31	35

卡钳法兰 O 形橡胶密封圈见表 6-70。

表 6-70 卡钳法兰配用密封圈规格

(单位:mm)

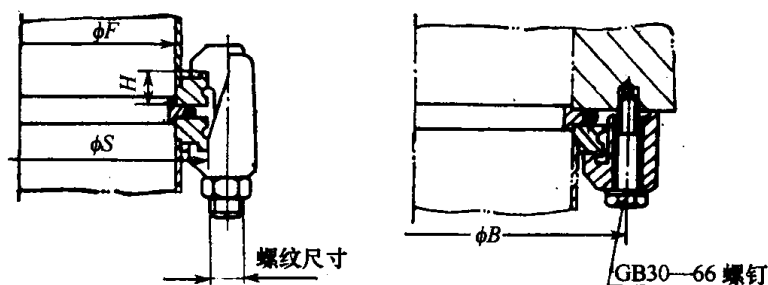
公称通径	63	100	160	200	250	320	400	500
内径	75	105	165	220	270	320	405	505
截面直径	5.5	5.5	5.7	5.7	5.7	7	8	8

③卡钳法兰连接配套:

a. 卡钳螺钉、卡钳垫块连接件配套表见表 6-71。

表 6-71 卡钳螺钉、卡钳垫块连接件配套表

(单位:mm)

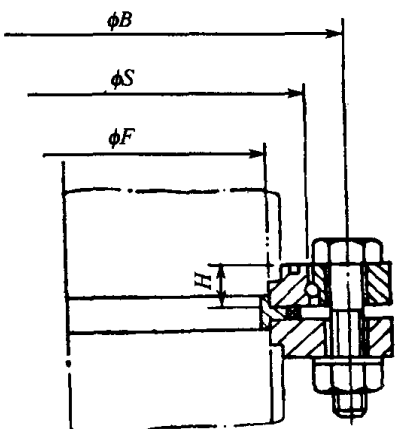


公称通径 D_N	实际通径 ϕF	肩圈直径 ϕS	肩圈厚度 H	卡 钳 钉 型		卡 钳 垫 块 型		
				螺纹尺寸	数量	中心圆直径 (ϕB)	螺钉	数量
63	70	95	12	M10×60	4	110	M8×35	4
100	102	130	12		4	145		8
160	153	180	12		4	200	M10×35	8
200	213	240	12		6	260	M10×40	12
250	261	290	12		6	310		12
320	318	370	17	M12×78	8	395	M12×50	12
400	400	450	17		8	480		16
500	501	550	17		12	580		16

b. 活法兰螺栓型连接件选配表见表 6-72。

表 6-72 活法兰螺栓型连接件选配表

(单位:mm)

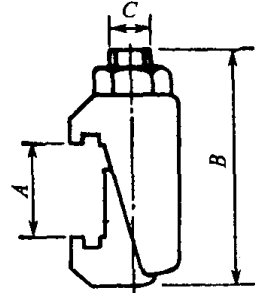
						
公称通径 D_N	实际通径 ϕF	肩圈直径 ϕS	肩圈厚度 H	中心圆直径 ϕB	连接螺钉 GB—30—86	数量
63	70	95	12	110	M8×40	4
100	102	130		145		8
160	153	180		200	M10×50	8
200	213	240		260		12
250	261	290		310		12
320	318	370	17	395	M12×60	12
400	400	450		480		16
500	501	550		580		16

(7) 国产卡钳螺钉组件 TB 2/1 型、TB2/2 型

卡钳螺钉组件,用于二个对称卡钳法兰(符合 ISO1609 国际标准)的连接。连接时,先将 O 形密封圈套在中心圈上,置于卡钳法兰端面用卡钳螺钉组件夹紧;密封可靠,使用方便,适合中小尺寸真空管道配套使用。其结构尺寸见表 6-73。

表 6-73 卡钳螺钉组件

(单位:mm)

	型 号	A	B	C	适用通径
	TB2/1	18~28	60	M10	$\phi 63 \sim \phi 250$
	TB2/2	28~38	78	M12	$\phi 320 \sim \phi 500$
	注:北京北仪创新真空技术有限责任公司生产				

2. 金属密封法兰

(1) 超高真空法兰结构型式(摘自 GB6071.1—85)

本标准适用于超高真空系统中不锈钢法兰连接。

① 法兰的连接型式及参数按表 6-74 规定。

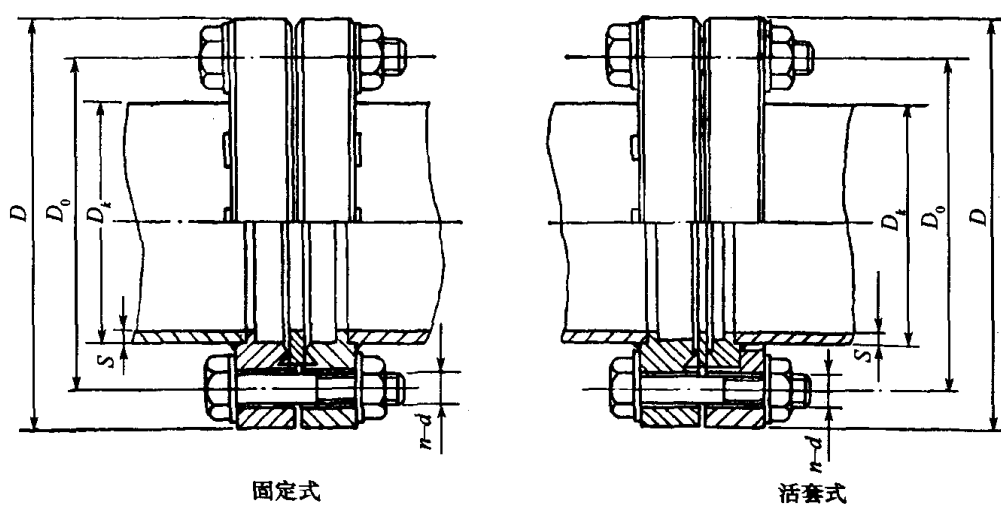
② 法兰最高允许烘烤温度为 450℃。

③ 法兰在 450℃ 下反复烘烤,密封处漏气率不大于 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

④ 螺栓螺母及垫圈与法兰装配时,一般应在螺栓、螺母间加二硫化钼润滑剂。

表 6-74 金属密封法兰结构尺寸

(单位:mm)



公称通径 D_N	法 兰		导 管		螺 栓	
	D	D_0	D_{kmax}	S(推荐)	n	ϕd
16 ^①	36	27.0	18.5	1.5	6	M4
20	56	41.0	24.0	2.0		M6
25	62	47.0	29.0			
32	70	54.0	36.0			
40 ^①	71	58.7	38.5			
50	89	72.4	54.0	2.5	8	M8
63 ^①	114	92.1	66.5		16	
80	130	110.0	85.0			
100 ^①	152	130.2	104.5			
160 ^①	202	181.0	155.0	3.0	20	
200	253	231.8	206.0		24	

注:①为优先采用

(2) 超高真空法兰尺寸(GB6071.2—85)

本标准适用于超高真空系统中公称通径为 16mm~200mm 用铜垫密封的不锈钢法兰。

① 法兰的型式及尺寸按图 6-40~图 6-45 及表 6-75 的规定。

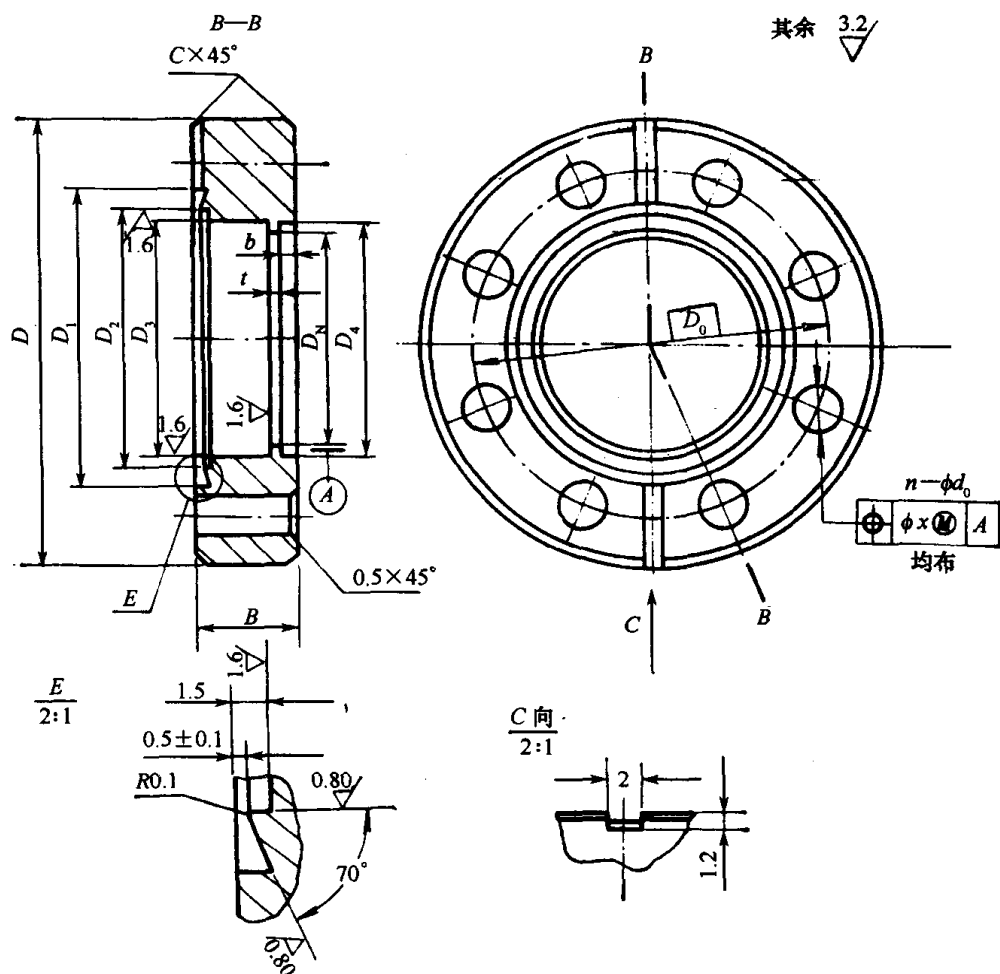


图 6-40 I 型超高真空法兰

② 列在表中的尺寸,不包括机械加工余量。

③ 公称通径一般与管子内径一致,但在不妨碍法兰连接的情况下,可以适当改变。

④ 标记示例:

公称通径为 80mm 的 I 型固定法兰,其标记为

法兰 80-I GB6071.2—85。

公称通径为 20mm 的 IV 型活套法兰,其标记为

法兰 20-IV GB6071.2—85。

⑤ 法兰刀口不允许有划伤,斑痕及其它影响真空密封性能的缺陷。

⑥ 法兰推荐用 GB1220—75《不锈钢耐酸钢 技术条件》规定的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制造。

⑦ 未注明公差的尺寸按 GB 1804—79《公差与配合 未注公差尺寸的极限偏差》IT14 加工。

(3) 超高真空法兰用铜密封垫(摘自 GB6071.3—85)

本标准适用于超高真空法兰用的铜密封垫。

① 密封垫的型式及尺寸按表 6-76 的规定。

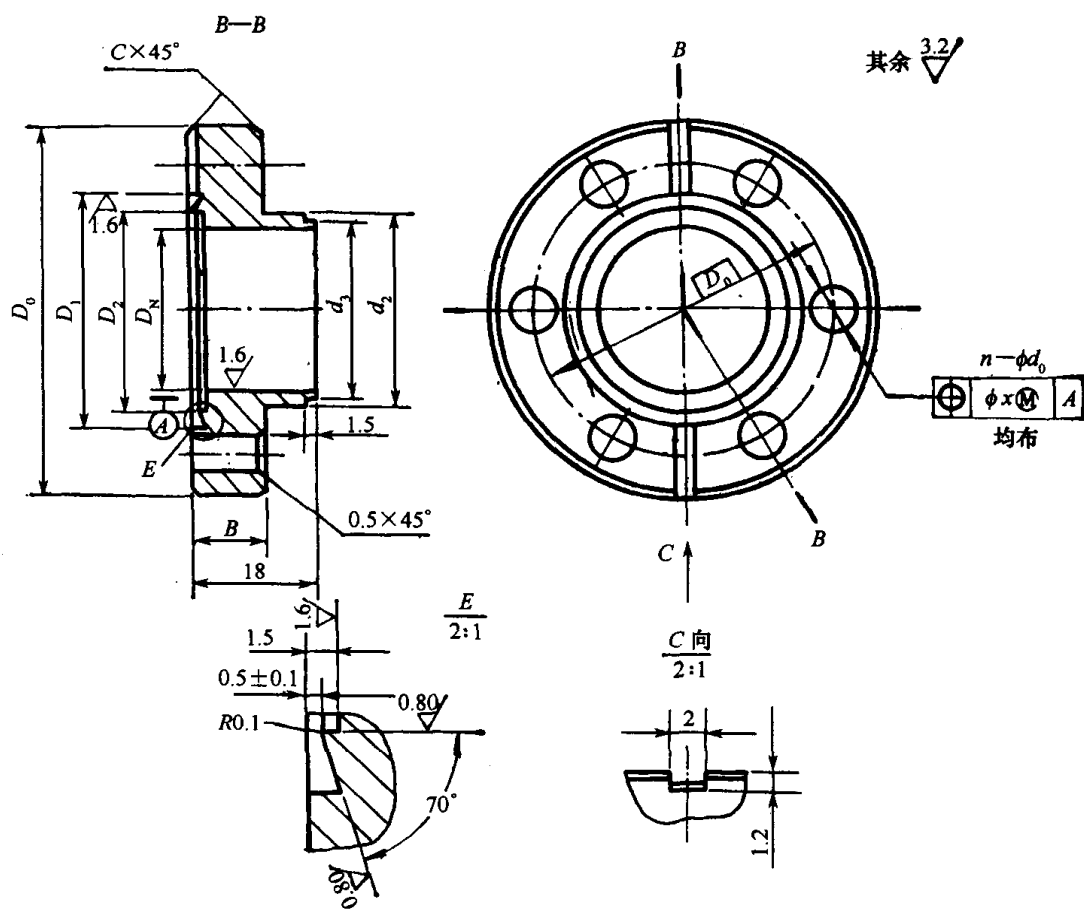


图 6-41 II型超高真空法兰

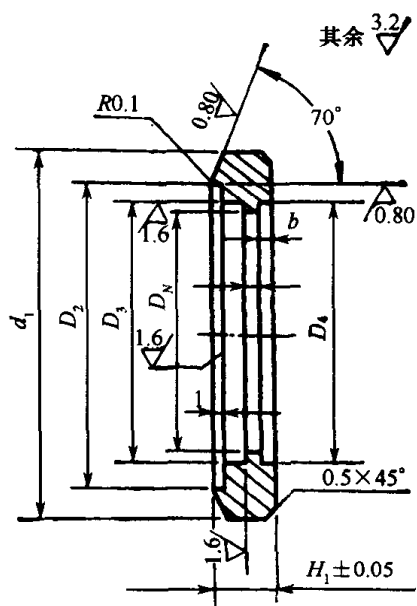


图 6-42 III型超高真空法兰

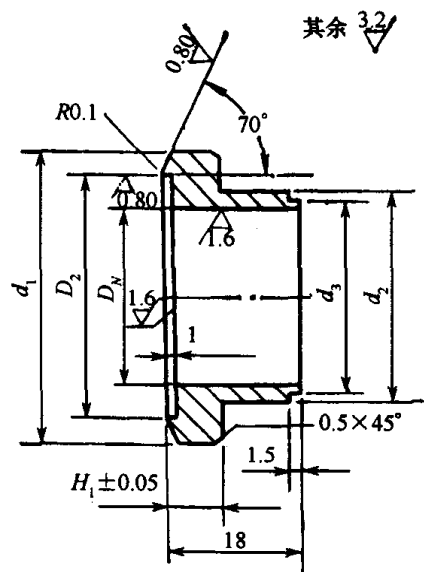


图 6-43 IV型超高真空法兰

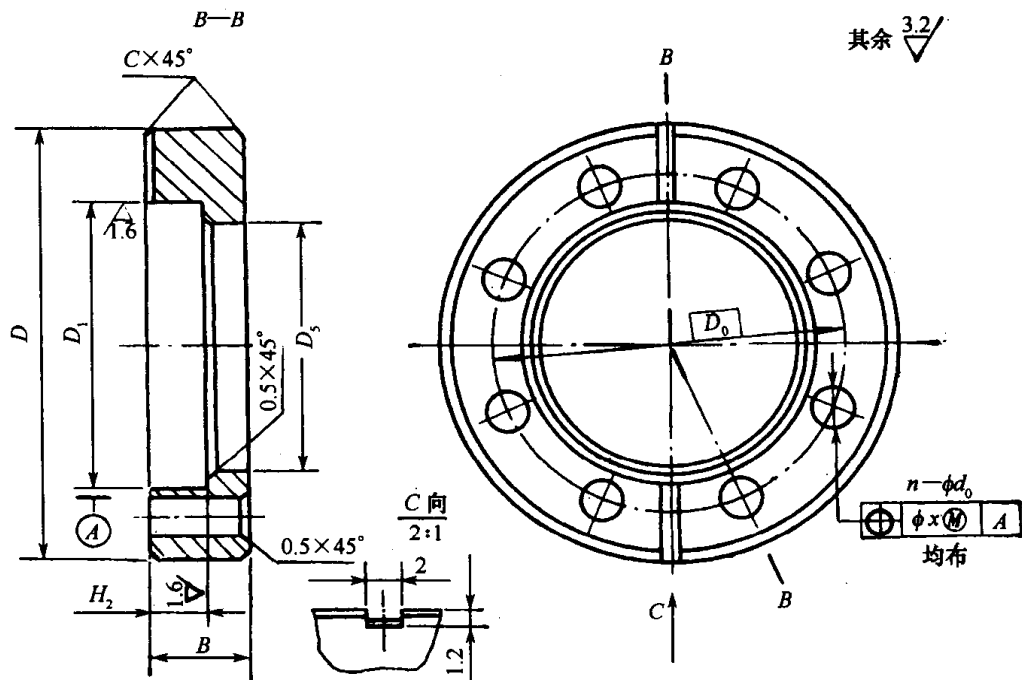


图 6-44 V型超高真空法兰

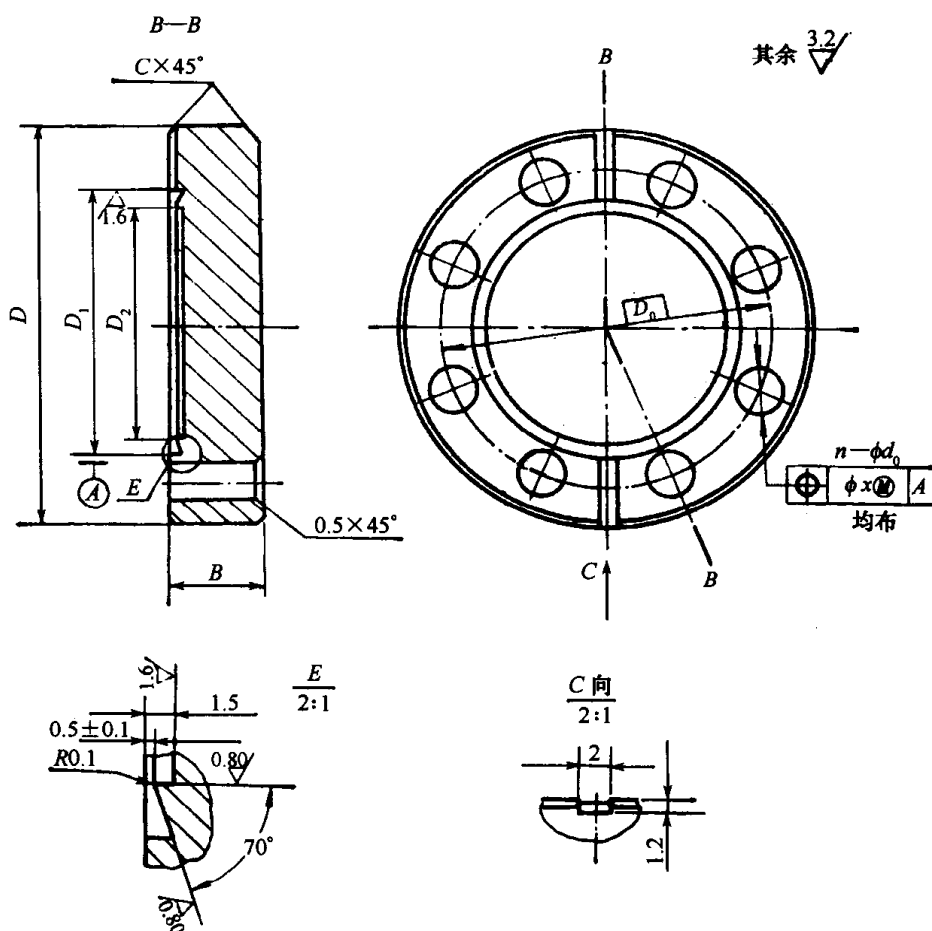


图 6-45 VI型超高真空法兰

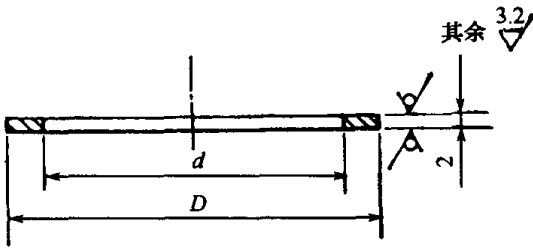
(单位:mm)

表 6-75 超高真空铜垫密封法兰尺寸

公称 通径 D_N	适用 型式	D_0	D_1		D_2		D_3		D_4		D_5		d_1		d_2	d_3		B	H_1	H_2		t	b	n	ϕd_0		x_{max}	C			
			基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差	基本 尺寸	公差		基本 尺寸	公差			基本 尺寸	公差										
16	II IV V VI	36	27.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.052 \end{smallmatrix}$	18.5	± 0.042	—	—	—	—	19.3	$\begin{smallmatrix} +0.52 \\ 0 \end{smallmatrix}$	21.4	$\begin{smallmatrix} -0.110 \\ -0.143 \end{smallmatrix}$	18.5	$\begin{smallmatrix} 17.0 \\ -0.110 \end{smallmatrix}$	8	5.3	5.8	$\begin{smallmatrix} +0.075 \\ 0 \end{smallmatrix}$	4.3	$\begin{smallmatrix} +0.12 \\ 0 \end{smallmatrix}$	6	2	8	16	8.4	$\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$	0.4	1.5	
20		56	41.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.062 \end{smallmatrix}$	29.0	± 0.042	—	—	—	—	25.0	$\begin{smallmatrix} +0.52 \\ 0 \end{smallmatrix}$	33.0	$\begin{smallmatrix} -0.120 \\ -0.159 \end{smallmatrix}$	24.0	$\begin{smallmatrix} 22.0 \\ -0.130 \end{smallmatrix}$	10	6.5	7.0	$\begin{smallmatrix} +0.090 \\ 0 \end{smallmatrix}$	6.4	$\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$									
25		62	47.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.062 \end{smallmatrix}$	34.0	± 0.050	—	—	—	—	30.0	$\begin{smallmatrix} +0.52 \\ 0 \end{smallmatrix}$	39.0	$\begin{smallmatrix} -0.120 \\ -0.159 \end{smallmatrix}$	29.0	$\begin{smallmatrix} 27.0 \\ -0.130 \end{smallmatrix}$	12	7.1	7.6	$\begin{smallmatrix} +0.090 \\ 0 \end{smallmatrix}$											
32	I III V	70	54.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.062 \end{smallmatrix}$	41.0	± 0.050	36	± 0.050	35.5	$\begin{smallmatrix} +0.100 \\ 0 \end{smallmatrix}$	39.0	$\begin{smallmatrix} +0.62 \\ 0 \end{smallmatrix}$	46.0	$\begin{smallmatrix} -0.130 \\ -0.169 \end{smallmatrix}$	—	—	—	12	16	9.5	10.0	$\begin{smallmatrix} +0.090 \\ 0 \end{smallmatrix}$	1.5	3	18	12.2	12.7	$\begin{smallmatrix} +0.110 \\ 0 \end{smallmatrix}$	0.4	1.5	
40		71	58.7	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.062 \end{smallmatrix}$	43.2	± 0.050	38	± 0.050	37.5	$\begin{smallmatrix} +0.100 \\ 0 \end{smallmatrix}$	45.0	$\begin{smallmatrix} +0.62 \\ 0 \end{smallmatrix}$	48.3	$\begin{smallmatrix} -0.130 \\ -0.169 \end{smallmatrix}$	—	—	—	13													
50		89	72.4	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.074 \end{smallmatrix}$	55.6	± 0.060	53	± 0.060	52.5	$\begin{smallmatrix} +0.120 \\ 0 \end{smallmatrix}$	56.0	$\begin{smallmatrix} +0.74 \\ 0 \end{smallmatrix}$	61.6	$\begin{smallmatrix} -0.140 \\ -0.186 \end{smallmatrix}$	—	—	—	16													
63	I III V	114	92.1	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.087 \end{smallmatrix}$	76.6	± 0.060	66	± 0.060	65.5	$\begin{smallmatrix} +0.120 \\ 0 \end{smallmatrix}$	67.0	$\begin{smallmatrix} +0.74 \\ 0 \end{smallmatrix}$	82.6	$\begin{smallmatrix} -0.170 \\ -0.224 \end{smallmatrix}$	—	—	—	18	12.2	12.7	$\begin{smallmatrix} +0.110 \\ 0 \end{smallmatrix}$	3	16	8.4	$\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$	0.4	1.5				
80		130	110.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.087 \end{smallmatrix}$	93.0	± 0.070	87	± 0.070	83.0	$\begin{smallmatrix} +0.140 \\ 0 \end{smallmatrix}$	87.0	$\begin{smallmatrix} +0.87 \\ 0 \end{smallmatrix}$	99.0	$\begin{smallmatrix} -0.170 \\ -0.224 \end{smallmatrix}$	—	—	—											21	13.8	14.3	$\begin{smallmatrix} +0.110 \\ 0 \end{smallmatrix}$
100		152	130.2	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.100 \end{smallmatrix}$	114.7	± 0.070	104	± 0.070	102.5	$\begin{smallmatrix} +0.140 \\ 0 \end{smallmatrix}$	105.0	$\begin{smallmatrix} +0.87 \\ 0 \end{smallmatrix}$	120.7	$\begin{smallmatrix} -0.200 \\ -0.263 \end{smallmatrix}$	—	—	—											22			
160		202	181.0	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.100 \end{smallmatrix}$	165.5	± 0.080	154	± 0.080	153.0	$\begin{smallmatrix} +0.160 \\ 0 \end{smallmatrix}$	155.5	$\begin{smallmatrix} +1.00 \\ 0 \end{smallmatrix}$	171.5	$\begin{smallmatrix} -0.230 \\ -0.293 \end{smallmatrix}$	—	—	—	22	15.3	15.8	$\begin{smallmatrix} +0.110 \\ 0 \end{smallmatrix}$	2	4	20	25	16.7	16.7	$\begin{smallmatrix} +0.110 \\ 0 \end{smallmatrix}$	2.0		
200		252	231.8	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.115 \end{smallmatrix}$	216.6	± 0.092	205	± 0.092	204.0	$\begin{smallmatrix} +0.185 \\ 0 \end{smallmatrix}$	206.5	$\begin{smallmatrix} +1.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$	222.3	$\begin{smallmatrix} -0.260 \\ -0.332 \end{smallmatrix}$	—	—	—	25													

表 6-76 铜垫密封圈尺寸

(单位:mm)

			
公称通径 D_N	D		d
	基本尺寸	公差	
16	21.4	-0.110 -0.143	16.0
20	33.0	-0.120 -0.159	25.0
25	39.0	-0.120 -0.159	29.0
32	46.0	-0.130 -0.169	36.0
40	48.3	-0.130 -0.169	38.3
50	61.6	-0.140 -0.186	51.6
63	82.6	-0.170 -0.224	70.6
80	99.0	-0.170 -0.224	87.0
100	120.7	-0.200 -0.263	108.7
160	171.5	-0.230 -0.293	159.5
200	222.3	-0.260 -0.332	210.3

②标记示例:

公称通径为 100mm 的铜密封垫,其标记为
密封垫 100 GB6071.3—85

③铜密封垫推荐用 YB145—71《纯铜加工产品化学成分》规定的 T2M 铜板或 YB700—70《无氧铜板和带》规定的 TU2M 无氧铜板制造。

④密封垫的两平面,不允许有划痕及影响密封性能的缺陷。两平面必须平整无翘曲。

⑤铜密封垫内径按 GB1804—79《公差与配合 未注公差尺寸的极限偏差》H14 加工。

(4)铜丝密封可烘烤真空法兰连接形式(摘自 JB5278.1—91)

本标准规定了用于超高真空系统的铜丝密封可烘烤法兰的结构型式与连接尺寸。

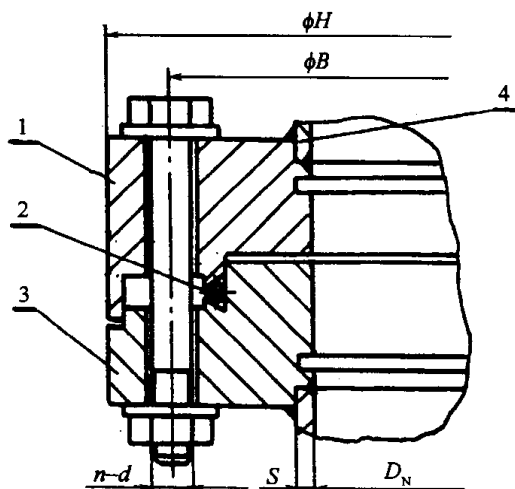
本标准适用于压力低于 1×10^{-5} Pa 超高真空系统中用铜丝密封的法兰连接。

①本标准规定的法兰结构为挤压式铜丝密封结构。法兰的公称通径应符合 GB 6070.1

规定。其结构型式及连接尺寸按表 6-77 的规定。

表 6-77 铜丝密封可烘烤真空法兰连接尺寸

(单位:mm)



1—A 型法兰; 2—铜丝密封圈; 3—T 型法兰; 4—接管。

公称通径 D_N	H	B	S (推荐)	d	n
250	314	288	3	M10	24
320	385	357			36
400	497	454	4	M12	
500	590	555			M16
630	689	658	5		
800	890	855	7		
1000	1090	1055	8		

②本标准所规定的法兰分 A 型和 T 型,如图 6-46 所示。T 型法兰用在迎着气流方向的情况下。T 型和 A 型法兰应符合 JB 5278.2 规定:

- a. 本标准所用铜丝密封圈应符合 JB 5278.3 规定。
- b. 接管采用 GB 3280 和 GB 3281 规定的 1Gr18Ni9Ti 不锈钢板制造。
- c. 接管与法兰采用氩弧焊焊接,内焊缝为连续焊,外焊缝为间断加强焊。
- d. 螺栓、螺母及垫圈均采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制造。装配时螺栓和螺母间应加二硫化钼润滑剂。

e. 法兰最高允许烘烤温度为 450℃。

f. 法兰在 450℃ 反复烘烤条件下,密封处的漏气率不大于 $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

(5)铜丝密封可烘烤真空法兰结构尺寸(摘自 JB5278.2—91)

①本标准规定了铜丝密封真空法兰的结构尺寸及技术要求。本标准适用于 JB 5278.1 规定的真空法兰连接型式。

②法兰结构、尺寸按图 6-46 和表 6-78 规定。

③法兰的技术要求为:法兰公称通径应符合 GB6071.1 规定;法兰的刀口密封面不得有划伤、斑痕或其它影响密封性能的缺陷;法兰采用 GB1220 规定的 1Gr18Ni9Ti 不锈钢制造。

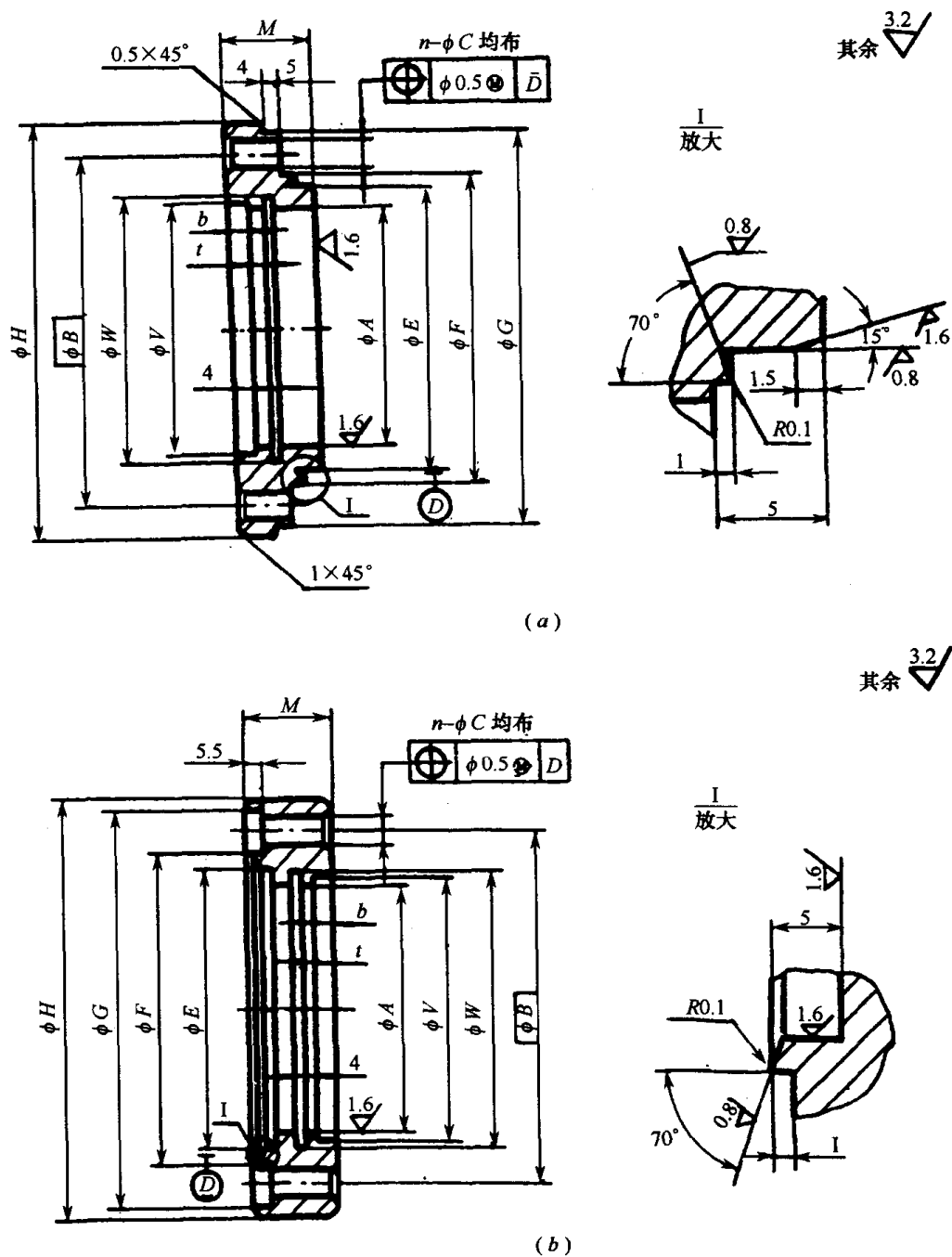


图 6-46 铜丝密封可烘烤真空法兰
(a) T 型; (b) A 型。

(6)铜丝密封可烘烤真空法兰铜丝密封圈结构尺寸(摘自JB5278.3—91)

本标准规定了铜丝密封圈的结构尺寸及技术要求。本标准适用于 JB 5278.1 规定的真空法兰连接型式。

铜丝密封圈结构及尺寸按表 6-79 规定。

铜丝密封圈的技术要求为:铜丝密封圈公称通径应符合 GB6071.1 规定;铜丝密封圈表面应光滑,不允许有划痕、斑点或影响密封性能的其他缺陷;焊接部位应密实,直径均匀,表面圆

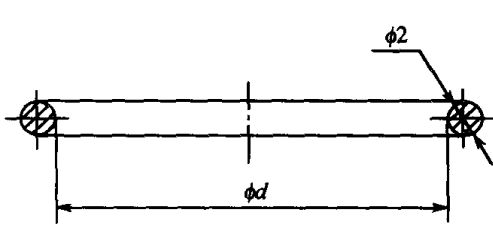
表 6-78 铜丝密封可烘烤真空法兰尺寸

(单位:mm)

公称 通径 D_N	A	H	B	M	C		n	E				F				G				V		W	b	l
								T型		A型						T型		A型						
					尺寸	公差		尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差					
250	250	314	288	29	11		24	271		271		275		308		308		254		257	6	2		
320	320	385	357				36	340		340		344		379		379		324		327				
400	400	497	454	33	13		36	436		436		440		480		480		406		410	8	2.5		
500	500	590	555	38				536	e9	536	H9	540	-0.2	580	d11	580	H11	506	H11	510				
630	603	689	658	44	17.5		40	635		635		639		680		680		608		614	10	3		
800	800	890	855	50			60	831		831		835		880		880		810		815	12			
1000	1000	1090	1055	58			80	1031		1031		1035		1080		1080		1012		1018	15	4		

表 6-79 铜丝密封圈结构尺寸

(单位:mm)

							
公称通径 D_N	250	320	400	500	630	800	1000
d	270	339	435	535	634	829	1029

整;铜丝密封圈应采用 GB3109 规定的 T₂ 铜线或 GB3119 规定的 TU₂ 无氧铜线焊接制成。

3. 国产超高真空 CF 法兰型式及尺寸

CF 法兰由不锈钢材料制成,适用于 10^{-6} Pa 以上的超高真空。密封垫圈材料为无氧高导电铜,允许高温烘烤,使用温度范围为 $-196^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$ 。法兰尺寸符合国际标准。

①CF 内焊法兰结构尺寸见表 6-80。

二、静密封

表 6-80 内焊法兰尺寸

(单位:mm)

CF 内焊法兰									
法兰代号	公称通径 D_N	法 兰 尺 寸						螺 孔 尺 寸	
		D	D_0	D_1	B	B_1	B_2	n	ϕd
CF-16	16	34	27	18	7.3	3	1	6	4.3
CF-25	25	54	43	28	10.5	5.5	1.5	6	6.6
CF-35	35	70	58.7	38	13	7.6	1.5	6	6.6
CF-50	50	86	72.4	53	16	8	1.5	8	8.4
CF-63	63	114	92.2	66	17.5	8	1.5	8	8.4
CF-100	100	152	130.3	104	20	9	2	16	8.4
CF-150	150	202	181.1	154	22	9.4	2	20	8.4
CF-200	200	253	231.9	205	24.5	11.8	2.5	24	8.4

②CF 对焊、内焊松套法兰结构尺寸见表 6-81。

表 6-81 CF 对焊法兰、内焊法兰尺寸

(单位:mm)

CF 对焊松套法兰										
CF 内焊松套法兰										
法兰代号	公称通径 D_N	法 兰			肩 环			螺 检 孔		法兰型式
		D	D_0	B	D_1	B_1	B_2	n	ϕd	
CF16	16	34	27	7.3	10	11.5	5.3	6	4.3	对焊松套法兰
CF16	10	34	27	7.3	12	11.5	5.3	6	4.3	对焊松套法兰
CF16	16	34	27	7.3	18	11.5	5.3	6	4.3	对焊松套法兰
CF35	35	70	58.7	13	38	7.6	—	6	6.6	内焊松套法兰
CF50	50	86	72.4	17.5	53	11	—	8	8.4	内焊松套法兰
CF63	63	114	92.2	19	66	9.5	—	8	8.4	内焊松套法兰
CF100	100	102	130.2	21.5	104	10.4	—	16	8.4	内焊松套法兰
CF150	150	202	181.1	24	154	11.4	—	20	8.4	内焊松套法兰
CF200	200	253	231.9	24.5	205	11.9	—	24	8.4	内焊松套法兰

③CF 盲法兰、活套盲法兰结构尺寸见表 6-82。

表 6-82 CF 盲法兰、活套盲法兰尺寸

(单位:mm)

CF 盲法兰

CF 活套盲法兰

法兰代号

公称通径

D_N

法 兰

螺栓孔

D

D_0

D_1

D_2

B

B_1

n

ϕd

CF16

16

34

27

21.3

18.5

7.3

5.8

6

4.3

CF25

25

54

43

35

28.5

10.5

6.9

6

6.6

CF35

35

70

58.7

48.15

39

13

7.6

6

6.6

CF50

50

86

72.4

61.6

56

16

9.7

8

8.4

CF63

63

114

92.2

82.4

71

17.5

12.7

8

8.4

CF100

100

152

130.3

120.5

109

20

14.3

16

8.4

CF150

150

202

181.1

171.3

160

22

15.8

20

8.4

CF200

200

253

231.9

221.1

206.5

24.5

17.1

24

8.4

④CF 法兰铜垫密封圈见表 6-83。

表 6-83 CF 法兰铜垫密封圈尺寸

(单位:mm)

CF 法兰铜垫密封圈

垫片代号	D_{16}	D_{25}	D_{35}	D_{50}	D_{63}	D_{100}	D_{150}	D_{200}
公称通径 D_N	16	25	35	50	63	100	150	200
D	21.3	35	48.15	61.6	82.4	120.5	171.8	222.1
d	16.2	25.6	36.8	52	63.6	101.7	152.5	203.3

4. 真空管路、真空规管接头

(1)真空管路配件装配尺寸(摘自 GB/T 16709—96)

本标准规定了公称通径 R5 系列从 10mm~250mm 真空管路配件(弯管、T 形管、十字管)的装配尺寸。

真空管路配件的装配尺寸应按表 6-84 规定。

表 6-84 真空管路配件尺寸

(单位:mm)

公称内径	<i>e</i>		<i>H</i>		管件中两个法兰匹配面间垂直公差	
	数值	公差	数值	公差	GB 4982	GB/T 6070
10	30	±1.5	60	±1.5	±2°	±1°
10	40*		80*			
16	40		80			
25	50		100			
40	65		130			
63	88		176	±2		
100	108	216	±0°30′			
160	138	276				
250	208	416		±3		

注:此表与图 6-47 配套

注:此表与图 6-47 配套

法兰尺寸应按 GB/T 6070 和 GB 4982 的规定。

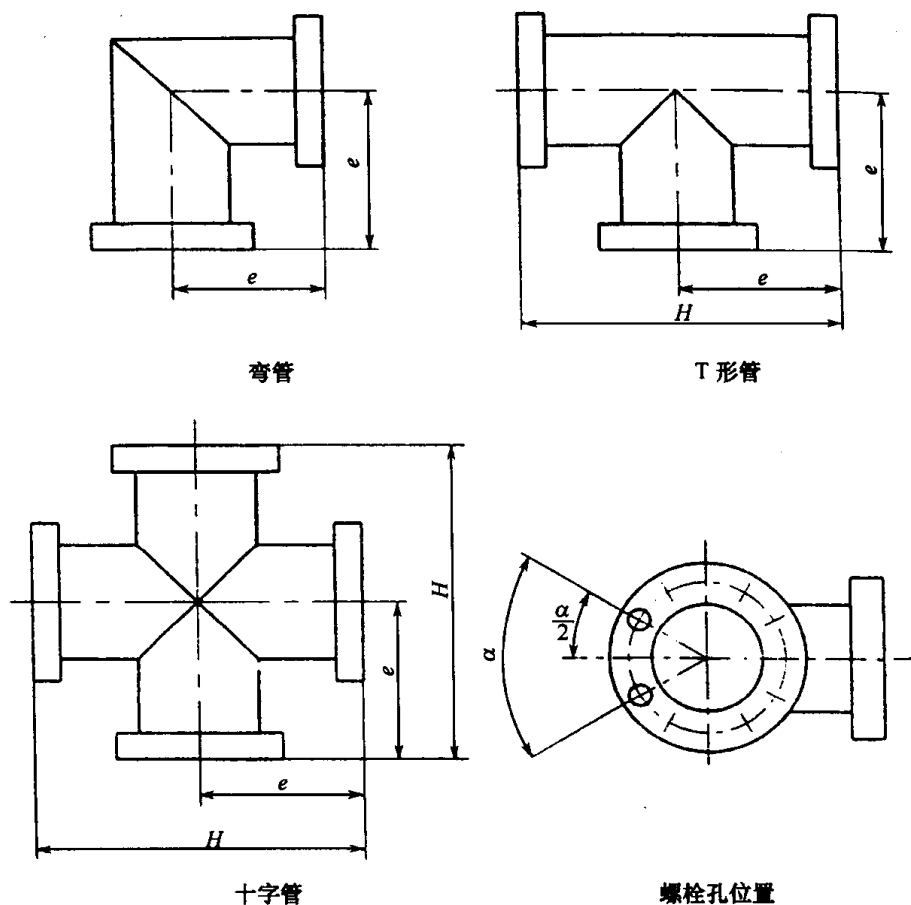
GB/T 6070 规定的法兰螺孔位置如图 6-47 所示, α 角是螺栓孔数的函数。

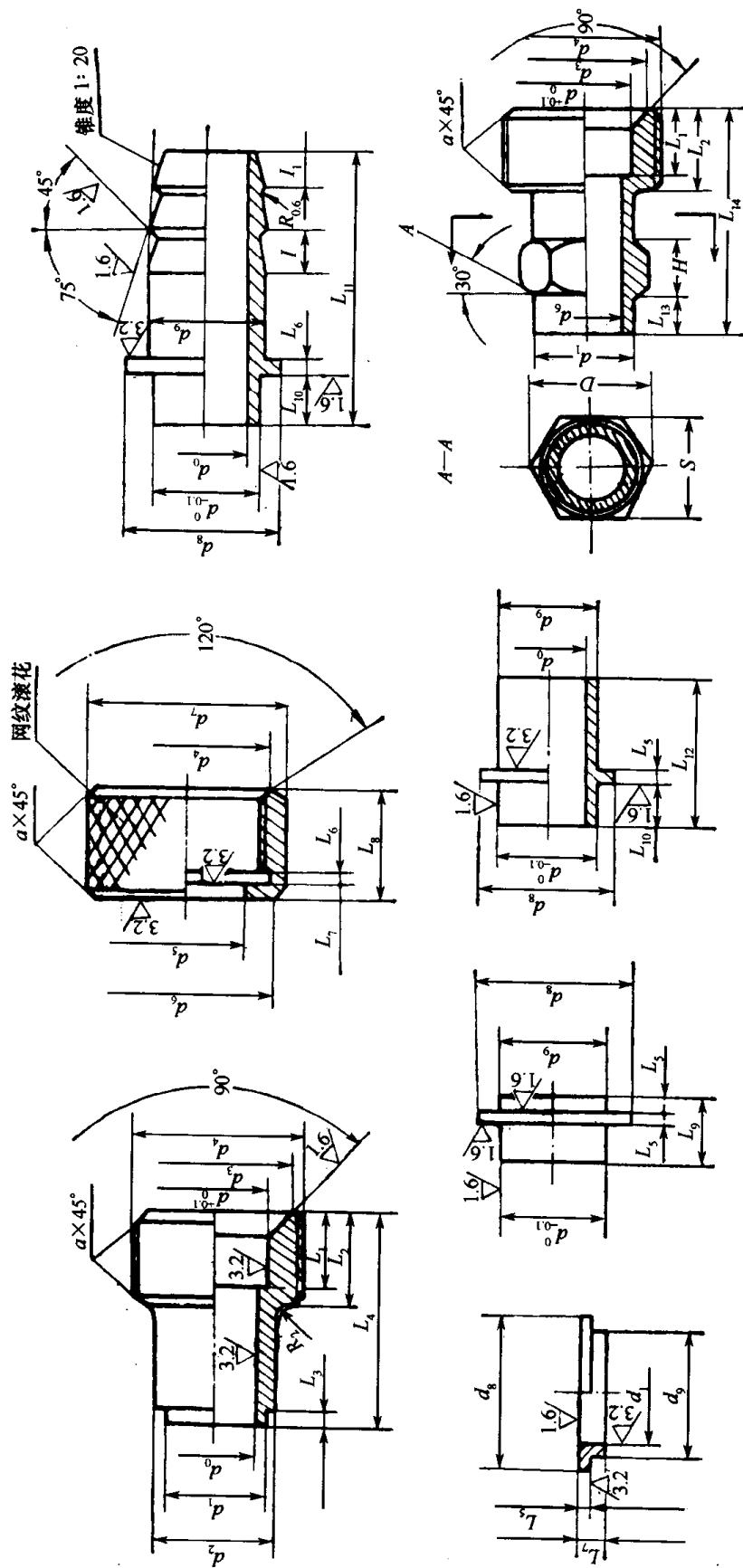
图 6-47 真空管路配件装配尺寸示意图

(2) 真空管道密封接头(Q/WH5—87)

①真空管道密封接头适用于真空度在 10^{-4} Pa 以下的金属真空系统,接头型式如图 6-48 所示。

表 6-85 真空管道接头尺寸

(单位: mm)



d ₀	d	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁	L ₁₂	L ₁₃	L ₁₄	I	I ₁	a	S	H	D	O形密封圈		橡皮管	
																															内径	断面直径		内径
5	7	9	11	11.6	M14×1.5	10.5	15	18	12	10	8	9	2.5	25	2	2.5	4	12	7	10	7	40	15	25	6	5	1.5	10	5	11.5	5.5	3	4	12
8	10	12	14	15.6	M18×1.5	13.5	19	22	16	13	9	11	3	28				14	10	8		20	6	30				14	8	16.2	9.5		8	16
10	13	14	16	22.4	M27×2	16.5	28	32	24	16	18	14		35				18				25	35	8	6	2	17	8	19.6	11.5		10	22	
15	19	19	21	28.4	M33×2	21.5	34	38	30	21	16	18	3	40	2.5	3.5	5	20	12	10	60	60	8	40			22	10	25.6	17.5		15	30	
20	24	24	28	32.1	M36×3	27.5	37	41	32	27	18			45				22			70											4	20	40
25	29	29	32	40.2	M45×3	33.5	46	51	41	33	20			50	3	4.5	6	25	14		85				12	10						27	25	50
32	36	36	40	47.2	M52×3	38.5	53	58	48	38	16	22	4	55				27		12	95				15	12						34	30	60

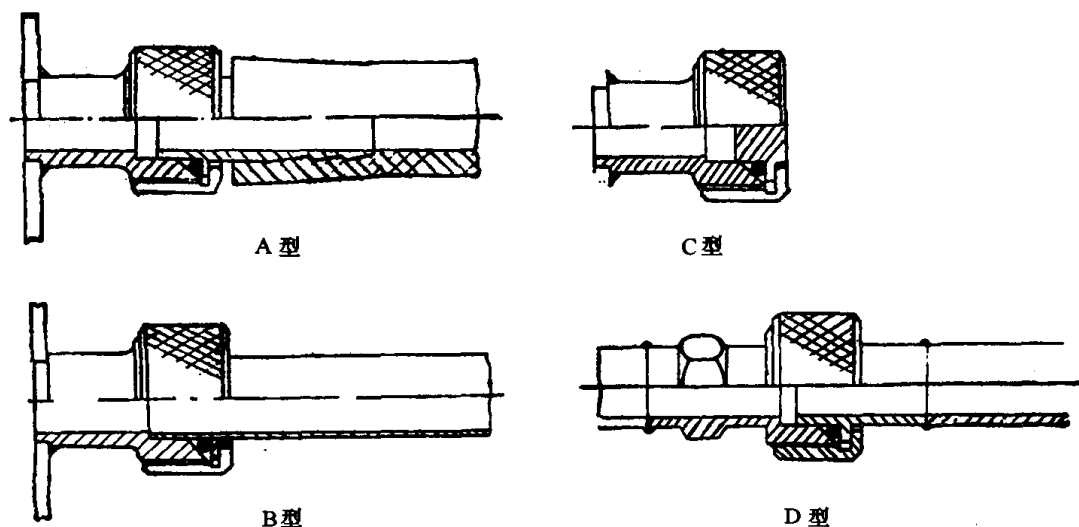


图 6-48 真空管道密封接头型式

②接头尺寸见表 6-86。

③真空接头零件的技术条件：

a. 除内接头外，其它零件全部镀镍后外表面抛光，内接头需要电镀时，在与壳体焊后一起电镀；

b. M 面与轴线的不垂直度应小于 0.05mm ；

c. 零件“内接头”与“橡皮管接头”、“堵头”、“连接管等之间的配合均为 $\frac{H_{11}}{h_{11}}$ ；

④真空接头零件标记示例：

a. D 型接头中的内接头 7, $d_0 = 10\text{mm}$, 内接头 (7) $d10(Q/WH5-87)$ ；

b. O 形密封圈内径 11.5mm , 截面直径 4mm , O 形密封圈 $\phi 11.5 \times \phi 4(Q/WH5-87)$ 。

⑤管道活连接有三种结构型式，详见图 6-49。

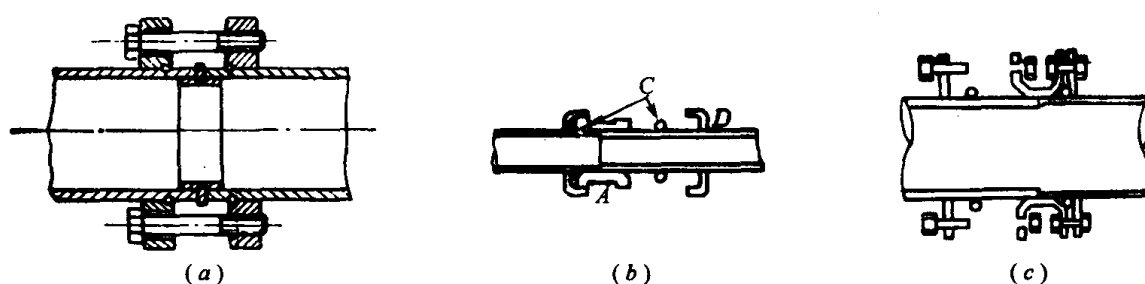


图 6-49 管道活连接组件

(3)真空规管接头

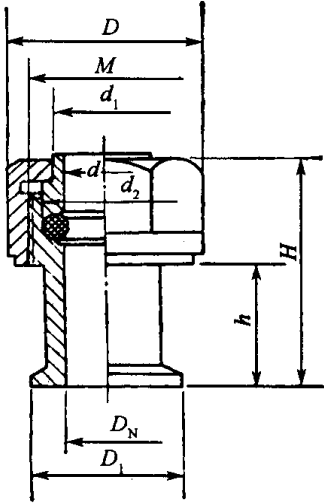
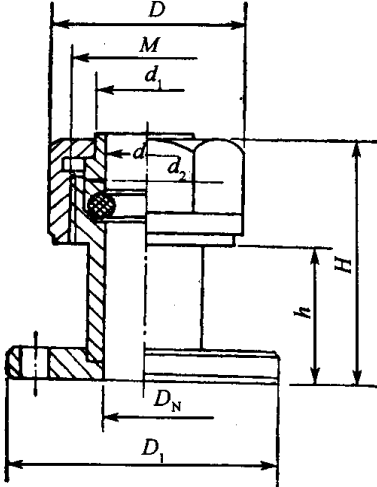
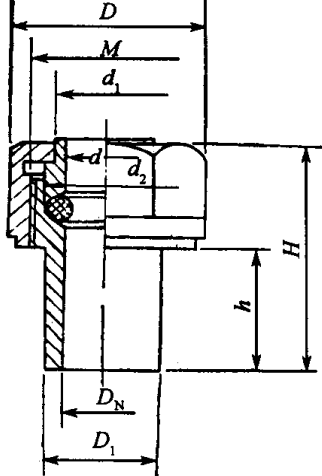
①橡胶密封真空规管接头(摘自 JB/T 8105.1—99)。

本标准适用于真空系统真空测量用橡胶密封的测量规管接头。

a. 橡胶密封真空规管接头型式分 I 型、II 型、III 型，I 型接头为快速连接型，其快速连接法兰应符合 GB/T 4982、GB/T 4983 的规定；II 型接头为法兰连接型，其法兰应符合 GB/T 6070 的规定；III 型法兰为焊接型，其焊接方式与接管长度可根据设备结构需要由选用者确定。它们的结构型式及主要结构尺寸按表 6-86 的规定。

表 6-86 真空规管接头尺寸

(单位:mm)

<div><div><p>I 型</p></div><div><p>II 型</p></div><div><p>III 型</p></div></div> <div><p>真空接头型式</p></div>										
公称通径 D_N	D_1			H	h ①	d	D	M	d_1	d_2
	I 型	II 型	III 型							
16	30	60	22	≈55	30	16.5	38	M30×2	20	24
25	40	70	30	≈68	35	26	54	M40×2	30	34
注:①可按需要调整										

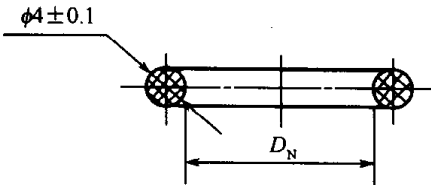
b. 标记示例:公称通径为 16mm 的快速连接型规管接头,其标记为
规管接头 16- I JB/T 8105.1—99

c. 装配后接头漏气率不大于 $7 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

d. 橡胶密封圈尺寸按表 6-87 的规定。橡胶密封圈表面应光滑,不应有气孔、裂纹、杂质等缺陷。密封圈材料使用丁腈橡胶或氟橡胶制造。

表 6-87 橡胶密封尺寸圈

(单位:mm)

	公称通径	D_N
	16	15.5
	25	24

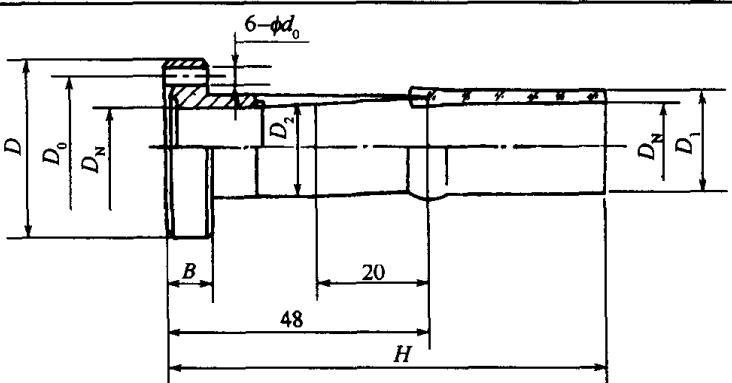
②金属密封真空规管接头(摘自 JB /T 8105.2—99)。

本标准适用于可烘烤真空系统中真空测量用金属密封的规管接头。

a. 金属密封真空规管接头的结构型式与尺寸按表 6-88 的规定。

表 6-88 金属真空规管接头尺寸

(单位:mm)

							
金属密封真空规管接头							
D_N	H	D	D_0	D_1	D_2	B	d_0
16	80	34	27	20	18.5	8	4.5
25	85	62	47	30	29	10	6.5

b. 金属密封真空规管接头用法兰应符合 GB/T 6071.2《超高真空法兰尺寸》的规定,其密封垫应符合 GB/T 6071.3《超高真空法兰用铜密封垫》的规定。

c. 标记示例:公称通径为 25mm 的金属密封真空规管接头,标记为
规管接头 25 JB/T 8105.2—99

d. 法兰与玻管之间的接管采用符合 YB/T 5231—93《铁-镍-钴玻璃封接合金 4J29》规定的 4J29 膨胀合金制造。

e. 规管接头漏气率不大于 $7 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

f. 规管接头最高烘烤温度为 450°C 。

③ 国产真空规管接头 I 型、II 型、III 型如图 6-50 所示,其尺寸如图 6-51、图 6-52 所示。

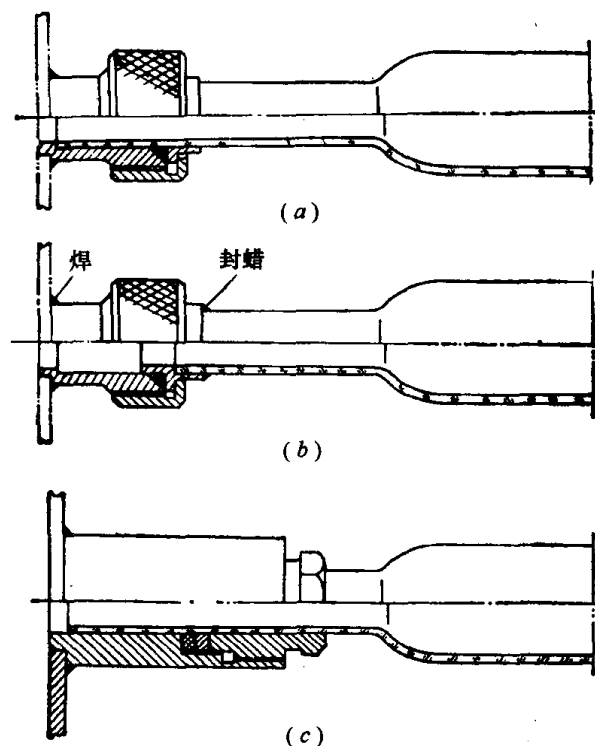


图 6-50 真空规管接头
(a) I 型; (b) II 型; (c) III 型。

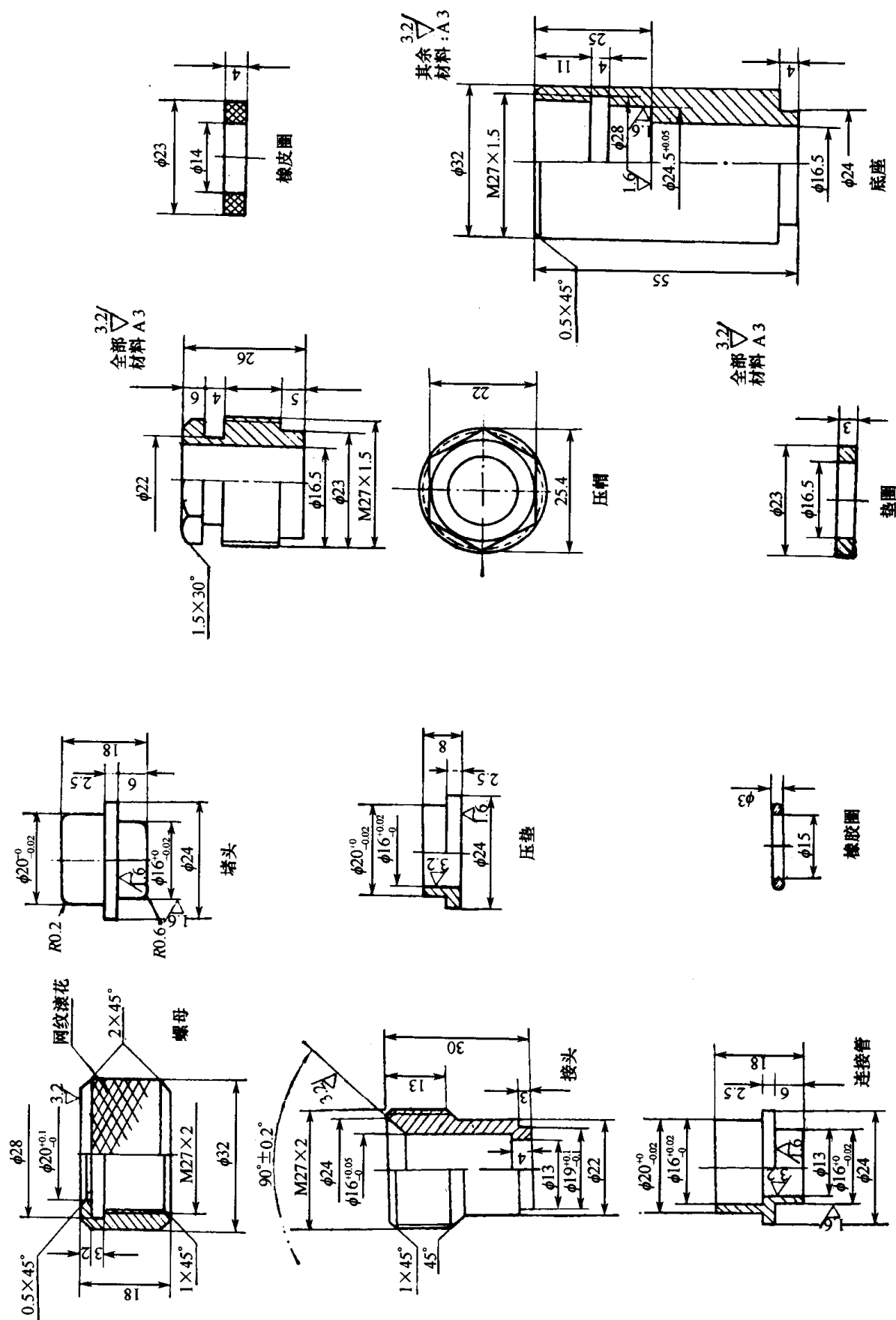


图 6-51 I、II型真空规管接头尺寸

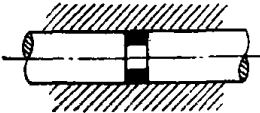
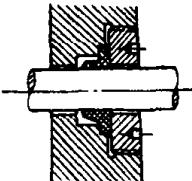
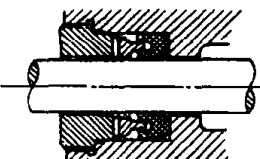
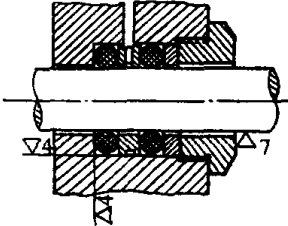
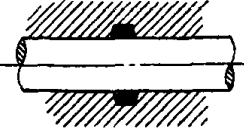
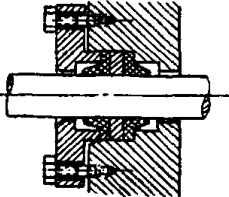
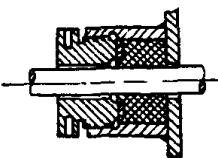
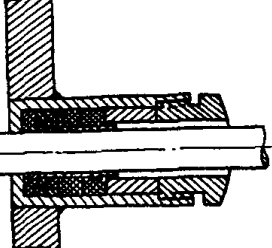
图 6-52 III型真空规管接头尺寸

三、动密封

(一) 动密封型式

各类真空装置,经常需要将外部的各类运动传递到真空容器中。传递的运动形式通常有以下几种:①传动轴的转动;②传动轴的往复直线运动;③传动轴的摆动。最常见的动密封型式是传递平动和转动的 O 形圈和填料密封(表 6-89),其中(a)、(b)为最简单的单只 O 形圈的轴密封结构。要求高的密封最好采用两只 O 形圈(表 6-90(g)),这种密封能确保轴中心的准直性。在轴上开密封槽容易加工,但传动轴的平移距离很长时则应在孔壁上开槽。带压紧力的填料密封漏率较小,但增加了摩擦力并使轴封发热,不适于传递高速运动。

表 6-89 动密封的各种型式

转动和平动		填料盒密封	
			
(a)	(c)	(e)	(g)
			
(b)	(d)	(f)	(h)

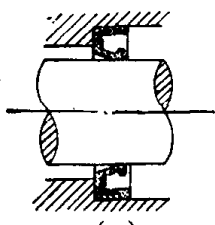
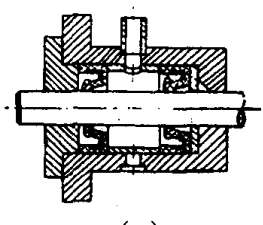
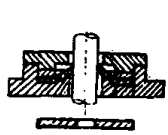
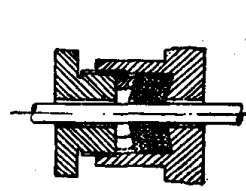
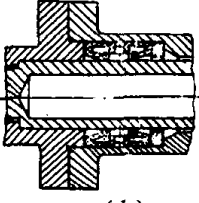
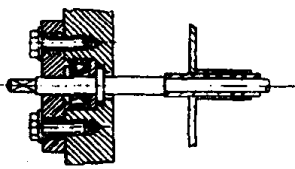
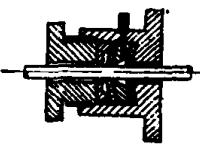
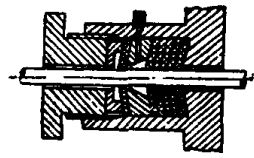
传递转动应用最广的密封型式是威尔逊密封(表 6-90),表中(e)~(h)的垫圈孔径通常是轴直径的 0.65 倍~0.8 倍,垫片的边缘部分被金属衬垫紧紧固定,扭曲变形的橡胶垫孔的内缘靠紧轴形成密封。威尔逊密封可用于直径 1.5mm~70mm 的传动轴。但轴径超过 20mm 时,结构设计要确保压力差不致将轴压入真空容器中。威尔逊密封常采用双道垫圈密封,垫圈之间抽空或注入真空润滑油脂,以改善真空密封性能。

靠波纹管或膜片的变形来传递轴的平移、摆动或转动的密封形式见表 6-91。特点是密封可靠、耐烘烤(金属波纹管或膜片),广泛用于超高真空系统中;缺点是价格高、寿命短、位移量小。

O 形密封圈被广泛用于动密封结构中。动密封中使用的 O 形圈,是靠给定的拉伸和压缩变形来保证密封性能的,为了减少摩擦阻力,通常压缩量比固定密封小。要根据运动形式选择不同的拉伸量和压缩量。用于往复运动和旋转运动示意图如图 6-53 及图 6-54 所示。

往复运动(往复直线运动)中的 O 形圈,无论是内径还是外径作滑动密封,其压缩率一般均取 10%~12%。由于 O 形圈在拉伸后安装,断面直径变小,使得实际压缩量变小,推荐拉伸后的实际压缩率不小于 8%。

表 6-90 威尔逊密封型式

带加强环的威尔逊密封		威尔逊密封	
			
(a)	(c)	(e)	(g)
			
(b)	(d)	(f)	(h)

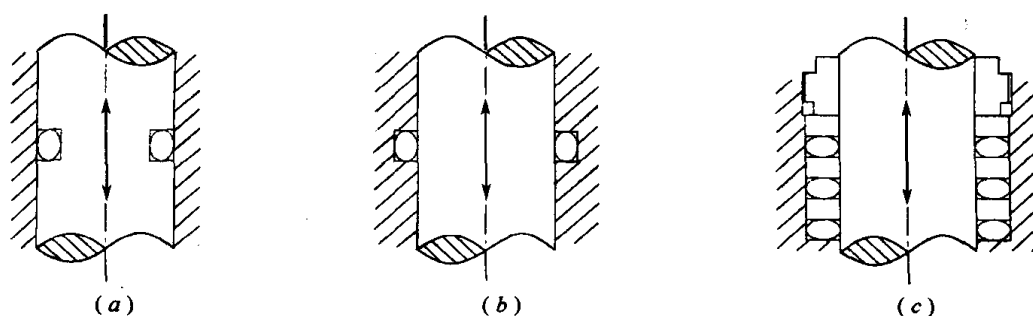


图 6-53 O形圈往复运动密封示意图
(a)轴开槽;(b)孔开槽;(c)孔长槽。

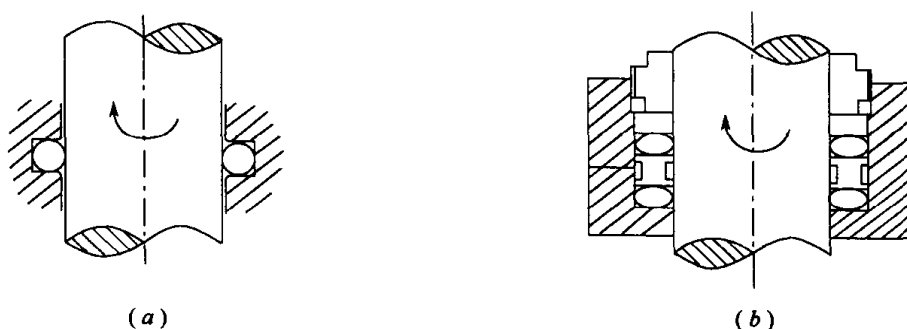
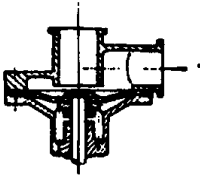
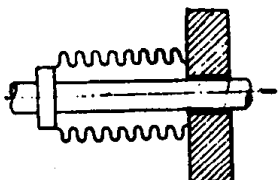
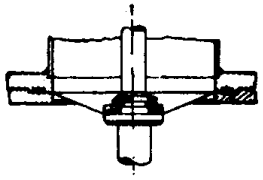
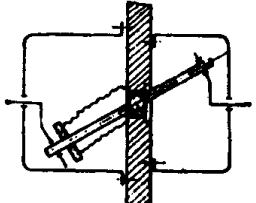
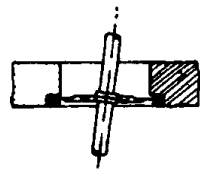
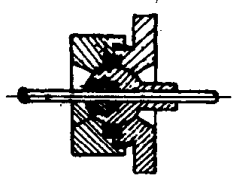


图 6-54 O形圈旋转运动密封示意图

O形圈用于旋转运动状态时,以预拉伸状态安装于密封部位的O形圈和旋转轴总是在一固定的部位上接触,旋转产生的摩擦热集中在一点,O形圈受热后不是膨胀而是收缩(拉伸状态下的橡胶受热收缩称为焦尔效应),使得旋转轴上的摩擦力加大,从而产生摩擦生热——收缩——摩擦力增大——摩擦热增大——收缩量加大,不断恶性循环,必然加速O形圈磨损,早期老化损坏。此外,橡胶O形圈收缩使其压缩变形量减少造成泄漏,因此在设计时必须引起

表 6-91 膜片与波纹管密封型式

膜片薄板传动	金属波纹管传动
 (a)	 (d)
 (b)	 (e)
 (c)	 (f)

足够的重视。

用于旋转运动的 O 形圈,国内外的统计数据表明,O 形圈的内径比旋转轴直径(或密封槽底部直径)小 3%~5%,外侧压缩率 5%~8%为宜,轴的偏心控制在 0.05mm~0.15mm。按照上述参数设计的密封槽,用于压力不低于 10^{-4} Pa,往复速度小于 0.2m/s,或旋转线速度在 4m/s~7m/s 条件下可获得良好的密封性能。

(二) 真空动密封型式及尺寸

1. O 形真空用橡胶密封圈型式及尺寸(摘自 JB1092—91)

本标准规定了 O 形真空用橡胶密封圈的型式及尺寸。

本标准适用于外部为大气压力,真空室压力高于 1×10^{-4} Pa 的往复运动真空机械设备的密封,在规定的温度下且往复运动速度低于 0.2m/s。真空机械设备其它情况下的密封,也可选用 O 形密封圈。

(1)型式尺寸

O 形真空用橡胶密封圈型式及系列尺寸之优选值,应符合表 6-92 的规定。

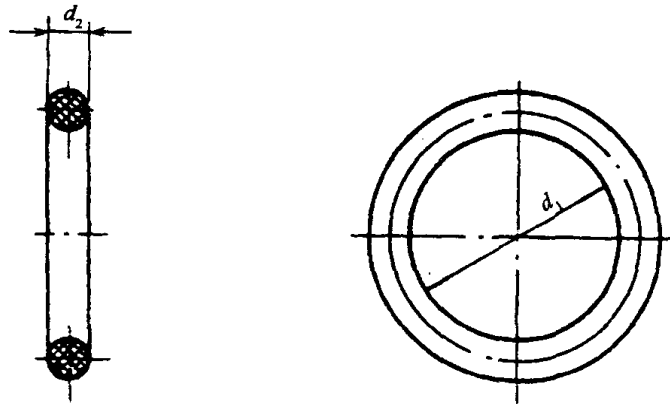
(2)标记示例

内径 $d_1 = 48.7$ mm,截面直径 $d_2 = 5.30$ mm 的 O 形真空用橡胶密封圈,标记为:

O 形密封圈 48.7×5.30 JB1092

表 6-92 O 形动密封真空用橡胶密封圈尺寸

(单位:mm)



名义 直径 d	内径 d_1		截面直径 d_2					名义 直径 d	内径 d_1		截面直径 d_2				
	尺寸	极限 偏差	1.80 ± 0.08	2.65 ± 0.09	3.55 ± 0.10	5.30 ± 0.13	7.00 ± 0.15		尺寸	极限 偏差	1.80 ± 0.08	2.65 ± 0.09	3.55 ± 0.10	5.30 ± 0.13	7.00 ± 0.15
3	2.50	± 0.13	*					45	43.7	± 0.30	*	*	*	*	
4	3.55		*					50	48.7		*	*	*	*	
5	4.50		*					55	53.0			*	*	*	
6	5.30		*					60	58.0			*	*	*	
8	7.50	± 0.14	*	*				65	63.0	± 0.45		*	*	*	
10	9.50		*	*				70	69.0			*	*	*	
12	11.2		*	*				75	73.0			*	*	*	
14	13.2		*	*				80	77.5				*	*	
15	14.0	± 0.17	*	*				85	82.5	± 0.65			*	*	
16	15.0		*	*				90	87.5				*	*	
18	17.0		*	*				100	97.5				*	*	
20	19.0		*	*	*			110	109				*	*	*
22	21.2	± 0.22	*	*	*			120	118	± 0.90		*	*	*	*
25	23.6		*	*	*			130	128				*	*	*
28	26.5		*	*	*			140	136				*	*	*
30	28.0		*	*	*			150	145				*	*	*
32	31.5	± 0.30	*	*	*			160	155	± 1.20			*	*	*
35	33.5		*	*	*			180	175				*	*	*
40	38.7		*	*	*			200	195				*	*	*

注: * 表示适用

(3) 技术要求

工作介质为机械泵油、扩散泵油或真空油脂。

工作温度为 $-25^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 。在充保护气体情况下工作时,其保护气体压力不高于 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 。胶料的物理机械性能应保证真空室压力不高于 $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。O形橡胶圈采用 45° 角开模压制,工作面上不允许有气泡、杂质和凹凸缺陷,非工作面的外观质量应符合表 6-93 的规定。

附件及安装结构型式可参照附录 A(参考件)。

(4) 附录 A O形真空用橡胶密封圈及安装结构型式(参考件)

①密封压套的型式及系列尺寸见表 6-94。

三、动密封

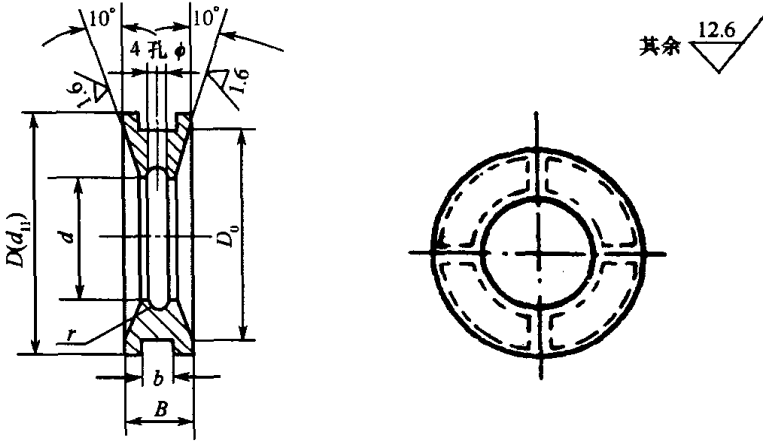
表 6-93 动密封 O 形圈外观质量

缺陷名称	指 标	
	直径 50mm 以下	直径 50mm~200mm
气泡	非工作面, 气泡直径不大于 1mm 者, 不得多于 2 处	非工作面, 气泡直径不大于 2mm 者, 不得多于 2 处
杂质	非工作面, 杂质面积不超过 1mm ² 者, 不得多于 2 处	非工作面, 杂质面积不超过 2mm ² 者, 不得多于 2 处
凸凹缺陷	非工作面, 凸凹不超过 0.5mm, 面积不超过 2mm ² 者, 不得多于 2 处	非工作面, 凸凹不超过 0.5mm, 面积不超过 6mm ² 者, 不得多于 2 处
修边痕迹	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm
合模缝错位	允许存在, 但不得超过公差范围	允许存在, 但不得超过 0.5mm

注: 为使密封圈的表面光滑, 要求模具的表面粗糙度 R_a 的值为 $0.2\mu\text{m}$ 或镀铬抛光

表 6-94 密封压套尺寸

(单位: mm)

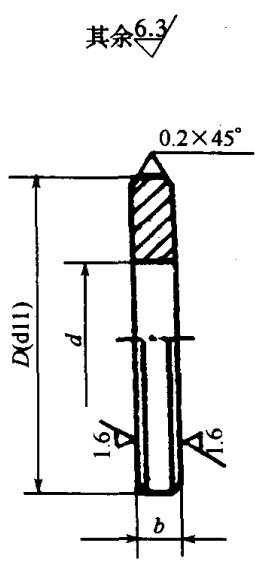
											
名义直径	d	B	b	ϕ	r	名义直径	d	B	b	ϕ	r
3	3.5	4	2	1	0.5	45	46	6	3	1.5	0.5
4	4.5					50	51				
5	5.5					55	56				
6	6.5					60	61				
8	8.5					65	66				
10	10.5	6	3	1.5	0.6	70	71	8	4	2	0.7
12	12.5					75	76				
14	15					80	81				
15	16					85	86				
16	17					90	91				
18	19	6	3	1.5	0.6	100	101	10	5	2.5	0.9
20	21					110	112				
22	23					120	122				
25	26					130	132				
28	29					140	142				
30	31	6	3	1.5	0.6	150	152	10	5	2.5	0.9
32	33					160	162				
35	36					180	182				
40	41					200	202				

注: 1. 密封压套的材料为 A3 或 H62。
2. D 及 D_0 尺寸按所选密封圈尺寸相应取值

②平垫的型式及系列尺寸见表 6-95。

表 6-95 平垫尺寸

(单位:mm)

	轴 径	d	b	轴 径	d	b
	3	3.5	1.5	45	46	3
	4	4.5		50	51	
	5	5.5		55	56	
	6	6.5		60	61	
	8	8.5		65	66	
	10	10.5		70	71	
	12	12.5	2	75	76	3
	14	15		80	81	
	15	16		85	86	
	16	17		90	91	
	18	19		100	101	
	20	21		110	112	
	22	23	2.5	120	122	3.5
	25	26		130	132	
	28	29		140	142	
	30	31		150	152	
	32	33		160	162	
	35	36		180	182	
	40	41		200	202	

注:1. 平垫的材料为 A3 或 H62。
2. D 尺寸按所选密封圈尺寸相应取值

③安装示例及密封槽的要求推荐如图 6-55 所示。

2. J 形真空用橡胶密封圈型式及尺寸(摘自 JB 1090—91)

本标准规定了 J 形真空用橡胶密封圈的型式及尺寸。

本标准适用于外部为大气压力、真空室压力高于 1×10^{-4} Pa 的旋转真空机械设备的密封,在规定的温度下且旋转线速度低于 2m/s,转速低于 2 000r/min。

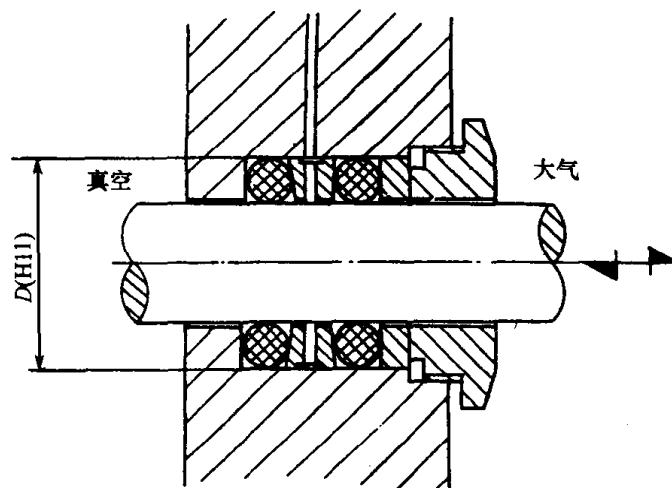


图 6-55 O形真空动密封、密封槽安装图

注：真空室内表面各零件表面粗糙度：密封面 R_a 的值为 $1.6\mu\text{m}$ ，轴 R_a 的值为 $0.8\mu\text{m}$ 。

(1)型式尺寸

J形真空用橡胶密封圈的型式及系列尺寸应符合表 6-96 的规定。

表 6-96 J形橡胶密封圈尺寸

(单位:mm)

名义直径 d	d_1		d_2	D	d_2, D 极限偏差	H	δ				
	尺寸	极限偏差					尺寸	极限偏差			
6	5.5	+0.2 -0.3	13	22	± 0.5	4.2	2	+0.6 -0.2			
8	7.5		15	24							
10	9.5		17	25							
12	11.5		19	27							
14	13	+0.3 -0.5	23	33	± 0.7	4.9	2.5				
15	14		24	34							
16	15		25	35							
18	17		27	38							
20	19		29	40		5.4					
22	21		31	42		5.5					
25	23.5		34	44							
28	26.5		37	48							

(续)

名义直径 d	d_1		d_2	D	$d_2、D$ 极限偏差	H	δ	
	尺寸	极限偏差					尺寸	极限偏差
30	28.5	+0.4 -0.6	40	52	± 0.8	5.8	2.5	+0.6 -0.2
32	30		42	54		6.0		
35	33		45	56		7.0		
40	38		52	66				
45	43		57	72				
50	48		62	76				
55	53		67	82		3		
60	58	74	90					
65	63	79	95	± 0.9	7.6			
70	68	84	100					
75	73	89	105					
80	78	94	112					
85	82	98	116	± 1.1	8.6		4	
90	87	103	122					
100	97	113	130					
110	106	+0.6 -1.2	126	144	± 1.5	9.7		+0.6 -0.3
120	116		136	154				
130	126		146	165				
140	136		156	175				
150	145		168	190				
160	155	+0.7 -1.5	178	200	± 1.5	10.6		
180	175		198	220				
200	195		218	240				

(2) 标记示例

J形真空用橡胶密封圈 $d = 50\text{mm}$, 标记为J形密封圈 $d50$ JB 1090

(3) 技术要求

①工作介质为机械泵油、扩散泵油或真空油脂。

②工作温度为 $-25^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。③在充保护气体情况下工作时,其保护气体压力不高于 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 。④胶料的物理机械性能应保证气体压力不高于 10^{-4}Pa 。

⑤J形真空用橡胶密封圈工作表面应平整光滑、不允许有气泡杂质、凹凸不平等缺陷,其非工作面的外观质量指标应符合表 6-97 规定。

⑥附件及安装系列依据可参照附录 A(参考件)。

(4) 附录 A J形密封圈及安装结构型式(参考件)

①密封压套的型式及系列尺寸见表 6-98。

三、动密封

表 6-97 J 形橡胶圈非密封面的技术要求

缺陷名称	指 标	
	直径 50mm 以下	直径 50mm~2000mm
气泡	非工作面, 气泡直径不大于 1mm 者, 不得多于 2 处	非工作面, 气泡直径不大于 2mm 者, 不得多于 2 处
杂质	非工作面, 杂质面积不超过 1mm ² 者, 不得多于 2 处	非工作面, 杂质面积不超过 2mm ² 者, 不得多于 2 处
凹凸缺陷	非工作面, 凹凸不超过 0.5mm, 面积不超过 2mm ² 者, 不得多于 2 处	非工作面, 凹凸不超过 0.5mm, 面积不超过 6mm ² 者, 不得多于 2 处
修边痕迹	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm
合模缝错位	允许存在, 但不得超过公差范围	允许存在, 但不得超过 0.5mm

注: 为使密封圈表面光滑, 要求模具的表面粗糙度为 $R_a 0.2$ 或镀硬铬抛光

表 6-98 J 形密封压套尺寸

(单位: mm)

Technical drawing of a J-shaped seal sleeve. The drawing shows a cross-section with dimensions D, d1, d2, d3, d4, H1, H2, H3, H4, and H. The drawing includes chamfers with a 30-degree angle and surface roughness symbols (12.5 and 6.3).

名义直径 d	D	d_1	d_2	d_1, d_2 极限 偏差	d_3	d_4	H_1	H_2	H_3	H_4	H		
											尺寸	极限偏差	
6	22	6.5	13	-0.1	20	2	4	2	2	3	5.9	± 0.06	
8	24	8.5	15		21								
10	25	11	17		23						5.8		
12	27	13	19		25								
14	33	15	23	-0.12	31		5	3	2.5	3.5	7.3		
15	34	16	24		32								
16	35	17	25		33								
18	38	19	27		36								
20	40	21	29		38								
22	42	23	31		40								
25	44	26	34		42								
28	48	29	37		46								

(续)

名义直径 d	D	d_1	d_2	$d_1、d_2$ 极限 偏差	d_3	d_4	H_1	H_2	H_3	H_4	H	
											尺寸	极限偏差
30	52	31	40	-0.12	50	2	5	3	2.5	3.5	7.6	± 0.06
32	54	33	42		52							
35	56	36	45		54							
40	66	41	52		64						8.2	± 0.08
45	72	46	57		70							
50	76	51	62		74							
55	82	56	67		80							
60	90	61	74	88	2.5	6	4	3	4.5	9.8		
65	95	66	79	93								
70	100	71	84	98								
75	105	76	89	103								
80	112	81	94	109						9.5		
85	116	86	98	114								
90	122	91	103	119						10		
100	130	101	113	127								
110	144	112	126	141								
120	154	122	136	151								
130	165	132	146	162						10.6		
140	175	142	156	172								
150	190	152	168	187								
160	200	162	178	197								
180	220	182	198	217								
200	240	202	218	237								

注:1. 表内 $d_2、d_4、H_1、H_2、H_3$ 及 H_4 等极限偏差,按未注公差执行。

2. 密封压套材料为 A3 或 H62

注:1. 表内 d_2, d_4, H_1, H_2, H_3 及 H_4 等极限偏差,按未注公差执行。

2. 密封压套材料为 A3 或 H62

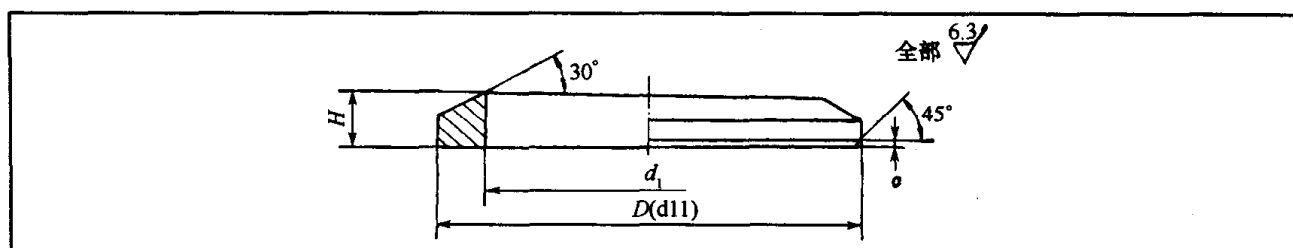
②平垫的型式及系列尺寸见表 6-99。

③安装示例及密封槽的要求推荐如图 6-56 所示。

注:①如果用螺帽压紧时,在螺帽与橡胶密封圈之间应装有金属垫圈。②真空室内表面各零件表面粗糙度:密封面 R_a 的值为 $1.6\mu\text{m}$,其它面 R_a 的值为 $3.2\mu\text{m}$,轴的表面粗糙度 R_a 的值为 $0.8\mu\text{m}$ 。

表 6-99 平垫尺寸

(单位:mm)



(续)

轴径 d	D	d_1	H		c	轴径 d	D	d_1	H		c
			尺寸	允差					尺寸	允差	
6	13	6.5	3	-0.10	0.5	55	67	56	4	-0.10	1.0
8	15	8.5	3			60	74	61	4	-0.15	
10	17	11	3.5			65	79	65	4		
12	19	13	3.5		70	84	71	4			
15	24	16	3.5		75	89	76	5			
16	25	17	3.5		80	94	81	5			
18	27	19	3.5		85	98	86	5			
20	29	21	3.5		90	103	91	5			
22	31	23	3.5		100	113	101	5			
25	34	26	3.5		110	126	112	5			
28	37	29	3.5		120	136	122	5			
30	40	31	4		130	146	132	5			
32	42	33	4		140	156	142	5			
35	45	36	4		150	169	152	5			
40	52	41	4		160	178	162	5			
45	57	46	4		180	198	182	5			
50	62	51	4		200	218	202	5			

注:1. 表内 d_1 及 c 的允差,按未注公差执行。

2. 如因结构关系, H 可以改变。

3. 垫材料为 A3 或 H62

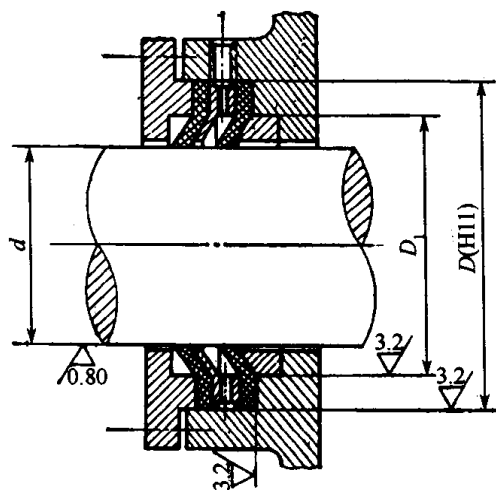


图 6-56 J 形动密封结构

3. JO 形和骨架型真空用橡胶密封圈型式及尺寸(摘自 JB 1091—91)

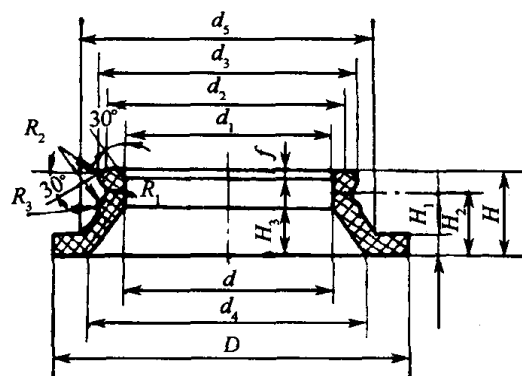
本标准适用于外部为大气压力,真空室压力高于 $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 的旋转真空机械设备的密封,在规定的温度下且旋转线速度低于 2m/s ,转速低于 2000r/min 。

(1)JO 形真空用橡胶密封圈型式及尺寸

①JO 形真空用橡胶密封圈的型式及系列尺寸应符合见表 6-100 的规定。

表 6-100 JO 形橡胶圈尺寸

(单位:mm)



轴 径 d	D		d_1		d_2	d_3	d_4	d_5	H	H_1	H_2	H_3	R_1	R_2	R_3	f
	尺寸	允差	尺寸	允差												
6	25	± 0.6	5.5	-0.4	9	12	13	15	10	2.5	7.5	6		0.5	0.3	
8	26		7.5		11	14	15	17								
10	28		9.5		14	17	18	20	12	3	9	7	1.2	0.6	0.4	0.5
12	30		11.5		16	19	20	22								
14	32		13.5		18	21	22	24	13	10	8					
15	33		14.5		19	22	24	25								
16	34	± 0.6	15.5	-0.5	20	23	25	27	14		11					
18	38		17.5		22	25	27	29								
20	42		19.5		24	27	29	31	15	4	12	9	1.4	0.9	0.5	1.0
22	45		21.5		26	29	32	34								
25	48		24.5		29	32	35	37	17		13	10				
28	52		27.5		32	35	38	40								
30	54	± 0.8	29.5	-0.6	34	37	40	42	19	5	15	12	1.5	1.0		
32	56		31		36	40	44	46								
35	60		34		39	43	47	49	20	6	16	13	1.6	1.1	0.6	1.5
40	66		39		44	48	52	54								
45	72		44		49	53	57	59	21	6	17	14				
50	76		49		54	58	62	64								
55	82	± 0.9	54	-0.7	59	63	68	70	19		15	12	1.5	1.0		
60	90		59		64	68	73	75								
65	95		64		69	73	79	80	20		16	13	1.6	1.1	0.6	1.5
70	100		69		74	78	83	85								
75	105		74		79	83	89	90	21	6	17	14				
80	110		79		84	89	94	95								
85	115	± 1.0	84	-0.8	89	94	98	100	20		16	13	1.6	1.1	0.6	1.5
90	120		89		94	99	104	105								
100	130		99		105	110	117	118	21	6	17	14				
110	144		108		115	120	127	128								
120	154		118		125	130	137	139	20		16	13	1.6	1.1	0.6	1.5
130	165		128		135	140	148	149								
140	175	± 1.0	138	-0.9	145	150	158	160	21	6	17	14				
150	190		148		155	160	168	170								
160	200		158		165	170	178	180	20		16	13	1.6	1.1	0.6	1.5
180	220		178		185	190	198	200								
200	240		198		205	210	218	220	21	6	17	14				

②标记示例:JO 形真空用橡胶密封圈 $d = 50\text{mm}$, 标记为

JO 形密封圈 $d50$ JB 1091

(2)JO 形真空用橡胶密封圈技术要求

①工作介质为机械泵油、扩散泵油或真空油脂。

②工作温度为 $-25^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

③在充保护气体情况下工作时,其保护气体压力不高于 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

④胶料的物理机械性能应保证气体压力不高于 10^{-4}Pa 。

⑤JO 形真空用橡胶密封圈工作面上不允许有气泡、杂质和凹凸缺陷,其非工作面的外观质量应符合表 6-101 的规定。

表 6-101 JO 形橡胶圈外观质量

序号	缺陷名称	指 标	
		直径 50mm 以下	直径 50mm~200mm
1	气泡	非工作面,气泡直径不大于 1mm 者,不得多于 2 处	非工作面,气泡直径不大于 2mm 者,不得多于 2 处
2	杂质	非工作面,杂质面积不超过 1mm^2 者,不得多于 2 处	非工作面,杂质面积不超过 2mm^2 者,不得多于 2 处
3	凹凸缺陷	非工作面,凹凸不超过 0.5mm,面积不超过 2mm^2 者,不得多于 2 处	非工作面,凹凸不超过 0.5mm,面积不超过 6mm^2 者,不得多于 2 处
4	修边痕迹	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm	毛刺高度及剪损深度不得超过 0.3mm
5	合模缝错位	允许存在,但不得超过公差范围	允许存在,但不得超过 0.5mm

注:为使密封圈表面光滑,要求模具的表面粗糙度为 $R_a 0.2$ 或镀硬铬抛光

⑥附件及安装系列依据可参照附录 A(参考件)。

(3)骨架型真空用橡胶密封圈型式及尺寸

①骨架型真空用橡胶密封圈的型式及系列尺寸应符合图 6-57 及表 6-102 的规定。

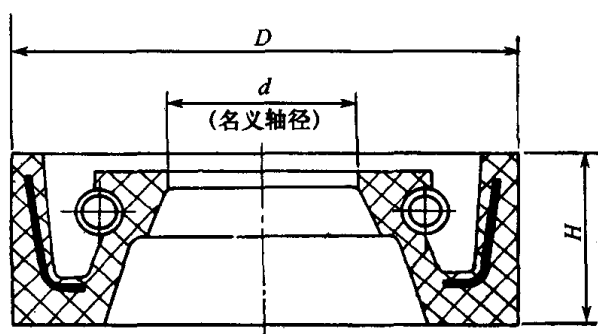


图 6-57 骨架型橡胶密封圈

②外径公差应符合表 6-103、高度公差应符合表 6-104 的规定。

③标记示例:

代号为 PD, $d = 22\text{mm}$ 、 $D = 40\text{mm}$ 、 $H = 10\text{mm}$ 的骨架型真空用橡胶密封圈,标记为:骨架型密封圈 PD22 \times 40 \times 10 JB1091

④制造技术要求按 HG 4—692 的规定。

⑤使用装配如图 6-58 所示。

第六章 真空密封

表 6-102 动密封轴封尺寸

(单位:mm)

内径 d	外径 D	高度 H	内径 d	外径 D	高度 H	内径 d	外径 D	高度 H
6	22	8	35	56	12	95	125	12
8	22	8	38	56	12	100	125	12
10	22	8	40	62	12	105	130	14
12	25	10	42	62	12	110	140	14
14	30	10	45	62	12	115	140	14
15	30	10	50	72	12	120	150	14
16	30	10	52	72	12	125	150	15
17	35	10	55	75	12	130	160	15
18	35	10	60	80	12	140	170	16
20	35	10	65	90	12	150	180	16
22	40	10	70	90	12	160	190	16
25	40	10	75	100	12	170	200	16
28	50	10	80	100	12	180	220	18
30	50	10	85	110	12	190	240	18
32	52	12	90	110	12	200	240	18

表 6-103 动密封传动轴外径公差

(单位:mm)

外径 D 范围	极限偏差
18~30	+0.25 +0.10
30~50	+0.30 +0.15
50~80	+0.40 +0.20
80~120	+0.50 +0.25
120~180	+0.60 +0.30
180~240	+0.70 +0.40

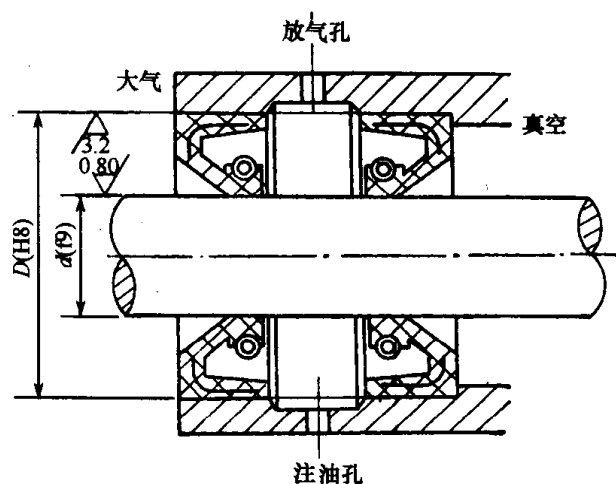


图 6-58 骨架型密封圈动密封结构
(真空室内表面各零件表面粗糙度:密封面 R_a 的
值为 $1.6\mu\text{m}$,轴 R_a 的值为 $0.8\mu\text{m}$)

表 6-104 动密封轴封高度公差

(单位:mm)

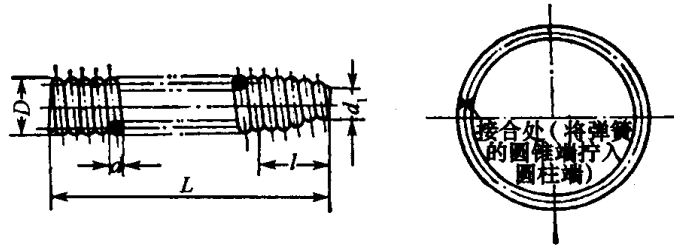
高度 H 范围	极限偏差	高度 H 范围	极限偏差
4~10	+0.4 -0.3	10~20	+0.5 -0.5

(4)附录 A(参考件)

①JO 形密封圈锁紧簧的型式及系列尺寸见表 6-105。

表 6-105 锁紧簧尺寸

(单位:mm)



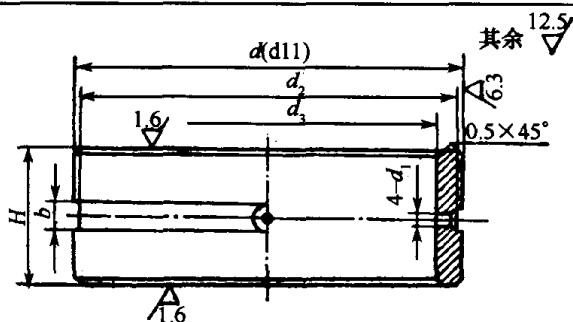
轴直径	螺旋圈数	展开长度	自由长度 L	锥部长度 l	弹簧外径 D	锥部外径 d_1	钢丝直径 d
6	89	475	27	2.5	2	1.0	0.3
8	112	596	34				
10	142	756	43				
12	121	606	49	3	2.5	1.2	0.4
14	136	682	55				
15	145	725	58				
16	151	758	61				
18	166	833	67				
20	184	920	74				
22	199	998	80				
25	221	1110	89				
28	244	1220	98				
30	261	1311	105				
32	221	1382	111	4	3.2	1.6	0.5
35	239	1495	120				
40	271	1696	136				
45	303	1897	152				
50	335	2098	168				
55	365	2286	183				
60	397	2487	199				
65	429	2688	215				
70	459	2877	230				
75	491	3078	246				
80	373	2940	262	5	3.2	1.6	0.7
85	395	3080	277				
90	418	3235	293				
100	468	3630	328				
110	400	2830	360	8	3.2	2	0.9
120	433	3160	390				
130	469	3380	422				
140	503	3660	453				
150	537	3870	484				
160	573	4130	516				
180	644	4640	580				
200	713	5150	642				

注:弹簧的材料及热处理条件等应符合 YB 248 的规定

②JO形密封圈密封压套的型式及系列尺寸见表 6-106。

表 6-106 压套尺寸

(单位:mm)



轴 径	d	d_2	d_3	H	b	d_1	轴 径	d	d_2	d_3	H	b	d_1
6	25	24	19	19	5	2	55	82	80	74	30	7	3
8	26	25	20				60	90	88	80			
10	28	27	22				65	95	93	85			
12	30	28	24	23			70	100	98	90	32		
14	32	30	26				75	105	103	95			
15	33	32	27				80	110	108	100			
16	34	33	28				85	115	113	105			
18	38	36	31				90	120	118	110			
20	42	40	35				100	130	128	120			
22	45	43	37	25			110	144	142	132	34		
25	48	46	40				120	154	152	142			
28	52	50	44				130	165	163	153			
30	54	52	46				140	175	173	163			
32	56	54	48				150	190	188	174			
35	60	58	52				160	200	198	184			
40	66	64	58				180	220	218	204			
45	72	70	64				30	200	240	238			
50	76	74	68										

注:1. 表内 d_2 、 d_3 、 H 、 b 及 d 等允差,按未注公差执行;

2. 压套的材料为 A3 或 H62

③JO形密封圈安装示例及密封槽的要求推荐如图 6-59 所示。

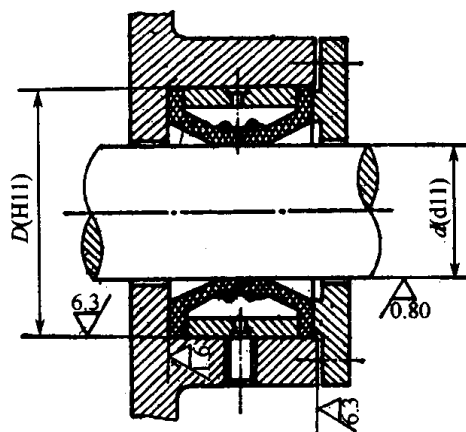


图 6-59 JO形动密封结构

(如果用螺帽压紧时,在螺帽与橡胶密封圈之间应装有金属垫圈。

真空室内表面各零件表面粗糙度:密封面 R_a 的值为 $1.6\mu\text{m}$,

其它面 R_a 的值为 $3.2\mu\text{m}$,轴 R_a 的值为 $0.8\mu\text{m}$)

(三) 金属波纹管密封

1. 金属波纹管密封典型结构图

金属波纹管密封典型结构如图 6-60 所示。

2. 金属波纹管

环形单层金属波纹管型式、基本参数与尺寸(摘自 JB2388—87)

①波纹管按两端配合部分的结构分为五种型式,如图 6-61 所示:

A 型:两端均为外配合 代号: A

B 型:两端均为内配合 代号: B

C 型:一端为外配合,另一端为内配合 代号: C

AD 型:一端为外配合,另一端带底 代号: AD

BD 型:一端为内配合,另一端带底 代号: BD

如有特殊要求,经用户及制造厂双方协商可采用其它配合型式,此时代号为 T。

②波纹管用下列四种材料制造:

a. 黄铜(H80) 代号: H

b. 锡磷青铜(QSn6.5—0.1) 代号: L

c. 铍青铜(QBe2 或 QBe1.9) 代号: P

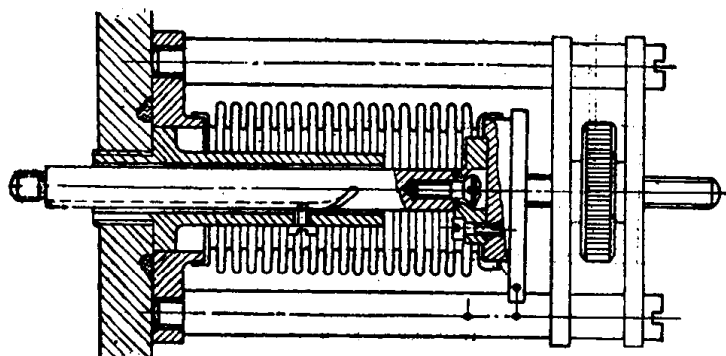
d. 不锈钢(1Cr18Ni9Ti) 代号: G

如有特殊要求,经用户及制造厂双方协商,允许采用其它材料,代号直接用材料牌号。

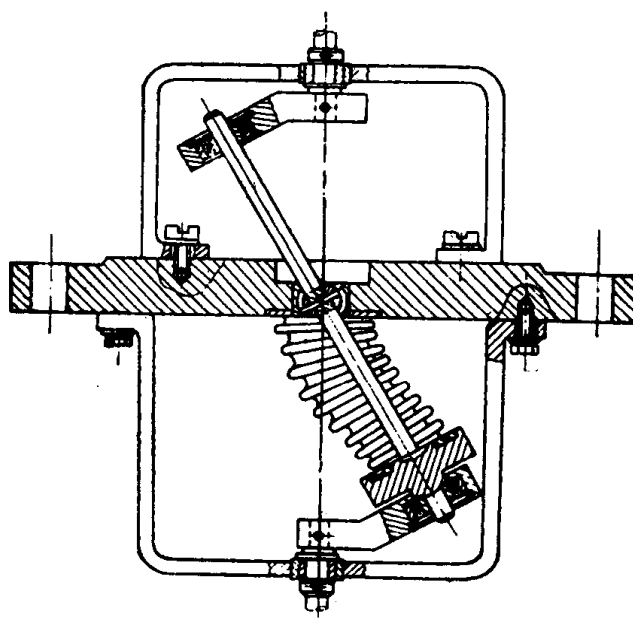
③波纹管的尺寸和基本参数应符合表 6-107、表 6-108 的规定。

④标记示例:波纹管两端均为外配合,材料用黄铜(H80),内径为 20mm,壁厚 0.1mm,波纹数 15 个,其标记为

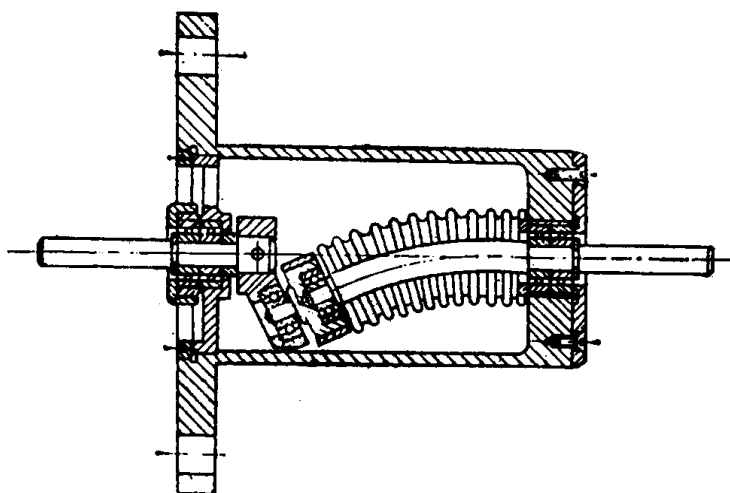
波纹管 AH20×0.1×15 JB2388—87



(a)



(b)



(c)

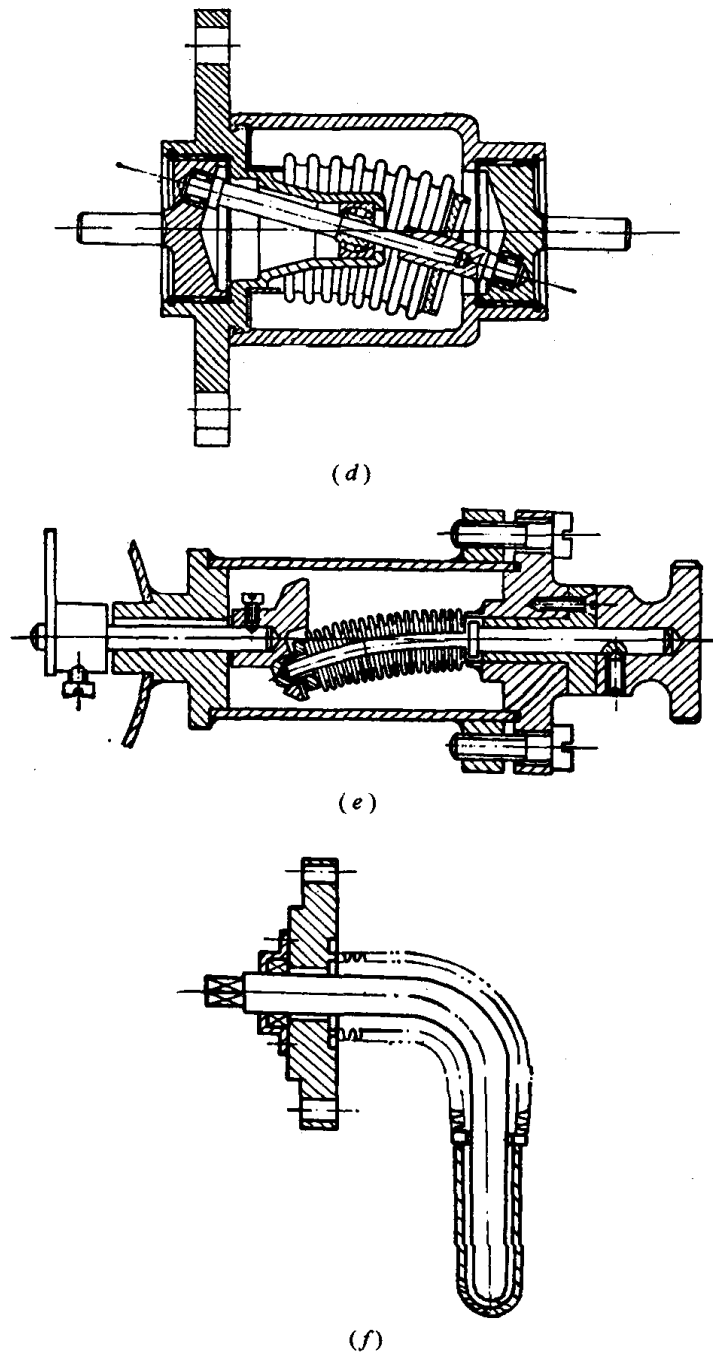


图 6-60 金属波纹管典型结构型式
(a)传递平动型式；(b)~(f)传递转动型式。

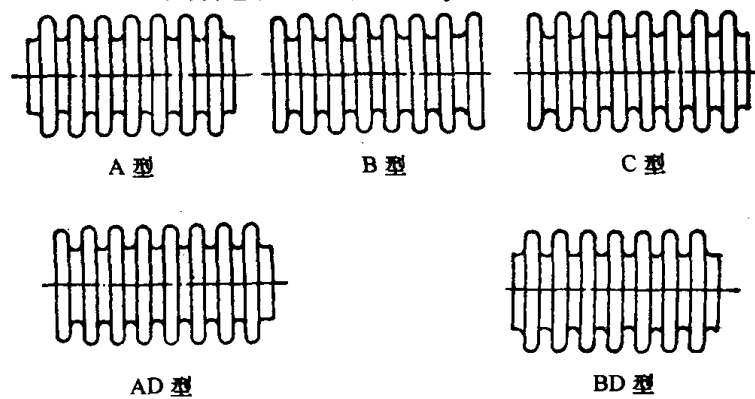
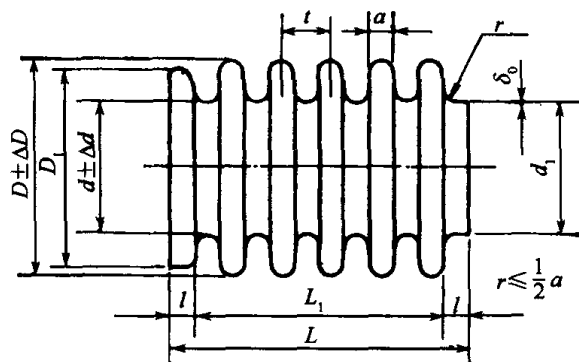


图 6-61 金属波纹管的形式

第六章 真空密封

表 6-107 金属波纹管尺寸

(单位:mm)



序号	内 径		外 径		波距	波厚	两端配合部分				有效面积
	d	Δd	D	ΔD	t	a	D_1	d_1	l		$F = \frac{\pi}{16}(D + d)^2$
									铜合金	不锈钢	
	mm										
1	4	+0.3	6	±0.4	0.8	0.48	5	4+2δ ₀	3	—	0.20
2	5	+0.3	8	±0.5	0.8	0.55	7	5+2δ ₀	3	—	0.33
3	6(6.2)	+0.4	10	±0.5	1.0	0.65	8	6+2δ ₀	3	—	0.50
4	8(7.5)	+0.4	12	±0.6	1.2	0.75	10	8+2δ ₀	3	3.5	0.79
5	10(9.5)	+0.4	15	±0.6	1.8	1.10	13	10+2δ ₀	3	3.5	1.23
6	11(11.5)	+0.4	18	±0.6	2.0	1.15	16	11+2δ ₀	3	3.5	1.65
7	12(12.5)	+0.4	20	±0.7	2.1	1.20	18	12+2δ ₀	3	3.5	2.01
8	14(14.5)	+0.4	22	±0.7	2.2	1.30	20	14+2δ ₀	3.5	4	2.54
9	16(16.5)	+0.4	25	±0.7	2.3	1.35	22	16+2δ ₀	3.5	4	3.30
10	18(18.5)	+0.5	28	±0.7	2.6	1.50	25	18+2δ ₀	3.5	4	4.15
11	22(21.5)	+0.5	32	±0.8	3.0	1.70	28	22+2δ ₀	3.5	4	5.73
12	24(24.5)	+0.5	36	±0.8	3.2	1.80	32	24+2δ ₀	3.5	4	7.07
13	25(25.5)	+0.5	38	±0.8	3.2	1.80	34	25+2δ ₀	3.5	4	7.79
14	28(27.5)	+0.5	40	±0.8	3.4	2.00	36	28+2δ ₀	4	5	9.03
15	32(31)	+0.6	46	±0.8	3.6	2.10	40	32+2δ ₀	4	5	11.82
16	35	+0.6	50	±0.8	3.8	2.20	45	35+2δ ₀	4	5	14.16
17	37	+0.6	55	±1.0	4.2	2.40	50	37+2δ ₀	4	5	16.62
18	40(41)	+0.6	60	±1.0	4.5	2.50	55	40+2δ ₀	4	5	19.64
19	48(47)	+0.6	70	±1.0	5.0	2.80	(65)	48+2δ ₀	4.5	6	27.34
20	55(54)	+0.7	80	±1.0	5.4	3.00	(75)	55+2δ ₀	4.5	6	35.78
21	65(64)	+0.7	90	±1.1	5.8	3.50	(85)	65+2δ ₀	5	7	47.17
22	75	+0.7	100	±1.1	6.0	3.60	(95)	75+2δ ₀	5	7	60.13
23	95(94)	+0.9	125	±1.3	7.5	4.50	(115)	95+2δ ₀	6	8	95.03
24	120(119)	+0.9	160	±1.3	10.0	6.00	(150)	120+2δ ₀	6	8	153.94
25	150(149)	+1.0	200	±1.3	12.0	7.00	(185)	150+2δ ₀	6	8	240.53

注:1. 括号内尺寸不推荐使用;

2. 有效面积 F 不适于括号内系列;3. δ_0 :波纹管壁厚

(单位:mm)

表 6-108 金属波纹管性能参数

序号	内径		壁厚 δ_0	一个波纹的刚度				一个波纹的最大允许位移				最大耐压力			
	d	δ_0		H80	$\times 9.8N$		H80	$/mm$		H80	$\times 0.1MPa$		H80	$/\times 0.1MPa$	
					QSn6.5-0.1	QBe2、QBe1.9		1Cr18Ni9Ti	QSn6.5-0.1		QBe2、QBe1.9	1Cr18Ni9Ti		QSn6.5-0.1	QBe2、QBe1.9
1	4	0.06	7.28	7.02	8.46	—	0.07	0.08	0.13	—	14.1	16.8	32.2	—	
2	4	0.08	15.60	15.00	18.10	—	0.05	0.06	0.10	—	18.0	21.4	41.2	—	
3	5	0.08	7.04	6.80	8.20	—	0.10	0.13	0.20	—	11.8	14.0	27.0	—	
4	5	0.10	13.78	13.32	16.04	—	0.08	0.10	0.16	—	14.2	16.9	32.4	—	
5	6	0.08	4.30	4.15	5.00	—	0.16	0.20	0.30	—	9.2	10.9	21.0	—	
6	6	0.10	8.58	8.28	9.98	—	0.13	0.16	0.25	—	11.0	13.0	25.0	—	
7	6	0.12	14.72	14.20	17.12	—	0.10	0.13	0.20	—	12.8	15.2	29.2	—	
8	8	0.08	3.30	3.20	3.85	5.70	0.23	0.28	0.40	0.19	7.4	3.8	17.0	23.0	
9	8	0.10	6.16	5.95	7.18	10.62	0.18	0.22	0.35	0.15	9.0	10.5	20.0	27.5	
10	8	0.12	10.50	10.15	12.20	18.10	0.15	0.18	0.29	0.12	10.5	12.5	24.0	32.5	
11	8	0.14	16.60	16.00	19.30	28.60	0.12	0.15	0.24	0.10	11.5	14.0	27.0	36.5	
12	10	0.10	4.75	4.60	5.55	8.18	0.29	0.35	0.58	0.24	8.4	10.0	19.3	26.0	
13	10	0.12	7.80	7.55	9.10	12.40	0.25	0.30	0.50	0.21	10.1	12.0	23.0	31.0	
14	10	0.14	12.00	11.60	13.95	20.65	0.17	0.21	0.34	0.14	11.8	14.1	27.0	36.5	
15	10	0.16	17.60	17.00	20.50	30.30	0.10	0.12	0.20	0.08	13.4	16.0	30.8	41.8	
16	11	0.10	3.50	3.40	4.10	6.00	0.39	0.48	0.78	0.32	6.4	7.7	15.0	20.0	
17	11	0.12	6.20	6.00	7.24	10.70	0.33	0.40	0.66	0.28	7.6	9.0	17.4	23.6	
18	11	0.14	9.50	9.15	11.00	16.35	0.23	0.28	0.46	0.20	8.7	10.3	19.8	26.8	
19	11	0.16	13.80	13.35	15.10	23.80	0.14	0.17	0.28	0.12	9.8	11.7	22.5	30.4	
20	12	0.10	2.65	2.55	3.10	4.55	0.50	0.62	0.80	0.42	5.4	6.5	12.5	17.0	
21	12	0.12	4.30	4.15	5.00	7.40	0.41	0.51	0.80	0.34	6.4	7.6	14.6	20.0	
22	12	0.14	6.55	6.35	7.65	11.30	0.35	0.42	0.69	0.29	7.4	8.8	17.0	23.2	
23	12	0.16	9.65	9.30	11.20	16.60	0.31	0.38	0.60	0.26	8.2	9.8	19.0	26.0	
24	14	0.10	2.90	2.80	3.38	5.00	0.50	0.61	0.80	0.41	5.0	5.8	11.2	15.4	
25	14	0.12	4.76	4.62	5.55	8.20	0.41	0.50	0.80	0.34	5.8	6.8	13.2	18.0	
26	14	0.14	7.40	7.12	8.60	12.75	0.35	0.43	0.68	0.29	6.6	8.0	15.2	20.8	
27	14	0.16	10.92	10.55	12.72	18.84	0.30	0.37	0.59	0.25	7.5	9.0	17.2	23.4	
28	16	0.10	2.45	2.38	2.85	4.22	0.62	0.76	0.86	0.51	3.9	4.7	9.0	12.4	
29	16	0.12	4.05	3.90	4.70	6.95	0.51	0.62	0.86	0.42	4.7	5.6	10.8	14.6	
30	16	0.14	6.38	6.15	7.40	10.95	0.43	0.52	0.83	0.35	5.3	6.2	12.2	16.6	
31	16	0.16	9.62	9.30	11.18	16.54	0.37	0.46	0.73	0.31	6.0	7.0	13.6	18.8	
32	18	0.10	1.92	1.86	2.24	3.30	0.77	0.94	1.00	0.60	3.5	4.2	8.0	11.0	

(续)

序号	内径 d	壁厚 δ_0	一个波纹的刚度				一个波纹的最大允许位移				最大耐压力			
			$/\times 9.8\text{N}$				$/\text{mm}$				$/\times 0.1\text{MPa}$			
			H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti	H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti	H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti
33	18	0.12	3.15	3.05	3.68	5.44	0.63	0.78	1.00	0.53	4.2	5.0	9.6	13.0
34	18	0.14	4.95	4.76	6.02	8.48	0.54	0.66	1.00	0.45	4.8	5.6	11.0	15.0
35	18	0.16	7.30	7.05	8.50	12.55	0.47	0.53	0.92	0.39	5.4	6.4	12.4	16.3
36	22	0.10	1.78	1.72	2.06	3.11	0.94	1.15	1.17	0.78	3.0	3.5	7.0	9.5
37	22	0.12	3.05	2.97	3.56	5.83	0.78	0.96	1.17	0.65	3.6	4.4	8.4	11.5
38	22	0.14	4.85	4.70	5.56	8.52	0.66	0.81	1.17	0.55	4.2	5.0	9.6	13.0
39	22	0.16	7.26	7.05	8.46	12.76	0.58	0.71	1.12	0.48	4.7	5.6	10.8	14.8
40	22	0.18	10.30	10.00	12.00	18.10	0.51	0.62	0.99	0.42	5.2	6.2	12.0	16.4
41	24	0.10	1.68	1.62	1.95	2.90	1.08	1.26	1.26	0.90	2.5	3.0	5.8	8.0
42	24	0.12	2.75	2.68	3.20	4.75	0.94	1.15	1.26	0.78	3.0	3.6	7.0	9.5
43	24	0.14	4.24	4.10	4.92	7.30	0.76	0.94	1.26	0.63	3.5	4.2	8.2	11.0
44	24	0.16	6.25	6.04	7.25	10.75	0.67	0.82	1.26	0.55	4.0	4.6	9.0	12.5
45	24	0.18	8.85	8.55	10.30	15.25	0.58	0.72	1.14	0.48	4.4	5.4	10.2	13.5
46	25	0.12	1.88	1.82	2.20	3.25	1.04	1.26	1.26	0.86	2.8	3.2	6.2	8.5
47	25	0.14	2.95	2.85	3.45	5.05	0.88	1.08	1.26	0.73	3.2	3.8	7.2	9.6
48	25	0.16	4.35	4.20	5.03	7.50	0.77	0.95	1.26	0.64	3.6	4.4	8.2	11.2
49	25	0.18	6.20	6.00	7.24	10.70	0.68	0.84	1.26	0.56	4.0	4.8	9.2	12.5
50	25	0.20	8.60	8.30	10.00	14.80	0.61	0.74	1.18	0.50	4.4	5.2	10.0	13.8
51	28	0.12	2.28	2.20	2.65	3.90	1.08	1.26	1.26	0.90	2.8	3.2	6.4	8.6
52	28	0.14	3.50	3.40	4.10	6.05	0.92	1.13	1.26	0.76	3.2	3.8	7.2	10.0
53	28	0.16	5.15	5.00	6.00	8.88	0.80	0.98	1.26	0.66	3.6	4.4	8.4	11.4
54	28	0.18	7.25	7.00	8.45	12.50	0.71	0.87	1.26	0.58	4.0	4.8	9.4	12.6
55	28	0.20	0.00	9.65	11.60	17.18	0.63	0.78	1.23	0.53	4.2	5.0	10.0	13.5
56	32	0.12	1.70	1.60	2.00	3.00	1.28	1.35	1.35	1.06	2.2	2.5	5.1	7.0
57	32	0.14	2.62	2.52	3.05	4.62	1.09	1.34	1.35	0.90	2.4	3.0	6.0	8.2
58	32	0.16	4.00	3.80	4.58	6.86	0.96	1.17	1.35	0.79	3.0	3.6	7.0	9.4
59	32	0.18	5.60	5.40	6.52	9.78	0.84	1.04	1.35	0.70	3.4	4.0	7.6	10.6
60	32	0.20	7.78	7.50	9.06	13.50	0.76	0.93	1.35	0.63	3.7	4.4	8.5	11.6
61	35	0.12	1.58	1.52	1.84	2.72	1.42	1.44	1.44	1.18	2.0	2.4	4.6	6.2
62	35	0.14	2.48	2.38	2.88	4.25	1.21	1.44	1.44	1.00	2.2	2.7	5.2	7.0
63	35	0.16	3.66	3.52	4.26	6.30	1.05	1.29	1.44	0.87	2.5	3.0	5.9	8.0
64	35	0.18	5.16	4.93	6.00	8.90	0.93	1.14	1.44	0.77	2.8	3.4	6.6	9.0
65	35	0.20	7.06	6.82	8.22	12.18	0.84	1.03	1.44	0.69	3.2	3.8	7.2	10.0

(续)

序号	内径		壁厚		一个波纹的刚度				一个波纹的最大允许位移				最大耐压力			
	d	δ ₀	H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti	H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti	H80	QSn6.5-0.1	QBz2、QBz1.9	1Cr18Ni9Ti		
/mm			/×9.8N			/mm			/×0.1MPa							
66	37	0.14	1.55	1.50	1.80	2.66	1.51	1.62	1.62	1.25	2.0	2.4	4.8	6.4		
67	37	0.16	2.30	2.16	2.60	3.85	1.32	1.62	1.62	1.10	2.4	2.8	5.4	7.4		
68	37	0.18	3.18	3.06	3.70	5.50	1.16	1.42	1.62	0.96	2.6	3.2	6.0	8.2		
69	37	0.20	4.40	4.25	5.10	7.55	1.04	1.28	1.62	0.86	2.8	3.4	6.6	9.0		
70	40	0.14	1.46	1.42	1.70	2.56	1.80	1.80	1.80	1.59	1.8	2.2	4.2	5.8		
71	40	0.16	2.18	2.12	2.55	3.84	1.66	1.80	1.80	1.37	2.0	2.4	4.8	6.4		
72	40	0.18	3.10	3.00	3.60	5.44	1.47	1.80	1.80	1.22	2.2	2.8	5.2	7.2		
73	40	0.20	4.24	4.12	4.94	7.45	1.32	1.62	1.80	1.10	2.5	3.0	5.8	8.0		
74	48	0.16	1.53	1.48	1.78	2.63	2.00	2.00	2.00	2.00	1.7	2.0	3.8	5.2		
75	48	0.18	2.15	2.07	2.50	3.70	2.00	2.00	2.00	1.80	1.8	2.2	4.4	6.0		
76	48	0.20	2.90	2.80	3.38	5.00	1.94	2.00	2.00	1.61	2.0	2.4	4.8	6.4		
77	48	0.22	3.82	3.70	4.48	6.60	1.75	2.00	2.00	1.45	2.2	2.8	5.2	7.2		
78	55	0.16	1.40	1.35	1.65	2.40	2.16	2.16	2.16	2.16	1.4	1.7	3.2	4.4		
79	55	0.18	1.95	1.85	2.25	3.30	2.16	2.16	2.16	2.16	1.6	1.8	3.5	4.8		
80	55	0.20	2.60	2.50	3.00	4.45	2.16	2.16	2.16	1.98	1.8	2.0	4.0	5.4		
81	55	0.22	3.36	3.25	3.95	5.80	2.16	2.16	2.16	1.80	1.8	2.2	4.2	5.8		
82	65	0.16	1.42	1.36	1.64	2.44	2.05	2.05	2.05	2.05	1.2	1.6	3.0	4.0		
83	65	0.18	1.92	1.85	2.24	3.32	2.05	2.05	2.05	2.05	1.4	1.8	3.4	4.5		
84	65	0.20	2.65	2.54	3.06	4.55	2.05	2.05	2.05	2.04	1.6	1.8	3.6	5.0		
85	65	0.25	4.90	4.75	5.70	8.45	1.95	2.05	2.05	1.62	2.0	2.4	4.6	6.2		
86	75	0.16	2.68	2.60	3.12	4.62	2.16	2.16	2.16	2.16	1.0	1.2	2.4	3.2		
87	75	0.20	4.35	4.20	5.05	7.50	2.16	2.16	2.16	1.74	1.4	1.5	3.0	4.0		
88	75	0.25	7.75	7.50	9.00	13.35	1.65	2.03	2.16	1.37	1.6	2.0	3.5	5.0		
89	75	0.30	2.35	11.90	14.35	21.25	1.38	1.70	2.16	1.14	2.0	2.4	4.5	6.0		
90	95	0.30	18.75	—	—	15.10	2.15	—	—	1.80	1.5	—	—	5.0		
91	95	0.40	18.60	—	—	32.05	1.60	—	—	1.30	2.0	—	—	6.2		
92	95	0.50	34.40	—	—	59.30	1.26	—	—	1.05	2.5	—	—	8.0		
93	120	0.30	5.90	—	—	10.20	3.60	—	—	3.25	1.2	—	—	4.0		
94	120	0.40	12.00	—	—	20.70	2.92	—	—	2.42	1.8	—	—	5.5		
95	120	0.50	21.90	—	—	37.70	2.31	—	—	1.92	2.0	—	—	6.5		
96	150	0.30	4.50	—	—	7.75	4.50	—	—	4.50	1.0	—	—	3.0		
97	150	0.40	8.50	—	—	14.60	4.10	—	—	3.40	1.2	—	—	4.0		
98	150	0.50	14.95	—	—	25.75	3.28	—	—	2.72	1.5	—	—	5.0		

3. 焊接波纹管

焊接波纹管是轴对称管状波纹薄片相互焊接而成的。与压制波纹管相比,在轴向力、横向力和弯矩作用下能产生较大的位移,广泛用于真空传动密封、轴向运动的补偿元件、轴向封口、伸缩接头等。

WMV 系列焊接波纹管的技术性能和尺寸见表 6-109、表 6-110。

表 6-109 WMV 系列焊接波纹管性能参数

漏 率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	最大压缩位移 /%	寿 命 工作次数	工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	最高耐压力 /Pa	爆破压力 /Pa	刚 度 ^① / $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$
$<1.3\times 10^{-10}$	50	$5\times 10^5\sim 1\times 10^6$	<300	2.6×10^6	1×10^7	4.9~34.3

注:①刚度:压缩 1mm 所需的力

表 6-110 WMV 系列焊接波纹管尺寸

(单位:mm)

型 号	波 纹 管 尺 寸			
	内径 d	外径 D	片厚 s	波距 t
WMV-8	8	16	0.1	0.8
WMV-10	10	20		1.0
WMV-16	16	25		0.8
WMV-18	18	28		1.0
WMV-22-1	22	35		1.2
WMV-22-2	22	40	0.12	1.4
WMV-25	25	40		1.25
WMV-30	30	50	0.1~0.12	1.2~1.4
WMV-32	32	57	0.15	3
WMV-38	38	55		1.3
WMV-43	43	65	0.15~0.2	1.5~1.9
WMV-48-1	48	65		1.3
WMV-48-2	48	70		1.8~2.2

(续)

型 号	波纹管尺寸			
	内径 d	外径 D	片厚 s	波距 t
WMV-53	53	75	0.2	1.8
WMV-56	56	102	0.15	3
WMV-58	58	80	0.2	1.8
WMV-63	63	85		2.0
WMV-68	68	90		
WMV-73	73	95		
WMV-85	85	115		2.2
WMV-88	88	112		
WMV-110	110	140		3
WMV-150	150	190		
WMV-165	165	203		
WMV-178	178	216		

注:丹东市振安金属波纹管密封件厂生产

中国科学院沈阳科学仪器研制中心有限公司生产的 HB 系列焊接波纹管的技术性能参数为:

- 漏率: $<10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$
- 压缩位移: 自由长度的 50%
- 寿命: 100 万次以上
- 烘烤温度: $<300^{\circ}\text{C}$
- 焊接波纹管尺寸见表 6-111。

HB 系列焊接波纹管接头型式尺寸见表 6-112。

表 6-111 接头尺寸

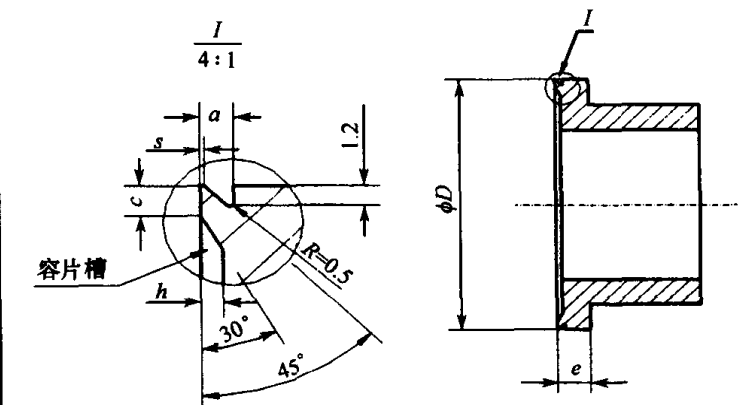
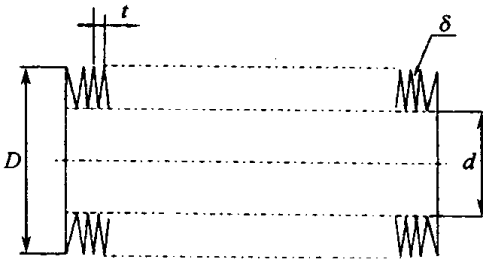
		D	a	c	s	h	e
		<50	1.5	1.52	0.2~0.25	0.8	4~5
		>50	1.7	1.52	0.2~0.25	1~1.2	4~5

表 6-112 HB 系列焊接波纹管尺寸

(单位:mm)

									
规格尺寸	内径 d	外径 D	片厚 δ	波距 t	规格尺寸	内径 d	外径 D	片厚 δ	波距 t
HB-8	8	16	0.1	0.8	HB-63	63	85	0.15	1.8
HB-10	10	20	0.1	1.0	HB-68	68	90	0.15	2
HB-16	16	25	0.1	0.8	HB-73	73	95	0.2	2
HB-19	19	30	0.1	0.8	HB-75	75	105	0.2	2.5
HB-22	22	35	0.1	1.2	HB-85	85	115	0.2	2.2
HB-22	22	40	0.1	1.3	HB-95	95	125	0.2	3
HB-30	30	50	0.12	1.2	HB-110	110	140	0.2	2.5
HB-38	38	55	0.15	1.3	HB-130	130	170	0.2	2.5
HB-43	43	65	0.15	1.5	HB-150	150	190	0.2	2.5
HB-48	48	65	0.15	1.5	HB-178	178	216	0.2	2.5
HB-48	48	70	0.15	1.5	HB-300	300	340	0.2	5
HB-53	53	75	0.15	1.8	HB-420	420	510	0.5	7
HB-58	58	80	0.15	1.8	HB-613	613	703	0.5	7

(四) 液态金属密封

利用液态金属密封,能改善转轴的密封性能,但要求这种金属必须满足下面几个条件:

- ①室温下是液态;
- ②表面张力大于 $5 \times 10^{-1} \text{N/m}$;
- ③500℃时蒸气压在 10^{-6}Pa 以下;
- ④容易浸润常用金属、玻璃、石英及陶瓷。

常见的低熔点金属及合金见表 6-113。

表 6-113 低熔点金属及合金

(单位:mm)

材 料	熔点/℃	蒸气压		表面张力	
		/Pa	/℃	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	/℃
镓 Ca	29.9	$< 10^{-6}$	500	73.5	30~40
铟 In	156.4	$< 10^{-6}$	500	34.0	170~250
锡 Sn	231.9	$< 10^{-6}$	500	52.6	300
				51.0	500
铋 Bi	271.0	$< 10^{-6}$	300	37.6	300
				36.3	500
铅 Pb	327.4	$< 10^{-6}$	350	42.2	350
				43.1	500
62.5 镓、21.5 铟、16 锡	10.7	$< 10^{-6}$	500	> 50.0	500

(续)

材 料	熔点/℃	蒸气压		表面张力	
		/Pa	/℃	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	/℃
62 镓、25 铟、13 锡	约 5				
69.8 镓、17.6 铟、12.5 锡	10.8				
76 镓、24 铟	15.7				
92 镓、8 铟	约 20				
~70 镓~30 锡	约 60				
49 铋、18 铅、12 锡、21 铟	57.8				
49 铋、18 铅、15 锡、18 铟	57.8~69				
32.7 铋、7.5 铅、16.7 锡、43.1 铟	58.8				
49.5 铋、17.6 铅、11.6 锡、21.3 铟	58.2				

液态金属形成真空密封主要是靠液态金属表面的张力,因此,它要求转轴与密封面的间隙最大不能超过 10^{-2}cm ,一般在 $0.1\text{mm}\sim 0.15\text{mm}$ 。液态金属长期暴露在大气中会因氧化产生杂质,所以要尽量避免同大气接触。液态金属密封的保护真空应在 10^3Pa 以下,旋转速度从 10r/min 到数千转每分钟。

图 6-62~图 6-64 给出了几种液态金属转轴密封的结构型式。

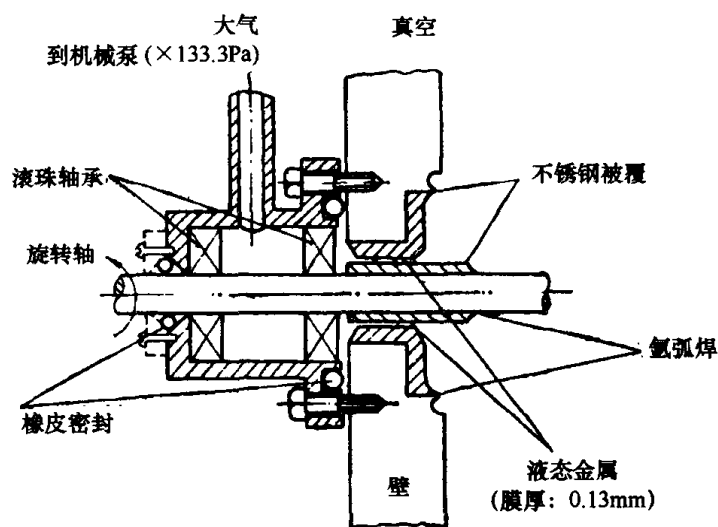


图 6-62 液态金属转轴密封

(五) 磁力传动密封

磁力传动是采用现代最新永磁材料或电磁力,使主动件与从动件之间靠磁力的超矩特性,实现无接触、无泄漏传递扭矩(功率)的一种新技术。实现这一技术的装置称为磁力驱动器,或称磁力传动、磁力耦合器、磁力联动器等,可用于对密封要求较高的真空系统中。磁力传动技术具有以下应用特点:

- ①磁力传动传递力矩,是利用磁力的超矩作用特性而实现的。可转化主轴传递扭矩的动密封为静密封,实现动力的零泄漏传递。
- ②可避免高频振动传递,实现工作机械的平衡运行。
- ③可实现工作机械运行中的过载保护。

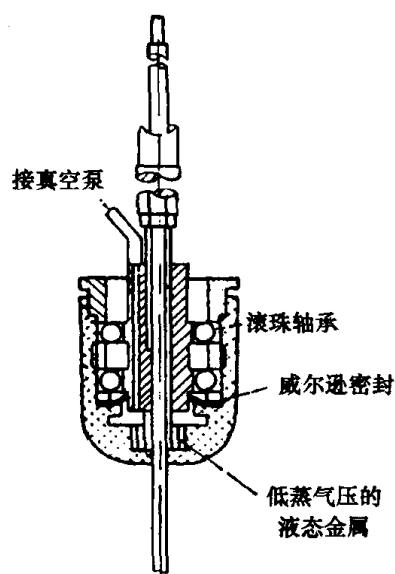


图 6-63 超高真空液态金属密封高速转轴

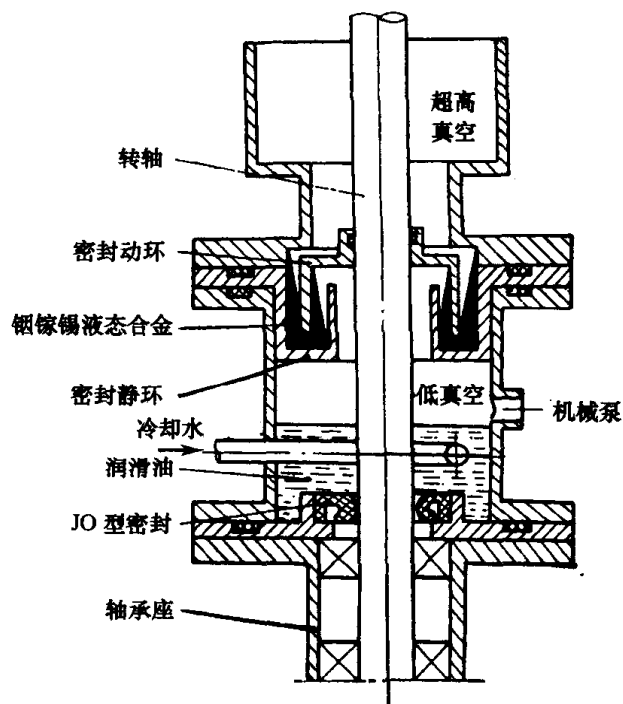


图 6-64 超高真空转轴密封

④与刚性联轴器相比较,安装、拆卸、调试、维修均较方便。

⑤可净化环境,消除污染。

1. 磁力传动器结构

最简单的磁力传动结构如图 6-65 所示。在真空技术中选用圆筒型磁力传动器较多,圆盘型多用于小型传动和一些特殊装置上。

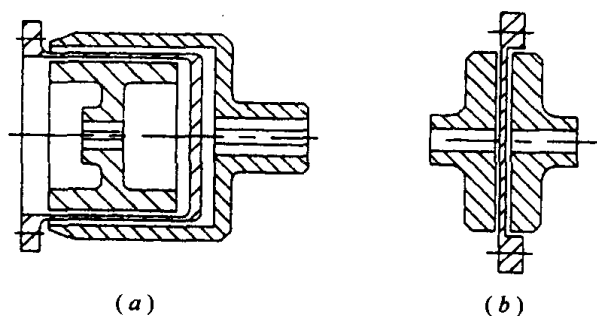


图 6-65 磁力传动结构示意图
(a)圆筒型; (b)圆盘型。

选用稀土永磁材料,利用它的高磁能积、高矫顽力的特性把不同极性的磁体密集排列在一起,如图 6-66 所示。当没有外力作用时,主动两侧相对的不同极性相互吸合在一起,当主动侧在外力作用下产生位移,从动侧由于惯性及负载的作用使主动、从动两侧磁极发生错位,此时主动、从动两侧的磁极除了异极的相互吸引力之外,还有同极的相互斥力作用。吸力和斥力形成了“推拉”作用力,从而带动从动侧位移,实现磁力传动。同轴型永磁体磁力传动器,是由内转子和外转子组成的“组合推拉磁路”结构。旋转磁体在真空室外,用手或电机驱动,真空室壁选用非磁体材料(无磁不锈钢、铝合金等)制成隔离套,变动密封为静密封,因此,从根本上消除

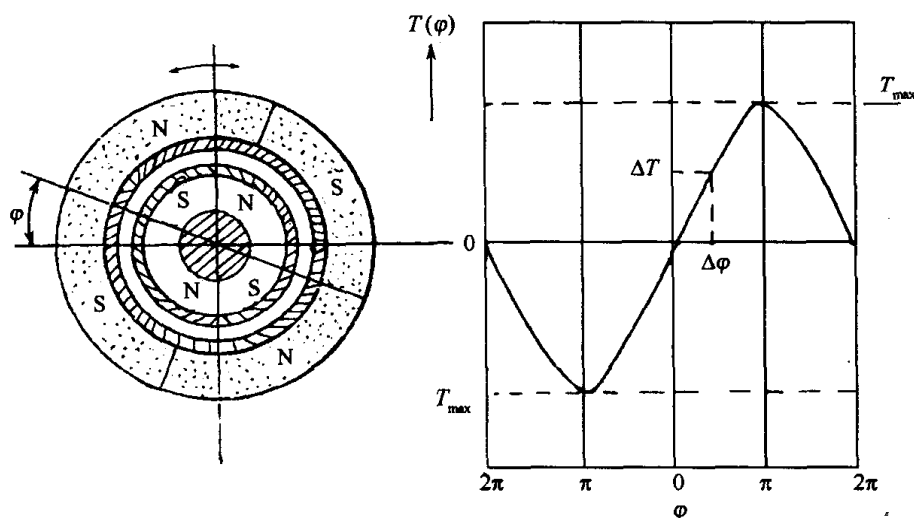


图 6-66 圆筒型磁路组合结构

了转动轴密封处产生的泄漏。

2. 磁力传动器力矩的计算

磁力驱动主要应计算驱动力矩的大小,借以判断所设计的磁力驱动器是否能够满足工程应用的要求。

在磁力驱动器中,磁扭矩(即驱动力矩)的计算方法有等效磁荷法、马克斯威应力法、静磁能理论力矩求解法、气隙数值法、力矩有限元算法等等。力矩的计算方法较多,计算也比较复杂,现仅就工程上常用的高斯定理求解法介绍如下。

这种方法是采用高斯定理和永磁材料的 $B-H$ 曲线而求解磁力矩的。通常是将计算式编成程序,在计算机上对各种磁路模型进行反复运算,改变已知参数进行优化设计的一种工程上较为实用的方法,其力矩 T 的表达式为

$$T = 3.92 \times 10^{-5} K M H_m S t_h R_c \sin\left(\frac{m}{2} \varphi\right) \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (6-9)$$

式中 K ——磁路系数,通过图解法求得

$$K = \left(\frac{r}{c}\pi\right)^2 \cos\beta$$

$$r = b - a$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\beta}$$

不同的磁路,系数不同,对于组合拉推磁路, $K = 4 \sim 6.4$;

$$M\text{——磁化强度, } M = \frac{10^{-4}}{4\pi} (B_m + H_m) \quad [\text{T}], \quad (6-10)$$

B_m, H_m 为工作点的磁感应强度与磁场强度 $[\text{T}]$;

H ——外磁路在内磁体处产生的磁场强度 $[\text{T}]$;

$$H = N_1 4\pi M \left[1 - \frac{t_g}{\sqrt{t_g^2 + t_0^2}} \right] \eta \quad (6-11)$$

N_1 ——极面形状的经验系数,扇形极面 $N = 1.05$,长方形、正方形极面 $N = 1.24$;

t_g ——工作气隙[m];

t_0 ——磁极平均弧长,即 $t_0 = \frac{1}{2}(\text{内磁极外弧} + \text{外磁极内弧})$ [m];

η ——厚度系数;

m ——磁极极数;

S ——磁极的极面积[m²];

t_h ——磁体平均厚度,即 $t_h = \frac{1}{2}(t_{im} + t_{om})$ [m];

R_c ——作用到内磁极上磁力至转动中心的平均转动半径[m],

$$R_c = \frac{1}{2}(R_2 + R_3);$$

ϕ ——表示工作时的位移角(°);

经试验得到:

$\frac{t_h}{t_0}$	η
0.2 ~ 0.4	0.7
0.5 ~ 0.6	0.85
0.7 ~ 0.9	0.95

当 $\sin\left(\frac{m}{2}\varphi\right) = \sin 90^\circ$ 时力矩达到最大值,也就是说在 $\sin\left(\frac{m}{2}\varphi\right) = \sin 90^\circ$ 时,即内外磁体的位移为磁体在移动方向的宽度的一半时,力矩达到最大值,此时轴向力趋于零。

在工程设计中, T 值计算得到后,还应根据实用功率以及实际应用状态的不同,进行功率匹配计算或修正处理。

公式中参量关系如图 6-67 所示。

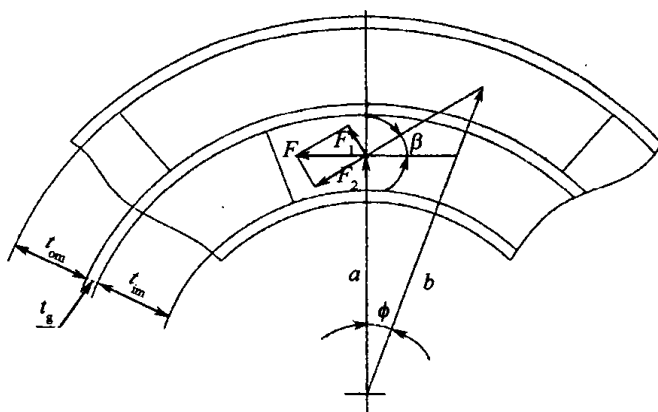


图 6-67 磁极尺寸图

t_{im} —内磁极厚度, t_{om} —外磁极厚度。

3. 磁性材料的选择

磁力传动的设计中,选择不同的永磁体对产品的性能影响很大,目前最常用的永磁体材料有铁氧体、钕钴和钕铁硼等。选用磁性材料时应考虑以下几点:

- ①使用温度及腐蚀、振动等技术、环境条件。
- ②磁力传动器在设备上的启动、运转状态,进行优化设计和可靠性评估。
- ③进行运行条件下的技术分析,经济合理地选用磁性材料,做到合理的性价比。常用磁性材料的主要性能参数,见表 6-114。

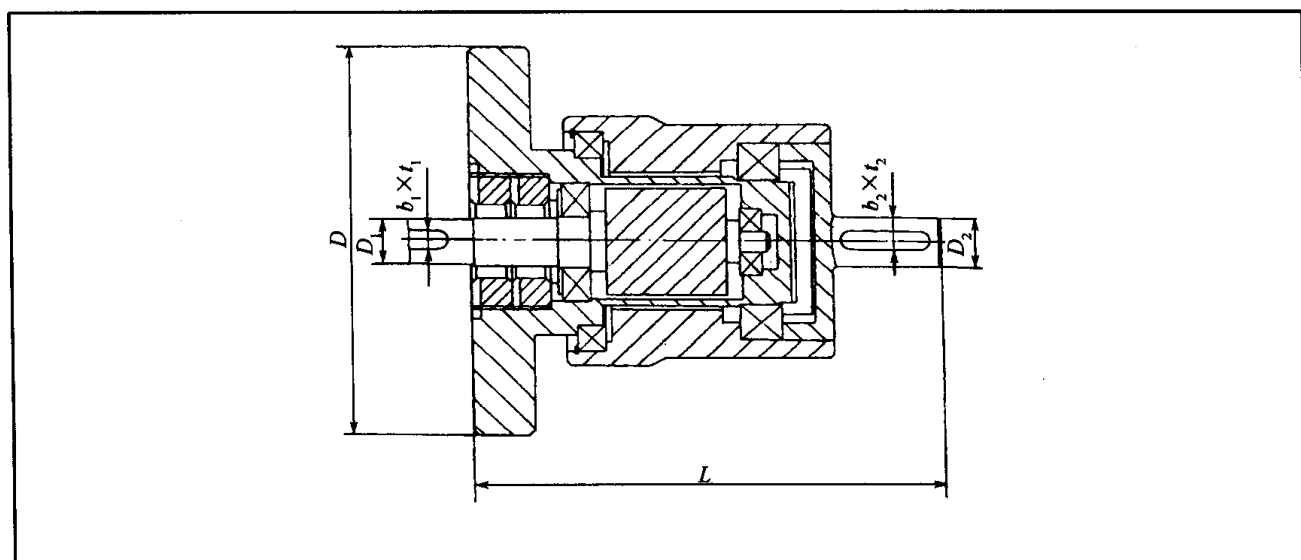
表 6-114 常用磁性材料性能 (单位:mm)

性 能 参 数	铁 氧 体	钐 钴	钕 铁 硼
剩磁/T	≥0.39	1.05	1.17
感应矫顽力/kA·M ⁻¹	≥240	676	844
内禀矫顽力/kA·M ⁻¹	≥356	≥1194	≥1592
最大磁能积/kJ·m ⁻³	≥3.4	26~30	31~33
温度系数/%·℃ ⁻¹	-0.18	-0.03	-0.126
可逆磁导率	1.1	1.03	1.05
居里温度/℃	460	850	340~400
密度/kg·m ⁻³	5.0×10 ³	8.4×10 ³	7.4×10 ³
电阻率/MΩ·cm ⁻²	>10 ⁴	85	144
硬度(HV)	530	550	600
抗弯强度/MPa	127.4	117.6	245
抗压强度/MPa	—	509.6	735
热膨胀系数/10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	11	9	3.4(//) -4.8(⊥)

4. 国产磁力传动器

甘肃省科学院磁力器件研究所生产的 CZM 系列磁力传动器,额定扭矩及外形尺寸参数见表 6-115。

表 6-115 CZM 系列磁力传动器外形尺寸及参数 (单位:mm)



(续)

型 号	额定扭矩/N·m	D_1	D_2	D	L	$b_1 \times t_1$	$b_2 \times t_2$
CZM-1	10	13	20	80	130	5×5	6×6
CZM-2	20	15	20	80	130	5×5	6×6
CZM-5	50	20	30	100	160	6×6	8×7
CZM-10	100	20	30	100	180	6×6	8×7
CZM-18	180	30	40	130	210	8×7	12×8
CZM-25	250	30	40	130	240	8×7	12×8
CZM-30	300	30	40	130	260	8×7	12×8
CZM-40	400	40	50	160	290	12×8	14×9
CZM-50	500	40	50	160	320	12×8	14×9
CZM-80	800	45	60	180	340	14×9	18×11
CZM-100	1000	45	60	180	370	14×9	18×11
CZM-120	1200	50	70	250	420	14×9	20×12
CZM-150	1500	50	70	250	500	14×9	20×12

(六) 磁流体密封

1965 年美国 Papell 发明一种磁流体是把磁铁矿等强磁性的细微粉末(约 0.1nm~10nm)放入水、油类、脂类、醚类等液体中形成稳定分散的一种胶态液体。这种液体在通常离心力和磁场作用下,既不下沉、凝聚又具有磁性,可被磁铁吸引。把这种液态磁性体用于真空转轴密封,称为真空磁流体密封。它与其它密封技术相比有下列优点:

①磁流体密封真空转轴的摩擦力很小,可减少功耗和提高轴的最高转速(可达 120000r/min)。采用低蒸气压磁流体密封,可使真空度维持在 10^{-7} Pa 以上。

②磁流体密封结构简单、维护方便,轴与极靴间的间隙较大,制造精度要求低。

③磁流体在密封空隙中是靠磁铁产生的磁场固定的,因此转轴的启动和停止比较方便。

磁流体密封装置在高温下不稳定,工作温度一般在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间。轴在过高或过低温度下工作时,需采取冷却或升温措施,从而使密封结构复杂化。

1. 磁流体密封原理

磁流体密封原理如图 6-68 所示。圆环形永久磁铁 1、极靴 2 和旋转轴 3 构成磁回路。磁铁产生的磁场使磁流体 4 集中在轴与极靴顶端缝隙中,形成一个所谓的磁流体密封 O 形环,从而实现密封。转轴材料可以是磁性体(图 6-68(a))和非磁性体(图 6-68(b));前者磁束集中于间隙处并通过转轴构成磁回路,后者磁束不通过转轴,而是通过密封间隙中的磁流体构成磁回路。

2. 磁流体的承压能力

磁流两侧承受的压力差 Δp 与磁流体两侧面的场强有关,也就是与磁流体在轴向上的厚度有关,而轴向厚度取决于磁流体注入量^①。磁流体耐压与注入量之间的实验曲线,如图 6-69

① 注入量是把磁靴与轴间的空隙体积作为单位注入量。

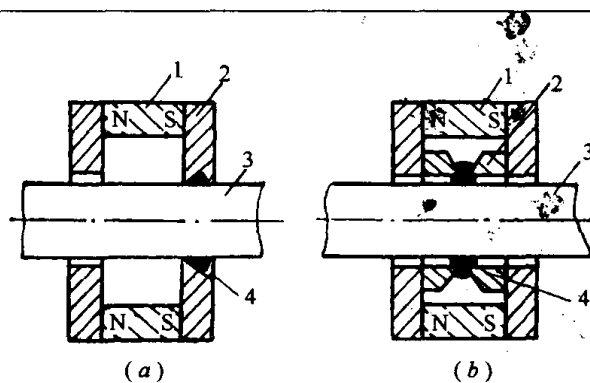


图 6-68 磁流体的密封原理及密封方式

1—永久磁铁；2—极靴；3—旋转轴；4—磁流体。

所示。可以看出,开始时增大磁流体注入量,耐压线性增加;但注入量达到一定值以后,耐压不再增加,而是稳定在某一恒定状态。图中注入量 6 倍以后,单极靴的耐压值平衡在 0.02MPa。

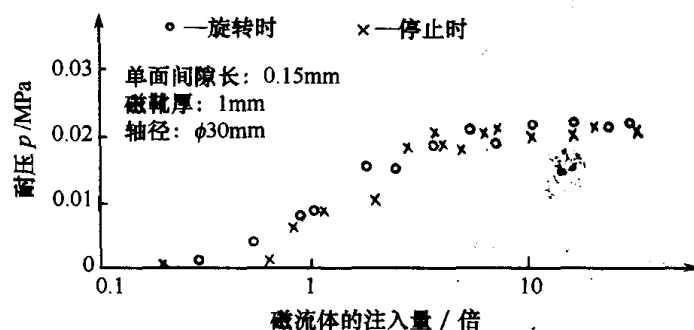


图 6-69 磁流体注入量与耐压的关系

图 6-68 的斜面齿型极靴的耐压值,当磁铁的场强很大时可按下式计算

$$\Delta p = \frac{B_i H}{4\pi} \quad (6-12)$$

式中 Δp ——压力差[Pa];

B_i ——磁流体极化强度[T];

H ——磁场强度[A/m]。

增加 B_i 可封住较大的压力差 Δp 。由于 B_i 的大小取决于磁流体种类,因此,在一定磁场下,密封装置的磁流体种类选定后,其单极靴的最大耐压能力也就确定了。表 6-116 给出了常用的磁流体的物理性质。

表 6-116 常用的磁流体的物理性质

材料种类 与牌号	磁饱和强度 /T	密度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粘度 /Pa·s	滴点 /℃	沸点 (蒸气压 133Pa)/℃	起始磁导率 /H·m ⁻¹	表面张力 /N·m ⁻¹	比热容 /J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	热膨胀系数 (体积) /m ³ ·m ⁻³ ·K ⁻¹
二脂润滑剂 D01	0.02	1.185	7.5	-37	148.9	0.5	—	—	—
矿物油 H01	0.02	1.05	0.3	4.7	76.7	0.4	0.023	1716.6	5×10^{-4}
H02	0.04	1.25	0.6	7	76.7	0.8	0.023	1716.6	4.8

(续)

材料种类 与牌号	磁饱和强度 /T	密度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粘度 /Pa·s	滴点 /℃	沸点 (蒸气压 133Pa)/℃	起始磁导率 /H·m ⁻¹	表面张力 /N·m ⁻¹	比热容 /J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	热膨胀系数 (体积) / $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
氟油 F01	0.01	2.05	250	-34.4	182.2	0.2	0.018	1967.8	5.9
脂类 E03	0.02	1.15	1.4	-56.7	148.9	0.4	0.026	3726.3	4.5
E03	0.04	1.30	3.0	-56.7	148.9	0.8	0.026	3762.3	4.5
E03	0.06	1.40	3.5	-62.2	40	1.0	0.021	3762.3	4.5
水基 A01	0.02	1.18	0.7	0(凝固点)	25.6	0.6	0.026	4186.8	2.0
A01	0.04	1.38	10	0(凝固点)	25.6	0.2	0.026	4186.8	2.8
聚苯醚 V01	0.01	2.05	750	10	260	0.2	—	—	—

3. 磁流体密封转轴转数对耐压的影响

密封轴转数增大(磁流体接触表面速度增大),高速旋转摩擦耗功增加而使磁流体温度升高,导致磁流载体液的蒸发和表面活性剂的脱离而恶化密封性能,耐压能力也将随磁流体温升而下降。图 6-70 给出耐压与温度的关系曲线。设计时应将转轴表面线速度控制在 20m/s 以下,或者对磁流体进行冷却,控制磁流体温度,防止温度过高。

磁流体油封的摩擦功耗,可用下式表示:

$$W = \frac{N\mu n^2 D^3 L_t}{118000 L_g} \quad (6-13)$$

式中 N ——密封级数;

μ ——磁流体粘度[Pa·s];

n ——密封轴转数[r/min];

D ——轴直径[m]

L_t ——每级密封齿型的平均宽度[m];

L_g ——磁回路间隙[m]。

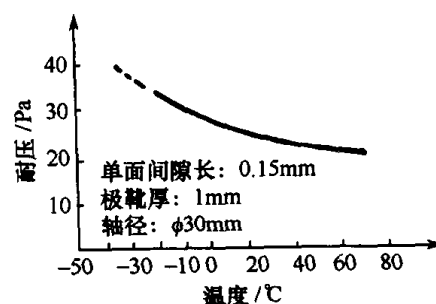


图 6-70 磁流体密封耐压与温度关系

4. 磁流体磁极靴结构设计

磁极靴顶端齿形设计是影响密封性能的重要因素。常见的齿型结构如图 6-71 所示。齿型的主要结构参数是 B/L_g 、 B/L_t 、 L_t/L_g 及 α_0 等, B 是齿宽,其余符号同前。图 6-71 中(a)型密封性能优于(b)型。表 6-117 是(a)型与(b)型的磁导率,磁导率大将增加磁流体的耐压,获得良好的密封性能。

表 6-117 (a)型与(b)型结构的磁导率

(单位: H/m)

型式	磁导率 B/L_t	最大磁导率		相对磁导率		平均磁导率	
		10	20	10	20	10	20
a	1	1	0.975	0.90	0.87	0.295	0.248
b	1	1	0.973	0.88	0.87	0.395	0.278

试验证明, (a)型齿的最佳参数是 $\alpha = 45^\circ \sim 60^\circ$, $B/L_g = 30 \sim 40$, $B/L_t = 20 \sim 10$, $L_t/L_g = 1.5 \sim 4.0$ 。日本金子曾对 $\alpha = 45^\circ$, $L_g = 0.5\text{mm}$ 的 (a)型极齿进行了实验, 当 L_t 在 $1\text{mm} \sim 6\text{mm}$ 范围内变化时, $L_t/L_g = 2$ 具有较高的耐压能力。

图 6-71(c)为多级结构型式的齿型。选取 $L_t/L_g = 2$, $L_s/L_g = 2.5 \sim 3$ 比较合理。

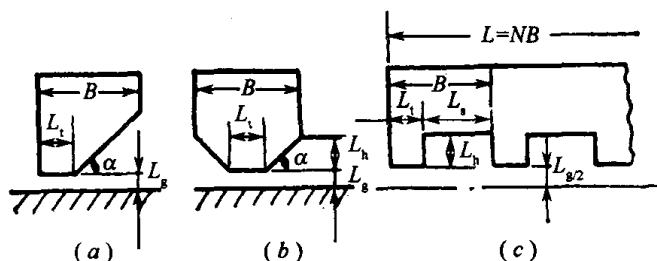


图 6-71 极靴顶端齿型结构

5. 磁流体密封级数与磁路间隙

磁流体一级密封耐压最大值约为 2MPa 。在一定的场强下, 耐压随级数的增加而提高。大约在 $7 \sim 14$ 级之间耐压能力达到最大值, 此后级数再增加, 耐压能力反而减小, 原因是间隙中场强及其分布的变化影响到耐压。

对给定级数的密封装置, 提高耐压可采用增加磁铁尺寸和减少齿顶与轴间的间隙 L_g 来实现。图 6-72 给出了径向间隙、压差及磁铁尺寸之间的关系曲线。径向间隙通常取 $L_g = 0.5\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$, 太小时轴的机械振动会引起齿顶与轴的机械摩擦。密封轴的径向跳动量, 一般限制在径向间隙 L_g 的 25% 以内。

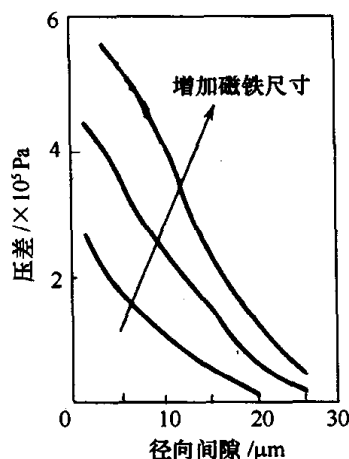


图 6-72 磁场、间隙与耐压的关系

6. 磁流体真空密封转轴结构

磁流体单极靴的耐压能力小, 不能承受大气压力, 用于真空转轴密封必须采用多级极靴结构, 如图 6-73 所示。

真空转轴磁流体密封的整体结构, 如图 6-74 所示。

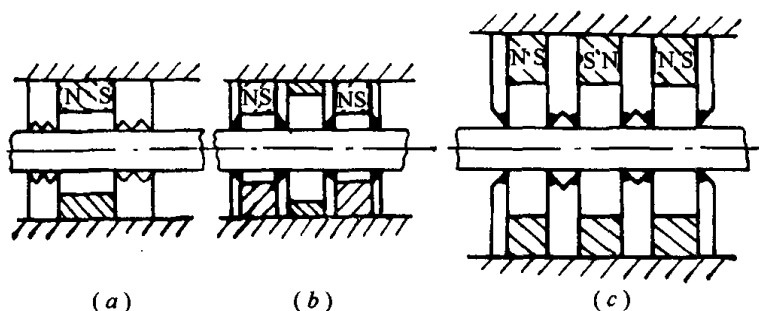


图 6-73 三种不同的结构磁路设计

7. 国产磁流体密封装置

①株洲维格磁流体有限公司生产的磁流体密封传动装置, 有实心轴、空心轴、法兰连接和螺纹连接等 16 种规格, 可用于 $4\text{mm} \sim 20\text{mm}$ 旋转轴动密封。产品的命名规则见表 6-118、表 6-119。

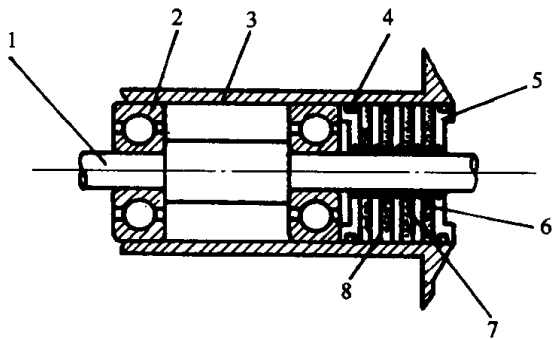


图 6-74 真空转轴磁流体密封装置

1—轴；2—轴承；3—箱体；4—密封环；5—挡盖；6—极靴；7—磁流体；8—磁铁。

表 6-118 普通型磁流体密封传动装置命名规则

轴(孔)径/mm	固定方式	轴类型	冷却方式	其它
□□□	FY(一端法兰式)	G(实心)	WS(无)	
	FZ(中间法兰式)		2S(2 水嘴)	
	FS(两端法兰式)	K(空心)	4S(4 水嘴)	
	TT(套筒式)			
	XB(悬壁式)			

产品示例:轴径为 30mm,一端法兰式,空心轴,4 水嘴型。标记为:

030 FY K 4S
轴径 30—端法兰空心轴 4 水嘴

表 6-119 特殊型磁流体密封传动装置命名规则

轴(孔)径/mm	工作状态	配套设备型号
□□□	NY(耐高压力)	
	NQ(耐活性气体)	
	FY(防油)	
	FS(防水)	
	WZ(无支撑)	

产品示例:轴径为 60mm,无支撑,配套设备型号为 CG6000 型。标记为:

060 WZ CG6000
轴径 60无支撑配套设备型号

产品的技术性能参数见表 6-120。

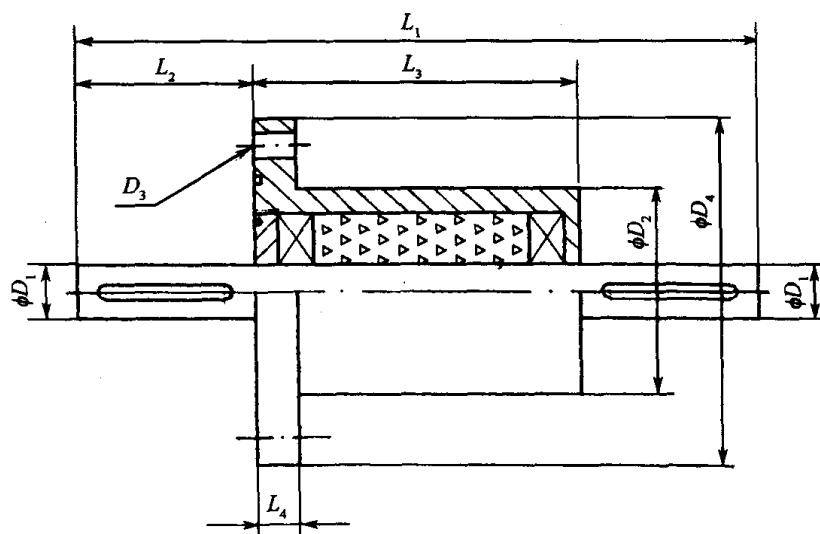
表 6-120 磁流体密封传动器技术特性参数

真空度 /Pa	漏率 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	最大耐压 /MPa	使用温度范围 /℃	适用介质	壳体材料	轴材料
10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹	0.2	0~80	非活性气体	无磁不锈钢	导磁不锈钢

产品的外形尺寸见表 6-121~表 6-136。

表 6-121 单法兰实心轴密封装置

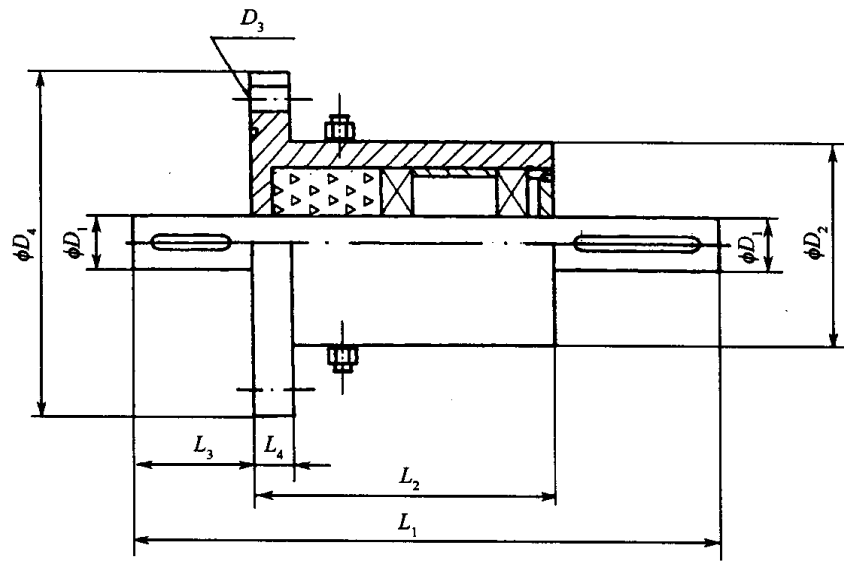
(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	中心圆 直径 D_3	螺 孔	D_4	轴承型号
D_1	公差							数量-孔径		
6	$\begin{matrix} 0 \\ -0.018 \end{matrix}$	102	18	66	10	400	55	4- $\phi 7$	70	6000
10	$\begin{matrix} 0 \\ -0.022 \end{matrix}$	120	25	70	10	44	60	4- $\phi 9$	80	6001
12	$\begin{matrix} 0 \\ -0.027 \end{matrix}$	134	30	74	10	48	70	4- $\phi 9$	90	6002
16	$\begin{matrix} 0 \\ -0.027 \end{matrix}$	152	35	82	10	58	75	4- $\phi 9$	100	6004
20	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	162	35	92	10	63	85	4- $\phi 9$	105	6005
25	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	185	40	105	18	82	107	6- $\phi 11$	125	6206
30	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	200	40	120	20	92	117	6- $\phi 11$	135	6207
35	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	215	45	125	20	100	125	6- $\phi 11$	150	6208
40	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	215	45	125	22	95	130	8- $\phi 11$	160	6009
45	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	235	50	135	22	115	140	8- $\phi 11$	170	6210
50	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	250	55	140	22	125	150	8- $\phi 11$	180	6211

表 6-122 单法兰实心轴 2 水嘴密封装置

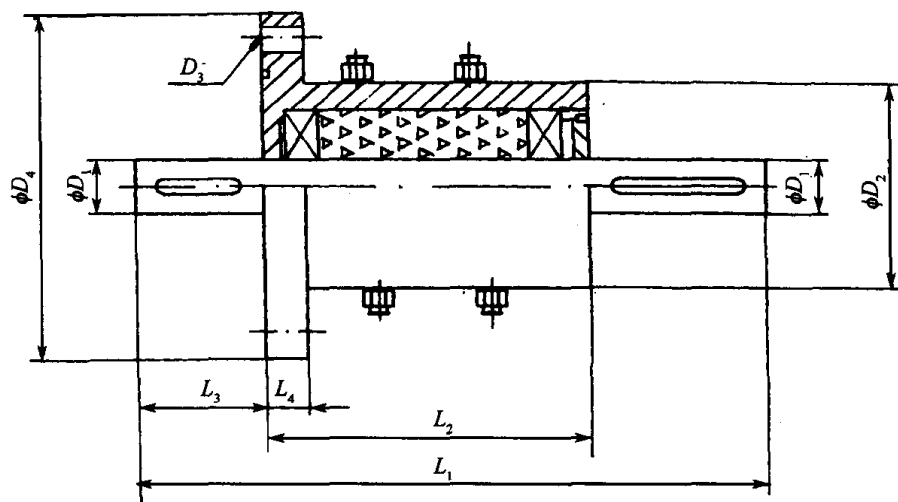
(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	中心圆 直径 D_3	螺 孔	D_4	轴承型号
D_1	公差							数量-孔径		
10	$\begin{matrix} 0 \\ -0.022 \end{matrix}$	153	103	25	10	48	62	4- $\phi 9$	80	6201
12	$\begin{matrix} 0 \\ -0.027 \end{matrix}$	165	105	30	10	51	70	4- $\phi 9$	90	6202
16	$\begin{matrix} 0 \\ -0.027 \end{matrix}$	181	111	35	10	63	75	4- $\phi 9$	100	6204
20	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	183	113	35	14	68	85	4- $\phi 9$	105	6205
25	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	195	115	40	14	78	95	4- $\phi 11$	115	6206
30	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	207	117	45	16	90	110	4- $\phi 13$	140	6207
35	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	220	120	50	16	98	114	4- $\phi 13$	140	6208
40	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	225	125	50	18	105	130	8- $\phi 13$	170	6209
45	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	250	130	60	18	110	140	8- $\phi 13$	170	6210
50	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	258	128	65	20	122	150	8- $\phi 13$	200	6211
55	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	260	130	65	20	132	170	8- $\phi 13$	200	6212
60	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	264	134	65	22	144	175	8- $\phi 13$	200	6213
70	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	268	138	65	22	154	180	8- $\phi 13$	210	6215

表 6-123 单法兰实心轴 4 水嘴密封装置

(单位:mm)

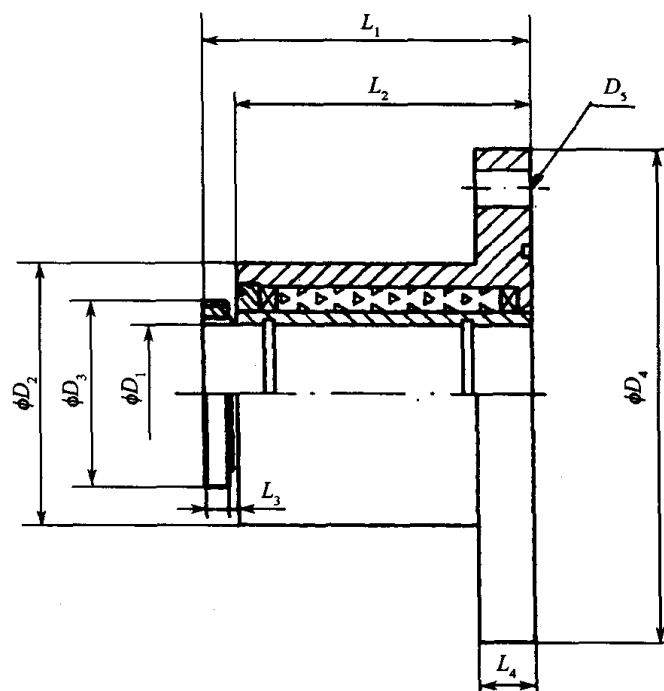


轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	中心圆 直径 D_3	螺 孔	D_4	轴承型号
D_1	公差							数量-孔径		
10	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	132	82	25	10	46	68	4- $\phi 11$	90	6000
12	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	135	85	25	10	48	68	4- $\phi 11$	90	16001
16	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	140	90	25	15	55	75	4- $\phi 11$	95	16003
20	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	175	115	30	18	68	90	6- $\phi 11$	110	6204
25	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	190	120	35	18	72	95	6- $\phi 11$	125	6205
30	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	205	125	40	20	85	113	6- $\phi 11$	140	6206
35	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	220	130	45	20	95	125	8- $\phi 13$	155	6207
40	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	236	136	50	20	100	120	8- $\phi 13$	150	6208
45	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	250	140	55	22	110	143	8- $\phi 13$	175	6209
50	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	265	145	60	22	115	148	8- $\phi 17$	180	6210
55	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	275	145	65	24	120	155	8- $\phi 17$	190	6012
60	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	300	160	70	24	135	175	8- $\phi 17$	215	6212
70	$\begin{matrix} 0 \\ -0.039 \end{matrix}$	315	165	75	26	150	190	8- $\phi 17$	230	6214

第六章 真空密封

表 6-124 单法兰空心轴密封装置

(单位:mm)

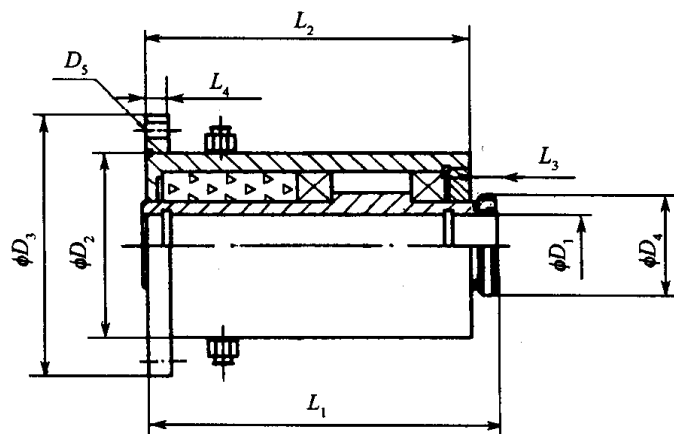


轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	D_3	D_4	中心圆 直径 D_5	螺 孔	轴承型号
D_1	公差									数量-孔径	
10	$+0.02$ 0	104	90	10	10	58	34	90	77	4- $\phi 9$	6004
12	$+0.02$ 0	106	92	10	10	63	36	95	80	4- $\phi 9$	6005
16	$+0.02$ 0	109	95	10	10	71	40	105	90	4- $\phi 9$	6006
20	$+0.02$ 0	114	100	10	10	71	44	110	95	4- $\phi 9$	6006
25	$+0.02$ 0	119	105	10	18	78	49	125	105	6- $\phi 11$	6007
30	$+0.02$ 0	124	110	10	20	84	54	130	110	6- $\phi 11$	6008
35	$+0.02$ 0	126	112	10	20	91	60	140	120	6- $\phi 11$	6009
40	$+0.02$ 0	131	115	12	22	96	69	150	125	8- $\phi 11$	6010
45	$+0.02$ 0	136	120	12	22	106	74	160	135	8- $\phi 11$	6011
50	$+0.02$ 0	136	120	12	22	115	80	170	145	8- $\phi 11$	6012

三、动密封

表 6-125 单法兰空心轴 2 水嘴密封装置

(单位:mm)



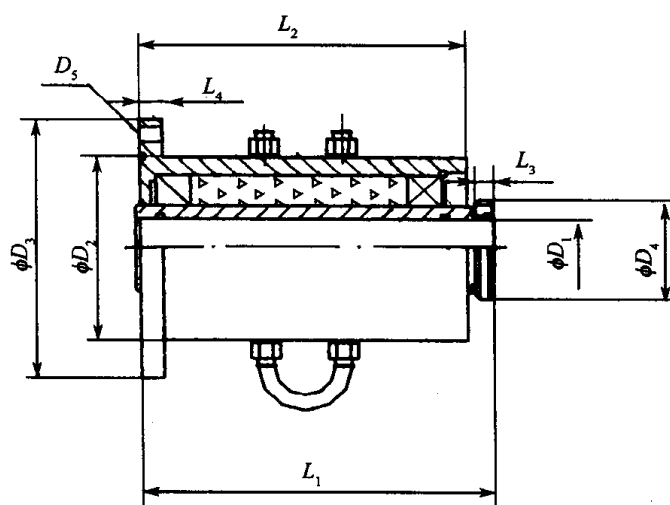
轴 径		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	D ₂	D ₃	D ₄	中心圆 直径 D ₅	螺 孔 数量-孔径	φD ^①	轴承型号
D ₁	公差											
10	+0.03 +0.01	78	64	10	10	55	90	34	72.5	4-φ9	10 ^{-0.01 -0.03}	16003
12	+0.04 +0.02	80	66	10	10	62	100	40	80	4-φ9	12 ^{-0.01 -0.03}	16004
16	+0.04 +0.02	90	70	10	15	70	110	42	90	4-φ9	16 ^{-0.01 -0.03}	16005
20	+0.04 +0.02	110	90	10	18	85	125	44	105	4-φ9	20 ^{-0.01 -0.03}	7206
25	+0.04 +0.02	116	95	10	18	95	140	49	118	4-φ9	25 ^{-0.01 -0.03}	7207
30	+0.04 +0.02	125	100	10	20	100	155	54	128	4-φ11	30 ^{-0.01 -0.03}	7208
35	+0.04 +0.02	130	105	10	20	105	165	60	135	4-φ11	35 ^{-0.01 -0.03}	7209
40	+0.04 +0.02	135	110	12	20	115	175	69	145	4-φ13	40 ^{-0.01 -0.03}	7210
45	+0.04 +0.02	145	115	12	22	125	185	74	155	4-φ13	45 ^{-0.01 -0.03}	7211
50	+0.04 +0.02	145	115	12	22	135	195	79	165	8-φ17	50 ^{-0.01 -0.03}	7212
55	+0.04 +0.02	150	120	12	24	145	210	84	178	8-φ17	55 ^{-0.01 -0.03}	7213
60	+0.04 +0.02	150	120	12	24	150	215	89	183	8-φ17	60 ^{-0.01 -0.03}	7214
70	+0.04 +0.02	155	125	12	26	160	225	94	193	8-φ17	70 ^{-0.01 -0.03}	7216

注:①为建议轴径尺寸

第六章 真空密封

表 6-126 单法兰空心轴 4 水嘴密封装置

(单位:mm)

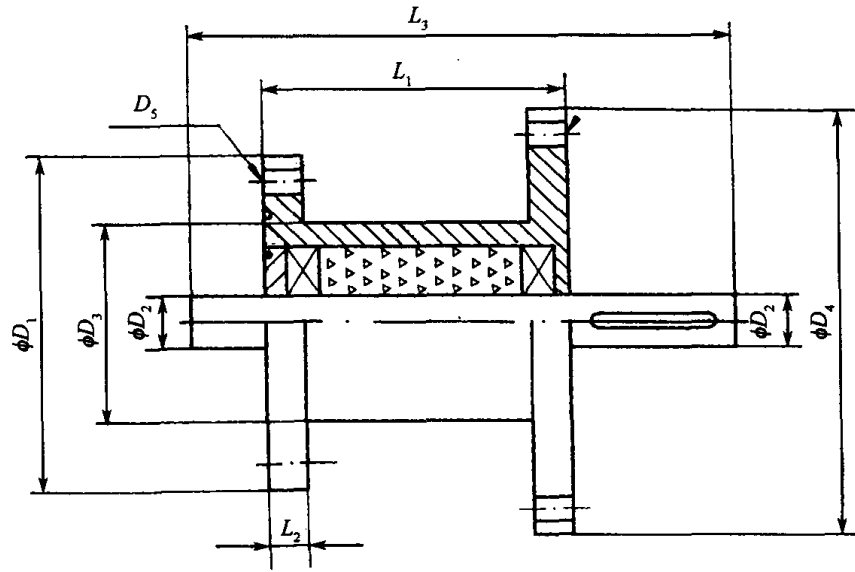


轴 径		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	D ₂	D ₃	D ₄	中心圆 直径 D ₅	螺 孔	φD ^①	轴承型号
D ₁	公差									数量-孔径		
10	+0.03 +0.01	97	82	10	10	67	105	34	86	4-φ9	10 ^{-0.01 -0.03}	6204
12	+0.04 +0.02	100	85	10	10	72	110	40	91	4-φ9	12 ^{-0.01 -0.03}	6205
16	+0.04 +0.02	100	90	10	15	82	120	42	101	4-φ9	16 ^{-0.01 -0.03}	6206
20	+0.04 +0.02	105	90	10	18	82	125	44	103	4-φ11	20 ^{-0.01 -0.03}	6206
25	+0.04 +0.02	105	95	10	18	92	135	49	113	4-φ11	25 ^{-0.01 -0.03}	6207
30	+0.04 +0.02	110	95	10	20	102	145	54	123	4-φ11	30 ^{-0.01 -0.03}	6208
35	+0.04 +0.02	115	100	10	20	110	160	60	135	4-φ13	35 ^{-0.01 -0.03}	6209
40	+0.04 +0.02	115	100	12	20	115	165	69	140	4-φ13	40 ^{-0.01 -0.03}	6210
45	+0.04 +0.02	120	105	12	22	125	175	74	150	4-φ13	45 ^{-0.01 -0.03}	6212
50	+0.04 +0.02	120	105	12	22	135	195	79	165	8-φ13	50 ^{-0.01 -0.03}	6212
55	+0.04 +0.02	125	110	12	24	145	205	84	175	8-φ13	55 ^{-0.01 -0.03}	6213
60	+0.04 +0.02	125	110	12	24	150	210	89	180	8-φ17	60 ^{-0.01 -0.03}	6214
70	+0.04 +0.02	130	115	12	26	165	225	94	195	8-φ17	70 ^{-0.01 -0.03}	6216

注:①为建议轴径尺寸

表 6-127 双法兰实心轴密封装置

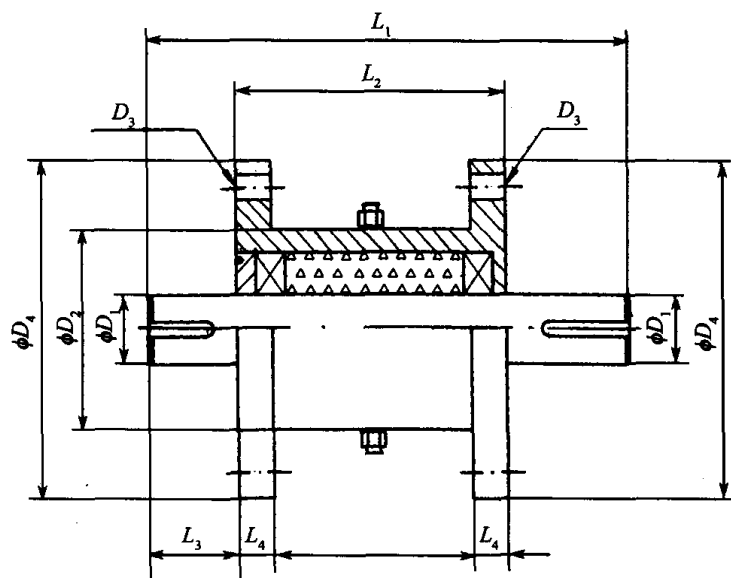
(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	D_1	D_3	D_4	中心圆	螺 孔	中心圆	螺 孔	轴承型号
D_2	公差							直径 D_5	数量-孔径	直径 D_6	数量-孔径	
6	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.018 \end{smallmatrix}$	66	10	102	75	40	75	52	4- $\phi 7$	52	4- $\phi 7$	6000
10	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.022 \end{smallmatrix}$	70	10	120	85	44	85	62	4- $\phi 9$	62	4- $\phi 9$	6001
12	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.027 \end{smallmatrix}$	74	10	134	95	48	95	72	4- $\phi 9$	72	4- $\phi 9$	6002
16	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.027 \end{smallmatrix}$	82	10	152	105	58	105	77	4- $\phi 9$	77	4- $\phi 9$	6004
20	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix}$	82	10	152	110	63	110	87	4- $\phi 9$	87	4- $\phi 9$	6005
25	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix}$	138	18	288	165	95	165	137	6- $\phi 11$	137	6- $\phi 11$	6206
30	$\begin{smallmatrix} 0 \\ 0.033 \end{smallmatrix}$	141	20	321	165	105	165	137	6- $\phi 11$	137	6- $\phi 11$	6207
35	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.039 \end{smallmatrix}$	150	20	330	175	120	175	152	6- $\phi 11$	152	4- $\phi 11$	6208
40	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.039 \end{smallmatrix}$	157	22	357	190	125	190	162	8- $\phi 11$	162	8- $\phi 11$	6209
45	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.039 \end{smallmatrix}$	160	22	380	205	130	205	177	8- $\phi 11$	177	8- $\phi 11$	6210
50	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.039 \end{smallmatrix}$	166	22	406	215	140	215	187	8- $\phi 11$	187	8- $\phi 11$	6211

表 6-128 双法兰实心轴 2 水嘴密封装置

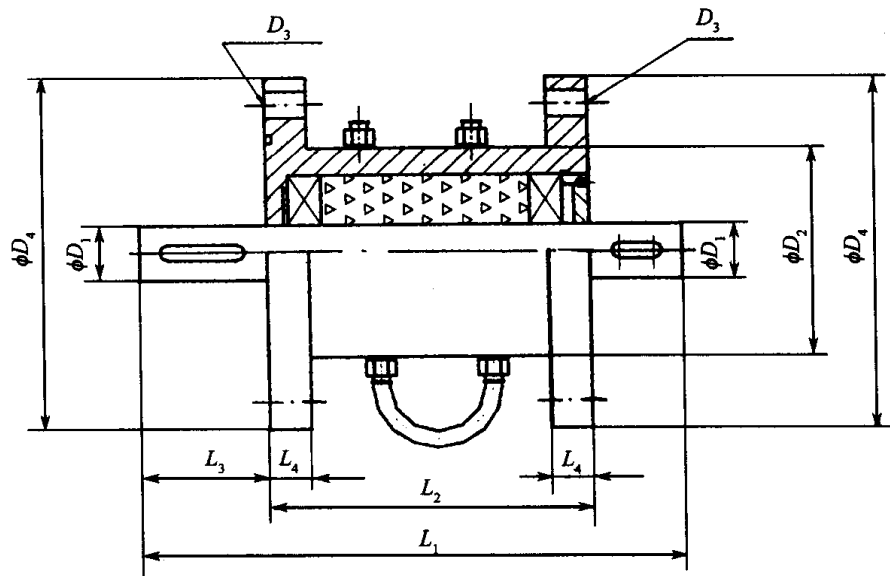
(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	中心圆 直径 D_3	螺 孔	D_4	轴承型号
D_1	公差							数量-孔径		
10	0 -0.022	153	103	25	12	48	65	4- $\phi 9$	85	6201
12	0 -0.027	165	105	30	12	51	70	4- $\phi 9$	90	6202
16	0 -0.027	181	111	35	12	63	80	4- $\phi 9$	100	6204
20	0 -0.033	185	113	35	14	68	85	4- $\phi 9$	105	6205
25	0 -0.033	195	115	40	14	78	100	4- $\phi 11$	120	6206
30	0 -0.033	207	117	45	16	90	115	4- $\phi 13$	140	6207
35	0 -0.033	220	120	50	16	98	120	4- $\phi 13$	145	6208
40	0 -0.033	225	125	50	18	105	130	6- $\phi 13$	155	6209
45	0 -0.033	250	130	60	18	110	135	6- $\phi 13$	160	6210
50	0 -0.039	258	128	65	20	122	145	8- $\phi 13$	170	6211
55	0 -0.039	260	130	65	20	132	155	8- $\phi 13$	180	6212
60	0 -0.039	264	134	65	22	144	170	8- $\phi 13$	195	6213
70	0 -0.039	268	138	65	22	154	180	8- $\phi 13$	205	6215

表 6-129 双法兰实心轴 4 水嘴密封装置

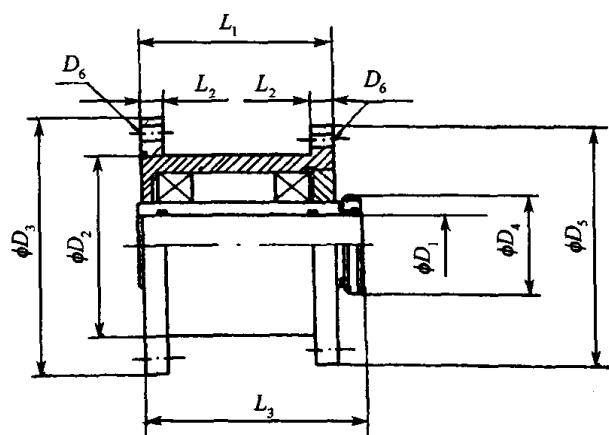
(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	中心圆 直径 D_3	螺 孔	D_4	轴承型号
D_1	公差							数量-孔径		
10	-0.1 -0.12	155	105	25	12	49	65	4- $\phi 7$	85	6000
12	-0.1 -0.12	153	107	25	12	51	70	4- $\phi 7$	90	16001
16	-0.1 -0.12	155	105	25	12	55	75	4- $\phi 9$	95	6003
20	-0.1 -0.12	165	115	30	12	72	90	4- $\phi 9$	110	6204
25	-0.1 -0.12	178	118	30	12	75	95	4- $\phi 9$	115	6205
30	-0.1 -0.13	180	120	35	15	85	105	6- $\phi 9$	125	6206
35	-0.1 -0.13	195	125	40	15	95	115	4- $\phi 11$	135	6207
40	-0.1 -0.13	208	128	40	15	106	125	4- $\phi 11$	145	6208
45	-0.1 -0.13	220	130	45	18	110	138	4- $\phi 13$	165	6209
50	-0.1 -0.13	230	130	50	18	115	140	4- $\phi 13$	165	6210
55	-0.1 -0.14	245	135	55	18	125	150	4- $\phi 13$	175	6211
60	-0.1 -0.14	255	135	60	18	135	163	4- $\phi 17$	190	6212
70	-0.1 -0.14	280	140	70	18	150	178	4- $\phi 17$	205	6214

表 6-130 双法兰空心轴密封装置

(单位:mm)



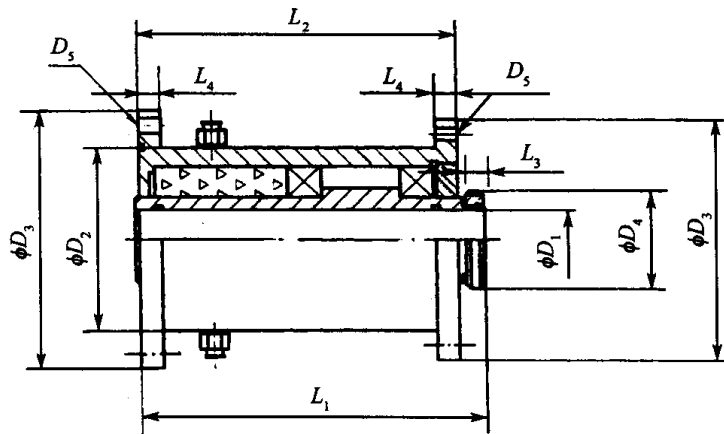
轴 径		L_1	L_2	L_3	D_2	D_3	D_4	D_5	中心圆 直径 D_6	螺 孔	$\phi D^{\text{①}}$	轴承型号
D_1	公差									数量-孔径		
10	$+0.02$ 0	90	10	104	58	90	34	90	77	4- $\phi 9$	$10 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6004
12	$+0.02$ 0	92	10	106	63	95	36	95	80	4- $\phi 9$	$12 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6005
16	$+0.02$ 0	95	10	109	71	105	40	105	90	4- $\phi 9$	$16 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6006
20	$+0.02$ 0	100	10	114	71	110	44	110	95	4- $\phi 9$	$20 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6006
25	$+0.02$ 0	105	18	119	78	125	49	125	105	6- $\phi 11$	$25 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6007
30	$+0.02$ 0	110	20	124	84	130	54	130	110	6- $\phi 11$	$30 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6008
35	$+0.02$ 0	112	20	126	91	140	60	140	120	6- $\phi 11$	$35 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6009
40	$+0.02$ 0	115	22	131	96	150	69	150	125	8- $\phi 11$	$40 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6010
45	$+0.02$ 0	120	22	136	106	160	74	160	135	8- $\phi 11$	$45 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6011
50	$+0.02$ 0	120	22	136	115	170	80	170	145	8- $\phi 11$	$50 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6012

注:①为建议轴径尺寸

三、动密封

表 6-131 双法兰空心轴 2 水嘴密封装置

(单位:mm)



轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	D_3	D_4	中心圆 直径 D_5	螺 孔	$\phi D^\text{①}$	轴承型号
D_1	公差									数量-孔径		
10	+0.03 +0.01	128	113	10	13	62	110	44	85	4- $\phi 11$	$10 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6004
12	+0.04 +0.02	130	115	10	13	67	115	46	90	4- $\phi 11$	$12 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6005
16	+0.04 +0.02	132	117	10	13	75	120	54	98	4- $\phi 11$	$16 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6006
20	+0.04 +0.02	135	120	10	13	75	120	54	98	4- $\phi 11$	$20 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6006
25	+0.04 +0.02	143	128	10	14	82	135	60	108	4- $\phi 13$	$25 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6007
30	+0.04 +0.02	146	132	10	14	88	140	65	114	4- $\phi 13$	$30 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6008
35	+0.04 +0.02	150	136	10	14	95	148	70	122	4- $\phi 13$	$35 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6009
40	+0.04 +0.02	148	124	12	18	100	155	74	128	6 $\phi 13$	$40 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	16010
45	+0.04 +0.02	164	140	12	18	115	170	84	143	6 $\phi 13$	$45 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6012
50	+0.04 +0.02	166	142	12	20	115	170	84	143	6 $\phi 13$	$50 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6012
55	+0.04 +0.02	166	142	12	20	120	175	86	148	6 $\phi 13$	$55 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6013
60	+0.04 +0.02	170	146	12	20	130	185	86	158	6 $\phi 13$	$60 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	6014
70	+0.04 +0.02	164	140	12	20	145	200	90	173	6 $\phi 13$	$70 \begin{smallmatrix} -0.01 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	16016

注:①为建议轴径尺寸

表 6-132 悬臂式实心轴密封装置(一)

(单位:mm)

轴 径		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	M	轴承型号
D_1	公差							
12	$\begin{matrix} 0 \\ -0.027 \end{matrix}$	179	40	109	74	48	M25×1.5	6002
20	$\begin{matrix} 0 \\ -0.033 \end{matrix}$	211	55	121	82	63	M30×1.5	6005

表 6-133 悬臂式实心轴密封装置(二)

(单位:mm)

轴 径		L_1	L_2	E (深×长)	轴承型号
D	公差				
4	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	14	80	0.5×10	686
5	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	14	80	0.5×10	686
6	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	14	80	0.5×10	686

表 6-134 悬臂式实心轴密封装置(三)

(单位:mm)

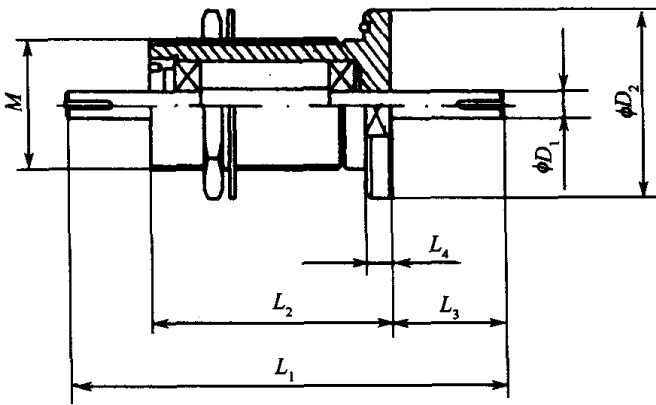
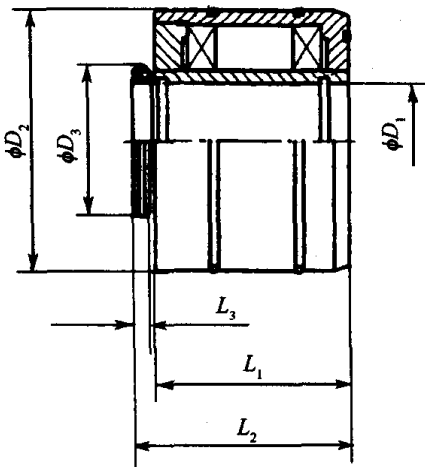
		L_1	L_2	L_3	L_4	D_2	M	轴承型号
轴 径	公差							
D_1								
6	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	98	58	20	10	55	M32×1.5	627
10	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	120	70	25	10	60	M38×1.5	6001

表 6-135 套筒式空心轴密封装置

(单位:mm)

		L_1	L_2	L_3	D_2	D_3	$\phi D^\text{①}$	轴承型号
孔 径	公差							
D_1								
10	$\begin{matrix} +0.03 \\ +0.01 \end{matrix}$	63	$75 \begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	10	$60 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.02 \end{matrix}$	34	$10 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$	6204
15	$\begin{matrix} +0.03 \\ +0.01 \end{matrix}$	68	$80 \begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	10	$68 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.02 \end{matrix}$	39	$15 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$	6205
20	$\begin{matrix} +0.04 \\ +0.02 \end{matrix}$	74	$86 \begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	10	$78 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.02 \end{matrix}$	44	$20 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$	6206
25	$\begin{matrix} +0.04 \\ +0.02 \end{matrix}$	80	$92 \begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	10	$88 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.02 \end{matrix}$	49	$25 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$	6207
30	$\begin{matrix} +0.04 \\ +0.02 \end{matrix}$	86	$98 \begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	10	$96 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.02 \end{matrix}$	54	$30 \begin{matrix} -0.01 \\ -0.03 \end{matrix}$	6208

注:①为建议轴径尺寸

表 6-136 套筒式实心轴密封装置

(单位:mm)

孔 径		L ₁	L ₂	L ₃	D ₂	轴承型号
D ₁	公差					
10	0 -0.022	25	70	120	45 ^{+0.01} _{-0.02}	6200
15	0 -0.027	35	75	145	50 ^{+0.01} _{-0.02}	6202
20	0 -0.033	35	82	152	63 ^{+0.01} _{-0.02}	6204
25	0 -0.033	45	95	185	72 ^{+0.01} _{-0.02}	6205
30	0 -0.033	45	105	195	82 ^{+0.01} _{-0.02}	6206

株洲维格磁流体有限公司生产的磁性流体性能参数见表 6-137。

表 6-137 磁流体性能参数

磁流体牌号	CF ₁	CF ₂	CF ₃	CF ₄	CF ₅	CF ₆	CF ₇
磁化强度/T	2×10 ⁻²	2×10 ⁻² ± 10 ⁻³	4×10 ⁻² ± 2×10 ⁻³	4×10 ⁻³ ± 2×10 ⁻³	4×10 ⁻² ± 2×10 ⁻³	4×10 ⁻² ± 2×10 ⁻³	4×10 ⁻² ± 5×10 ⁻³
外观	黑色液体						
密度(20℃)/g·cm ⁻³	1.05	1.08	1.21	1.31	1.33	1.34	1.27
粘度(25℃)/ep	3.1	6	19.6	95.7	202	266	78
载液	水	碳水化合物		矿物油		二酯基	
起始凝固点/℃	≤0	≤-25	/	/	/	/	-55
沸点/℃	≥98	≥200	/	/	/	/	≥370
注:CF ₇ 挥发率为 1.24×10 ⁻⁵ g/cm ² ·h							

②沧州市通用建材机械(集团)有限公司生产的磁性流体有油基、酯基、碳氢化合物基等共 7 大系列。生产的 4 种磁流体密封真空传动器件,真空度可达 10⁻⁷Pa,轴径 φ10mm~φ120mm,转速 0~3000r/min,使用环境温度 -30℃~80℃。产品广泛用于离子束焊机、离子束刻蚀机、激光测试设备、晶体生长设备、扩散炉、钎焊炉及各类真空设备。

磁性流体属于新型的纳米材料产品,是将纳米级的超顺磁性材料均匀混入基液中,通过加

工形成高度稳定的胶体溶液,具有磁化特性、流变特性、流体力学特性、光学特性、声学特性和热作用特性等。沧州通用建材机械公司生产的磁性流体技术性能参数见表 6-138。

磁性流体真空传动密封件外形尺寸及技术性能参数见表 6-139~表 6-143。

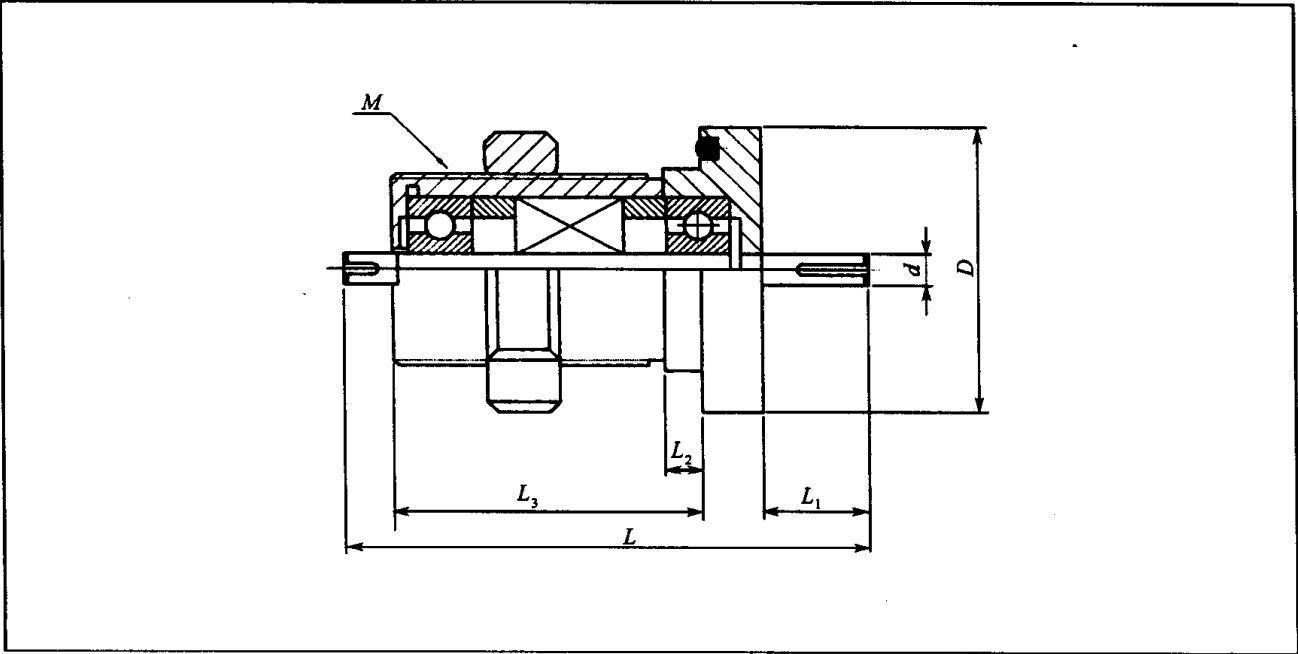
表 6-138 磁性流体技术性能参数

型 号	CW-01	CM-01	CM-02	CR-01	CB-01	CZ-01	CZ-02
基 液	水	矿物油		矿物油	矿物油	二脂	
饱和磁化强度/ $\times 10^{-3}\text{T}$	20	40	50	30	50	40	25
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.3	1.3	1.5	1.0	2.0	1.4	1.3
粘度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1}$	12	17	30	12	35	40	30
载液饱和蒸气压(20°C)/Pa	1.8×10^3			5.7×10^{-4}		9×10^{-6}	
蒸发量(80°C)(0.1MPa)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$				4×10^{-4}		8.5×10^{-6}	
沸点(0.1MPa)/ $^{\circ}\text{C}$	100	180			200	310	
凝固点/ $^{\circ}\text{C}$	0	-30	-30	-40	-40	-60	

表 6-139 磁性流体密封件性能参数

工作 压力 /Pa	漏 率 /Pa $\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	耐 压 /MPa	使用温度范围 / $^{\circ}\text{C}$	密封介质	壳体材料	轴(套)材料
$10^{-4}\sim 10^{-7}$	$<10^{-11}$	0.2	-30~80	非活性气体	非磁不锈钢	导磁不锈钢

表 6-140 通孔轴磁流体密封传动件外形尺寸 (单位:mm)

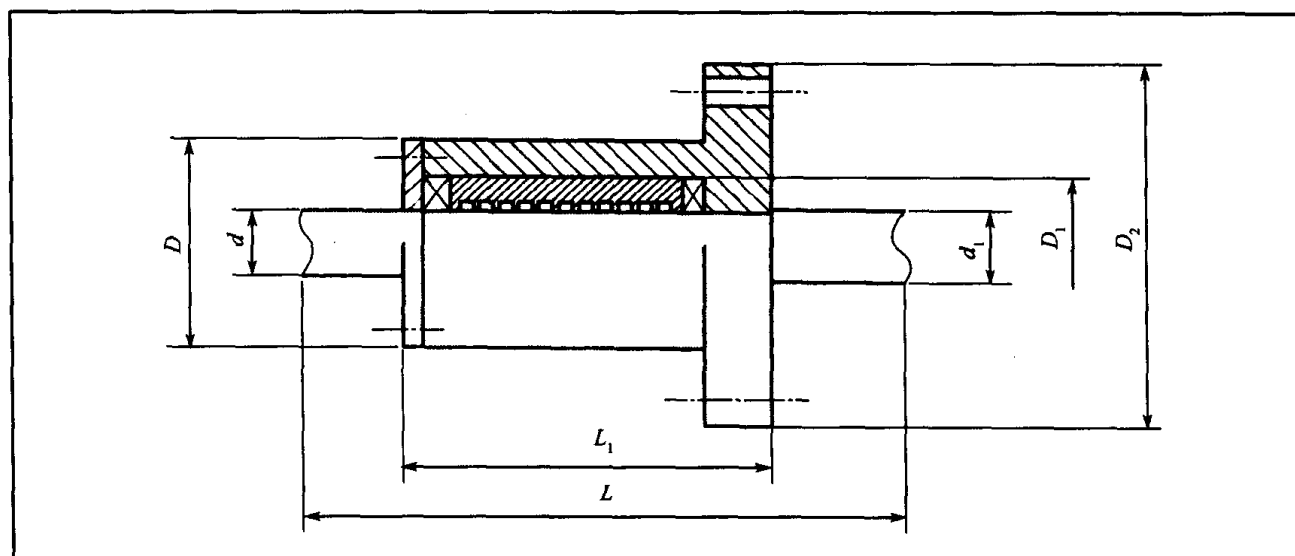


(续)

型号	d	D	L	L_1	L_2	L_3	M
006	6	55	97.5	20	10	57.5	M32×1.5
010	10	60	119.5	25	10	69.5	M38×1.5

表 6-141 法兰磁流体密封传动件外形尺寸

(单位:mm)



型号	d	d_1	D	D_1	D_2	L	L_1	转速/ $r \cdot \min^{-1}$
010	10	11	32	22	56	80~100	55~60	0~500
015	15(12)	16	50	35	70	100~120	70~75	0~500
020	20(17)	22	65	47	95~100	120~130	75~80	0~1500
025	25(24)	26	70	52	100	200~450	140~150	0~3000
030	30(28)	32	80	62	110	200~450	140~150	0~3000
035	35(32)	36	90	72	120	210~450	150~160	0~3000
040	40(38)	42	100	80	130	210~450	160~170	0~3000
045	45(38)	46	120	85	160	210~450	180~190	0~3000

三、动密封

表 6-142 四水嘴冷却式磁流体密封传动件外形尺寸

(单位:mm)

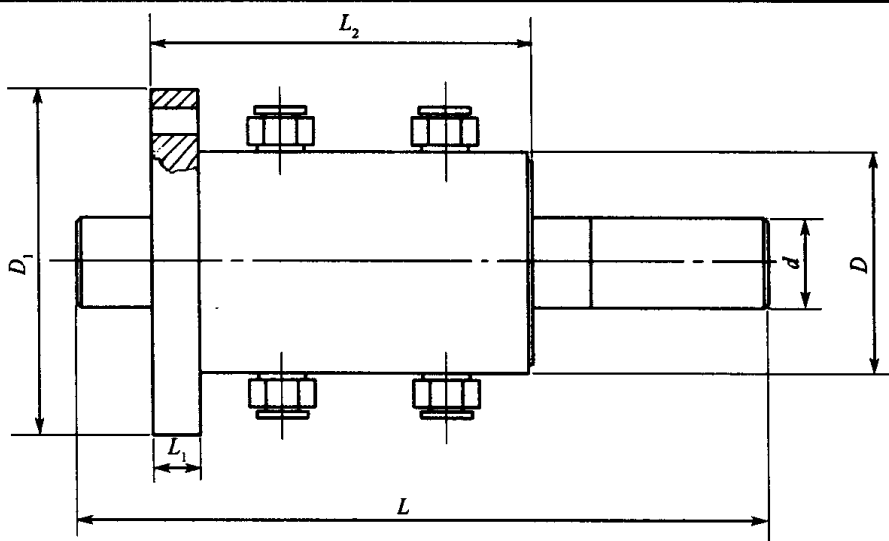
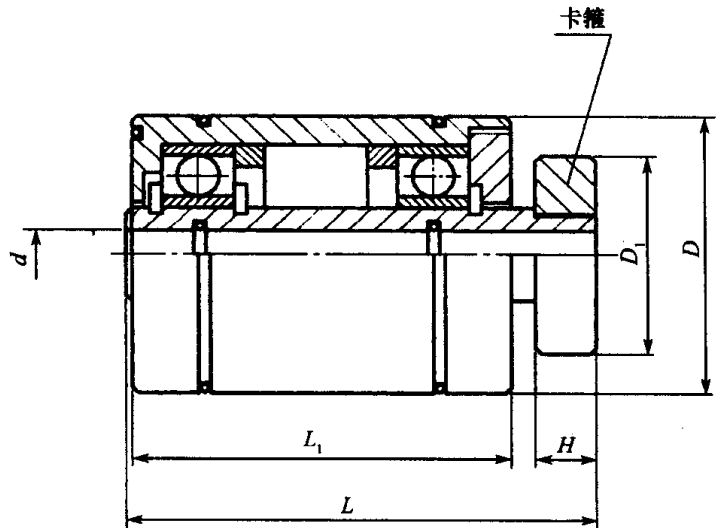
						
型 号	d	D	D_1	L	L_1	L_2
020	20	78	120	255	10	124
025	25	90	145	288	10	126
030	30	96	145	321	10	130
040	40	106	160	357	10	141

表 6-143 空心轴磁流体密封传动件外形尺寸

(单位:mm)

						
型 号	d	D	D_1	L	L_1	H
010	$10^{+0.03}_{-0.01}$	$48^{0}_{-0.02}$	34	78	64	10
020	$20^{+0.04}_{-0.02}$	$58^{0}_{-0.03}$	44	82.5	68.5	
025	$25^{+0.04}_{-0.02}$	$63^{0}_{-0.03}$	49	88	74	
030	$30^{+0.04}_{-0.02}$	$73^{0}_{-0.03}$	54	93	79	
040	$40^{+0.04}_{-0.02}$	$88^{0}_{-0.04}$	69	96	80	12
050	$50^{+0.04}_{-0.02}$	$98^{0}_{-0.04}$	79	98	82	
075	$75^{+0.06}_{-0.04}$	$137^{0}_{-0.04}$	109	115	96	15

③杭州大和热电子有限公司生产的磁性流体元器件有磁流体真空传动器件、磁流体阻尼器和磁流体密封圈 3 大类。磁流体密封传动具有低泄漏率、长寿命、高可靠、摩擦阻力小等优点,广泛用于真空设备中需自由控制进给的装置上,如真空炉、真空镀膜机、等离子刻蚀、化学气相沉积、离子移置技术、晶体再生等。磁流体密封技术可实现机器人与有害物质环境的隔离,减少不必要的停机时间,在机械化大规模特殊生产过程中具有特殊意义。

磁流体真空传动器件有下列 4 种:

- a. 多轴密封传动件——3 轴、同轴承轴传动;
- b. 实心轴密封传动件——法兰型、通孔轴重负荷型;
- c. 空心轴密封传动件——通孔型、法兰型;
- d. 特殊用途传动件——实现直线运动。

磁流体真空传动件命名规则:

轴类型	机座类型	磁性流体型号	轴外径或内径	水冷	结构	其它
实心 (S) 空心 (H) 同轴 (C)	通孔式 (T) 法兰式 (F) 螺母式 (N) 螺栓式 (S) 微型 (M)	W11 F11 P11 01 V0401	020 999	水冷式 (W) 夹紧式 (C) 混合式 (M) 无水冷 (N)	悬臂式 (C) 普通式 (N) 重负荷 (H) 其它 (O)	客户要求

示例: SFL006NN 表示实心轴, 法兰式, L01 基液, 轴径 6mm, 无水冷, 普通型磁流体真空传动装置。

磁流体密封安装维护或使用不当时会出现密封失效而引发事故, 正确拆封和安装使用磁流体密封传动装置时, 应注意下列事项。

a. 不能将丙酮、酒精、氟里昂、油、水等溶剂以及其它非真空用油混入磁流体中, 否则会使密封失效。

b. 磁流体密封装置两端的压差, 不能超过允许的最大压差, 以确保磁流体可靠密封。

c. 使用水冷却产品时应先接通冷却水再启动传动转轴, 避免转轴缺水过热造成密封失效。冷却水可用常温自来水, 流量 1L/min~34L/min。

d. 以下场合使用磁流体密封, 需事先与生产厂家联系, 提供使用的特殊环境或技术要求: 高温、高转速, 高负载, 强弱电流, 高频场, 强磁场, 粉尘悬浮物场合及其它特殊要求。

④磁流体真空传动装置技术性能参数见表 6-144。产品的外形尺寸及技术性能参数见表 6-145~表 6-151。

表 6-144 磁流体真空传动装置技术性能参数

(单位:mm)

磁流体 型 号	真空度 /La	漏 率 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	最大耐压 /MPa	使用温度 范围/℃	适用气体	材 料		
						轴承	转轴	壳体
L	10 ⁻⁶	<10 ⁻¹²	0.2	0~80	非活性气体	SUS440C	SUS630	SUS303
F	10 ⁻⁵				活性气体	SUJ2 ^①		SUS304

注: ①用于空心轴密封传动件

表 6-145 微型轴密封传动装置(一)

Technical drawing of a micro shaft seal drive device. The drawing shows a cross-section of the device with various dimensions. Key dimensions include: outer diameter 23.5, inner diameter 15.8, total length 63.8, and internal features like 11.6, 2.4, 20, and 23.8. A dimension E(2X) is indicated for the seal lip.

型 号	外形尺寸/mm		技术性能参数		
	d	E (深×长)	允许扭矩/N·m	轴承型号	
SML004NN	$4^{+0}_{-0.018}$	0.5×10	0.57	686	
SML005NN	$5^{+0}_{-0.018}$		0.63		
SML006NN	$6^{+0}_{-0.018}$				

表 6-146 微型轴密封传动装置(二)

Technical drawing of a micro shaft seal drive device. The drawing shows a cross-section of the device with various dimensions. Key dimensions include: outer diameter 21, inner diameter 19, total length 76.5, and internal features like 12, 36.5, 46.5, 15, and 12. A dimension E(2X) is indicated for the seal lip. A mounting hole is labeled M12x1.5.

型 号	外形尺寸/mm		技术性能参数		
	d	E (深×长)	允许扭矩/N·m	轴承型号	
SSL004NN	$4^{+0}_{-0.018}$	0.5×10	0.57	686	
SSL005NN	$5^{+0}_{-0.018}$		0.63		
SSL006NN	$6^{+0}_{-0.018}$				

表 6-147 通孔密封轴传动装置

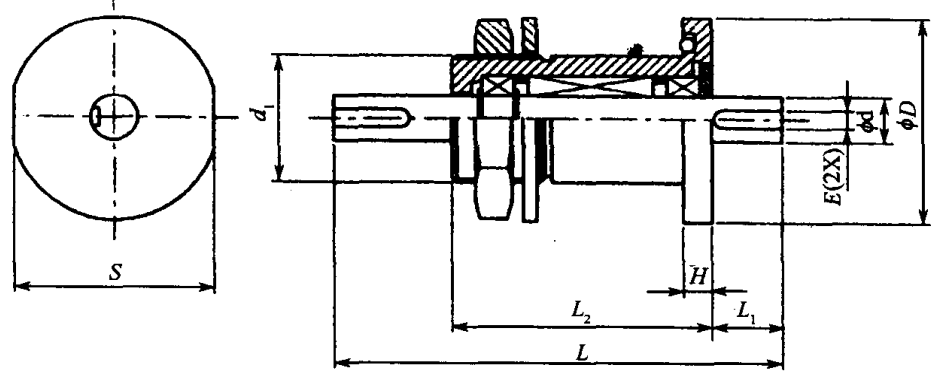
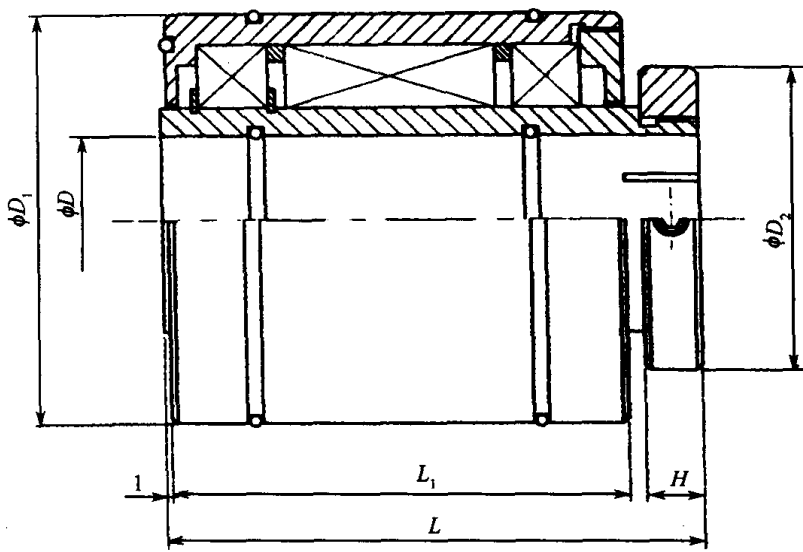
											
型 号	外形尺寸/mm							性能参数			
	d	d_1	D	L	L_1	L_2	H	S	键 (深×长×宽)	允许扭矩 /MPa	轴承 型号
SNL006NN	$6^{+0}_{-0.018}$	M32×1.5	55	97.5	20	57.5	10	49	0.5×12 (扁平面)	0.95	627
SNF006NN											
SNL010NN	$10^{+0}_{-0.022}$	M38×1.5	60	119.5	25	69.5	10	55	3×1.8×14	6.1	6001
SNF010NN											

表 6-148 法兰型密封传动装置

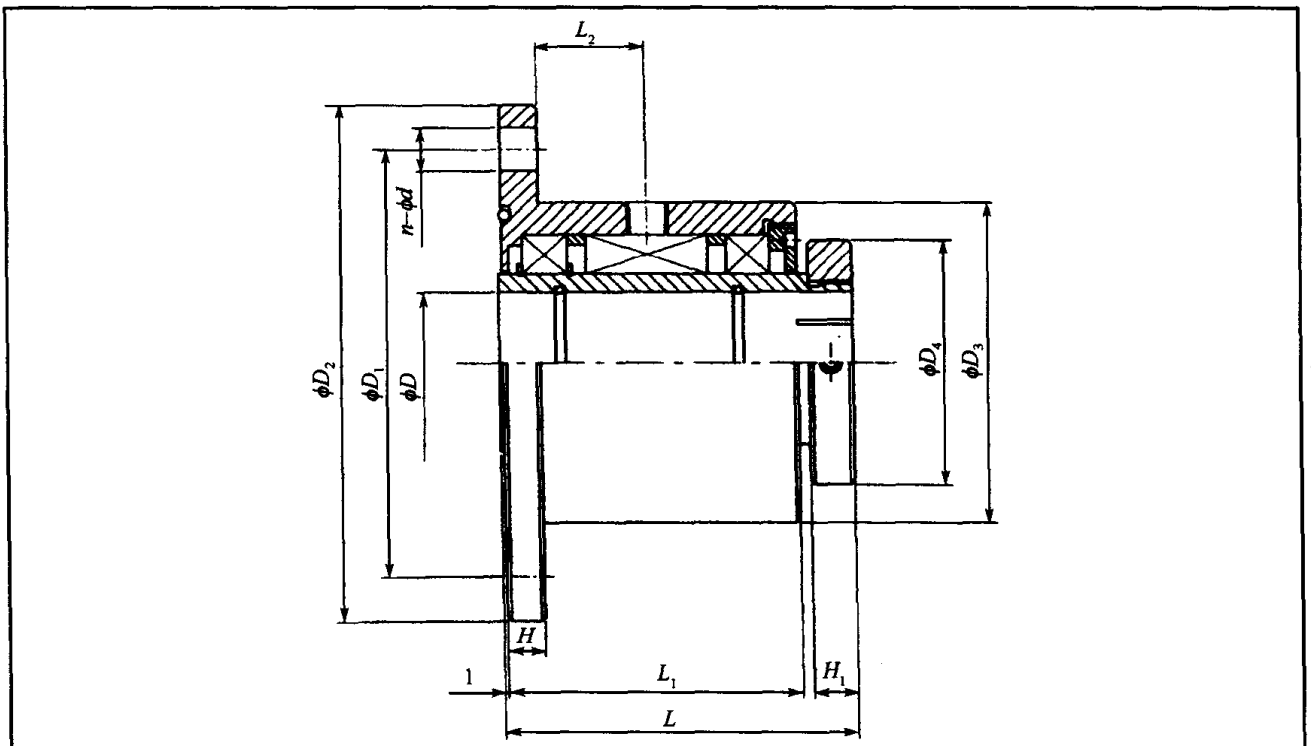
型 号	外形尺寸/mm										性能参数	
	d	D	D_1	D_2	L	L_1	L_2	L_3	H	键 (深×长×宽)	允许扭矩 /MPa	轴承 型号
SFL006NN	$6^{+0}_{-0.018}$	38	80	60	97.5	20	57.5	18	10	0.5×12	0.95	627
SFF006NN												
SFL010NN	$10^{+0}_{-0.022}$	44	80	60	119.5	25	69.5	24	10	3×1.8×14	6.1	6001
SFF010NN												
SFL012NN	$12^{+0}_{-0.027}$	48	90	70	133.5	30	73.5	27	10	4×2.5×20	12.2	6002
SFF012NN												
SFL020NN	$20^{+0}_{-0.033}$	63	105	85	151.5	35	81.5	31	10	6×3.5×25	60	6005
SFF020NN												

表 6-149 空心轴密封传动装置(一)



型 号	外形尺寸/mm						承轴型号
	D	D ₁	D ₂	L	L ₁	H	
HTL010CN	10 ^{+0.03} _{-0.01}	48 ⁺⁰ _{-0.02}	34	78	64	10	16003
HTL020CN	20 ^{+0.04} _{-0.02}	58 ⁺⁰ _{-0.03}	44	82.5	68.5		6906
HTL025CN	25 ^{+0.04} _{-0.02}	63 ⁺⁰ _{-0.03}	49	88	74		6907
HTL030CN	30 ^{+0.04} _{-0.02}	73 ⁺⁰ _{-0.03}	54	93	79		6908
HTL040CN	40 ^{+0.04} _{-0.02}	88 ⁺⁰ _{-0.04}	69	96	80	12	6910
HTL050CN	50 ^{+0.05} _{-0.02}	98 ⁺⁰ _{-0.04}	79	98	82		6912
HTL075CN	75 ^{+0.06} _{-0.03}	137 ⁺⁰ _{-0.04}	109	115	96	15	6915

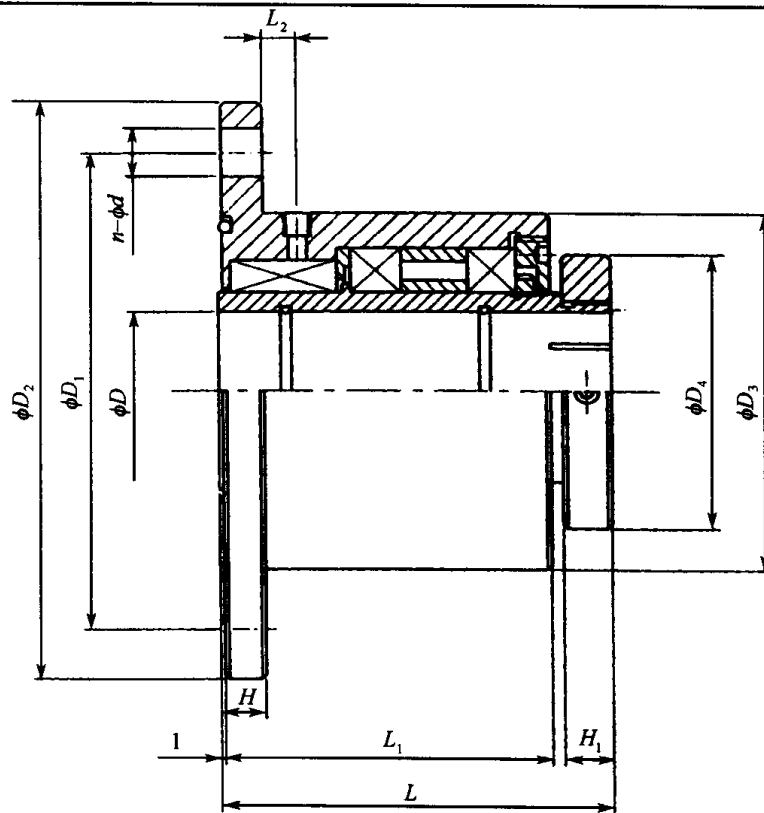
表 6-150 空心轴密封传动装置(二)



(续)

型号	外形尺寸/mm											承轴型号
	D	D_1	D_2	D_3	D_4	L	L_1	L_2	H	H_1	$n-\phi d$	
HFL010CN	$10^{+0.03}_{-0.01}$	70	90	51	34	78	64	20	10	10	4×10	16003
HFL020CN	$20^{+0.04}_{-0.02}$	85	105	63	44	82.5	68.5	22.5				6906
HFL025CN	$25^{+0.04}_{-0.02}$	100	120	71	49	88	74	26				6907
HFL030CN	$30^{+0.04}_{-0.02}$			78	54	93	79	27				6908
HFL040CN	$40^{+0.04}_{-0.02}$	120	145	90	69	96	80	26.5	12	4×12		6910
HFL050CN	$50^{+0.05}_{-0.02}$	135	160	103	79	98	82					6912
HFL075CN	$75^{+0.06}_{-0.03}$	185	210	123	109	115	96	33	12	15		6918

表 6-151 空心轴密封传动装置(三)



型号	外形尺寸/mm											承轴型号
	D	D_1	D_2	D_3	D_4	L	L_1	L_2	H	H_1	$n-\phi d$	
HFF020CC	$20^{+0.04}_{-0.02}$	100	120	78	44	123.5	109.5	14.5	10	10	4×10	7206CDB
HFF025CC	$25^{+0.04}_{-0.02}$	120	145	90	49	126	112	13				7297CDB
HFF030CC	$30^{+0.04}_{-0.02}$	120		96	54	130.5	116.5	14				7208CDB
HFF040CC	$40^{+0.04}_{-0.02}$	135	160	106	69	141	125	12	12	12	4×12	7210CDB
HFF050CC	$50^{+0.05}_{-0.02}$	160	185	132	70	147.5	131.5	12.5				7212CDB

第七章 真空元件

一、真空阀门

(一) 概述

真空阀门是真空系统中用以调节气流量、切断或接通管路的元件。

真空阀门的种类繁多,根据阀门的工作特性、传动原理、联接方式和用途等分类,见表 7-1。

表 7-1 真空阀门类别

分类方法	阀门名称
根据工作压力	低真空阀门、高真空阀门、超高真空阀门
根据用途	截止阀、隔离阀、充气阀、节流阀、换向阀、封闭送料阀
根据传动原理	手动阀、电动阀、手电两用阀、电磁阀、气动阀、液动式真空阀
根据材料	玻璃真空活塞(考克)、金属真空阀
根据结构特点	挡板阀、翻板阀、蝶阀、连杆阀、隔板阀、闸阀、双通阀、三通阀、四通阀、直通阀、角阀

对真空阀门的基本要求是:流导尽可能大,密封可靠,操作简便,密封部件耐磨性好,能反复使用,寿命长,容易清洗安装。此外,对于超高真空阀还要求能耐烘烤(450℃),对于节流阀要求能均匀调节气流量。

(二) 真空阀门的一般结构原理

1. 节流阀、放气阀

节流阀、放气阀的结构原理如图 7-1 所示。

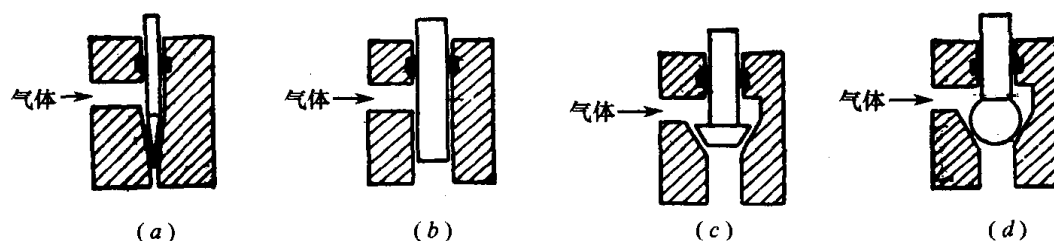


图 7-1 节流阀、放气阀结构原理

2. 隔离阀

隔离阀结构原理如图 7-2 所示。

3. 组合阀

组合阀结构原理如图 7-3 所示。

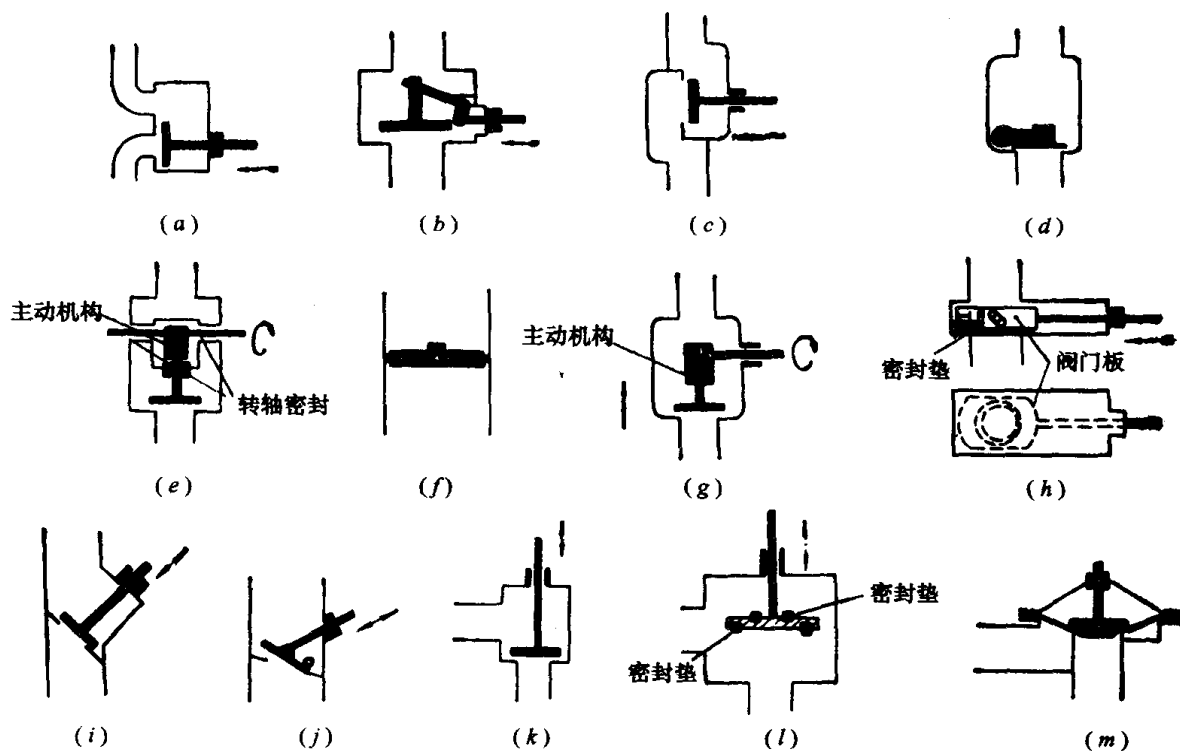


图 7-2 隔离阀结构原理

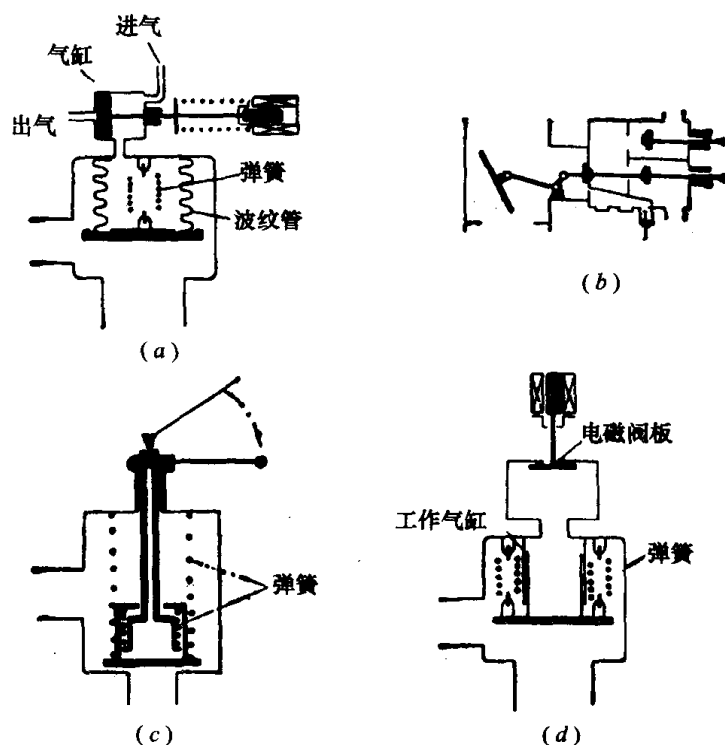


图 7-3 组合阀结构原理

(三) 真空阀门的型号编制、型式及基本参数

1. 真空阀门型号编制方法(摘自 JB/T 7673—95)

本标准规定了真空阀门型号的编制方法;适用于各种真空阀门。

真空阀门型号由基本型号和辅助型号两部分组成,中间用短横线隔开,型号构成如下:

一、真空阀门

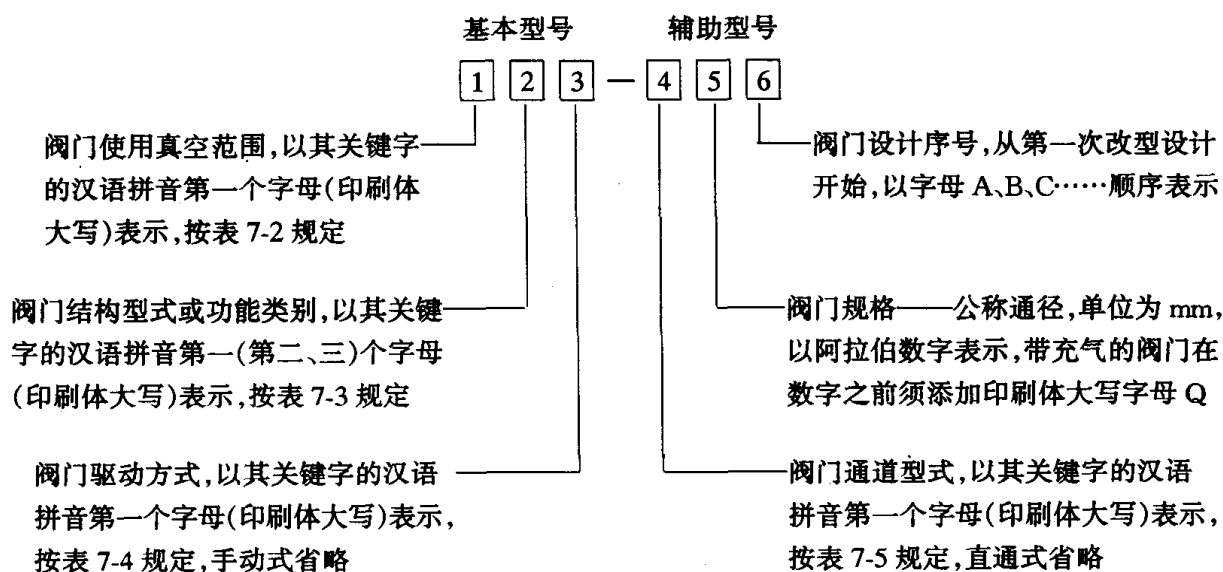


表 7-2 阀门使用真空范围

代 号	C	G	D
关键字意义及拼音字母	“超”高真空阀“chao”	“高”真空阀“gao”	“低”真空阀“di”

表 7-3 阀门结构型式

代 号	关键字意义及拼音字母	代 号	关键字意义及拼音字母
D	“挡”板“dang”	Z	“锥”形“zhui”
C	“插”板“cha”	W	“微”调“wei”
F	“翻”板“fan”	Q	充“气”“qi”
M	隔“膜”“mo”	U	“球”形“qiu”
I	“蝶”“die”	Y	“压”差“ya”

表 7-4 阀门驱动方式

代 号	D	C	Q	Y
关键字意义及拼音字母	“电”动“dian”	“磁”动“ci”	“气”动“qi”	“液”动“ye”

表 7-5 阀门通道型式

代 号	S	j
关键字意义及拼音字母	“三”通式“san”	直“角”式“jiao”

阀门型号意义示例:

- GDQ—J320 高真空气动挡板阀,直角式,公称通径为 320mm
- DDC—JQ50 低真空磁动挡板阀,直角式、带充气,公称通径为 50mm
- GI—50 高真空手动蝶型阀,公称通径为 50mm
- DW—2A 低真空微调阀,公称通径为 2mm,第一次改型设计
- CD—J25 超高真空手动挡板阀,直角式,公称通径为 25mm

CCQ—100 超高真空气动插板阀,公称通径为 100mm

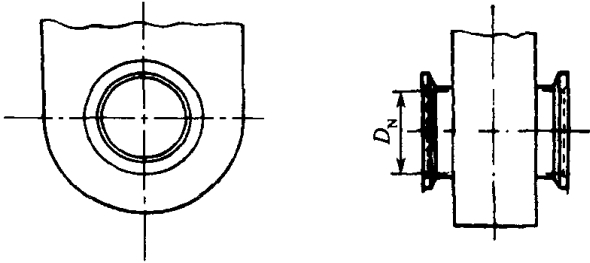
CDY—320 超高真空液动挡板阀,公称通径为 320mm

2. 高真空插板阀型式与基本参数(摘自 JB /T 4077—91)

本标准规定了高真空插板阀的型式与基本参数,适用于 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa} \sim 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 真空中用以开启或隔断气流的插板阀(以下简称插板阀)。开启阀门时,阀板两侧的压力差应小于或等于 2.7kPa。

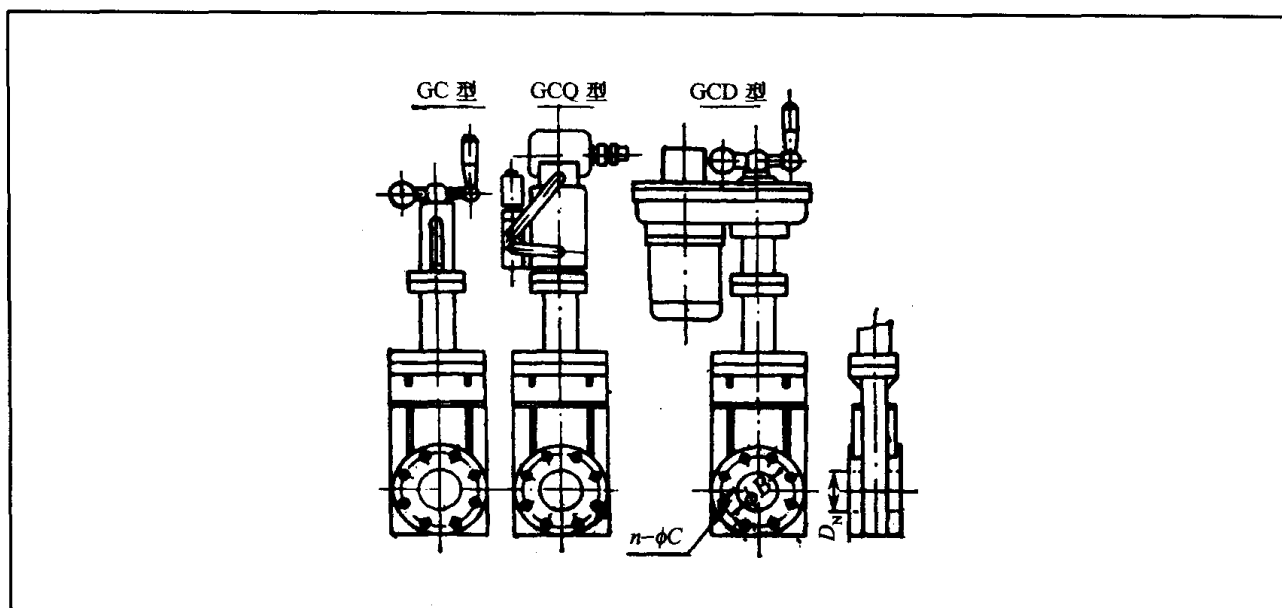
①公称通径 D_N 小于或等于 40mm 的插板阀,其结构型式与基本参数应符合表 7-6 规定;其连接法兰的结构尺寸应符合 GB4982 的规定。

表 7-6 $D_N \leq 40 \text{mm}$ 真空插板阀型式与基本参数

						
型 号			公称通径 D_N /mm	连接法兰 型 式	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹
手 动	气 动	电 动				
GC-25	GCQ-25	GCD-25	25	按 GB 4982 规定	1.3×10^{-7}	30
GC-40	GCQ-40	GCD-40	40			85
注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据						

②公称通径 D_N 为 63mm~630mm 的插板阀,其结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-7 的规定。法兰的结构尺寸应符合 GB6070 的规定。

表 7-7 D_N 为 63mm~630mm 高真空插板阀基本参数



(续)

型 号			公称通径 D_N /mm	连 接 尺 寸/mm			漏率 /Pa·L·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹
手 动	气 动	电 动		ϕB	n	ϕC		
GC-63	GCQ-63	GCD-63	63	110	4	M8	1.3×10^{-7}	400
GC-100	GCQ-100	GCD-100	100	145	8			1100
GC-160	GCQ-160	GCD-160	160	200				3400
GC-200	GCQ-200	GCD-200	200	260	12	M10		7300
GC-250	GCQ-250	GCD-250	250	310				12000
GC-320	GCQ-320	GCD-320	320	395		M12	1.3×10^{-5}	21000
—	GCQ-400	GCD-400	400	480	16			30000
—	GCQ-500	GCD-500	500	580				51000
—	GCQ-630	GCD-630	630	720				20

注：①分子流状态下的理论计算值，不作验收依据

注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

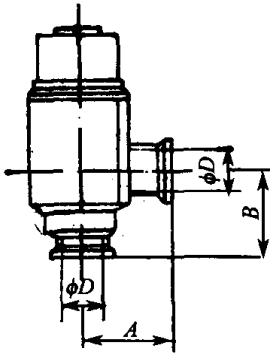
③插板阀的型号表示方法按 ZBJ78018 规定。

3. 高真空挡板阀型式与基本参数(摘自 JB/T4078—91)

本标准规定了高真空挡板阀的型式与基本参数,适用于 $1.3\times 10^{-3}\text{Pa}\sim 1.0\times 10^5\text{Pa}$ 真空系统中用以开启或隔断气流的挡板阀(以下简称挡板阀);挡板阀的型号表示方法按 ZBJ78018 规定。

①公称通径 D_N 小于或等于 40mm 的手动挡板阀,其结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-8 的规定。法兰的结构尺寸应符合 GB1982 和 GB4980 的规定。

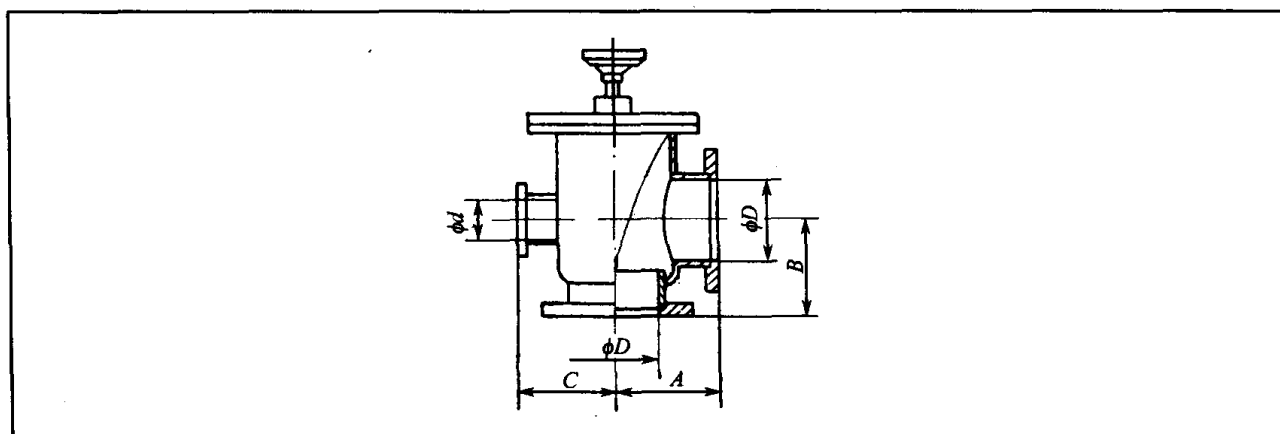
表 7-8 $D_N\leq 40\text{mm}$ 手动挡板阀基本参数

	型 号	公称通径 D_N /mm	连 接 尺 寸/mm			漏 率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	流导 ^① $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$
			A	B	ϕD		
	GD-J10	10	30	30	10	1.3×10^{-7}	1.5
	GD-J16	16	40	40	16		4.5
	GD-J25	25	50	50	25		14
	GD-J40	40	65	65	40		40

注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

②公称通径 D_N 为 63mm~250mm 的手动挡板阀,其结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-9 的规定。法兰的结构尺寸应符合 GB6070 的规定。

表 7-9 D_N 为 63mm~250mm 手动挡板阀基本参数



(续)

型 号	公称通径 D_N /mm	连接尺寸/mm					漏 率 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹
		A	B	C	ϕD	ϕd		
GD-J63	63	88	88	—	63	—	1.3×10^{-10}	110
GD-J100	100	108	108	—	100	—	1.3×10^{-10}	340
GD-J160 GD-S160	160	138	138	138	160	40	1.3×10^{-10}	1000
GD-J250 GD-S250	250	208	208	208	250	63	1.3×10^{-10}	2500

注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

③公称通径 D_N 为 63mm~1000mm 的气动、电动挡板阀,其结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-10 的规定;法兰的结构尺寸应符合 GB6070 的规定。

表 7-10 D_N 为 63mm~1000mm 气动、电动挡板阀基本参数

型 号		公称通径 D_N /mm	连接尺寸/mm					漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹	压缩空 气压力 /MPa	开闭时间/s	
气 动	电 动		A	B	C	ϕD	ϕd				气 动	电 动
GDQ-J63	GDD-J63	63	88	88	—	63	—	1.3×10^{-7}	110	0.4~ 0.6	3	20
GDQ-J80	GDD-J80	80	88	88	—	80	—		210			
GDQ-J100	GDD-J100	100	108	108	—	100	—		340			
GDQ-J160 GDQ-S160	GDD-J160 GDD-S160	160	138	138	138	160	40		1000		5	25
GDQ-J200 GDQ-S200	GDD-J200 GDD-S200	200	200	200	200	200	50		1400			
GDQ-J250 GDQ-S250	GDD-J250 GDD-S250	250	208	208	208	250	63		2500			
GDQ-J320 GDQ-S320	GDD-J320 GDD-S320	320	250	250	250	320	80	1.3×10^{-5}	4200		7	30
GDQ-J400 GDQ-S400	GDD-J400 GDD-S400	400	330	330	330	400	100		6400			
GDQ-J630 GDQ-S630	GDD-J630 GDD-S630	630	450	450	450	630	160		17000		10	40
GDQ-J800 GDQ-S800	GDD-J800 GDD-S800	800	520	520	520	800	200		29000			
GDQ-J1000 GDQ-S1000	GDD-J1000 GDD-S1000	1000	620	620	620	1000	320		47000			

注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

4. 高真空蝶阀型式与基本参数(摘自 JB /T 4079—91)

本标准规定了高真空蝶阀型式与基本参数,适用于 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa} \sim 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 真空系统中用以开启或隔断气流的高真空蝶阀(以下简称蝶阀);蝶阀的型号表示方法按 ZB J78018 规定。

蝶阀有手动(GI)和气动(GIQ)两种型式,其基本参数应符合表 7-11 的规定;法兰结构尺寸应符合 GB6070 规定。

表 7-11 高真空蝶阀基本参数

GI 型

GIQ 型

型 号		公称通径 D_N /mm	连 接 尺 寸/mm			漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹
手 动	气 动		ϕB	n	ϕC		
GI-32	—	32	70	4	9	1.3×10^{-7}	22
GI-40	GIQ-40	40	80				50
GI-50	GIQ-50	50	90				102
GI-63	GIQ-63	63	110				156
GI-80	GIQ-80	80	125	8	11		300
GI-100	GIQ-100	100	145				530
GI-125	GIQ-125	125	175				910
GI-160	GIQ-160	160	200				1620
GI-200	GIQ-200	200	260	12	14	1.3×10^{-6}	2550
GI-250	GIQ-250	250	310				4180
GI-320	GIQ-320	320	395				7130
—	GIQ-400	400	480				11000
—	GIQ-500	500	580	16	20		17400
—	GIQ-630	630	720				27000
—	GIQ-800	800	890				45000
—	—	—	—				—

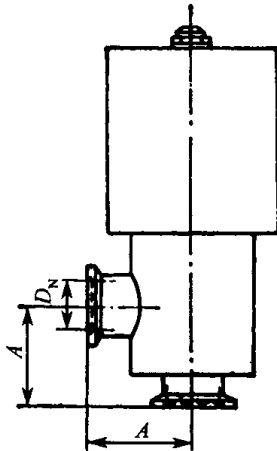
注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

5. 高真空电磁阀型式与基本参数(摘自 JB /T 4080—91)

本标准规定了高真空电磁阀的型式与基本参数,适用于 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa} \sim 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 真空中用以开启或隔断气流的电磁阀(以下简称阀门)。

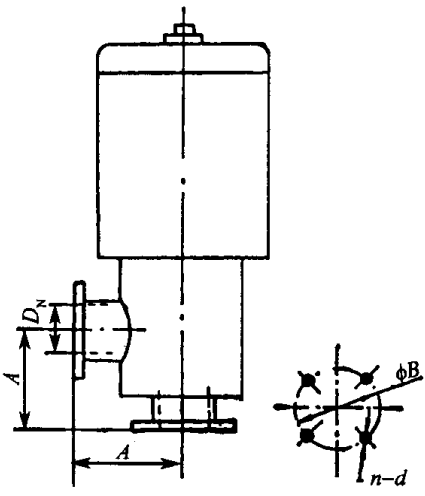
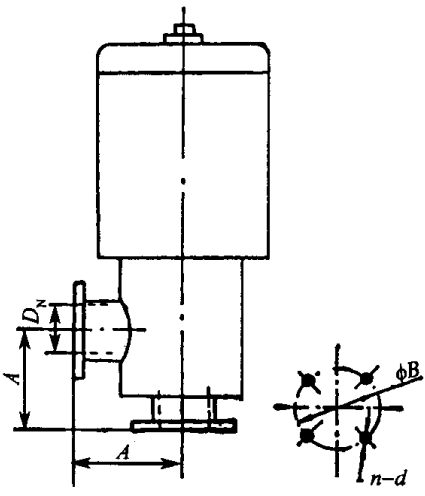
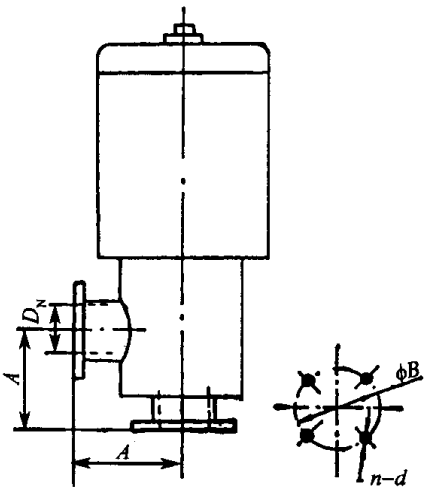
①公称通径 D_N 小于或等于 40mm 的阀门,结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-12 的规定;法兰的结构尺寸应符合 GB4982 和 GB4983 的规定。

表 7-12 $D_N \leq 40\text{mm}$ 电磁高真空阀基本参数

						
型 号	公称通径 D_N /mm	连接法兰型式	连接尺寸 A /mm	漏 率 $/\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	流导 ^① $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	每小时最大开动 频率/次
GDC-J10	10	按 GB4982 和 GB4983 规定	30	1.3×10^{-10}	1.5	500
GDC-J16	16		40		3	
GDC-J20	20				8	
GDC-J25	25		50		12	
GDC-J32	32				28	
GDC-J40	40		65		39	
注:①流导为分子流状态下的理论计算值,不作验收依据						

②公称通径 D_N 为 50mm~200mm 的阀门,结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-13 的规定。法兰的结构尺寸应符合 GB6070 的规定。

表 7-13 D_N 为 50mm~200mm 电磁高真空阀基本参数

		型号	公称通 径 D_N mm	连接尺寸				漏 率 $/\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	流导 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	每小时 最大开 动频率 /次
				A /mm	ϕB /mm	n	d /mm			
		GDC-J50	50	80	90	4	$\phi 9$	1.3×10^{-10}	80	500
		GDC-J63	63	88	110				180	
		GDC-J80	80	95	125				225	
		GDC-J100	100	108	145	8	$\phi 11$	1.3×10^{-8}	460	250
		GDC-J125	125	138	175				500	
		GDC-J160	160	160	200				1100	
		GDC-J200	200	200	260	12			2000	

6. 真空电磁带充气阀型式与基本参数(摘自 JB/T 4083—91)

本标准规定了真空电磁带充气阀的型式与基本参数,适用于真空系统中装设在油封式真空泵上的直角式电磁带充气阀(以下简称阀门)。

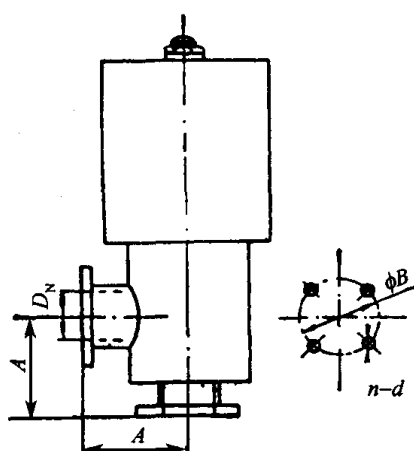
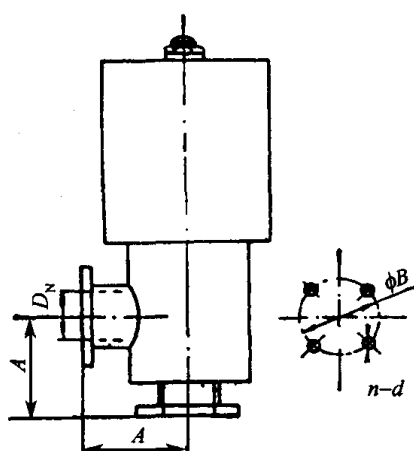
①公称通径 D_N 小于或等于 40mm 的阀门,结构型式、连接法兰及基本参数应符合表 7-14 的规定;法兰的结构尺寸应符合 GB4982 的规定。

表 7-14 $D_N \leq 40\text{mm}$ 电磁真空带充气阀型式与基本参数

型 号	公称通径 D_N /mm	连接法兰型式	连接尺寸 A /mm	漏 率 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	流导/L·s ⁻¹
DDC-JQ10	10	按 GB4982 规定	30	6.6×10^{-7}	1.5
DDC-JQ16	16		40		3
DDC-JQ20	20				8
DDC-JQ25	25		50		12
DDC-JQ32	32				28
DDC-JQ40	40		65		39

②公称通径 D_N 为 50mm~200mm 的阀,其型式与基本参数应符合表 7-15 规定;连接法兰按 GB6070—1985《真空法兰》规定。

表 7-15 D_N 为 50mm~200mm 电磁真空带充气阀型式与基本参数

	型 号	公称通 径 D_N /mm	连接尺寸				漏 率 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	流导 ^① /L·s ⁻¹
			A/mm	ϕB /mm	n	ϕd /mm		
	DDC-JQ50	50	80	90	4	$\phi 9$	6.6×10^{-7}	80
	DDC-JQ63	63	88	110				180
	DDC-JQ80	80	95	125				225
	DDC-JQ100	100	108	145	8	$\phi 11$	6.6×10^{-6}	460
	DDC-JQ125	125	138	175				500
	DDC-JQ160	160	160	200				1100
	DDC-JQ200	200	200	260	12			2000

注:①分子流状态下的理论计算值,不作验收依据

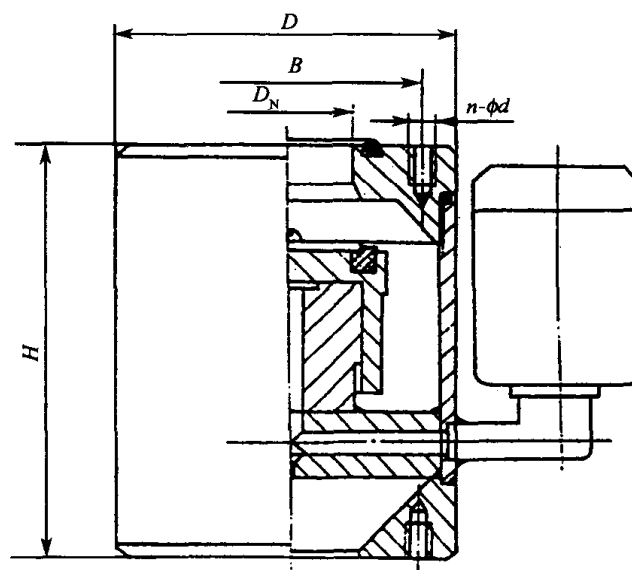
7. 低真空电磁压差充气阀的型式与基本参数(摘自 JB/T5410—91)

本标准规定了低真空电磁压差充气阀的型式与基本参数。适用于 DYC-Q 型低真空电磁压差充气阀(以下称压差阀)。

(1)结构型式

压差阀的结构型式及基本参数应符合表 7-16 的规定。连接法兰尺寸按 GB6073.3 规定。

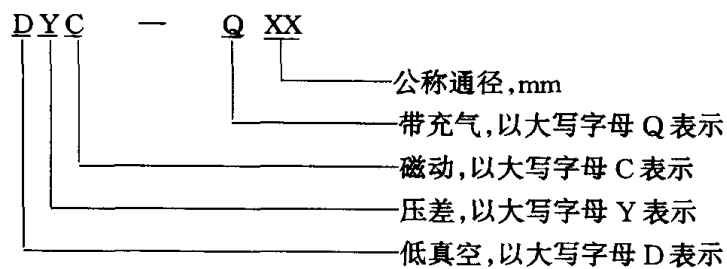
表 7-16 压差阀基本参数



型 号	公称通径 D_N /mm	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	开闭时间 /s	电机功率 /W	流导 ^① /L·s ⁻¹	基本尺寸/mm				
						D	B	d	H	n
DYC-Q16	16	$\leq 6.5 \times 10^{-2}$	≤ 3	14	>8	60	43	M6	≤ 75	4
DYC-Q20	20				>12	65	50		≤ 83	
DYC-Q25	25				>20	70	55		≤ 92	
DYC-Q32	32				>26	90	70	M8	≤ 102	
DYC-Q40	40				>40	100	80		≤ 114	
DYC-Q50	50				>80	110	90		≤ 132	
DYC-Q63	63				>120	130	110		≤ 146	
DYC-Q80	80				>200	145	125	M10	≤ 168	8
DYC-Q100	100				>300	165	145		≤ 200	
DYC-Q125	125				>400	200	175		≤ 280	
DYC-Q160	160				>600	225	200		≤ 260	
DYC-Q200	200				>1200	285	260	M12	≤ 300	12
DYC-Q250	250				>2000	335	310		≤ 340	
DYC-Q320	320				>3000	425	395		≤ 380	

注：①分子流状态下的理论计算值，不作验收依据

(2)型号组成



(3)型号示例
公称通径为 80mm 的低真空电磁压差充气阀型号标记为
DYC-Q80

(四) 国产真空阀门型式、性能参数

1. 隔膜式真空阀

隔膜式真空阀是利用阀杆将橡皮膜直接压在阀座上用来截止或接通真空系统。阀体采用铝合金铸造,结构简单,体积小,质量轻,密封性能良好。采用丁腈橡胶隔膜,适用于前级和预抽管道上及温度为-25℃~80℃的非腐蚀性气体。采用氟橡胶隔膜,可用于高真空系统,使温度范围为-30℃~150℃。

①上海阀门二厂生产的 GM 高真空隔膜阀有 GM 型、GM-C 型、GM-C-KF 型、GM-D-H (I) 型及 GM-D-H(II) 型五种,其外形尺寸和主要技术性能见表 7-17~表 7-21。

GM 型高真空隔膜阀供接通或切断真空系统之用。连接管焊接式真空隔膜阀更是溴化锂制冷设备中的理想配件。适用介质为空气及非腐蚀性气体。

表 7-17 GM 型高真空隔膜阀技术性能参数

适用范围 /Pa	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	介 质 温 度/℃		主 要 材 料
		隔膜为丁腈橡胶	隔膜为氟橡胶	
10 ⁵ ~1.3×10 ⁻⁴	6.7×10 ⁻⁴	-25~+80	-30~+150	1. 阀体材料:碳钢、不锈钢 2. 密封材料:丁腈橡胶、氟橡胶 3. 阀杆:不锈钢

表 7-18 GM-D-H(I) 型隔膜阀外形尺寸 (单位:mm)

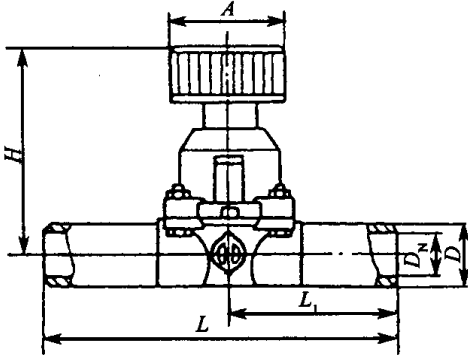
							
型 号	通径 D _N /mm	D	H	A	L	L ₁	连 接 方 式
GM-10D-H(I)	10	19	73	50	150	75	连接管焊接式
GM-25D-H(I)	25	32	108	66	150	75	
GM-40-H	40	45	133	100	240	120	
GM-50-H	50	57	157	100	240	120	

表 7-19 GM-D-H(Ⅱ)型隔膜阀外形尺寸

(单位:mm)

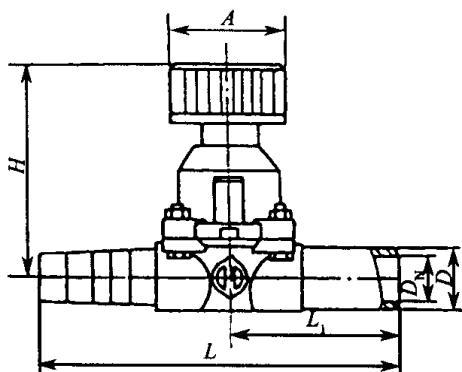
							
型 号	通径 D_N /mm	D	H	A	L	L_1	连接方式
GM-10D-H(Ⅱ)	10	19	73	50	150	75	连接管焊接式
GM-25D-H(Ⅱ)	25	32	108	66	150	75	

表 7-20 GB-C-KF 隔膜阀外形尺寸

(单位:mm)

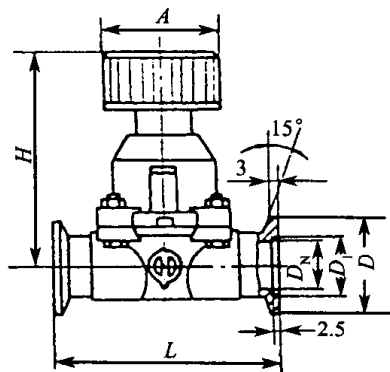
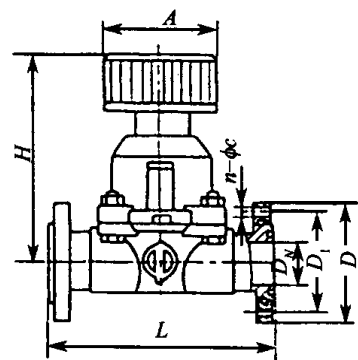
							
型 号	通径 D_N /mm	D	D_1	A	H	L	连接法兰
GM-10C-KF	10	30	12.2	55	80	75	GB4982
GM-25C-KF	25	40	26.2	80	105	120	
GM-40-KF	40	55	41.2	100	133	120	

表 7-21 GM-C 型隔膜阀外形尺寸

(单位:mm)

								
型 号	通径 D_N /mm	D	D_1	H	A	L	$n-\phi c$	连接标准
GM-10C	10	46	36	80	55	75	4- $\phi 6$	GB6070 或 JB919
GM-25C	25	70	55	105	80	120	4- $\phi 7$	
GM-40	40	100	80	133	100	150	4- $\phi 9$	
GM-50	50	110	90	157	100	180	4- $\phi 9$	

②上海万可姆高科技生产的 GM 型真空隔膜阀有 GM-B 型、GM-C 型、GMH-A 型和气动型 GMQ-A 型、GMQ-B 型、GMQ-C 型六种。其外形尺寸和主要技术指标性能见表 7-22 和表 7-23。

表 7-22 GM 型真空隔膜阀技术性能参数

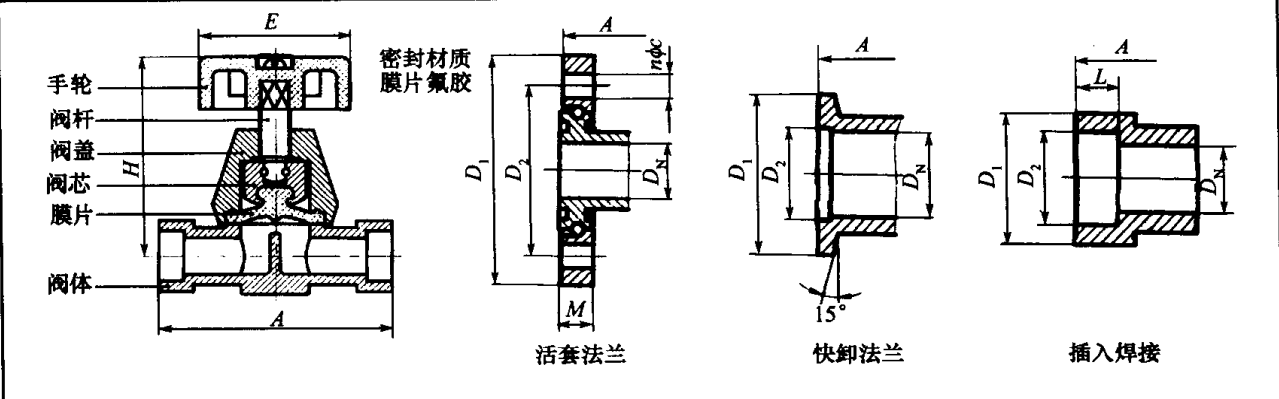
				
适用压力范围 /Pa	漏气速率 /Pa·L·s ⁻¹	介质温度 /℃	使用寿命 /次	主要材料
3×10 ⁵ ~1×10 ⁻⁶	≤1×10 ⁻⁶	-20~150	≥3×10 ⁴	阀体:304、316L

表 7-23 GM 型真空隔膜阀外形尺寸

型 号	通径 D _N /mm	外形尺寸/mm						连接尺寸 n-φc	质量 /kg	备 注
		A	D ₁	D ₂	E	H	L			
GMH-10A	10	80	25	18	50	65	10	4-φ7	0.9	插入焊接 结构
GMH-25A	25	110	40	33	65	88	14	4-φ7	1.8	
GMH-40A	40	140	48	40	80	112	17.5	4-φ7	2.9	
GM-10B	10	80	55	40	50	73	—	4-φ7	0.9	活套法兰 连接
GM-25B	25	110	70	55	65	98	—	4-φ7	1.8	
GM-40B	40	140	100	80	80	127	—	4-φ9	2.9	
GM-10C	10	70	30	12.2	50	66	—	—	0.9	快卸法兰 连接
GM-25C	25	90	40	26.2	65	83	—	—	1.8	
GM040C	40	122	55	41.5	80	102	—	—	2.9	

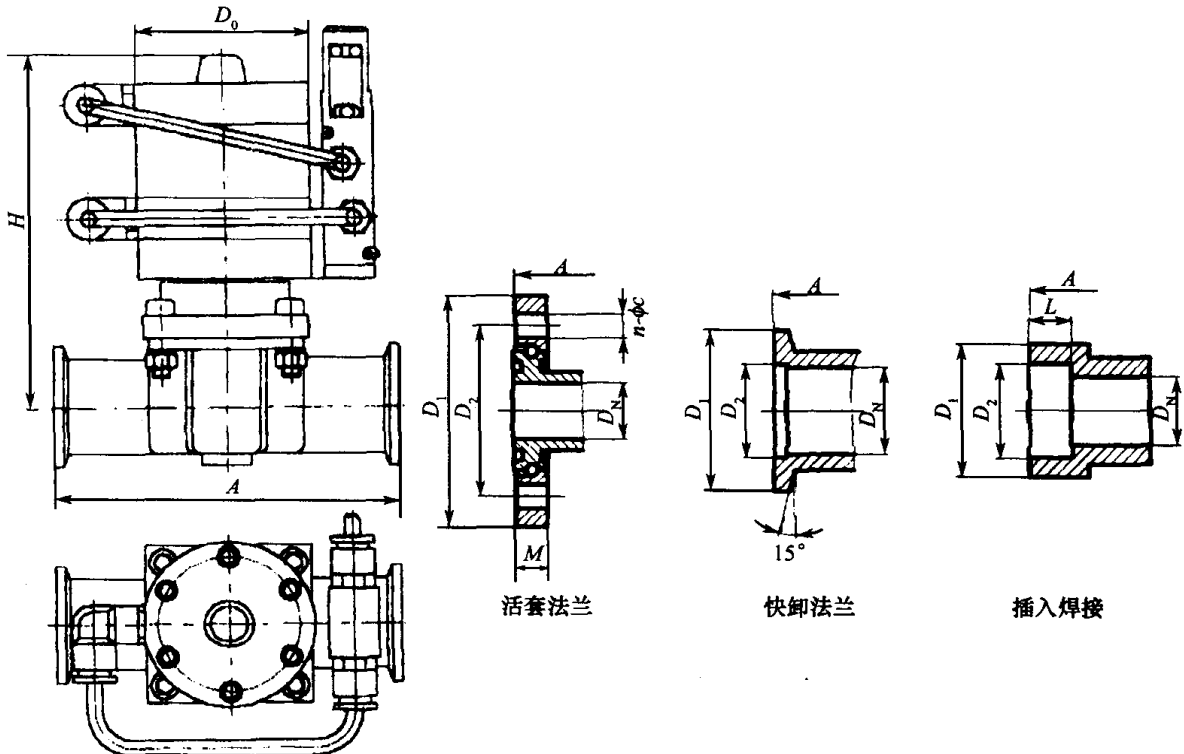
③上海万可姆高科技生产的 GMD 型气动真空隔膜阀是以压缩空气为动力,通过气缸执行机构开、关真空阀门,可广泛用于自动控制的真空设备中。其气动控制方式有:两位两通,弹簧复位,常闭;两位两通,弹簧复位,常开和两位两通,双作用执行机构三种。阀体材料为 304、316L,漏率≤1×10⁻⁶Pa·L/s,阀门寿命≥3 万次。其外形尺寸见表 7-24。

④沈阳科学仪器研制中心有限公司生产的隔膜阀 DM-1 型,其主要技术性能参数和外形尺寸见表 7-25。

2. 真空挡板阀

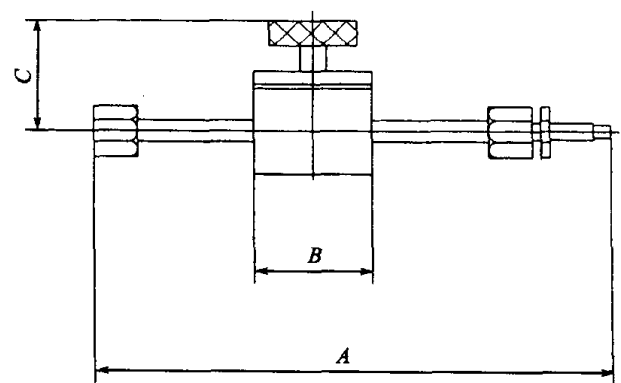
高真空挡板阀可用于真空系统中作启闭机构,适用的介质为空气及非腐蚀性气体。传动部件以螺纹结构为主,也可采用平凸轮结构。动作轻巧、工作可靠、适用温度范围为 -30℃ ~ 150℃。真空挡板阀按轴封结构可分 GD-J 型橡胶密封和 GD-Jb 型波纹管密封两种。GD-J 为角通型式,GD-S 为带预抽口的三通型式。

表 7-24 GMQ 型气动真空隔膜阀外形尺寸



型号	通径 D_N/mm	外形尺寸/mm					连接尺寸 $n-\phi$	质量 /kg	备 注
		A	D_1	D_2	H	L			
GMQ-10A	10	80	25	18	110	10	—	1.2	插入焊接结构
GMQ-25A	25	110	40	33	130	14	—	2	
GMQ-40A	40	140	55	48	160	17.5	—	3	
GMQ-10B	10	80	55	40	110	—	4- $\phi 7$	1.2	活套法兰
GMQ-25B	25	110	70	55	130	—	4- $\phi 7$	2	
GMQ-40B	40	140	100	80	160	—	4- $\phi 7$	3	
GMQ-10C	10	70	30	12.2	110	—	—	1.2	快卸法兰
GMQ-25C	25	90	40	26.2	130	—	—	2	
GMQ-40C	40	122	55	41.2	160	—	—	3	

表 7-25 DM-1 型隔膜真空阀外形尺寸及性能参数



型号	通径 D_N/mm	外形尺寸/mm			漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	烘烤温度 $^{\circ}\text{C}$	接管内径 /mm	接口尺寸	法兰
		A	B	C					
DM-1	16	40	40	87	$<10^{-6}$	150	$\phi 3$	M10×1	CF16

①上海阀门二厂生产的手动高真空挡板阀有 GD-J 型、GD-S 型、GD-J-T 型和 GD-J-H 型。其外形及性能参数见表 7-26~表 7-28。

表 7-26 GD 型高真空挡板阀的外形尺寸、主要技术性能参数

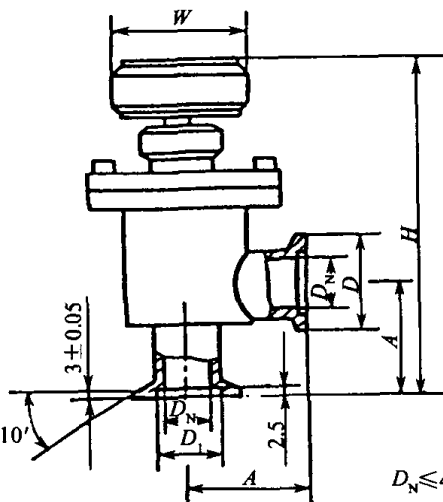
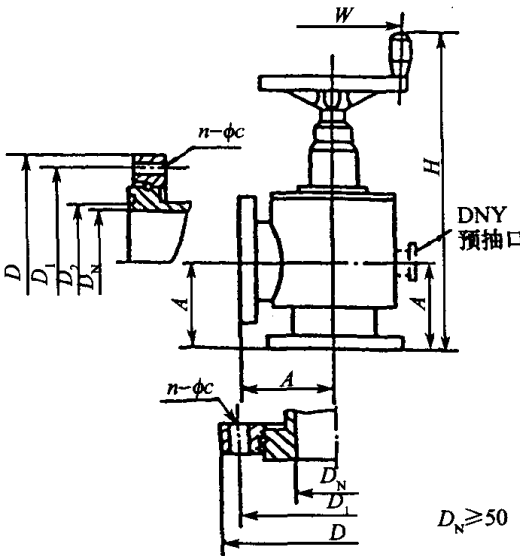
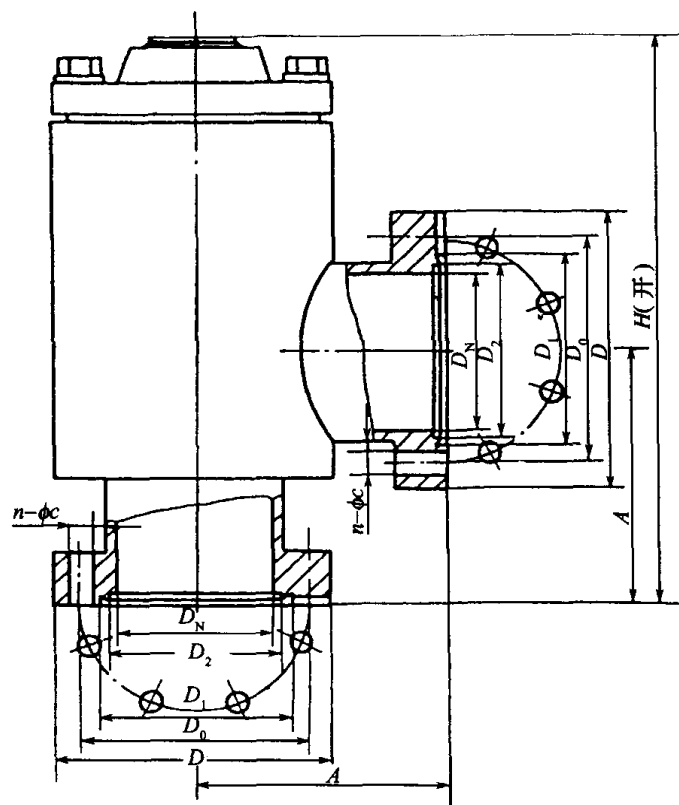
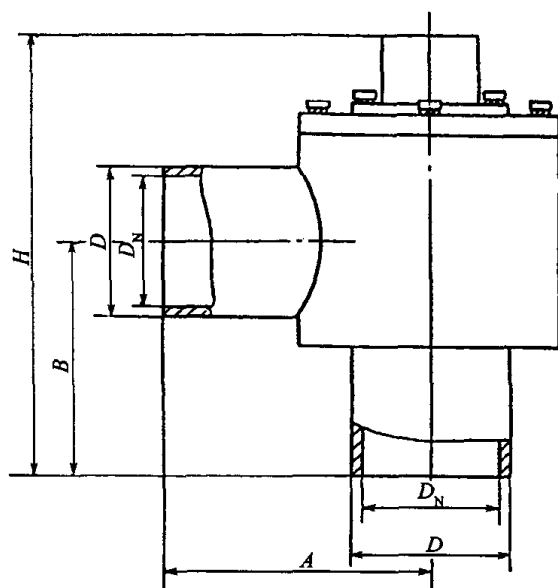
																			
型 号	通径 D _N /mm	外形尺寸/mm								连接 标准	性能参数 漏率/Pa·L·s ⁻¹	备 注							
		D	D ₁	D ₂	A	H	W	n-φc	预抽口										
GD-J $\frac{10}{10b}$	10	30	12.2		30	120	55	—	—	GB4982	1.3×10^{-7}	1. 适用范围： 10 ⁵ Pa~1.3×10 ⁻⁴ Pa (轴封为橡胶) 10 ⁵ Pa~1.3×10 ⁻⁵ Pa (轴封为波纹管) 2. 介质温度： -25℃~80℃ (密封件为丁腈橡胶) -30℃~150℃ (密封件为氟橡胶) 3. 阀体材料： 碳钢镀镍或不锈钢 4. 阀板密封材料： 丁腈橡胶或氟橡胶							
GD-J $\frac{16}{16b}$	16	30	17.2		40	133	55	—	—										
GD-J $\frac{25}{25b}$	25	40	26.2		50	148	60	—	—										
GD-J $\frac{32}{32b}$	32	55	34.2		58	168	60	—	—										
GD-J $\frac{40}{40b}$	40	55	41.2		65	168	60	—	—										
GD-J50	50	110	90	55	70	192	89	4-φ9	—	GB6070									
GD-J63	63	130	110	68	88	360	160		—										
GD-J80	80	145	125	85	98	380	160	8-φ9	—										
GD-J100	100	165	145	105	108	410	160		—										
GD- $\frac{J150}{S150}$	150	220	195	156	138	610	250	8-φ12	D _N 40GB4982	JB919									
GD- $\frac{J160}{S160}$	160	225	200	165	138	610	250	8-φ11	D _N 40GB4982	GB6070									
GD- $\frac{J200}{S200}$	200	285	260	208	200	650	250	12-φ11	D _N 50GB6070										
GD- $\frac{J250}{S250}$	250	335	310	258	208	725	250		D _N 63GB6070										
GD- $\frac{J300}{S300}$	300	380	350	308	250	800	250	8-φ14	D _N 80GB6070	JB919	1.3×10^{-5}								
GD- $\frac{J320}{S320}$	320	425	395	328	250	800	250	12-φ14	D _N 80GB7070	GB6070									

表 7-27 CD-J-T 型超高真空挡板阀的外形尺寸、主要技术性能参数



型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm								性能参数			备 注
		D	D_0	D_1	D_2	A	H	$n \cdot \phi$	连接标准	漏率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	最大关闭力矩 $/\text{N} \cdot \text{m}$	行程 /mm	
CD-J25A-T	25	62	47	39	34	50	160	6- $\phi 6.4$	GB6071	1×10^{-7}	59	25	1. 烘烤温度: 400℃ 2. 阀体材料: 不锈钢 3. 阀板材料: 无氧铜 4. 轴封处密封件: 不锈钢波纹管
CD-J50A-T	50	89	72.4	61.6	55.6	80	200	8- $\phi 8.4$			98	20	

表 7-28 GD-J-H 型高真空挡板阀的外形尺寸、主要技术性能参数



(续)

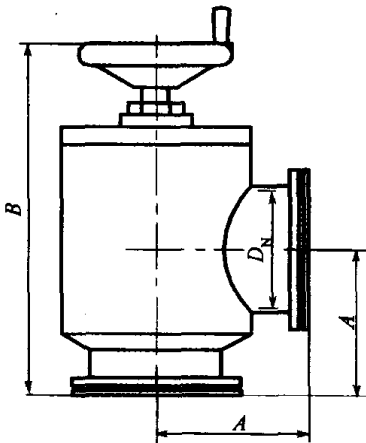
型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm				连接方式	性能参数 漏率/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	备 注
		D	A	B	H			
GD-J50-H	50	57	130	110	181	连接管焊接式	$\leq 6.7 \times 10^{-4}$	1. 适用范围: $1.5 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 2. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ (密封件为丁腈橡胶) $-30^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ (密封件为氟橡胶) 3. 阀体材料: 碳钢镀镍或不锈钢 4. 阀板密封材料: 丁腈橡胶或氟橡胶
GD-J65-H	65	73	140	115	215			
GD-J80-H	80	89	155	130	239			
GD-J100-H	100	110	170	150	282			
GD-J125-H	125	135	210	170	348			
GD-J150-H	150	160	215	190	397			
GD-J200-H	200	210	240	210	449			
GD-J250-H	250	260	265	240	504			

②上海万可姆高科技生产的高真空挡板阀有 GD-J 型、GD-JP 型和 GD-JL 型,其外形尺寸和连接法兰见表 7-29~表 7-30。

表 7-29 GD-JP、GD-JL 型真空挡板阀外形尺寸、性能参数

型 号	通 径 D_N /mm	外形尺寸/mm			性 能 参 数		备 注
		A	B	C	漏率/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	使用压力/MPa	
GD-JP	10	30	100	48	$\leq 1 \times 10^{-6}$	0.1~0.3	1. GD-JL 型方形真空挡板阀, 阀体材料为铝合金 2. GD-JP 型圆形真空挡板阀, 阀体材料 1Cr18Ni9Ti、304、316L、碳钢镀镍 3. 密封材料: 氟橡胶、聚四氟乙烯 4. 连接法兰: 快卸法兰 GB4982-1982
	16	40	116	65			
	25	50	128	78			
	40	65	146	104			
	50	70	170	123			
GD-JL	10	30	92	48			
	16	40	104	62			
	25	50	142	79			
	40	65	177	104			
	50	70	186	125			

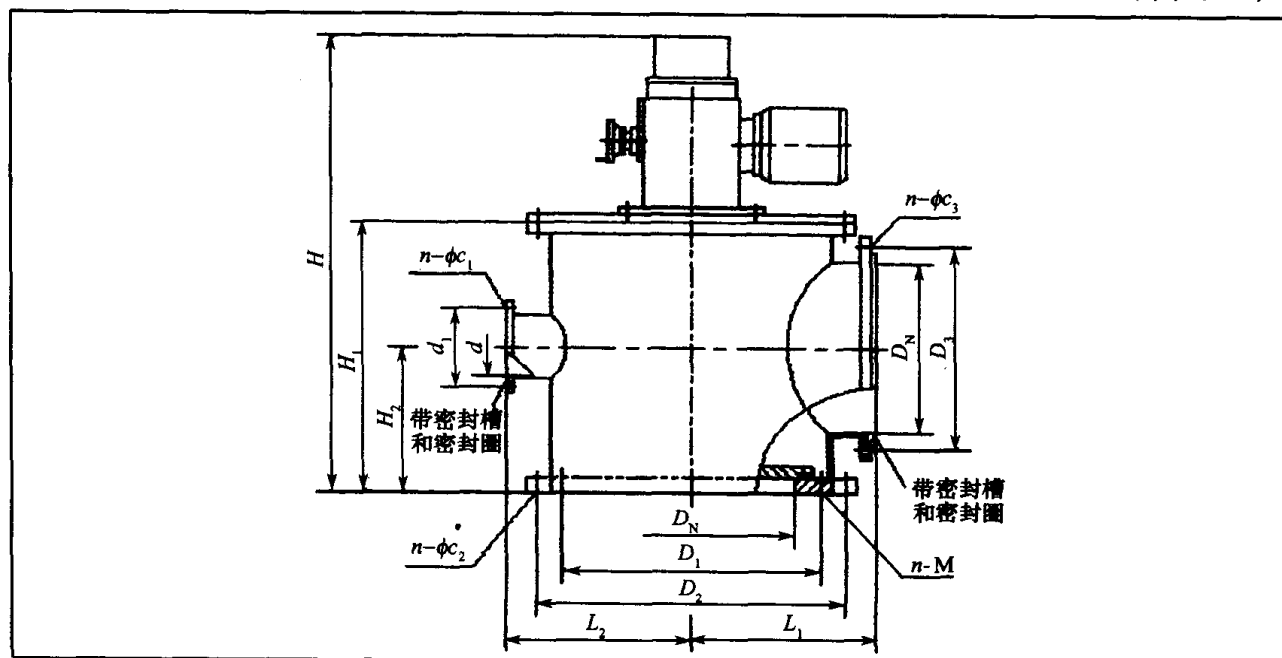
表 7-30 GD-J 真空挡板阀外形尺寸、性能参数

									
型 号		GD-J63	GD-J80	GD-J100	GD-J125	GD-J160	GD-J200	GD-J250	GD-J300
通径 D_N/mm		63	80	100	125	160	200	250	300
外形 尺寸/mm	A	88	100	108	125	145	170	200	240
	B	240	280	320	370	450	470	490	570
	C	139	162	180	209	240	280	360	425
漏率/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$		$\leq 1.3 \times 10^{-6}$							
使用压力/MPa		0.1~0.3							
备 注		连接法兰:GB6070 或 JB919 活套法兰							

③GDD-J 系列手电两用高真空挡板阀是在真空系统中用来接通或截止气流的主要元件,适用于 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 的压力范围。该阀不可在强腐蚀性和含有颗粒状的气体状态下长期使用。该系列阀门配置了离合器和开关。阀门具有安全性好、密封可靠、流导大以及可手控、电控、自动控制等特点。

兰州真空设备有限责任公司生产的 GDD-J 系列阀门的外形和连接尺寸见表 7-31,性能参数见表 7-32。

表 7-31 GDD-J 系列手电两用高真空挡板阀外形和连接尺寸 (单位:mm)



(续)

型号	D_N	H	H_1	H_2	L_1	L_2	D_1	D_2	D_3	d	d_1	$n-\phi c_1$	$n-\phi c_2$ ($n-M$)	$n-\phi c_3$
GDD-J150	150	540	208	110	140		195		195				8-M10	8- $\phi 12$
GDD-J200	200	635	261	137.5	170	160	250		250	40	70	4- $\phi 7$	8-M10	8- $\phi 12$
GDD-J300	300	930	425	215	250	240		420	350	80	125	4- $\phi 9$	8- $\phi 14$	8- $\phi 14$
GDD-J320	320	930	425	215	295	240		420	395	80	125	4- $\phi 9$	8- $\phi 14$	12- $\phi 14$
GDD-J400	400	1140	670	300	340	315	465		465	100	145	4- $\phi 12$	8-M16	8- $\phi 18$
GDD-J500	500	1310	760	330	370	350	580		580	125	175	8- $\phi 11$	16-M12	16- $\phi 14$
GDD-J600	600	1610	820	390	550	460	670		670	150	195	8- $\phi 12$	12-M18	12- $\phi 21$
GDD-J800	800	1950	990	470	660	550		1060	880	150	195	8- $\phi 12$	32- $\phi 23$	20- $\phi 21$
GDD-J1000	1000	2100	1280	615	775	675		1240	1090	300	350	8- $\phi 14$	24- $\phi 24$	24- $\phi 22$
GDD-J1200	1200	2700	1480	720	850	780		1465	1310	500	580	16- $\phi 14$	32- $\phi 28$	28- $\phi 26$

表 7-32 GDD-J 系列手电两用高真空挡板阀性能参数

型 号	GDD-J150	GDD-J200	GDD-J300	GDD-J320	GDD-J400	GDD-J500	GDD-J600	GDD-J800	GDD-J1000	GDD-J1200
漏率 $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	$<1.3\times 10^{-5}$									
流导 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	1200	2000	5000	5200	8000	12500	18000	32000	50000	70000
启闭时间 /s	<15		<30			<40		<60		
电机功率 /kW	0.18	0.25	0.37	0.37	0.75	0.75	2.20	2.20	3.0	3.0
使用温度 /℃	被抽介质温度 $-30\sim 90$ 环境温度 $-10\sim 50$									

④GDQ 型气动高真空挡板阀是用压缩空气为动力,通过电磁换向阀改变气路方向,执行气缸驱动挡板阀作启闭运动,在真空系统中作切断或接通气流用。阀门适用的工作介质为空气及非腐蚀性气体。气动高真空挡板阀按轴封结构可分 GDQ-J 型橡胶密封和 GDQ-Jb 型波纹管密封两种。GDQ-J 为角通型式, GDQ-S 为带预抽口的三通型式。

a. 上海阀门二厂生产的高真空气动挡板阀的外形尺寸和技术性能参数见表 7-33。

表 7-33 GDQ 型高真空挡板阀的外形尺寸、主要技术性能参数

<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;">$D_N \leq 40$$D_N \geq 50$</div>														
型 号	通径 D_N /mm	外 形 尺 寸/mm								性 能 参 数		备 注		
		D	D_1	D_2	A	H	B	$n-\phi c$	预抽口	连接标准	漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$			
GDQ-J $\frac{10}{10b}$	10	30	12.2		30	155	59	—	—	GB4982	1.3×10^{-7}	1. 适用范围: $10^5 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ (轴封为橡胶)		
GDQ-J $\frac{16}{16b}$	16	30	17.2		40	168	59	—	—					
GDQ-J $\frac{25}{25b}$	25	40	26.2		50	195	96	—	—					
GDQ-J $\frac{32}{32b}$	32	55	34.2		58	212	101	—	—					
GDQ-J $\frac{40}{40b}$	40	55	41.2		65	209	113	—	—					
GDQ-J50	50	110	90	55	70	280		4- $\phi 9$	—	GB6070			1.3×10^{-7}	$10^5 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ (轴封为波纹管)
GDQ-J63	63	130	110	68	88	306		—	—					
GDQ-J80	80	145	125	85	98	326		8- $\phi 9$	—					
GDQ-J100	100	165	145	105	108	346		—	—					
GDQ-J150 S150	150	220	195	156	138	535		8- $\phi 12$	$D_N 40 \text{GB4982}$	JB919		2. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ (密封件为丁腈橡胶) $-30^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ (密封件为氟橡胶)		
GDQ-J160 S160	160	225	200	165	138	535		8- $\phi 11$	$D_N 40 \text{GB4982}$	GB6070				
GDQ-J200 S200	200	285	260	208	200	615		12- $\phi 11$	$D_N 50 \text{GB6070}$					
GDQ-J250 S250	250	335	310	258	208	570		—	$D_N 63 \text{GB6070}$					
GDQ-J300 S300	300	380	350	308	250	632		8- $\phi 14$	$D_N 80 \text{GB6070}$	JB919	1.3×10^{-5}			
GDQ-J320 S320	320	425	395	328	250	632		12- $\phi 14$	$D_N 80 \text{GB6070}$	GB6070				
GDQ-J400 S400	400	510	480	410	330	960		16- $\phi 14$	$D_N 100 \text{GB6070}$					
GDQ-J500 S500	500	610	580	510	360	960		—	$D_N 125 \text{GB6070}$					JB919
GDQ-J600 S600	600	710	670	610	450	1400		12- $\phi 21$	$D_N 160 \text{GB6070}$					
GDQ-J630 S630	630	750	720	640	450	1400		20- $\phi 14$	$D_N 160 \text{GB6070}$	GB6070				
GDQ-J800 S800	800	920	890	815	530			24- $\phi 14$	$D_N 200 \text{GB6070}$					

b. 上海万可姆高科技生产的气动挡板阀有方形和圆形两种。北京中科科美真空技术有限责任公司生产方形型号。方形型号GDQ-JL, 通径 D_N 10mm~50mm, 材料代号 L 为铝合金; 圆形型号 GDQ-JP, 通径 D_N 10mm~50mm, 材料代号 P 为不锈钢, R 为 316L。气源气体压力 $\leq 0.3\text{MPa}$, 控制功能有两位两通, 弹簧复位, 常闭; 两位两通, 弹簧复位, 常开和两位两通, 双作用执行机构。通径在 D_N 10mm~160mm 的轴封为波纹管; 通径 $D_N > 160\text{mm}$ 的轴采用 VAC 密封结构, 气源气体压力 $\leq 0.3\text{MPa}$, 漏率 $\leq 1.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。其外形尺寸见表 7-34、表 7-35。

表 7-34 GDQ-JP、GDQ-JL 气动真空挡板阀外形尺寸

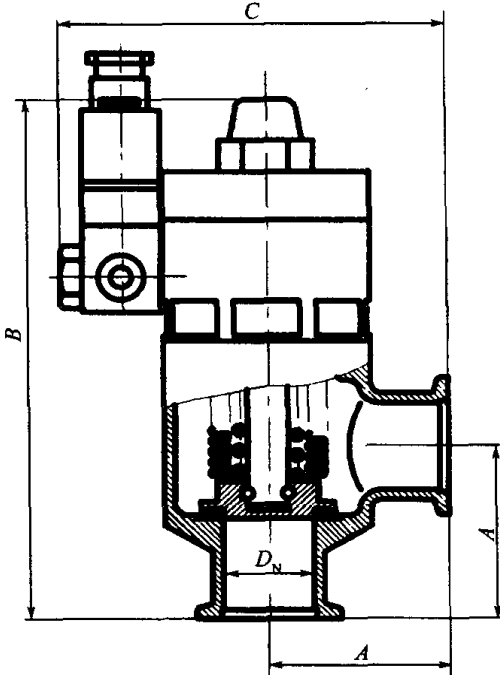
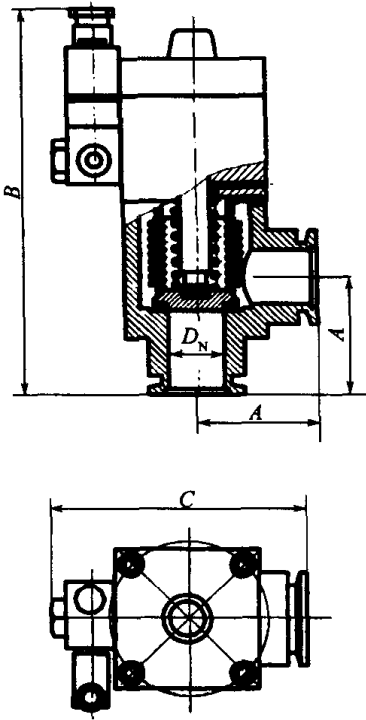
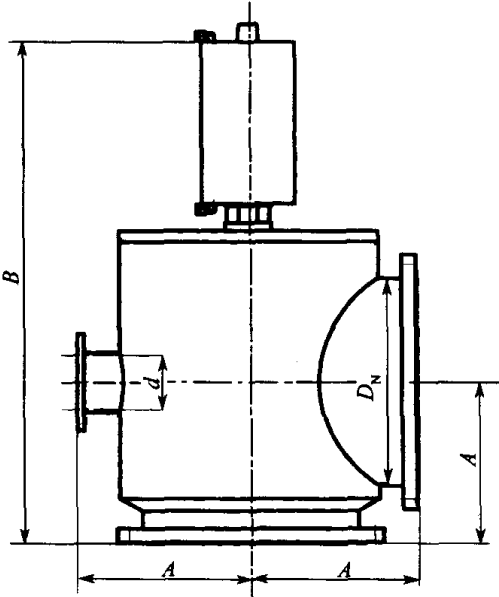
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>GDQ-JP 型</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>GDQ-JL 型</p> </div> </div>						
通 径 D_N/mm	外形尺寸/mm			漏 率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	压力范围 $/\text{MPa}$	备 注
	A	B	C			
10	30	142	73	$\leq 1.3 \times 10^{-7}$	≤ 0.3	1. 型号: GDQ-JP 2. 阀体为圆柱形, 材料代号 P 为不锈钢、R 为 316L 3. 连接法兰: GB4982—85 快卸法兰
16	40	152	90			
25	50	163	106			
40	65	191	131			
50	70	190	135			
10	30	132	77	$\leq 1.3 \times 10^{-7}$	≤ 0.3	1. 型号: GDQ-JL 2. 阀体为方形, 材料代号 L 为方铝合金 3. 连接法兰: GB4982—85 快卸法兰
16	40	142	90			
25	50	165	108			
40	65	192	133			
50	70	190	135			

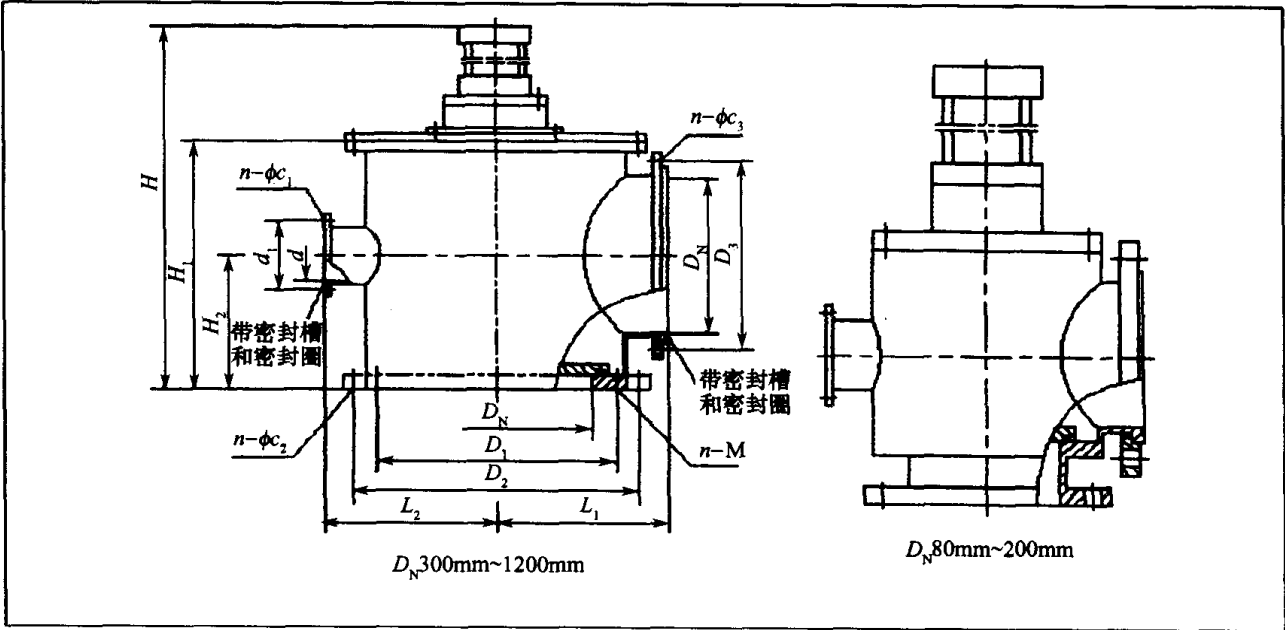
表 7-35 GDQ-J 气动真空挡板阀

(单位:mm)

															
通 径 D_N		63	80	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250
						150			300			600			1200
外 形 尺 寸	A	88	100	108	125	145	170	200	240	285	340	420	520	630	780
	B	320	350	400	450	500	610	720	830	1050	1280	1500	1920	2370	2800
备 注		1. 漏率: $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 2. 压力范围: $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \sim 3 \times 10^5 \text{Pa}$ 3. 气源压力: $0.4 \text{Pa} \sim 0.6 \text{MPa}$ 4. 寿命 ≥ 20000 次													

c. 兰州真空设备有限责任公司生产的高真空气动挡板阀有 GDQ-J 型和 GDQ-JB 型(扁阀)两种,用于高、低真空系统中切断或接通气流。适用介质为干燥空气、不带腐蚀性气体及不含有颗粒微尘的洁净气体。外形尺寸见表 7-36,性能参数见表 7-37。

表 7-36 GDQ-J 系列高真空气动挡板阀外形和连接尺寸 (单位:mm)



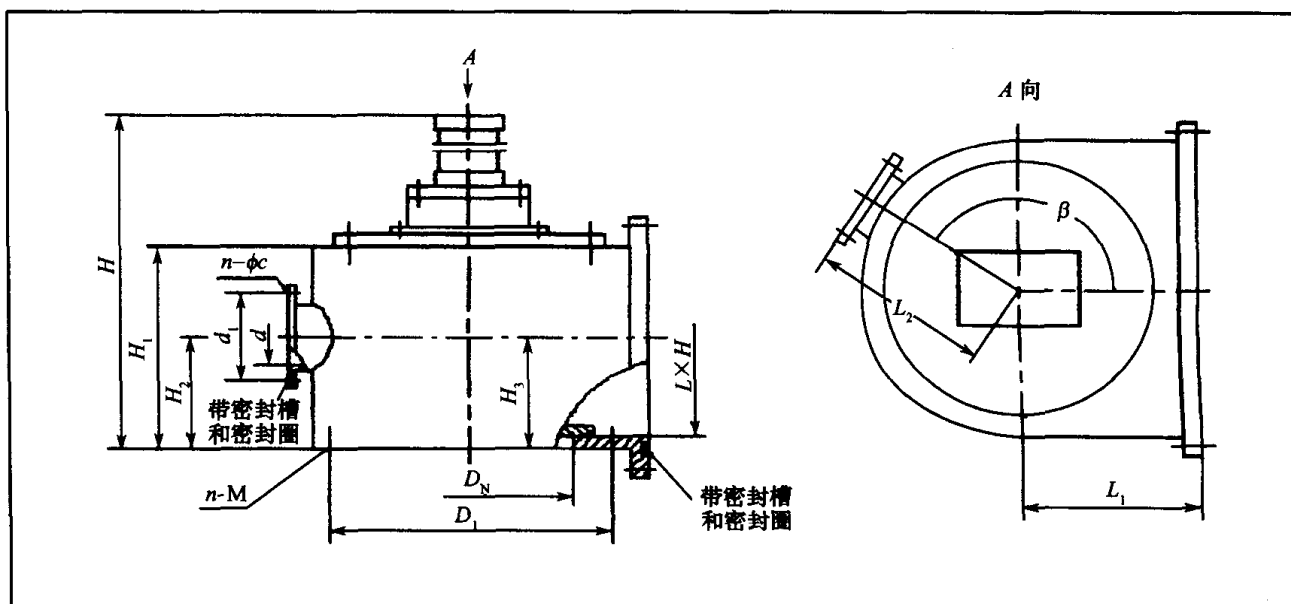
(续)

型号	D_N	H	H_1	H_2	L_1	L_2	D_1	D_2	D_3	d	d_1	$n-\phi c_1$	$n-\phi c_2$ ($n-M$)	$n-\phi c_3$
GDQ-J80	80	380	170	98	98			125	125				4- $\phi 9$	4- $\phi 9$
GDQ-J100	100	420	185	108	108			145	145				4- $\phi 12$	4- $\phi 12$
GDQ-J150	150	500	245	138	138			195	195				8- $\phi 12$	8- $\phi 12$
GDQ-J200	200	680	340	200	200	200		250	250	50	90	4- $\phi 9$	8- $\phi 12$	8- $\phi 12$
GDQ-J300	300	990	425	215	250	240		420	350	80	125	4- $\phi 9$	8- $\phi 14$	8- $\phi 14$
GDQ-J400	400	1230	605	330	330	330	465		465	100	145	4- $\phi 12$	8-M16	8- $\phi 18$
GDQ-J500	500	1310	680	330	370	370	580		580	160	200	8- $\phi 12$	16-M12	16- $\phi 14$
GDQ-J600	600	1580	780	390	550	460	670		670	150	195	8- $\phi 12$	12-M18	12- $\phi 21$
GDQ-J800	800	1890	940	470	660	550		1060	890	200	260	12- $\phi 12$	16- $\phi 23$	24- $\phi 14$
GDQ-J1000	1000	2500	1230	615	775	675		1240	1090	300	350	8- $\phi 14$	24- $\phi 24$	24- $\phi 22$
GDQ-J1200	1200	3000	1440	720	850	780		1465	1310	300	350	8- $\phi 14$	32- $\phi 26$	28- $\phi 26$

表 7-37 GDQ-J 系列高真空气动挡板阀性能参数

型 号	GDQ-J80	GDQ-J100	GDQ-J150	GDQ-J200	GDQ-J300	GDQ-J400	GDQ-J500	GDQ-J600	GDQ-J800	GDQ-J1000	GDQ-J1200
漏率/Pa·L·s ⁻¹	<1.3×10 ⁻⁵										
流导/L·s ⁻¹	320	500	1200	2000	5000	8000	12500	18000	32000	50000	70000
启闭时间/s	<5				<10				<20		
气源压力/MPa	0.4~0.8										
使用温度/℃	被抽介质温度-30~90				环境温度-10~50						

表 7-38 GDQ-JB 系列高真空气动挡板扁阀外形和连接尺寸 (单位:mm)



(续)

型号	D_N	H	H_1	H_2	H_3	L_1	L_2	D_1	d	d_1	$n-\phi c$	$n-M$	$L \times H$	备注
GDQ-J300B	300	870	259	140	129.5	340	270	350	100	145	4- $\phi 12$	8-M12	350×215	$\beta=90^\circ$ ~270°
GDQ-J400B	400	970	345	172		340	320	465	100	145	4- $\phi 12$	8-M16	488×300	
GDQ-J500B	500	1000	400	200		385	370	565	160	200	8- $\phi 12$	16-M12	590×350	
GDQ-J600B	600	1120	470	235		455	435	670	150	195	8- $\phi 12$	12-M18	694×420	
GDQ-J800B	800	1270	615	310		580	515	880	200	250	8- $\phi 12$	20-M18	904×560	
GDQ-J900B	900	1520	743	270	368	720	600	978	200	250	8- $\phi 12$	28-M20	1140×700	

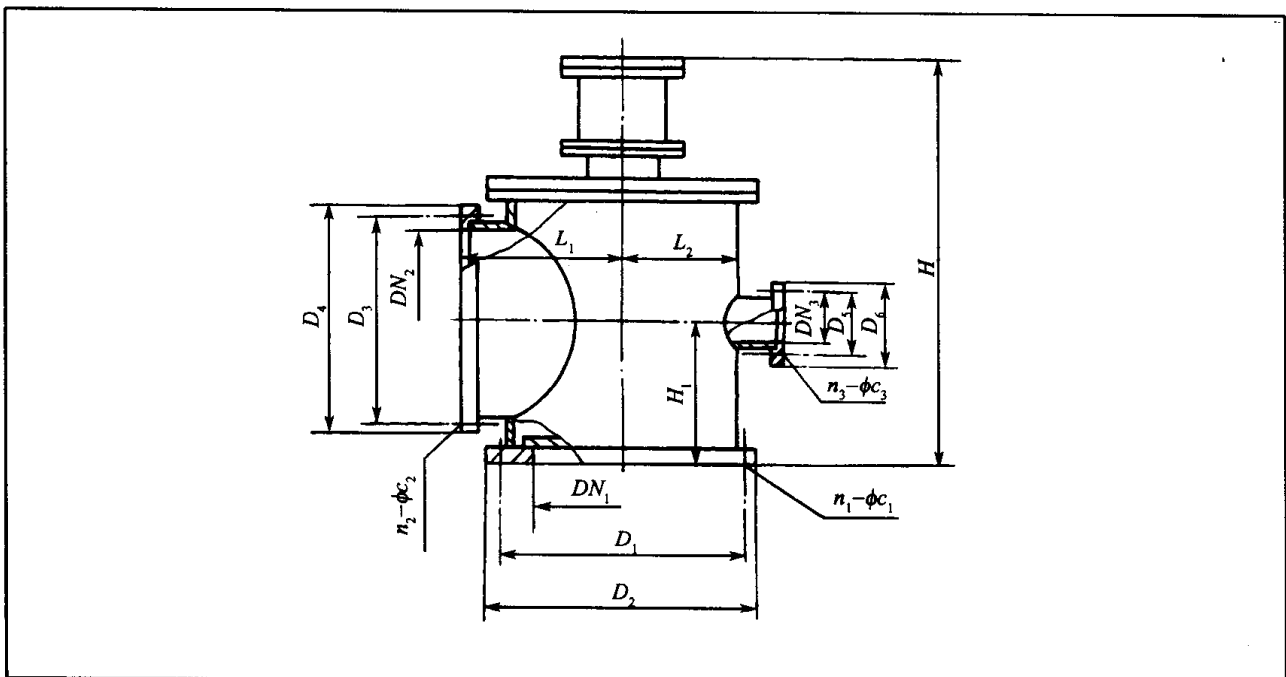
表 7-39 GDQ-JB 系列高真空气动挡板扁阀性能参数

型 号	GDQ-J300B	GDQ-J400B	GDQ-J500B	GDQ-J600B	GDQ-J800B	GDQ-J900B
漏率 /Pa·L·s ⁻¹	<1.3×10 ⁻⁵					
流导 /L·s ⁻¹	5400	8700	14000	20000	35000	44000
启闭时间 /s	<10				<20	
气源压力 /MPa	0.4~0.8					
使用温度 /℃	被抽介质温度-30~90 环境温度-10~50					

d. 沈阳真空泵厂生产的高真空气动挡板阀外形及连接尺寸见表 7-40。

表 7-40 GDQ 系列高真空气动挡板阀外形尺寸

(单位:mm)



(续)

型号	GDQ-J63	GDQ-J80	GDQ-J100	GDQ-J160	GDQ-J200	GDQ-J300	GDQ-J400	GDQ-J630
L_1	88	88	108	138	180	300	330	450
L_2	—	—	—	138	190	240	330	450
H_1	88	88	108	138	200	220	330	450
H	395	410	455	600	695	915	1065	1580
DN_1	63	80	100	160	200	300	400	630
D_1	110	125	145	200	250	350	465	720
D_2	130	145	170	225	275	380	500	750
$n-M_1$	4-M8	4-M8	4-M10	8-M10	8-M10	8-M12	8-M16	20-M12
DN_2	63	80	100	160	200	800	400	630
D_3	110	125	145	200	250	350	480	720
D_4	130	145	170	225	275	380	510	750
$n_2-\phi_{c2}$	4- $\phi 8$	8- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 10$	8- $\phi 12$	8- $\phi 14$	16- $\phi 12$	20- $\phi 14$
DN_3	—	—	—	$\phi 40$	$\phi 60$	$\phi 80$	$\phi 100$	$\phi 160$
D_4	—	—	—	$\phi 80$	$\phi 105$	$\phi 125$	$\phi 145$	$\phi 200$
D_5	—	—	—	$\phi 100$	$\phi 125$	$\phi 145$	$\phi 170$	$\phi 225$
$n_3-\phi_{c3}$	—	—	—	4- $\phi 9$	4- $\phi 9$	4- $\phi 9$	4- $\phi 12$	8- $\phi 12$

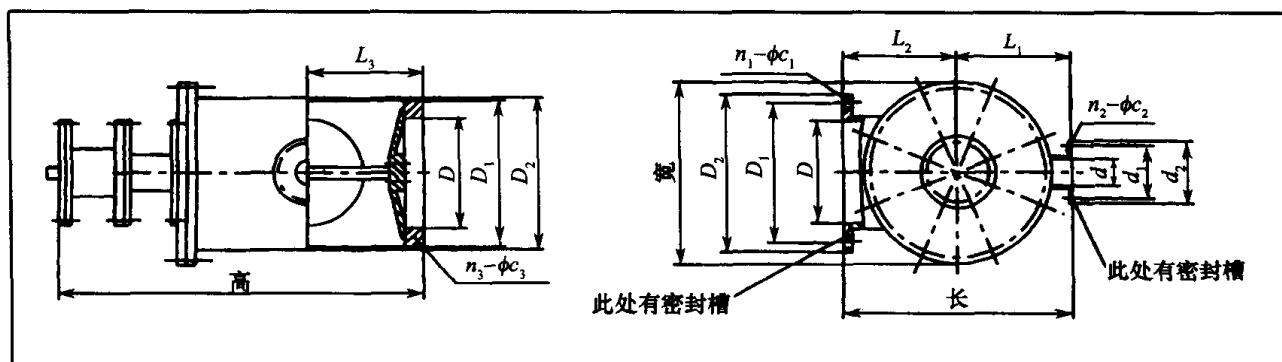
e. 沈阳恒星实业有限公司生产的 GDQ 高真空气动阀门的性能参数、外形尺寸和连接尺寸见表 7-41、表 7-42。

表 7-41 GDQ 型高真空气动挡板阀技术性能参数

型 号	CDQ-J100	CDQ-S160	CDQ-S200	CDQ-S300	CDQ-S320	CDQ-S400	CDQ-S600	CDQ-S630	CDQ-S800	CDQ-S1000
公称通径/mm	$\phi 100$	$\phi 160$	$\phi 200$	$\phi 300$	$\phi 320$	$\phi 400$	$\phi 600$	$\phi 630$	$\phi 800$	$\phi 1000$
漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	1.3×10^{-7}			1.3×10^{-5}						
流导/ $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	340	1000	1400	3700	4200	6400	12000	17000	29000	47000
压缩空气压力 /MPa	0.4~0.6									
开闭时间/s	3			7			10		12	

表 7-42 GDQ 型高真空气动挡板阀外形尺寸

(单位:mm)



(续)

型 号	D	D ₁	D ₂	d ₁	d ₂	d ₃	L ₁	L ₂	L ₃	n ₁ -φc ₁	n ₂ -φc ₂	n ₃ -φc ₃	长×宽×高
GDQ-J100	100	145	170					130	96	4-φ11		4-M10	240×220×300
GDQ-S160	160	200	225	40	80	100	138	138	138	8-φ10	4-φ8	8-M10	300×300×510
GDQ-S200	200	260	275	50	90	110	200	200	200	12-φ11	8-φ9	12-M10	400×335×633
GDQ-S300	300	350	380	80	125	145	240	250	250	8-φ14	4-φ9	8-M12	490×435×880
GDQ-S320	320	395	425	80	125	145	250	250	250	12-φ14	8-M8	12-M12	500×480×935
GDQ-S400	400	465	500	100	145	170	310	320	320	8-φ18	4-φ12	8-M16	630×550×1120
GDQ-S600	600	670	710	150	195	220	420	440	440	12-φ18	8-φ12	12-M16	860×710×1465
GDQ-S630	630	720	750	160	200	225	420	450	450	20-φ14	8-φ11	20-M12	852×822×1255
GDQ-S800	800	890	920	200	260	285	520	520	520	24-φ14	12-φ11	24-M12	1020×1000×1800
GDQ-S1000	1000	1090	1120	320	395	425	640	640	640	32-φ14	12-φ14	32-M12	1280×1220×2090

3. 高真空插板阀

①上海阀门二厂生产的超高插板阀有手动(CC型)、气动(CCQ型)和电动(CCD型)三种型号,适用于介质为清洁空气及非腐蚀性气体的超高真空系统中切断或接通气流,其外形尺寸及技术性能参数,见表7-43~表7-45。

表 7-43 CC型超高真空插板阀外形尺寸及性能参数

$D_N \leq 200$

$D_N \geq 250$

型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm											性能参数		备注
		A	H	D	D_0	D_1	D_2	D_3	n-c	L	L_1	G	连接标准	漏率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	
CC-25A	25	55	48	62	47	39	34	-	6-M6	253	110	50	GB6071	$\leq 1.3 \times 10^{-7}$	1. 适用范围: $10^5 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-7} \text{Pa}$
CC-50A	50	60	92	89	72.4	61.6	55.6	-	8-M8	493	153	80			2. 烘烤温度: $\leq 150^\circ\text{C}$ (除传动装置外)
CC-63A	63	65	105	114	92.1	82.6	76.6	-	8-M8	547	180	80			3. 开阀时阀板两侧压力差: $\leq 2.7 \times 10^3 \text{Pa}$
CC-80A	80	65	130	130	110	99	93	-	16-M8	607	200	80			4. 阀体、阀板材料: 不锈钢
CC-100A	100	70	152	152	130.2	120.7	114.7	-	16-M8	660	267	80			5. 阀板密封件: 氟橡胶, 轴封处密封件: 不锈钢波纹管
CC-150A	150	70	202	202	181	171.5	165.5	-	20-M8	754	350	100			
CC-200A	200	80	251	253	231.8	222.3	216.6	-	24-M8	903	424	100			
CC-250A	250	85	300	314	288	308	275	271	24-M10	1146	550	130	JB5278		
CC-300A	300	85	352	365	338	353	323	318	32-M10	1233	613	130	SJ1658		

表 7-44 CCQ 型气动超高真空插板阀外形尺寸及性能参数

<div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div></div> <div><div></div><</div>														

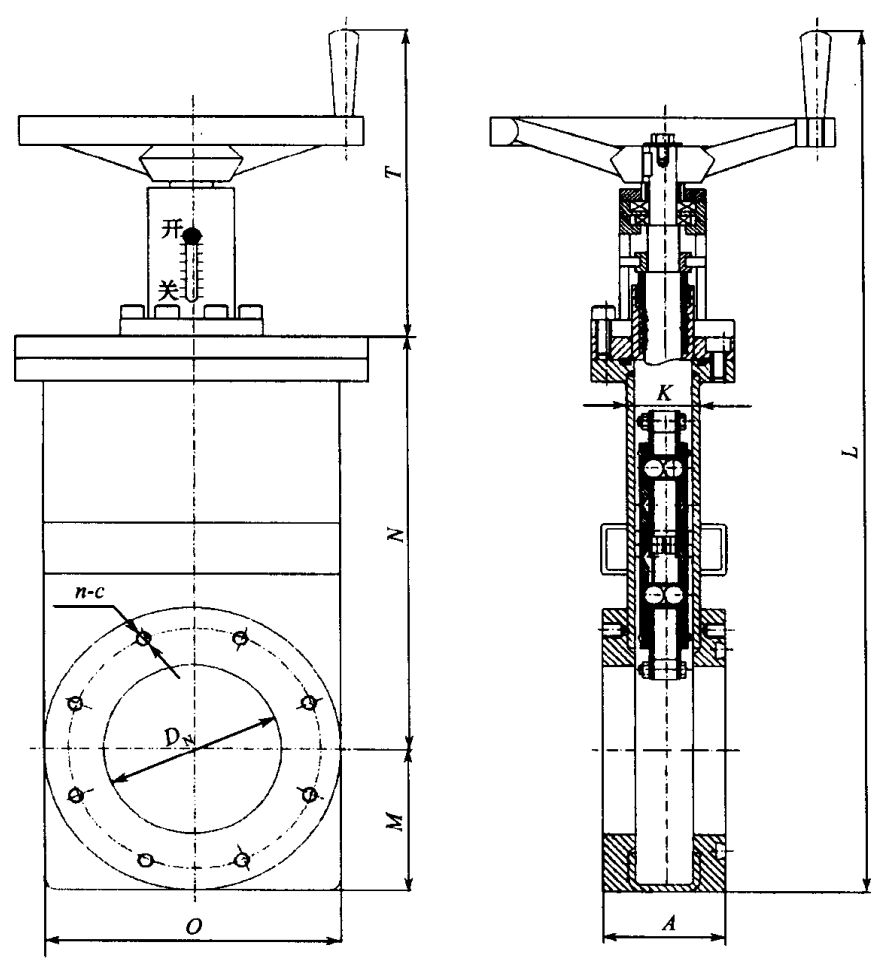
表 7-45 CCD 型电动超高真空插板阀外形尺寸及性能参数

<p>$D_N 50\text{mm} \sim 320\text{mm}$ $D_N \geq 400\text{mm}$</p> <p>$D_N \leq 200\text{mm}$ $D_N \geq 250\text{mm}$</p>															
型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm												性能参数	备注
		A	H	D	D_0	D_1	D_2	D_3	n-c	L	L_1	G	E	漏率 /Pa·L·s ⁻¹	
CCD-50A	50	60	92	89	72.4	61.6	55.6	—	8-M8	515	153	220	124	$\leq 1.3 \times 10^{-7}$	1. 适用范围: $10^5\text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 2. 烘烤温度: $\leq 150^\circ\text{C}$ (除传动装置外) 3. 开阀时阀板 两侧压力 差: $\leq 2.7 \times 10^3\text{Pa}$ 4. 阀体、阀板 材料: 不锈 钢 5. 阀板密封 件: 氟 橡 胶, 轴封处 密封件: 不 锈钢波纹 管
CCD-63A	63	65	105	114	92.1	82.6	76.6	—	8-M8	566	180	220	124		
CCD-80A	80	65	130	130	110	99	93	—	16-M8	603	200	220	124		
CCD-100A	100	70	152	152	130.2	120.7	114.7	—	16-M8	653	267	220	124		
CCD-150A	150	70	202	202	181	171.5	165.5	—	20-M8	781	350	270	150		
CCD-200A	200	80	251	253	231.8	222.3	216.6	—	24-M8	889	424	270	150		
CCD-250A	250	85	300	314	288	308	275	271	24-M10	1127	550	298	200		
CCD-300A	300	85	352	365	338	353	323	318	32-M10	1197	613	298	200		
CCD-320A	320			385	357	379	344	340	36-M10						
CCD-400A	400	110	456	497	454	480	440	436	36-M12	1069	560	851	120		
CCD-500A	500			590	555	580	540	536	40-M12						
CCD-630A	630			689	658	680	639	635	40-M16						
CCD-800A	800			890	855	880	853	831	60-M16						

②上海万可姆高科技生产的真空插板阀有手动(GC型)和气动(GCQ型)两种型号。GC系列真空插板阀是以螺杆传动推动钢球运动,撑开阀板关闭,又靠弹簧力收拢阀板打开的真空阀门;GCQ系列是以压缩空气为动力推动钢球运动,实现阀门的打开和关闭。阀体材料为不锈钢,漏率 $\leq 1.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}$ 。阀门外形和连接尺寸见表7-46、表7-47。

表 7-46 GC 系列真空插板阀外形和连接尺寸

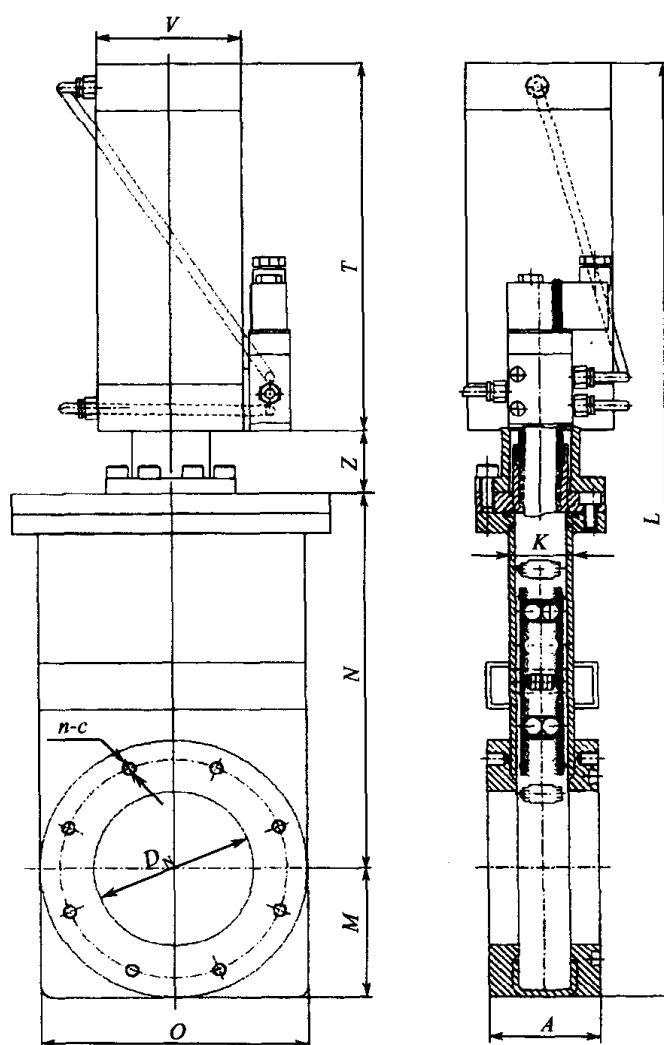
(单位:mm)



通 径 D_N/mm	A	K	M	N	T	V	O	P	L	n-c
100	80	52	82	200	220	90	165	70	502	8-M8
150	84	52	112	275	230	100	225	84	617	8-M8
200	84	52	142	350	240	100	285	84	723	12-M8
250	84	52	167	425	250	135	335	84	842	12-M10
300~320	96	52	212	500	260	135	425	109	972	12-M12
400	110	66	255	650	270	168	510	144	1175	16-M12

表 7-47 GCQ 系列气动真空插板阀外形和连接尺寸

(单位:mm)

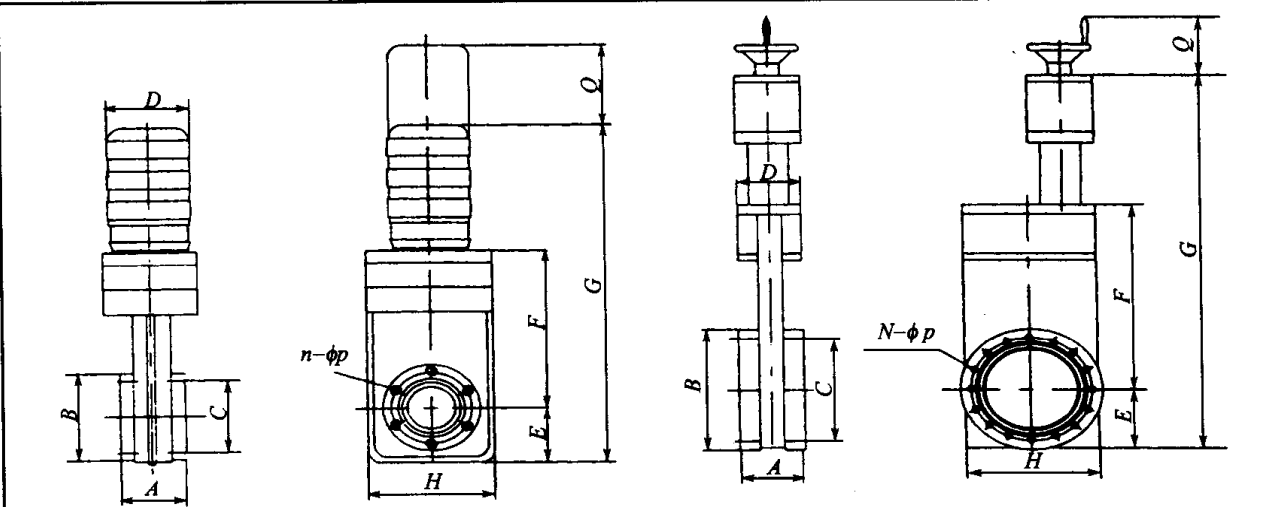


通 径 D_N/mm	A	K	M	N	T	Z	V	O	P	L	n-c
100	80	52	82	200	222	50	90	165	70	554	8-M8
150	84	52	112	275	277	50	100	225	84	714	8-M8
200	84	52	142	350	332	50	100	285	84	874	12-M8
250	84	52	167	425	382	50	135	335	84	1024	12-M10
300~320	96	52	212	500	452	50	135	425	109	1214	12-M12
400	110	66	255	650	545	50	168	510	144	1500	16-M12

③沈阳科学仪器研制中心有限公司生产手动(CC型)超高真空插板阀,采用手轮、丝杠传动结构,适用于超高真空系统中切断或接通气流。适用介质为清洁的空气及非腐蚀性气体,阀门可以任意方向安装,可承受一定的压力。烘烤温度 150°C (阀门开启),漏率 $\leq 6.6 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。其外形尺寸见表 7-48。

表 7-48 CC-I 型超高真空插板阀外形尺寸

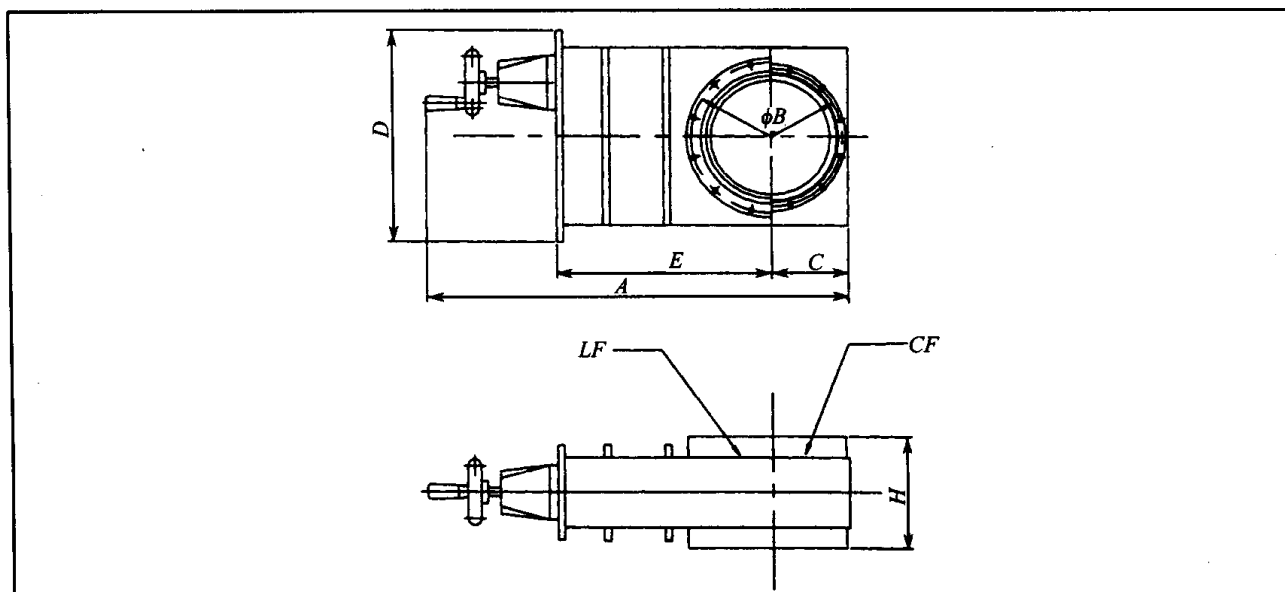
(单位:mm)

										
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> DN35 型 DN63~400 型 </div>										
通 径 D_N/mm	A	B	C	D	E	F	G	H	Q	$n\text{-}M$
35	50	70	58.7	70	37	135	274	90	65	6-M6
63	56	114	92.2	62	56	202	408	114	100	8-M8
100	57	152	130.3	67	73.5	245	474	142	95	16-M8
150	59	202	181.1	75	100	315	563	196	95	20-M8
200	80	253	231.9	80	127	435	890	254	100	24-M8
250	80	335	284	80	161	560	952	322	113	24-M8
300	100	360	340	100	180	590	1011	360	100	32-M10
400	150	510	480	150	235	866	1527	470	75	32-M10

④北京中科科仪技术发展有限公司生产手动(CC型)、电动(CCD型)、气动(CCQ型)三种超高真空插板阀,使用压力范围为 $1.01 \times 10^5 \text{Pa} \sim 10^{-7} \text{Pa}$ 。

CC系列超高真空手动插板阀外形尺寸及技术性能参数见表 7-49。CCD-250 型电动超高真空插板阀外形尺寸及性能参数见表 7-50。CCQ 系列超高真空气动插板阀,适用于 $10^5 \text{Pa} \sim 10^{-7} \text{Pa}$,最佳安装位置为水平安装,垂直安装时应避免气缸冲下。外形尺寸及性能参数,见表 7-51。

表 7-49 CC 系列超高真空手动插板阀外形尺寸及技术性能参数



(续)

型号	通径 /mm	外形尺寸 /mm						流导 $/L \cdot s^{-1}$	漏率 $/Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	烘烤温度 /℃		螺孔 /mm $n-M$	连接法兰
		A	D	H	ϕB	C	E			开	关		
CC-100	100	390	222	88	130.3	76	175	1300	1.3×10^{-7}	<150	<125	16-M8	DN100CF
CC-150	150	507	292	87.5	181.1	110	258	4600	1.3×10^{-7}			20-M8	DN150CF
CC-200	200	685	368	112.1	231.9 260	127	332	8635	1.3×10^{-7}			24-M8 12-M10	DN200CF DN200LF

表 7-50 CCD-250 型电动超高真空阀外形尺寸及性能参数

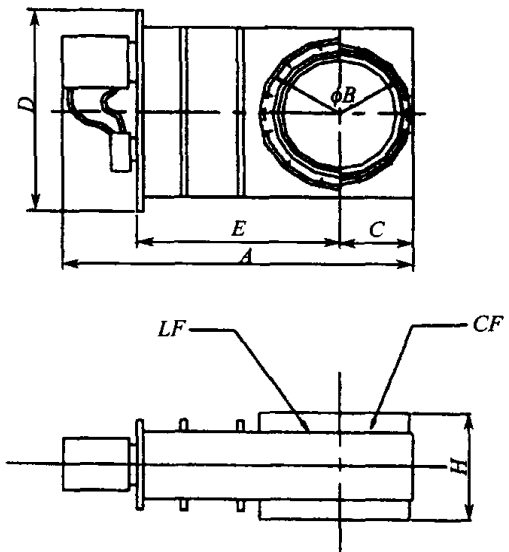
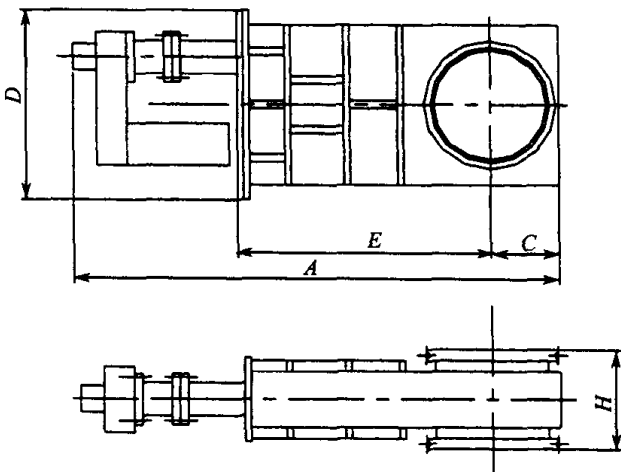
													
通径 /mm	外形尺寸 /mm					烘烤温度 /℃		流导 $/L \cdot s^{-1}$	漏率 $/Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	电压 /V	电流 /A	压力范围 /Pa	连接法兰
	A	D	H	C	E	开	关						
250	982	320	96	149	540	<150	<125	2×10^4	1.3×10^{-7}	~220	0.64	$10^5 \sim 10^{-7}$	DN250LF

表 7-51 CCQ 系列超高真空气动插板阀外形尺寸及性能参数

													
型号	通径 D_N /mm	外形尺寸 /mm						流导 $/L \cdot s^{-1}$	漏率 $/Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	烘烤温度 /℃		螺孔 /mm $n-M$	连接法兰
		A	D	H	ϕB	C	E			开	关		
CCQ-100	100	420	222	88	130.3	76	175	1300	1.3×10^{-7}	<150	<125	16-M8	DN100CF
CCQ-150	150	532	292	87.5	181.1	110	258	4600	1.3×10^{-7}			20-M8	DN150CF
CCQ-200	200	595	368	112.1	231.9 260	127	332	8635	1.3×10^{-7}			24-M8 12-M10	DN200CF DN200LF

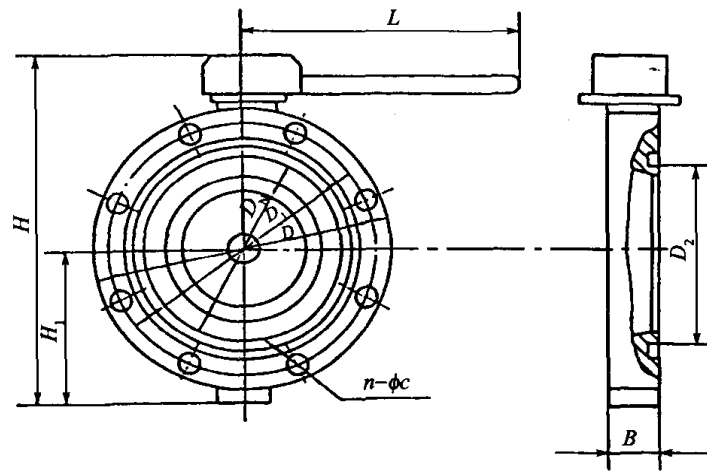
4. 真空蝶阀

①上海阀门二厂生产的高真空蝶阀有手动(GI 型、GI-A 型)、气动(GIQ 型、GIQ-A 型)、电动(GID 型)和用于调节真空系统的气流量的调节式(GI-C)蝶阀四种型号。其外形尺寸及技术参数见表 7-52~表 7-57。

表 7-52 GI 型高真空蝶阀外形尺寸及性能参数

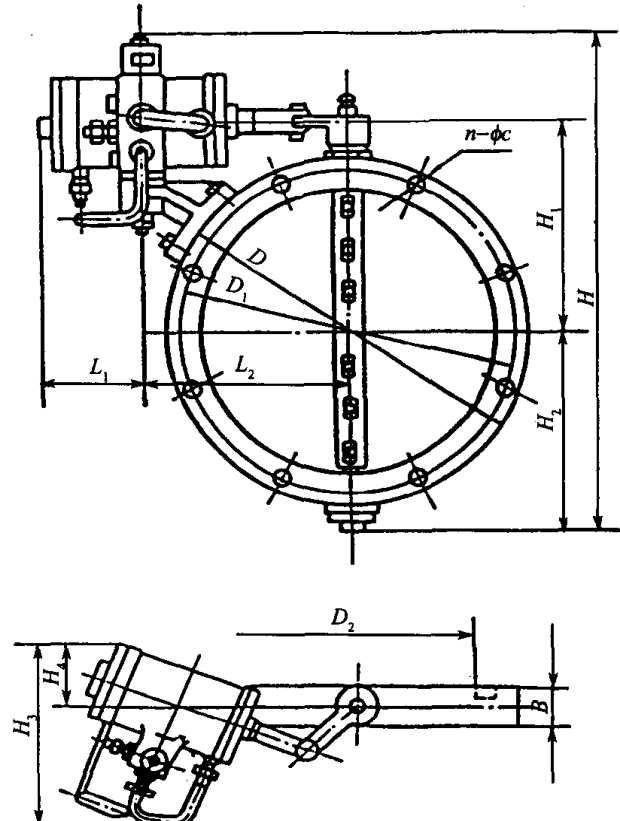
型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm							连接标准	性能参数 漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	备 注				
		D	D_1	D_2	B	H	L	$n-\phi c$							
GI-32	32	78	64	36	22	76	82	4- $\phi 7$	JB919	1.3×10^{-7}	1. 适用范围: $10^5 \text{Pa} \sim 6.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 2. 开启时阀板两 侧压差: $\leq 10^5 \text{Pa}$ 3. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 4. 阀体材料: 碳 钢镀镍 5. 密封材料: 丁 腈橡胶				
GI-40	40	85	70	44	22	80	82								
GI-50	50	110	90	55	22	98	95	4- $\phi 9$							
GI-65	65	125	105	68	26	123	132								
GI-80	80	145	125	85	30	153	132								
GI-100	100	170	145	105	30	165	132	4- $\phi 12$							
GI-150	150	220	195	156	35	200	167	8- $\phi 12$		1.3×10^{-5}					
GI-200	200	275	250	208	40	295	232								
GI-250	250	330	300	258	45	292	369	8- $\phi 14$							
GI-300	300	380	350	308	55	368	358								
GI-400	400	500	465	408	60	手轮式直径 320		8- $\phi 18$							

表 7-53 GI-A 型高真空蝶阀外形尺寸及性能参数



型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm								连接标准	手动结构	性能参数 漏率 /Pa·L·s ⁻¹	备 注
		D	D ₁	D ₂	B	L	H ₁	H	n-φc				
GI-80A	80	145	125	85	32	146	74	165	8-φ9	GB6070	手柄	1.3×10^{-7}	1. 适用范围: $10^5 \text{Pa} \sim 6.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 2. 介质温度: (丁腈橡胶) -25℃~80℃, (氟橡胶) -30℃~150℃ 3. 阀体材料: 碳钢镀镍或不锈钢 4. 密封材料: 丁腈橡胶或氟橡胶
GI-100A	100	165	145	105		84	195	8-φ12					
GI-160A	160	225	200	166	35	190	115	266	8-φ11				
GI-200A	200	285	260	208	45	200	146	379	12-φ11				
GI-250A	250	335	310	258	50	250	173	437	12-φ14				
GI-300A	300	425	395	308	55		216	523					
GI-400A	400	510	480	410	60	320	259	614	16-φ14				
GI-150A	150	220	195	156	35	190	113	262	8-φ12	JB919	手柄	1.3×10^{-7}	

表 7-54 GIQ 型气动高真空蝶阀外形尺寸及技术性能参数



(续)

型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm												连接 标准	性能参数	备 注
		D	D_1	D_2	B	H	H_1	H_2	H_3	H_4	L_1	L_2	$n-\phi$		漏率 /Pa·L·s ⁻¹	
GIQ-40	40	85	70	44	22	109.5	51	42.5	68	26	62	91	4-φ7	JB919	1.3×10 ⁻⁷	1. 适用范围: 10 ⁵ Pa ~6.7×10 ⁻⁴ Pa 2. 介质温度: (丁腈橡胶) -25℃ ~ 80℃, (氟橡胶) - 30℃ ~150℃ 3. 开启时, 阀板两 侧压差: ≤10 ⁵ Pa 4. 气源压力 0.4MPa ~ 0.6MPa 5. 阀体材料: 碳钢 镀镍或不锈钢 6. 密封材料: 丁腈 橡胶或氟橡胶
GIQ-50	50	110	90	55		135	64	55					4-φ9			
GIQ-65	65	125	105	68	26	239.5	84	62.5	80	171	4-φ12					
GIQ-80	80	145	125	85	30	284.5	92	72.5	182	46	93.5	136	8-φ12			
GIQ-100	100	170	145	105		309	104	85	239	74	117	199	8-φ14			
GIQ-150	150	220	195	156	35	366	136	110	205	57	101	164.6	8-φ18	1.3×10 ⁻⁵		
GIQ-200	200	275	250	208	40	422.5	165	137.5	239	74	117	199	12-φ18			
GIQ-250	250	330	300	258	45	482	197	165	263	88	128	224.6	12-φ21			
GIQ-300	300	380	350	308	55	543	233	190	263	88	128	224.6	20-φ21			
GIQ-400	400	500	465	408	60	686	293	260	303	97	138	253				
GIQ-500	500	600	565	510	80	742	355	312	272	136	140	300				
GIQ-600	600	710	670	606	100	912	428.5	391	250	125	122	330				
GIQ-800	800	920	880	810	130	1177	565	474.5	380	190	171.5	445				

表 7-55 GIQ-A 型气动高真空蝶阀外形尺寸及技术性能参数

型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm								连接标准	性能参数	备 注			
		D	D_1	D_2	B	L	H_1	H	$n-\phi c$		漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$				
GIQ-80A	80	145	125	85	32	223	74	193	8- $\phi 9$	GB6070	1.3×10^{-7}	1. 适用范围: $10^5\text{Pa}\sim 6.7\times 10^{-4}\text{Pa}$ 2. 介质温度: (丁腈橡胶) - 25°C ~ 80°C (氟橡胶), - 30°C ~ 150°C 3. 气源压力: $0.4\text{MPa}\sim 0.6\text{MPa}$ 4. 阀体材料: 碳钢镀镍或不锈钢 5. 密封材料: 丁腈橡胶或氟橡胶			
GIQ-100A	100	165	145	105			84	217	8- $\phi 12$						
GIQ-150A	150	225	200	156	35	320	113	286	8- $\phi 11$		1.3×10^{-5}				
GIQ-200A	200	285	260	208	45		146	349	12- $\phi 11$						
GIQ-250A	250	335	310	258	50	400	173	414							
GIQ-300A	300	425	395	308	55		216	500	12- $\phi 14$						
GIQ-400A	400	510	480	410	60	465	259	594	16- $\phi 14$						

表 7-56 GID 型电动高真空蝶阀外形尺寸及技术性能参数

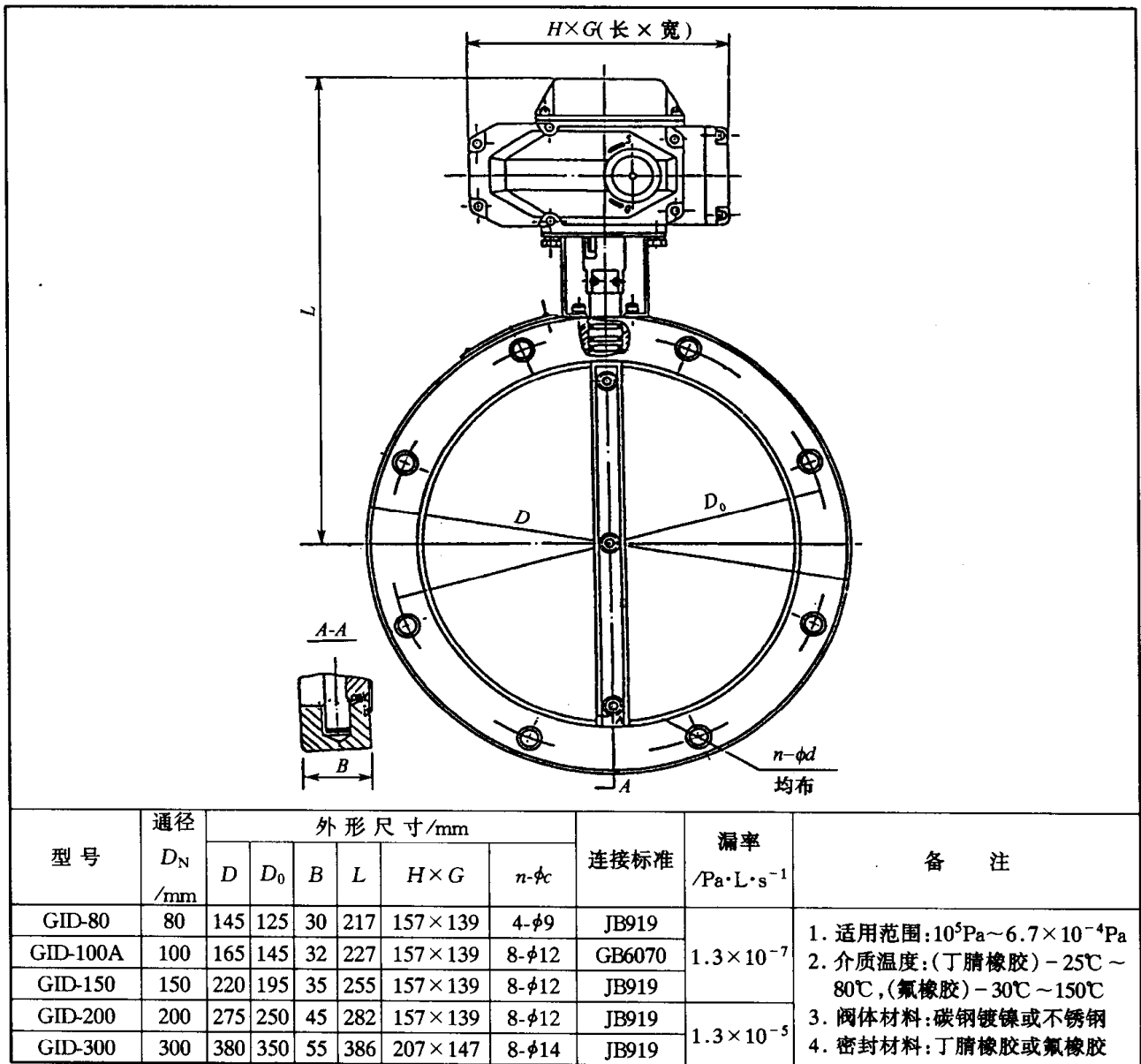
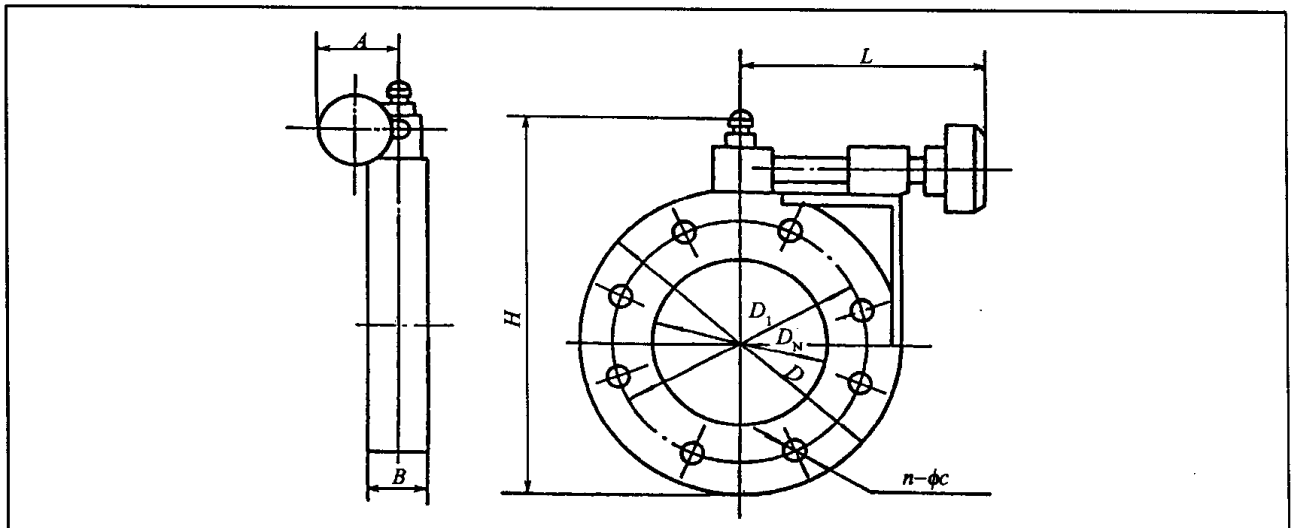


表 7-57 GI-C 型高真空调节式蝶阀外形尺寸及技术性能参数



(续)

型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm							连接标准	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{s}^{-1}$	备 注
		D	D_1	B	A	L	H	$n-\phi c$			
GI-50C	50	110	90	22	60	85	140	4- $\phi 9$	JB919-75	6.7×10^{-4}	1. 适用范围: $10^5\text{Pa} \sim 6.7 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 2. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 3. 阀体材料: 碳钢镀镍 4. 密封材料: 丁腈橡胶 5. 阀板启动位置: $0^\circ \sim 90^\circ$
GI-65C	65	125	105	22	70	95	158	4- $\phi 9$			
GI-80C	80	145	125	30	80	100	173	4- $\phi 9$			
GI-100C	100	170	145	30	90	110	198	4- $\phi 12$			

②上海万可姆高科技生产的真空蝶阀有手动(GI型)、气动(GIQ型)、电动(GID)三种型号技术性能为:漏率 $\leq 1 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$;承受压力0.3MPa。开位和关位都设有自锁功能,因而不怕震动,可任意位置安装,阀杆不窜动。

真空蝶阀是靠阀板旋转 90° 实现接通或切断气流。和其它阀门相比,它具有体积小、开闭迅速的优点,广泛用于抽气管道和真空管道和真空设备中。

GI系列真空蝶阀的外形尺寸见表7-58、表7-59。

表 7-58 GI 系列真空蝶阀外形尺寸(一)

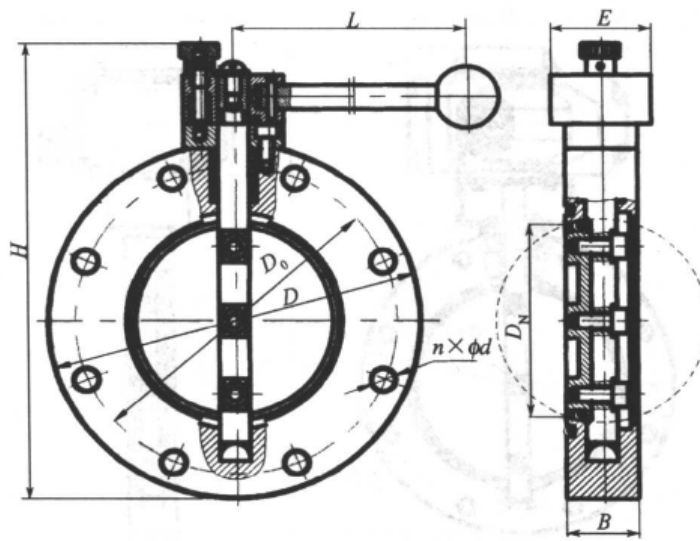
									
型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm							连接标准
		B	D	D_0	$n-\phi c$	H	L	E	
GI-32	32	22	90	70	4- $\phi 8$	130	70	35	GB6070-85
GI-40	40	22	100	80	4- $\phi 8$	140	80	35	
GI-50	50	22	110	90	4- $\phi 8$	150	90	35	
GI-63	63	28	130	110	4- $\phi 8$	170	100	39	
GI-80	80	28	145	125	4- $\phi 8$	185	120	39	
GI-100	100	28	165	145	4- $\phi 8$	205	140	39	
GI-125	125	34	200	175	4- $\phi 10$	240	160	46	
GI-150	150	34	225	200	8- $\phi 10$	265	180	46	
GI-200	200	40	285	260	8- $\phi 10$	333	230	54	
GI-250	250	45	335	310	8- $\phi 10$	383	280	56	
GI-320	300	50	425	395	8- $\phi 12$	473	390	60	
GI-400	400	60	510	480	8- $\phi 12$	560	420	66	

表 7-59 GI 系列真空蝶阀外形尺寸(二)

型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm							连接标准	质量 /kg
		B	D	D_0	$n-\phi c$	H	L	E		
GI-32	32	22	78	64	4- $\phi 6$	118	70	35	JB919-75	0.75
GI-40	40	22	85	70	4- $\phi 6$	215	80	35		0.86
GI-50	50	22	110	90	4- $\phi 8$	150	90	35		1.36
GI-65	65	28	125	105	4- $\phi 8$	165	100	39		2.80
GI-80	80	28	145	125	4- $\phi 8$	185	120	39		3.20
GI-100	100	28	170	145	4- $\phi 10$	210	140	39		4.20
GI-125	125	34	195	170	4- $\phi 10$	235	160	46		5.40
GI-150	150	34	220	195	8- $\phi 10$	260	180	46		6.80
GI-200	200	40	275	250	8- $\phi 10$	323	230	54		11.0
GI-250	250	45	330	300	8- $\phi 12$	378	280	56		16.0
GI-300	300	50	380	350	8- $\phi 12$	428	390	60		24.0
GI-400	400	60	500	465	8- $\phi 16$	410	420	66		

GID 系列电动真空蝶阀,采用 1/4 旋转的电动装置,工作平稳可靠;可任意方向安装,阀杆不会窜动;阀门开和关有电信号输出,能手电两用。其外形尺寸见表 7-60、表 7-61。

表 7-60 GID 系列电动真空蝶阀外形尺寸(一)

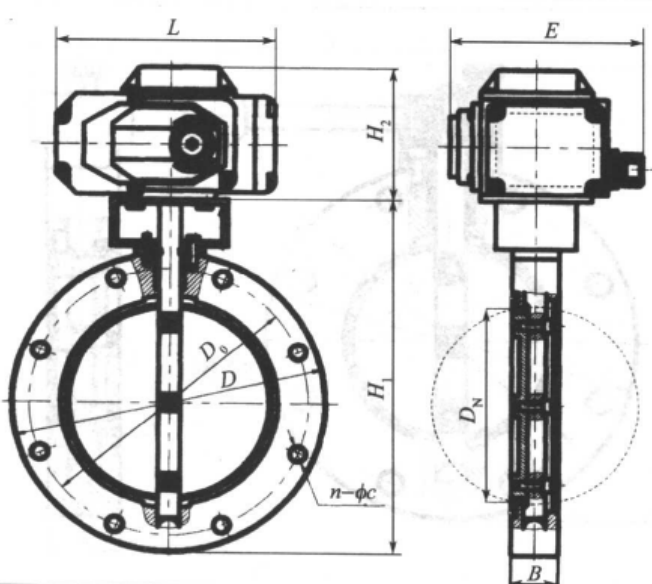
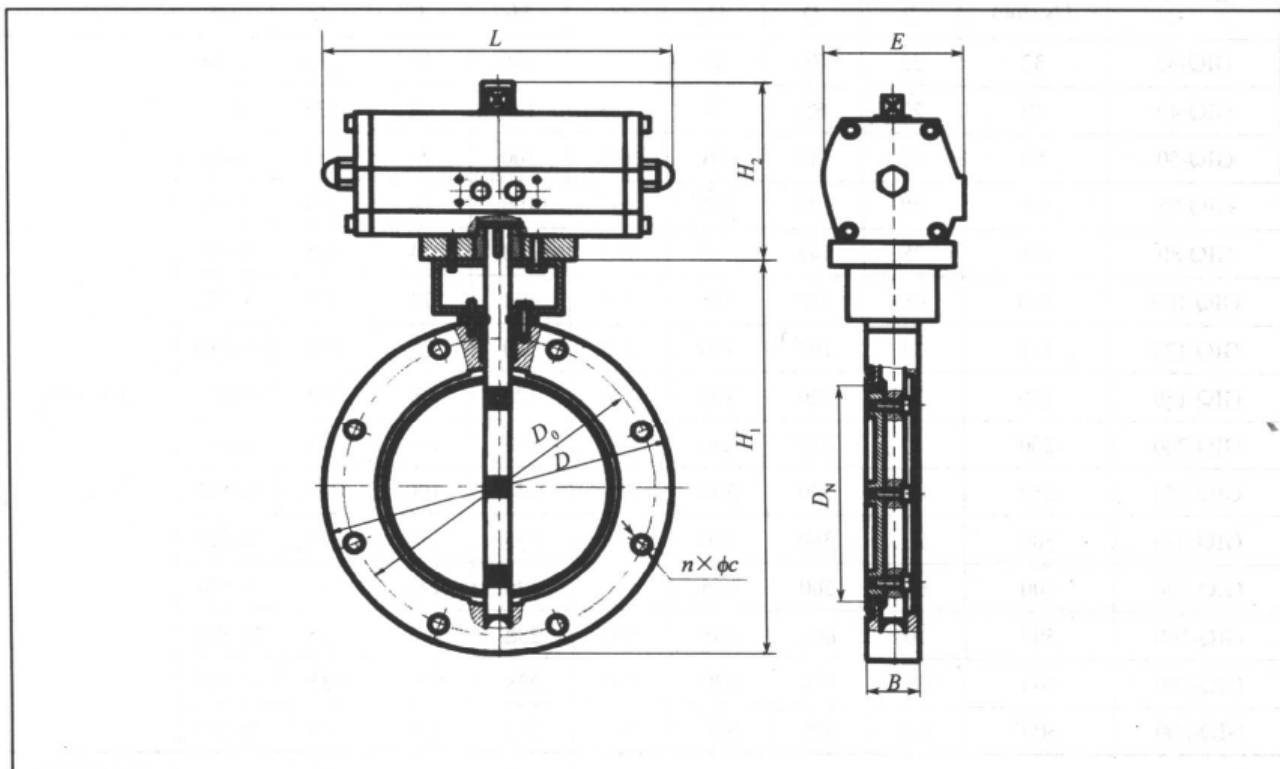
										
型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm								连接标准
		B	D	D_0	H_1	H_2	E	L	$n-\phi c$	
GID-32	32	22	90	70	130	103	157	139	4- $\phi 8$	GB6070-85
GID-40	40	22	100	80	140	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-50	50	22	110	90	150	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-63	63	28	130	110	170	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-80	80	28	145	125	185	103	157	139	8- $\phi 8$	
GID-100	100	28	165	145	205	103	157	139	8- $\phi 8$	
GID-125	125	34	200	175	240	103	157	139	8- $\phi 10$	
GID-160	160	34	225	200	265	103	157	139	8- $\phi 10$	
GID-200	200	40	285	260	333	129	207	137	12- $\phi 10$	
GID-250	250	45	335	310	383	129	207	137	12- $\phi 10$	
GID-320	320	50	425	395	473	129	207	137	12- $\phi 12$	
GID-400	400	60	510	480	560	140	256	182	16- $\phi 12$	
GID-500	500	70	610	580	680	140	256	182	16- $\phi 12$	
GID-600	600	80	750	720	820	140	256	182	20- $\phi 12$	
GID-800	800	100	950	920	1020	170	380	240	24- $\phi 12$	

表 7-61 GID 系列电动真空蝶阀外形尺寸(二)

型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm								连接标准
		B	D	D_0	H_1	H_2	E	L	$n-\phi c$	
GID-32	32	22	78	64	118	103	157	139	4- $\phi 6$	JB919-75
GID-40	40	22	85	70	125	103	157	139	4- $\phi 6$	
GID-50	50	22	110	90	150	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-65	65	28	125	105	165	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-80	80	28	145	125	185	103	157	139	4- $\phi 8$	
GID-100	100	28	170	145	210	103	157	139	4- $\phi 10$	
GID-125	125	34	195	170	235	103	157	139	4- $\phi 10$	
GID-150	150	34	220	195	260	103	157	139	8- $\phi 10$	
GID-200	200	40	275	250	323	129	207	137	8- $\phi 10$	
GID-250	250	45	330	300	378	129	207	137	8- $\phi 12$	
GID-300	300	50	380	350	428	129	207	137	8- $\phi 12$	
GID-400	400	60	500	465	410	140	256	182	8- $\phi 16$	
GID-500	500	70	600	565	670	140	256	182	12- $\phi 16$	
GID-600	600	80	710	670	780	140	256	182	12- $\phi 18$	
GID-800	800	100	920	880	990	170	380	240	20- $\phi 18$	

GIQ 系列气动真空蝶阀,采用 1/4 旋转式气缸,角度可调。开位和关位带有电信号装置。外形尺寸见表 7-62、表 7-63。

表 7-62 GIQ 系列气动真空蝶阀外形尺寸(一)



(续)

型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm								连接标准
		B	D	D_0	H_1	H_2	E	L	$n-\phi c$	
GIQ-32	32	22	90	70	130	100	74	235	4- $\phi 8$	GB6070-85
GIQ-40	40	22	100	80	140	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-50	50	22	110	90	150	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-63	63	28	130	110	170	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-80	80	28	145	125	185	100	74	235	8- $\phi 8$	
GIQ-100	100	28	165	145	205	100	74	235	8- $\phi 8$	
GIQ-125	125	34	200	175	240	120	88	275	8- $\phi 10$	
GIQ-160	160	34	225	200	265	120	88	275	8- $\phi 10$	
GIQ-200	200	40	285	260	333	138	100	310	12- $\phi 10$	
GIQ-250	250	45	335	310	383	138	100	310	12- $\phi 10$	
GIQ-320	320	50	425	395	473	165	118	370	12- $\phi 12$	
GIQ-400	400	60	510	480	560	190	143	450	16- $\phi 12$	
GIQ-500	500	70	610	580	680	238	178	535	16- $\phi 12$	
GIQ-630	600	80	750	720	820	238	178	535	20- $\phi 12$	
GIQ-800	800	100	950	920	1020	313	248	630	24- $\phi 12$	

表 7-63 GIQ 系列气动真空蝶阀外形尺寸(二)

型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm								连接标准
		B	D	D_0	H_1	H_2	E	L	$n-\phi c$	
GIQ-32	32	22	78	64	118	100	74	235	4- $\phi 6$	JB919-75
GIQ-40	40	22	85	70	125	100	74	235	4- $\phi 6$	
GIQ-50	50	22	110	90	150	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-65	65	28	125	105	165	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-80	80	28	145	125	185	100	74	235	4- $\phi 8$	
GIQ-100	100	28	170	145	210	100	74	235	4- $\phi 10$	
GIQ-125	125	34	195	170	235	120	88	275	4- $\phi 10$	
GIQ-150	150	34	220	195	260	120	88	275	8- $\phi 10$	
GIQ-200	200	40	275	250	323	138	100	310	8- $\phi 10$	
GIQ-250	250	45	330	300	378	138	100	310	8- $\phi 12$	
GIQ-300	300	50	380	350	428	165	118	370	8- $\phi 12$	
GIQ-400	400	60	500	465	410	190	143	450	8- $\phi 16$	
GIQ-500	500	70	600	565	670	238	178	535	12- $\phi 16$	
GIQ-600	600	80	710	670	780	238	178	535	12- $\phi 18$	
GIQ-800	800	100	920	880	990	313	248	630	20- $\phi 18$	

5. 电磁真空阀

电磁真空阀靠磁场磁力和弹簧复位力用以打开或关闭阀门,它有常开、常闭两种规格,通

常应用最多的是不通电时常闭,这样遇到突然停电,阀门自动关闭,避免大量空气进入真空室。

①上海阀门二厂生产的电磁阀有 GDC-J 型电磁真空挡板阀、GQC 型电磁充气阀及 GDC-Q5 型、DDC-JQ 型电磁高真空带充气阀等四种型号。中科科美真空技术有限公司生产 DDC-J 型及 DDC-JQ 型两种型号。

GDC-J 型电磁高真空挡板阀用于真空系统中切断或接通气流。工作介质为干燥空气及非腐蚀性气体。阀门关闭时,允许阀板密封面上侧承受大气压(下侧为真空),在此状态下接通电源后,阀板应能正常开启。

GDC-J 型电磁高真空挡板阀的外形尺寸及技术性能参数见表 7-64。

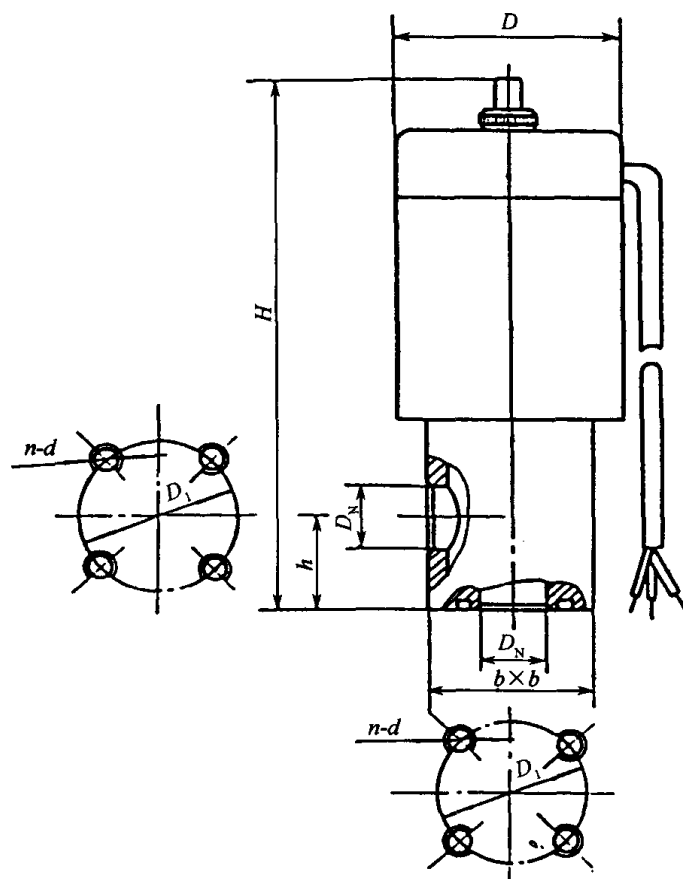
表 7-64 GDC-J 型电磁高真空挡板阀外形尺寸及技术性能参数

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm						连接标准	漏 率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	备 注
		D	$H \approx$	$b \times b$	D_1	$n-d$	h			
GDC-J16A	16	68	168.5	48×48	42	4-M5	28	JB919	1.3×10^{-7}	1. 输入电源:AC220V 2. 适用压力范围: $10^5 \text{Pa} \sim 6.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 3. 阀体材料:碳钢镀镍 4. 密封材料:丁腈橡胶 5. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$
GDC-J25A	25	82	187.8	58×58	55	4-M6	35			
GDC-J32A	32	92	216.5	68×68	64	4-M6	40			
GDC-J40	40	110	260	80×80	70	4-M6	44			
GDC-J50A	50	124	284	94×94	90	4-M8	56			
GDC-J65	65	135	290	115×115	105	4-M8	65			
GDC-J80	80	165	332	140×140	125	4-M8	75			

DDC-JQ 型电磁真空带充气阀是安装在机械真空泵的专用阀门,电源与机械泵电机接在同一电路上,泵的开启与停止和阀门的开关同步。当切断电源或遇到电源突然中断时,该阀能自动将真空抽气系统封闭,并将大气充入泵腔内,避免泵油逆流,污染真空系统。

DDC-JQ 型电磁真空带充气阀的外形尺寸及技术性能参数,见表 7-65。

表 7-65 DDC-JQ 型电磁真空带充气阀外形尺寸及技术性能参数



型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm						连接标准	漏率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
		D	$H \approx$	$b \times b$	D_1	$n-d$	h		
DDC-JQ16A	16	68	176.1	48×48	42	4-M5	28	JB919	6.7×10^{-4}
DDC-JQ25A	25	82	199	58×58	55	4-M6	35		
DDC-JQ32A	32	92	222	68×68	64	4-M6	40		
DDC-JQ40	40	110	252.5	80×80	70	4-M6	44		
DDC-JQ50A	50	124	293.8	94×94	90	4-M8	56		
DDC-JQ65	65	135	320	115×115	105	4-M8	65		
DDC-JQ80	80	165	367	140×140	125	4-M8	75		

注:1. 输入电源:AC220V;

 2. 适用压力范围: $10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-2} \text{Pa}$;

3. 阀体材料:碳钢镀镍;

4. 密封材料:丁腈橡胶;

 5. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$

GDC-5 型、GDC-Q5 型电磁真空挡板阀接口为焊管式。GDC-Q5 型为电磁高真空带充气阀,通电打开阀板的同时封闭充气口;断电时阀板关闭,打开充气口,通过 F 端向 A 端充气。GDC-5 型用来接通或截止真空系统气流。外形尺寸及技术性能参数见表 7-66。

表 7-66 GDC-Q5、GDC-5 型电磁阀外形尺寸及技术性能参数

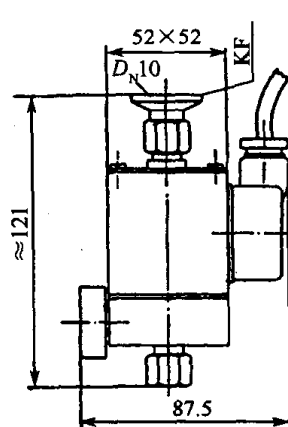
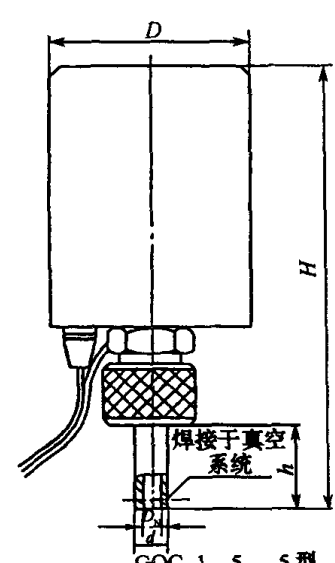
型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm			连接方式	漏率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	功耗 /W	备 注				
		阀体										
		直径	长	高								
GDC-Q5	5	52	123	101	焊接式接管 连接	6.7×10^{-4}	10	1. 输入电源: AC220V				
GDC-5	5	52	123	101				2. 适用压力范围: $10^5 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$				
								3. 阀体材料: 黄铜镀镍				
								4. 密封材料: 丁腈橡胶				
								5. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$				

GQC-1.5 型、GQC-5 型电磁高真空充气阀是以电磁力为动力,当电源接通后,阀门被关闭,使真空系统与大气隔离,切断电源时,阀门处于开启状态,大气随之充入真空系统。

GQC-4A 型电磁高真空充气阀具有通电开启或通电关闭的两种功能,阀内带有空气过滤器可用作向真空系统充气。

GQC 型电磁高真空充气阀接口为接管式,外形尺寸及技术性能参数见表 7-67。

表 7-67 GQC 型电磁高真空充气阀外形尺寸、性能参数

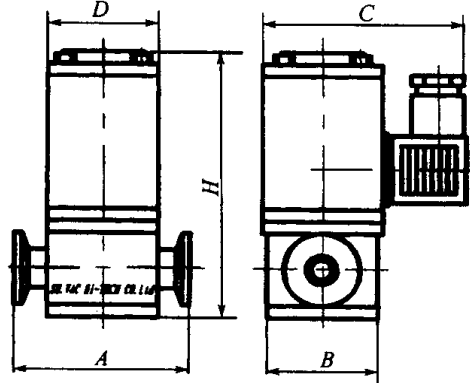
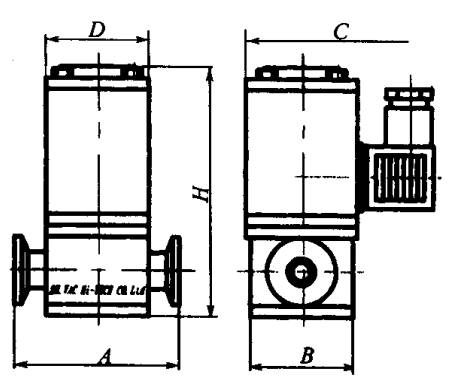
 <p>GQC-4A 型</p>		 <p>GQC-1、5、-5 型</p>	
---	--	--	--

(续)

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm				连接标准	电源/V	功率/W	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	备 注
		D	H	d	h					
GQC-1.5	1.5	52	112	7	17	焊接式接管	DC36	2.34	1.3×10^{-4}	1. 阀芯材料:铜或铝合金镀镍 2. 密封材料:丁腈橡胶 3. 适用范围: $10^5\text{Pa}\sim 1.3\times 10^{-4}\text{Pa}$ 4. 介质温度: $-25^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$
GQC-5	5	60	136	10	25			6.8		
GQC-4A	4	-	-	-	-	GB4982-85	DC36 或 AC220	3.6		

②上海万可姆高科技有限公司生产的 GDC 系列电磁真空挡板阀,有常开和常闭两种规格。阀门漏率 $\leq 1.3\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$,电磁线圈接线处有红色指示灯,用以告知阀门工作状态。阀体采用 1Cr18Ni9Ti 或 304 不锈钢,密封材料为氟橡胶,能抗腐蚀性气体。连接方式为 GB498Z-85 快卸法兰。外形尺寸见表 7-68。

表 7-68 GDC 系列电磁真空挡板阀外形尺寸

<div><div><p>常开型</p></div><div><p>常闭型</p></div></div>							
型 号	规 格	外 形 尺 寸 /mm					备 注
		A	B	C	D	H	
GDC-8K	常闭式	60	30	80	44×44	100	1. 工作电压 220V 2. 法兰标准 KF10-16
	常开式	70	44	80	44×44	110	
GDL-10K	常闭式	60	30	80	44×44	100	
	常开式	70	44	80	44×44	110	

6. 电磁充气压差真空阀

电磁充气压差阀是装在机械真空泵进气口上的专用阀门,当泵停止运转时,利用大气压力使阀板自动落下将真空系统封闭,并通过阀的充气口将大气充入泵腔中,起到保持真空系统的真空度和防止机械真空泵油返流污染真空系统的一种新颖真空阀门。原理是机械泵的电源和电磁阀线圈电源接在同一电路上,机械真空泵通电运转的同时,电磁先导阀线圈电磁力将阀内通大气的孔关闭,阀内活塞靠弹簧力将阀板推开,进入正常工作状态;关掉电源(或突然断电)时,机械泵停止运转的同时,电磁先导阀失电而打开通大气的孔,大气进入气缸推动活塞压缩

弹簧并推动阀关闭真空系统,随后将大气充入真空泵进气口,使泵内进排气口压力平衡,避免泵油的返流。

①上海阀门二厂生产的 DYC-JQ 型电磁真空带充气压差阀的外形尺寸及技术性能参数见表 7-69。

表 7-69 DYC-JQ 型电磁真空带充气压差阀外形尺寸及技术参数

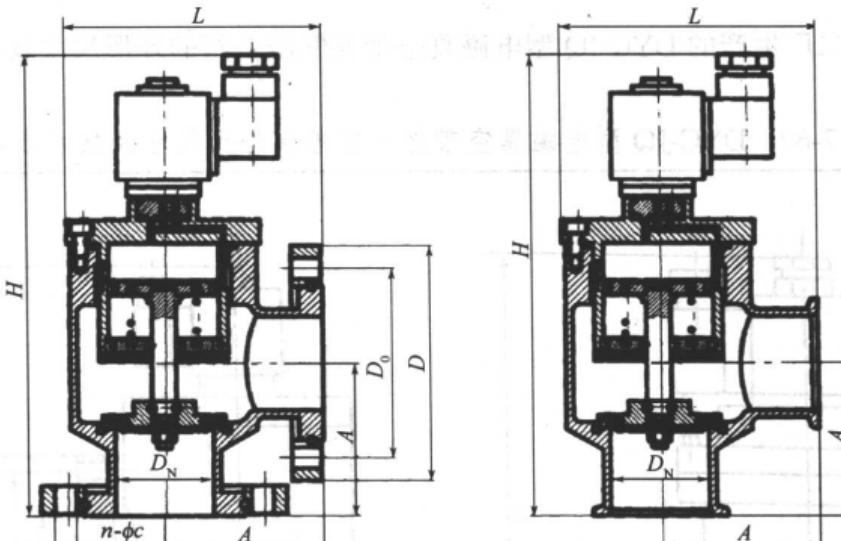
$D_N \leq 40$

$D_N \geq 50$

型 号	通径 D_N /mm	外 形 尺 寸/mm						连接标准	漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	备 注		
		D	D_0	A_1	A_2	H	$n-\phi c$					
DYC-JQ16	16			40	40			GB4982	6.7×10^{-2}	1. 输入电源: AC220V 2. 阀体材料: 碳钢镀锌 3. 密封材料: 丁腈橡胶 4. 介质温度: $-25^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$		
DYC-JQ25	25			50	50	168						
DYC-JQ32	32			58	58	184						
DYC-JQ40	40			65	65	182						
DYC-JQ50	50	110	90	70	70	209	4- $\phi 9$	GB6070				
DYC-JQ65	65	125	105	88	88	266	4- $\phi 9$	JB919				
DYC-JQ80	80	145	125	98	98	290	8- $\phi 9$	JB6070				
DYC-JQ100	100	165	145	108	108	296	8- $\phi 9$					
DYC-JQ150	150	220	195	155	160	374	8- $\phi 12$	JB919				

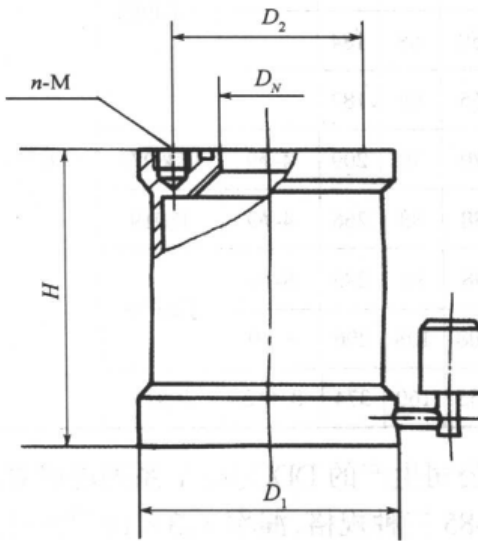
②上海万可姆高科技生产的 DDC-JQ-Y 系列电磁真空充气压差阀按连接标准有 GB6070-85、GB919-76、GB4982-85 三种规格,漏率 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,外形尺寸见表 7-70。

表 7-70 DDC-JQ-Y 系列电磁真空充气压差阀外形尺寸 (单位:mm)

															
通径 D_N	A	H	L	D	D_0	$n-\phi c$	A	H	L	D	D_0	$n-\phi c$	A	H	L
25	50	172	80	70	55	4-M6	50	172	80	70	55	4-M6	50	172	80
40	65	196	104	100	80	4-M8	65	196	104	85	70	4-M6	65	196	104
50	80	216	124	110	90	4-M8	80	216	124	110	90	4-M8	70	216	124
63	88	234	140	130	110	4-M8	88	234	140	125	105	4-M8	/	/	/
80	100	255	161	145	125	8-M8	100	255	161	145	125	4-M8	/	/	/
100	108	274	181	165	145	8-M8	108	274	181	170	145	4-M10	/	/	/
150	145	332	239	225	200	8-M10	145	332	239	220	195	8-M10	/	/	/
法兰连接标准	GB6070-85						GB919-76						GB4982-85		

③沈阳真空泵厂生产 DDC-Y 型系列真空电磁压差阀外形尺寸见表 7-71。

表 7-71 DDC 型系列真空电磁压差阀外形尺寸及技术性能参数

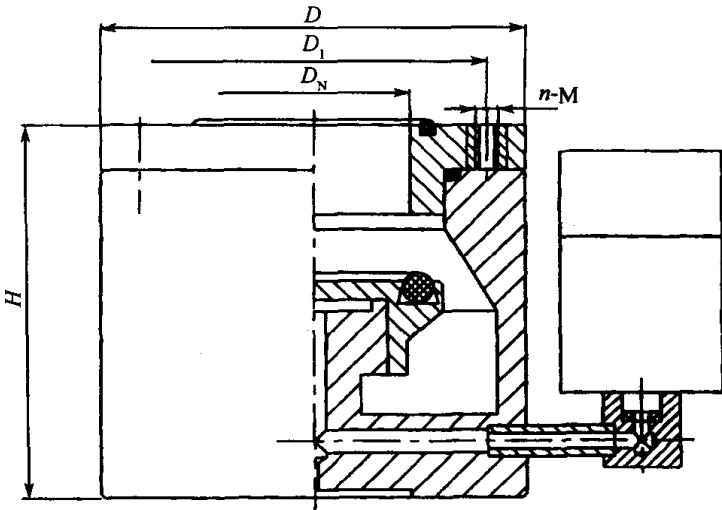
															
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

(续)

型 号	通 径 D_N/mm	外形尺寸 /mm				质量 /kg	漏气率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	开闭时间 /s	电源电压 /V
		D_1	D_2	H	$n\text{-M}$				
DDCY-25Q	25	70	55	85	4-M6	1.5	6.7×10^{-2}	<3	220
DDCY-32Q	32	78	64	95		2			
DDCY-40Q	40	80	70	95		3			
DDCY-50Q	50	110	90	100	4-M8	4			
DDCY-65Q	65	125	105	110		5.5			
DDCY-80Q	80	145	125	120		7			
DDCY-100Q	100	170	145	145	8-M10	16			
DDCY-125Q	125	196	170	165		18			
DDCY-150Q	150	220	195	190		20			
DDCY-200Q	200	275	250	240	12-M10	30			

④沈阳恒星实业有限公司生产的 DYC-Q 型电磁压差真空阀的外形尺寸及技术性能参数,见表 7-72。

表 7-72 DYC-Q 型电磁压差真空阀外形尺寸及技术性能参数

										
型 号	通 径 D_N/mm	外形尺寸 /mm				流 导 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	漏气率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	开闭时间 /s	功率 /W	质量 /kg
		D	D_1	H	$n\text{-M}$					
DYC-Q25	25	70	55	85	4-M6	20	6.5×10^{-2}	≤ 3	14	1.5
DYC-Q32	32	78	64	95	4-M6	26				2
DYC-Q40	40	85	70	95	4-M6	40				2.5
DYC-Q50	50	110	90	100	4-M8	60				4
DYC-Q65	65	125	105	110	4-M8	120				5.5
DYC-Q80	80	145	125	116	4-M8	200				7

⑤成都无极真空科技有限公司生产 DYC-JQ 型电磁真空充气压差阀,阀体材料采用硬质铝合金,法兰型式 ISO-KF。使用时,A 法兰与抽气管道相连,B 法兰与旋片泵相连,并将先导阀与旋片泵接在同一电源上。工作时,旋片泵运转的同时打开阀门,断电停泵时,利用大气压

关闭阀门,保持系统真空并将大气放入泵腔,防止泵油返流。其外形尺寸及技术性能参数见表 7-73。

表 7-73 DYC-JQ 型电磁真空充气压差阀外形尺寸及性能参数

DYC-JQ25、40、50 型

DYC-JQ63、80 型

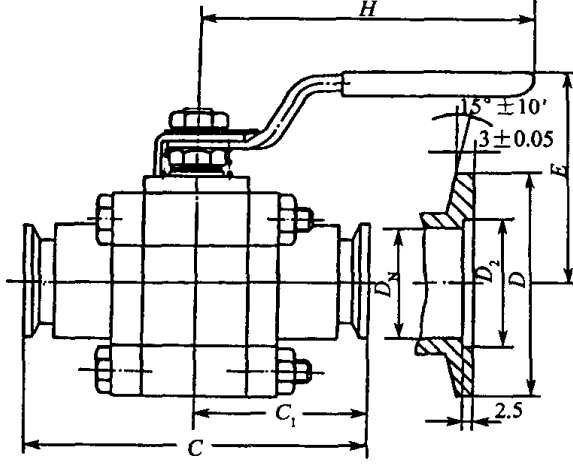
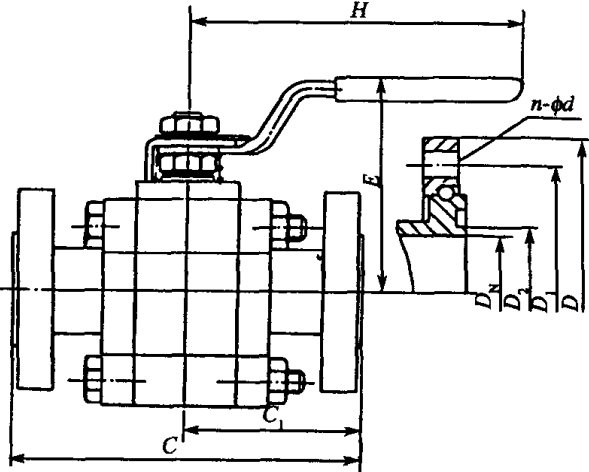
型 号	通 径 D_N/mm	外形尺寸/mm				漏 率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	电 源 $/\text{V}$	电压	电流	适用泵型
		A	B	C	D			$/\text{V}$	$/\text{A}$	
DYC-JQ5	25	50	38	85	132	$\leq 10^{-3}$	220V (50Hz/60Hz)	1.6	2.5	2X2、2X4
DYC-JQ40	40	65	55	111	182					2X8、2X15
DYC-JQ50	50	70	63	120	210			10	11.5	2X15、2X30
DYC-JQ63	63	55	80	108×108	250					2X30、2X70
DYC-JQ80	80	65	90	128×128	280			16	19	2X70、X-100

7. 真空球阀

真空球阀有手动、气动和电动三种,与真空蝶阀相同,是只需旋转 90° 就能实现关或开的真空阀门。真空球阀开关速度快,但体积和漏率都较真空蝶阀大。适用介质为空气、水、蒸气、酸、碱等。

①上海阀门二厂生产的系列球阀有手动(GU 型)、气动(GUQ 型)和电动(GUD 型)三种规格。适用于真空系统或压力系统中接通或切断带有酸、碱性的气体或液体的介质流。球阀的外形尺寸及技术性能参数见表 7-74~表 7-76。

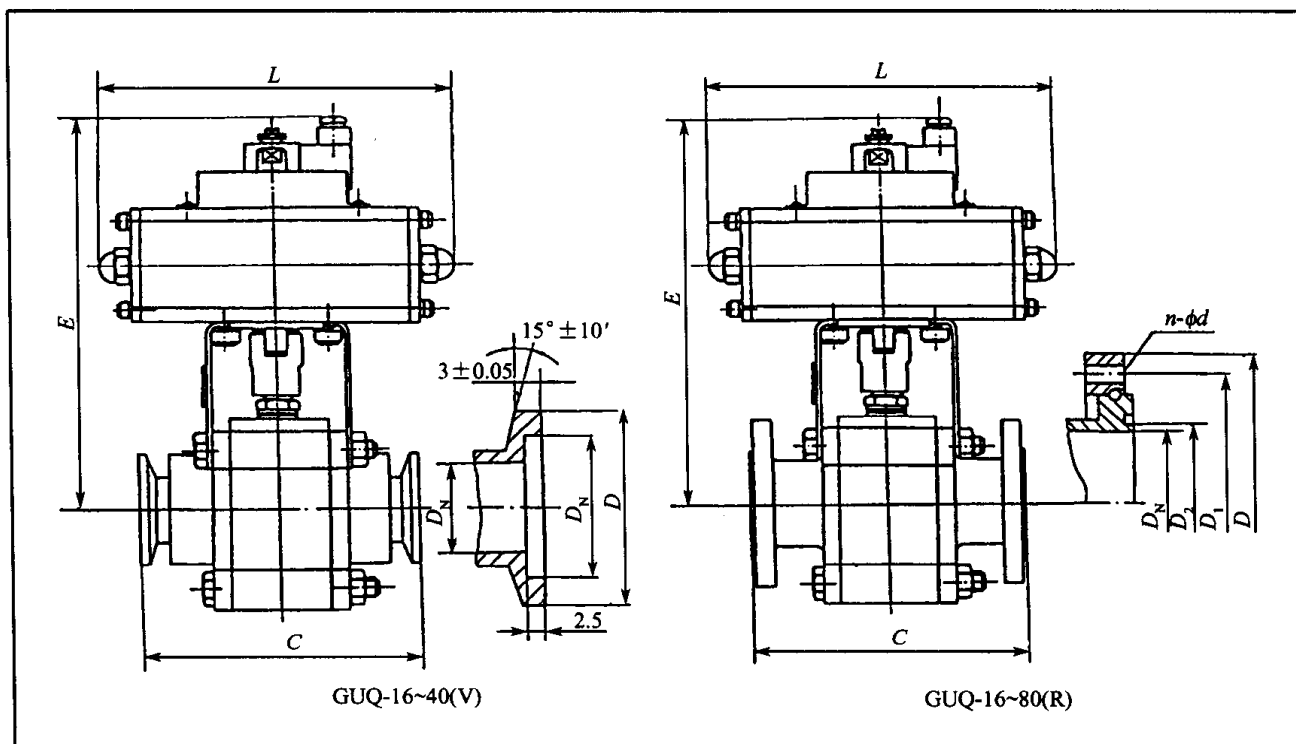
表 7-74 GU 型球阀外形尺寸及技术性能参数

	
GU-16-40(V)	GU-16-80(R)

(续)

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm									连接标准	漏率 $/Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	备 注	
		D	D_1	D_2	G	C	C_1	E	H	$n-\phi d$				
GU-16(P)	16				12.7 ($G\frac{1}{2}$)	68.4	34.2	60	115		—	$<1 \times 10^{-3}$	1. 适用范围: $1.6 \times 10^6 Pa \sim 1 \times 10^{-3} Pa$ 2. 介质温度: $-25^\circ C \sim 120^\circ C$ 3. 阀体、球、阀杆材料: 不锈钢 4. 球封处、轴封处密封材料: 聚四氟乙烯	
GU-25(P)	25				25.4 ($G1$)	94	47	72.8	152.8					
GU-32(P)	32				31.75 ($G1\frac{1}{4}$)	118	59	101.5	203					
GU-40(P)	40				38.1 ($G1\frac{1}{2}$)	128	64	107	203					
GU-16(V)	16	30		17.2		83.8	41.9	60	115		GB4982			
GU-25(V)	25	40		26.2		114	57	72.8	152.8					
GU-32(V)	32	55		34.2		140	70	101.5	203					
GU-40(V)	40	55		41.2		160	80	107	203					
GU-16(R)	16	60	45	22		83.8	41.9	60	115	4- $\phi 6.6$	GB6070			
GU-25(R)	25	70	55	29		114	57	72.8	152.8	4- $\phi 6.6$				
GU-32(R)	32	90	70	36		140	70	101.5	203	4- $\phi 9$				
GU-40(R)	40	100	80	44		160	80	107	203	4- $\phi 9$				
GU-50	50	110	90	55		170	80	145	185	4- $\phi 9$				
GU-80	80	195	160	100		203	95	170	240	8- $\phi 18$	固定法兰			

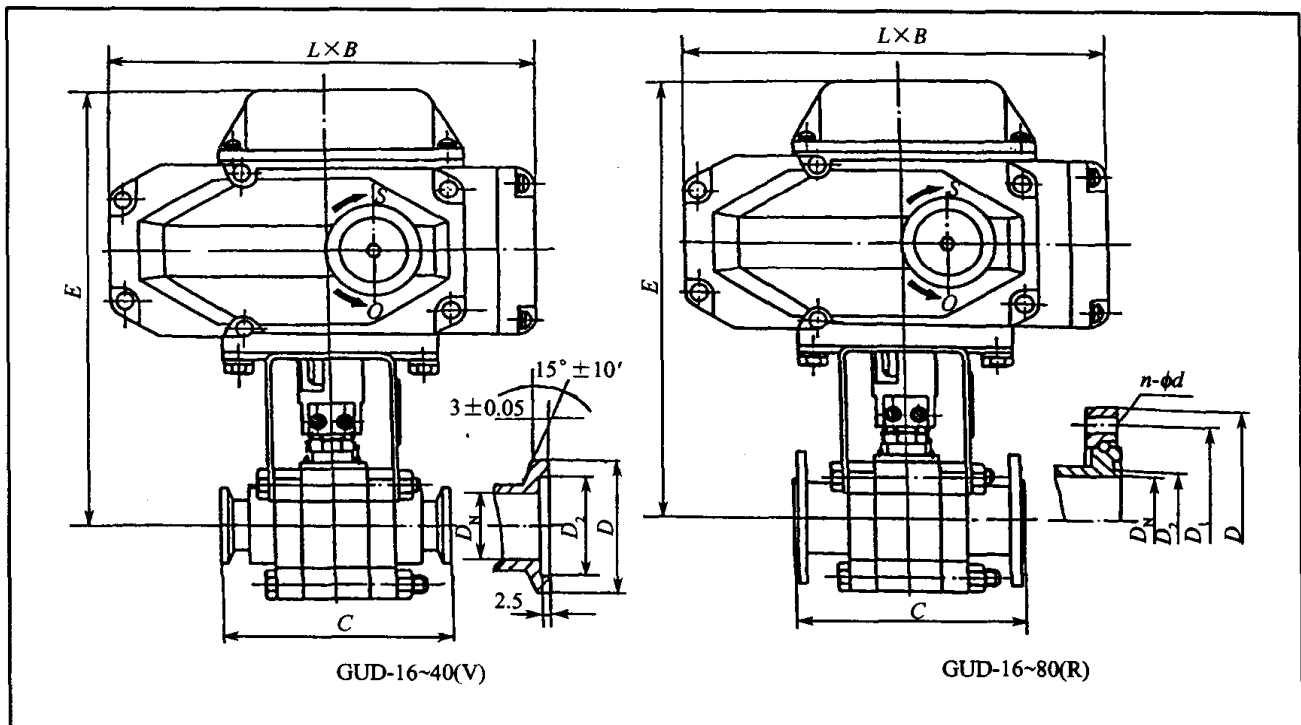
表 7-75 GUQ 型气动球阀外形尺寸及技术参数



(续)

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm								连接标准	漏率 $/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	备 注	
		D	D_1	D_2	G	C	E	L	$n-\phi d$				
GUQ-16(P)	16				12.7 ($G\frac{1}{2}$)	68.4	189.5	178		—	$<1 \times 10^{-3}$	1. 适用范围: $1.6 \times 10^6 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 2. 介 质 温 度: $-25^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 3. 气 源 压 力: $0.4\text{MPa} \sim 0.6\text{MPa}$ 4. 阀体、球、阀杆 材料: 不锈钢 5. 球封处、轴封 处密封材料: 聚四氟乙烯	
GUQ-25(P)	25				25.4 ($G1$)	94	209.5	198					
GUQ-32(P)	32				31.75 ($G1\frac{1}{4}$)	118	229.5	214					
GUQ-40(P)	40				38.1 ($G1\frac{1}{2}$)	128	244	236					
GUQ-16(V)	16	30		17.2		83.8	189.5	178		GB4982			
GUQ-25(V)	25	40		26.2		114	209.5	198					
GUQ-32(V)	32	55		34.2		140	229.5	214					
GUQ-40(V)	40	55		41.2		160	244	236					
GUQ-16(R)	16	60	45	22		83.8	189.5	178	4- $\phi 6.6$	GB6070			
GUQ-25(R)	25	70	55	29		114	209.5	198	4- $\phi 6.6$				
GUQ-32(R)	32	90	70	36		140	229.5	214	4- $\phi 9$				
GUQ-40(R)	40	100	80	44		160	244	236	4- $\phi 9$				
GUQ-50	50	110	90	55		170	288	270	4- $\phi 9$				
GUQ-80	80	195	160	100		203	310	284	8- $\phi 18$	固定法兰			

表 7-76 GUD 型电动球阀外形尺寸及技术性能参数



(续)

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm								性能参数		备 注
		D	D_1	D_2	G	C	E	$L \times B$	$n-\phi d$	连接标准	漏率 /Pa·L·s ⁻¹	
GUD-16(P)	16				12.7 (G $\frac{1}{2}$)	68.4	169.3	157×139		—	<1×10 ⁻³	1. 适用范围: 1.6 × 10 ⁶ Pa ~ 1 × 10 ⁻³ Pa 2. 介质温 度: -25℃ ~ 120℃ 3. 阀体、球、 阀杆材料:不 锈钢 4. 球封处、 轴封处密封 材料:聚四氟 乙烯
GUD-25(P)	25				25.4 (G1)	94	184.5					
GUD-32(P)	32				31.75 (G1 $\frac{1}{4}$)	118	203					
GUD-40(P)	40				38.1 (G1 $\frac{1}{2}$)	128	208.2					
GUD-16(V)	16	30		17.2		83.8	169.3			GB4982		
GUD-25(V)	25	40		26.2		114	184.5					
GUD-32(V)	32	55		34.2		140	203					
GUD-40(V)	40	55		41.2		160	208.2					
GUQ-16(R)	16	60	45	22		83.8	169.3		4- ϕ 6.6	GB6070		
GUD-25(R)	25	70	55	29		114	184.5		4- ϕ 6.6			
GUD-32(R)	32	90	70	36		140	203		4- ϕ 9			
GUD-40(R)	40	100	80	44		160	208.2		4- ϕ 9			
GUD-50	50	110	90	55		170	259.5		4- ϕ 9			
GUD-80	80	195	160	100		203	416	207×147	8- ϕ 18	固定法兰		

②上海万可姆高科技生产的系列真空压力球阀有气动(GQQ型)和电动(GQD型)两种。漏率 $\leq 1.3 \times 10^{-4}$ Pa·L/s;使用压力范围:10⁻⁴Pa~1.6MPa;工作温度:-30℃~150℃。阀体和球心材料为316L,密封件材料为增强聚四氟乙烯、氟橡胶。采用1/4旋转气动(或电动)执行器,工作平稳,阀门开和关有电信号输出。电动真空压力球阀可手、电两用。

GQQ系列气动真空压力球阀外形尺寸见表7-77。

GQD系列电动真空压力球阀外形尺寸见表7-78。

表 7-77 GQQ 系列气动真空压力球阀外形尺寸

(单位:mm)

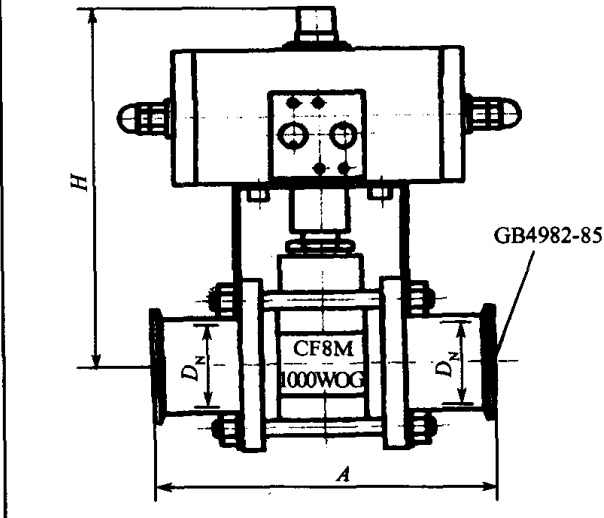
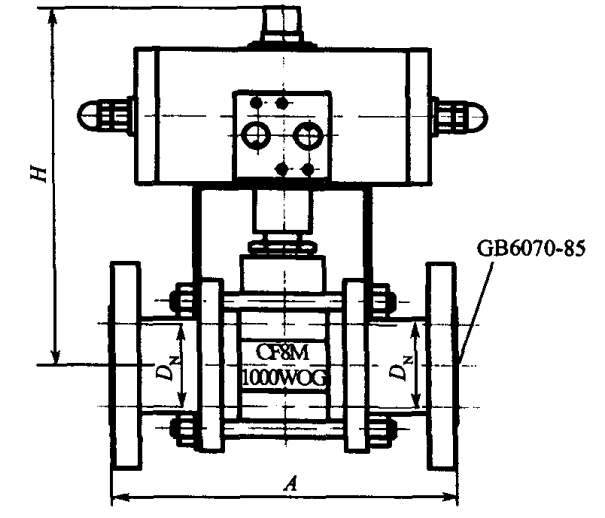
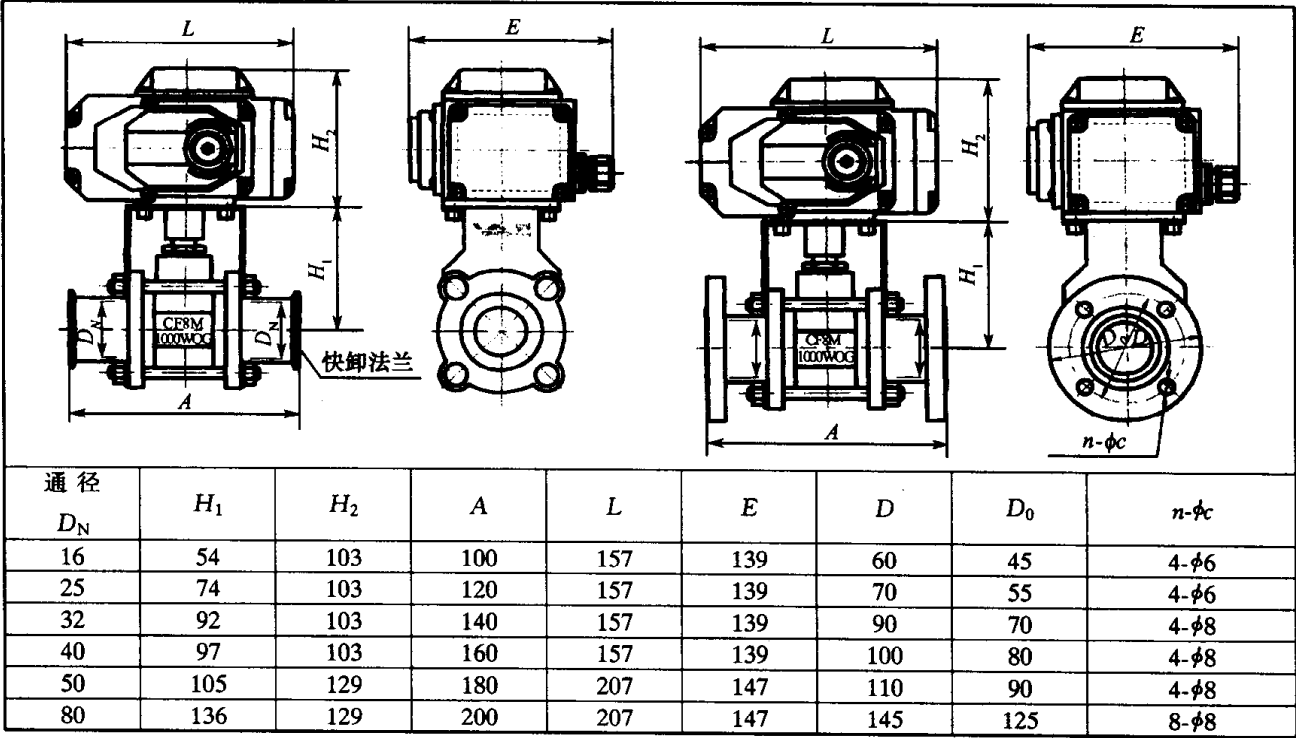
					
					
通径 D_N	16	25	32	40	50
A	100	120	140	160	200
H	163	178	193	203	250

表 7-78 GQD 系列电动真空压力球阀外形尺寸 (单位:mm)



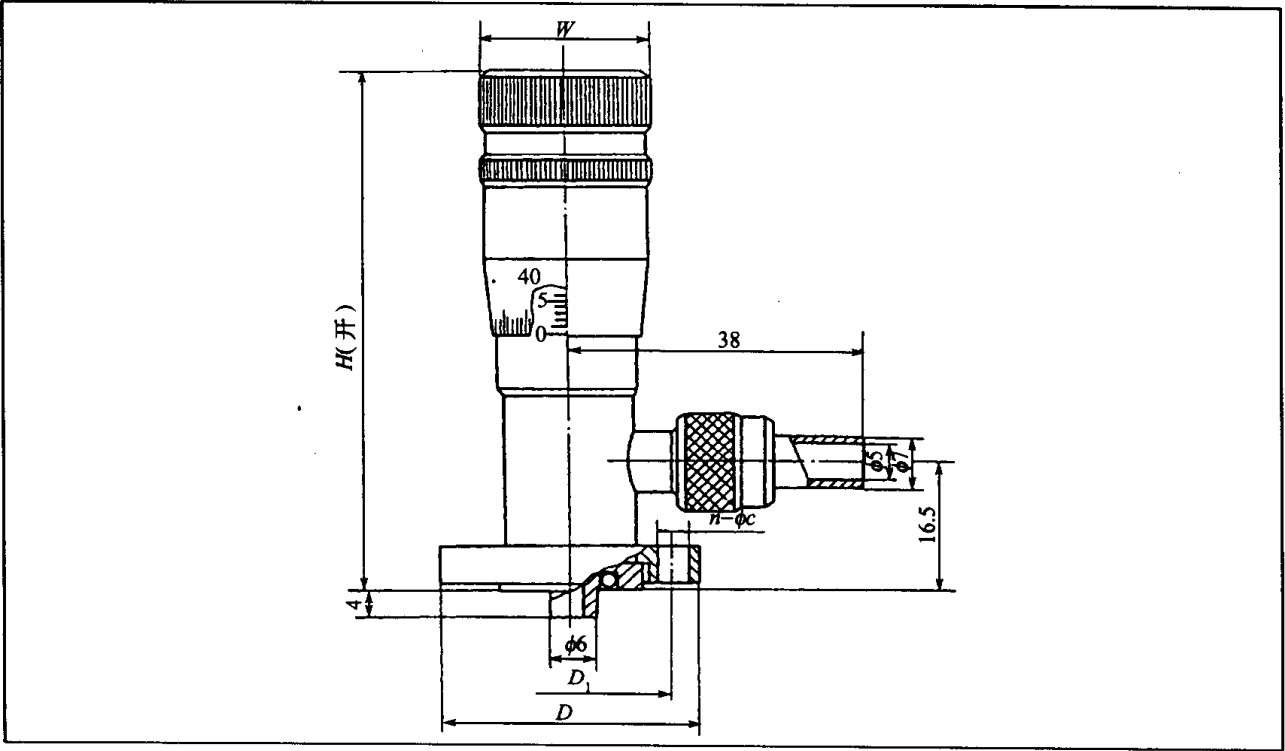
8. 真空微调阀

真空微调阀又名真空针阀,靠螺杆传动来调节锥形针和孔的缝隙长度,改变阀座流导值,用以调节流量装置的气体流量和控制真空容器的真空度。

①上海阀门二厂生产 GW-J-T 型和 ZT 型两种规程的真空微调阀。适用介质为空气及非腐蚀性气体。

GW-J-T 型高真空微调阀外形尺寸及技术性能参数见表 7-79。

表 7-79 GW-J-T 型高真空微调阀外形尺寸及性能参数



(续)

型号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm					性能参数			备 注
		D	D_1	H (开)	W	$n-\phi$	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	最小可调量 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	最大可调量 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	
GW-J30-T	0.8	34	26	76.5	22	$3-\phi 4.5$	$<1.3\times 10^{-6}$	1.3×10^{-2}	4000	1. 适用范围: $10^5\text{Pa}\sim 1.3\times 10^{-2}\text{Pa}$ 2. 介质温度: $-25^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 3. 阀体、阀杆材料: 不锈钢 4. 阀座: 无氧铜 5. 轴封处密封件: 丁腈橡胶、四氟乙烯
GW-J200-T	2				38			1.3×10^{-1}	26700	

ZT 型真空调节阀用来调节充入真空系统的气体流量,其外形尺寸及技术性能参数,见表 7-80。

表 7-80 ZT 型真空调节阀外形尺寸及性能参数

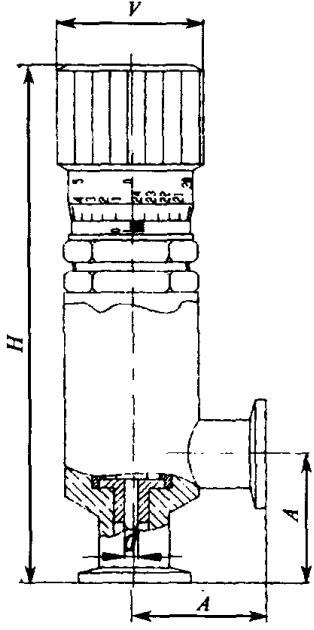
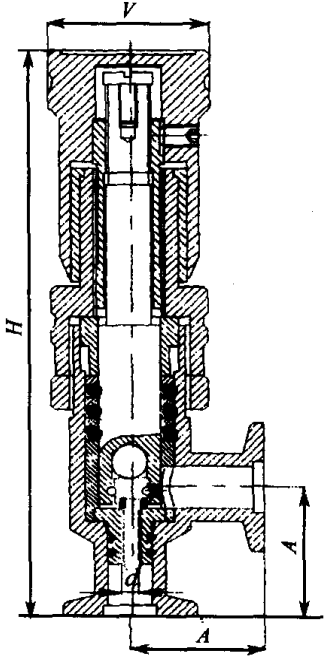
ZT

ZT-A

型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm							轴封处漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	备 注		
		D	A	D	H	H_1	L	L_1				
ZT-40	40	47	—	89	145	48.5	150	75	$<1.3\times 10^{-2}$	1. 适用范围: $1.5\times 10^5\text{Pa}\sim 1.3\times 10^{-2}\text{Pa}$ 2. 工作压力: 0.15MPa 3. 介质温度: $-25^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 4. 阀体、阀板、阀杆材料: 碳钢 5. 密封件: 丁腈橡胶		
ZT-50	50	57	—	114	150	53.5						
ZT-65	65	76	—	130	169	63						
ZT-80	80	89	—	152	182	69.5						
ZT-100	100	108	—	202	201	79	200	100				
ZT-32A	32	38	43	253	108	39						
ZT-40A	40	47	50	314	129	49						
ZT-50A	50	57	50	365	138.5	53.5						
ZT-65A	65	76	50	385	157	63						
ZT-80A	80	89	50	497	169.5	69.5						
ZT-100A	100	108	50	590	189	79						

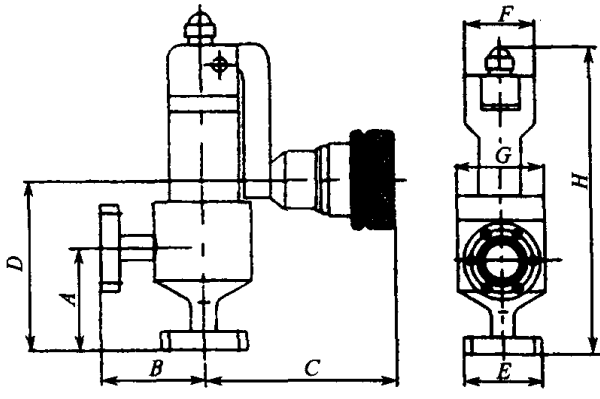
②上海万可姆高科技生产的 GW-J-T 型真空微调阀有 GW-JP I 型(一般调节)和 GW-JP II 型(精细调节)两种。阀门关闭后总漏率(阀体、阀针密封处): $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$;耐正向压力 $0.1 \text{MPa} \sim 1.0 \text{MPa}$ 。阀针阀座材料采用 316L, 阀体、阀杆为 304 不锈钢, 通径有 1mm、1.5mm、3mm 三种规格。GW-JP I 型为变通细牙螺纹调节。使用温度范围: $-30^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$;适用介质:空气、蒸气、水、酸、碱等。其外形尺寸见表 7-81。

表 7-81 GW-JP 型真空微调阀外形尺寸

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> GW-JI 型 GW-JII 型 </div>							
型 号	外形尺寸/mm				最小可调流量	最大可调流量	类 别
	d	A	$H(\text{开})$	$H(\text{关})$	$\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	
GW-J1.0P I	1.0	30	128	120	0.0047	0.0188	一般调节
GW-J1.5P I	1.5	30	128	120	0.0369	0.1477	
GW-J3.0P I	3.0	30	128	120	0.7959	3.1839	
GW-J1.0P II	1.0	30	140	132	0.0047	0.0188	精细调节
GW-J1.5P II	1.5	30	140	132	0.0369	0.1477	
GW-J3.0P II	3.0	30	140	132	0.7959	3.1839	

③沈阳中科仪技术发展有限公司生产 CW16 超高真空微调阀,适用于超高真空容器或流量计的气体流量调节,可精确控制送入真空系统的进气量,用以达到需要的稳定真空度。外形尺寸及技术性能参数见表 7-82。

表 7-82 CW16 型超高真空微调阀外形尺寸及技术性能参数

												
通 径 D_N/mm	外形尺寸 /mm								漏气率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	烘烤温度 $/^\circ\text{C}$	连接法兰	质量 $/\text{kg}$
	A	B	D	F	E	F	G	H				
16	40	40	65	75	33.7	30	38	132	1×10^{-8}	150	CF16	0.95

9. 真空翻板阀

高真空气动翻板阀是以压缩空气作为动力,用以改变活塞运动方向带动阀板作启动动作,实现真空系统或管道中气体的截止与导通。该类阀门结构简单、开闭时间短,并可实现自动控制,广泛用于冶金、电子、化工、航天、原子能、生物医药、食品等中大型设备,如真空炉、真空镀膜设备、真空冷冻干燥设备等。

①沈阳蓝菱真空设备制造公司生产的 GFQ 型系列高真空气动翻板阀,适用范围: $10^5\text{Pa}\sim 1\times 10^{-5}\text{Pa}$;气源压力 $0.4\text{MPa}\sim 0.6\text{MPa}$,阀门开启后阀板转角 90° 。其外形尺寸及技术性能参数见表 7-83。

表 7-83 GFQ 型系列高真空翻板阀外形尺寸及性能参数

The drawing shows a valve assembly with a central body and a top handle. The side view (left) shows dimensions D_2 , D_1 , D_N , L_2 , L_1 , H , H_1 , $n-\phi c$, and $n-M$. The front view (right) shows dimensions D_N , d_1 , d_2 , $n-\phi c_1$, and D_2 . The central body has a diameter of D_N and a length of L_1 . The handle has a diameter of $n-\phi c$ and a length of L_2 . The base has a diameter of D_2 and a height of H . The side view also shows a diameter of D_1 and a height of H_1 . The front view shows a diameter of D_N and a height of d_1 and d_2 . The base has a diameter of D_2 and a height of H . The side view also shows a diameter of D_1 and a height of H_1 . The front view shows a diameter of D_N and a height of d_1 and d_2 . The base has a diameter of D_2 and a height of H .

型 号	通 径 D_N /mm	外形尺寸/mm				法兰尺寸/mm				螺 孔 /mm			活塞行程 /mm	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	开闭时间 /s	
		L_1	L_2	H_1	H	D_1	D_2	d_1	d_2	DN_1	$n-M$	$n-\phi c$				$n-\phi c_1$
GFQ-65	65	—	100	72	297	105	125	—	—	—	4-M8	4- $\phi 9$	—	35	3×10^{-4}	0.2
GFQ-80	80	—	110	79	328	125	145	—	—	—	4-M8	4- $\phi 9$	—	40	3×10^{-4}	0.2

(续)

型 号	通 径 D_N /mm	外形尺寸/mm				法兰尺寸/mm					螺 孔 /mm			活塞行程 /mm	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	开闭时间 /s
		L_1	L_2	H_1	H	D_1	D_2	d_1	d_2	DN_1	$n-M$	$n-\phi$	$n-\phi_{c1}$			
GFQ-100	100	—	120	90	352	145	165	—	—	—	4-M10	4- $\phi 12$	—	45	5×10^{-4}	0.4
GFQ-150	150	—	150	115	421	195	220	—	—	—	4-M10	4- $\phi 12$	—	54	5×10^{-4}	0.6
GFQ-200	200	180	180	145	490	250	275	105	125	65	4-M10	4- $\phi 12$	4- $\phi 9$	71	1×10^{-3}	1
GFQ-300	300	235	245	200	682	350	380	125	145	80	4-M12	4- $\phi 14$	4- $\phi 9$	112	1×10^{-3}	2
GFQ-400	400	310	320	260	853	465	500	145	170	100	4-M16	4- $\phi 18$	4- $\phi 12$	120	5×10^{-3}	3
GFQ-500	500	365	400	330	1046	580	610	195	220	150	4-M16	4- $\phi 18$	4- $\phi 12$	213	5×10^{-3}	4~5
GFQ-600	600	410	450	365	1180	670	710	195	220	150	4-M18	4- $\phi 21$	4- $\phi 12$	237	5×10^{-3}	4~5
GFQ-800	800	550	600	475	1470	880	920	250	275	200	4-M18	4- $\phi 21$	4- $\phi 12$	302	8×10^{-3}	6~8
GFQ-1000	1000	670	580	580	1835	1090	1140	310	335	250	4-M20	4- $\phi 23$	4- $\phi 14$	403	8×10^{-3}	10~12

②沈阳真龙真空设备有限公司生产的 GD(F)Q 系列高真空气动挡(翻)板阀,适用范围:
 $10^5 \text{Pa} \sim 1.33 \times 10^{-5} \text{Pa}$,气源压力:0.4MPa~0.6MPa;介质温度:丁腈橡胶密封圈为 $-25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$,
 氟橡胶密封圈为 $-30^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$;漏率:阀门通径 200mm 以下为 $1.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,通径
 大于 300mm 为 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。其外形尺寸及技术性能参数见表 7-84。

表 7-84 GD(F)Q 系列高真空挡板(翻)板阀外形尺寸及性能参数

(续)

型 号	通 径 D_N /mm	外形尺寸/mm					法 兰 尺 寸/mm								流 导 $/L \cdot s^{-1}$	启闭时间 /s	质量 /kg
		A	C	L	B	H	D_1	D_2	$n-M$	$n-\phi$	DN_1	D_1	d_2	$n-\phi_1$			
GD(F)Q-J150	150	120	150	—	254	736	195	220	4-M10	4- $\phi 12$	—	—	—	—	720	3~4	24
GD(F)Q-J200	200	145	195	385	340	800	250	275	4-M10	4- $\phi 12$	65	105	125	4- $\phi 9$	1000	3~4	37
GD(F)Q-J300	300	220	250	490	440	1030	350	380	4-M12	4- $\phi 14$	80	125	145	4- $\phi 9$	2900	4~5	94
GD(F)Q-J320	320	230	275	530	485	1122	395	425	4-M12	4- $\phi 14$	80	125	145	8- $\phi 9$	3100	4~5	101
GD(F)Q-J400	400	280	325	630	550	1277	465	500	4-M16	4- $\phi 18$	100	145	170	4- $\phi 12$	4700	4~5	159
GD(F)Q-J500	500	325	400	765	660	1525	565	600	4-M16	4- $\phi 18$	100	145	170	4- $\phi 12$	7700	5~6	264
GD(F)Q-J600	600	370	440	880	785	1593	670	710	4-M18	4- $\phi 21$	150	195	220	8- $\phi 12$	11000	5~6	369
GD(F)Q-J630	630	385	480	980	822	1722	720	750	4-M12	4- $\phi 14$	160	200	225	8- $\phi 12$	12500	5~6	390
GD(F)Q-J800	800	470	660	1210	1015	1930	880	920	4-M18	4- $\phi 21$	200	250	275	8- $\phi 12$	21000	6~7	580
GD(F)Q-J1000	1000	590	690	1380	1250	2158	1090	1140	4-M20	4- $\phi 23$	300	350	380	8- $\phi 14$	35000	7~9	730
GD(F)Q-J1200	1200	720	850	1630	1480	2630	1310	1360	4-M22	4- $\phi 25$	300	350	380	8- $\phi 14$	5000	10~12	870

10. 其它

(1)真空角阀

真空角阀是用于低、高、超高真空系统中的前级泵的配套元件。沈阳中科仪技术发展有限责任公司生产的 CD-J 型真空角阀按法兰密封形式分为真空角阀(氟橡胶密封)及全金属角阀(无氧铜垫密封)二种,阀体为不锈钢,阀传动密封采用波纹管密封形式,避免了传动杆运动时的漏气。其外形尺寸及技术性能参数见表 7-85、表 7-86。

表 7-85 CD-J 型真空角阀外形尺寸及技术性能参数

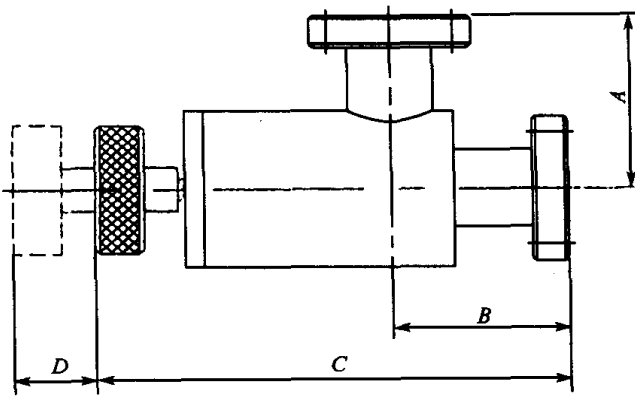
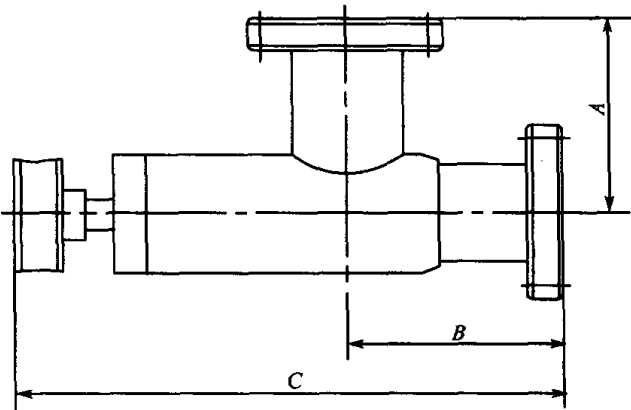
									
型 号	通径 D_N /mm	外形尺寸/mm				连接法兰	密封材料	漏 率 $/Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	烘烤温度 $/^{\circ}C$
		A	B	C	D				
CD-J16	16	40	37	100	14	CF16	氟橡胶	10^{-7}	<120
CD-J25	25	44	42	120	10	CF25			
CF-J35	354	68	58	128	15	CF35			

表 7-86 CD-J 型金属角阀外形尺寸及技术性能参数

									
型号	通径 D_N/mm	外形尺寸/mm			连接法兰	密封材料	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	烘烤温度/℃	
		A	B	C				开	关
CD-J16	16	48	45	106	CF16	无气铜	10^{-8}	450	300
CD-J35	35	77.5	77.5	194	CF35				
CD-J50	50	100	86	237	CF50				

(2) CD-J 型全金属超高真空截止阀

成都无极真空科技有限公司生产的 CD-J 型超高真空截止阀,采用金属密封,耐烘烤,广泛用于超高真空系统中。阀板任意一面可直接通大气而另一面仍能保持超高真空。该阀也可用于高温或低温下工作的低压管路中。其开关次数大于 1000 次,更换密封头方便。其外形尺寸及性能参数见表 7-87。

表 7-87 CD-J 型全金属超高真空阀外形尺寸及性能参数

型号	通径 D_N/mm	外形尺寸 /mm				漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	流导 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	行程 /mm	烘烤温度 $^{\circ}\text{C}$
		A	B	D_0	$n-\phi d$				
CD-J16	16	155	50	27	6- $\phi 4.3$	1×10^{-8}	2.8	6	<400
CD-J25	25	195	63	47	6- $\phi 6.4$		11	11	
CD-J40	40	225	80	58.7	6- $\phi 6.4$		32	16	
CD-J50	50	253	100	72.4	8- $\phi 8.4$		53	20	

注: 法兰标准符合 GB6071.2-85

(3) 逆止阀

逆止阀又称自封阀(常闭型),该阀分为阀体和专用接口两部分,阀体与专用接口连接或拆卸的瞬间能确保空气不进入工件内。该阀具有体积小、联接快速、操作简便、密封性能可靠的优点,适用于真空设备、航天、化工、电力等工业。

使用逆止阀时,需要专用接口,此专用接口根据用户需要配制。将逆止阀装在工件上,专用接口插入逆止阀体上阀门即打开,再将锁紧母旋在阀体上,此时工件、阀门和系统即连通,便可对工件进行抽气、检漏、充气(液)。待工件抽真空或充气(液)达到工艺要求时,将接口取下,阀门自动将真空系统或充气(液)容器封闭。

北京海淀区长宁实验技术研究所生产的 NZF 型逆止阀及接口外形尺寸、性能参数,见表 7-88、表 7-89。

表 7-88 NZF 型逆止阀外形尺寸及性能参数

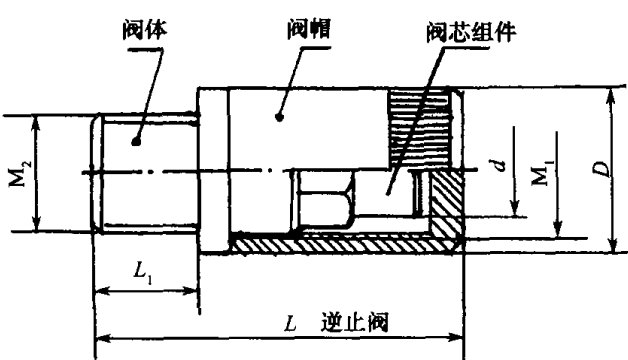
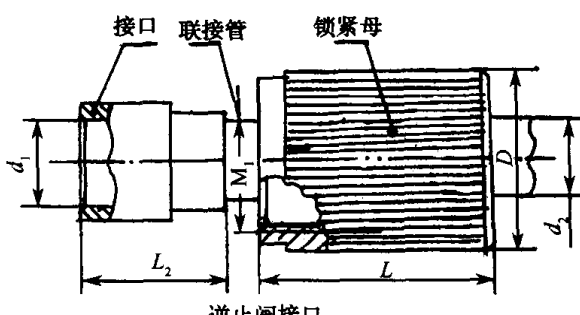
										
型号	公称通径 D_N/mm	外形尺寸 /mm						技术性能		
		L	L_1	D	d	M_1	M_2	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	质量 $/\text{kg}$	主要材料
NZF5B	5	52	14	25.5	14	M20×1	M18×1.5	$<5\times 10^{-6}$	0.1	阀体:黄铜镀镍 阀帽:硬铝合金氧化
NZF10B	10	56	14	27.5	18	M22×1	M20×1.5	$<5\times 10^{-6}$	0.15	

表 7-89 NZF5B NZF10B 型逆止阀接口外形尺寸及性能参数

									
型号	公称通径 D_N/mm	外形尺寸 /mm						技术性能	
		L	L_2	D	d_1	D_2	M_1	漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	主要材料
NZF5BJ	5	34	21	27	14	12	M20×1	$<5\times 10^{-6}$	接口:不锈钢 锁紧母:硬铝合金氧化
NZF10BJ	10	36	23	29	18	12	M22×1	$<5\times 10^{-6}$	

二、挡油帽、挡板和冷阱

(一) 挡油帽

安装在扩散泵入口第一级喷嘴上面的挡油帽,是用来降低扩散泵油的返流的,其结构示意图如图 7-4 所示。挡油帽的尺寸越大,挡油的效果就越好。但尺寸过大,会使泵的抽速显著降低。一般加上挡油帽后,以泵的抽速降低小于 20% 为宜。水冷挡油帽比不加水冷的挡油效果要好,但通水冷却结构较复杂。此外,挡油帽向下伸出长度越大,挡油效果越好。通常挡油帽边缘与射流方向相切,这样既不挡蒸气主流,又可以挡住向高真空端的返流的蒸气。挡油帽伸出长度 H 可由下式计算:

$$H = \frac{d_2 - d_1 - 2\delta}{2} \tan \alpha \quad [\text{mm}] \quad (7-1)$$

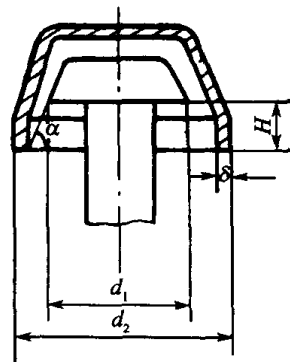


图 7-4 挡油帽示意图

式中 d_1 ——泵的喷口直径[mm];
 d_2 ——挡油帽帽缘外径[mm];
 δ ——挡油帽帽缘厚度[mm];
 α ——泵的喷口扩张角[°]。

各种型式挡油帽的挡油效果如图 7-5 所示。

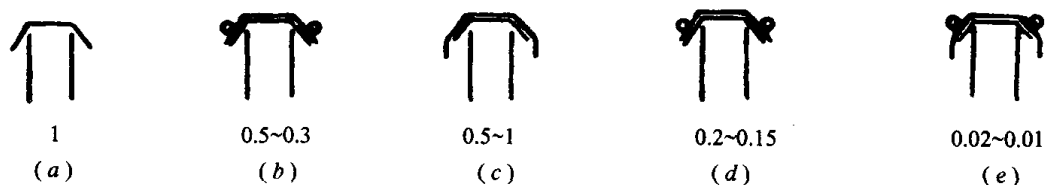


图 7-5 各类挡油帽挡油效果图

(a) 不加挡油帽时,设挡油量为 1; (b)、(c)、(d)、(e) 表示加挡油帽及水套等措施后的挡油量,数值越小,挡油效果越好。

(二) 挡板

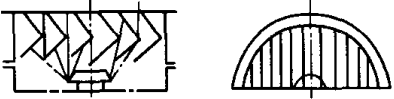
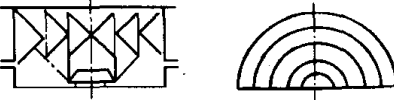
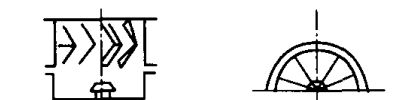
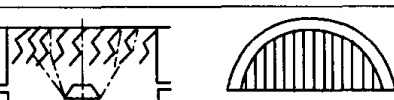
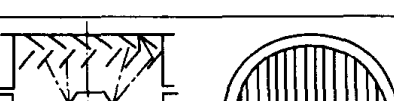
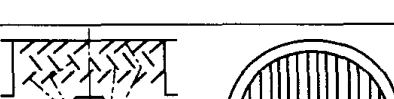
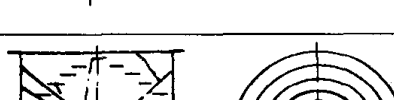
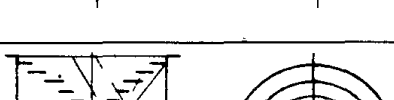
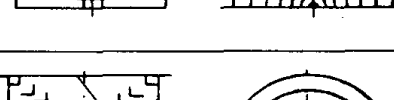
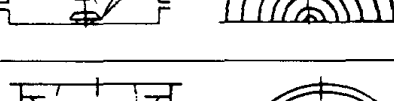
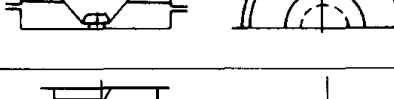
1. 挡板设计原则

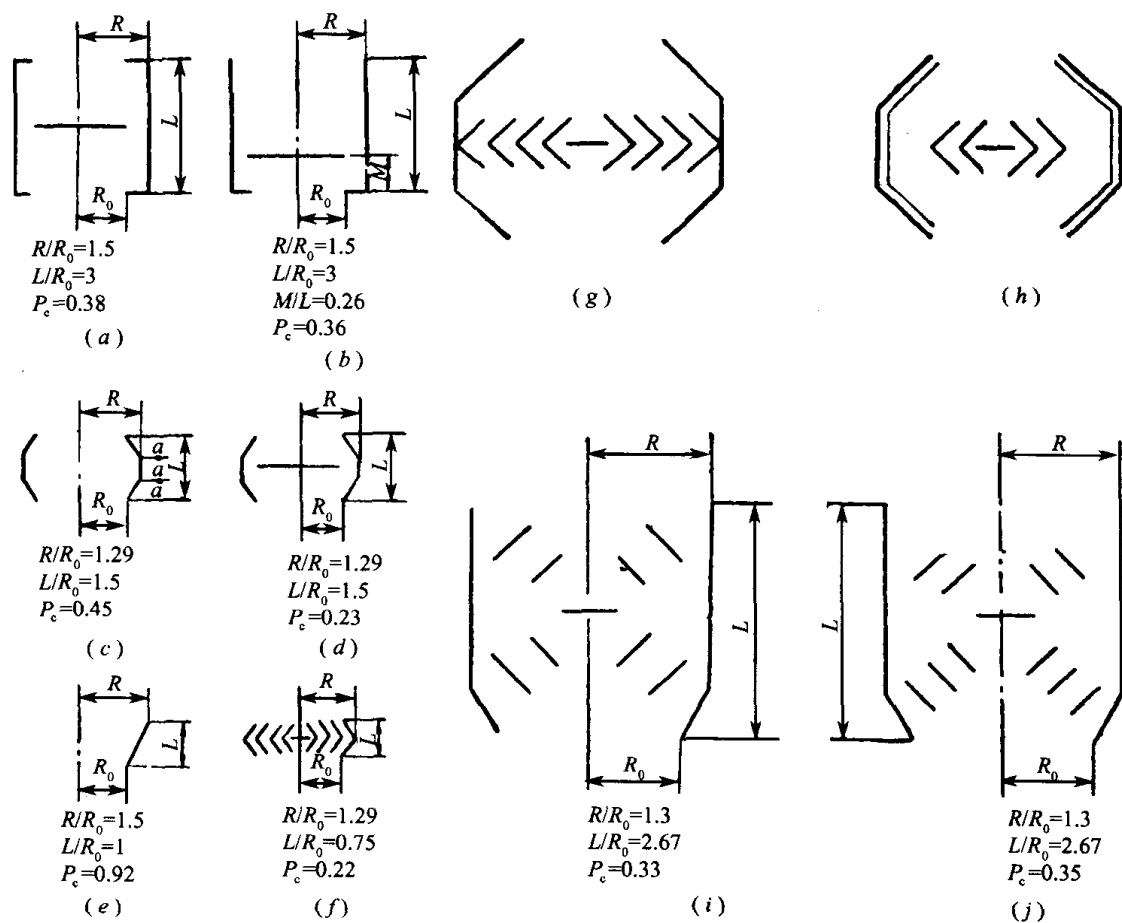
- ① 至少要有一次光学屏蔽,即至少要挡住一次束流。
- ② 尽可能有大的流导值。
- ③ 容易加工。挡板各部分温差小,制冷剂耗量少。
- ④ 超高真空用的挡板应能承受高温烘烤。

扩大挡板的直径,可以降低挡板对泵的有效抽速的影响。扩大的挡板传输概率如图 7-7 所示。

二、挡油帽、挡板和冷阱

表 7-90 常用挡板结构和比流导

型 式	比 流 导 $/L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$	最大二次束角 β_{max}	屏蔽效果
(1) 	3.6	90°	
(2) 	3.6	0° ($< 90^\circ$)	
(3) 	3.6	$< 90^\circ$	
(4) 	2.2	0°	
(5) 	3.2	$< 90^\circ$	
(6) 	2.0	0°	
(7) 	8	$< 90^\circ$	
(8) 	3.2 4.2 4.5	35° 45° 65°	10^{-5}
(9) 	3.8	0°	$< 10^{-5}$
(10) 	1.6	$< 90^\circ$	10^{-4}
(11) 	1.2 1.4	$< 90^\circ$	


 图 7-6 直通挡板结构和传输概率 P_c

	W/D	$P_{c\text{实验值}}$
桶形弯头	2.00	0.44
	1.33	0.39
	1.00	0.32
带有喷嘴帽的桶形弯头	2.00	0.33
	1.33	0.30
扩散泵上的桶形弯头	2.00	0.32
	1.33	0.27
有人字形挡板 $A/B=5$ 的桶形弯头	2.00	0.38
	1.66	0.35
	1.33	0.31
	W/D	$P_{c\text{实验值}}$
方形弯头	2.00	0.43
	1.50	0.38
有喷嘴帽的方形弯头	2.00	0.36
	1.50	0.28
在扩散泵上的方形弯头	2.00	0.30
	1.50	0.27

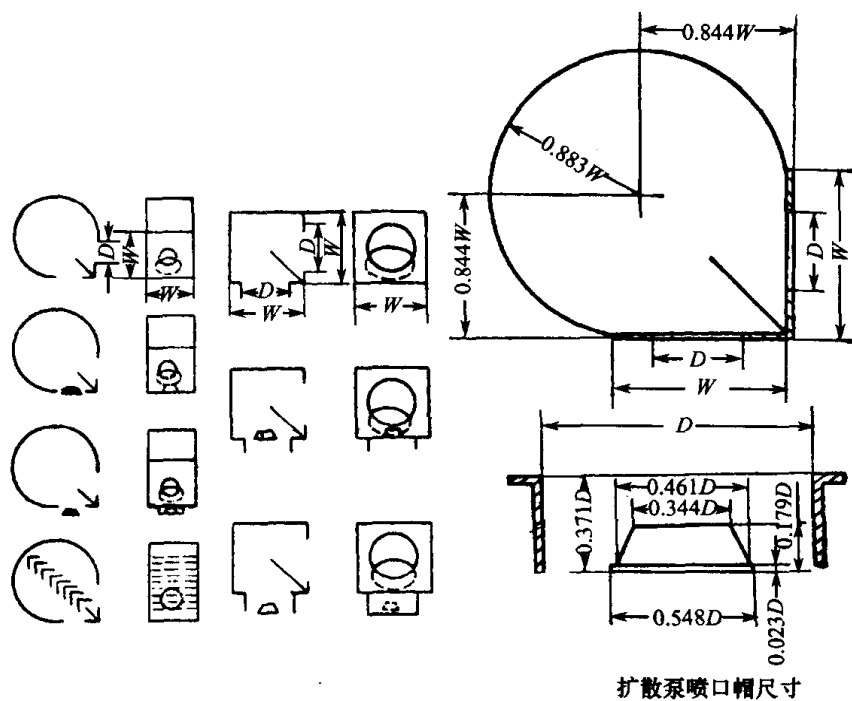


图 7-7 圆桶形和方形弯头挡板结构的传输概率

2. 挡板的结构图

几种挡板的结构如图 7-8~图 7-11 所示。

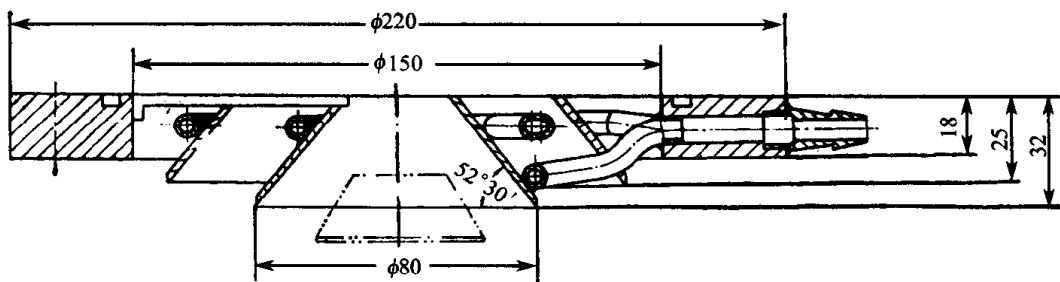


图 7-8 锥状环形挡板

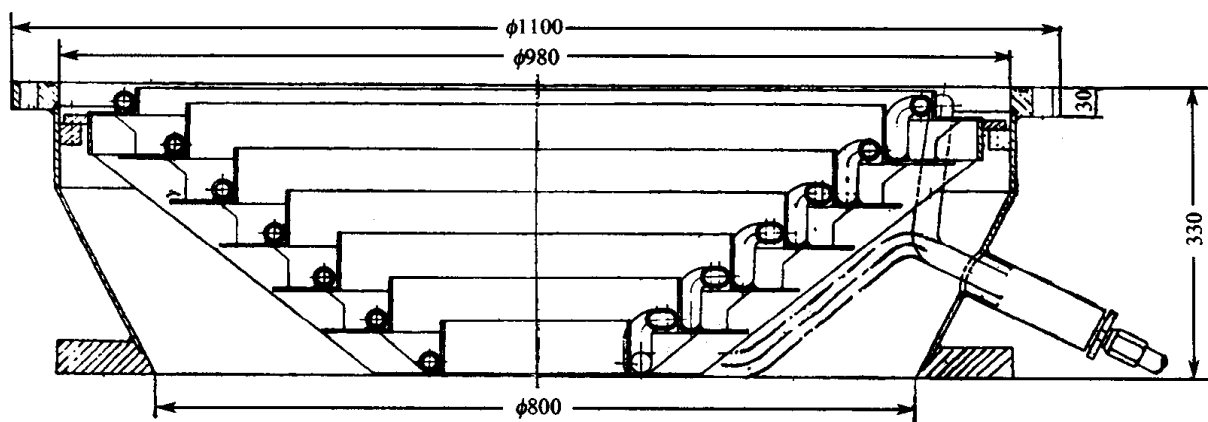


图 7-9 锥形挡板
(兰州真空设备厂生产)

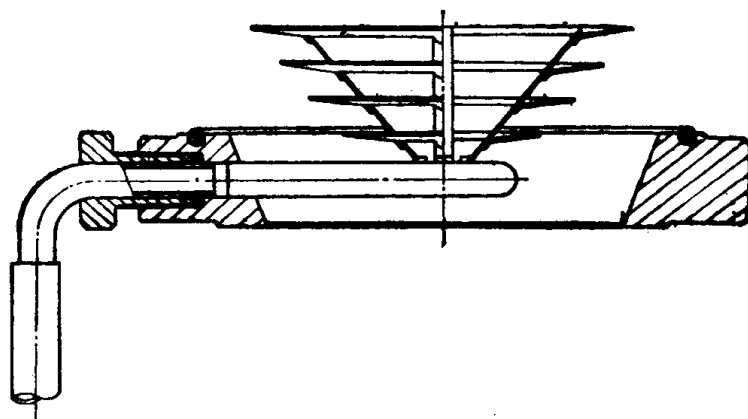


图 7-10 锥形挡板
(沈阳教学仪器厂生产)

3. 直筒式水冷挡板(摘自 ZBJ78010—87)

本标准适用于直筒式高真空双层百叶窗、光学密封水冷挡板(以下简称挡板)。

①技术性能应符合表 7-91 规定。

②外形和连接尺寸如表 7-92 所示。

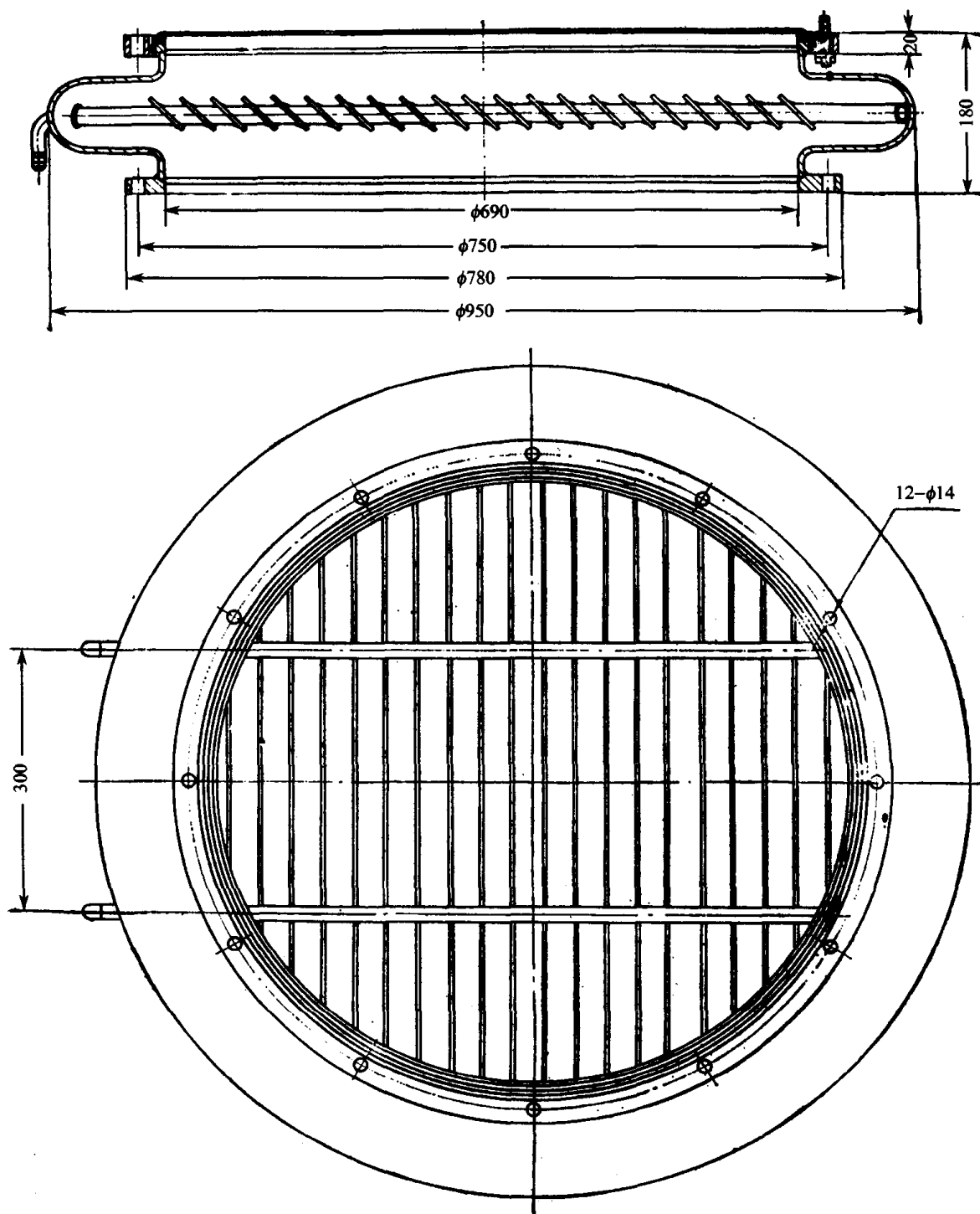


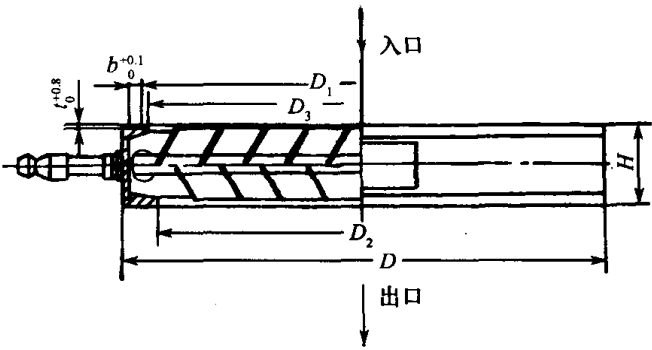
图 7-11 百叶窗挡板

表 7-91 双层百叶窗技术性能

公称通径/mm	160	200	250	320	400	500	630
流导/ $L \cdot s^{-1}$	900	1600	2400	4000	5700	9000	15000
漏气速率 / $Pa \cdot L \cdot s^{-1}$	6×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	2×10^{-2}	3×10^{-2}	6×10^{-2}	1×10^{-1}

表 7-92 直筒式水冷挡板尺寸

(单位:mm)



公称通径 D_N/mm	D	D_1	D_2	D_3	H	b	t
160	187	$166^{+0.5}_0$	$\leq D_3$	160	70	6	3.6
200	246	$208^{+1.0}_0$		200		6	3.6
250	287	$258^{+1.0}_0$		250		6	3.6
320	377	$328^{+1.0}_0$		320		6	3.6
400	462	$410^{+1.5}_0$		400	100	8	4.8
500	561	$510^{+1.5}_0$		500		8	4.8
630	700	$640^{+1.5}_0$		630		8	4.8

③挡板的性能试验方法:

a. 挡板的漏气速率用加压检漏法或氦质谱检漏法检验。加压检漏法的充气压力不小于 0.3MPa~0.4MPa。

b. 挡板流导的检验。按 JB/T 8472.1—96《蒸气流真空泵抽气速率(体积流率)测量方法》,测试装挡板前油扩散泵的抽速。将挡板装入油扩散泵进气口与测试罩之间,按 JB/T 8472.1 规定的测量方法,测试装挡板后系统的抽速。测试时应同时按规定要求向挡板和油扩散泵通水冷却。根据测得的装挡板前、后的抽速,按下式计算出挡板的流导能力

$$U_B = \frac{S_p \cdot S_e}{S_p - S_e} \quad (7-2)$$

式中 U_B ——挡板流导[L/s];

S_p ——泵的抽速[L/s];

S_e ——系统的有效抽速[L/s]。

c. 挡油效率的检验。采用测量精度不低于 $10^{-5} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 的测试仪器,分别测出装挡板前、装挡板后系统的返油率。根据测得的装挡板前、后的返油率,按下式计算挡板的挡油效率:

$$\varphi = \left(1 - \frac{R_f}{R_b}\right) \times 100\% \quad (7-3)$$

式中 φ ——挡板的挡油效率;

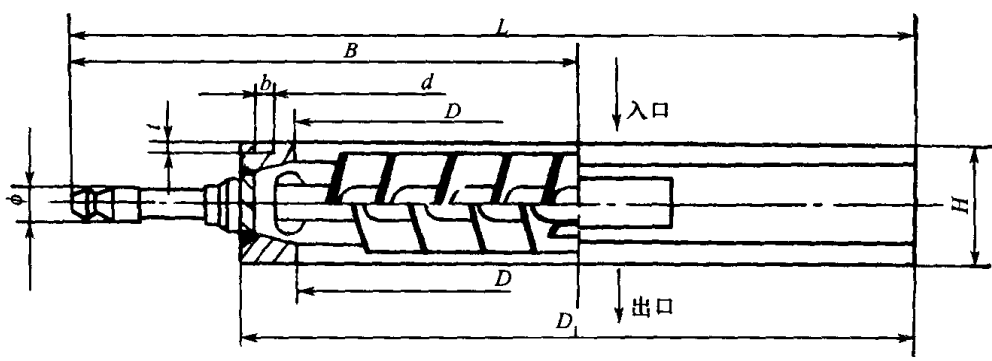
R_b ——装挡板前泵的返油率;

R_f ——装挡板后泵的返油率。

4. 国产 LB 型水冷挡板

①成都国投南光有限公司生产的 LB 型系列水冷挡板外形尺寸见表 7-93。

表 7-93 LB 型水冷挡板尺寸



型 号	通 径 D_N/mm	外 形 尺 寸 /mm								流 导 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$
		D	D_1	d	密封槽 $b\times t$	L	B	H	水嘴直径 ϕ	
LB-150A	150	132.5	182	156	$8^{+0.1}\times 4.5^{+0.1}$	249	150	70	12	990
LB-200B	200	182.5	237	208		314	195			1640
LB-300A	300	282.5	335	308		407	240		15	3440
LB-400	400	368.5	445	410	$10^{+0.1}\times 5.5^{+0.1}$	545	323	100	18	6110
LB-500	500	473.5	544	510	$8^{+0.1}\times 4.8^{+0.1}$	639	367			9160
LB-500A	630	613.5	702	640		794	443			14500

②沈阳真龙真空设备有限公司生产的 SDB 系列水冷挡板,有百叶窗式(A_1 、 A_2 型)和锥塔形(B_1 、 B_2 型)两种, B_2 型冷剂为水或氟里昂两用型,捕集面积最大,结构紧凑,挡油效果好。挡板部件漏率为 $1.3\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,外形尺寸及技术性能参数见表 7-94。

(三) 阱

1. 概述

阱广泛用于超高真空(或高真空)系统。阱的作用类似于挡板,它装在泵入口和真空室之间,不仅能有效地捕集来自蒸汽流泵的返流蒸气及部分裂解物,而且可抽除来自真空室的蒸气。装有各类阱的超高真空系统,经过彻底的高温烘烤去气后,可以获得 $10\text{Pa}^{-8}\sim 10^{-10}\text{Pa}$ (或更高)的超高真空度。在真空技术中常用的阱有铜箔阱、分子筛吸附阱、液氮冷阱、钛升华阱以及阻挡机械泵油用的前级吸附阱等。

2. 铜箔阱

铜箔阱吸附油蒸气的现象是属于物理吸附过程,因而要求有较大的吸附表面。典型的铜箔阱如图 7-12(a~c)所示。它是用厚 0.76mm、宽 152mm 的无氧高导铜滚压成深 0.63mm 的波状板,再卷起来放在真空室和扩散泵之间的管道中做成的。真空室和铜箔阱经 450°C 高温去气后,在室温下,18d 内可以维持 10^{-9}Pa 的真空度,30d 后压强升高到相当于扩散泵油的饱和蒸气压值(如图 7-12(d)所示)。

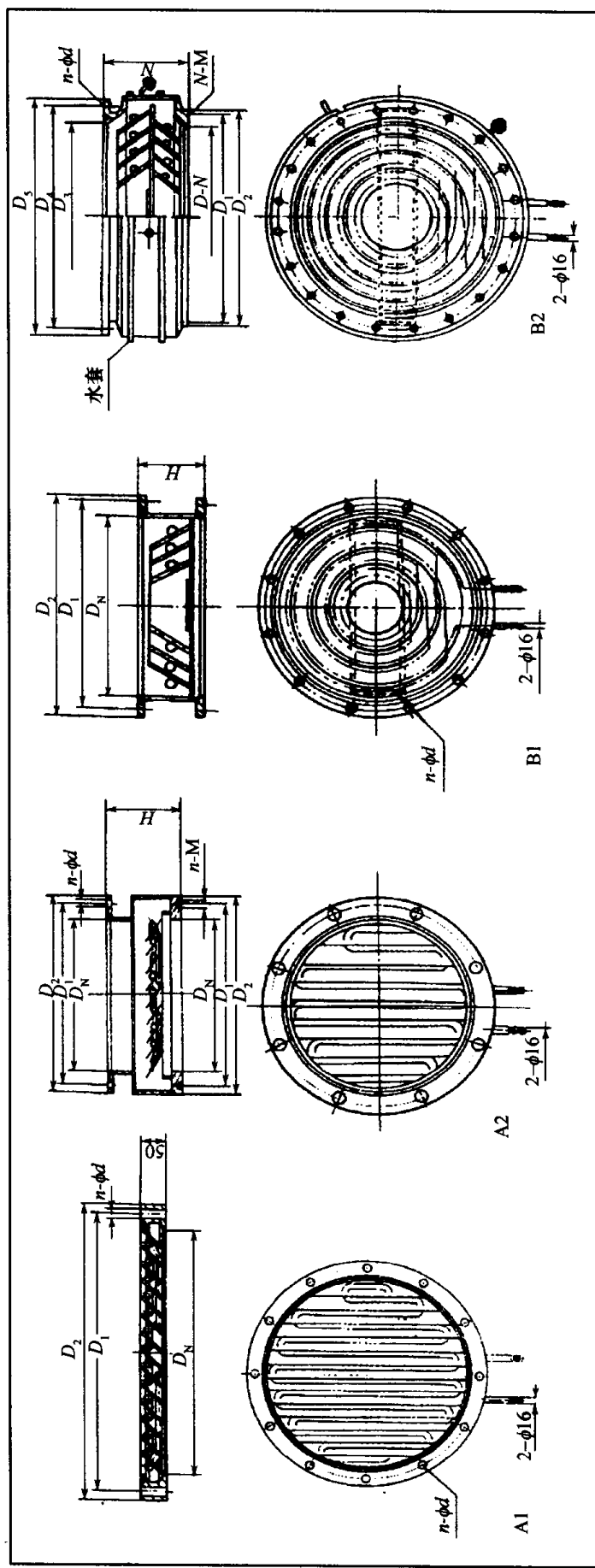
铜箔阱的串联、并联及铜箔阱长度与有效工作时间关系如图 7-12 所示。

根据图 7-12(d)的实测数据,可以得出计算铜箔阱在 $1\times 10^{-7}\text{Pa}$ 以下的有效工作时间的经验公式

$$t = C(L_{\min} - L_D)N \quad [\text{d}] \quad (7-4)$$

表 7-94 SDB 系列水冷挡板外形尺寸及技术参数

型号	通 径 D_N /mm	法 兰 尺 寸/mm						螺 孔 尺 寸/mm			H/mm			流 导/ $\times 10^3 L \cdot s^{-1}$						质 量 /kg			
		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$n-\phi$	$n-M$	A_1	B_1	B_2	A_1	A_2	B_1	B_2	A_1	A_2	B_1	B_2				
SDB-100	100	145	170	100	145	170	4- $\phi 12$	4-M10	200	100	150	200	0.16	0.16	0.19	0.14	6.3	7.3	15	20			
SDB-150	150	195	220	150	195	220	8- $\phi 12$	8-M10	200	120	180	200	0.5	0.5	0.6	0.45	8.9	11.5	20	25			
SDB-200	200	250	275	200	250	275	8- $\phi 12$	8-M10	200	135	200	200	0.94	0.94	1.13	0.85	12.6	15.9	35	50			
SDB-300	300	350	380	300	350	380	8- $\phi 14$	8-M12	220	145	220	220	1.9	1.9	2.28	1.71	20	30	60	80			
SDB-320	320	395	425	320	395	425	12- $\phi 14$	12-M12	220	145	220	220	2	2	2.4	1.8	28	39	65	90			
SDB-400	400	465	500	400	465	500	8- $\phi 18$	8-M16	220	160	250	220	3.4	3.4	4.08	3.06	32	47	75	100			
SDB-500	500	565	600	500	565	600	12- $\phi 18$	12-M16	220	160	250	220	5	5	6	4.5	41	60	90	120			
SDB-600	600	670	710	600	670	710	12- $\phi 21$	12-M18	230	180	275	230	7.1	7.1	8.52	6.4	54	90	95	130			
SDB-630	630	720	750	630	720	750	20- $\phi 14$	12-M12	230	180	275	230	7.8	7.8	9.36	7.02	62	101	100	135			
SDB-800	800	880	920	800	880	920	20- $\phi 21$	20-M18	230	200	300	230	12.5	12.5	15	11.25	80	140	110	150			
SDB-1000	1000	1090	1140	1000	1090	1140	24- $\phi 23$	24-M20	250	200	300	250	19.6	19.6	23.52	17.64	117	221	135	180			
SDB-1200	1200	1310	1360	1200	1310	1360	28- $\phi 25$	28-M22	250	210	320	250	22.3	22.3	26.76	20.07	162	319	185	250			



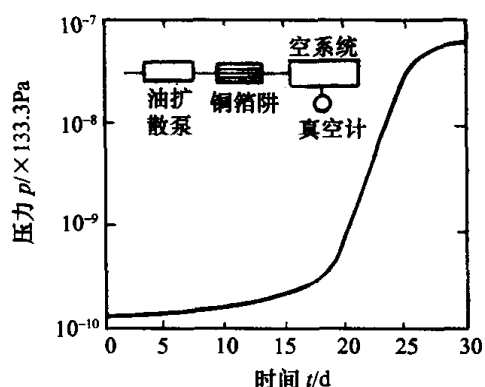
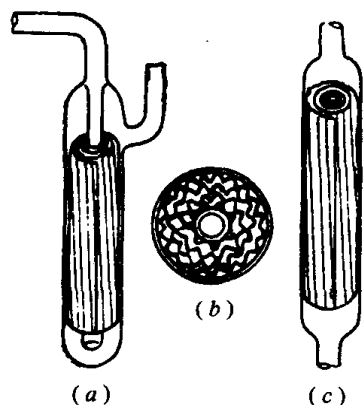


图 7-12 铜箔阱结构与有效工作时间

式中 t ——铜箔阱有效工作时间[d],如图 7-13 所示;

L_{\min} ——每根串联铜箔阱的总长,并联管取其最短长度[cm],图 7-14 是有限工作时间与铜箔长度的关系;

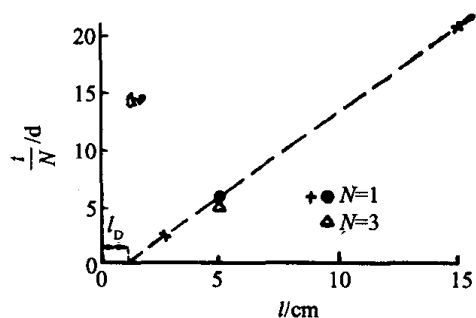
L_D ——无效长度[cm];

C ——常数,对于图 7-12, $C = 1.6d/cm$, $L_D = 1cm$;

N ——阱数。

	阱的形状 /cm	有效工作时间 /d	
		实测	计算
0		~21	22
1		~2	2
2		~6	6
3		~6	6
4		~15	18

图 7-13 各类铜箔阱的有效工作时间


 图 7-14 铜箔阱有效工作时间
与铜箔长度关系
(根据图 7-12 实测值绘制)

3. 分子筛吸附阱

分子筛具有特别大的吸附表面面积,用分子筛吸附来自泵的返流蒸气,效果比无氧铜箔阱要好。一般采用 13X 型或 4A 型分子筛,能获得 $10^{-8}Pa \sim 10^{-10}Pa$ 的超高真空,有效工作时间长达 75d。图 7-15 为玻璃分子筛吸附阱。

金属超高真空系统用的大型分子筛吸附阱的结构如图 7-16(a)所示。烘烤后能获得 $4 \times 10^{-8}Pa$ 的极限真空(使用 Octoil-S 扩散泵油),在 $10^{-7}Pa$ 以下工作能维持 70d,如图 7-16(b)所示。也可利用泵与真空室连接的直角管道壁作为分子筛吸附阱,其结构如图 7-17 所示。阱内装有 13X 分子筛 250g,经 $450^{\circ}C$ 高温烘烤 48h 后,能获得 $4 \times 10^{-8}Pa$ 的极限真空。在 1×10^{-7}

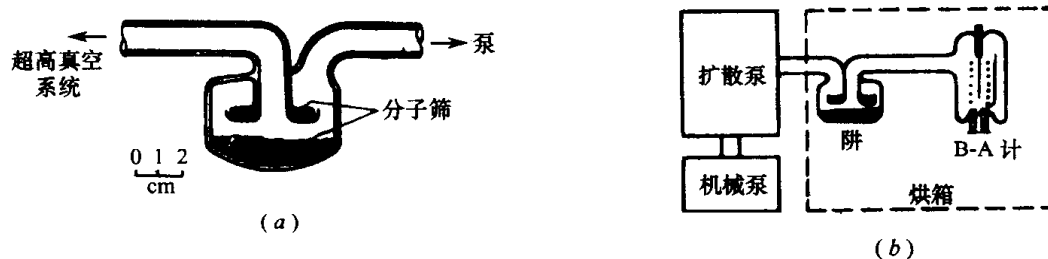


图 7-15 玻璃分子筛吸附阱

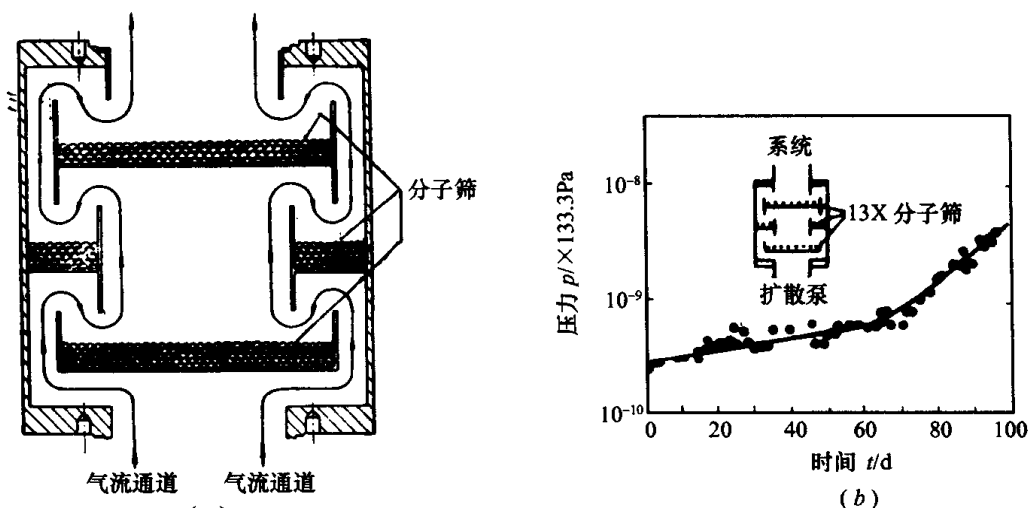


图 7-16 对氮具有 65L/s 流导的分子筛吸附阱

Pa 以下工作可以维持 2 周, 6 周后压力上升到 1×10^{-6} Pa。

用裸规和标准规管同时测量带有分子筛阱的真空室的真空度时, 二种规的压力读数会出现较大的偏差(达一个多数量级), 此种现象称为贝莱尔(Blears)效应, 如图 7-18 所示。

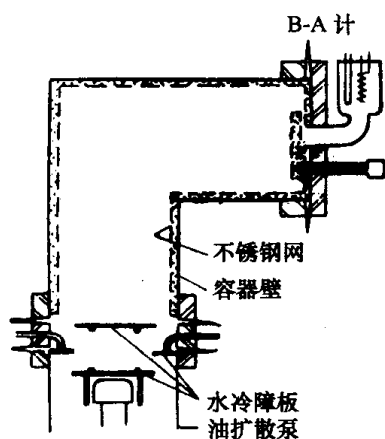


图 7-17 L 型分子筛吸附阱

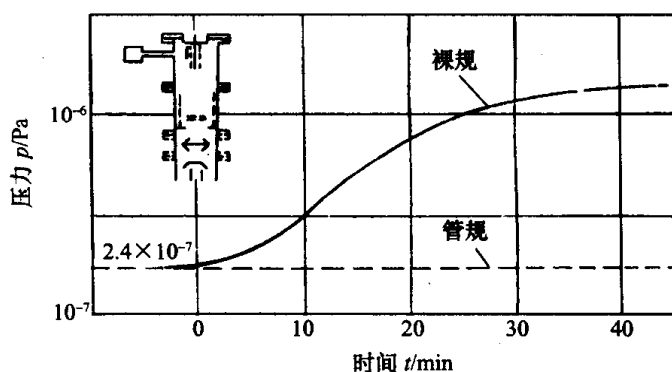


图 7-18 扩散泵工作液通过分子筛吸附阱的贝莱尔效应

贝莱尔效应主要是由标准规管的细长管道所引起的。油分子通过细长管道要迟延一段时间(由于油分子的蒸发热比较大, 平均滞留时间长), 因而标准规管内油蒸气分压达到与真空室油蒸气分压相同值时, 需要长达数十小时。

低压下, 分子通过导管的迟延时间 t 为

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{2r} \right)^2 \left(\frac{2r}{\bar{v}} + \beta S \tau \right) [s] \quad (7-5)$$

式中 r ——管道半径[cm];
 L ——管道长度[cm];
 \bar{v} ——温度为 T 时分子热运动的平均速度[cm/s];
 β ——管道真实表面与垂直于长度方向上的视表面之比;
 S ——碰撞在管道表面上的分子的附着概率;
 τ ——分子吸附在壁上的平均滞留时间[s]。

对于吸附时间 τ 非常大的分子, 即 $\frac{2r}{\bar{v}} \ll \beta S \tau$ 时, 式(7-5)可简化为

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{2r} \right)^2 \beta S \tau \quad (7-6)$$

各种扩散泵工作液在 22℃ 温度下通过管径为 $2r$ 的管子的滞延时间如图 7-19 所示。

分子筛吸附阱的主要优点是结构简单, 价格便宜和不需要运转维持费用。但使用时要注意下面两点:

①分子筛在大气中能强烈吸附水分, 所以使用前对分子筛进行预处理是很重要的。曾暴露于大气的分子筛要在真空中进行高温烘烤, 必要时还要用干燥氮气冲洗。如处理不彻底, 就会影响所能获得的极限真空, 且拖长抽气时间。要求在短时间达到超高真空的真空系统, 必须装置超高真空阀门, 以避免分子筛吸附阱经常暴露于大气中。

②分子筛反复经受加热烘烤去气, 会逐渐变为粉末。当迅速向系统内充入大气或抽大气时, 会使粉末到处飞扬而污染系统, 为此必须采取相应的措施。

4. 冷阱

冷阱是在玻璃或金属真空系统中广泛应用的一种装置。它是利用低温壁来捕集气体的。冷阱的效果除了取决于冷阱结构之外, 冷剂的温度对冷阱的性能影响很大, 温度越低效果越好。常用冷剂的制冷温度见表 7-95。

表 7-95 常用冷剂的致冷温度和 CO_2 、 H_2O 、 Hg 蒸气压

冷 剂	10^5Pa 下制冷温度/℃	饱和蒸气压/Pa		
		CO_2	H_2O	Hg
冰	0	—	6.1×10^2	6.7×10^{-2}
含冰盐水	-18	—	1×10^2	4×10^{-4}
掺冰氯化钙	-48	—	5.3	5.3×10^{-5}
固体二氧化碳	-78	8.9×10^3	6.7×10^{-2}	10^{-8}
丙酮混合物	-183	1×10^{-4}	10^{-18}	10^{-30}
液态氧	-196	1.3×10^{-6}	10^{-19}	10^{-30}
液态氮	-258	—	10^{-20}	—

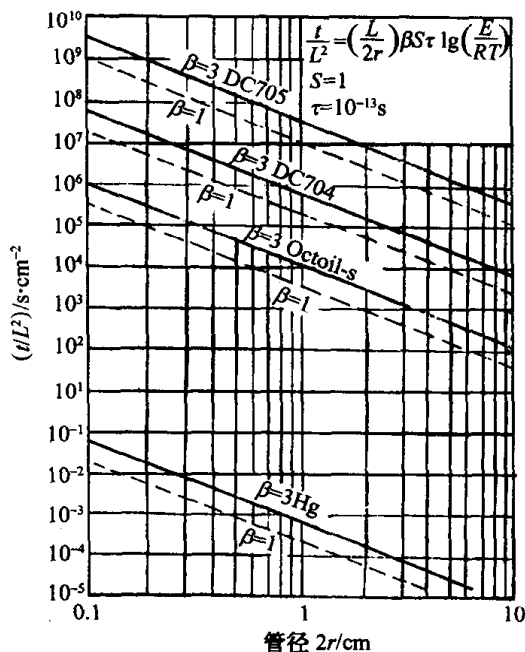


图 7-19 各种扩散泵工作液在 22℃ 温度下通过管长为 L 管径为 $2r$ 的管子的滞延时间

表 7-96 $T = -185^{\circ}\text{C}$ 时各种物质的饱和蒸气压

物质	汞 Hg	水 H_2O	苯 C_6H_6	丙酮 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	二氧化碳 CO_2	乙烯 C_2H_4	甲烷 CH_4	一氧化碳 CO
饱和蒸气压 /Pa	10^{-31}	10^{-20}	$\approx 10^{-13}$	$\approx 10^{-11}$	7×10^{-6}	10	$\approx 2.7 \times 10^{-3}$	1.15×10^5

(1) 玻璃冷阱的一般结构

根据盛装冷剂的方式玻璃冷阱分为外冷式和内冷式。外冷式结构简单,制造容易,不需要较高的玻璃吹制技术,但需要配备盛装冷剂的敞口杜瓦瓶。内冷式冷阱的流导大,冷剂热耗少,但结构复杂,吹制困难。常见的玻璃冷阱型式如图 7-20 所示。

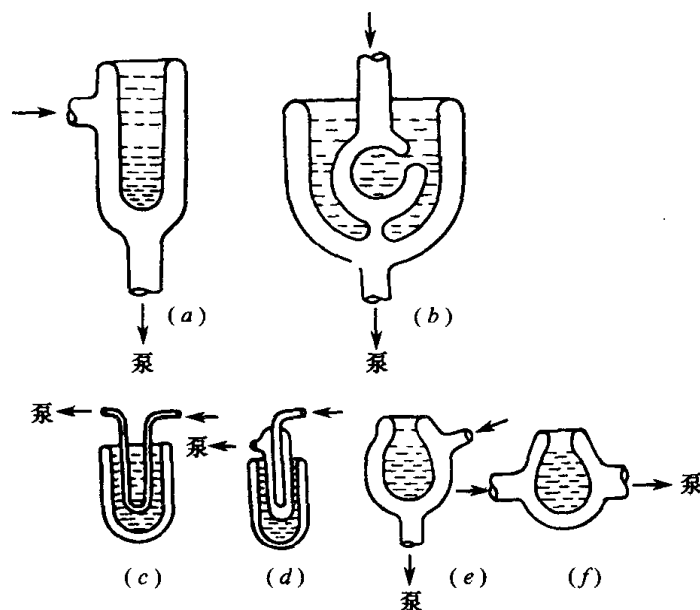


图 7-20 常见玻璃冷阱型式

(2) 国产玻璃冷阱

国产玻璃冷阱外型及尺寸见表 7-97。

(3) 金属冷阱结构型式

金属冷阱的型式繁多,结构复杂。为了保证冷阱既有良好的挡油效果,又有较大的流导,设计冷阱时需注意以下几点:

① 冷凝面要正对返流蒸气分子的入射方向,并且至少要保证一次光学屏蔽,以获得最好的捕集效果;

② 用于超高真空系统的冷阱,油爬移的所有通路上至少要有一段处于低温,以防止油的爬移;

③ 保证冷阱冷凝面的温度恒定(不因液氮面变动而改变),以防止液氮面下降时因冷凝面温度升高而使冷凝面吸附的油蒸气分子再放出;

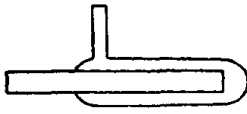
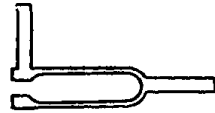
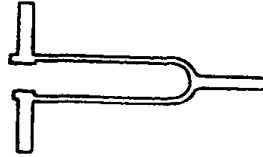
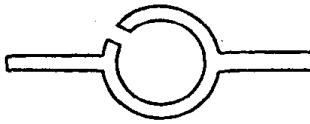

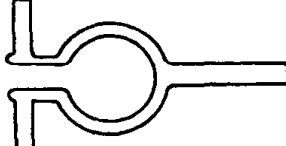

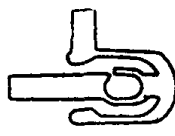
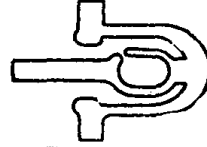
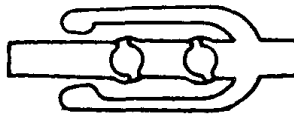
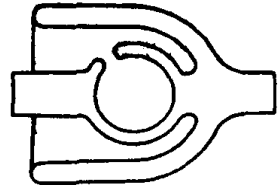
④ 阱的结构要合理,既要便于焊接、检漏,又要有低的热损耗。大流导的冷阱多采用扩大冷阱中间部分以获得最有利于气流的几何形状。

典型的金属冷阱结构型式如图 7-21~图 7-25 所示。

图 7-21 中(a)型冷阱不能防止油的爬移。从 O 点发出的蒸气分子,遵循余弦定律,碰撞在冷阱室壁(如 A_1 、 A_2 点)上,然后再蒸发。这样打在 A_1 、 A_2 区域的蒸气分子可以不碰在液氮冷冻面上而进入高真空端。(b)型为改进型,黑粗线为导热良好的紫铜屏蔽板,焊在中心液氮容器上,蒸气分子至少要有有一次碰撞在液氮冷冻面上,才能进入高真空端,因此挡油效果较(a)型好。

(单位:mm)

表 7-97 国产玻璃冷阱外型及尺寸

型式	普通形二通	筒形二通	筒形三通	球形直通	球形二通	球形三通	四层直通	四层二通	四层三通	四层二级直通	单级双层	
简图												
	160	120 150 200	120 150 200				120 140 170	140 120	120 140	150 200	105	
	50	41 51 70	41 51 70	40 60 85	60 80 100	60 80 100	80 100 135	100 80	80 100	80 100	94	
	支管外径	12 16 20	12 16 20	14 17 21	14 18 21	14 18 21	29 31 56	31 29	29 31	29 31	29 31	
	支管长度	100	100 100 100	100 100 100	100 100 125	100 120 130	100 120 130	150 150 200	150 150	150 150	150 150	
产品型号	3501	3502	3503	3504	3505	3506	3507	3508	3509	3510	3511	
	6501	6511	6512	6521	6522	6523	6541	6542	6543	6561		

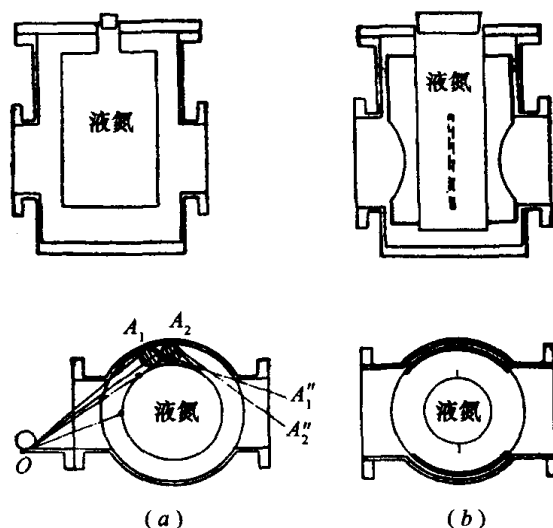


图 7-21 金属冷阱结构

(a) 简易冷阱结构; (b) 改良型防油爬移冷阱结构。

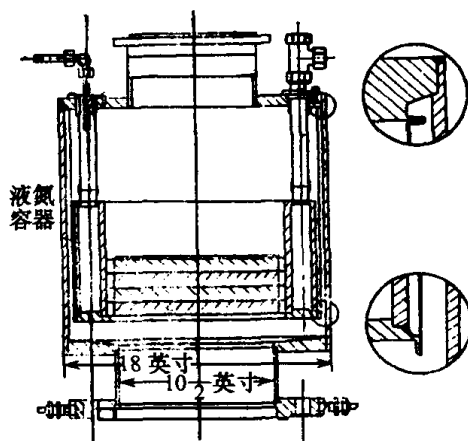


图 7-22 带有中心障板的冷阱结构

(1 英寸 = 2.54cm)

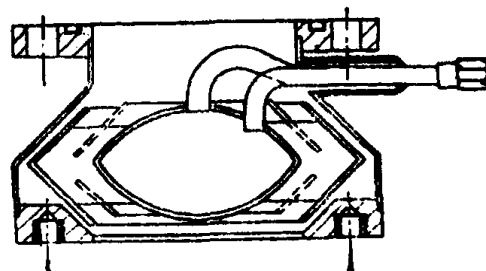
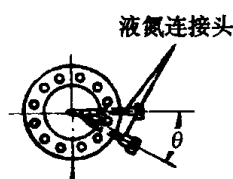


图 7-23 中心带有液氮罐的冷阱

图 7-25 给出的直角冷阱, 其高为 57.8cm, 直筒内径为 29.9cm, 入口法兰直径为 25.4cm, 法兰厚 19mm。T 形管壁厚 3mm, 21 根 $\phi 25.4\text{mm}$ 、壁厚 0.8mm 的冷冻管焊在液氮贮存器的底部, 贮液器靠三根 $\phi 6.5\text{mm}$ 放空管和一根 $\phi 25.4\text{mm}$ 注液管悬吊在法兰上。这四根支持管采用了帽形结构的双层管, 降低了导热损失。贮液器容积为 9375cm^3 , 占 T 形管垂直部分体积的 25%, 装一次液氮能维持 13h。

21 根冷冻管按一定形状排列, 对入气口形成光学密闭并保持最大的流导。21 根冷冻管的总截面仅大于 T 型管截面的 15%, 但是却具有 8929cm^2 的巨大冷冻面。为防止管的摆动和减少与贮液器焊点的应力, 冷却管的底部用不锈钢带焊成蛛网状, 并在管子中部的外面焊一圈不锈钢丝以增加强度。

装满一次液氮约需 10min, 在 $4 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的真空条件下, 注入液氮 5min 后, 将容器(直径 51cm, 长 3m)的真空度提高到 $8 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 抽气 12h, 达到了 $2 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 。

(4) 国产金属冷阱

LJ-85 型 LN_2 阱为立式结构, LJ-100 型 LN_2 阱为卧式结构, 两种冷阱的法兰均采用 CF 超高真空密封法兰。表 7-98 为北京中科科仪科技发展有限公司生产的 LJ 型冷阱的性能参数。

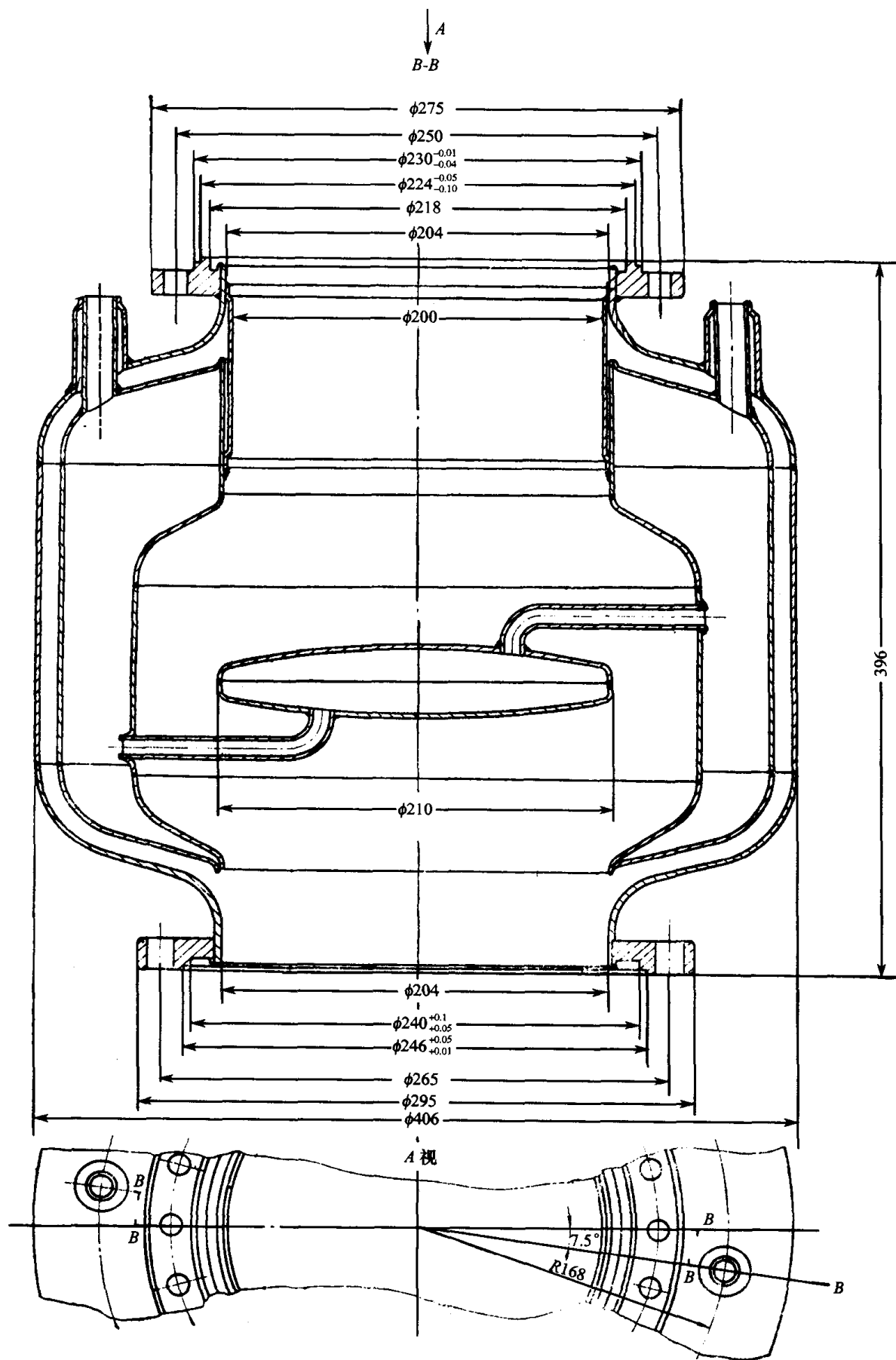
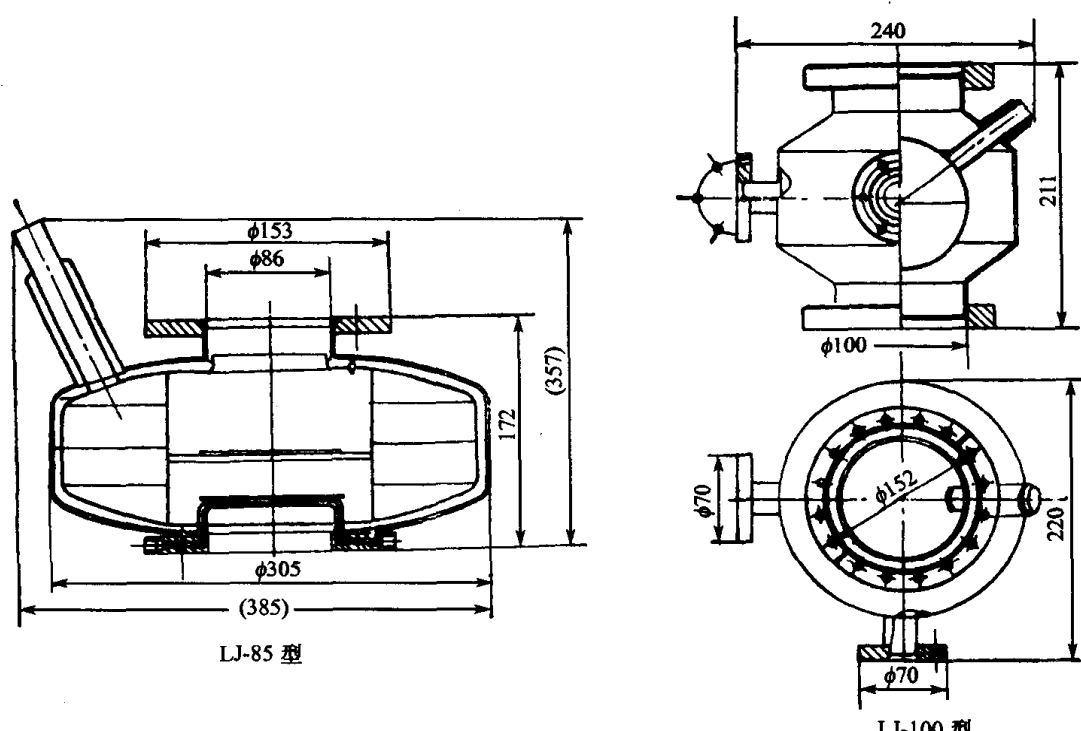


图 7-24 新型大流导冷阱

表 7-98 LJ 型冷阱性能参数

					
型 号	口 径 /mm	流 导 /L·s	容器体积 /L	第一次充满 LN ₂ 最大耗量 /L	充满一次 LN ₂ 保持 时间 /h
LJ-85	86	—	3.7	~7.5	~9
LJ-100	100	330	0.5	~1.1	~2

5. 钛升华阱

液氮冷阱虽能有效地降低泵油返流,但是少量的油蒸气分子仍然可以穿过冷阱。此外,泵油的裂解物中有大量氢气,它不能被液氮冷阱捕获,成为限制扩散泵获得更高真空的一个主要因素。在扩散泵和真空室之间加装钛升华阱,除能挡住油分子及其它裂解物的返流外,还能捕集氢。因此,装有钛升华阱的超高真空系统,能获得 $10^{-11}\text{Pa} \sim 10^{-12}\text{Pa}$ 的极限压力。

典型钛升华阱的结构型式如图 7-26 ~ 图 7-28 所示。

6. 前级预抽管道低温吸附阱

预抽中,当压力降到粘滞—分子流状态的压力时 ($<10\text{Pa}$ 数量级),机械泵油开始污染真空系统。压力进一步降低到分子流状态的压力时,机械泵油就以不变的流量 $Q = pU$ 污染真空系统 (p ——一定温度下机械泵油的饱和蒸气压; U ——前级管道的流导)。设室温下 $p = 10^{-2}\text{Pa}$, $U = 10\text{L/s}$,则 $Q = 1 \times 10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$,此值相当于每秒几微克的油返流到真空系统。假设真空系统的面积为 1000cm^2 ,油将以 0.1 单分子层/s 的速率淀积在表面上。为防止机械泵油的污染,通常采用的措施是:

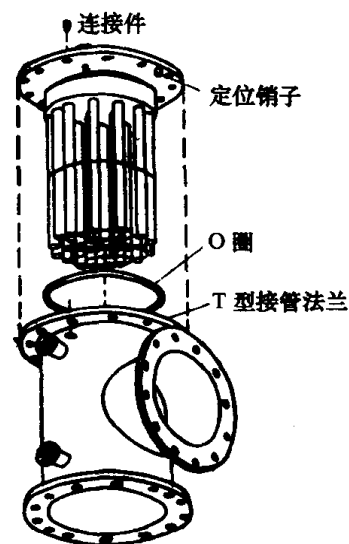


图 7-25 直角冷阱

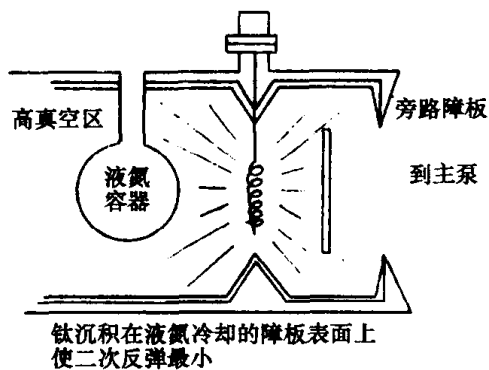


图 7-26 简单的钛升华阱

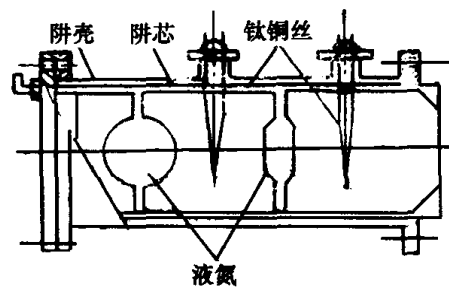


图 7-27 高效率钛升华阱

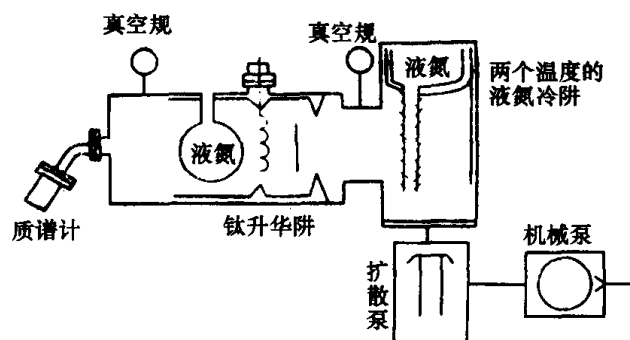


图 7-28 装有钛升华阱的油扩散泵极高真空系统

- ①前级管道中加装液氮冷阱、分子筛吸附阱、活性氧化铝阱等来阻挡机械泵油蒸气的返流；
- ②用纯净氮气冲洗。机械泵抽到 10Pa 左右以后马上关闭机械泵，启动分子筛低温吸附泵预抽。

图 7-29 为前级管道阱结构；图 7-30 为各种前级管道抽气时间特性。图 7-31 为两种类型的氮气纯化器的流程图。

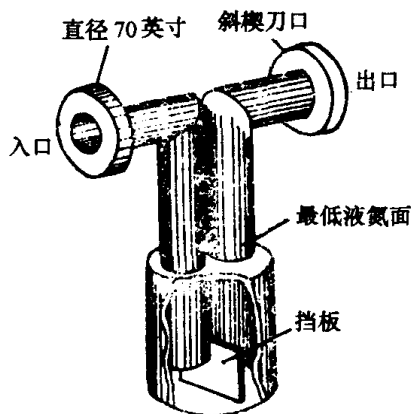


图 7-29 前级管道阱结构图
(1 英寸 = 25.4mm)

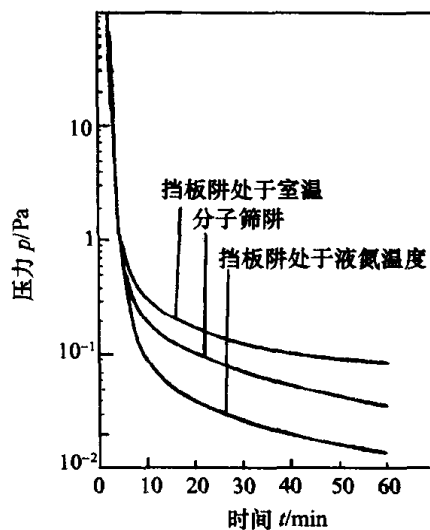


图 7-30 前级管道阱抽气时间特性

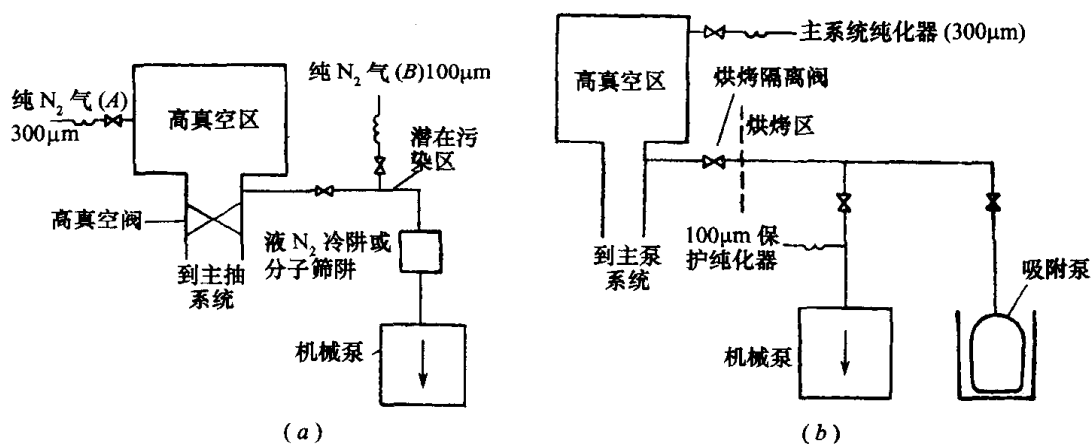


图 7-31 两种类型氮纯化器的流程图

氮纯化器操作程序:打开纯化器 A 和 B,启动机械泵预抽,控制流量使管道内气体状态为粘滞流,容器和管道中吸附的二氧化碳和水蒸气及其它污染物被干净纯化氮气流带走。纯化半小时后,关闭纯化器 A,管道上低温吸附阱中充入液氮,并关闭纯化器 B,抽到 10Pa 压力后,关闭预抽机械泵,继续用低温吸附阱抽气。

三、观察窗、电极引入

(一) 观察窗

通常通过观察窗来监视真空容器内部生产情况(如观测温度、试料状态等)或传输光源。根据密封型式,观察窗可分为可拆连接和不可拆连接。前者用于高真空和低真空系统,后者用于超高真空系统。在不可拆连接中,用无氧高导铜和玻璃的不匹配封接或者使用可伐与玻璃的匹配封接,两者都能承受 300℃~450℃ 高温烘烤。真空度要求不太高的地方,可用透明有机玻璃板代替玻璃板。传播光线的观察窗材料可采用光学玻璃或石英玻璃等。石英玻璃用在高温炉上,为了预防橡胶密封圈过热,法兰要用水管冷却。为了防止某些金属蒸镀到玻璃片上,可装设挡片或擦拭片。

1. 观察窗结构类型

观察窗的基本结构类型如图 7-32~图 7-39 所示。

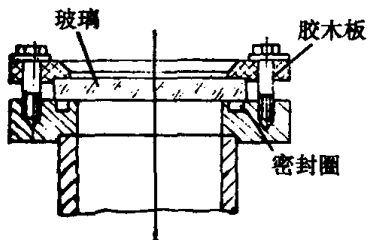


图 7-32 可拆卸高真空观察窗

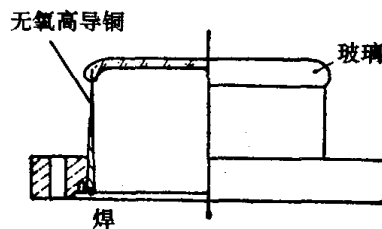


图 7-33 不匹配封接高真空观察窗

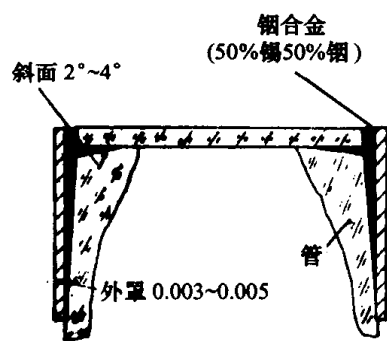


图 7-34 不同玻璃材料的耐高温
 钢密封观察窗

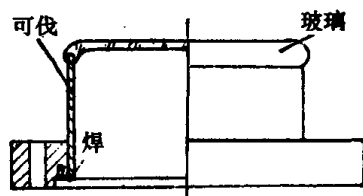


图 7-35 匹配封接超高真空观察窗

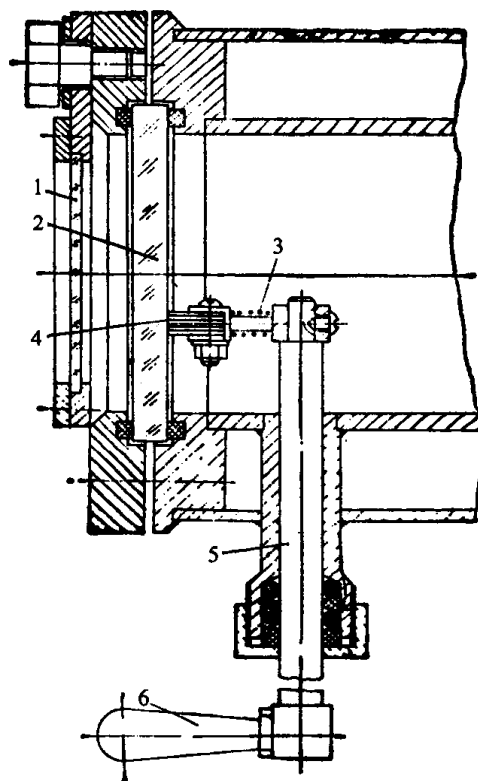


图 7-36 带有擦拭片的观察窗
 1—防护玻璃;2—承压玻璃;3—弹簧;
 4—擦拭片;5—转轴;6—手柄。

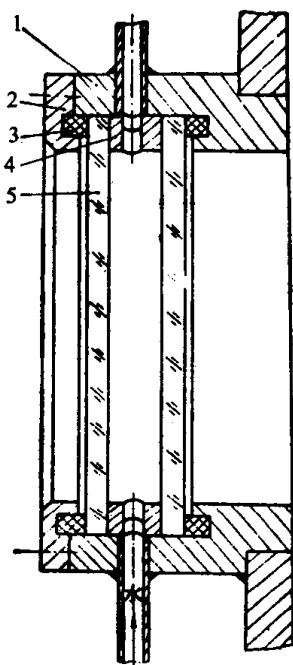


图 7-37 带有冷却水的观察窗
 1—法兰;2—压盖;3—密封圈;
 4—夹垫;5—玻璃。

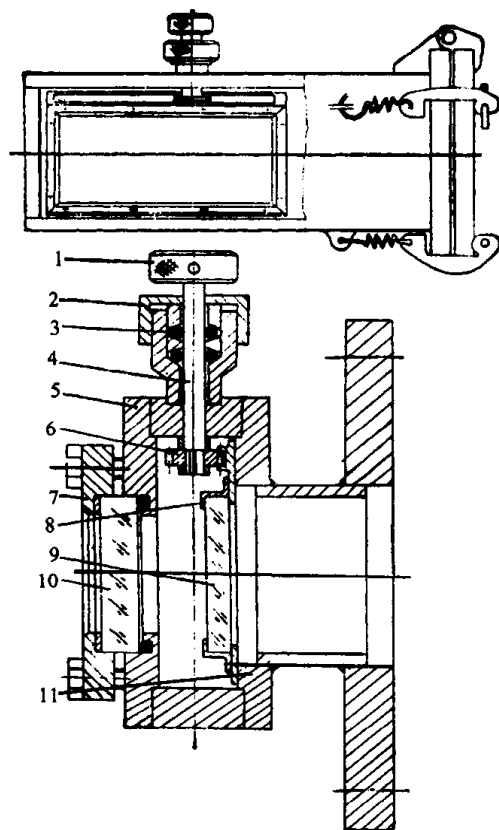


图 7-38 可移动观察区的观察窗
 1—旋转扭;2—压帽;3—密封圈;4—转轴;5—压盖;6—齿轮;
 7—上盖;8—卡环;9—玻璃片;10—玻璃板;11—支架。

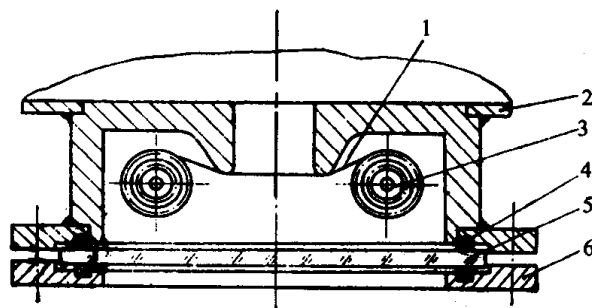


图 7-39 聚乙烯薄膜观察窗

1—透明聚乙烯膜;2—容器壁;3—轴;
4—密封圈;5—玻璃板;6—法兰。

2. 真空设备观察窗(摘自 SJ1774—81)

本标准适用于真空设备用橡胶密封的观察窗。观察窗结构分 I 型、II 型两种。其结构型式及尺寸见表 7-99、表 7-100。观察窗漏气率不大于 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

表 7-99 I 型观察窗尺寸

(单位:mm)

D_N	D	D_1	D_2	B	H
50	84	3M76×2	58	25	55
65	100	3M90×2	73	25	55
80	122	3M110×2	88	30	60
100	144	3M130×2	110	30	60

标记示例:

公称通径为 80mm 的 I 型观察窗,其标记为:

观察窗 80- I SJ1774-81

公称通径为 100mm 的 II 型观察窗,其标记为:

观察窗 100- II SJ1774-81

观察窗漏气率不大于 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

3. 国产玻璃观察窗

沈阳中科仪技术发展有限责任公司生产的系列玻璃观察窗,广泛用于各类高低真空和超高真空设备,透过观察窗可从外部清楚地观察真空容器内部的工艺状况,玻璃涂屏后,可做荧光屏使用。法兰密封采用金属无氧铜垫密封,能耐 300°C 以下的高温烘烤,漏率小于 $10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,外形尺寸见表 7-101。

表 7-100 II 型观察窗尺寸

(单位:mm)

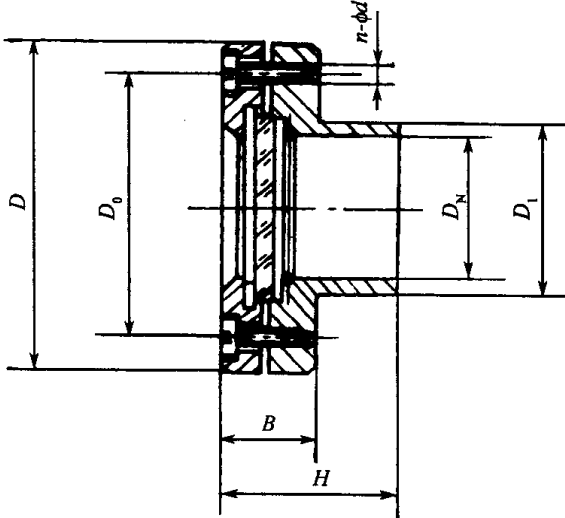
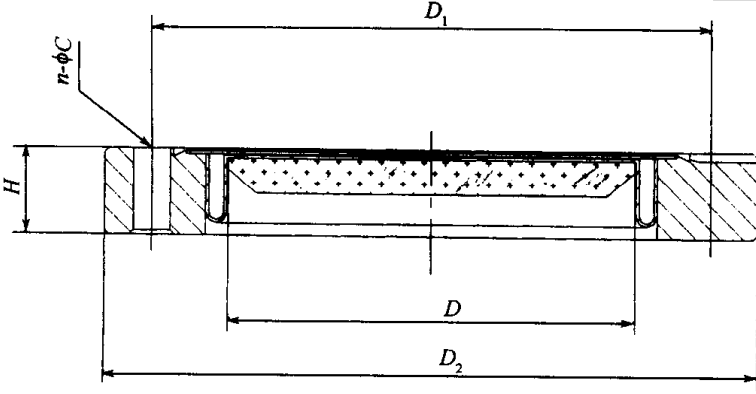
							
D_N	D	D_0	D_1	B	H	n	ϕd
50	110	90	58	26	56	4	M8
65	125	105	73	26	56	4	M8
80	145	125	88	30	60	4	M8
100	170	145	110	30	60	4	M10

表 7-101 玻璃观察窗外形尺寸

						
通 径 D_N /mm	外 形 尺 寸 /mm				$n-\phi C$	连接法兰
	D	D_1	D_2	H		
35	38	58.7	70	16	6- $\phi 6.6$	CF35
50	50	72.4	86	18	8- $\phi 8.4$	CF50
63	65	92.2	114	20	8- $\phi 8.4$	CF63
100	98	130.3	152	20	16- $\phi 8.4$	CF100
150	151	181.1	202	22	20- $\phi 8.4$	CF150
200	202	231.9	253	25	24- $\phi 8.4$	CF200

(二) 电极引入

将电流输入到真空系统或真空管壳中,应采用真空电极引入线。这些导线与导线之间、导线与真空室(管道)壁之间应当满足电绝缘、真空密封和承受一定的电流负荷。

电极引入线、电极密封材料的选择取决于工作电压、电流、频率、温度等。通常,电极引入线分为永久密封电极引入线和可拆密封电极引入线。前者用于高温可烘烤及各种真空测量规管中,后者用于一般高真空抽气系统中。

永久密封电极引入线采用玻璃—金属封接或陶瓷金属封接,根据外形分为杆密封、芯柱密

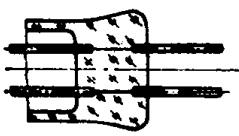
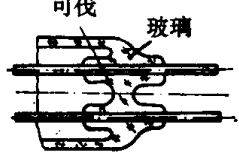


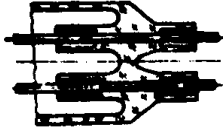
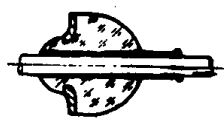
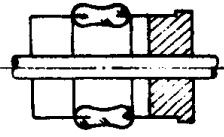
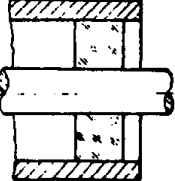
封、带状密封、盘形密封和杯形密封等。

强电流或高压引入线通常将两种密封型式结合使用。引入线和玻璃(或陶瓷)采用永久封接,封好的电极引线 and 电空室(管道)的密封采用可拆(或半可拆—封蜡)密封。

1. 玻璃—金属封接电极

玻璃—金属封接电极型式见表 7-102。

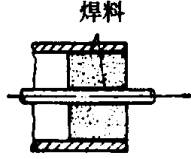
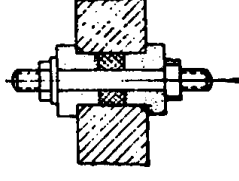
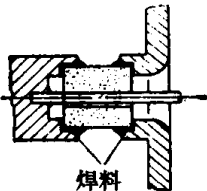
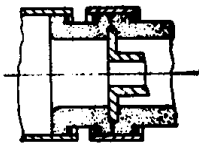
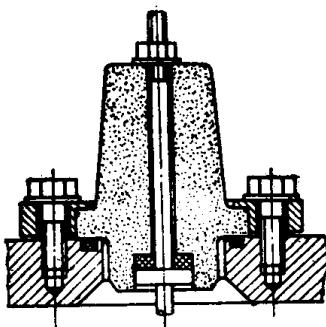
表 7-102 玻璃—金属封接电极型式

			
杜美丝过渡封接双芯电极	钨、铜、杆、匹配封接双芯电极	无氧高导电铜不匹配封接单芯电极	可伐管匹配封接单芯电极
			
带袖套的钨、铜玻璃封接双芯电极	钨杆、玻璃珠、可伐片封接单芯电极	单芯大电流电极 (一)	单芯大电流电极 (二)

2. 陶瓷—金属封接电极

陶瓷—金属封接电极可分为钎焊封接和橡胶密封封接(可拆卸),其型式见表 7-103。

表 7-103 陶瓷—金属封接电极型式

	
(a)	(b)
	
(c)	(d)
	
(e)	

3. 真空用低压电极

(1) 低压小电流电极

低压小电流电极分为固定型(图 7-40)和插入型(图 7-41)。

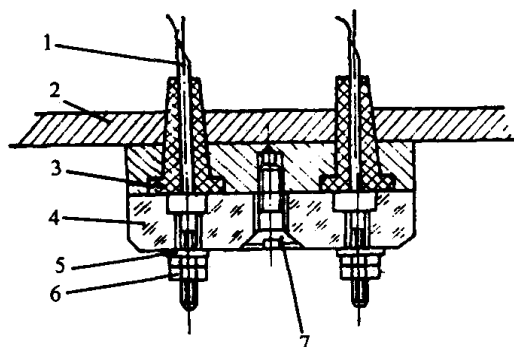


图 7-40 固定型低压小电流电极
1—电极;2—炉体;3—锥形密封塞;4—有机玻璃压盖;
5—垫片;6—螺母;7—螺钉。

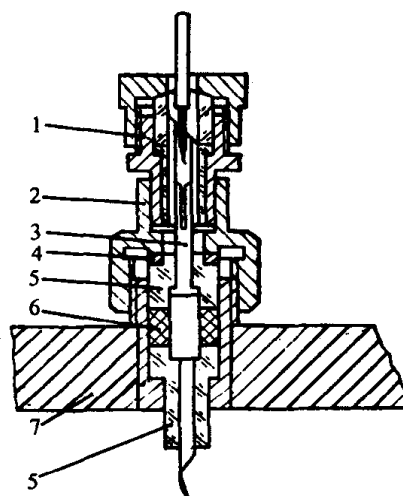


图 7-41 插入型低压小电流电极
1—插母;2—螺母;3—引入电极;4—垫;
5—有机玻璃绝缘套;6—密封圈;7—炉体。

(2) 低压大电流电极

低压大电流电极型式较多,如图 7-42~图 7-49 所示。

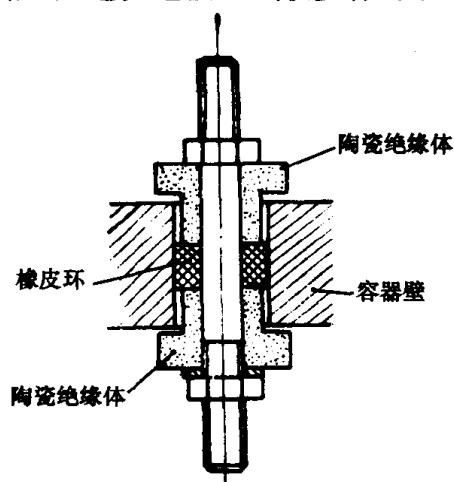


图 7-42 耐压数千伏大电流电极结构

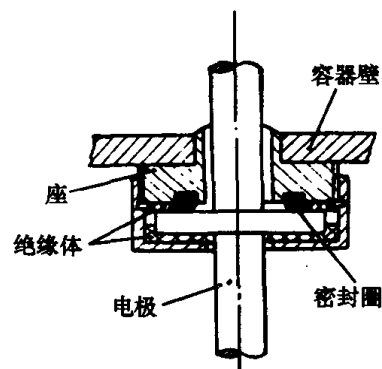


图 7-43 低压大电流电极结构(一)

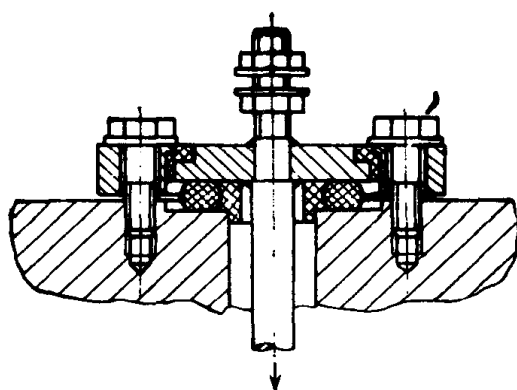


图 7-44 低压大电流电极结构(二)

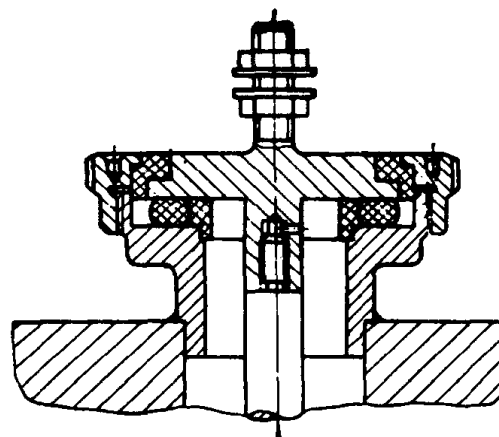


图 7-45 低压大电流电极结构(三)

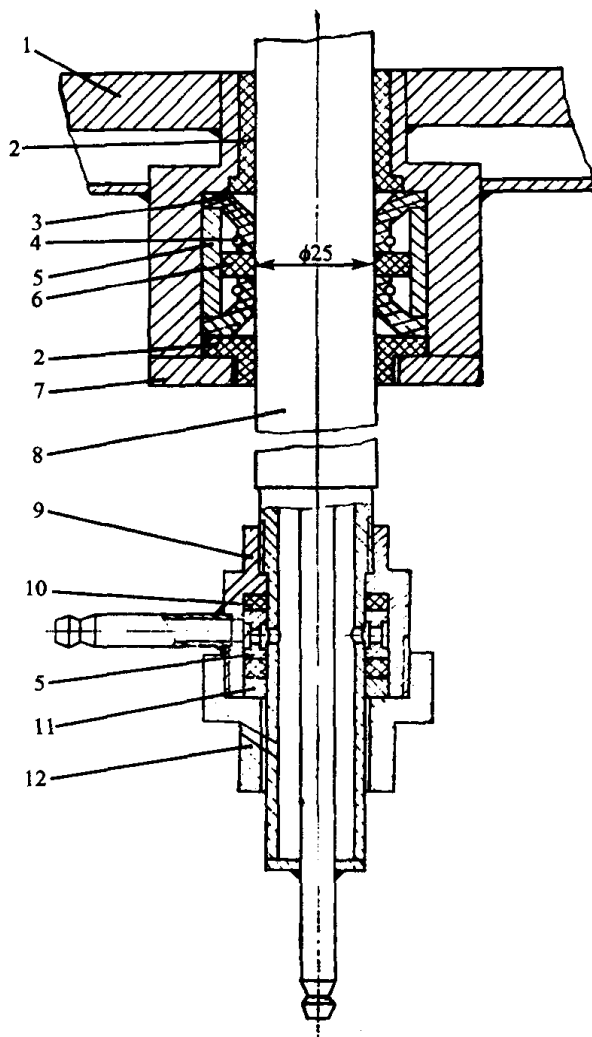


图 7-46 可移动的低电压大电流水冷电极
1—炉盖;2—绝缘胶木;3—密封环;4—弹簧;5—压环;
6—毛毡圈;7—压盖;8—电极;9—密封座;10—密封圈;
11—压环;12—螺母。

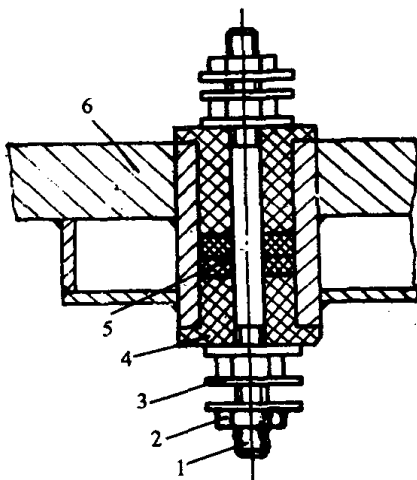


图 7-48 外套水冷式镍铬丝加热电极
1—电极;2—螺母;3—垫片;4—绝缘胶木;
5—橡皮圈;6—炉盖。

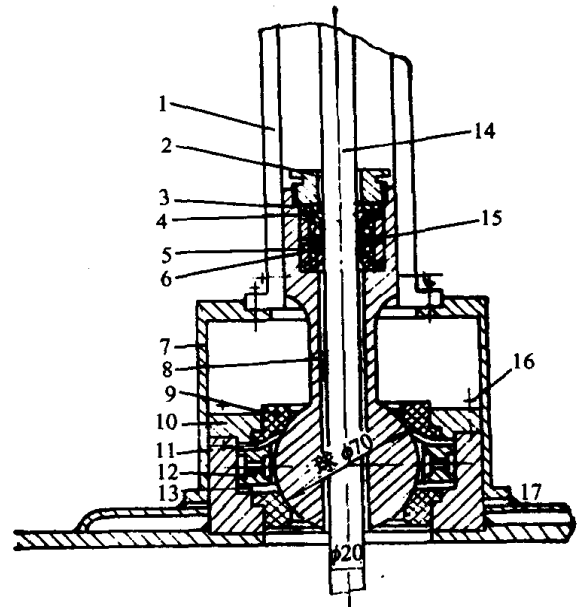


图 7-47 低电压大电流可升降可倾斜电极
1—上传动支架;2—螺母;3—垫;4—密封圈;
5—压环;6—密封圈弹簧;7—托架(两半);8—倾斜球体;
9—胶木垫;10—压盖;11—密封圈;12—压环;
13—密封圈;14—电极;15—毡垫;16—螺钉;
17—炉盖。

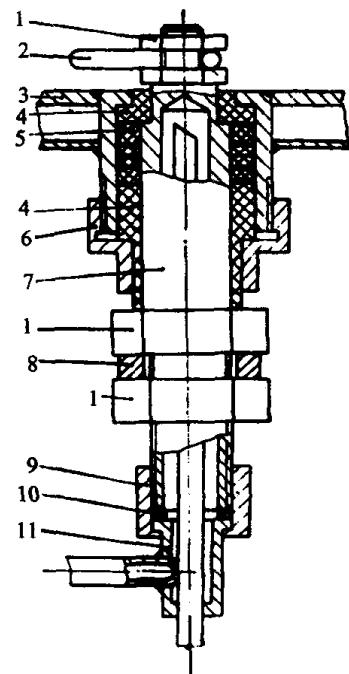


图 7-49 水冷式镍铬丝加热电极
1—螺母;2—镍铬丝;3—炉体;4—绝缘胶木;
5—密封圈;6—螺母;7—电极;8—外接线板;9—螺母;
10—封水圈;11—进出水接头。

4. 真空用高压电极型式

真空用高压电极型式如图 7-50~图 7-53 所示。

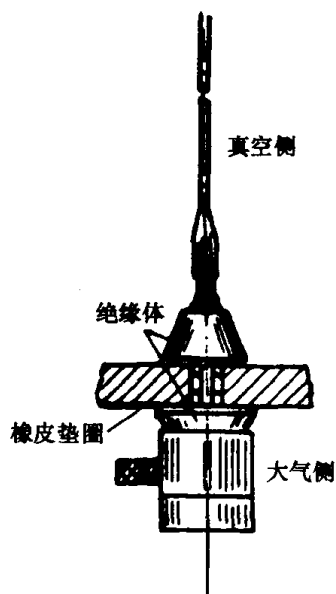


图 7-50 高压电极密封结构

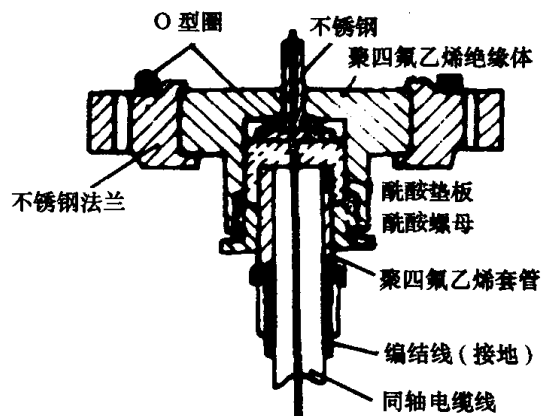


图 7-51 高压高频电极密封结构

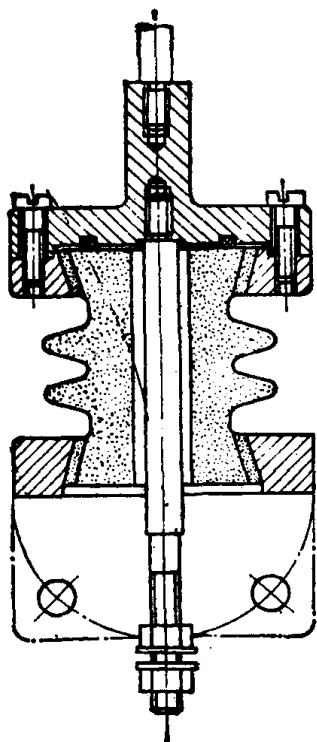


图 7-52 2kV, 120A 高压大电流电极结构

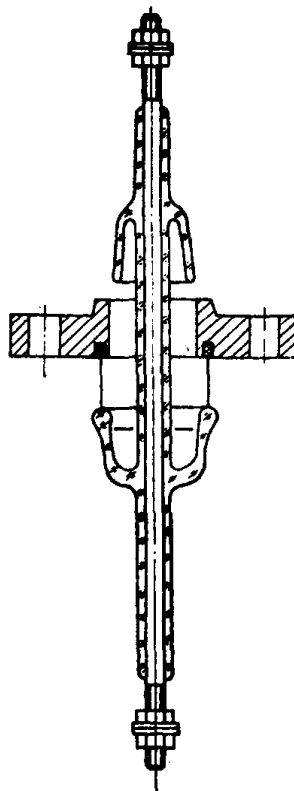


图 7-53 5kV, 10A 高压大电流电极结构

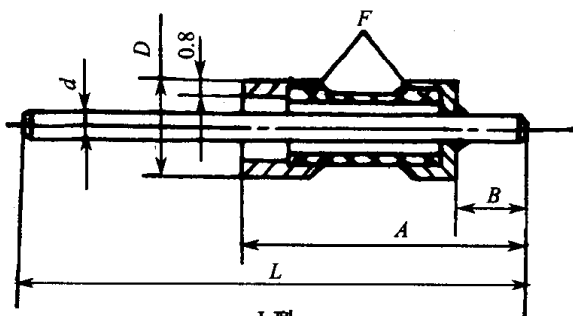
5. 部标陶瓷金属封接电极(摘自 SJ1775—81)

本标准适用于真空设备中的陶瓷金属封接式引入电极。

封接式电极分 I 型、II 型、III 型三种,其结构型式及尺寸: I 型按表 7-104 规定, II、III 型按图 7-54、图 7-55 规定。

表 7-104 I 型电极尺寸

(单位:mm)

 <p>I 型</p>				
D	d	A	L	B
6	1.5	25	40	5
10	3	35	65	8

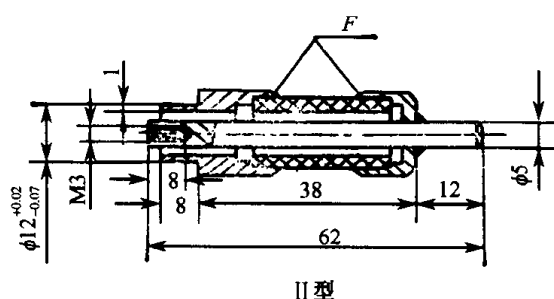


图 7-54 II 型电极结构

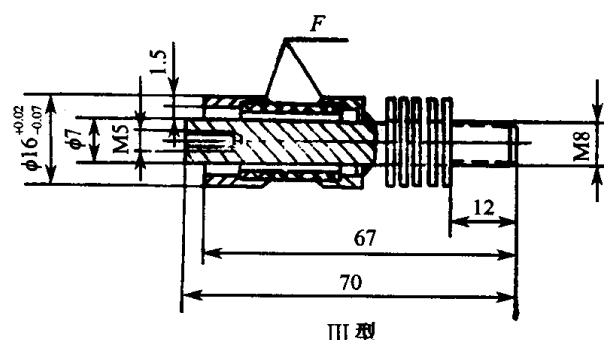


图 7-55 III 型电极结构

标记示例:

电极杆为 3mm 的 I 型封接式电极,其标记为:

封接电极 I -3 SJ1775-81

III 型封接电极 其标记为:

封接电极 III SJ1775-81

陶瓷金属封接电极使用 4J31, 4J33 可伐合金(YB662-69《铁—镍—钴瓷封合金 4J34、4J31、4J33》)与 95 瓷制造。最大漏气速率不大于 10^{-9} [Pa·L/s];最高烘烤温度为 450℃。

6. 国产 JB 型高压电极引线

JB 型高压引线由真空陶瓷、可伐、不锈钢法兰焊接而成。经严格的真空检漏、具有可靠的密封性能和良好的高压绝缘性能,可广泛用于超高真空、高真空系统中,其电极法兰按国际真空标准设计。表 7-105 是 JB 型高压引线性能参数。

7. 国产陶瓷-金属封接电极

沈阳中科仪技术发展有限责任公司生产陶瓷封接 CF 组件型和陶瓷封接引线瓷片型,前者带有 CF 法兰,后者不带法兰。技术参数见表 7-106~表 7-108。

表 7-105 JB 型高压引线性能参数

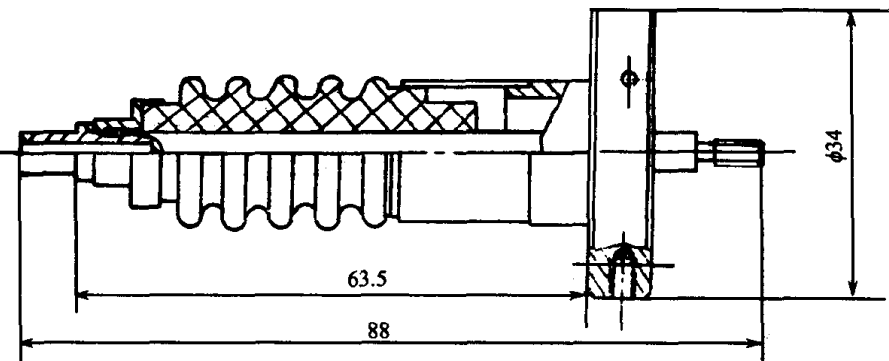
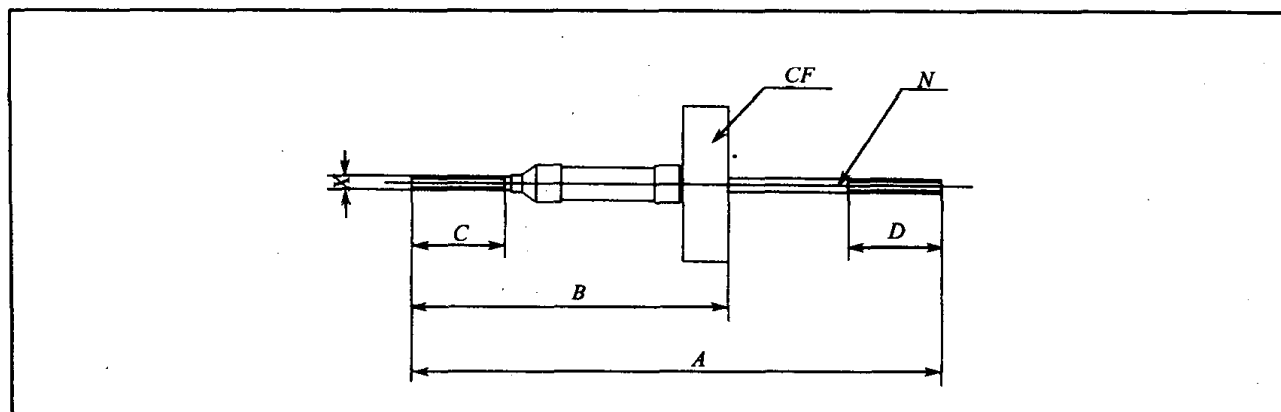
					
型 号	漏气速率/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	绝缘耐压/ kV	电流/ A	温度参数/ $^{\circ}\text{C}$	烘烤温度/ $^{\circ}\text{C}$
JB	$<10^{-8}$	≤ 10	10	196~450	≤ 400
注:北京中科仪技术发展有限责任公司生产					

表 7-106 CF 陶瓷封接 CF 组件型技术性能参数

名 称	连接法兰	电极型号	允许最大电流 / A	最高工作电压 / V	漏 率 / $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	烘烤温度 / $^{\circ}\text{C}$
CF-9 单芯组件	CF16	T/CF1.00	5	4K	$<10^{-8}$	≤ 300
CF-10 单芯组件	CF16	T/CF1.00B	10	3K		
CF-11 1-6 芯组件	CF25	T/CF1.00	5	4K		
CF-12 1-6 芯组件	CF35	T/CF1.00	5	4K		
		T/CF1.00B	10	3K		
CF-13 1-10 芯组件	CF50	T/CF1.00	5	4K		
		T/CF1.00B	10	3K		
CF-14 1-12 芯组件	CF63	T/CF1.00	5	4K		
		T/CF1.00B	10	3K		
CF-15 多芯组件	CF100 CF150	T/CF1.00	5	4K		
		T/CF1.00B	10	3K		
		T/CF5.00	40	3K		

表 7-107 CF 法兰型陶瓷封接组件外形尺寸



(续)

连接法兰	引线直径 /mm	外形尺寸 /mm				电流 /A	耐压 /kV	引线数量 N	电极杆 材 料
		A	B	C	D				
CF16	φ1.8	85	50	/	/	5	4	1	4J33
	M3	100	50	12	16	10	3		4J33
	M6	120	68	20	20	40	3		TU1
CF25	φ1.8	85	53	/	/	5	4		4J33
	M3	100	53	12	16	10	3		4J33
	M6	120	71	20	20	40	3		TU1
CF35	φ1.8	85	56	/	/	5	4	1-8	4J33
	M3	100	56	12	16	10	3		4J33
	M6	120	73.5	20	20	40	3	1-3	TU1
CF50	φ1.8	85	59	/	/	5	4	1-2	4J33
	M3	100	59	12	16	10	3		4J33
	M6	120	76.5	20	20	40	3	1-4	TU1
CF63	φ1.8	85	60.5	/	/	5	4	1-6	4J33
	M3	100	60.5	12	16	10	3		4J33
	M6	120	78	20	20	40	3	1-5	TU1
CF100	φ1.8	85	63	/	/	5	4	1-20	4J33
	M3	100	63	12	16	10	3		4J33
	M6	120	80	20	20	40	3	1-8	TU1
CF150	φ1.8	85	65	/	/	5	4	1-30	4J33
	M3	100	65	12	16	10	3		4J33
	M6	120	82	20	20	40	3	1-12	TU1

表 7-108 CF 瓷片型陶瓷封接引线技术性能参数

电极型号	封环尺寸 /mm	引线尺寸 /mm	陶瓷件 /mm	最大电 流/A	最高电 压/V	漏 率 /Pa·L·s ⁻¹	烘烤温度 /℃
T/CF1.00 单芯引线	φ7×20	φ1.8	95%Al ₂ O ₃ 管 φ7	5	4K	<10 ⁻⁸	≤300
T/CF1.00B 单芯引线	φ7×20	φ3	95%Al ₂ O ₃ 管 φ7	10	3K		
T/CF2.00 十芯引线	φ45	φ1.8	95%Al ₂ O ₃ 片 φ48	5	5K		
T/CF3.00 三芯引线	φ30	φ1.8	95%Al ₂ O ₃ 片	5	5K		
T/CF4.00 七芯引线	φ38	φ1.8	95%Al ₂ O ₃ 片 φ38	5	5K		
T/CF5.00 密封电极(单)	φ15	φ6	95%Al ₂ O ₃ 管 φ17	40	3K		
T/CF6.00 高压电极(单)	φ36	φ6	95%Al ₂ O ₃ 管 φ36	5	20K		
T/CF7.00 瓷瓶电极(单)	φ62×128	φ3	95%Al ₂ O ₃ 管	5	50K		

第八章 真空室设计

一、真空室

(一) 概述

真空室是真空设备的主要部件之一。真空设备的生产工艺过程都是在真空室中进行的。真空室中装有不同的部件,可以完成各种不同的工艺要求。如真空室中有蒸发金属的部件,就可蒸镀金属薄膜;真空室中有感应加热部件,就可以作为真空冶炼用的真空感应电炉等等。各种真空设备的真空室尽管完成的工艺过程不同,但大多数真空室都是由筒体、封头、门、冷却水套、法兰、管道等组成的。

由于使用要求不同,真空室有圆筒形、圆锥形、盒形等。

对于焊接结构的真空室有下列要求:

- ① 为了减少漏孔和漏气量,焊缝的总长度应尽可能短。
- ② 不要有十字交叉的焊缝,焊缝的高度应大于壳体厚度的 $1/3$;两缝中心线之间的距离应大于 100mm。
- ③ 全部焊缝都能方便地进行真空检漏。
- ④ 壳体上需开孔时最好不要开在焊缝上。
- ⑤ 为了防止壳体变形,对于非气密性焊缝可用间断焊。

封头是真空室的一个零件,与筒体焊在一起而组成一个整体。真空室封头有凸形、球形、锥形、平盖形等。

为便于工艺操作,真空室上都装设有门。门是可动部件,有平盖形、凸形、球形等。

有的真空室上设有冷却水套或敷有水管,这是因为真空室有时处于高温状态下工作,如真空冶炼设备,为了防止壳体变形和保证密封性,就需要设有冷却水套冷却真空室。

真空室一般用金属轧制板材制成,对材料的要求是可焊性好,气密性好。对于真空度要求不高的真空室,所用材料通常为低碳钢、合金钢、铝材和铜材等。对于要求真空度较高而又耐腐蚀的真空室,一般采用不锈钢。各种材料适用的真空度见表 8-1。

(二) 真空室的门

各类真空室均设置有门,其目的之一是便于在室内安装各种机构,其二是用于取送物料及材料。门通常是由密封法兰、门板、门铰链、密封圈预紧机构等组成的。门板有凸形的和平板形的,视真空室壳体结构而定。门有圆形和矩形两种。圆形门易加工,是设计真空室时常用形式。矩形门加工密封槽不方便,但有些真空室设计亦常用,如医药及生物制品用的真空冷冻干燥机,生物试验舱,小型真空镀膜设备等。矩形门的门板是平板式的,为减少厚度多采用加强筋结

表 8-1 各种材料适用的真空度

材 料	压 力 范 围 /Pa				
	$10^5 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-8}$
钢	好	好	好	需除气后	用不锈钢
铁、铸铜、铸铝	好	好	不好	不好	不好
轧铜及其合金	好	好	好	需除气后	用无氧铜
镍及其合金	好	好	好	好	好
铝	好	好	经过除气后		不使用
玻璃、石英	好	好	除气后		仅厚壁的
			好	好	
陶 瓷	好	好	经过充分除气后		专门类型
云 母	好	好			不使用
橡 胶	好	好	除气后	不好	不好
电木(胶木)	好	专门型号	专门型号	仅聚四氟乙烯	不使用

构。圆形门板常用标准凸形封头。门上的法兰为防止变形影响密封性能,常采用焊后精加工。门的密封槽一般都开在筒体法兰上。图 8-1 给出了门开启方式示意图。

门的强度按封头公式计算。

门的开启可以用手动或机动。门上有夹紧机构。夹紧机构的类型有丝杆螺母机构、偏心夹紧机构、楔形机构等。图 8-2 给出了一丝杆螺母机构简图。夹紧机构给密封圈一定的“预压力”。这种“预紧力”的压力 $0.5\text{MPa} \sim 0.8\text{MPa}$ 。如果真空室是钟罩式的(如各种镀膜机)就不需要有夹紧装置,钟罩本身的重量就可以使密封圈得到足够的预压力。抽气后大气压作用在密封圈上,密封就更可靠了。

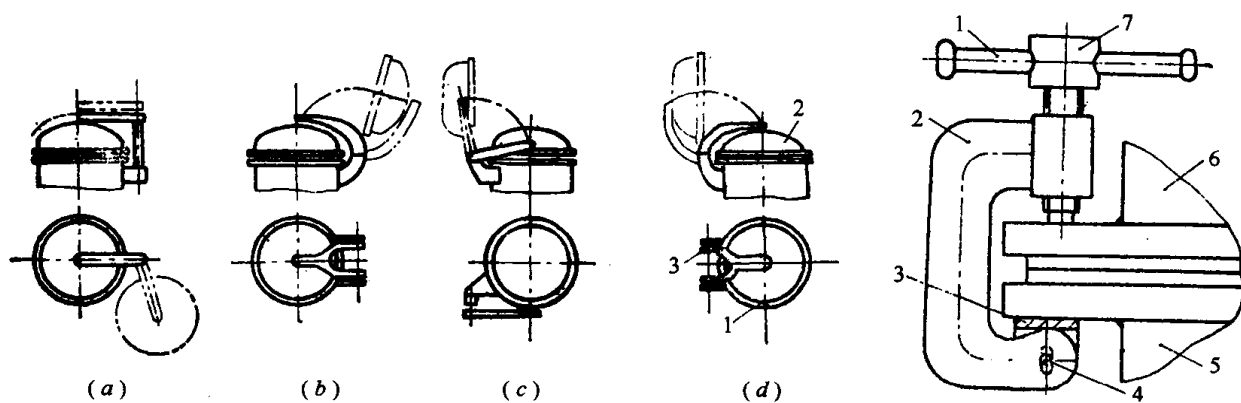


图 8-1 门示意图

(a)、(b) 为立式真空室;(c)、(d) 为卧式真空室。
1—法兰;2—门板;3—铰链。

图 8-2 丝杆螺母夹紧机构

1—手把;2—弯臂;3—铰链座;
4—小轴;5—筒体;
6—大门;7—螺杆。

大的门由于受大气压力的作用力很大,容易损坏密封圈。例如直径为 2m 的圆形门,其上的作用力约为 $3 \times 10^5\text{N}$ 。因此在设计密封槽时,要注意不使密封圈承担过大的力。密封槽的截面积要大于密封圈的截面积,且能允许密封圈变形 30% (密封圈截面高度压缩 30%)。

除门以外,真空室还焊有一些法兰盘或管道,通过它们与抽气系统相接,或者把各种传动

引入真空室中,或者引入电极等。

(三) 真空室的水冷

真空室水冷形式有两种:一种是将水管螺旋式地焊在真空室外壁上,另一种是真空室外壁加冷却水套(如图 8-3 所示)。真空室热负载大时用冷却水套冷却,热负载小时用水管冷却。有时两种形式混合使用。

选择哪种冷却方式,依据设备的具体情况(设备结构不同、加热温度不同、工作真空度高、观察方便、修补焊缝容易等)而定。

由于水管冷却效果差,故只能用在加热温度不高的情况下。在设计、安装冷却水管时,应使水管与真空室壁接触良好,其接触面积应尽可能扩大。

当真空室壁温较高时用冷却水套冷却,其冷却效果比水管好。冷却腔的宽度由真空室的尺寸、壁的温度决定,通常取 10mm ~ 40mm 之间。为了保证冷却水和高温壁进行充分的热交换,冷却水应由水套或水管的下部进入,从上部流出。

两个冷却水管间(图 8-4)的最大温升按下列公式计算

$$t_{\max} = \frac{q}{\alpha} \left[1 - \frac{1}{\cosh \frac{L}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}}} \right] + \frac{t_{\text{冷}}}{\cosh \frac{L}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}}} \quad (8-1)$$

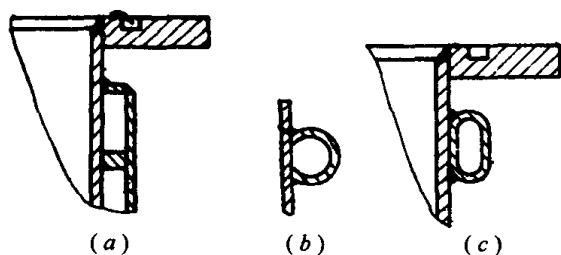


图 8-3 真空室水冷示意图

(a) 水套冷却; (b) 开口水管冷却; (c) 水管冷却。

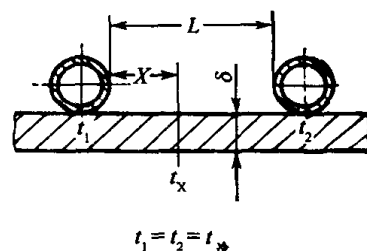


图 8-4 两水管间最高温升的计算示意图

式中 t_{\max} ——两水管间的最高温度(在 $x = \frac{L}{2}$ 处)[℃];
 λ ——壳体材料的导热系数[W/(m·K)];
 L ——两水管之间的距离[m];
 X ——由壳体温度为 t_1 的点到所要确定温度的某点的距离[m];
 δ ——壳体厚度[m];
 q ——单位面积热流量[W/m²];
 $t_{\text{冷}}$ ——冷却水温度[℃], $t_{\text{冷}} = 40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$;
 α ——壳体外表面传热系数[W/(m²·K)],见表 8-2。

表 8-2 传热系数 α 与壁温的关系

壁温度 /℃	40	60	80	100	120	150	200
$\alpha/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	29728	34543	38102	41451	44382	48988	56106

二、真空室强度计算的一般知识

(一) 薄壳

为了确定真空室的壁厚,应按薄壳理论对真空室进行强度计算。所谓薄壳,就是其厚度大大小于它的曲率半径。实际上薄壳应具有这样的条件,即

$$\frac{S}{D_B} \leq 0.04 \quad (8-2)$$

式中 S ——壳体壁厚[mm];
 D_B ——容器内径[mm]。

(二) 设计压力

带冷却水套的真空容器的设计压力取冷却水套中最大工作压力再加上大气压(10^5Pa);当夹层内液体静压力超过工作压力的5%时,还必须计入液体的静压力。

不带冷却水套的真空容器的设计压力应等于大气压。

(三) 壁厚的附加量

壁厚的附加量应按下式确定:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8-3)$$

式中 C ——壁厚的附加量[mm];
 C_1 ——钢板的最大负公差附加量[mm],见表8-3,一般情况下均取0.5mm;
 C_2 ——腐蚀裕度[mm];
 C_3 ——封头冲压时的拉伸减薄量。

表 8-3 碳钢及低合金钢板的最大负公差附加量

钢板厚度 /mm	2.5	3	4	4.5	5	6	8 ~ 25	26 ~ 30	32 ~ 34	36 ~ 40
最大负公差 /mm	0.2	0.22	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1

当介质对容器材料的腐蚀速度 $> 0.05\text{mm/年}$ 时,其腐蚀裕度应根据腐蚀速度和设计的使用寿命来决定。当介质对容器材料的腐蚀速度 $\leq 0.05\text{mm/年}$ 时(包括大气腐蚀),单面腐蚀取 $C_2 = 1\text{mm}$,双面腐蚀取 $C_2 = 2\text{mm}$ 。

在一般情况下, C_3 取计算厚度的10%,并且不大于4mm;对于需要热加工手工敲打的封头,根据加工具体情况,考虑增加由于氧化及拉伸所减薄的厚度,并在图纸上注明。对于圆筒体等不经冲压的元件,取 $C_3 = 0$ 。

(四) 容器的最小壁厚

对于一般的真空容器,当用碳钢和低合金钢做容器时,其壁厚不得小于3mm;当用不锈钢时,其壁厚不得小于2mm。

(五) 许用应力

材料的许用应力取下列三者中的最小值:

$$\left. \begin{aligned} [\sigma] &= \frac{\sigma_b}{n_b} \\ [\sigma] &= \frac{\sigma_s^t}{n_s} \\ [\sigma] &= \frac{\sigma_D^t}{n_D} \text{ 或 } [\sigma] = \frac{\sigma_n^t}{n_n} \end{aligned} \right\} \quad (8-4)$$

式中 $[\sigma]$ ——材料的许用应力[MPa],不同温度下材料的许用应力见表 8-4;

σ_b ——常温下材料的抗拉强度[MPa];

σ_s^t ——工作温度下材料的屈服限,亦可取产生残余变形达 0.2% 的条件屈服限[MPa];

σ_D^t ——工作温度下,材料的持久限(经 10 万 h 断裂)[MPa];

σ_n^t ——工作温度下材料的蠕变限(在 10 万 h 下蠕变率为 1%)[MPa];

n_b, n_s, n_D, n_n ——安全系数,见表 8-5。

表 8-4 各种温度下材料的许用应力

(单位:MPa)

材 料	工 作 温 度 /℃													
	20	200	240	250	260	280	300	320	340	350	360	380	400	420
A ₃ 、A ₃ F	137	123	113		108	103	99			89			77	69
15、15g	139	128	117		111	106	102	97	92		86	81	77	73
20、20g	153	139	129		122	117	111	105	100		94	89	84	79
不锈钢	144			137			135			133			132	127

注:不锈钢系指:1Cr18Ni9; Cr18Ni10Ti; Cr18Ni12Ti; 1Cr18Ni9Ti

表 8-5 材料安全系数

安全系数	碳钢、合金钢	奥氏体不锈钢	有色金属及合金
n_b	3.0	3.0	3.0
n_s	1.6	1.5	1.5
n_D	1.6	1.6	
n_n	1.0	1.0	

对于直接受火焰或用电加热器辐射加热的容器,则需将上述许用应力乘以减弱系数 0.85. 碳钢和低合金钢工作壁温超过 420℃,低合金铬钼钢的工作壁温超过 450℃,不锈钢工作壁温超过 550℃ 时,必须进行持久极限的验算;无持久极限时可以按蠕变极限验算。

(六) 焊缝系数

焊缝系数见表 8-6。

表 8-6 焊缝系数 γ

焊 接 情 况	局部透视者 γ	不透视者 γ
双面自动电弧焊或手工焊的对接焊缝以及保证双面焊透的丁字连接焊缝	0.9	0.7
单面自动电弧焊或手工焊的对接焊缝(温度低于 - 20℃ 不采用此结构)	0.7	0.6
不保证焊接元件焊透的丁字连接以及双面搭接焊缝(温度低于 - 20℃ 不采用此结构)	0.7	0.6

(七) 开孔削弱系数

筒体上开设排孔,会减弱筒体强度。其轴向削弱系数在筒体强度计算中与焊缝系数一样代入公式中。轴向开孔削弱系数如下:

① 节距相等[如图 8-5(a) 所示]时,

$$J = \frac{t - d}{t} \quad (8-5)$$

式中 J ——轴向开孔削弱系数;

t ——孔中心距离;

d ——孔的直径。

② 节距不相等,但 t_2 不大于 $1.3t_1$ [如图 8-5(b) 所示]时,

$$J = \frac{t_1 + t_2 - 2d}{t_1 + t_2} \quad (8-6)$$

式中 t_1 ——孔中心线距离中较小的值;

t_2 ——孔中心线距离中较大的值。

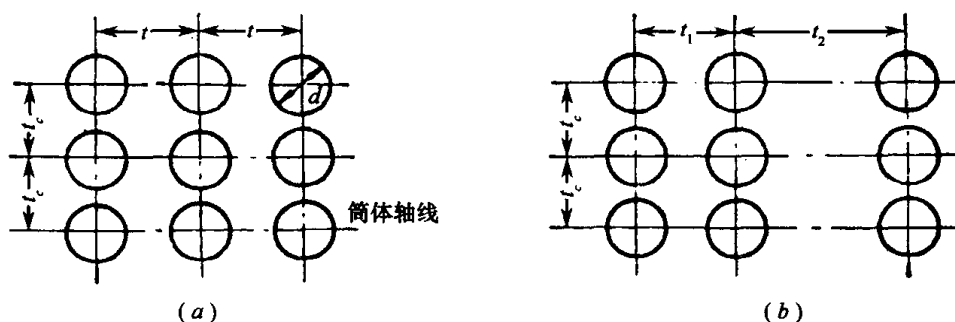


图 8-5 开孔削弱系数示图

(a) 节距相等; (b) 节距不相等($t_2 \leq 1.3t_1$)。

③ 环向开孔削弱系数,

$$J_c = \frac{t_c - d}{t_c} \quad (8-7)$$

式中 t_c ——环向孔中心线距离。

当 $J_c \geq \frac{1}{2}$ 时,可不必将 J_c 代入筒体轴向应力计算公式。当 $J_c < \frac{1}{2}$ 时,应将 J_c 代入筒体轴向应力计算公式,以校核筒体轴向应力是否大于材料许用应力值。

(八) 压力试验

对直径大于 500mm ($D_B > 500\text{mm}$) 的真空容器,通常要做水压试验以检验其强度。真空容器没有冷却水套时,要进行内压水压试验,其水压值取为 0.196MPa。有水冷却套时,除做内压水压试验外,还要进行外压水压试验,其水压值 $p_{\text{水}} = 1.5p$ (p ——设计外压力)。

三、真空室壳体设计

(一) 圆筒形壳体

1. 概述

大多数真空室的壳体都是圆筒形的,原因是制造容易且强度好。真空室除用板材制造外,对于直径较小的真空室筒体亦可用热轧无缝钢管制造。圆筒体焊制后应进行整形和矫直。根据需要真空室可以做成立式的或卧式的。

圆筒体的内径 D_B 建议选用表 8-7 中的数值。

表 8-7 圆筒体内径 D_B

(单位:mm)

400	(450)	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800
2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	

圆筒体容积、内表面积及质量见表 8-8。

表 8-8 圆筒体的容积、内表面积及质量

公称通径 D_g /mm	1m 高的 容积 V/m^3	1m 高的 内表面积 F_B/m^2	1m 高 筒 节 钢 板 质 量 /kg																
			壁 厚 /mm																
			3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
300 (350)	0.071 0.096	0.94 1.10	22 26	30 35	37 44	44 50	59 79												
400 (450)	0.126 0.159	1.26 1.41	30 34	40 45	50 56	60 67	79 100	99 125	119 150										
500	0.196	1.51	37	50	62	75	100	125	150	175									
(550)	0.238	1.74	41	55	68	82													
600 (650)	0.283 0.332	1.88 2.04	45	60 65	75 81	90 97	121 130	150	180	211									
700	0.385	2.20		69	87	105	140	176	213	250									
800	0.503	2.51		79	99	119	159	200	240	280									
900	0.636	2.83		89	112	134	179	224	270	315	363	408							
1000 (1100)	0.785 0.950	3.14 3.46			124 136	149 164	199 218	249 274	296	348	399	450	503						
1200 (1300)	1.131 1.327	3.77 4.09			149 161	178 193	238 258	298 323	358	418	479	540	602	662					
1400 (1500)	1.539 1.767	4.40 4.71			173 186	208 223	278 297	348 372	418 446	487	567	630	700	770	840	914	986	1058	
1600	2.017	5.03			198	238	317	397	476	556	636	720	800	880	960	1040	1124	1206	
1800	2.545	5.66				267	356	446	536	627	716	806	897	987	1080	1170	1263	1353	
2000	3.142	6.28				296	397	495	596	695	795	895	995	1095	1200	1300	1400	1501	
2200	3.801	6.81				322	436	545	655	714	874	984	1093	1204	1318	1429	1540	1650	
2400	4.524	7.55				356	475	596	714	834	960	1080	1194	1314	1435	1556	1677	1798	
2600	5.309	8.17					514	644	774	903	1030	1160	1290	1422	1553	1684	1815	1946	
2800	6.158	8.80					554	693	831	970	1110	1250	1390	1531	1671	1812	1953	2094	
3000	7.030	9.43					593	742	881	1040	1190	1338	1490	1640	1790	1940	2091	2242	
3200	8.050	10.05					632	791	950	1108	1267	1425	1537	1745	1908	2069	2229	2390	
3400	9.075	10.68					672	841	1008	1177	1346	1517	1687	1857	2027	2197	2367	2538	
3600	10.180	11.32					711	890	1070	1246	1424	1606	1785	1965	2145	2325	2505	2686	
3800	11.340	11.83					751	939	1126	1315	1514	1693	1884	2074	2263	2453	2643	2834	
4000	12.566	12.57					790	988	1186	1383	1582	1780	1980	2185	2380	2585	2785	2985	

2. 圆筒形壳体计算

(1) 按计算公式确定外压圆筒形壳体壁厚

圆筒壳体只承受外压时,可按稳定条件计算,其壁厚为

$$S_0 = 1.25 D_B \left(\frac{p}{E_t} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} \quad (8-8)$$

式中 S_0 ——圆筒计算壁厚[mm];

D_B ——圆筒内径[mm];

p ——外压设计压力[MPa],真空容器选择 $p = 0.1\text{MPa}$;

L ——圆筒计算长度[mm](如图 8-6 所示);

E_t ——材料温度为 t 时的弹性模量[MPa],图 8-7 给出了碳钢和合金钢在各种温度下的 E_t 值。

圆筒的实际壁厚应为

$$S = S_0 + C \quad (8-9)$$

式中 S ——圆筒实际壁厚[mm];

S_0 ——圆筒计算壁厚[mm][见公式(8-8)];

C ——壁厚附加量[mm][见公式(8-3)]。

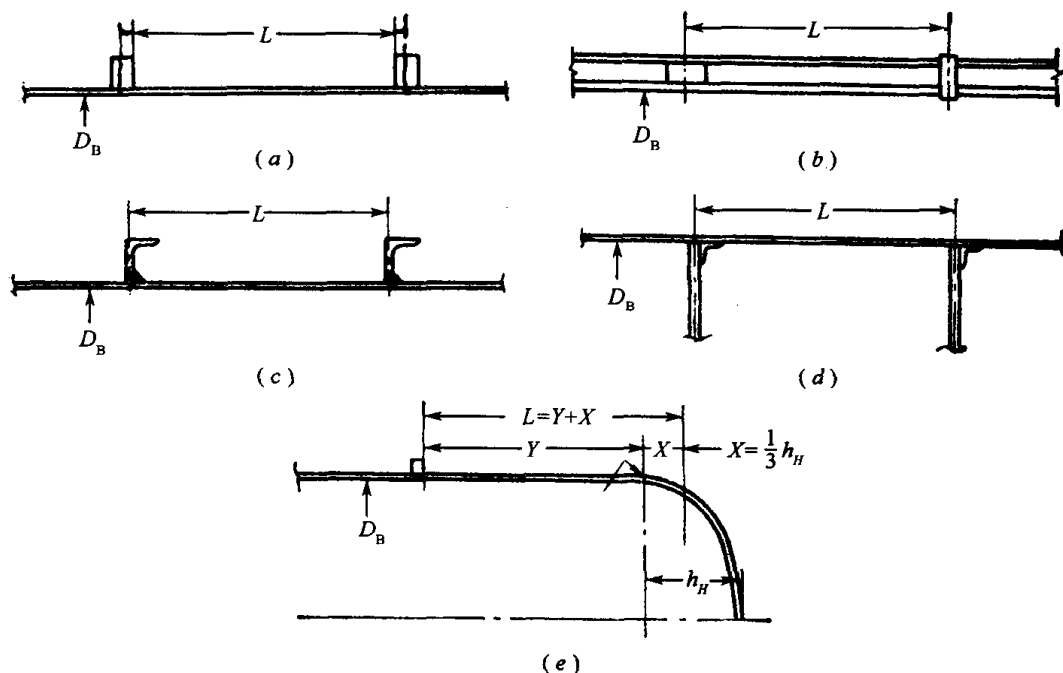


图 8-6 外压圆筒的计算长度

(a) 矩形截面; (b) 双壁壳体; (c) 角钢筋; (d) 壳体内筋; (e) 视封头为筋。

计算公式(8-8)除了要满足材料的泊松系数 $\mu = 0.3$ (实际上全部金属材料均可满足) 外,还必须满足下面两个条件方可应用:

$$\textcircled{1} \quad 1 \leq \frac{L}{D_B} \leq 8 \quad (8-10a)$$

$$\textcircled{2} \quad \left(\frac{p}{E_t} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} \leq 0.523 \quad (8-10b)$$

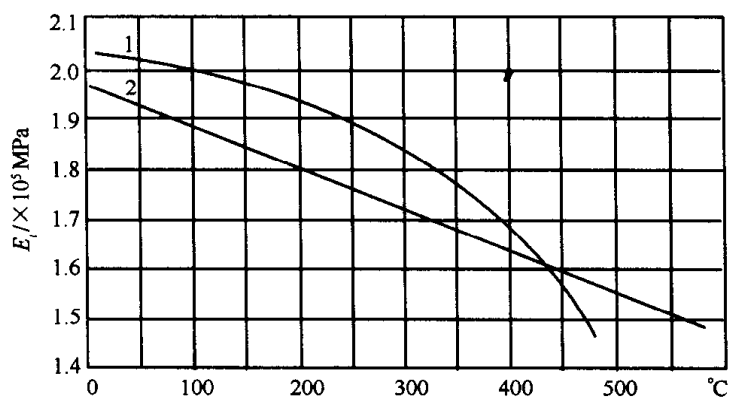


图 8-7 弹性模量的计算值与温度的关系

1—碳钢;2—合金钢(奥氏体钢)。

(2) 查表确定圆筒形壳体壁厚

表 8-9 给出了外压力为 0.1MPa 时圆筒壁厚,可供设计者参考。

表 8-9 圆筒壁厚 ($p = 0.1\text{MPa}$)

(单位:mm)

公称直径 圆筒壁厚 容器的长 与外径之比													
	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
1	3	3	4	4	4	4.5	5	6	6	8	8	8	10
2	3	4	4	4.5	5	6	6	8	8	10	10	12	12
3	4	4	4.5	5	6	8	8	8	8	10	12	14	14
4	4	4.5	5	6	8	8	8	10	10	12	14	14	16
5	4	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16

注:本表适用于工作温度 $\leq 150^\circ\text{C}$, 屈服限 σ_s 为 206MPa ~ 265MPa 的 A3、A3R、15g、20g、0Cr13、1Cr13 制设备, 给出壁厚值作为设计参考

(3) 水压试验

容器进行外压水压试验时应满足

$$|\sigma| \leq 0.9\sigma_s \quad (8-11)$$

$$|\sigma| \leq 0.06E \left(\frac{S}{R_B} \right) \quad (8-12)$$

式中 σ_s ——材料在 20°C 时的屈服限[MPa]; E ——材料的弹性模量[MPa]; S ——圆筒的壁厚(包括壁厚附加量)[mm]; R_B ——圆筒内半径[mm]; $|\sigma|$ ——外压水压试验时产生的应力的绝对值[MPa], 外压水压试验压力 $p_{\text{水}} = 0.196\text{MPa}$ 。

(4) 筒体加工允许偏差

圆筒体允许的周长偏差和纵向焊缝的边缘变动偏差示在表 8-10 之中, 筒体允许的几何形状偏差表示在表 8-11 之中, 供设计参考。

表 8-10 圆筒体允许的周长偏差和纵向焊缝的边缘变动偏差

壁 厚 /mm	碳钢及低合金钢		高合金钢	
	沿周长 /mm	焊缝边缘变动	沿周长 /mm	焊缝边缘变动
≤ 14	± 3	10% S	± 3	10% S
16、18	± 5		± 5	
20 ~ 24	± 7			
26、28	± 9			
30 ~ 34	± 11			
36、38	± 13			

表 8-11 焊接圆筒允许的几何形状偏差

几 何 尺 寸	允 许 偏 差
L	$\pm 0.3\% L$, 但不能大于 $\pm 75\text{mm}$
中心线不直度	$\pm 0.2\% L$, 但当 $L \leq 10000\text{mm}$ 时不能大于 20mm 但当 $L > 10000\text{mm}$ 时不能大于 30mm
两端平行度	$\pm 0.06\% L$, 但不能大于 2mm
椭圆度	最大直径与最小直径差不得超过 $0.5\% D_B$, 且不大于 20mm

(二) 球形壳体

从稳定性和消耗材料上来说壳体以球形最好。但由于球形制造困难, 内部有效利用空间小, 一般少用。

真空状态下的球体, 按稳定条件计算时, 其计算壁厚为

$$S_0 = 0.8 D_B \sqrt{\frac{p \sqrt{3}(1 - \mu^2)}{E_t}} \quad (8-13)$$

实际壁厚应为

$$S = S_0 + C \quad (8-14)$$

式中 S_0 ——计算壁厚[mm];
 S ——球体实际壁厚[mm];
 C ——壁厚附加量[mm];
 D_B ——球体内径[mm];
 p ——外压设计压力[MPa];
 E_t ——温度为 t 时材料的弹性模量[MPa];
 μ ——泊松系数。

球体成型后, 在任何方向上的椭圆度不得大于 $0.5 D_B \%$ 。

(三) 锥形壳体

如壳体为图 8-8 中(a)、(b)所示形状且半锥角 $\alpha < 30^\circ$ 时, 其壁厚可按圆筒体壁厚计算公式计算。

如壳体为图 8-8 中(c)所示形状或者半锥角 $\alpha > 30^\circ$ 时, 其壁厚均按下述公式计算(取最大者)

$$S = \frac{K p D_B}{2 K_1 [\sigma]_{\text{强}}} + C \quad (8-15)$$

$$S = \frac{pD_B}{2K_1 \cos \alpha [\sigma]_{\text{屈}}} + C \quad (8-16)$$

式中 p ——外压设计压力[MPa];
 S ——壳体实际厚度[mm];
 C ——壳体壁厚附加量[mm];
 D_B ——锥体大端内径[mm];
 K_1 ——系数,无开孔时取 $K_1 = 0.74$,有开孔时取 $K_1 = 0.64$;
 $[\sigma]_{\text{强}}$ ——按强度限确定的许用应力[MPa];
 $[\sigma]_{\text{屈}}$ ——按屈服限确定的许用应力[MPa];
 α ——半锥角(°);
 K ——形状系数(如图 8-9 所示)。

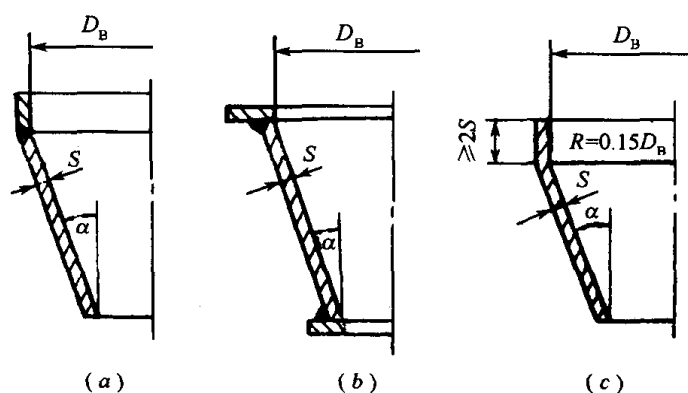


图 8-8 锥形壳体
 (a) 无直边; (b) 有法兰; (c) 有直边。

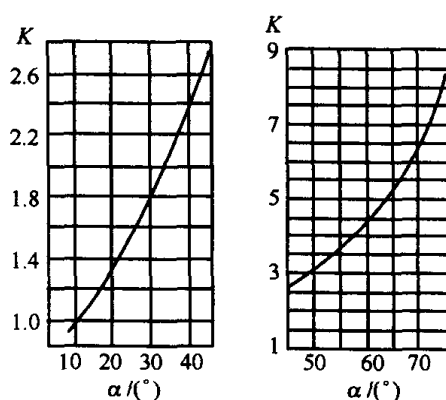


图 8-9 锥形壳体形状系数 K

(四) 盒形壳体

真空室用盒形壳体比用圆筒形少,盒形壳体制造复杂,耗费金属材料多。但盒形壳体内部可利用的空间大,做生物试验用的低压舱用盒形壳体的较多。为了减少板材的厚度,在盒形壳体上通常都使用了加强筋。

在设计时应注意壳体的每一个面应尽可能小,大平面应有加强筋。

盒形壳体厚度可以按矩形平板计算。下面给出的计算公式,其适用条件是:板周边固定,受外压为 0.1MPa,水压试验用压力 $p_{\text{水}}$ 为 0.2MPa。

$$S = S_0 + C \quad (8-17)$$

$$S_0 = \frac{0.224B}{\sqrt{[\sigma]_{\text{弯}}}} \quad (8-18)$$

式中 S ——壳体实际壁厚[cm];
 S_0 ——壳体计算壁厚[cm];
 C ——壁厚附加量[cm];
 B ——矩形板的窄边长度[cm];
 $[\sigma]_{\text{弯}}$ ——弯曲时许用应力[MPa]。轧钢和铸钢的弯曲许用应力通常规定与简单拉伸压缩时用的许用应力相同。

当做水压试验时,矩形板的应力为

$$\sigma = \frac{0.5B^2 p_{\text{水}}}{(\delta - c)^2} \leq 0.9\sigma_s \quad (8-19)$$

为了减少盒形壳体壁厚,通常采用加强筋补强,加强筋的多少依具体情况而定。加强筋主要类型如图 8-10 所示。

有加强筋的盒形壳体壁厚仍按公式(8-18) 计算。不过公式中的 B 值应以相应的值来代替。对于图 8-10(a) 应以 l 代替 B ,图(b) 应以 b 代替 B ,图(c) 则应以 l 和 b 两者中最小者代替 B 。

在计算加强筋时,假定被筋分割的小平面所承受载荷的一半,由一个加强筋来承受(相当于一根梁),每个筋受弯时(受均布载荷) 的抗弯截面模量为:

对于图 8-10(a)

$$W_p = \frac{B^2 l p}{2K[\sigma]_{\text{弯}}} \quad (8-20)$$

对于图 8-10(b)

$$W_p = \frac{L^2 b p}{2K[\sigma]_{\text{弯}}} \quad (8-21)$$

对于图 8-10(c)

$$\text{横加强筋} \quad W_{p1} = \frac{B^2 l p}{4K[\sigma]_{\text{弯}}} \quad (8-22)$$

$$\text{竖加强筋} \quad W_{p2} = \frac{L^2 b p}{4K[\sigma]_{\text{弯}}} \quad (8-23)$$

式中 W_p ——加强筋的抗弯截面模量[cm^3];

p ——设计压力,如做水压试验则取 $p = 0.196\text{MPa}$,如果水的静压力较大且超过 5% p 值时,应加上水的静压力;如不做水压试验 $p = 0.098\text{MPa}$;

K ——系数,与筋两端的固定方式有关,若为刚性固定(例如同法兰相接,或与其它筋相接) 取 $K = 12$;若非刚性固定则取 $K = 8$ 。

根据公式(8-20) ~ 公式(8-23),求出截面模量后,即可确定加强筋的断面几何尺寸。

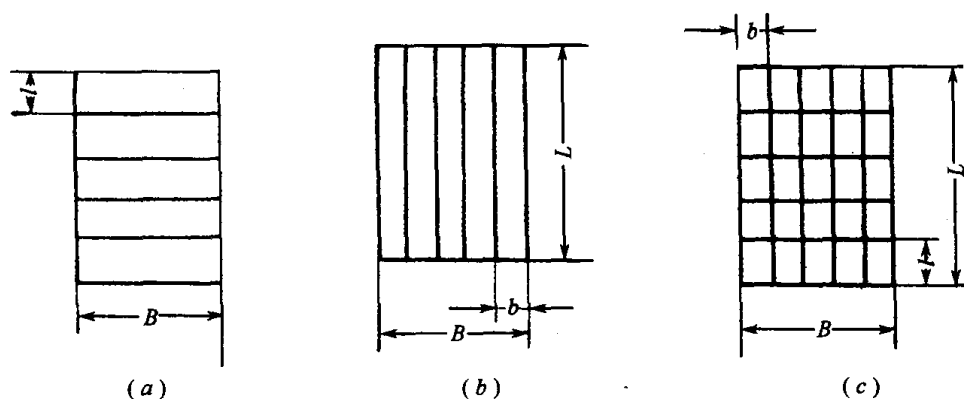


图 8-10 盒形壳体加强筋类型

选用型钢做加强筋(槽钢、工字钢、角钢等),一般金属材料性能表中都会给出来其截面模量,若型材的截面模量值和计算的相符合就可以选用。

加强筋亦可以做成矩形截面的,对于矩形截面的加强筋其高度与宽度之比为 5 时,则加强筋的厚度为

$$S_p = 0.62 \sqrt[3]{W_p} [\text{cm}] \quad (8-24)$$

计算出来的尺寸应化为整数。筋的截面尺寸由真空室水压试验时的最大应力来确定。在计算时,壁厚确定后,就可以计算加强筋和壁的一部分(如图 8-11 所示)。联合作用的截面模量为

$$W_{p.c} = \frac{J_p + J_c + F_p(0.5h_p - Y)^2 + F_c[Y + 0.5(S - C)]^2}{h_p - Y} \quad (8-25)$$

式中 $W_{p.c}$ ——联合抗弯截面模量[cm^3];

J_p ——面积 F_p 对通过其质心的轴线 $x-x$ (平行于壁) 的惯性矩[cm^4];

J_c ——面积 F_c 对通过其质心的轴线(平行于壁)的惯性矩[cm^4];

F_p ——加强筋的截面积[cm^2];

F_c ——壁一部分的截面积[cm^2], $F_c = X(S - C)$, 对于横加强筋 $X = l$, 竖加强筋 $X = b$ (如图 8-10 所示);

Y ——由壁到联合面积质心的距离[cm],

$$Y = \frac{F_p h_p - F_c(S - C)}{2(F_p + F_c)}$$

h_p ——加强筋高[cm]。

做水压试验时,加强筋的最大应力应满足下列条件:

对于图 8-10(a)

$$\sigma = \frac{B^2 l p_{\text{水}}}{K W_{p.c}} \leq 0.9 \sigma_s \quad (8-26)$$

对于图 8-10(b)

$$\sigma = \frac{L^2 b p_{\text{水}}}{K W_{p.c}} \leq 0.9 \sigma_s \quad (8-27)$$

对于图 8-10(c)

$$\text{横筋} \quad \sigma_1 = \frac{B^2 l p_{\text{水}}}{2 K W_{p.c}} \leq 0.9 \sigma_s \quad (8-28)$$

$$\text{竖筋} \quad \sigma_2 = \frac{L^2 b p_{\text{水}}}{2 K W_{p.c}} \leq 0.9 \sigma_s \quad (8-29)$$

如满足不了上述条件,加强筋尺寸应增加。

盒形真空室由几个平面构成,在计算时要选择其中面积最大的面来计算。

例 确定焊接结构的盒形真空室壁厚和选择加强筋,真空室尺寸如图 8-12 所示。

材料 1Cr18Ni9Ti, 其

$$\sigma_b = 529.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 196 \text{ MPa}$$

温度 $t_{\text{平均}} = 20^\circ\text{C}$

$B = 100 \text{ cm}$, $B_1 = 50 \text{ cm}$, $H = 200 \text{ cm}$, $l = 50 \text{ cm}$, $b = 25 \text{ cm}$ 。做水压试验 $p_{\text{水}} = 0.196 \text{ MPa}$ 。

① 按强度极限确定许用应力

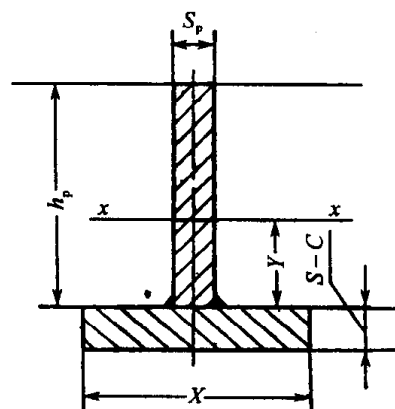


图 8-11 矩形加强筋和壁联合截面

$$[\sigma]_{\text{弯}} = \frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{529.5}{2.7} = 196\text{MPa}$$

② 按屈服极限确定许用应力

$$[\sigma]_{\text{弯}} = \frac{\sigma_s}{n_s} = \frac{196}{1.5} \approx 130.7\text{MPa}$$

③ 按公式(8-18) 确定最小厚度

$$S_0 = \frac{0.224b}{\sqrt{[\sigma]_{\text{弯}}}} = \frac{0.224 \times 25}{\sqrt{130.7}} = \frac{5.6}{11.43} \approx 0.49[\text{cm}]$$

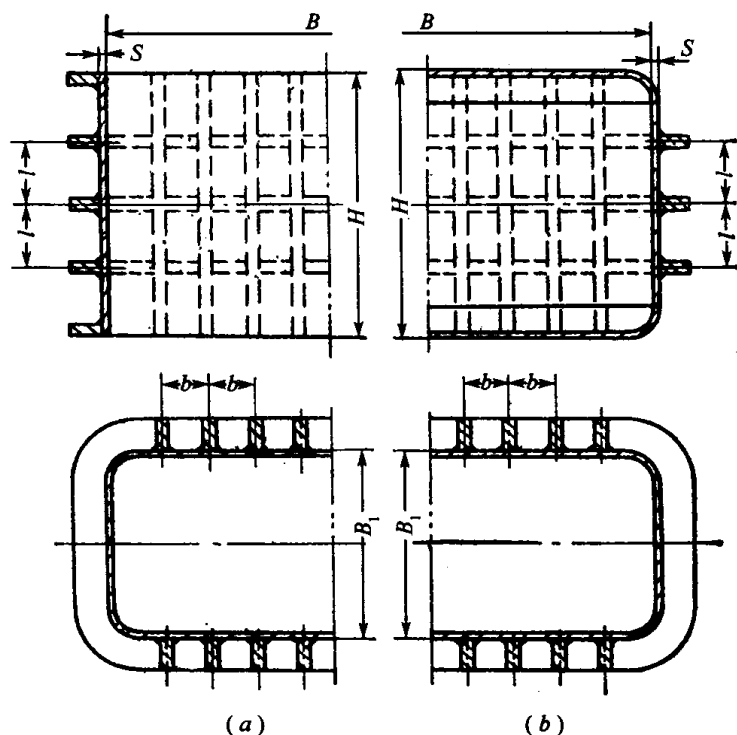


图 8-12 盒形真空室

(a) 有法兰的; (b) 有焊接封头的。

此计算中只考虑由板材最大负公差引起的壁厚附加量,选附加量为 0.5mm 时,壁厚 S 应为 5.4mm,为简化计算起见取壁厚为 6mm。

④ 按公式(8-19) 校核水压试验应力。

水的试验压力

$$p_{\text{水}} = 0.196\text{MPa}$$

水静压力

$$p_{\text{静}} = H\rho = 200 \times 1\text{g/cm}^3 = 0.0196\text{MPa} > 5\% p_{\text{水}}$$

式中 H ——水的高度[cm];

ρ ——水的密度[1g/cm^3]。

总压力

$$p = p_{\text{水}} + p_{\text{静}} = 0.216\text{MPa}$$

如选壁厚 $(S - C)$ 为 0.55cm, 则

$$\sigma = \frac{0.5b^2 p}{(S - C)^2} = \frac{0.5 \times 25^2 \times 0.216}{0.55^2} \approx 223\text{MPa} > 0.9\sigma_s = 177\text{MPa}$$

由计算可见,需要增加壁厚,选壁厚为 0.75cm 再进行试算, 则 $\sigma = 138\text{MPa} < 0.9\sigma_s =$

177MPa, 满足了水压试验要求。

⑤ 选矩形截面加强筋, 如图 8-13 所示。宽与高之比为 1/5, 加强筋的类型属于图 8-10(c), 按公式(8-22)、(8-23) 计算所需要的截面模量。

$$\text{横筋} \quad W_{p1} = \frac{B^2 L_p}{4K[\sigma]_{\text{弯}}} = \frac{100^2 \times 50 \times 0.216}{4 \times 12 \times 130.7} = 17.2[\text{cm}^3]$$

$$\text{竖筋} \quad W_{p2} = \frac{L^2 b p}{4K[\sigma]_{\text{弯}}} = \frac{200^2 \times 25 \times 0.216}{4 \times 12 \times 130.7} = 34.4[\text{cm}^3]$$

由式(8-24) 计算加强筋宽度

$$S_{p1} = 0.62 \sqrt[3]{W_{p1}} = 0.62 \sqrt[3]{17.2} \approx 1.6[\text{cm}]$$

$$S_{p2} = 0.62 \sqrt[3]{W_{p2}} = 0.62 \sqrt[3]{34.4} \approx 2[\text{cm}]$$

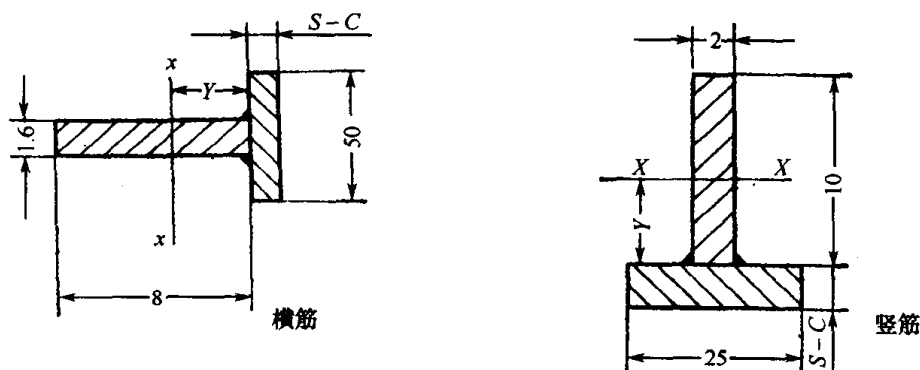


图 8-13 加强筋剖面图

加强筋的尺寸

横筋 $S_{p1} = 1.6\text{cm}$, 高 $h_{p1} = 8\text{cm}$

竖筋 $S_{p2} = 2\text{cm}$, 高 $h_{p2} = 10\text{cm}$

⑥ 计算加强筋和壁联合的截面模量。

加强筋截面积

$$F_{p1} = 1.6 \times 8 = 12.8[\text{cm}^2]$$

$$F_{p2} = 2 \times 10 = 20[\text{cm}^2]$$

壁部分的截面积

$$F_{c1} = 0.7 \times 50 = 35[\text{cm}^2]$$

$$F_{c2} = 0.7 \times 25 = 17.5[\text{cm}^2]$$

加强筋截面的惯性矩(对通过其质心而平行于壁面的轴线)

$$J_{p1} = \frac{1}{12} \times 1.6 \times 8^3 = 68.3[\text{cm}^4]$$

$$J_{p2} = \frac{1}{12} \times 2 \times 10^3 = 166.7[\text{cm}^4]$$

壁部分截面积的惯性矩(对通过其质心而平行于壁面的轴线)

$$J_{c1} = \frac{1}{12} \times 50 \times 0.7^3 = 1.43[\text{cm}^4]$$

$$J_{c2} = \frac{1}{12} \times 25 \times 0.7^3 = 0.71[\text{cm}^4]$$

加强筋高度

$$h_{p1} = 8[\text{cm}]$$

$$h_{p2} = 10[\text{cm}]$$

壁计算厚度

$$S - C = 0.75 - 0.05 = 0.7[\text{cm}]$$

由壁到联合重心的距离

$$y_1 = \frac{12.8 \times 8 - 35 \times 0.7}{2(12.8 + 35)} \approx 0.80[\text{cm}]$$

$$y_2 = \frac{20 \times 10 - 17.5 \times 0.7}{2(20 + 17.5)} \approx 2.50[\text{cm}]$$

加强筋与壁联合作用的截面模量由式(8-25)得

$$W_{p_1 c_1} = \frac{68.3 + 1.43 + 12.8(0.5 \times 8 - 0.8)^2 + 35[0.8 + 0.5 \times 0.7]^2}{8 - 0.8} \approx 34.3[\text{cm}^3]$$

$$W_{p_2 c_2} = \frac{166.7 + 0.71 + 20(0.5 \times 10 - 2.5)^2 + 17.5[2.5 + 0.5 \times 0.7]^2}{10 - 2.5} \approx 57.9[\text{cm}^3]$$

⑦ 校核水压试验应力。

对于横筋,按公式(8-28)有

$$\sigma_1 = \frac{B^2 l p_{\text{水}}}{2KW_{p_1 c_1}} = \frac{100^2 \times 50 \times 0.216}{2 \times 12 \times 34.3} \approx 131.2 < 0.9\sigma_s = 176.5\text{MPa}$$

对于竖筋,按公式(8-29)有

$$\sigma_2 = \frac{L^2 b p_{\text{水}}}{2KW_{p_2 c_2}} = \frac{200^2 \times 25 \times 0.216}{2 \times 12 \times 57.9} \approx 155.3 < 0.9\sigma_s = 176.5\text{MPa}$$

可见满足水压试验要求。

(五) 椭圆球形壳体

图8-14给出了长轴为 $2a$,短轴为 $2b$ 的椭圆球形壳体示意图。其临界弹性弯曲压力 $p_{\text{临}}$ 可用瑞利-里兹[Rayleigh-Ritz]方法求得。

可利用图8-15给出的曲线求出壳体的厚度。

表8-12给出了临界弯曲压力及波数的计算值与实验值。

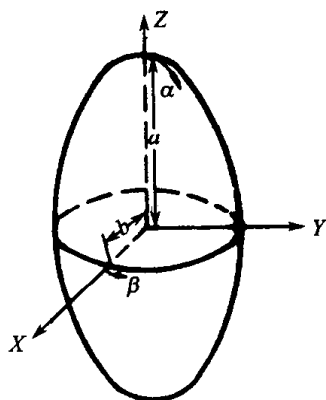


图 8-14 椭圆球形壳体

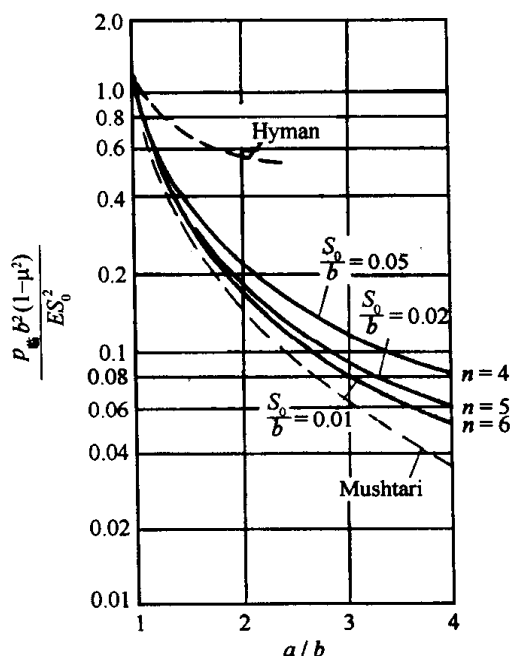


图 8-15 计算椭圆球形壳体壁厚曲线

$p_{\text{临}}$ —壳体所承受的临界外压力[MPa];
 a —椭圆长半轴[cm]; b —椭圆短半轴[cm];
 S_0 —壳体壁厚[cm]; E —材料弹性模量[MPa];
 μ —泊松比,图中 $\mu = 0.3$; n —周向波数;

Hyman、Mushtari 研究者。

表 8-12 临界弯曲压力及波数的计算值与实验值比较

样品 代号	a/b	S_0/b	弯曲压力 $/\times 6.9 \times 10^{-3} \text{MPa}$			波 数		样品 代号	a/b	S_0/b	弯曲压力 $/\times 6.9 \times 10^{-3} \text{MPa}$			波 数	
			计算	实验	Mushtari	计算	实验				计算	实验	Mushtari	计算	实验
24	4.0	0.061	9.6	8.5	5.4	5	4	3	2.0	0.080	53.4	49	41.6	6	5
25		0.083	19.4	15.0	10.1	4	4	4		0.1165	123	111	88.4	6	5
20		0.121	47.1	39	21.4	4	3	1		0.140	184	158	127	5	4
33		0.152	84.9	54.25	33.8	4	3	2		0.187	361	261	228	5	4
10		0.187	134	94	51.5	3	3	17	1.5	0.060	52.1	47	46.7	9	-
13		0.317	469	259	147	3	2								
	3.0							15		0.080	95.9	84	83.1	8	8
23		0.064	16.4	13.5	11.0	5	5	5		0.1195	229	198	185	7	6
19		0.079	25.9	23.5	16.7	5	4	27	1.25	0.041	37.7	23.25	36	12	-
7		0.120	69.1	54	38.6	4	4								
32		0.152	117	88	61.5	4	3	31		0.045	45.6	21.25	43.2	12	-
9		0.189	197	137	95.5	4	3	26		0.057	74.4	48	69.5	11	9
12	2.5	0.312	653	432	260	3	3	16		0.060	84.6	51	72	10	-
								14		0.0795	148	129	135	9	8
22		0.060	18.9	19	14.3	6	6								
18		0.079	35.2	32	24.6	6	5	30	1.0	0.0335	51.4	17.75	51	17	-
6		0.121	91.1	70	57.9	5	4	29		0.040	73.4	30.25	72.7	15	-
8		0.189	254	190	141	4	3	28		0.058	156	98.75	152	12	-
11	2.0	0.325	976	601	408	3	3								
21		0.060	28.4	27	23.4	7	7								

注: $E = 3.2 \times 10^4 \text{MPa}$;
 $\mu = 0.4$;
 $b = 7.62 \text{cm}$

(六) 环形壳体

图 8-16 给出了半径为 a 的环形壳体, 在均匀外压下其壁厚 S_0 可用图 8-17 曲线或表 8-13 来确定。图 8-18 为壳体径向位移形状, 图 8-19 为不同研究者计算结果比较。

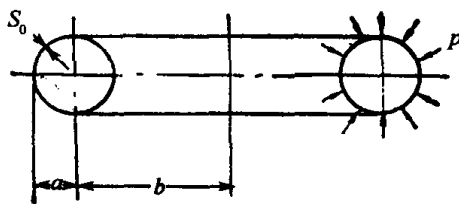


图 8-16 环形壳体示意图

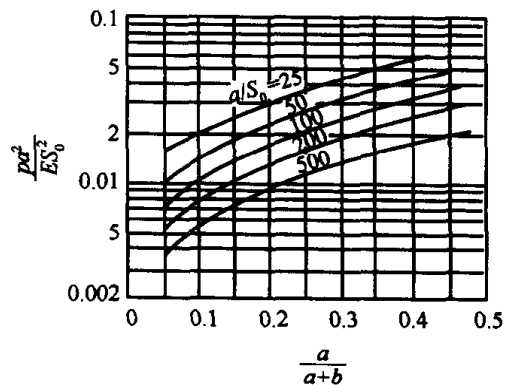


图 8-17 在均匀静压下环形壳体的弯曲系数

表 8-13 不同弯曲形式的结果比较

b/a	$a/S_0 = 100$			$a/S_0 = 500$		
	$(pa/ES_0) \times 10^3$			$(pa/ES_0) \times 10^4$		
	A 型 $n = 2$	B 型 $n = 2$	B 型 $n = 0$	A 型 $n = 2$	B 型 $n = 2$	B 型 $n = 0$
1.2	0.520	0.516	0.373	0.441	0.440	0.420
2	0.281	0.281	0.268	0.301	0.301	0.300
4	0.175	0.176	0.173	0.191	0.192	0.191
8	0.113	0.115	0.114	0.121	0.122	0.123
20	0.066	0.067	0.068	0.068	0.069	0.069

注: n —周向波数

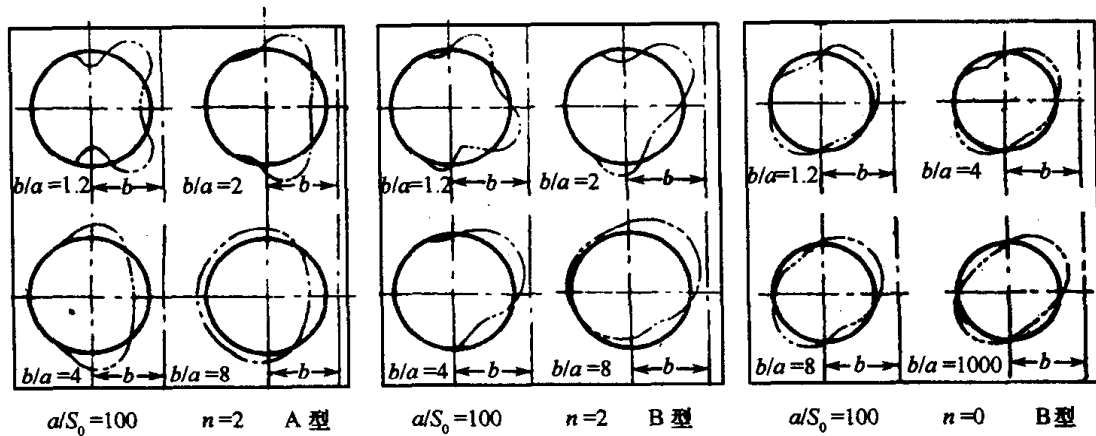


图 8-18 壳体径向位移形状

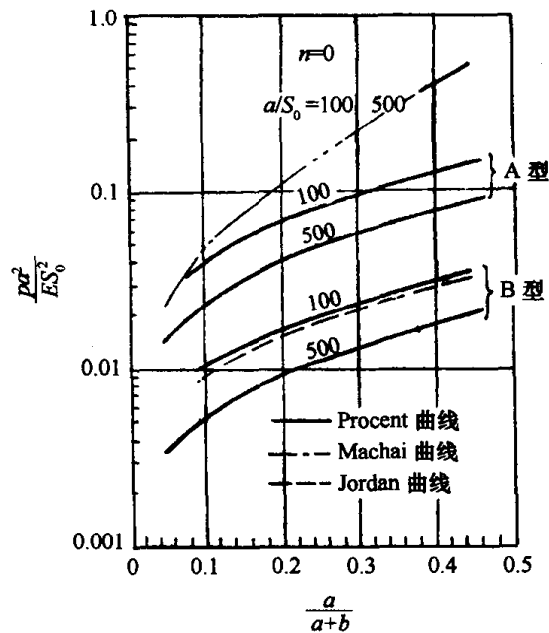


图 8-19 不同研究者计算结果之比较

表 8-14 实验结果与计算值比较

	$a / \times 2.54$ cm	$b / \times 2.54$ cm	S_0		$\frac{b}{a}$	$\frac{a}{S_0}$	材 料	pa^2/ES_0^3		$\frac{p_{计算}-p_{实验}}{p_{计算}} \times 100\%$
			名义 $/ \times 2.54$ cm	平均 $/ \times 2.54$ cm				实验	计算	
近于完整的 环形壳体	7.2	57.6	0.1	0.0395	8.04	71.5	钢 17-7PH	0.01182	0.01302	9.2
	7.2	57.6	0.1	0.0383	8.04	73.8	钢 17-7PH	0.01370	0.01285	-6.6
	7.2	57.6	0.1	0.0353	8.04	80.0	钢 AM-350	0.01369	0.01240	-10.4
180° 环形壳体	3.50	22.125	0.050	—	6.32	70	钛 6Al-4V	0.0164	0.0152	-7.9
表中符号: a —环截面半径[cm]; b —圆环中心线之半径[cm]; E —材料弹性模量[MPa]; S_0 —圆壳体壁厚[cm]; $p_{计算}$ —计算外压值[MPa]; $p_{实验}$ —实验外压值[MPa]										

四、国家标准(GB150—98) 中外压圆筒和球壳壁厚计算公式

(一) 外压圆筒和外压管子

外压圆筒和外压管子所需的有效厚度用图 8-20 ~ 图 8-28 进行计算,分两种情况,步骤如下。

1. $D_H/S \geq 20$ 的圆筒和管子

① 假设 S_n , 令 $S = S_n - C$, 定出 L/D_H 和 D_H/S 。

② 在图 8-20 的左方找到 L/D_H 值, 过此点沿水平方向右移与 D_H/S 线相交(遇中间值用内插法), 若 L/D_H 值大于 50, 则用 $L/D_H = 50$ 查图, 若 L/D_H 值小于 0.05, 则用 $L/D_H = 0.05$ 查图。

③ 过此交点沿垂直方向下移, 在图的下方得到系数 A 。

④ 按所用材料选取用图 8-21 ~ 图 8-28, 在图的下方找到系数 A 。

若 A 值落在设计温度下材料线的右方, 则过此点垂直上移, 与设计温度下的材料线相交(遇中间温度值用内插法), 再过此交点水平方向右移, 在图的右方得到系数 B , 并按式(8-30)计算许用外压力 $[p]$

$$[p] = \frac{B}{D_H/S} \quad (8-30)$$

若所得 A 值落在设计温度下材料线的左方, 则用式(8-31)计算许用外压力 $[p]$

$$[p] = \frac{2AE}{3(D_H/S)} \quad (8-31)$$

⑤ $[p]$ 应大于或等于设计外压力 p_c , 否则须再假设名义厚度 S_n , 重复上述计算, 直到 $[p]$ 大于且接近于 p_c 为止。

2. $D_H/S < 20$ 的圆筒和管子

① 用与 1 条相同的步骤得到系数 B 值; 但对 $D_H/S < 4.0$ 的圆筒和管子应按式(8-32)计算系数 A 值

$$A = \frac{1.1}{(D_H/S)^2} \quad (8-32)$$

系数 $A > 0.1$ 时, 取 $A = 0.1$ 。

② 按式(8-33) 计算许用外压力 $[p]$

$$[p] = \min \left\{ \left[\frac{2.25}{D_H/S} - 0.0625 \right] B, \frac{2\sigma_o}{D_H/S} \left[1 - \frac{1}{D_H/S} \right] \right\} \quad (8-33)$$

式中 σ_o ——应力, 取以下两值中的较小值

$$\sigma_o = 2[\sigma]^t$$

$$\sigma_o = 0.9\sigma_s^t$$

$[p]$ 应大于或等于 p_c , 否则须再假设名义厚度 S_n , 重复上述计算, 直到 $[p]$ 大于且接近 p_c 为止。

(二) 外压球壳

外压球壳所需的有效厚度按以下步骤确定:

① 假设 S_n , 令 $S = S_n - C$, 定出 R_o/S ;

② 用式(8-34) 计算系数 A :

$$A = \frac{0.125}{(R_o/S)} \quad (8-34)$$

③ 根据所用材料选用图 8-21 ~ 图 8-28, 在图的下方找出系数 A , 若 A 值落在设计温度下材料线的右方, 则过此点垂直上移, 与设计温度下的材料线相交(遇中间温度值用内插法), 再过此交点水平方向左移, 在图的右方得到系数 B , 并按式(8-35) 计算许用外压力 $[p]$:

$$[p] = \frac{B}{(R_o/S)} \quad (8-35)$$

若所得 A 落在设计温度下材料线的左方, 则用式(8-36) 计算许用外压力 $[p]$:

$$[p] = \frac{0.083 \ 3E}{(R_o/S)^2} \quad (8-36)$$

以上各式中

A ——系数;

C ——壁厚附加量[mm];

D_H ——圆筒外径[mm];

R_o ——球体外半径[mm];

E ——设计温度下材料弹性模量[MPa];

S ——壁厚[mm];

σ^t ——设计温度下材料许用应力[MPa];

σ_s^t ——设计温度下材料屈服限[MPa];

p_c ——设计外压力[MPa]。

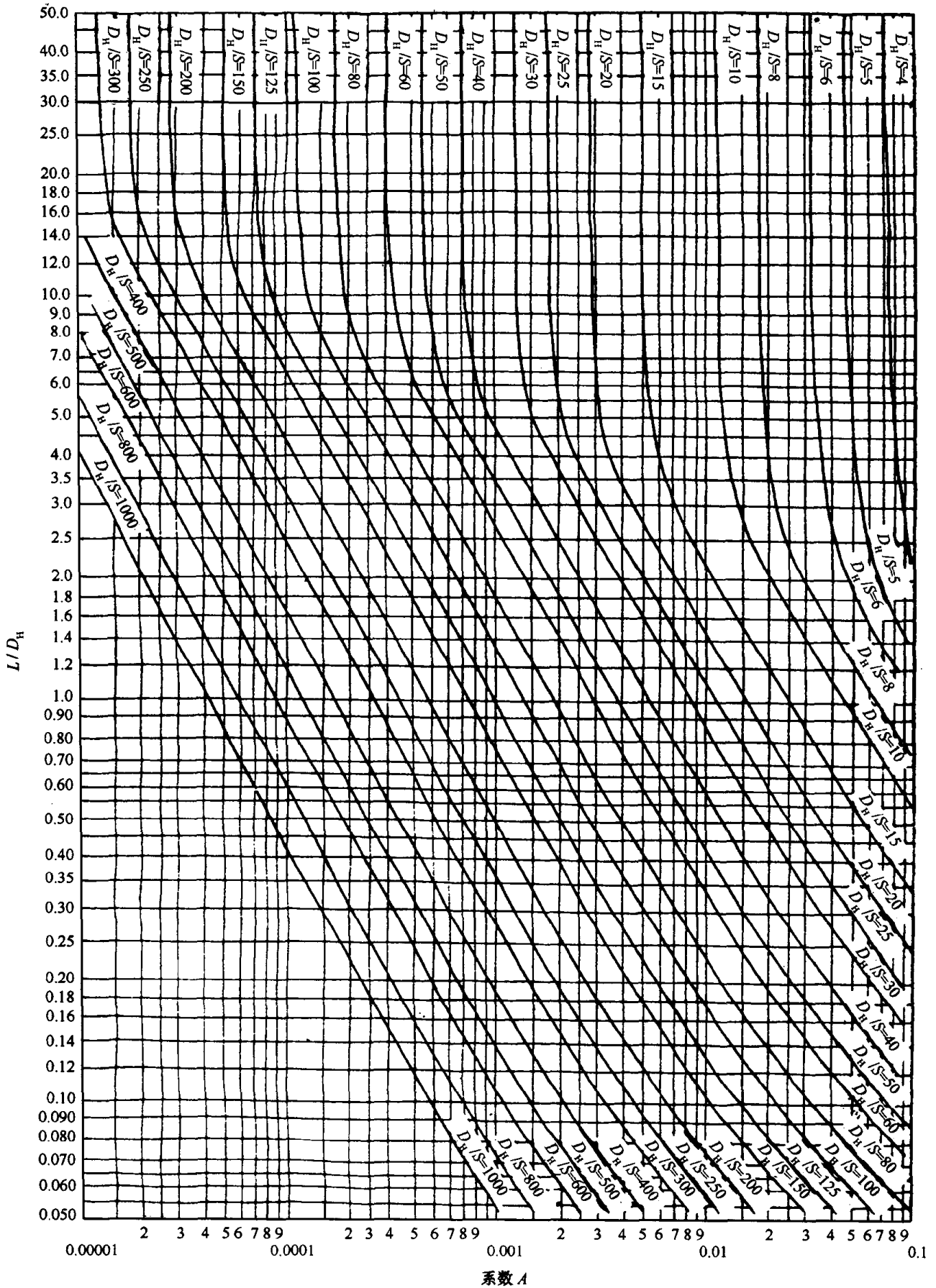


图 8-20 外压或轴向受压圆筒和管子几何参数计算图
(用于所有材料)

四、国家标准(GB150—98) 中外压圆筒和球壳壁厚计算公式

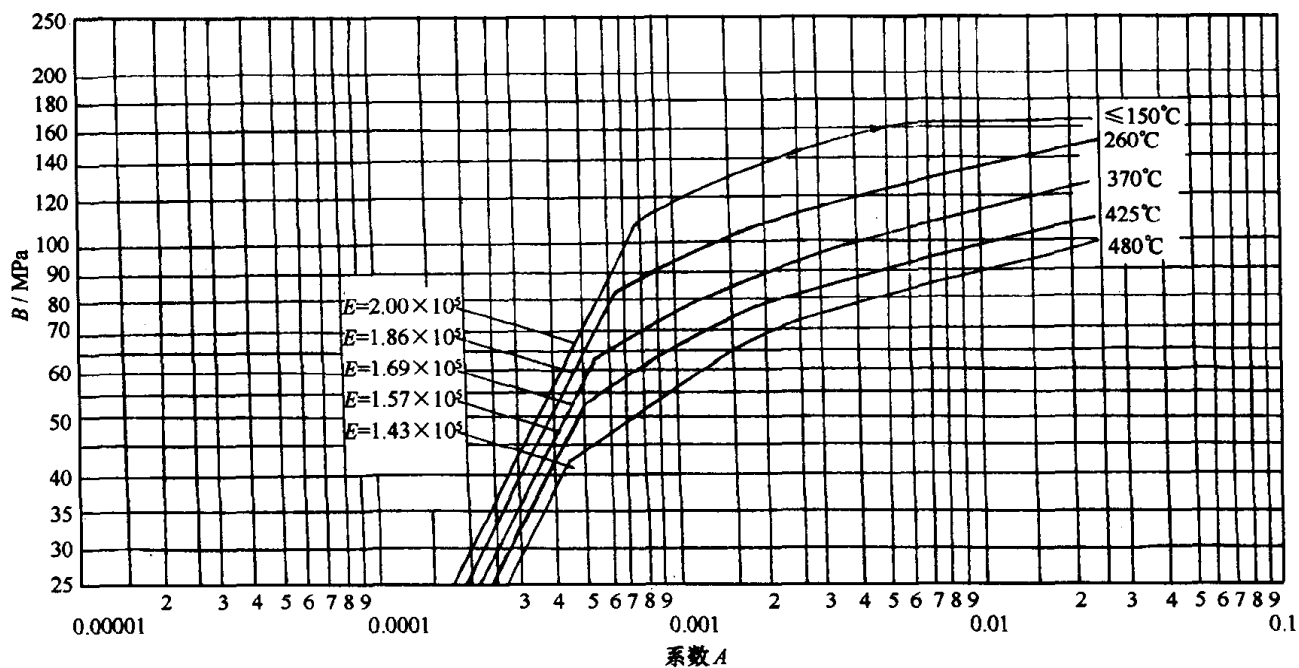


图 8-21 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(屈服点 $\sigma_s > 207\text{MPa}$ 的碳素钢和 0Cr13、1Cr13 钢)

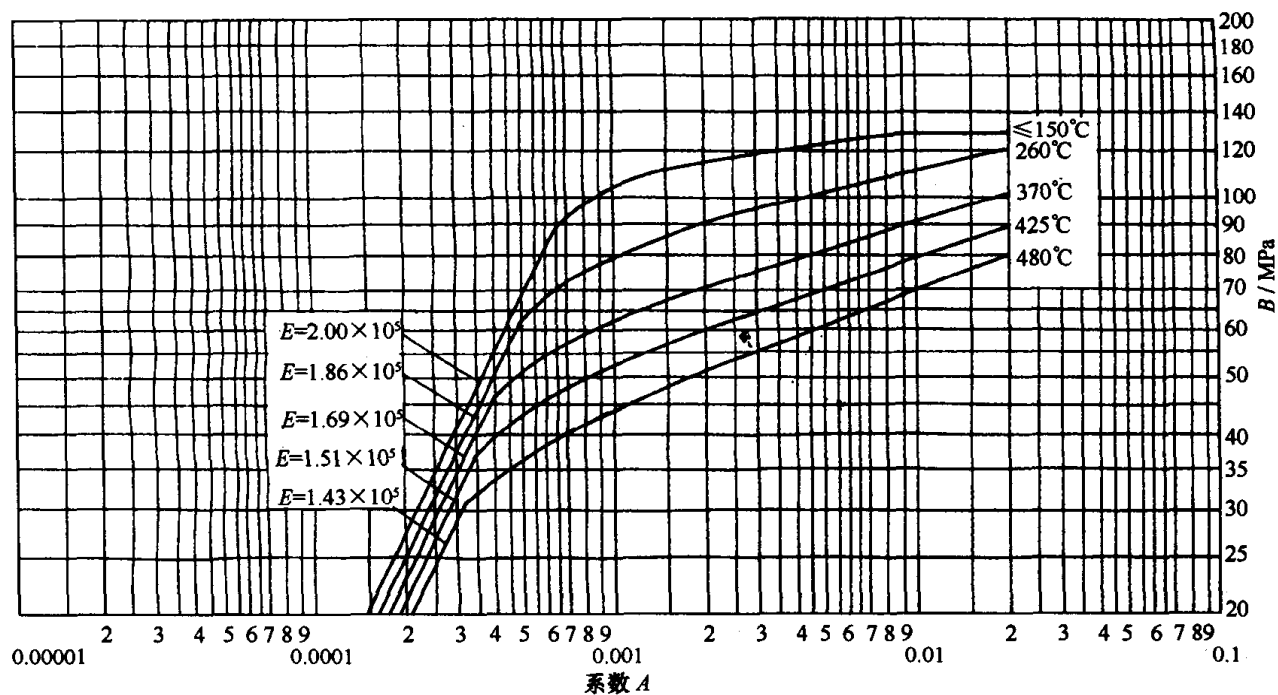


图 8-22 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(屈服点 $\sigma_s < 207\text{MPa}$ 的碳素钢)

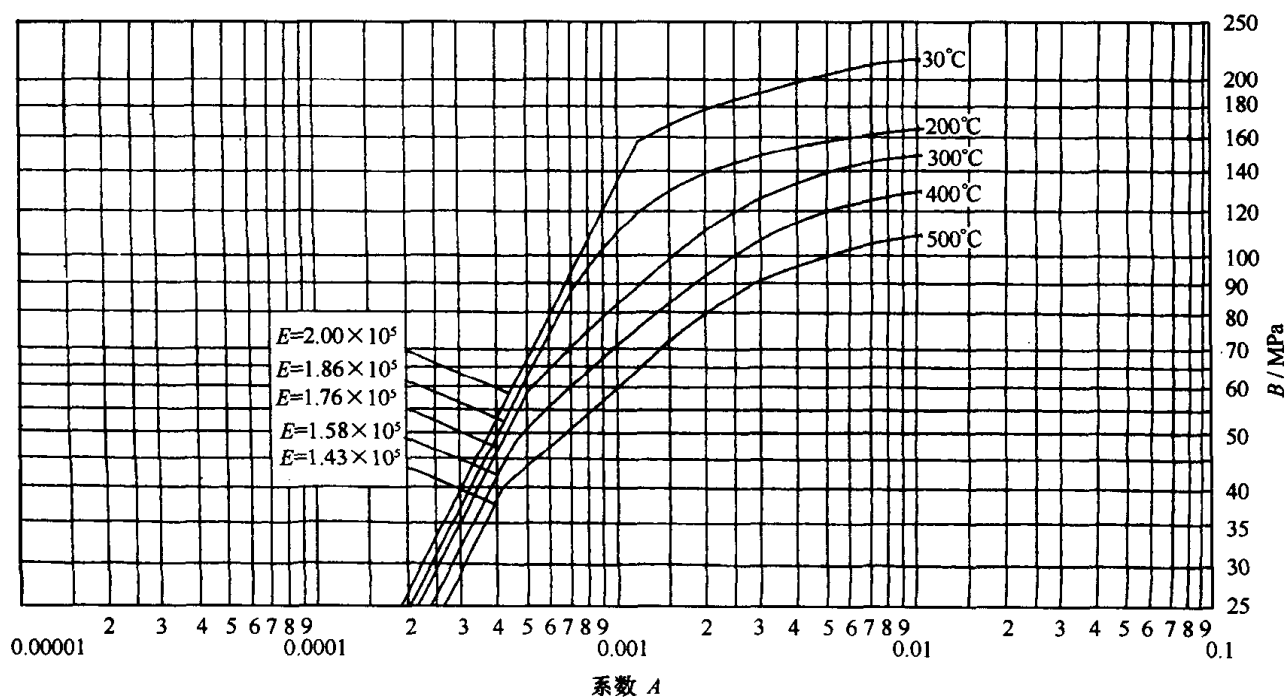


图 8-23 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(15MnVR 钢)

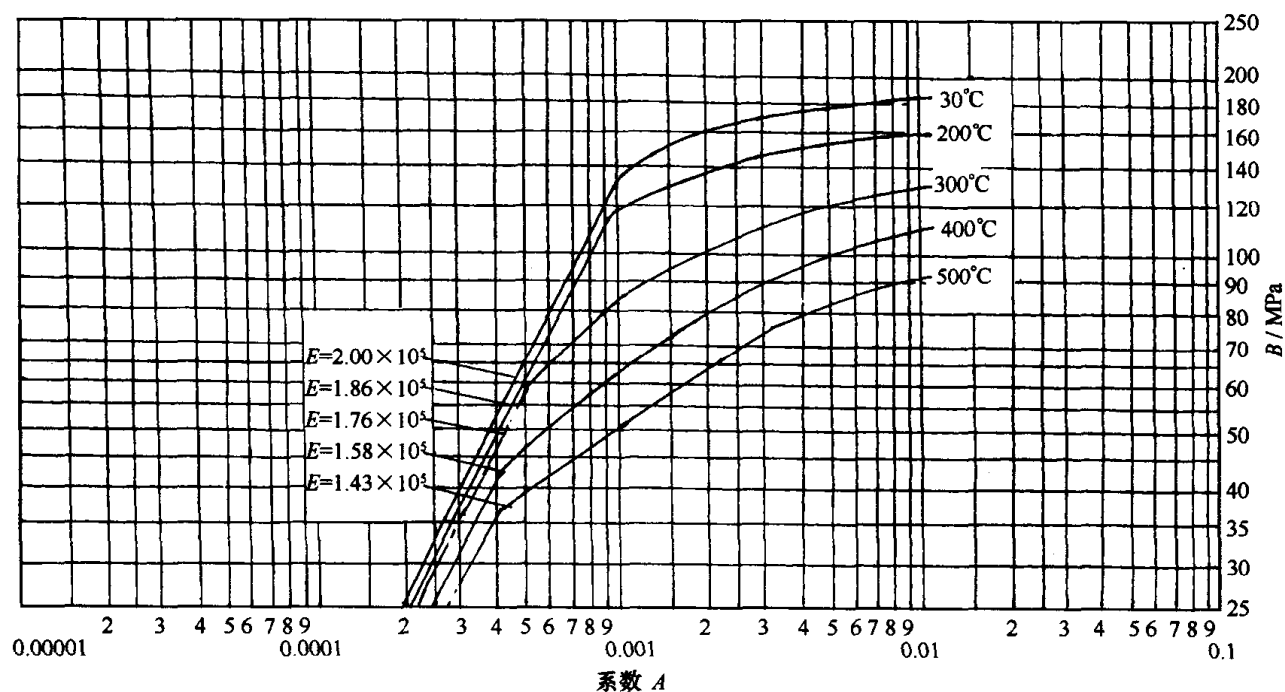


图 8-24 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(16MnR, 15CrMo 钢)

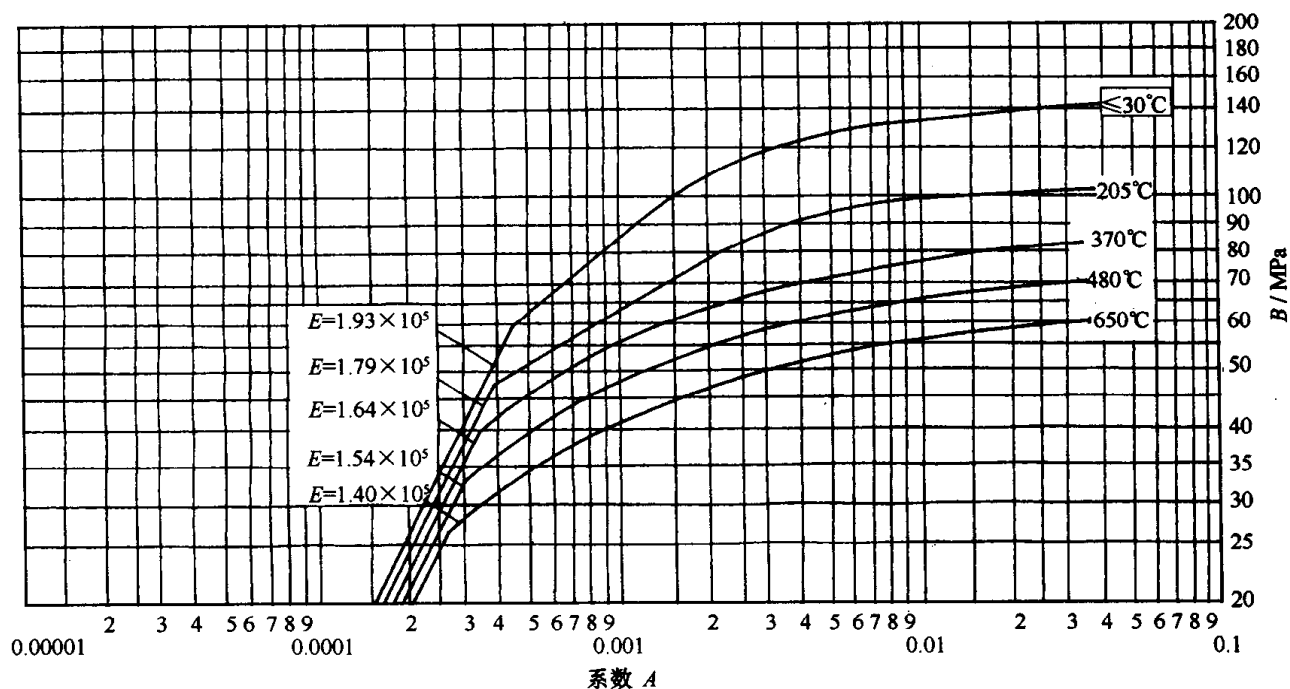


图 8-25 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(0Cr18Ni9 钢)

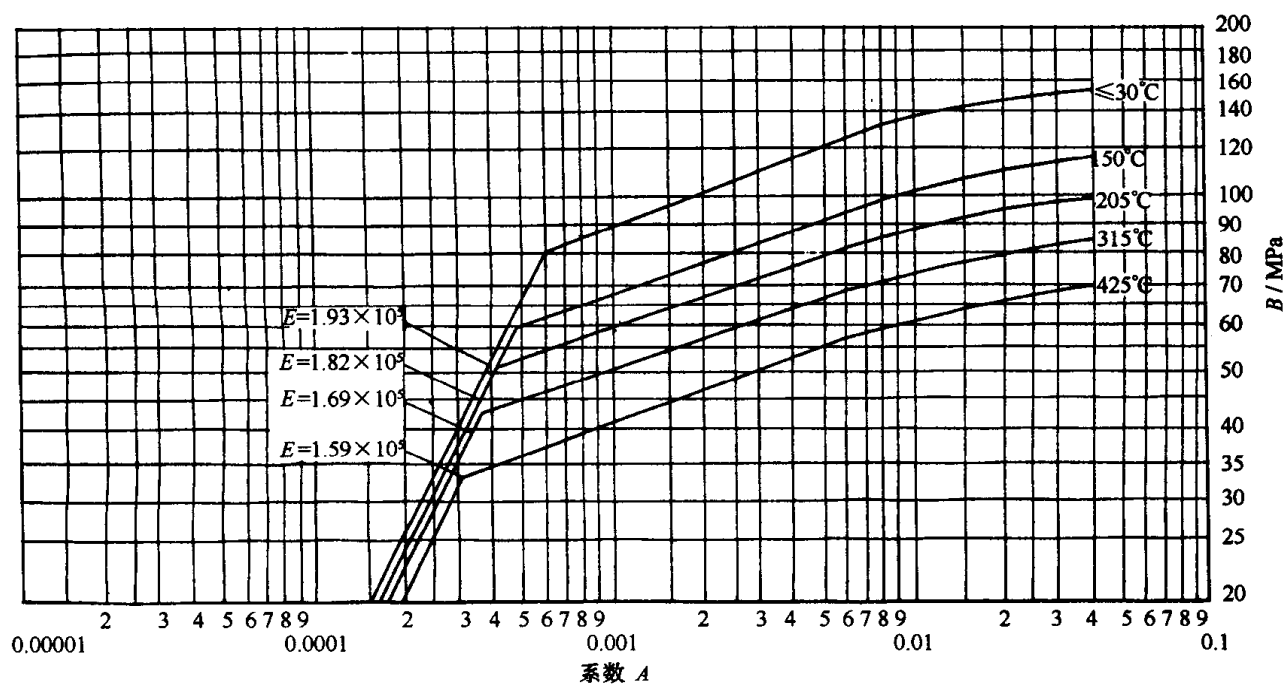


图 8-26 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(00Cr17Ni14Mo2、00Cr19Ni13Mo3 钢)

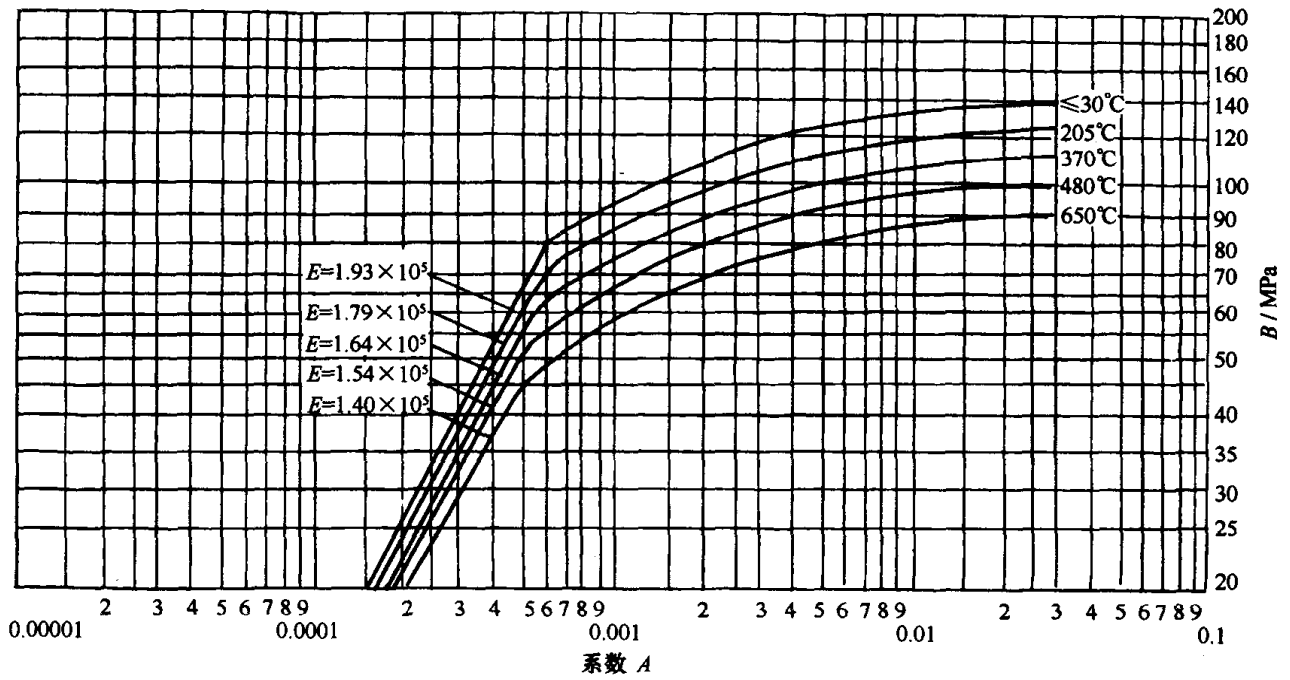


图 8-27 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(0Cr18Ni10Ti、0Cr17Ni12Mo2、0Cr19Ni13Mo3 钢)

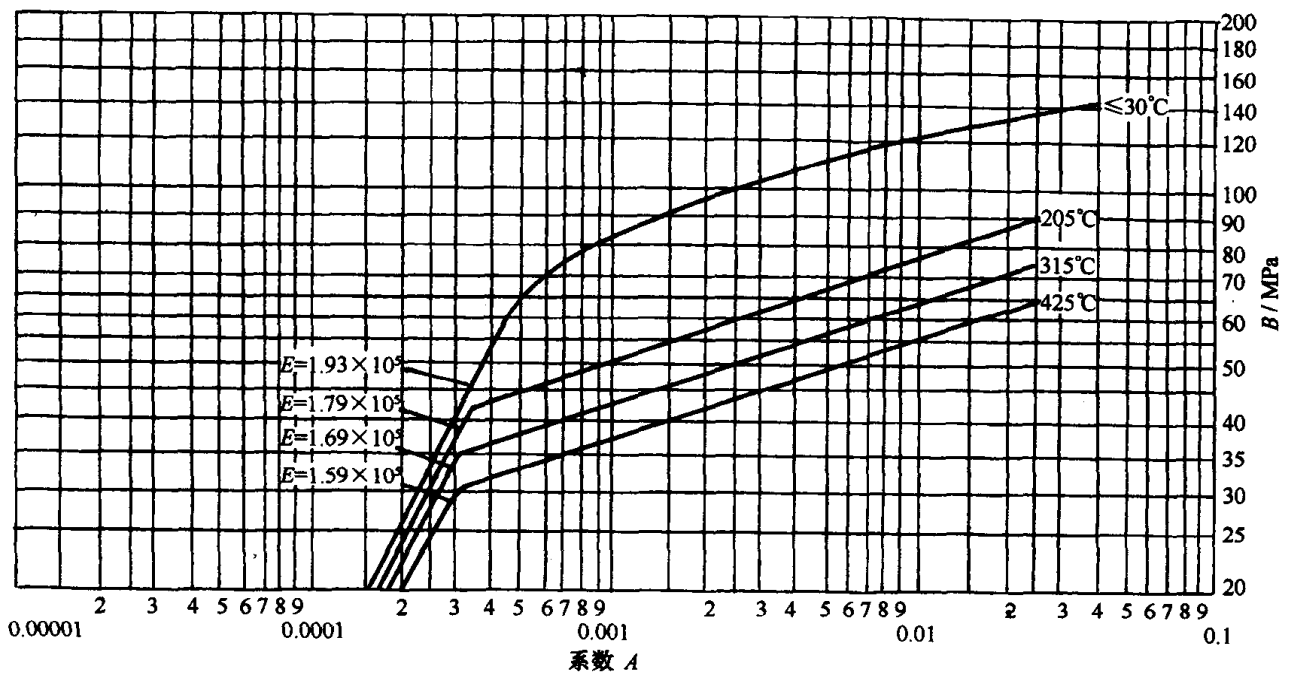


图 8-28 外压圆筒、管子和球壳厚度计算图
(00Cr19Ni10 钢)

图 8-29 ~ 图 8-32 均为美国金属材料实验曲线, 仅作参考。

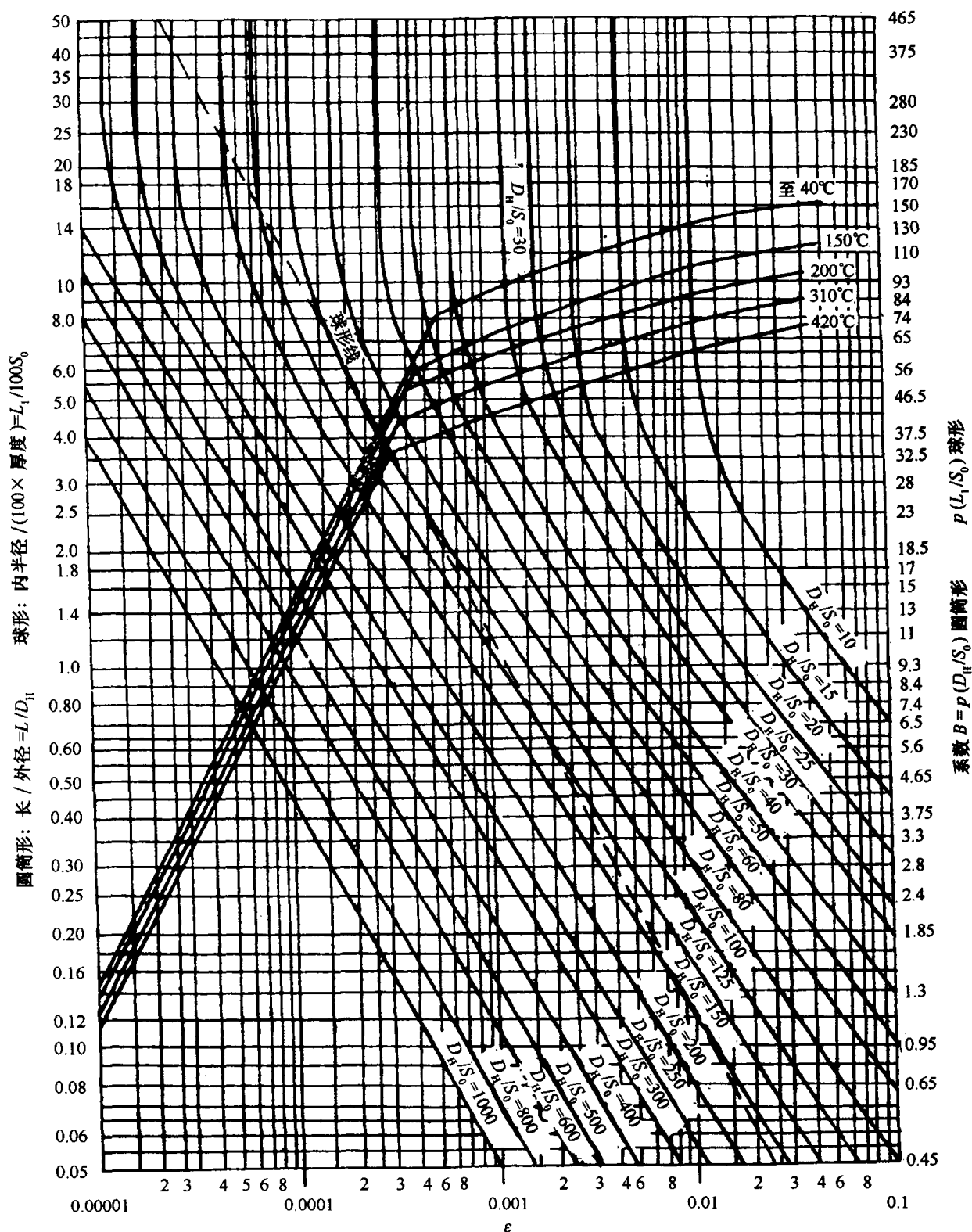


图 8-29 圆筒形或球形钢制外压容器壁厚计算图

(材料为: 00Cr17Ni13Mo2; 00Cr17Ni13Mo3)

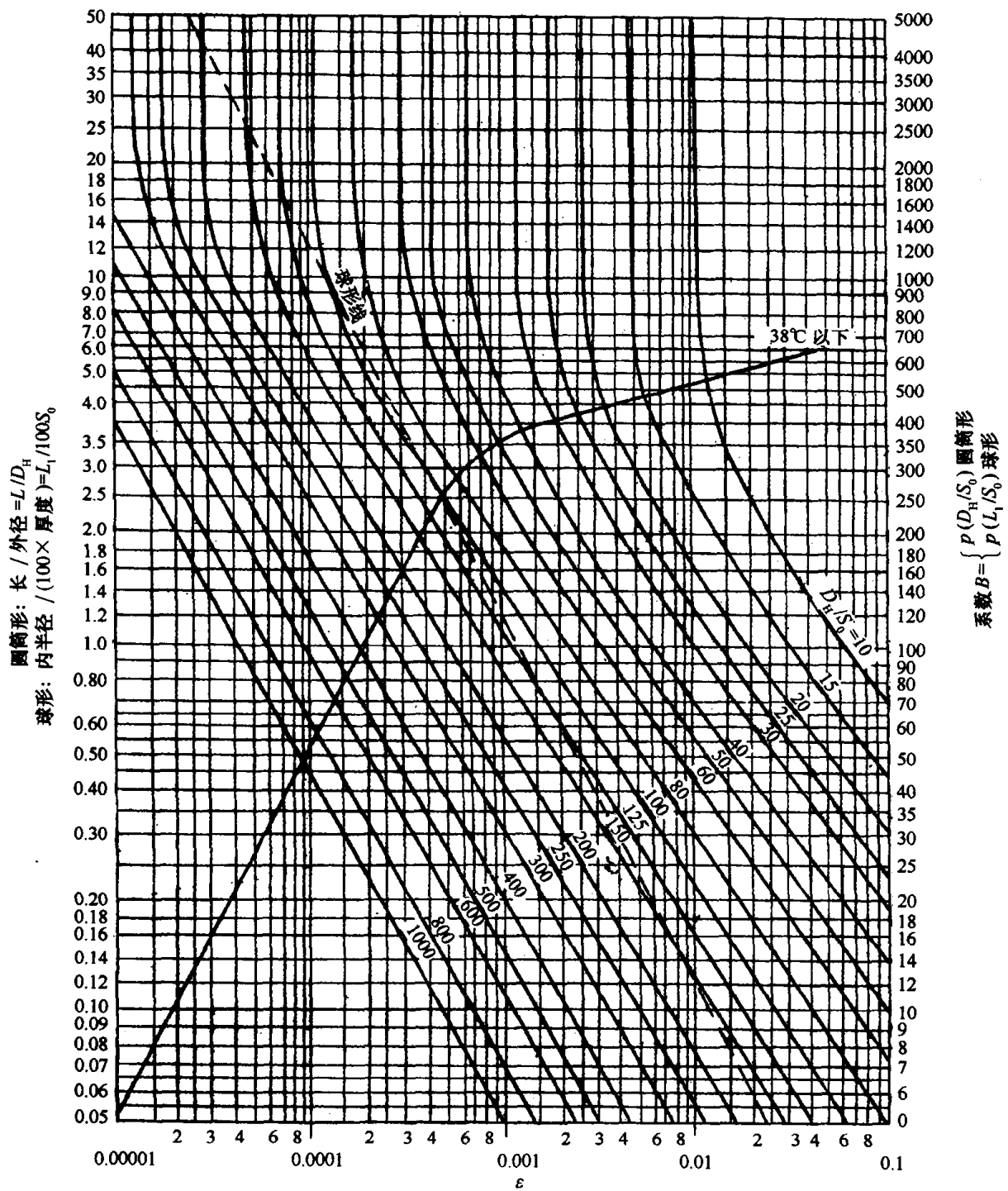


图 8-30 圆筒形或球形铝合金制外压容器壁厚计算图

(材料: 铝合金 5154(GR40A)O 及 H112 回火及 5454(GM31A)O, H32, H34 及 H112 回火)

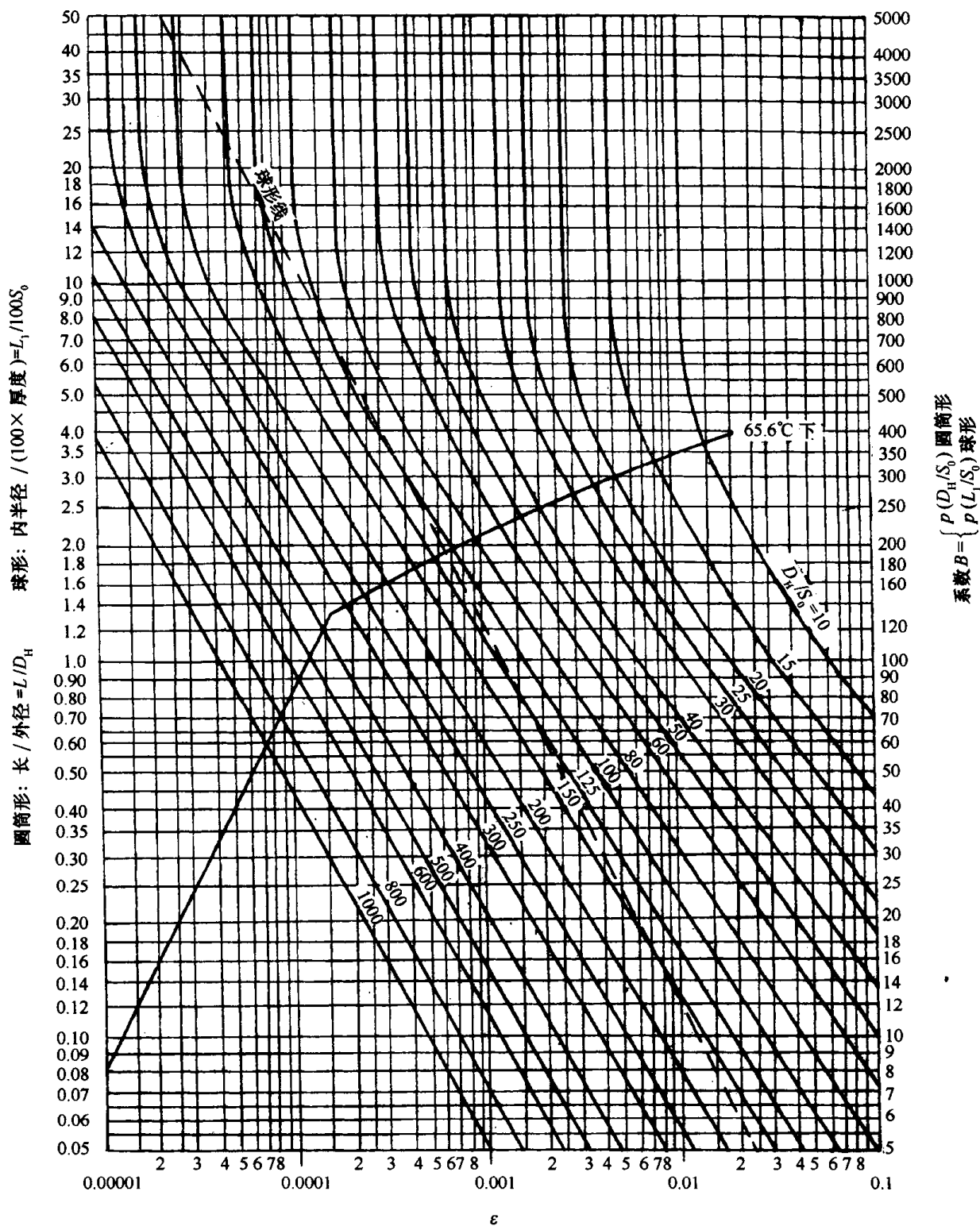


图 8-31 圆筒形或球形铜制外压容器壁厚计算图
(材料: Cu-DHP(退火铜))

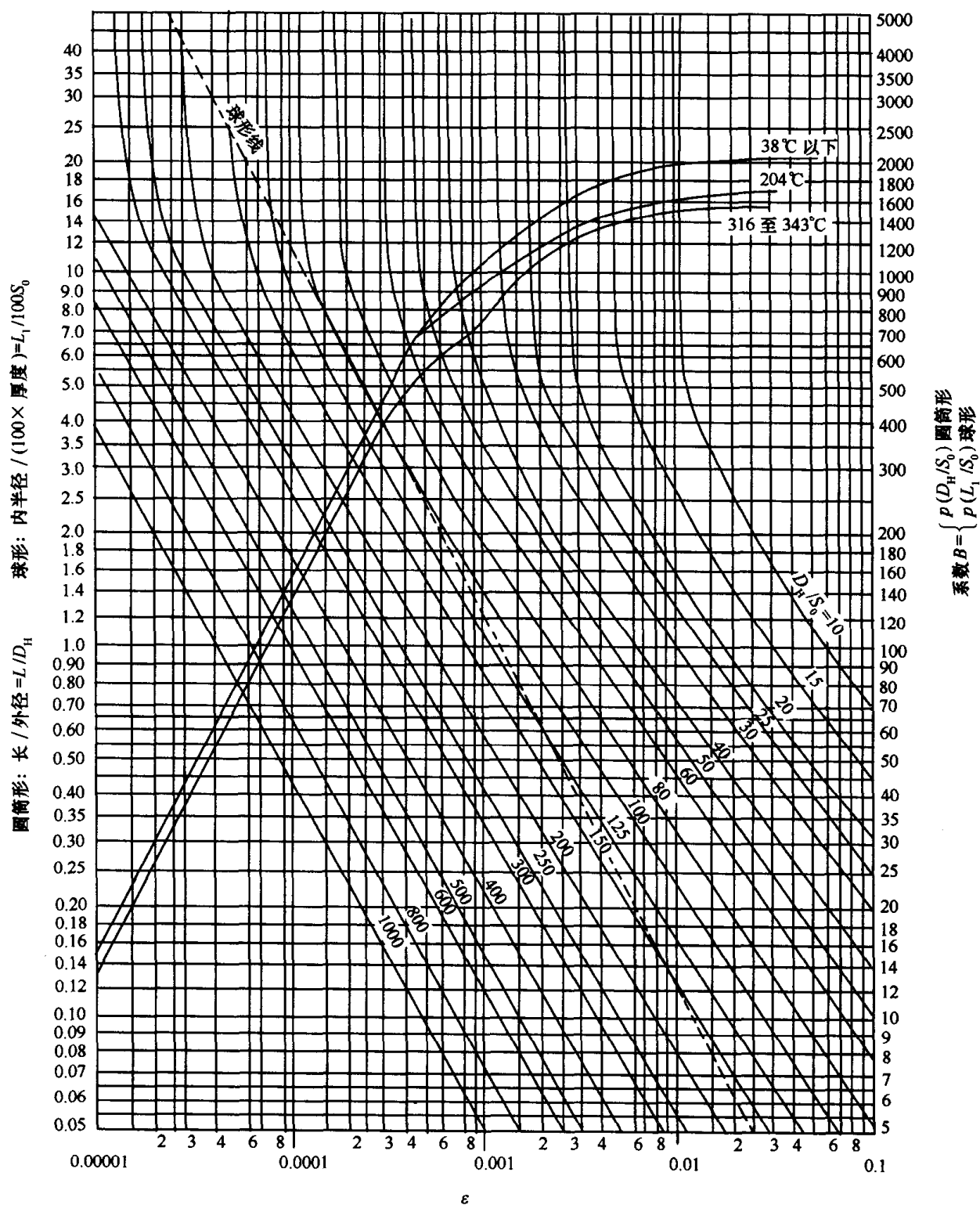


图 8-32 圆筒形或球形镍钼合金制外压容器壁厚计算图
(材料: 镍钼合金)

五、圆筒体加强圈的设计

(一) 概述

在设计外压圆筒体时,应选择尽可能小的 L/D 之值。当 L/D 的比值大于 5 时,建议设计加强圈,不大于 5 时,为了减少其壁厚亦可设计加强圈。

加强圈可以焊在圆筒体内侧或外侧,也可以不焊而装在筒体内部,但需要紧密配合,并配有足够数量的侧向支架。加强圈截面的主要类型如图 8-33 所示。



图 8-33 加强圈的类型

加强圈需要围绕圆筒体一圈,加强圈和筒体之间允许有局部间断,但间断部分的筒体最大弧长不得超过图 8-34 的规定值。

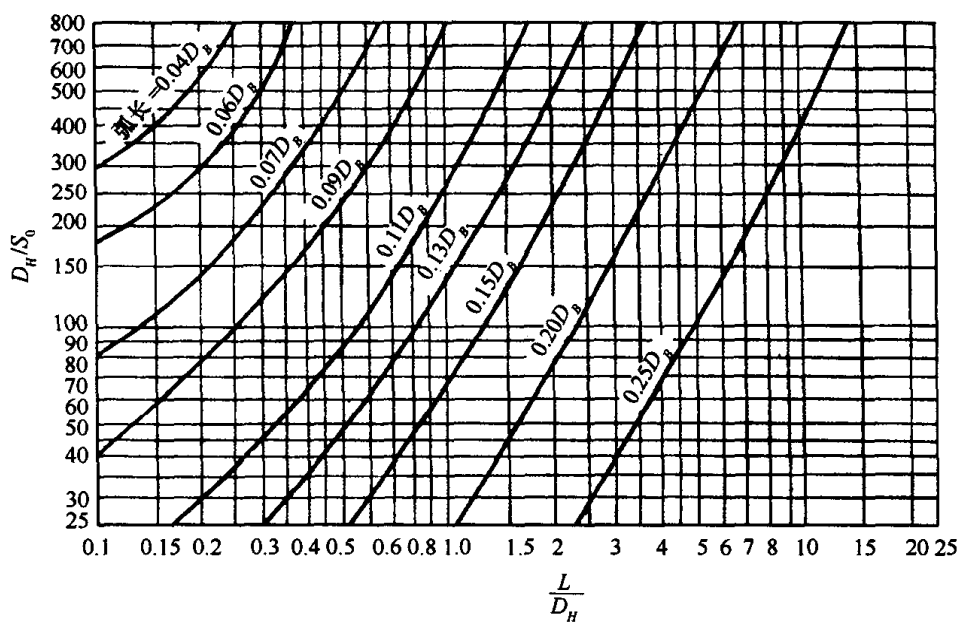


图 8-34 允许不加强的加强圈断口弧长

内部支撑或支架的负荷必须通过基本上连续的环分布到筒壁上。

加强圈断开后,必须设法补强。

加强圈若间断焊时,每边焊缝长度不小于筒体周长的一半。间断焊缝间的距离不小于 $8S$ 。

(二) 图表法计算加强圈

加强圈计算可利用图 8-29 ~ 图 8-32 曲线。

首先假设加强圈的尺寸,求出截面积 F 及其惯性矩 I ,然后按下式求出 B 值

$$B = \frac{pD_H}{S_0 + \frac{F}{L}} \quad (8-37)$$

式中 p ——外压设计压力[MPa];
 D_H ——筒体外径[mm];
 S_0 ——圆筒体计算壁厚(不包括壁厚附加量)[mm];
 F ——加强圈的截面积[mm²];
 L ——容器的计算长度[mm];
 B ——系数。

根据 B 和设计温度,利用图 8-29 ~ 图 8-32 查出 ϵ 值,再按下式计算加强圈横截面所必须的惯性矩 I_s :

$$I_s = \frac{D_H^2 L \left(S_0 + \frac{F}{L} \right)}{14} \epsilon \quad (8-38)$$

式中 ϵ ——筒体应变,查图 8-29 ~ 图 8-32。

必须满足条件 $I_s \leq I$, 且 I_s 接近 I 。

上面 I_s 的计算是考虑到一般情况下壳体的加强作用约为加强圈的 30% 的情况,对于外压壳体具有较大厚度时,加强圈的惯性矩 I 值计算可计入在加强圈两侧各为 $0.55 \sqrt{D_H S_0}$ 内的壳体惯性矩(若相邻两加强圈的壳体有效加强范围重叠时,重叠部分取一半计算)。采用这种计算方法时,应满足 $I \geq 1.3 I_s$, I_s 的计算方法同上。

外压圆筒加强圈的设计可参见 GB150-1998 标准中给出的相应公式进行计算。

六、封头强度计算

(一) 外压球形封头

封头壁厚按图 8-29 ~ 图 8-32 外压图表计算,其步骤如下:

① 首先设 S_0 , 并决定比值 $\frac{S_0}{L_1}$ 和 $\frac{L_1}{100 S_0}$ 。

② 根据所选用的材料,应用图 8-29 ~ 图 8-32。在图的左方找到 $\frac{L_1}{100 S_0}$ 值,并将此点沿水平方向移动到球形线上。

③ 从此交点出发,沿垂直方向移动到设计温度线上(遇中间温度值可用内插法计算)。

④ 从此点出发,沿水平方向移动到右边,并读出 B 值。

⑤ 用下列公式计算许用外压力:

$$[p] = \frac{B S_0}{L_1} \quad (8-39)$$

式中 L_1 ——等于球形封头的内半径 R_B 。

⑥ 比较 p 与 $[p]$ 值,若 $[p] < p$, 则必须增加壁厚,并重复上述计算步骤直至求得 $[p] \geq p$, 且接近于 p 时为止。

外压球形封头壁厚也可以用式(8-34) ~ 式(8-36) 计算。

(二) 外压凸形封头

圆筒体上的封头一般都用椭圆形封头(图 8-35),从受外压角度来讲,采用这种封头形式比较好。除椭圆形以外,还有碟形封头及无折边球形封头。碟形封头常用,无折边球形封头在圆筒体上少用,而在真空室门上多用。图 8-36 给出了椭圆封头及碟形封头基本尺寸。

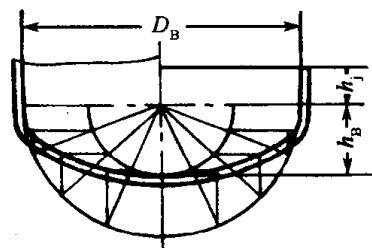
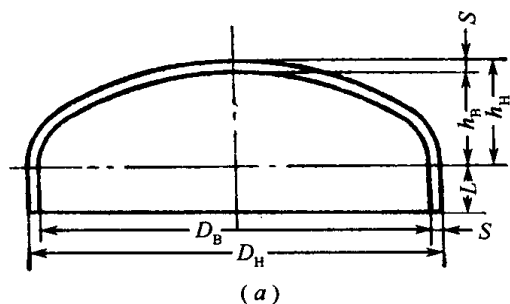
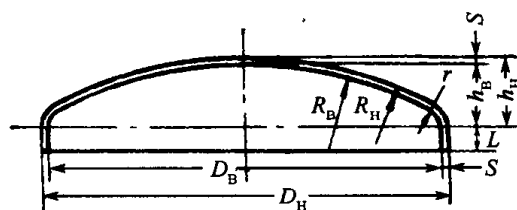


图 8-35 椭圆形封头



(a)



(b)

图 8-36 封头基本尺寸

(a) 椭圆形; (b) 碟形。

① 当 $\frac{L_1}{100S_0} \leq 1.5$ 时,外压凸形封头按内压封头公式计算,但须将设计压力乘以 1.7 倍,其公式如下:

椭圆形封头

$$S = \frac{1.7 p D_B}{4[\sigma]\gamma - p} \cdot \frac{D_B}{2h_B} + C \quad [\text{mm}] \quad (8-40)$$

碟形封头

$$S = \frac{1.7 p R_B M}{2[\sigma]\gamma} + C \quad [\text{mm}] \quad (8-41)$$

式中 p ——外压设计压力[MPa];

M ——系数, $M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R_B}{r}} \right)$, 可查表 8-15;

D_B ——封头直边部分内径[mm];

r ——碟形封头圆角半径[mm];

h_B ——封头凸出部分内边高度[mm];

γ ——焊缝系数(见二、(六)节);

$[\sigma]$ ——许用应力(见二、(五)节)[MPa];

R_B ——碟形封头球形部分内半径[mm];

C ——壁厚附加量(见二、(三)节)[mm]。

表 8-15 系数 M

R_B/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.5	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
R_B/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
R_B/r	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	$16\frac{2}{3}$
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

② 当 $\frac{L_1}{100S} > 1.5$ 时, 外压凸形封头按图表法计算, 其步骤与六、(一) 节相同。在这种情况下, L_1 的取值如下:

对于椭圆形封头

$$L_1 = K_1 D_H$$

式中 D_H ——直边部分外径[mm];

K_1 ——系数, 按表 8-16。

按计算的封头厚度, 应选成标准封头厚度, 对于焊接真空室, 封头厚度不应小于筒体的壁厚。

表 8-16 系数 K_1 值

$D_B/2h_B$	3	2.8	2.6	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	0.99	0.9	0.81	0.73	0.65	0.57	0.5

(三) 锥形封头

锥形封头和锥形筒体一样, 使用较少。封头锥角通常采用 60° 或 90° , 150° 用得较少。

外压锥形封头计算分为三种情况:

(1) 当圆锥角 $2\alpha \leq 45^\circ$ 时

其壁厚按承受相同外压的圆筒进行计算。圆筒壳体的长度:

① 无加强圈时, 等于圆锥的轴向长度。

② 有加强圈时, 等于加强圈之间轴向长度。

圆筒壳体的外径:

① 无加强圈时, 等于圆锥最大外径。

② 有加强圈时, 等于两加强圈之中比较大的外径。

(2) 当圆锥角为 $45^\circ < 2\alpha \leq 150^\circ$ 时

其壁厚按承受相同外压的圆筒进行计算。该圆筒壳体的外径等于圆锥最大外径除以 $\cos\alpha$, 即 $D_H/\cos\alpha$ 。而圆筒体的长度, 当无加强圈时, 等于锥体外径; 当有加强圈时, 就等于两加强圈之间轴向间距。

(3) 当圆锥角 $2\alpha > 150^\circ$ 时

其厚度按平封头计算。封头在任何截面的椭圆度应不大于 1%。

(四) 平盖

平盖多用于直径较小的圆筒体, 所用材料比凸形封头多, 但制造不需专用设备。为了减小平盖的厚度, 可以采用加强筋来补强, 如图 8-37 所示。平盖一般用于直径小于 1.5m 的圆筒形真空室。

封头与筒体焊接形式示于表 8-17 中。

1. 圆形平盖厚度计算公式

$$S = D \sqrt{\frac{Kp}{[\sigma]}} + C \quad (8-42)$$

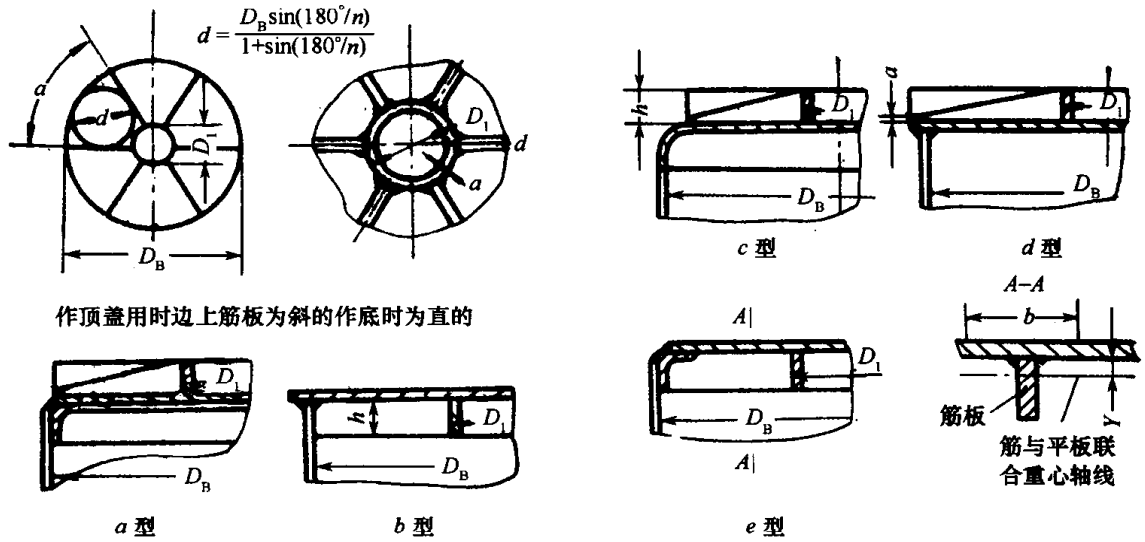


图 8-37 平盖加强筋的类型

表 8-17 圆形、非圆形平盖结构特征系数 K

固定法	序号	简 图	结构特征系数 K	适 用 范 围
与筒体成 一体或与筒 体对焊	1		$K = \frac{1}{4} \left[1 - \frac{r_1}{D} \left(1 + \frac{2r_1}{D} \right) \right]^2$ $K \geq 0.16$ 对矩形和椭圆形为 0.15, 上图 of 锻制平盖 下图 of 冲压平盖	圆形平盖 $r_1 \geq S_t$ $r_1 \geq 3S_t$
	2		0.25	$t \geq 1.25S_t$
与筒体角 焊及其它 焊接	3		$0.5m (m = S_0/S_t)$ 最小为 0.3 矩形和椭圆形为 0.5	$t \geq 2S_0$ $t \geq 1.25S_t$ } 取两者 之大值 $\phi \leq 45^\circ$ 筒体自平盖内表面计的延 出长度不小于 $2\sqrt{DS_t}$, 焊接 须采用焊透结构
	4		0.35	$S_1 \geq S_t + 3\text{mm}$
	5		0.25	$r \geq S_t/3$, 且 $r \geq 5\text{mm}$ $S_2 \geq \frac{2}{3} S_b$, 且 $S_2 \geq 5\text{mm}$

(续)

固定法	序号	简 图	结构特征系数 K	适 用 范 围
与筒体角 焊及其它 焊接	6		$0.5m (m = S_0/S_t)$ 最小为 0.3 矩形和椭圆形为 0.5	$t \geq 0.7S_t$ 筒体自平盖内表面计的延 出长度不小于 $2\sqrt{DS_t}$, 推荐 用 0.59MPa 之下的容器 对低合金高强度钢, 及使用 于 0°C 之下的容器均不宜采 用此种结构
	7		0.4	对低合金高强度钢及用于 0°C 之下的容器均不宜用此种 结构 $S_h \geq 2S_t$
	8		0.3 矩形和椭圆形为 0.3	
螺栓连接	9		圆形平盖 操作时 $0.3 + \frac{1.78P_L b'}{pD^3}$ 预紧时 $\frac{1.78P_L b'}{pD^3}$ 非圆形平盖 操作时 $0.3Z + \frac{6P_L b'}{pLa^2}$ 预紧时 $\frac{6P_L b'}{pLa^2}$	
	10		式中 a ——非圆形平盖的短轴长 度[mm]; b ——非圆形平盖的长轴长 度[mm]; L ——非圆形平盖螺栓中心 连线长度[mm]; Z ——非圆形平盖的形状系 数 $Z = 3.4 - 2.4 \frac{a}{b}$, 且 $z \leq 2.5$	

2. 椭圆形和矩形平盖的厚度计算公式

$$S = \alpha \sqrt{\frac{KZp}{[\sigma]}} + C \quad (8-43)$$

系数 $Z = 3.4 - 2.4 \frac{a}{b}$, 并规定 $Z \leq 2.5$ 。

式中 S ——平盖实际厚度(包括壁厚附加量)[mm];
 S_h ——平盖厚度(不包括腐蚀裕度)[mm];
 S_0 ——无缝筒体计算壁厚(不包括壁厚附加量)[mm];
 S_t ——筒体壁厚(不包括腐蚀裕度)[mm];
 C ——壁厚附加量[mm];
 $[\sigma]$ ——许用应力[MPa];
 p ——设计压力[MPa];
 K ——结构特征系数(见表 8-17);
 D ——计算直径[mm];
 b' ——垫片中心圆与螺栓中心圆间距[mm];
 P_L ——螺栓总载荷[N];
 H ——介质作用于平盖总压力[N];
 a ——椭圆形和矩形平盖的短轴长度[mm];
 b ——椭圆形和矩形平盖的长轴长度[mm];
 Z ——椭圆形和矩形平盖的形状系数;
 L ——平盖直边高度[mm]。

表 8-17 中的符号意义同上。

3. 加强筋的圆形封头结构及计算

图 8-37 给出了平盖加筋的几种主要类型。加强筋一般采用矩形截面,其厚度与高度之比为 1:5,加强筋的数量不少于 6,加强筋与平板的焊接可用双面间断角焊缝。 D_1 可取为 $0.33D_B$,此类型封头计算过程如下:

(1) 平板厚度计算

在加强筋之间平板的计算直径

$$d = \frac{D_B \sin \frac{180^\circ}{n}}{1 + \sin \frac{180^\circ}{n}} \quad (8-44)$$

$$S = 0.5d \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} + C \quad [\text{cm}] \quad (8-45)$$

式中 p ——外压设计压力[MPa];
 n ——筋的数量;
 $[\sigma]$ ——许用应力[MPa];
 C ——壁厚附加量[cm]。

(2) 用近似方法初步决定筋板尺寸

不考虑平板受负荷,在封头上每个区域负荷的一半由一个筋来承受,要求筋的断面模量

$$W_0 = \frac{0.065 D_B^3 p}{n [\sigma]} [\text{cm}^3] \quad (8-46)$$

如果筋的厚度为 S_1 , 与高度 h 之比为 $1:5$, 则初步近似得到筋板的厚度 $S_1 = 0.62 \times \sqrt[3]{W_0} [\text{cm}]$ 。

(3) 封头平板与加强筋合在一起承受负荷时总断面模量 W^* (断面系数) 的计算, 封头平板在加强筋附近能够承受负荷长度 $b = \frac{\pi D_1}{n} [\text{cm}]$ (如图 8-37A-A 所示)。

由联合重心至板边距离 (如图 8-37A-A 所示)

$$y = \frac{S_1 h^2 - \frac{\pi D_1}{n} (S - C)^2}{2 \left[S_1 h + \frac{\pi D_1}{n} (S - C) \right]} [\text{cm}]$$

$$W_0 = \frac{\frac{1}{12} S_1 h^3 + S_1 h (0.5h - y)^2 + \frac{\pi D_1}{n} (S - C) \left\{ [y + 0.5(S - C)]^2 + \frac{1}{12} (S - C)^2 \right\}}{h - y} \quad (8-47)$$

S_1 ——不包括腐蚀裕度的筋板厚度 $[\text{cm}]$ 。

(4) 筋板工作时应力 σ 的校核

$$\sigma = \frac{0.13 D_B^3 p}{n W_0} \leq 1.2 [\sigma] [\text{MPa}] \quad (8-48)$$

(5) 筋板在水压试验时应力 $\sigma_{\text{水}}$ 的校核

$$\sigma_{\text{水}} = \frac{0.13 D_B^3 p_{\text{水}}}{n W_0} \leq \frac{\sigma_s}{1.1} [\text{MPa}] \quad (8-49)$$

式中 $p_{\text{水}}$ ——水压试验压力 $[\text{MPa}]$;

σ_s ——材料屈服限 $[\text{MPa}]$ 。

如校核后与要求条件不符, 则应重新假定筋板尺寸进行计算。此种结构比较复杂, 对于大直径的封头比较适合。

(五) 与圆筒体连结的加强球盖

图 8-38 给出了外压加强球盖, 其临界负荷由下式确定

$$P_{\text{临界}} = \lambda_i \left(1 - 0.175 \frac{\varphi_0 - 20^\circ}{20^\circ} \right) \left(1 - 0.07 \frac{R/t_i}{400} \right) \times 0.3E \left(\frac{t_i}{R} \right)^2 \quad (8-50)$$

$$\text{使用条件} \begin{cases} 400 \leq R/t_i \leq 2000 \\ 20^\circ \leq \varphi_0 \leq 60^\circ \end{cases}$$

式中

$$t_i^2 = 0.89 \sqrt{t_j^3 t_F}$$

$$t_j^3 = \frac{t^3}{0.89} + \alpha \xi \cos^2 \varphi_0$$

$$t_F = \frac{t}{0.89} \beta \left(1 - 0.25 \frac{\xi}{t_j^3} \right) + \xi$$

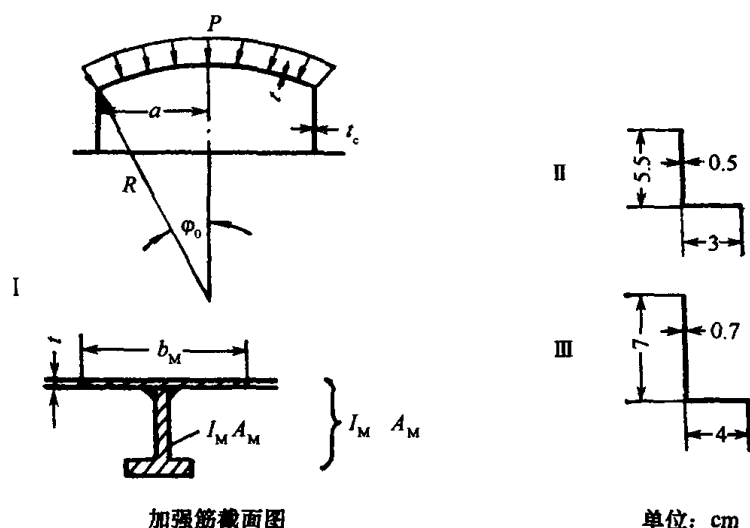


图 8-38 与圆筒体相连的加强球盖

$$\xi = \frac{I_M n}{2a\pi} \left(1 + 2 \frac{I_R}{I_M} \frac{m}{n} \right)$$

$$\zeta = \frac{1}{25} \sqrt[3]{A_M \frac{a}{n}} \left(1 + 2 \frac{m}{n} \right)$$

$$a = \left(\frac{6n}{25 + n} - 0.6 \right) \frac{m + 1}{m + 1.8}$$

$$\beta = 1 - 0.25 \frac{n}{a} b_M$$

$$b_M \leq \frac{A_M}{t} \leq 80t \leq 4.4 \frac{a}{n}$$

$$I_M \times 0.356 \leq 3I_M$$

$$A_M \times 0.356 \leq 2A_M$$

0.356 是通过卡门 - 特斯 (Karman-Tsien) 型能量标准得到的。

$$\lambda_i = 0.65 \left(1 + \frac{R/t_i}{400 + R/t_i} \right) \left(\frac{\rho_i \sqrt{a\rho_i/R}}{1 + \rho_i \sqrt{a\rho_i/R}} + 0.5 \right) \cos \varphi_0$$

$$\text{使用条件} \begin{cases} R/t_i \leq 2000 \\ 20^\circ \leq \varphi_0 \leq 60^\circ \end{cases}$$

$$\rho_i = \frac{t_{ci}}{t_i} \leq 2.5$$

符号 I_M ——加强筋惯性矩;
 A_M ——加强筋截面面积;
 I_R ——对于环加强筋相似 I_M ;
 n ——径向加强筋根数;

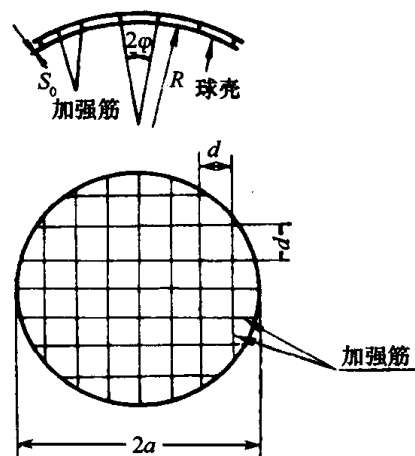
m ——环向加强筋根数；
 t ——球盖的厚度；
 t_c ——圆筒体壁厚；
 t_{ci} ——圆筒体理想厚度。

(六) 井字加强圆形球盖

图 8-39 给出了一个井字加强的球盖,总弯曲压力由下式确定

$$p_{\text{临界}} = 0.356E \left(\frac{S_0}{R} \right)^2 \left(1 + \frac{12I}{dS_0^3} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{A}{d \cdot S_0} \right)^{1/2} \quad (8-51)$$

式中 $p_{\text{临界}}$ ——临界外压力；
 S_0 ——球壳壁厚；
 R ——球面半径；
 I ——加球筋的惯性矩；
 E ——材料弹性模量；
 A ——加强筋截面面积；
 d ——加强筋间距。



当加强筋扭转刚性比较小时,局部弯曲(加强筋之间弯曲)应力为

图 8-39 井字加强球盖

$$\frac{\sigma_{\text{临界}}}{E} = \frac{1}{160} \varphi^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{S_0}{R} \right)^2 \cdot \frac{1}{\varphi^2} \quad (8-52)$$

表 8-18 给出了理论计算与实验值。表 8-19 为实验样品尺寸。

表 8-18 计算与实验结果比较

壳体号	实验弯曲压力 /MPa		理论弯曲压力 /MPa	
	局部弯曲	总弯曲	局部弯曲	总弯曲
1	3.10	3.80	2.62	7.10
2	4.00	4.48	4.48	8.55
3	—	3.24	4.55	3.31
4	—	3.86	7.72	4.14

表 8-19 实验样品尺寸

壳体号	加 强 筋	d/cm	R/cm
1	$\phi 1.65\text{mm}$ 丝(双面两个方向)	7.6	44
2	$\phi 1.65\text{mm}$ 丝(双面两个方向)	5.1	44
3	$\phi 0.89\text{mm}$ 丝(每面单方向)	5.1	43
4	$\phi 0.89\text{mm}$ 丝(每面单方向)	3.8	43

注:壳体材料:3003-0-铝, $S_0 = 0.51\text{mm}$, $2a = 61\text{mm}$; 铝丝用环氧树脂粘在壳体表面上

七、封头标准

(一) 钢制压力容器用封头标准(摘自 JB/T 4746-2002)

1. 范围

①本标准规定了钢制压力容器用封头的制造、检验、验收要求,同时给出了钢制压力容器用封头的常用型式与参数。

②本标准给出的型式与参数适用于表 8-20 所列类型的整板或拼板采用冲压、旋压及卷制成形的钢制压力容器用封头。

③本标准规定的检验与验收要求,既适用于表 8-20 所列类型的封头,也适用于其它型式与参数的整板或拼板采用冲压、旋压及卷制成形的钢制压力容器用椭圆形、碟形、折边锥形与球冠形封头。

2. 符号

A ——封头内表面积[m^2];

C_1 ——钢材厚度负偏差,按相应钢板标准选取[mm];

D_N ——封头公称直径(按表 8-21 规定)[mm];

D_i ——椭圆形、碟形和球冠形封头内直径或折边锥形封头大端内直径[mm];

D_{is} ——折边锥形封头小端内直径[mm];

D_o ——椭圆形、碟形和球冠形封头外直径或折边锥形封头大端外直径[mm];

D_{os} ——折边锥形封头小端外直径[mm];

H ——碟形、球冠形封头及以内径为基准椭圆形封头总深度或折边锥形封头及以外径为基准椭圆形封头总高度[mm];

H' ——折边锥形封头至锥顶总高度[mm];

h ——椭圆形、碟形及折边锥形封头直边高度[mm];

m ——封头质量[kg];

R_i ——碟形、球冠形封头球面部分内半径[mm];

r ——碟形、折边锥形封头大端过渡段转角内半径[mm];

r_s ——折边锥形封头小端过渡段转角内半径[mm];

V ——封头容积[m^3];

α ——折边锥形封头半顶角[$(^\circ)$];

δ_n ——封头名义厚度[mm];

δ_s ——钢材厚度,即钢板质量证明书中的规格厚度[mm]。

3. 型式参数与标记

①封头的名称、断面形状、类型代号及型式参数关系见表 8-20。

②各类型封头的尺寸、内表面积、容积、质量分别见表 8-21~表 8-34。

③封头标记按如下规定(JB/T 4746):

①×②—③×④

a. 按表 8-20 规定的封头类型代号;

b. 数字为封头公称直径[mm];

c. 数字为封头名义厚度[mm];

d. 封头材料牌号;

示例 1:

公称直径 2400mm、名义厚度 20mm、 $R_i = 1.0D_i$ 、 $r = 0.15D_i$ 、材质为 0Gr18Ni9 的碟形封头标记如下:

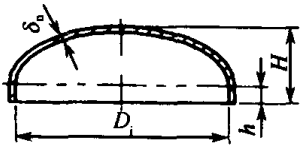
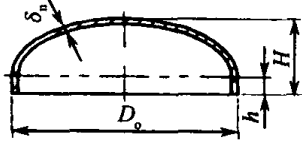
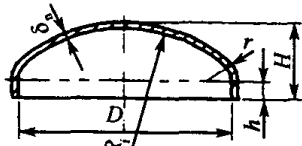
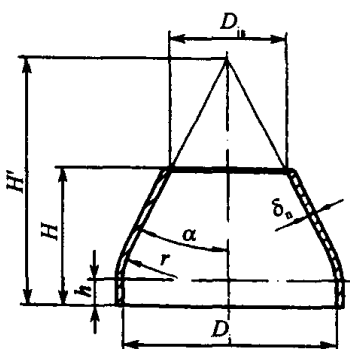
DHA2400×20-0Gr18Ni9 JB/T 4746

示例 2:

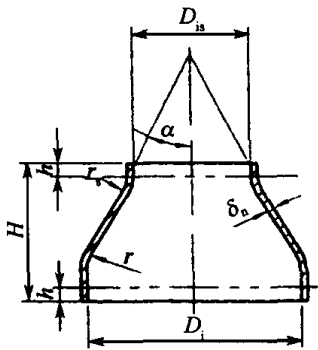
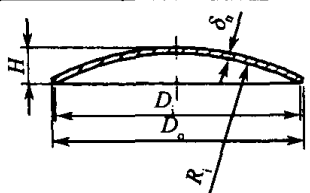
公称直径 325mm、名义厚度 12mm、材质为 16MnR、以外径为基准的椭圆形封头标记如下:

EHB 325×12-16MnR JB/T 4746

表 8-20 封头类型

名 称		断面形状	类型代号	型式参数关系
椭圆形封头	以内径为基准		EHA	$\frac{D_i}{2(H-h)} = 2$ $DN = D_i$
	以外径为基准		EHB	$\frac{D_o}{2(H-h)} = 2$ $DN = D_o$
碟形封头			DHA	$R_i = 1.0D_i$ $r = 0.15D_i$ $DN = D_i$
			DHB	$R_i = 1.0D_i$ $r = 0.10D_i$ $DN = D_i$
折边锥形封头			CHA	$r = 0.15D_i$ $\alpha = 30^\circ$ $DN = D_i$
			CHB	$r = 0.15D_i$ $\alpha = 45^\circ$ $DN = D_i$

(续)

名 称	断面形状	类型代号	型式参数关系
折边锥形封头		CHC	$r = 0.15D_i$ $\alpha = 60^\circ$ $r_s = 0.10D_s$ $DN = D_i$
球冠形封头		PSH	$R_i = 1.0D_i$ $DN = D_o$

4. 材料

①采用规则设计或分析设计的封头用钢板除应分别符合 GB150-1998 或 JB4732-1995 对压力容器元件用钢的规定外,还应符合图样或订货技术协议的要求。

②封头制造单位应按质量证明书对钢板进行验收,必要时还应进行复验。如无钢材生产单位的有效钢材质量证明书,则应按《压力容器安全技术监察规程》(1999 年)的有关规定处理。

5. 封头成形

①依据封头的类型、规格、材质,可采用冷冲压、热冲压、冷旋压、热旋压、冷卷、热卷等方法成形。

②成形封头的端部应切边,作为尺寸形状检测的测量基准,封头不允许毛边交货。端部如需要加工坡口时,坡口的形状与尺寸由供需双方在订货技术协议中确定。

③椭圆形、碟形、折边锥形封头的直边倾斜度确定方法如图 8-40 所示,倾斜度以符合表 8-21 为合格。测量封头直边倾斜度时,不应计入直边增厚部分。

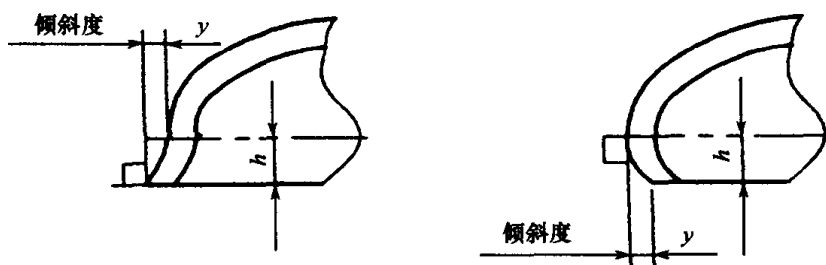


图 8-40 封头直边倾斜度确定方法

④封头与筒体对接是以外圆周长不以内直径为基准,由供需双方订货技术协议确定,外圆周长公差与内直径公差应符合下列要求。

封头切边后,在封头端面直径方向拉一根钢丝或放一直尺,用直角尺一直角边与拉紧的钢丝或直尺重合,另一直角边与封头接触,在直边部位测量直角尺与封头间的最大距离即为封头

表 8-21 倾斜度值 y

(单位:mm)

直边高度 h	倾 斜 度	
	向 外	向 内
25	≤ 1.5	≤ 1.0
40	≤ 2.5	≤ 1.5
其它	$6\%h$, 且不大于 5	$4\%h$, 且不大于 3

的直边倾斜度。

a. 以外圆周长为对接基准的封头切边后,在直边部分端部用钢卷尺实测外圆周长,外圆周长公差应符合表 8-22 的要求。外圆周长的设计值为: $\pi \times D_o$ 或 $\pi(\delta_s \times 2 + D_i)$,其中 π 取 3.1416。

表 8-22 外圆周长公差

(单位:mm)

公称直径 D_N	钢材厚度 δ_s	外圆周长公差
$300 \leq D_N < 600$	$2 \leq \delta_s < 4$	$-4 \sim +4$
	$4 \leq \delta_s < 6$	$-6 \sim +6$
	$6 \leq \delta_s < 16$	$-9 \sim +9$
$600 \leq D_N < 1000$	$4 \leq \delta_s < 6$	$-6 \sim +6$
	$6 \leq \delta_s < 10$	$-9 \sim +9$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-9 \sim +12$
$1000 \leq D_N < 1600$	$6 \leq \delta_s < 10$	$-9 \sim +9$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-9 \sim +12$
	$22 \leq \delta_s < 40$	$-12 \sim +18$
$1600 \leq D_N < 3000$	$6 \leq \delta_s < 10$	$-9 \sim +9$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-9 \sim +12$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-12 \sim +18$
$3000 \leq D_N < 4000$	$10 \leq \delta_s < 22$	$-9 \sim +12$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-12 \sim +18$
$4000 \leq D_N < 5000$	$12 \leq \delta_s < 22$	$-9 \sim +12$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-12 \sim +18$
$5000 \leq D_N \leq 6000$	$16 \leq \delta_s \leq 60$	$-12 \sim +18$

b. 以内直径为对接基准的封头切边后,在直边部分实测等距离分布的四个内直径,取其平均值。内直径公差应符合表 8-23 的要求。

表 8-23 内直径公差

(单位:mm)

公称直径 D_N	钢材厚度 δ_s	内直径公差
$300 \leq D_N < 600$	$2 \leq \delta_s < 4$	$-1.5 \sim +1.5$
	$4 \leq \delta_s < 6$	$-2 \sim +2$
	$6 \leq \delta_s < 16$	$-3 \sim +3$
$600 \leq D_N < 1000$	$4 \leq \delta_s < 6$	$-2 \sim +2$
	$6 \leq \delta_s < 10$	$-3 \sim +3$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-3 \sim +4$
$1000 \leq D_N < 1600$	$6 \leq \delta_s < 10$	$-3 \sim +3$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-3 \sim +4$
	$22 \leq \delta_s < 40$	$-4 \sim +6$

(续)

公称直径 D_N	钢材厚度 δ_s	内直径公差
$1600 \leq D_N < 3000$	$6 \leq \delta_s < 10$	$-3 \sim +3$
	$10 \leq \delta_s < 22$	$-3 \sim +4$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-4 \sim +6$
$300 \leq D_N < 4000$	$10 \leq \delta_s < 22$	$-3 \sim +4$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-4 \sim +6$
$4000 \leq D_N < 5000$	$12 \leq \delta_s < 22$	$-3 \sim +4$
	$22 \leq \delta_s < 60$	$-4 \sim +6$
$5000 \leq D_N \leq 6000$	$16 \leq \delta_s \leq 60$	$-4 \sim +6$

⑤封头切边后,在直边部分实测等距离分布的四个内直径,以实测最大值与最小值之差作为圆度公差,圆度公差应不大于 $0.5\% D_i$,且不大于 25mm;当 $\delta_s/D_i < 0.005$,且 $\delta_s < 12\text{mm}$ 时,应不大于 $0.8\% D_i$,且不大于 25mm。

⑥封头切边后,在封头端面任意两直径位置上放置直尺或拉紧钢丝,在直尺或钢丝交叉处等测量封头总深度(封头总高度),封头总深度(封头总高度)公差为 $(-0.2 \sim 0.6)\% D_i$ 。

⑦用弦长相当于封头内直径的间隙样板,检查封头内表面的形状公差,如图 8-41 所示。检查时应使样板垂直于待测表面,允许避开焊缝进行测量。椭圆形、碟形、球冠形封头内表面的形状公差应符合以下要求:

a. 样板与封头内表面间的最大间隙:外凸不得大于 $1.25\% D_i$;内凹不得大于 $0.625\% D_i$ 。

b. 样板轮廓曲线线性尺寸的极限偏差:按 GB/T 1804—2000 中 m 级的规定。

⑧碟形封头、折边锥形封头过渡段转角内半径不得小于表 8-20 或图样规定值。

⑨椭圆形、碟形与折边锥形封头的直边部分不得存在纵向皱折。封头切边后,用直尺测量椭圆形、碟形与折边锥形封头的直边高度,当封头公称直径 $D_N \leq 2000\text{mm}$ 时,直边高度 h 宜为 25mm;当封头公称直径 $D_N > 2000\text{mm}$ 时,直边高度 h 宜为 40mm。直边高度公差为 $(-5\% \sim 10\%)h$ 。

⑩对于按规则设计的封头,成形封头实测的最小厚度不得小于封头名义厚度减去钢板厚度负偏差 C_1 ,但当设计图样标注了封头成形后的最小厚度,可按实测的最小厚度不小于图样标注的最小厚度验收。对于按分析设计的封头,实测的最小厚度不得小于封头设计厚度。

a. 沿封头端面圆周 0° 、 90° 、 270° 三个方位,用超声波测厚仪、卡钳或千分卡尺,在厚度的必测部位检测成形封头的厚度。

b. 椭圆形与碟形、折边锥形、球冠形封头厚度的必测部位,分别如图 8-42、图 8-43、图 8-44 所示。

⑪封头成形前打磨的拼焊焊缝表面,封头成形后在符合下列所有条件时,可低于相邻母材表面:

- 焊缝部位实测的最小厚度,应符合⑩的规定;
- 焊缝表面不得低于母表面 0.5mm 以上。

⑫封头成形后的减薄率允许值见表 8-24。

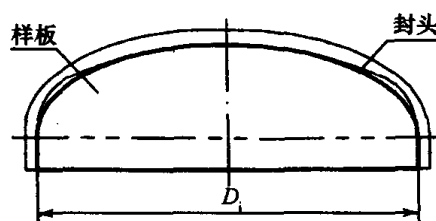
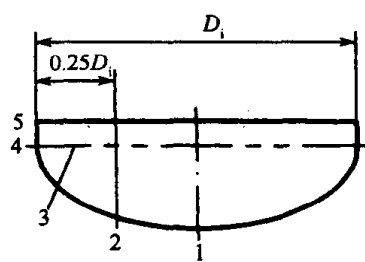
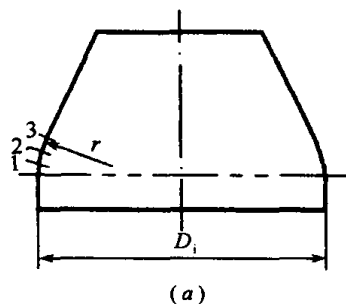


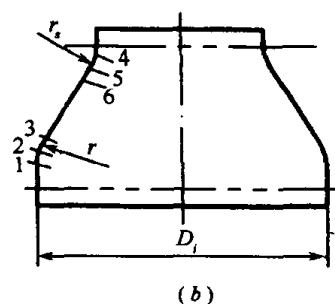
图 8-41



(注:数字处为测厚点)

图 8-42 椭圆形与碟形封头
厚度必测部位图

(a)

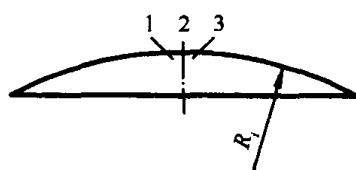


(b)

(注:数字处为测厚点)

图 8-43 折边锥形封头厚度必测部位图

(a)普通型;(b)带直边型。



(注:数字处为测厚点)

图 8-44 球冠形封头厚度必测部位图

表 8-24 封头成形厚度减薄率

公称直径 D_N/mm	钢材厚度 δ_s/mm	厚度减薄率/%	
		DHA 和 DHB 型	EHA 和 EHB 型
$300 \leq D_N < 600$	$6 \leq \delta_s < 8$	12	13
	$8 \leq \delta_s < 12$	11	12
	$12 \leq \delta_s < 16$	10	12
$600 \leq D_N < 1000$	$6 \leq \delta_s < 8$	12	13
	$8 \leq \delta_s < 12$	11	12
	$12 \leq \delta_s < 22$	10	12
$1000 \leq D_N < 1500$	$6 \leq \delta_s < 8$	13	14
	$8 \leq \delta_s < 12$	11	13
	$12 \leq \delta_s < 24$	11	12
	$24 \leq \delta_s < 60$	10	12
$1500 \leq D_N < 2000$	$6 \leq \delta_s < 12$	13	14
	$12 \leq \delta_s < 24$	12	13
	$24 \leq \delta_s < 60$	11	12
$2000 \leq D_N < 3000$	$6 \leq \delta_s < 12$	13	15
	$12 \leq \delta_s < 20$	12	13
	$20 \leq \delta_s < 34$	12	13
	$34 \leq \delta_s < 60$	11	12

七、封头标准

(续)

公称直径 D_N/mm	钢材厚度 δ_s/mm	厚度减薄率/%	
		DHA 和 DHB 型	EHA 和 EHB 型
$3000 \leq D_N < 4000$	$10 \leq \delta_s < 24$	13	15
	$24 \leq \delta_s < 34$	12	13
	$34 \leq \delta_s < 50$	12	13
	$50 \leq \delta_s < 60$	12	13
$4000 \leq D_N < 5000$	$12 \leq \delta_s < 24$	14	16
	$24 \leq \delta_s < 34$	13	14
	$34 \leq \delta_s < 50$	12	13
	$50 \leq \delta_s < 60$	11	12
$5000 \leq D_N \leq 6000$	$18 \leq \delta_s < 24$	14	16
	$24 \leq \delta_s < 34$	13	15
	$34 \leq \delta_s < 50$	12	13
	$50 \leq \delta_s < 60$	12	13

注:标准中资料性附录

(二)封头内表面积、容积及质量

1. 椭圆形封头

表 8-25 为 EHA 椭圆形封头内表面积及容积。表 8-26 为 EHA 椭圆封头质量。表 8-27 为 EHB 椭圆形封头内表面积、容积及质量。

表 8-25 EHA 椭圆形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	100	0.1211	0.0053	8	650	188	0.5090	0.0442
2	350	113	0.1608	0.0080	9	700	200	0.5861	0.0545
3	400	125	0.2049	0.0115	10	750	213	0.6686	0.0663
4	450	138	0.2548	0.0159	11	800	225	0.7566	0.0796
5	500	150	0.3103	0.0213	12	850	238	0.8499	0.0946
6	550	163	0.3711	0.0277	13	900	250	0.9487	0.1113
7	600	175	0.4374	0.0353	14	950	263	1.0529	0.1300

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
15	1000	275	1.1625	0.1505	41	3600	940	14.5008	6.5144
16	1100	300	1.3980	0.1980	42	3700	965	15.3047	7.0605
17	1200	325	1.6552	0.2545	43	3800	990	16.1303	7.6364
18	1300	350	1.9340	0.3208	44	3900	1015	16.9775	8.2427
19	1400	375	2.2346	0.3977	45	4000	1040	17.8464	8.8802
20	1500	400	2.5568	0.4860	46	4100	1065	18.7370	9.5498
21	1600	425	2.9007	0.5864	47	4200	1090	19.6493	10.2523
22	1700	450	3.2662	0.6999	48	4300	1115	20.5832	10.9883
23	1800	475	3.6535	0.8270	49	4400	1140	21.5389	11.7588
24	1900	500	4.0624	0.9687	50	4500	1165	22.5162	12.5644
25	2000	525	4.4930	1.1257	51	4600	1190	23.5122	13.4060
26	2100	565	5.0443	1.3508	52	4700	1215	24.5359	14.2844
27	2200	590	5.5229	1.5459	53	4800	1240	25.5782	15.2003
28	2300	615	6.0233	1.7588	54	4900	1265	26.6422	16.1545
29	2400	640	6.5453	1.9905	55	5000	1290	27.7280	17.1479
30	2500	665	7.0891	2.2417	56	5100	1315	28.8353	18.1811
31	2600	690	7.6545	2.5131	57	5200	1340	29.9644	19.2550
32	2700	715	8.2415	2.8055	58	5300	1365	31.1152	20.3704
33	2800	740	8.8503	3.1198	59	5400	1390	32.2876	21.5281
34	2900	765	9.4807	3.4567	60	5500	1415	33.4817	22.7288
35	3000	790	10.1329	3.8170	61	5600	1440	34.6975	23.9733
36	3100	815	10.8067	4.2015	62	5700	1465	35.9350	25.2624
37	3200	840	11.5021	4.6110	63	5800	1490	37.1941	26.5969
38	3300	865	12.2193	5.0463	64	5900	1515	38.4750	27.9776
39	3400	890	12.9581	5.5080	65	6000	1540	39.7775	29.4053
40	3500	915	13.7186	5.9972	—	—	—	—	—

表 8-26 EHA 椭圆形封头质量

(单位: kg)

序 号	公称 直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																		
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	
1	300	1.9	2.8	3.8	4.8	5.8	7.8													
2	350	2.5	3.7	5.0	6.3	7.6	10.3													
3	400		4.8	6.4	8.0	9.7	13.1	16.5	20.0	23.6										
4	450		5.9	7.9	10.0	12.0	16.2	20.4	24.8	29.2										
5	500		7.2	9.6	12.1	14.6	19.6	24.7	30.0	35.3	40.7	46.2	51.8							
6	550		8.6	11.5	14.4	17.4	23.4	29.5	35.7	41.9	48.3	54.8	61.4							
7	600		10.1	13.5	17.0	20.4	27.5	34.6	41.8	49.2	56.7	64.2	71.9							
8	650		11.7	15.7	19.7	23.8	31.9	40.2	48.5	57.0	65.6	74.4	83.2							
9	700		13.5	18.1	22.7	27.3	36.6	46.1	55.7	65.4	75.3	85.2	95.3							
10	750		15.4	20.6	25.8	31.1	41.7	52.5	63.4	74.4	85.6	96.8	108.3							
11	800			23.3	29.2	35.1	47.1	59.3	71.5	83.9	96.5	109.2	122.0	135.0	148.2	161.4	174.9			
12	850			26.1	32.8	39.4	52.9	66.5	80.2	94.1	108.1	122.3	136.6	151.1	165.8	180.6	195.5			
13	900			29.2	36.5	44.0	58.9	74.1	89.3	104.8	120.4	136.1	152.0	168.1	184.4	200.8	217.3			
14	950			32.3	40.5	48.8	65.3	82.1	99.0	116.1	133.3	150.7	168.3	186.0	203.9	222.0	240.3			
15	1000			35.7	44.7	53.8	72.1	90.5	109.1	127.9	146.9	166.0	185.3	204.8	224.5	244.4	264.4			
16	1100				53.7	64.6	86.5	108.6	130.9	153.3	176.0	198.9	221.9	245.2	268.6	292.2	316.1	340.1	364.3	
17	1200				63.5	76.4	102.2	128.3	154.6	181.1	207.8	234.7	261.8	289.1	316.6	344.4	372.3	400.5	428.9	
18	1300					89.2	119.3	149.7	180.3	211.1	242.2	273.4	304.9	336.7	368.6	400.8	433.2	465.9	498.7	
19	1400					102.9	137.7	172.7	208.0	243.5	279.2	315.2	351.4	387.9	424.6	461.5	498.7	536.2	573.8	
20	1500					117.7	157.4	197.4	237.6	278.1	318.9	359.9	401.1	442.7	484.4	526.5	568.8	611.4	654.2	
21	1600					133.4	178.4	223.7	269.2	315.0	361.1	407.5	454.1	501.1	548.3	595.7	643.5	691.5	739.8	
22	1700						200.7	251.6	302.8	354.3	406.1	458.1	510.5	563.1	616.0	669.3	722.8	776.6	830.7	

(续)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
23	1800						224.4	281.2	338.4	395.8	453.6	511.7	570.1	628.7	687.8	747.1	806.7	866.6	926.9
24	1900						249.3	312.5	375.9	439.7	503.8	568.2	632.9	698.0	763.4	829.1	895.2	961.6	1028.3
25	2000						275.6	345.3	415.4	485.8	556.6	627.7	699.1	770.9	843.0	915.5	988.3	1061.4	1134.9
26	2100						309.4	387.7	466.3	545.2	624.6	704.2	784.3	864.7	945.4	1026.6	1108.0	1189.9	1272.1
27	2200						338.6	424.2	510.2	596.5	683.2	770.3	857.8	945.6	1033.8	1122.4	1211.4	1300.7	1390.5
28	2300							462.4	556.0	650.1	744.5	839.3	934.5	1030.1	1126.1	1222.5	1319.3	1416.5	1514.1
29	2400							502.2	603.9	706.0	808.4	911.3	1014.6	1118.3	1222.4	1327.0	1431.9	1537.3	1643.0
30	2500							543.7	653.7	764.1	875.0	986.3	1098.0	1210.1	1322.7	1435.6	1549.1	1662.9	1777.2
31	2600							586.8	705.5	824.6	944.2	1064.2	1184.6	1305.5	1426.8	1548.6	1670.8	1793.5	1916.6
32	2700							631.6	759.3	887.4	1016.0	1145.0	1274.5	1404.5	1534.9	1665.8	1797.2	1929.0	2061.3
33	2800							678.0	815.0	952.5	1090.4	1228.9	1367.8	1507.1	1647.0	1787.3	1928.2	2069.4	2211.2
34	2900							726.0	872.7	1019.9	1167.5	1315.6	1464.3	1613.4	1763.0	1913.1	2063.7	2214.8	2366.4
35	3000							775.7	932.4	1089.5	1247.2	1405.4	1564.1	1723.3	1883.0	2043.2	2203.9	2365.1	2526.9
36	3100								994.0	1161.5	1329.5	1498.1	1667.2	1836.7	2006.9	2177.5	2348.7	2520.4	2692.6
37	3200								1057.7	1235.8	1414.5	1593.7	1773.5	1953.8	2134.7	2316.1	2498.1	2680.6	2863.6
38	3300										1502.1	1692.4	1883.2	2074.6	2266.5	2459.0	2652.0	2845.7	3039.8
39	3400										1592.3	1793.9	1996.1	2198.9	2402.2	2606.1	2810.6	3015.7	3221.4
40	3500										1685.2	1898.5	2112.4	2326.8	2541.9	2757.6	2973.8	3190.7	3408.1
41	3600										1780.7	2006.0	2231.9	2458.4	2685.5	2913.3	3141.6	3370.6	3600.2
42	3700										1878.8	2116.4	2354.7	2593.6	2833.1	3073.3	3314.0	3555.4	3797.4
43	3800										1979.6	2229.9	2480.8	2732.4	2984.6	3237.5	3491.0	3745.2	4000.0
44	3900										2082.9	2346.2	2610.2	2874.8	3140.1	3406.0	3672.6	3939.9	4207.8

(续)

序 号	公称直 径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
45	4000										2189.0	2465.6	2742.9	3020.9	3299.5	3578.8	3858.9	4139.5	4420.9
46	4100										2297.6	2587.9	2878.8	3170.5	3462.9	3755.9	4049.7	4344.1	4639.2
47	4200										2408.9	2713.1	3018.1	3323.8	3630.2	3937.3	4245.1	4553.6	4862.8
48	4300										2522.8	2841.3	3160.7	3480.7	3801.4	4122.9	4445.1	4768.0	5091.7
49	4400										2639.3	2972.5	3306.5	3641.2	3976.6	4312.8	4649.7	4987.4	5325.8
50	4500										2758.5	3106.7	3455.6	3805.3	4155.8	4507.0	4859.0	5211.7	5565.2
51	4600										2880.3	3243.8	3608.0	3973.0	4338.9	4705.4	5072.8	5440.9	5809.8
52	4700										3004.7	3383.8	3763.7	4144.4	4525.9	4908.2	5291.2	5675.1	6059.7
53	4800										3131.7	3526.8	3922.7	4319.4	4716.9	5115.2	5514.3	5914.2	6314.9
54	4900										3261.4	3672.8	4085.0	4498.0	4911.8	5326.4	5741.9	6158.2	6575.3
55	5000										3393.7	3821.7	4250.5	4680.2	5110.7	5542.0	5974.1	6407.2	6841.0
56	5100										3528.7	3973.6	4419.4	4866.0	5313.5	5761.8	6211.0	6661.0	7112.0
57	5200										3666.3	4128.5	4591.5	5055.4	5520.3	5985.9	6452.5	6919.9	7388.2
58	5300										3806.5	4286.3	4766.9	5248.5	5730.9	6214.3	6698.5	7183.6	7669.6
59	5400										3949.3	4447.0	4945.6	5445.2	5945.6	6446.9	6949.2	7452.3	7956.4
60	5500										4094.8	4610.8	5127.7	5645.5	6164.2	6683.9	7204.4	7725.9	8248.4
61	5600										4242.9	4777.4	5313.0	5849.4	6386.7	6925.1	7464.3	8004.5	8545.6
62	5700										4393.6	4947.1	5501.5	6056.9	6613.3	7170.5	7728.8	8288.0	8848.1
63	5800										4547.0	5119.7	5693.4	6268.0	6843.7	7420.3	7997.8	8576.4	9155.9
64	5900										4703.0	5295.3	5888.5	6482.8	7078.1	7674.3	8271.5	8869.7	9468.9
65	6000										4861.6	5473.8	6087.0	6701.2	7316.4	7932.6	8549.8	9168.0	9787.2

表 8-27 EHB 椭圆形封头内表面积、容积、质量

序号	公称直径 D_N/mm	总高度 H/mm	名义厚度 δ_n/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
1	159	65	4	0.0361	0.0009	1.1623
2			5	0.0351	0.0008	1.4342
3			6	0.0342	0.0008	1.6988
4			8	0.0324	0.0007	2.2066
5	219	80	5	0.0629	0.0020	2.5205
6			6	0.0616	0.0019	2.9950
7			8	0.0592	0.0018	3.9152
8	273	93	6	0.0930	0.0036	4.4653
9			8	0.0900	0.0034	5.8577
10			10	0.0871	0.0032	7.2035
11			12	0.0842	0.0030	8.5035
12	325	106	6	0.1292	0.0058	6.1529
13			8	0.1256	0.0055	8.0908
14			10	0.1222	0.0053	9.9735
15			12	0.1188	0.0051	11.8018
16	377	119	8	0.1671	0.0084	10.6795
17			10	0.1631	0.0081	13.1881
18			12	0.1592	0.0078	15.6336
19			14	0.1553	0.0075	18.0170
20	426	132	8	0.2116	0.0120	13.4444
21			10	0.2071	0.0116	16.6240
22			12	0.2026	0.0112	19.7326
23			14	0.1982	0.0108	22.7709

2. 碟形封头

表 8-28 为 DHA 碟形封头内表面积及容积。表 8-29 为 DHA 碟形封头质量。表 8-30 为 DHB 碟形封头内表面积及容积。表 8-31 为 DHB 碟形封头质量。

表 8-28 DHA 碟形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	93	0.1194	0.0050	34	2900	694	9.3158	3.2209
2	350	104	0.1579	0.0076	35	3000	716	9.9563	3.5560
3	400	115	0.2017	0.0109	36	3100	739	10.6182	3.9135
4	450	126	0.2509	0.0150	37	3200	761	11.3013	4.2942
5	500	138	0.3054	0.0201	38	3300	784	12.0057	4.6988
6	550	149	0.3652	0.0261	39	3400	806	12.7314	5.1280
7	600	160	0.4303	0.0333	40	3500	829	13.4784	5.5826
8	650	172	0.5007	0.0416	41	3600	851	14.2467	6.0633
9	700	183	0.5765	0.0512	42	3700	874	15.0362	6.5708
10	750	194	0.6576	0.0622	43	3800	897	15.8471	7.1058
11	800	205	0.7440	0.0746	44	3900	919	16.6792	7.6691
12	850	217	0.8358	0.0886	45	4000	942	17.5326	8.2614
13	900	228	0.9328	0.1043	46	4100	964	18.4073	8.8834
14	950	239	1.0352	0.1043	47	4200	987	19.3033	9.5359
15	1000	250	1.1429	0.1409	48	4300	1009	20.2206	10.2196
16	1100	273	1.3743	0.1851	49	4400	1032	21.1592	10.9351
17	1200	295	1.6269	0.2378	50	4500	1054	22.1190	11.6833
18	1300	318	1.9009	0.2995	51	4600	1077	23.1002	12.4649
19	1400	341	2.1961	0.3711	52	4700	1099	24.1026	13.2805
20	1500	363	2.5126	0.4533	53	4800	1122	25.1263	14.1309
21	1600	386	2.8505	0.5468	54	4900	1144	26.1713	15.0169
22	1700	408	3.2096	0.6524	55	5000	1167	27.2376	15.9392
23	1800	431	3.5899	0.7706	56	5100	1190	28.3252	16.8985
24	1900	453	3.9916	0.9024	57	5200	1212	29.4341	17.8955
25	2000	476	4.4146	1.0484	58	5300	1235	30.5642	18.9309
26	2100	513	4.9578	1.2613	59	5400	1257	31.7157	20.0055
27	2200	536	5.4280	1.4429	60	5500	1280	32.8884	21.1201
28	2300	558	5.9196	1.6412	61	5600	1302	34.0824	22.2752
29	2400	581	6.4324	1.8568	62	5700	1325	35.2978	23.4717
30	2500	604	6.9665	2.0906	63	5800	1347	36.5343	24.7104
31	2600	626	7.5219	2.3431	64	5900	1370	37.7922	25.9918
32	2700	649	8.0986	2.6152	65	6000	1392	39.0714	27.3168
33	2800	671	8.6965	2.9076	—	—	—	—	—

(单位:kg)

表 8-29 DHA 碟形封头质量

序号	公称 直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	300	1.9	2.9	3.9	4.9	5.9	7.9												
2	350	2.5	3.8	5.1	6.4	7.7	10.4												
3	400		4.8	6.5	8.1	9.8	13.3	16.8	20.3	24.0									
4	450		6.0	8.0	10.1	12.2	16.4	20.7	25.1	29.6									
5	500		7.3	9.8	12.3	14.8	19.9	25.1	30.4	35.8	41.3	46.8	52.5						
6	550		8.7	11.7	14.6	17.6	23.7	29.9	36.2	42.6	49.0	55.6	62.3						
7	600		10.3	13.7	17.2	20.7	27.9	35.1	42.5	49.9	57.5	65.2	73.0						
8	650		11.9	16.0	20.0	24.1	32.4	40.8	49.3	57.9	66.6	75.5	84.5						
9	700		13.7	18.3	23.0	27.7	37.2	46.8	56.5	66.4	76.4	86.5	96.8						
10	750		15.6	20.9	26.2	31.6	42.4	53.3	64.3	75.5	86.9	98.3	109.9						
11	800			23.6	29.6	35.7	47.8	60.2	72.6	85.2	98.0	110.9	123.9	137.1	150.4	163.9	177.6		
12	850			26.5	33.3	40.0	53.7	67.5	81.4	95.5	109.8	124.2	138.7	153.5	168.3	183.4	198.5		
13	900			29.6	37.1	44.6	59.8	75.2	90.7	106.4	122.2	138.2	154.4	170.7	187.2	203.9	220.7		
14	950			32.8	41.1	49.5	66.3	83.3	100.5	117.8	135.4	153.0	170.9	188.9	207.1	225.5	244.0		
15	1000			36.2	45.4	54.6	73.2	91.9	110.8	129.9	149.2	168.6	188.2	208.0	228.0	248.2	268.5		
16	1100				54.5	65.6	87.8	110.3	132.9	155.7	178.8	202.0	225.4	249.0	272.8	296.8	321.0	345.4	370.1
17	1200				64.5	77.6	103.8	130.3	157.0	183.9	211.0	238.4	265.9	293.7	321.6	349.8	378.2	406.8	435.7
18	1300					90.5	121.2	152.0	183.1	214.4	246.0	277.7	309.7	342.0	374.4	407.1	440.1	473.2	506.6
19	1400					104.5	139.8	175.4	211.2	247.3	283.6	320.1	356.9	394.0	431.3	468.8	506.6	544.7	583.0
20	1500					119.5	159.9	200.5	241.3	282.5	323.9	365.5	407.5	449.7	492.1	534.8	577.8	621.1	664.6
21	1600					135.5	181.2	227.2	273.5	320.0	366.8	414.0	461.3	509.0	557.0	605.2	653.7	702.5	751.6
22	1700						203.9	255.6	307.6	359.9	412.5	465.4	518.6	572.1	625.8	679.9	734.3	789.0	844.0

(续)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
23	1800						227.9	285.7	343.7	402.1	460.8	519.8	579.1	638.8	698.7	759.0	819.6	880.5	941.7
24	1900						253.3	317.4	381.9	446.7	511.8	577.2	643.0	709.1	775.6	842.4	909.5	977.0	1044.7
25	200						280.0	350.8	422.0	493.6	565.5	637.7	710.3	783.2	856.5	930.1	1004.1	1078.5	1153.1
26	2100						314.2	393.7	473.5	553.7	634.3	715.2	796.5	878.2	960.3	1042.7	1125.5	1208.6	1292.1
27	2200						343.9	430.8	518.1	605.8	693.9	782.4	871.2	960.4	1050.1	1140.1	1230.5	1321.2	1412.4
28	2300							469.6	564.8	660.3	756.2	852.5	949.2	1046.4	1143.9	1241.8	1340.1	1438.9	1538.0
29	2400							510.1	613.4	717.0	821.1	925.7	1030.6	1135.9	1241.7	1347.9	1454.5	1561.5	1669.0
30	2500							552.2	664.0	776.2	888.8	1001.8	1115.3	1229.2	1343.5	1458.3	1573.6	1689.2	1805.3
31	2600							596.0	716.6	837.6	959.1	1081.0	1203.3	1326.1	1449.4	1573.1	1697.3	1821.9	1947.0
32	2700							641.5	771.2	901.4	1032.0	1163.1	1294.7	1426.7	1559.2	1692.2	1825.7	1959.6	2094.0
33	2800							688.7	827.9	967.5	1107.7	1248.3	1389.4	1531.0	1673.1	1815.7	1958.8	2102.3	2246.4
34	2900							737.5	886.5	1036.0	1186.0	1336.5	1487.5	1639.0	1791.0	1943.5	2096.5	2250.0	2404.1
35	3000							788.0	947.1	1106.8	1267.0	1427.7	1588.9	1750.6	1912.9	2075.7	2239.0	2402.8	2567.1
36	3100								1009.8	1179.9	1350.6	1521.9	1693.6	1865.9	2038.8	2212.2	2386.1	2560.5	2735.5
37	3200								1074.4	1255.4	1437.0	1619.1	1801.7	1984.9	2168.7	2353.0	2537.9	2723.3	2909.3
38	3300										1526.0	1719.3	1913.2	2107.6	2302.6	2498.2	2694.4	2891.1	3088.4
39	3400										1617.7	1822.5	2027.9	2233.9	2440.5	2647.7	2855.5	3063.9	3272.8
40	3500										1712.0	1928.7	2146.1	2364.0	2582.5	2801.6	3021.3	3241.7	3462.6
41	3600										1809.1	2038.0	2267.5	2497.7	2728.4	2959.8	3191.9	3424.5	3657.8
42	3700										1908.8	2150.2	2392.3	2635.0	2878.4	3122.4	3367.1	3612.3	3858.3
43	3800										2011.2	2265.5	2520.5	2776.1	3032.4	3289.3	3546.9	3805.2	4064.1
44	3900										2116.2	2383.7	2651.9	2920.8	3190.4	3460.6	3731.5	4003.0	4275.3

(续)

序 号		公称直 径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
			2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
45	4000											2223.9	2505.0	2786.8	3069.2	3352.4	3636.2	3920.7	4205.9	4491.8
46	4100											2334.3	2629.3	2924.9	3221.3	3518.4	3816.1	4114.6	4413.8	4713.7
47	4200											2447.7	2756.6	3066.5	3377.1	3688.4	4000.4	4313.2	4626.7	4940.9
48	4300											2563.2	2886.9	3211.3	3536.5	3862.4	4189.1	4516.5	4844.6	5173.5
49	4400											2681.6	3020.2	3359.5	3699.6	4040.4	4382.0	4724.4	5067.5	5411.4
50	4500											2802.7	3156.5	3511.0	3866.4	4222.5	4579.4	4937.0	5295.5	5654.7
51	4600											2926.4	3295.8	3665.9	4036.8	4408.5	4781.0	5154.3	5528.4	5903.3
52	4700											3052.9	3438.1	3824.1	4211.0	4598.6	4987.1	5376.3	5766.4	6157.3
53	4800											3182.0	3583.4	3985.7	4388.8	4792.7	5197.4	5603.0	6009.4	6416.6
54	4900											3313.8	3731.8	4150.6	4570.3	4990.8	5412.1	5834.3	6257.3	6681.2
55	5000											3448.3	3883.1	4318.9	4755.4	5192.9	5631.2	6070.3	6510.3	6951.2
56	5100											3585.4	4037.5	4490.4	4944.3	5399.0	5854.6	6311.0	6768.4	7226.6
57	5200											3725.2	4194.9	4665.4	5136.8	5609.1	6082.3	6556.4	7031.4	7507.3
58	5300											3867.7	4355.2	4843.7	5333.0	5823.3	6314.4	6806.5	7299.5	7793.3
59	5400											4012.9	4518.6	5025.3	5532.9	6041.4	6550.8	7061.2	7572.5	8084.7
60	5500											4160.7	4685.0	5210.2	5736.4	6263.5	6791.6	7320.6	7850.6	8381.5
61	5600											4311.2	4854.4	5398.5	5943.6	6489.7	7036.7	7584.7	8133.7	8683.6
62	5700											4464.4	5026.8	5590.2	6154.5	6719.9	7286.2	7853.5	8421.7	8991.0
63	5800											4620.2	5202.2	5785.2	6369.1	6954.1	7540.0	8126.9	8714.9	9303.8
64	5900											4778.8	5380.6	5983.5	6587.4	7192.3	7798.1	8405.1	9013.0	9621.9
65	6000											4940.0	5562.1	6185.2	6809.3	7434.5	8060.7	8687.9	9316.1	9945.4

七、封头标准

表 8-30 DHB 碟形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	序号	公称直径 D_N/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	83	0.1127	0.0044	34	2900	602	8.6902	2.6779
2	350	93	0.1488	0.0066	35	3000	621	9.2869	2.9548
3	400	103	0.1898	0.0095	36	3100	641	9.9033	3.2502
4	450	112	0.2358	0.0130	37	3200	660	10.5396	3.5646
5	500	122	0.2868	0.0173	38	3300	679	11.1957	3.8987
6	550	132	0.3427	0.0224	39	3400	699	11.8715	4.2529
7	600	141	0.4035	0.0284	40	3500	718	12.5672	4.6280
8	650	151	0.4693	0.0355	41	3600	738	13.2826	5.0245
9	700	161	0.5401	0.0436	42	3700	757	14.0179	5.4430
10	750	170	0.6158	0.0528	43	3800	776	14.7729	5.8841
11	800	180	0.6964	0.0632	44	3900	796	15.5478	6.3484
12	850	190	0.7820	0.0750	45	4000	815	16.3424	6.8365
13	900	199	0.8726	0.0881	46	4100	834	17.1569	7.3489
14	950	209	0.9681	0.1026	47	4200	854	17.9912	7.8864
15	1000	219	1.0685	0.1186	48	4300	873	18.8452	8.4494
16	1100	238	1.2843	0.1555	49	4400	893	19.7191	9.0385
17	1200	258	1.5198	0.1993	50	4500	912	20.6127	9.6544
18	1300	277	1.7752	0.2506	51	4600	931	21.5262	10.2977
19	1400	296	2.0503	0.3100	52	4700	951	22.4594	10.9689
20	1500	316	2.3453	0.3782	53	4800	970	23.4125	11.6687
21	1600	335	2.6600	0.4556	54	4900	989	24.3853	12.3975
22	1700	354	2.9946	0.5430	55	5000	1009	25.3780	13.1561
23	1800	374	3.3489	0.6408	56	5100	1028	26.3904	13.9451
24	1900	393	3.7231	0.7497	57	5200	1048	27.4227	14.7649
25	2000	413	4.1170	0.8703	58	5300	1067	28.4748	15.6162
26	2100	447	4.6297	1.0551	59	5400	1086	29.5466	16.4997
27	2200	466	5.0680	1.2058	60	5500	1106	30.6383	17.4158
28	2300	486	5.5261	1.3703	61	5600	1125	31.7497	18.3652
29	2400	505	6.0039	1.5491	62	5700	1145	32.8810	19.3485
30	2500	524	6.5016	1.7427	63	5800	1164	34.0320	20.3663
31	2600	544	7.0190	1.9518	64	5900	1183	35.2029	21.4191
32	2700	563	7.5563	2.1770	65	6000	1203	36.3935	22.5076
33	2800	583	8.1134	2.4188	—	—	—	—	—

(单位:kg)

表 8-31 DHB 碟形封头质量

序 号	公称 直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	300	1.8	2.7	3.6	4.6	5.6	7.5												
2	350	2.4	3.6	4.8	6.0	7.3	9.8												
3	400		4.5	6.1	7.7	9.3	12.5	15.8	19.2	22.6									
4	450		5.6	7.6	9.5	11.5	15.4	19.5	23.7	27.9									
5	500		6.9	9.2	11.5	13.9	18.7	23.6	28.6	33.7	38.9	44.1							
6	550		8.2	11.0	13.7	16.6	22.3	28.1	34.0	40.0	46.2	52.4							
7	600		9.6	12.9	16.2	19.5	26.2	33.0	39.9	46.9	54.1	61.3							
8	650		11.2	15.0	18.8	22.6	30.4	38.3	46.2	54.4	62.6	70.9							
9	700		12.9	17.2	21.6	26.0	34.9	43.9	53.1	62.3	71.7	81.3							
10	750		14.6	19.6	24.6	29.6	39.7	50.0	60.3	70.9	81.5	92.3							
11	800			22.1	27.8	33.4	44.8	56.4	68.1	79.9	91.9	104.0	116.3	128.7	141.2	153.9	166.8		
12	850			24.8	31.1	37.5	50.3	63.2	76.3	89.5	102.9	116.4	130.1	144.0	158.0	172.1	186.4		
13	900			27.7	34.7	41.8	56.0	70.4	85.0	99.7	114.5	129.6	144.8	160.1	175.6	191.3	207.1		
14	950			30.7	38.5	46.3	62.1	78.0	94.1	110.4	126.8	143.4	160.2	177.1	194.2	211.5	228.9		
15	1000			33.9	42.5	51.1	68.5	86.0	103.7	121.6	139.7	157.9	176.3	194.9	213.7	232.7	251.8		
16	1100				51.0	61.3	82.1	103.1	124.3	145.7	167.3	189.1	211.0	233.2	255.5	278.1	300.8	323.8	346.9
17	1200				60.3	72.5	97.1	121.8	146.8	172.0	197.4	223.0	248.8	274.9	301.1	327.5	354.2	381.1	408.2
18	1300					84.6	113.2	142.1	171.2	200.5	230.0	259.8	289.7	320.0	350.4	381.0	411.9	443.0	474.4
19	1400					97.6	130.6	163.9	197.4	231.1	265.1	299.3	333.8	368.5	403.4	438.6	474.0	509.7	545.6
20	1500					111.6	149.3	187.3	225.5	263.9	302.7	341.7	380.9	420.4	460.2	500.2	540.5	581.0	621.8
21	1600					126.5	169.2	212.2	255.4	298.9	342.7	386.8	431.1	475.7	520.6	565.8	611.2	657.0	703.0
22	1700						190.3	238.6	287.2	336.1	385.3	434.7	484.5	534.5	584.8	635.5	686.4	737.6	789.1

(续)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																		28	30	32
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32			
23	1800						212.7	266.7	320.9	375.4	430.3	485.5	540.9	596.7	652.8	709.2	765.9	822.9	880.2			
24	1900						236.4	296.2	356.4	417.0	477.8	539.0	600.5	662.3	724.5	786.9	849.7	912.9	976.3			
25	2000						261.2	327.4	393.8	460.7	527.8	595.3	663.2	731.3	799.9	868.7	937.9	1007.5	1077.4			
26	2100						293.6	367.9	442.5	517.5	592.8	668.6	744.6	821.1	897.8	975.0	1052.5	1130.4	1208.6			
27	2200						321.2	402.5	484.1	566.1	648.4	731.1	814.3	897.7	981.6	1065.8	1150.5	1235.5	1320.8			
28	2300							438.6	527.5	616.8	706.5	796.5	887.0	977.8	1069.1	1160.7	1252.7	1345.2	1438.0			
29	2400							476.3	572.8	669.7	767.0	864.7	962.8	1061.4	1160.3	1259.6	1359.4	1459.6	1560.1			
30	2500							515.6	620.0	724.8	830.0	935.7	1041.8	1148.3	1255.2	1362.6	1470.4	1578.6	1687.3			
31	2600							556.4	669.0	782.1	895.6	1009.5	1123.8	1238.6	1353.9	1469.6	1585.7	1702.3	1819.3			
32	2700							598.8	719.9	841.5	963.6	1086.1	1209.0	1332.4	1456.3	1580.6	1705.4	1830.7	1956.4			
33	2800							642.8	772.7	903.2	1034.1	1165.4	1297.3	1429.6	1562.4	1695.7	1829.5	1963.7	2098.4			
34	2900							688.2	827.4	967.0	1107.0	1247.6	1388.7	1530.2	1672.3	1814.8	1957.9	2101.4	2245.4			
35	3000							735.3	883.9	1032.9	1182.5	1332.6	1483.2	1634.3	1785.9	1938.0	2090.6	2243.8	2397.4			
36	3100								942.2	1101.1	1260.5	1420.4	1580.8	1741.7	1903.2	2065.2	2227.7	2390.8	2554.4			
37	3200								1002.5	1171.4	1340.9	1510.9	1681.5	1852.6	2024.3	2196.5	2369.2	2542.5	2716.3			
38	3300									1243.9	1423.8	1604.3	1785.3	1966.9	2149.0	2331.7	2515.0	2698.8	2883.2			
39	3400									1318.6	1509.2	1700.5	1892.2	2084.6	2277.6	2471.1	2665.2	2859.8	3055.1			
40	3500									1395.4	1597.1	1799.4	2002.3	2205.7	2409.8	2614.4	2819.7	3025.5	3231.9			
41	3600										1687.5	1901.2	2115.4	2330.3	2545.8	2761.9	2978.5	3195.8	3413.8			
42	3700										1780.4	2005.7	2231.7	2458.3	2685.5	2913.3	3141.8	3370.8	3600.5			
43	3800										1875.8	2113.1	2351.1	2589.7	2828.9	3068.8	3309.3	3550.5	3792.3			
44	3900										1973.6	2223.2	2473.5	2724.5	2976.1	3228.3	3481.3	3734.8	3989.1			

(续)

序 号	公称 直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
45	4000										2073.9	2336.2	2599.1	2862.7	3127.0	3391.9	3657.5	3923.8	4190.8
46	4100										2176.8	2451.9	2727.8	3004.4	3281.6	3559.5	3838.1	4117.5	4397.5
47	4200										2282.1	2570.5	2859.6	3149.4	3439.9	3731.2	4023.1	4315.8	4609.1
48	4300										2389.9	2691.8	2994.5	3297.9	3602.0	3906.9	4212.5	4518.8	4825.8
49	4400										2500.1	2816.0	3132.5	3449.8	3767.8	4086.6	4406.1	4726.4	5047.4
50	4500										2612.9	2942.9	3273.6	3605.1	3937.4	4270.4	4604.2	4938.7	5274.0
51	4600										2728.2	3072.6	3417.9	3763.9	4110.7	4458.2	4806.6	5155.7	5505.5
52	4700										2845.9	3205.2	3565.2	3926.0	4287.7	4650.1	5013.3	5377.3	5742.1
53	4800										2966.1	3340.5	3715.7	4091.6	4468.4	4846.0	5224.4	5603.6	5983.6
54	4900										3088.9	3478.6	3869.2	4260.6	4652.9	5045.9	5439.8	5834.5	6230.0
55	5000										3214.1	3619.5	4025.9	4433.1	4841.1	5249.9	5659.6	6070.1	6481.5
56	5100										3341.7	3763.3	4185.7	4608.9	5033.0	5458.0	5883.8	6310.4	6737.9
57	5200										3471.9	3909.8	4348.6	4788.2	5228.7	5670.0	6112.3	6555.4	6999.3
58	5300										3604.6	4059.1	4514.5	4970.9	5428.0	5886.1	6345.1	6805.0	7265.7
59	5400										3739.7	4211.2	4683.6	5157.0	5631.2	6106.3	6582.3	7059.2	7537.1
60	5500										3877.4	4366.2	4855.9	5346.5	5838.0	6330.5	6823.9	7318.2	7813.4
61	5600										4017.5	4523.9	5031.2	5539.4	6048.6	6558.7	7069.8	7581.8	8094.7
62	5700										4160.1	4684.4	5209.6	5735.8	6262.9	6791.0	7320.0	7850.0	8381.0
63	5800										4305.2	4847.7	5391.1	5935.5	6480.9	7027.3	7574.6	8122.9	8672.2
64	5900										4452.8	5013.8	5575.8	6138.7	6702.7	7267.6	7833.6	8400.5	8968.4
65	6000										4602.9	5182.7	5763.5	6345.4	6928.2	7512.1	8096.9	8682.8	9269.6

3. 锥形封头

表 8-32 为锥形封头内表面积及容积。表 8-33 为 CHA 锥形封头质量。表 8-34 为 CHB 锥形封头内表面积及容积。表 8-35 为 CHB 锥形封头质量。表 8-36 为 CHC 锥形封头内表面积及容积。表 8-37 为 CHC 锥形封头质量。

表 8-32 CHA 锥形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总高度 H/mm	圆弧半径 r/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	297	45	0.1757	0.0087
2	350	342	53	0.2346	0.0135
3	400	387	60	0.3019	0.0196
4	450	433	68	0.3777	0.0275
5	500	478	75	0.4619	0.0371
6	550	523	83	0.5546	0.0488
7	600	569	90	0.6557	0.0628
8	650	614	98	0.7653	0.0791
9	700	659	105	0.8833	0.0981
10	750	705	113	1.0098	0.1198
11	800	750	120	1.1447	0.1446
12	850	795	128	1.2881	0.1725
13	900	841	135	1.4400	0.2039
14	950	886	143	1.6003	0.2388
15	1000	931	150	1.7690	0.2775
16	1100	1022	165	2.1319	0.3670
17	1200	1112	180	2.5285	0.4739
18	1300	1203	195	2.9590	0.5997
19	1400	1294	210	3.4233	0.7461
20	1500	1384	225	3.9214	0.9145
21	1600	1475	240	4.4533	1.1065
22	1700	1566	255	5.0190	1.3236
23	1800	1656	270	5.6185	1.5675
24	1900	1747	285	6.2518	1.8395
25	2000	1837	300	6.9190	2.1414
26	2100	1943	315	7.7189	2.5266
27	2200	2034	330	8.4583	2.8978
28	2300	2124	345	9.2316	3.3036
29	2400	2215	360	10.0387	3.7456
30	2500	2306	375	10.8796	4.2254
31	2600	2396	390	11.7543	4.7445
32	2700	2487	405	12.6628	5.3045
33	2800	2577	420	13.6051	5.9069
34	2900	2668	435	14.5813	6.5532
35	3000	2759	450	15.5912	7.2450

第八章 真空室设计

表 8-33 CHA 锥形封头质量

(单位: kg)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	300	2.8	4.2	5.7	7.1	8.6	11.6												
2	350	3.7	5.6	7.5	9.5	11.4	15.4												
3	400		7.2	9.7	12.2	14.7	19.7	24.9	30.2	35.6									
4	450		9.0	12.1	15.2	18.3	24.6	31.0	37.6	44.2									
5	500		11.0	14.7	18.5	22.3	30.0	37.8	45.7	53.8	61.9	70.2	78.7						
6	550		13.2	17.7	22.2	26.7	35.9	45.2	54.6	64.2	73.9	83.8	93.8						
7	600		15.6	20.9	26.2	31.5	42.3	53.3	64.4	75.6	87.0	98.6	110.2						
8	650		18.2	24.3	30.5	36.7	49.3	62.0	74.9	87.9	101.1	114.5	128.0						
9	700		21.0	28.1	35.2	42.4	56.8	71.4	86.2	101.2	116.3	131.6	147.1						
10	750		24.0	32.1	40.2	48.4	64.8	81.5	98.3	115.4	132.6	150.0	167.6						
11	800			36.3	45.5	54.8	73.4	92.2	111.3	130.5	149.9	169.5	189.3	209.3	229.5	249.9	270.6		
12	850			40.8	51.2	61.6	82.5	103.6	125.0	146.5	168.3	190.2	212.4	234.4	257.4	280.2	303.2		
13	900			45.6	57.2	68.8	92.1	115.7	139.5	163.5	187.7	212.2	236.8	261.7	286.8	312.1	337.7		
14	950			50.7	63.5	76.4	102.3	128.4	154.8	181.4	208.2	235.3	262.6	290.1	317.8	345.8	374.1		
15	1000			56.0	70.2	84.4	113.0	141.8	170.9	200.2	229.8	259.6	289.6	319.9	350.5	381.2	412.3		
16	1100				84.5	101.6	136.0	170.6	205.5	240.7	276.1	311.8	347.7	384.0	420.5	457.2	494.3	531.6	569.2
17	1200				100.1	120.4	161.0	202.0	243.3	284.8	326.6	368.8	411.2	453.9	496.9	540.1	583.7	627.6	671.8
18	1300					140.7	188.3	236.1	284.2	332.7	381.4	430.5	479.9	529.6	579.6	629.9	680.6	731.6	782.8
19	1400					162.7	217.6	272.8	328.4	384.3	440.5	497.1	553.9	611.2	668.7	726.6	784.9	843.5	902.4
20	1500					186.3	249.1	312.2	375.7	439.6	503.8	568.4	633.3	698.6	764.2	830.2	896.6	963.4	1030.5
21	1600					211.4	282.7	354.3	426.2	498.6	571.3	644.5	718.0	791.8	866.1	940.7	1015.8	1091.2	1167.0
22	1700						318.4	399.0	479.9	561.3	643.1	725.3	807.9	890.9	974.3	1058.2	1142.4	1227.0	1312.1
23	1800						356.2	446.3	536.8	627.8	719.2	811.0	903.2	995.9	1088.9	1182.5	1276.4	1370.8	1465.6
24	1900						396.2	496.3	596.9	697.9	799.4	901.4	1003.8	1106.6	1209.9	1313.7	1417.9	1522.5	1627.6
25	2000						438.2	549.0	660.2	771.8	884.0	996.6	1109.7	1223.2	1337.3	1451.8	1566.7	1682.2	1798.2
26	2100						488.7	612.1	736.0	860.4	985.3	1110.7	1236.5	1362.9	1489.8	1617.2	1745.1	1873.5	2002.4
27	2200						535.3	670.4	806.1	942.2	1078.9	1216.1	1353.8	1492.0	1630.8	1770.1	1909.9	2050.2	2191.1
28	2300							731.4	879.3	1027.7	1176.7	1326.3	1476.3	1627.0	1778.1	1929.8	2082.1	2234.9	2388.3
29	2400							795.0	955.7	1117.0	1278.8	1441.2	1604.2	1767.7	1931.8	2096.5	2261.8	2427.6	2594.0
30	2500							861.4	1035.4	1210.0	1385.2	1561.0	1737.4	1914.4	2091.9	2270.1	2448.8	2628.2	2808.2
31	2600							930.3	1118.2	1306.7	1495.8	1685.5	1875.9	2066.8	2258.4	2450.6	2643.4	2836.8	3030.8
32	2700							1001.9	1204.2	1407.1	1610.6	1814.8	2019.6	2225.1	2431.2	2637.9	2845.3	3053.3	3262.0
33	2800							1076.2	1293.4	1511.2	1729.7	1948.9	2168.7	2389.2	2610.4	2832.2	3054.7	3277.8	3501.6
34	2900							1153.1	1385.7	1619.0	1853.1	2087.8	2323.1	2559.2	2795.9	3033.4	3271.5	3510.3	3749.8
35	3000							1232.6	1481.3	1730.6	1980.7	2231.4	2482.8	2735.0	2987.9	3241.4	3495.7	3750.7	4006.4

七、封头标准

表 8-34 CHB 锥形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总高度 H/mm	圆弧半径 r/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	194	45	0.1390	0.0066
2	350	222	53	0.1847	0.0100
3	400	250	60	0.2367	0.0145
4	450	278	68	0.2952	0.0202
5	500	306	75	0.3601	0.0272
6	550	334	83	0.4313	0.0356
7	600	362	90	0.5091	0.0456
8	650	390	98	0.5932	0.0572
9	700	418	105	0.6837	0.0707
10	750	447	113	0.7807	0.0862
11	800	475	120	0.8840	0.1038
12	850	503	128	0.9938	0.1230
13	900	531	135	1.1100	0.1458
14	950	559	143	1.2327	0.1705
15	1000	587	150	1.3617	0.1978
16	1100	643	165	1.6390	0.2609
17	1200	700	180	1.9420	0.3362
18	1300	756	195	2.2706	0.4247
19	1400	812	210	2.6249	0.5275
20	1500	868	225	3.0049	0.6456
21	1600	924	240	3.4105	0.7802
22	1700	981	255	3.8418	0.9323
23	1800	1037	270	4.2988	1.1029
24	1900	1093	285	4.7814	1.2932
25	2000	1149	300	5.2897	1.5042
26	2100	1220	315	5.9226	1.7889
27	2200	1277	330	6.4869	2.0496
28	2300	1333	345	7.0769	2.3344
29	2400	1389	360	7.6925	2.6445
30	2500	1445	375	8.3388	2.9808
31	2600	1502	390	9.0008	3.3445
32	2700	1558	405	9.6934	3.7366
33	2800	1614	420	10.4117	4.1583
34	2900	1670	435	11.1557	4.6104
35	3000	1726	450	11.9253	5.0943

第八章 真空室设计

表 8-35 CHB 锥形封头质量

(单位:kg)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	300	2.4	3.6	4.9	6.1	7.4	10.0												
2	350	3.2	4.8	6.4	8.1	9.8	13.2												
3	400		6.2	8.3	10.4	12.5	16.9	21.3	25.9	30.5									
4	450		7.7	10.3	12.9	15.6	21.0	26.5	32.1	37.8									
5	500		9.4	12.5	15.7	19.0	25.5	32.2	38.9	45.8	52.8	60.0	67.2						
6	550		11.2	15.0	18.8	22.7	30.5	38.4	46.5	54.7	63.0	71.4	80.0						
7	600		13.2	17.7	22.2	26.7	35.9	45.2	54.7	64.3	74.0	83.9	93.9						
8	650		15.4	20.6	25.8	31.1	41.8	52.6	63.5	74.6	85.9	97.3	108.9						
9	700		17.7	23.7	29.8	35.8	48.1	60.5	73.1	85.8	98.7	111.7	124.9						
10	750		20.3	27.1	34.0	40.9	54.8	69.0	83.3	97.7	112.4	127.2	142.1						
11	800			30.7	38.4	46.3	62.0	78.0	94.1	110.4	126.9	143.6	160.5	177.5	194.7	212.1	229.7		
12	850			34.5	43.2	52.0	69.7	87.6	105.7	123.9	142.4	161.0	179.9	198.9	218.1	237.6	257.2		
13	900			38.5	48.2	58.0	77.8	97.7	117.8	138.2	158.7	179.5	200.4	221.5	242.9	264.5	286.2		
14	950			42.7	53.5	64.4	86.3	108.4	130.7	153.2	175.9	198.9	222.0	245.4	269.0	292.8	316.8		
15	1000			47.2	59.1	71.1	95.3	119.6	144.2	169.0	194.0	219.3	244.8	270.5	296.4	322.5	348.9		
16	1100				71.1	85.5	114.5	143.8	173.2	203.0	232.9	263.1	293.6	324.3	355.2	386.4	417.8	449.5	481.5
17	1200				84.2	101.3	135.6	170.1	204.9	240.0	275.3	310.9	346.8	382.9	419.3	456.0	493.0	530.2	567.7
18	1300					118.4	158.4	198.7	239.3	280.1	321.3	362.7	404.5	446.5	488.8	531.4	574.3	617.4	660.9
19	1400					136.8	183.0	229.5	276.3	323.4	370.8	418.5	466.5	514.9	563.5	612.5	661.8	711.4	761.3
20	1500					156.5	209.3	262.5	315.9	369.7	423.8	478.3	533.1	588.2	643.6	699.4	755.5	811.9	868.7
21	1600					177.6	237.4	297.7	358.2	419.2	480.4	542.0	604.0	666.3	729.0	792.0	855.4	919.2	983.2
22	1700						267.3	335.1	403.2	471.7	540.6	609.8	679.4	749.4	819.7	890.4	961.5	1033.0	1104.9
23	1800						299.0	374.7	450.8	527.3	604.2	681.5	759.2	837.3	915.7	994.6	1073.9	1153.5	1233.6
24	1900						332.5	416.6	501.1	586.1	671.5	757.2	843.4	930.0	1017.1	1104.5	1192.4	1280.7	1369.4
25	2000						367.7	460.7	554.1	647.9	742.2	836.9	932.1	1027.7	1123.7	1220.2	1317.1	1414.5	1512.2
26	2100						410.9	514.7	619.1	723.8	829.1	934.7	1040.9	1147.5	1254.6	1362.1	1470.1	1578.5	1687.4
27	2200						449.9	563.6	677.8	792.4	907.5	1023.1	1139.2	1255.7	1372.7	1490.2	1608.2	1726.7	1845.7
28	2300						490.8	614.7	739.1	864.1	989.5	1115.4	1241.8	1368.8	1496.2	1624.2	1752.6	1881.6	2011.0
29	2400						533.4	668.0	803.2	938.8	1075.0	1211.7	1349.0	1486.7	1625.0	1763.8	1903.2	2043.0	2183.4
30	2500						577.7	723.5	869.8	1016.7	1164.1	1312.0	1460.5	1609.6	1759.1	1909.3	2059.9	2211.2	2362.9
31	2600						623.9	781.2	939.2	1097.7	1256.7	1416.3	1576.5	1737.3	1898.6	2060.5	2222.9	2385.9	2549.5
32	2700						671.8	841.2	1011.2	1181.7	1352.9	1524.6	1696.9	1869.8	2043.3	2217.4	2392.1	2567.3	2743.2
33	2800						721.5	903.3	1085.8	1268.9	1452.6	1636.9	1821.8	2007.3	2193.4	2380.1	2567.4	2755.4	2944.0
34	2900						772.9	967.7	1163.1	1359.2	1555.8	1753.1	1951.0	2149.6	2348.8	2548.6	2749.0	2950.1	3151.8
35	3000						826.2	1034.3	1243.1	1452.5	1662.6	1873.4	2084.7	2296.8	2509.5	2722.8	2936.8	3151.4	3366.7

表 8-36 CHC 锥形封头内表面积、容积

序号	公称直径 D_N/mm	总高度 H/mm	圆弧半径 r/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3
1	300	138	45	0.1246	0.0055
2	350	156	53	0.1651	0.0084
3	400	175	60	0.2111	0.0121
4	450	194	68	0.2628	0.0167
5	500	213	75	0.3200	0.0224
6	550	231	83	0.3829	0.0292
7	600	250	90	0.4514	0.0373
8	650	269	98	0.5256	0.0467
9	700	288	105	0.6053	0.0576
10	750	306	113	0.6907	0.0701
11	800	325	120	0.7816	0.0842
12	850	344	128	0.8782	0.1001
13	900	363	135	0.9804	0.1179
14	950	382	143	1.0882	0.1377
15	1000	400	150	1.2016	0.1595
16	1100	438	165	1.4453	0.2100
17	1200	475	180	1.7115	0.2700
18	1300	513	195	2.0001	0.3406
19	1400	550	210	2.3112	0.4224
20	1500	588	225	2.6448	0.5164
21	1600	625	240	3.0008	0.6233
22	1700	663	255	3.3793	0.7441
23	1800	700	270	3.7802	0.8796
24	1900	738	285	4.2036	1.0305
25	2000	776	300	4.6495	1.1978
26	2100	828	315	5.2168	1.4343
27	2200	866	330	5.7123	1.6418
28	2300	903	345	6.2302	1.8685
29	2400	941	360	6.7707	2.1151
30	2500	978	375	7.3336	2.3825
31	2600	1016	390	7.9189	2.6715
32	2700	1053	405	8.5267	2.9829
33	2800	1091	420	9.1570	3.3177
34	2900	1128	435	9.8097	3.6765
35	3000	1166	450	10.4849	4.0604

表 8-37 CHC 锥形封头质量

(单位: kg)

序号	公称直径 D_N /mm	封头名义厚度 δ_n /mm																	
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	300	2.2	3.3	4.5	5.7	6.8	9.2												
2	350	2.9	4.4	5.9	7.5	9.0	12.2												
3	400		5.7	7.6	9.6	11.5	15.5	19.6	23.8	28.1									
4	450		7.1	9.5	11.9	14.3	19.3	24.3	29.5	34.8									
5	500		8.6	11.5	14.5	17.4	23.4	29.6	35.8	42.1	48.6	55.1	61.8						
6	550		10.3	13.8	17.3	20.8	28.0	35.3	42.7	50.2	57.8	65.6	73.5						
7	600		12.1	16.2	20.4	24.5	33.0	41.5	50.2	59.0	67.9	77.0	86.2						
8	650		14.1	18.9	23.7	28.5	38.3	48.2	58.3	68.5	78.8	89.3	99.9						
9	700		16.3	21.8	27.3	32.8	44.1	55.5	67.0	78.7	90.5	102.5	114.6						
10	750		18.6	24.8	31.1	37.5	50.2	63.2	76.3	89.6	103.0	116.5	130.3						
11	800			28.1	35.2	42.4	56.8	71.4	86.2	101.2	116.3	131.5	147.0	162.6	178.4	194.4	210.5		
12	850			31.5	39.5	47.6	63.8	80.2	96.7	113.5	130.4	147.5	164.7	182.2	199.8	217.6	235.6		
13	900			35.2	44.1	53.1	71.2	89.4	107.8	126.5	145.3	164.3	183.5	202.8	222.4	242.1	262.1		
14	950			39.1	49.0	58.9	78.9	99.2	119.6	140.2	161.0	182.0	203.2	224.6	246.2	268.0	290.0		
15	1000			43.2	54.1	65.0	87.1	109.4	131.9	154.6	177.5	200.6	223.9	247.5	271.2	295.2	319.3		
16	1100				65.0	78.2	104.7	131.4	158.4	185.5	213.0	240.6	268.4	296.5	324.9	353.4	382.2	411.2	440.4
17	1200				77.0	92.5	123.9	155.4	187.3	219.3	251.6	284.2	317.0	350.0	383.3	416.9	450.7	484.7	519.0
18	1300					108.1	144.7	181.5	218.6	255.9	293.5	331.4	369.6	408.0	446.7	485.6	524.8	564.3	604.1
19	1400					124.9	167.1	209.5	252.3	295.3	338.6	382.3	426.2	470.3	514.8	559.6	604.6	650.0	695.6
20	1500					142.9	191.1	239.6	288.4	337.6	387.0	436.7	486.8	537.1	587.8	638.8	690.0	741.6	793.5
21	1600					162.1	216.7	271.7	327.0	382.6	438.6	494.8	551.4	608.4	665.6	723.2	781.1	839.3	897.9
22	1700						243.9	305.8	368.0	430.5	493.3	556.6	620.1	684.0	748.3	812.9	877.8	943.1	1008.7
23	1800						272.8	341.9	411.4	481.2	551.4	621.9	692.8	764.1	835.8	907.8	980.1	1052.9	1126.0
24	1900						303.3	380.0	457.2	534.7	612.6	690.9	769.6	848.6	928.1	1007.9	1088.1	1168.7	1249.7
25	2000						335.3	420.2	505.4	591.0	677.1	763.5	850.3	937.6	1025.2	1113.3	1201.8	1290.6	1379.9
26	2100						375.3	470.1	565.4	661.1	757.3	853.8	950.8	1048.2	1146.1	1244.4	1343.1	1442.2	1541.8
27	2200						410.8	514.7	618.9	723.6	828.8	934.3	1040.4	1146.9	1253.8	1361.2	1469.0	1577.3	1686.0
28	2300							561.2	674.8	788.9	903.5	1018.5	1134.0	1249.9	1366.3	1483.2	1600.6	1718.4	1836.7
29	2400							609.8	733.2	857.1	981.4	1106.3	1231.6	1357.4	1483.7	1610.5	1737.8	1865.6	1993.8
30	2500							660.4	793.9	928.0	1062.6	1197.7	1333.3	1469.3	1605.9	1743.0	1880.7	2018.8	2157.4
31	2600							713.0	857.1	1001.8	1147.0	1292.7	1438.9	1585.7	1733.0	1880.8	2029.2	2178.0	2327.4
32	2700							767.6	922.7	1078.4	1234.6	1391.3	1548.6	1706.5	1864.9	2023.8	2183.3	2343.3	2503.9
33	2800							824.2	990.7	1157.8	1325.4	1493.6	1662.4	1831.7	2001.6	2172.1	2343.1	2514.1	2686.8
34	2900							882.8	1061.1	1240.0	1419.5	1599.5	1780.1	1961.4	2143.1	2325.5	2508.5	2692.1	2876.2
35	3000							943.5	1134.0	1325.1	1516.7	1709.0	1901.9	2095.4	2289.5	2484.2	2679.6	2875.5	3072.0

4. 球冠形封头

表 8-38 为 PSH 球冠形封头内表面积、容积及质量。

表 8-38 PSH 球冠形封头内表面积、容积、质量

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
1	300	2	40	0.0747	0.0014	1.1803
2		3	39	0.0741	0.0014	1.7637
3		4	39	0.0736	0.0014	2.3425
4		5	39	0.0731	0.0014	2.9169
5		6	38	0.0725	0.0013	3.4868
6	350	2	46	0.1019	0.0023	1.6083
7		3	46	0.1012	0.0022	2.4045
8		4	46	0.1006	0.0022	3.1955
9		5	45	0.1000	0.0022	3.9812
10		6	45	0.0994	0.0021	4.7616
11	400	2	53	0.1332	0.0034	2.1024
12		3	53	0.1325	0.0033	3.1445
13		4	52	0.1318	0.0033	4.1806
14		5	52	0.1311	0.0033	5.2106
15		6	52	0.1304	0.0032	6.2347
16		8	51	0.1290	0.0032	8.2650
17	450	3	59	0.1680	0.0048	3.9836
18		4	59	0.1672	0.0047	5.2978
19		5	59	0.1664	0.0047	6.6053
20		6	59	0.1656	0.0046	7.9060
21		8	58	0.1640	0.0046	10.4873
22	500	3	66	0.2077	0.0066	4.9218
23		4	66	0.2068	0.0065	6.5472
24		5	66	0.2059	0.0065	8.1652
25		6	65	0.2050	0.0064	9.7756
26		8	65	0.2033	0.0063	12.9739
27		10	64	0.2015	0.0062	16.1425
28	550	3	73	0.2517	0.0088	5.9591
29		4	73	0.2507	0.0087	7.9288
30		5	72	0.2497	0.0086	9.8902
31		6	72	0.2487	0.0086	11.8434
32		8	71	0.2467	0.0084	15.7249
33		10	71	0.2448	0.0083	19.5736
34	600	3	80	0.2998	0.0114	7.0956
35		4	79	0.2987	0.0113	9.4426
36		5	79	0.2976	0.0112	11.7805

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
37	600	6	79	0.2966	0.0112	14.1094
38		8	78	0.2944	0.0110	18.7402
39		10	78	0.2923	0.0108	23.3351
40	650	3	86	0.3521	0.0145	8.3311
41		4	86	0.3510	0.0144	11.0885
42		5	86	0.3498	0.0143	13.8360
43		6	85	0.3486	0.0142	16.5737
44		8	85	0.3463	0.0140	22.0198
45		10	84	0.3440	0.0139	27.4269
46	700	3	93	0.4087	0.0181	9.6658
47		4	93	0.4074	0.0180	12.8665
48		5	92	0.4062	0.0179	16.0566
49		6	92	0.4049	0.0178	19.2362
50		8	91	0.4024	0.0176	25.5637
51		10	91	0.3999	0.0174	31.8492
52	750	4	99	0.4681	0.0222	14.7768
53		5	99	0.4667	0.0221	18.4425
54		6	99	0.4654	0.0220	22.0969
55		8	98	0.4627	0.0217	29.3719
56		10	98	0.4600	0.0215	36.6019
57	800	4	106	0.5330	0.0270	16.8191
58		5	106	0.5315	0.0269	20.9936
59		6	105	0.5301	0.0267	25.1559
60		8	105	0.5272	0.0264	33.4445
61		10	104	0.5244	0.0262	41.6850
62		12	104	0.5215	0.0259	49.8775
63		14	103	0.5187	0.0256	58.0224
64		16	103	0.5158	0.0253	66.1198
65	850	4	113	0.6020	0.0324	18.9937
66		5	112	0.6005	0.0323	23.7099
67		6	112	0.5990	0.0321	28.4132
68		8	112	0.5959	0.0318	37.7814
69		10	111	0.5929	0.0315	47.0984
70		12	110	0.5899	0.0312	56.3646
71		14	110	0.5868	0.0309	65.5799
72		16	109	0.5838	0.0305	74.7447

七、封头标准

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
73	900	4	119	0.6753	0.0385	21.3004
74		5	119	0.6737	0.0384	26.5913
75		6	119	0.6721	0.0382	31.8687
76		8	118	0.6689	0.0378	42.3826
77		10	118	0.6656	0.0375	52.8423
78		12	117	0.6624	0.0371	63.2480
79		14	117	0.6592	0.0368	73.6000
80		16	116	0.6560	0.0364	83.8983
81	950	4	126	0.7528	0.0454	23.7393
82		5	126	0.7511	0.0452	29.6380
83		6	126	0.7494	0.0450	35.5224
84		8	125	0.7460	0.0446	47.2481
85		10	124	0.7426	0.0442	58.9166
86		12	124	0.7392	0.0438	70.5280
87		14	123	0.7358	0.0434	82.0826
88		16	123	0.7325	0.0430	93.5805
89	1000	4	133	0.8346	0.0530	26.3103
90		5	133	0.8327	0.0527	32.8499
91		6	132	0.8309	0.0525	39.3744
92		8	132	0.8274	0.0521	52.3779
93		10	131	0.8238	0.0516	65.3213
94		12	131	0.8202	0.0512	78.2045
95		14	130	0.8166	0.0508	91.0278
96		16	129	0.8131	0.0503	103.7914
97	1100	5	146	1.0086	0.0703	39.7692
98		6	146	1.0066	0.0701	47.6730
99		8	145	1.0027	0.0695	63.4306
100		10	145	0.9987	0.0690	79.1218
101		12	144	0.9948	0.0685	94.7468
102		14	143	0.9909	0.0679	110.3059
103		16	143	0.9869	0.0674	125.7991
104	1200	5	159	1.2013	0.0915	47.3494
105		6	159	1.1992	0.0911	56.7646
106		8	158	1.1948	0.0905	75.5406
107		10	158	1.1905	0.0899	94.2440
108		12	157	1.1862	0.0892	112.8752

第八章 真空室设计

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
109	1200	14	157	1.1819	0.0886	131.4342
110		16	156	1.1777	0.0880	149.9213
111	1300	5	173	1.4109	0.1165	55.5904
112		6	172	1.4085	0.1161	66.6492
113		8	172	1.4038	0.1153	88.7078
114		10	171	1.3992	0.1146	110.6878
115		12	171	1.3945	0.1138	132.5893
116		14	170	1.3898	0.1131	154.4128
117		16	170	1.3852	0.1123	176.1581
118		18	169	1.3806	0.1116	197.8256
119		20	168	1.3759	0.1109	219.4154
120		22	168	1.3713	0.1102	240.9278
121		24	167	1.3667	0.1094	262.3629
122	1400	5	186	1.6372	0.1456	64.4921
123		6	186	1.6347	0.1452	77.3267
124		8	185	1.6297	0.1443	102.9323
125		10	185	1.6246	0.1434	128.4531
126		12	184	1.6196	0.1426	153.8895
127		14	184	1.6146	0.1417	179.2416
128		16	183	1.6096	0.1408	204.5094
129		18	182	1.6046	0.1400	229.6935
130		20	182	1.5996	0.1391	254.7937
131		22	181	1.5946	0.1383	279.8102
132		24	181	1.5897	0.1375	304.7436
133	1500	5	200	1.8804	0.1793	74.0547
134		6	199	1.8777	0.1788	88.7972
135		8	199	1.8723	0.1778	118.2141
136		10	198	1.8669	0.1768	147.5402
137		12	198	1.8615	0.1758	176.7755
138		14	197	1.8562	0.1748	205.9206
139		16	196	1.8508	0.1738	234.9753
140		18	196	1.8454	0.1728	263.9402
141		20	195	1.8401	0.1718	292.8150
142		22	195	1.8347	0.1709	321.6003
143		24	194	1.8294	0.1699	350.2961
144	1600	5	213	2.1405	0.2178	84.2781

七、封头标准

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
145	1600	6	213	2.1376	0.2172	101.0607
146		8	212	2.1318	0.2161	134.5532
147		10	211	2.1261	0.2194	167.9487
148		12	211	2.1203	0.2138	201.2476
149		14	210	2.1146	0.2126	234.4500
150		16	210	2.1089	0.2115	267.5559
151		18	209	2.1031	0.2104	300.5658
152		20	209	2.0974	0.2093	333.4797
153		22	208	2.0917	0.2082	366.2978
154		24	208	2.0860	0.2071	399.0204
155	1700	6	226	2.4143	0.2608	114.1171
156		8	225	2.4082	0.2595	151.9495
157		10	225	2.4021	0.2582	189.6789
158		12	224	2.3959	0.2569	227.3055
159		14	224	2.3898	0.2556	264.8294
160		16	223	2.3837	0.2543	302.2509
161		18	223	2.3777	0.2531	339.5702
162		20	222	2.3716	0.2518	376.7875
163		22	221	2.3655	0.2506	413.9027
164		24	221	2.3595	0.2493	450.9164
165		26	220	2.3534	0.2481	487.8285
166		28	220	2.3474	0.2468	524.6393
167		30	219	2.3413	0.2456	561.3489
168		32	219	2.3353	0.2443	597.9579
169	1800	6	239	2.7078	0.3098	127.9665
170		8	239	2.7013	0.3083	170.4032
171		10	238	2.6949	0.3069	212.7307
172		12	238	2.6884	0.3055	254.9493
173		14	237	2.6819	0.3040	297.0592
174		16	237	2.6755	0.3026	339.0605
175		18	236	2.6690	0.3012	380.9536
176		20	235	2.6626	0.2998	422.7386
177		22	235	2.6561	0.2983	464.4153
178		24	234	2.6497	0.2969	505.9843
179		26	234	2.6433	0.2955	547.4459
180		28	233	2.6369	0.2941	588.7999

第八章 真空室设计

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
181	1800	30	233	2.6305	0.2927	630.0466
182		32	232	2.6241	0.2914	671.1863
183	1900	6	253	3.0182	0.3646	142.6089
184		8	252	3.0114	0.3630	189.9141
185		10	252	3.0045	0.3614	237.1042
186		12	251	2.9977	0.3598	284.1792
187		14	251	2.9908	0.3582	331.1394
188		16	250	2.9840	0.3566	377.9849
189		18	249	2.9772	0.3550	424.7158
190		20	249	2.9704	0.3534	471.3326
191		22	248	2.9636	0.3518	517.8354
192		24	248	2.9568	0.3503	564.2242
193		26	247	2.9501	0.3487	610.4995
194		28	247	2.9433	0.3471	656.6611
195		30	246	2.9365	0.3456	702.7092
196		32	245	2.9298	0.3440	748.6445
197	2000	6	266	3.3454	0.4256	158.0442
198		8	266	3.3382	0.4238	210.4824
199		10	265	3.3310	0.4220	262.7992
200		12	264	3.3238	0.4202	314.9948
201		14	264	3.3166	0.4184	367.0695
202		16	263	3.3094	0.4166	419.0236
203		18	263	3.3022	0.4149	470.8570
204		20	262	3.2951	0.4131	522.5701
205		22	262	3.2879	0.4114	574.1630
206		24	261	3.2808	0.4096	625.6360
207		26	261	3.2736	0.4079	676.9889
208		28	260	3.2665	0.4062	728.2225
209		30	259	3.2594	0.4044	779.3363
210		32	259	3.2523	0.4027	830.3312
211	2100	8	279	3.6819	0.4909	232.1078
212		10	278	3.6743	0.4890	289.8158
213		12	278	3.6667	0.4870	347.3965
214		14	277	3.6592	0.4851	404.8501
215		16	277	3.6516	0.4831	462.1770
216		18	276	3.6441	0.4812	519.3771

七、封头标准

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
217	2100	20	276	3.6366	0.4792	576.4507
218		22	275	3.6291	0.4773	633.3983
219		24	274	3.6216	0.4754	690.2196
220		26	274	3.6141	0.4734	746.9147
221		28	273	3.6066	0.4715	803.4845
222		30	273	3.5991	0.4696	859.9288
223		32	272	3.5916	0.4677	916.2474
224	2200	8	292	4.0424	0.5649	254.7906
225		10	292	4.0345	0.5627	318.1539
226		12	291	4.0265	0.5606	381.3841
227		14	291	4.0186	0.5584	444.4810
228		16	290	4.0107	0.5563	507.4449
229		18	290	4.0028	0.5541	570.2760
230		20	289	3.9949	0.5520	632.9747
231		22	288	3.9870	0.5499	695.5408
232		24	288	3.9792	0.5478	757.9748
233		26	287	3.9713	0.5456	820.2769
234		28	287	3.9635	0.5435	882.4471
235		30	286	3.9556	0.5414	944.4854
236		32	286	3.9478	0.5393	1006.3930
237	2300	8	306	4.4198	0.6459	278.5307
238		10	305	4.4115	0.6435	347.8138
239		12	305	4.4032	0.6412	416.9575
240		14	304	4.3949	0.6388	485.9619
241		16	304	4.3866	0.6365	554.8273
242		18	303	4.3784	0.6341	623.5538
243		20	302	4.3701	0.6318	692.1418
244		22	302	4.3619	0.6295	760.5909
245		24	301	4.3536	0.6272	828.9022
246		26	301	4.3454	0.6248	897.0750
247		28	300	4.3372	0.6225	965.1100
248		30	300	4.3290	0.6202	1033.0070
249		32	299	4.3208	0.6179	1100.7670
250	2400	8	319	4.8139	0.7343	303.3282
251		10	319	4.8053	0.7317	378.7952
252		12	318	4.7966	0.7292	454.1171

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
253	2400	14	318	4.7880	0.7266	529.2930
254		16	317	4.7794	0.7240	604.3245
255		18	316	4.7707	0.7215	679.2106
256		20	316	4.7621	0.7190	753.9521
257		22	315	4.7535	0.7164	828.5489
258		24	315	4.7449	0.7139	903.0013
259		26	314	4.7363	0.7114	977.3093
260		28	314	4.7278	0.7088	1051.4740
261		30	313	4.7192	0.7063	1125.4930
262		32	312	4.7106	0.7038	1199.3700
263	2500	8	333	5.2250	0.8305	329.1828
264		10	332	5.2159	0.8277	411.0983
265		12	331	5.2069	0.8249	492.8624
266		14	331	5.1979	0.8221	574.4748
267		16	330	5.1889	0.8193	655.9362
268		18	330	5.1799	0.8165	737.2463
269		20	329	5.1710	0.8138	818.4052
270		22	329	5.1620	0.8110	899.4136
271		24	328	5.1530	0.8083	980.2719
272		26	327	5.1441	0.8055	1060.9800
273		28	327	5.1352	0.8028	1141.5380
274		30	326	5.1262	0.8001	1221.9450
275		32	326	5.1173	0.7973	1302.2030
276	2600	8	346	5.6528	0.9346	356.0947
277		10	345	5.6434	0.9316	444.7231
278		12	345	5.6341	0.9286	533.1935
279		14	344	5.6247	0.9256	621.5063
280		16	344	5.6153	0.9226	709.6625
281		18	343	5.6060	0.9196	797.6607
282		20	343	5.5966	0.9166	885.5023
283		22	342	5.5873	0.9136	973.1870
284		24	341	5.5780	0.9106	1060.7150
285		26	341	5.5687	0.9076	1148.0860
286		28	340	5.5594	0.9047	1235.3020
287		30	340	5.5501	0.9017	1322.3610
288		32	339	5.5408	0.8988	1409.2650

七、封头标准

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
289	2700	8	359	6.0975	1.0472	384.0638
290		10	359	6.0878	1.0439	479.6690
291		12	358	6.0780	1.0407	575.1106
292		14	358	6.0683	1.0374	670.3884
293		16	357	6.0586	1.0342	765.5032
294		18	357	6.0489	1.0309	860.4539
295		20	356	6.0392	1.0277	955.2419
296		22	355	6.0295	1.0245	1049.8670
297		24	355	6.0198	1.0213	1144.3300
298		26	354	6.0101	1.0181	1238.6300
299		28	354	6.0004	1.0149	1332.7670
300		30	353	5.9908	1.0117	1426.7420
301		32	353	5.9811	1.0085	1520.5560
302	2800	8	373	6.5591	1.1684	413.0905
303		10	372	6.5489	1.1649	515.9369
304		12	372	6.5388	1.1614	618.6140
305		14	371	6.5287	1.1579	721.1207
306		16	371	6.5187	1.1544	823.4583
307		18	370	6.5086	1.1509	925.6264
308		20	369	6.4985	1.1474	1027.6250
309		22	369	6.4885	1.1440	1129.4550
310		24	368	6.4784	1.1405	1231.1160
311		26	368	6.4684	1.1371	1332.6090
312		28	367	6.4584	1.1336	1433.9330
313		30	367	6.4483	1.1302	1535.0880
314		32	366	6.4383	1.1268	1636.0750
315	2900	8	386	7.0374	1.2987	443.1742
316		10	386	7.0270	1.2949	553.5264
317		12	385	7.0165	1.2911	663.7028
318		14	384	7.0060	1.2874	773.7032
319		16	384	6.9956	1.2836	883.5284
320		18	383	6.9851	1.2799	993.1776
321		20	383	6.9747	1.2762	1102.6510
322		22	382	6.9643	1.2724	1211.9510
323		24	382	6.9539	1.2687	1321.0750
324		26	381	6.9435	1.2650	1430.0230

(续)

序号	公称直径 D_N/mm	名义厚度 δ_n/mm	总深度 H/mm	内表面积 A/m^2	容积 V/m^3	质量 m/kg
325	2900	28	380	6.9331	1.2613	1538.7980
326		30	380	6.9227	1.2576	1647.3980
327		32	379	6.9123	1.2540	1755.8250
328	3000	8	400	7.5326	1.4383	474.3151
329		10	399	7.5218	1.4342	592.4377
330		12	398	7.5110	1.4302	710.3778
331		14	398	7.5001	1.4262	828.1358
332		16	397	7.4893	1.4222	945.7125
333		18	397	7.4785	1.4181	1063.1080
334		20	396	7.4677	1.4142	1180.3210
335		22	396	7.4570	1.4102	1297.3530
336		24	395	7.4462	1.4062	1414.2040
337		26	394	7.4354	1.4022	1530.8750
338		28	394	7.4247	1.3983	1647.3650
339		30	393	7.4139	1.3943	1763.6740
340		32	393	7.4032	1.3904	1879.8030

(三) 封头内表面积、容积及质量计算

1. 以内径为基准的椭圆封头(EHA)

① 内表面积(mm^2)

$$S = \pi r[r + h_1 \times C + 2h] \quad (8-53)$$

式中

$$r = D_i/2$$

$$h_1 = H - h$$

$$C = \ln[r/h_1 + \sqrt{(r/h_1)^2 - 1}] / \sqrt{(r/h_1)^2 - 1}$$

其它符号意义见(一)2.。对标准椭圆封头 $r/h_1 = 2$, 于是 $C = 0.760346$ 。

② 容积(mm^3)

$$V = \pi r^2 \left(\frac{2}{3} h_1 + h \right) \quad (8-54)$$

③ 质量(kg)

$$W = 7850 \times (V_w - V) \times 10^{-9} \quad (8-55)$$

式中 V_w 为封头外壁容积, 以 $(h_1 + \delta_n)$ 代替 h_1 、 $(r + \delta_n)$ 代替 r , 由公式(8-54) 计算。

2. 以外径为基准的椭圆封头(EHB)

令

$$r = D_0/2$$

$$h_1 = H - h$$

内表面积 S 和容积 V 以 $(h_1 - \delta_n)$ 代替 h_1 、 $(r - \delta_n)$ 代替 r , 分别由公式(8-53) 和公式

(8-54) 计算。不作上述替换,按公式(8-54) 计算结果即为封头外壁容积 V_w 、封头质量仍按公式(8-54) 计算。

3. 碟形封头(DHA 和 DHB)

① 内表面积(mm^2)

$$S = 2\pi \left[D_i r \times \frac{\theta_0}{2} + r^2(\sin\theta_0 - \theta_0) + R_i^2(1 - \sin\theta_0) + \frac{D_i}{2} \times h \right] \quad (8-56)$$

式中

$$\theta_0 = \arccos \frac{D_i/2 - r}{R_i - r}$$

θ_0 单位为弧度,其它符号意义见(一)2.。

② 容积(mm^3)

$$V = \pi \left(C_1 D_i^2 r + C_2 D_i r^2 + C_3 r^3 + C_4 R_i^3 + \frac{D_i^2}{4} \times h \right) \quad (8-57)$$

式中

$$C_1 = \frac{\sin\theta_0}{4}$$

$$C_2 = \frac{\theta_0 + \sin\theta_0 \cos\theta_0}{2} - \sin\theta_0$$

$$C_3 = 2\sin\theta_0 - \theta_0 - \sin\theta_0 \cos\theta_0 - \frac{\sin^3\theta_0}{3}$$

$$C_4 = \frac{(2 + \sin\theta_0)(1 - \sin\theta_0)^2}{3}$$

③ 质量(kg)

$$W = 7850 \times (V_w - V) \times 10^{-9} \quad (8-58)$$

式中 V_w 为封头外壁容积,以 $(D_i + 2\delta_n)$ 代替 D_i 、 $(r + \delta_n)$ 代替 r 、 $(R_i + \delta_n)$ 代替 R_i 由公式(8-57) 计算。

4. 折边锥形封头(CHA、CHB 和 CHC)

本标准内表面积、容积和质量系计算至锥顶的近似值,忽略小端局部结构尺寸的影响。

① 内表面积:

锥段

$$S_1 = \pi b_z \sqrt{b_z^2 + h_z^2} \quad (8-59)$$

式中

$$b_z = R - r(1 - \cos\theta_0)$$

$$h_z = H' - h - r\sin\theta_0$$

$R = D_i/2$, θ_0 为 α 角的弧度值,其它符号意义见(一)2.。

圆弧段

$$S_2 = 2\pi r [R\theta_0 + r(\sin\theta_0 - \theta_0)] \quad (8-60)$$

直边段

$$S_2 = 2\pi R h \quad (8-61)$$

因此,内表面积(mm^2)

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (8-62)$$

② 容积:

锥段

$$V_1 = \frac{\pi}{3} b_z^2 h_z \quad (8-63)$$

圆弧段

$$V_2 = \pi r [(R - r)^2 \sin \theta_0 + C_1 r (R - r) + C_2 r^2] \quad (8-64)$$

式中

$$C_1 = \theta_0 + \sin \theta_0 \cos \theta_0$$

$$C_2 = \frac{\sin \theta_0 (2 + \cos^2 \theta_0)}{3}$$

直边段

$$V_3 = \pi R^2 h \quad (8-65)$$

因此,容积(mm³)

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (8-66)$$

③ 质量 kg:

首先计算外壁容积 V_w , 分别如下:

锥段外壁容积

$$V_{w1} = \frac{\pi}{3} b_{z0}^2 h_{z0}$$

式中

$$b_{z0} = (R + \delta_n) - (r + \delta_n)(1 - \cos \theta_0)$$

$$h_{z0} = H' - h - (r + \delta_n) \sin \theta_0 + \delta_n / \sin \theta_0$$

以 $(R + \delta_n)$ 代替 R 、 $(r + \delta_n)$ 代替 r , 按公式(8-64) 及公式(8-65) 可分别计算圆弧段外壁容积 V_{w2} 及直边段外壁容积 V_{w3} 。

于是,外壁容积(mm³)

$$V_w = V_{w1} + V_{w2} + V_{w3} \quad (8-67)$$

则质量(kg)

$$W = 7850 \times (V_w - V) \times 10^{-9} \quad (8-68)$$

5. 球冠形封头(PSH)

① 内表面积(mm²)

$$S = 2\pi D_o h \quad (8-69)$$

式中

$$h = D_o - \sqrt{D_o^2 - \left(\frac{D_o - \delta_n}{2}\right)^2}$$

② 容积(mm³)

$$V = \pi h^2 (D_o - h/3) \quad (8-70)$$

③ 质量(kg)

$$h_z = \left(D_o + \frac{\delta_n}{2}\right) - \sqrt{\left(D_o + \frac{\delta_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_o - \delta_n}{2} - \frac{\delta_n}{4}\right)^2}$$

中面面积 S_z

$$S_z = 2\pi(D_o + \delta_n/2)h_z$$

于是,质量(kg)

$$W = 7850 \times S_z \times \delta_n \times 10^{-9} \quad (8-71)$$

八、开孔加强设计

(一) 概述

本节开孔加强方法适用于 $\sigma_B \leq 392.2\text{MPa}$ 的钢制筒体或封头上圆形、椭圆形、长圆形的单个孔。所有开孔应尽可能避开焊缝。当筒体上开椭圆孔或长圆形孔时,其短半轴必须平行于筒体纵轴。若 $\sigma_B > 392.2\text{MPa}$ 的高强度钢制容器,请查有关的化工容器设计资料。

1. 允许不加强的最大孔径

当容器承受压力波动不大时,允许不加强的最大孔径如下所述。

(1) 熔焊或钎焊附件

圆筒体或封头(包括平封头、凸形封头及锥形封头)厚度小于 10mm 时,最大孔径 d 为 50mm。

圆筒体或封头(包括平封头、凸形封头及锥形封头)厚度大于 10mm 时,最大孔径 d 为 35mm。

(2) 螺纹或双头螺栓连接附件

圆筒体或封头上的最大孔径 d 为 35mm(开孔直径超过上述最大孔径时,并不一定要加强,但需根据下述方法进行计算来确定是否需要补强)。

2. 局部加强方法所适用的最大开孔

在圆筒体上开孔直径不得超过以下数值:

① 容器直径 $D_B \leq 1500\text{mm}$ 。

开孔最大直径 $d = \frac{1}{2}D_B$, 且须 $d \leq 500\text{mm}$ 。

② 容器直径 $D_B > 1500\text{mm}$

开孔最大直径 $d = \frac{1}{3}D_B$, 且须 $d \leq 1000\text{mm}$ 。

如因工艺要求超过上述限制时,设计者必须对该孔的补强结构和计算作特殊考虑。封头上开孔直径原则上不受限制,但超过 $1/3D_B$ 时,建议采用锥形封头,或特殊曲线封头。

(二) 封头开孔补强

1. 凸形封头

(1) 凸形(椭圆形,碟形)封头因开孔而削弱的计算面积

$$A = d \times S_0 \quad (8-72)$$

其中 S_0 计算如下:

① 椭圆形封头 —— 开孔及其加强材料位于封头直径 80% 之封头中心范围内

$$S_0 = \frac{pK_1 D_B}{2[\sigma]} \quad (8-73)$$

式中 p ——设计压力[MPa];
 D_B ——封头内径[mm];
 $[\sigma]$ ——许用应力[MPa];
 K_1 ——系数(见表 8-39)。

表 8-39 K_1 值

$D_B/2h_B$	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

② 碟形封头——开孔位于碟形封头之球面部分内

$$S_0 = \frac{pR_B}{2[\sigma]} \quad (8-74)$$

式中 S_0 ——计算壁厚(不包括附加量)[mm];
 p ——设计压力[MPa];
 R_B ——球面部分内半径[mm];
 $[\sigma]$ ——材料许用应力[MPa]。

(2) 凸形封头的整体加强

椭圆形封头或碟形封头(碟形封头需满足 $R_B \leq D_B$, $\frac{h_B}{D_B} \geq 0.2$, $r_B \geq 3S$, r_B 为转角处内半径)按下式计算开孔封头厚度

$$S = \frac{PD_B}{4Z[\sigma]} \cdot \frac{D_B}{2h_B} + C \quad (8-75)$$

式中 p ——设计压力[MPa];
 h_B ——封头凸出部分内边高度(如图 8-36 所示)[mm];
 $[\sigma]$ ——许用应力[MPa];
 Z ——系数 $Z = 1 - d/D_B$, 且 $d \leq 0.7D_B$;
 D_B ——封头内径[mm];
 d ——若封头上同时存在几个孔,则 d 为封头上开孔的最大直径[mm]。

(3) 凸形封头过渡部分开孔规定

碟形封头上开孔的孔边与封头边缘间的投影距离不小于 $0.1D_B$ 。

椭圆形封头上开孔边与封头边缘的投影距离若因工艺或结构上需要小于 $0.1D_B$ 时,封头厚度仍按有孔封头计算(即整体加强),并且还要按局部加强法补强。

2. 锥形封头开孔补强

因开孔需要补强面积

$$A = d \times S_0 \quad (8-76)$$

式中 S_0 等于以开孔中心处锥体内径作为锥形直径计算而得的无缝锥体厚度(图 8-45)。

3. 平盖开孔

平盖开孔直径 $d \leq 0.5D_B$ 时,因开孔削弱的面积

$$A = 0.5d \times S_0 \quad (8-77)$$

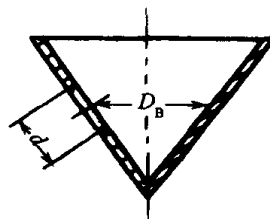


图 8-45 开孔的锥形封头

式中 S_0 ——平盖计算厚度(不包括附加量 C)[mm],若开孔直径 $d > 0.5D_B$ 时,须按法兰计算。

(三) 外压容器的开孔补强

因开孔而削弱的面积

$$A = 0.5d \times S_0 \quad (8-78)$$

式中 S_0 ——外压计算求得的筒体或封头壁厚(不包括壁厚附加量)[mm]。

(四) 内压圆筒体开孔补强

因开孔削弱面积

$$A = dS \quad (8-79)$$

式中 S ——筒体计算壁厚;
 d ——开孔直径。

(五) 开孔补强计算

加强区有效范围如图 8-46 所示。

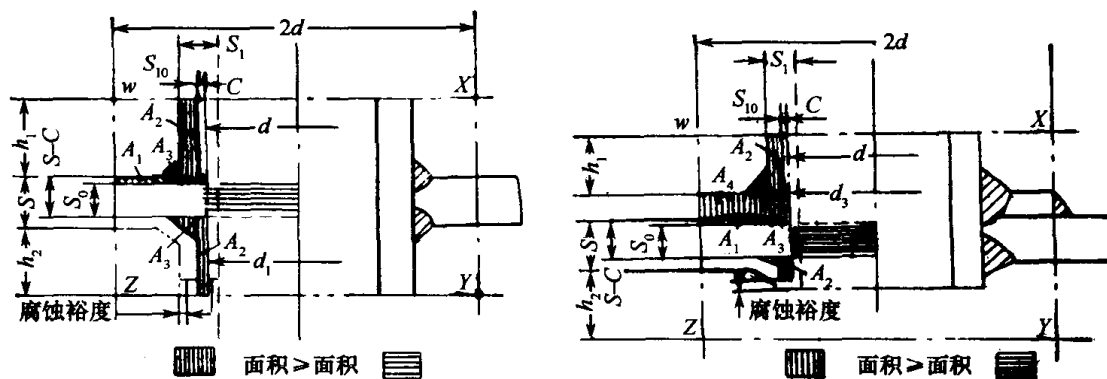


图 8-46 加强区有效面积

(1) 有效宽度

$$B = 2d \quad (8-80)$$

(2) 有效高度

① 外侧高度(如图 8-46 所示)

$$h_1 = \sqrt{d(S_1 - C)} \quad (8-81)$$

或 $h_1 =$ 接管实际外伸高度。

取两者中最小者。

② 内侧高度(如图 8-46 所示)

$$h_1 = \sqrt{d(S_1 - 2C)} \quad (8-82)$$

或 $h_1 =$ 接管实际内伸高度。

取两者中最小值。

(3) 在 $XYWZ$ 内(图 8-46)有效加强的金属面积

$$A_1 + A_2 + A_3$$

式中 A_1 ——壳体或封头上超过抵抗压力所需的多余金属面积(不包括腐蚀裕度)[mm^2]

$$A_1 = (B - C)[\gamma(S - C) - S_0] \quad (8-83)$$

式(8-3)中, γ 为焊缝系数, 开孔不通过纵焊缝时, 取 $\gamma = 1$, 开孔通过纵焊缝时, 取纵焊缝系数 (见第二节)。

A_2 ——接管上超过抵抗压力所需要的多余金属面积[mm²]

$$A_2 = 2h_1(S_1 - S_{10} - C) + 2h_2(S - 2C) \quad (8-84)$$

式(8-84)中, S_{10} 为接管计算壁厚(不包括壁厚附加量)[mm]; S_1 为接管实际壁厚(包括壁厚附加量)[mm]; C 为壁厚附加量[mm]。

A_3 ——焊缝截面积[mm²]。

如果满足

$$A_1 + A_2 + A_3 \geq A \quad (8-85)$$

则无需另加补强板; 如果不满足, 则需要另加补强板, 补强板的截面积应等于

$$A_{\text{补强}} = A - (A_1 + A_2 + A_3) \quad (8-86)$$

(六) 并联开孔的补强

① 当相邻两个开孔的中心线间距小于两开孔平均直径的两倍时, 这两个孔(或多孔) 应采用联合补强, 联合补强板的强度应等于各单独开孔所需要补强的总强度。

② 若两个以上的相邻开孔采用联合补强板, 则这些开孔中心距应大于它们平均直径的 $1\frac{1}{2}$ 倍, 开孔之间补强面积至少等于两个开孔所需要总补强面积的 50%。

③ 若上述两条所述情况中, 孔中心间距小于它们平均直径的 $1/3$ 时, 在两个开孔之间采用任何金属都不能进行补强。

④ 数量任意而位置很靠近的开孔, 不论其排列形式如何都可以看作一个等效于所有开孔直径的假想孔来补强。

⑤ 在受压容器内, 若存在一系列管孔而对每个孔都加以补强是不可能时, 则应该采用开孔之间带状结构补强, 此带按本章二、(七) 节开孔削弱系数进行计算。

(七) 补强方法

若条件许可推荐用厚壁接管代替补强板为宜。

若采用补强板时, 在容器或封头内外表面上对称布置比单面补强板效果好, 补强板须有 M10 的讯号孔。

补强板的材料与筒体或封头相同。若所用补强板的强度限小于筒体或封头材料强度限 75%, 则补强板的厚度应按比例增加。若所有补强板的强度限大于筒体或封头材料的强度限, 补强板厚度仍不得减少。

接管及补强板焊接方法如图 8-47 所示。

(八) 补强图标准(摘自 JB/T4736—2002)

1. 范围

① 本标准规定了钢制压力容器壳体开孔补强用补强圈的型式、尺寸及技术要求。

② 本标准用于钢制压力容器壳体开孔采用补强圈结构补强时, 应同时具备下列条件:

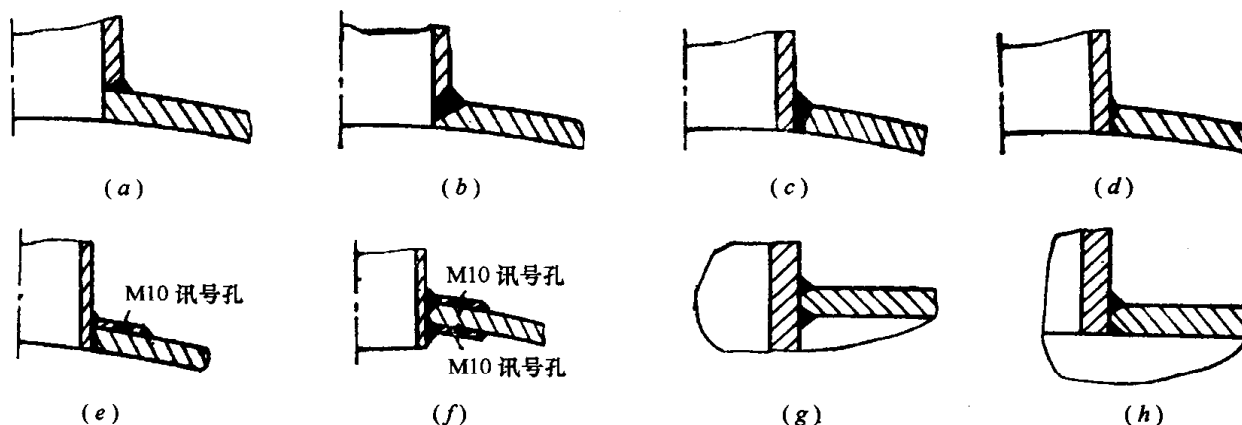


图 8-47 接管及补强板焊接

(a) 安放式; (b) 插入式; (c) 平滑插入式; (d) 平滑插入式; (e) 平滑插入式(单面外强);

(f) 内伸式(双面补强); (g) 双坡口双面角焊; (h) 双坡口单面角焊。

- a. 容器设计压力小于 6.4MPa;
- b. 容器设计温度不大于 350℃;
- c. 容器壳体开孔处名义厚度 $\delta_n \leq 38\text{mm}$;
- d. 容器壳体钢材的标准抗拉强度下限值不大于 540MPa;
- e. 补强圈厚度应不大于 1.5 倍壳体开孔处的名义厚度。

③ 本标准不推荐用于铬钼钢制造的容器,也不推荐用于盛装毒性为极度危害与高度危害介质的容器。

④ 本标准不适用于承受疲劳载荷的容器。

2. 符号

- D_1 ——补强圈内径[mm];
 D_2 ——补强圈外径[mm];
 d_N ——接管公称直径[mm];
 d_o ——接管外径[mm];
 δ_c ——补强圈厚度[mm];
 δ_n ——壳体开孔处名义厚度[mm];
 δ_{nt} ——接管名义厚度[mm]。

3. 型式、尺寸

① 坡口型式:按照补强圈焊接接头结构的要求,补强圈坡口分为 A、B、C、D 和 E 五种型式,如图 8-48 所示。除图示型式外,设计者可根据结构要求自行设计坡口型式。

② 各种坡口型式的适用条件:

- A 型——适用于壳体为内坡口的填角焊结构;
 B 型——适用于壳体为内坡口的局部焊透结构;
 C 型——适用于壳体为外坡口的全焊透结构;
 D 型——适用于壳体为内坡口的全焊透结构;
 E 型——适用于壳体为内坡口的全焊透结构。

③ 补强圈的尺寸系列见表 8-40。

④ 各种坡口的焊接接头型式及适用范围见表 8-41。

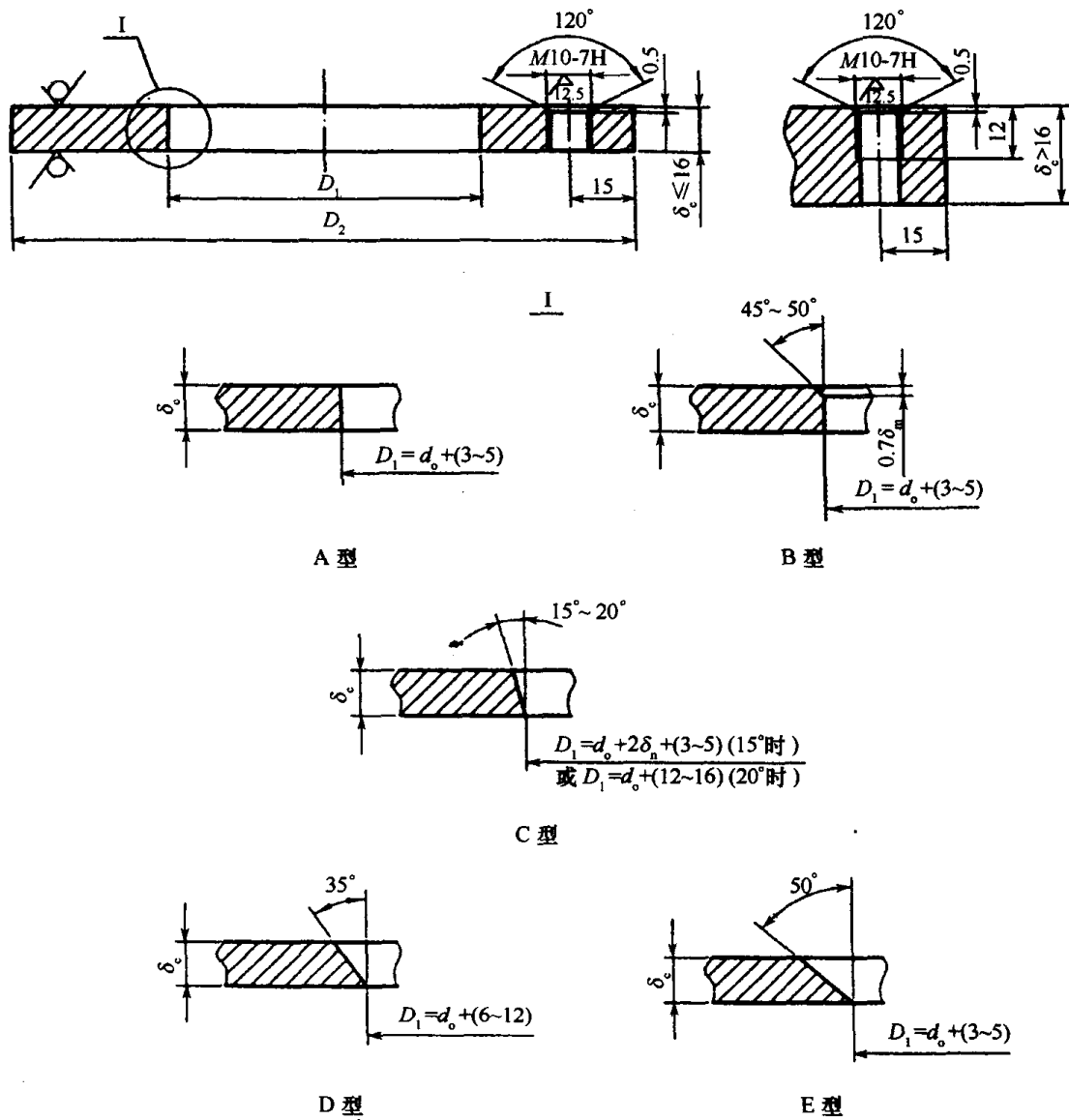


图 8-48

表 8-40 补强圈尺寸系列

接管 公称 直径 d_N	外径 D_2	内径 D_1	厚度 δ_c /mm													
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
尺寸 /mm			质量 /kg													
50	130	按图 8-48 中的 型式 确定	0.32	0.48	0.64	0.80	0.96	1.12	1.28	1.43	1.59	1.75	1.91	2.07	2.23	2.57
65	160		0.47	0.71	0.95	1.18	1.42	1.66	1.89	2.13	2.37	2.60	2.84	3.08	3.31	3.55
80	180		0.59	0.88	1.17	1.46	1.75	2.04	2.34	2.63	2.92	3.22	3.51	3.81	4.10	4.38
100	200		0.68	1.02	1.35	1.69	2.03	2.37	2.71	3.05	3.38	3.72	4.06	4.40	4.74	5.08
125	250		1.08	1.62	2.16	2.70	3.24	3.77	4.31	4.85	5.39	5.93	6.47	7.01	7.55	8.09
150	300		1.56	2.35	3.13	3.91	4.69	5.48	6.26	7.04	7.82	8.60	9.38	10.2	10.9	11.7
175	350		2.23	3.34	4.46	5.57	6.69	7.80	8.92	10.0	11.1	12.3	13.4	14.5	15.6	16.6
200	400		2.72	4.08	5.44	6.80	8.16	9.52	10.9	12.2	13.6	14.9	16.3	17.7	19.0	20.4

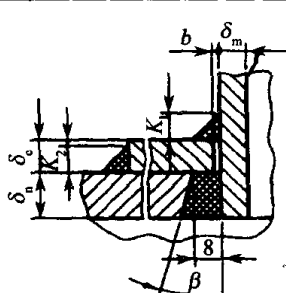
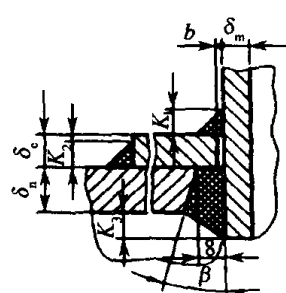
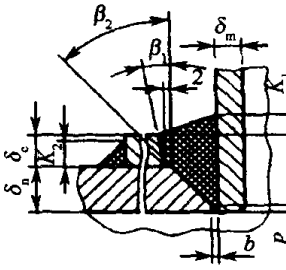
(续)

接管 公称 直径 d_N	外径 D_2	内径 D_1	厚度 δ_c/mm													
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
尺寸 /mm			质量 /kg													
225	440	按图 8-48 中的 型式 确定	3.24	4.87	6.49	8.11	9.74	11.4	13.0	14.6	16.2	17.8	19.5	21.1	22.7	24.3
250	480		3.79	5.68	7.58	9.47	11.4	13.3	15.2	17.0	18.9	20.8	22.7	24.6	26.5	28.4
300	550		4.79	7.18	9.58	12.0	14.4	16.8	19.2	21.6	24.0	26.3	28.7	31.1	33.5	36.0
350	620		5.90	8.85	11.8	14.8	17.7	20.6	23.6	26.6	29.5	32.4	35.4	38.3	41.3	44.2
400	680		6.84	10.3	13.7	17.1	20.5	24.0	27.4	31.0	34.2	37.6	41.0	44.5	48.0	51.4
450	760		8.47	12.7	16.9	21.2	25.4	29.6	33.9	38.1	42.3	46.5	50.8	55.0	59.2	63.5
500	840		10.4	15.6	20.7	25.9	31.1	36.3	41.5	46.7	51.8	57.0	62.2	67.4	72.5	77.7
600	980		13.8	20.6	27.5	34.4	41.3	48.2	55.1	62.0	68.9	75.7	82.6	89.5	96.4	103.3

注:1. 内径 D_1 为补强圈成形后的尺寸。

2. 表中质量为 A 型补强圈按接管公称直径计算所得的值

表 8-41 焊接接头型式

坡口型式	接头型式	基本尺寸	使用范围
A		$\beta = 20^\circ \pm 2^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $K_1 = 1.4\delta_m$, 且 $K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c$ (当 $\delta_c \leq 8$ 时) $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8)$ (当 $\delta_c > 8$ 时)	1. 非特殊工况(非疲劳、低温及大的温度梯度)的一类压力容器; 2. 适用于在容器内有较好施焊条件的接管与设备的焊接
B		$\beta = 20^\circ \pm 2^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $K_1 = 1.4\delta_m$, 且 $K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c$ (当 $\delta_c \leq 8$ 时) $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8)$ (当 $\delta_c > 8$ 时) $K_3 \geq 6$	1. 非特殊工况(非疲劳、低温及大的温度梯度)的一类压力容器; 2. 适用于在容器内有较好施焊条件的接管与设备的焊接
C		$\beta_1 = 15^\circ \pm 2^\circ$ $\beta_2 = 45^\circ \pm 5^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $P = 2 \pm 0.5$ $K_1 = \delta_m/3$, 且 $K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c$ (当 $\delta_c \leq 8$ 时) $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8)$ (当 $\delta_c > 8$ 时)	1. 多用于壳体内不具备施焊条件或进入壳体施焊不便的场合; 2. 该全焊透结构适用于 $\delta_m \geq \delta_n/2$ (当 $\delta_n \leq 16$ 时) 或 $\delta_m \geq 8$ (当 $\delta_n > 16$ 时)

(续)

坡口型式	接头型式	基本尺寸	使用范围
D		$\beta_1 = 35^\circ \pm 2^\circ$ $\beta_2 = 50^\circ \pm 5^\circ$ $b_1 = 5 \pm 1$ $b_2 = 2 \pm 0.5$ $K_1 = \delta_n/3, \text{ 且 } K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c (\text{当 } \delta_c \leq 8 \text{ 时})$ $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8) (\text{当 } \delta_c > 8 \text{ 时})$ $P = 2 \pm 0.5$	1. 可用于低温、储存有毒介质或腐蚀介质的容器; 2. 适用于 $\delta_m \geq \delta_n/2$ (当 $\delta_n \leq 16$ 时) 或 $\delta_m \geq 8$ (当 $\delta_n > 16$ 时)
E		$\beta_1 = 50^\circ \pm 5^\circ$ $\beta_2 = 20^\circ \pm 2^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $P = 0_0^{+2}$ $K_1 = \delta_n/3, \text{ 且 } K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c (\text{当 } \delta_c \leq 8 \text{ 时})$ $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8) (\text{当 } \delta_c > 8 \text{ 时})$	1. 可用于低温、中压容器及盛装腐蚀介质的容器; 2. 适用于 $\delta_m \geq \delta_n/2$ (当 $\delta_n \leq 16$ 时) 或 $\delta_m \geq 8$ (当 $\delta_n > 16$ 时); 3. 一般用于接管直径 $d_N \leq 150$
F		$\beta = 50^\circ \pm 5^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $K_1 = \delta_m, \text{ 且 } K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c (\text{当 } \delta_c \leq 8 \text{ 时})$ $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8) (\text{当 } \delta_c > 8 \text{ 时})$ $H = 0.7\delta_m$	1. 可用于中、低压及有内部腐蚀的工况; 2. 不适用于高温、低温、大的温度梯度及承受疲劳载荷的操作条件; 3. 一般 $\delta_m = \delta_n/2$
G		$\beta = 50^\circ \pm 5^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $K_1 = \delta_m, \text{ 且 } K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c (\text{当 } \delta_c \leq 8 \text{ 时})$ $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8) (\text{当 } \delta_c > 8 \text{ 时})$ $H_1 = 0.7\delta_m$ $H_2 = \delta_m$	1. 可用于中、低压及有内部腐蚀的工况; 2. 不适用于高温、低温、大的温度梯度及承受疲劳载荷的操作条件; 3. 一般 $\delta_m = \delta_n/2$
H		$\beta_1 = 20^\circ \pm 2^\circ$ $\beta_2 = 50^\circ \pm 5^\circ$ $b = 2 \pm 0.5$ $P = 2 \pm 0.5$ $K_1 = \delta_n/3, \text{ 且 } K_1 \geq 6$ $K_2 = \delta_c (\text{当 } \delta_c \leq 8 \text{ 时})$ $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8) (\text{当 } \delta_c > 8 \text{ 时})$	1. 可用于低温、介质有毒或有腐蚀性的操作工况; 2. 该全焊透结构适用于 $\delta_m \geq \delta_n/2$ (当 $\delta_n \leq 16$ 时) 或 $\delta_m \geq 8$ (当 $\delta_n > 16$ 时)

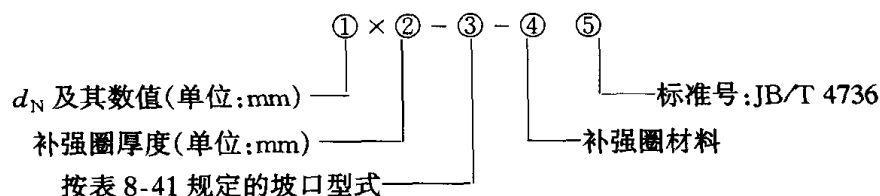
注:本表中除 β 为角度外,其余单位均为 mm

4. 技术要求

- ① 补强圈厚度按 GB 150—98 有关规定计算,并按表 8-40 选取。
- ② 补强圈与壳体、接管相连的焊接接头应根据设计条件及结构要求,参考表 8-41 A.1 选用或自行设计。用于低温压力容器的焊接接头必须采用全焊透结构。
- ③ 补强圈的材料一般与壳体材料相同,并应符合相应材料标准的规定。
- ④ 补强圈可采用整板制造或径向分块拼接。径向分块拼接的补强圈,只允许用于整体补强圈无法安装的场合,拼接焊妥后焊缝表面应修磨光滑并与补强圈母材齐平,并按 JB 4730—94 进行超声检测、Ⅱ 级为合格。
- ⑤ 被补强圈覆盖的壳体对接焊接接头和壳体、接管相连的焊接接头,应在补强圈安装前打磨至与母材齐平,补强圈的形状亦应与被补强部分壳体相符,以保证补强圈与壳体紧密贴合。
- ⑥ 安装补强圈时,应注意使螺孔放置在壳体最低的位置,螺孔的加工精度按 GB/T197—1981 中的 7H 级;补强圈其余部分的制造公差按 GB/T 1804—2000 中的 m 级。
- ⑦ 补强圈与壳体、接管的焊接,应采用经 JB 4708—2000 评定合格的焊接工艺进行施焊。施焊前应清除坡口内的铁锈、焊渣、油污、水汽等脏物。
- ⑧ 补强圈焊妥后,应对补强圈的焊缝进行检查,不得有裂纹、气孔、夹渣等缺陷;必要时应按 JB 4730—1994 做磁粉或渗透检查,Ⅰ 级合格。焊缝的成形应圆滑过渡或打磨至圆滑过渡。
- ⑨ 由 M10 螺孔通入 0.4MPa ~ 0.5MPa 的压缩空气,检查补强圈连接焊缝的质量,角焊缝不得有渗漏现象。

5. 标记

补强圈标记按如下规定:



示例:

接管公称直径 $d_N = 100\text{mm}$ 、补强圈厚度为 8mm、坡口型式为 D 型、材质为 Q235-B 的补强圈,其标记为:

$d_N 100 \times 8 - D - Q235 - B \text{ JB/T4736}$

九、法兰及管道设计

本节供非标准法兰计算用(按国家或部标准选择真空法兰时,不必作计算)。法兰简图见图 8-49。

(一) 螺栓计算

1. 螺栓载荷

操作时

$$P_{L1} = H + H_P = 0.785 D_{CP}^2 p + 2\pi b D_{CP} \cdot m p \quad (8-87)$$

预紧时

$$P_{L2} = \pi b D_{CP} \cdot y \quad (8-88)$$

式中 p ——设计压力[MPa];
 H ——总的流体静压轴向力[N];
 H_P ——连接件接触面压紧总负荷[N];
 D_{CP} ——密封圈反作用力作用点直径[cm], 当
 $b_0 \leq 0.6\text{cm}$ 时, D_{CP} 为密封圈接触面的
 平均直径, 当 $b_0 > 0.6\text{cm}$ 时, D_{CP}
 等于密封圈接触面外径减去 $2b$;
 b ——密封圈有效密封宽度, 当 $b_0 \leq 0.6\text{cm}$
 时, $b = b_0$; 当 $b_0 > 0.6\text{cm}$ 时, $b =$
 $0.79 \sqrt{b_0}$; b_0 为密封宽度(表 8-42);
 m ——密封圈系数(表 8-42);
 y ——密封圈比压(表 8-42);
 P_{L1} ——操作时螺栓负荷[N];
 P_{L2} ——预紧时螺栓负荷[N]。

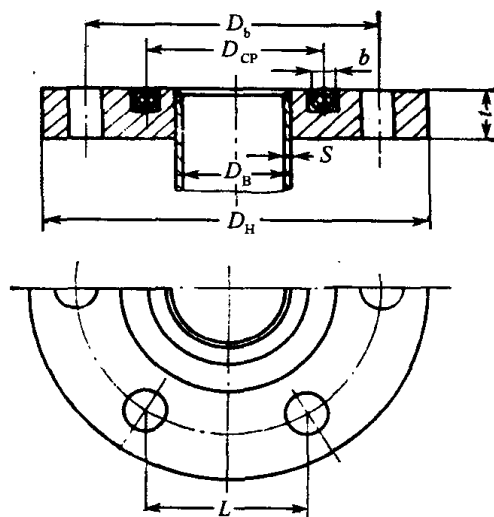






图 8-49 法兰尺寸

表 8-42 密封宽度 b_0 , 密封圈系数 m , 压力 y 值

压紧面形状简图	密封圈密封宽度 b_0		密封圈 截面简图	密封圈材料	密封圈 系数 m	压力 y /MPa
	I	II				
	$\frac{N}{2}$			软 铝 软铜或 黄铜 铁或软钢 蒙乃尔或 4% ~ 6% 铬钢 不锈钢		
	$\frac{w + \delta}{2}$ $\left(\frac{w + N}{4} \text{ 最大}\right)$	$\frac{w + \delta}{2}$ $\left(\frac{w + N}{4} \text{ 最大}\right)$				
	$\frac{w + N}{4}$	$\frac{w + 3N}{8}$				
	$\frac{w}{2}$ $\left(\frac{N}{4} \text{ 最小}\right)$	$\frac{W + N}{4}$ $\left(\frac{3N}{8} \text{ 最小}\right)$				

(续)

压紧面形状简图	密封圈密封宽度 b_0		密封圈 截面简图	密封圈材料	密封圈 系数 m	压力 y /MPa
	I	II				
	—	$\frac{N}{2}$		橡胶 O 形圈 肖氏硬度 < 75 肖氏硬度 75 ~ 85	3 6	0.69 1.47
	—	$\frac{N}{2}$		橡胶矩形截面 肖氏硬度 < 75 肖氏硬度 75 ~ 85	4 9	0.98 2.75

2. 所需要螺栓面积,按下式计算,取较大值

操作时

$$A_{m1} = \frac{P_{L1}}{[\sigma]_{\delta}^t} \quad (8-89)$$

预紧时

$$A_{m2} = \frac{P_{L2}}{[\sigma]_{\delta}} \quad (8-90)$$

式中 P_{L1} ——操作时螺栓负荷[N]; P_{L2} ——预紧时螺栓负荷[N]; $[\sigma]_{\delta}$ ——常温下螺栓许用应力, $[\sigma]_{\delta} = \frac{\sigma_s}{n_s}$ [MPa]; $[\sigma]_{\delta}^t$ ——设计温度下螺栓许用应力, $[\sigma]_{\delta}^t = \frac{\sigma_s^t}{n_s}$ [MPa]; n_s ——安全系数(见表 8-43); A_{m1} ——操作时,所需要的螺栓根部的总面积,或承受应力最小截面积总和[cm²]; A_{m2} ——预紧时,所需要的螺栓根部的总面积,或承受应力最小截面积总和[cm²].表 8-43 安全系数 n_s

螺栓直径 /mm	> 30	30、27	24、20、18	16、14、12
n_s	2.5	3	3.5	4

3. 确定螺栓个数及中心距

螺栓个数

$$n = \frac{A_m}{A_0} \quad (8-91)$$

式中 A_m ——所需要螺栓总面积(为 A_{m1} , A_{m2} 中最大者)[cm²]; A_0 ——一个螺栓的螺纹根部截面积[cm²].

螺栓中心距不得超过下式数值

$$L = \frac{7d + t}{2} \quad (8-92)$$

式中 L ——最大螺栓中心距(如图 8-49 所示)[cm]; d ——螺栓直径[cm]; t ——法兰厚度[cm].

(二) 内压法兰计算

本节计算适用如图 8-50 所示的活套法兰及任意法兰。计算过程可按表 8-44 进行。任意法兰按表 8-44 计算, 要满足下列条件: $g_0 \leq 15\text{mm}$, $\frac{D_B}{g_0} \leq 300$, 设计压力 $p \leq 1.96\text{MPa}$, 工作温度 $\leq 370^\circ\text{C}$ 。

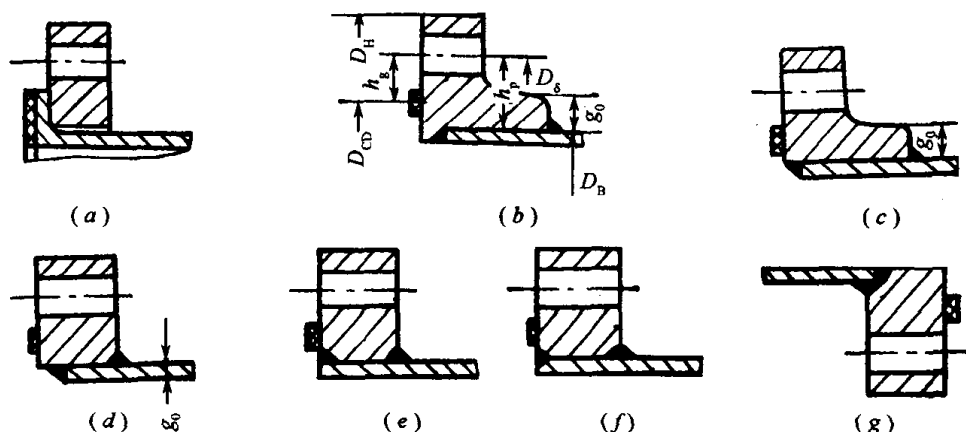


图 8-50 法兰类型

(a) ~ (c) 活套法兰; (b) ~ (g) 任意法兰。

表 8-44 活套法兰计算表

设计压力		p	MPa	垫片详图	当 $b_0 \leq 0.6\text{cm}$ 时	N	
设计温度			$^{\circ}\text{C}$		$b = b_0$	b_0	
法兰材料				法兰面详图 型式 垫片外径	当 $b_0 > 0.6\text{cm}$ 时	b	
螺栓材料					$b = 0.79 \sqrt{b_0}$	y	
腐蚀裕度			cm	$p_{L2} = 3.14 b D_{CP}$		m	
螺栓许用应力	设计温度	$[\sigma]_{\delta}^t$	MPa	$H_P = 6.28 b D_{CP} m p$			
	常 温	$[\sigma]_{\delta}$	MPa	$H = 0.785 D_{CP}^2 p$	$H_P + H$		
法兰许用应力	设计温度	$[\sigma]_{\phi}^t$	MPa	$A_m = \frac{p_{L2}}{[\sigma]_{\delta}} \text{ 或 } \frac{H_P + H}{[\sigma]_{\delta}^t} \text{ (二者中之大者)}$			
	常 温	$[\sigma]_{\phi}$	MPa	A_b			
所有尺寸均不包括腐蚀裕度				$p_L = (A_m)[\sigma]\delta$			
				垫片宽度校核		$N_{\min} = \frac{A_b \times [\sigma]\delta}{6.284 y D_{CP}}$	
操 作 情 况							
$H_D = 0.785 D_B^2 P$			$h_D = 0.5(D_{\delta} - D_B)$			$H_D h_D$	
$H_G = H_P$			$h_G = 0.5(D_{\delta} - D_{CP})$			$H_G h_G$	
$H_T = H - H_D$			$h_T = 0.5(h_D + h_G)$			$H_T h_T$	
						M_P	
预 紧 螺 栓 情 况							
$H_G = P_L$			$h_G = 0.5(D_{\delta} - D_{CP})$			$M_s = H_G H_G$	
$M_0 = M_P \text{ 或 } M_s \times \frac{[\sigma]_{\phi}^t}{[\sigma]_{\phi}} \text{ (二者中之大者)}$				$C_F = \sqrt{\frac{\text{螺栓中心距}}{2(\text{螺栓直径}) + t}} \geq 1$		$M = \frac{M_0 \times C_F}{D_B}$	

(续)

	<p>形状常数</p> $K = \frac{D_H}{D_B}$ $Y = \frac{1}{K-1} \left(0.66845 + 571690 \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right)$ $t = \sqrt{\frac{YM}{[\sigma]_t^t}}$
<p>* $D_{CP} = (\text{接触面外径}) - 2b$</p>	

注: A_b 为螺栓的螺纹根部实际断面积总和或承受应力的实际最小断面积总和。表中符号意义, 同公式(8-87) 及(8-88)

1. 法兰弯矩

操作时

$$M_P = H_D h_D + H_T h_T + H_G h_G \quad (8-93)$$

预紧螺栓时

$$M_a = P_L h_G \quad (8-94)$$

式中 M_P ——在操作情况下作用在法兰上的总弯矩[N·m];

M_a ——在预紧螺栓时作用在法兰上的总弯矩[N·m];

H_D ——作用在法兰内径面积上的流体静压轴向力, $H_D = 0.785 D_B^2 P$ [N]; $H_T = H - H_D$;

H ——流体静压总轴向力, $H = 0.785 D_{CP}^2 \cdot p$ [N];

$H_G = H_P = 2\pi b D_{CP} m P$, 总的连接件接触面压紧载荷[N];

P_L ——螺栓设计载荷[N], $P_L = A_m [\sigma]_\delta$;

A_m ——螺栓总面积(取 A_{m1} 和 A_{m2} 的最大者)[cm²];

$[\sigma]_\delta$ ——常温下螺栓许用应力(见本章二[MPa]);

h_D 、 h_T 、 h_G 见表(8-45)。

表 8-45. h_D 、 h_T 、 h_G

法 兰 种 类	h_D	h_T	h_G
任意法兰(4)(5)(6)(7)	$\frac{D_\delta - D_B}{2}$	$\frac{h_D + h_G}{2}$	$\frac{D_\delta - D_{CP}}{2}$
松套法兰(2)(3)	$\frac{D_\delta - D_B}{2}$	$\frac{D_\delta - D_{CP}}{2}$	$\frac{D_\delta - D_{CP}}{2}$
松套法兰(1)	$\frac{D_\delta - D_B}{2}$	$\frac{D_\delta - D_{CP}}{2}$	$\frac{D_\delta - D_{CP}}{2}$

注: D_δ ——螺栓中心圆直径(见图 8-49)[cm];
 D_B ——法兰内径[cm]

2. 法兰应力及强度校核

$$\sigma_2 = \frac{YM}{t^2} \leq [\sigma]_t^t \quad (8-95)$$

式中 σ_2 ——法兰中的切向应力[MPa];

Y ——与 $K = \frac{D_H}{D_B}$ 有关的系数(如图 8-51 所示),

$$Y = \frac{1}{K-1} \left(0.66845 + 571690 \frac{K^2 \cdot \log_{10} K}{K^2 - 1} \right) \textcircled{1}$$

$$M = \frac{M_0 C_F}{D_B};$$

M_0 ——法兰弯矩,选 $M_0 = M_P$ 或 $M_0 = \frac{[\sigma]_t}{[\sigma]_\varphi} M_a$ 之中最大者;

C_F ——螺栓中心校正系数, $C_F = \sqrt{\frac{\text{螺栓中心距}(l)}{2(\text{螺栓公称直径}) + t}}$;

t ——法兰厚度[cm];

$[\sigma]_\varphi^t$ ——法兰设计温度下许用应力(见本章二)[MPa];

$[\sigma]_\varphi$ ——法兰常温下许用应力(见本章二)[MPa]。

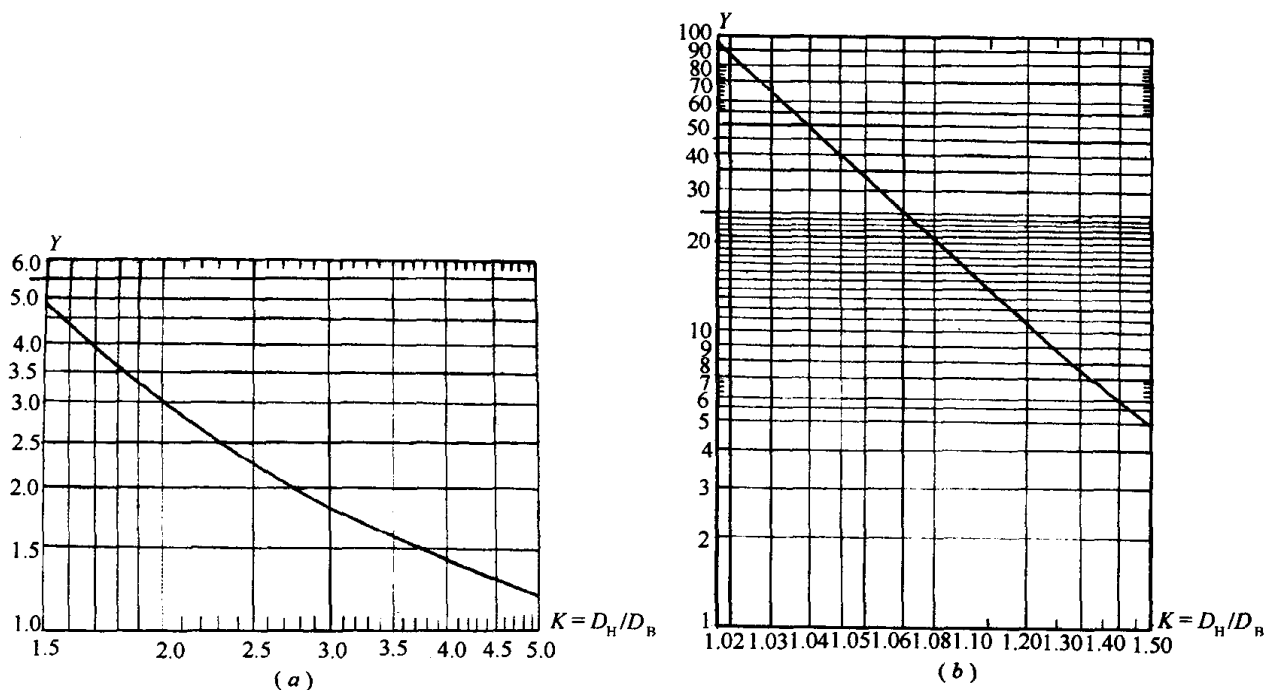


图 8-51 K 与 Y 关系曲线

(三) 外压法兰计算

外压法兰可按内压法兰计算,而法兰弯矩按下式确定:

1. 在操作情况下

$$M_P = H_D(h_D - h_G) + H_T(h_T - h_G) \quad (8-96)$$

2. 在预紧螺栓时

$$M_a = P_L h_G \quad (8-97)$$

式中 P_L ——螺栓负荷, $P_L = A_{m2}[\sigma]_\delta[N]$;

① 假定泊松系数为 0.3。

$$H_D = 0.785 D_B^2 \cdot p [\text{N}];$$

$$H_T = H - H_D [\text{N}];$$

$$H = 0.785 D_{CP}^2 \cdot p [\text{N}];$$

p ——设计外压力[MPa]。

符号意义同公式(8-87)、(8-88)。

(四) 管道壁厚计算

下列计算适用于外径 $\leq 200\text{mm}$ 的受内压或外压的管子,管子承受静载荷,且直径比 $d_a/d_i \leq 1.7$ 。

1. 计算公式

① 壁温 $\leq 120^\circ\text{C}$,

$$S = \frac{d_a \cdot p}{200 \gamma [\sigma]} + C_1 + C_2 = S_0 + C_1 + C_2 \quad (8-98)$$

② 壁温 $> 120^\circ\text{C}$,

$$S = \frac{d_a \cdot p}{200 \gamma [\sigma] + P} + C_1 + C_2 = S_0 + C_1 + C_2 \quad (8-99)$$

式中 S ——管子壁厚[mm];

S_0 ——计算壁厚[mm];

d_a ——管子外径[mm];

d_i ——管子内径[mm];

p ——设计压力[MPa];

$[\sigma]$ ——管子材料许用应力[MPa];

C_1 ——壁减薄量的附加量[mm](对于无缝钢管查冶金部标准);

C_2 ——腐蚀裕度或磨损量[mm];

γ ——纵焊缝的焊缝系数,对无缝钢管 $\gamma = 1$ 。

2. 许用应力 $[\sigma]$

① 工作温度 $\leq 120^\circ\text{C}$ 时,钢材可取 20°C 的屈服限 σ_s ,除以安全系数 n_s ,即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s}$$

② 工作温度 $> 120^\circ\text{C}$ 时,取下列两者最小值:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s^t}{n_s} \quad (8-100)$$

或

$$[\sigma] = \frac{\sigma_D^t}{n_D} \quad (8-101)$$

式中 σ_s^t ——工作温度下最小热屈服限[MPa];

n_s ——安全系数,对于钢材受内压时, $n_s = 1.8$,受外压时 $n_s = 2.2$;

σ_D^t ——工作温度下的平均持久限[MPa](取 10 万 h 时);

n_D ——安全系数,对于钢材 $n_D = 1.6$ 。

③ 对于有色金属,

$$[\sigma] = \sigma'_b / n_b$$

式中 σ'_b —— 计算温度下的强度限[MPa];

n_b —— 安全系数,内压时 $n_b = 4.0$,外压时 $n_b = 4.8$ 。

3. 焊缝系数 γ

单面焊接的焊缝 $\gamma = 0.7$;

双面或有衬垫的单面焊缝 $\gamma = 0.8$;

有特殊检验要求并退火的双面焊缝 $\gamma = 0.9$ 。

第九章 真空系统设计

设计真空系统主要是决定系统如何配置,选择系统的基本结构,选配抽气设备、管道、阀门等真空元件。一般情况下,真空系统的设计计算主要解决两个基本问题:

① 根据真空设备产生的气体量、工作压力、极限真空及抽气时间等,选配主泵的类型,确定管路及选择真空元件。

② 计算真空设备的抽气时间,或计算在给定的抽气时间内所达到的压力。

一、真空系统设计中的主要参数

(一) 真空室的极限压力

真空室所能达到的极限真空,由下式决定

$$p_j = p_0 + \frac{Q_0}{S_p} \quad (9-1)$$

式中 p_j ——真空室所能达到的极限真空[Pa];

p_0 ——真空泵的极限真空[Pa];

Q_0 ——空载时,长期抽气后真空室的气体负荷(包括漏气、材料表面出气等)[Pa·L/s];

S_p ——真空室抽气口附近泵的有效抽速[L/s]。

真空室的极限真空通常总是低于真空抽气机组的极限真空。两者之差取决于 Q_0/S_p ,在抽气口附近泵有效抽速一定的条件下,真空室的极限真空正比于真空室的漏气和出气。

在设计真空系统时,漏气量主要由真空室的极限真空和工作压力来确定。一般选取低于工作状态下气体负荷(工艺生产中放出的气体量)的十分之一。

表 9-1 给出了各种真空装置允许的漏气量值。

表 9-1 真空装置允许漏量实例

漏量/Pa·L·s ⁻¹	装置名称	漏量/Pa·L·s ⁻¹	装置名称
10 ⁴	简单减压装置、真空过滤装置、真空成形装置	10 ⁻³	有关原子炉真空装置
10 ³	减压干燥装置、真空浸渍装置、真空输送装置	10 ⁻⁴	真空冶金装置
10 ²	减压蒸馏装置、真空除气装置、真空浓缩装置	10 ⁻⁵	回旋加速器
10	真空蒸馏装置	10 ⁻⁶	高真空排气装置
1	高真空蒸馏装置	10 ⁻⁷	真空绝热装置、宇宙空间模拟装置
10 ⁻¹	分子蒸馏装置	10 ⁻⁸	封离、切断真空装置
10 ⁻²	附有抽气泵的水银整流器	10 ⁻⁹	真空管、电子束管

注:此表为各类真空装置允许漏量的统计值,仅供设计参考

(二) 真空室的工作压力

真空室正常工作时所需的工作压力由下式决定：

$$p_g = p_j + \frac{Q_1}{S_p} = p_0 + \frac{Q_0}{S_p} + \frac{Q_1}{S_p} \quad (9-2)$$

式中 p_g ——真空室工作压力[Pa]；

Q_1 ——工艺生产过程中真空室的气体负荷[Pa·L/s]。

其余符号同公式(9-1)。

真空室的工作压力一般高于其极限真空。工作压力选择得愈接近极限真空,真空抽气设备的经济效率愈低。从经济方面考虑,最好在主泵的最大抽速或最大排气量附近选择工作压力。一般工作压力多半选择在高于极限压力半个到一个数量级。各类真空泵的工作压力范围见表 9-2。工业常用真空泵最佳工作范围见表 9-3。

表 9-2 各种真空泵工作压力范围

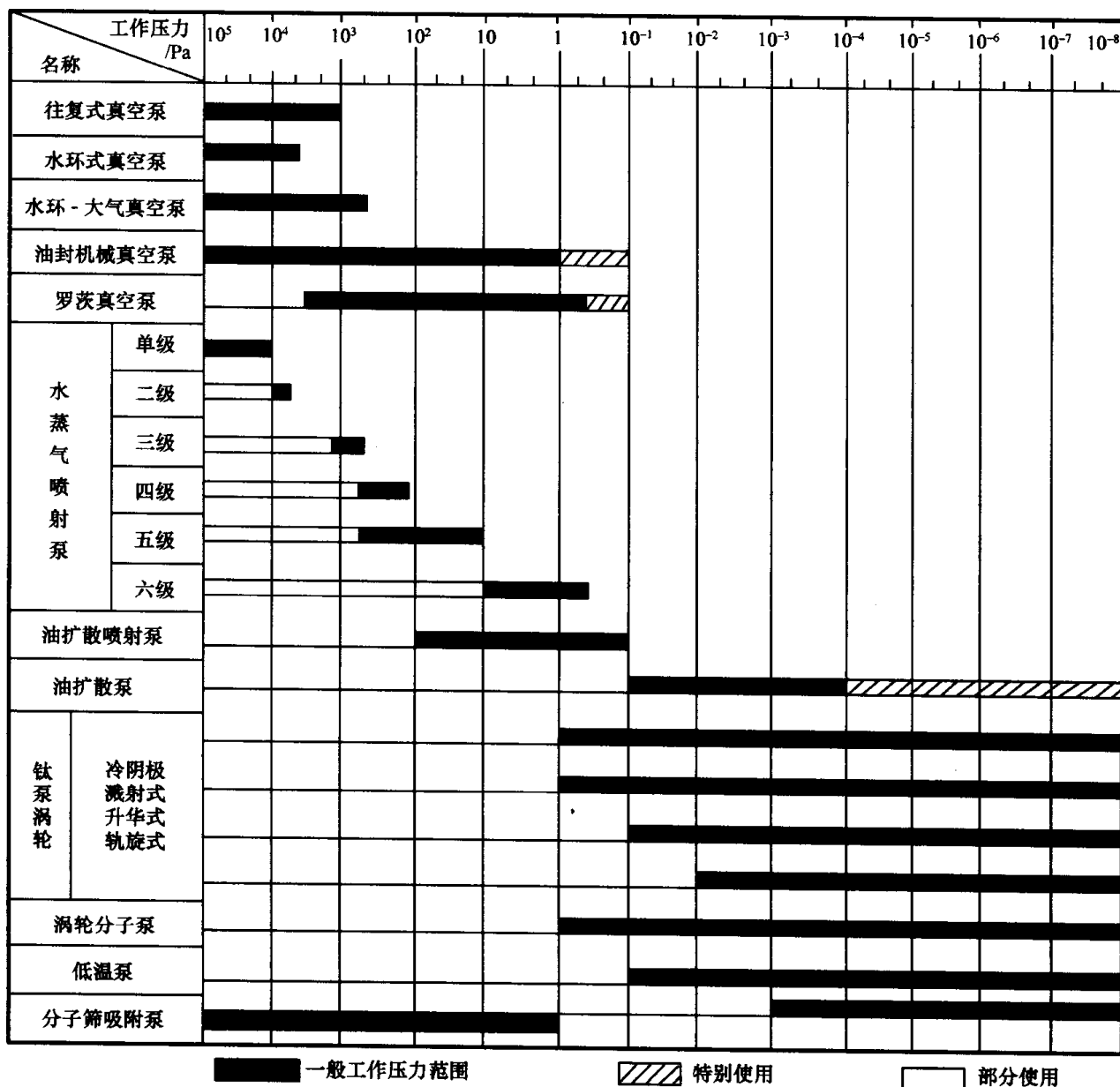


表 9-3 工业常用真空泵最佳工作范围

泵种类	油封机械泵	水蒸气喷射泵	罗茨泵	油扩散喷射泵	油扩散泵
最佳工作范围/Pa	$10^5 \sim 10$	$10^5 \sim 10^2$	$10^2 \sim 1$	$1 \sim 10^{-1}$	$5 \times 10^{-2} \sim 10^{-4}$

(三) 真空室抽气口处泵的有效抽速

最简单的真空抽气系统如图 9-1 所示。

真空室的气体负荷 $Q[\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$, 通过流导为 U 的管道被真空机组或真空泵抽走。图中 S 为真空室抽气口的有效抽速, 而 p 、 p_p 分别为管道入口和出口压力, S_p 则为真空泵的抽速。

依据流量的定义有

$$Q = U(p - p_p) \quad (9-3a)$$

泵口压力为 p_p 、泵的抽速为 S_p , 泵抽走的气体流量为

$$Q = S_p p_p \quad (9-3b)$$

管道入口压力为 p , 有效抽速为 S , 通过入口的气流量为

$$Q = S p \quad (9-3c)$$

在动态平衡时, 流经任意截面的气体流量相等。由式(9-3a)、(9-3b) 及(9-3c) 得

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \quad (9-3d)$$

或

$$S = \frac{S_p \cdot U}{S_p + U} \quad (9-3e)$$

在 S_p 为定值时, 真空抽气系统的有效抽速随管道流导变化, 三者关系如图 9-2 所示。

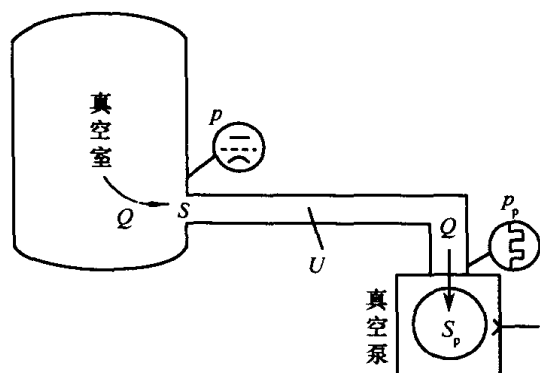


图 9-1 抽气系统原理

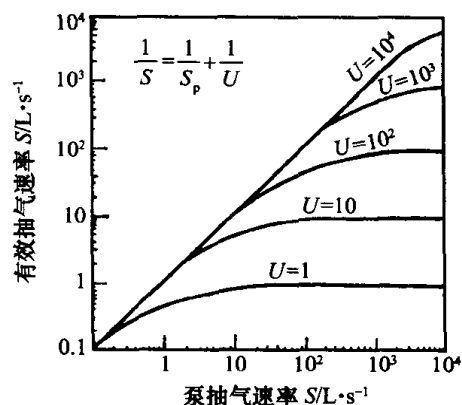


图 9-2 有效抽速、机组抽速与流导的关系

由公式(9-3d) 和(9-3e) 可知, 如果管道的流导很大, 即 $U \gg S_p$ 时, 则 $S \approx S_p$, 在此情况下, 有效抽速 S 只受泵的限制。若 $U \ll S_p$, 则 $S \approx U$, 在此情况下, 有效抽速 S 就受到管道流导的限制。由此可见, 为了提高泵的有效抽速, 必须使管道流导尽可能增大, 为此管道应该短而粗, 尤其是高真空管道更应如此。在一般情况下, 对于高真空管道, 泵的抽速损失不应大于

40% ~ 60%，而对低真空管道，其损失允许 5% ~ 10%。

应用列线图如图 9-3 所示，可计算有效抽速。

例如，泵的抽速 S_p 为 10L/s，管道的流导 U 为 12L/s，求泵的有效抽速 S 。

方法：在 OA 线上找到 S_p 为 10L/s 的一点，在 OC 线上找到 U 为 12L/s 的一点，两点的连线交 OB 线一点，此点即为有效抽速 S 值。由图可知 S 为 5.5L/s。

为了了解机组的抽气特性，可根据真空泵实测抽速曲线及各种压力下流导计算值来绘制机组的有效抽速曲线图。

例如，抽速为 50L/s 的油封机械泵和直径 3cm，长 1000cm 的抽气管道组成的低真空抽气机组，随压力而变化的有效抽速曲线由图 9-4 给出。

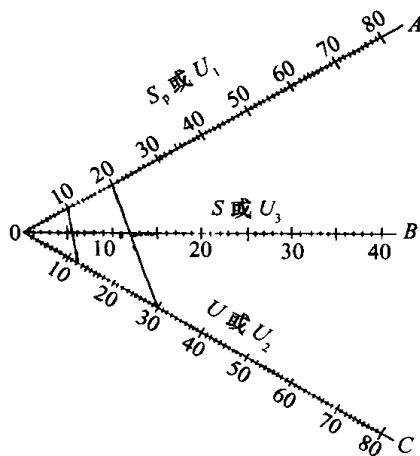


图 9-3 计算串联流导和有效抽速的列线图

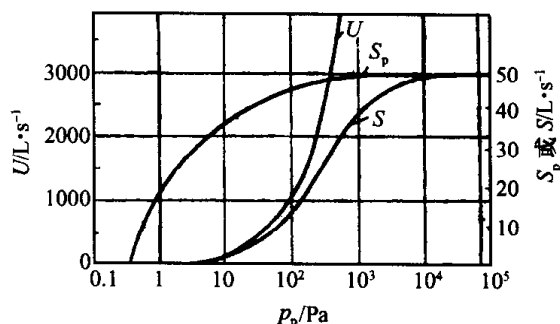


图 9-4 50L/s 油封机械泵和 $d = 3\text{cm}$ 、 $L = 1000\text{cm}$ 管道组成的低真空抽气机组有效抽速曲线

绘制步骤：

- ① 根据真空泵产品目录绘制真空泵实测抽速曲线 S_p ；
- ② 根据公式 (2-24) 计算直径 3cm、长 1000cm 的管道在平均压力 \bar{p} 分别为 1Pa、10Pa、 10^2Pa 、 10^3Pa 、 10^4Pa 、 10^5Pa 时各点的流导 U ；
- ③ 根据公式 (9-3e) 计算对应压力下的有效抽速 S ，见表 9-4。

表 9-4 $d = 3\text{cm}$ 、 $L = 1000\text{cm}$ 的管道与 50L/s 油封机械泵串联后的有效抽速
(假设 $p_1 = p_2$ ， p_1 、 p_2 分别为管道进出口压力)

平均压力 \bar{p} /Pa	管道流导 U /L·s ⁻¹	真空泵抽速 S_p /L·s ⁻¹	机组有效抽速 S /L·s ⁻¹
1	1.474×10^{-1}	20	0.15
10	1.474	35	1.41
10^2	14.742	46	11.16
10^3	147.42	48	36.21
10^4	1474.2	49	47.59
10^5	11203.9	50	49.85

根据表 9-4 计算数据，绘制图 9-4。

从图 9-4 中可见该机组在 10^4Pa 以上工作时，由于管道流导 U 比真空泵抽速 S_p 大很多倍，真空泵抽速损失很小。因而，有效抽速近似等于真空泵的抽速。当真空泵在 10^3Pa 左右工

作时,泵的抽速损失较多,以致使有效抽速下降到泵的抽速 70% 左右。真空泵在 10^2Pa 工作时,泵的抽速损失更大。由此可见该机组在 $10^5\text{Pa} \sim 10^4\text{Pa}$ 之间工作较为合适,在 10^2Pa 以下不宜使用。

二、抽气时间计算

(一) 粗真空、低真空下抽气时间计算

在粗真空、低真空下,真空设备本身内表面的出气量与设备总的气体负荷相比,可以忽略不计。因而,在粗真空、低真空情况下计算抽气时间时一般不需要考虑出气的影响。

简单的抽气系统原理图如图 9-5 所示。它由真空室、管道和真空泵三部分组成。 S 为泵的有效抽速; S_p 为泵的名义抽速; p 为真空室某一时刻的压力; p_0 为真空室的极限压力; U 为管道流导。

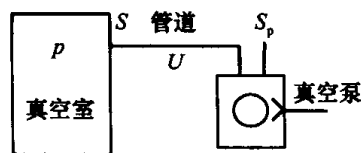


图 9-5 真空系统原理图

1. 泵的抽速近似常量时的抽气时间计算

① 若漏气量很小以至可以忽略时,真空设备从压力 p_i 降到 p 所需要的抽气时间 t :

当流导很大($U \gg S_p$) 时,则 $S \approx S_p$, 此时

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \lg \frac{p_i}{p} \quad [\text{s}] \quad (9-4)$$

流导为 U 时, $\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U}$, 则

$$t = 2.3 V \left(\frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \right) \lg \frac{p_i}{p} \quad [\text{s}] \quad (9-5)$$

② 若漏气量 Q_0 很大以至不能忽略时,真空室所能达到的极限压力 $p_0 = Q_0/S$, 真空设备从压力 p_i 降到 p 所需要的抽气时间为:

当流导很大($U \gg S_p$) 时,则 $S \approx S_p$, 此时

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \lg \frac{p_i - p_0}{p - p_0} \quad (9-6)$$

当流导为 U 时, $\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U}$, 则

$$t = 2.3 V \left(\frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \right) \lg \frac{p_i - p_0}{p - p_0} \quad (9-7)$$

式中 t ——抽气时间[s];
 V ——真空设备容积[L/s];
 S ——泵的有效抽速[L/s];
 S_p ——泵的名义抽速[L/s];
 p ——设备经 t 时间的抽气后的压力[Pa];
 p_i ——设备开始抽气时压力[Pa];

p_0 ——真空室的极限压力[Pa];

U ——管道的流导[L/s];

Q_0 ——空载时,长期抽气后真空室的气体负荷(由漏气、材料表面出气形成的)。

③ 抽速 S_p 近似于常数,管道 U 是变量时的抽气时间计算(适合于粘滞流时的粗略计算);
先把真空设备工作压力范围划分为几个区域,按每个区的平均压力计算流导,再按下式计算抽气时间

$$t = \frac{V}{S_p} \ln \frac{p_1}{p_{n+1}} + V \left(\frac{1}{U_1} \ln \frac{p_1}{p_2} + \frac{1}{U_2} \ln \frac{p_2}{p_3} + \cdots + \frac{1}{U_n} \ln \frac{p_n}{p_{n+1}} \right) \quad (9-8)$$

式中 t ——抽气时间[s];

V ——被抽真空设备容积[L];

S_p ——泵的名义抽速[L/s];

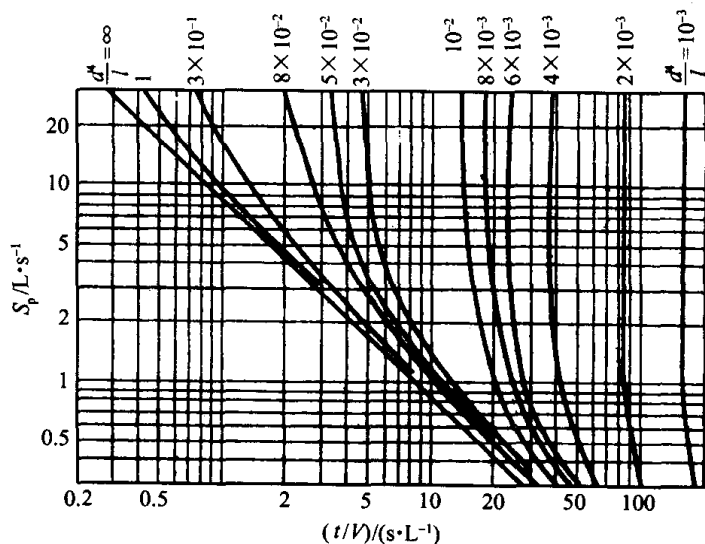
p_1 ——开始抽气时的压力[Pa];

p_{n+1} ——经 t 时间的抽气后的压力[Pa];

U_1 ——为 p_1 与 p_2 压力区域间的计算流导, U_2 为 p_2 与 p_3 压力区域的计算流导,其余类推[L/s];

p_2, p_3, \cdots, p_n ——分别为所分的压力区域各点压力[Pa]。

利用图 9-6 给出的一簇曲线,可以计算粘滞流状态下的抽气时间。图 9-6 的横坐标表示将容积为 1L 的容器由大气压下降到 10Pa 时所需的抽气时间,纵坐标表示泵的抽速。



10^{-1} 的曲线交于一点,由该点作垂线,交于 $\frac{t}{V}$ 线于一点,即得 $5s/L$ 。

③ 容积为 50L,所需的抽气时间为

$$t = 5s/L \times 50L = 250s$$

2. 泵的抽速为变量时的抽气时间计算

管道流导为 U ,在极限压力可以忽略的情况下,可将 $S_p = f(p)$ 曲线图,划分为几个区域(如图 9-7 所示),取每个区域的抽速的平均值,分段计算抽气时间:

$$t = V \left(\frac{1}{\bar{S}_{p1}} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} + \frac{1}{\bar{S}_{p2}} \ln \frac{p_2}{p_3} + \cdots + \frac{1}{\bar{S}_{pn}} \cdot \ln \frac{p_n}{p_{n+1}} \right) + \frac{V}{U} \ln \frac{p_1}{p_{n+1}} \quad (9-9)$$

式中 t ——抽气时间[s];

V ——被抽真空设备容积[L];

\bar{S}_{p1} 、 \bar{S}_{p2} ——分别为压力在 p_1 与 p_2 , p_2 与 p_3 之间泵的抽速的平均值[L/s];

p_1 ——为开始抽气时的压力[Pa];

p_{n+1} ——经 t 时间抽气后的压力[Pa];

p_2 、 p_3 、 \cdots 、 p_n ——分别为所分的几个压力区域中各点的压力[Pa]。

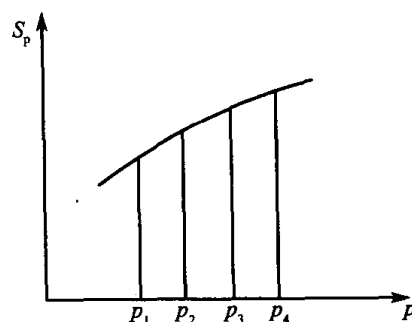


图 9-7 抽速曲线 $S_p = f(p)$

3. 机械泵的抽气时间计算

真空室用机械泵从大气开始抽气时,在低真空区域内,机械泵的抽速随真空度升高而下降。其抽气时间用下式计算

$$t = 2.3K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{p_i - p_0}{p - p_0} \quad (9-10)$$

若忽略 p_0 ,则

$$t = 2.3K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{p_i}{p} \quad (9-11)$$

式中 t ——抽气时间[s];

S_p ——泵的名义抽速[L/s];

V ——真空设备容积[L];

p ——经 t 时间抽气后的压力[Pa];

p_0 ——真空设备的极限压力[Pa];

p_i ——设备开始抽气时的压力[Pa];

K_q ——修正系数,与设备抽气终止时的压强 P 有关,见表 9-5。

表 9-5 修正系数 K_q

p/Pa	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10$	$10 \sim 1$
K_q	1	1.25	1.5	2	4

4. 用粗真空抽气时间曲线及抽气时间列线图来计算真空室的抽气时间

图 9-8 使用说明:① 此曲线是单位容积的真空设备用单位抽速的泵抽气时所达到的压力与所需抽气时间的关系曲线。容积与抽速的单位应一致(L 和 L/min; m^3 和 m^3/min)。

② 虚线表示不考虑极限压力 p_0 的情况,实线则表示考虑极限压力 p_0 的情况。

③ 此曲线最适用于没有气镇的双级机械真空泵。

④ 利用此曲线可计算任意容积的真空系统的抽气时间。

例如,真空设备容积为 2m^3 , 泵的抽速为 $80\text{m}^3/\text{h}$, 试计算从大气压下降到 10^3Pa 所需要的抽气时间。

方法:① 由图 9-8 可知容积为 1m^3 , 泵的抽速为 $1\text{m}^3/\text{min}$ 时, 从大气压降到 10^3Pa 所需抽气时间为 $t_1 = 4.6\text{min}$;

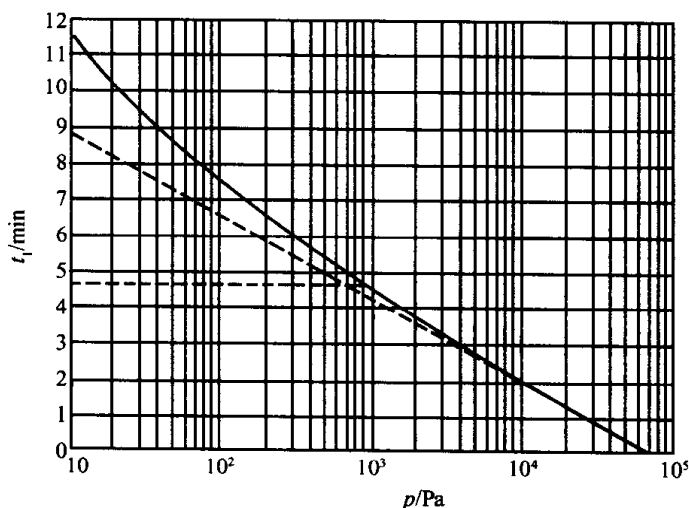


图 9-8 粗抽时间曲线

② 设备的容积 $V = 2\text{m}^3$ 、泵的抽速 $S_p = 80\text{m}^3/60\text{min}$ 时抽气时间应为

$$t = t_1 \cdot \frac{V}{S_p} = 4.6 \times \frac{2}{80/60} = 6.9 \text{ [min]}$$

图 9-9 抽气时间列线图可用于计算真空室的抽气时间。

① V 线是真空设备的容积[L], S_p 线是泵的抽速[L/s], t 线表示抽气时间[s], p 线右半部数值表示设备从大气压抽到所需要的压力(Pa)。

② 从 V 线找到设备的容积一点, S_p 线上找到泵抽速一点, 两点连成一直线, 交 V/S_p 线于一点, 此点与 p 线上对应于所希望达到压力的一点连一直线并与 t 线相交, 即得抽气时间。

③ 如果不是从大气开始而是从 p_1 开始抽到 p_2 , 则应求出 $p_2/p_1 = x$ 的值, 将 x 点与 V/S_p 相联结交于 t 线一点, 此点值即为抽气时间。

④ 此列线图已考虑了低压力下泵的抽速会减小的问题。

例 1: 真空设备容积为 5m^3 , 泵的抽速为 $120\text{m}^3/\text{h}$, 从大气抽到 13.3Pa 时所需要的时间。

方法: 在 V 线上查到 $V = 5\text{m}^3 = 5000\text{L}$ 的一点 A ; 在 S_p 线上查到 $S_p = 120\text{m}^3/\text{h}$ 的一点 B , A 与 B 两点连成一直线与 V/S_p 线交于一点 C , 在 p 线上查到 $p = 13.3\text{Pa}$ 的一点 D , C 和 D 两点连成一直线, 与 t 线交于一点 E , E 点就是所求的抽气时间, 即 $t = 1800\text{s} = 30\text{min}$ 。

例 2: 真空设备容积为 5m^3 , 泵的抽速 S_p 为 $700\text{m}^3/\text{h}$, 从 13.3Pa 抽到 0.133Pa 求所需要的抽气时间。

方法: 连结 A 和 B' 点 (B' 点为 $S_p = 700\text{m}^3/\text{h}$), 延长 AB' 交 V/S_p 线于一点 C' , 又 $x = p_1/p_2 = 100$, 在 p 线左边 x 线查到一点 D' , C' 和 D' 连线与 t 线交于 E' 点, E' 点即为所求的抽气时间, 即得 $t = 120\text{s}$ 。

(二) 高真空下抽气时间计算

在高真空领域内, 真空设备内材料的出气可以忽略时, 真空室的抽气时间计算与低真空抽

二、抽气时间计算

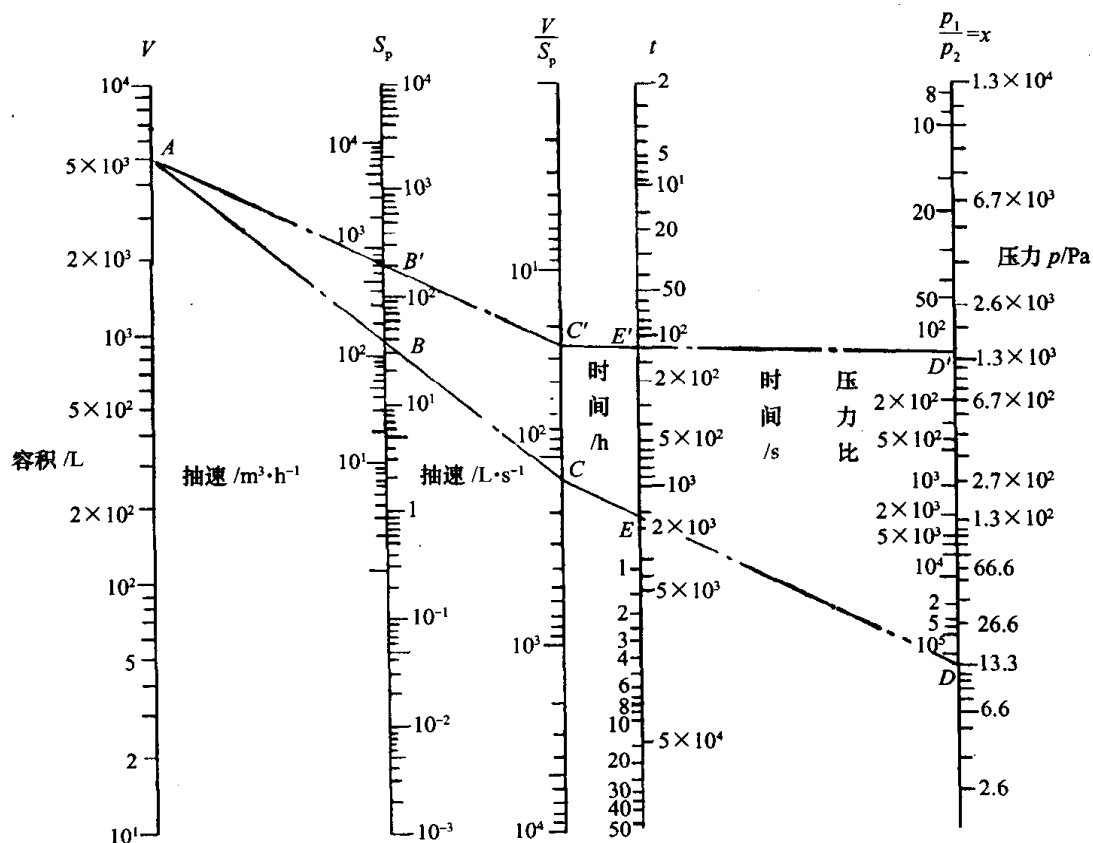


图 9-9 计算抽气时间列线图

气计算相同。由于高真空泵抽速较大,这段时间很短。实际上高真空的抽气时间,主要取决于材料出气。

在刚开始抽气的几十小时内,材料出气率是变量,因而真空室的总出气量随抽气时间而衰减。计算到达某一压力所需的时间由总出气量和泵(或机组)的有效抽速的比值决定。一般可用查材料出气率曲线和绘图方法进行计算。

例如计算抽到压力 p 需要的抽气时间步骤如下:

① 计算真空室平衡压力为 p 时的出气量 Q , 其值等于泵(或机组)在压力为 p 时的排气量, 即

$$Q = p \cdot S \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$$

② 计算真空室中材料表面积为 A 的平均出气速率 \bar{q} , 即

$$\bar{q} = Q/A \quad [\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$$

③ 根据材料出气率曲线, 查出 \bar{q} 的点, 与此点相对应的时间, 即为达到平衡压时所需要的时间。

计算举例:

碳钢制作的真空室内放置实验用铜板, 钢和铜的面积各为 $4 \times 10^4 \text{cm}^2$, 用有效抽速为 10^3L/s 的高真空机组抽气时, 室温下要获得 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 需要多少时间(漏气可以忽略)?

[解] ① 计算真空室在平衡压力为 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时的允许出气量

$$Q = p \cdot S = 5 \times 10^{-4} \times 10^3 = 5 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$$

② 计算钢板和铜板两者的平均出气率

$$\bar{q} = \frac{Q}{A} = \frac{5 \times 10^{-1}}{8 \times 10^4} = 6.25 \times 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] =$$

$$6.25 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)]$$

③ 作碳钢和铜板两者叠加后的平均出气率曲线(图 9-10)。

④ 查曲线图 9-10 得: 出气率为 $6.25 \times 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{L} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$ 时的出气时间为 0.41h, 这一时间就是所求的抽气时间。

说明:

① 真空室只有一种材料时, 不需要作叠加曲线, 只需查出气率曲线即可。

② 当材料种类很多时, 可将出气率很小(或面积很小)的某些材料的出气忽略不计, 只需作几种出气率大的材料的出气率的叠加曲线, 以使计算简化。

③ 当材料面积不等时, 可按材料面积倍数作叠加曲线。如上例中, 假如碳钢的表面积为铜板面积的 20 倍, 碳钢出气率则应增加 20 倍, 以此作出叠加出气率曲线。

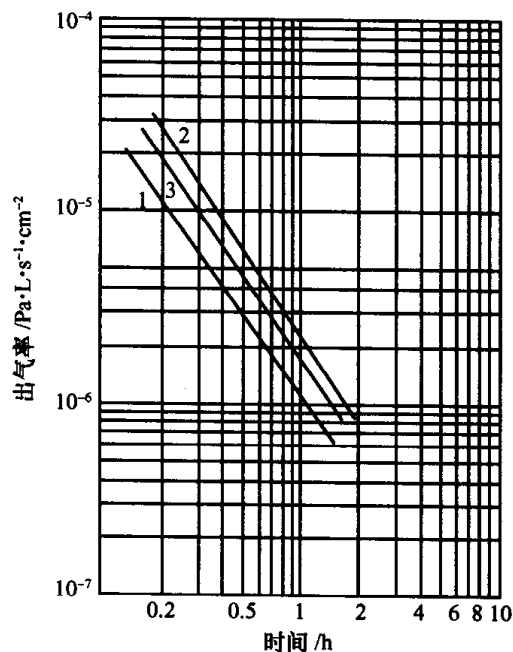


图 9-10 碳钢、铜板及叠加后的出气率曲线

1—碳钢的出气率; 2—铜的出气率;
3—叠加后的平均出气率。

(三) 真空室压力下降至初始压力的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{10}$ 和 $\frac{1}{e}$ 时的抽气时间

真空室内压力降到初始压力的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{10}$ 和 $\frac{1}{e}$ ($e = 2.718, 1/e = 0.368$) 的抽气时间用下列公式计算:

降至初始压力的 $\frac{1}{2}$ 时的抽气时间

$$t_{1/2} = 0.693 \frac{V}{S} \quad (9-12)$$

降至初始压力的 $\frac{1}{10}$ 时的抽气时间

$$t_{1/10} = 2.303 \frac{V}{S} \quad (9-13)$$

降至初始压力的 $\frac{1}{e}$ 时的抽气时间(称为时间常数)

$$t_{1/e} = \frac{V}{S} \quad (9-14)$$

式中 V ——真空室的容积[L];

S ——泵(或机组)对真空室抽气口的有效抽速[L/s]。

三、出气对真空系统的影响

(一) 局部出气时对稳定过程或瞬变过程计算的影响

稳态出气过程中, 恒定气体量获得的平衡压力(忽略泵的极限压力)为

$$p_1 = \frac{Q}{S} \quad (9-15a)$$

事实上出气量 Q 随抽气时间而缓慢变化。非稳态出气时,其瞬态方程式为

$$p = (p_i - p_0 - p_1)e^{-\frac{S}{V}t} + p_0 + p_1 \quad (9-15b)$$

式中 p ——真空室内压力[Pa];
 p_i ——时间 $t = 0$ 时的起始压力[Pa];
 p_0 ——抽气机组的极限压力[Pa];
 p_1 ——某一时刻 t 时的平衡压力,即出气量 Q 与机组有效抽速 S 之比[Pa];
 V ——真空室容积[m³];
 S ——机组有效抽速[L/s];
 t ——压力由 p_i 到 p 的时间[s];
 Q ——出气量[Pa · L/s]。

由公式(9-15b)可知真空室的极限压力为 $p_0 + p_1$;

当 $p_0 \ll p_1$,真空室内压力取决于出气,即 $Q/S = p_1$;

当 $p_0 \gg p_1$,出气可以忽略时,真空室压力取决于泵的极限压力;

当 p_0 和 p_1 为同数量级时,极限压力为 $p_0 + p_1$ 。

(二) 均匀出气条件下,细长真空室内压力分布

由于大多数真空室的直径均很大,故可以认为真空室内部压力分布均匀。但像高能加速器一类真空系统,真空室又细又长,真空室内部各处压力是不等的,如图 9-11 所示。

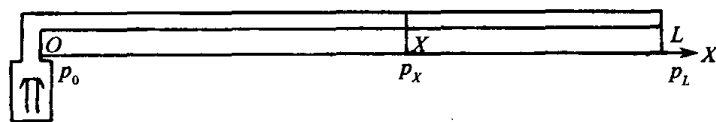


图 9-11 均匀出气的细长真空室的抽气

$$p_X = ql \left[\frac{L}{S} + \frac{x}{U} - \frac{x^2}{2UL} \right] \quad (9-16a)$$

$$p_0 = \frac{qlL}{S} = \frac{Q}{S} \quad (9-16b)$$

$$p_X - p_0 = ql \left[\frac{x}{U} - \frac{x^2}{2UL} \right] \quad (9-16c)$$

$$p_L - p_0 = \frac{qlL}{2U} = \frac{Q}{2U} \quad (9-16d)$$

式中 p_0, p_X, p_L ——分别为真空室长度方向上 O, X 和 L 各点的压力值[Pa];
 l ——真空室截面周长[m];
 L ——真空室长度[m];
 Q ——真空室壁的出气量[Pa · L/s];
 q ——真空室壁材料出气率[Pa · L/(s · cm²)];

U ——长度为 L 的管道的流导[L/s];

S —— $X = 0$ 处机组的有效抽速[L/s]。

可以看出,压力最大值在真空室最远端 L 处,压力分布呈抛物线型。在 $X = L$ 处, $\frac{dp_x}{dx} = 0$, 即真空室端部没有压力梯度。

式(9-16c)、(9-16d)表明, $p_x - p_0$ 和 $p_L - p_0$ 与抽速无关。将式(9-16b)代入式(9-16d)得真空室最远端压力为

$$p_L = p_0 \left(1 + \frac{S}{2U} \right) \quad (9-16e)$$

当 p_L 和流导 U 值给定时,对于不同的出气负载,真空室所需的机组的有效抽速为

$$S = \frac{2UQ}{2Up_L - Q} \quad (9-16f)$$

式中 Q ——真空室壁出气量, $Q = qlL$ [Pa·L/s]。

四、选泵及配泵

(一) 主泵选择及抽速计算

设计一套使用方便而又工作可靠的真空系统,选取主泵是个关键问题。选取主泵不能只追求某一项指标,必须根据使用条件多方面综合考虑。真空系统选取主泵的主要依据是:

① 空载时真空室所需要达到的极限真空度。

根据真空室所需要建立的极限真空确定主泵的类型,选取主泵的极限真空要比真空室的极限真空高,通常高半个数量级到一个数量级。

② 根据真空室进行工艺生产(或实验)时所需要的工作压力选主泵。

这项要求比较重要,因此要求能够掌握主泵的最佳抽速的压力范围,各类真空泵工作压力范围及最佳工作压力由表 9-2 及表 9-3 给出。真空室的工作压力一定要保证在主泵最佳抽速压力范围内,所需要的主泵抽速由工艺生产中放出的气量、系统漏气量及所需要的工作压力来确定。

a. 计算主泵的有效抽速。

根据真空室要求的工作压力 p_g , 真空室的总气体量 Q , 计算泵的有效抽速

$$S = \frac{Q}{p_g} \quad [\text{L/s}] \quad (9-17)$$

式中 Q 为真空室的总气体量[Pa·L/s]。 Q 通常由三部分组成,即

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (9-18)$$

式中 Q_1 ——真空室工作过程中产生的气体量;

Q_2 ——真空室及真空元件的放气量;

Q_3 ——真空室的总漏气量。

b. 确定主泵的抽速。

根据有效抽速 S 以及泵与真空室之间的连接管道的流导 U 确定主泵的抽速 S_p 。由流导串联公式有

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_p} \quad (9-19a)$$

或者

$$S_p = \frac{SU}{U - S} \quad (9-19b)$$

由式(9-19a)可见,为了增大有效抽速 S 必须增大流导 U ,为此连接管道要短而粗。管道直径不能小于主泵入口直径,目前各种真空系统抽气管道的直径通常等于主泵入口直径(特殊情况可大于抽气口的直径,如:由于管道上设置冷阱,为增大流导而使管道局部加粗)。

在计算主泵有效抽速时,通常将按式(9-17) 计算出的主泵有效抽速 S 增大 20% ~ 30% 或更大。

③ 根据被抽气体种类、成分、温度以及气体含灰尘杂质情况选主泵。蒸汽流泵对不同种类气体的理论抽速详见附录(一) 中的表(三十四) 所示。

④ 根据真空室对油污染要求的不同,来选择有油、无油或半无油真空泵作主泵。

⑤ 根据投资及日常维护运转的经济指标来选择。

(二) 前级泵的配置及抽速确定

主泵选定之后,如何配置前级泵,需遵守的原则是:

- ① 要求前级泵造成主泵工作所需的预真空条件;
- ② 抽走主泵产生的最大气体量;
- ③ 必须满足主泵进气口能工作的最大压力时所需的预抽时间要求。

不同的主泵其前级泵配置各异,分述如下。

1. 蒸汽流泵前级配置

此类泵包括油扩散泵、油扩散喷射泵以及增扩泵等。在主泵允许的最大排气口压力下,前级泵需将主泵产生的最大气体量及时抽走,即前级泵的有效抽速必须满足

$$S_q > \frac{p_g S}{p_n} \text{ 或 } \frac{Q_{\max}}{p_n} \quad (9-20)$$

式中 S_q ——前级泵的有效抽速[L/s],和选择高真空泵一样,先由 S_q 来确定前级泵的抽速,然后再根据该抽速选定泵型;

p_n ——主泵前级的临界前级压力[Pa];

Q_{\max} ——主泵所能排出的最大气体量[Pa · L/s];

p_g ——主泵允许的最高工作压力[Pa];

S ——主泵工作在 p_g 时的有效抽速[L/s]。

在选择前级泵时,应该注意机械泵的抽速是在大气压力下测得的,但正常使用的泵都是在低于大气压的条件下运转,使泵的抽速下降了,因而我们必须根据抽速曲线来选择泵。若没有抽速曲线,可参考经验公式

$$S_p = (1.5 \sim 3) S'_p \quad (9-21)$$

式中 S_p ——实际选用的前级泵的抽速;

S'_p ——计算要求的前级泵抽速。

2. 罗茨泵配置油封机械泵

罗茨泵其前级配置油封机械泵时,前级泵的抽速由经验公式确定,即

$$S_p = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{8} \right) S_L \quad (9-22)$$

式中 S_p ——前级泵的抽速[L/s];

S_L ——罗茨泵的抽速[L/s]。

式中系数选择,通常抽速大的罗茨泵取小值,抽速小的选大值。

3. 罗茨泵以水环泵为前级

罗茨泵—水环泵机组,水环泵抽速选择根据经验确定,即

$$S_s = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5} \right) S_L \quad (9-23)$$

式中 S_s ——水环泵的抽速[L/s];

S_L ——罗茨泵的抽速[L/s]。

4. 罗茨泵串联机组

罗茨泵串联机组,有两种配置方式:其一是罗茨泵—罗茨泵—机械泵;其二是罗茨泵—罗茨泵—水环泵。两种方式均是以一罗茨泵为主泵,而另一罗茨泵为前级,两罗茨泵抽速关系,由经验确定,即

$$S_{jL} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) S_L \quad (9-24)$$

式中 S_{jL} ——前级罗茨泵抽速[L/s];

S_L ——主罗茨泵抽速[L/s]。

5. 涡轮分子泵前级配置

涡轮分子泵所配置的前级泵抽速,应满足

$$S_p > \frac{Q_{\max}}{P_j} \quad (9-25)$$

式中 S_p ——前级泵的抽速[L/s];

P_j ——涡轮分子泵前级压力,通常为 2Pa;

Q_{\max} ——最大流量[Pa·L/s],涡轮分子泵平稳抽速范围为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-7}\text{Pa}$ 。故最大流量 Q_{\max} 值应等于 10^{-1}Pa 下的抽速与该压力之积。

(三) 粗抽泵抽速确定

各种低温泵、低温吸附泵(不含分子筛泵)、溅射离子泵、钛泵等均需要在某种预真空下才能启动。此时,系统所需预抽泵的抽速不仅与真空室容积有关,同时与所设定的预抽时间有关。预抽泵的抽速用下式计算

$$S_p = 2.3K_q \frac{V}{t} \lg \frac{P_2}{P} \quad [\text{L/s}] \quad (9-26)$$

式中 t ——设定预抽时间[s];

p ——系统中预真空压力[Pa]。

其余符号同式(9-11)。

对于大型真空系统,用主泵配置的前级泵作为粗抽泵时不可取。因为有时为了缩短粗抽时间,前级泵需配置较大,长期运行耗能很高,很不经济。为此,大型系统均配有专用的粗抽泵。其抽速计算同式(9-26)。

五、计算实例

设计一台有油真空系统。真空室的直径为 100cm,容积为 $V = 1.5\text{m}^3$,内表面积为 7.5m^2 。真空室材料为不锈钢(1h 后的出气率为 $2.3 \times 10^{-5}[\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$,2h 后的出气率为 $1.5 \times 10^{-5}[\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$ 。

真空室工作压力

$$p = 1.3 \times 10^{-3} [\text{Pa}];$$

真空室工艺过程中放出的气体量

$$Q_1 = 1.3 [\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}];$$

系统的总漏气量

$$Q_2 = 6.7 \times 10^{-1} [\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}];$$

被抽气体为 20℃ 干燥空气;

返流油蒸气对工艺过程有害。

(一) 确定真空室中保持 $1.3 \times 10^{-3}[\text{Pa}]$ 的工作压力所需要的真空系统的有效抽速 S

由公式(9-17) 可得

$$S = \frac{Q}{p_g}$$

式中 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ (Q_3 为真空室表面出气量,暂选不锈钢 1h 后的出气量)

$$Q_1 = 1.3 [\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}]$$

$$Q_2 = 6.7 \times 10^{-1} [\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}]$$

$$Q_3 = 2.3 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2) \times 75000 \text{cm}^2 = 1.7 [\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}]$$

将 Q 值代入式中得

$$S = \frac{Q}{p_g} = \frac{3.67}{1.3 \times 10^{-3}} = 2823 [\text{L}/\text{s}]$$

但为了可靠起见,可根据设备具体情况适当增大,我们选增大 20%,那么实际要求的有效抽速 S 应为 3388L/s。

(二) 根据要求的工作压力及使用要求,选油扩散泵作为主泵

为了防止油进入真空室中,扩散泵与真空室之间安装《山型》挡板(见表 2-19),山型挡板比流导为 $3.16\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 并配上一个高真空挡板阀,扩散泵前级泵选 2X 型机械泵组成的真

空机组(如图 9-12 所示)。

根据要求,泵的有效抽速为 3388L/s,考虑到加上阀门、挡板后泵的抽速损失(一般泵的有效抽速是泵的抽速 1/3 左右),暂选抽速为 10000L/s 的扩散泵来进行试算。由表 4-17 可见选 K-600 型扩散泵完全可满足要求。泵的进气口直径为 0.6m,排气口直径为 0.15m。

(三) 计算扩散泵与真空室排气口间管路的流导,验证选 K-600 型扩散泵是否合适

K-600 型扩散泵口径为 0.6m,为增大挡板流导,将其直径扩大到 700mm(如图 9-12 所示)。计算流导时为简化计算起见,挡板锥体部分不做计算。

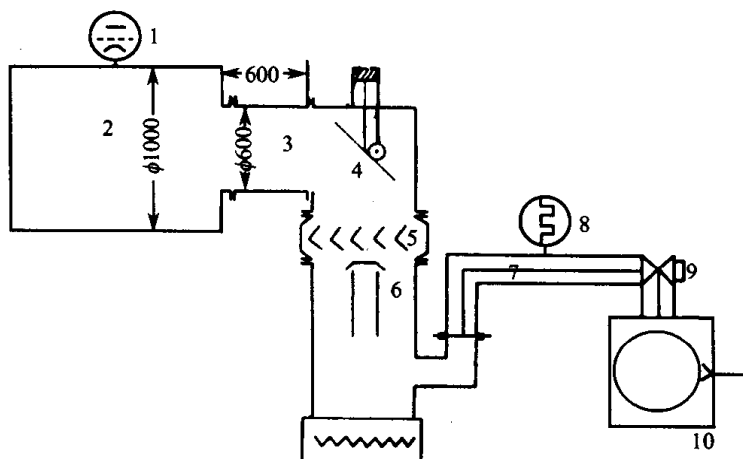


图 9-12 高真空油扩散泵系统简图

1—电离规; 2—真空室; 3—高真空管道; 4—高真空挡板阀; 5—挡板;
6—扩散泵; 7—前级管路; 8—热偶规; 9—电磁阀; 10—机械泵。

总流导由高真空管道 3 的流导、阀门 4 的流导及挡板 5 的流导串联得到。

确定气体沿管道的流动状态。真空室工作压力 p_g 为 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时,扩散泵入口压力很低,故管路出口压力可以忽略,管路中的平均压力 $\bar{p} = \frac{1}{2} p_g = 6.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$,此时 $\bar{p}d = 6.5 \times 10^{-4} \text{Pa} \times 0.6 \text{m} = 3.9 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m} < 0.02 \text{Pa} \cdot \text{m}$ 。可见为分子流。

① 高真空管道(3)的流导 由表 2-13 中公式可得

$$U_3 = 11.6 A a (a \text{ 由表 2-15 查得: } a = 0.8)$$

$$= 11.6 \frac{\pi}{4} d^2 a$$

$$= 11.6 \times 2827 \times 0.8$$

$$\approx 26000 [\text{L/s}]$$

② 阀门(4)的流导 由表 7-10 查得

$$U_4 = 14000 [\text{L/s}]$$

③ 挡板(5)的流导 由式(2-51)有

$$U_5 = U_{\text{比}} \cdot A (U_{\text{比}} \text{ 由表 2-19 查得: } U_{\text{比}} = 3.16 [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)])$$

$$= 3.16 \times \frac{\pi}{4} d^2$$

$$= 3.16 \times \frac{3.14}{4} \times 70^2$$

$$\approx 12000 [\text{L/s}]$$

④ 总流导 U

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_3} + \frac{1}{U_4} + \frac{1}{U_5} = \frac{1}{26000} + \frac{1}{14000} + \frac{1}{12000}$$

$$U \approx 5200 [\text{L/s}]$$

⑤ 计算扩散泵的抽速 S_p 由公式(9-19b) 得

$$S_p = \frac{SU}{U - S} = \frac{3388 \times 5200}{5200 - 3388} \approx 9800 [\text{L/s}]$$

由此可见,选 K-600 型扩散泵是合适的,此泵在 $10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 范围内的平均抽速为 $11000\text{L/s} \sim 13000\text{L/s}$ 。

(四) 计算前级真空管路流导

K-600 型扩散泵临界前级压力 p_n 为 40Pa 。由抽速曲线可知,在 $2.7 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 下,扩散泵最大排气量 $Q_{\max} = pS = 2.7 \times 10^{-2} \times 11000 = 297 [\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$ 。在扩散泵出口管道断面处,要求前级泵的有效抽速不小于

$$S_q = \frac{Q_{\max}}{p_n} = \frac{297}{40} \approx 7 [\text{L/s}]$$

扩散泵排气口的直径为 15cm ,选前级管道直径为 0.15m ,长度为 3m ,由于管道长可以不考虑弯角的影响。

确定流动状态:扩散泵出口压力为 40Pa ,机械泵进气口压力要比 40Pa 低得多,在计算管道中平均压力时可以忽略,故 $p = \frac{1}{2} p_n = 20\text{Pa}$ 。此时 $\bar{p}d = 20 \times 0.15 = 3\text{Pa} \cdot \text{m} > 0.67\text{Pa} \cdot \text{m}$,可见为粘滞流。

前级管道的流导由公式(2-24b) 得

$$U = 1.34 \times 10^3 \frac{d^4}{L} \bar{p} \approx 4.5 [\text{m}^3/\text{s}] = 4500 [\text{L/s}]$$

前级泵的抽速

$$S_p = \frac{S_q \cdot U}{U - S_q} \approx 7 [\text{L/s}]$$

通常把 S_p 增大 1.5 倍 ~ 3 倍后选泵。若增大 3 倍,则 S_p 为 21L/s ,可选 2X-30 型旋片式机械真空泵,若考虑到兼做粗抽泵,为缩短粗抽时间,可以选 2X-70 机械泵。

(五) 计算抽气时间

不考虑管道的容积,真空室容积为 $V = 1.5\text{m}^3$,工作压力 $p_g = 1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$,用 2X-30 型机械泵从大气抽到 13.3Pa ,其抽速 S_p 为 30L/s (因为管道流导很大,故管道对抽速的影响可以忽略)。由公式(9-11) 得

$$\begin{aligned}
 t &= 2.3K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{p_i}{p} \\
 &= 2 \times 2.3 \frac{1.5 \times 10^3}{30} \lg \frac{10^5}{13.3} \approx 15 \quad [\text{min}]
 \end{aligned}$$

一般粗抽时间不大于 10min ~ 30min。故从抽气时间角度来看,选 2X-30 型机械泵做前级泵是可以的。

计算从 13.3Pa 到 1.3×10^{-3} Pa 的抽气时间。

考虑出气的影响,1h 后的出气量 $Q_1 = 2.3 \times 10^{-5} \times 75000 = 1.7 \text{Pa} \cdot \text{L/s}$, $p = \frac{Q_1}{S} = \frac{1.7}{3388} = 5 \times 10^{-4} \text{Pa} < 1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。可见高真空只需要 1h 就能达到。

六、超高真空系统设计

(一) 超高真空与高真空系统设计

超高真空主要用于表面研究、热核反应、高能加速器、半导体研究、空间模拟等科学领域中。由于这些现代科学技术发展的需要,大大促进了超高真空技术的发展,目前超高真空实用真空度已达 10^{-12} Pa。

现代超高真空技术与超高真空萌芽的 20 世纪 50 年代相比,有如下特点:

- ①真空装置的容积大,有的达上千立方米,并且达到的真空度高。
- ②测试手段复杂,除了测量真空度外,还包括质谱分析,低能电子衍射,电子谱等。
- ③材料选择上,用不锈钢代替了玻璃;密封材料多半使用铜。
- ④用捕集式真空泵,如:低温泵、各种钛泵代替了油扩散泵;用无油超高真空代替了有油超高真空。

超高真空与高真空系统设计有不少相同之处,主要有:管路的流导计算;壳体强度计算;主泵抽速计算及泵之间匹配选择;真空元件的清洁处理及检漏等。

超高真空与高真空系统设计也有许多不同之处:选择真空泵的方法不同;对材料要求更为严格;密封结构和密封材料不同;采用了烘烤措施;焊接结构和方法不同;对漏率控制更为严格。

(二) 材料选择

金属材料都是通过熔炼和铸造得到的,在此过程中,空气中的氢、氧、氮和碳的氧化物不同程度地溶于材料之中。存放材料时,其表面还会吸附大量气体,主要是水蒸气、氧、氮、碳的氧化物等。材料加工过程中的再污染及其本身的非致密性引起的渗透,这些因素就构成了真空中的主要气源。

用真空泵抽真空室时,首先抽走的是容积中的大气(这部分气体很快被抽走)。然后是材料表面解吸的气体、材料内部向表面扩散出来的气体、以及通过器壁渗透到真空中的气体。解吸及扩散到表面再解吸气体的衰减速率非常缓慢,需要时间很长。一台金属密封的不烘烤的真空系统,计算表明,要达到超高真空(低于 10^{-7} Pa)所需大约 10^8 h,可见不采用烘烤技术想得到超高真空是很困难的。

超高真空所需要的材料,除满足真空材料一般要求外,还应满足下列要求:

①在烘烤温度下,材料不应该丧失其机械性能;壳体材料能承受外部大气压力。一般低熔点金属和软玻璃满足不了这种要求。

②材料在烘烤温度下蒸汽压要低。

③材料的渗透气体量不能超过允许值。

④材料加热时不易变形。

⑤材料表面容易抛光。

从这些要求出发,适于超高真空中用的通用材料有:

不锈钢——超高真空系统中主要用材,常用于做壳体、管道、法兰以及各种真空元件。我国超高真空系统常用材料是 1Cr18Ni9Ti,美国多用 304 不锈钢,其次还有 304L、316、316L、321、347 等;英国多用 347;其它欧洲各国常用 316 不锈钢。不锈钢材质很好,但采用焊接工艺不当,亦会造成晶间腐蚀、热裂缝、气孔、奥氏体焊缝脆化等缺陷,影响壳体的气密性。资料[59]中详细分析了这些缺陷产生的原因及消除方法。

玻璃——用于封接电极引入线、制作规管管壳及观察窗等。

氧化铝陶瓷——制作电极引入线的绝缘子。

可伐——制作与玻璃或陶瓷的封接件。

金、银、铜、铝——密封圈材料。

氟橡胶——常开启的门与窗的水冷密封圈。

(三) 表面化学清洗及烘烤

超高真空系统清洗处理非常重要,清洗处理好与否,直接影响极限真空的获得。良好的清洁处理工艺,可以使材料的出气率低几个数量级。以不锈钢为例,长期暴露于大气,不进行任何处理,抽气 1h 后的出气率为 $2 \times 10^{-3} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)]$;如果经除油处理,不烘烤抽气 4h 后可到 $1 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)]$;若除油后再清洗,在 250°C 下烘烤 15h,出气率可降到 $1 \times 10^{-8} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)]$,使出气率下降了近五个数量级。文献详细论述了真空清洗原理、清洗剂以及各种清洗方法和清洁处理方法。

真空系统烘烤,对获得超高真空是不可少的手段。一个设计合理的真空系统,如果没有烘烤手段,也没有采取其它措施,无论选择什么类型的真空泵抽气,如扩散泵、涡轮分子泵、溅射离子泵、低温泵等,只能获得的工作压力约为 $10^{-4} \text{Pa} \sim 10^{-5} \text{Pa}$ 数量级,极限真空 10^{-6}Pa 量级,再高的真空度是不可能的。

不锈钢最有效的加速出气方法有两种:①在 $800^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ 温度下真空烘烤;②在 400°C 下空气中烘烤。真空烘烤应在 10^{-6}Pa 下进行,这样可使材料中的氢浓度降低到最低限度。资料[63]提出烘烤应在 2700Pa 的纯氧中进行,以避免烘烤过程中,存在的水蒸气对表面产生影响。

烘烤时需要注意金属-玻璃封接件、金属-陶瓷封接件的烘烤温度不应超过 400°C 。铜垫圈不应超过 450°C 。资料[16]提出玻璃烘烤温度根据种类不同而异,其范围为 $140^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 内,非金属材料为 $80^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$,普通金属材料为 $300^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 。资料[64]介绍了超高真空系统的烘烤方法。

(四) 抽气技术

超高真空系统所用的主泵有油扩散泵、溅射离子泵、钛泵(蒸发式或升华式钛泵)、涡轮分子泵、低温泵等。近年来国内有用锆铝吸气剂泵与其它泵类组合抽气来获得超高真空。

对超高真空系统使用的真空泵要求,除通常的选泵原则外,还有:

- ①主泵极限真空要比真空装置的工作真空高一个到一个半数量级,如工作真空选 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$,那么泵的极限真空至少为 $1 \times 10^{-7} \text{Pa}$;
- ②在真空装置工作真空范围内,真空泵要有足够的抽速,以便排走装置中气体;
- ③主泵或者主泵入口到真空室排气口的管道、冷阱、挡板、阀门等均能经受 $250^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 的烘烤;
- ④主泵对被抽气体有选择性抽气时,应配辅助泵联合抽气;
- ⑤真空泵所用钢材应选用不锈钢。

1. 扩散泵系统

油扩散泵是获得超高真空的重要泵种,但必须很好地解决污染,否则无法获得超高真空。

扩散泵系统的污染主要来自扩散泵油的返流,机械泵油的返流,以及扩散泵油加热分解产生的永久性气体,如氢、甲烷、乙烷等的返流。扩散泵油返流原因、影响及防止在第四章已论述过,这里不再赘述。分解产生的永久性气体用液氮冷阱是无益的,应使用钛升华阱,资料[66]介绍的钛升华阱得到了 10^{-9}Pa 的真空度。

减少机械泵油的返流有三种方法:①在粗抽管道中加液氮冷阱,是一种最有效的方法。资料[67]中给出了这种冷阱结构,并给出了谱图;②粗抽管道上安装充气阀,充入干燥氮气,使真空室保持到 $15 \text{Pa} \sim 30 \text{Pa}$ 真空度;③不用粗抽管道,通过扩散泵进行粗抽。

一般来讲,污染控制较好的真空系统,可得到 10^{-10}Pa 的真空度。

2. 涡轮分子泵抽气系统

高压比率的涡轮分子泵,以双级旋片式真空泵为前级,可得到 $5 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 的真空度。用扩散泵作前级,可得到 10^{-9}Pa 真空度。泵入口安装上钛升华阱,获得的真空度高于 10^{-9}Pa 。

涡轮分子泵对氢的压缩比较小,残余气体中主要是氢。泵的极限氢分压受泵的压缩比和前级管道中氢分压的限制,采用扩散泵作前级,可降低前级管道中的氢分压,进而可提高泵的极限真空。

涡轮分子泵内表面积大,烘烤出气是非常必要的。由于结构限制,一般只允许烘烤到 100°C 左右。

为了消除粗抽时的污染,可以通过涡轮分子泵进行粗抽,在这种情况下,要求机械泵有足够大的抽速,使涡轮分子泵转数达到额定转数的 75% 时,就能将真空室抽到 $20 \text{Pa} \sim 200 \text{Pa}$ 。一般涡轮分子泵的加速时间为 $5 \text{min} \sim 10 \text{min}$,这意味着机械泵排气时间必须小于这个范围。

3. 溅射离子泵抽气系统

溅射离子泵通常与钛升华泵联合使用。溅射离子泵的残气中主要成分是氢,而钛升华泵抽氢效果最好。一般中小型真空系统以溅射离子泵作主泵;而大型系统以钛升华泵作主泵。用这种机组可得到 10^{-9}Pa 的真空度。

在超高真空系统中,要求溅射离子泵要彻底烘烤。如果真空室已进行了高温烘烤,那么泵只需要 250°C 烘烤,真空度到 10^{-5}Pa 后,缓慢升到 250°C ,时间为 $10 \text{h} \sim 20 \text{h}$ 。

4. 低温泵抽气系统

低温泵对不锈钢制造的超高真空容器排气很适合。 20K 的低温泵可得到 10^{-8}Pa 的真空度, 4.2K 的低温泵,可得到 $10^{-10} \text{Pa} \sim 10^{-12} \text{Pa}$ 的真空度。

低温泵系统不产生碳氢化合物、金属膜的剥落碎片或自身带来的其它污染。在超高真空范围,低温泵是可以取代其它类泵的一种清洁抽气手段。

(五) 超高真空装置实例

1. 分子束外延设备

图 9-13 是分子束外延设备真空系统原理图。真空室由工作室、喷射炉室、样品预备室组成。工作室极限真空为 $1 \times 10^{-8} \text{Pa}$, 外延时的工作压力为 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。主泵为抽速 $6 \times 10^3 \text{L/s}$ 的溅射离子泵—钛升华泵机组, 其极限真空为 $5 \times 10^{-10} \text{Pa}$ 。

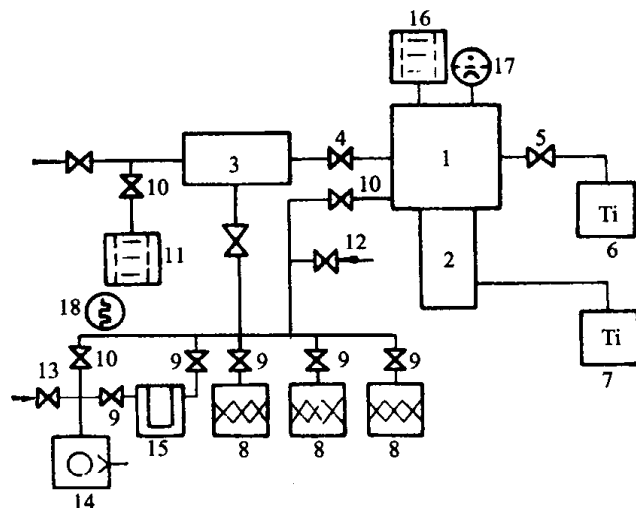


图 9-13 分子束外延设备原理图

- 1—工作室；2—喷射炉室；3—样品预备室；4—闸阀；5—闸阀；
6—6000L/s 溅射离子泵—钛升华泵机组；7—1000L/s 溅射离子泵—钛升华泵机组；
8—分子筛泵；9—通径 32mm 超高真空阀；10—通径 50mm 超高真空阀；
11—100L/s 溅射离子泵；12—针阀；13—充气阀；14—2X-8 型机械泵；
15—分子筛阱；16—25L/s 溅射离子泵；17—B-A 规；18—热偶规。

为了保证工作室的工作压力, 喷射炉室装有抽速 1000L/s 的溅射离子泵—钛升华泵机组, 用以排走喷射炉产生的气体。

工作室不宜经常暴露于大气, 为此, 设备有传送样品的预备室, 该室的真空度为 10^{-6}Pa 。

另外, 在工作室电子枪部位设有抽速 25L/s 的溅射离子泵, 可以排走电子衍射仪电子枪工作时放出来的气体。

真空室粗抽用了三只分子筛泵, 三级抽气。所用的分子筛量分别是 1.2kg、1.5kg、2.2kg。如果没有液氮, 可以用机械泵—分子筛阱抽气。

2. CTL-500 型超高真空钼片炉

图 9-14 为钼片炉真空系统原理图。真空室直径 500mm, 主泵为溅射离子泵—钛升华泵组, 抽速为 $4 \times 10^3 \text{L/s}$ 。真空室极限真空为 $2 \times 10^{-7} \text{Pa}$, 工作压力为 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$, 为了粗抽及对付工艺过程中放出来的大量气体, 配有油扩散泵—机械泵组成的机组。

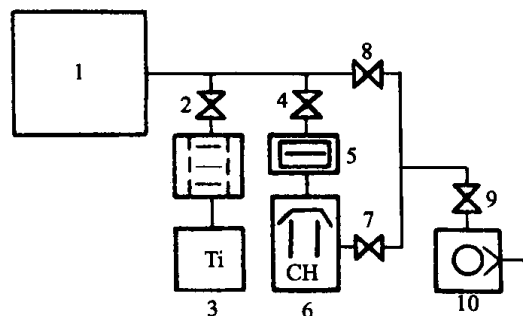


图 9-14 钼片炉真空系统原理图

- 1—真空室；2— $\phi 200$ 超高真空闸阀；
3—溅射离子泵—钛升华泵组；4—超高真空闸阀；5—冷阱；6—K-200A 型扩散泵；7—管道阀；8—超高真空管道阀；
9—带放气的电磁阀；10—机械泵。

3. 用于表面研究的超高真空设备

图 9-15 为表面研究用的超高真空设备真空系统原理图。真空室用不锈钢制成, 直径 450mm, 高 700mm, 容积 100L, 用铜垫圈密封。系统粗抽用三个分子筛泵及无油机械泵。主泵是钛升华泵, 吸气面用液氮冷却, 配有溅射离子泵与升华泵联合抽气。此系统从大气抽到 1×10^{-2} Pa 为 15min, 200°C 下 3.5h 烘烤后的真空度为 10^{-2} Pa $\sim 10^{-8}$ Pa, 30h 左右的极限真空 $< 1 \times 10^{-8}$ Pa。

4. 温控涂层耐久性试验装置

图 9-16 为卫星表面温控涂层耐久性试验装置原理图。装置包括: 加速电压 20kV、束流为 0~300mA 的扫描电子枪; 能量为 1keV~5keV 的质子源; 5kV 高压汞弧氙灯紫外源, 通过镀铝抛物面反射镜, 穿过石英窗投射到样品上。

真空系统主泵是钛升华泵及溅射离子泵, 升华泵的吸气面用液氮冷却。粗抽用三级分子筛吸附泵。系统经过 300°C 的烘烤, 可达 10^{-9} Pa 的真空度。

5. 小型空间模拟设备

图 9-17 为小型双层空间模拟设备原理图, 内容器可以达到 10^{-10} Pa $\sim 10^{-12}$ Pa 的真空度。

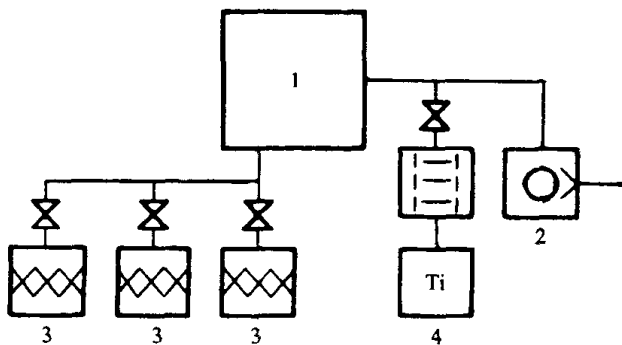


图 9-15 表面研究用的超高真空系统原理图

1—真空室; 2—无油机械泵; 3—分子筛泵;
4—钛升华泵-溅射离子泵组。

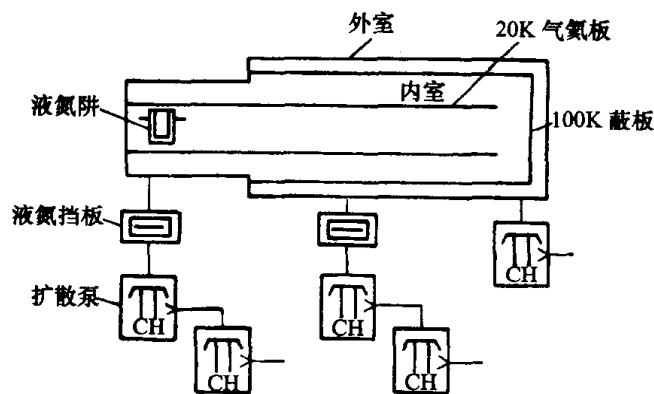


图 9-17 小型空间模拟设备真空系统原理图

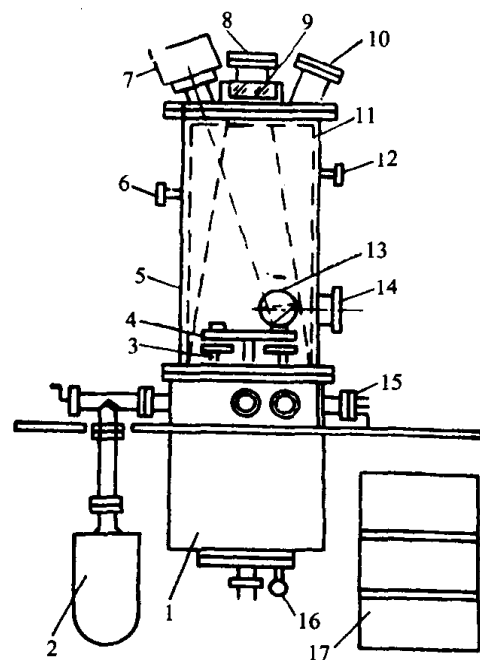


图 9-16 温控涂层耐久性试验装置

1—溅射离子泵(500L/s); 2—分子筛泵;
3—样品台固定部分; 4—样品台活动部分;
5—真空室; 6—高压输入端; 7—投影灯;
8—质子枪法兰; 9—紫外入射石英窗;
10—电子枪法兰; 11—热沉套; 12—质谱计法兰;
13—积分球; 14—分光光度计用的石英窗口;
15—电引入线; 16—钛升华泵(5000L/s);
17—操纵和控制台。

真空室由内容器和外容器构成。内容器主要抽气手段是 20K 气氮板,其预抽用扩散泵,扩散泵与内容器之间抽气管道较长,并用液氮冷冻,因而扩散泵油分子很难跑到内容器中,从而保证内容器可以得到很高的真空度。内容器外部设有外容器,抽气手段是用扩散泵串接抽气,并有液氮冷阱,保证了内、外容器之间夹层有较高的真空度,大大降低了向内容器的漏气量。

外容器用橡胶密封,放出来的气体由外容器的泵抽走,不会进到内容器中。

6. 大型空间模拟设备

图 9-18 为大型空间模拟设备原理图。此设备是波音公司为“月球轨道器”及“勘测者”宇航器而建造的。真空室直径 12m,高 15m,容积为 1500m^3 。

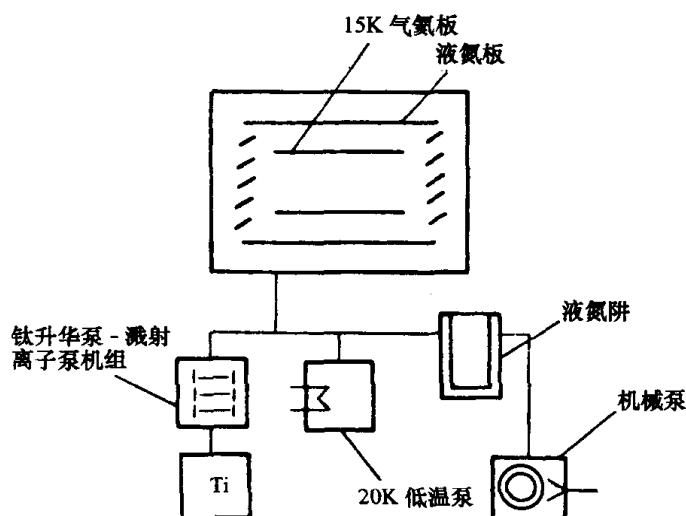


图 9-18 大型空间模拟设备真空系统原理图

容器主要抽气手段有装在容器中的液氮冷壁及 15K 的气氮冷壁。真空室还附有三个小型抽气室,每个室中有钛泵、溅射离子泵及 20K 的低温泵,总抽速 $2 \times 10^5 \text{L/s}$ 。系统粗抽用有液氮阱的机械泵。真空室最终压力为 $1 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 。

7. 托卡马克等离子试验真空装置

图 9-19 为托卡马克装置真空系统原理图。真空室为环形,由 0.5mm 厚不锈钢波纹管焊制成的。容积为 1.5m^3 ,总表面积为 35m^2 。真空室烘烤温度为 450°C ,观测段为 200°C ,最终压力为 $4 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 。

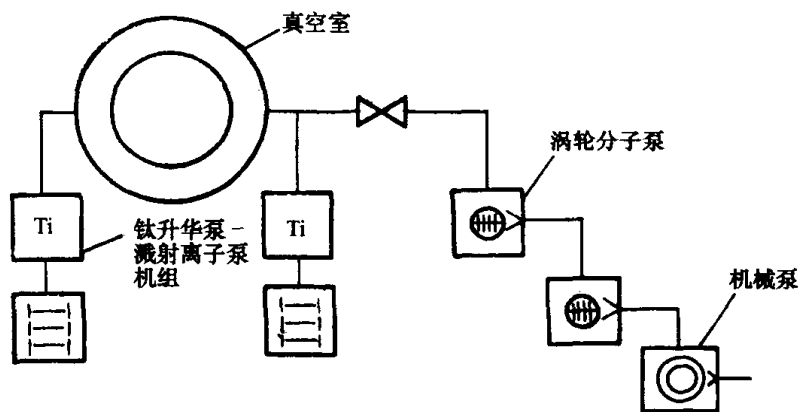


图 9-19 托卡马克真空装置原理图

主泵为钛泵、涡轮分子泵。分子泵两台串联,抽速分别为 500L/s 及 50L/s,前级用机械泵。钛泵抽气面用液氮冷,面积为 0.5m^2 。

真空度测量用 B-A 计和质谱计。

8. 超高真空空间环境模拟设备

图 9-20 为我国一台大型空间环境模拟设备真空系统原理图。

真空室直径 7m,高 12m,容积为 400m^3 。真空容器用厚 18mm 不锈钢卷制而成,每隔 1.3m 有一盒形加强环。为了减小不锈钢(1Cr18Ni9Ti)出气量,内壁抛光到 $R_a1.6$ 。

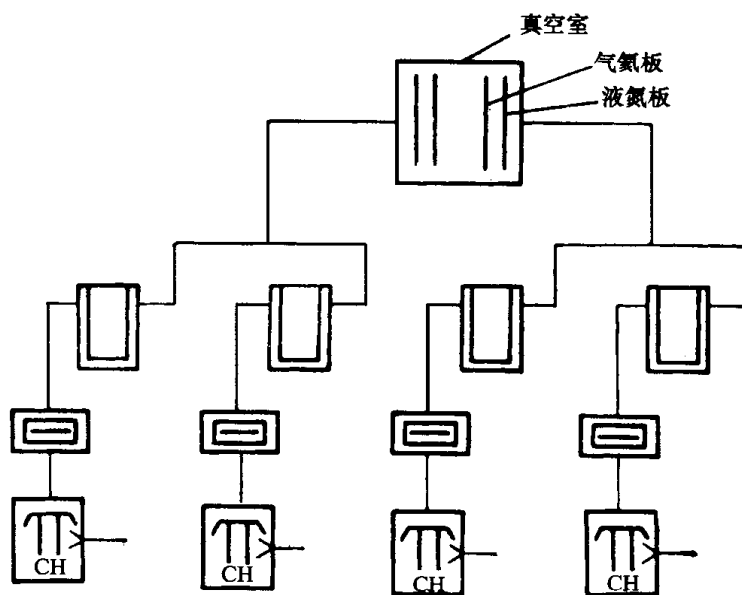


图 9-20 超高真空空间环境模拟设备

真空室大门法兰采用双道橡胶密封,两个密封圈之间抽真空,以减小密封圈漏气量。法兰厚 150mm,分五段拼焊而成。焊后需要消除焊接应力,在 900°C 下保温 2h,空气中冷却来达到热处理。

真空抽气系统由扩散泵机组、20K 气氮板组成。扩散泵机组由四台 K-1200 扩散泵,四台 ZL-11 罗茨泵、两台 H-8 机械泵组成。粗抽用两台 V-6 型机械泵。扩散泵入口配有直角液氮冷阱和氟里昂-12 冷却的人字形挡板。扩散泵工作 24h 后泵的极限真空为 $2 \times 10^{-6}\text{Pa}$;而泵的有效抽速为 18000L/s。气氮板在 16K 时,真空度为 $5 \times 10^{-4}\text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5}\text{Pa}$;对氮的抽速为 230 万 L/s,对氧的抽速为 220 万 L/s,对氩的抽速为 155 万 L/s。真空室的最终压力为 $3.8 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 。

七、真空机组

(一) 低真空抽气机组

低真空抽气机组的主要特点是工作压力高、排气量大,但抽速比高真空机组低。多用于真空室的粗抽以及放气量很大、工作压力又高的真空输送、真空浸渍、真空过滤、真空干燥、真空脱气(钢水处理)等装置中。低真空抽气机组的主泵常用往复式真空泵、油封真空泵、水蒸气喷射泵、水环泵,分子筛吸附泵、油蒸汽喷射泵、罗茨泵等。除油蒸汽喷射泵、罗茨泵不能直接排于大气外,其余各种泵均能直接排于大气。各类泵的工作压力范围见表 9-2。使用低真空抽气机组,还需要根据被抽气体清洁程度、湿度或其它特殊要求,配置必要的除尘器、干燥罐等部件。

1. 除尘器

往复泵、油封机械泵不适于抽含有灰尘的气体。灰尘能污染油并且磨损泵腔内表面产生漏气,使极限真空下降。防止灰尘的办法是装置除尘器。在真空冶金炉上常用的除尘器配置方法如图 9-21 所示。图 9-21(a)所示方案适用于始终都需要保护机械泵的真空装置中;图 9-21(b)所示方案适用于在冶炼过程中某一阶段要求对真空泵进行保护的情况;图 9-21(c)所示方案适用于连续、半连续生产的真空装置中。

除尘器能保护机械泵,但严重地降低了泵的有效抽速,增加了设备投资,给维修运转带来不便。

除尘器有两种常用结构,即精除尘器(油雾、油膜除尘器)和粗除尘器(旋风除尘器、金属网除尘器)。

(1) 精除尘器结构原理

精除尘器结构原理如图 9-22 所示。在圆柱形筒体中设置多层带孔金属隔板,板上放置陶瓷环(或金属环),筒体上部有洒油环形喷头(用循环油泵供油),气流通过时,灰尘被粘附在油膜上。这种装置兼有机械阻挡(金属隔板、陶瓷环)、油膜粘附及油雾过滤三种除尘方式,既有良好的除尘效果,又能降低气体温度。

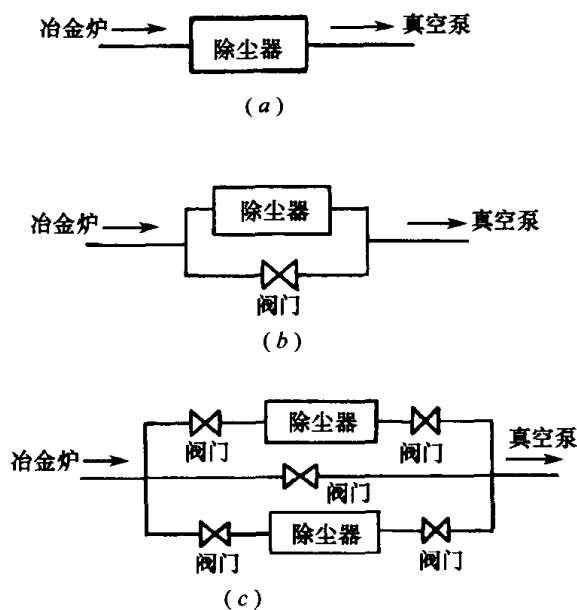


图 9-21 除尘器配置示意图

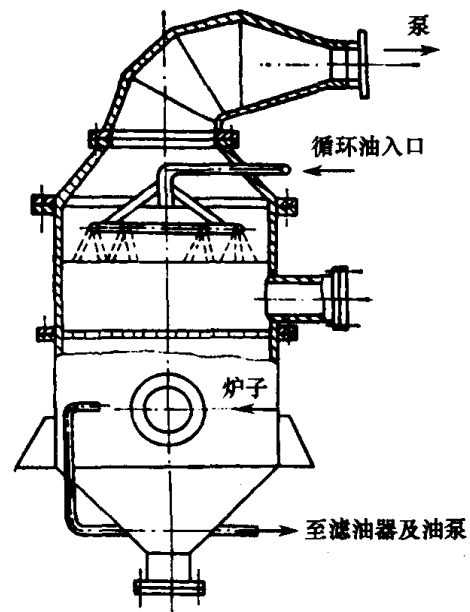


图 9-22 油雾除尘器

(2) 旋风除尘器的结构

旋风除尘器的结构如图 9-23 所示。含有灰尘的气体,以较高的速度从切线方向由进气管 3 进入除尘器,大部分气体在外壳与中央排气管之间绕轴做自上而下的旋转运动。小部分向上运动,遇顶盖 4 后返回到大部分气体中。由于离心力的作用,气流中灰尘被抛向外壁最后落到底部集尘室里,旋转气流中较干净的气体随着锥形底部的收缩而转向中心,最后受下部阻挡而返回,形成一股上升的旋流,经上面出口排出。

旋风除尘器的结构简单,阻力小,处理气量较大,维护方便。但只能除 0.05mm 以上的较大尘粒,细微尘粒需配合其它除尘器才能除掉。

(3) 金属网钢屑片除尘器

这种除尘器的结构简单,是由金属丝网袋中装上金属切削屑而构成的。使用时放在真空

室出口管道中,能方便地推进或取出,通常长度为 20cm~60cm。此种除尘器除尘原理主要靠金属屑的机械阻挡作用,能有效除去较大颗粒的灰尘,此外还有一定的降温作用。经常用来作为钢水真空处理的第一级除尘器。

(4)改良型金属网除尘器

改良型金属网除尘器的结构示意图如图 9-24 所示,在底部正对气流方向的贮油器中装一些泵油,气流中夹杂的大部分灰尘微粒能被油面粘附,没有被粘附的灰尘,再经金属网过滤掉。

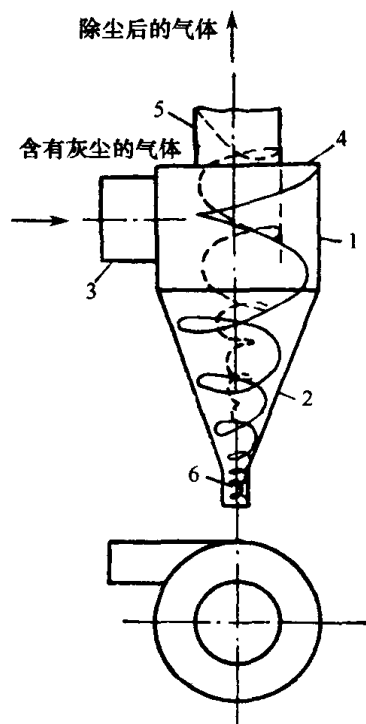


图 9-23 旋风除尘器

1—壳体; 2—锥形底; 3—进气管;
4—顶盖; 5—排气管; 6—集尘室。

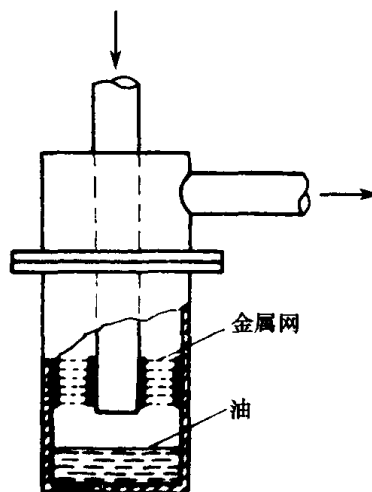


图 9-24 改良型金属网除尘器

2. 防止水蒸气对机械泵的污染

油封机械泵不适于排除含有大量水蒸气的气体。水蒸气在压缩过程中会凝结成水滴,并与泵油混合形成悬浮液,不仅会使真空度下降,也能使泵腔与转子生锈,破坏密封面。防止的措施有:

①使用带有气镇装置的油封机械泵,当泵温为 $70^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 时,可允许抽除含有水蒸气分压为 $1 \times 10^3 \text{Pa} \sim 4 \times 10^3 \text{Pa}$ 的气体。

②装油分离器、离心式分离器或油水分离器,将混有水的机械泵油进行处理,处理过的油再流入泵中使用。

③使用吸水性强的干燥剂,如五氧化二磷、三氧化二铝、氯化钙、分子筛等做成捕集阱吸收水蒸气。各种干燥剂性能见表 9-6。

表 9-6 各种干燥剂性能

干 燥 剂	1L25℃空气中含 水量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	相对露点/ $^{\circ}\text{C}$	干 燥 剂	1L25℃空气中含 水量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	相对露点/ $^{\circ}\text{C}$
P_2O_5	2×10^{-5}	-90.0	$\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2×10^{-3}	-75.0
$\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$	5×10^{-4}	-83.0	Al_2O_3	3×10^{-3}	-72.5

(续)

干燥剂	1L25℃空气中含水量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相对露点/℃	干燥剂	1L25℃空气中含水量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相对露点/℃
CaSO_4	4×10^{-3}	-70.6	CaCl_2	0.14~0.25	-42.1~36.5
MgO	8×10^{-3}	-66.3	$\text{H}_2\text{SO}_4(95.1\%)$	0.3	-34
$\text{CaBr}_2(-72^\circ\text{C})$	0.016	-61.5	$\text{CaCl}_2(\text{融解})$	0.36	-32.2
$\text{CaBr}_2(-21^\circ\text{C})$	0.019	-60.0	ZnCl_2	0.8	-23.2
$\text{CaBr}_2(25^\circ\text{C})$	0.14	-42.1	ZnBr_2	1.1	-19.5
$\text{NaOH}(\text{融解})$	0.16	-40.5	CuSO_4	1.4	-16.6
CaO	0.2	-38.5			

④使用前级吸附阱,不仅能有效地吸附水蒸气,还可阻挡机械泵油向高真空室的返流(详见第七章)。

工业上常用前两种方法;实验室及小型抽气系统常用后两种方法。

(二)高真空抽气机组

工作于分子流状态下的高真空抽气机组与低真空机组相比,特别是工作压力较低($10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$)、排气量小、抽速大。机组的主泵通常为扩散泵、扩散增压泵、分子泵、钛泵、低温冷凝泵等。这些泵不能直接对大气工作,因此需要配置预抽泵或前级维持泵。有些扩散泵高真空抽气机组还配有前级贮气罐,以防止气压波动,改善机组性能。

1. 预抽泵

预抽泵(粗抽泵)主要用来抽除真空室中的大量气体,使真空室气压由 $1\times 10^5\text{Pa}$ 降到主泵能够启动工作时的真空度,因此,要求预抽泵所达到的压力小于主泵的启动工作压力,预抽泵(如用机械泵)的抽速大小由粗抽时间决定。从公式(9-11)可导出

$$S_p = 2.3K_g \frac{V}{t} \lg \frac{p_i}{p} \quad [\text{L/s}] \quad (9-27)$$

式中 S_p ——预抽泵的名义抽速[L/s]

V ——真空室容积[L];

p_i ——开始抽气时真空室压力[Pa],通常为 $1\times 10^5\text{Pa}$;

p ——主泵启动压力(或预抽结束时压力)[Pa];

K_g ——修正系数(见表 9-5);

t ——预抽泵的抽气时间,对于容积 $V<1\text{m}^3$,取 $t=10\text{min}\sim 20\text{min}$;中等容积 $V=2\text{m}^3\sim 4\text{m}^3$,取 $20\text{min}\sim 30\text{min}$;大型容积,即 $V>5\text{m}^3$ 的真空室,取 $t=30\text{min}\sim 60\text{min}$ 。

2. 贮气罐

小型扩散泵高真空抽气机组通常配置有贮气罐,设置在扩散泵和前级泵之间,贮存扩散泵排出的气体,设置贮气罐的原因有:

①由于需要防震而设置贮气罐。真空系统工作时,某些工艺过程要求严格防震,因此需要机械泵在一段时间内停止工作。在这段时间内,扩散泵排出的气体全都贮存在贮气罐中;贮气

罐代替机械泵维持扩散泵正常工作。

这种用途的贮气罐的体积 V 为

$$V \geq \frac{Q \cdot t}{p'_1 - p'_0} \quad (9-28)$$

式中 Q ——在机械泵停止工作的时间 t 内扩散泵的排气量 [$\text{Pa} \cdot \text{L/s}$];

t ——机械泵停止工作的时间,也就是要求贮气罐工作的时间 [s];

p'_1 ——扩散泵临界前级压力,或经过时间 t 后,贮气罐中所允许的最高压力 [Pa];

p'_0 ——机械泵工作时扩散泵的前级压力,或 $t=0$ 时,贮气罐内压力 [Pa].

例如某工艺生产过程中,机组的排气量为 $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,要求机械泵中间停止工作 1h,需要前级贮气罐的体积多大? 扩散泵前级耐压取 10Pa ,正常工作时前级压力为 $7 \times 10^{-1} \text{Pa}$.

将 $Q = 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$, $t = 3600 \text{s}$, $p'_1 = 10 \text{Pa}$,

$p'_0 = 7 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 代入公式(9-28)得

$$V \geq \frac{10^{-1} \cdot 3600}{10 - 7 \times 10^{-1}} = 38.7 \quad [\text{L}]$$

②为了缩短工作周期而设置贮气罐。有些生产工艺要求在不关闭扩散泵加热器的情况下,真空室放进大气换取元件、装料。装料后,用机械泵预抽真空室,这段时间内利用贮气罐来维持扩散泵工作。

这类贮气罐体积的计算公式同式(9-28)。此时 Q 为扩散泵阀门关闭后贮气罐的气体负荷(漏气及出气), t 为机械泵预抽真空室的时间,其余符号同式(9-28)。

③为防止真空室内瞬时大量放气影响扩散泵正常工作而设置贮气罐。工艺生产中某段时间内放气量特别大,但时间短。若按此时的最大排气量配机械泵很不经济,这样可配置前级贮气罐,在最大放气量时贮存一部分气体,以避免扩散泵前级压力超过临界前级压力。

前级贮气罐体积计算同式(9-28)。但设计这类前级罐时,应满足下面关系式

$$t \geq \frac{V}{U} \ln \frac{p'_1}{p_1} \quad (9-29)$$

式中 U ——贮气罐到扩散泵出口管道的流导 [L/s];

V ——贮气罐体积 [L];

t ——贮气罐工作时间 [s];

p'_1 ——扩散泵临界前级压力 [Pa];

p_1 ——机组正常工作时,扩散泵前级压力 [Pa].

④用于稳定扩散泵出口压力而设置贮气罐。机械泵排气是脉冲的,虽然频率不高(一般为 7 次/s 左右),也会引起扩散泵出口压力的波动,设置贮气罐可减少这种波动。

(三) 超高真空抽气机组

超高真空机组工作在 $10^{-6} \text{Pa} \sim 10^{-8} \text{Pa}$ 超高真空压力范围,除了要求真空室的材料出气率很低、漏气率很小、能经受 $200^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 高温烘烤外,对机组的要求还有:

①主泵的极限真空要高,至少在 $10^{-7} \text{Pa} \sim 10^{-8} \text{Pa}$ 以上。

②在超高真空的工作压力范围内主泵具有一定的抽速。

③机组的主泵或主泵进气口以上部分能承受 $200^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 高温烘烤。

- ④来自主泵的返流气体(包括工作液蒸汽及解析的气体)的分压力要足够低。
- ⑤对被抽气体选择性强的主泵,要配备足够大的辅助泵。
- ⑥机组主泵进气口以上的管道、阀门等部件,材料的选择和密封要特别慎重。一般采用出气率较低的不锈钢和采用金属圈密封。

八、罗茨真空泵机组

(一) 概述

以罗茨真空泵作主泵,其前级配旋片式机械泵、滑阀式机械泵、或液环式真空泵组成罗茨泵真空机组已广泛地应用于国民经济各种领域中。诸如真空冶金、真空镀膜、热处理、焊接、石化、医药、轻工、食品、航天等行业中。其抽速范围 $30\text{L/s} \sim 2500\text{L/s}$, 工作压力范围 $10^5\text{Pa} \sim 0.1\text{Pa}$ 。

(二) 罗茨真空泵机组标准(JB/T6921—93)摘选

1. 主题内容与适用范围

本标准规定了抽速为 $30\text{L/s} \sim 5000\text{L/s}$ 的罗茨真空泵机组的型式与基本参数、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、包装、运输、贮存。

本标准适用于以罗茨真空泵为主泵或主泵和中间泵,以滑阀真空泵、旋片真空泵、液(水、油)环真空泵为前级泵所组成的二级或三级罗茨真空泵机组(以下简称机组)。

2. 引用标准

GB/T 13306 标牌

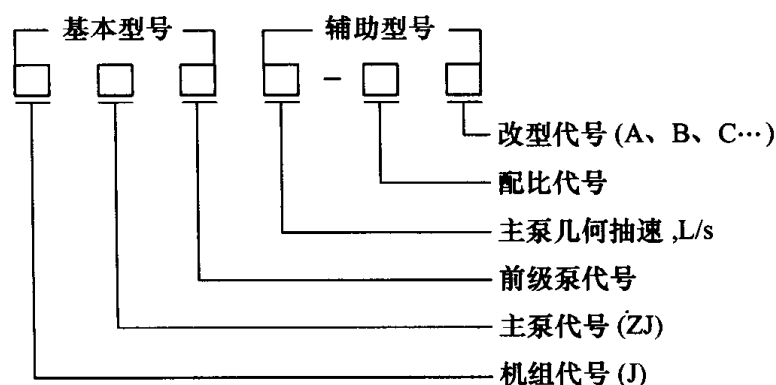
GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

ZB J78 013 罗茨真空泵

3. 型式与基本参数

(1) 型号表示方法

机组型号由基本型号和辅助型号组成,其表示方法如下:



(2) 配比及配比代号

配比系指机组中主泵与前级泵或主泵与中间泵、中间泵与前级泵抽速之比。配比以 1、2、4、8 四个配比代号单独或两个配比代号组合进行表示。配比代号所代表的配比值见表 9-7。

(3) 前级泵代号

前级泵代号见表 9-8。

表 9-7 配比代号

配比代号	1	2	4	8
配比值	1~1.5	2~3	4~6	8~10

表 9-8 前级泵代号

前级泵代号	H	X	S	Y
前级泵名称	滑阀真空泵	旋片真空泵	水环真空泵	油环真空泵

(4) 型号标记示例

主泵为 600L/s 的罗茨真空泵、前级泵为 70L/s 的滑阀真空泵的二级机组,其型号标记为:
JZJH 600-8

主泵为 600L/s 的罗茨真空泵、中间泵为 150L/s 的罗茨真空泵、前级为 70L/s 的旋片真空泵的三级机组,其型号标记为:

JZJX 600-42

(5) 机组系列与基本参数

推荐采用的机组系列见表 9-9 和表 9-10,其基本参数应符合表 9-11、表 9-12、表 9-13 和表 9-14 的规定。

表 9-9 二级罗茨真空泵机组推荐采用系列

主泵 \ 前级泵		2S(Y)K-0.8	2S(Y)K-1.5	2S(Y)K-3	2S(Y)K-6	2S(Y)K-12
	H(X)-8 2H(X)-8	H(X)-15 2H(X)-15	H(X)-30 2H(X)-30	H(X)-70 2H(X)-70	H(X)-150 2H(X)-150	H-300
ZJ-30	JZJH(X)30-4	JZJS(Y)30-2	JZJS(Y)30-1			
ZJ-70	JZJH(X)70-8	JZJH(X)70-4	JZJS(Y)70-2	JZJS(Y)70-1		
ZJ-150		JZJH(X)150-8	JZJH(X)150-4	JZJS(Y)150-2	JZJS(Y)150-1	
ZJ-300			JZJH(X)300-8	JZJS(X)300-4	JZJS(Y)300-2	JZJS(Y)300-1
ZJ-600				JZJH(X)600-8	JZJH(X)600-4	JZJS(Y)600-2
ZJ-1200					JZJH(X)1200-8	JZJH1200-4

表 9-10 三级罗茨真空泵机组推荐采用系列

主泵 \ 中间泵 \ 前级泵			2S(Y)K-0.8	2S(Y)K-1.5	2S(Y)K-3	2S(Y)K-6	2S(Y)K-12
			H(X)-8 2H(X)-8	H(X)-15 2H(X)-15	H(X)-30 2H(X)-30	H(X)-70 2H(X)-70	H(X)-150 2H(X)-150 H-300
ZJ-150	ZJ-30	JZJH(X)150-44	JZJ□150-42 *	JZJS(Y)150-41			
ZJ-300	ZJ-70		JZJH(X)300-44	JZJ□300-42 *	JZJS(Y)300-41		
ZJ-600	ZJ-150			JZJH(X)600-44	JZJ□600-42 *	JZJS(Y)600-41	
ZJ-1200	ZJ-300				JZJH(X)1200-44	JZJ□1200-42 *	JZJS(Y)1200-41
ZJ-2500	ZJ-600					JZJH(X)2500-44	JZJ□2500-42 *
ZJ-5000	ZJ-1200						JZJH5000-44

注:有“*”记号的机组型号中方框内的前级泵代号根据实际配泵情况确定

八、罗茨真空泵机组

表 9-11 罗茨泵滑阀(旋片)泵二级机组

型 号	抽气 速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限压力 $/Pa \leq$		抽气效率 $\% \geq$	功 率 $/kW \leq$			
		H(X)型 前级泵	2H(2X)型 前级泵		H 型 前级泵	2H 型 前级泵	X 型 前级泵	2X 型 前级泵
JZJH(X)30- ⁴ / ₈	30	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	1.50	1.85	1.50	1.85
				70	1.12	1.30	1.12	1.30
JZJH(X)70- ⁴ / ₈	70	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	2.60	3.30	2.60	3.30
				70	1.85	2.20	1.85	2.20
JZJH(X)150- ⁴ / ₈	150	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	5.20	6.20	4.40	5.20
				70	3.70	4.40	3.70	4.40
JZJH(X)300- ⁴ / ₈	300	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	11.50	11.50	8.00	9.50
				70	7.00	8.00	6.20	7.00
JZJH(X)600- ⁴ / ₈	600	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	22.50	26.00	15.00	18.50
				70	15.00	15.00	11.50	13.00
JZJH(X)1200- ⁴ / ₈	1200	1×10^{-1}	5×10^{-2}	80	41.00	—	—	—
				70	26.00	29.50	18.50	22.00

注:表中的抽气速率系指主泵的几何抽气速率

表 9-12 罗茨泵水环(油环)泵二级机组

型 号	抽气速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限压力 $/Pa \leq$		抽气效率 $\% \geq$	功 率 $/kW \leq$
		双级水环泵	双级油环泵		
JZJS(Y)30- ¹ / ₂	30	4×10^2	8×10^1	80	4.75
				70	2.95
JZJS(Y)70- ¹ / ₂	70	4×10^2	8×10^1	80	8.60
				70	5.10
JZJS(Y)150- ¹ / ₂	150	4×10^2	8×10^1	80	19.00
				70	11.50
JZJS(Y)300- ¹ / ₂	300	4×10^2	8×10^1	80	43.00
				70	19.00
JZJS(Y)600- ¹ / ₂	600	4×10^2	8×10^1	80	52.50
				70	37.50

注:表中的抽气速率系指主泵的几何抽气速率

表 9-13 罗茨泵滑阀(旋片)泵三级机组

型 号	抽气 速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力/ $\text{Pa}\leq$		抽气效率 $\% \geq$	功率/ $\text{kW}\leq$			
		H(X)型 前级泵	2H(2X)型 前级泵		H 型 前级泵	2H 型 前级泵	X 型 前级泵	2X 型 前级泵
JZJH(X)150- ⁴² ₄₄	150	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	4.45	5.15	4.45	5.15
					3.70	4.05	3.70	4.05
JZJH(X)300- ⁴² ₄₄	300	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	8.10	9.10	7.30	8.10
					6.60	7.30	6.60	7.30
JZJH(X)600- ⁴² ₄₄	600	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	17.20	17.20	13.70	15.20
					12.70	13.70	11.90	12.70
JZJH(X)1200- ⁴² ₄₄	1200	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	30.00	33.50	22.50	26.00
					22.50	22.50	19.00	20.50
JZJH(X)2500- ⁴² ₄₄	2500	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	56.00	—	—	—
					41.00	48.00	37.00	40.50
JZJH(X)5000- ⁴² ₄₄	5000	5×10^{-2}	3×10^{-2}	80	103.00	—	—	—
					78.00	—	—	—

注:表中的抽气速率系指主泵的几何抽气速率

表 9-14 罗茨泵水环(油环)泵三级机组

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力/ $\text{Pa}\leq$		抽气效率 $\% \geq$	功 率 $/\text{kW}\leq$
		双级水环泵	双级油环泵		
JZJS(Y)150- ⁴¹ ₄₂	150	4×10^1	8×10^{-1}	80	8.75
					6.95
JZJS(Y)300- ⁴¹ ₄₂	300	4×10^1	8×10^{-1}	80	12.60
					9.10
JZJS(Y)600- ⁴¹ ₄₂	600	4×10^1	8×10^{-1}	80	24.70
					17.20
JZJS(Y)1200- ⁴¹ ₄₂	1200	4×10^1	8×10^{-1}	80	45.00
					30.00
JZJS(Y)2500- ⁴¹ ₄₂	2500	4×10^1	8×10^{-1}	80	74.50
					59.50

注:表中的抽气速率系指主泵的几何抽气速率

4. 技术要求

①机组应符合本标准规定,并按经规定程序批准的图样及技术文件制造;

- ②组成机组的各种真空泵必须是按相应产品标准制造并经制造厂检验合格的产品；
- ③机组设计时,应保证其中某一台泵损坏时易于更换；
- ④机组允许使用的工作环境温度 $5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ；
- ⑤机组主泵启动后 0.5h 内,其极限压力值应达到表 9-11、表 9-12 规定的要求；
- ⑥机组的抽气效率应达到表 9-11、表 9-12 规定的要求；
- ⑦机组运行应平稳,机架应牢固可靠,运行时不得有明显的振动；
- ⑧机组在极限压力下连续运行 1h,其间应无任何故障现象；
- ⑨机组应有防止罗茨泵过载的保护装置以及防止前级泵工作液返流或反喷的装置；
- ⑩机组中各种泵所需冷却液以及水环泵工作液的供给管路应有断液报警装置；
- ⑪机组电气控制系统应具有联锁自动保护功能,并且工作可靠、安全；
- ⑫机组各管路部件在装配前应进行清洁处理,其中真空管路应进行压力为 $0.25\text{MPa} \sim 0.40\text{MPa}$ 的气压试验,保压 15min,其间不得有漏气现象；
- ⑬机组表面应油漆光洁,外露紧固件、操作件应进行防锈处理；
- ⑭在用户遵守机组的运输、保管、安装、使用维护规则的条件下,从制造厂发货日期起一年内(使用期不得超过 6 个月),机组因制造不良而不能正常工作时,制造厂应免费为用户修理或更换零、部件。

5. 试验方法和检验规则

①每台机组均应经检验合格并附带产品合格证方可出厂。

②机组的检验分为出厂检验和型式检验。

③出厂检验：

检验项目见[4. 技术要求⑤、⑦、⑧、⑨、⑪和⑬]各条款。其中第⑤条按 ZBJ78 013 的规定进行检测,其余各条用目测方法检查。

④型式检验：

检验项目除按出厂检验项目检查外,还应检查第 4 中的第⑥条,检测方法按 ZBJ78 013 的规定。

⑤有下列情况之一时,应进行型式检验：

- a. 新产品试制定型鉴定；
- b. 正式生产后,当结构、材料、工艺有较大改变,可能影响产品性能时；
- c. 正常生产并形成一定批量时,每年抽检 1 台~2 台；
- d. 产品长期停产后,恢复生产时；
- e. 国家质量监督机构提出进行型式检验时。

(三) 国产罗茨真空泵机组技术性能、曲线、外形尺寸

1. JZPS300-21P 罗茨真空泵机组(浙江真空设备厂)

该厂生产的罗茨真空泵机组包括 7 个系列：①罗茨泵—滑阀泵机组；②气冷式罗茨泵—罗茨泵直排机组；③气冷式罗茨泵—滑阀泵机组；④气冷式罗茨泵—往复泵机组；⑤罗茨泵—水环泵机组；⑥罗茨—水环—大气泵机组；⑦罗茨泵—油环泵机组。图 9-25 为 JZPS300-21P 机组抽速曲线。图 9-26 为 JZPS300-21P 机组外形图。

表 9-15~表 9-21 为罗茨泵机组型号及技术参数。

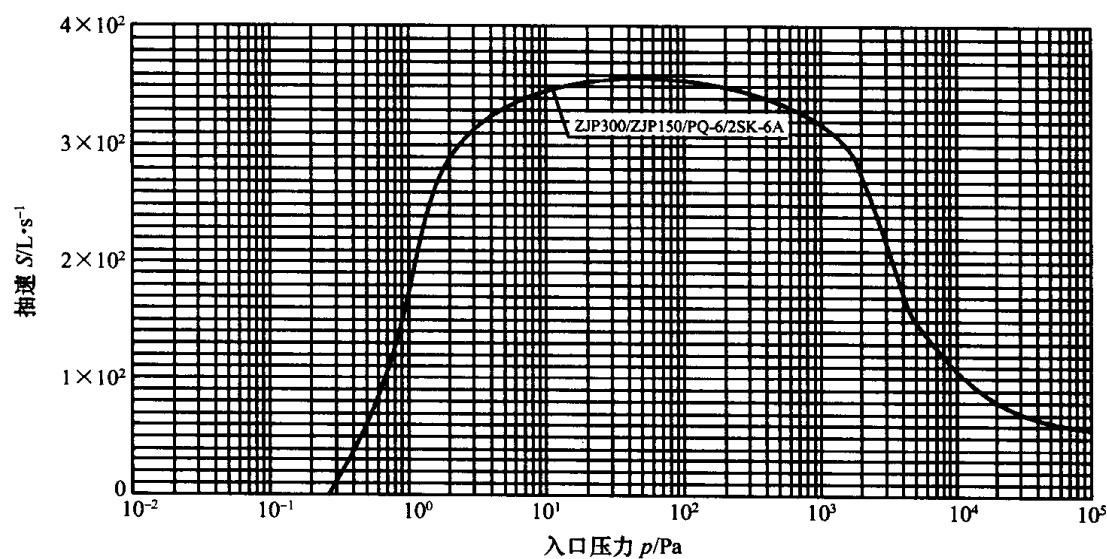


图 9-25 JZPS300-21P 机组抽速—入口压力曲线

表 9-15 罗茨泵—滑阀泵机组型号及技术参数

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	机 组 配 置		配套功率 $/\text{kW}$
			主 泵	前级泵(组)	
JZJH150-2	150	1×10^{-1}	ZJ-150	H-70B	9.7
JZPH300-2	300	1×10^{-1}	ZJP-300	H-150D	19
JZJ(P)H300-4	300	1×10^{-1}	ZJ-300 或 ZJP-300	H-70B	11.5
JZJ(P)H600-4A	600	1×10^{-1}	ZJ-600 或 ZJP-600	H-150D	18.5
JZJ(P)H600-8	600	1×10^{-1}	ZJ-600 或 ZJP-600	H-70B	15
JZJ(P)H1200-8A	1200	1×10^{-1}	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	H-150D	22
JZPH2500-8	2500	1×10^{-1}	ZJ-2500 或 ZJP-2500	H-300	52
JZPH2500-9	2500	1×10^{-1}	ZJ-2500 或 ZJP-2500	H-150D	37
JZP2H30-4	30	2×10^{-2}	ZJP-30	2H-8	1.85
JZP2H70-4	70	2×10^{-2}	ZJP-70	2H-15	3.3
JZJ(P)2H150-4	150	2×10^{-2}	ZJ-150 或 ZJP-150	2H-30A	6.2
JZJ(P)2H300-4	300	2×10^{-2}	ZJ-300 或 ZJP-300	2H-70A	11.5
JZP2H30-8	30	2×10^{-2}	ZJP-30	2H-4	1.5
JZP2H70-8	70	2×10^{-2}	ZJP-70	2H-8	2.2
JZJ(P)2H600-8	600	2×10^{-2}	ZJ-600 或 ZJP-600	2H-70A	15
JZP2H500-9	2500	2×10^{-2}	ZJ-2500 或 ZJP-2500	2H-70	29.5
JZJ(P)H1200-24	1200	2×10^{-2}	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	ZJ-600(ZJP-600) + H-150	26
JZJ(P)H600-41	600	2×10^{-2}	ZJ-600 或 ZJP-600	ZJP-150 + H-150	24.7
JZJ(P)H600-42	600	2×10^{-2}	ZJ-600 或 ZJP-600	ZJP-150 + H-70B	17.2

八、罗茨真空泵机组

(续)

型 号	抽气速率 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	机 组 配 置		配套功率 /kW
			主 泵	前级泵(组)	
JZJ(P)H1200-42	1200	2×10^{-2}	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	ZJP-300 + H-150D	26
JZJ(P)H2500-42	2500	2×10^{-2}	ZJ-2500 或 ZJP-2500	ZJP-600 + H-300	59.5
JZJ(P)H2500-44	2500	2×10^{-2}	ZJ-2500 或 ZJP-2500	ZJP-600 + H-150D	40.5
JZJH500-44	5000	2×10^{-2}	ZJ-5000	ZJP-1200A + H-300	78.5
JZJH1000-44	10000	2×10^{-2}	ZJ-1000	ZJP-2500 + H-600	166(171)
JZJ(P)2H150-42	150	2×10^{-2}	ZJ-150 或 ZJP-150	ZJP-30 + 2H-15	5.15
JZJ(P)2H300-42	150	2×10^{-2}	ZJ-300 或 ZJP-300	ZJP-70 + 2H-30A	9.1
JZJ(P)2H600-42	150	2×10^{-2}	ZJ-600 或 ZJP-600	ZJP-150 + 2H-70	17.2

表 9-16 气冷式罗茨泵-罗茨泵直排机组型号及技术参数

型 号	抽气速率 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	机 组 配 置		配套功率 /kW
			主 泵	前级泵(组)	
JZQ150-2	150	1×10^{-3}	LQ-150	LQ-75	15
JZQ300-2	300	1×10^{-3}	LQ-300	LQ-150	30
JZQ600-2	600	1×10^{-3}	LQ-600	LQ-300	60
JZQ1200-2	1200	1×10^{-3}	LQ-1200	LQ-600	110
JZQ2500-2	2500	1×10^{-3}	LQ-2500	LQ-1200	220
JZQ300-22	300	100	LQ-300	LQ-150 + LQ-75	30
JZQ600-22	600	80	LQ-600	LQ-300 + LQ-150	60
JZQ1200-22	1200	70	LQ-1200	LQ-600 + LQ-300	115
JZQ2500-22	2500	70	LQ-2500	LQ-1200 + LQ-600	260

表 9-17 气冷式罗茨泵-滑阀泵机组型号及技术参数

型 号	抽气速率 /L·s ⁻¹	极限压力 /Pa	机 组 配 置		配套功率 /kW
			主 泵	前级泵(组)	
JZQH300-2	300	1×10^{-1}	LQ-300	H-300	30
JZQH600-4D	600	1×10^{-1}	LQ-600	H-150D	45
JZQH1200-4	1200	1×10^{-1}	LQ-1200	H-15-(2 台)	90
JZQH3750-4	3750	1×10^{-1}	LQ-2500	H-300(3 台)	190
JZQH300-22	300	2.7×10^{-2}	LQ-300	LQ-150 + H-70B	30
JZQH600-22	600	2.7×10^{-2}	LQ-600	LQ-300 + H-150	60
JZQH1200-24	1200	2.7×10^{-2}	LQ-1200	LQ-600 + H-150	165
JZQH2500-28	2500	2.7×10^{-2}	LQ-2500	LQ-1200 + H-150	235

表 9-18 气冷式罗茨泵-往复泵机组

型 号	抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 Pa	机 组 配 置		配套功率 kW
			主 泵	前级泵(组)	
JZQW2500-222	2500	≤ 3	LQ-2500	LQ-1200 + LQ-600 + W-300	152
JZQW3750-322	3750	≤ 3	LQ-3750	LQ-1200 + LQ-600 + W-300	187
JZJQS5000-421	5000	≤ 3	ZJ-5000	2J-1200A + LQ-600 + SK-25A	123

表 9-19 罗茨泵-水环泵机组型号及技术参数

型 号	抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 Pa	机 组 构 成		配套功率 kW
			主 泵	前级泵(组)	
JZPS30-1	30	300	ZJP-30	SK-1.5A	4.75
JZPS70-1	70	300	ZJP-70	ZSK-3	8.6
JZJ(P)S150-1	150	300	ZJ-150A 或 ZJP-150	ZSK-6A	13.2
JZJ(P)S300-1	300	300	ZJ-300 或 ZJP-300	ZSK-12A	22.5
JZJ(P)S600-1	600	300	ZJ-600 或 ZJP-600	SK-25A	44.5
JZJ(P)S150-3	150	300	ZJP-150	ZSK-3	9.7
JZJ(P)S300-3	300	300	ZJP-300	ZSK-6A	15
JZJ(P)S600-3	600	300	ZJ-600 或 ZJP-600	SK-12A	18.5
JZJ(P)S1200-3	1200	300	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	SK-25A	48
JZPS70-21	70	40	ZJP-70	ZJP-30 + SK-1.5A	5.85
JZJ(P)S150-21	150	40	ZJ-150 或 ZJP-150	ZJP-70 + 2SK-3	10.8
JZJ(P)S300-21	300	40	ZJ-300 或 ZJP-300	ZJ-150A 或 ZJP-150 + 2SK-6A	17.2
JZJ(P)S600-21	600	40	ZJ-600 或 ZJP-600	ZJ-300 或 ZJP-300 + SK-12A	30
JZJ(P)S1200-21	1200	40	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	ZJ-600 或 ZJP-600 + SK-25A	55.5
JZJ(P)S2500-21	2500	40	ZJ-2500 或 ZJP-2500	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A + SK-60	
JZJ(P)S300-41	300	40	ZJ-300 或 ZJP-300	ZJP70 + 2SK-3	12.6
JZJ(P)S600-41	600	40	ZJ-600 或 ZJP-600	ZJ-150A 或 ZJP-150 + 2SK-6A	20.7
JZJ(P)S1200-41	1200	40	ZJ-1200A 或 ZJP-1200A	ZJ-300 或 ZJP-300 + SK-12A	33.5
JZJ(P)S2500-41	2500	40	ZJ-2500 或 ZJP-2500	ZJ-600 或 ZJP-600 + SK-25A	66.5
JZJS1200-421	1200	2	ZJ-1200A	ZJ-300 或 ZJP-150A + 2SK-6A	28.2
JZJS600-221	600	2	ZJ-600	ZJ-300 或 ZJP-150A + 2SK-6A	24.7
JZPS300-221T	300	2	ZJP-300	ZJ-150 或 ZJP-70 + 2SK-6A	18.3

八、罗茨真空泵机组

表 9-20 罗茨—水环—大气泵机组型号及技术参数

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	机 组 配 置		配套功率 $/\text{kW}$
			主 泵	前级泵(组)	
JZPS30-1P	30	40	ZJP-30	PQ-1.5 + SK-1.5A	4.75
JZPS70-1P	70	40	ZJP-70	PQ-3 + 2SK-3	8.6
JZPS150-1P	150	40	ZJP-150	PQ-6 + 2SK-6A	13.2
JZPS300-1P	300	40	ZJP-300	PQ-12 + SK-12A	22.5
JZPS600-1P	600	40	ZJP-600	PQ-25 + SK-25A	44.5
JZPS150-3P	150	40	ZJP-150	PQ-3 + 2SK-3	9.7
JZPS300-3P	300	40	ZJP-300	PQ-6 + 2SK-6A	15
JZPS600-3P	600	40	ZJP-600	PQ-12 + SK-12A	18.5
JZPS1200-3P	1200	40	ZJP-1200A	PQ-25 + SK-25A	48
JZPS70-21P	70	2	ZJP-70	ZJP-30 + PQ-1.5 + SK-1.5A	5.85
JZPS150-21P	150	2	ZJP-150	ZJP-70 + PQ-3 + 2SK-3	10.8
JZPS300-21P*	300	2	ZJP-300	ZJP-150 + PQ-6 + 2SK-6A	17.2
JZPS600-21P	600	2	ZJP-600	ZJP-300-PQ-12 + SK-12A	30
JZPS1200-21P	1200	2	ZJP-1200A	ZJP-600 + PQ-25 + SK-25A	55.5
JZPS300-41P	300	2	ZJP-300	ZJP-70 + PQ-3 + 2SK-3	12.6
JZPS600-41P	600	2	ZJP-600	ZJP-150 + PQ-6 + 2SK-6A	20.7
JZPS1200-41P	1200	2	ZJP-1200A	ZJP-300 + PQ-12 + SK-12A	33.5

表 9-21 罗茨泵—油环泵机组

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	机 组 构 成		配套功率 $/\text{kW}$
			主 泵	前级泵(组)	
JZPY70-2	70	40	ZJP-70	YK-1.5B	5.1
JZPY150-3	150	40	ZJ-150	2YK-3	9.7
JZPY150-1	150	40	ZJ-150	2YK-6B	13.2
JZPY300-4	300	40	ZJ-300	2YK-3	11.5
JZPY300-3	300	40	ZJP-300	2YK-6B	15
JZPY70-21	70	2	ZJP-70	ZJP-30 + YK-1.5B	5.85
JZPY300-41	300	2	ZJP-300	ZJP-70 + 2YK-3	12.6
JZPY300-42	300	2	ZJP-300	ZJP-70 + 2YK-1	9.1
JZPY300-21	300	2	ZJP-300	ZJ-150A + 2YK-6B	17.2
JZPY600-42	600	2	ZJ-600	ZJ-150A + 2YK-3	13.7
JZPY600-23	600	2	ZJP-600	ZJP-300A + 2YK-6B	22.5
JZPY600-41	600	2	ZJ-600	ZJ-150A + 2YK-6B	20.7
JZPY1200-43	1200	2	ZJP-1200A	ZJP-300A + 2YK-6B	30

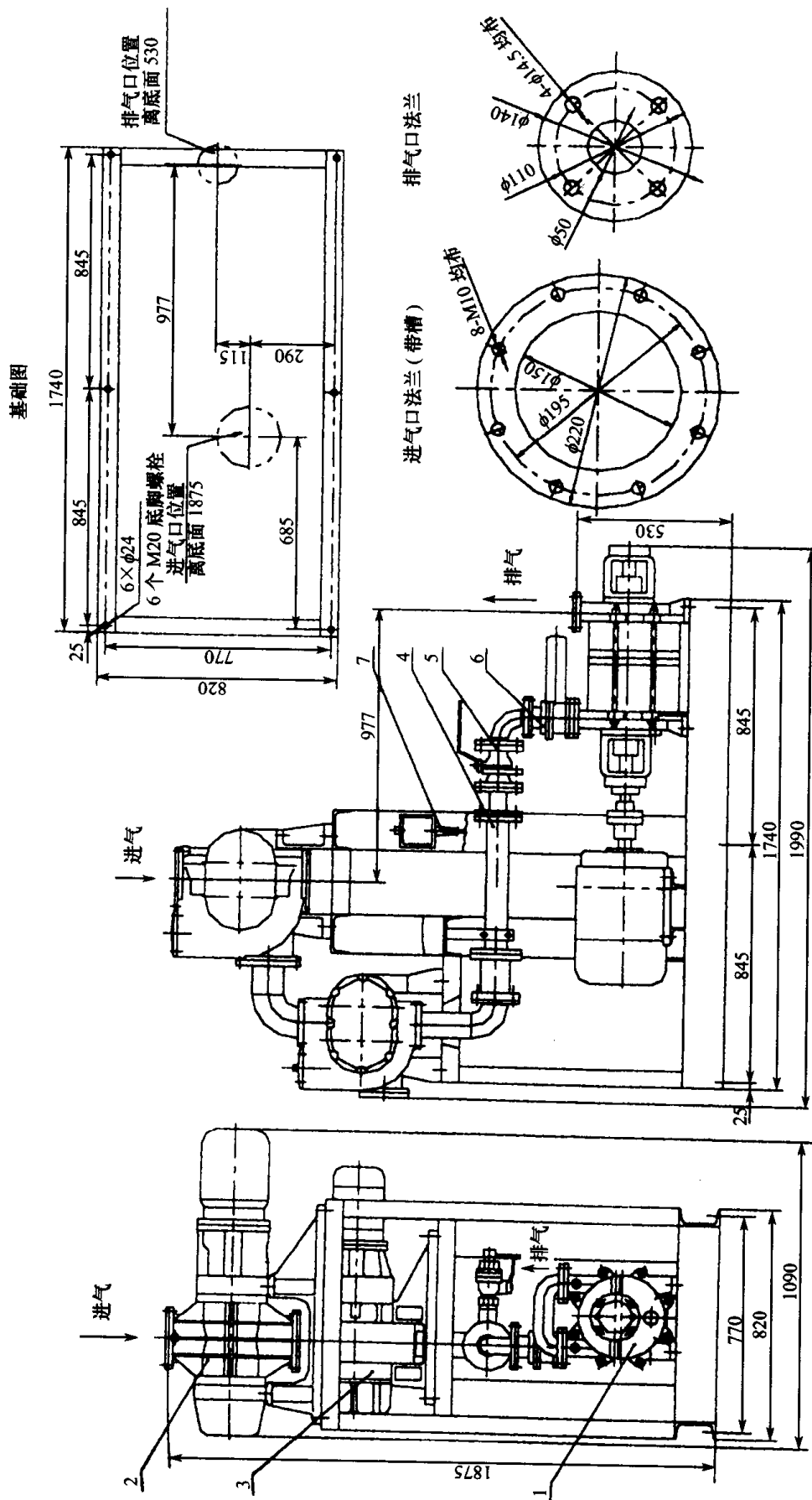


图 9-26 JZPS300-21P 机组外形及基础图 (浙江真空设备厂)

1-2SK-6A水环泵;2-ZJP-300罗茨泵;3-ZJP-150罗茨泵;4-大气喷射泵;5-球阀;6-浮球式止回阀;7-断水报警器。

2. JZJH 罗茨真空泵机组(上海真空泵厂)

(1) JZJH 型罗茨泵—滑阀泵真空机组

JZJH 型真空机组是以罗茨真空泵为主泵,以滑阀真空泵为前级泵的成套真空获得设备。整机可通过真空继电器、水压继电器及电控装置来实现罗茨泵过载过热保护及停水自动开机等。还可根据用户需要配置真空测量仪器或仪表。整机结构简单、操作方便。

本机组可广泛应用于电力工业三大件:变压器、电线电缆、电容器的真空浸渍工艺;真空镀膜;真空冶炼;真空热处理;真空滤油;食品行业冷冻干燥以及含有少量水蒸气或少量可凝性气体、少量粉尘的工艺流程中;对于某些会有较多水分、粉尘的工艺必须配备过滤装置冷凝器等,另外还可增加一台双级水环泵作粗抽,使大量水分、粉尘由水环泵抽除,这样就可延长机组的正常使用寿命,减少前级泵换油次数,降低使用成本,提高生产效率。

表 9-22 给出了机组型号及技术参数。图 9-27 为抽速曲线,图 9-28 及图 9-29 为外形尺寸。

表 9-22 JZJH 型罗茨泵—滑阀泵机组型号及技术参数

型 号	泵 型 号		泵功率/kW		抽气速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限压力 $/Pa$	进气口径 $/mm$	排气口径 $/mm$	质量 $/kg$
	主泵	前级泵	主泵	前级泵					
JZJ(B)H-600·150	ZJ(B)-600	H-150	5.5	15	600	0.1	$\phi 150$	$\phi 80$	1950
JZJ(B)H-1200·150	ZJ(B)-1200	H-150	11	15	1200	0.1	$\phi 250$	$\phi 80$	2800

注:1. 机组抽速是指在机组入口压力 $10Pa \sim 1000Pa$ 工作条件下的最大实际抽速。
2. 机组极限压力是指用麦氏真空计在机组入口封闭条件下,测得的空气分压力值、用热偶计测得的空气全压力值应比极限压力指标大(0.5~1)个数量级。
3. 机组在接还原罐时(在系统不漏情况下)其真空度将比表中指标值大(1~1.5)个数量级

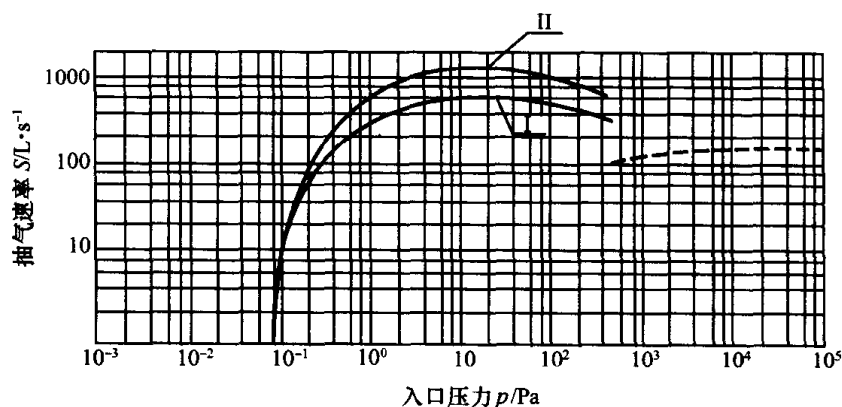


图 9-27 JZJ(B)H-1200.150 及 JZJ(B)H-600.150

罗茨泵—滑阀泵机组抽速曲线

虚线从 $10^5 Pa \sim 1.5 \times 10^3 Pa$, 为 H-150 滑阀泵;

实线 I 从 $1.5 \times 10^3 Pa \sim 0.1 Pa$, 为 H-150 滑阀泵与 ZJ(B)-600 罗茨泵同时工作;

实线 II 从 $1.5 \times 10^3 Pa \sim 0.1 Pa$, 为 H-150 滑阀泵与 ZJ(B)-1200 罗茨泵同时工作。

(2) ZJLS 型气体循环冷却罗茨泵—水环泵真空机组

JZJLS 型气体循环冷却罗茨真空泵水环泵机组是以 ZJL 型气体循环冷却罗茨真空泵为主泵或中间泵,以 2SK 型双级水环式真空泵为前级泵,通过真空继电器、水压继电器来实现各级罗茨泵和水环泵的自动关闭及自动过载安全保护的真空获得设备。它除了具有一般罗茨真空泵水环泵机组的某些特点外,由于采用气体循环冷却罗茨真空泵作为主泵或中间泵,因而能在

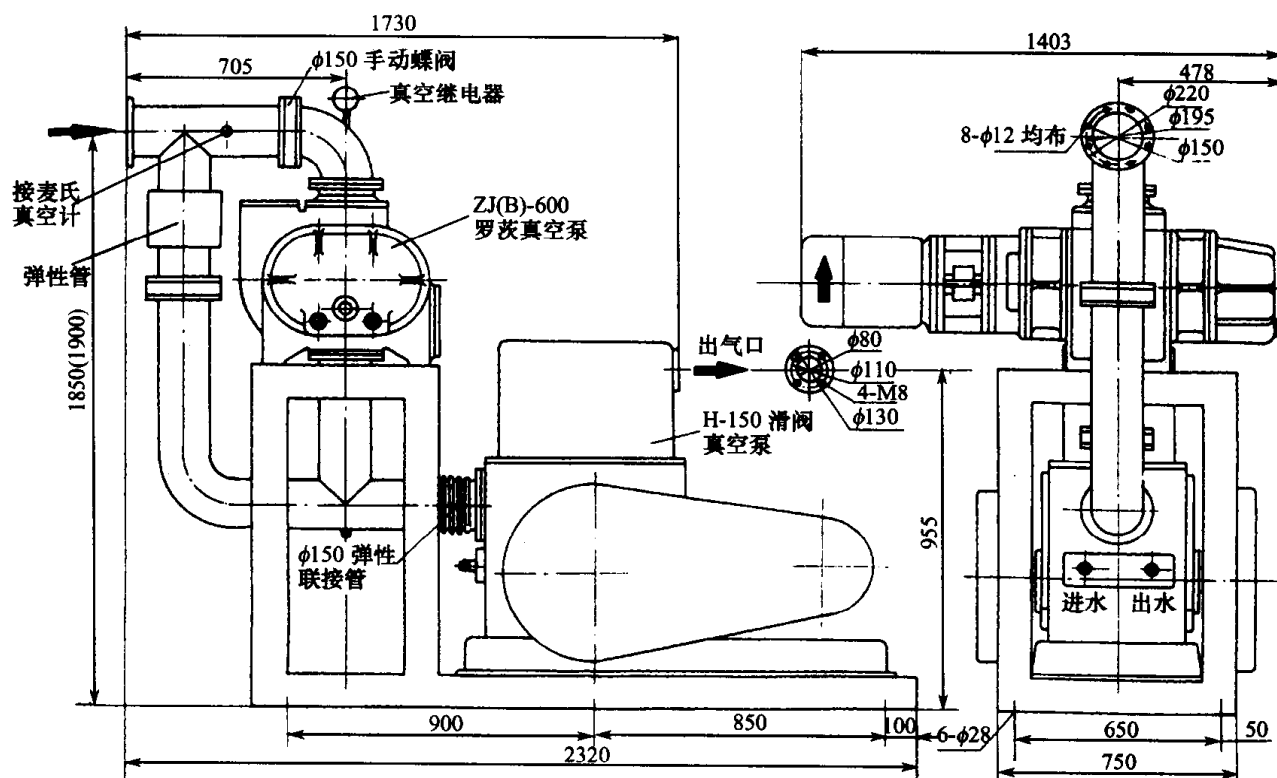


图 9-28 JZJ(B)H-600·150 机组外形尺寸

高压压缩比,高压差下正常工作,这样就大大缩短了对系统的预抽时间,获得较低的预抽压力。

JZJLS 型气体循环冷却罗茨真空泵水环泵机组由于采用双级水环真空泵作为前级泵,因而本机组特别适用于抽除含有大量水蒸气和带有一定腐蚀性及可凝性气体的工艺过程中,例如电力工业三大件电力电容器、变压器、电缆的真空浸渍、真空干燥;化工产品的真空蒸馏、真空蒸发、脱水结晶;轻纺工业的涤纶切片干燥等。

表 9-23 给出了 JZJLS 真空机组型号及技术参数。图 9-30 为该机组抽速曲线。

图 9-31~图 9-33 为该机组外形尺寸。

表 9-23 JZJLS 型气体循环冷却罗茨泵—水环泵机组型号及技术参数

型 号	抽气 速率 $/L \cdot s^{-1}$	极限 压力 $/Pa$	机组组成泵型号			配用 功率 $/kW$	进气 口径 $/mm$	排气 口径 $/mm$	外形尺寸 长 \times 宽 \times 高 $/mm \times mm \times mm$	质量 $/kg$
			主泵	中间泵	前级泵					
JZJLS-150·70	150	400	ZJL-150		2S-230	29.5* 18.5	$\phi 100$	$\phi 50$	1790 \times 1670 \times 1130	1300
JZJLS-150·70·70	150	400	ZJL-150		2S-230	29.5* 18.5	$\phi 100$	$\phi 50$		
JZJLS-300·70	300	400	ZJL-300		2S-230	48* 26	$\phi 125$	$\phi 50$	1790 \times 1670 \times 1130	1350
JZJLS-300·150·70	300	10	ZJ-300 或 ZJB-300	ZJL-150	2S-230	33.5* 22.5	$\phi 160$	$\phi 50$	1840 \times 1670 \times 1715	1800
JZJLS-600·150·70	600	10	ZJ-600 或 ZJB-600	ZJL-150	2S-230	35* 24	$\phi 200$	$\phi 50$	1840 \times 1670 \times 1715	1830
JZJLS-1200·300·150·70	1200	0.2	ZJ-1200	ZJB-300 + ZJL-150	2S-230	44.5* 33.5	$\phi 250$	$\phi 50$	1950 \times 2130 \times 2450	3600
JZJLS-1200·400	1200	400	ZJL-1200		2SK-25	110	$\phi 250$	$\phi 100$	3090 \times 2210 \times 1725	3800

注:配用功率是指各泵原设计配用功率的总和,组成机组以后的实际配用功率可根据使用情况而定

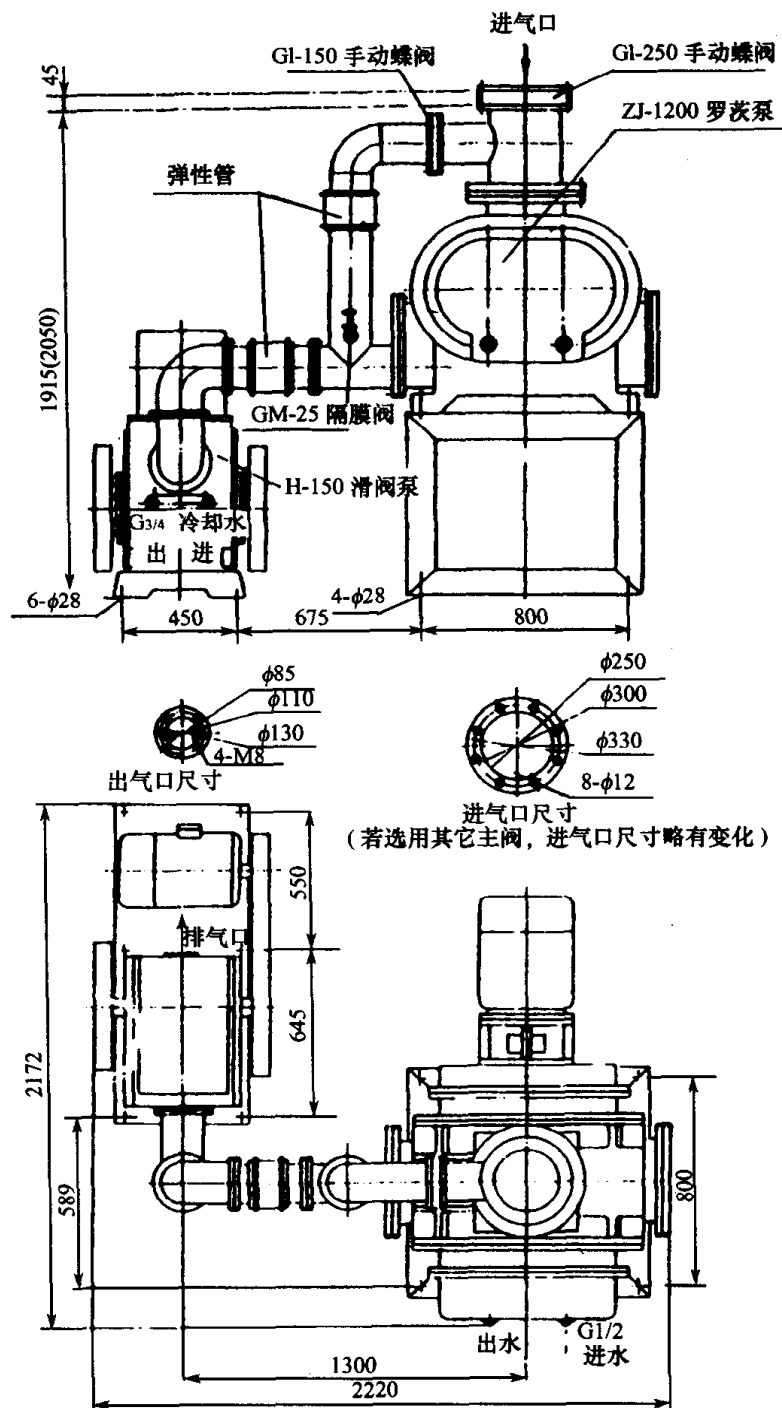


图 9-29 JZJ(B)H-1200·150 机组外形尺寸

(3) JZJS 型罗茨泵—水环泵真空机组

JZJS 型真空机组是以普通罗茨真空泵为主泵, 以双级水环式真空泵为前级泵, 通过压力继电器, 来实现罗茨真空泵水环真空泵的自动启闭, 自动过载保护的成套真空获得设备。它除了具有一般罗茨真空泵机组的一些特点外, 由于采用水环式真空泵作前级泵, 因此, 它特别适用于抽除含较多蒸气及有一定腐蚀性气体的工业流程中。例如: 化工产品的真空蒸馏、真空蒸发、脱水结晶; 轻纺工业的涤纶切片干燥; 食品工业的冷冻干燥等工艺均可采用。

表 9-24 给出了 JZJS 型罗茨泵—水环泵真空机组型号及技术参数。图 9-34 为该机组抽速曲线。图 9-35 及图 9-36 为机组外形尺寸。

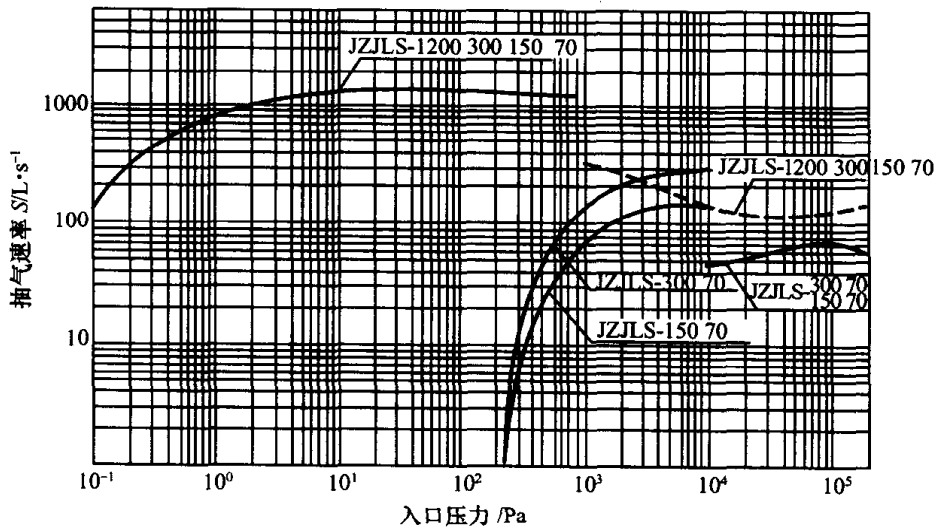


图 9-30 JZJLS 型气体循环冷却罗茨泵—水环泵机组抽速曲线

表 9-24 JZJS 型罗茨泵—水环泵真空机组型号及技术参数

型号	抽气速率 /L·s ⁻¹	极限真空 /Pa	机组组成泵型号			配用功率 /kW	进气口径 /mm	排气口径 /mm	质量 /kg
			主泵	中间泵	前级泵				
JZJS-70·35	70	650	ZJ-70		2S-185(A)	7	80	50	450
JZJS-70·70·35	70	25	ZJ-70	ZJ-70	2S-185(A)	8.5	80	50	
JZJS-150·70·35	150	25	ZJ-150A	ZJ-70	2S-185(A)	10	100	50	1200
JZJS-150·70Z·35	150	25	ZJ-150A	ZJ-70Z	2S-185(A)	10.7	100	50	
JZJS-300·200	300	650	ZJ-300		2SK-12	34	150	50	
JZJS-300·150·70	300	25	ZJ-300	ZJ-150A	2S-230	18	150	50	
JZJS-600·150·70	600	25	ZJ-600	ZJ-150A	2S-230	19.5	150	50	
JZJS-600·300·200	600	25	ZJ-600	ZJ-300	2SK-12	39.5	150	50	

注:ZJ-70Z 采用 ZJ-150A 泵将二极电机变为四极电机改装而成

(4)JZJX 罗茨泵—旋片泵真空机组

JZJX 罗茨泵—旋片泵真空机组型号与技术参数由表 9-25 给出。

表 9-25 JZJX 罗茨泵—旋片泵机组型号及技术性能

型 号	JZJ-30·4	JZJ-70·8	JZJ-150·30	JZJ-300·30	JZJ-600·70	JZJ-1200·150×2	JZJ·1200·300·70
主泵	ZJ-30 或 ZJB-30	ZJ-70 或 ZJB-70	ZJ-150A 或 ZJB-150	ZJ-300 或 ZJB-300	ZJ-600 或 ZJB-600	ZJ-1200A 或 ZJB-1200	ZJ-1200A+ZJ-300 或 ZJB-1200+ZJB-300
前级泵	2X-4C 或 2XZ-4	2X-8 或 2XZ-8 (水冷)	2X-30A	2X-30A 或 2X-70A	2X-70A	X-1502 台 (或 1 台)	2X-70A
抽气速率/L·s ⁻¹	30	70	150	300	600	1200	1200
极限压力/Pa	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²	5×10 ⁻²

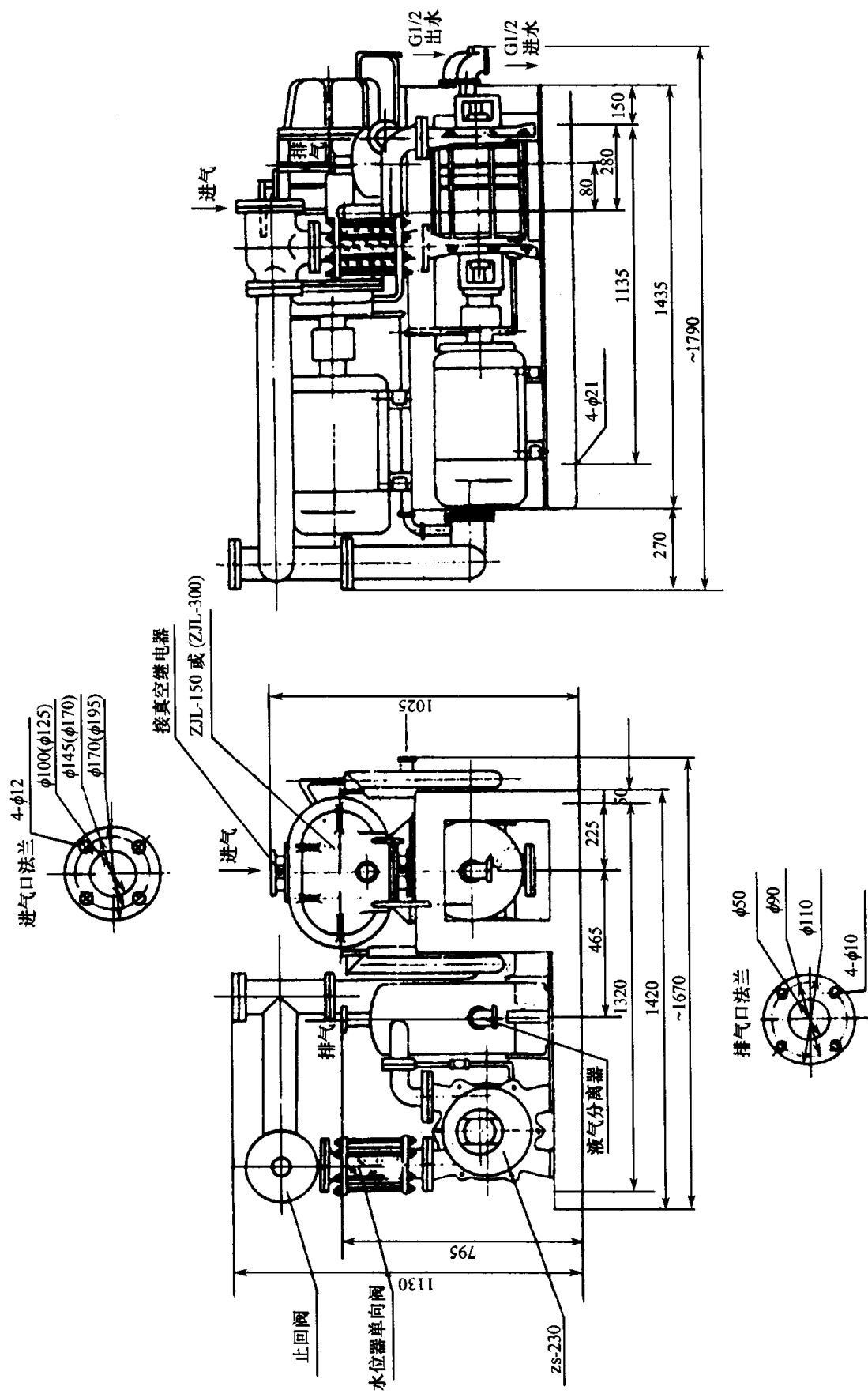


图 9-31 JZJLS-150.70 及 JZJLS-300.70 机组外形尺寸

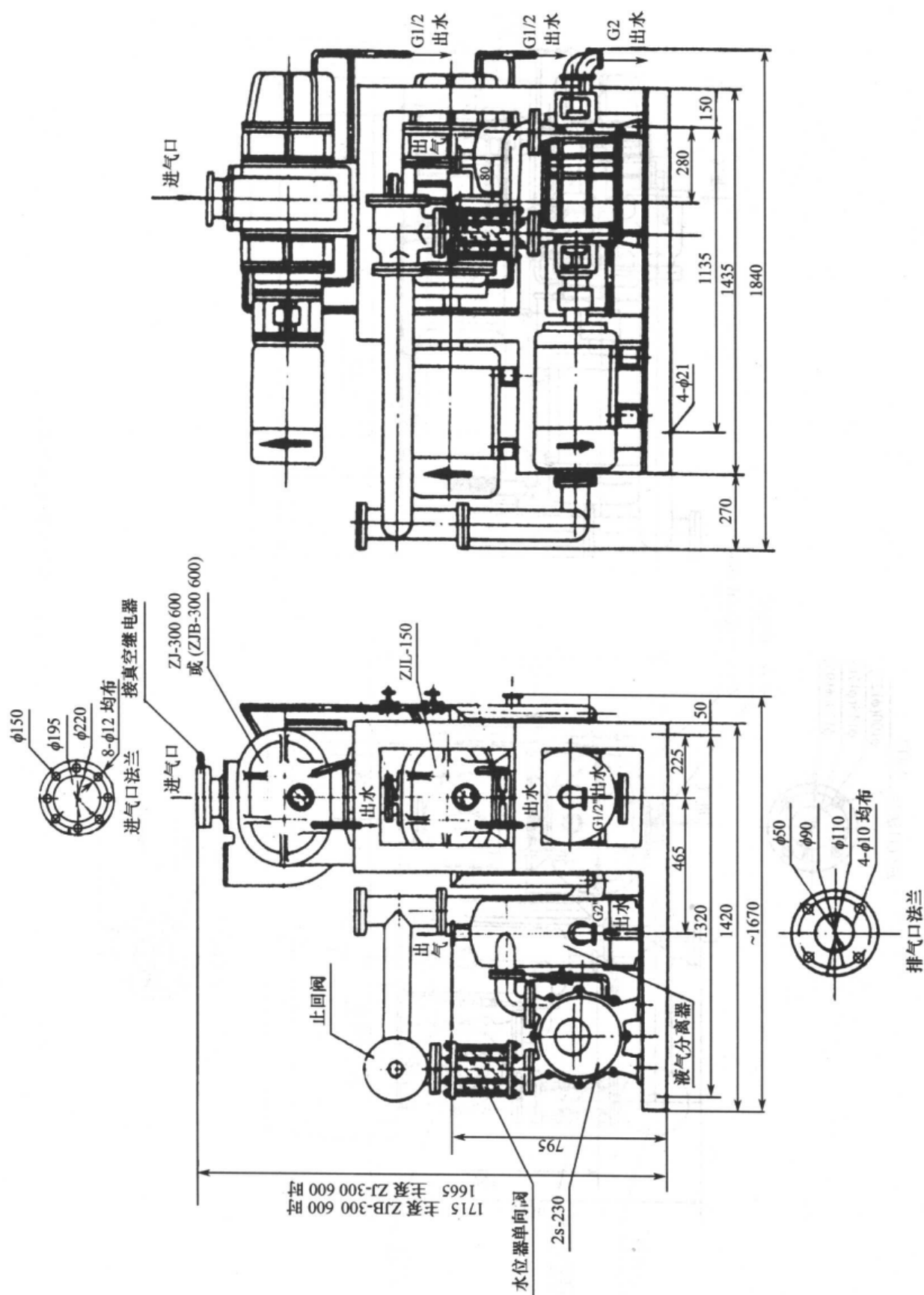


图 9-32 JZJLS-300.150.70、JZJLS-600.150.70、JZJBLS-300.150.70、JZJBLS-600.150.70 机组外形尺寸

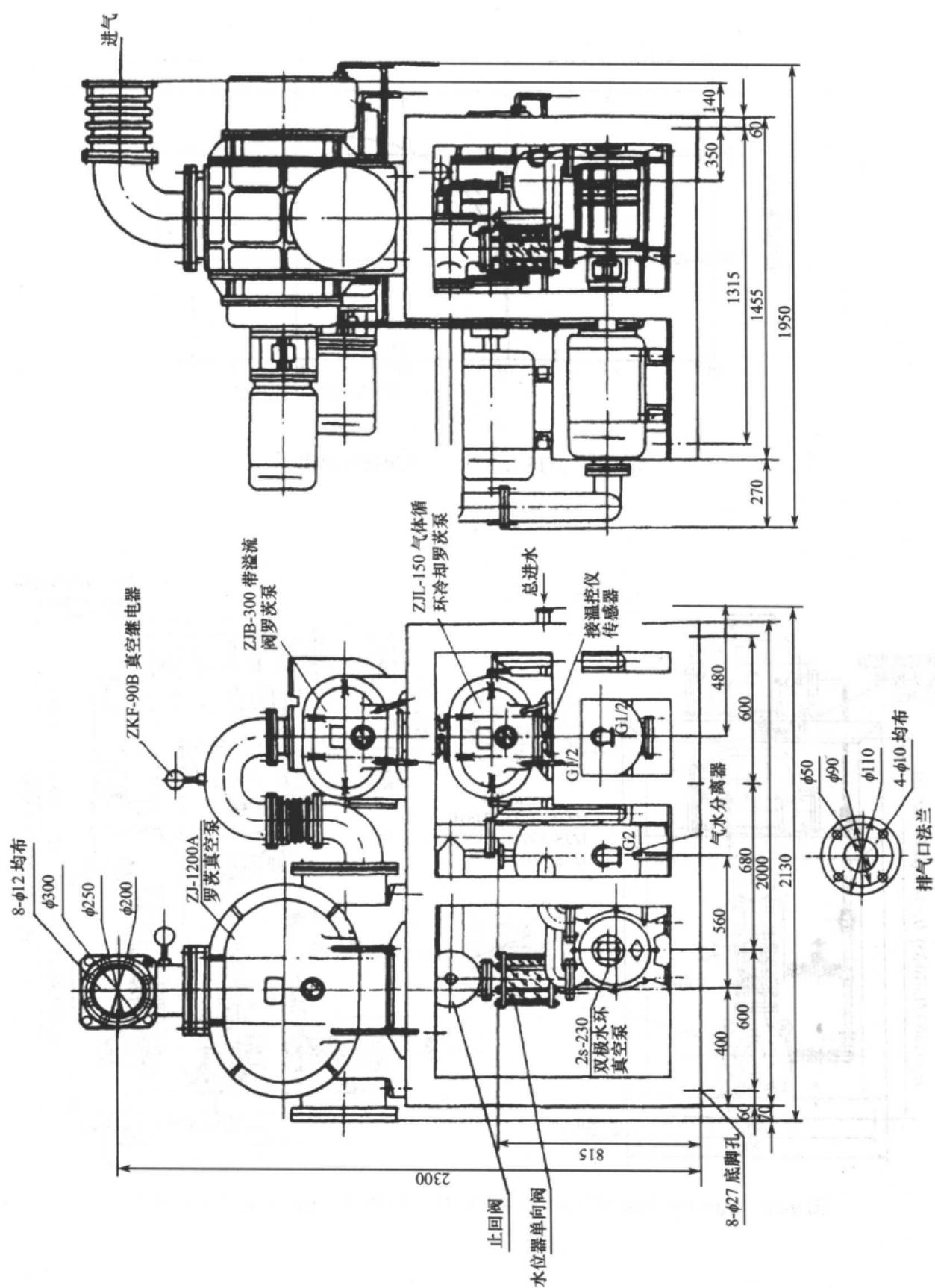


图 9-33 JZJLS-1200-300-150-70 机组外形尺寸

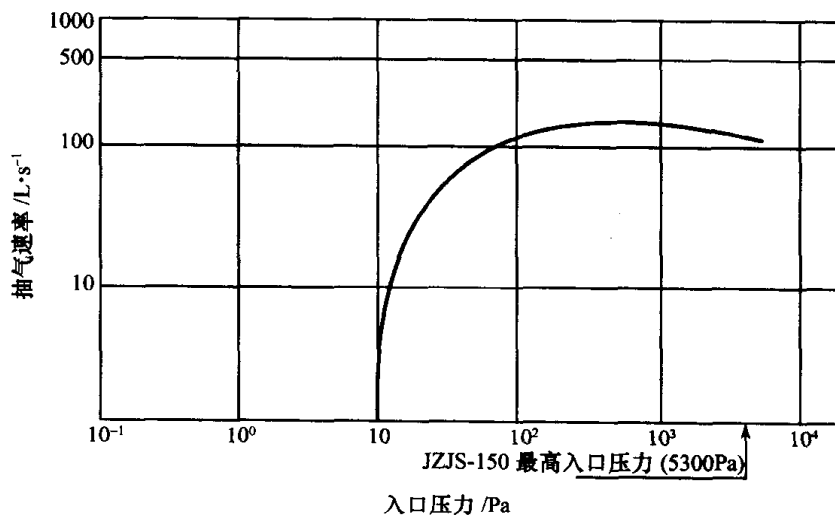


图 9-34 JZJS-150.70.35 机组抽气曲线

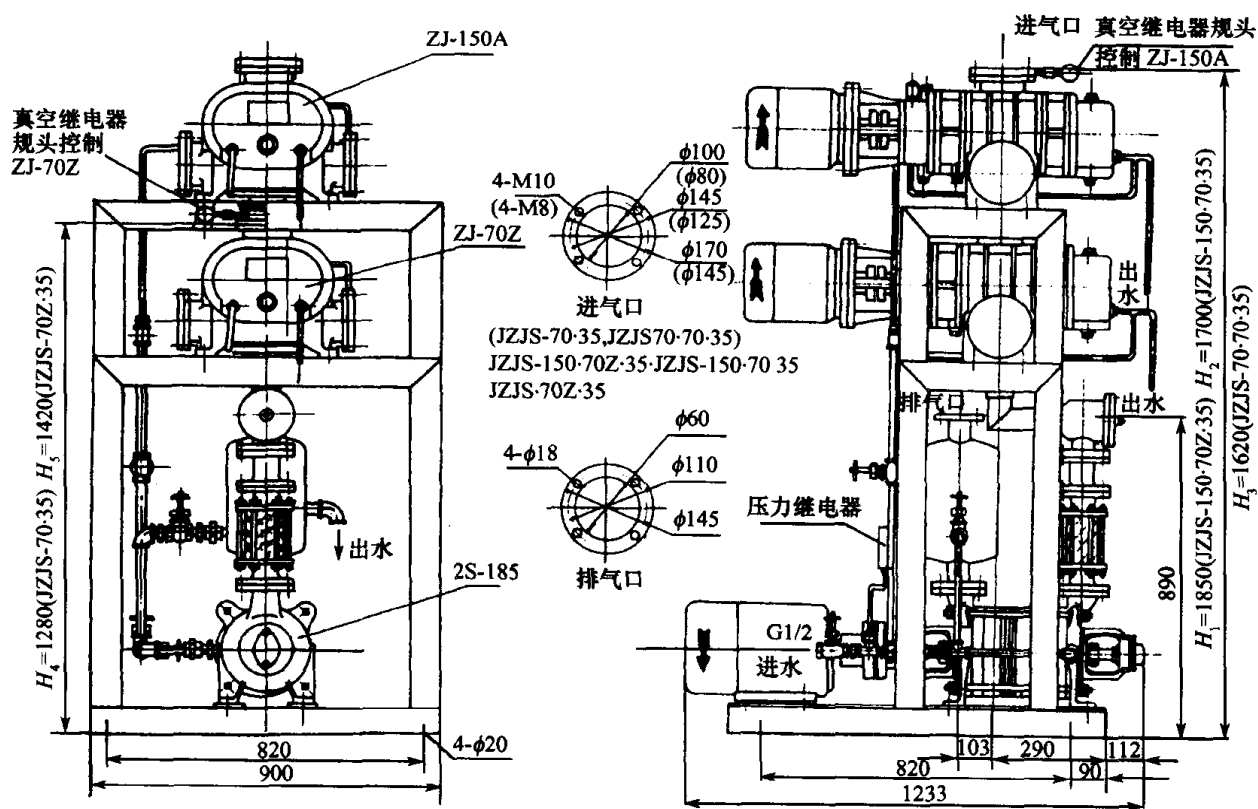


图 9-35 JZJS-150.70Z.35/150.70.35/70.70.35/70.35/70Z.35 机组外形尺寸

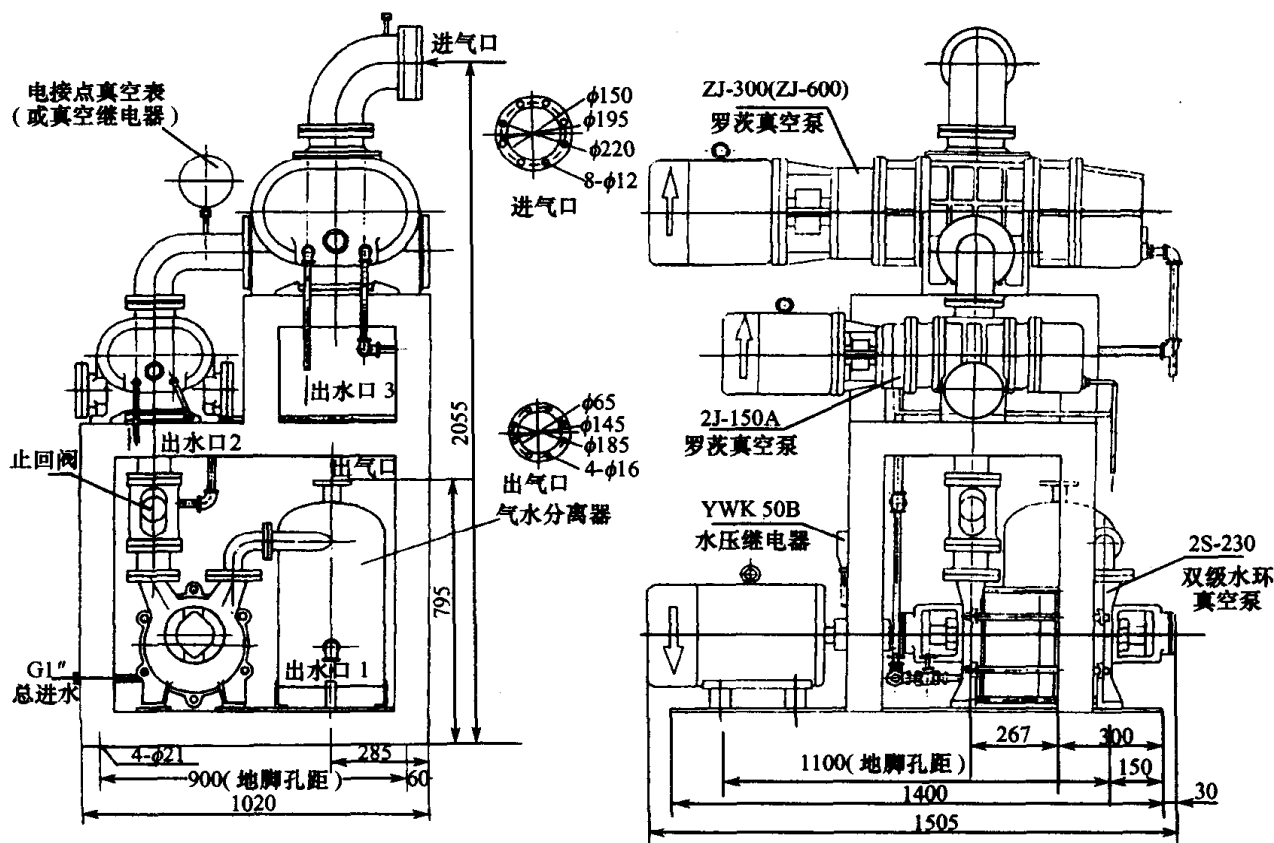


图 9-36 JZJS-300·150·70/600·150·70 机组外形尺寸

3. JZJX 系列罗茨泵—旋片泵机组 (山东淄博真空设备厂有限公司)

此系列罗茨泵—旋片泵机组通过 ISO·9001 质量体系认证,其型号及技术参数见表 9-26。

表 9-26 罗茨泵—旋片泵机组型号及技术参数

型 号	主 泵	前 级 泵	抽速/ $L \cdot s^{-1}$	极 限 压 力/Pa		总功率/kW
				X 型前级泵	2X 型前级泵	
JZJX30-8	ZJ30	2X-4	30		5×10^{-2}	1.3
JZJX30-4	ZJ30	2X-8	30		5×10^{-2}	1.85
JZJX70-8	ZJ70	2X-8	70		5×10^{-2}	2.6
JZJX70-4	ZJ70	2X-15	70		5×10^{-2}	3.7
JZJX150-8	ZJ150	2X-15	150		5×10^{-2}	5.2
JZJX150-4	ZJ150	X(2X)-30	150	1×10^{-1}	5×10^{-2}	7(6)
JZJX300-8	ZJ300	X(2X)-30	300	1×10^{-1}	5×10^{-2}	8(7)
JZJX300-4	ZJ300	X(2X)-70	300	1×10^{-1}	5×10^{-2}	11.5(9.5)
JZJX600-8	ZJ600	X(2X)-70	600	1×10^{-1}	5×10^{-2}	13(11)
JZJX600-4	ZJ600	X-150	600	1×10^{-1}		20.5
JZJX1200-8A	ZJ1200	X-150	1200	1×10^{-1}		26
JZJX1200-8B	ZJ1200	2X-70, 2X-70	1200		5×10^{-2}	22
JZJX150-4.4	ZJ150	ZJ30; 2X-8	150		3×10^{-2}	4.85
JZJX150-4.2	ZJ150	ZJ30; 2X-15	150		3×10^{-2}	5.95
JZJX300-4.4	ZJ300	ZJ70; 2X-15	300		3×10^{-2}	7.7
JZJX300-4.2	ZJ300	ZJ70; X(2X)-30	300	5×10^{-2}	3×10^{-2}	9.5(8.5)
JZJX600-4.4	ZJ600	ZJ150; X(2X)-30	600	5×10^{-2}	3×10^{-2}	12.5(11.5)
JZJX600-4.2	ZJ600	ZJ150; X(2X)-70	600	5×10^{-2}	3×10^{-2}	16(14)
JZJX1200-4.4	ZJ1200	ZJ300; X(2X)-70	1200	5×10^{-2}	3×10^{-2}	22.5(20.5)
JZJX1200-4.2	ZJ1200	ZJ300; X-150	1200	5×10^{-2}		30
JZJX2500-4.4	ZJ2500	ZJ600; X-150	2500	5×10^{-2}		39

4. JLS 罗茨泵—水环泵机组(沈阳真空泵厂)

本机组是以罗茨泵为主泵,水环泵为前级泵串联而成的。其结构紧凑,操作方便。用于抽除含有大量水蒸气 and 带有一定腐蚀性的可凝性气体。适用于真空蒸馏、蒸发、脱水、干燥等工艺过程中,其型号及技术参数见表 9-27。

表 9-27 JLS 罗茨泵—水环泵机组性能型号及技术参数

型 号	抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	主泵	前级泵	进气口径 $/\text{mm}$	排气口径 $/\text{mm}$	重量 $/\text{kg}$
JLS-30	30	4×10^2	ZJ-30	2SK-1.5	40	40	300
JLS-70	70	4×10^2	ZJ-70	2SK-3	40	40	330
JLS-150	150	4×10^2	ZJ-150	2SK-6	40	40	530
JLS-300	300	4×10^2	ZJ-300	2SK-6	50	50	1000
JLS-600	600	4×10^2	ZJ-600	2SK-12	80	80	1500
JLS-1200	1200	25	ZJ-1200	2SK-20	125	125	4300

5. JZJX 系列罗茨泵真空机组(北京北仪创新真空技术有限责任公司)

JZJX 罗茨—旋片(滑阀、水环)机组是以罗茨泵为主泵,分别以单级或双级旋片(滑阀、水环)泵为前级的真空获得机组。它具有真空度高、抽速大、工作性能稳定、占地面积小等优点,尤其罗茨—水环机组的抽吸水蒸气能力被广泛地应用在食品、纺织、化工、医药、冶金工业及电子领域的真空蒸发、真空浓缩、真空回潮、真空浸渍、真空干燥、真空冶炼等方面。该机组型号及技术参数见表 9-28。

表 9-28 JZJX、JZJH、JZJS 机组技术参数

型 号	主 泵	前 级 泵		抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	总功率 $/\text{kW}$
		I	II			
JZJX30-4	ZJP-30		2XZ-8	30	5×10^{-2}	1.85
JZJX70-4A	ZJP-70		2X-15	70		3.3
JZJX150-4A	ZJP-150		2X-30	150		5.2
JZJX300-4	ZJP-300		2X-70	300		9.5
JZJX600-4	ZJP-600		2X-70(2台)	600		18.5
JZJX1200-42	ZJP-1200	JZJ-300	2X-70(2台)	1200	3×10^{-2}	26
JZJH600-4	ZJP-600		H-150	600	1×10^{-1}	22.5
JZJH1200-4	ZJP-1200		H-300	1200		32
JZJS150-41	ZJP-150	ZJP-30	2SK-1.5	150	4×10^1	8.75
JZJS300-41	ZJP-300	ZJP-70	2SK-3	300		12.6
JZJS600-41	ZJP-600	ZJP-150	2SK-6	600		24.7
JZJS1200-41	ZJP-1200	ZJP-300	2SK-12	1200		45
JZJS150-2	ZJP-150		2SK-3	150	4×10^2	11.5
JZJS300-2	ZJP-300		2SK-6	300		19
ZJJS600-2	ZJP-600		2SK-12	600		37.5

6. JZJX、JZJS 罗茨泵真空机组(南京真空泵厂)

JZJX 系列罗茨—旋片真空机组及 JZJS 系列罗茨—水环真空机组。型号及技术参数见表

9-29~表 9-30。

表 9-29 JZJX 罗茨—旋片真空机组型号及技术参数

型 号	配 用 泵 型		抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$
	主泵	前级泵		
JZJX-30	ZJ-30 或 ZJB-30	2X-4	30	5×10^{-2}
JZJX-70	ZJ-70 或 ZJB-70	2X-8C(水冷)	70	
JZJX-150	ZJ-150 或 ZJB-150	2X-30A	150	
JZJX-300	ZJ-300 或 ZJB-300	2X-30A 或 2X-70A	300	
JZJX-600	ZJ-600 或 ZJB-600	2X-70A	600	

表 9-30 JZJS 罗茨—水环真空机组型号及技术参数

型 号	配 用 泵 型		抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$
	主泵	前级泵		
JZJS-30	ZJ-30 或 ZJB-30	2SK-1.5	30	800
JZJS-70	ZJ-70 或 ZJB-70	2SK-1.5	70	
JZJS-150	ZJ-150 或 ZJB-150	2SK-3	150	
JZJS-300	ZJ-300 或 ZJB-300	2SK-6	300	
JZJS-600	ZJ-600 或 ZJB-600	2SK-12	600	

7. JZJX 罗茨真空泵机组(沈阳恒星实业有限公司)

该机组是以罗茨真空泵为主泵,以旋片泵为前级泵并配有电磁阀,管路等组成的真空获得设备。它具有结构紧凑、操作方便、抽气能力大、抽气时间短等特点。广泛应用于真空冶金、真空脱气、真空镀膜以及空间模拟、低密度风洞等装置中,以抽除非腐蚀性气体,还可用于医药、食品、电子、化工等工业的蒸馏、蒸发、干燥等生产过程。其型号及技术性能见表 9-31。

表 9-31 JZJX 罗茨真空泵机组型号及技术性能

型 号	抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	机组配置		进气口径 $/\text{mm}$	排气口径 $/\text{mm}$	配套功率 $/\text{kW}$
			主泵	前级泵			
JZJX-150	150	2.7×10^{-2}	ZJ-150	2X-15	100	80	3.7
JZJX-300	300	2.7×10^{-2}	ZJ-300	2X-70	160	100	9.5
JZJX-600	600	2.7×10^{-2}	ZJ-600	2X-70	200	160	11

8. 罗茨泵真空机组(台州星光真空设备制造有限公司)

该公司生产的罗茨泵真空机组型号及技术参数见表 9-32~表 9-33。

表 9-32 罗茨泵滑阀(旋片)泵真空机组型号及技术参数

型 号	泵 型 号			抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	进气口径 $/\text{mm}$	排气口径 $/\text{mm}$	电机功率/ kW		
	主泵	中间泵	前级泵 ^①					主泵	中间泵	前级泵
JZJ2X305	ZJY-150	-	2X-30	150	1.1×10^{-2}	100	40	2.2	-	3
JZJ2X404	ZJY-300	-	2X-70	300	1.1×10^{-2}	150	65	4	-	5.5
JZJH504	ZJY-600	-	HGL-150	600	5.1×10^{-2}	200	80	7.5	-	11
JZJ2X508	ZJY-600	-	2X-70	600	1.1×10^{-2}	200	65	7.5	-	5.5
JZJH608	ZJY-1200	-	HGL-150	1200	5.1×10^{-2}	250	80	11	-	11
JZJH542	ZJY-600	ZJY-150	2X-70	600	1.1×10^{-2}	200	65	7.5	2.2	5.5
JZJH541	ZJY-600	ZJY-150	HGL-150	600	1.1×10^{-2}	200	80	7.5	2.2	11
JZJH624	ZJY-1200	ZJY-600	HGL-150	1200	1.1×10^{-2}	250	80	11	7.5	11
JZJH642	ZJY-1200	ZJY-300	HGL-150	1200	1.1×10^{-2}	250	80	11	4	11
JZJH644	ZJY-1200	ZJY-300	2X-70	1200	1.1×10^{-2}	250	65	11	4	5.5

注:①当配用的前级泵用 HG-150 代替 HGL-150 时,前级泵配用功率为 15kW

表 9-33 罗茨水环(油环大气喷射泵)真空机组型号及技术参数

型 号	泵 型 号			抽气速率 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	极限压力 $/\text{Pa}$	进气口径 $/\text{mm}$	排气口径 $/\text{mm}$	电机功率/ kW		
	主泵	中间泵	前级泵					主泵	中间泵	前级泵
JZJS150-3	ZJY-150	-	2SK-3	150	267	100	50	2.2	-	7.5
JZJS150-1	ZJY-150	-	2SK-6A	150	267	100	50	2.2	-	11
JZJS300-3	ZJY-300	-	2SK-6A	300	267	150	50	4	-	11
JZJS150-21	ZJY-150	ZJY-70	2SK-3	150	26.7	100	50	2.2	1.1	7.5
JZJS300-21	ZJY-300	ZJY-150	2SK-6A	300	26.7	150	50	4	2.2	11
JZJS300-41	ZJY-300	ZJY-70	2SK-3	300	26.7	150	50	4	1.1	7.5
JZJS600-41	ZJY-600	ZJY-150	2SK-6A	600	26.7	200	50	7.5	2.2	11
JZJS1200-43	ZJY-1200	ZJY-300	2SK-6A	1200	26.7	250	100	11	4	11
JZJY150-3	ZJY-150	-	2YK-3	150	66.7	100	50	2.2	-	7.5
JZJY300-3	ZJY-300	-	2YK-6	300	66.7	150	50	4	-	11
JZJY150-21	ZJY-150	ZJY-70	2YK-3	150	0.8	100	50	2.2	1.1	7.5
JZJY300-21	ZJY-300	ZJY-150	2YK-6A	300	0.8	150	50	4	2.2	11
JZJY300-41	ZJY-300	ZJY-70	2YK-3	300	0.8	150	50	4	1.1	7.5
JZJY600-41	ZJY-600	ZJY-150	2YK-6A	600	0.8	200	50	7.5	2.2	11
JZJY1200-43	ZJY-1200	ZJY-300	2YK-6A	1200	0.8	250	50	11	4	11
JZJS150-1P	ZJY-150	-	2SK-6AP	150	40.0	100	50	2.2	-	11
JZJS150-3P	ZJY-150	-	2SK-3P	150	40.0	100	50	2.2	-	7.5
JZJS300-3P	ZJY-300	-	2SK-6AP	300	40.0	150	50	4	-	11
JZJS150-21P	ZJY-150	ZJY-70	2SK-3P	150	2.0	100	50	2.2	1.1	7.5
JZJS300-21P	ZJY-300	ZJY-150	2SK-6AP	300	2.0	150	50	4	2.2	11
JZJS300-41P	ZJY-300	ZJY-70	2SK-3P	300	2.0	150	50	4	1.1	7.5
JZJS600-41P	ZJY-600	ZJY-150	2SK-6AP	600	2.0	200	50	7.5	2.2	11
JZJS1200-41P	ZJY-1200	ZJY-300	2SK-12P	1200	2.0	250	100	11	4	22
JZJS600-21P	ZJY-600	ZJY-300	2SK-12P	600	2.0	200	100	7.5	4	22

9.JZJ 罗茨泵—干式泵真空机组(北京朗禾科技有限公司)

此罗茨泵机组是由罗茨泵、干式真空泵、管路、控制电源等组装而成的少油真空获得设备。性能可靠、操作简单,可广泛应用于化工、制药、航天等真空技术领域。其型号及技术性能见表 9-34。

表 9-34 罗茨泵—干式泵型号及技术性能

型 号		JZJ-30	JZJ-70	JZJ-150
抽速 $/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$		30	70	150
极限压力 $/\text{Pa}$		5×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}
配用泵	主泵	ZJ-30	ZJ-70	ZJ-150A
	干式泵	PH-8	PH-15	PH-30

九、扩散泵真空机组

(一) 概述

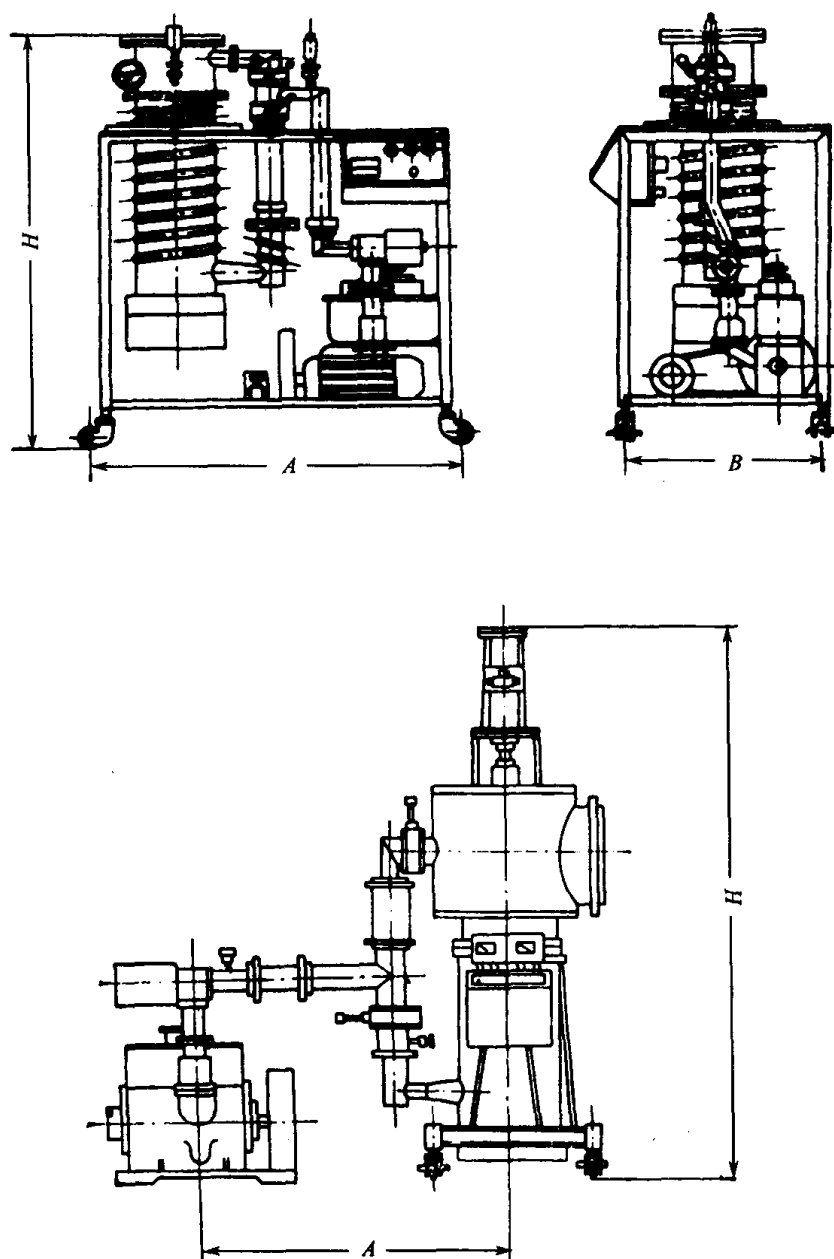
扩散泵真空机组是真空工程中广泛使用的一种抽气设备,其工作压力范围 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$,抽速从 $10^2\text{L/s} \sim 2 \times 10^4\text{L/s}$ 。它采用油做工作介质,对于怕油污染的真空环境,其使用

受到了一定限制。如果采用五氯酚苯基乙醚或五氯酚苯基硅氧烷为工作液,返油就会得到很大改善。也可以采用水冷挡板,再装一个简单的液氮阱,可使返油率小于 $5 \times 10^{-6} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{min}$ 。扩散泵机组对各种气体抽气无选择性,操作简单,便于维护。因而广泛地应用于光学工业、电子工业、真空冶金、航天及原子能工业中。

(二) 国产扩散泵真空机组外形尺寸与基本参数

①上海曙光机械厂生产的 JK 系列扩散泵机组型号及性能见表 9-35。

表 9-35 JK 型油扩散泵机组型号及技术参数



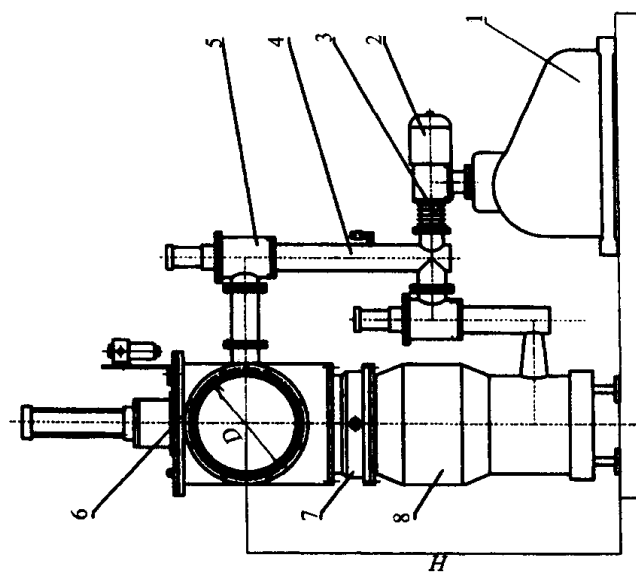
(续)

型 号	JK-50	JK-100	JK-150	JK-200	JK-300	JK-400	JK-600	JK-800	JK-1200
极限压力/Pa	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
抽气速率/ $L \cdot s^{-1}$	20~25	100	220	280	900	1800	3700	6500	17000
临界前级压力 /Pa	27	40	40	40	40	40	40	40	40
加热功率/kW	0.4	0.8	1	1.5	2.5	4.8	6	9	21
配用主扩散泵 扩散喷射	K-50	K-100	K-150	K-200	K-300	K-400	K-600	K-800	K-1200
配用挡板	S-50	S-100	S-150	S-200	S-300	S-400	S-600	-80℃ 低温流程	-80℃ 低温流程
配用阀门	GD-50 手动	GD-100 手动	GD-150 手动	GD-200 手动	GD-300 手动	GDQ-400 气动	GDQ-600 气动	GDQ-800 气动	GDQ-1300 气动
前级机械泵	2X-1	2X-4	2X-4	2X-8	2X-15	2X-30	2X-70	2X-30 和 Z-150	2X-70 和 Z-300
进气口直径/mm	φ50	φ100	φ150	φ200	φ300	φ400	φ600	φ800	φ1300
装入油量/L	0.05	0.15	0.3~0.5	0.5~0.8	1.2~1.5	2.5~3	6~7	10~12	16~20
净重/kg	12	50	70	85	100	350	1000	2100	5000
外形 参考 尺寸	A /mm	—	—	850	1000	1200	1340	—	—
	B /mm	—	—	473	825	800	—	—	—
	H /mm	—	—	900	1200	1600	2405	—	—
注:工作液为大连石油七厂3号扩散泵油,其蒸气压(室温20℃)为 10^{-6} Pa,各机组加油量同K型诸泵,当使用硅油274、275时加热功率需增大15%~20%。各机组外形尺寸作为参考尺寸									

②兰州真空设备厂生产的JK系列扩散泵真空机组有两种类型:主泵是直腔式油扩散泵及主泵为凸腔式油扩散泵。其机组型号及技术参数见表9-36。

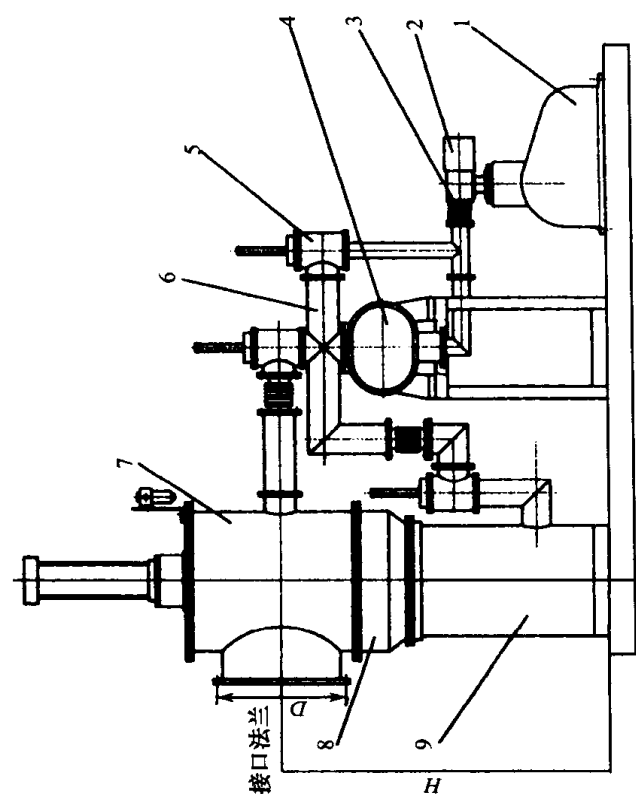
③北京北仪创新真空技术有限责任公司生产的JK系列扩散泵真空机组由低真空泵、高真空油扩散泵,高真空阀,低真空阀,充气阀,挡油器等通过机架及管道组合在一起对容器进行抽气获得高真空的设备。具有结构紧凑,操作灵活可靠,使用方便等特点,已广泛应用在科研、教学及生产中,是真空应用设备理想的配套产品。不适用于排除对金属有腐蚀作用或对油产生化学反应的气体。

表 9-36 JK 型扩散泵真空机组型号及技术参数



(a) 油扩散泵机组二级配置简图

- 1—前级泵; 2—电磁充气阀; 3—波纹管; 4—管道; 5—低真空阀门;
6—高真空阀门; 7—水冷挡板; 8—高真空油扩散泵。



(b) 油扩散泵机组三级配置简图

- 1—前级泵; 2—电磁充气阀; 3—波纹管; 4—罗茨泵; 5—低真空阀门;
6—管道; 7—高真空阀门; 8—水冷挡板; 9—高真空油扩散泵。

(续)

型 号	JK-200T	JK-300T	JK-320TD	JK-400T	JK-500TD	JK-600T	JK-800	JK-800TD	JK-1000TD	JK-1200
2.7 × 10 ⁻⁴										
极限压力/Pa										
抽气速率/L·s ⁻¹	600	1400	1500	2600	3800	5600	7560	8600	13000	16000
主泵加热功率/kW	1.8	3	4	4.5	6.9	8.4	8.4	15	24	24
主泵型号	K-200T	K-300T	K-320TD	K-400T	K-500TD	K-600T	K-800	K-800TD	K-1000TD	K-1200
配用的挡板	SB-200	SB-300	内藏式	SB-400	内藏式	SB-600	SB-800	内藏式	内藏式	SB-1200
配用的高真空阀 (气、电动阀)	GF-200	GF-300								
	GDD-J200	GDD-J300	GDD-J320	GDD-J400	GDD-J500	GDD-J600				
	GDQ-J200	GDQ-J300	GDQ-J320	GDQ-J400	GDQ-J500	GDQ-J600	GDQ-J800	GDQ-J800	GDQ-J1000	GDQ-J1200
配用的前级泵	2X-15	2X-30	2X-30	2X-70	2X-70	2X-70	2X-70 2台	H-150 2台	H-150 2台	H-150 2台
进气口直径 D/mm	200	300	320	400	500	600	800	800	1000	1200
螺栓中心圆 D1/mm	250	350	395	465	580	670	880	880	1090	1310
N-φ1	8-φ12	8-φ14	12-φ14	8-φ18	16-φ14	12-φ21	20-φ21	20-φ21	24-φ23	28-φ25
中心高尺寸/mm	~940	~1160	~1340	~1500	~1700	~2030	~2280	~2414	~2915	~3582

注:①机组所需二级配置未设置罗茨泵;机组所需三级配置设有罗茨泵;

②根据客户要求可设计制造各种不同压力 and 不同配置的高真空机组;

③GF-为高真空翻板阀;

④GDD-J 为高真空电动挡板阀;

⑤GDQ-J 为高真空气动挡板阀;

⑥KTD 系列有内藏阱,不需再配置挡板及冷阱;

⑦D1-阀门进气口连接尺寸;N-φ1 为螺栓数目与孔径

JK 扩散泵真空机组型号及技术参数见表 9-37。

表 9-37 JK 扩散泵真空机组型号及技术参数

型 号	JK-100A	JK-150A	JK-200A	JK-300	JKT-200 凸腔式	JK-400A	JK-500A	JK-630
极限压力/Pa	$\leq 1.3 \times 10^{-4}$				$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1.3 \times 10^{-4}$		$\leq 2 \times 10^{-4}$
抽气速率/L·s ⁻¹	≥110	≥260	≥500	≥750	≥700	≥2000	≥2800	≥5600
加热功率/kW	0.7	1	1.8	3	2	5.5	7.5	9.6
通径/mm	φ100	φ150	φ225	φ350	φ210	φ400	φ501	φ651
螺孔中心圆 直径/mm	φ145	φ195	φ275	φ385	卡钳螺钉	卡钳螺钉		
孔数×螺孔 尺寸/mm	4×φ9	4×M10	8×M10	8×M10				
推荐前级机械泵	2XQ-2	2X-4	2XZ-8	2X-15	2XZ-8	2X-30	2X-70	2X-70
前级维持	储气桶					2XQ-2	2X-4	2X-15
高真空油扩散泵	K-100	K-150	K-200	K-300	KT-200	K-400	K-500	K-630
高真空挡板阀	GI-100 蝶阀	GI-150 蝶阀	GD-200	GD-300	GI-200C 蝶阀	GFQ-J400 角阀	GFQ-J500 角阀	GFQ-J630 角阀
低真空三通阀	DS-20A	DS-30A	DS-30A	DS-50	DS-30A	GFQ-J80 角阀	GFQ-J100 角阀	GFQ-J150 角阀
前级泵磁力阀	DQG-30	DQG-30	DQG-30	DQG-50	DQG-30			
真空室充气阀	QF-5	QF-5	QF-5	CQF-12	QF-5	GQQ-J25	GQQ-J25	GQQ-J40
挡油器	DY-100B	DY-150	M-200 挡油帽	DY-300	DY-200B	DY-400A	DY-500A	DY-630
质量/kg	100	130	150	300	140	600	1000	1200
外形尺寸 /mm×mm×mm	700×500 ×721	850×500 ×931	1000×660 ×810	1200×800 ×1055	1100×660 ×1060	750×580 ×1875	1186×700 ×2255	1580×750 ×2770

④沈阳真空设备厂生产的高真空扩散泵真空机组是以高真空扩散泵为主泵,以旋片式真空泵为前级泵串联而成的。它可以使被抽容器获得 7×10^{-4} Pa(JKT 可达 7×10^{-5}) 高真空,因而广泛应用于电子工业、冶金工业、化学工业、原子能工业以及宇航等科研技术领域。机组可为真空烧结炉,各种真空镀膜机以及其它应用设备抽高真空之用。其型号及技术参数见表 9-38。

表 9-38 JK 及 JKT 扩散泵真空机组型号及技术参数

型 号	JK-80	JK-100	JK-150	JK-200	JKT-200	JK-300	JKT-300	JK-400	JKT-400	JK-600	JKT-600
极限压力/Pa	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-5}	7×10^{-4}	7×10^{-5}	7×10^{-4}	7×10^{-5}	7×10^{-4}	7×10^{-5}
抽气速率/ $L \cdot s^{-1}$	60	110	260	500	600	1000	1400	2000	2500	4500	5600
主泵型号	K-80	K-100	K-150	K-200	KT-200	K-300	KT-300	K-400	KT-400	K-600	KT-600
前级泵型号	2X-2	2X-4	2X-4	2X-8	2X-15	2X-15	2X-30	2X-30	2X-70	2X-70	2X-70 (2台)
进气口径/mm	80	100	150	200	200	300	300	400	400	600	600

⑤沈阳恒星实业有限公司生产的 JZ 系列油扩散喷射泵真空机组又称油增压泵机组。它由油扩散喷射泵、旋片泵、高真空气动挡板阀及管路等组成。该机组抽气能力大、粗抽时间短、维护简单、操作方便,是真空应用设备的理想配套设备。该机组不适于排除对金属有腐蚀作用及对泵油产生化学反应的气体。表 9-39 为该机组型号及技术参数性能。

表 9-39 JZ 油扩散喷射泵真空机组型号及技术参数

型 号	JZ-320	JZ-400	JZ-630	JZ-800
极限真空/Pa	6.7×10^{-2}			
抽气速率/ $L \cdot s^{-1}$	1500	2000	3000	6500
主泵型号	Z-320	Z-400	Z-630	Z-800
配用主阀	GDQ-J320	GDQ-J400	GDQ-J630	GDQ-J800
地面至挡板阀中心高/mm	1957	2138	2957	3520

⑥JKT 系列油扩散泵真空机组是由主泵、前级泵、真空阀门、油捕集器、连接管路、机架及辅助设备(电控、液控)等部分组成,是用以获得 10^{-4} Pa $\sim 10^{-2}$ Pa 真空的主要设备,广泛应用于电子、化学、冶金等工业领域。

表 9-40 为此机组型号及技术参数。

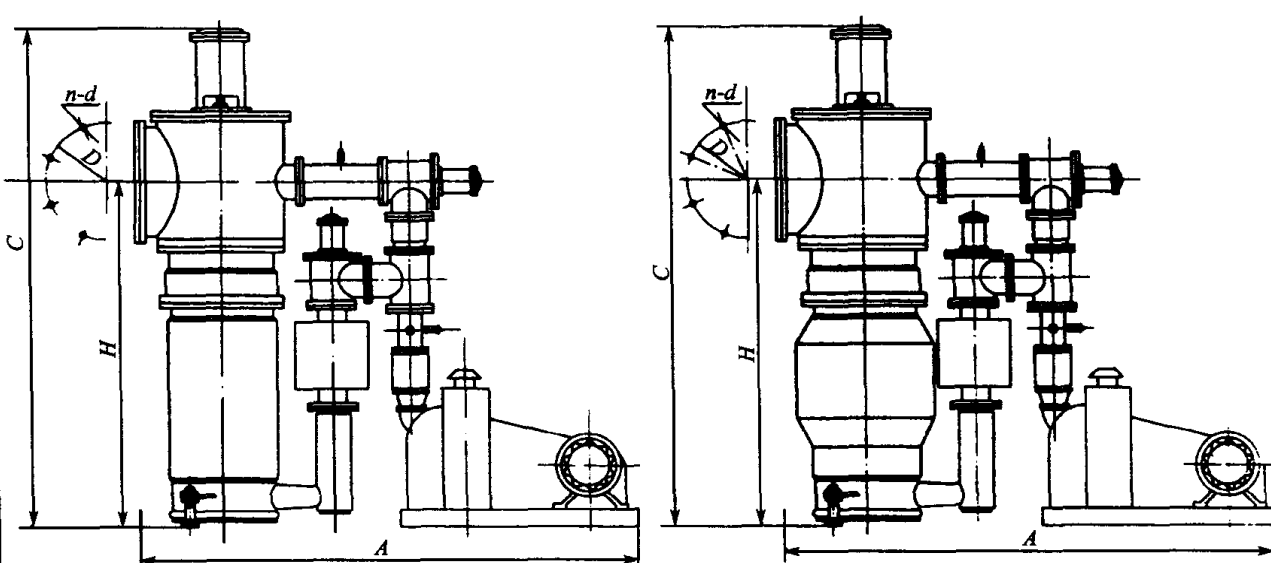
表 9-40 JKT 油扩散泵真空机组型号及技术参数

型 号	JKT-200	JKT-300	JKT-400	JKT-600	JKT-630	JKT-800	JKT-1000
抽气速率/ $L \cdot s^{-1}$	580	1150	2300	4600	5000	9000	14000
极限真空/Pa	5×10^{-4}						
抽至 1.3×10^{-2} Pa 时间/min	15						
主泵型号	KT-200	KT-300	KT-400	KT-600	KT-630	KT-800	KT-1000
推荐前级泵	2X-15	2X-15	2X-30	2X-70 二台 2X-4	2X-70 2X-4	2X-70 ZJ-300	2X-70 二台 ZJ-1200
配用主阀	GDQ-J200	GDQ-J300	GDQ-J400	GDQ-J600	GDQ-J630	GDQ-J800	GDQ-J1000
地面至挡板阀中心高/mm	995	1206	1500	2150	1680	2296	2930

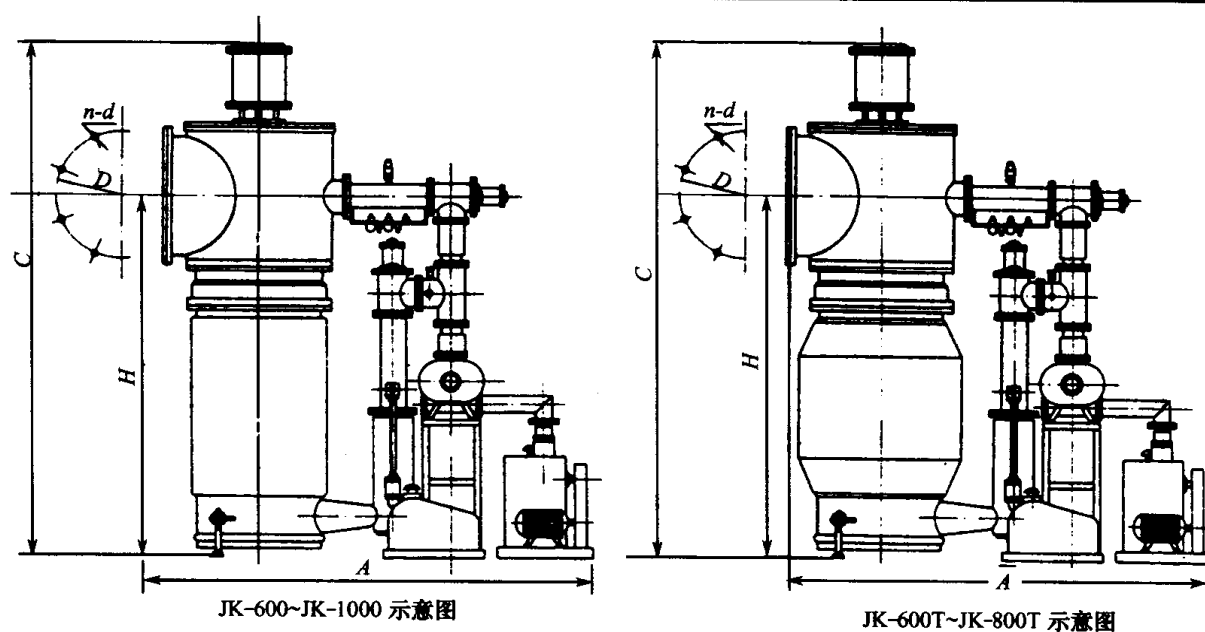
⑦沈阳兰菱真空设备公司生产的 JK 系列扩散泵真空机组是以高真空油扩散泵为主泵,配有一整套真空元器件所组成的高真空抽气设备,它可使被抽容器获得 10^{-2} Pa $\sim 10^{-4}$ Pa 的高真空。因而被广泛应用于电子工业、化学工业、冶金工业、原子能工业及宇宙探测等技术领域,如单晶炉、真空扩散炉、真空烧结炉、各类真空镀膜机、真空电子束焊机、各类真空电炉、电子显微镜、各种电子射线、加速器、宇宙空间模拟容器所需之高真空环境均可用 JK 系列扩散泵真空机组来实现。

JK 系列扩散泵真空机组型号及技术参数见表 9-41。

表 9-41 JK 及 JKT 机组型号及技术参数

					
JK-200~JK-400 示意图			JK-200T~JK-400T 示意图		
型 号	JK-200	JK-200T	JK-300	JK-300T	JK-400
极限压力/Pa	6.6×10^{-5}				
抽气速率/ $L \cdot s^{-1}$	500	600	1000	1200	2000
主泵加热功率/kW	1.2	1.8	2.4	3	4.5
主泵型号	K-200	K-200T	K-300	K-300T	K-400
前级泵	2X-15	2X-15	2X-30	2X-30	2X-70
维持泵	储气罐	储气罐	储气罐	储气罐	储气罐
高真空主阀	GFQ-J200	GFQ-J200	GFQ-J300	GFQ-J300	GFQ-J400
高真空管路阀	GFQ-J65 2 只	GFQ-J65 2 只	GFQ-J80 2 只	GFQ-J80 2 只	GFQ-J100 2 只
电磁压差阀	DDCY-50Q	DDCY-50Q	DDCY-65Q	DDCY-65Q	DDCY-80Q
主泵水冷挡板	SDB-200	SDB-200	SDB-300	SDB-300	SDB-400
H/mm	809	852	1060	1110	1375
D/mm	250	250	350	350	465
d	$\phi 12$	$\phi 12$	$\phi 14$	$\phi 14$	$\phi 18$
n	8	8	8	8	8
A/mm	1265	1265	1540	1540	1885
B/mm	400	400	505	505	772
C/mm	1159	1202	1640	1690	1968

(续)



型 号	JK-400T	JK-600	JK-600T	JK-800	JK-800T	JK-1000
极限压力/Pa	6.6×10^{-5}					
抽气速率/L·s ⁻¹	2400	4600	9400	8500	9400	13200
主泵加热功率/kW	4.5	7	7	13	13	16
主泵型号	K-400T	K-600	K-600T	K-800	K-800T	K-1000
前级泵	2X-70	2X-70 或 ZJZ-150	ZJZ-300	2X-70	ZJZ-300	ZJZ-600
维持泵	储气罐	2X-8	2X-8	2X-15	2X-15	2X-30
高真空主阀	GFQ-J400	GFQ-J600	GFQ-J600	GFQ-J800	GFQ-J800	GFQ-J1000
高真空管路阀	GFQ-J100 2 只	GFQ-J150 2 只	GFQ-J150 2 只	GFQ-J150 2 只	GFQ-J150 2 只	GFQ-J200 2 只
电磁压差阀	DDCY-80Q	DDCY-80Q DDCY-50Q	DDCY-80Q DDCY-50Q	DDCY-80Q DDCY-50Q	DDCY-80Q 2 只 DDCY-50Q	DDCY-80Q 2 只 DDCY-65Q
主泵水冷挡板	SDB-400	SDB-600	SDB-600	SDB-800	SDB-800	SDB-1000
H/mm	1425	2010	2025	2400	2500	2860
D/mm	465	670	670	880	880	1090
d8	φ18	φ21	φ21	φ14	φ14	φ23
n	12	12	20	20	24	
A/mm	1885	2700	2700	2865	2865	3460
B/mm	772	1090	1090	1365	2165	2350
C/mm	2018	2160	2185	3400	3500	4115

⑧沈阳真龙真空设备有限公司生产的 JKT、JK 系列油扩散真空泵机组是用来获得高真空的主要设备。它以油扩散泵为主泵与阀门、水冷挡板、管道、机械真空泵(前级泵)等组成高真空抽气系统,可获得 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$ 的工作真空度。

该机组的特点是抽气能力大,抽速在 105L/s 至 20000L/s 范围内可供选择,并可长时间稳定连续工作。它被广泛地应用于电子、化工、冶金、航空、航天、材料、生物医药、原子能、空间模拟等高科技领域。

表 9-42 为 JKT 及 JK 扩散泵真空机组技术参数,表 9-43 为机组配置,表 9-44 为机组外形尺寸。

表 9-42 JKT 及 JK 机组技术参数

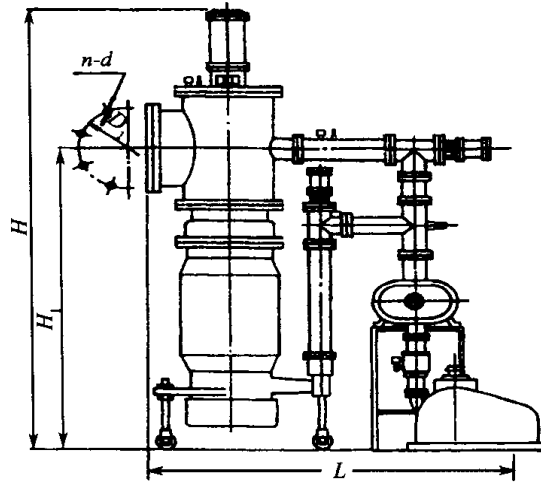
型 号	JKT-100 (JK-100)	JKT-150 (JK-150)	JKT-200 (JK-200)	JKT-300 (JK-300)	JKT-320 (JK-320)	JKT-400 (JK-400)	JKT-500 (JK-500)	JKT-600 (JK-600)	JKT-630 (JK-630)	JKT-800 (JK-800)	JKT-1000 (JK-1000)	JKT-1200 (JK-1200)
极限压力 /Pa	$2.6-3.5\times 10^{-4}$											
抽气速率 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	150 (105)	420 (280)	800 (530)	1700 (1100)	1800 (1200)	2800 (2100)	4600 (3300)	6500 (4600)	7000 (4900)	12000 (6600)	14500 (14000)	20000 (17500)
临界前级 压力/Pa	40											
主泵加热 电压/V	220				380							
主泵加热 功率/kW	0.8-1	1.2-1.5	1.6-1.8	2.4-3	3.5-3.8	4.5	7	9	10	13-13.5	17-2	28-30
主泵泵油 型号	KS-3											
主泵装油 量/L	0.15	0.4	0.55	1.2-1.3	1.4-1.8	3-4	4	6-7	7-8	12-14	15-16	22
主泵冷却 水量/ $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	180	200	300	400	420	500	600	800	850	1200	1500	2600
进气口径 DN/mm	100	150	200	300	320	400	500	600	630	800	1000	1200
推荐前级 泵抽速 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	4	8	15 (8)	30 (15)	30 (15)	70 (30)	150 (70)	150 (70)	150 (150)	300 (240)	600 (350)	600 (350)
外形 尺寸 /mm	L	700	970	1250	1600	1650	2400	2700	3600	3700	4100	5000
	B	500	570	690	800	900	1300	1600	2000	2100	2200	2500
	H	850 (1030)	1080 (1230)	1240 (1390)	1556 (1728)	1680 (1850)	1965 (2135)	2425 (2595)	2770 (2950)	2890 (3070)	3490 (3670)	4110 (4310) 4970 (5170)
净重/kg	106 (104)	173 168	353 (200)	610 490	840 (520)	1500 (780)	1900 (1300)	3100 (1800)	3200 (2500)	3700 (2800)	4500 (3800)	5300 (4400)

表 9-43 JKT 及 JK 机组配置

型号	主泵	水冷挡板	主阀	前 级 泵				管 道 阀		
				罗茨泵	滑阀泵	旋片泵	维持泵	挡板阀	电磁压差阀	充气阀
JKT-100 (JK-100)	KT-100 (K-100)	SDB-100	GDQ-S100			2X-4		GDQ-J32/2	DDCY-25Q	GQC-1.5
JKT-150 (JK-150)	KT-150 (K-150)	SDB-150	GDQ-S150			2X-8		GDQ-J50/2	DDCY-40Q	GQC-1.5
JKT-200 (JK-200)	KT-200 (K-200)	SDB-200	GDQ-S200			2X-8 (2X-15)		GDQ-J55/2	DDCY-40Q (DDCY-50Q)	GQC-1.5
JKT-300 (JK-300)	KT-300 (K-300)	SDB-300	GDQ-S300			2X-15 (2X-30)		GDQ-J80/2	DDCY-50Q (DDCY-65Q)	GQC-5
JKT-320 (JK-320)	KT-320 (K-320)	SDB-320	GDQ-S320			2X-15 (2X-30)		GDQ-J80/2	DDCY-50Q (DDCY-65Q)	GQC-5
JKT-400 (JK-400)	KT-400 (K-400)	SDB-400	GDQ-S400	(ZJP-300)		2X-30 (2X-70) (2X-70)		GDQ-J100/2	DDCY-65Q (DDCY-80Q) (DDCY-80Q)	GQC-5
JKT-500 (JK-500)	KT-500 (K-500)	SDB-500	GDQ-S500	(ZJP-600)		2X-70 (2X-70/2) (2X-70)		GDQ-J100/2	DDCY-80Q (DDCY-80Q/2) (DDCY-80Q)	GQC-5
JKT-600 (JK-600)	KT-600 (K-600)	SDB-600	GDQ-S600	(ZJP-1200)	(H-150)	2X-70 (2X-70/2)	2X-8	GDQ-J150/2	DDCY-80Q (DDCY-80Q/2) (DDCY-40Q)	GQC-5
JKT-630 (JK-630)	KT-630 (K-630)	SDB-630	GDQ-S630	(ZJP-600) (ZJP-1200)	(H-150)	2X-70/2 (2X-70)	2X-8	GDQ-J160/2	DDCY-80Q/2 (DDCY-80Q) (DDCY-40Q)	GQC-5
JKT-800 (JK-800)	KT-800 (K-800)	SDB-800	GDQ-S800	ZJP-300 (ZJP-1200)	(H-150)	2X-70	2X-8	GDQ-J200/2	DDCY-80Q (DDCY-40Q)	GQC-5
JKT-1000 (JK-1000)	KT-1000 (K-1000)	SDB-1000	GDQ-S1000	ZJP-600 (ZJP-1200)	(H-150)	2X-70	2X-8	GDQ-J300/2	DDCY-80Q (DDCY-40Q)	GQC-5
JKT-1200 (JK-1200)	KT-1200 (K-1200)	SDB-1200	GDQ-S1200	ZJP-300 (ZJP-600) (ZJP-1200)	(H-150)	2X-70 (2X-70)	2X-8	GDQ-J300/2	DDCY-80Q (DDCY-80Q) (DDCY-40Q)	GQC-5

九、扩散泵真空机组

表 9-44 JK 及 JKT 真空机组外形尺寸



型 号	DN	D_1	$n-d$	H	H_1	B	L
JKT-100 JK-100	100	145	4- $\phi 12$	880 (1030)	515 (665)	500	700
JKT-150 JK-150	150	195	8- $\phi 12$	1080 (1230)	675 (825)	570	970
JKT-200 JK-200	200	250	8- $\phi 12$	1240 (1390)	790 (940)	690	1250
JKT-300 JK-300	300	350	8- $\phi 14$	1556 (1726)	996 (1166)	800	1600
JKT-320 JK-320	320	395	12- $\phi 14$	1680 (1850)	1060 (1230)	900	1650
JKT-400 JK-400	400	465	8- $\phi 18$	1965 (2135)	1255 (1425)	1300	2400
JKT-500 JK-500	500	565	12- $\phi 18$	2425 (2595)	1540 (1710)	1600	2700
JKT-600 JK-600	600	670	12- $\phi 21$	2770 (2950)	1845 (2025)	2000	3600
JKT-630 JK-630	630	720	20- $\phi 14$	2890 (3070)	1890 (2070)	2100	3700
JKT-800 JK-800	800	880	20- $\phi 21$	3490 (3670)	2390 (2570)	2200	4100
JKT-1000 JK-1000	1000	1090	24- $\phi 23$	4110 (4310)	2860 (3060)	2300	4500
JKT-1200 JK-1200	1200	1310	28- $\phi 25$	4970 (5170)	3370 (3570)	2500	5000

注:①括号内尺寸为厚水冷挡板;

②参考尺寸按最大配置

⑨沈阳真空机械三厂生产三个系列扩散泵真空机组:JKS 型高真空手动抽气机组;JKQ 型高真空气动抽气机组;JKQT 型凸腔气动抽气机组。

表 9-45、表 9-46、表 9-47 分别给出了三种机组的主要技术性能参数。图 9-37~图 9-39 分别给出了三种机组的抽速曲线。

表 9-45 JKS 型高真空抽气机组技术性能

型 号			JKS-100	JKS-150	JKS-200	JKS-300	JKS-400
极限压力/Pa			7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}
抽气速率/ $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$			100	260	500	1000	2000
临界前级压力/Pa			40	40	40	53.33	40
主扩散泵			K-100	K-150	K-200	K-300	K-400
加热功率/kW			1	1.5	2	3	4
配用挡板			SDB-100	SDB-150	SDB-200	SDB-300	SDB-400
配用阀门	数量	1	GI-100	GI-150	GF-J200	GF-J300	GF-J400
		2	GI-32	GI-50	GI-65	GI-80	GI-100
		1					
		1	DDCy-20Q	DDCy-25Q	DDCy-40Q	DDCy-50Q	DDCy-65Q
配用泵		前级	2X-2	2X-4	2X-8	2X-15	2X-30
		维持					
进气口径			$\phi 100$	$\phi 150$	$\phi 200$	$\phi 300$	$\phi 400$
装油量			0.15	0.5	0.8	1.6	4

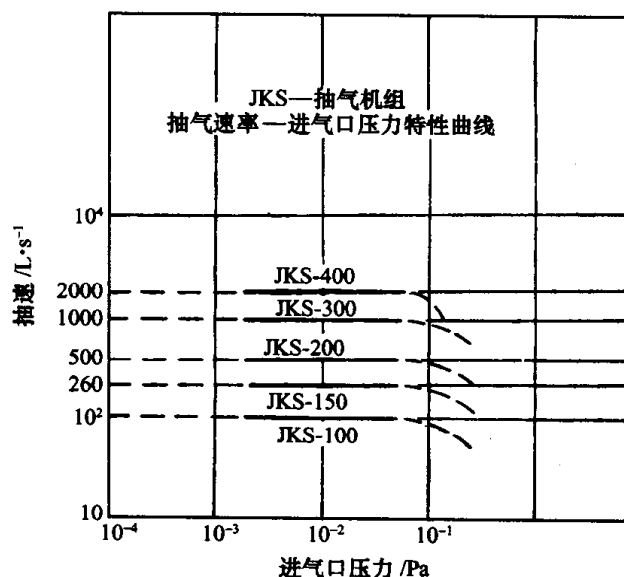


图 9-37 JKS 型高真空抽气机组抽速曲线

表 9-46 JKQ 型高真空抽气机组技术性能

型 号			JKQ-100	JKQ-150	JKQ-200	JKQ-300	JKQ-400	JKQ-600	JKQ-800
极限压力/Pa			7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}
抽气速率/L·s ⁻¹			100	260	500	1000	2000	4500	8500
临界前级压力/Pa			40	40	40	53.33	40	40	40
主扩散泵			K-100	K-150	K-200	K-300	K-400	K-600	K-800
加热功率/kW			1	1.5	2	3	4	7	12
挡板			SDB-100	SDB-150	SDB-200	SDB-300	SDB-400	SDB-600	SDB-800
配用阀门	数量	1	GFQ-100	GFQ-150	GFQ-200	GFQ-300	GFQ-400	GFQ-600	GFQ-800
		2	GI-32	GI-50	GFQ-65	GFQ-80	GFQ-100	GFQ-100	GFQ-150
		1						DDQy-20Q	DDQy-25Q
		1	DDCy-20Q	DDCy-25Q	DDCy-40Q	DDCy-50Q	DDCy-65Q	DDCy-80Q	DDCy-150Q
配用泵		前级	2X-2	2X-4	2X-8	2X-15	2X-30	2X-70	H-150
		维持							2X-4
进气口径/mm			φ100	φ150	φ200	φ300	φ400	φ600	φ800
装油量/L			0.15	0.5	0.8	1.6	4	7	14

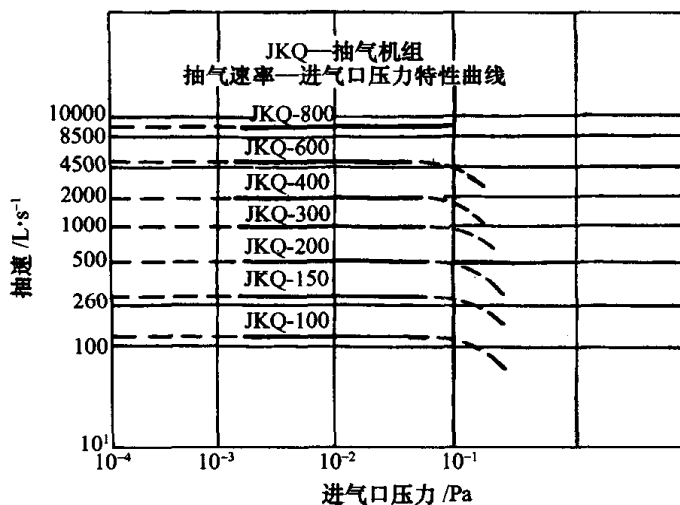


图 9-38 JKQ 型高真空抽气机组抽速曲线

表 9-47 JKQT 型凸腔气动抽气机组技术性能

型 号			JKQT-200	JKQT-300	JKQT-400	JKQT-600	JKQT-800
极限压力/Pa			7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}
抽气速率/L·s ⁻¹			662.5	1325	2650	5952.5	11262.5
最大排气压力/Pa			40	53.33	40	40	40
主扩散泵			KT-200	KT-300	KT-400	KT-600	KT-800
加热功率/kW			1.8	3.5	5	9	18
配用挡板			SDB-200	SDB-300	SDB-400	SDB-600	SDB-800
配用阀门	数量	1	GFQ-200	GFQ-300	GFQ-400	GFQ-600	GFQ-800
		2	GFQ-65	GFQ-80	GFQ-100	GFQ-150	GFQ-200
		1				DDCy-20Q	DDCy-25Q
		1	DDCy-32Q	DDCy-50Q	DDCy-65Q	DDCy-80Q	DDCy-150Q
		1					
配用泵		前级	2X-8	2X-15	2X-30	2X-70	H-150
		维持				2X-2	2X-4
进气口径/mm			φ200	φ300	φ400	φ600	φ800
装油量/L			1.8	2	5	9	16

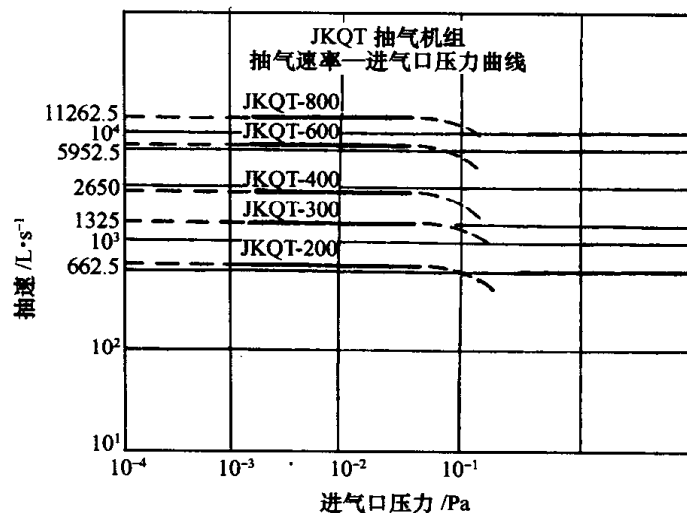


图 9-39 JKQT 型高真空抽气机组抽速曲线

⑩表 9-48~表 9-49 给出了(甘肃腾飞真空泵制造有限公司生产的)油扩散泵、油增扩泵、油扩散喷射泵及卧式油扩散喷射泵真空机组型号及技术参数。

表 9-48 油扩散泵及油增扩泵真空机组型号及技术参数

型 号	JK-600TD	JK-800TD	JK-1000TD	JZK-600T	JZK-800T
极限压力/Pa	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}
抽气速率 $/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	13000	22000	30000	12000	18000
加热功率/kW	9	15	25	9~12	18
前级配置	ZJ-300 2X-70	ZJ-600 2台 2X-70	ZJ-1200 2台 H-150	ZJ-300 2台 2X-70	ZJ-600 2台 2X-70
高真空主阀	GQD-J600	GQD-J800	GQD-J1000	GQD-J600	GQD-J800
进气口直径 /mm	600	800	1000	600	800
外形尺寸/mm	2400×1600×3400	2800×1900×3900	3200×2400×4600	2400×1600×3400	2800×1900×3900
注:JK—油扩散泵真空机组;JZK—油增扩泵真空机组					

表 9-49 油扩散喷射泵及卧式油扩散喷射泵真空机组性能

型 号	JZL-300	JZL-400	JZL-600	JZL-800	JZL-1000	JWZ-500	JWZ-600	JWZ-800
极限压力/Pa	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}	6.7×10^{-2}
抽气速率/ $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	1800	4000	6000	11000	19000	6000	7000	12000
加热功率/kW	6.6	14	20	30	45	21	21	27
前级配置	ZJ-150 2X-70	ZJ-300 2X-70	ZJ-600 2台 2X-70	ZJ-600 2台 H-150	ZJ-1200 2台 H-150	ZJ-600 2台 2X-70	ZJ-600 2台 2X-70	ZJ-600 2台 H-150
高真空主阀	GQD-J300	GQD-J400	GQD-J600	GQD-J800	GQD-J1000	GQD-J500	GQD-J600	GQD-J800
进气口直径/mm	300	400	600	800	1000	500	600	800
外形尺寸/mm	2000×1000 ×2400	2200×1600 ×3000	2400×1900 ×4000	2600×1900 ×5200	3800×2400 ×6500	1800×1800 ×4100	1800×1800 ×4100	2400×2400 ×5200
注:JZL—油扩散喷射泵真空机组;JWZ—卧式油扩散喷射泵真空机组								

第十章 真空装置

一、真空镀膜

(一) 概述

现代薄膜技术的开拓者是德国学者马克斯·奥维将教授,早在 20 世纪 30 年代中期,他已开始研究和生产光学薄膜。经半个世纪后,薄膜应用已遍及国民经济各个领域。

在机械行业,镀层刀具已得到广泛应用,镀层主要是 TiN、TiC 以及二者的复合镀层,还有 Al_2O_3 等,镀层厚度 $2\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 。大量的廉价刀具(如钻头、丝锥),镀 TiN 镀层后可以加大进刀量,提高切削速度,提高生产率。工模具、量刃具、精密轴承及其它易磨损件,在表面沉积耐磨镀层(如 TiC 等),可大大提高使用寿命。

在航空工业中,涡轮发动机工作温度很高,在发动机叶片上溅射一层 Co-Cr-Al-Y 合金后,对其抗高温氧化和抗腐蚀性能有明显的效果。如果镀上一层 ATD-1 型合金(35%~41%Cr,10%~12%Al,25%Y,其余为 Ni),也具有优良的抗氧化和抗热腐蚀性能,它的寿命为通常燃气涡轮部件的氧化铝镀层的 1 倍~3 倍。

航天设备有的要在超高真空、射线辐照、高温下工作,在这种恶劣环境下,一般液体润滑剂已无能为力,而航天发动机的功率及其结构和寿命,与诸如摩擦、磨损、磨蚀、腐蚀、气蚀、高温氧化、渗漏和疲劳有直接关系,因此迫切需要固体润滑膜。用真空蒸镀、离子镀、溅射三种方法获得的固体润滑膜已在航空航天设备的各种仪器、齿轮、螺丝、轴承以及滑动部件中得到广泛应用。作为防腐涂层,离子镀 Al 已成功用于飞机、宇宙飞船的各种异型部件,代替氢脆敏感的电镀 Cr 层和在太空中易挥发的涂层。潮湿试验表明,离子镀铝抗蚀层远比电镀镍和电镀金性能优越。

在电子学方面,真空镀膜技术是集成电路向高集成度、高性能、高可靠和高生产率发展的重要保证。有人估计,大规模集成电路有一半工序必须在真空条件或真空设备中进行,而在研制超大规模集成电路时,所需真空工艺和设备则占了 75% 以上。

在能源科学方面,正在研究的有各种结构的薄膜太阳能电池,如非晶硅、III-V 族(如 CaAs)、II-IV 族化合物(如 $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$)薄膜太阳能电池等。 $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$ 薄膜太阳能电池具有工艺简单、成本低廉的特点,是一种有希望在地面大量应用的太阳能电池。在便宜的基板上真空沉积一层 InP、CaAs 等多晶半导体的薄膜,可用于太阳能电池或地面用太阳能发电系统。在石英玻璃基板上真空沉积一层 SnO_2 、 In_2O_3 、CaO 等金属氧化物的薄膜,可用作太阳能集光器。

在受控热核反应堆的试验装置中,一些高熔点,低原子序数材料的镀层(如 TiB_2 、 B_3C 、TiC 等)用于高温和表面保护。用离子镀在反应堆燃料元件表面镀上防腐蚀的铝膜等。

在超导领域,有快速蒸发、低温凝聚的 InSb 非晶超导膜,高纯度 Nb 超导溅射膜以及 Nb-

Ge 系、Nb-(Cu)系、V-Hf-Zr 系超导膜等。

在声学应用方面,ZnO 薄膜是一种优良的压电薄膜材料,它具有机电耦合系数大,温度性能好,容易在各种非压电基片上形成择优取向等优点。

除了上述应用之外,真空镀膜技术在激光同位素分离、复印技术、红外技术、包装、装饰、手工艺制品、催化以及敏感测量元件等方面都有重要的用途。

(二) 真空蒸发镀膜

1. 真空蒸发镀膜原理

真空蒸发镀膜原理图如图 10-1 所示。

将膜材置于真空室中,通过蒸发源加热使其蒸发,蒸气的原子或分子从蒸发源表面逸出,由于空间气体分子的平均自由程大于真空室的线性尺寸,因此很少与其它分子或原子碰撞,可直接到达被镀的基片表面上,凝结后形成薄膜。

在蒸发过程中的真空条件是:真空室中由膜材蒸发出来的原子(分子)平均自由程应大于蒸发源与基片之间的距离。蒸发材料原子(分子)的平均自由程与真空室内压力关系见第一章九节。

2. 蒸发源

镀膜机常用的蒸发源有电阻式加热蒸发源、电子束式加热蒸发源、空心热阴极等离子束蒸发源、感应式加热蒸发源。

在设计蒸发源时,需注意事项是:① 蒸发源要使膜材有较高的蒸发率,并能存贮足够的膜材;② 蒸发率易控制;③ 长时间工作稳定性要好;④ 蒸发源需有较长的寿命,可靠性要高;⑤ 运转费用低,易于维护。从蒸镀材料方面来讲,蒸发源应能够蒸镀 Al、Ti、Fe、Co、Cr 及其合金,以及 SiO₂、SiO₂、MgF₂、ZnS 等。

1) 电阻式加热蒸发源

电阻加热式蒸发源实际上就是一个电阻加热器,它是利用发热体通电后,产生焦耳热而获得高温,以此来熔融膜材使其达到蒸发的目的。由于这种源结构简单,操作方便,成本低廉,材料易于获得,因此,在镀膜技术中得到了广泛的应用。

(1) 丝状源与舟状源

用难熔金属制成的丝状或舟状电阻源是目前应用最广泛的一处蒸发源。其金属丝、锥形筐和线圈可以是单股线的或多股线的。图 10-2 为丝状源简图,图 10-3 为舟状源简图。

目前用于电阻加热式热源的材料有 W、Ta、Mo、Nb 等高熔点金属,有时也用 Fe、Ni、Ni-Cr 合金等,其中最常用的是钼片和钨丝。

(2) 铝蒸发用坩埚加热器。在真空镀膜技术中,蒸发铝材占有重要的地位。在电子工业,光学零件特别是轻工业中蒸镀铝膜是非常普遍的。

① 石墨坩埚加热器。一般认为,连续式蒸发设备所使用的蒸发源应具备的性能是:蒸发效率应足够高;使用寿命应足够长;坩埚与蒸发材料不发生反应;能长时间稳定地蒸发并能自

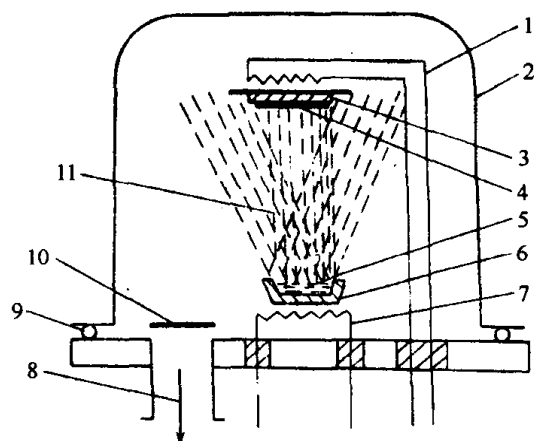


图 10-1 真空蒸发镀膜原理图

1—基片加热电源;2—真空室;3—基片架;4—基片;
5—膜材;6—蒸发舟;7—加热电源;8—抽气口;
9—真空密封;10—挡板;11—蒸气流。

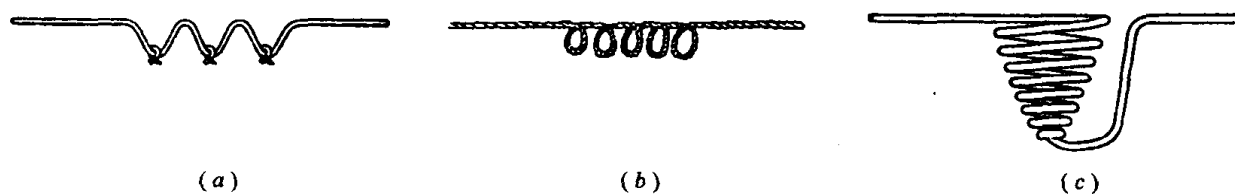


图 10-2 丝状源

(a) 正弦波形; (b) 螺旋形; (c) 筐式形。

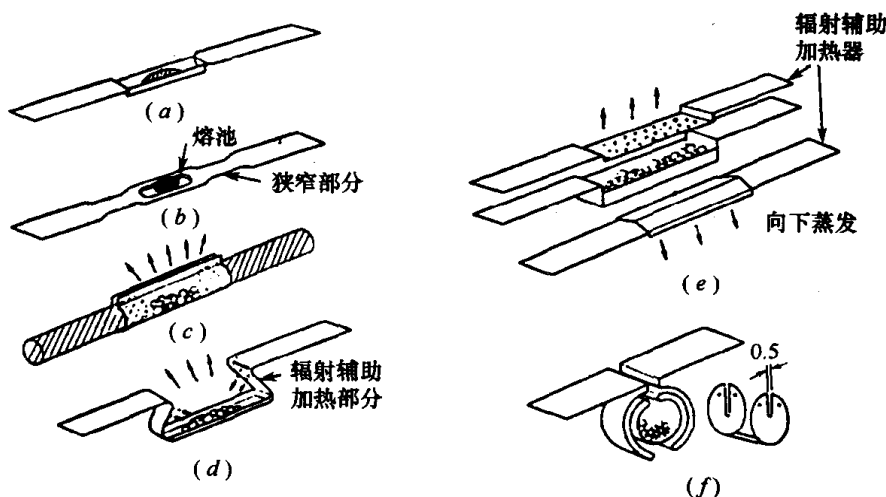


图 10-3 舟状源

(a) 槽状; (b) 平面; (c) 棒状; (d) 辐射辅助加热; (e) 带盖; (f) 筒状。

动补充蒸发材料。根据这些要求,目前所采用的加热方式有电阻加热、高频加热和电子束加热。在大多数镀铝设备中,采用最多的还是直接通电的电阻加热蒸发源。蒸发源所用的坩埚材料一般为难熔金属(如 W、Mo、Ta)和石墨。前者多用于间歇式蒸发设备中,后者多用于连续式蒸发设备中。

② 氮化硼合成导电陶瓷加热器。为了获得比石墨更加理想的蒸发器材料,在真空镀膜设备中,广泛采用了一种新的蒸发器,即氮化硼合成导电陶瓷加热器。这种加热器是由耐腐蚀、耐热性能优良的氧化物、硼化物等材料通过热压、涂敷而成的一种具有导电性的陶瓷材料。

2) 电子束加热蒸发源

随着薄膜技术的广泛应用,不但对膜的种类要求繁多,而且对膜的质量要求也更加严格了。为了适应这种要求,只采用电阻加热式蒸发源已不能满足蒸镀某些金属和非金属材料的需要。电子束作为蒸镀膜材的热源就是在这种情况下发展起来的。

电子束加热原理是基于电子在电场作用下,获得动能打到膜材上,使膜材加热气化,实现蒸发镀膜。

电子束加热源有如下优点。

① 能获得远比电阻热源更大的能量密度,数值可达到 $10^4 \text{ W/cm}^2 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$,因此可以将膜材表面加热到 $3000^\circ\text{C} \sim 6000^\circ\text{C}$ 。为蒸镀难溶金属和非金属材料如 W、Mo、Ge、 SiO_2 、 Al_2O_3 等提供了良好的热源。而且由于被蒸镀的材料是放在水冷坩埚内的,因而可以避免坩埚材料蒸发及其与膜材之间的反应,这对提高膜的纯度是极为重要的。

② 热量可直接加到膜材表面上,热效率高,热传层和热辐射损失少。

电子束加热的缺点是电子枪结构较复杂,而且加速电压较高,高压下所产生的 X 射线对

人有害。此外,由于电子轰击,对多数化合物易产生分解作用,因此不宜蒸镀化合物薄膜。

(1)磁偏转式电子束加热蒸发源

电子束作为熔化膜材的热源,其种类较多,诸如熔滴式、直枪式、环式等。由于这些热源在用于真空蒸镀设备上均存在许多缺点,因此已被磁偏转式电子束热源所代替。

磁偏转式电子束蒸发源所发射的电子轨迹与“e”相似,故有 e 型电子束源之称,简称 e 型枪。图 10-4 给出了国产两种型式的 e 型枪。e 型枪的工作原理如图 10-4 所示。阴极灯丝加热后发射出具有 0.3eV 初始动能的热电子,这些热电子在灯丝阴极与阳极之间受极间电场制约,不但可以按一定的会聚角会聚成束状,而且还会受磁场的作用,沿 $E \times B$ 的方向偏转。到达阳极孔时,电子能量可提高到 10keV,通过阳极孔之后,电子束在偏转磁场的作用下偏转 270°,入射到坩埚内的膜材表面上轰击膜材使之加热蒸发。

电子束轰击膜材,将激发出许多有害的散射电子,如反射电子、背散射电子和二次电子等。图 10-5 中的吸收极 6 吸收这些有害电子,可以保护基片和膜层。

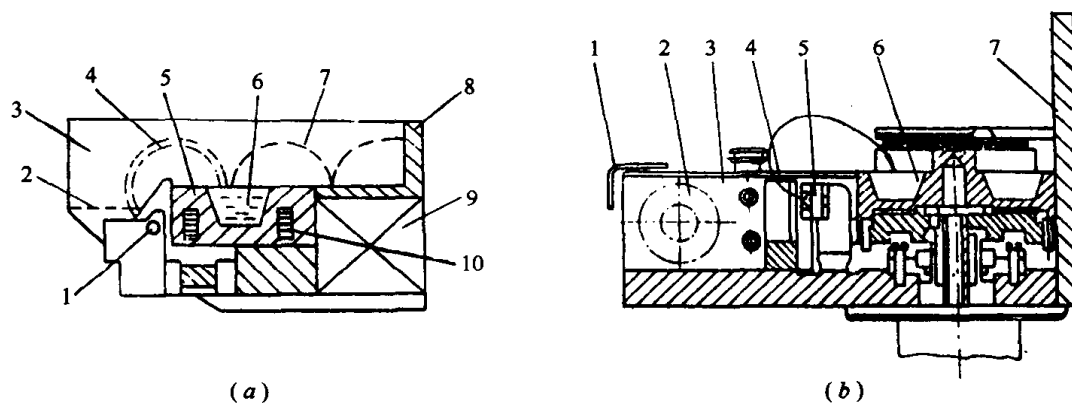


图 10-4 电子束蒸发源结构图

- 1—灯丝;2—加速极;3—水冷靴;4—电子束;5—水冷坩埚;6—膜材;7—二次电子;8—二次电子收集极;
9—励磁线圈;10—冷却水;
1—离子收集极;2—励磁线;3—极靴;4—阳极;5—发射体;6—水冷坩埚;7—散射电子收集极。

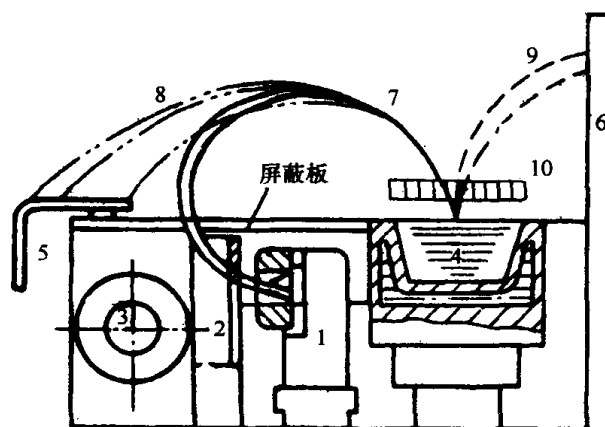


图 10-5 e 型枪的工作原理

- 1—发射体;2—阳极;3—电磁线圈;4—水冷坩埚;5—收集极;6—吸收极;7—电子轨迹;8—正离子轨迹;
9—散射电子轨迹;10—等离子体。

(2)空心热阴极等离子电子束蒸发源

空心热阴极等离子电子束蒸发源简称 HCD 枪。

① HCD 枪的工作原理及特点:

HCD 枪的原理如图 10-6 所示。空心钨管作阴极,膜材作阳极,置于真空室中。用泵将真空室抽到高真空后,在钨管中通入少量的氩气,使真空室内保持 $1\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的真空度。这时在阴阳极之间加上引弧电源,点燃氩气。当电压达到点燃电压 U_B 时,则氩气被电离。这样就在中空阴极内产生低压等离子体,直流放电电压约为 $100\text{V} \sim 150\text{V}$,电流只有几个安培。一旦氩气被电离,等离子体中的正离子就会不断地轰击阴极钨管。当钨管上有一段受热达到工作温度 $2300\text{K} \sim 2400\text{K}$ 时,即可出现热电子发射,使放电转变到稳定状态,电压下降到 $30\text{V} \sim 50\text{V}$,同时使等离子体电子束流增大到一定值。这时由空心阴极内引出的高密度等离子体电子束在电场的作用下射向膜材,膜材被加热到蒸发温度,开始蒸发而沉积到基片上成膜。

这种蒸发源有如下特点:

a. 空心阴极放电可形成密度很高的等离子体;且通过阴极的气体可大部分被电离。

b. 阴极工作温度可达 3200K ,蒸发原子通过等离子区时,被等离子激发电离,其离化率可达 20% 。

c. 阴极不易损坏,寿命较长。

d. 可在气体辉光放电区内工作;稳定工作压力为 $1\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 。如果将工件加数十伏、数百伏负高压,使金属离子向工件轰击制膜,膜的附着强度好,如通入反应气体可制备化合物膜(如 TiN , TiC 等)。

e. 结构简单。

f. 低电压、大电流下工作,所以使用安全、易于自动控制。

② HCD 枪的结构:

HCD 枪的典型结构如图 10-7 所示。它是由带有水冷接头的钨管空心阴极,聚焦磁场线圈,辅助阳极,偏转磁场线圈所组成。

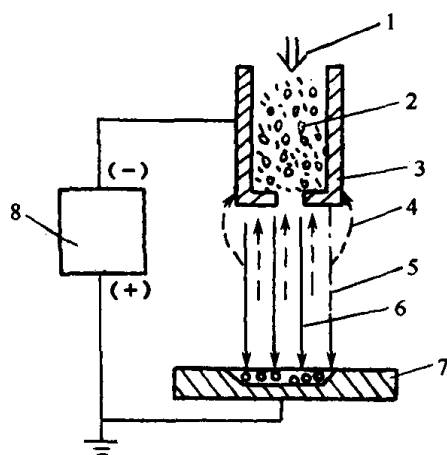


图 10-6 中空热阴极等离子体电子束的发生原理

- 1—惰性气体(氩气);2—等离子体;
3—空心阴极(钨管);4—正离子;
5—来自阴极表面的电子;
6—等离子电子束;7—阴极膜材。

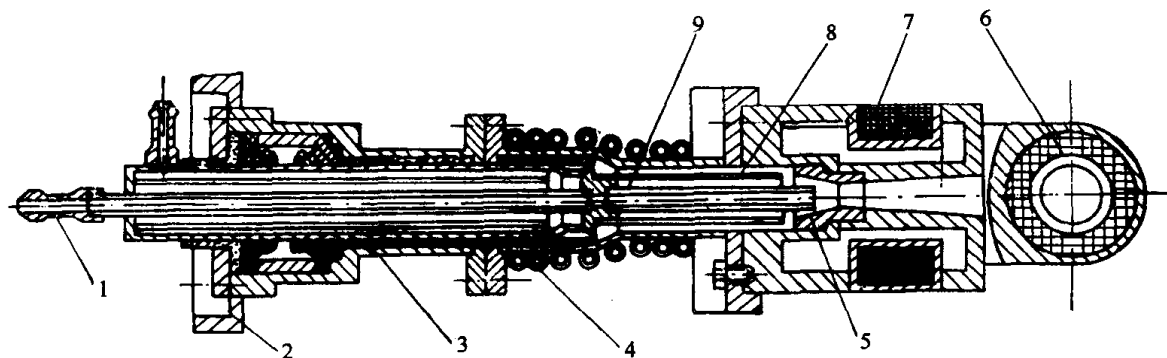


图 10-7 KLD-500 型空心阴极电子枪的结构

- 1—水冷电极;2—密封法兰组;3—绝缘套;4—冷却水管;5—阳极口;6—偏转线圈;
7—聚焦线圈;8—阴极罩;9—空心阴极。

这种枪的水冷坩埚和聚焦线圈的放置与e型枪不同,它不是放到枪体上,而是放置在与枪中心线成一定角度和一定距离的真空室壳体上。为了使枪与真空室壳体之间具有较大的距离,消除金属溅射和金属蒸气对空心阴极的污染,以及防止电接头和冷却器对室壁起弧,目前多采用水平放置。

3) 感应加热式蒸发源

(1) 感应加热式蒸发源的工作原理及特点

将装有膜材的坩埚放在螺旋线圈的中央(不接触),在线圈中通以高频电流,膜材在高频电磁场感应下产生强大的涡流,致使膜材升温,直至蒸发,膜材体积越小,所需频率越高,每块仅有几毫克重的材料应采用几兆赫频率的电源频率,感应线圈常用铜管制成并通以冷却水。为了使膜层均匀,各坩埚线圈功率均可单独调节。

这种蒸发源的特点是:

① 蒸发速率大。在铝淀积厚度为 40nm 时,卷绕速度可达 270m/min,比电阻热源大 10 倍左右。

② 蒸发源温度均匀稳定,不易产生铝滴飞溅现象。可避免铝滴淀积在薄膜上产生针孔现象。所以采用感应加热方法生产金银丝的成品率亦相应提高。

③ 蒸发源一次装料,无需送丝机构,温度控制比较容易,操作比较简单。

④ 对膜材纯度要求低。一般真空感应加热用 99.9% 纯度的铝,而电阻加热要求铝的纯度为 99.99%。所以生产成本亦可降低。

(2) 感应加热式蒸发源的结构

日本真空株式会社(ULVAC)生产的 EW 系列卷绕式高真空镀膜机中用的感应加热式蒸发源结构,如图 10-8 所示。电源为高频发电机组,电压 450V,频率为 9727Hz。该系列坩埚共有四个品种,其标准尺寸见表 10-1。

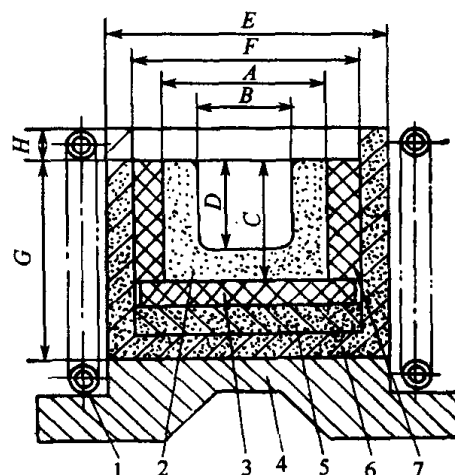


图 10-8 感应加热源的结构

1—感应线圈;2—内坩埚;3—热绝缘层;
4—底座;5—调整垫;6—外坩埚;
7—热绝缘筒。

表 10-1 坩埚标准尺寸

(单位:mm)

型 号	石 墨 坩 埚				氧化铝坩埚(富铝红柱石)			
	A	B	C	D	E	F	G	H
80	100	80	90	80	136	120	105	15
90	110	90	95	85	146	130	110	15
100	120	100	100	90	156	140	115	15
110	135	110	120	107.5	171	155	135	15

φ100mm 内径坩埚的装料是 1000g,坩埚使用寿命平均达 18 次~20 次。为了延长坩埚使用寿命,在第一次装铝料时,应加入 4% 的钛,以后可适当减少,其目的是在坩埚的内表面形成一层 TiC,以防止铝直接与坩埚发生反应。

除上述各种蒸镀方法外,其它蒸镀方法及其实用性见表 10-2。

3. 蒸发镀膜相关数据

① 电阻加热、高频加热、电子束加热方式各有特点,其性能比较见表 10-3。

表 10-2 蒸镀方法

加 热 法	蒸 发 源	蒸发物质	膜面积 ^①	最高使用 温度/K	沉积速 率/ $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$	速度控制	附着性	膜纯度	超高真 空蒸镀 ^②	外延生长 ^②	工业生 产方式	备 注
1. 电阻加热	蒸发盘、灯丝、蒸发管、 直接通电	几乎所有物质	中	2 000	几个	容易	良	中~优	(可)	可	可	镀膜有时和热丝合金化 而发生断丝现象
2. 外加热坩埚	陶瓷坩埚 + 加热器	同上	中	2 000	数十	容易	良	低~中	不可	可	可	生成还原沉积物
3. 辐射加热 (弧 光加热)	试样表面、热屏蔽坩埚 (Ta、W)	同上	小	2 000 (~3 000)	数十	难	良	中~高	(可)	可	不可	(也可利用太阳炉)
4. 高频加热	陶瓷坩埚	金属	中	2 000	数十	难	良	中	不可	可	可	不可混入杂质
5. 电子束加热	水冷铜坩埚 + 电子枪	几乎所有物质	中	3 500	数百	可能	优	高~优	可	可	可	高电压(千伏~几十千 伏)
6. 电子轰击	水冷铜坩埚 + 试样棒	金属	中	2 500	几个	可能	优	高	(可)	可	可	与电子束加热法相比不 直接受热部分较多,放气 较多,电压至几千伏
7. 闪蒸法	高温蒸发盘	几乎所有物质	小~中	约 2 500	1 00	不可能	优	中~高	不可	(可)	可	适合化合物、合金,喷出 释放气体
8. 通电爆线	试样自身为线型	金属	小~中	约 3 000	10^5	不可能	良	优	不可	不可	不可	瞬时产生等离子体
9. 电弧加热	绝缘容器	金属	中	约 3 000	10	不可能	良	高	不可	不可	不可	真空度劣化,不稳定
10. 离子束加热	电弧放电室	金属	小	2 500	$10^{-2}\sim 10^{-1}$	可能	优	高~优	可	可	不可	超高真空范围
11. 激光加热	试样表面	几乎所有金属	小	3 500	10^5	难	良	优	可	(可)	不可	加热极薄表面层(10nm)

注: ①中:几百平方毫米,小:几十平方毫米,用几个蒸发源可得到大面积膜;

②加括弧者为有可能性

一、真空镀膜

表 10-3 实用蒸发源特性比较

蒸发源形式 项 目	电阻加热方式	高频加热方式	电子束加热方式
适合蒸发的物质	Al, Ag, Ni, Cr, Cu	Al, Cu, Ag	In ₂ O ₃ , SnO ₂ , SiO ₂ , Si, Al ₂ O ₃ , Ta, W, Ni, Fe, Fi
蒸发速率稳定性	稳定	稳定	稍不稳定
预热时间/min	5	10	10
蒸发源产生的气体	少	少	无
粒子动能/eV	0.1~1	0.5~1	0.5~2
操作性能	稍容易	稍容易	稍难
蒸发源结构	简单	稍复杂	复杂
运行费用	1	0.5~0.6	0.4
设备费用	1	1.9	2.0
电子消耗	1	0.75	0.5
冷却水消耗	1	1.25	0.8

②电阻式加热方式常用蒸发源材料有钨、钽、钼等。其性能见表 10-4。

表 10-4 蒸发源所用金属材料的性质

	温度/℃	27	1 027	1 527	1 727	2 027	2 327	2 527
W 熔点 3 380℃, 密度 19.3 g/cm ³	电阻率/ μΩ·cm	5.66	33.66	50	56.7	66.9	77.4	84.7
	蒸气压/Pa	—	—	—	1.3×10 ⁻⁹	6.3×10 ⁻⁷	7.6×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻³
	蒸发速率/ g·cm ² ·s ⁻¹	—	—	—	1.75×10 ⁻¹³	7.82×10 ⁻¹¹	8.79×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁷
	光谱辐射率 (0.665μm)	0.470	0.450	0.439	0.435	0.429	0.423	0.419
Ta 熔点 2 980℃, 密度 16.6 g/cm ³	电阻率/ μΩ·cm	15.5(20°)	54.8	72.5	78.9	88.3 ^①	97.4	102.9
	蒸气压/Pa	—	—	—	1.3×10 ⁻⁸	8×10 ⁻⁸	5×10 ⁻⁴	7×10 ⁻³
	蒸发速率/ g·cm ² ·s ⁻¹	—	—	—	1.63×10 ⁻¹²	9.78×10 ⁻¹¹ (1927°)	5.54×10 ⁻⁸	6.61×10 ⁻⁷
	光谱辐射率	0.493 (20°)	0.462	0.432	0.421	0.409	0.400	0.394
Mo 熔点 2 630℃, 密度 10.2 g/cm ³	电阻率/ μΩ·cm	5.6 (25°)	35.2 (1 127°)	47.0	53.1	59.2(1 927°)	72	78
	蒸气压/Pa	—	2.1×10 ⁻¹³	1.1×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻³	1.9×10 ⁻¹	1.3
	蒸发速率/ g·cm ² ·s ⁻¹	—	2.5×10 ⁻¹⁷	1.1×10 ⁻¹⁰	5.3×10 ⁻⁹	5.0×10 ⁻⁷	1.6×10 ⁻⁵	1.04×10 ⁻⁴
	光谱辐射率	0.419 (30°)	—	0.367 (1 330°)	0.353 (1 730°)	—	—	—

注:① 由内插法求得

③ 各种蒸发器材料所适用的蒸发金属(膜材),其匹配性见表 10-5。

表 10-5 各种金属与蒸发器材料的匹配

蒸发器材料 蒸发金属	W	Ta	Mo	蒸发温度/℃
Al	1	1	1	1 200~1 250
Sb	2,4	2	2	700~750
As	4			550~600
Ba	1	1	1	650~700
Bi	2	2	2	700~750
Cd	3,4			~300
Cr	3,4			1 400~1 450
Co	4			1 500~1 600
Cu	2	2	2	1 300~1 350
Au	2	2	2	1 450~1 500
Fe	4			1 500~1 600
Pb	2	2	2	~750
Mg	2	2	2	~450
Mn	2,3	2,3	2,3	~1 000
Ni	4			1 550~1 600
Se	4	4	1,2	250~300
Si	4[BeO]			1 350~1 400
Ag	2	1,2	1,2	1 050~1 100
Sn	2,3	2,3	2,3	1 200~1 250
Ti	1	1	1	1 600~1 650
Zn	2	2	2	350~400

注:表中各数字意义如下,1—丝、螺旋线圈;2—加热皿;3—加热筐;4—陶瓷坩埚和 W 线圈

④ 蒸发镀各种坩埚材料性能见表 10-6。

⑤ 表 10-7 给出了适于蒸发各种元素的蒸发源材料。

表 10-6 坩埚材料

项 目	半融氧化镁 MgO	半融氧化铝 Al ₂ O ₃	半融氧化铍 BeO	氮化硼 BN	石 墨 C
密度/g·cm ⁻³	3.6	4.0	3.0	2.2	约 1.8(商品)
气孔率/%	3~7	3~7	3~7	—	8~15
熔点/℃	2 800	2 030	2 550	3 000(分解)	>3 500(升华)
最高使用温度/℃	1 250	1 400	1 800	1 600 ^①	2 500
导热系数 J·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·℃ ⁻¹	0.06 (1 200℃~1 400℃)	0.05 (1 400℃)	0.15 (1 800℃)	(⊥)0.27 (//)0.13(1 000℃)	1.17~1.38
线膨胀系数 /K ⁻¹	14.0×10 ⁻⁶	9.3×10 ⁻⁶ (25℃~1 500℃)	9.5×10 ⁻⁶ (约 1 400℃)	(⊥)7.5×10 ⁻⁶ (//)0.77×10 ⁻⁶ (25℃~1 000℃)	(2.0~2.5)×10 ⁻⁵
电阻率/Ω·cm	10 ⁸ (1 000℃)	2×10 ⁶ (1 000℃)	10(1 000℃)	3×10 ⁴ (1 000℃)	1×10 ⁻³

注:① 表示 1Pa 解离压力下的温度,烧结 BN 含有 B₂O₃ 粘结剂,因其蒸气压力高,温度也更高些

一、真空镀膜

表 10-7 适合于各种元素的蒸发源材料

元 素		蒸 发 温 度/℃		蒸发源材料(按适合程度排列)		备 注
符号	名称	熔点	($p = 1\text{Pa}$)	金属丝,薄片	坩埚	
Ag	银	961	1 030	Ta, Mo, W	Mo, C	与 W 不发生浸润 可与所有的 RM 制成合金,难以蒸发。W: 使用粗线可以急速蒸发少量铝,更粗线可以使用多次。对所有坩埚材料均浸润,容易流出坩埚外面。C: 能很快形成黄色 Al_4C_3 晶体。高温下能与 Ti、Zr、Ta 等反应。制作这些物质的碳化层,则寿命增长。BN: 应使用 CVD 法制作成型体(PBN),寿命长。TiB ₂ -BN: HDA 组合陶瓷(联合碳化物公司制品),可机械加工,寿命长。SiO ₂ : 不能使用
Al	铝	659	1 220	W	BN, TiC/C, TiB ₂ -BN	
As	砷	820	280		Al ₂ O ₃ , SiO ₂	
Au	金	1 063	1 400	W, Mo	Mo, C	
B	硼	2 300<	2 300		C	石墨蒸气能大量混入 不能形成合金,浸润 RM, 在高温下与大多数氧化物起反应
Ba	钡	710	610	W, Mo, Ta, Ni, Fe	C	
Be	铍	1 283	1 230	W, Mo, Ta	C, ThO ₂	
Bi	铋	271	670	W, Mo, Ta, Ni	Al ₂ O ₃ 等陶瓷, C, 金属	
C	碳		约 2 600			石墨本身在高温下升华(电弧、电子束、激光等加热) 在 He 气氛中预熔解去气
Ca	钙	850	600	W	Al ₂ O ₃	
Cd	镉	321	265	铬镍合金 Nb, Ta, Fe	Al ₂ O ₃ , SiO ₂	
Ce	铈	795	1 700			
Co	钴	1 495	1 520	W	Al ₂ O ₃ , BeO	不浸润铬镍合金, He 中预熔解去气, SiO ₂ : 不发生反应,但不适合作蒸发源 用液氮冷却的铜坩埚进行 EBV 与 W、Ta、Mo、Pt 等形成合金。质量在钨线的 30% 以下。镀钴的钨线 镀铬的钨线, Cr 棒在高温下升华,在 H ₂ 或 He 气氛中熔着在钨线上
Cr	铬	约 1 900	1 400	W	C	
Cs	铯	28	153		陶瓷, C	
Cu	铜	1 084	1 260	Mo, Ta, Nb, W	Mo, C, Al ₂ O ₃	
Fe	铁	1 536	1 480	W	BeO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	与所有 RM 形成合金,蒸发物质小于 W 线 30% 以下,能低速升华,适合 EBV 左边氧化物可耐温 1000℃ 对钨的溶解度小,浸润 RM, 不浸润 C
Ga	镓	30	1 130		BeO, Al ₂ O ₃ SiO ₂	
Ge	锗	940	1 400	W, Mo, Ta	C, Al ₂ O ₃	
In	铟	156	950	W, Mo	Mo, C	
K	钾	64	208		玻璃	

(续)

元 素		蒸 发 温 度/℃		蒸发源材料(按适合程度排列)		备 注
符号	名称	熔点	($p=1\text{Pa}$)	金属丝,薄片	坩 埚	
La	镧	920	1 730	W, Ta, Mo, Ni, Fe	软钢 Fe, C, Al ₂ O ₃	用液氮冷却的铜坩埚进行 EBV
Li	锂	179	540			
Mg	镁	650	440			在 He 中预溶解去气, SiO ₂ : 不能使用
Mn	锰	1 244	940	W, Mo, Ta	Al ₂ O ₃ , C	浸润 RM
Na	钠	97.7	290	W	玻璃	
Nd	钕	1 024	1 300		Al ₂ O ₃ , BeO	参见 La
Ni	镍	1 450	1 530		Fe, Al ₂ O ₃	与 W、Mo、Ta 等形成合金。宜采用 EBV
Pb	铅	327	715	Fe, Ni, 铬镍合金, Mo	Fe, Al ₂ O ₃	不浸润 RM
Pd	钯	1 550	1 460	W(镀 Al ₂ O ₃)	Al ₂ O ₃	与 RM 形成合金。可低速升华
Pt	铂	1773	2 090	W	ThO ₂ , ZrO ₂	与 Ta、Mo、Nb 形成合金。与 W 形成部分合金。适合采用 EBN
Rb		39	173	W	陶瓷, 玻璃	
Rh	铑	1 966	2 040		ThO ₂ , ZrO ₂	镀 Rh 的钨线。适合采用 EBV
Sb	锑	630	530		Al ₂ O ₃ , BN, 金属	$a_v < 1, T >$ 熔点。有毒。浸润铬镍合金
Se	硒	217	240	Mo, Fe 铬镍合金, 304 不锈钢	金属, Al ₂ O ₃	浸润左边材料。污染真空。有毒
Si	硅	1 410	1 350	铬镍合金, Mo, Ta	BeO, ZrO ₂ , ThO ₂ , C	浸润氧化物坩埚, SiO 蒸发污染膜层。C: 形成 SiC, 适合 EBV
Sn	锡	232	1 250		Al ₂ O ₃ , C	浸润 Mo, 且浸蚀
Sr	锶	770	540		Mo, Ta, C	浸润所有 RM, 但不能形成合金
Te	碲	450	375	W, Ta, Mo	Mo, Ta, C, Al ₂ O ₃	浸润所有 RM, 但不能形成合金。污染真空。有毒
Th	钍	1 900	2 400	W	C, ThO ₂	浸润 W。适用于 EBV
Ti	钛	1 727	1 740	W, Ta		与 W 反应。不与 Ta 反应, 在熔化中有时 Ta 线会断裂
Tl	铊	304	610	Ni, Fe, Nb, Ta, W		浸润左边所有金属, 但不能形成合金。稍浸润 W、Ta, 不浸润 Mo
U	铀	1 132	1 930	W	Mo	浸润 Mo, 但不能形成合金。在 W 中的溶解度很小。与 Ta 形成合金
V	钒	1 890	1 850	W, Mo		

(续)

元 素		蒸 发 温 度/℃		蒸发源材料(按适合程度排列)		备 注
符号	名称	熔点	($p=1\text{Pa}$)	金属丝,薄片	坩 埚	
Y	钇	1 477	1 632	W		浸润 RM,但不形成合金。 SiO_2 :不发生反应,但不适合作蒸发源 浸润 W,溶解度很小
Zn	锌	420	345	W, Ta, Mo	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}, \text{C}, \text{Mo}$	
Zr	锆	1 852	2 400	W		

注:RM—高熔点金属;EBV—电子束蒸发

4. 小平面源、点源在平行平面上蒸发膜厚计算

图 10-9 给出的是从一个小平面 s 到与 s 平面相平行的基片上的蒸发情况。

设小平面 s 源和垂线与 SR 直线的夹角和基片的垂线 SO 的夹角均等于 θ , R 处的膜厚 t 的计算公式为

$$t_R = \frac{mh^2}{\pi\rho(h^2 + \delta^2)^2} \quad (10-1)$$

式中 t_R —— R 处的薄膜厚度;

m ——膜材质量[g];

ρ ——蒸镀膜材密度[g/cm³].

由于蒸发源下面 O 点处 $\delta = 0$, 故 O 点处的膜厚计算式可写成

$$t_O = \frac{m}{\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (10-2)$$

故膜厚从 O 点到 R 点的变化率为

$$\frac{t_R}{t_O} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\delta}{h}\right)^2\right]^2} \quad (10-3)$$

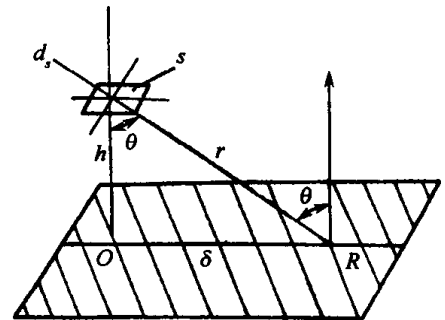


图 10-9 小平面对一平行平面上的蒸发

如果把图 10-9 中的 s 看成是一个点 d_s 。设 d_s 上的垂线与 SR 线的夹角为 θ , 点源对平面 R 处的膜厚公式为

$$t'_R = \frac{mh}{4\pi\rho(h^2 + \delta^2)^{3/2}} \quad (10-4)$$

同理, 由于蒸发源下面 O 点处 $\delta = 0$, 故 O 点处的膜厚为

$$t'_O = \frac{m}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (10-5)$$

因此, 在 O 点与 R 两点之间的膜厚变化可用下式表达

$$\frac{t'_R}{t'_O} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\delta}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (10-6)$$

(三) 蒸发卷绕式镀膜机

卷绕式镀膜机 30 年来有了较大的发展, 镀膜产品广泛用于装饰、包装、电容器等领域中, 可镀光学、电学、电磁、导电等多种薄膜。所用基材有 PE、PET、PI、PP、OPP、BOPP、纸、泡沫塑

料及布等。一般塑料基薄膜材料含水量为1%~2%,纸含水量更大,一般为5%~7%,经涂布烘干后,含水量仍有3%。由于基材含水量高,故镀膜室由初始的单室发展到目前双室或多室结构。蒸发源可以是电阻式、感应式、电子束式以及磁控溅射式。双室结构应用普遍,其优点是:①可以蒸镀放气量较大的纸基材,并能保障镀膜质量。纸放出的大量气体从卷绕室中被排走。由于卷绕室与蒸镀室之间隔板窄缝很小,使放出来的气体不易进入蒸镀室中;②单室结构必须配置较大的排气系统才能保障蒸镀时的工作压力,而双室结构中的蒸镀室气体量较小,可配小型抽气机组,使设备成本降低,并节约能源;③卷绕室与蒸镀室分别抽气,可缩短抽气时间。

卷绕式真空镀膜机在结构上除了有一般镀膜机所有的结构外,必须有一个为了实现连续镀膜而设置的卷绕机构。由于被镀基体是纸或塑料,放气量较大,因此,在真空室的结构上又有单室和多室之分,卷绕式双室真空镀膜机的结构如图10-10所示。

卷绕机构设计中应考虑的几个问题:

①提高卷绕速度的问题。卷绕速度即是带状基材运动的线速度,它是卷绕机构的一个主要技术指标。国内早期镀膜机卷绕速度只有10m/min,现在也只有80m/min~120m/min,在国外日本的EW系列产品中,其卷绕速度已达到300m/min,德国L.H公司生产的镀膜机已达到600m/min,可见随着镀膜技术的发展,卷绕速度有待提高。

②带状基材的线速恒定问题。这一问题也很重要,因为只有卷绕机构保证带状基材的线速恒定,才能使基材上镀层厚度均匀。这一点对制备带状基材的功能性膜(如电容器膜)尤为重要。

③带状基材的跑偏和起褶问题。随着卷绕速度的提高,带状基材在卷绕镀膜过程中,起褶和发生偏斜,严重时会造成基材的断裂,使生产中断,既影响生产效率,又浪费材料。因此,在卷绕机构的设计中应充分考虑这一问题。

卷绕镀膜机真空抽气系统分上室下室两组,下室为蒸镀室,要求真空度高,主泵多为油扩散泵。上室为基材卷绕室,要求真空度较低,为罗茨泵机组或扩散泵—罗茨泵—机械泵组。一般蒸镀室要达到的真空度为 $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \sim 2 \times 10^{-3} \text{Pa}$,而工作压力为 $1 \times 10^{-2} \text{Pa} \sim 2 \times 10^{-2} \text{Pa}$,而卷绕室真空度通常较蒸镀室低一个数量级。有时卷绕镀膜机以增扩泵(油扩散泵的一种)为主泵,它的极限压力虽然不及油扩散泵,但其抽速范围向高压方向延伸一个数量级,非常适宜此类蒸发的镀膜过程。

目前国内卷绕式镀膜机蒸发源多采用坩埚蒸发,其材质有氮化硼、石墨、钨等。氮化硼由于电学及热学性能好,使用寿命长,因而较为普遍地应用于卷绕镀膜机中。每个坩埚的加热功率为6kW~8kW,加热电压为10V~12V。坩埚数量由基材幅宽来确定。幅宽愈宽坩埚数量愈多。幅宽500mm时4只坩埚,800mm时7只坩埚,1300mm时12只坩埚。坩埚分布是不均匀的,中间部分间距大些,在基材边缘处间距小,有的最外侧坩埚与基材幅宽边缘重合。

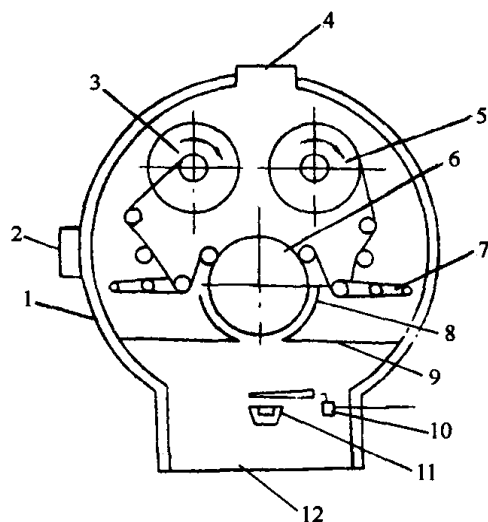


图10-10 双室卷绕式半连续真空镀膜机镀膜室结构

- 1—真空室;2—观察孔;3—卷绕辊;
4—上室排气口;5—放卷辊;6—水冷辊筒;
7—张紧轮;8—隔板缝;9—隔板;
10—挡板机构;11—蒸发源;12—下室排气口。

(四) 真空溅射镀膜

由溅射现象发展到溅射镀膜经历了相当长的发展过程,早在 1853 年法拉第做气体放电试验时,就发现了放电管壁沉积金属现象,当时只把它作为一种有害现象,研究如何避免。直到 1902 年 Goldsrein 才证明了沉积金属是正离子轰击阴极溅射出来的产物。大约到 20 世纪 60 年代,贝尔实验室利用溅射方法制取了钽膜,从而溅射膜开始应用于工业生产中,1965 年 IBM 公司用射频溅射方法实现了在绝缘体基片上镀膜,同时出现了同轴圆柱磁控溅射装置和三级溅射装置。特别要提出的是 1974 年 J. chapin 研制成功了平面磁控溅射装置,实现了高速低温溅射镀膜,使溅射镀蔚然一新,与其它类镀膜相比具有明显的优越性,它可在任何基材上沉积任何镀材的薄膜。

1. 离子溅射基本原理

在真空氛围中,荷能粒子或粒子束入射到固体表面(靶)上,使靶表层原子获得部分能量,当其动能超过周围原子形成的势垒(对于金属是 $5\text{eV} \sim 10\text{eV}$)时,这种原子由晶格阵点中被碰出来,进入真空中,这种现象谓之溅射。由于离子易于被电磁场加速或偏转,故真空溅射镀均选择离子束轰击靶材,使其原子被溅射出来沉积到基片上形成薄膜。每个离子溅射产额不仅与入射离子能量、入射角、离子质量有关,同时还与靶材种类、原子序数、靶面原子结合状态以及结晶取向有关。一般产额为 $0.1 \sim 10$ (原子/离子),大部原子能量小于 20eV ,并且为中性居多。

原子溅射产额与入射离子能量有关,只有离子能量超过溅射阈值能量时才能发生溅射。当离子能量超过阈值后,随着离子能量增加,在 150eV 以前,溅射产额与离子能量平方成正比;在 $150\text{eV} \sim 1\text{keV}$ 范围与离子能量成正比,在 $1\text{keV} \sim 10\text{keV}$ 范围内基本不变。当用惰性气体氩离子及氦离子轰击靶材时,由于能量不同,溅射产额亦不同。

表 10-8 给出了 500eV 的离子溅射产额。

各种溅射方法镀膜原理及特点由表 10-9 给出。

表 10-8 能量为 500eV 的离子的溅射产额 (单位:原子/离子)

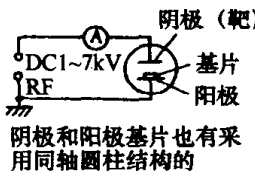
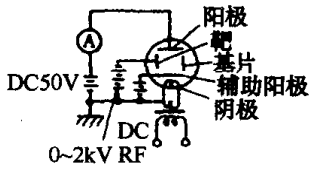
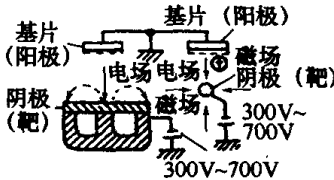
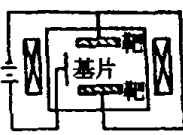
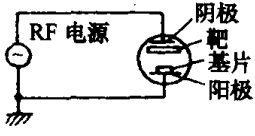
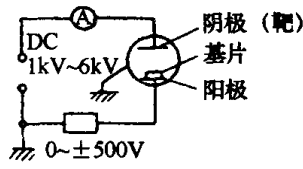
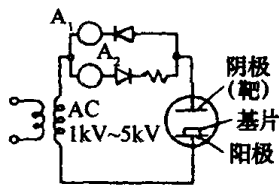
靶	相对原子量	Ar^+	He^+	Ne^+	Kr^+	Xe^+	Hg^+
Be	9.02	0.51	0.24	0.42	0.48	0.35	—
C	12.010	0.12	0.07	—	0.13	0.17	0.16
Al	26.97	1.05	0.16	0.73	0.96	0.82	0.57
Si	23.06	0.50	0.13	0.48	0.50	0.42	0.18
Ti	47.9	0.51	0.07	0.43	0.48	0.43	0.38
V	50.95	0.65	0.06	0.48	0.62	0.63	0.39
Cr	52.01	1.18	0.17	0.99	1.39	1.55	—
Mn	54.93	—	—	—	1.39	1.43	—
Fe	55.84	1.10, 0.84	0.15	0.88, 0.63	1.07, 0.77	1.00, 0.88	0.66
Co	58.94	1.22	0.13	0.90	1.08	1.08	0.78
Ni	56.69	1.45, 1.33	0.16	1.10, 0.99	1.30, 1.06	1.22, 1.22	0.89
Cu	63.57	2.35, 1.2, 2.0	0.24	1.80, 2.1, 1.35	2.35, 2.50, 1.91	2.05, 1.91, 3.9, 1.55	1.70
Zn	65.38	—	—	—	—	—	—

(续)

靶	相对原子量	Ar ⁺	He ⁺	Ne ⁺	Kr ⁺	Xe ⁺	Hg ⁺
Ga	69.72	—	—	—	—	—	1.47
Ge	72.6	1.1	0.08	0.68	1.12	1.04	0.76
Y	88.9	0.68	0.05	0.46	0.66	0.48	—
Zr	91.22	0.65	0.02	0.38	0.51	0.50	0.48
Nb	92.91	0.60	0.03	0.33	0.55	0.53	0.42
Mo	95.95	0.80,0.64	0.03	0.48,0.24	0.87,0.59	0.87,0.72	0.63
Rb	85.48	1.15	—	0.57	1.27	1.20	0.83
Rh	102.9	1.30	0.06	0.70	1.43	1.38	1.25
Pd	106.7	2.08	0.13	1.15	2.22	2.23	1.53
Ag	107.88	3.12,2.4,2.3,3.06	0.20,1.0	1.77,1.70,1.80	3.27,3.1	3.32	2.54
Sm	150.43	0.80	0.05	0.69	1.09	1.28	—
Gd	156.9	0.83	0.03	0.48	1.12	1.20	—
Dy	162.46	0.88	0.03	0.55	1.15	1.29	—
Er	167.2	0.77	0.03	0.52	0.07	0.07	—
Hf	178.6	0.70	0.01	0.32	0.80	—	0.68
Ta	180.88	0.57	0.01	0.28	0.87	0.88	0.58
W	183.92	0.57	0.01	0.28	0.91	1.01	0.80
Re	186.31	0.87	0.01	0.37	1.25	—	0.89
Os	190.2	0.87	0.01	0.37	1.27	1.33	0.95
Ir	193.1	1.01	0.01	0.43	1.35	1.56	1.51
Pt	195.23	1.40	0.03	0.63	0.82	1.93	2.04
Au	197.2	2.40,2.5	0.07,0.10	1.08,1.3	3.06	3.01,7.7	2.42
Pb	207.21	2.7	—,1,1	—	—	—	—
Th	232.12	0.62	0.00	0.28	0.96	1.05	0.82
U	238.07	0.85	0.00	0.45	1.3	0.81	1.28
PbTe (111)		1.4					
GaAs (110)		0.9					
GaP (111)		0.95					
CdS (1010)		1.12					
SiC (0001)		0.41					
InSb 晶体取向未知		0.55					

一、真空镀膜

表 10-9 各种溅射镀膜方法的原理、参数及示意图

序号	溅射方式	溅射电源	氩气压力 /Pa	特 征	原 理 图
1	二极溅射	DC 1kV~7kV 0.15mA/cm ² ~ 1.5mA/cm ² RF 0.3kW~10kW 1W/cm ² ~10W/cm ²	约 1.3	构造简单,在大面积的基板上可以制取均匀的薄膜,放电电流随压力和电压的变化而变化	
2	三极或四极溅射	DC 0~2kV RF 0~1kW	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	可实现低气压,低电压溅射,放电电流和轰击靶的离子能量可独立调节控制,可自动控制靶的电流。也可进行射频溅射	
3	磁控溅射 (高速低温溅射)	0.2kV~1kV(高速低温) 3W/cm ² ~30W/cm ²	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	在与靶表面平行的方向上施加磁场,利用电场和磁场相互垂直的磁控管原理,减少了电子对基板的轰击(降低基板温度),使高速溅射成为可能	
4	对向靶溅射	DC RF	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	两个靶对向放置,在垂直于靶的表面方向加上磁场,可以对磁性材料进行高速低温溅射	
5	射频溅射 (RF溅射)	FR 0.3kW~10kW 0~2kV	1.3	开始是为了制取绝缘体,如石英、玻璃、Al ₂ O ₃ 的薄膜而研制的,也可溅射镀制金属膜	
6	偏压溅射	在基板上施加 0~500V 范围内的相对于阳极的正的或负的电位	1.3	在镀膜过程中同时清除基板上轻质量的带电粒子,从而能降低基板中杂质气体(例如, H ₂ O、N ₂ 等残留气体等)的含量	
7	非对称交流溅射	AC 1kV~5kV 0.1mA/cm ² ~2mA/cm ²	1.3	在振幅大的半周期内对靶进行溅射,在振幅小的半周期内对基板进行离子轰击,去除吸附的气体,从而获得高纯度的镀膜	

(续)

序号	溅射方式	溅射电源	氩气压力 /Pa	特征	原理图
8	离子束溅射	DC	10^{-3}	在高真空中,利用离子束溅射镀膜,是非等离子体状态下的成膜过程,靶接地电位也可	
9	吸气溅射	DC 1kV~7kV 0.15mA/cm ² ~1.5mA/cm ² RF 0.3kW~10kW 1W/cm ² ~10W/cm ²	1.3	利用活性溅射粒子的吸气作用,除去杂质气体,能获得纯度高的薄膜	
10	反应溅射		在 Ar 中混入适量的活性气体,例如 N ₂ 、O ₂ 等分别制取 TiN、Al ₂ O ₃	制做阴极物质的化合物薄膜,例如,如果阴极(靶)是钛,可以制作 TiN、TiC	从原理上讲,上述各种方案都可以进行反应溅射,当然 1、9 两种方案一般不用于反应溅射

注:RF—射频溅射源;DC—直流溅射源;AC—交流溅射源

2. 磁控溅射镀膜

(1) 磁控溅射镀膜工作原理

磁控溅射靶采用静止电磁场,磁场为曲线形,均匀电场和对数电场则分别用于平面靶和同轴圆柱靶,而 s-枪靶介于二者之间。它们的工作原理是相同的,以图 10-11 说明如下:

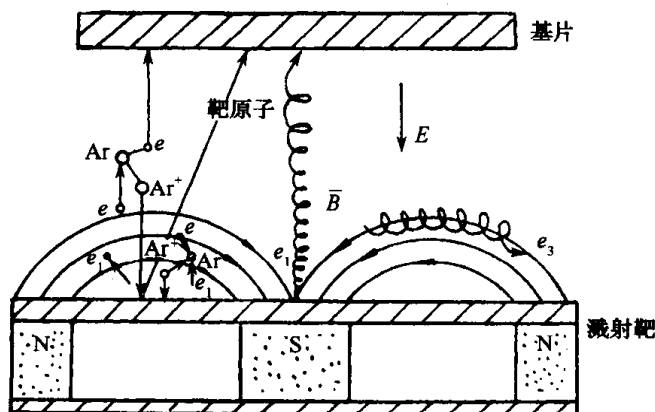


图 10-11 磁控溅射工作原理

电子在电场作用下,加速飞向基片的过程中与氩原子发生碰撞。若电子具有足够的能量(约为 30eV)时,则电离出 Ar^+ 并产生电子。电子飞向基片, Ar^+ 在电场作用下加速飞向阴极(溅射靶)并以高能量轰击靶表面,使靶材发生溅射。在溅射粒子中,中性的靶原子(或分子)沉积在基片上形成薄膜;二次电子 e_1 在加速飞向基片时受磁场 B 的洛伦兹力作用,以摆线和螺旋线状的复合形式在靶表面作圆周运动。该电子 e_1 的运动路径不仅很长,而且被电磁场束缚在靠近靶表面的等离子体区域内。在该区中电离出大量的离子 Ar^+ 用来轰击靶材,因此磁控溅射具有沉积速率高的特点。随着碰撞次数的增加,电子 e_1 的能量逐渐降低,同时 e_1 逐步远离靶面。低能电子 e_1 将如图 10-11 中 e_3 那样沿着磁力线来回振荡,待电子能量将耗尽时,在电场 E

的作用下最终沉积在基片上。由于该电子的能量很低,传给基片的能量很小,使基片温升较低。在磁极轴线处电场与磁场平行,电子 e_2 将直接飞向基片。但是,在磁控溅射装置中,磁极轴线处离子密度很低,所以 e_2 类电子很少,对基片温升作用不大

综上所述,磁控溅射的基本原理就是以磁场改变电子运动方向,束缚和延长电子的运动路径,提高电子的电离概率和有效地利用了电子的能量。因此,在形成高密度等离子体的异常辉光放电中,正离子对靶材轰击所引起的靶材溅射更加有效,同时受正交电磁场的束缚的电子只能在其能量将要耗尽时才能沉积在基片上。这就是磁控溅射具有“低温”、“高速”两大特点的机理。

(2)矩形平面磁控溅射

矩形平面靶简图如图 10-12 所示。靶面处于正交的电磁场中,磁场方向与靶面阴极平行,形成环形磁场。真空室通入高纯氩气,使真空室保持 $10^{-3}\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的真空度,在阳极和阴极(靶)加一定的直流电压后,便产生放电。放电产生的氩离子轰击阳极(靶),溅射靶材沉积到基片上,形成薄膜。

靶面发生的二次电子在正交的电磁场作用下沿环形磁场(跑道)作摆线运动,这些电子运动路径长,增加了与气体分子碰撞的机会,使气体的电离概率增大,进而增大了溅射速率。

磁控靶对磁场的要求是:① 要构成封闭的环形跑道(图 10-12);② 水平场强要达到 $2\times 10^{-2}\text{T}\sim 5\times 10^{-2}\text{T}$,并能在此范围内进行调节。

图 10-13 所示的矩形平面磁控靶,靶面尺寸为 $120\text{mm}\times 240\text{mm}$ 。这种靶的磁体可以用永磁体(例如锶铁氧体和铝镍钴),也可以使用电磁铁。

这种结构靶的特点是采用了极靴,并使极靴与靶材直接接触。

图 10-13 所示的极靴上布置了六块锶铁氧体。每块尺寸的长 \times 宽 \times 高为 $80\text{mm}\times 20\text{mm}\times 17\text{mm}$ (“高”为磁化方向)。锶铁氧体的磁感应强度为 $3.8\times 10^{-1}\text{T}$,矫顽力为 $2.1\times 10^5\text{A/m}$ 。按照这种布置方案,当靶材厚度为 8mm 时,靶面的最大水平场强可达 $2.9\times 10^{-2}\text{T}$ 。

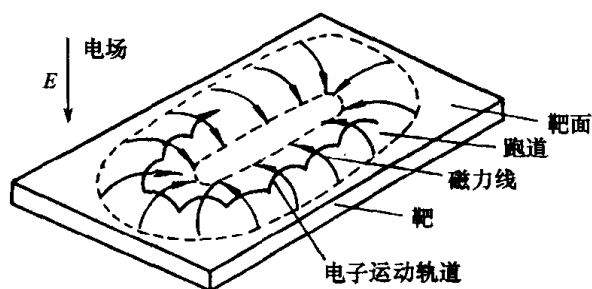


图 10-12 磁控靶表面由磁场构成的
封闭环状跑道

矩形靶结构简单,通用性很强,适于大面积镀膜。

(3)同轴圆柱形磁控溅射镀膜

同轴圆柱形磁控溅射靶的结构如图 10-14 所示。在溅射装置中该靶接 $500\text{V}\sim 600\text{V}$ 的负电位。基片接地、悬浮或加偏压。

在每个永磁体单元的对称面上,磁力线平行于靶表面并与电场正交。磁力线与靶表面封

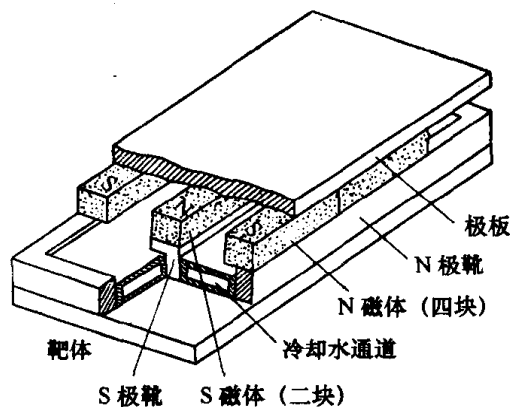


图 10-13 矩形平面磁控靶的结构
(装 6 块锶铁氧体)

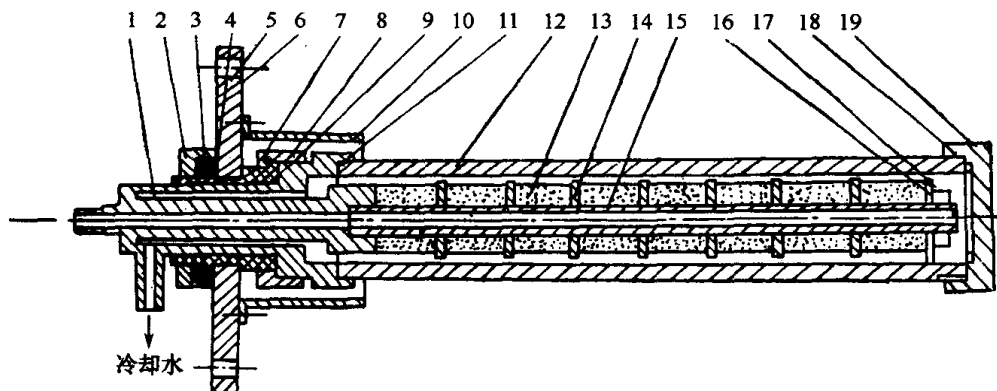


图 10-14 圆柱形磁控溅射靶的结构

1—水嘴座；2—螺母；3—垫片；4—密封圈；5—法兰；6—密封圈；7—绝缘套；8—螺母；
9—密封圈；10—屏蔽罩；11—密封圈；12—阴极靶；13—永磁体；14—垫片；15—管；
16—支撑；17—螺母；18—密封圈；19—螺帽。

闭的空间就是束缚电子运动的等离子区域。在异常辉光放电中，离子不断地轰击靶表面并使之溅射，材料沉积在基片上，形成薄膜。

① 永磁体的选择。磁控靶中常用的永磁体材料有锶铁氧体、钡铁氧体、铝镍钴合金等。其几何尺寸，一般选择长度和直径相同为宜。磁体端面场强最好接近 0.15T ，这样可保证靶表面平行磁场 $B \approx 0.03\text{T}$ 。

② 阴极靶筒。阴极靶筒是用膜材制成的。靶筒材料的纯度要高且表面光洁，组织应致密。几何尺寸可根据要求设计确定，其内径决定靶筒自身的冷却效果，壁厚则直接限定靶表面的磁场及使用寿命。所以，在保证机械强度的前提下，通常取壁厚为 $5\text{mm} \sim 10\text{mm}$ 。

③ 垫片。磁控靶中永磁体单元之间的垫片应选择纯铁、低碳钢等导磁性好的材料制成，其直径大于永磁体直径 5mm 左右，其厚度约在 $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$ 为宜。这样可以通过引磁作用在靶表面上形成较为理想的磁场，提高溅射速率和拓宽靶的腐蚀区域。

(4) 圆形平面磁控溅射靶的结构

圆形平面磁控溅射靶的结构如图 10-15 所示。圆形平面靶采用螺钉或钎焊方式紧紧固定在由永磁体（包括环形磁铁和中心磁柱）、水冷套和靶外壳等零件组成的阴极体上。通常，溅射靶接 $500\text{V} \sim 600\text{V}$ 负电位，真空室接地，基片放置在溅射靶的对面，接地、悬浮或加偏压。因此，构成了基本上是均匀的静电场。

图 10-15 中的水套作用是控制靶温以保证溅射靶处于合适的冷却状态。温度过高将引起靶材熔化；温度过低则导致溅射速率下降。

图 10-15 中屏蔽罩的设置，是为了防止非靶材零件的溅射，提高薄膜纯度，并且该屏蔽罩接地，还能起吸收低能电子的辅助阳极的作用。屏蔽罩的位置，根据屏蔽罩与阴极体之间的间隙来确定。

磁控溅射的磁场是由磁路结构和永久磁体的剩磁（或电磁线圈的安匝数）所决定的。最终表现为溅射靶表面的磁感应强度 B 的大小及分布。通常，圆形平面磁控溅射靶表面磁感应强度的平行分量 B 为 $0.02\text{T} \sim 0.05\text{T}$ ，其较好值为 0.03T 左右。因此，无论磁路如何布置，磁体如何选材，都必须保证上述的 B 要求，磁场 B 可以通过测试或计算掌握其大小及分布规律。

(5) s 枪磁控溅射镀膜

s 枪磁控溅射镀膜不仅具有磁控溅射共同的“低温”、“高速”的特点，而且由于溅射靶有特

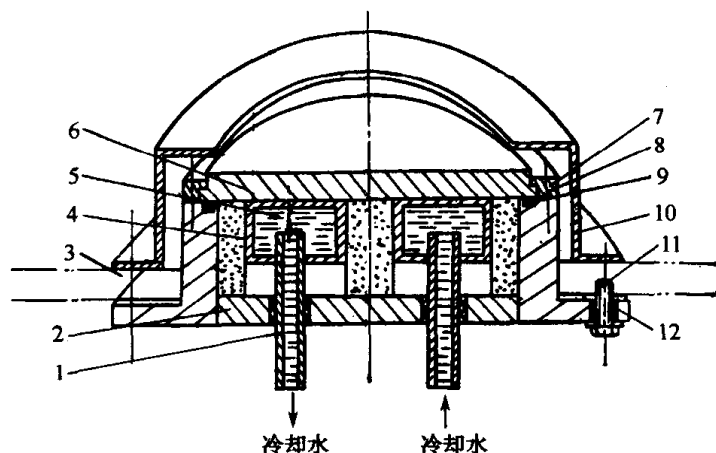


图 10-15 圆形平面磁控溅射靶的结构

1—冷却水管；2—轭铁；3—真空壁；4—环形磁铁；5—水管；6—靶；
7—压环；8—螺钉；9—密封圈；10—屏蔽罩；11—螺钉；12—绝缘套。

殊靶形和冷却方式,还具有靶材利用率高、膜厚分布均匀、靶功率密度大和易于更换靶材等优点。

典型的 s 枪磁控溅射靶结构如图 10-16 所示。它是由倒锥形阴极靶、水冷套、辅助阳极、永磁体、极靴、可拆卸屏蔽环和接地屏蔽罩等构件组成。阴极靶接几百伏的负电位,镀膜室壁接地,辅助阳极接地或接几十伏的正电位,基片通常接地(可以悬浮或偏压)。环状磁体在阴极靶表面形成曲线形磁场,与电场构成正交电磁场。电子在电磁场中作摆线加螺旋线的复合运动,导致异常辉光放电。

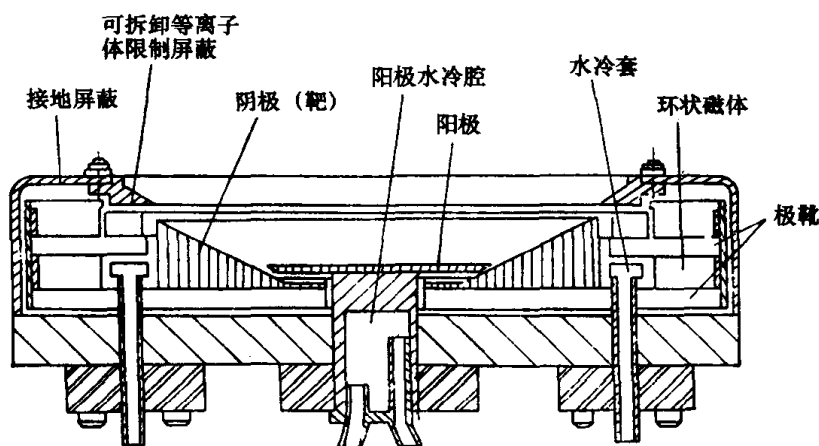


图 10-16 12.5cm s 枪靶的剖面图

辅助阳极能够吸收低能电子,减少电子对基片的轰击。水冷套与靶材之间应具有适当的配合间隙:当靶工作时,由于受热而紧紧地与水冷套贴在一起,保证散热效果;当靶不工作时,二者之间保持一定间隙,以便能够方便地更换靶材。可拆卸屏蔽环能够防止非靶材构件的溅射,并且可以拆卸下来清除沉积其上的膜层。其余构件的作用与其它磁控靶的构件相同。

(6)磁控溅射的特点

① 沉积速率大。由于采用高速磁控电极,可以得到很大的离子流,大大地提高了溅射速率和沉积速率。与其它溅射方式相比,磁控溅射生产能力高,产量高,广泛应用于工业生产中。表 10-10 给出了平面磁控溅射的沉积速率。

表 10-10 平面磁控溅射的沉积速率

元 素	溅射产额 (原子/离子) 以溅射电压 600V 计	沉积速率/ $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$		备 注	元 素	溅射产额 (原子/离子) 以溅射电压 600V 计	沉积速率/ $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$		备 注
		计算值	实验值				计算值	实验值	
银 Ag	3.4	2650	2120		铑 Rh	1.5	1170		
铝 Al	1.2	760	600		硅 Si	0.5	400	320	
金 Au	2.8	2200	1700		钽 Ta	0.6	470	350	
碳 C	0.2(Kr)	160			钛 Ti	0.6	470	350	
钴 Co	1.4	※	300	靶厚<1.6mm	铀 U	1.0	800		
铬 Cr	1.3	1000	800		钨 W	0.6	470	350	
铜 Cu	2.3	1800	1400		锆 Zr	0.75	600		
铁 Fe	1.3	※	400	靶厚<1.6mm	二氧化硅 SiO_2	0.13(1kV)		120	RF:2kW
锗 Ge	1.2	770			三氧化二铝 Al_2O_3	0.04(1kV)		90	
钼 Mo	0.9	700	550		二氧化锡 SnO_2			320	反应溅射 Sn
铌 Nb	0.65	500			砷化镓 GaAs	0.9			
镍 Ni	1.5	※	300	靶厚<1.6mm					
钨 Os	0.95	740							
钯 Pd	2.4	1870	1450						
铂 Pt	1.6	1260	1000						
铼 Re	0.9	700							

注:1. 条件:阴极(靶)127mm×305mm;溅射工作电压 600V,导体,直流溅射 6A;介质,射频溅射 2kW;
2. 铁磁材料(表中标※者)溅射要用特殊磁场,靶厚 1.6mm

② 功率效率高。磁控靶电压一般在 200V~1000V,典型值为 600V。从图 10-17 可见此电压刚好处在功率效率最高范围内。

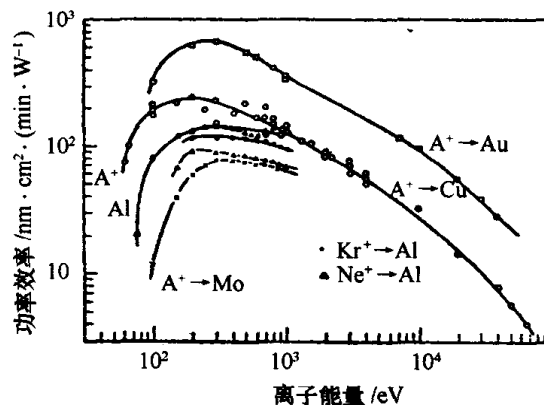


图 10-17 溅射功率效率与入射离子能量的关系

③ 溅射能量低。磁控靶施加的电压低,等离子体被磁场约束在阴极附近,这样可抑制能量较高的带电粒子入射到基片上。

④ 基片温度低。放电时产生的电子可以通过阳极导走,而不必通过接地的基片支架,可以大大减少电子轰击基片,因而基片温度不高。对塑料基底镀膜非常有利。

⑤ 靶刻蚀不均匀。由于靶磁场不均匀,使其局部位置刻蚀速率较大,使靶材利用率仅为20%~30%。为提高靶材利用率,可采取一定措施改变磁场分布,还可使磁铁在阴极中移动来提高靶材利用率。

⑥ 制复合靶。为了镀合金膜可制作复合靶。图 10-18 给出了复合靶示意图。已利用这种靶成功制取了 Ta-Ti 合金、(Tb-Dy)-Fe 以及 Gb-Co 合金膜,其中以扇形结构效果最好。

按薄膜功能分类,溅射膜可为分电气、磁学、光学、机械、化学和装饰等几大类,见表10-11。

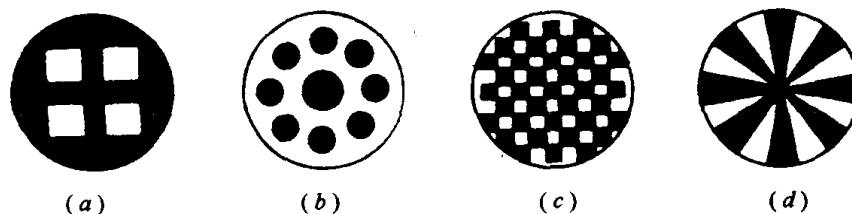


图 10-18 各种不同结构的复合靶

(a) 方块镶嵌靶; (b) 圆块镶嵌靶; (c) 小方块镶嵌靶; (d) 扇形镶嵌靶。

表 10-11 溅射膜的应用分类

应用分类			材料
电子工业	IC 半导体元件	电极,引线 绝缘层,表面钝化膜	铝及铝合金、Ti、Pt、Au、Mo-Si、TiW SiO ₂ 、Si ₃ N ₄ 、Al ₂ O ₃
	显示元件	透明导电膜 光色膜 绝缘层,表面钝化膜	In ₂ O ₃ 、SnO ₂ WO ₃ SiO ₂
	磁记录	软磁性膜 硬磁性膜 磁头缝隙材料,绝缘层 特殊材料	Fe-Ni、Fe-Si-Al、Ni-Fe-Mo、Mn-Zn、Ni-Zn γ-Fe ₂ O ₃ 、Co、Co-Cr、Mn-Bi、Mn-Al-Ge Cr、SiO ₂ 、玻璃 过渡金属和稀土类的合金
	约瑟夫森元件	超导膜 绝缘膜	Nb、Nb-Ge SiO ₂
	光电子学	光 IC	各种玻璃
	其它电子元件	电阻薄膜 印刷机薄膜热写头 压电薄膜 电极引线	Ta、Ta-N、Ta-Si、Ni-Cr Ta-N、SiO ₂ 、Ni-Cr、Au、Ta ₂ O ₅ 、SiC、Ta-Si、Ta-SiO ₂ 、Cr-SiO ₂ ZnO、PZT、BaTiO ₃ 、LiNbO ₃ Al、Cr、Au、Ni-Cr、Pb、Cu
太阳能利用		太阳能电池 选择吸收膜 选择反射膜	Si、Ag、Ti、In ₂ O ₃ 金属碳化物 In ₂ O ₃
光学应用		反射镜 光栅	Al、Ag、Cu、Au Cr
机械、化学应用		润滑 耐磨损 耐腐蚀 耐热	MoS ₂ 、Ag、Cu、Au、Pb、Cu-Au、Pb-Sn Cr、Pt、Ta、CrN、CrC、TiN、TiC、HfN Cr、Ta、CrN、CrC、TiN、TiC 等 Al、W、Ti、Ta、Mo、Co-Cr-Al 系合金
塑料工业		塑料装饰,硬化	Cr、Al、Ag、TiN

(五) 离子镀膜

真空离子镀膜于 1963 年由 D. M. Mattox 提出并开始实验。1971 年 Chamber 等发表电子束离子镀技术, 1972 年 Bunshah 报告了反应蒸镀 (ARE) 技术, 并制作出 TiN 及 TiC 超硬膜。同年 Moley 和 Smith 将空心阴极技术应用于镀膜。20 世纪 80 年代, 国内又相继出现了多弧离子镀及电弧放电型高真空离子镀, 至此离子镀达到工业应用的水平。

1. 离子镀膜原理及种类

离子镀是在真空室中, 利用气体放电或被蒸发物质部分离化, 在气体离子或被蒸发物质离子轰击作用的同时, 将蒸发物或其反应物沉积在基片上。离子镀把气体辉光放电现象、等离子体技术与真空蒸发三者有机地结合起来, 不仅明显地改进了膜层质量, 而且还扩大了薄膜应用范围。其优点是膜层附着力强, 绕射性好, 膜材广泛等。D. M. Mattox 首次提出离子镀原理, 如图 10-19 所示。工作过程是: 先将真空室抽至 4×10^{-3} Pa 以上的真空度, 再接通高压电源, 在蒸发源与基片间建立一个低压气体放电的低温等离子区。基片电极上接上 5kV 直流负高压, 从而形成辉光放电阴极。负辉光区附近产生的惰性气体离子进入阴极暗区被电场加速并轰击基片表面, 对其进行清洗。然后进入镀膜过程, 加热使镀料气化, 其原子进入等离子区, 与惰性气体离子及电子发生碰撞, 少部分产生离化。离化后的离子及气体离子以较高能量轰击镀层表面, 致使膜层质量得到改善。

离子镀种类很多, 蒸发源加热方式有电阻加热、电子束加热、等离子电子束加热、高频感应加热等。各种加热方式的离子镀膜装置见表 10-12。

2. 空心阴极离子镀

(1) 空心阴极离子镀 (HCD) 工作原理及特点

空心阴极离子镀已广泛应用于装饰、工具、模具及其它特种涂层。HCD 法利用热阴极放电产生等离子体束, 以空心钨管作阴极。辅助阳极距阴极较近, 两者作为引燃弧光放电的两极。HCD 枪引燃方式有两种: 其一在钨管处施加高频电场, 使钨管通入的氩气电离, 氩离子轰击钨管, 受热升温达到热电子发射温度时, 产生等离子电子束; 其二是在阴极钨管与辅助阳极之间加 300V 左右直流电压, 钨管通入氩气, 在 10Pa~1Pa 氩气气氛下, 钨管与辅助阳极间发生辉光放电, 产生氩离子轰击钨管, 当其温度达 2300K~2400K 时, 钨管表面发射出大量电子后, 由辉光放电转变为弧光放电, 此时电压下降到 30V~60V, 在阴—阳极之间接通主电源, 即可引出等离子电子束。

图 10-20 示出了 HCD 装置示意图。它由水平位置 HCD 枪、水冷铜坩埚、基片架、真空室、抽气机组等组成。HCD 枪引出的电子束经聚焦后, 在偏转极场作用下转 90°, 在坩埚聚焦磁场作用下, 束径变小聚于坩埚中蒸发镀材。

空心阴极离子镀特点: ① 离化程度高, 带电粒子密度大, 且有大量高能中性粒子。由于 HCD 法较其它离子镀电子束流高 100 倍, 因而其离化率较其它方法高 3~4 个数量级, 而实测金属离子产生率为 22%~40%。② 离子轰击基片, 除掉了氧化物, 在膜—基界面形成“伪扩散层”, 镀层附着力好, 膜质均匀致密, 不仅能镀金属 Ti、Cr、Mo, 也可以进行反应镀 TiN、TiC、CrC 等硬质膜。③ 可用一般低压大流设备电源, 因而使电气系统操作简单、安全。设备成本低。④ 工作压力范围宽, 在 10Pa~ 10^{-2} Pa 范围内均可。⑤ 改善表面覆盖度, 增加绕射性。

表 10-12 各种加热方式的离子镀装置的比较

离子镀种类	蒸发源	充入气体	真空度 /Pa	离子化方式	离子加速方式	能否进行反 应性离子镀	基板升温	能否制取光 泽膜透明膜	其它特点	应用	示意图
直流放电 二极型 (DCIP)	电阻加热或 电子束加热	Ar, 也可充 入少量反 应气体	5×10^{-1} $\sim 10^0$	被镀基体为 阴极, 利用高电 压直流辉光放 电	在数百伏 ~ 数千伏的电压 下加速。离子化 和离子加速一 起进行	可	大	可	绕射性好, 附 着性好, 基板温 度易上升; 膜结 构及形貌差, 若 用电子束加热 必须用差压板	耐蚀, 润 滑, 机械制 品	
多阴极型	电阻加热或 电子束加热	真空, 惰性 气体或反 应气体	10^{-4} $\sim 10^{-1}$	依靠热电子、 阴极放出的电 子以及辉光放 电	0 ~ 数千伏的 加速电压, 离子 化和离子加速可 独立操作	良	有时 小。有 需要时 对基板 加热	可	采用低能电 子, 离子化效 率高, 膜层质 量高, 膜层厚 度可控制	精密机械 制品, 电子 器件, 装饰 品	
活性反应 蒸发 (ARE)	电子束加热	反应气体 $O_2, N_2,$ C_2H_2, CH_4 等	10^{-2} $\sim 10^{-1}$	依靠正偏置 阴极和电子束 间的低电压等 离子辉光放电。 二次电子	无加速电压, 也 有在基片上加 有 0 ~ 数千伏 加速电压的 ARE	良	还要 小。对 基板加 热	可	蒸发效率高, 能获得 $Al_2O_3,$ TiN, TiC 等 薄膜	机械制品, 电子器件 装饰品	
空心阴极 放电离子 镀 (HCD)	等电子束 束	Ar, 其它惰 性气体, 反 应气体	10^{-2} $\sim 10^0$	利用低电压 大电流的电子 束碰撞	0 ~ 数百伏的 加速电压, 离子 化和离子加速 交操作	良	还要 小。对 基板加 热	可	离子化效率高, 电子束斑较大, 金属膜、介质 膜、化合物膜 都能镀	装饰镀层, 耐磨镀层, 机械制品	

(续)

离子镀种类	蒸发源	充入气体	真空度 /Pa	离子化方式	离子加速方式	能否进行反 应性离子镀	基板升温	能否制取 光泽膜透 明膜	其它特点	应用	示意图
射频放电 离子镀 (RFIP)	电阻加热或 电子束加热	真空, Ar, 其它惰性 气体, 反应 气体 O ₂ 、 N ₂ 、C ₂ H ₂ 、 CH ₄ 等	10 ⁻³ ~10 ⁻¹	射频等离子体 放电 (13.56MHz)	0~数千伏的 加速电压, 离子 化和离子加速独 立操作	良	小	良	杂质气体少, 成膜好, 化合物 成膜更好; 匹配 较困难	光学, 半导 体器件, 装 饰品, 汽车 零件	
增强的 ARE 型	电子束加热	Ar, 其它惰 性气体, 反 应气体如 O ₂ 、N ₂ 、 CH ₄ 、C ₂ H ₂ 等	10 ⁻² ~10 ⁻¹	探针除了吸 引电子束的一 次电子、二次电 子外, 增强极发 出的低能电子 促进离子化	无加速电压, 也有在基片上 加有 0~数千 伏加速电压的 增强的 ARE	良	还要 小。还要 对基板加 热	良	易离子化, 基板 所需功率和放 电功率能独立 调节, 膜层厚度 容易控制	机械制品, 电子器件, 装饰品, 光 学器件	
低压等离子 体离子镀 (LPPD)	电子束加热	惰性气体、 反应气体	10 ⁻² ~10 ⁻¹	等离子体	DC 或 AC, 50V	良	还要 小。还要 对基板加 热	可	结构简单, 能 获得 TiC、TiN、 Al ₂ O ₃ 等化合物 镀层	机械制品, 电子器件, 装饰品	
电场蒸发	电子束加热	—	10 ⁻⁴ ~10 ⁻²	利用电子束 形成的金属等 离子体	数百伏~数千 伏的加速电压, 离子化和加速连 动操作	不可	还要 小。还要 对基板加 热	良	带电场的真 空蒸发, 镀层质 量好	电子器件, 音响器件	

(续)

离子镀种类	蒸发源	充入气体	真空度 /Pa	离子化方式	离子加速方式	能否进行反 应性离子镀	基板温升	能否制取光 泽膜透明膜	其它特点	应用	示意图
感应加热 离子镀	高频感应加 热	惰性气体 反应气体	10^{-4} $\sim 10^{-1}$	感应漏磁	DC 1kV~5kV	可	小	可	能获得化合 物镀层	机械制品, 装饰品,电 子器件	
电弧离 子束镀	电阻加热,从 坩埚中喷出 的是簇团状 的蒸发颗粒	真空或反 应气体	10^{-4} $\sim 10^{-2}$	电子发射,从 灯丝发出的电 子的碰撞作用	0~数千伏的加 速电压,离子加 速独立操作	可	小	可	既能镀纯金 属膜又能直接 镀化合物膜,如 ZnO	电子器件, 音响器件	
多弧离子镀	阴极弧光辉 点	真空或反 应气体	10^{-1} $\sim 10^{-1}$	热电离,场离 子发射,弧光放 电产生的离子	利用蒸发原子 束的定向运动	可	较大	可	离子化率高,沉 积速率大	机械制品, 刀具,模具	
电弧放电型 高真空 离子镀	电子束加热	真空或反 应气体	10^{-4} $\sim 10^{-4}$	蒸发源热电 子或热灯丝发 射电子促进离 子化	0~700V的加 速电压	可	小	良	离子化率高,膜 层质量优良	机械制品 刀具,装饰	

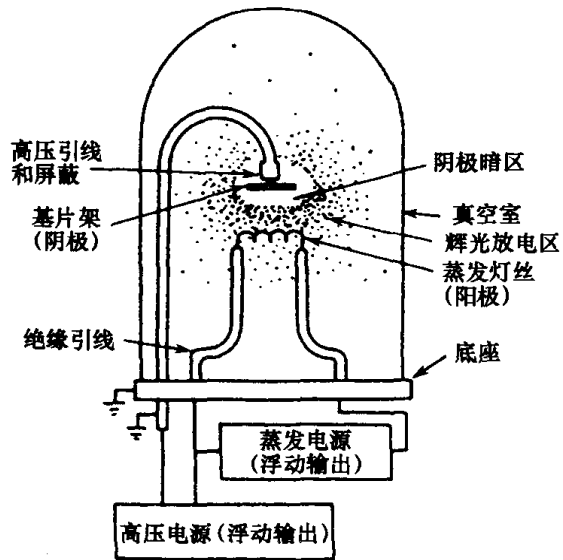


图 10-19 离子镀原理示意图

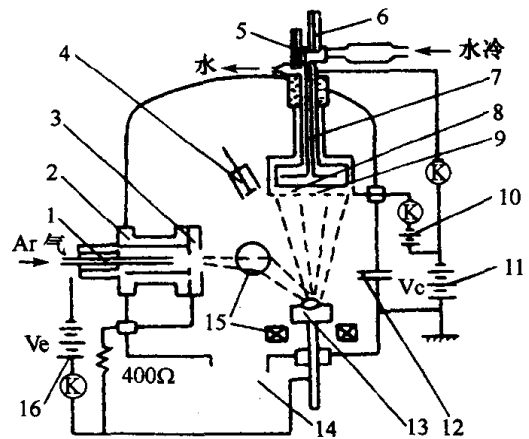


图 10-20 HCD 离子镀装置示意图

- 1—阴极空心钨管；2—空心阴极；3—辅助阳极；
4—测厚装置；5—热电偶；6—流量计；7—收集极；
8—样品；9—抑制栅极；10—抑制电压(25V)；
11—样品偏压；12—反应气体入口；13—水冷铜坩埚；
14—真空机组；15—偏转聚焦极；16—主电源。

(2) 空心阴极镀氮化钛装置

空心阴极镀氮化钛装置示意图如图 10-21 所示。主要结构有：镀膜室其尺寸为 $\phi 620\text{mm} \times 720\text{mm}$ ；HCD 枪：空心阴极为 $\phi 9\text{mm} \times 1\text{mm} \times 170\text{mm}$ 钨管；枪功率 12W；坩埚熔池容积 35cm^3 ；烘烤装置功率 5kW；三维复合运动工件行星转动架；真空系统由 300L/s 油扩散泵及 2X-30 机械泵组成；充气、水冷、装料车、电器控制等。

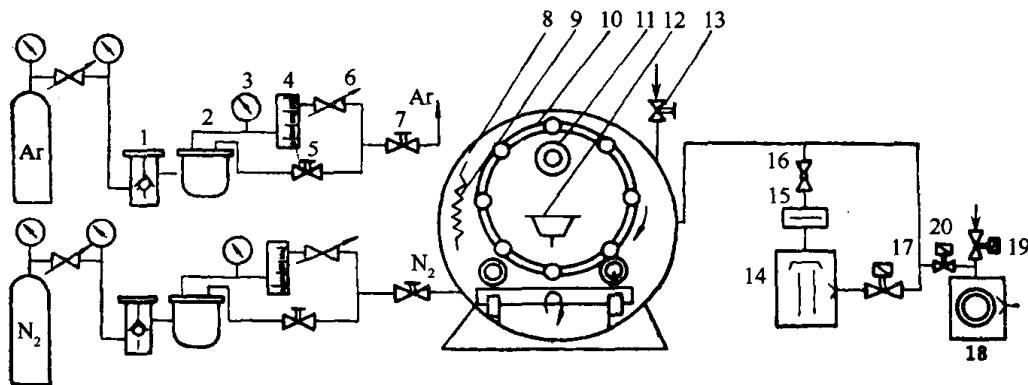


图 10-21 镀氮化钛装置结构示意图

- 1—一定压阀；2—贮气罐；3—真空压力表；4—流量计；5—管路支阀；6—微调阀；7—管路总阀；8—镀膜室；
9—烘烤装置；10—行星转架；11—HCD 枪；12—坩埚；13—手动放气阀；14—扩散泵 $\phi 300$ ；15—冷阱；
16—手动插板阀；17—高真空阀(电磁截止阀)；18—机械泵 2X-30；19—电磁放气阀；
20—低真空阀(电磁截止阀)。注：1~7 充气系统，15~19 真空系统 KYLD-620 型。

3. 射频放电离子镀

1973 年日本村山洋研制成了射频放电离子镀(RFIP)装置,其原理图如图 10-22 所示。此装置真空度为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$, 蒸镀物质原子离化度为 10%, 加热用的频率线圈高 7cm, 用 $\phi 3$ 铜丝绕制, 共 7 圈。射频源频率为 13.56MHz 或 18MHz, 功率 1kW~2kW, 直流偏压 0~1500V。

此装置分三个区域:以蒸发源为中心的蒸发区;以高频线圈为中心的离化区;以基板为中心的离子加速区。三者有机地结合在一起,可以镀金属膜、化合物膜及合金膜。由于镀膜时真空度较高,使镀层针孔少、膜质均匀致密、纯度高,对制作超导膜及光学膜特别有利。

射频放电离子镀优点:① 蒸发、离化、加速三种过程分别独立控制,离化靠射频激励,而不是靠加速直流电场,基板周围不产生阴极暗区。② 工作压力低,成膜质量好。③ 基板温度较低,较容易控制。其不足是:由于真空度高,绕射性较差;要求频率源与电极之间需有匹配箱,并随镀膜参数变化而调节;蒸发源与频率源之间易产生干扰;射频对人体有害,需加防护。

4. 电弧离子镀

(1) 真空电弧离子镀原理

真空电弧离子镀是由美国 Multi-Arc 公司和 Vac-Tec 公司联合开发的,1981 年达到工业实用化阶段。

电弧离子镀的原理是基于冷阴极真空弧光放电理论提出的。该理论认为放电过程的电量迁移是借助于场电子发射和正离子电流这两种机制同时存在且相互制约而实现的。在放电过程中,阴极材料大量蒸发,这些蒸气分子所产生的正离子在阴极表面附近很短的距离内产生极强的电场,在这样强的电场作用下,电子产生“场电子发射”,而逸到真空中去,其发射的电流密度 J_c 表达式为

$$J_c = BE^2 \exp(-C/E) \quad [A/cm^2] \quad (10-7)$$

式中 E ——阴极电场强度;

B 、 C ——与阴极材料有关的系数。

而正离子流可占总电弧电流的 10% 左右,但在理论计算上尚存在一定难度,还不能够确切地建立和求解阴极弧光辉点内的质量、能量和电量的平衡关系。

电弧法涉及到从阴极弧光辉点放出的阴极物质的离子。阴极弧光辉点是存在于极小的空间的高电流密度高速变化的一种现象,其机理尚

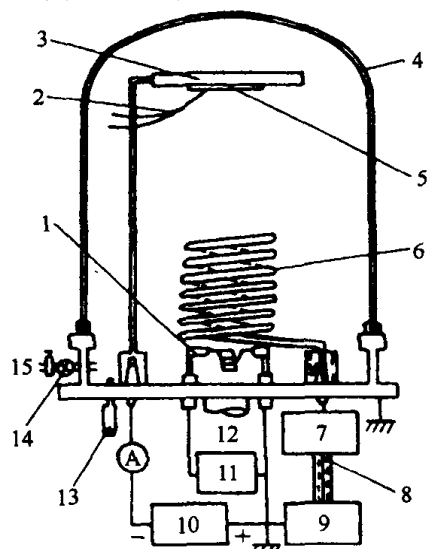


图 10-22 射频放电离子镀原理图

- 1—熔化坩埚;2—热电偶;3—基片支持架(阴极);
4—真空室;5—基板;6—RF 线圈;7—匹配箱;
8—同轴电缆;9—射频电源;10—加速用直流电源;
11—蒸发源;12—真空系统;13—真空计;
14—调节阀;15—反应气体入口。

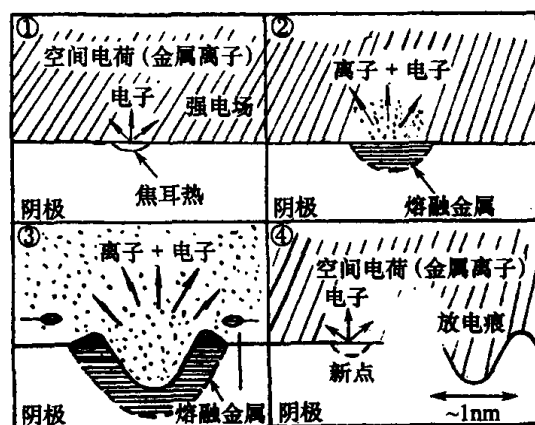


图 10-23 真空弧光放电的阴极弧光辉点

不完全清楚。按 J.E.Daolder 的解释,能较好地利用图 10-23 说明这一现象。

① 被吸到阴极表面的金属离子形成空间电荷层。由此产生强电场使阴极表面上功函数小的点(晶界或微裂纹)开始发射电子。

② 个别发射电子密度高的点产生高密度的电流,该电流产生的焦耳热使该点温度上升而进一步发射热电子。这种反馈作用使电流局部集中。

③ 由于电流局部集中产生的焦耳热使阴极材料在此局部产生爆发性的等离子化而发射电子和离子,然后留下放电痕。同时放出熔融的阴极材料粒子。

④ 发射的离子中的一部分被吸回阴极表面再次形成空间电荷层,产生强电场,又使新的功函数小的点开始发射电子。

这个过程反复进行,弧光辉点在阴极表面上激烈地、无规则地运动。弧光辉点过后,在阴极表面上留下分散的放电痕。研究结果表明,阴极辉点的数量一般与电流成正比增加,因此可以认为每一个辉点的电流是常数,并随阴极材料的不同而异,见表 10-13。

表 10-13 不同阴极材料阴极辉点的平均电流密度

阴 极 材 料	阴极辉点电流/A	阴 极 材 料	阴极辉点电流/A
铋	3~5	铜	75
镉	8	银	60~100
锌	20	铁	60~100
铝	30	钨	150
铬	50	碳	200
钛	70	钨	300

上述阴极辉点极小,有关资料测定为 $1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 。所以辉点内的电流密度值可达 $10^5\text{A}/\text{cm}^2 \sim 10^7\text{A}/\text{cm}^2$ 。这些辉点犹如很小的发射点,每个点的延续时间很短,约为几至几十微秒。在此瞬间过后,电流又分布到阴极表面的其他辉点上,建立起足够的发射条件,致使辉点附近的阴极材料大量蒸发,从而达到成膜的目的。

(2) 电弧蒸发源和多弧离子镀

多弧离子镀技术的核心是电弧蒸发源,这种新型蒸发源是一种冷阴极电弧放电型自蒸发自离化式固体蒸发源,它与其它传统离子镀蒸发源相比具有以下显著特点:

- ① 沉积速率高,对 TiN 来说可达 $100\text{nm}/\text{s} \sim 1000\text{nm}/\text{s}$;
- ② 离化率高,一般可到 $60\% \sim 80\%$;
- ③ 离子能量高;
- ④ 工作真空范围宽;
- ⑤ 固体蒸发源,靶面形状、尺寸、位置可变;
- ⑥ 膜层致密性高,强度与耐久性好。

这种蒸发源既可蒸镀金属材料、合金材料,也可以进行反离子镀。它可以镀制 TiN、TiC 等超硬膜,Al、Ag、Cu、Cr、Y 等高温低温耐腐蚀膜,不锈钢、黄铜、镍铬等装饰保护膜,WC 类金刚石等特硬膜,在机械、化工、冶金、轻工、电子、采矿地质、国防等领域具有广泛的用途。当前

最突出的应用就是刀具氮化钛超硬涂层。

电弧蒸发源的工作机理是冷阴极自持弧光放电,其物理基础是场致发射。电弧蒸发源的典型结构示意图如图 10-24 所示。被镀材料接阴极,真空室接阳极,真空室抽至较高真空,当引发电极启动器接触拉开时,阴极与阳极之间即形成稳定的电弧放电,阴极表面布满飞速游动的阴极斑、阴极斑的直径约为 $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$,闪耀的光斑直径约为 $10\mu\text{m}$,移动速度为几十米每秒,电流密度 $10^5\text{A}/\text{cm}^2\sim 10^7\text{A}/\text{cm}^2$,极间电压降至 $20\text{V}\sim 40\text{V}$ 。阴极热斑的正前方是高密度的金属等离子体,其中电子向阳极快速运动,离子“相对静止”在镀膜空间,阴极斑点前面正离子的堆积形成正空间电荷,在阴极近表面形成高强电场 $10^5\text{V}/\text{cm}\sim 10^6\text{V}/\text{cm}$,克服阴极中的势垒,产生强大的电子发射,以维持放电,而部分离子对阴极的轰击,使阴极斑点局部继续迅速高温蒸发,并在空间迅速离化,使这种阴极斑变成微点蒸发源。这些微点蒸发源在磁场和屏蔽绝缘的作用下束缚在阴极靶正面的范围内,无规则地移动,从而形成大面积均匀的蒸发源。弧斑的大小由电流调节控制,弧斑的运动则由磁场、屏蔽、阴极材质、表面形状等确定。

以若干个电弧蒸发源为核心的离子镀设备,称之为多弧离子镀,或称电弧镀,或弧镀。其原理示意图如图 10-25 所示。它具有以下优点:

- ① 膜层性能优良。全离子化金属等离子体对工件轰击加热,轰击、清洗、沉积镀膜,一弧三用,膜层结合牢固,结构致密。
- ② 离子镀膜工艺范围宽。可以在较低温度(200°C)或较高真空下进行离子镀和反应镀。
- ③ 镀膜空间大。固体蒸发源安置灵活,工件装卡更换简单,不另加加热器。
- ④ 设备简单、工作周期短、生产效率高,适合工业化大批量生产。

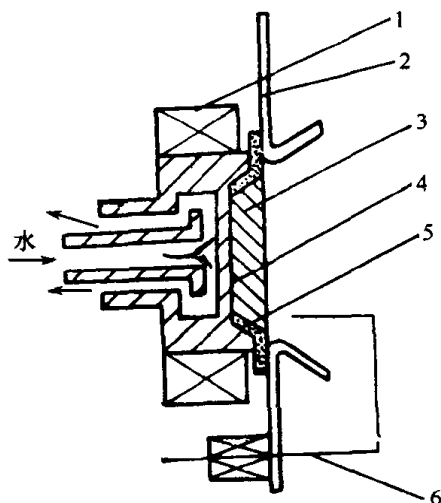


图 10-24 电弧蒸发源结构示意图

1—磁场线圈;2—阳极;3—阴极靶;
4—水冷阴极座;5—屏蔽;6—接触启动器。

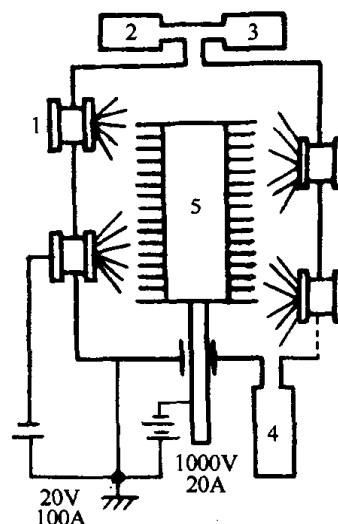


图 10-25 多弧离子镀示意图

1—电弧蒸发源;2—惰性气体;3—反应气体;
4—真空系统;5—钻头工作架。

5. 离子镀应用概况

基于离子镀沉积速度快,镀材广泛,绕射性好,镀层质密,附着性好等特点,其应用日趋广泛,将来有可能代替湿式电镀。离子镀应用领域见表 10-14。

表 10-14 离子镀应用领域

电 子 工 业										
应用领域	耐 蚀	耐 热								
镀层材料	Al, Zn, Cd	Al, W, Ti, Ta	Ni-Cr	W, Pt	Cu	Au, Al, Cu, Ni	Be	Pt	Au, Ag	Fe, Co, Ni, Co-Cr
镀层/工件	Zn, Al/高纯钢 (Al/低碳钢螺栓)	Al/钢、 不锈钢	Ni-Cr/耐火 陶瓷绕线管	W/铜合金	Cu/陶瓷、 树脂	Au, Al, Ni /Si 薄膜	Be/自动 定位箔	Pt/Si 薄膜	Au, Ag/ 铁镍合金	Fe, Co, Ni/ 塑料带
应用实例	飞机、船舶 (一般结构用材料)	排气管、耐火 金属材料	电阻	触点材料	印制线路板、 薄膜集成 IC 电路基板	电极副、 导电膜	音响用 振动板	集成 电路	导线架	磁带
应用领域	表 面 硬 化									
镀层材料	Cr, Cr-N Cr-C	氮 化 物				TiN, TaN			碳化物	TiC
镀层/工件	Cr/型钢、 低碳钢	氮化物/不锈 钢	氮化物/ 轴承钢	氮化物 /型钢	氮化物 /铸铁	TiN/ 不锈钢	TiN 硬 质合金	TiN/ 高速钢	TiC/ 硬质合金	TiC/ 高速钢
应用实例	模具、 机器零件	模具、机器零件 汽车零件	机器零件	机器零件	机器零件	手表壳等	刀具	刀具、 模具	机器零件	刀具、膜具
应用领域	装 饰					光 学				
镀层材料	Au, Ag	玻璃	Al	Al	氮化物	BiO ₂ , TiO ₂	玻璃	Al	Au	Mo, Nb
镀层/工件	Au/不锈 钢 (Au/黄铜)	玻璃/塑料	Al/塑料	Al/塑料	氮化物/不锈 钢	氧化物/玻 璃	玻璃/透明 塑料	Al/铀	Au/铜壳 体	Mo, Nb/ZrAl 合金
应用实例	手表、装饰品	塑料镜片上 镀膜玻璃	着色涂层	手表/装饰 品	镜片耐磨涂 层	眼镜用镜 片	核反应堆	加速器	核聚变实验 装置	

(六) 化学气相沉积(CVD)制作薄膜


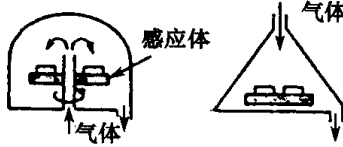
化学气相沉积是以化学反应方式制作薄膜。其原理是将含有制膜材料的反应气体通到基片上,在基片上发生化学反应形成薄膜,对 CVD 薄膜生成过程,可以定性地归结为;反应气体通到基片上后,反应气体分子被基片表面吸附,并在基片表面上产生化学反应,形成核,然后反应生成物脱离基片表面,并沿基片表面不断扩散形成薄膜。CVD 沉积薄膜速率较 PVD 高, PVD 通常在 $25\mu\text{m/h}\sim 250\mu\text{m/h}$ 范围,而 CVD 速率为 $25\mu\text{m/h}\sim 1500\mu\text{m/h}$ 。其制膜材料包括除碱及碱土类以外的金属(Ag、Au 困难),碳化物、氧化物、氮化物、硫化物、硒化物、碲化物以及金属化合物及合金。CVD 可用于制作表面保护膜、装饰膜、精制材料以及半导体和电子材料等。

1. 化学气相沉积(CVD)装置构成

化学气相沉积装置主要包含四部分,即反应室、加热系统、供反应气体系统、反应后气体处理系统。

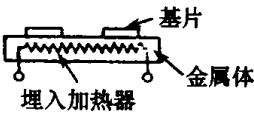

反应室设计时首要问题是保证薄膜的均匀性。因化学反应在基片上发生,因而还需注意:① 应为反应提供充足的气体;② 抑制气相中发生反应;③ 使反应后生成的气体迅速离开。从结构上来讲,反应室有水平型、垂直型、水平与垂直结合的圆筒型。不同结构的反应室见表 10-15。

表 10-15 CVD 装置反应室结构简图

型 式	加 热 方 式	温度范围/℃	结构原理图
水平型	热板式 感应加热 红外加热	≈ 500 ≈ 1200	
垂直型	热板式 感应加热	≈ 500 ≈ 1200	

CVD 装置的加热系统为基片上进行化学反应提供必要的热量。因而,只需加热基片,环境不需要加热。通常为避免气相中产生反应物质,基片温度应高于环境气体温度。基片加热方式有电阻式加热、高频感应加热、红外线及激光加热等。各种加热方式及应用见表 10-16。不同薄膜成膜温区见表 10-17。

表 10-16 CVD 装置加热方式及应用

加 热 方 式	原 理 图	应 用
电阻加热	热板方式 	500℃ 以下的各种绝缘膜, 等离子体 CVD
	管状炉 	各种绝缘膜, 多晶硅膜(低压 CVD)

(续)

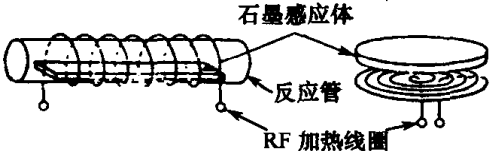
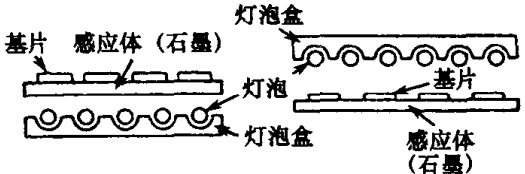
加热方式	原理图	应用
高频感应加热		硅外延生长及其它
红外加热(灯泡加热)		硅外延生长及其它
激光束加热		CVD 金属膜(选择性 CVD)

表 10-17 成膜温区

生长温度范围		反应系	薄膜	应用举例
低温生长	常温~200℃	紫外线激发 CVD, 臭氧氧化法	SiO ₂ Si ₃ O ₄	钝化(Al 上, Al 间)
	200℃~400℃	等离子体激发 CVD	SiO ₂ Si ₃ O ₄	
	400℃~500℃	SiH ₄ -O ₂ 系 SiO ₂	SiO ₂ PSG	
中温生长	500℃~800℃	SiN ₄ -NH ₃ SiH ₄ -CO ₂ -H ₂ SiCl ₄ -CO ₂ -H ₂ SiH ₂ Cl ₂ -NH ₃ SiH ₄	Si ₃ N ₄ SiO ₂ Si ₃ N ₄ 多晶硅	钝化电极材料 (忽视杂质再分布的温度)
高温生长	800℃~1200℃	SiH ₄ -H ₂ SiCl ₄ -H ₂ SiH ₂ Cl ₂ -H ₂	Si	外延生长

CVD 装置供反应气体由原料气体、氧化剂气体、还原剂气体以及将反应气体输送至反应室中的载带气体组成。原料气体可由气相、液相及固相三种形态提供。气体可直接送入反应室中。气体流量控制可使用质量流量计或针阀来实现。

CVD 反应后的余气大多数都是腐蚀性、有毒性气体。一般需通过冷阱来冷凝或经洗涤器水洗和中和后排走。

2. CVD 的反应方式及制作薄膜所用材料

(1) CVD 的反应方式

CVD 方法采用不同的反应方式可以制备出单质、化合物、氧化物和氮化物等各类薄膜。早期精制金属时,采用氢还原及化学输送反应。现在广泛使用的反应方式有加热分解、氧化、等离子体激发、光激发等。各种反应方式及生成物见表 10-18。

一、真空镀膜

表 10-18 CVD 反应方式及生成物

反应类型	材 料	反 应 举 例	CVD 生成物
热分解	金属氢化物 金属碳酸化合物 有机金属化合物 金属卤化物	$\text{SiH}_4 \xrightarrow{\Delta} \text{Si} + 2\text{H}_2$ $\text{W}(\text{CO})_6 \xrightarrow{\Delta} \text{W} + 6\text{CO}$ $2\text{Al}(\text{OR})_3 \xrightarrow{\Delta} \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{R}'$ $\text{SiI}_4 \xrightarrow{\Delta} \text{Si} + 2\text{I}_2$	Si W Al ₂ O ₃ Si
氢还原	金属卤化物	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{Si} + 4\text{HCl}$ $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{Si} + 3\text{HCl}$ $\text{MoCl}_5 + 5/2\text{H}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{Mo} + 5\text{HCl}$	Si Si Mo
金属还原	金属卤化物, 单质金属	$\text{BeCl}_2 + \text{Zn} \xrightarrow{\Delta} \text{Be} + \text{ZnCl}_2$ $\text{SiCl}_4 + 2\text{Zn} \xrightarrow{\Delta} \text{Si} + 2\text{ZnCl}_2$	Be Si
基片材料还原	金属卤化物, 硅基片	$\text{WF}_6 + 3/2\text{Si} \longrightarrow \text{W} + 3/2\text{SiF}_4$	W
化学输送反应	硅化物等	$2\text{SiI}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiI}_4$	Si
氧化	金属氢化物 金属卤化物 金属氧氯化物 有机金属化合物	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$ $(\text{PH}_3 + 5/4\text{O}_2 \longrightarrow 1/2\text{P}_2\text{O}_5 + 3/2\text{H}_2)$ $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$ $\text{POCl}_3 + 3/4\text{O}_2 \longrightarrow 1/2\text{P}_2\text{O}_5 + 3/2\text{Cl}_2$ $\text{AlR}_3 + 3/4\text{O}_2 \longrightarrow 1/2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{R}'$	SiO ₂ (P ₂ O ₅) SiO ₂ P ₂ O ₅ Al ₂ O ₃
加水分解	金属卤化物	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$ $2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl}$	SiO ₂ Al ₂ O ₃
与氨反应	金属卤化物 金属氢化物	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 4/3\text{NH}_3 \longrightarrow 1/3\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{HCl} + 2\text{H}_2$ $\text{SiH}_4 + 4/3\text{NH}_3 \longrightarrow 1/3\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{H}_2$	Si ₃ N ₄ Si ₃ N ₄
等离子体激发反应	硅氢化合物	$\text{SiH}_4 + 4/3\text{N} \longrightarrow 1/3\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{H}_2$ $\text{SiH}_4 + 2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$	Si ₃ N ₄ SiO ₂
光激发反应	硅氢化合物	$\text{SiH}_4 + \text{O}^+ \xrightarrow{\text{紫外线}} \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$ $\text{SiH}_4 + 4/3\text{NH}_3 \longrightarrow 1/3\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{H}_2$	SiO ₂ Si ₃ N ₄
激光激发反应	有机金属化合物	$\text{W}(\text{CO})_6, \text{Cr}(\text{CO})_6, \text{Fe}(\text{CO})_5 \longrightarrow \text{W}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{CO}$	Fe, Cr, W

(2) 半导体生产中采用的 CVD 原料

CVD 原料一般应选择常温下是气态的物质或具有较高蒸气压的液体或固体, 原料有氢化物、卤化物、有机金属化合物等。表 10-19 给出了制备 CVD 薄膜原料及其反应生成物。

表 10-19 CVD 薄膜制作用材料

材 料	化 合 物	CVD 薄膜	材 料	化 合 物	CVD 薄膜
氢化物	SiH ₄ PH ₃ B ₂ H ₆	Si P B	卤化物	SiCl ₄ SiH ₂ Cl ₂ SiHCl ₃	Si
	SiH ₄ PH ₃ B ₂ H ₆	SiO ₂ 掺杂氧化物		GeCl ₄ -H ₂	Ge
有机金属化合物	SiH ₄ PH ₃ B ₂ H ₆	Si ₃ N ₄ Ge		SiCl ₄ SiH ₂ Cl ₂	Si ₃ N ₄
	SiH ₄ -NH ₃ , N ₂ H ₄ GeH ₄			SiCl ₄ SiH ₂ Cl ₂	SiO ₂
	Fe(CO) ₅ Cr(CO) ₆ Mo(CO) ₆ W(CO) ₆ Pt(CO) ₂ Cl ₂ Fe(CO) ₅ -O ₂ Si(OC ₂ H ₅) ₄ Al(OC ₂ H ₅) ₃ Al(C ₂ H ₅) ₃ PO(OCH ₃) ₃ Al(C ₂ H ₅) ₃ -O ₂ , H ₂ O 各种乙酰丙酮化物	Fe Cr Mo W Pt Fe ₂ O ₃ SiO ₂ Al ₂ O ₃ Al P ₂ O ₅ Al ₂ O ₃ 各种金属		SiCl ₄ SiH ₂ Cl ₂	SiO ₂
				TiCl ₄ AlCl ₃	TiO ₂ Al ₂ O ₃
				WCl ₆ (WF ₆) MoCl ₅ (MoF ₆)	W, Mo

3. CVD 装置典型实例

(1) 低温 CVD 装置

图 10-26 给出了低温 CVD 装置简图。在 500℃ 以下制作绝缘薄膜, 用于集成电路中铝布线表面防护膜、线间绝缘膜。

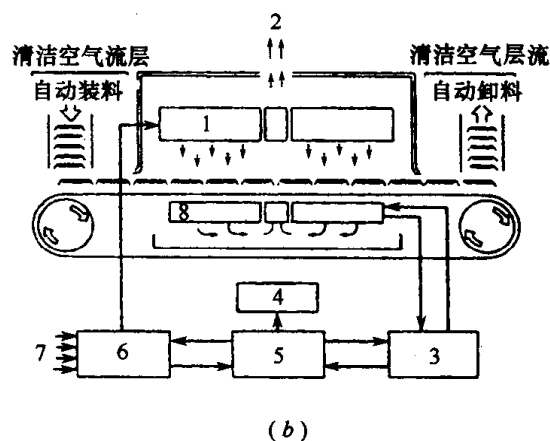
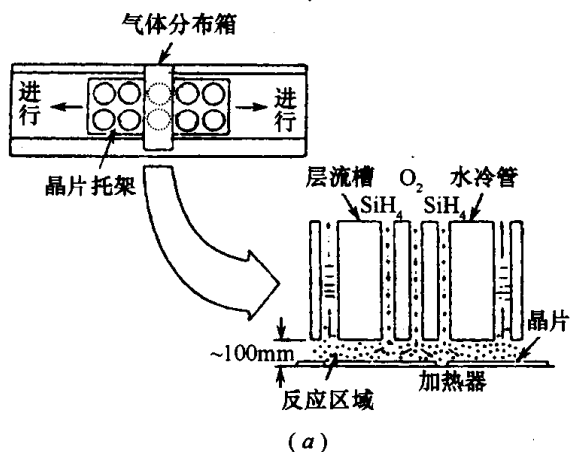


图 10-26 低温 CVD 装置

(a) 输送式 CVD 装置; (b) 串联(片盒-片盒)式 CVD 装置。

1—气体分布箱; 2—排气; 3—温度控制; 4—读数装置; 5—控制组件; 6—气体流动组件;

7—清洗和反应气体; 8—四段加热器。

(2) 中等温度 CVD 装置

此种装置成膜温度为 600℃ ~ 800℃, 可以制作集成电路中的金属膜、多晶硅膜以及各种绝缘膜。此种装置原理图如图 10-27 所示。

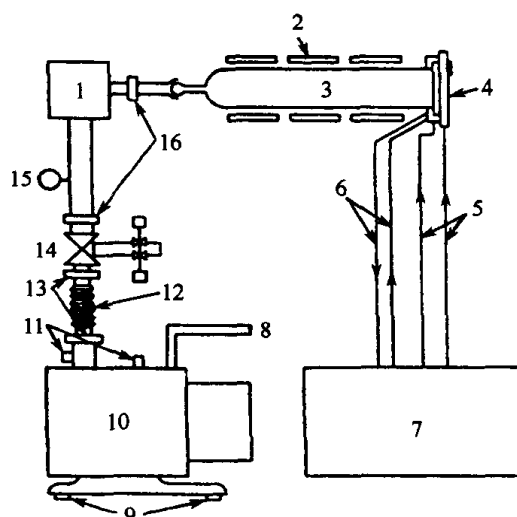


图 10-27 中等温度 CVD 装置

- 1—冷阱;2—普通扩散炉;3—反应室;4—装料门组件;5—反应气体管;6—装料门气动联锁装置;
7—气体控制系统;8—排气口;9—防振台;10—主真空泵;11—N₂ 清洗;
12—波纹管;13、16—接头;14—真空阀;15—压力计。

(3) 制备硅单晶膜 CVD 装置

图 10-28 给出了外延生长硅单晶膜 CVD 装置简图。此装置在高温下,在硅晶片上外延生长硅单晶膜。可制作出均匀膜层,膜层厚度 $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ 。

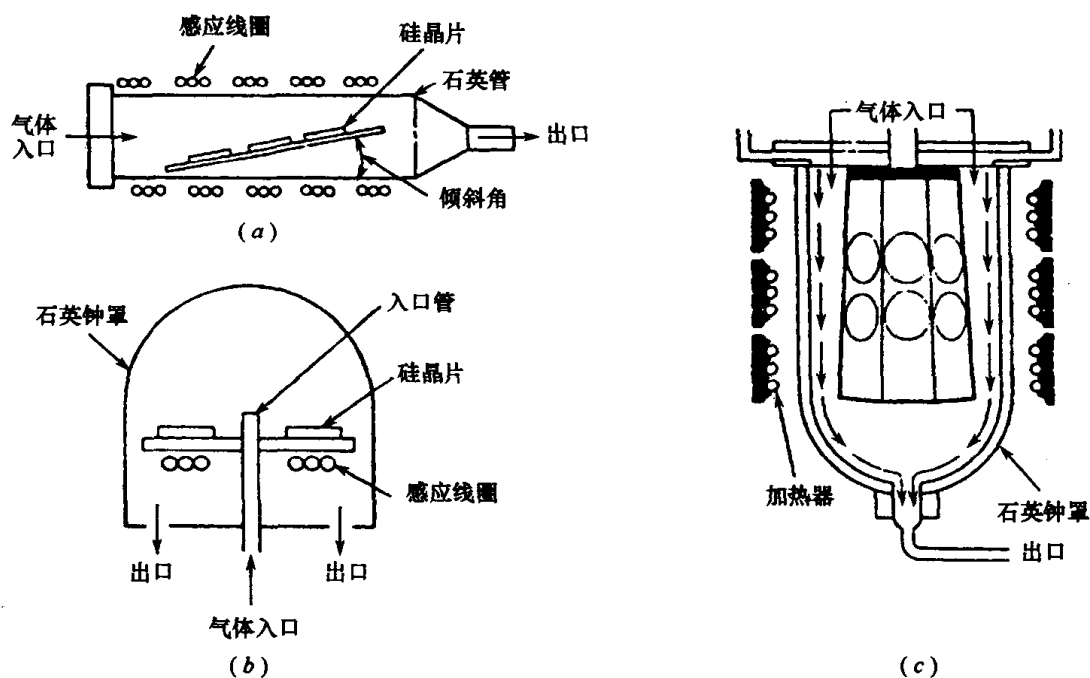


图 10-28 硅单晶膜 CVD 装置

(a) 水平型反应室结构; (b) 垂直型反应室结构; (c) 圆筒型反应室结构。

(4) 制备硅膜 CVD 装置

此装置简图如图 10-29 所示。装置采用射频感应加热,反应在基片与感应体附近发生,管壁沉积很少,硅膜生长速率为 $1\mu\text{m}/\text{min}\sim 3\mu\text{m}/\text{min}$ 。

(5) CVD 法制作碳化硅膜(SiC)

此装置原理图如图 10-30 所示。采用高频加热,温度可达 1300℃~1800℃,膜生长速率为 0.2μm/min~1.0μm/min。

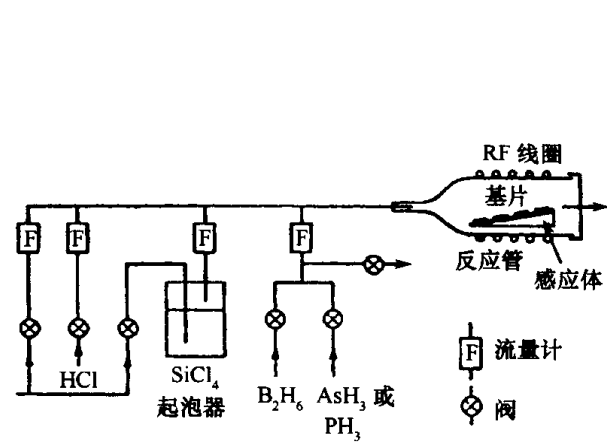


图 10-29 制备硅膜 CVD 装置

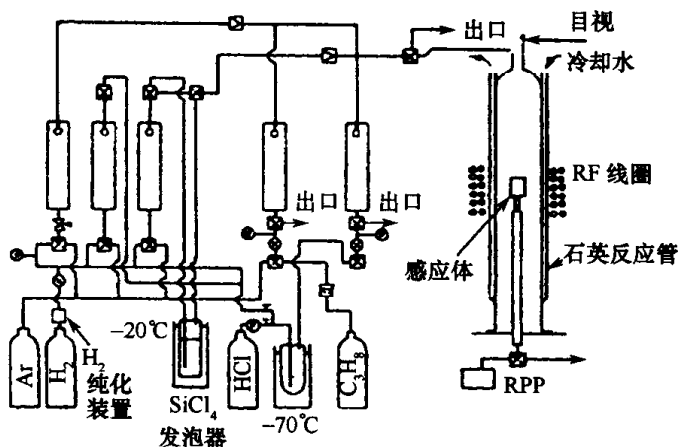


图 10-30 碳化硅膜 CVD 装置

(6)减压 CVD 法制作绝缘膜

减压 CVD 法可制备 SiO₂ 膜、PSG(硅酸磷玻璃)膜、BSG(硅酸硼玻璃)膜、AsSG(硅酸砷玻璃)膜、Si₃H₄ 膜及 Al₂O₃ 等绝缘膜。主要用于半导体器件制造上。表 10-20 给出了绝缘膜种类、制作方法及用途。图 10-31 为热壁反应室结构简图,减压装置的工作压力为 10Pa~1000Pa。

表 10-20 绝缘膜种类及用途

绝缘膜种类	生长法	生长温度/℃	应用
SiO ₂ 膜	$\text{SiH}_4 + 2\text{N}_2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{N}_2$	600~750	表面稳定膜 扩散掩膜
	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \longrightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{C}_2\text{H}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	750~800	
	$\text{SiH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO} + 5\text{H}_2\text{O}$	800~950	
	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 2\text{N}_2\text{O} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{HCl} + 2\text{N}_2$	750~850	
	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	400~500	保护膜
PSG 膜	$\text{SiH}_4 + \text{PH}_3 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$	350~450	层间绝缘膜
BSG 膜	$\text{SiH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	350~450	扩散掩膜
AaSG 膜	$\text{SiH}_4 + \text{AsH}_3 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{As}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$	350~450	扩散泵(P,B,As)
Si ₃ N ₄ 膜	$3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$	700~950	氧化扩散掩膜
	$3\text{SiCl}_4 + 4\text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{HCl}$	700~950	表面保护膜
	$3\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 10\text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{NH}_4\text{Cl} + 6\text{H}_2$	700~950	MNOS 存储器用
Al ₂ O ₃ 膜	$2\text{AlCl}_3 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} + 6\text{HCl}$	800~950	MAOS 存储器用
	$2\text{Al}(\text{CH}_3)_3 + 9\text{O}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{CO}_2 + 9\text{H}_2\text{O}$	350~500	表面保护膜
	$\text{Al}(i\text{-OC}_3\text{H}_7)_3 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + x\text{C}_7\text{H}_m + y\text{H}_2\text{O}$	350~450	绝缘膜

(7)CVD 方法制作金属薄膜

用 CVD 方法制作金属薄膜,几乎适用于所有的金属,但一般低熔点金属不必用 CVD 方法制膜,用蒸镀和离子镀方法可以得到优质薄膜。CVD 制金属膜,仅用于制作熔点高、硬度大的膜,如 Ta、Mo、W、Re 等金属膜。用 CVD 法还可以制作微细晶粒的纯致密金属,制造形状复杂

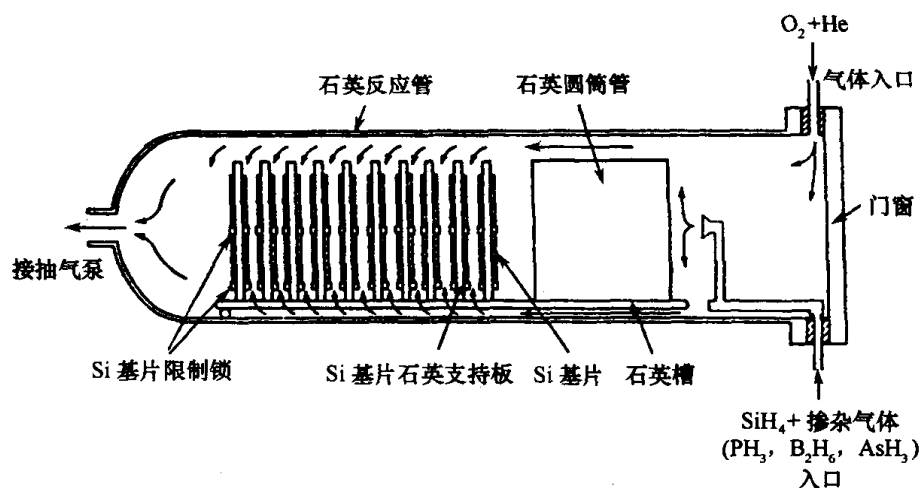


图 10-31 减压 CVD 热壁反应室结构

的金属制品,如钨坩埚、管件、喷嘴等。CVD 法涂覆难熔金属的反应式及温度由表 10-21 给出。

表 10-21 CVD 涂覆难熔金属

涂覆金属	反 应	反应温度/℃	文 献
W	$\text{WF}_6 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{W} + 6\text{HF}$	400~800	[90,92]
	$\text{WCl}_6 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{W} + 6\text{HCl}$	750~900	[91]
Mo	$\text{MoF}_6 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{Mo} + 6\text{HF}$	400~800	[92]
	$\text{MoCl}_6 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{Mo} + 6\text{HCl}$	400~1300	[94]
Cr	$\text{CrBr}_3 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{Cr} + 3\text{HBr}$	900~1000	[93]
Ta	$\text{TaF}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{Ta} + 2\text{HF}$	600~1000	[94]
V	$\text{VCl}_3 + 3/2\text{H}_2 \longrightarrow \text{V} + 3\text{HCl}$	2100~2350	[89]
Re	$\text{ReCl}_6 + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{Re} + 6\text{HCl}$	1100~1300	[88]
	$\text{ReO}_3\text{Cl} + 7/2\text{H}_2 \longrightarrow \text{Re} + \text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O}$	450	[95]
Ni	$\text{Ni}(\text{CO})_4 \longrightarrow \text{Ni} + 4\text{CO}$	100~250	[96]
Pt	$\text{Pt}(\text{CO})_2\text{Cl}_2 \longrightarrow \text{Pt} + 2\text{HCl} + 2\text{CO}$	200~600	[97]
B	$\text{BCl}_3 + 3/2\text{H}_2 \longrightarrow \text{B} + 3\text{HCl}$	1100	[98]
V-Nb 合金	—	2000~2300	[89]

4. 等离子体增强化学气相沉积(PECVD)

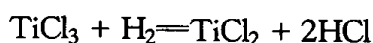
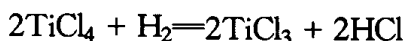
等离子体化学气相沉积有两种:

一是等离子体增强化学气相沉积(PECVD),二是等离子体化学气相沉积(PCVD)它们都是 20 世纪 70 年代发展起来的工艺。其特点是:

- ① 低温成膜,温度对基片影响小,避免了高温成膜的晶粒粗大及膜层与基片之间生成脆相;
- ② 可制备厚膜,膜层成分均匀,针孔小、致密、内应力小,不易产生微裂纹;
- ③ 等离子体对基片有清洗作用,增加了膜层的附着力;
- ④ 在不同基片上制备各种金属膜,非晶态无机物膜、有机物聚合膜。

等离子增强化学气相沉积的基本原理是:将被镀件置于低气压辉光放电的阴极上,通入适

当气体,在一定温度下,利用化学反应和离子轰击相结合的过程,在工件表面获得涂层。如果采用 TiCl_4 、 H_2 、 N_2 混合气体,在辉光放电条件下沉积氮化钛,其沉积过程反应是:



而气相物质吸收于工件表面并互相间反应,最后形成固相薄膜沉积在工件表面上。

除以上的化学反应外,还有复杂的等离子体化学反应。

反应过程中的辉光放电,有两种作用:

- ① 放电中产生的离子清洗了工件表面;
- ② 使工件得到均匀加热。为沉积膜层提供一定的温度条件。这两种作用可提高膜层结合力,加快反应速度。

PCVD 等离子体在激发电力的输入方式上有外部感应耦合方式和内部感应耦合方式;从生产过程来讲,有批量式的,半连续式的和连续式的几种,下面分别加以介绍。

(1) 外部感应耦合方式

① 批量式 PCVD 装置。

在石英管的外侧绕上高频线圈,接上供气系统抽气,系统就组成了反应器。高频线圈从外部把高频电力输给反应器中的气体,产生等离子体。这种装置的优点为:a. 构造简单,可以小型化;b. 线圈位于石英管外,由线圈材料放出的气体不会造成膜层的沾污;c. 功率集中,可得到高密度等离子体;d. 稀薄气体也能获得高的沉积速度;e. 对于较大的基片也能获得比较满意的膜厚均匀性。

当然这种小型设备主要用于实验研究。图 10-32 是制取 SiN_x 的 PCVD 装置的示意图。这种装置在相当高的压力(约 $1.3 \times 10^2 \text{Pa} \sim 4 \times 10^2 \text{Pa}$)下使用,使用低浓度($<5\%$)的 SiN_4/N_2 混合气体,RF 功率 225W, 13.56MHz, 反应压力 $4 \times 10^4 \text{Pa}$, 基体温度 300°C , 沉积速度约为 65nm/min 。

② 连续式 PCVD 装置。

图 10-33 是由装料室、沉积室、卸料室等三个部分组成的连续性 PCVD 生产装置示意图。其中沉积室由五个反应器组成,等离子激发均采用外部感应耦合方法。通过对工艺过程的控制可以进行自动化生产。

基片从装料室送到沉积室,抽真空后进行预加热,加热后的基片依次送到按一定时间隔排列的反应器中,每个反应器的反应气体均从顶部进入,废气在各自下方的排气口排出。采用 13.56MHz 的射频电源激发等离子。

在沉积室的下部。有一个被加热的传送带,用来把基片从一个反应器输送到另一个反应器,基片在每个反应器停留时进行气相沉积,通过五个反应器后达到所需要的膜厚。沉积好的

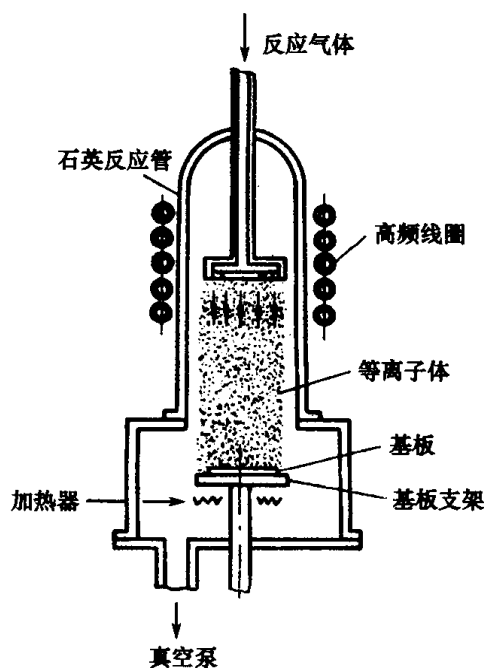


图 10-32 外部感应耦合批量式 PCVD 装置

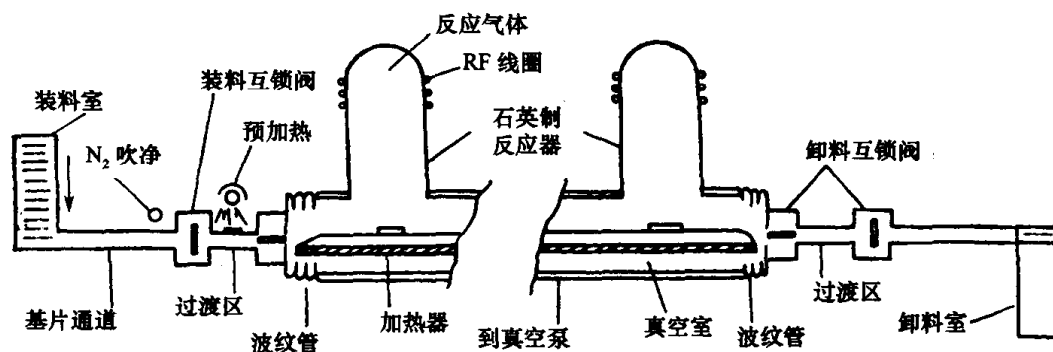


图 10-33 外部感应耦合连续式 PCVD 装置

基片由沉积室送入到卸料室，待基片的温度降到一定程度后把基片从卸料室取出。

此装置可以处理 $\phi 50\text{mm} \sim \phi 80\text{mm}$ 的样品，使用的反应气体为 SiH_4/N_2 。当使用 1.5% 的 SiH_4 ，反应压力为几百帕，可以获得近于 $100\text{nm}/\text{min}$ 的沉积速度。

这种装置的优点是，反应器中的功率集中，使用低浓度的 SiH_4 气体就能获得较高的沉积速度，而且安全较好。

(2) 内部感应耦合方式

从生产能力和膜层质量的均匀性考虑，比较理想的是具有平行平板型电极的 PCVD 装置，其等离子体的激发采用内部感应耦合方式。图 10-34 示出了各种不同的结构。电极的形状多数为圆形的，也有方形的，在连续式、半连续式装置中，方形电极更方便些。

反应器内部的基板电极和高频电极一般是对向平行布置的，如果反应气体从电极四周流向电极中心，则应使电极中心区的电场比电极四周的强一些，这样可以使电场分布的不均匀和反应气体浓度分布的不均匀互相补正，以增大膜厚的均匀区的范围。总之，要根据具体情况，合理布置反应气体的进口、废气出口，反应气体的流向、流动状态以及电场分布等等。

① 批量式装置。

如图 10-35 所示，反应器中平行向对布置电极 ($\phi 650\text{mm}$)，基板用反应器外面的加热器加

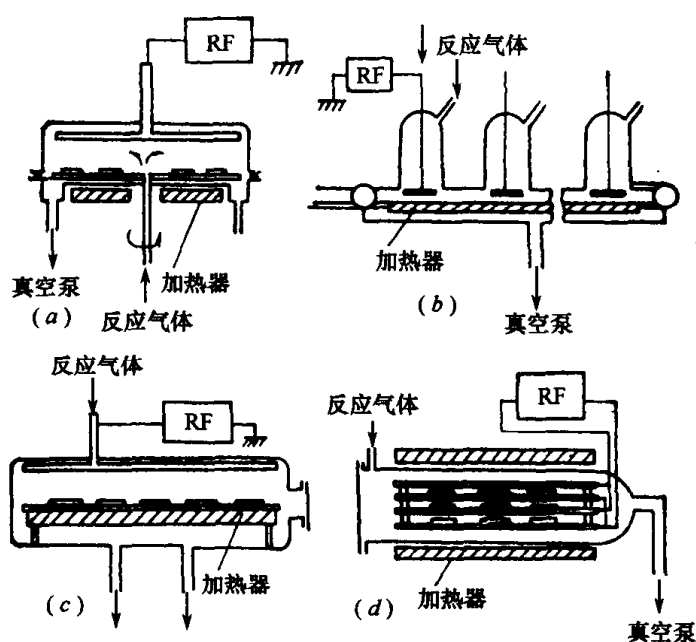


图 10-34 内部感应耦合方式的各种 PCVD 装置

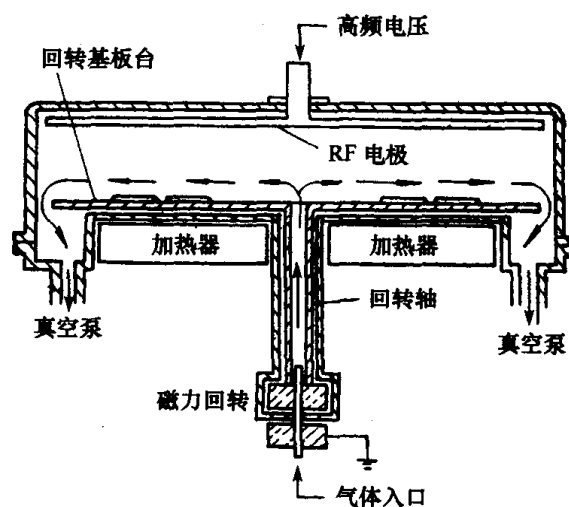


图 10-35 内部感应耦合批量式 PCVD 装置

热到 350℃,并由磁旋转机构旋转。高频电极与基板间距离约为 50mm,反应气体由基板中心流向四周(即径向流动方式),废气由基板下面的四个排气口排走。等离子体由 50RHz 的高频电源激发,维持放电的功率为 500W(约 0.15W/cm²)。

反应气体采用 SiH₄/NH₃ 系统。当沉积压力为 26Pa,功率为 500W,气体全流量为 9.75×10⁷Pa·cm³/min 时,沉积速率大约为 30nm/min。当装 28 块 φ75mm 的基片时,不同基片之间膜厚偏差±8%,而不同批量间为±10%。

在平行平板电极布置时,除了径向流动的供气方式外,还有喷淋式供气方式,其气体流动和浓度分布都比较复杂,只适用于小型简单工件的涂覆。

② 半连续式装置。

像溅射镀膜、离子镀膜等利用等离子体的沉积技术一样,当 PCVD 装置内部暴露大气时,器壁上就会吸附水蒸气等杂质,在等离子体作用下,这些杂质会解吸而沾污等离子体,进而对膜层质量产生不利的影响。PCVD 装置更易受到污染,因此使反应器处于真空状态,具有重要意义。

事实已经证明,在 SiN_x 膜,非晶硅膜中,氢的含量多少对膜层的内应力、电学性能等均有很大的影响,所以,对于这种情况要格外注意。

PECVD 的典型应用见表 10-22。

表 10-22 PECVD 的一些典型应用

应 用	膜 成 分	气 体 原 料	优 点
绝缘及纯化膜	SiO ₂ SiN _x D-PSG SiO _x N _y	SiH ₄ + N ₂ O SiCl ₄ + O ₂ Si(OC ₂ H ₅) ₄ SiH ₄ + (SiH ₂ Cl ₂) + NH ₃ SiH ₄ + PH ₃ + O ₂ SiH ₄ + NO + NH ₃ SiH ₄ + N ₂ O	温度低,可以避免 CVD 普通法由水蒸气造成的多孔;也可以避免 Na 等杂质的渗入 D-PSG 膜可以在更低的温度下制成
非晶硅太阳能电池电子感光照相静电复印	a-Si	SiH ₄ (SiH ₂ Cl ₂) + B ₂ H ₆ (PH ₃)或采用混合气体: SiH ₄ + SiF ₄ + Si ₂ H ₆	基板材料不要求用单晶,只变换掺杂介质气体就能方便地制取 P-N 结;低温(200℃ ~ 400℃),能大面积制取薄膜,所以便宜
等离子聚合	有机化合物		不必要完全破坏有机单体,选择能生成原子团的条件就能聚合成有机化合物,能获得用一般方法得不到的非晶态聚合等
耐磨抗蚀膜	TiC TiN TiC _x N _{1-x}	TiCl ₄ + CH ₄ TiCl ₄ + N ₂ TiCl ₄ + CH ₄ + N ₂	成膜温度低,膜层均匀光滑,膜层和基片附着性好,沉积速度高
其它应用薄膜	SiC Si, Ge	SiH ₄ + C ₂ H ₂ SiH ₄ + CH ₄ (或 CF ₄) SiH ₄ , GeH ₄	成膜温度低 可控制膜成分和性能,膜层均匀光滑,表面质量好

(续)

应 用	膜 成 分	气 体 原 料	优 点
其它应用薄膜	Al ₂ O ₃ GeO ₂ B ₂ O ₃ TiO ₂ SnO ₂	AlCl ₃ + O ₂ 烷基或烷氧基化合物	成膜温度低 可控制膜成分和性能,膜层均匀光滑,表面质量好
	BN P ₃ N ₅	B ₂ H ₆ + NH ₃ P + N ₂	

(七) 各种化合物薄膜及形成方法

表 10-23 给出了各种化合物薄膜形成方式,成膜条件、膜的特点及用途。

表 10-23 各种化合物薄膜及形成方法

组 成	构造 ^①	形成法 ^②	基板	形 成 条 件			膜 的 特 征	用 途
				基板温度 /℃	成膜速率 /μm·h ⁻¹	其 它		
CdS	PC	VE	石英	约 200	约 2		C 轴取向密排六方结构, 表面波速度约 1700m/s	压电换能器,超声波 放大
ZnS	SC	VE	Si (100)	275		ZnS 粉末 氧化铝坩埚	$d_{15} = 0.73 \times 10^{-13} \text{ m/V}$ (632.8nm),立方结构	压电换能器
	SC	RF-SP	NaCl (100)	20	18~54	ZnS 靶 Ar 溅射	立方结构	电致发光光波导
ZnSe	SC	RF-SP	NaCl (100)	200	0.35	ZnSe 靶 Ar 溅射	立方结构	电致发光光电器件
Al ₂ O ₃	a	RF-MSP	Si	160~300	0.9~2.1	Al ₂ O ₃ 靶 Ar/O ₂ = 1	$\epsilon^* \approx 9.96 \quad n_0 \approx 1.61 \sim 1.66$ 耐压 $4 \times 10^6 \text{ V/cm}$	MOS 表面钝化
SiO ₂	a	CVD	石英	900~1100	6~150	SiCl ₄ + O ₂ (气体)	光 波 导 损 耗 44.5dB/cm (1.15μm)6.4dB/cm(632.8nm)	MOS 表面钝化
	a	RF-MSP	玻璃	<130	1.2	SiO ₂ 靶 Ar 离子溅射	溅射气压 $1 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ RF 功率 4kW	光波导
TiO ₂		DC-MSP	玻璃	室温~200	1.4	Ti 靶 Ar/O = 85/15	$n_0 \approx 2.5 (0.5\mu\text{m})$	光学镜
ZnO	PC	RF-SP	石英	350	0.54	ZnO 靶 Ar/O ₂ = 8/2	C 轴取向	压电换能器表面波 器件光波导 光音响器件
	PC	RF-SP	玻璃	100~200	0.3~0.7	ZnO 球形靶 Ar/O ₂ = 1	C 轴取向 $\gamma = 7.5^\circ \sim 9.5^\circ$ $\phi < 3$	
	PC	RF-MSP	石英	250~320	2~3	ZnO 靶 Ar/O ₂ = 1	C 轴取向 $\sigma < 1^\circ$	

(续)

组成	构造 ^①	形成法 ^②	基板	形成条件			膜的特征	用途
				基板温度 /℃	成膜速率 / $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$	其它		
ZnO	SC	RF-SP	蓝宝石 C、 R面	600	0.2	ZnO靶 Ar/O ₂ = 1	$\rho \approx 2.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ (C面) $\rho \approx 70 \Omega \cdot \text{cm}$ (R面) $\mu_{\text{H}} \approx 2.6 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ $\sim 28 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$	压电换能器 表面波器件 光波导 光音响器件
	SC	RF-MSP	蓝宝石 R面	400	0.11~0.25	ZnO (Li ₂ O ₃)靶 Ar/O ₂ = 1	表面波速度 $\approx 5160 \text{ m/s}$ $K^2 \approx 3.5\%$	
Bi ₁₂ GeO ₂₀ (BGO)	PC	RF-SP	玻璃	100~350	0.2~0.6	BGO靶	$n_0 = 2.6$	表面波传输
RZT	PC	EB	石英 不锈钢	溅射 ≈ 350 退火 ≈ 700			铁电体, $\epsilon^* \approx 100$ (RT) $P_s \approx 4.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ $T_c \approx 340^\circ\text{C}$	光变频记忆 元件旁路电 容器
	PC	RF-SP	石英 Pt	>500		PZT52/48靶 Ar + O ₂ 溅射	铁电体, $\epsilon^* \approx 751$ (RT) $P_s \approx 21.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ $T_c \approx 325^\circ\text{C}$ $n_0 = 2.36$	
PLT	SC	RF-SP	MgO (100)	600~700	0.18~0.48	PLT18/100靶 Ar + O ₂ 溅射	$\epsilon^* \approx 700$ $n_0 \approx 2.3 \sim 2.5$ (632.8nm)	电光器件记 忆元件光开 关
PLZT	PC	RF-SP	石英 Pt	溅射 ≈ 500 退火	0.2~0.4	PLZT7/65/ 35靶 Ar + O ₂ 溅射	$\epsilon^* = 1,000 \sim 1,300$ $T_c \approx 170^\circ\text{C}$ $n_0 \approx 2.49$ (632.8nm)	
	SC	RF-SP	蓝宝石 C面 SrTiO ₃ (100)	650~700 700	≈ 0.4	PLZT9/65/ 35靶 Ar + O ₂ 溅射		
WO ₃	a	VE	玻璃	100				电致发光器 件
AlN	PC	RF-SP	玻璃	200~300		AlN靶 Ar 溅射	$\rho \approx 2000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$	压电换能器 表面波器件 光波导 光记忆器件 耐热受光器 件
	PC	DC-MSP	玻璃	320	1.3	Al靶 Ar/N ₂ 溅射	C轴取向 $\sigma = 2.9^\circ \sim 5.4^\circ$	
	SC/PC	RF-MSP	蓝宝石 C面 玻璃	50~500	0.2~0.8	Al靶 Ar/N ₂ 溅射	$\sigma = 1^\circ$ (蓝宝石) $\sigma = 3^\circ$ (玻璃)	

一、真空镀膜

(续)

组成	构造 ^①	形成法 ^②	基板	形成条件			膜的特征	用途
				基板温度 /℃	成膜速率 /μm·h ⁻¹	其它		
AlN	SC	RF-SP	蓝宝石 C、R面	1200	0.5	Al靶 NH ₃ 气溅射	表面波速度≈5500m/s K ² ≈0.05%~0.02%	压电换能器 表面波器件 光波导 光记忆器件 耐热受光器件
	SC	CVD	蓝宝石 R面	1200	3	气体 (CH ₃) Al + NH ₃ + H ₂	表面波速度≈6100m/s K ² ≈0.8%	
	SC	CVD	蓝宝石 C面	1200	3	气体 (CH ₃) Al + NH ₃ + H ₂	表面波速度≈5650m/s K ² ≈0.15%	
	SC	CVD	Si (111) (110) (100)	1260		气体 (CH ₃) Al + NH ₃ + H ₂		
Si ₃ N ₄		PCVD	Si	250	3 (200W)	气体 N ₂ + NH ₃ + SiH ₄	n ₀ =2.0~2.1	MOS IC 用钝化膜
		RF-MSP	Si	100	1	Si ₃ N ₄ 靶 Ar溅射	n ₀ =2.1(632.8nm)	
Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	SC	RF-SP	Pt (001)	700		Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂ 靶 (Bi过剩)	ε* = 120 P = 48μC/cm ² 铁电体	压电换能器 记忆元件 光波导
Bi ₁₂ TiO ₂₀	SC	RF-SP	BGO	425	0.5		光损耗 15dB/cm(632.8nm)	
Bi ₁₂ PbO ₁₉	PC	RF-SP	玻璃	100~600	0.6	Bi ₁₂ PbO ₁₉ 靶	K ₁ =0.22 压电体(470MHz)	压电换能器
Bi ₂ WO ₆	PC	RF-SP	玻璃	室温溅射 退火温度 ≈200	0.4	Bi ₂ WO ₆ 靶	n = 2.5 铁电体	压电换能器, 热电器件
(In ₂ O ₃) 0.8 (SnO ₂) 0.2 (ITO)	PC	RF-MSP	玻璃	130	≈1	ITO靶 Ar + O ₂ 气体	ρ≈10 ³ Ω·cm n≈10 ²¹ /cm ³ μ = 10cm/(V·s)	透明电极
		RF-MSP	玻璃	40	(溅射功率) ~200W φ100靶	ITO靶 Ar气压 4×10 ⁻³ Torr	R/□≈10Ω~100Ω/□	SIS 太阳 电池
K ₃ Li ₂ Nb ₅ O ₁₅ (KLN)	SC	RF-SP	K ₂ Bi- Nb ₅ - O ₁₅ (KBN) 蓝宝石	600~700	0.2	KLN靶 (K, Li过剩)	铁电体 ε* = 140 T _c = 460℃ n ₀ = 2.277(632.8nm)	光调频

(续)

组成	构造 ^①	形成法 ^②	基板	形成条件			膜的特征	用途
				基板温度 /℃	成膜速率 /μm·h ⁻¹	其它		
LiNbO ₃ (LN)	a	RF-SP	石英	室温	0.38	LN靶 Ar/O ₂ = 1	$\epsilon^* \approx 10^4$ (200℃ ~ 300℃, 1kHz)	光波导 热电器件 光音响器件
	SC	RF-SP	蓝宝石 C面	500	0.025	LN靶 Ar + O ₂ 气体	铁电体 $n_0 = 2.32$ 光传播损失 9dB/cm (632.8nm)	
	SC	液相	LiTa- O ₃ C面	850			$n_0 = 2288$ 光传播损失 11dB/cm (632.8nm)	
PbTiO ₃	a	DC-MSP	玻璃	200	0.3	Ti/Pb靶 Ar/O ₂ = 1	$\epsilon^* = 120(\text{RT})$ $T_c = 490^\circ\text{C}$	热电器件 光音响器件 旁路电容器
	PC	RF-SP	Pt	610	0.24 ~ 0.3	PbO/TiO ₂ 靶 Ar + O ₂ 气体	$\epsilon^* \approx 200(\text{RT})$	
	SC	RF-SP	蓝宝石 C面	620	0.3 ~ 0.6	PbTiO ₃ 粉末 靶 Ar + O ₂ 气体		
TiN	PC	DC-MSP	玻璃	150	0.6 ~ 1.8	Ti靶 Ar/N ₂ = 7/3	$\rho = 250\mu\Omega\cdot\text{cm}$ $\text{TCR} = 150 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	精密电阻膜
	PC	RF-MSP	石英	500	1.5	TiN靶 Ar 溅射		
NbN	PC	RF-SP	玻璃	300	0.6	Nb靶 Ar + N ₂ 溅射	$\rho = 10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ (100)取向	超导膜, 约瑟夫森器件
	SC	DC-SP	MgO (100)	400 ~ 600		Nb靶 Ar + N ₂ 溅射	$T_c \approx 16\text{K}$	
B ₄ C	a	RF-SP	蓝宝石	450	~0.5	B ₄ C靶 Ar 溅射	HV = 4800N/cm ²	耐磨损镀层
SiC	a	RF-SP	玻璃	600	0.2 ~ 0.7	Si靶 Ar + CH ₄ 气溅射	红外吸收 800cm ⁻¹ (Si-C) 2000cm ⁻¹ (Si-H)	高温热敏电阻, 蓝色发光器件, 耐蚀耐磨损镀层, 温度传感器
	PC	RF-SP	石英 氧化铝	550	0.5 ~ 1	SiC靶 Ar 溅射	$\beta\text{-SiC}$, (220)取向 $\rho = 2000\Omega\cdot\text{cm}$ $B = 2100\text{K}$	
	SC	IP	Si (111)	1000	0.9 ~ 1.8	Si, C ₂ H ₂ 反应 IP	$\beta\text{-SiC}$	
	SC	CVD	Si (100)	1330	4 ~ 6	H ₂ + SiH ₄ + C ₃ H ₈ 气体	$\beta\text{-SiC}$ 碳缓冲层	
GaAs	SC	MBE	GaAs	600	石墨坩埚 Ga (1090℃)	As(320)℃	$n_{300} = 2.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ $\mu_{300} = 7500\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	
	SC	RF-SP	GaAs (100)	500 ~ 625	0.7 ~ 1.2	GaAs靶 Ar 溅射	$\rho = 10^5\Omega\cdot\text{cm} \sim 10^8\Omega\cdot\text{cm}$ $\mu_{300} \approx 5000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	

一、真空镀膜

(续)

组成	构造 ^①	形成法 ^②	基板	形成条件			膜的特征	用途
				基板温度 ℃	成膜速率 /μm·h ⁻¹	其它		
GaSb	SC	MBE	GaAs				p型半导体 $n_{300} = (4 \sim 6) \times 10^{16} / \text{cm}^3$ $\mu_{300} = 670 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$	
	a	RF-SP	BaF ₂ (111)	400	0.15	GaSb 靶 Ar 溅射		
InAs	SC	MEE	GaAs	450~600	0.36~1		n型半导体 $n_{300} = (4 \sim 6) \times 10^{16} / \text{cm}^3$ $\mu_{300} = 16700 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$	半导体激光器, 光导波路, 光 IC, 微波 FET, 混频二极管, 太阳能电池
In _{1-x} Ga _x Sb	SC	RF-SP	BaF ₂ (111)	400	0.15	InSb, GaSb 靶 Ar 溅射	$x = 0.36$	
Nb ₃ Sn		DC-MCP	蓝宝石	650~800	60	Nb ₃ Sn 靶 Ar 溅射	$T_c \approx 18.3 \text{K}$	超导膜, 约瑟夫森器件

注: ① a—非晶态; PC—多晶体; SC—单晶体。
 ② VE—真空蒸镀; RF-SP—射频溅射; RF-MSP—射频磁控溅射; CVD—化学气相沉积;
 DC-MSP—直流磁控溅射; LPE—液相外延; EB—电子束; PCVD—等离子体化学气相沉积;
 DC-SP—直流二极溅射; IP—离子镀; MBE—分子束外延

(八) 真空镀膜设备国家标准

1. 真空镀膜设备型号编制方法(摘自 JB/T7673—95)

真空镀膜机(以下简称镀膜机)

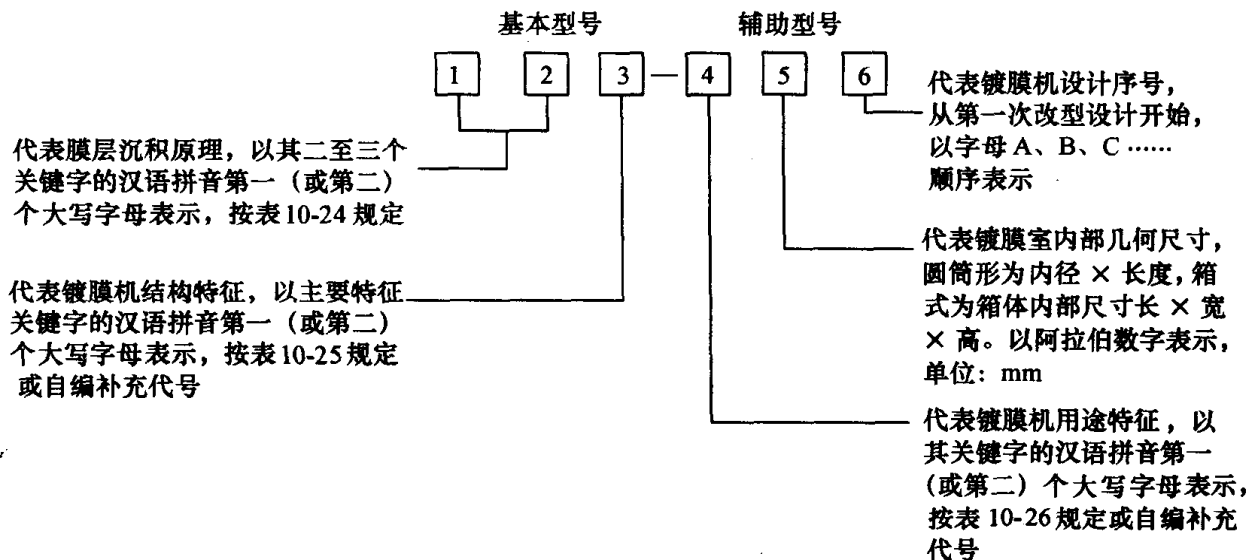


表 10-24 基本型号编制

设备按膜层沉积原理的分类		代 号	关键字意义及拼音字母	
蒸 发	电阻加热蒸发	ZZ	蒸—zheng, 阻—zu	
	电子束加热蒸发	ZS	蒸—zheng, 束—shu	
	高频感应加热蒸发	ZG	蒸—zheng, 感—gan	
	激光束加热蒸发	ZJ	蒸—zheng, 激—ji	
	兼有电阻蒸发源及电子束蒸发源	ZZS		
溅 射	直 流 溅 射	直流溅射	J	溅—jian,
		直流磁控溅射	JC	溅—jian, 磁—ci
		直流反应性溅射	JF	溅—jian, 反—fan
		直流吸附溅射	JX	溅—jian, 吸—xi
		直流偏压溅射	JP	溅—jian, 偏—pian
	高 频 溅 射	高频溅射	JG	溅—jian, 高—gao
		高频磁控溅射	JGC	溅—jian, 高—gao, 磁—ci
		高频反应性溅射	JGF	溅—jian, 高—gao, 反—fan
		高频吸附溅射	JGX	溅—jian, 高—gao, 吸—xi
		高频偏压溅射	JGP	溅—jian, 高—gao, 偏—pian
离 子 沉 积	电阻蒸发离子镀膜	LZ	离—li, 阻—zu	
	电子束蒸发离子镀膜	LS	离—li, 束—shu	
	高频感应蒸发离子镀膜	LG	离—li, 感—gan	
	空心阴极离子镀膜	LK	离—li, 空—kong	
	溅射离子镀膜	LJ	离—li, 溅—jian	
	多弧阴极离子镀膜	LD	离—li, 多—duo	
	簇团离子镀膜	LC	离—li, 簇—cu	
化学气 相沉积	低压化学气相沉积	HD	化—hua, 低—di	
	等离子化学气相沉积	HL	化—hua, 离—li	
	光化学气相沉积	HG	化—hua, 光—guang	
复合式	兼有蒸发源及溅射源	FZJ	复—fu, 蒸—zheng, 溅—jian	
	兼有不同原理沉积源	F□□ ^①	复—fu, □□意义见注	

注:① 分别表示几种不同沉积原理关键字汉语拼音的第一(或第二)个字母(印刷体大写)

注:① 分别表示几种不同沉积原理关键字汉语拼音的第一(或第二)个字母(印刷体大写)

表 10-25 镀膜机结构特征以字母表示

结 构 特 征	代 号	关键字意义 及拼音字母	结 构 特 征	代 号	关键字意义 及拼音字母
平面溅射	P	平—ping	连续式	L	连—lian
同轴溅射	T	同—tong	半连续式	B	半—ban
倒锥式溅射	A	倒—dao	多室式	D	多—duo
卧式	W	卧—wo	箱式	X	箱—xiang

注:对二极、三极或四极溅射的镀膜设备,以相应的阿拉伯数字表示,标记于型号的首位

表 10-26 镀膜机用途特征以字母表示

用 途 特 征	代 号	关键字意义 及拼音字母	用 途 特 征	代 号	关键字意义 及拼音字母
塑料镀膜	S	塑—su	晶体镀膜	T	体—ti
制镜镀膜	J	镜—jing	电阻镀膜	Z	阻—zu
硒鼓镀膜	G	鼓—gu	电容镀膜	R	容—rong

(续)

用途特征	代 号	关键字意义 及拼音字母	用途特征	代 号	关键字意义 及拼音字母
刀具镀膜	D	刀—dao	光学镀膜	U	光—guang
装饰镀膜	H	饰—shi	电气元件镀膜	Y	元—yuan

2. 真空镀膜设备通用技术条件(摘自 GB/T11164—99)

本标准适于压力在 $10^{-4}\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 范围内蒸发类、溅射类、离子镀类真空镀膜设备(以下简称设备)。

(1) 设备主要技术参数

设备的主要技术参数见表 10-27。

表 10-27 真空镀膜设备技术参数

项 目	参 数 名 称		参 数 数 值	
1	镀膜室尺寸分挡/mm		320*、500*、600*、630*、700*、800*、900*、1 000*、 1 200*、1 250*、1 400、1 600*、1 800、2 000*	
2	真空	分挡	A	B
	指标	极限压力/Pa	$\leq 5 \times 10^{-4}$	$\leq 5 \times 10^{-3}$
		抽气时间/min	$\leq 20(10^{-5}\text{Pa} \sim 7 \times 10^{-3}\text{Pa})$	$\leq 10(10^{-5}\text{Pa} \sim 7 \times 10^{-2}\text{Pa})$
3	沉积源 指标	沉积源型式、尺寸、数量及最大耗电功率	根据设计要求	
4	工件架 指标	工件架尺寸及转动方式 工件烘烤方式及烘烤温度		
5	离子轰击,工件偏压功率			
6	膜厚监控方式及控制精度			
7	设备控制方式			
8	设备最大耗电量			

注:1. 所列镀膜室的几何尺寸,对圆柱式室体为圆柱内径;对箱式室体为箱体内部宽度,带*号尺寸优先选用,其它尺寸和其它结构形式的设备可由制造厂参照上述尺寸决定,专用设备由用户与制造厂另订协议。

2. 本尺寸分挡作为推荐值,不作考核

(2) 极限压力的测定

① 试验条件:

- 镀膜室内为空载(即不放置被镀件);
- 真空测量规管应装于镀膜室壁上或最靠近镀膜室的管道上;
- 所用真空计应为设备本身的配套者, 并应在有效期内;
- 允许在抽气过程中用设备本身配有的加热轰击装置对镀膜室进行除气;
- 对具有中隔板、上卷绕室和镀膜室的卷绕镀膜设备, 应在两室同时抽气时对镀膜室的压力进行测试。

② 测试方法: 在对镀膜室连续抽气 24h 之内, 测定其压力的最低值, 定为该设备的极限压力。当压力变化值在 0.5h 内不超过 5% 时, 取测量表读数最高值为极限压力值, 且镀膜室内各旋转密封部位处于运动状态。

(3) 抽气时间的测定

① 试验条件:同极限压力测定的试验条件之 a、b、c、d。

② 测试方法:设备在连续抽气条件下,在镀膜室内达到极限压力之后,打开镀膜室 15min,再关闭镀膜室对其再度抽气至表 10-31 中所规定的压力值所需的时间,定为该设备的抽气时间。

(4) 升压率测定

① 试验条件:同极限压力测定。

② 测试方法:设备在连续抽气 24h 之内使镀膜室内达到稳定的最低压力之后,关闭与镀膜室相连接的真空阀,待镀膜室压力上升至 p_1 (1Pa) 时,开始计时,经 1h 后记 p_2 ,然后按下式计算升压率:

$$R = \frac{p_2 - p_1}{t} \quad (10-8)$$

式中 R ——镀膜室的升压率[Pa/h]; p_1 ——镀膜室的起始压力[Pa]; p_2 ——镀膜室的终止压力[Pa]; t ——压力由 p_1 升至 p_2 的时间[h]。

3. 真空蒸发镀膜设备(摘自 JB /6922—93)

(1) 适用范围

本标准适用于极限压力在 7×10^{-3} Pa ~ 7×10^{-4} Pa 范围的真空蒸发镀膜设备(以下简称设备)。

(2) 型式与基本参数

设备主要由镀膜室、真空机组、保护装置及电气控制装置组成。

设备的基本参数应符合表 10-28 的规定。

表 10-28 蒸发镀膜设备基本参数

参数名称	参数数值	
	A	B
极限压力/Pa	$\leq 7 \times 10^{-4}$	$\leq 7 \times 10^{-3}$
抽气时间/min(从大气压抽至 p_2 /Pa)	$\leq 30(2 \times 10^{-3})$	$\leq 20(5 \times 10^{-2})$
镀膜室直径/mm	320, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000	
工件烘烤装置烘烤温度调节范围/℃	0~200, 0~300, 0~350, 0~400	
有效加热区加热均匀度/%	≤ 5	

(3) 试验方法

① 镀膜室极限压力。镀膜室内为空载(即不放置被镀物品),用设备配套的真空系统对镀膜室进行抽气(在抽气过程中,允许用设备本身配有的加热或轰击等装置对镀膜室进行除气),24h 内测量镀膜室压力,在 30min 内变化不超过 5% 时(此时各动密封部位应处于静止状态),取其达到的最低值即为极限压力。

② 升压率。将设备抽至极限压力后,再抽 4h(允许除气),然后关闭镀膜室所有与真空机组相通的阀门,待镀膜室压力升至 p_1 (1Pa) 时,开始计时,经 30min,记录压力 p_2 ,然后按下式计算升压率

$$R = \frac{p_2 - p_1}{30} \quad (10-9)$$

式中 R ——镀膜室的升压率[Pa/min];

p_1 ——开始测镀膜室升压率的压力[Pa];

p_2 ——终止测镀膜室升压率的压力[Pa]。

③ 镀膜室抽气时间。将设备抽至极限压力后,关闭镀膜室所有与真空机组相通的阀门,对镀膜室进行放气,并打开镀膜室暴露大气 15min,然后关闭镀膜室进行抽气。从抽气开始至到达规定真空度所需的时间为镀膜室抽气时间。

④ 电阻蒸发器通电试验。镀膜室进行清洁处理后,装入电阻蒸发器及蒸镀材料,然后抽空镀膜室至压力低于工作压力时,接通蒸发电源,逐渐加热,使蒸发电流达到 JB/T 6922-93 规定(即每个蒸发器加热器应在电压为 4V~20V,电流为 50A~130A 状态下正常工作),此时蒸发器应达白炽状态。蒸发结束后,蒸发器上的蒸镀材料应全部蒸发。

⑤ 镀膜室工件烘烤装置有效加热区加热均匀度的测量。启动真空系统抽空到工作压力,接通烘烤装置电源,当温度达到最高烘烤温度并保持 10min 后,在被镀工件与烘烤装置之间、距工件表面 10mm 处的有效加热区内,用热电偶或其它相当的温度传感器测量 3~5 点温度(能反映最大温差),各点应同时测量(允许使用转换开关)。然后求各测量点温度与平均温度最大相对偏差作为加热均匀度,其计算按下式

$$G_i = \frac{|t_i - t_{cp}|}{t_{cp}} \times 100 \quad (10-10)$$

式中 G_i ——第 i 点有效加热区加热均匀度[%];

t_i ——第 i 点温度[℃];

t_{cp} —— n 个测点平均温度[℃]。

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

4. 真空溅射镀膜设备(摘自 JB/T8945—99)

本标准适用于压力在 1×10^{-4} Pa ~ 5×10^{-1} Pa 范围的真空溅射镀膜设备(以下简称设备)。

(1) 型号与基本参数

设备的型号应符合 JB/T7673—95 的规定。设备的基本参数应符合表 10-29 的规定。

表 10-29 基本参数

参数名称	参数数值	
	A	B
极限压力/Pa	$\leq 5 \times 10^{-1}$	$\leq 5 \times 10^{-1}$
恢复真空抽气时间/min	从大气压至 7×10^{-5} Pa ≤ 20	从大气压至 7×10^{-2} Pa ≤ 10
溅射电流变化率/%	$< \pm 5$	

(2) 极限压力

① 试验条件:

a. 镀膜室内为空载(即不放被镀物品);

- b. 真空测量规管应装于镀膜室靠近排气口位置上;
c. 允许在抽气过程中用设备本身配有的加热或轰击装置对镀膜室进行除气。

② 测试方法:按“2. 真空镀膜设备通用条件”中的此项参数测试方法。

(3) 镀膜室恢复真空抽气时间

① 试验条件:同极限压力测试。

② 测试方法:按“2. 真空镀膜设备通用条件”中的此项参数测试方法。

(4) 升压率

① 试验条件:同极限压力测试。

② 测试方法:按“2. 真空镀膜设备通用条件”中的此项参数试验方法。

(5) 溅射电流的变化率

设备在镀膜过程中,阴极稳定工作后,测得溅射电流在 3min 范围内(若镀膜过程少于 3min,则在整个镀膜过程内的)的变化值,并按下式计算变化率

$$W = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}} \times 100\% \quad (10-11)$$

式中 W ——溅射电流的变化率;

I_{\max} ——正常工作时实测最大溅射电流值[A];

I_{\min} ——正常工作时实测最小溅射电流值[A]。

(6) 测量用仪表设备

① 测量极限压力、镀膜室恢复真空抽气时间、升压率所使用的真空计应为设备本身配套者,并应在有效期限内。

② 测量溅射电流的变化率所用的电流表应为设备本身配套者,并应在有效期限内。

5. 真空离子镀膜设备(摘自 JB/T 8946—99)

(1) 适用范围

本标准适用于压力在 $10^{-4}\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 范围的真空离子镀膜设备(以下简称设备),具体包括如下类型:多弧离子镀、电弧放电型真空离子镀、空心阴极离子镀(HCD)、射频离子镀(RFIP)、直流放电二极型(DCIP)、多阴极型、活性反应蒸发镀(ARE)、增强型 ARE、低压等离子体离子镀(LFPD)、电场蒸发离子镀、感应加热离子镀、簇团离子束镀等。

(2) 设备主要技术参数

设备主要技术参数应符合表 10-30 规定

表 10-30 离子镀膜设备主要参数

分 挡	A	B
极限压力/Pa	$\leq 5 \times 10^{-4}$	$\leq 5 \times 10^{-3}$
抽气时间/min	$\leq 20(10^5\text{Pa} \sim 7 \times 10^{-3}\text{Pa})$	$\leq 10(10^3\text{Pa} \sim 7 \times 10^{-2}\text{Pa})$

(3) 结构要求

① 设备中的真空管道、静态密封零部件(法兰、密封圈等)的结构型式,应符合 GB/T 6070 的规定。

② 在低真空和高真空管道上及真空镀膜室上应安装真空测量规管,分别测量各部位的真空度。当发现电场对测量造成干扰时,应在测量口处安装电场屏蔽装置。

③ 如果设备使用的主泵为扩散泵时,应在泵的进气口一侧装设油蒸气捕集阱。

④ 设备的镀膜室应设有观察窗,观察窗上应设有挡板装置。观察窗应能观察到沉积源的工作情况以及其他关键部位。

⑤ 离子镀沉积源的设计应尽可能提高镀膜过程中的离化率,提高镀膜材料的利用率,合理匹配沉积源的功率,合理布置沉积源在真空室体的位置。

⑥ 合理布置加热装置,一般加热器结构布局应使被镀工件温升均匀一致。

⑦ 工件架应与真空室体绝缘,工件架的设计应使工件膜层均匀。

⑧ 离子镀膜设备一般应具有工件负偏压和离子轰击电源,离子轰击电源应具有抑制非正常放电装置,维持工作稳定。

⑨ 真空室接不同电位的各部分间的绝缘电阻值的大小,均按 GB/T 11164—99 中相关规定。

(4)测试方法

极限压力、抽气时间、升压率的测试方法分别同“2. 真空镀膜设备通用条件”的相应参数的测试方法。

(九) 国产真空镀膜设备概况

我国真空镀膜设备研制始于 20 世纪 50 年代,当时研制了各种蒸发式真空镀膜设备,满足了光学事业发展需要。进入上世纪 70 年代以后,由于国民经济各种领域的需求,各类真空镀膜设备得到了长足的发展。目前各类镀膜设备基本齐全,种类繁多,满足了各行业的需要。真空镀膜设备主要类型有真空蒸发镀膜设备、磁控溅射镀膜设备、离子镀膜设备、化学气相沉积镀膜设备等。各类镀膜设备及生产厂家见表 10-31。其主要性能见表 10-32~表 10-35。

表 10-31 国产真空镀膜设备

序号	设备名称	用途	生产厂家
1	216 天文望远镜镀膜设备 ^①	镀膜大型天文望远镜反射膜、增透膜及保护膜	兰州物理研究所
	TD-2800 型天文望远镜镀膜设备		
	LDH 系列多弧离子镀膜设备		
	JC-平面磁控溅射镀膜机		
	ZZ-卷绕式镀膜机		
2	电阻—电子枪蒸发镀膜设备	光学膜、半导体膜、导电膜	上海曙光机械制造厂
	ZZ-2400 型、ZZ-2400B 型、ZZ-2400C 型、ZZ-2400D 型高真空卷绕式镀膜设备	纸品及塑料膜上镀膜	
	ZZB-2500 型高真空卷绕镀膜机	纸品及塑料膜上镀膜	
	ZZ-1800K 高真空系列卷绕镀膜机	纸品及塑料膜上镀膜	
	ZZ-1380 高真空系列卷绕镀膜机	纸品及塑料膜上镀膜	
	ZZ-1800KIV 系列高真空卷绕式镀膜设备	纸品及塑料膜上镀膜	
	JCJ-D1200 系列磁控溅射卷绕镀膜机	塑料基材上溅射太阳控制膜,低辐射膜,ITO 导电膜	
	KC-3A 光盘镀膜机	光盘镀膜	
	KD 系列高真空光学镀膜设备	光学器件镀膜、激光器件镀膜、微电子器件	
	ZZ-1688V 双开门系列装饰镀膜机	塑料、陶瓷、化妆镜镀膜	
	ZZ-1688-56 系列高真空装饰镀膜机	塑料、陶瓷镀铝	

(续)

序号	设备名称	用途	生产厂家
3	ZZD-1000、ZZD-1600、ZZD-2050 汽车灯具镀膜设备	汽车灯具镀金属膜、非金属膜、金属氧化膜	兰州真空设备有限责任公司
	DLK-600、DLK-800、DLK-1100 空心阴极离子镀膜设备	仿金 TiN 装饰膜、TiC、TiN 硬质膜	
	TG-6/D ₂ 、TG-8D、TG-10D ₄ /JP、TG-14D ₄ 多弧离子镀膜设备	表壳、表带、小五金装饰镀膜	
	ZZL 系列真空蒸发卷绕镀膜设备(8 种规格)	纸张、塑料镀金属膜	
	JPTD 系列真空磁控溅射镀膜设备(8 种规格)	金属膜、ITO 导电膜、工艺美术及装璜装饰膜、电子器件	
4	高真空多功能磁控溅射设备	多层金属膜、磁性膜、高温超导膜、半导体膜、绝缘膜	沈阳中科仪器技术发展有限责任公司
	多对向靶磁控溅射设备	氧化膜、单晶膜	
	多弧离子镀膜机	仿金装饰膜、硬膜	
	FJL520 型磁控与离子束复合溅射设备	金属膜、半导体膜、介质膜、磁性膜	
	FJL560 型超高真空磁控与离子束复合溅射设备		
	磁控与离子束复合镀膜设备		
	JGP240 超高真空高温超导磁控溅射设备	主要用于大面积多层高温超导薄膜的制备	
	JGP350 多靶磁控溅射设备	用于制备各种单层或多层介质膜、半导体膜、金属膜	
	JGP450 磁控溅射设备	用于制备各种金属膜、介质膜、半导体膜。广泛用于生产和工艺研究	
	JGP500 高真空多靶磁控溅射设备	用于制备各种单层或多层介质膜、半导体膜、金属膜等	
	JGP560 超高真空多功能磁控溅射设备	用于制备各种金属膜、半导体膜、介质膜、磁性膜、光学膜、超导膜、传感器膜以及各种特殊需要的功能薄膜等	
	JGP600 超高真空多靶磁控溅射设备	制备各种金属膜、介质膜、半导体膜、集成光学薄膜、高精度磁性记录材料以及表面处理方面的耐腐蚀薄膜、耐热合金膜、装饰薄膜、硬质薄膜等	
	PLD400 型脉冲激光镀膜设备	超导膜、半导体膜、超硬膜	
	PCVD 非晶硅太阳能电池设备	非晶硅膜、太阳电池	
	PCVD-300 型等离子体化学气相沉积设备	非晶态膜、多晶膜、硬膜、金属膜、有机金属膜、非晶硅太阳电池	
	磁控—电子束蒸发连续镀膜设备	超导膜、磁性膜、半导体膜、光学膜	
	EB-700 型电阻—电子蒸镀设备	导电膜、半导体膜、光学膜	
	EHB-400 型电阻蒸发镀膜设备	导电膜、半导体膜、铁电体膜、光学膜	

一、真空镀膜

(续)

序号	设备名称	用途	生产厂家
5	DM 系列真空镀膜机	反射膜、透射膜、滤光膜、电学膜、装饰膜	北京北仪 创新真空 技术有限 责任公司
	ZZSX 系列电子束镀膜机	多层膜、滤光片、反射膜、透射膜	
	LDH 系列多弧离子镀膜机	镀制不锈钢板、小五金装饰膜、模具及刀具硬膜	
	XJPB-2200 型磁控溅射平板玻璃镀膜生产线	多种彩色幕墙玻璃,单层膜、反应膜、复合膜	
	LDSX-1100 光学反应离子镀膜机	氧化物、氮化物及碳化合物光学膜	
	JTR-700 集热管镀膜机	太阳能集热管镀膜	
	ZZI-800 型晶体镀膜机	镀制钽表石英振子	
	JDD-700 型多功能磁控溅射镀膜机	TiN、TiC 膜	
	DMS-700 型塑料金属化镀膜机	塑料、金属及玻璃制品上镀铝和铜、装饰膜	
6	射频多靶磁控溅射镀膜设备	光学膜、光导传输膜、电学膜、半导体膜、集成电路表面功能膜、防腐膜、硬膜	沈阳真空 技术研究 所
	ITO 透明导电玻璃真空镀膜生产线	液晶显示器导电电极薄膜光导、太阳能电池功能窗、红外反射涂层	
	多弧离子镀膜机	反应膜、金属膜、仿金膜、防腐膜、硬膜	
7	ZZW-H1400 II 型高真空装饰镀膜机	装饰膜	上海真空 泵厂
	ZZW-B2400 II 型幕墙玻璃镀膜机	玻璃镀多色膜	
8	JS3X-100B、JS3S-100B 系列磁控溅射台	微电子、微机械、光电子等领域	北京创威 纳科技有 限公司
	PECVD-8000A 型等离子体化学淀积台	淀积 SiO ₂ 、Si ₃ N ₄	
	PECVD 等离子体化学空相淀积台系列设备	淀积 SiO ₃ N、SiO 磷硅玻璃非晶硅、碳化硅、类金刚石等多积薄膜材料	
9	ZZ1100-1/Z 型卷绕真空镀膜机	广泛适用于 BOPP、OPP、PETPC 等塑料薄膜、纸及化纤纺织品带材的镀铝或镀铝锌复合膜(其中型号分母 Z:包装应用;D:电学应用)	成都国投 南光有限 公司
	ZZ1100-2/Z 型卷绕真空镀膜机		
	ZZ1300-1/Z 型卷绕真空镀膜机		
	ZZ1300-2/Z 型卷绕真空镀膜机		
	ZZ650-2/D 型卷绕真空镀膜机		
10	ZZ500/630/700/800/900/1100/1250/1500/1800/2000-1/G 型箱式真空镀膜机	主要用于各种光学薄膜、多层电学膜(其中:型号分母 G 为光学应用;D 为电学应用)	成都国投 南光有限 公司
	ZZS500/630/700/800/1250/1500/1800/2000-1/Z 型箱式真空镀膜机		
11	JC600-1/D 型磁控溅射真空镀膜机	用于矩形片状工件镀膜,基片尺寸:280mm×100mm,铝层厚度:20μm/h	成都国投 南光有限 公司
	JC600-2/D 型磁控溅射真空镀膜机 ^②	适用科研、生产和砷化镓基片亚微米级镀膜,铝层厚度为 2420μm/h	
	JC500-1/D 型磁控溅射真空镀膜机	圆形片状工件镀膜,铝膜厚度:16μm/h	
	JC500-5/D 型磁控溅射真空镀膜机	矩形片状工件,基片尺寸:150mm×150mm,铝膜厚度:10μm/h	
	JC800-6/D 型磁控溅射真空镀膜机 ^③	适合科研、生产,0.5μm 大规模集成电路及光盘、磁盘,镀膜厚度 50μm/h	
注:① 镀膜机口径 2800mm,可镀 2200mm 反射镜及 SIO 保护膜; ②JC600-2/D 型磁控溅射真空镀膜机,可自转、公转、水平装片,低温泵系统; ③JC800-6D 型磁控溅射真空镀膜机,能全自动盒对盒、水平短距离操作,低尘粒,低温泵、分子泵系统			

表 10-32 国产真空蒸发镀膜机主要性能表

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	工件架尺寸 /mm	蒸发源功率/kW		烘烤温度 /℃	离子轰击		总功率 /kW	生产厂家
						电阻 加热	电子束 加热		电压 /kV	功率 /kW		
1	216 天文望远镜专用 镀膜设备	2.3×10^{-4}	<40	2840	2200	11		120	6	3	60	兰州物理研 究所
2	TD-2800 天文望远镜 镀膜设备	2.0×10^{-4}	<35	$\phi 2800 \times 5000$	400~2160	(丝源 11 舟源 9)	6	120	6	3	60	
3	箱式真空镀膜机											国投南光有 限公司
	ZZS500 型			$\phi 500 \times 650$	$\phi 400$						15	
	ZZS630 型			$\phi 630 \times 750$	$\phi 560$						18	
	ZZS700 型		<15	$\phi 700 \times 850$	$\phi 640$						25	
	ZZS800 型	3×10^{-4}	(1×10^{-5} Pa 抽至	$\phi 800 \times 900$	$\phi 730$	4.5	4~10	350	3	0.6~1	30	
	ZZS900 型		1×10^{-3} Pa)	$\phi 900 \times 1000$	$\phi 820$	(2 只)					35	
4	箱式真空镀膜机											
	ZZS500-2/D ZZS-700-6/G	4×10^{-4} 3×10^{-4}	<20 <15	$\phi 500 \times 650$ $\phi 710 \times 850$		4.5	8 4	350 350				
5	高真空光学镀膜设备											上海曙光机 械厂
	KD-650 型			$\phi 650 \times 800$			5	300		0.6	20	
	KD-800 型	6×10^{-4}	<30	$\phi 800 \times 900$		5	5	300	3	0.6	25	
	KD-1100 型			$\phi 1100 \times 900$			5	300		0.9	40	
6	ZZ-1688V 双开门系列 装饰镀膜机	5×10^{-3}	<8	$\phi 1400 \times 1600$								

(续)

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	工件架尺寸 /mm	蒸发源功率/kW		烘烤温度 /℃	离子轰击		总功率 /kW	生产厂家
						电阻 加热	电子束 加热		电压 /kV	功率 /kW		
7	ZZ-1688-56 系列高真空装饰镀膜机	5×10^{-3}	<8	$\phi 1400 \times 1688$								上海曙光机械厂
8	电子束沉积设备 DZS-500 型 DZS-600 型 DZS-800 型	6.7×10^{-5}	≤ 30 ($1 \times 10^5 \text{Pa}$ 抽至 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$)	$500 \times 500 \times 600$ $650 \times 600 \times 700$ $800 \times 800 \times 860$	$\phi 300$	2.5	6	600			22 26 36 10	沈阳中科仪 技术发展有 限责任公司
9	DZ-400 型电阻热蒸发 沉积设备											
10	箱式前开门多层电子束镀膜机 ZZSX-500 型 ZZSX-600 型 ZZSX-800 型 ZZSX-1100 型	5×10^{-4}	≤ 20 ($1 \times 10^5 \text{Pa}$ 抽至 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$)	$500 \times 500 \times 680$ $650 \times 600 \times 700$ $800 \times 800 \times 860$ $1100 \times 1100 \times 1200$	$\phi 460$ $\phi 580$ $\phi 740$ $\phi 1000$	2.5 5 10	6		3.4		22 26 36 48	北京北仪创 新真空技术 有限责任公 司
11	高真空镀膜机 GZD-300 型 GZD-500B 型 GZD-600 型 PDM-500 型 ZDW-10 型	6.7×10^{-4} 4×10^{-4} 4×10^{-4} 4×10^{-4} 1.5×10^{-3}	≤ 20 ($1 \times 10^5 \text{Pa}$ 抽至 $2.7 \times 10^{-3} \text{Pa}$) ≤ 20 ($1 \times 10^5 \text{Pa}$ 抽至 $7 \times 10^{-3} \text{Pa}$)	$\phi 300 \times 400$ $\phi 500 \times 670$ $\phi 600 \times 660$ $\phi 500 \times 570$ $\phi 1000 \times 1000$		2 3 3 20	10				3.5 12 12 20 55	辽宁锦州真 空设备制造 总厂

(续)

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	工件架尺寸 /mm	蒸发源功率/kW		烘烤温度 /℃	离子轰击		总功率 /kW	生产厂家
						电阻 加热	电子束 加热		电压 /kV	功率 /kW		
12	卷绕式真空镀膜机系 列 ZDL-6B型 ZDL-13型 ZZ-650型 ZG-15型	1.3×10^{-3}	$\leq 30(1 \times 10^5 \text{Pa 抽至}$ $6.7 \times 10^{-3} \text{Pa})$	$\phi 600 \times 560$		16					25	辽宁锦州真 空设备制造 总厂
		1.3×10^{-2}	$\leq 15(1 \times 10^5 \text{Pa 抽至}$ $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa})$	$\phi 1300 \times 1260$		32					93	
		1.3×10^{-3}	$\leq 15(1 \times 10^5 \text{Pa 抽至}$ $6.7 \times 10^{-2} \text{Pa})$	$\phi 650 \times 450$		8					18	
		20×10^{-3}	$\leq 20(1 \times 10^5 \text{Pa 抽至}$ $4 \times 10^{-2} \text{Pa})$	$\phi 1500 \times 1200$		50					160	
13	ZS-850 光学镀膜机	5×10^{-4}	≤ 20	$\phi 800$	$\phi 800 \times 1600$	5	5			1.5	44	上海真空泵 厂
14	ZZW-H1400 II 高真空 装饰镀膜机	6×10^{-3}	≤ 15	$\phi 850 \times 800$		20						
15	汽车灯具蒸发镀膜设 备 ZZD-1000 型 ZZD-1400 型 ZZD-1600 型 ZZD-2050 型	$\leq 1 \times 10^{-3}$	(大气抽至 $2 \times 10^{-2} \text{Pa})$ ≤ 25 ≤ 25 ≤ 10 ≤ 8	$\phi 1000 \times 1500$ $\phi 1400 \times 1900$ $\phi 1600 \times 2100$ $\phi 2050 \times 2100$		15/15 20/20 25/27 40/40			0~3	4 4 12 12	60 85 120 180	兰州真空设 备有限责任 公司
16	PECVD-2D 型等离子 体化学气相沉积台	4×10^{-4}	(大气抽至 $5 \times 10^{-3} \text{Pa})$ < 10	$\phi 400 \times 180$	$\phi 290$ (热均匀区 $\phi 220$)	射频电源 功率 1kW		≤ 300			6	北京创威纳 科技有限公司
	PECVD-2E 型等离子 体化学气相沉积台	1.5×10^{-4}	(大气抽至 $5 \times 10^{-3} \text{Pa})$ < 10	$\phi 400 \times 180$				≤ 300			6	

表 10-33 国产磁控溅射真空镀膜机主要性能表

序 号	型 号、名 称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	磁 控 靶			烘烤温度 /℃	总功率 /kW	生产厂家	
					尺寸 /mm	功率 /kW	数量 /个				
1	JGP系列高真空多靶磁控溅射设备 JGP350 型 JGP450 型 JGP500 型 JGP600 型	6.6×10^{-5}	≤ 40 (充干燥氮气, 从大气抽至 6.6×10^{-4} Pa)	$\phi 300 \times 280$ $\phi 450 \times 280$ $\phi 500 \times 280$ $\phi 600 \times 300$	$\phi 50$ $\phi 60$ $\phi 60$ $\phi 60$	1.5 2.5	3 4 4 6	400	10 15	沈阳中科仪技术 发展有限责任公司	
2	SP系列高真空矩形靶磁控(+ 电子束联合)镀膜设备 SP75 型 SP100 型 SP320 型 SP450 型	6.6×10^{-4} 3.0×10^{-4} 5.0×10^{-4} 2.0×10^{-4}	≤ 40	$400 \times 300 \times 1000$ $350 \times 300 \times 13003$ $550 \times 450 \times 140$ $900 \times 300 \times 1800$	$3 \times 150 \times 60$ $3 \times 150 \times 60$ $3 \times 350 \times 100$ $6 \times 700 \times 120$	2 2 2 9		400	10 10 15 25		
3	FJL系列(超)高真空多靶磁控 + 离子束联合溅射设备 FJL450 型 FJL520 型 FJL560A 型 FJL560B 型	6.6×10^{-6} 3.0×10^{-5} 1.0×10^{-5} 6.6×10^{-6}	≤ 40	$\phi 450 \times 450$ $\phi 520 \times 450$ $\phi 560 \times 450$ $\phi 560 \times 450$	$\phi 60$ $\phi 60$ $\phi 75$ $\phi 60$	2 1 3 1.5	2 3 3 3	400	10 10 10 15		北京北仪创新真空 技术有限公司 公司
4	JDD-700 型多功能磁控溅射镀膜 膜机	6.7×10^{-4}	≤ 25	$\phi 700 \times 600$		5	5	300	12		
5	ZZJ-1600 型旋转圆柱靶磁控 射镀膜机	6×10^{-3}	≤ 6			45			90		上海真空泵厂

(续)

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	磁 控 靶			烘烤温度 /℃	总功率 /kW	生产厂家
					尺寸 /mm	功率 /kW	数量 /个			
6	JT 及 JP 系列磁控溅射镀膜机 JT-8 型 JT-12 型 JP-7 型 JP-14 型 JP-14B 型	5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 820 \times 1200$	$\phi 56 \times 1000$	15			30	辽宁锦州真空设备制造总厂
		5×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1250 \times 1520$	$\phi 56 \times 1300$	30			60	
		6.7×10^{-4}	≤ 20	$\phi 650 \times 570$	$308 \times 127 \times 10$	10			300	
		5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 1450 \times 1780$	$\phi 70 \times 1400$	30			150	
		5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 1450 \times 1780$	$\phi 70 \times 1400$	30				
7	JTF 系列磁控溅射反应镀膜机 JTF-1000 型 JTF-14 型 JTF-1000B 型 JTF-1000S 型 JTF-12B 型	5×10^{-4}	≤ 20	$\phi 1050 \times 1000$	$\phi 56 \times 870$	20			55	兰州真空设备有限公司
		5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 1450 \times 1520$	$\phi 56 \times 1300$	30			30	
		5×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1050 \times 1000$	$\phi 56 \times 870$	20			50	
		5×10^{-4}	≤ 20	$\phi 1050 \times 1000$	$\phi 56 \times 870$	20			70	
		5×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1250 \times 1300$	$\phi 56 \times 1300$	30			90	
8	JP 系列平面磁控溅射镀膜设备 JPTD-1000L 型 JPTD-1000LC 型 JPTD-1100L 型 JPT-1000S 型 DJP-2380 型 JP-1600T 型 JP-3000 型 JPD-1200 型	5×10^{-3}	(从大气抽至 10^{-3} Pa)	$\phi 1000 \times 900$	666×122	12	3	20~130	60	兰州真空设备有限公司
		5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 1000 \times 1276$	980×122	15	3	20~130	60	
		4×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1150 \times 1150$	800×122	15	2	20~130	90	
		1×10^{-3}	≤ 15	$\phi 1000 \times 1000$	660×160	10	3	20~130	120	
		6.7×10^{-3}	≤ 5	$2670 \times 2400 \times 700$	270×220	60	2	60~120	350	
		2×10^{-4}	≤ 45	$2800 \times 2460 \times 1500$	$\phi 160$	5/3	4	20~350	80	
		2×10^{-4}	≤ 60	$\phi 2800 \times 4500$	$\phi 150$	30/10	3/2	20~350	350	
		7×10^{-4}	≤ 15	$2600 \times 1800 \times 620$	1600×180	30	1	120	80	
9	JT 系列同轴磁控溅射镀膜设备 JT-500 型 JT-900 型 JTD-1400 型	5×10^{-3}	(从大气抽至 10^{-3} Pa)	$\phi 500 \times 520$	$\phi 60 \times 370$	5	1		10	北京创威纳科技有限公司
		5×10^{-3}	≤ 15	$\phi 900 \times 1400$	$\phi 60 \times 960$	30	1	20~350	45	
		5×10^{-4}	≤ 30	$\phi 1400 \times 2000$	$\phi 70 \times 1500$	30	2		90	
			≤ 30							
10	JS3S-100B 磁控溅射台 JS2S-150B 磁控溅射台	2×10^{-4}	(从大气抽至 10^{-3} Pa)	$\phi 540 \times 200$	$\phi 100$	1.5	3	≤ 300	5	北京创威纳科技有限公司
		2×10^{-4}	≤ 15	$\phi 600 \times 180$	$\phi 150$					

表 10-34 国产电弧离子镀膜机主要性能表

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空 时间/min	镀膜室尺寸 /mm	电弧蒸发源		总功率 /kW	生产厂家
					功率 /kW	数量 /个		
1	JTD 及 DH 型磁控多 弧离子镀膜机系列		(从大气抽至 7×10^{-3} Pa)					辽宁锦州真空设备制 造总厂
	JTD-1000S 型	6.7×10^{-4}	≤ 20	$\phi 1000 \times 1000$	1.8	8	71	
	JTD-8 型	1.5×10^{-3}	≤ 10	$\phi 850 \times 1250$	1.8	10	50	
	JTD-12 型	2.0×10^{-3}	≤ 10	$\phi 1250 \times 1520$	1.8	8	90	
	DH-8 型	1.5×10^{-3}	≤ 20	$\phi 850 \times 1000$	1.8	8	35	
	DH-16 型	1.5×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1600 \times 3400$	1.8	20	180	
	DH-16C 型	3.0×10^{-3}	≤ 20	$\phi 1600 \times 1800$	1.8	11	108	
2	LDH、LDH-800A 型多 弧离子镀膜机	5×10^{-4}	≤ 20	$\phi 800 \times 1000$		8	80	北京北仪创新真空技 术有限责任公司
3	TG 系列多弧离子镀膜 设备							兰州真空设备有限责 任公司
	TG-6 型	1×10^{-3}	≤ 18 (从大气抽至 6.7×10^{-3} Pa)	$\phi 1250 \times 1100$		6		
	TG-8 型			$\phi 1000 \times 1500$		8		
	TG-10 型			$\phi 1250 \times 1500$		10		
	TG-14 型			$\phi 1250 \times 1500$		14		
	TG-24 型			$\phi 1800 \times 3500$		24		
	TG-26 型			$\phi 2200 \times 3000$		26		

表 10-35 国产卷绕式镀膜机主要性能表

序 号	型 号、名 称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	蒸镀膜材尺寸		最大卷绕 速度 /m·min ⁻¹	蒸 发 舟		总功率 /kW	生 产 厂 家
					卷径 /mm	幅宽 /mm		功率 /kW	数量 /个		
1	ZZ-2400 型高真空卷绕式 镀膜机 ZZ-2400 型 ZZ-2400B 型 ZZ-2400C 型 ZZ-2400D 型	上室 1.3×10^{-1} 下室 5×10^{-3}	(从大气抽至 6×10^{-2} Pa) <8	2400×2100 2400×2100 2400×2250 2400×2350	1100	1100	450	每组 0~7.5 可调	12	300 320 330 350	上海曙光机械制 造厂
						1350			15		
						1500			16		
						1600			18		
2	ZZ-1800KIV 系列高真空卷 绕式镀膜设备 ZZ-1800KIV 型 ZZ-1800KBIV 型 ZZ-1800KCIV 型 ZZ-1800KDIV 型	上室 1.3×10^{-1} 下室 5.0×10^{-3}	<8	2000×1560 2000×1810 2000×2000 2000×2100	600	1100	400	每组 7~10	12	280 300 310 320	
						1350			15		
						1500			16		
						1600			17		
3	ZZB-1380 系列高真空卷绕 式镀膜机 ZZB-1380A 型 ZZB-1380K 型	上室 1.3×10^{-1} 下室 5.0×10^{-3}	<10	φ1400×1250	450	800	280	每组 7~10	9	188	
4	JCJ-D1200 系列磁控溅射卷 绕镀膜机 JCJ-D1200 型 JCJ-D1200C 型	1.0×10^{-4}	<20	1915×1200 2020×1600	400	1200	1~10		5 7		

(续)

序号	型号、名称	极限压力 /Pa	恢复真空时间 /min	镀膜室尺寸 /mm	蒸镀带材尺寸		最大卷绕 速度 /m·min ⁻¹	蒸发舟		总功率 /kW	生产厂家
					卷径 /mm	幅宽 /mm		功率 /kW	数量 /个		
5	ZZ系列卷绕真空镀膜机	2.0×10^{-3}	<15		750	1100	480		12	180	国投南光有限公司
	ZZ1100-1/Z型										
	ZZ1300-1/Z型										
	ZZ1300-2/Z型										
	ZZ1600-2/Z型										
6	ZZ650-2/D型										
	ZZ650-2/D型										
	ZZ650-2/D型										
	ZZ650-2/D型										
	ZZ650-2/D型										
7	卷绕真空镀膜机	1.3×10^{-3}	≤30 ≤15 ≤15 ≤20	φ600×560 φ1300×1260 φ650×450 φ1500×1200			70	8	2	25	辽宁锦州真空设备制造总厂
	ZDL-6B型										
	ZDL-13型										
	ZZ-650型										
	ZG-15型										
7	ZZL系列高真空卷绕镀膜设备	上室 1×10^{-1} 下室 7×10^{-3}	(大气至工作压力, 清洁、空载) ≤8	φ1800	φ650	1100 1200 1300 1600	500	10(单)	11 12 13 16	260 270 280 310	兰州真空设备有限公司
	ZZL-1800/1.1型										
	ZZL-1800/1.2型										
	ZZL-1800/1.3型										
	ZZL-1800/1.6型										
7	ZZL-1000/0.7型			φ1000 φ1400 φ2200 φ2400 φ1600	φ350 φ500 φ800 φ1000 φ500	700 700 2000 800 700	400 400 500 720 400	10(单) 10(单) 13(单) 15(单) 20(单)	7 7 20 26 4	85 120 350 350 140	
	ZZL-1400/0.7型										
	ZZL-2200/2.0型										
	ZZL-2400/2.8型										
	ZZL-1600/0.7型										

二、分子束外延设备

(一) 概述

分子束外延(简称 MBE)技术是 20 世纪 70 年代国际上迅速发展起来的一项技术。它是在真空蒸发工艺基础上发展起来的一种外延生长单晶薄膜的方法。1969 年对分子束外延进行研究主要为美国的贝尔实验室和 IBM 两家,另外英国和日本也在进行研究,我国于 1975 年开始进行研究。到目前为止分子束外延设备日趋完善,已由初期的较简单的实验设备发展到今天的具有多种功能的商品。

分子束外延技术是在超高真空条件下,构成晶体的各个组分和掺杂原子(分子)以一定的热运动速度、按一定的比例喷射到热的基片上进行晶体的外延生长的方法。这个方法与其它的液相、气相外延生长方法相比较具有如下特点:

- ① 它是在超高真空下进行的干式工艺。因此残余气体等杂质混入少,可保持表面清洁。
- ② 生长速度慢($1\mu\text{m/h} \sim 10\mu\text{m/h}$),并可以任意选择,可以生长超薄而平整的薄膜。
- ③ 生长温度低(GaAs 在 $500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 下生产, Si 在 500°C 下生长)。
- ④ 在生长过程中,同时可精确地控制生长层的厚度、组分和杂质分布,生长的表面和界面有原子级的平整度,结合适当的技术,可生长二维和三维图形结构。
- ⑤ 在同一系统中可以原位观察单晶薄膜的生长过程,进行结晶生长的机制分析研究,也避免了大气污染的影响。

因此利用这些特点,使得这一新技术得到迅速的发展,它的研究领域广泛地涉及到半导体材料、器件、表面和界面,以及超晶格量子效应等方面,并取得了一些显著的进展。

分子束外延设备综合性强、难度大,涉及到超高真空、电子光学、能谱、微弱信号检测及精密机械加工等现代技术。

(二) 独立束源快速换片型分子束外延设备

该设备主要是由清洁的全无油超高真空系统,外延生长和控制系统及监测分析仪器等部分组成。其结构简图如图 10-36 所示。

设备的真空室是由直径为 $\phi 450\text{mm}$, 不锈钢材料制成的圆筒,其周围需开大小不同的 20 余个法兰,用以配置各种表面分析仪器、样品架、样品传递结构、分子束源及观察窗等等。为了充分发挥升华泵的抽速,升华泵的直径与真空室直径相一致,选用法兰连接。便于真空室布局,该设备采用卧式布局,因而要使真空室和升华泵的法兰准确地对中相接,故采用将真空室和超高真空机组分成二个独立的支架,然后用轨道使这两部分准确地对中,保证密封可靠,节省了真空室开启时的起重设备。

独立束源快速换片型分子束外延设备本身具有两个特点。首先是分子束源,它由六个独立分子束炉组成,装在 $\phi 160\text{mm}$ 直径的法兰上,每个炉子具有独立的快门连同加热引线,测温热电偶等集中装在一个小法兰上,因而每个炉子可容易地独立取换,互不影响。其次是具有一个独立的样品传递结构,可快速地取换样品,提高了工效。

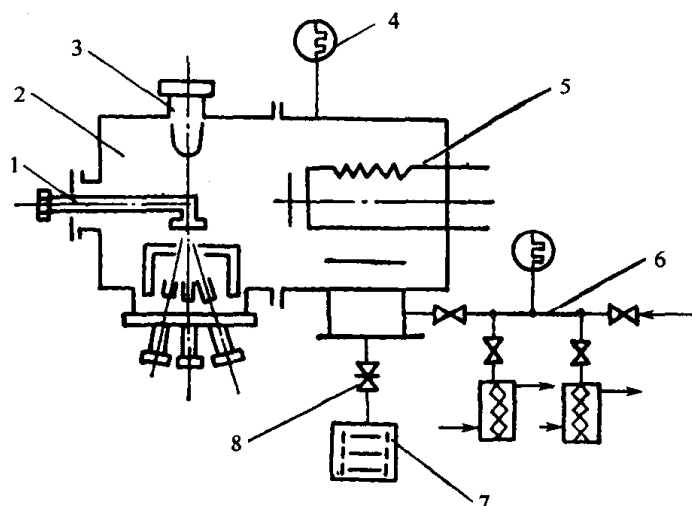


图 10-36 分子束外延结构图

1—样品架;2—真空室;3—四极质谱计;4—B A 规;5—钛升华泵;6—前级真空排气系统;
7—离子泵;8— $\phi 200\text{mm}$ 氟橡胶插板阀。

(三) 对真空的要求

分子束外延设备是在超高真空条件下,一个或多个热分子束与晶体表面起反应而外延生长超薄单晶膜的综合性设备。为了获得性能良好的超薄单晶膜,应避免在生长过程中衬底表面及热分子束受到污染,这就要求在清洁的超高真空环境下进行膜的生长,生长前的本底压力一般地要求为 10^{-8}Pa 的真空度,而且系统的残余气氛中的碳氢化合物、水、一氧化碳和二氧化碳等成分要很少。同时设备上配有各种表面分析仪器,如俄歇谱仪就要求在清洁的超高真空下工作等等。所以到目前为止,国内外研究生产的分子束外延设备均都采用清洁的超高真空系统。

为在分子束外延中得到清洁的超高真空环境,除对所用的不锈钢、陶瓷等材料选择以外,尤其应注意热分子束源材料的纯度和分子束炉的材料及其纯度的选择。

(四) 清洁的超高真空抽气系统

根据分子束外延设备对真空的要求,需达到 10^{-8}Pa 的超高真空环境,图 10-36 中设备真空系统组成如下:

1. 前级真空排气系统

前级真空排气系统是由两个分子筛吸附泵对该设备整机排气,从大气开始排气抽到离子泵开始启动(约 10^{-1}Pa),同时兼对高能电子衍射仪的五万伏电子枪进行排气的前级真空排气系统。

前级真空排气系统是由两个各装 5kg 分子筛(13x 和 5A 各半)的内冷式吸附泵,一个高压计,一个放气阀,三个可烘烤的金属超高真空阀(其中一个为总阀)以及真空管道组成的。

分子筛对气体的吸附属于物理吸附,过程是可逆的,低温时大量吸气,当温度回升时,又会部分甚至全部放出。此时泵内压力又升高甚至有很大压力,为了安全,在泵的抽气口管道上设置了一个安全阀,当泵内压力大于一个大气压力时则自动打开放气。当然也可作成简单的带锥度的橡皮塞子来代替安全阀。但对塞子的位置设计时要特别注意不致使液氮把橡皮塞冷冻而硬化,致使产生漏气的问题。

排气方法采用二级抽气,即先用一个分子筛泵由大气开始排气约 3min~5min 后,再用另一个分子筛泵继续排气。

2. 清洁的超高真空主排气系统

超高真空排气系统采用三极溅射离子泵作为辅助泵,钛升华泵作为主泵而获得超高真空 10^{-8} Pa。

(五) 几个重要部件的真空问题

在 MBE 中对口径 $\phi 200$ mm 超高真空氟橡胶插板阀,分子束源系统以及样品传递结构系统等主要部件要很好地考虑其清洁真空问题。

1. 分子束源系统

分子束源系统是 MBE 中的核心部件,该部件共有六个分子束炉,该炉用石墨制成,有炉丝加热,钽箔保温,各炉之间有水冷隔板。它处于高温下,结构复杂,材料品种多,是一个主要的出气源,直接地影响到真空室的清洁真空的获得。为了保证这部分保持清洁而对真空室维持在超高真空条件下没有影响,因而采用整个束源放置于液氮屏蔽罩内,以减少这个气源对真空室的污染。

分子束源系统配有抽速约 200L/s 的水冷升华泵(钛钼合金丝升华器),以便在束源部分出气量较大时作差分抽气用。

2. 样品传递结构系统

为了缩短工作周期,快速更换样品,同时在更换样品过程中对真空室的清洁真空既不破坏其超高真空状态,又对真空室不污染的目的,所以配备了样品传递结构系统。图 10-37 是样品传递结构系统的示意图。样品传递系统通过直通阀,直接与真空室的一侧相连。换样时是把样品(清洁处理过的)放置在传递杆的样品架上,传递杆借磁力传动把样品通过直通阀送入真空室,由多自由度样品架进行样品交换,再把生长好的外延薄膜传递出真空室。通过这样的传递更换样品,大大提高了工效。为了达到清洁真空的目的,该系统设计了独立的清洁的真空排气系统,它是由 120L/s 的三极溅射离子泵与两个各装 1kg 分子筛(13X 和 5A 各半)的吸附泵组成。

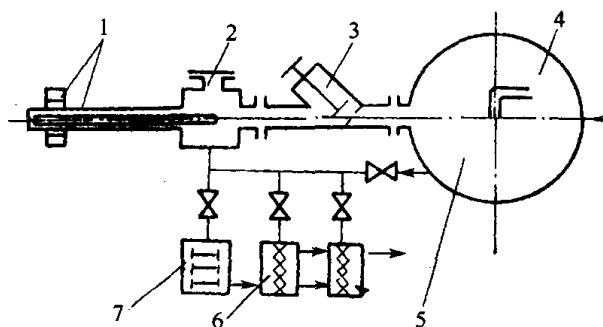


图 10-37 样品传递结构系统示意图

1—传递机构;2—样品室;3—直通阀;4—样品架;5—真空室;6—吸附泵;7—离子泵。

该系统一般地装好更换的样品之后,经过 30min 从大气排气到 10^{-4} Pa,打开直通阀,完成一次交换样品约 10min,这时真空室的真空度仍可维持在 10^{-6} ~ 10^{-7} Pa 范围内。

3. 口径 $\phi 200$ mm 超高真空氟橡胶插板阀

在升华泵与离子泵之间设置氟橡胶插板阀。该阀采用了阀板向下压紧的结构;在关闭时,借助大气越压越紧,具有使用方便确保离子泵不暴露于大气,且再次启动容易的优点。

三、离子束刻蚀技术

(一) 概述

离子束刻蚀技术是从 20 世纪 70 年代起随着固体器件向亚微米级线宽方向发展而兴起的一种超精细加工技术,它是利用离子束轰击固体表面时发生溅射效应来剥离加工器件上所需要的几何图形的。

离子束刻蚀这种工艺与机械加工、化学腐蚀、等离子体腐蚀、等离子体溅射等工艺相比较,具有以下特点:①对加工材料具有非选择性,任何材料包括导体、半导体、绝缘体都可以刻蚀。②具有超精细的加工能力。它能刻蚀加工非常精细的沟槽图形,是属于微米级和亚微米级加工,甚至能刻出 $0.008\mu\text{m}$ 的线条。③刻蚀的方向性好,分辨率高。它的样品在真空中被准直的离子束定向轰击,是一种方向性刻蚀,可以克服化学湿法中不可避免的钻蚀现象,刻蚀的图形边缘陡直、清晰。分辨率高。精度可达 $0.1\mu\text{m}\sim 0.01\mu\text{m}$,表面粗糙度优于 $0.05\mu\text{m}$ 。④加工性灵活,重复性好。因为离子束的束流密度、能量、入射角、工件台的移动或旋转速度等工作参数,能够在相当宽的范围内独立地、准确地控制,因而容易得到不同样品的最佳加工条件,既能控制线条的边壁斜度,又能控制沟槽深度按一定函数变化。(按一定函数变化的沟槽深度称为深度加权)。⑤离子束刻蚀的缺点是存在着溅射材料的重新沉积(再沉积效应)现象。有待在实践中加以解决。

离子束刻蚀分三种类型,即溅射刻蚀、反应刻蚀和混合刻蚀。

(1) 溅射刻蚀

溅射刻蚀是基于荷能惰性离子对表面的物理溅射,它包括等离子体刻蚀和离子束刻蚀两种方法。前者,被刻蚀的样品置于负极,由直流或高频形成的惰性气体等离子体直接和样品作用。后者,离子束取自离子源或枪,可以聚焦、偏转,然后引向样品。

(2) 反应刻蚀

反应刻蚀是利用活性粒子的化学作用对表面进行刻蚀,它包括等离子体反应刻蚀和化学活性游离根或非饱和键化合物刻蚀两种方法。在等离子体反应刻蚀中,样品置于化学活性气体或蒸气形成的等离子体区中,依靠离子和电子的诱导或强化刻蚀剂与被刻蚀材料之间的化学效应,使之产生挥发性产物,排除出真空系统,从而达到对样品刻蚀的目的。在利用化学活性游离根或非饱和键化合物刻蚀中,置于真空室中的样品与气体的电弧区是分开的。依靠从电弧区中引出的中性游离根或活性分子与样品起化学反应而达到对样品刻蚀的目的。

(3) 混合刻蚀

混合刻蚀是既有物理溅射又有化学腐蚀作用的刻蚀方法。产生物理溅射的粒子是活性离子,故常称离子反应刻蚀或反应离子刻蚀。它又可分为以下三种类型:

① 反应溅射刻蚀。它和等离子体反应刻蚀基本相似,样品也置于活性气体形成的等离子体区内。但混合刻蚀中的离子能量较高($>100\text{eV}$),因而溅射作用增加(溅射率 $\eta \geq 0.1$ 原子/离子)。这时既有反应刻蚀作用又有离子溅射作用。

② 离子束反应刻蚀。从离子源中引出化学活性离子,使其直接和样品相互作用,离子束可以聚焦、偏转和调节。

③ 离子束强化反应刻蚀。活性气体和惰性气体离子通过各自的通道,互不相关地、但同

时到达被刻蚀样品的表面。它的突出优点是可以分别地、准确地监测、控制二者的参数。

离子束刻蚀作为一种超精细加工工艺,广泛地用于超大规模集成电路、动压气体轴承、声表面波器件、磁泡存储器、集成光学、电荷耦合器件、计量光栅、透射电子显微镜用样品等刻蚀精细沟槽图形;减薄各种材料和抛光;清洗高精度表面。在国外,自1965年用离子束刻蚀出 $0.25\mu\text{m}$ 的超精细集成电路线条以来,这种技术得到迅速发展和广泛应用。离子束刻蚀设备已从实验室到生产线,从用惰性气体到用反应性气体,从手动到自动,发展到包括有终点控制和自动装卸片在内的全自动控制。离子源阳极直径从 $50\text{mm}\sim 350\text{mm}$,并从单一功能刻蚀发展到可做溅射沉积和表面改性等工艺。国内生产的离子束刻蚀设备,已在动压气体轴承变宽线条的刻蚀加工、声表面波沟槽栅(包括深度加权的刻蚀)、红外器件、光栅等固体器件的刻蚀加工得到应用。

(二) 工作原理

离子束刻蚀的基本原理是利用离子束轰击固体表面产生的溅射现象来剥离加工几何图形的。一般由真空室、离子源、工作台、快门、真空抽气系统、供气系统、水冷系统、电源和电气系统等主要部分组成。图10-38为离子束刻蚀机工作原理图。

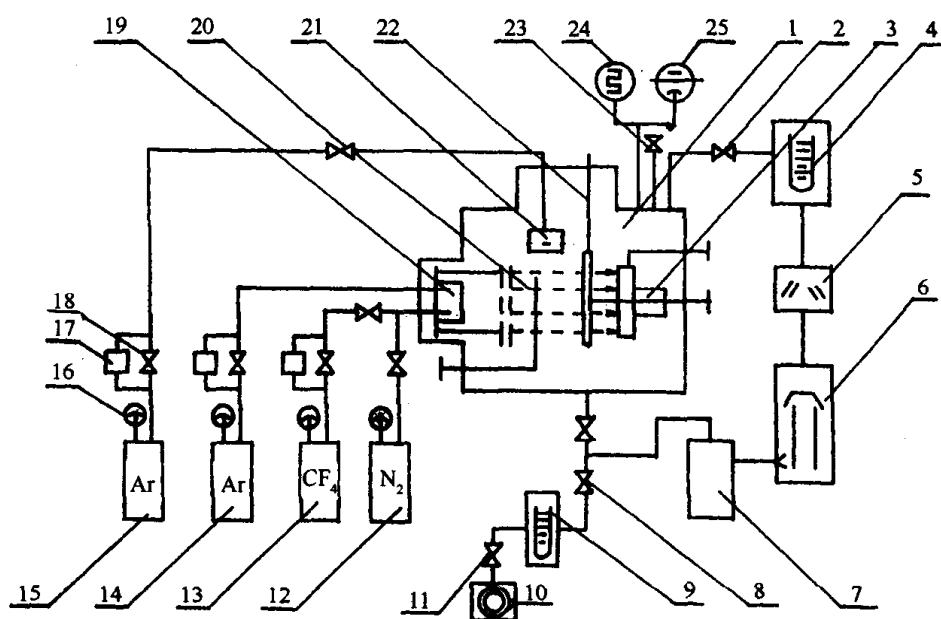


图 10-38 离子束刻蚀机原理图

- 1—真空室;2—插板阀;3—工件台;4—冷阱;5—水冷障板;6—扩散泵;7—贮气罐;8—三通阀;9—冷阱;10—机械泵;
11—电磁阀;12— N_2 储罐;13— CF_4 储罐;14—Ar 储罐(1);15—Ar 储罐(2);16—真空压力表;17—质量流量计;
18—管道阀门;19—离子源;20—快门;21—等离子桥中和器;22—法拉第筒;23—放气阀;24—电阻规;25—冷规。

该设备在正常工作时,首先是待真空室压力抽至 $6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 或更低时,可以调节Ar气流量使真空室压力保持在 $1 \times 10^{-2}\text{Pa} \sim 6 \times 10^{-2}\text{Pa}$ (如果需用辅助气体氧,则可以按一定比例与之混合),然后启动离子源各电源,使离子源正常工作。从离子源引出一定能量和密度的离子束,被中和器发射的电子中和后穿过快门和光阑孔,轰击工作台上的工件进行溅射刻蚀,工件表面有制备沟槽的掩膜,这样,裸露部分就被刻蚀掉。掩膜部分就被保留下来,从而在工件表面形成所需的沟槽图形。等深度沟槽的刻蚀终点是根据工件的刻蚀速率和沟槽深度由计算机自动控制快门开启时间加以控制的,深度加权沟槽栅的刻蚀则是根据晶片的刻蚀速率和深度加权函数,用计算机程序控制步进电机驱动平移工件台通过光阑孔时的停留时间加以控制的。

(三) 技术性能

离子束刻蚀设备的主要性能一般包括:整机特性、离子源特性、真空系统性能、工件台性能。控制系统特性等。表 10-36 给出了兰州物理研究所生产的 LSK 型、DSI 型、RIBE 型离子束刻蚀设备主要技术性能。

(四) 结构特点

离子束刻蚀设备一般采取卧式结构(也有立式结构)。卧式结构离子束水平方向喷射,刻蚀的溅射物大部分落在真空室底部,能减少溅射材料的重新沉积。立式结构相反,刻蚀质量难以保证。

1. 真空室

刻蚀设备的真空室一般采用圆筒形结构,用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢焊接而成。最好是在两边都开门以便装卸工件、检修和清洗离子源和快门等,关在适当位置设置观察窗以便观察刻蚀进行的情况。大门为蝶形封头或平面形,开启与关闭应轻便灵活。真空室内壁应抛光,内表面光滑,便于清洗真空室。

2. 离子源

离子源采用永久磁铁轴向发散磁场结构的考夫曼(Kaufman)型离子源。圆筒形阳极直径为 150mm;钽丝阴极直径为 0.4mm,长度为 130mm,绕成内径约 2mm 的单螺旋形;钽丝中和器直径为 0.4mm,长度 70mm;多孔钼制屏蔽极和加速极开孔区直径为 120mm 栅极间隙 1.5mm。为了便于装拆和清洗,离子源整体结构为可拆卸式。阴极组件可单独卸下来,中和器装在屏蔽罩正面。供气管和引线为接插式结构。图 10-39 为离子源示意图。

考夫曼离子源由于它的离子流密度较高,可达 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上,束径可达 350mm,均匀性为 $\pm 5\%$,可变离子能量为 2keV。为此,目前的离子束刻蚀设备一般均采用考夫曼型离子源。

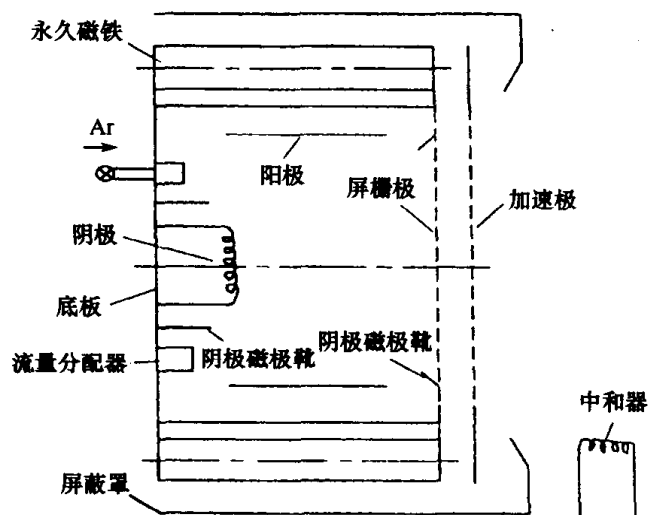


图 10-39 离子源示意图

3. 工件台

工件台是装卡刻蚀工件用的。由于被刻蚀的工件种类和要求不同,所以工件台的种类亦不同。一般为平移和旋转两种工件台;按水冷方式又分为直接水冷和间接水冷两种。

图 10-40 给出了一维平移工件台结构原理图;图 10-41 给出了旋转、平移、倾斜的三维工件台结构原理图。

表 10-36 LSK 型、RIBE 型离子束刻蚀

设备型号		LSK-1 ^①	LSK-2(2A) ^②	LSK-3(3A) ^①
整机特性	设备类型	卧式	卧式	卧(立)式
	真空尺寸(直径×长度) /mm×mm	φ400×700	φ400×700	φ400×475
	一次连续工作时间/h	8	8	8
离子束特性 Ar	有效束径/mm	φ78	φ105	φ100
	束流密度均匀度/%	±5	±5	±5
	束加速电压/V	100~1300	100~1300	100~1300
	束流密度/mA·cm ⁻²	0~0.7	0~1.1	0~1.0
	束加速电压稳定度/%·h ⁻¹	±0.45	±0.45	±0.45
	束流稳定度/%·h ⁻¹	±2.2	±3.2	±0.5
真空系统性能	极限真空度/Pa	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}
	工作压力/Pa	$(1 \sim 3) \times 10^{-2}$	$(1 \sim 3) \times 10^{-2}$	$(1 \sim 3) \times 10^{-2}$
	抽气时间(从大气到 6×10^{-3} Pa) /min	51	53	51
	更换工作后抽气时间/min	15	15	15
水冷工作台特性	运动方向	四维	一维平移	三维
	安装尺寸/mm	φ88	(长×高)200×80	φ100
	其它特性	旋转间断可调 (5~30)r/min 平移 35mm 水平和垂直倾斜均为 0°~90°	最小步距 0.25μm 最大行程 150mm 单向定位精度 4.5μm 全程累积误差 2.9μm	旋转间断可调 (5~30)r/min 平移 150mm 水平和垂直倾斜均为 0°~90°
控制系统特性	控制方式	继电器自控或手控	计算机程序控制	继电器自控或手控
	控制功能	预置刻蚀时间为 0~12h 束流中断联锁 刻蚀时间快门控制	刻蚀过程控制 刻蚀时间和位置显示 步进电机正反转 束流中断联锁 行程限位联锁 快门开关控制	预置刻蚀时间为 0~12h 束流中断联锁 刻蚀时间快门控制 时序自动控制刻蚀全过程

注:① 主要用于气体轴承变宽螺旋沟槽刻蚀;

③ 主要用于红外光栅的刻蚀,除 Ar 工质外,可通反应性气体

三、离子束刻蚀技术

设备主要技术性能表

LSK-6 ^②	DSJ-4		RIBE-5 ^③	RIBE-200 ^③
卧(立)式	卧式		卧(立)式	卧(立)式
φ400×475	φ400×500		φ450×500	φ450×540
8	8		8	8
φ100 ±5 50~1300 0~1.0 ±1 ±1	φ100 ±5 400~1000 0~1.0 ±0.5 ±0.5	φ25 — 500~1500 20 ±0.5 ±0.5	φ100 ±5 50~1000 0~1.0 ±1 ±1	φ100, φ200 ±5 50~1000 0~1.0 ±1 ±1
5×10 ⁻⁴ (1~3)×10 ⁻² 60 15	7×10 ⁻⁴ (3~4)×10 ⁻² 60 —		5×10 ⁻⁴ (3~4)×10 ⁻² (充PC ₄) 60 —	6×10 ⁻⁴ (3~4)×10 ⁻² 60 30
三维	三维		三维	三维
φ100	φ150		φ150	φ100, φ200
旋转间断可调 (5~60)r/min 倾斜±90° 平移 100mm 台面温度<35°	旋转间断可调 (10~60)r/min 倾斜±90° 平移 150mm 台面温度<35°		旋转间断可调 (10~60)r/min 倾斜±90° 平移 50mm 台面温度<35°	旋转间断可调 (10~60)r/min 倾斜±90° 平移 50mm 台面温度<35°
继电器自控或手控	计算机自控或手控		计算机自控或手控	计算机自控或手控
预置刻蚀时间为 0~12h 刻蚀时间快门控制	排气过程、加工工艺过程、 数据处理等均由计算机自 控		排气过程、加工工艺过程、 数据处理、文字显示、绘图 和打印均由计算机自控	排气过程、加工工艺过程、 数据处理等均由计算机自 控

② 主要用于声表面波槽栅(包括深度加权)的刻蚀,真空室有两种尺寸;

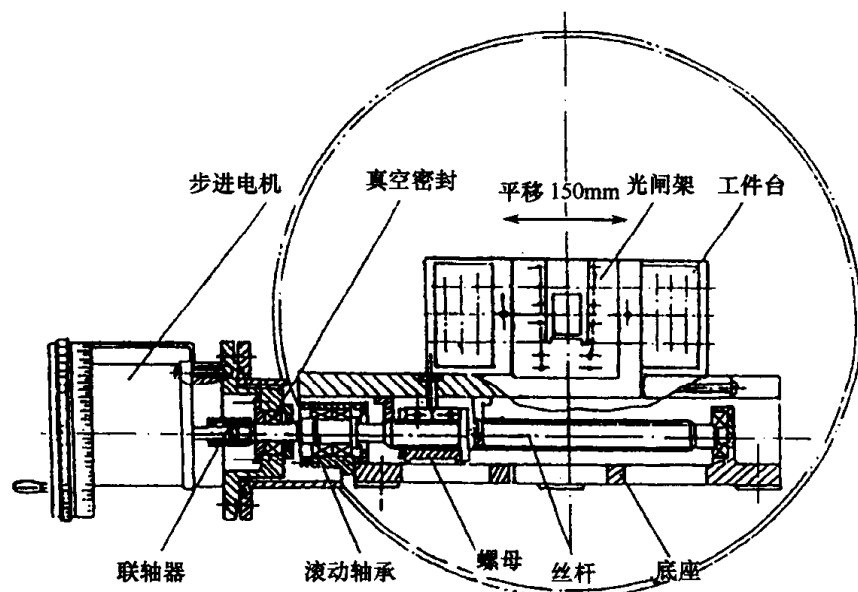


图 10-40 一维平移工件台结构原理图

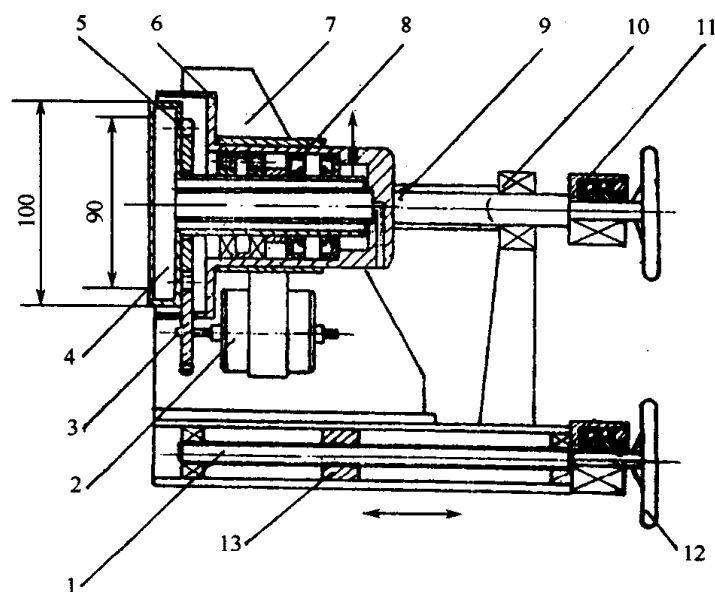


图 10-41 三维直接水冷工件台结构原理图

- 1—移动丝杆;2—步进电机;3—小齿轮;4—工件台;5—大齿轮;6—外套;7—支架;
8—碗形密封;9—倾斜机构;10—支架;11—威尔逊密封;12—手轮;13—螺母。

平移工件台采用步进电机直联丝杆传动结构。90BF006 型步进电机通过威尔逊高真空转动密封机构与丝杆直联、丝杆再转动固定在工件台底部的螺母使工件台平移;丝杆和螺母的螺距为 1mm;工件台最大行程为 150mm,并由装在两端的行程开关加以限位;工件台要求定位精度为 $5\mu\text{m}$,它主要依靠丝杆和螺母的(有松紧调节机构)加工精度来保证。滑润油用 DC-274 扩散泵油,工件台内部铣成蛇形槽直接通水冷却,降低了工件温度,防止晶片受热碎裂和光刻胶焦化。工件台的前面还备有可拆卸的光闸装架。

三维直接水冷旋转工件台由 SY-5 力矩电机、工件台、蜗轮蜗杆倾斜机构、丝杆驱动平移机构等组成。直接水冷工件台直径为 $\phi 100\text{mm}$,旋转由力矩电机通过齿轮来实现。转速从 $5\text{r/min} \sim 30\text{r/min}$ 连续可调,正反均可;倾斜角度,与束垂直的水平方位是 $0^\circ \pm 90^\circ$,是通过蜗轮蜗杆实现的;平移距离 150mm,是通过转动丝杆实现的;直接水冷是通过空心的轴和碗形橡胶密封圈实现的。这种直接水冷转动工件台最大的优点是在刻蚀的过程中,在真空条件下,通过转

动手轮可以改变距离和倾斜角度。直接水冷降低了工件台靶面的温度,可以提高器件的加工刻蚀质量。

4. 快门

快门是用来隔断离子束通向工件台的通路的,目的是便于在刻蚀前检测束流密度和束的中和情况。从放电开始引出束流到束流稳定往往需要几分钟的时间。在离子束稳定后才打开快门进行刻蚀并同步计时,故刻蚀的时间可以用开关快门来控制。快门有手动、电动两种,操作要简单可靠、无故障。图 10-42 给出了手电两用四杆联动单叶快门结构示意图。

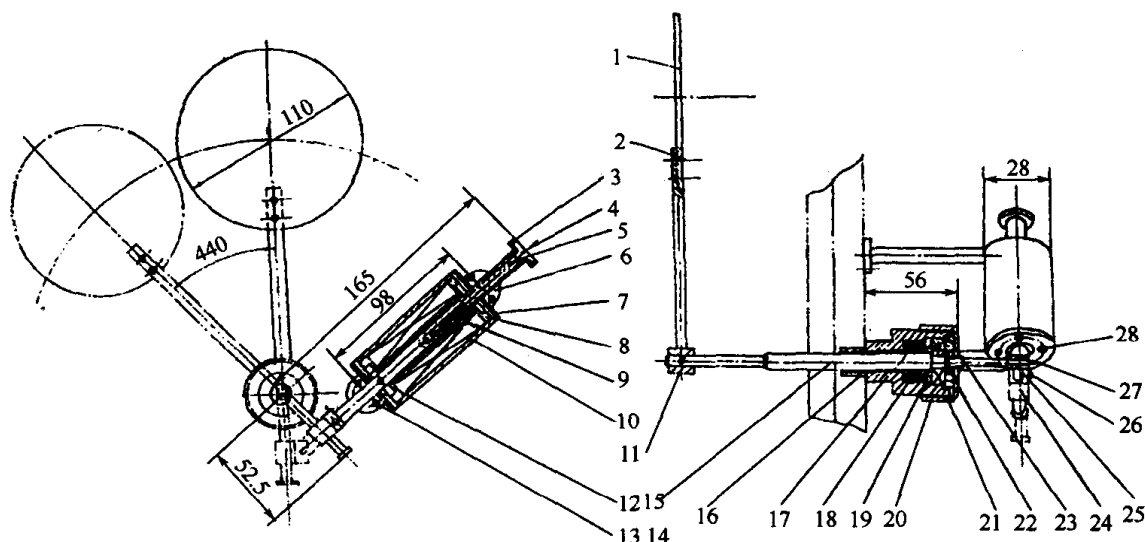


图 10-42 手电两用四杆联动单叶片快门

- 1—挡片;2—螺钉;3—滑杆;4—堵头;5—磁棒;6—支架;7—端盖;8—骨架;9—线圈;10—外套;11—拨杆;
12—销轴;13—螺钉;14—垫圈;15—转动轴;16—密封套;17—密封圈;18—垫圈;19—垫圈;
20—压紧螺母;21—滚动轴承;22—内压圈;23—外压圈;24—连接滑杆;25—连接滑块;
26—螺钉;27—轴套;28—螺钉。

手电两用四杆联动的单叶快门,它的 $\phi 110\text{mm}$ 的单叶片固定在空心连杆上。连杆与传动轴相连,传动轴通过高真空威尔逊密封跟位于真空室外的连轴、滑杆相连。滑杆在电磁线圈内套里,通过改变电磁线圈中的电流方向,使滑杆左右移动,从而带动连轴、传动轴、固定连杆联动、单叶片摆动,使快门打开或关闭。电磁铁可使滑杆移动距离为 40mm。电磁铁线圈丝径 0.44mm,共 2800 匝(电阻 20Ω);威尔逊密封的润滑油用 DC-274 扩散泵油。

5. 真空系统

真空系统由卧式真空室、 $\phi 200$ 高真空插板阀、 $\phi 200$ 单百叶窗式水冷障板, K-200T 油扩散泵、储气罐、三通阀、电磁带放气真空截止阀、2XZ-8 型高速旋片式机械泵。电磁放气阀、真空管道及真空检测系统(ZRC-1J 电阻磁放电复合真空计、电阻规、冷规)等组成。其真空系统示意图如图 10-43(a)、(b)所示。

6. 供气系统

供气系统分氩气(工质气体)和氧气(辅助气体)两套系统。在氩气中混入一定比例的氧气,可以防止一些晶体(如铌酸锂)表面缺氧而导致性能变化。LSK-3 型离子束刻蚀机的供气系统分手控和自控两路。手控系统由流量微调真空阀(WT30-1 型)、两个 GM-10 型真空隔膜阀、一个容积为 8L 的贮气罐,一个 $2.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 真空压力表和管路组成。自控系统除手控的部件外,加有一套 D07-2/ZM 型质量流量控制器。气体流量由工作压力间接指示。

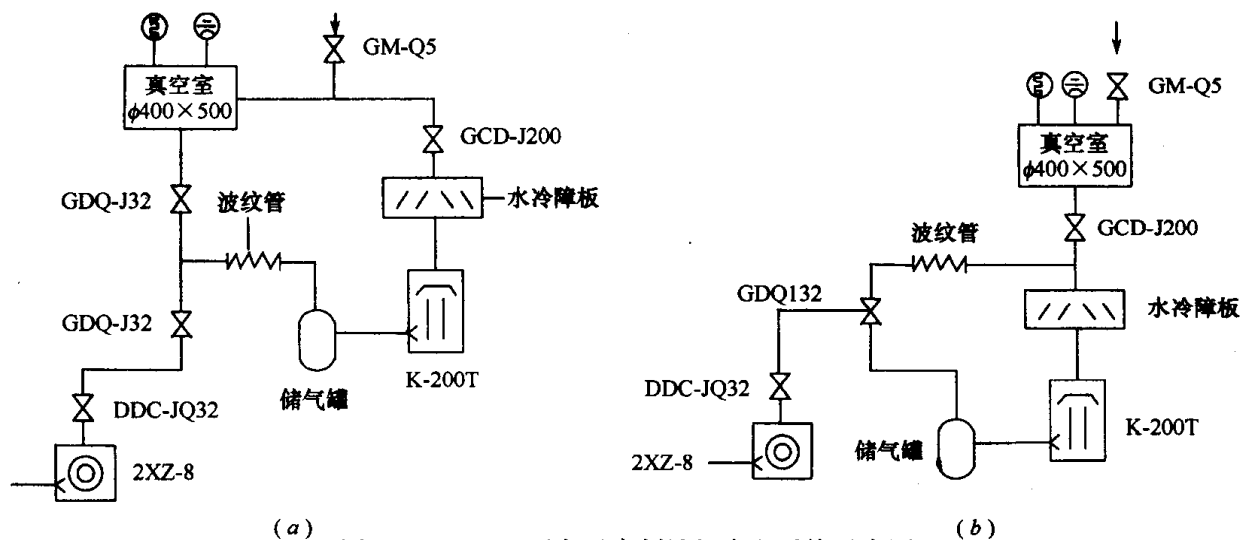


图 10-43 LSK 型离子束刻蚀机真空系统示意图

7. 水冷系统

水冷系统是用来冷却离子源、工件台、水冷障板、油扩散泵等部件的，一般由四个截止阀、水压继电器和管路组成。水压继电器当停水和水压过低时能自动切断电源，由断水警报器及时发出音响，给予报警，以保护设备不致烧坏。

(五) 离子源及真空系统设计要点

1. 离子源的设计

(1) 离子源离子引出计算

考夫曼离子源的工质多用惰性气体氩，压力为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 。当阴极灯丝加热至白炽状态能发射电子时，阳极上加几十伏的正电压则得到氩气的辉光放电，从放电产生的等离子体中提取准直、均匀的离子束，则需要一个离子引出系统。为了刻蚀非导体材料不使样品表面积累正电荷，应加置一个发射电子的热丝中和器，使氩离子束中和成氩原子束来刻蚀样品表面。因此，离子源由放电室、离子引出系统、中和器及接地屏蔽等构成。

根据傅姆的扰动等离子体球探针理论和原始电子不能忽略时曼斯克对形成稳定鞘的傅姆数据的修正，并假定放电室产生的多荷离子可以忽略、到达屏栅极开孔面积上的单荷离子均被引出成束时，在加速极出口处的束流密度 J_B ，由下式计算

$$J_B = 8.8 \times 10^{-10} n_i f_i \sqrt{\frac{T_e}{\mu} \left(1 + \frac{n_{ep}}{n_{em}} \right)} \quad [\text{mA/cm}^2] \quad (10-12)$$

式中 n_i ——屏栅极附近未扰等离子体密度 $[\text{l/m}^3]$ ；

f_i ——离子引出系统对单荷离子的有效透明度，它是屏栅极几何透明度的 0.9 倍 ~ 1.2 倍；

T_e ——电子能量 $[\text{eV}]$ ；

μ ——工质元素的摩尔质量，(氩 $\mu = 39.95$)；

n_{ep} ——原始电子密度 $[\text{l/m}^3]$ ；

n_{em} ——等离子体密度 $[\text{l/m}^3]$ 。

若设 $T_e = 10\text{eV}$ ， $n_{ep}/n_{em} = 0.1$ ，要想在加速极出口处得到束流密度为 2mA/cm^2 ，就需要在屏栅极附近能产生 6.2×10^{10} 个 $/\text{cm}^3$ 的等离子体密度。

到达屏栅极开孔面积上的离子能否引出成束,还受离子引出系统导流系数 P 的限制。在 $0.37 < d_{ac}/d_B \leq 1$ 的条件下,据有关实测数据推算,每对孔的导流系数可以写成

$$P = I_B / (V_{\min})^{3/2} \approx 1.43(d_{ac}/d_B - 0.3) \frac{\pi \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2ed_B^2}{m_i I_e^2}} \quad (10-13)$$

式中 I_B ——每对孔引出的束流强度[A];

V_{\min} ——刚出现加速极直接截获离子流为最小时的总加速电压,相当于放电等离子体与加速极的电位差[V];

d_{ac} ——加速极小孔的孔径[m];

d_B ——屏栅极小孔的孔径[m];

ϵ_0 ——真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m];

e/m_i ——单荷离子的荷质比[c/kg];

I_e ——考夫曼提出的离子有效加速长度, $I_g^2 + \left(\frac{d_B}{2}\right)^2$; 其中 I_g 为栅极间隙[m]。

(2) 离子源结构设计

① 空心阴极离子源结构原理如图 10-44 所示,阳极直径为 200mm,放电室的外壳为无磁不锈钢圆筒。放电室底板、阴极靴和屏极靴选用导磁率高的低碳钢材料。两端紧固低碳钢轴套的铝镍钴 5 永久磁棒,用螺钉紧固到放电底板和屏极靴上,形成由阴极靴到屏极靴的发散磁场。无磁不锈钢环形腔体,用压环紧固在放电室底板上,与底板同轴,在外侧面上均匀开一些导流小孔,靠近底板一方开有一个较大的孔,与底板外面安装的气体导管紧配,使活性工质进入分流器,再径向均匀注入放电室。

空心阴极组件通过螺钉与阴极靴相连,位于放电室底板中心。它是由多元硼化物电子发射体(即阴极),触持极,引出极和电子分配挡板组成的。引出极是通过三个加屏蔽帽的绝缘子紧固在安装座上。电子分配挡板通过两个加屏蔽帽的绝缘子固定在引出极上。

放电室前端平行安装了两块精确对中的多个孔钼制平板栅极作为离子引出系统。变孔屏栅与放电室同电位,等孔加速极通过四个加屏蔽的绝缘子紧固在屏极靴上,两块栅板的间隙保持在 1.4mm 左右。

② 等离子体桥中和器的设计。为了能刻蚀非导体材料的工件,并考虑到反应离子束中氟基、氯基活性离子对热丝中和器的强腐蚀作用,需要设计一个等离子体桥中和器,其结构如图 10-45 所示。它是由外壳、钨丝阴极、阳极筒和引出极组成。外壳是不锈钢圆筒,引出极为带有小孔的不锈钢圆片,用双屏蔽陶瓷固定外壳筒体上。该中和器整体结构为可拆卸式。

2. 真空系统的设计计算

真空是进行离子束刻蚀的必要条件,它的性能好坏直接影响着整机性能。良好的真空系统取决于合理的真空系统理论设计和计算。通过计算主要解决两个基本问题:一是根据该设备产生的气体量、极限真空、工作压力及抽气时间,选择主泵的类型、确定管道及选择真空元件;二是计算该设备抽气时间。

① 确定设备的气体量,气体量 Q 主要有三个来源:一是工作过程中放出的气体量 Q_1 ;二是系统的漏气量 Q_2 ;三是真空室表面出气量 Q_3 。其中 Q_1 是主要的,它来自离子源,如保证阳极直径为 150mm,离子源在最大束流密度时,正常工作的气体流量大约为 $8\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ (约等效于 300mA 束流)。如 LSK-3 型离子束刻蚀机,经计算总的气体量为 $8.077\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

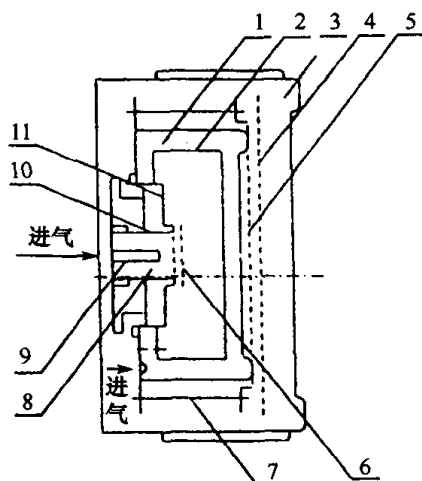


图 10-44 离子源结构原理图

1—离子室;2—阳极筒;3—外罩;4—加速极;
5—屏蔽;6—引出极;7—磁棒;8—发射体;
9—阴极;10—触待级;11—底座。

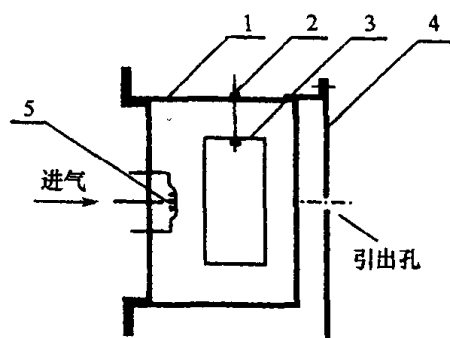


图 10-45 等离子体桥中和器结构示意图

1—外壳;2—陶瓷绝缘子;3—阳极筒;
4—引出极;5—阴极。

② 然后确定本设备真空室中保持 $1.5 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 工作压力 (p_w) 所需要有效抽速

$$S = Q/p_w = 415 \text{ [L/s]}$$

但为了可靠起见,常将 S 适当增大,根据具体情况,按增大 25% 计算,故实际要求的有效抽速 S 为 518.75 L/s 。

③ 根据要求的工作压力及使用要求,选择主泵的型号。一般选择油扩散泵作为主泵。

为防止返油进入真空室,扩散泵和真空室之间安装单百叶窗水冷障板。查有关资料,该障板比流导为 $4.8 \text{ L/s} \cdot \text{cm}^2$,并配有一个 $\phi 200$ 高真空手电两用插板阀,扩散泵前级泵选 2XZ-8 型直联机械泵组成真空机组。

a. 根据要求,所需的有效抽速 $S = 518.75 \text{ L/s}$ 。考虑到加上障板、插板阀后的泵的抽速损失(一般泵的有效抽速是泵抽速的 $1/3$ 左右),暂选抽速为 $1200 \text{ L/s} \sim 1600 \text{ L/s}$ 的油扩散泵来进行试算。查有关 K 型扩散泵产品样本,K-200T 型油扩散泵可以满足要求。泵的进口直径为 $\phi 200 \text{ mm}$,排气口直径为 65 mm 。

b. 计算扩散泵与真空室排气口管道的流导,验证选 K-200T 型扩散泵是否合适。

这段高真空管道总的流导 C 由高真空管道流导 C_1 、障板流导 C_2 、插板阀流导(因该阀工作时全部打开,故忽略它的流导不计)串联组成。

先确定气体沿管道的流动状态。真空室工作压力 $p_w = 1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,扩散泵入口压力很低,故管道出口压力可以忽略,管道的平均压力 $p = \frac{1}{2} p_w = 0.75 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,此时 $Pd = 0.75 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-2} = 1.5 \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{m}) < 0.02 (\text{Pa} \cdot \text{m})$,可见为分子流。

高真空管道的流导 C_1 ,按公式 $C_1 = 11.6 A \alpha$, (α 为克劳辛系数值, $\alpha = 0.52$); A 为管道截面积,代入

$$C_1 = 11.6 A \alpha = 11.6 \frac{\pi}{4} d^2 \alpha = 11.6 \times 314 \times 0.52 = 1894 \text{ [L/s]}$$

障板的流导

$$C_2 = 4.8 \times \frac{\pi}{4} d^2 = 1700 \text{ [L/s]}$$

总的流导 C , 由管道流导 C_1 和障板流导 C_2 串联所得 $C = 900(\text{L/s})$ 。

最后计算油扩散泵的抽速

$$S_p = \frac{SC}{C - S} = \frac{518.75 \times 900}{900 - 518.75} = 1225 \quad [\text{L/s}]$$

由此可见, 选择 K-200T 型扩散泵是合适的。此泵在 $10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 范围内的抽速为 $1200\text{L/s} \sim 1600\text{L/s}$ 。极限真空度 $6.6 \times 10^{-5}\text{Pa}$, 能满足该设备真空系统 $6.6 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 的极限真空度要求, 该泵最佳工作压力为 $1.3 \times 10^{-2}\text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 能满足该设备工作压力 p_w 为 $(1 \sim 3) \times 10^{-2}\text{Pa}$ 的要求。

④ 配泵计算。选配前级泵的原则是要求前级泵造成主泵(即扩散泵)工作所需要的预真空条件, 以及在主泵允许的最大排气压力(这里指扩散泵的最大前级耐压一反压力)下, 前级泵必须能将主泵所排出的最大气体量及时排走。

a. 前级泵有效抽速的计算。主泵为 K-200T 型扩散泵, 它的最大反压力为 40Pa , 由抽速曲线可知, 在 $2.7 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 压力下扩散泵的最大排气量为 $2.7 \times 10^{-2} \times 1200 = 32\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。在扩散泵出口管道断面处, 要求前级泵的有效抽速不小于 0.8L/s 。

b. 前级管道的流导。扩散泵排气口的直径为 65mm , 经过储气罐三通真空阀与前级管道相连, 前级管道的直径为 32mm , 长度为 1m 。由于管道长暂不考虑弯角的影响。

确定气体流动状态: 扩散泵出口临界前级压力为 40Pa , 而机械泵进气口的压力要比 40Pa 低得多, 在计算管道中平均压力时可以忽略。故管道平均压力为 20Pa 。此时管道的气体流动状态为粘滞流。

由于前级泵为机械泵, 它的抽速是在大气压力下测得的, 但正常使用的泵都是在低于大气压的条件下运转, 泵的抽速下降了, 故必须根据抽速曲线来选择泵。

c. 抽气时间的计算。总的抽气时间 t 包括粗抽时间 t_1 和高真空抽气时间 t_2 两部分。

粗抽气时间 t_1 按公式 10-12 计算。高真空抽气 t_2 由总的出气量和机组有效抽速的比值决定, 一般可用材料出气率曲线和绘图方法计算。

$$t = 2.3k_q \cdot V / S_p \cdot \lg(p_1/p_2) \quad [\text{min}] \quad (10-14)$$

式中 k_q ——修正系数, 一般取 $1 \sim 4$;

V ——真空室容积 $[\text{L}]$;

S_p ——泵的抽速;

p_1 、 p_2 ——起始、终止压力 $[\text{Pa}]$ 。

一般粗抽时间不大于 $10\text{min} \sim 30\text{min}$, 而计算时间为 3.27min , 实际上, 开机械泵 4min , 真空度可达 4Pa , 故从抽气时间角度来看, 选择 2XZ-8 型泵做为前级泵是合理的。

计算从 $13.3\text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的抽气时间, 这主要应考虑出气的影响。1h 后真空室的出气量经计算为 $Q = 203 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ (不锈钢材料 1h 的单位面积出气速率为 $2 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$, 真空室内表面积为 9027cm^2), 此时的工作压力小于 $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。可见高真空 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 只需要 1h 就可以达到。而设计指标抽到 $6.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 为 1h, 在实际工作中抽到 $6.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的时间为 $27\text{min} \sim 42\text{min}$; 连续抽气 2h, 极限真空度可达 $4 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 可见真空系统的设计是合理的。

此外, 本真空系统中, 在扩散泵出口与三通阀之间设有储气罐, 主要作用是缩短工作周期, 储存扩散泵排出的气体。因为本机在工作过程中, 更换样品要求在不关闭扩散泵加热器的情况下, 真空室放进大气换取工作, 装好工作后, 用机械泵通过三通阀预抽真空室。这段时间内

将利用储气罐来维持扩散泵工作。储气罐体积应

$$V \geq \frac{Qt}{p_1 - p_2} [\text{L}] \quad (10-15)$$

式中 Q ——扩散泵上面插板阀关闭后储气罐的气体负荷(漏气及出气) $[\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$;

t ——机械泵预抽真空室时间 $[\text{s}]$;

p_1 ——扩散泵最大反压力 $[\text{Pa}]$;

p_2 ——机械泵工作时扩散泵的前级压力 $[\text{Pa}]$ 。

(六) 电源和控制系统设计要点

离子束刻蚀设备的电源及控制系统包括离子源电源、工件台步进电机驱动器(用于平移工件台)和力矩电机驱动电源(用于旋转工件台)、快门时间控制器及主机电控部分。

1. 离子源电源

离子源电源由阴极、阳极、屏栅极、加速极和中和器电源等五部分组成。其技术指标见表 10-37。

表 10-37 五种离子源电源主要性能表

指 标 名称	输出电压/V	电压稳定度/%	输出电流/A	调节方式	连接方式
阴极电源	50Hz 交流 0~15	1	0~15	连续	浮在屏栅极电源正端
阳极电源	直流 0~100	1	0~2	连续	浮在屏栅极电源正端
屏栅极电源	直流 0~1300	1	0~0.2	连续	负端与加速极正端连接
加速极电源	直流 0~500	1	0~0.1	连续	与屏栅极电源共地连接
中和器电源	50Hz 交流 0~15	1	0~15	连续	浮在耦合电源 -15V 上

离子源电源的特点是:

① 五种电源在主电路上均采用同一类型的变压器原端可控硅调整的稳压方案。阴极和中和器电源由变压器次级直接供出交流电压;阳极、屏栅极、加速极电源由桥式整流后通过 RC 或 LC 组成的 π 型滤波器供出直流电压。由于在电源各部分参数的设计上,特别是对于变压器原端可控硅的选择以及主电路各元件上安全系数选取比通常的要大得多,故在系统溅射时而引起的频繁打火,过流浪涌的冲击、瞬时的高压短路的恶劣工作条件下电源都能安全稳定地工作。

② 五种电源每种都有自己的短路过流过载保护装置。保护电路为延迟型,以便于在系统清洗过后也能很快进入稳定工作。

③ 五种电源输出电压都用一多圈精密电位器从零到最大值的范围连续可调;阴极电源和中和器电源并设有束流稳定装置,设定点连续由多圈精密电位器来设定。五种电源的控制部分都由同一“机芯”组成,装在同样的一块印制版上。五种电源从上到下顺序地安装在同一架立式机柜中。每一机箱都有可伸缩的馈线连接,便于每一电源单独由机箱的滑轨拉出,因而在机架上就能带电进行测试和检查。

离子源电源是采用一只可控硅在变压器初级与四只硅整流二极管组成全桥线路。可控硅

的导通角受触发电路输送的宽脉冲所控制,而这一脉冲的宽度是受取样信号和设定电压的控制,因而达到变压器初级交流的调压。

可控硅控制极的触发电路是采用锯齿波移相的触发电路形式。它是利用同步变压器与二极管对交流进行全波变换后,给一个电容充电,在电容上形成具有固定幅度的(频率为 100Hz)锯齿波,输入到 BG307 同相输入端,与输入到 BG307 的反相输入端(由主电路输出端取样并由 5G23 放大)的直流控制电压进行比较,使运算放大器 BG307 的输出端产生一宽度受这一直流电压控制的正脉冲,经光电隔离并经末级直流放大器放大后加到可控硅的控制极来控制它的导通角大小,从而进行交流调压。

直流控制电压是采样主电路的输出电压到直流放大器 5G23 的同相(加速极是反相端)输入端与电压调压电位器 V_R 上的设定电压比较来改变 5G23 输出电压的大小,从而来调节和稳定主电路输出电压的变化。

2. 快门时间控制器

手电两用四杆联动的单叶片结构快门用在 LSK-2 型、LSK-3 型离子束刻蚀设备上。该快门电磁线圈由固定的 30V 电源驱动。快门动作方向由继电器 J_3 和 J_4 的触点进行切换而改变。由于快门的开和关动作要在几秒钟之内完成,加上电磁线圈的安匝数大,导线细,为不使线圈发热,电磁铁的供电电路设计了 5s 延时通电电路。在保证快门动作完成后,将电磁线圈断电。这个电路由 BG₅、 J_9 、BG₆、 J_6 等元件组成。快门时间控制器分手控和计算机控制的束控两种控制方式。手控时将通过琴键开关直接控制 BG₃ 和 BG₄ 的基极来控制快门的开和关;外控(束控)将通过计算机以及由差动式比较器 BG307 连接成的窗口鉴别器送出的信号电压控制 BG₁ 和 BG₂ 的基极控制快门的开和关。

3. 主机电控系统

离子束刻蚀的主机电控系统由控制变压器、压力继电器、热继电器、半导体时间继电器、中间继电器、交流接触器、螺旋式熔断器、讯响器、开关、插座、信号灯等组成。位于主机机柜中,保证机械泵、扩散泵、电磁带放气真空阀、插板阀、三通阀、复合真空计及供水系统正常工作。

4. 计算机控制系统

实现工作一维深度加权刻蚀的离子束刻蚀设备,要用计算机控制系统。深度加权的刻蚀深度按照预先给定的曲线分布进行,由于离子束的强度是恒定的,离子源的位置也是固定的,而工件台相对于离子源作一维平移,所以控制工件的刻蚀深度即转化为控制工件在各个不同位置的刻蚀时间。

计算机 TRS-80 先按给定的数据模型计算出对应于工件每个位置所需的刻蚀时间,并存入内存;然后控制步进电机使工件台作一维方向的平移,每移动一定的距离,停留某一预定时间。

在刻蚀过程中,用计算机控制,主要实现以下几个功能:① 控制刻蚀时间;② 控制工件台平移;③ 控制快门开、关;④ 巡检束流。当配电系统的各种故障引起束流不正常时,希望保留现场,计算机处于暂停状态,待故障排除后继续进行刻蚀;⑤ 控制步进电机能正、反转进行双向刻蚀。

5. 整机自控系统

离子束刻蚀设备整机自动化是设备发展的方向。LSK-3 型机实现了从开机到刻蚀终止全过程的自动化。

整机程序自动控制的功能为:对刻蚀全过程 14 个受控量具有准确控制功能;对 6 个条件

量具有判别、等待和分支处理功能。延时时间精度优于 $\pm 0.2\%$ 。

(七) 离子束刻蚀工艺

加工质量和加工效率是离子束刻蚀工艺的主要问题。加工效率以刻蚀速率为标志,加工质量则涉及到图形轮廓、刻蚀精度、均匀性、重复性和表面损伤等问题。它们既取决于刻蚀设备(特别是离子源)的研制水平和掩膜技术,又取决于工作参数的选择和样品材料的性质。

1. 刻蚀速率

刻蚀速率是以单位时间内刻蚀的深度表示的,它与溅射率、到达表面的离子通量密度及材料的原子密度有关。

刻蚀速率与溅射率成正比。溅射率与入射离子的种类、能量、入射角度、靶材的种类、晶格结构、表面状态、升华热、温度以及残余气体的组分有关。离子束刻蚀通常用的入射离子能量为 $300\text{eV}\sim 2000\text{eV}$ 。入射离子的能量增大则刻蚀速度增大,但表面损伤也增大。

刻蚀速率与束流密度成线性关系,是指束流密度和离子能量较低、溅射率不随束流密度变化而言的。束流密度过高,可能破坏表面的某些物理化学状态,使溅射过程复杂化,从而使刻蚀速率偏离线性关系。

刻蚀速率与靶材的原子的密集程度成反比,即在相同的溅射率下,靶材密度越高,原子量越小,刻蚀速率就越低。表 10-38 给出了换算成束流密度为 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 的氩离子束垂直入射时,各种材料的刻蚀速率实验值。表 10-39 给出了离子垂直入射材料的刻蚀速率。

表 10-38 氩离子的溅射产额和刻蚀速率

靶 材	溅射产额 (原子/离子)		刻蚀速率 ^① $/\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$		靶 材	溅射产额 (原子/离子)		刻蚀速率 $/\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$	
	500eV	1000eV	500eV	1000eV		500eV	1000eV	500eV	1000eV
Be	0.5	1.0			Ta	0.6	0.9	15	25
C	0.1	0.2		12	W	0.6	0.8	18	
Al	1.1	2.0	24~30	44~68	Pt	1.4	2.0		120
Si	0.5	0.9	22	36~49	Au	2.4	3.7	105	160~200
Ti	0.5	1.0	10~20	20	1Cr18 Ni9Ti			25	
V	0.6	0.9		22	SiO ₂			33	38~63
Cr	1.2	1.5		20	Al ₂ O ₃			8~13	13
Fe	1.0	1.7		32	FeO				44
Co	1.2	1.8			B ₄ C				28
Ni	1.4	2.0		54	GT35				24
Cu	2.0	3.1	45	100~130	GaAs (110)	0.9		65	103~260
Ge	1.1	1.5			LiNbO ₃			25	40~64
Zr	0.6	1.0		32	Bi ₁₂ GeO ₂₀			100~130	
Nb	0.6	1.0		30	AZ1350			20~24	53~60

(续)

靶材	溅射产额 (原子/离子)		刻蚀速率 ^① /nm·min ⁻¹		靶材	溅射产额 (原子/离子)		刻蚀速率 ^① /nm·min ⁻¹	
	500eV	1000eV	500eV	1000eV		500eV	1000eV	500eV	1000eV
Mo	0.7	1.2	23	40	KTFR				39
Pb	2.1	3.0		90	PMMA			65	84
Ag	3.0	4.5		200~275	坡莫合金			33~45	50

注:①刻蚀速率是束流密度为 1mA/cm² 时的值

表 10-39 离子束垂直入射的各种材料的刻蚀速率

材料	刻蚀速率/nm·min ⁻¹	离子能量/eV	材料	刻蚀速率/nm·min ⁻¹	离子能量/eV
铝	30, 24, 67.5	50, 50, 100	不锈钢(304)	25	50
金	105, 160, 200	50, 100, 100	坡莫合金	33, 45, 50	50, 50, 100
钨	18	50	硅	21.5, 36	50, 100
钽	15, 25	50, 100	二氧化硅	33, 38, 62.5	50, 10, 100
钛	20, 10, 20	50, 100, 100	氧化亚铁	44	100
钼	23, 40	50, 100	三氧化二铝	83, 13, 13	50, 50, 100
铜	45, 130, 100	50, 100, 100	钠钙玻璃	20	50
铬	20	100	铈酸锂	43, 64	50, 100
锆	32	100	砷化镓	65, 103, 240	50, 100, 100
银	200, 275	100, 100	锆酸铋	134	50
锰	27	100	AZ1350	20, 23.6, 60	50, 50, 100
钒	22	100	KTFR	39	100
铁	32	100	OMR83	575	100
铌	30	100	Riston14	25	50
铂	115, 120	100, 100	PMMA	65, 84	50, 100
钯	90	100	COP	86	50
镍	54	100			

2. 图形轮廓

图形轮廓的边壁斜度可通过选择束入射角(有时还需旋转工件台)来控制。

掩膜厚度对束有遮蔽作用。迎面的掩膜会遭到束的直接轰击,得到脊背形直条沟槽,倘若图形复杂,不同部位线条走向不同,其遮蔽区和迎面掩膜边壁上入射角则不同、造成沟槽剖面的很大差异。若同时旋转工件台,对不同部位掩膜遮蔽区域的作用时间相同,则可消除这种差异。

图形边壁底部有时会有明显的沟道,这主要是由于离子从边壁反射增加了边壁底部的通量密度引起的。

刻蚀过程中溅射原子的角分布具有余弦特征。与离子入射角无关。被溅射出的基底材料会重新沉积到图形边壁上,有时能使窄槽变成“U”字形剖面。重新沉积是引起金属氧化物器

件(如 MOS)产生漏电的主要原因。控制这种现象有两种方法:一种是用圆弧形掩膜,另一种是选择低刻蚀速率的材料做成薄掩膜。

3. 几何图形刻蚀的均匀性和重复性

整个样品几何图形刻蚀的均匀性和可重复性,主要取决于离子源的性能和刻蚀面的形貌。着先要求离子源的工作参数稳定,特别是束离子能量和束流密度稳定,样品的离子曝光区域的束流密度均匀。刻蚀面上的凸起和凹坑,会使线条变窄,斜面变形等。例如,若离子束垂直轰击样品基面,则凹坑斜面刻蚀得较快,使坑进一步加深和扩大。若使样品倾斜一个角度,凹坑就得以减小或消除。与此相反,若刻蚀面有锥体凸起,则离子束垂直轰击基面时使凸的生长受限制。

4. 合理选择刻蚀工况

不同的器件要根据不同的要求合理地选择刻蚀工况,才能保证刻蚀出合格的器件。

① 对气体轴承螺旋槽止推板上刻蚀,利用 LSK-3 型离子束刻蚀机选择合理的刻蚀工况,实现了不等宽螺旋槽的刻蚀。图 10-46 给出了离子束刻蚀加工的动压气体轴承变宽螺旋槽止推板的外形图。表 10-40 给出了两对气体轴承止推板的刻蚀工况。

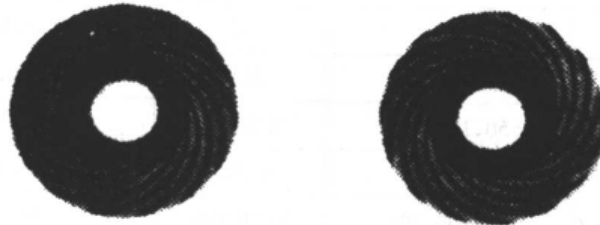


图 10-46 动压气体轴承变宽螺旋槽止推板外形图

表 10-40 两对动压气体轴承止推板刻蚀工况

项 目		第一对	第二对
阴极	电压/V	9.5	8.5
	电流/A	9	7.6
阳极	电压/V	60	60
	电流/A	0.8	0.36
屏栅极	电压/V	600	600
	电流/mA	80	80
加速极	电压/V	-200	-200
	电流/mA	4	4
离子能量/eV		660	860
束流密度/mA/cm ²		0.45	0.45
束入射角/(°)		0	0
工作压力/Pa		6.6×10^{-2}	6.6×10^{-2}
工作气体		Ar	Ar

止推板材料:碳化硼;掩膜材料:铝片,厚 0.2mm;刻蚀时间:第一对为:240min,第二对为 255min;刻蚀速度: $0.7\mu\text{m}/\text{h}\sim 1\mu\text{m}/\text{h}$ 。

槽深精度:采用泰勒品塞 4 型粗糙度仪测量,结果为:

第一对 $\pm 0.14\mu\text{m}$,均匀度 7%;

第二对 $\pm 0.04\mu\text{m}$,均匀度 1.5%。

结果:实刻出的工件槽底形状好,槽底的斜角大于 85° 。

② 声表面波沟槽器件反射槽的离子束刻蚀,利用 LSK-2 型离子束刻蚀机选择合理的刻蚀工艺,对声表面波交通槽器件的反射槽进行离子束刻蚀。图 10-47 给出了声表面波沟槽器件结构示意图。其工艺过程如下:

首先在基底上光刻成光刻胶掩膜,用光刻胶遮挡不刻蚀部分,只让要刻蚀的沟槽部分受离子束轰击。

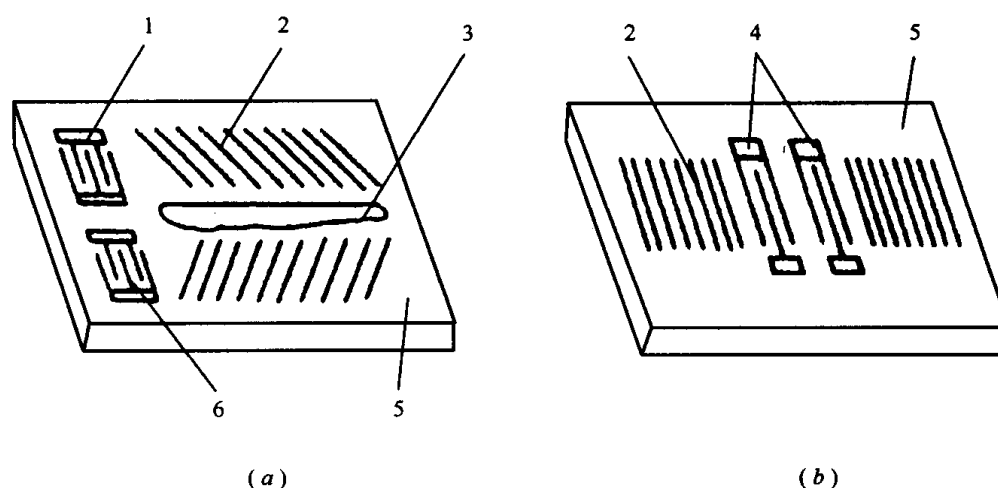


图 10-47 声表面波沟槽器件结构示意图

(a) 脉冲压缩滤波器; (b) 双端对谐振器。

1—发射换能器;2—反射栅阵;3—可变宽金属膜;4—换能器;5—基片;6—接收换能器。

作好掩膜的基底放入离子束刻蚀机真空室内可移动的工件台上。离子束通过“人”字形狭缝照射工件。狭缝宽度只允许离子束在每个时刻轰击少数沟槽。移动工件台,改变离子束在栅阵不同位置上的照射时间,便可形成所要求的槽深分布。工件台的移动由 TRS-80 微机控制,用步进电机驱动。

刻蚀的开始和结束由计算机通过快门的开关来控制。当出现故障时,计算机自动关闭快门,中止刻蚀,排除故障后可继续刻蚀。

刻蚀的工况是:工作压力: $6.6 \times 10^{-2}\text{Pa}$,束流 80mA,束离子加速电压 600V,加速极电压 -200V,束流密度 $0.6\text{mA}/\text{cm}^2$,器件(铌酸锂)的刻蚀速率为 $4 \times 10^{-7}\text{mm}/\text{s}$ 。

离子束刻蚀后,去掉光刻胶,用干涉显微镜测量槽深。实验表明槽深分布与理论计算是一致的。

(八) 国内外离子束刻蚀机概况

表 10-41 给出了离子束刻蚀机主要性能及生产单位。

表 10-41 国内外离子束刻蚀机性能指标对照表

型号名称	真空室	离子源	有效束径/mm	性能指标						功能	制造单位	制造日期
				束流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	束能量/eV	束稳定度	工件台	工质	抽气手段	控制方法		
CSC 生产线 离子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	装片 12片4	<1.5	<2000		旋转、倾斜	Ar^+ 束	低温泵	全自动 控制	美国 CSC 公司	1979 年
Veeco-3"离子 束刻蚀机	立式	考夫曼型	$\phi 70$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 15.0$	<2000			Ar^+ 束	扩散泵液氮 阱水冷障板	全自动	美国 Veeco 公司	1973— 1976 年
NIN/TLA 离 子束多功能设备	方式	考夫曼型	$\phi 55$ $\phi 150$ $\phi 350$	$0\sim 1.0$	<1500			Ar^+ 束	扩散泵水冷 障板液氮冷 阱	全自动	美国 Technics 公司	1979 年
RE-580 反应离 子束刻蚀机	卧式	石墨电极 考夫曼型	$\phi 150$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 1.0$	<1500		氟里昂冷机 自动装拆片 有终点监控	Ar^+ CCl_4		全自动	美国	1980 年
LK-1 离子 束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 70$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 1.5$	$300\sim 1500$		旋转倾斜 半导体制冷	Ar^+	扩散泵 水冷障板	手控	上海冶金所	1979 年
LK-1 离子 束刻蚀机	立式	考夫曼型	$\phi 40$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 1.0$	$150\sim 1000$	$\pm 1\%/h$ 手调	平移工件台	Ar^+	扩散泵 水冷障板	计算机 控制平移 工件台	长沙半导体 工艺设备厂	1981 年
LSK-500 离 子束刻蚀机	卧式	多极场 离子源	$\phi 150$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 1.0$	$100\sim 1000$	$\pm (1\%)/h$	旋转、直接 水冷	Ar^+	扩散泵水冷 障板	手控	中科院半导 体所北京真 空仪器厂	1983 年
LSK-2 型离 子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 105$ ($\pm 5\%$)	$0\sim 1.0$	$100\sim 1300$	$\pm (3\%)/h$	平移、直接 水冷	Ar^+	扩散泵 水冷障板	计算机 控制平 移工件台	兰州物理所	1981 年

(续)

型号名称	真空室	离子源	有效束径 /mm	性能指标						功能	制造单位	制造日期
				束流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	束能量/eV	束稳定度	工件台	工质	抽气手段	控制方法		
LSJ-1型 离子束刻蚀机	立式	考夫曼型	$\phi 67$ ($\pm 5\%$)	0~1.0		$\leq \pm 1\%/h$	旋转、直 接水冷	Ar^+	扩散泵 水冷障板	手控	航天部 二院23所	1983年
LSK-3型 离子束刻蚀机	卧式 兼立式	考夫曼型	$\phi 100$ ($\pm 5\%$)	0~1.0	100~1300	$\pm 0.5\%/h$	旋转、倾斜 平移直接水冷	Ar^+	扩散泵 水冷障板	手控 全自控	兰州物理所	1985年
DSI-4型 离子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 100$ ($\pm 5\%$) $\phi 25$	0~1.0 20.0	400~1000 500~1500	$\pm 0.5\%/h$	旋转、倾斜 直接水冷	Ar^+	扩散泵 水冷障板	手控自控	兰州物理所	1986年
RIBE-5型 离子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 100$ ($\pm 5\%$)	0~1.0	50~1000	$\pm 1\%/h$	旋转、倾斜 直接水冷	Ar^+ F_4C	扩散泵 水冷障板 液氮冷阱	手控自控	兰州物理所	1991年
LSK-1型 离子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 78$ ($\pm 5\%$)	0~0.7	100~1300	± 0.45	四维;旋转 平移,倾斜	Ar	扩散泵 水冷障板	手控	兰州物理所	1981年
RIBE-200型反应 离子束刻蚀机	卧式	考夫曼型	$\phi 100$ $\phi 200$	0~1.0	50~1000	± 1.0	三维、旋转 平移,倾斜	Ar CF F_4C	扩散泵 水冷障板 液氮冷阱	手控自控	兰州物理所	1994年
LSK-6型 离子束刻蚀机	卧式 兼立式	考夫曼型	$\phi 100$	0~1.0	50~1300	± 1.0	三维、平移 旋转、倾斜		扩散泵 水冷障板	手控自控	兰州物理所	1995年

四、空间环境模拟设备

(一) 概述

地球周围的大气层密度是随高度而变化的,高度越高空气越稀薄。地球上海平面的大气压为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$,而世界最高峰珠穆朗玛峰的顶端大气压只有 $3.2 \times 10^4 \text{Pa}$,相当于大气压的 $1/3$ 强。发射的人造卫星离地面最低时,其高度为 150km ,此高度的空间真空度约为 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。最高的通信卫星离地面达 $3.6 \times 10^4 \text{km}$,至于探测月球的阿波罗载人飞船,以及探测火星、金星的自动星际站离地球表面就更遥远了。星际空间中的真空度约为 $1.3 \times 10^{-11} \text{Pa}$ 。

卫星、运载火箭、飞船、星际站(统称飞行器)都是在真空中飞行,真空对这些飞行器运行及材料的影响与大气中不同,主要表现为:

- ①真空中的材料会加速升华,损失质量;
- ②材料在真空中没有气体保护层,并可以失去氧化膜,使材料的光学特性改变,以至活动部件之间的磨损增大,甚至出现冷焊现象;
- ③真空中的仪器设备产生的热量不易传走,可能使局部温度升高,影响仪器正常工作;
- ④材料长期处于真空中,由于气体脱附及易挥发物质的损失,材料的热性能及电性能将发生改变。

飞行器在空间飞行,除了受到真空环境影响以外,还要受到太阳辐射、各种带电粒子及温度的影响,这些因素将造成材料性能的改变,使材料损伤、仪器失灵,破坏飞行器工作,以至造成人身伤亡。为此,必须建立与空间环境相似的模拟设备,使飞行器上天之前通过地面模拟试验,消除隐患,以确保飞行时的可靠性。

(二) 热真空模拟试验设备

热真空模拟设备是用于模拟太空的真空环境、外热流环境及冷黑环境的装置。模拟室直径大于 2m 者,称之为空间模拟器,用于整星或大型分系统作热真空试验。模拟室直径小于 2m 者,称之为热真空环境模拟设备,用于卫星组件、元器件及材料试验。

1. 模拟设备的环境参数

①真空环境。空间的真空度随卫星轨道高度的不同而不同,距地面 100km 处的真空度为 $4 \times 10^{-2} \text{Pa}$; 300km 是 $4 \times 10^{-5} \text{Pa}$; 3000km 是 $4 \times 10^{-11} \text{Pa}$ 。根据气体的传热性能与压力的关系,压力小于 10^{-1}Pa 时,传热的主要方式是辐射传热。对流和气体分子热传导传热可忽略。为此,模拟室用 10^{-3}Pa 的真空度来模拟空间的超高真空环境,在航天器作热平衡试验时,对热控温度带来的影响可以忽略不计。

②冷黑环境。宇宙空间是一个温度为 3K ,吸收系数为 1 的冷黑空间。在此环境下,运行中的航天器发出的热量不再返回,没有辐射的再反射,这种环境是理想的绝对黑体,称为冷黑环境。热真空设备中,用热沉来模拟冷黑环境,若航天器表面温度为 300K ,热沉内壁温度为 100K ,所引进的模拟误差仅为 1% 左右。

③空间外热流环境。热流环境包括太阳辐照、地球辐射和地球反照。热流模拟一类是采用太阳模拟器,模拟太阳辐照、地球辐射和反照。另一类是用红外模拟器,如红外灯、电阻式加热装置对航天器进行加热,使航天器表面热流等于空间外热流。

2. ZM 系列热真空环境试验设备

ZM-800 热真空模拟设备是用于星载仪器作热真空试验。其空载真空度为 $2 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 温度范围为 $50^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 。依据对真空度的要求, 选择扩散泵—机械泵机组作为抽气手段即可。真空室中, 为得到 $50^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 的温度环境, 设置了热沉, 其外壁绕加热带, 以得到高温。内壁盘上冷管, 通入由氟里昂冷却的酒精液体, 可以得到 -65°C 的低温。

(1) 设备构成

设备主要由真空室、热沉、抽气系统及制冷系统构成。

①真空室。真空室筒体内径 800mm, 长约 1600mm, 用 6mm 不锈钢板卷制而成。筒体后部有酒精入口, 中部有抽气口。筒体上设有真空压力表、针阀以及热偶和电离规。除此之外, 还有高频引入法兰及通电法兰等。

卧式真空室端部有大门, 法兰厚 26mm, 宽 45mm。以两个固定铰链与筒体相连, 铰链轴孔为腰形长孔, 以便适应抽真空后, 橡胶圈的变形量。大门预紧采用了三个手轮, 通过丝杆—螺母机构给橡胶密封圈施加预紧力。机械泵开始抽气后, 借助于真空室内外压差使大门密封。有时大门法兰与密封圈之间还有间隙, 但一抽气, 法兰立刻合拢。在设计大门密封圈时应注意, 其突出高度应比标准密封设计高一点, 以弥补大门法兰加工误差及变形。

真空室内壁应该抛光, 以便清除表面氧化层及污物。氧化层为疏松结构, 表面很大吸气量就大, 不利于抽气。污物除吸附大量气体外, 蒸气压较高, 也会直接影响真空度的获得。

②热沉。热沉的功能是: 在低温状态下, 能完全吸收试验物放出来的热; 在高温状态下, 能将热量传给试验物体。在高真空下, 热沉与试验物之间为辐射换热, 故要求热沉内壁涂黑。黑度愈大, 辐射率愈大, 换热效果就愈好。可以用化学发黑或涂耐高温涂料来实现。涂涂料时, 应采取适当工艺, 否则涂层会因受冷热交变而脱落。热沉外表面应该抛光, 以减小辐射引起的冷损。同样的理由, 热沉支承与筒体间应隔热, 进出液管与筒体连接应使用波纹管。

热沉材料通常选用紫铜, 导热性好, 易使热沉温度均匀。也有用不锈钢材料的, 容易发黑, 可得到较高的黑度。但它导热较差, 短时间内可能造成热沉壁温度不均。

热沉为圆筒形, 外壁绕有加热带, 内壁焊有冷液管, 其示意图如图 10-48 所示。冷管材料为紫铜, 而出口法兰为不锈钢, 两者之间不易焊接, 故两者之间应选择一适当过渡管材, 保证可焊性否则气密性不易保障。

③真空抽气机组。真空系统原理如图 10-49 所示。以 K-400T 扩散泵为主泵。经过挡板及高真空阀后的有效抽速为 2600L/s 。在真空室热沉温度为 50°C 而真空度为 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时, 扩散泵能排走的平均气体流量为 $2.6 \text{Pa} \cdot \text{L/s}$, 也就是说, 试验物及真空室内表面出气所产生的流量为 $2.6 \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 时, 能确保在 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 下做试验。

扩散泵以两台 2X-30 型机械泵为前级, 在正常工作状态下, 用一台机械泵做扩散泵的维持泵。在粗抽时, 为缩短抽气时间, 可同时开动两台机械泵。两台机械泵还可以切换作扩散泵的前级泵。切换使用时, 应注意将碟阀 2 先关闭, 然后再切换, 否则可使大气进入扩散泵前级管道。由调试中发现, 在机械泵切换的瞬间, 前级管道上热偶计指示几乎到大气状态。这是由于电磁阀开启后, 还未来得及关闭其放气孔所致。

④制冷系统。制冷系统采用复叠式氟里昂压缩机组, 其原理如图 10-50 所示。第一级制冷采用 F22 工质, 可得到 -40°C 温度。第二级制冷采用 F13 工质, 可得到 -80°C 低温。本设备试验中, 常用 -50°C , 选择酒精作冷媒即可。酒精易挥发, 酒精箱密闭性要好。

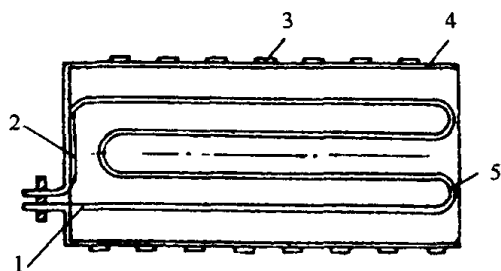


图 10-48 热沉示意图

- 1—进液管;2—出液管;
3—加热带;4—热沉壁;
5—冷管。

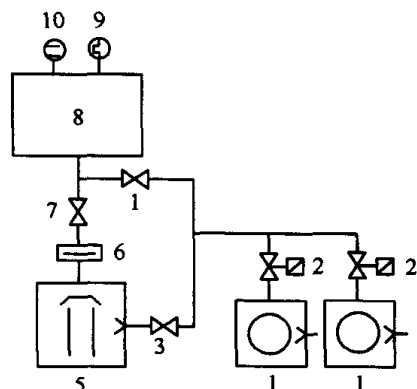


图 10-49 真空系统原理图

- 1—2X-30 型机械泵;2—电磁阀;3—前级阀;
4—粗抽阀;5—K-400T 扩散泵;6—挡板;
7—高真空阀;8—真空室;9—热偶规;10—电离规。

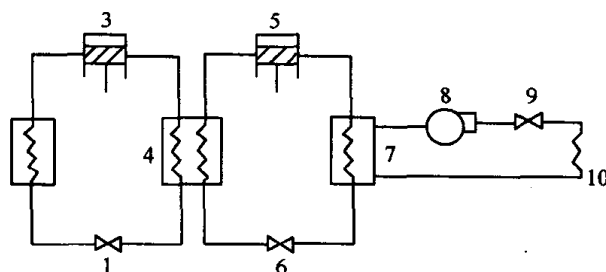


图 10-50 制冷系统原理图

- 1—F22 节流阀;2—冷凝器;3—F22 压缩机;4—F13 冷凝器;5—F13 压缩机;
6—F13 节流阀;7—蒸发器(酒精槽);8—酒精泵;9—电磁阀;10—热沉冷管。

制冷系统制冷过程是:由 F22 压缩机出来的高温高压 F22 蒸气,到冷凝器后,被冷凝成高压液态冷剂,通过节流阀后,冷剂进一步降温,同时使压力由高压变为低压,并在蒸发器中蒸发,吸走被冷却介质(即 F-13)的热量,使其降温。低温高压的 F13 液体,经 F13 膨胀阀后,进一步降温,同时压力降低,流经酒精箱中的蒸发器后,吸收酒精热量,使酒精降温,其温度可达 -80°C 。低温酒精,通过酒精泵,打入热沉中,使热沉达到所需温度。

(2) 设备试验性能

真空室容积为 900L,机械泵的抽速为 30L/s。从大气下开始抽气,10min 后可达 6.2Pa ,此值与计算值比较接近。(对于扩散泵—机械泵真空系统,达此真空度后,扩散泵即可以工作。)抽到接近机械泵的极限真空(如 1Pa 左右)大约需 45min。当真空室在未打开之前通入氮气,结果表明,在相同的时间内,可得到较高的真空度,即意味着缩短了抽气时间。不充氮时,达到 2.5Pa 的真空度需要 30min,而充氮后,这此真空度仅需 10min,使抽气时间缩短至 $1/3$ 。出现这种现象的原因是大气中水气的影响。真空室内表面暴露大气后,水分子吸附于表面,其吸附热较大,不易解吸,致使抽气时间增长。

当打开真空室大门不充氮气时,开高阀 30min 后,真空室真空度可达 $5.4 \times 10^{-3}\text{Pa}$;充氮气后,可得到 $4.0 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的真空度。

热沉由室温升到工作温度 50°C 仅需 20min。温度变化为一直线,意味着升温速率为常数。由计算可知,升温速率近似于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

从室温降到 -30°C ,热沉的降温曲线为一直线,斜率较大,即意味着降温速度快。而

$-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 为曲线,表示降温速度慢。越接近工质温度,降温速度越慢,最后趋近于恒定值。

热沉由室温降到 -50°C ,保温 10h,再由 -50°C 上升到 50°C ,再保温 10h,共做 5 个循环试验。在第一个循环时。冷态真空度为 $6.4 \times 10^{-5}\text{Pa}$;热态真空度为 $2 \times 10^{-3}\text{Pa}$;第 5 个循环时,热态真空度提高到 $5.4 \times 10^{-4}\text{Pa}$,冷态真空度上升到 $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。

(3) ZM 型星船组部件热真空模拟设备技术参数

ZM 型热真空模拟设备技术参数见表 10-42。

表 10-42 ZM 型热真空模拟设备主要技术参数

型号 技术参数	ZM-630	ZM-800	ZM-1000
真空室尺寸/mm	$\phi 630 \times 1400$	$\phi 800 \times 1400$	$\phi 1000 \times 1700$
有效空间(热沉尺寸)/mm	$\phi 470 \times 1000$	$\phi 700 \times 1000$	$\phi 800 \times 1200$
空载真空度/Pa	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
有载真空度/Pa	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}
热沉温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-60 \sim +100$	$-60 \sim +100$	$-60 \sim +100$
热沉平均升降温速率/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	± 1	± 1	± 1
热沉温度不均匀性/ $^{\circ}\text{C}$	± 4	± 4	± 4
允许试验件发热量/W	80	100	100
允许试验件漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5	2	2
设备包括主要部件	真空室、热沉 抽气机组 酒精热交换器 制冷系统 加热系统 电控系统 微机数据采集	真空室、热沉 抽气机组 酒精热交换器 制冷系统 加热系统 电控系统 微机数据采集	真空室、热沉 抽气机组 酒精热交换器 制冷系统 加热系统 电控系统 微机数据采集
功率/kW	32	38	45
水量/ $\text{T} \cdot \text{h}^{-1}$	2	2.5	3.5
注:兰州物理研究所产品			

3. 大型热真空模拟设备

大型空间环境模拟试验设备是环境模拟工程中的重要地面试验设备,由于空间环境十分复杂,不可能在一个设备中全部加以模拟。对于大型空间模拟器,一般应能模拟空间真空、冷黑、太阳电磁辐照、地球对太阳光的反照、地球本身的红外辐射环境以及空间飞行器对太阳的姿态等。

大型空间环境模拟试验设备主要是为空间飞行器作整星(船)试验,以模拟空间飞行器在宇宙空间所遇到的主要空间环境,使空间飞行器在正式发射之前,能在这类模拟设备中作各种检验性试验或可靠性试验,以检验飞行器的结构设计、温控设计及整星(船)功能等是否满足设计要求。

1) KM2 空间模拟器

KM2 空间模拟器主模拟室直径 2m、长 3.2m,有效空间直径 1.7m、长 2.5m。用 20 锅炉钢板制造,壁厚 16mm,内表面镀镍抛光。

热沉温度 85K,最高温度 373K,吸收系数 0.92,用紫铜制造。

真空抽气系统:粗抽泵用 1 台 H-150 型滑阀泵,抽速 150L/s;前级泵用 2 台 ZX-30 型机械泵,每台抽速 30L/s,2 台 Z-150 型增压泵,每台抽速 450L/s;高真空泵用 2 台 KY-15(K-800)油扩散泵,每台抽速 20000L/s。真空容器极限真空度为 6.7×10^{-5} Pa。

液氮系统用开式沸腾,由二台 5t 液氮储槽交替增压输送液氮。

加热系统采用 15kW 扁形电加热带。

太阳模拟器采用透射式发射系统;光源用一只 25kW 短弧水冷氙灯,辐照强度 $(0.5 \sim 1.3) S_0$ 可调,辐照面积直径 1m,发散角 13° 。面均匀性:在直径 1m 光照面积上为 $\pm 15\%$,在直径 0.9m 光照面积上为 $\pm 5\%$,稳定性: $\pm 3\%$ 。容器顶部设计有吊装试件的转轴一根,可作 360° 旋转,转速 $1\text{r/min} \sim 10\text{r/min}$ 。

2) KM3 空间模拟器

KM3 空间模拟器系统图如图 10-51 所示。

主模拟室直径 3.6m、长 7.3m、容积 70m^3 ,试验空间:直径 3m、长 5m。真空容器用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板制造,壁厚 14mm。

空载极限真空度: 9.3×10^{-7} Pa。

热沉温度: $< 100\text{K}$,吸收系数 0.93,材料用紫铜制造。

真空抽气机组:粗抽泵用一台 V6(W4)型活塞泵,抽速 100L/s。前级泵用 2 台 H-150 型滑阀泵,每台抽速 150L/s;2 台 ZL-11(ZJ-1200)罗茨泵,每台抽速 1200L/s。高真空泵:原设计用 2 台 KY-15(K-800)油扩散泵作主抽泵、每台抽速 $2 \times 10^4\text{L/s}$,配有水冷障板及液氮冷阱,并公用一台 KY-12(K-300)辅助扩散泵,抽速 2500L/s,现经改造用 2 台直径 800mm 制冷机低温泵代替扩散泵,成为无油抽气系统。

在热沉内安装有内装式 20K 低温泵,氮板尺寸:板宽 60mm、长 4780mm、厚 0.5mm,氮管直径 20mm、壁厚 2mm。氮板布置:沿筒体热沉套横截面,每隔 5° 布置一根氮管,共 80 根,占 240° 角范围,并用液氮翼板作屏蔽保护。氮板前沿面积为 29m^2 ,氮板温度 $< 20\text{K}$,氮板总抽速: $> 10^6\text{L/s}$ 。

气氮制冷系统如图 10-51 所示。原设计用活塞式膨胀制冷机,制冷量 800W,现已改造成透平式膨胀机,制冷量 450W,出口温度 14K。压缩机采用单列双向无油润滑氮气压缩机:4 级压缩,终压 4MPa,每台进气量 $8.33\text{m}^3/\text{min}$,共 2 台,其中 1 台备用。

液氮系统原理图如图 10-51 所示,采用单相密闭循环系统。液氮泵流量 $16\text{m}^3/\text{h}$,排出压力 0.2MPa,共 2 台,其中一台备用。

图 10-52 是我国 KM3 改成无油抽气后的系统原理图。主泵由 20K 气氮板及 2 台 ZDB-800 低温泵组成,预抽及粗抽由分子泵机组及罗茨泵机组完成。

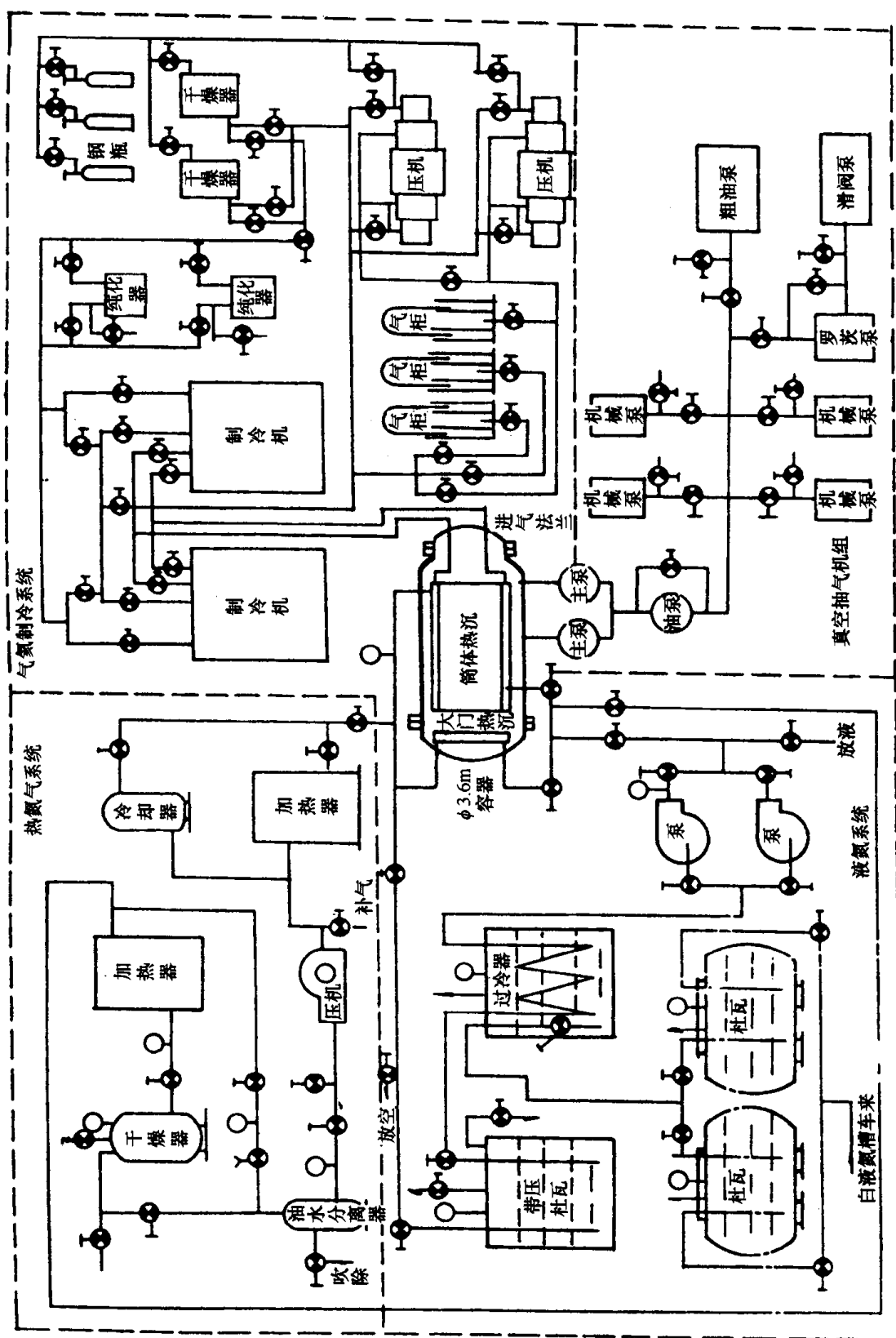


图 10-51 KM3 空间模拟器系统图

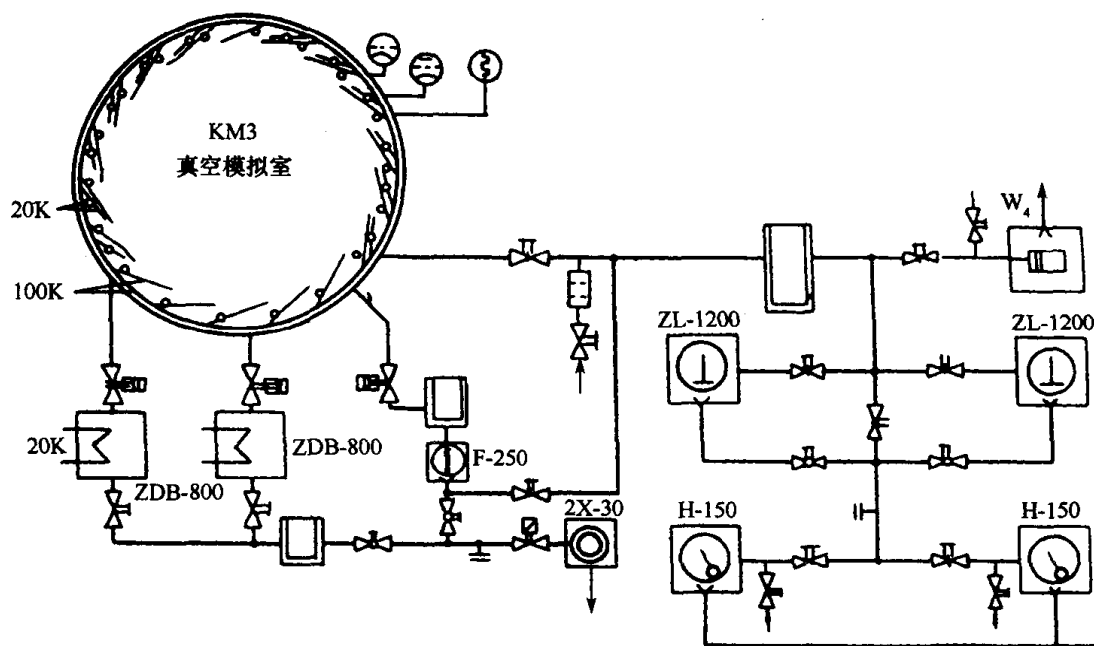


图 10-52 KM3 无油超高真空系统原理图

3) KM4 空间模拟器

中国空间技术研究院的 KM4 设备可用作大型卫星(飞船)的整体热真空和热平衡试验,亦可作大型部件或分系统的热真空试验。采用适当措施后,还可提供整星(船)作大气压条件下的热循环试验和低压下大型部件的高低温性能考核试验等。

该设备的主要技术性能如下:

试验空间:直径 6m、高 8.5m,试件入口直径 6m。

工作转台:有绕两轴转动的转台,载重 2000kg,转速 $4^{\circ}/\text{min}$,转台并可作 90° 翻转。

试件吊具:试验大厅备有 5t 和 20t 两种吊钩的桥式吊车,起吊高度为 12m,试验容器内亦设计有三点支承的试件吊具,承重能力为 2t,可将星(船)吊在容器内试验。

空载极限真空度: $5.1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

热沉套壁温: $90\text{K} \pm 5\text{K}$ 。

KM4 热真空试验设备的主容器垂直安装于试验大厅内,大厅顶部备有大型桥式吊车,大厅分上、下二层。设备顶盖为直径 7m 的大门,可以 $1\text{m}/\text{min}$ 速度移向大厅二层停放,顶盖上可安装太阳模拟器,大型试验件从容器上口进入。各分系统机组均安装在大厅一层,容器在一层平面处开有一个直径 3m 侧门,供人进出。

KM4 热真空试验设备由容器、真空抽气系统、热沉套及其降温或加热系统、太阳模拟器系统及温度数据采集和处理系统等五个分系统组成。系统简图如图 10-53 所示。

(1) 容器

结构形式:圆柱形立式容器,外壳焊有环形加强筋,直径 7m,高 12m。

结构材料:1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

顶盖大门:直径 7m,由液压千斤顶升起,电力驱动平移。

侧门:直径 3m,电力驱动侧移。

(2) 抽气系统

① 油扩散泵机组。

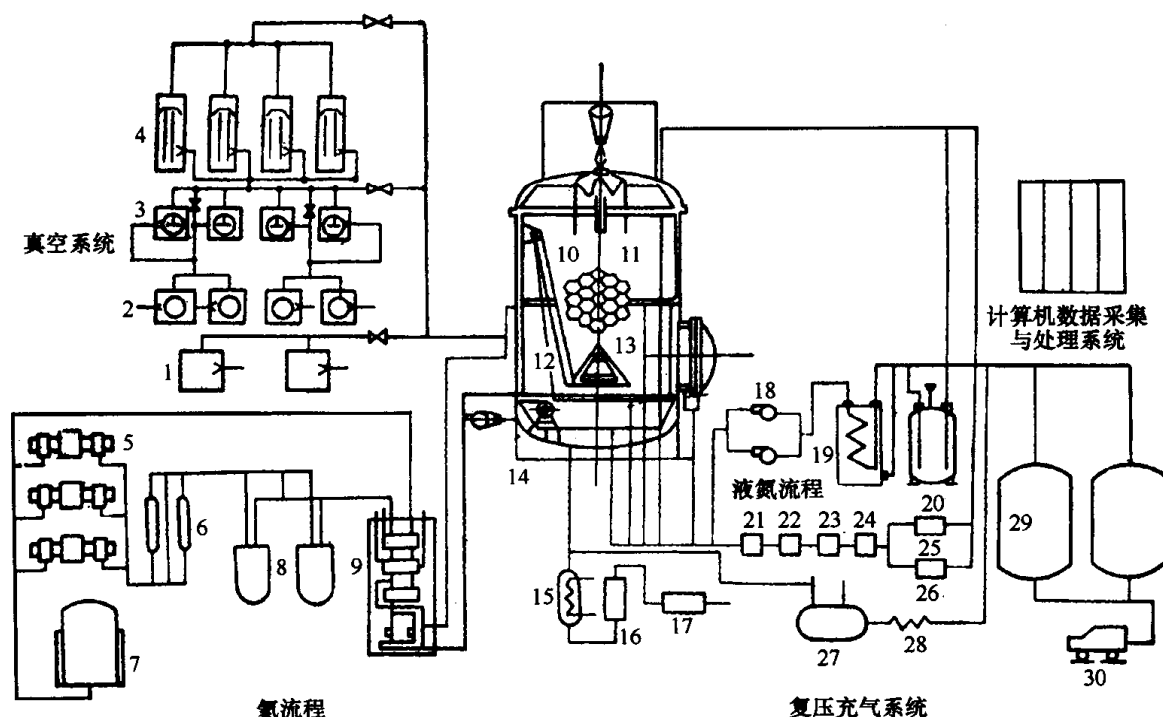


图 10-53 KM4 设备系统简图

- 1—粗泵;2—机械泵;3—罗茨泵;4—扩散泵;5—氨压机;6—干燥器;7—氨气柜;8—纯化器;9—氨制冷机;
10—太阳模拟器;11—热沉;12—大型深冷泵;13—姿态模拟器;14—主模拟室;15—冷却器;16—过滤器;
17—干燥器;18—液氮泵;19—过冷器;20—带压杜瓦;21—加热器;22—干燥器;23—油水分离器;
24—压机;25—冷却器;26—加热器;27—气罐;28—蒸发器;29—液氮贮槽;30—槽车。

粗抽泵:2 台 W₄-6 型活塞泵,每台抽速 100L/s。

前级泵:4 台 H-8(H-150)型滑阀泵,每台抽速 150L/s。

4 台 ZI-11(ZI-1200)型罗茨泵,每台抽速 1200L/s。

高真空泵:4 台 KY-16(K-1200)油扩散泵,每台抽速 50000L/s,并配有水冷挡板及液氮冷阱。

②20K 低温板(深冷泵)。

采用板管式结构,分布于中部热沉套内。

氮板尺寸:宽 100mm,长 3780mm,管径 20mm。

氮板布置:沿中部热沉套横切面每隔 3°布置一根氮管,并用液氮翼板屏蔽保护。

氮板前沿面积:约 50m²。

氮板温度:<20K。

氮板总抽速:71.5×10⁶L/s(对 O₂、N₂)。

③抽气性能曲线。在容器空载情况下,真空系统抽气 3h,可从大气压抽到 5Pa 左右,抽气 6h 可达 10⁻²Pa,抽气 24h,可达 3×10⁻⁴Pa,扩散泵冷阱中加注液氮后真空度可提高到 10⁻⁴Pa,热沉套加液氮后,总抽气时间在 30h 左右,容器真空度可达 6.8×10⁻⁵Pa。再通入 20K 气氮,抽气 12h(总抽气约 40h 左右),容器可达 5×10⁻⁶Pa 的极限真空。

KM4 容器高真空抽气曲线如图 10-54 所示。

④20K 气氮流程。用以提供 20K 低温抽气板 20K 冷氮气。流程如图 10-55 所示。

压缩机:单列双向无油润滑氮气压缩机,4 级压缩,终压 4MPa,每台进气量(STP)

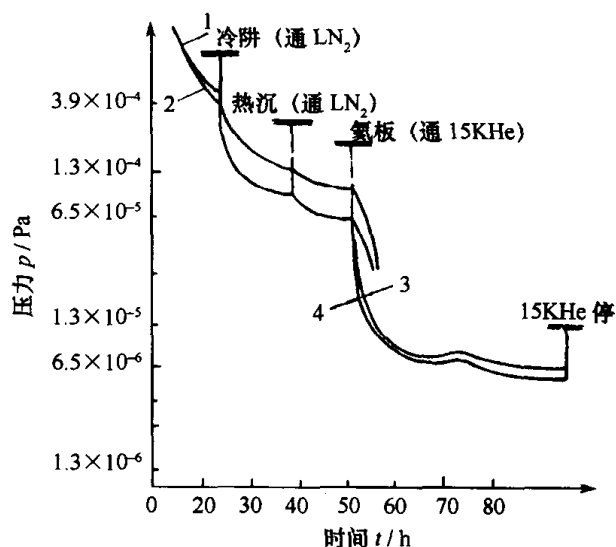


图 10-54 KM4 容器高真空抽气曲线

1—筒体南侧中部电离规测量；2—筒体北侧中部电离规测量；
3—筒体南侧下部 B-A 规测量；4—筒体北侧下部 B-A 规测量。

8.33m³/min, 数量 3 台。

制冷机：涡轮式膨胀制冷机，转速 70000r/min~90000r/min，制冷量 >1200W，效率 67%，制冷机输出至氮板总管进口处温度为 11K 左右。

制冷速度：制冷机从室温至 13K 需 $1\frac{2}{3}$ h。

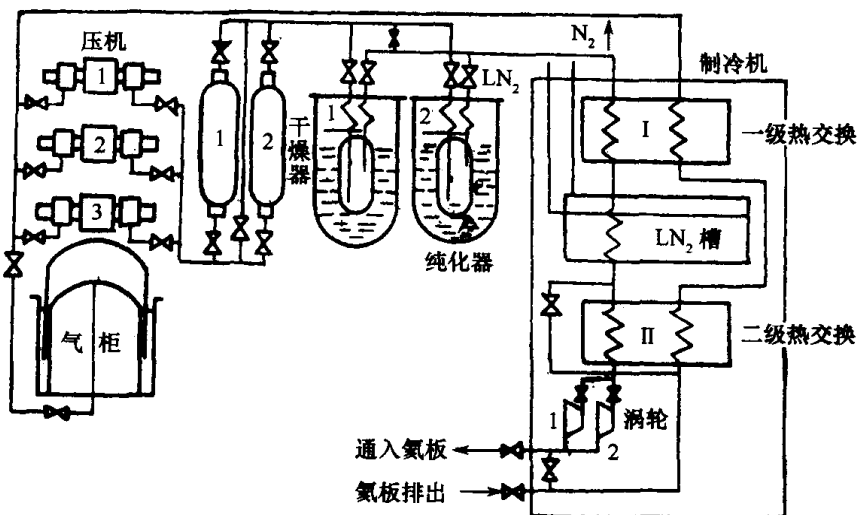


图 10-55 KM4 设备气氮流程示意图

(3) 热沉套及其降温、加热系统

① 热沉套由上部、中部、底部、大门、侧门、侧门颈部及活动热沉套七部分组成。

热沉套材料：紫铜。

结构形式：用板和管焊接成圆筒状、平板状等形式。

内表面热吸收率：涂有机黑漆，使热吸收率达 0.93。

液氮及热氮气流程，用来对热沉套进行冷却和加热。系统示意图如图 10-56 所示。

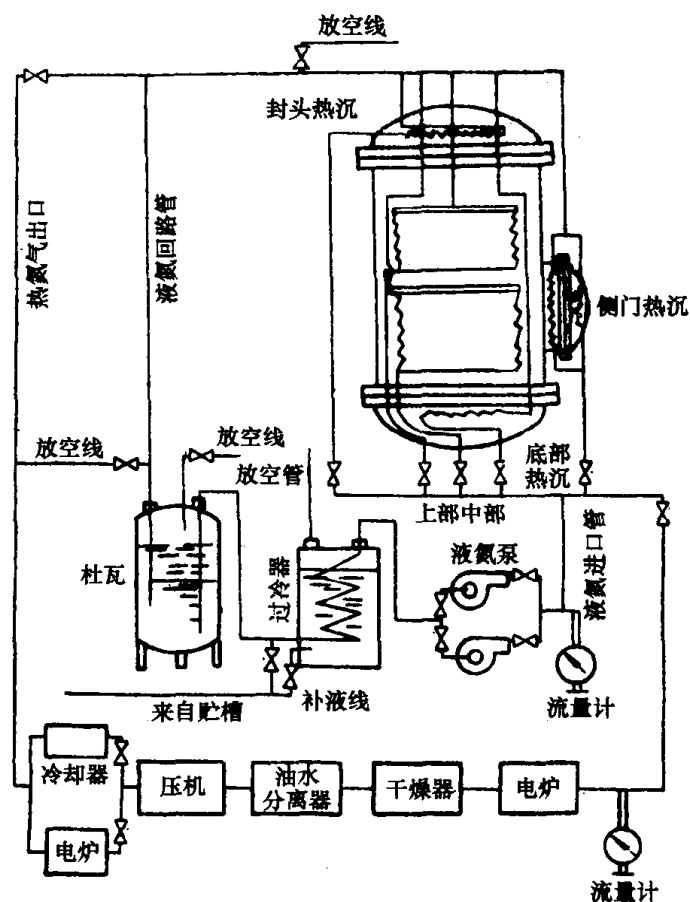


图 10-56 液氮及热氮气流程图

液氮流程形式:单相密闭循环。

液氮泵:流量 $32\text{m}^3/\text{h}$, 排出压力 $2.5 \times 10^5\text{Pa}$, 数量 2 台。

液氮贮罐:贮量 15t, 数量 2 台。

热氮气流形式:单相密闭循环。

空压机:压力 $8 \times 10^5\text{Pa}$, 流量 $600(\text{STP})\text{m}^3/\text{h}$, 1 台。

电炉:每台功率 50kW, 数量 2 台。

最高氮气温度: 150°C 。

(4) 太阳模拟器系统

型式:19 个单元组合的同轴卡塞格林系统, 单元光学原理如图 10-57 所示。

光源:19 只 25kW 短弧水冷氙灯, 其结构如图 10-58 所示。

辐照强度:1.3S(太阳常数)。

辐照面积: 12m^2 (直径 3.9m)。

准直角: $\pm 2^\circ$ 。

面均匀性: $\pm 12\% \sim \pm 15\%$;

稳定性: $\pm 5\%$ 。

(5) KM4 改为无油抽气系统后的原理图

图 10-59 是原 KM4 改为无油抽气系统后的原理图。主泵由 20K 气氮板及 3 台直径为 1300mm 制冷机低温泵组成, 预抽及粗抽由罗茨泵机组及微泵完成。

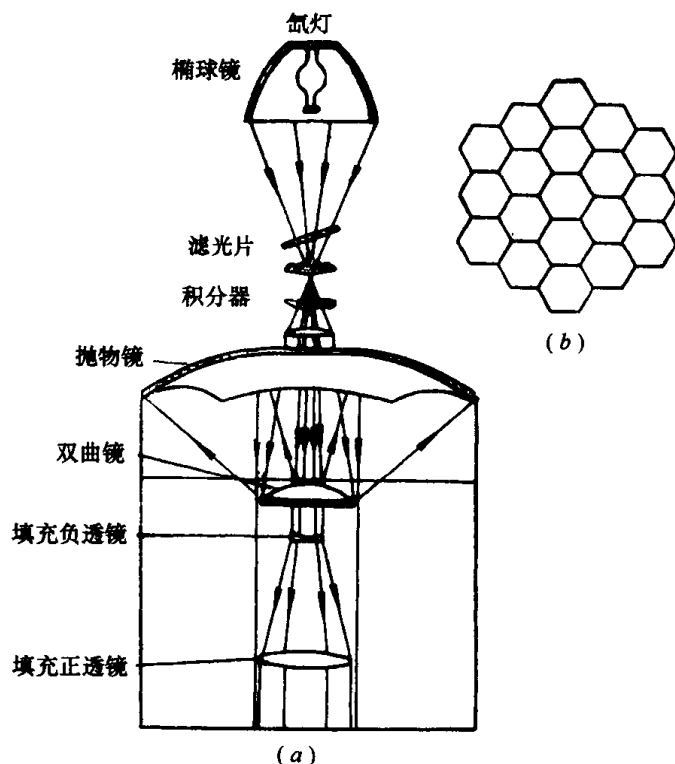


图 10-57 单元光学原理图

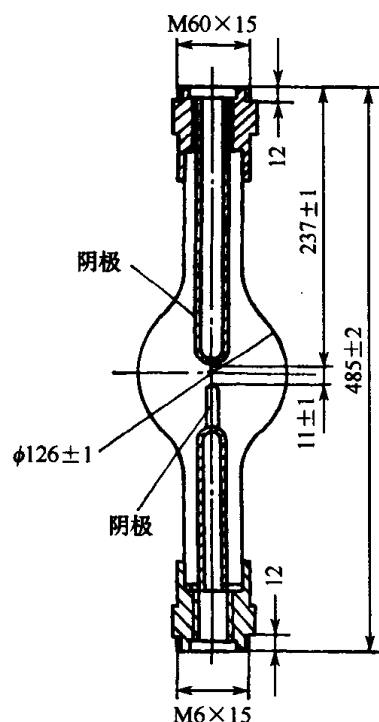


图 10-58 光源结构图

4) KM5 空间模拟器

KM5 空间模拟器系统如图 10-60 所示。

主模拟室直径 5m、高 10.6m、容积 130m^3 ，试验室间：直径 4.2m、高 6.5m。真空容器用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板制造，壁厚 15mm，加强筋采用 18 工字钢，间距为 1m。容器盖顶部开有直径 800mm 供太阳模拟器进光用的石英玻璃窗口。容器上 50% 的焊缝经 X 光探伤检查。用氦质谱仪检漏，极限真空度为 $1.9 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。热沉温度 $< 100\text{K}$ 。

真空系统采用 2 台扩散泵机组，每台扩散泵抽速 $5 \times 10^4\text{L/s}$ ；前级泵用 2 台 H-300 型滑阀泵，每台抽速 300L/s；2 台 ZL-1200 罗茨泵，每台抽速 1200L/s。

液氮系统采用开式带压循环系统，液氮泵流量 $15\text{m}^3/\text{h}$ ，液氮进口压力 0.49MPa，出口压力 0.196MPa。

加热系统采用空气压缩机，排气压力 0.49MPa（实际用量 0.196MPa），排气量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ；加热器最大加热功率 48kW，出口温度 200°C 。

5) KM6 载人航天器空间环境模拟设备

KM6 载人航天器空间环境模拟设备是供载人飞船、空间站、大型应用卫星作热平衡、热真空试验用。

KM6 载人航天器空间环境模拟设备由 11 个分系统组成，其中 9 个分系统已建成，有 8 个分系统已投入使用，载人试验分系统主体部分已建成。目前已建成的系统包括：

①真空容器。由 3 个容器组成：主容器直径 12m、高 22.4m；辅助容器 $\phi 7.5\text{m}$ 、长 15m，主、辅容器总面积 3200m^2 ；载人试验舱容器直径 5m。

②热沉。直径 10.5m、高 16.9m，温度为 $95\text{K} \pm 5\text{K} \sim 333\text{K}$ 。内表面涂黑漆，半球面发射率 $\epsilon_h \geq 0.91$ ，太阳吸收率 $\alpha \geq 0.96$ 。

③真空系统。高真空系统采用 2 台内装式低温泵，每台抽速为 $1 \times 10^6\text{L/s}$ ，8 台外接式低

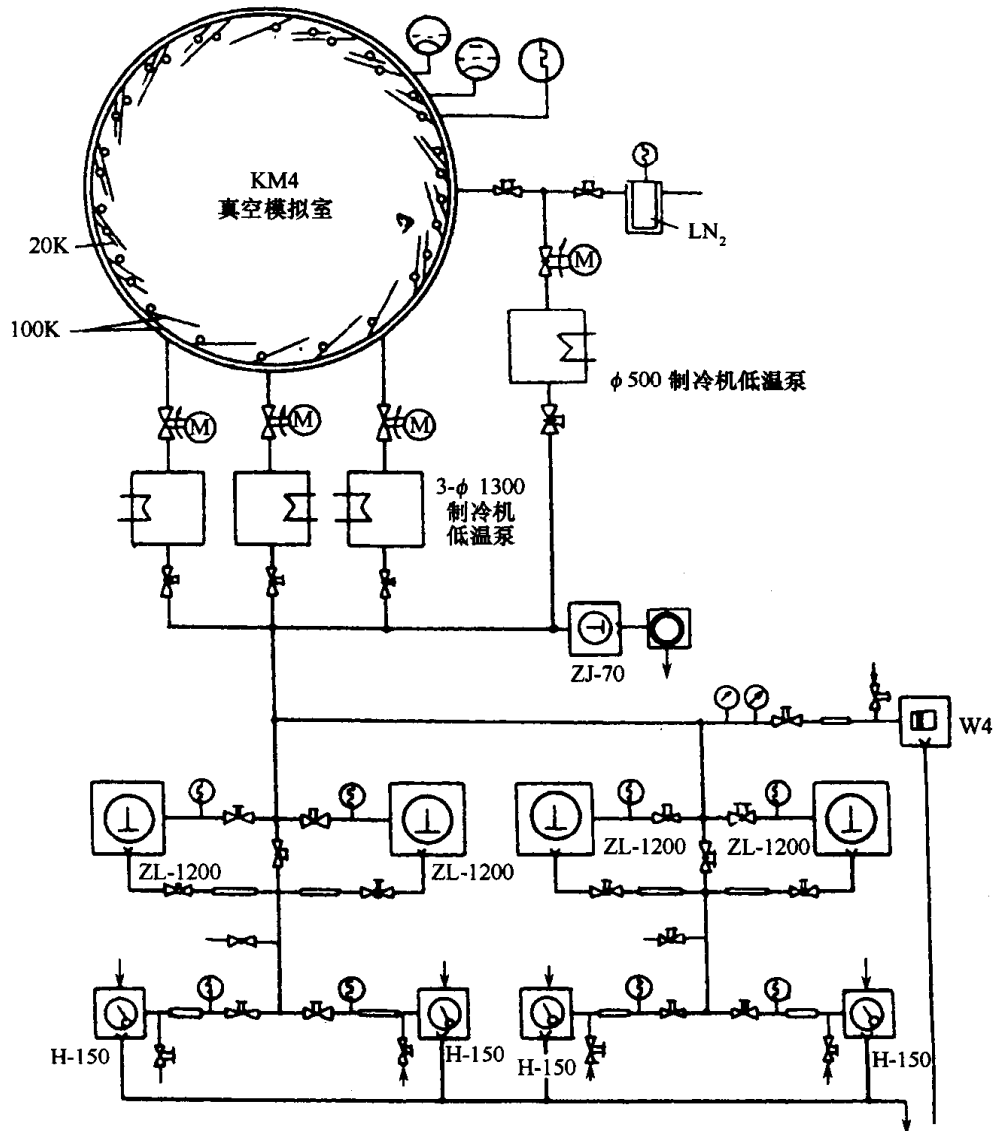


图 10-59 KM4 无油系统原理图

温泵,每台抽速为 $5 \times 10^4 \text{L/s}$,3 台分子泵,每台抽速为 2200L/s 。低真空系统采用 4 套罗茨泵串联机组,每套机组用 3 台罗茨泵串联,抽速分别为 5000L/s 、 1200L/s 、 600L/s ,并用一台抽速为 150L/s 机械泵作为前级。用外接式低温泵对主、辅模拟室抽气,真空度达到 $4 \times 10^{-5} \text{Pa}$,用内装式深冷泵抽气,真空度达到 $4.5 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

④液氮系统。热沉液氮系统采用密闭循环。由液氮泵、过冷泵、文丘利管、冷箱等组成。热负荷 400kW 。用 4 台液储槽,共 210m^3 。

⑤气氮系统。此系统由压机、电加热器、热交换器组成。最大热负荷 600kW ,用于热沉加热与调温用。加热温度为 333K 。

⑥氦系统。氦系统由 2 台 600W 、 20K 氦透平膨胀机,流量为 $900 \text{N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ 氦压机,热交换器,纯化器等组成。透平机出口温度 3K ,氦深冷板出口温度 9K 。

⑦红外热流模拟系统。模拟太阳热流系统,由控制计算机、程控电源、红外模拟器、热流计等组成。飞船试验时,实现了 271 台程控电源对 271 路红外模拟器的控制,测温点 2000 个。

⑧载人试验系统。此系统由副舱(又称载人舱)、气闸舱 A、气闸舱 B 组成。A 舱容积 30m^3 ,B 舱容积 45m^3 。副舱直径 5m 、长 11m 、高 2.1m 。航天员舱外活动试验时,另外需配备

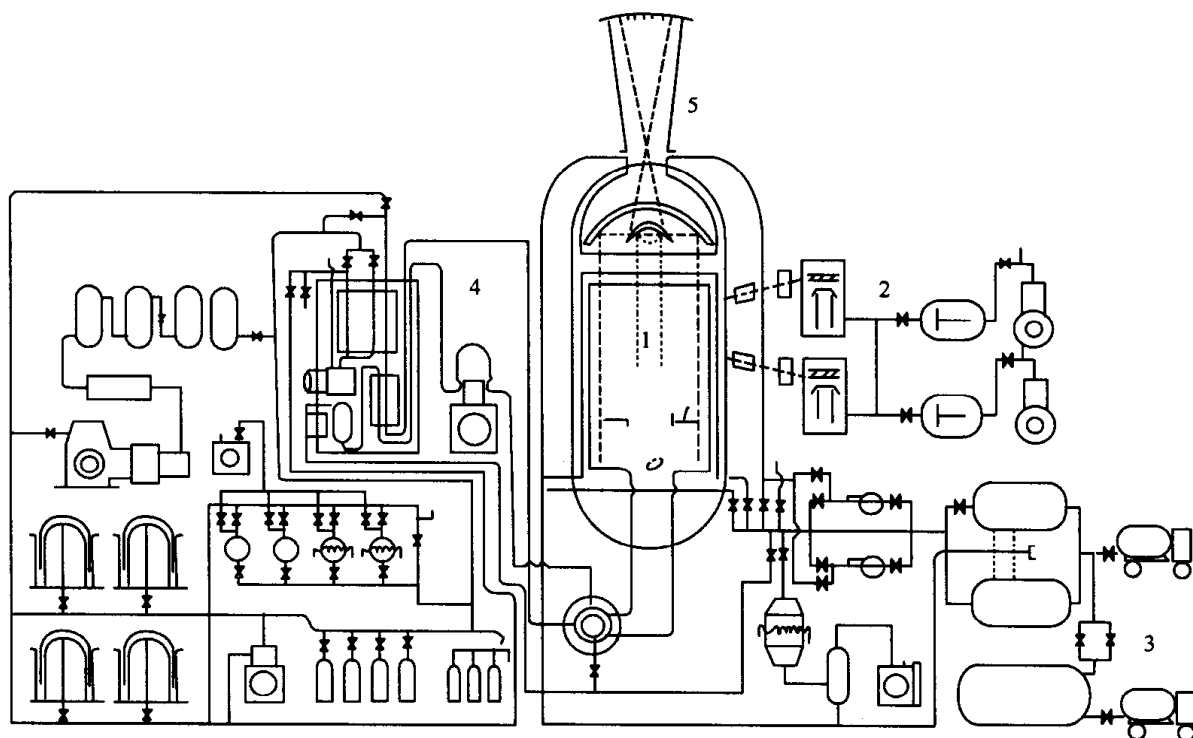


图 10-60 KM5 空间模拟器系统图

1—模拟室；2—真空系统；3—液氮系统；4—氦系统；5—太阳模拟器系统。

安全系统。

⑨总控系统。采集 KM6 设备运行情况及时件温度数据,向分系统发出中央控制指令,向客户工作站发送有关数据,同各分系统进行双向通信。

（三）亚暴环境模拟设备

1. 磁层亚暴环境及等离子体注入

地球周围存在着地球磁场。地球磁场受到太阳磁场及太阳风磁场的约束,使其向着太阳面变得扁平,被压缩成 8 个~10 个地球半径;而背太阳面,可以延伸到 1000 个地球半径,像慧星一样,拖了很长的尾巴,这个尾巴叫磁尾。磁尾中存在着一个特殊界面,界面两边磁力线突然改变方向,此界面是磁中性区,叫做中性片。中性片厚度约 600km,此区是等离子体最热区,其中等离子体被磁场约束,它好像热核反应中的“磁瓶”。

太阳是由 90% 氢及 9% 氦构成。其日冕区温度高达 600 万℃。这种超高温下引起的核反应,使太阳不断地喷出带电粒子流,这就是太阳风粒子。太阳风粒子由质子和电子构成,它们不断地注入地球轨道。这种运动的带电粒子产生的磁场,称为太阳风磁场。太阳风磁场与地球磁场相互作用,扰乱了地球磁场,可以引起磁针剧烈颤动,好像地球磁场突然卷起了“风暴”。这种地球磁场的强烈扰动,称为“磁暴”。磁层亚暴也是地球层扰动的一种表现,因为它与“磁暴”相比是较小的扰动,为与磁暴相区别,称做磁层亚暴,简称亚暴。亚暴多发生在行星磁场方向由北向南反转以后。这时,在磁尾中性片附近经常发生不稳定的磁合并,使磁场扰动,引起磁层亚暴。

太阳风粒子能量不高,亚暴发生后,使粒子受到了加速。其原因是行星际磁场与地磁场相互耦合,引起磁力线重联,磁力线变密、拉紧,从而使磁层中磁场强度增加,积累起大量磁能,使

磁流体发电机作用加强,引起横越磁尾的电场增强,使等离子体获得能量。在磁尾电场作用下,等离子体得到了一个向地球漂移的速度,注入同步轨道。在漂移过程中,又受到电子回旋加速或费密加速,使等离子体能量进一步提高。1979年4月24日亚暴时,SCA-THA卫星测出电子能量范围为 $0.6\text{keV}\sim 335\text{keV}$;离子能量为 $4\text{keV}\sim 388\text{keV}$, 218keV 以上的电子约占 $4\text{keV}\sim 50\text{keV}$ 电子的千分之一。

卫星浸没在等离子体环境中,电子和离子不断与卫星表面相碰撞。这种碰撞是非弹性的。由于电子入射率约为离子的43倍,因而,使卫星表面充负电。ATS-6实验卫星在空间得到的最高电位为 -11000V 。

2. 环境参数的确定

电子环境是亚暴模拟主要环境之一。根据磁层亚暴时实测的电子能谱及卫星表面实测电位,此种模拟设备的电子能量多数为 $5\text{keV}\sim 30\text{keV}$ 范围内,原因是此能量范围内的电子通量大,且不易穿透材料,电子易附于材料表面层。当然,如果有条件也可以在更宽的能谱范围内进行模拟,空间环境束流密度为 $10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$,模拟时通常选 $0\sim 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ 。为了使束均匀性好,束直径应该比样品最大尺寸大30%左右。

太阳光照环境也是亚暴重要环境,光入射到材料表面上后,有些材料的光电发射电流密度比亚暴环境束流密度($10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$)大。例如:氧化铝的光电发射电流密度为 $4.2\times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$;氧化铟 $3\times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$;胶体石墨 $1.8\times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ 。由于光电发射,卫星在阳光面,可能出现正电位,因此,环境条件除了电子环境以外,还要有太阳光照环境,空间阳光强度为一个太阳常数,地面模拟为了缩短模拟时间,通常选择大于一个太阳常数的光源。

同步轨道高度的真空度约 10^{-12}Pa 以上。地面模拟是真空效应模拟,不能选这样高的真空度。真空环境改变了材料表面电导及趋肤效应。研究真空环境下放电现象所需要的真空度为 $10^{-5}\text{Pa}\sim 10^{-7}\text{Pa}$,需要无油抽气手段。国外这种类型模拟设备的真空度大致都在这个范围内。如刘易斯中心的模拟设备直径为 1.8m ,真空度为 $10^{-5}\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$;IPW实验室直径 2.5m 的模拟设备,其真空度为 10^{-5}Pa ;英国原子能科学中心 0.5m 设备,真空度为 10^{-5}Pa ;欧洲宇宙工艺学中心直径 0.8m 的设备,真空度为 10^{-5}Pa ,其直径 2.5m 模拟设备,真空度为 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 。

除此以外,卫星在轨道运行时,有时向太阳,有时背太阳,向太阳时表面可达 100°C 的高温,背太阳时,表面可到 -100°C 的低温。温度将改变材料表面电阻、体电阻及其它性能。因此,地面模拟需要建立这种温度环境,国外亚暴环境模拟设备温度都要控制,刘易斯中心设备温度为 $-185^\circ\text{C}\sim +120^\circ\text{C}$;英国原子能科学中心样品温度为 $-178^\circ\text{C}\sim +75^\circ\text{C}$;欧洲宇宙工艺学中心样品温度为 $-20^\circ\text{C}\sim +130^\circ\text{C}$ 。

在上述环境的作用下,影响卫星表面电荷积累的因素有电子束能量及密度、入射离子密度,材料的二次发射、光电发射、离子引起的二次发射,表面电导及体电导等。为此在建造模拟设备时,除考虑环境因素外,还要考虑这些因素。

3. 亚暴环境模拟设备

世界各国为卫星整体带电研究,卫星表面电位控制、带电机理研究以及材料研究,研制了很多尺寸不同、用途不同的亚暴环境模拟器(见表10-43)。图10-61为美国宇航局刘易斯中心地磁亚暴模拟设备简图。此设备用于做材料试验,已做过的典型飞行器材料有:飞行器漆、隔热材料、绝缘膜和太阳电池等。研究材料的充电放电特性、表面电位、放电电磁脉冲、光电发射等。

表 10-43 各国亚暴模拟设备

设备所属	模拟设备条件	研究内容
美国宇航局飞行器充电诱导介质击穿试验设备	容器直径 30cm; 长 1m; 真空度 10^{-5} Pa; 电子 $E = 0 \sim 34\text{keV}$; $I = 0 \sim 5 \times 10^{-9}\text{A/cm}^2$	靶击穿及解除带电过程
美国斯坦福研究所电子束充电试验设备	容器直径 80cm; 有真空、样品温度、电子条件; 电子 $E =$ 几百电子伏特 $\sim 20\text{keV}$, $I = 10^{-7}\text{A/cm}^2$	反射镜的击穿特性
加拿大多伦多大学扫描电子显微镜	电子 $E = 1 \sim 30\text{keV}$ 束流为 $180\mu\text{A}$	材料试验。可以做二次发射, 样品放电电流频谱, 表面物理损伤
法国空间研究中心飞行器电位主动控制模拟装置	容器直径 2m; 长 3m; 真空度为 10^{-4} Pa; 等离子体密度 10^3 个/ $\text{cm}^3 \sim 10^6$ 个/ cm^3	研究同步轨道等离子体环境; 飞行器表面电位的主动控制
法国航空航天研究院卫星表面充电模拟设备	容器直径 6m; 长 7m; 真空度 10^{-6}Pa ; 样品温度为 $100\text{K} \sim 460\text{K}$; 太阳模拟; 电子束	气象卫星充电、放电研究; 减少带电效应的技术研究
德国航空与航天研究所, 亚暴环境设备	容器直径 2.5m; 真空度 10^{-5}Pa ; 电子照射面积直径 1m; 密度为 10^{-9}A/cm^2	飞行器表面材料的充电放电实验和理论研究; 亚暴环境电子束模拟研究
德国 IPW/Freiburg 亚暴环境设备	容器直径 2.5m, 长 5m; 真空度 10^{-5}Pa ; 配有氩工质的等离子体束; 电子密度为 5×10^5 个/ cm^3 ; 真空紫外	等离子体与物体相互作用, 飞行器充电的理论研究; 材料老化研究
荷兰, 欧洲空间署欧洲空间技术中心模拟设备	有三个真空容器, 直径分别为 3m、2m 及 1.5m; 真空度为 10^{-5}Pa , 配有太阳模拟器及电子源	材料研究; 二次发射、光电发射、电导; 电磁脉冲对电器系统的影响; 对卫星表面放电监视充电的理论研究
英国飞行器研究所试验设备	有四个真空容器, 直径分别为 0.9m、1.5m、2.5m 及 3m, 真空度为 10^{-4}Pa , 配有太阳及电子源	卫星异常事件研究; 离子推力器试验

该设备真空容器用不锈钢制成, 直径 1.8m、长 1.8m。容器中有直径 1.5m 的温控壁板, 由铝材制成并涂上黑色导电涂层, 其温度为 $-185^\circ\text{C} \sim +120^\circ\text{C}$, 用气氮来调节, 抽气手段是一台抽速为 50000L/s 的油扩散泵, 抽气 $90\text{min} \sim 120\text{min}$, 容器中的真空度达 $10^{-5}\text{Pa} \sim 10^{-6}\text{Pa}$ 。

容器中有样品台, 直径为 0.5m, 可以处于三个不同位置, 每次能试验三个样品, 样品尺寸达 30cm, 样品台与电子源同心。

配置的电子源能量为 $0 \sim 30\text{keV}$, 束流密度为 $0 \sim 5 \times 10^{-9}\text{A/cm}^2$, 束是均匀的, 束面积超过样品台 30%。

太阳模拟器的光强为 3~4 太阳常数, 光通过石英玻璃窗口引到真空室中。

低能等离子体源以气氮为工质, 其粒子密度为 10 个/ $\text{cm}^3 \sim 10^6$ 个/ cm^3 。通常用于消除样品的带电。

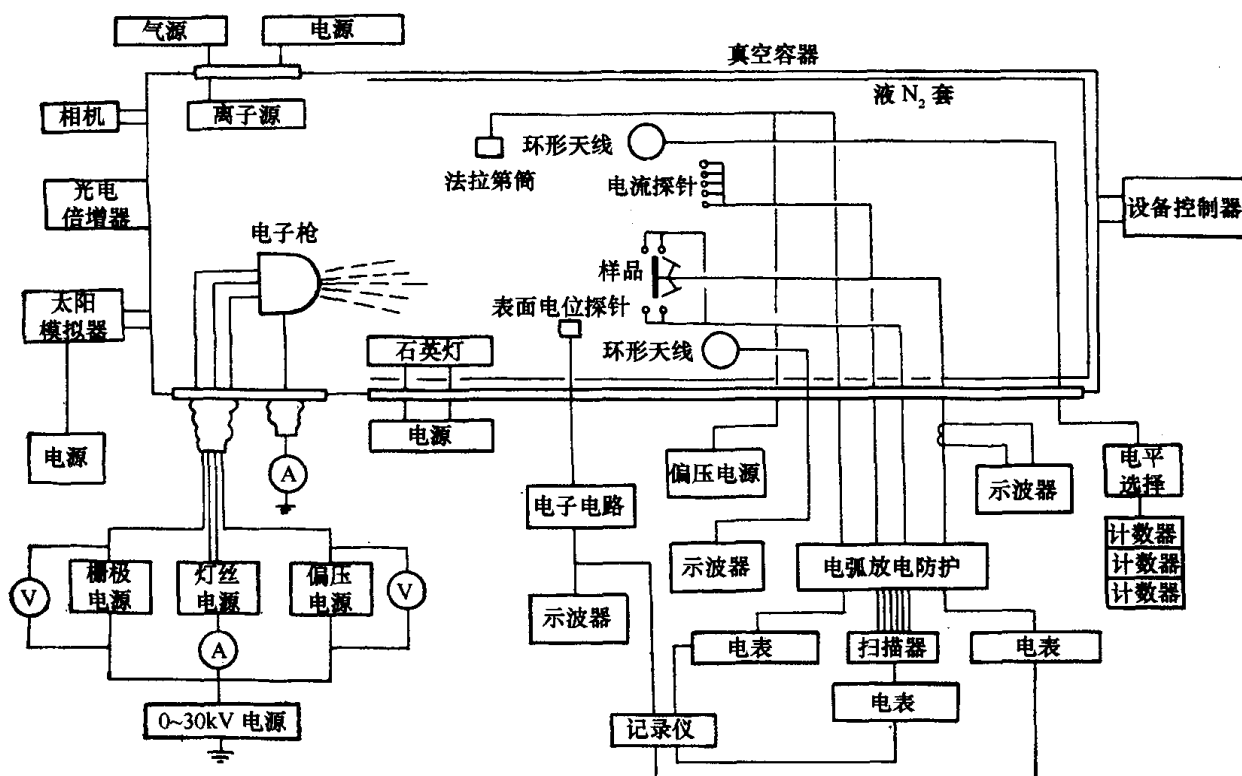


图 10-61 亚暴模拟设备示意图

(四) X 射线望远镜空间环境模拟检测装置

1. 用途

用于 X 射线望远镜(太空望远镜)镜头和总体性能模拟试验与检测;测定真空中的光速;研究与测试其它光学部件在真空中的性能。

2. 技术性能

设备主要尺寸:检测腔直径 1.2m、长 5.6m;光路管道直径 0.4m、长 64m;光源腔 I 直径 0.5m、长 1m;光源腔 II 直径 0.5m、长 1m。

工作真空:在检测腔注入 $1 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的等效氮气时,检测腔 $3.2 \times 10^{-5} \text{Pa}$;光源腔 $3.6 \times 10^{-5} \text{Pa}$;光路管道 $3.2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

极限真空:检测腔 $4.8 \times 10^{-6} \text{Pa}$;光源腔 $3.46 \times 10^{-5} \text{Pa}$;光路管道 $3.46 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

无油程度:容器内碳氢化合物含量 $< 1\%$ 。

抽气时间:2h 内可从大气压抽到 $2.7 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 。可连续工作 48h 以上。

振动(包括基底在内) $< 0.87 \mu\text{m}$ 。

光路管道准直度: $< 6\text{mm}$ 。

3. 设备组成

该装置由检测腔、光路管道、光源腔和抽气系统组成。设备如图 10-62 所示。

(1) 检测腔

卧式,用 1Cr18Ni9Ti 材料制成,壁厚 10mm,一端有单臂支撑的大门,另一端接光路管道。腔体上除装有抽气泵外,还有操作孔,观察孔,30kV、10kV 高压引线,多芯线和同轴电缆及各种测量控制装置。

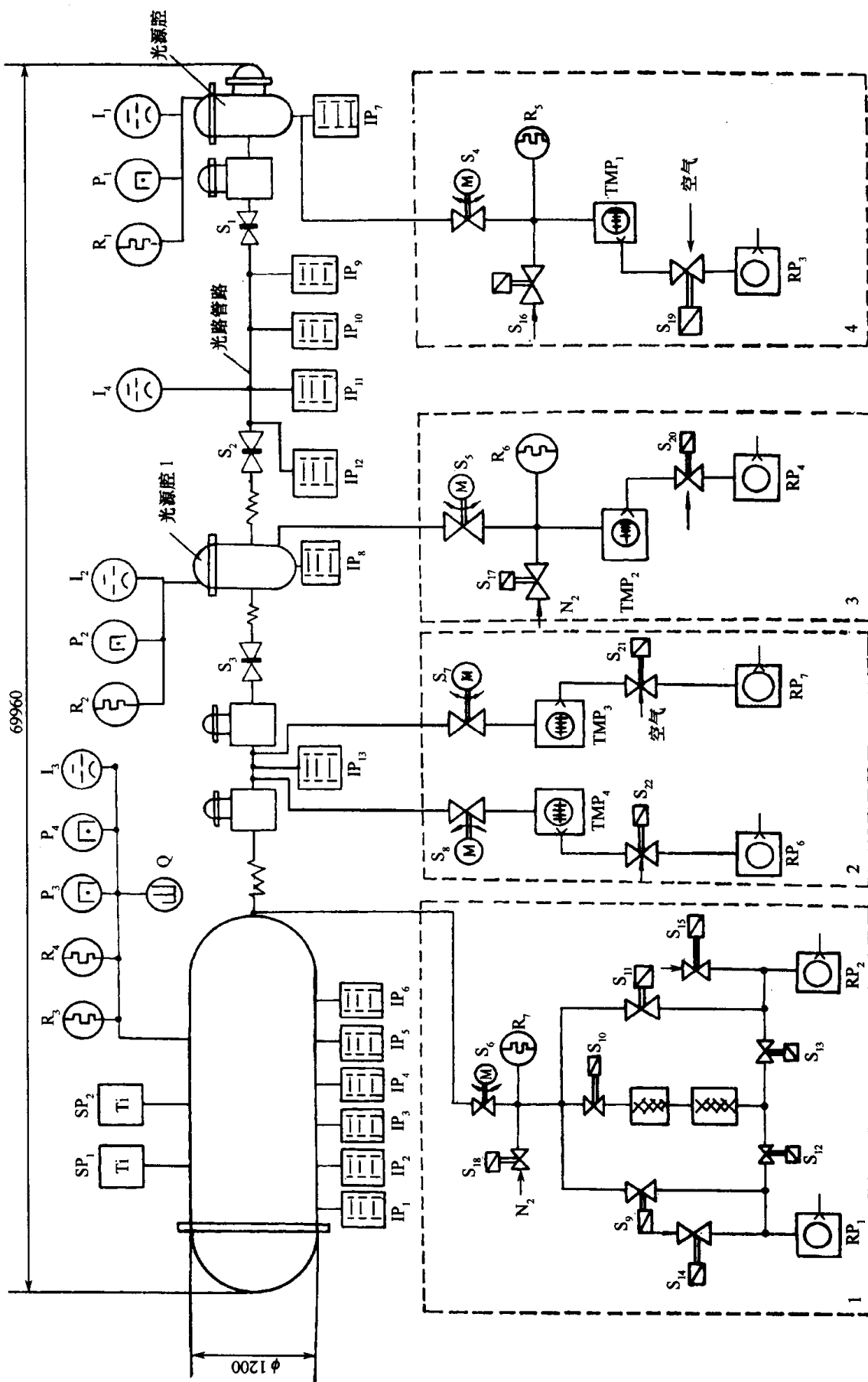


图 10-62 X 射线望远镜空间环境模拟设备示意图

1—粗抽机组；2—预抽机组；3—光源腔 I 预抽机组；4—光源腔 II 预抽机组；IP—溅射离子泵；SP—升华钛泵；TMP—涡轮分子泵；RP—机械泵；V—阀门；R—电阻规；P—真空规；I—电离规；Q—四极质谱计。

(2)光源腔

两个立式光源腔直插在光路管道中,距检测腔分别为 15cm 和 69m,腔内装有试验用 X 光源或其它光源,腔上有电极引线、测量孔等,与光路管道相连的两端装有电动插板阀,使光源腔能单独放入大气或抽真空,便于进行光源检修或更换。

(3)光路管道

光路管道分段水平安装。每段长 5m,段与段之间用金属法兰连接。整个管道装有四段挠性波纹管,起组装补偿及温度变化的补偿作用。管道平卧在固定基座上,用抱箍与固定基座相连。

(4)抽气系统

①主抽气系统。

检测腔:溅射离子泵(800L/s)6 台,升华钛泵(4000L/s)2 台。

光源腔:溅射离子泵(800L/s)2 台(每个光源腔 1 台)。

光路管道:溅射离子泵(600L/s)5 台,分布式布置。

②预抽气系统:由分子泵、分子筛阱、活性氧化铝阱、机械泵组成,从大气抽到 4kPa 直接采用机械泵 2X-30 抽气;从 4kPa~10Pa 通过吸附阱与机械泵抽气,从 $10\text{Pa} \sim 2.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 用 1500 型分子泵抽气,这种抽气系统机械泵油的返流污染少。

(五)空间辐射制冷器用小型环境模拟设备

辐射制冷器是近代航天飞行器红外遥感系统的一种有效制冷手段,也是当代空间站红外遥感设备和电子仪器理想的冷源。

辐射制冷器试验的冷背景多用逆布雷顿循环氮制冷流程或氮流程。其优点是制冷功率大,适用于大、中、小型辐射制冷器试验,但运转费用十分昂贵。

我国 1985 年研制的一台小型空间环境模拟设备,使用闭循环小型制冷机作为模拟器冷背景的冷源。冷背景温度 20K,功率 8W,黑度 0.98,容器用低温泵可抽空至 $1.8 \times 10^{-5}\text{Pa}$,系统配有巡回检测装置,对实验数据自动进行采集。

图 10-63 为此模拟设备的示意图。低温冷源用一台沙尔文制冷机。辐射制冷器实验加热除气时用低温泵(配 G-M 制冷机)抽气。空间模拟冷背景用铝蜂窝制成,用银带和无氧铜带与制冷机冷头软连接,避免引起制冷机薄壁气缸变形。冷背景用液氮屏进行热屏蔽,将活性炭粘在冷背景背面,低温下作为低温泵使用。当冷背景温度达到 20K~30K 时,关掉低温泵,用冷背景背面的活性炭抽气,维持高真空。

沙尔文制冷机冷头和冷背景测温用金铁—镍铬热偶。辐射制冷器各表面采用镍铬—康铜热偶测温,并配以巡回检测数字打印系统,对实验数据进行采集、打印。

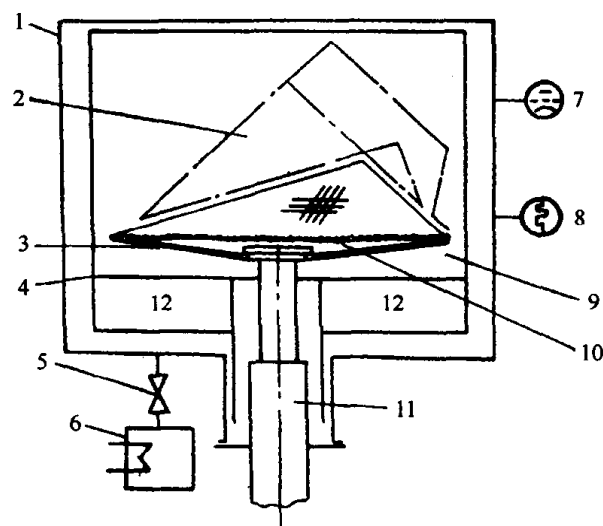


图 10-63 模拟设备示意图

1—真空室;2—辐射制冷器;3—银带;4—液氮屏;5—真空阀;
6—低温泵;7—高真空电离规;8—热偶真空规;
9—冷背景;10—活性炭;11—沙尔文制冷机;12—液氮。

(六) 空间辐射环境模拟设备

1. 简述

为了评价空间技术中使用的太阳能电池、光学元件及半导体器件,美国戈达德空间飞行中心研制了一台空间辐射环境模拟设备。此设备提供真空、温度、电子辐照及太阳辐射等空间条件。照射样品的样品台有效直径为 10cm,电子辐照能量为 1MeV。样品温度控制在 -100°C \sim $+100^{\circ}\text{C}$ 的范围内,样品的最低温度可达 -170°C ,最高温度为 $+150^{\circ}\text{C}$ 。真空系统采用没有碳氢化合物污染的清洁抽气系统。真空室 4h 可达 $1 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 。主要的抽气手段是抽速为 400L/s 的溅射离子泵和球型钛升华泵,预抽使用分子筛吸附泵。功率 4.2kW 的氙灯光谱近似于太阳的光谱,照射强度为四个太阳常数。

2. 真空室

空间辐射环境模拟设备真空室简图如图 10-64 所示,容器内径 450mm、长 2000mm、用不锈钢材料制成。容器一端有样品台,另一端有粒子辐照入口,可以引入电子或质子对样品进行辐照。筒壁还有石英窗,可以引入太阳光或紫外线,对样品进行照射。此外,还有热沉,可进行热真空模拟。

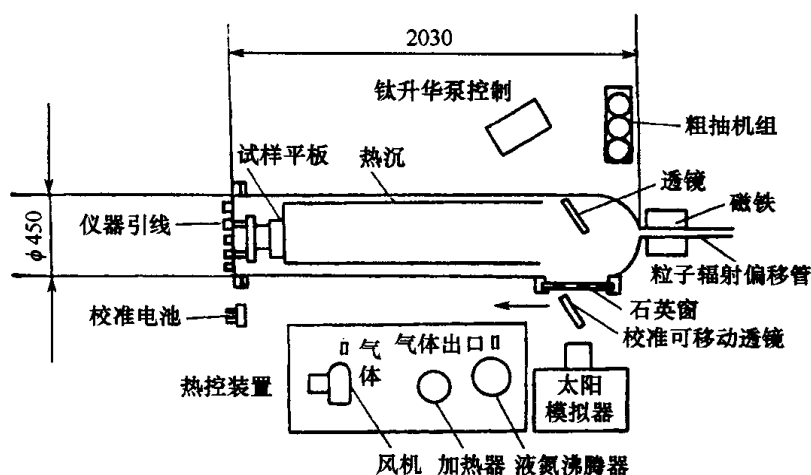


图 10-64 空间辐射环模真空室示意图

3. 真空系统

真空机组如图 10-65 所示。主泵是 400L/s 的溅射离子泵,辅助泵是钛丝和钛球升华泵。粗抽使用三台分子筛吸附泵,装在一个小车上,移动很方便。抽气曲线如图 10-66 所示。

4. 样品台

样品台尺寸为 230mm \times 230mm,如图 10-67 所示。可安放 50 只太阳电池。台上布置了 9 个法拉第筒,用以监视束流及辐照的均匀性,还布有热电偶用以测量温度、控制温度。

(七) 涂层材料综合环境模拟设备

航天器表面涂层材料必须经受超高真空、真空紫外和近太阳紫外的辐照、低能电子和质子辐照、X 射线、宇宙尘的冲击、空间交变的温度等环境条件的考验才能应用。综合环境对材料性能影响要比单一条件严重得多,并要求“原位测量”,这样才能比较准确地反映出空间环境对材料性能的影响。

图 10-68 为这种设备的简图。获得超高真空所用的主泵是溅射离子泵和钛升华泵,预抽

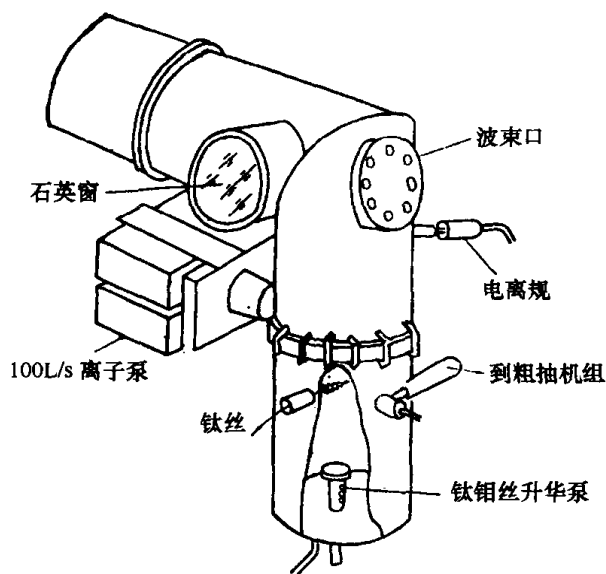


图 10-65 真空机组示意图

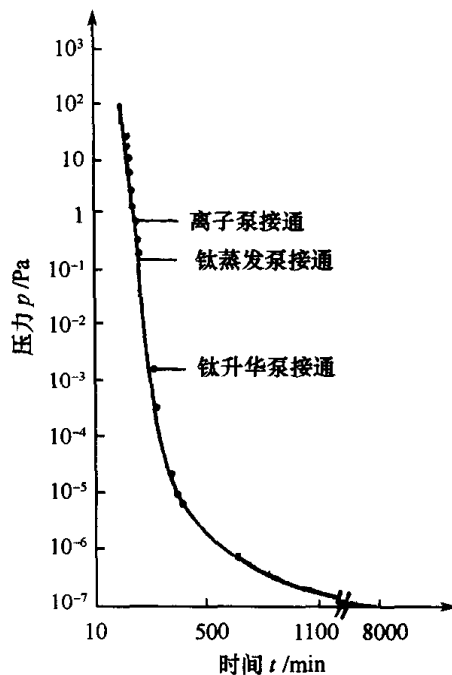


图 10-66 抽气曲线图

用分子筛吸附泵。近太阳紫外用汞氙灯模拟,其光谱范围为 $0.2\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$;功率为 5kW ;真空紫外用氢灯模拟,波长范围为 $0.1\mu\text{m}\sim 0.26\mu\text{m}$,氢灯热流量为 $1\text{mW}/\text{cm}^2$,大于 4 个太阳常数;电子辐照模拟,是用一个电子枪来提供的,电子束流可调,其值为 $0\sim 300\text{mA}$,电子枪电压为 $0\sim 20\text{kV}$;质子源能量为 130keV ,是用射频离子源产生质子;X 射线源采用了一个 $40\text{kV}\sim 90\text{kV}$ 的 X 射线组合源。

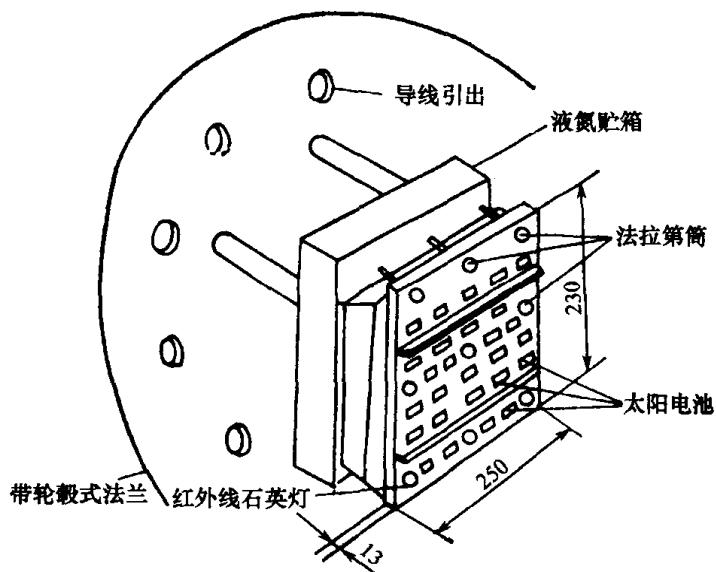


图 10-67 样品试验台

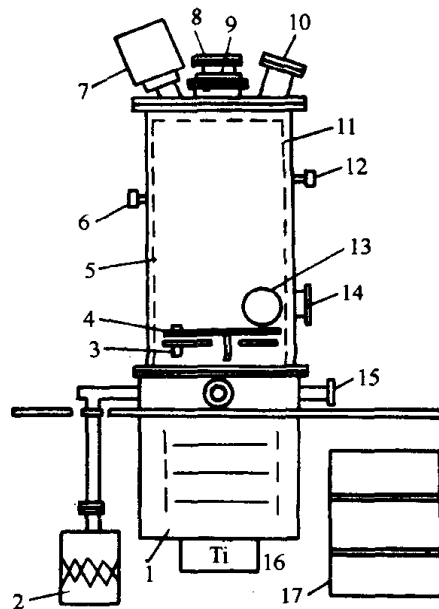


图 10-68 涂层材料综合环境模拟设备简图

- 1—溅射离子泵;2—分子筛吸附泵;3—工作台;
4—转盘;5—热沉;6—规管入口;7—质子源;
8—紫外源;9—紫外入口窗;10—电子枪入口;
11—真空室;12—质谱仪法兰;13—积分球;
14—光源入口;15—探针入口;16—钛升华泵;
17—控制台。

(八) 冷焊模拟设备

1. 用途

①对空间活动部件的冷焊性能进行评价。既可对空间活动部件的各种对偶材料的冷焊性能做精确的测量,为活动部件的选材、防冷焊措施及结构设计提供科学依据,也可对各种活动部件做实物模拟试验,进行冷焊性能的评价。

②进行冷焊性能的机理研究。

③可在超高真空条件下研究各种材料的摩擦性能并进行评价。

2. 技术性能

热沉温度:77K;极限真空度: 6.6×10^{-9} Pa;

测力范围: 50×10^{-8} N~150N。

3. 设备组成

设备如图 10-69 所示。

主要组成部分如下:

(1) 无油超高真空冷焊模拟系统

主要包括工作室和抽气系统。工作室里装有工作台、测力装置和真空测试规管等。抽气系统由分子泵(或吸附泵)、钛升华泵、冷阴极溅射离子泵组成无油抽气机组。系统可承受高温烘烤。

(2) 冷焊测力装置

冷焊力是冷焊模拟及研究中最重要物理量。本设备有以下三种不同精度和用途的测力装置。

①杠杆式冷焊测力装置。利用杠杆原理给样品加载卸载。适用于工程材料冷焊力的测量。

②冷焊测力轴尖天平。由主天平(测力)、副天平(去载校准)、电磁加载系统和专用直流稳压电源四部分组成。利用电磁原理实现样品加载卸载。测力范围在 1.5×10^{-4} N~0.5N,灵敏度 $100\mu\text{N}$ 。

③应变测力装置。根据电阻应变片受力形变时电信号的变化来测量。测量范围在 5×10^{-5} N~1N。

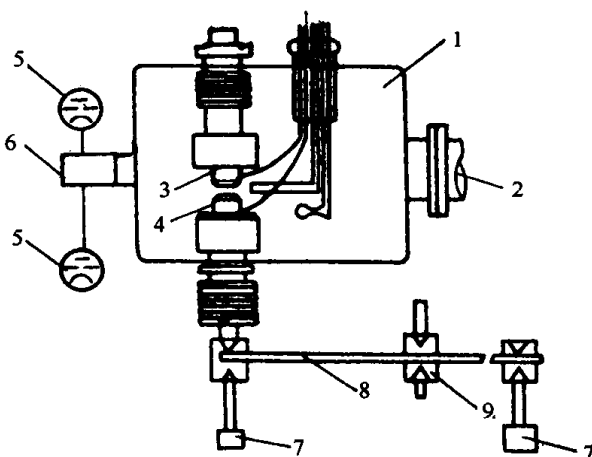


图 10-69 冷焊模拟设备

1—工作室;2—接升华泵;3—上样品;4—下样品;
5—规管;6—观察窗;7—重物;8—杠杆;9—支点。

(九) 轴承真空试验设备

1. 用途

主要用于研究空间用轴承的摩擦润滑动态特性及长期运转时各种摩擦润滑特性的变化及机理。

2. 技术性能

热沉温度:220K~320K;转轴转速:0~3000r/min;极限真空度: 2×10^{-7} Pa;有载真空度: 2×10^{-6} Pa~ 2×10^{-5} Pa。

3. 设备组成

①模拟室:卧式,直径0.5m、长0.7m;有效尺寸直径0.4m、长0.6m。模拟室内装有可供多个轴承同时做试验用的轴承支架及测力传感元件。

②抽气机组:由溅射离子泵、钛升华泵和机械泵组成。

③热沉:采用半导体制冷,体积小,使用方便可靠。

④测试设备:由动态应变仪与数字电压表组成数字采集系统。实验结果用微机进行频谱分析。

(十) 超高真空防冷焊评价试验设备

高轨道卫星的活动部件经常处于超高真空工作环境,因此,会使运动时相互接触表面的污染膜破裂,出现新鲜清洁金属表面,较长时间保持原子清洁状态,这就可能出现冷焊现象,影响航天器驱动机构、传动机构、伸展机构、继电器、转换开关的正常工作,出现驱动功率不足、运动元件卡住现象。此设备可用于冷焊机理研究,防止冷焊技术措施研究等。

1. 设备主要技术指标

设备真空室有效空间 $\phi 550\text{mm} \times 700\text{mm}$; 常温下的极限压力为 $7.0 \times 10^{-8}\text{Pa}$, 在 45°C 下极限压力为 $5.0 \times 10^{-8}\text{Pa}$; 真空室有载, 在 45°C 温度下的工作压力 $7.0 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 。

2. 防冷焊评价试验设备设计原则

设备必须满足出现冷焊的条件:第一,能得到新鲜清洁表面;第二,能使试件在较长时间内维持新鲜清洁表面。所以,设计时需遵循下述原则:

①常温下空载极限压力低。真空度越高,试件表面气体分子覆盖度越小,就能在较长的时间内保证新鲜清洁表面不会被污染,这是产生冷焊的首要条件。极限真空度的要求与试件所处的空间实际工作环境有关,原则上是越高越好。一般需达到 $1 \times 10^{-8}\text{Pa}$, 或优于此值。

②系统清洁。油蒸气能阻止冷焊的产生,且不易清除。如果设备的油蒸气分压较高,活动机构已清洁的新鲜表面会在很短的时间内被油蒸气分子完全覆盖,无法模拟空间冷焊条件,从而得出不符合空间实际情况的错误试验结论。因此,作为防冷焊评价试验设备的油蒸气分压应越低越好。

③“高温”下空载极限压力低。一般说来,空间活动机构通过常温防冷焊评价试验后,还应进行“高温”(根据有关标准,这一温度不应低于活动机构空间工作时的环境温度)下的防冷焊试验。冷焊与温度密切相关,温度越高越容易出现冷焊。其原因一是气体污染膜的表面扩散,在高温下气体的平均滞留时间比低温下要短得多,因此,试件表面吸附的气体少,这样由相邻区间向已清洁的试件表面扩散的污染物也较少,故试件表面可在较长时间内保持清洁;其二是污染膜向内部扩散,在高温下试件表面污染膜可能向材料内部扩散,致使表面有部分污染膜消失,形成新鲜清洁表面。

鉴于上述情况,为确保空间活动机构工作的可靠性,对其进行“高温”(一般 $40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$) 防冷焊评价试验是很有必要的。

④设备工作压力要低。空间活动机构一般结构比较复杂,出气面积大,材料种类多,加之某些试件结构的特殊性,不允许试验前进行彻底清洗和高温烘烤抽气,因而出气量大。在这种情况下,要求系统的极限真空度要很高,否则无法进行试验,因此要求抽气机组不但性能优良,而且对各种气体有足够大的抽速。

为满足设计原则,此设备采取了必要的设计措施:

①选择适宜抽气方式。真空设备的抽气方式是获得极限真空高低和无油程度的重要前提,是设备成功的关键。根据设备的特点,选择了“机械泵+涡轮分子泵+钛升华泵+溅射离子泵”的抽气方式。这种组合抽气手段是超高真空防冷焊评价试验设备较理想的抽气方式。溅射离子泵为钛-钽两极型。钛升华泵带有附加升华阱。

②采用严密的防返油措施。此设备所用机组是准无油的,这就要靠严密的防返油措施来有效阻止蒸气向超高真空室的返扩散。具体措施一是在机械泵与分子泵之间加活性氧化铝挡油阱;二是在分子泵与超高真空阀之间加液氮冷阱;三是采用严格的防返油操作程序。

3. 设备构成

设备原理如图 10-70 所示,主要由三部分组成:

①预抽气机组:由机械泵、F-450 涡轮分子泵、低真空阀、液氮冷阱、活性氧化铝挡油阱和超高真空阀组成。

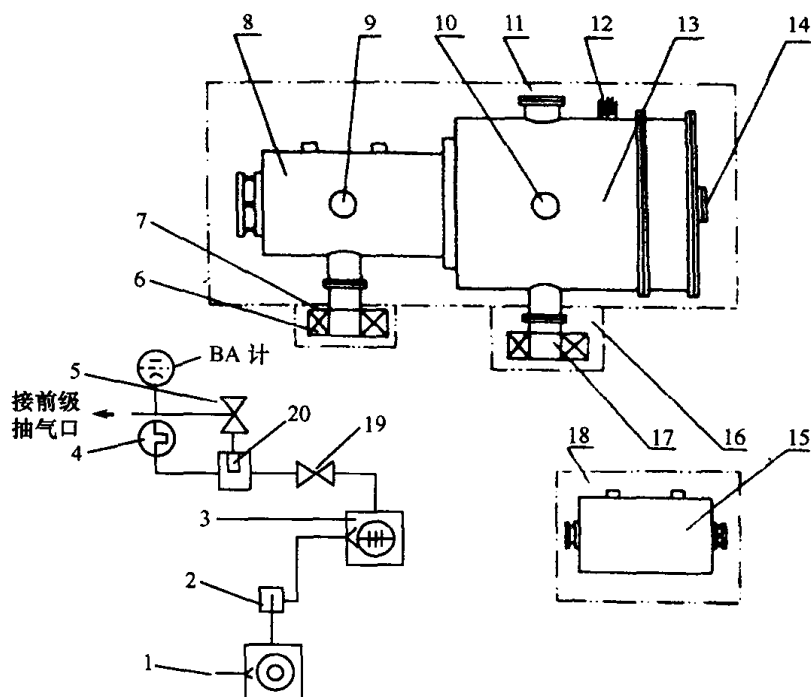


图 10-70 超高真空防冷焊评价试验设备结构示意图

1—机械泵;2—挡油阱;3—分子泵;4—热偶计;5—超高阀;6—离子泵 I;7—离子泵 I 烘箱;
8—升华泵 I;9—前级抽气口;10—接升华泵 II;11—大烘箱;12—BA 计;13—工作室;14—观察窗;
15—离子泵 II 烘箱;16—离子泵 II;17—离子泵 II 烘箱;18—升华泵 II 烘箱;19—低真空阀;20—LN₂ 冷阱。

②主抽气机组:包括两个升华泵,抽速分别为 5000L/s 和 1800L/s;两个溅射离子泵抽速分别为 400L/s 和 200L/s。

③工作室:有效空间为 $\phi 552\text{mm} \times 700\text{mm}$,由不锈钢制成。室内有工作台和测温控元件。真空室一侧和前法兰各装有玻璃观察窗,顶部和另侧装有 30 芯的电引线法兰各一个。另外还备有高压和高频引线法兰及四极质谱接口。

4. 设备特点

此台超高真空防冷焊评价试验设备的特点:

①设备常温空载极限真空度高。用进口 LM520 型分离规测得系统空载真空度 $3.6 \times 10^{-9}\text{Pa}$,且在长时间内维持不变。

②设备清洁无油。用进口 QX2000 型质谱计,在总压为 10^{-9}Pa 有情况扫描,未见油及其

裂解物的谱峰。如图 10-71 所示。

③设备“高温”空载极限真空度高。在真空室空间温度为 46°C 的条件下,用校准后的 ZDH1 型数显超高真空计,测得真空度为 $2.6 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 。

④设备能进行“高温”防焊评价试验。如前所述,为确保活动机构空间工作的长寿命、高可靠,在上天以前必须对其进行“高温”防冷焊评价试验。而这台设备就完全能满足“高温”防冷焊评价试验需要。它在“高温”条件下具有很高的有载极限真空,在试件出气量很大, 45°C 的温度下,真空度达到了 $3.5 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 。

⑤设备抽速大,有载真空度高。由于该设备的两升华泵对真空室的有效抽速(对 H_2)高达 $2.7 \times 10^4\text{L/s}$,所以有载试验时,尽管试件的出气量很大,设备的极限真空仍高达 10^{-8}Pa 。

⑥设备不烘烤时极限真空度也很高。一般超高真空系统获得优于 $1 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 的超高真空都需要经过长时间的高温烘烤抽气,否则很难实现。但是对于一台防冷焊评价试验设备来说,若受到这种限制就不能完全满足试验需要。因为有的活动机构不能承受高温烘烤。此设备不烘烤时真空度高,可满足防冷焊评价试验要求。设备长时间暴露大气后,不烘烤真空度可达 $7.9 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 。

⑦设备“静态”真空度好。设备在 $5.5 \times 10^{-9}\text{Pa}$ 的真空度下离子泵停止工作,升华泵停止升华(冷阱加满液氮),做“静态”保持试验。1h 后真空度为 $8 \times 10^{-9}\text{Pa}$;10h 后为 $7.6 \times 10^{-8}\text{Pa}$;13h 后为 $9 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 。如果试验中系统出现了故障,有足够的时间处理,使设备恢复正常,而不致于导致试验失败。

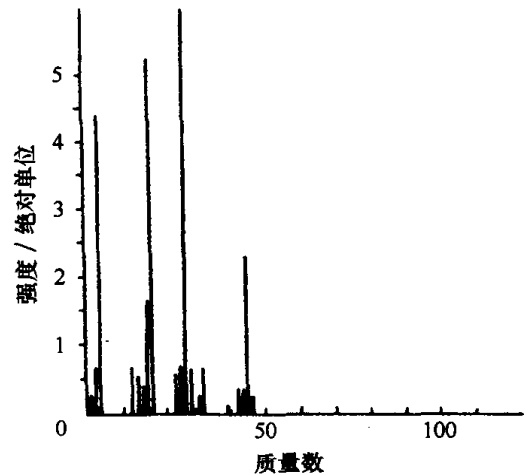


图 10-71 无油超高真空防冷焊评价试验设备质谱图

(十一) 宇航员训练试验设备

宇航员训练试验设备是为宇航员在上天之前模拟空间环境而设置的地面模拟设备,它的试验内容一般包括三个部分:一是宇航员对生活舱环境与宇宙服作适应性试验;二是宇航员使用操作设备的训练;三是宇航员在失重环境下进行机械操作的适应性试验。

宇航员生活舱的环境(温度、压力及气体成分)与地面都不相同,苏联设计的“和平”号太空站上的舱内气压为 10^5Pa ,美国航天飞机座舱内的气压一般是 $(\frac{1}{3}) \times 10^5\text{Pa}$ 。模拟宇航员生活舱的环境设备称为环境舱,它内部的压力是可调的,舱内还能做宇宙服性能试验。

宇航员训练试验设备,一般和真实载人飞船模型的大小一样,内部装有训练宇航员操作的各种仪器。宇航员训练试验设备如图 10-72 所示。

1. 用途

①研究航天器座舱总压力,压力上升和下降速度、氧分压、 CO_2 分压、温度、湿度等指标的适用标准,以提供航天器座舱设计部分参数。

②可做上述微小气候影响下的航天医学研究、航天食品研究、航天服考核等。

③选拔训练航天员。

④供高山和航空生理研究。

2. 技术性能

船体尺寸:直径×长度/mm×mm	$\phi 2800 \times 7000$
真空度/Pa	$10^5 \sim 2.5 \times 10^4$ (可达 4×10^3)
通风量/ m^3/n	1500~300
加热/ $^{\circ}\text{C}$	5~40
湿度:绝对湿度/Pa	$6.6 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$
相对湿度/%	15~85
消声后的噪声:白天	<70dB
夜间	<60dB
高氧:氧浓度	>98%

真空系统:水环泵、机械泵

3. 设备组成

设备主要包括:船体、真空抽气系统、通风系统、加热、去湿、除臭、消声、二氧化碳吸附器、水冷却系统 电源控制系统等。

设备简图如图 10-72 所示。

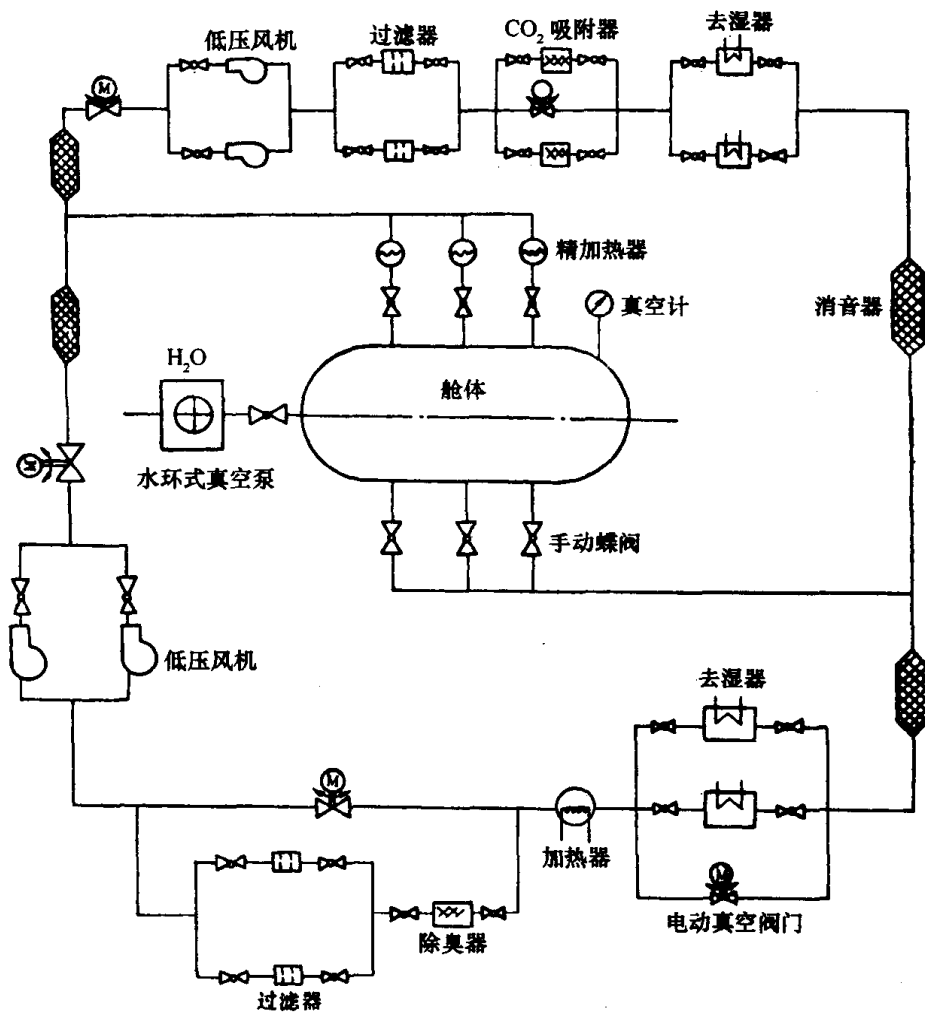


图 10-72 宇航员训练试验设备示意图

(十二) 固体火箭发动机点火模拟设备

1. 用途

主要用于卫星变轨发动机的点火试验与烟火剂在真空与低温条件下点火性能模拟试验。

2. 技术性能

真空容器:直径 1m、长 2m;

有效容积:直径 0.9m、长 1.5m;

工作台温度:300K~213K;

极限真空: 4×10^{-5} Pa;

火箭腔体模拟器内压力:3MPa。

3. 设备组成

设备简图如图 10-73 所示。主要包括:

①主模拟室:容器为卧式,室内装有火箭腔体模拟器、泄烟隧道、限压堵片、快速阀门及点火器、烟火剂安装底座。

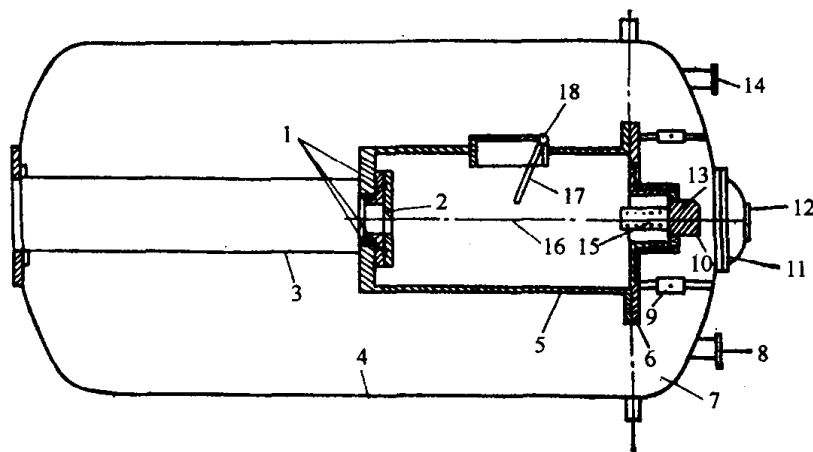


图 10-73 固体火箭发动机点火模拟设备

1—密封圈;2—限压铝片;3—泄烟隧道;4—模拟室;5—火箭腔体模拟器;6—药盒法兰;
7—大门;8—引线孔;9—调节螺丝;10—小电阻;11—小门;12—观察窗;13—药盒;14—测量孔;
15—烟火剂;16—压力传感器;17—快速阀板;18—快速阀轴;19—快速阀座。

②抽气机组:由带液氮冷阱的 K-400 扩散泵、机械泵及直径 400mm 高真空气动阀门等组成。

③低温循环系统:由 2 台 2F10 氟里昂压缩机组组成串级式密闭循环系统。工质采用 F22。酒精作为载冷液,用来冷却试件。

④电控及测试系统:为保证试验时的人身安全,装有整套设备运转和试验远距离监控设备,可自动测试温度、压力、点火电压、引爆电流等各种实验参数。

(十三) 激光点火模拟设备

1. 用途

该设备主要是为星用火箭发动机烟火剂的高空激光点火试验而研制的地面模拟试验设备。

2. 技术性能

环境温度:223K~323K;极限真空: 4×10^{-4} Pa。

3. 设备组成

此设备由真空容器、调温系统、抽气系统、压力调节和测量系统以及电器控制部分组成,如图 10-74 所示。

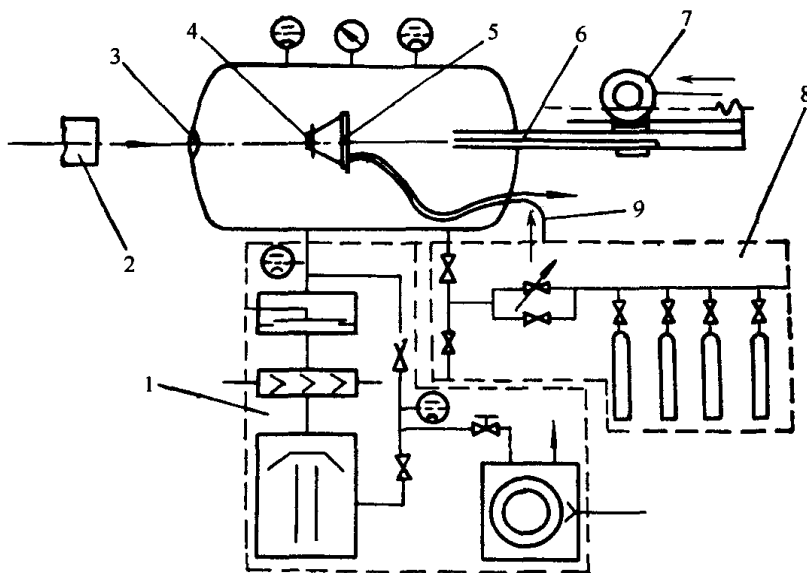


图 10-74 激光点火模拟设备示意图

1—真空抽气系统;2—激光器;3—透镜;4—试样;5—半导体制冷器;
6—磁力传动器;7—自整角电机;8—压力调节系统;9—水管。

①真空容器:卧式。前部有大门,尾部装有磁力偶合器及在它上面的可移动式样品台和自整角机调速及聚焦装置。两侧装有直径 120mm 的观察窗和多芯引线。

②调温系统:容器内装有半导体致冷的小热沉,温度在规定的使用范围内可任意自动调节,无噪声,使用方便。

③抽气系统:扩散泵抽气机组。

④压力调节系统:采用真空隔膜阀和针阀,能分别充氧、氮、氢、氦和空气。

(十四) 火箭发动机高空试车台

导弹和运载器上的火箭发动机启动升空后,即承受低气压环境的作用,其结果会给发动机材料、推力及工作性能带来有利与不利的影响。因此,在火箭发动机研制中,一般均应在预计的工作高度下,进行各类试验。特别是发动机的启动、运行和关车试验,以检验发动机的设计、工作性能和寿命等。利用低气压的特性而设计的火箭发动机,只有在相应工作高度下进行试验,才能准确测定推力与比冲,评价启动与关车性能,了解发动机与相邻物体表面的相互作用及干扰效应。进行这些试验的设备称为火箭发动机高空试车台。

不同类型的发动机因其设计参数和功能参数不同,对高空试车台的要求有所不同,分别称为液体火箭发动机高空试车台,固体火箭发动机高空试车台,电火箭发动机试车台等。

设计在不同高度下工作的火箭发动机,有不同的试验内容,要求试车台提供的高度条件也不一样。一般分为低高空试车台(提供的工作高度为 20km 上下)、中高空试车台(提供的工作高度为 40km 上下)、高高空试车台(提供的工作高度为 80km 上下)和超高高空试车台(提供的工

四、空间环境模拟设备

作高度为 200km 上下)。另外为了满足火箭发动机的某些特殊试验的需要,可以借用空间模拟设备或研制一些专用的试验设备和装置。

国外火箭发动机高空试车台种类很多。表 10-44 分别摘选了部分美国火箭发动机试车台试验数据及设备概况。

表 10-44 火箭发动机高空模拟试验设备

设备名称	主要性能	用途	所属单位	备注
火箭发动机点火试验舱	试验舱为直径 6m 的球,真空度 10^{-1}Pa	“阿波罗”11 号登月舱的姿控火箭 R-4D 点火试验	宇航局	
J-2A 试验舱	舱体直径 6m,长 10.6m,液氮排气。姿控火箭点火压强为 10^{-2}Pa (相当于 120km 高度),发动机工作时维持真空度不低于 22.6Pa (相当于 60km 高度)。变轨火箭发动机工作时维持压强为 $1 \times 10^2\text{Pa}$ (相当于 45km 高度)		空军阿诺德工程中心	1964 年建成,1965 年使用
电火箭高空模拟器	容器直径 7.5m,长 24.3m。真空度 10^{-3}Pa (加液氮后为 10^{-5}Pa ,加液氦为 10^{-6}Pa)	用于电火箭和离子火箭试验	宇航局 刘易斯中心	
空间推进设备	容器直径 9.1m,高 10.5m。真空度 10^{-7}Pa	用于“阿波罗”月球着陆推进系统的试验		造价 630 万美元
空间推进设备	容器直径 22.5m,长 30m。真空度 10^{-4}Pa 液氮热沉,冷气氦抽气。温度 $-205^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$ 。建筑物 $115\text{m} \times 30\text{m} \times 18\text{m}$	用于新型推进系统和电推进系统的评价和发展试验		造价 2550 万美元
核推进系统空间模拟器	真空容器直径 30.4m,高 37m。真空度 10^{-6}Pa ,作核能源试验时真空度 10^{-4}Pa ,热载 1000kW(去离子水吸收热量)。铝壳外加混凝土墙,可连续运转 90d。建筑物为 $170\text{m} \times 81\text{m} \times 42\text{m}$,占地 60 万 m^2	用于空间核火箭和核能源试验		1963 年建成,造价 2500 万美元
发射阶段模拟器	离心机半径 25m,最大加速度 $30g$,有效载荷 2.25t,噪声 150dB,三个自由度振动,频率 $5\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$,130s 内可从 10^5Pa 变到 1.3Pa	模拟发射环境		
空间环境试验容器	可达 10^{-4}Pa 的真空度,装有液氮热沉和石英灯,模拟空间环境。容器直径 9.1m,长 30m	试验“人马座”火箭		由风洞改装而成
空间环境试验容器	直径 10.6m,高 19.8m,用液氮、液氢和液氦,备有炭弧灯和石英灯,真空度可达 10^{-6}Pa	热真空试验和火箭点火试验	空军阿诺德工程中心	

(十五) 姿态调整火箭高空试车台

1. 用途

此试车台用于 76km 小型姿态调整火箭的高空环境模拟。在此高度试验发动机的点火、再启动、全尺寸燃烧试验。

2. 技术性能

热沉通入液氮后, 10h 真空度可达 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 不通液氮真空舱的极限压力为 $1.3 \times 10^{-2} \text{Pa}$, 工作压力为 1.3Pa , 真空机组可抽除未完全燃烧的 N_2O_4 。

3. 设备组成

设备主要由真空舱、抽气机组、热沉及液氮外流程组成。

(1) 真空抽气机组

真空抽气机组由高真空、中真空及低真空机组构成。

高真空机组由 JK-1200 高真空油扩散泵 + 罗茨泵 + 滑阀泵构成, 配置两套。机组极限压力为 $1.4 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 抽速为 $2.1 \times 10^4 \text{L/s}$ 。

中真空抽气机组由 JZ-1000 油扩散喷射泵 + 罗茨泵 + 滑阀泵组成, 共 8 套。机组的极限压力为 $5 \times 10^{-1} \text{Pa}$, 抽速为 $1.96 \times 10^4 \text{L/s}$ 。

低真空抽气机组由罗茨泵 + 罗茨泵 + 水环泵组成, 设置 2 套。发动机点火后, 大量的可凝气体被热沉壁捕集, 以霜的形式存在于舱体内, 该机组可将融霜后产生的气体排到舱外。机组极限压力 $1 \times 10^{-1} \text{Pa}$, 抽速 1200L/s 。

(2) 真空舱体

真空舱体由试验舱、主舱、辅舱组成。被试火箭发动机安置在试验舱密封端盖上的测力平台上, 喷管口朝向主舱。舱内布置了燃料的注入、控制装置和信号采集, 压力测量等接口; 主舱用于安装热沉, 并设有与试验状态有关的温度、激波压力、真空度等数据采集的测量口、观察窗等; 辅舱由油扩散喷射泵真空机组的抽空通道构成, 机组分布在舱体两侧。

试验舱处在主舱封头上。试验舱和主舱之间设有内门, 并采用能耐高压的唇型橡胶密封圈进行密封。试验舱为大气状态, 主舱可以保持 $5 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的真空度。这样在一个抽空过程中就可以进行多次试验, 可以打开试验舱门进行安装、检测操作。试验舱和主舱封头之间有阀门管道连接, 可以通过主舱经过该管路对试验舱抽空。达到内门开启所需的压差后, 可以打开内门。试验舱设置手动充气阀, 充气时间小于 10s。

(3) 热沉

热沉由冷管组件及冷壁组件构成。冷管组件用于对试验气体的冷却和冷凝。冷壁组件是模拟空间冷黑环境的部件, 与真空舱体保持 100mm 的距离。材质为奥氏体不锈钢。

冷管组件共 5 组, 前 2 组为盘状光管, 后 3 组带翼管, 全部安置在主舱后半段; 冷壁组件共 4 组, 分别安装有试验舱、主舱封头、主舱前段和主舱后段。舱体下部为进液氮口, 上部为出液氮口, 每一路单独进出, 并分别与液氮外循环系统连接。舱体外的液氮管路用保温层包裹。

火箭喷出的高温高速燃气进入主舱后, 逐步降温、减速, 经过冷管组件进行热交换后, 燃气中的如 H_2O 、 CO_2 、 H_2 的温度被降至 150K 后进入尾舱, 通过中真空机组排出舱体。

热沉除了通液氮外, 还要在化霜阶段通入热氮气。要求热沉能承受冷热交变温度, 因此需要解决热沉的结构和材料在高低温交变下的应力腐蚀、疲劳损伤和热胀冷缩等问题, 以免热沉损伤。

(4) 液氮外流程

热沉液氮外流程由 2 个液氮储罐、2 台液氮泵、过冷器、低温阀门和液氮管路等部件组成。液氮系统和热沉构成了液氮的密闭循环回路。为提高系统的可靠性,低温阀门采用手动形式。在火箭发动机试验中,实现了系统由开式沸腾降温,快速稳定地转换成液氮单相密闭循环。在液氮流程正常工作时,热沉壁板温度可达到 $90\text{K} \pm 5\text{K}$ 。热氮气流用于热沉加热,加快化霜速度。由空气压缩机、干燥器、油水分离器、加热炉、管道、阀门等组成。进气温度为室温,排气最高温度 423K 。

五、真空冶金炉

(一) 概述

真空电炉是 20 世纪 50 年代发展起来的一种金属冶炼设备,主要用于新型材料生产。第一台真空感应电炉诞生于 1954 年,从此之后相继研制成功了真空电阻炉、真空电子束炉、真空电弧炉。我国于 1960 年研制出真空自耗炉,并用于工业生产,使金属钛冶炼得到了很大的发展。1962 年生产出工业生产用的真空感应炉,1964 年研制出真空电子束炉,1973 年制造出第一台真空热处理炉并用于工业生产。

真空电炉根据加热方式不同分为真空电阻炉、真空电子束炉、真空电弧炉、真空感应炉。

真空电阻炉是利用电阻加热工件或材料的炉子,即在真空条件下,加热器通电产生的电阻热通过辐射加热工件或材料。

真空电子束炉是利用电子枪发射出高速电子打到熔炼材料上,将电能转换成热能,使材料熔化。

真空电弧炉是利用弧光放电产生的电弧热熔炼材料。将自耗电极(被熔炼材料)接负极,坩埚接正极,通电时两极间产生弧光放电,正离子打在阴极上(材料),电子打在阳极上(坩埚),将电能转变成热能,使材料熔化。

真空感应炉是将物料放入具有线圈的坩埚中,当线圈通入交变电流时,产生交变磁场,在物料表面产生感应电流,感应电流产生的电阻热,将物料熔化或加热。

(二) 真空电阻炉

真空电阻炉主要用于钛、钽、锆等活泼、难熔金属或某些磁性、电工合金的光亮退火和真空除气,也用于某些材料的真空焊接、钎焊和扩散焊。

电阻炉按结构型式和使用方式可分为:

①按加热体布置方式分内热式和外热式。加热器置于炉壳内,炉壳外水冷,称为内热式。加热器放在炉壳外,如磁性材料烧结炉等,称为外热式,即采用外热式加热。

②按加热方式分为直热式和旁热式。直热式是利用炉料电阻热加热炉料本身。旁热式则是利用加热器的辐射热间接加热炉料。大多数电阻炉采用内热式辐射加热。

③按作业方式分为间歇式和半连续式。

④按炉体结构型式分为立式和卧式。立式电阻炉的加热室垂直放置,占地面积小。如设计为半连续式,则炉体较高,传动机构简单,但装拆较困难。卧式电阻炉的加热室水平放置,其特点恰与立式相反。

⑤按炉膛温度范围可分为 1150℃ 以下的低温炉和 1600℃ 以上的高温炉,介于二者之间的为中温炉。由于热区温度的不同,在结构和熔炼材质上也有不同。

1. 电阻炉结构原理

最简单的真空电阻炉,如图 10-75 所示,它是一个单室结构的间歇式炉。加热和冷却均在一个室内,加热器在炉膛内属旁热式。它既可做成立式亦可做成卧式。装有一套真空系统。

双室和多室电阻炉,在两室之间只要有一个闸阀就可构成半连续式。若没有闸阀,它只能是间歇式炉。半连续式炉需要配置两套以上的真空系统,而间歇式炉即使是多室结构,也多采用一套真空系统。图 10-76 所示的半连续式炉为三室两阀结构,配有三套真空系统。

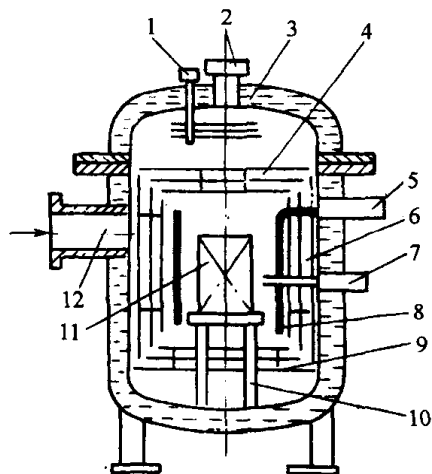


图 10-75 立式电阻炉

1—挡板;2—观察孔;3—炉盖;4—上屏;
5—电极;6—侧屏;7—热电偶;8—加热器;
9—下屏;10—料架;11—炉料;12—抽气口。

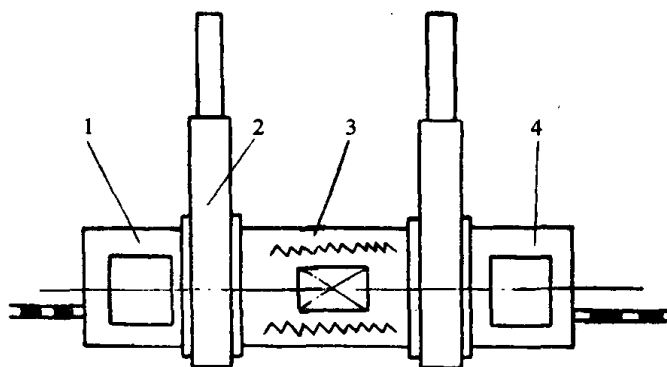


图 10-76 半连续式电阻炉

1—出料室;2—闸阀;3—加热室;4—进料室。

真空电阻炉主要有六个部分:①炉体,由水冷炉壳、炉盖、辐射屏衬、加热器、水冷电极、观察孔和托料支架等组成;②真空系统,由真空泵、阀门、管道、真空仪表和充气装置等组成;③电气系统;④水冷系统,由冷却炉壳、炉盖、加热电极和真空泵的供水管路等组成;⑤测温系统,主要是测量炉膛温度的热电偶;⑥运送炉料的传动系统,为多室炉而设置,它包括机械传动、气动和液压传动。

2. 电阻炉的热计算

电阻炉设计的主要参数有:最高工作温度;炉体尺寸及工件最大质量;升温时间;工件受热后的允许温差;炉体内冷态极限真空及热态下的工作压力等。

电阻炉设计计算主要包括最大加热功率、加热元件、壳体壁厚、真空系统、电气等方面的计算。简要介绍如下:

(1) 最大加热功率的计算

熔化炉料所需的加热功率包括两部分:一部分是工件炉料受热、升温到工作温度或熔化的有用功率;另一部分为通过热屏蔽的损失功率。由加热器发出的热流量 Q_1 应等于加热需要的有用热流量 Q_2 和损失掉的热流量 Q_3 之和,即

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (10-16)$$

炉料和料筐升温时所需要的有用热流量 Q_2 可用下列式计算:

$$Q_2 = Q_{\text{工}} + Q_{\text{筐}} \quad (10-17)$$

式中 $Q_{\text{工}}$ —— 工件加热所需要的热流量[kJ/h];
 $Q_{\text{筐}}$ —— 料筐与工件一样升温所需热流量[kJ/h]。

$$Q_2 = G_{\text{工}} c_m (t_1 - t_2) / \tau + G_{\text{筐}} c_n (t_1 - t_2) / \tau \quad [\text{kJ/h}] \quad (10-18)$$

式中 $G_{\text{工}}、G_{\text{筐}}$ —— 分别为工件、料筐质量[kg];
 $c_m、c_n$ —— 分别为当温度由 t_2 升到 t_1 时工件、料筐的平均比热容[kJ/(kg·℃)];
 t_1 —— 炉料所应达到的最高工作温度[℃];
 t_2 —— 炉料升温开始时的温度(常温)[℃];
 τ —— 由 t_2 升到 t_1 所需的升温时间[h]。

炉料熔化时需要的有用热量 Q'_2 为

$$Q'_2 = G_{\text{工}} C_g / \tau' \quad (10-19)$$

式中 C_g —— 炉料的熔化潜热[kJ/kg];
 τ' —— 炉料熔化时间[h]。

设计熔化炉时取式(10-18)和(10-19)中最大值作为有用热流量,对于真空热处理炉,只需计算升温过程中需要的有用热流量。

(2) 损失热量 Q_3 的计算

在炉膛处于热平衡态即温度不变时, Q_3 为各部分传热损失之和,即

$$Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (10-20)$$

式中 Q_4 —— 通过炉衬的传热损失[kJ/h];
 Q_5 —— 通过上顶和下底炉衬的传热损失[kJ/h];
 Q_6 —— 通过水冷电极的传热损失[kJ/h];
 Q_7 —— 观察孔传热和辐射热损失[kJ/h];
 Q_8 —— 其它传热损失,如炉衬支撑杆、炉料筐支撑杆等因绝热不良的短路热损失[kJ/h]。

关于 Q_4 的计算,因为有两种不同炉衬,即辐射屏衬和厚壁炉衬,所以计算方法也有两种。

计算炉衬辐射屏的热损失需作以下假定:① 炉膛内热源相当于一个温度均匀的圆筒形热源;② 辐射屏很薄,且屏的两侧温度相等;③ 同种材料的各屏在不同温度下的黑度相同;④ 内壁各处的温度均匀且不变;⑤ 炉膛内处于真空,主要为辐射热损失而忽略对流传热损失。因此可以认为,在传热趋于平衡的状态下,炉膛内各点温度不变,通过各屏的辐射热损失相等。即由热元件传给第1屏的热流量 Q_{f1} 等于第一屏传给第二屏的热流量 Q_{12} ,也等于第 n 屏传给炉壳内壁的热流量 Q_{nb} ,且都等于 Q_4 。那么

$$Q_4 = \sigma_H F_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{nb}}{100} \right)^4 \right] \quad (10-21)$$

式中 Q_4 —— 炉衬辐射热损失[kJ/h];
 σ_H —— 加热元件,各屏及炉壳体内壁综合辐射系数[kJ/(m²·h·K⁴)];
 F_f —— 加热元件辐射面积[m²];
 T_f —— 加热元件温度(一般选较炉膛温度高 100K ~ 200K)[K];
 T_{nb} —— 炉壳体内壁温度[K]。

加热元件、各屏及炉壳体内壁综合辐射系数为

$$\sigma_H = F_f^{-1} \left[\frac{1}{F_f \sigma_{f1}} + \frac{1}{F_1 \sigma_{12}} + \frac{1}{F_3 \sigma_{23}} + \frac{1}{F_n \sigma_{nb}} \right]^{-1} \quad (10-22)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_{f1} &= \sigma_0 \left[\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{F_f}{F_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \right]^{-1} \\ \sigma_{12} &= \sigma_0 \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1} \\ \sigma_{23} &= \sigma_0 \left[\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{F_2}{F_3} \left(\frac{1}{\epsilon_3} - 1 \right) \right]^{-1} \\ \sigma_{nb} &= \sigma_0 \left[\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{F_n}{F_{nb}} \left(\frac{1}{\epsilon_{nb}} - 1 \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (10-23)$$

式中 $F_1, F_2, F_3 \cdots F_n, F_{nb}$ ——分别为各屏及炉壳体内壁面积[m²];

ϵ_f ——加热元件发射率;

$\epsilon_1, \epsilon_2 \cdots \epsilon_n, \epsilon_{nb}$ ——分别为各屏及炉壳体内壁发射率;

σ_0 ——斯忒藩—玻耳兹曼常数[kJ/(m²·h·K⁴)].

计算中要注意的是:①加热元件的辐射面积 F_f 只能根据同类电阻炉类比计算,待求出加热功率确定加热器尺寸再验算;②辐射屏的层数以不超过六层为宜;③由公式(10-21) 求出 Q_4 后可推导出辐射屏温度的计算式;④辐射屏的选材有钼片、不锈钢片和石墨,而钽片、钨片、钛片不常用。

计算厚壁炉衬的热损失 Q_4 时,需对炉衬材料的绝热性能有一定的了解。供炉衬选用的新型保温材料有碳毡、碳布、硅酸铝耐火纤维等。这些材料耐高温、保温性好,热惯性小,含气量少,且易抽真空。图 10-77、10-78 及图 10-79 给出了厚壁炉衬和厚壁炉衬剖面示意图。

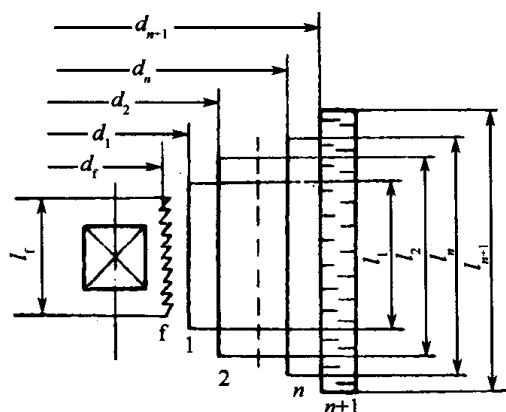


图 10-77 加热室剖面各屏位置
f—加热元件;1—第1屏;2—第2屏;
n—第n层屏;n+1—炉壳内壁。

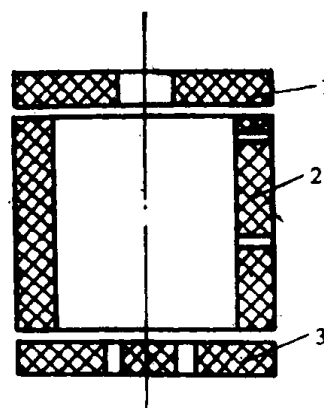


图 10-78 厚壁炉衬
1—上炉衬;2—侧炉衬;3—下炉衬。

当炉膛内升温而传热趋于平衡时,加热元件传给炉衬内壁的热流量 Q_{f1} 等于炉衬内壁传给外壁的热流量 Q_{12} ,又等于炉衬外壁传给炉壳内壁的热流量 Q_{23} ,且都等于 Q_4 ,那么

$$Q_4 = Q_{f1} = \frac{\sigma_0 F_f}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{F_f}{F_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \quad (10-24)$$

$$Q_4 = Q_{12} = \frac{2\pi l_1 \lambda (T_1 - T_2)}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \quad (10-25)$$

$$Q_4 = \frac{\sigma_0 F_2}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{F_2}{F_3} \left(\frac{1}{\epsilon_3} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \quad (10-26)$$

Q_5 的计算,近似方法是用 Q_4 按上顶和下底炉衬面积的配比计算,即

$$Q_5 = \frac{F_{\text{上}} + F_{\text{下}}}{F_1} Q_4 \quad (10-27)$$

式中 F_1 ——侧壁面积,对辐射屏取第一屏面积,对厚壁炉衬取内壁面积[m²];
 $F_{\text{上}}$ ——上顶面积,对辐射屏取第一屏面积,对厚壁炉衬取内壁面积[m²];
 $F_{\text{下}}$ ——下底面积,对辐射屏取第一屏面积,对厚壁炉衬取内壁面积[m²].

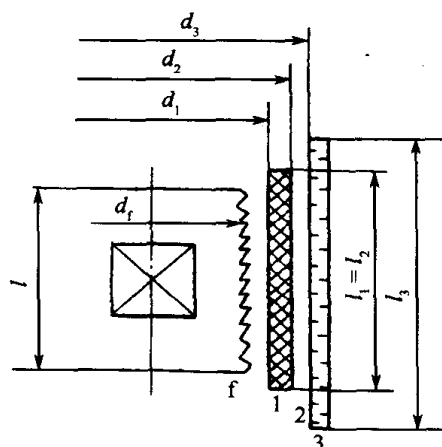


图 10-79 厚壁炉衬剖面

f—加热元件;1—炉衬内壁;2—炉衬外壁;3—炉壳内壁。

此式的适用条件是:辐射屏的顶屏、底屏和侧屏的层数相同,且内屏应构成一个封闭空间。对厚壁炉衬则是各衬的厚度相同,且内屏也为一封闭空间。

水冷电极(如图 10-80 所示)热损失 Q_6 的计算有两部分,即通过电极传导的热损失和接触电阻的热损失。这两部分热量经铜棒电极被冷却水带走。在传热趋于平衡时,电极传热损失 Q_6 应等于接头热损失 Q'_6 ,也应等于铜棒热损失 Q''_6 ,那么

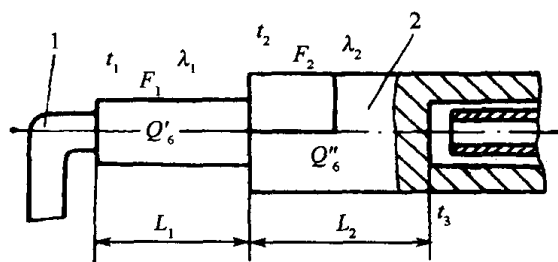


图 10-80 水冷电极结构示意图

1—加热元件与接头;2—水冷铜棒电极。

$$Q_6 = Q'_6 = \frac{\lambda_1 A_1}{L_1} (t_1 - t_2), Q_6 = Q''_6 = \frac{\lambda_2 A_2}{L_2} (t_2 - t_3)$$

式中 λ_1 和 λ_2 为两段不同材料的导热系数 [$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; L_1 和 L_2 为此两段金属的长度 [m]; A_1 和 A_2 则为各段的横截面积 [m^2]; t_1 为加热元件的温度; t_2 为接头处接触温度; t_3 按冷却水出水温度取值 [$^\circ\text{C}$]。由上述二式推导出

$$Q_6 = \left[\frac{L_1}{\lambda_1 A_1} + \frac{L_2}{\lambda_2 A_2} \right]^{-1} (t_1 - t_3) \quad [\text{kJ/h}] \quad (10-28)$$

由于接触电阻的热损失不易计算,通常采用同类电炉实际热损失来估算,每个电极的热损失平均取 $0.5\text{kW} \sim 1\text{kW}$ 。

观察孔的热损失 Q_7 的计算,比较精确的是按观察孔导热面积 F 计算

$$Q_7 = c_0 F \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{n+1}}{100} \right)^4 \right] \left[\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_{n+1}} - 1 \right]^{-1} \quad (10-29)$$

粗略地

$$Q_7 = (Q_4 + Q_5) \times 2\% \quad (10-30)$$

其它热损失 Q_8 的计算,较精确的是待支架等尺寸初步确定后,按导热公式计算,即

$$Q_8 = \frac{\lambda A}{L} (t_1 - t_2) \quad [\text{kJ/h}] \quad (10-31)$$

式中 λ ——支架材料的导热系数 [$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$];

A ——支架的截面积 [m^2];

L ——支架的长度 [m];

t_1 ——支架热端温度 [K];

t_2 ——支架冷端温度 [K].

粗略地

$$Q_8 = (Q_4 + Q_5) \times 5\% \quad [\text{kJ/h}] \quad (10-32)$$

(3) 电阻炉总功率的计算

熔化功率(或升温功率)和热损失功率之和求出后,再乘安全系数,得到总功率。通常安全系数取 $1.1 \sim 1.3$ 。

(4) 加热元件的计算

加热元件直径

$$d = 34.4 \left(\frac{P_n^2 \rho}{U^2 W} \right)^{1/3} \quad [\text{mm}] \quad (10-33)$$

加热元件长度

$$L = \left(\frac{10 U^2 P_n}{4 \pi \rho W^2} \right)^{1/3} \quad [\text{m}] \quad (10-34)$$

式中 P_n ——每支加热元件的加热功率 [kW];

ρ ——加热元件热态电阻率 [$\Omega \cdot \text{m}$];

U ——加热元件上的电压,通常低于 100V , $6\text{V} \sim 60\text{V}$ 可调;

W ——加热元件表面功率,钼材选 $10\text{W}/\text{cm}^2 \sim 16\text{W}/\text{cm}^2$,石墨选 $20\text{W}/\text{cm}^2$ 以上。

3. 电阻炉的隔热层

隔热层所用材料有耐火砖、金属屏、耐火纤维(石墨毡、硅酸铝纤维等)。隔热层的内部空

间尺寸取决于炉子的热区尺寸。隔热层的内表面与加热器之间距离一般为 50mm~100mm, 其外层表面与水冷壁之间的距离为 100mm~150mm。下面介绍几种隔热层结构。

(1) 耐火砖隔热层

通常采用轻质高级耐火材料,如泡沫高铝砖,使用砌法砌成。高铝砖的性能见表 10-45。

表 10-45 轻质高铝砖的性能

指 标	牌 号			
	PM-1.0	PM-0.8	PM-0.6	PM-0.4
Al_2O_3 不小于/%	48	48	48	48
Fe_2O_3 不大于/%	2	2	2.5	2.5
体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.0	0.8	0.6	0.4
常温耐压强度不小于/MPa	4	3	2	0.6
耐火度不小于/℃	1750	1750	1730	1730
10^5Pa 荷重软化开始温度不大于/℃	1230	1180	1100	1730
重烧线收缩不大于/%	0.5	0.6	1	1
试验温度/℃	1400	1400	1350	1350

为使耐火砖隔热层很快热透脱气,隔热层一般都选得比较薄,隔热层外表面一般保持在 300℃ 以上。这样就会增加热损失。为减少热损失,可在砖的外侧再装置 2 层~3 层不锈钢屏,这样还能使砖的外壁温度增高,改善脱气条件。选用耐火砖隔热层时,应注意电热体不要与砖接触,否则电热体在高温下与砖发生反应,损坏电热体。这种保温材料的缺点是蓄热量大,脱气条件差,不适宜快速冷却及加热,难以达到高真空,一般用于真空度在 10^{-1}Pa 以下的真空炉。

(2) 金属屏隔热层

金属屏隔热是利用多层金属屏反射热量而起到隔热作用。温度高于 900℃,要选用高熔点金属如钨、钼、钽片。低于 900℃,可选用薄不锈钢板作反射层。在保证屏有足够刚度的前提下,应尽量减少屏的厚度,以便减少屏的蓄热量。钨、钼、钽板一般为 0.2~0.5mm。不锈钢板一般为 0.5mm~1mm。中、小型炉选薄些,大型炉选厚些。屏的黑度越小,其反射效果越好。而黑度不仅与材料种类有关,还与表面粗糙度有关。所以应进行表面处理。钨、钼、钽片用酸洗法处理,不锈钢经抛光处理。屏的层数与隔热效果大体按 $\frac{1}{n+1}$ (n = 层数) 变化,可见屏的层数过多其意义并不大。工作温度为 1300℃,用六层屏即可。屏间距离小些较好,一般为 10mm 左右,每层之间用衬套、垫圈等隔开,如图 10-81 所示。

设计反射屏时应考虑热胀冷缩的影响,防止冷、热变形而引起损坏。金属屏的优点是炉子可以实现较快的加热和冷却,易于达到 10^{-4}Pa 的高真空。

(3) 石墨毡、炭毡隔热层

这种材料是 20 世纪 60 年代出现的新型高温隔热材料。它密度小、热容量小、导热系数小,可以急速加热和冷却。当温度上升时其强度亦随之提高,长期使用也不会损耗。此外,还

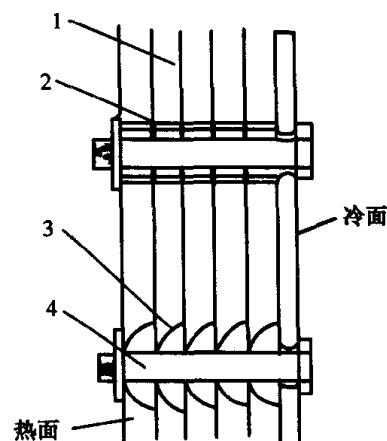


图 10-81 反辐射屏隔热层

1—钼片;2—钼衬套;3—钼垫圈;4—钼螺钉。

有出气量小、价格较金属屏便宜、加工安装简易等特点。辽阳炭素厂生产的炭毡技术数据见表 10-46。石墨毡的隔热性能如图 10-82 所示。石墨毡、炭毡隔热层的结构如图 10-83 所示。钢框架外面焊接菱形钢板网或钢丝网,网内衬石墨毡或炭毡,每层毡的接缝位置应彼此错开,用钼丝将毡捆扎在网上。工作温度不超过 1300℃,毡的厚度 40mm 即可,外面的钢框架可用普通碳钢。

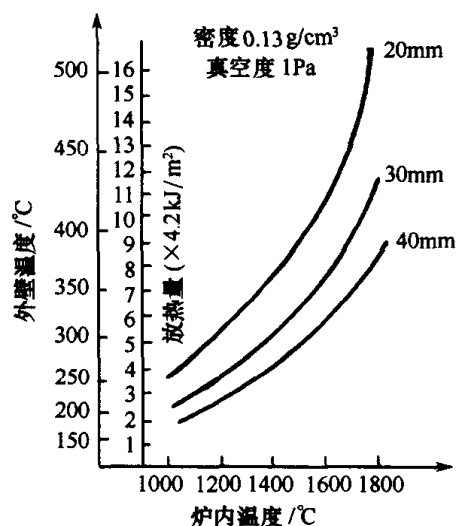


图 10-82 石墨毡的隔热性能

表 10-46 炭毡的技术数据

密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	132
导热系数 / $\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	0.20
抗张强度纵向 / MPa	0.41
横向 / MPa	0.08
比热容 $c_p / \text{J} \cdot (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	20℃ 0.1836
	100℃ 0.237
	300℃ 0.25
	500℃ 0.335
	700℃ 0.348
	900℃ 0.35
	1100℃ 0.351
	1300℃ 0.352

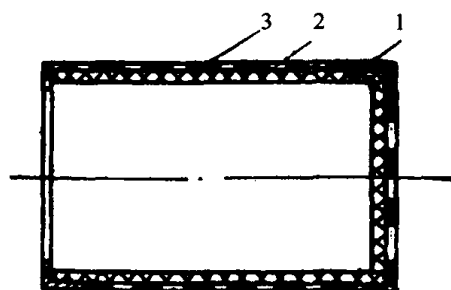


图 10-83 石墨毡、炭毡隔热层结构

1—框架;2—菱形钢板网;3—石墨毡或炭毡。

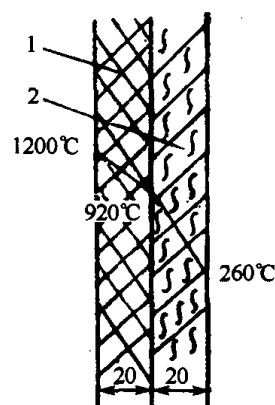


图 10-84 炭毡、硅酸铝纤维混合隔热层

1—炭毡;2—硅酸铝纤维毡。

实践证明,石墨毡、炭毡至少对钢铁材料是会造成污染的,长期使用后,由于毡与氧、水蒸气以及油蒸气发生反应,其隔热性能降低,一般使用寿命为 5 年~6 年,更换时只换下里面的 1 层~2 层即可。

(4) 石墨毡(或炭毡)与硅酸铝纤维毡混合隔热层

紧靠加热区的一侧衬以石墨毡或炭毡,其余全衬以硅酸铝纤维毡,这种结构不仅隔热效果好,而且经济。日本“海斯”公司的 VCQ-E 型真空炉就是采用这种隔热层。硅酸铝纤维也是一种密度小,导热系数小,保温效果好,耐热冲击的优良保温材料,只是耐高温性能比石墨毡差些,其性能见表 10-47。某些国产硅酸铝纤维的导热系数见表 10-48。

国内生产的真空淬火炉,用 20mm 炭毡和 20mm 硅酸铝纤维作隔热层,如图 10-84 所示。当炉膛温度为 1200℃ 时,测得炭毡与硅酸铝毡交界面温度 920℃,硅酸铝毡外层温度 260℃。混合隔热层比单一炭毡层价格便宜。

表 10-47 硅酸铝纤维的技术性能

材 料	天然料硅酸铝纤维 (甲等)	高纯硅酸铝纤维	高铝硅酸铝纤维	含铬硅酸铝纤维
1. 化学成分/%				
Al ₂ O ₃	45~52	48~52	≥60	≥94
Al ₂ O ₃ + SiO ₂	≥90	≥99	≥99	3.5~5.5
Cr ₂ O ₃	≤1.5	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Fe ₂ O ₃	≤0.5	≤0.2	≤0.2	≤0.2
K ₂ O + Na ₂ O	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.1
2. 允许长期使用温度/℃	<(1150℃ × 6h)	<(1250℃ × 6h)	<(1400℃ × 6h)	<(1400℃ × 6h)
3. 加热收缩/%	<2.5(1050℃)	<2.5(1150℃)	<2.5(1250℃)	<2.5(1250℃)
4. 纤维直径/μm	3~5	3~5	3~5	3~5
5. 密度/kg·m ⁻²	120~140	120~140	120~140	120~140
6. 含水量/%	≤1	≤1	≤1	≤1

表 10-48 硅酸铝纤维导热系数

(单位: kJ/m·K·h)

密 度/kg·m ⁻³	300℃	500℃	700℃	900℃	1200℃
105	0.22	0.29	0.38	0.53	0.86
168	0.20	0.24	0.33	0.43	0.64
210			0.30 (600℃)	0.31	0.46

注:首都耐火材料厂生产

用硅酸铝纤维作隔热层,应注意以下几点。

①硅酸铝纤维吸湿,炉子不应长时间暴露于大气,停炉期间应使炉子保持真空。

②纤维毡一般是由纤维加入有机粘合剂压制而成,应选用粘合剂少的或不加粘合剂的纤维毡,以免加热后硅酸铝纤维毡“出油”。

③这种纤维毡还是绝缘体,电极穿过硅酸铝纤维毡不用另加绝缘材料。在淬火炉使用时,油蒸气浸入纤维毡,遇热炭化,会使纤维的绝缘性能下降,应经常检查电极的对地电阻,大于2000Ω为正常。

(5) 夹层式隔热层

夹层式隔热层其内层用铝片,外层用不锈钢片,其间填充石墨毡、炭毡、硅酸铝纤维等耐火纤维,组成夹层式隔热层。为了在抽真空时除去耐火纤维中的气体,不锈钢片上应开通气孔。夹层式隔热层具有反射屏隔热和耐火纤维隔热两个作用。反射屏隔热层和石墨毡,炭毡隔热层均不适用于气体循环的真空电阻炉,而用夹层式隔热层即可满足气体循环系统的要求。“伊普森”公司的 VFC-24 型真空回火炉为气体循环冷却,其隔热层即为夹层式隔热层,中间衬是硅酸铝纤维。该公司 VFC 系列真空炉的加热室简图如图 10-85 所示,隔热层如图 10-86 所示。

此外,柔性石墨、石墨板等也可作隔热材料。

上述各种隔热层除耐火砖隔热层由于蓄热量大,脱气困难,真空度低等缺点而很少使用外,其它的几种隔热层都因有各自的优点而得到应用:

金属屏隔热层,虽然其隔热效果不如各种纤维隔热性能好,但它具有放气量小,吸湿性小,可得到较高的真空度等优点,被广泛应用。特别是有些特殊材料,需要在非常清洁的真空气氛中处理,金属屏是不可少的。

石墨毡隔热层(包括混合式隔热层),其隔热效果很好,可使真空炉功率损耗降低很多,耐

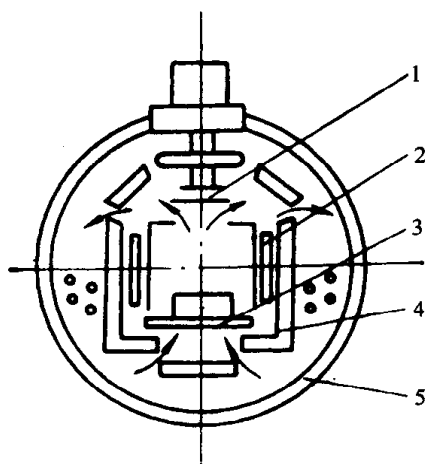


图 10-85 VFC-24 型真空炉

1—风扇；2—加热器；3—炉床；
4—隔热层；5—炉壳。

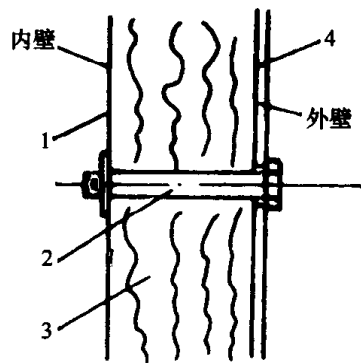


图 10-86 夹层式隔热层

1—钼片；2—钼螺钉；
3—硅酸铝纤维；4—不锈钢片。

热冲击性能也好，而且价格比较便宜，维修、更换都方便，是比较好的隔热层。

（三）真空电子束炉

电子束熔炼的设想于 1907 年提出，直到 1954 年才用于生产之中。其主要优点有：熔炼速度可在大范围内调节；功率密度高且易控制；熔池表面温度高。因而可熔炼难熔金属，适用于任何形状的原料（如棒、块、屑、板等）。易于精确控制熔料的化学组分，得到一定性能要求的稀有难熔和高纯金属材料。此外，电子束对熔料的扫描还有搅拌作用，有利于合金化与去杂质。

工业上大规模用于钽、锆、钨及其合金的熔炼，用于不锈钢的冶炼规模较小。

1. 电子束炉结构原理

电子束熔炼有三种形式：滴熔、池溶和凝壳熔炼，如图 10-87 所示。图 10-87(a)为滴熔，既可垂直送料，也可横向送料。棒料需制成电极形式，要求严格，功耗也较池熔大。图 10-87(b)为池熔，不需制备棒料，但原料损耗稍大，铸锭表面较粗糙，熔化速度低，熔池较浅。图 10-87(c)为凝壳熔炼，没有坩埚污染，可铸成各种异型件。适用于高纯金属和活泼金属熔炼。

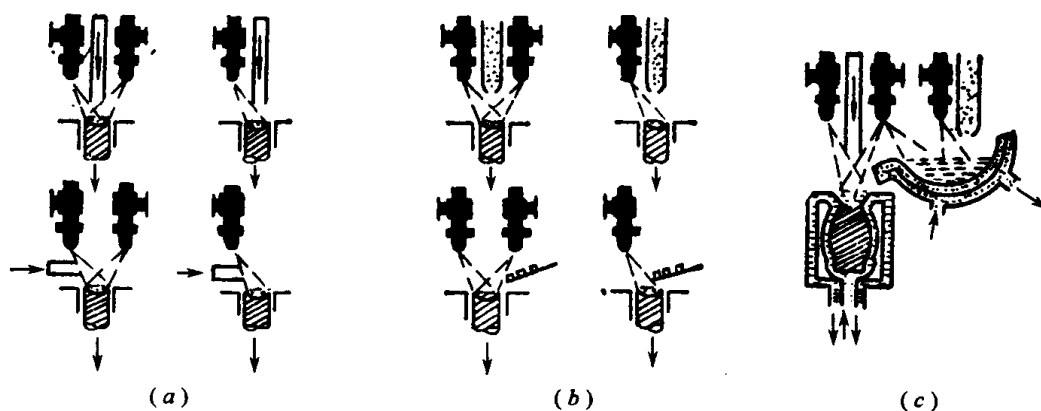


图 10-87 电子束炉的基本熔炼方式

电子束炉又称电子轰击炉，主要包括电子枪、炉体、托锭机构及结晶器、送料机构、真空系统、水冷系统、观察装置、电源等，如图 10-88 所示。

所用电子枪的种类有轴向（皮尔斯）、横向、远环和近环四种，多用轴向枪为主。它们的结

构布局如图 10-89、图 10-90、图 10-91 所示。图 10-92 为三种送料方法的复式皮尔斯枪示意图,不仅由单枪向多枪组合熔炼方式发展,而且可适应颗粒状料的熔炼。图 10-93~图 10-95 为各种不同的电子束炉结构示意图,图 10-96 为电子束与熔池的布置图。

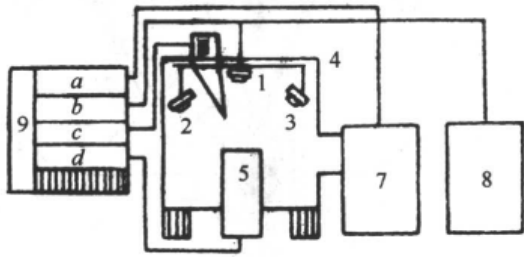


图 10-88 电子束熔炼炉系统

1、2、3—电子枪；4—炉体；5—锭模和托锭装置；6—送料装置；
7—真空系统；8—电源；9—各种电路控制装置(a—真空系统；
b—电子枪；c—进料；d—引锭)。

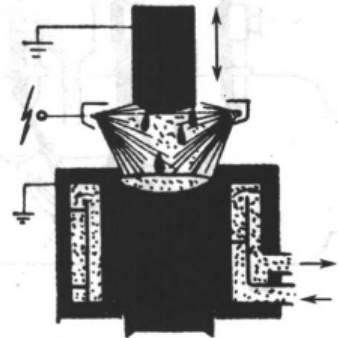


图 10-89 近距环形枪、垂直送料的电子束炉

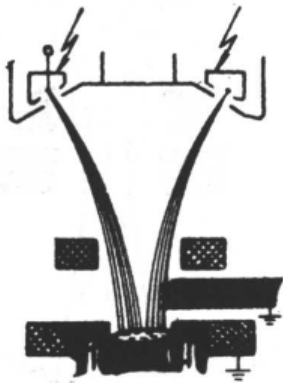


图 10-90 远距环形枪、水平送料的电子束炉

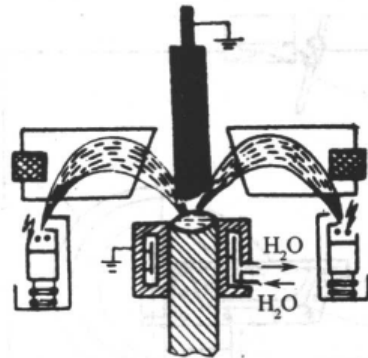


图 10-91 复式横向枪、垂直送料的电子束炉

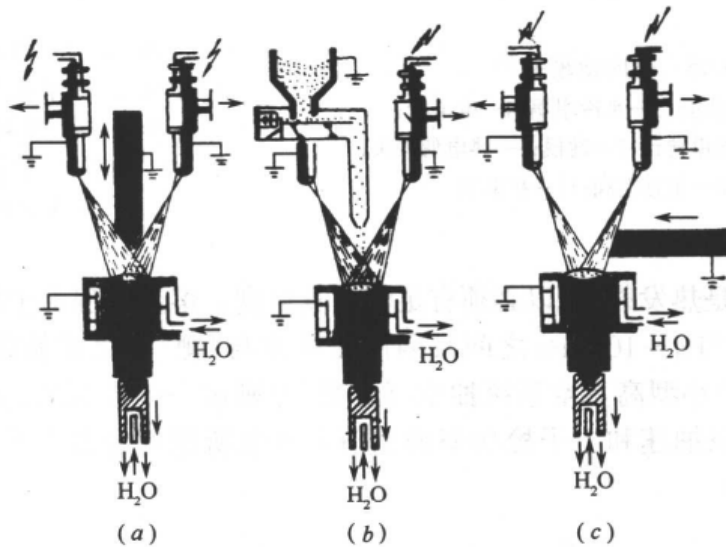


图 10-92 复式皮尔斯电子枪、三种送料方式

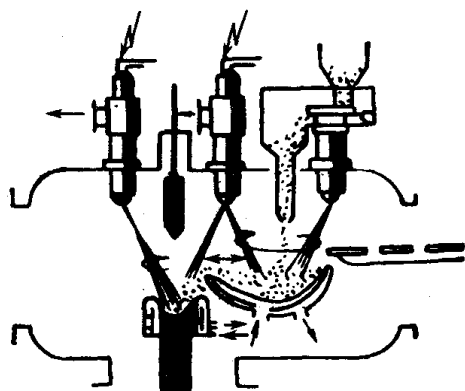


图 10-93 三只皮尔斯枪连续模铸炉

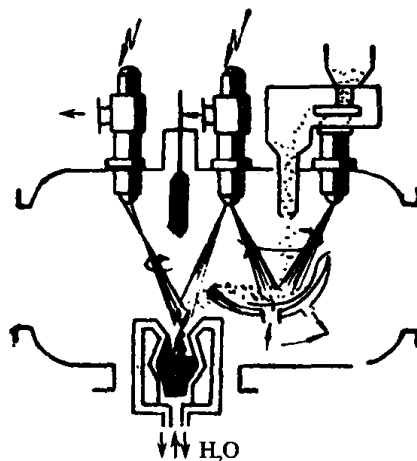


图 10-94 三只皮尔斯枪模铸炉

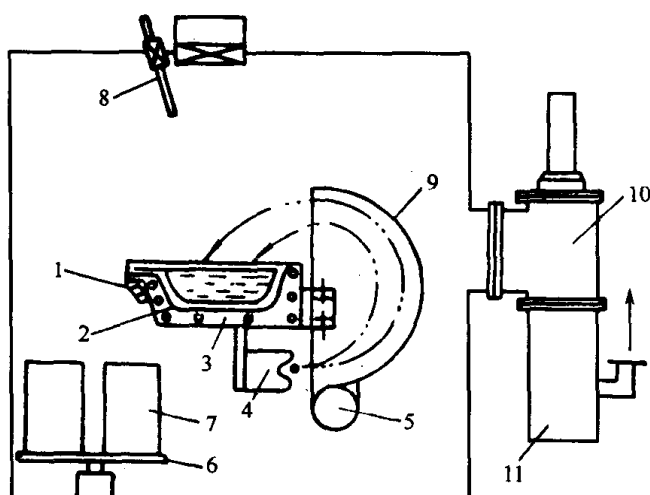


图 10-95 横向枪模铸炉

- 1—倾转轴;2—凝壳;3—水冷坩埚;4—电子枪;
5—磁性线圈;6—磁模转台;7—铸锭;8—热电偶探头;
9—磁极;10—主真空阀;11—扩散泵。

2. 枪室与真空度

由于电子枪电子是热发射,所以必须有足够的真空度。熔炼过程由于放气,熔炼室的真空度波动很大(约在 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 之间);因而在枪室与“靶”室之间始终保持一定的压差。枪室通常由 2 个~3 个小型高真空系统抽空,而“靶”室则由一个大型的高真空系统工作。近来人们习惯用主扩散泵抽速和电子枪功率的比值来衡量所选用的真空系统是否合理。经统计,该比值范围大致为

$$\frac{S}{P} = 150 \sim 200 \quad [\text{L}/(\text{s} \cdot \text{kW})] \quad (10-35)$$

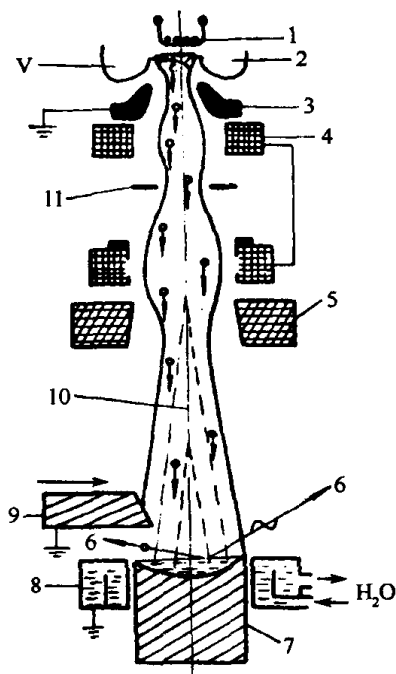


图 10-96 电子束与熔池布置

- 1—阴极;2—聚焦极;3—加速极;4—聚焦极;
5—偏移极;6—X 射线和二次电子辐射;
7—铸锭;8—水冷结晶器;9—棒料;
10—电子束;11—光阑。

式中 S ——主扩散泵抽速;

P ——电子枪功率。

3. 电子束的熔炼功率、熔化速度与送料速度

设计电子束功率应包括熔化功率和热损失。熔化功率与炉料种类、熔化速度等因素有关。热损失主要有熔池热辐射、结晶器水冷传热料棒传热及辐射等。熔炼功率可按热力学进行计算,也可由图 10-97 曲线参照经验选定。对池熔来说,功率与结晶器直径有关;对滴熔来说,为池熔功率与棒料熔化功率之和,如结晶器 $\phi 60\text{mm}$,滴熔 $\phi 40\text{mm}$ 钼棒,由图 10-97 中虚线查得熔化棒料的功率为 19kW ,由实线查得池熔功率为 50kW ,即熔炼功率为这二者之和 (69kW)。对于大型电子束熔炉功率可由图 10-98 查得。根据此值结合电子枪标准系列确定电子枪功率(俗称束功率)。

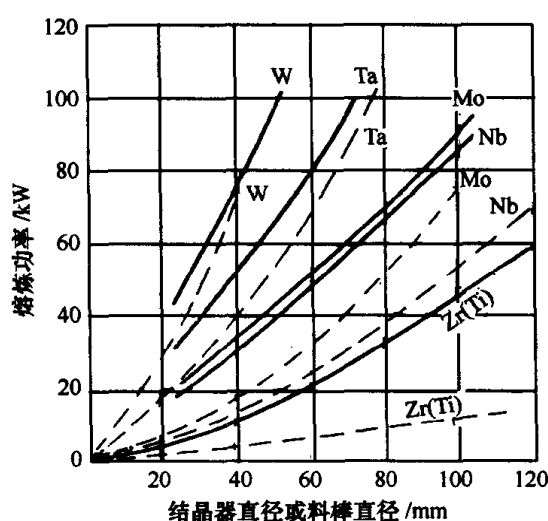


图 10-97 熔炼功率与结晶直径或与棒料直径的关系

(实线为池熔所需的功率,虚线为熔化棒所需功率)

熔炼功率计算公式为

$$P_r = (K_1 + K_2) V_r \frac{4.187}{60} (\Delta t c + L) \quad (10-36)$$

式中 P_r ——熔炼功率[kW];

V_r ——熔化速度[kg/min];

c ——比热容平均值[J/g·°C];

L ——熔解热[J/g];

Δt ——熔点和室温之差[°C];

K_1 ——工艺系数,与料的流动性、表面张力、熔滴在液相中的时间有关;

K_2 ——电子束损失系数,与电子束散射有关; $K_1 + K_2$ 通常取 $1.5 \sim 1.7$ 。

根据已知的电子枪功率,某种材料的熔化速度与送料速度,可由下式计算:

$$\text{熔化速度} \quad V_r = \frac{P}{60L} \quad [\text{kg/min}] \quad (10-37)$$

式中 P ——电子枪功率[kW];

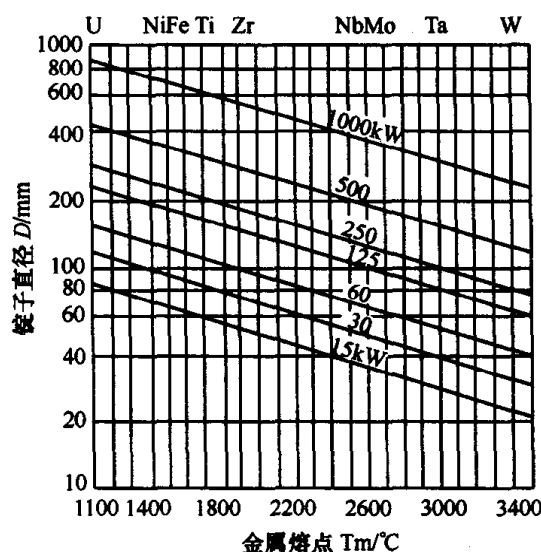


图 10-98 熔炼功率与金属熔点和料锭直径的关系

l ——熔化时电耗[kW·h/kg]。

$$\text{送料速度} \quad V_m = \frac{V_r L_m}{G_m} = \frac{1000 V_r}{F \rho} \quad [\text{cm/min}] \quad (10-38)$$

式中 L_m ——棒料长度[m];
 G_m ——棒料质量[kg];
 F ——棒料横截面积[m²];
 ρ ——棒料密度[kg/m³].

(四) 真空电弧炉

自从 1905 年鲍尔顿[Bolton]博士利用氩气电弧熔炼出金属钽以来,经历了漫长的真空电弧熔炼的试验阶段,直到 20 世纪 50 年代达到工业生产规模。这以后发展较快,德、美、英、日等各国利用真空电弧炉熔炼钢、合金钢、活性金属钛锆和难熔金属钨、钼、钽、铌和铀等等。

真空电弧熔炼是在低于大气压力下用电弧加热熔炼金属或合金。与普通电弧熔炼相比,它有许多优点。例如,在熔炼中避开了大气的污染,也没有耐火材料炉衬的不良作用;相反,低压促进了去除有害气体和杂质,改善了材料纯度,改善了金属或合金的性能。

我国从 1958 年开始试制实验室小型真空电弧炉,熔炼 Mo、W、Zr。到 20 世纪 60 年代初试制出了各种不同结构的真空电弧炉,熔炼合金钢、钛及其它金属和合金。产品有 ZH-15、ZH-200、ZH-3000、ZH-5000 型真空自耗电极电弧炉,容量为 20kg、30kg、50kg、100kg 和 250kg 的真空凝壳炉。

1. 结构型式

真空电弧炉有三种:真空自耗电极电弧炉,简称为自耗炉,被熔炼材料压制成电极,在水冷金属坩埚中启弧熔炼;真空非自耗电极电弧炉,简称为非自耗炉,电极既不消耗也不起任何反应,只提供电弧电流,一般在惰性气氛中熔炼,原料通常以颗粒供给到水冷金属坩埚中;真空自耗电极电弧凝壳炉,简称为凝壳炉,它能使定量的金属在具有金属自身结成的凝壳中迅速熔化并浇注成型模铸锭。真空电弧炉结构如图 10-99 所示;其主要区别和应用范围见表 10-49。

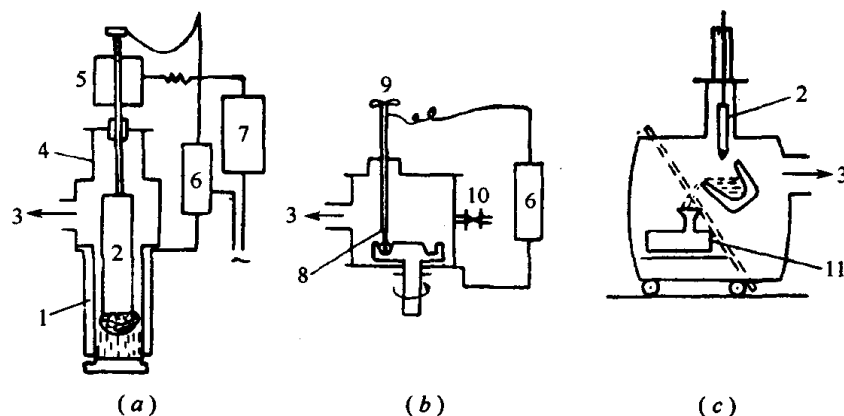


图 10-99 三种真空电弧炉示意图

(a)自耗炉;(b)非自耗炉;(c)凝壳炉。

1—水冷坩埚;2—自耗电极;3—排气;4—炉身;5—升降机构;6—电弧电源;
 7—电极升降控制系统;8—钨极头;9—操纵柄;10—充氩气口;11—型模。

表 10-49 三种真空电弧炉的比较

比较项目		真空自耗炉	真空非自耗炉	凝壳炉
电极	材料	被熔炼金属或合金	难熔金属或碳化物	被熔炼金属或合金
	自耗与否	电极熔化自耗	电极不消耗	电极熔化自耗
坩埚	性状	水冷金属坩埚	水冷金属坩埚	水冷金属坩埚
	有无炉衬	没有炉衬污染熔炼材料	没有炉衬污染熔炼材料	熔料形成凝壳作炉衬
熔炼方式		边排气边熔炼, 自耗电极边进给, 锭子边增长	抽空后充惰性气体稳弧电极电弧扫描熔池	边排气边形成大熔池, 自耗电极同时进给
铸锭	方式	边熔炼边冷却成锭	边熔炼边冷却成锭	凝壳中形成大熔池, 用离心浇注成各种形状铸锭
	特点	铸锭成柱状晶粒组织	铸锭的显微组织有热梯度大的材料特点	铸锭中没有方向性组织, 组织致密
适用范围	对象	熔炼难熔金属及其合金, 活性金属及其合金, 超高强度钢等	研制活性金属和难熔金属及其合金	制造形状复杂的活泼金属及其合金铸锭
	特点	可用大电极生产出大铸锭, 熔炼速度范围大, 可能出现某种局部偏析现象	只限于实验室小型炉子, 熔炼速度受限制	适用于中、小型炉子

2. 真空电弧炉的设计

1) 原始参数

- ①炉子的容量, 即生产的最大锭重(常以钢计算)。
- ②熔化速度, 每分钟熔化金属的质量。
- ③熔炼的材料, 由此决定设计计算某些物理量。例如比热容、密度、电阻以及化学成分等。
- ④对铸锭的质量要求, 例如对化学成分及其偏析的要求, 以及组织均匀性的要求等。

2) 炉身设计

炉身也称为真空室或炉子工作室, 主要用途是容纳电极和提供熔炼时所必需的真空环境。根据经验, 炉身的内径 D_1 用下面公式估算:

$$D_1 = (2 \sim 3) D_d \quad (10-39)$$

式中 D_d ——炉子熔炼的最大锭子的直径。对于系数(2~3)选择, 一般来讲, 大炉子取小值, 小炉子取大值。有的小炉子 D_1/D_d 的值可达 7~8。

炉腔的高度 L_1 , 用下式估算:

$$L_1 = L_d + L \quad [\text{m}] \quad (10-40)$$

式中 L_d ——电极长度[m];

L ——锭子长度[m]。考虑到电极头(假电极)和电极夹头的长度, 计算值需增大 200mm~400mm。

炉身与坩埚的容积比, 一般为(3~5):1。综合以上三个关系来确定炉身的大小。

3) 坩埚设计

对坩埚的要求: ①有良好的导热性和导电性, 且不易被熔炼金属粘结; ②坩埚内表面应该

平整光滑;③坩埚结构应该允许其热胀变形;④直径小于 150mm 的坩埚,内表面应带有锥度,通常取 0.5%;⑤要充分冷却,一般采用水套式冷却。

坩埚通常为紫铜材料,如果冷却条件好,亦可用钢制。

(1) 坩埚热计算

坩埚受热来自六个方面:电极传到坩埚的热量;熔池金属蒸发热,熔池辐射热;金属液传导热;锭子结晶热;电弧辐射传给坩埚的热量。

①电极传到坩埚的热量 Q_d 。圆柱型电极传到坩埚热量由下式计算:

$$Q_d = \lambda \frac{\pi D_d^2}{4} \sqrt{\frac{160 \epsilon \sigma_0}{\lambda D_d} \left[\left(\frac{t_d}{100} \right)^5 \right]} \quad [\text{W}] \quad (10-41)$$

或

$$Q_d = 23.6 \sqrt{\lambda \epsilon \sigma_0 D_d^3 \left(\frac{t_d}{100} \right)^5} \quad [\text{W}] \quad (10-42)$$

式中 λ ——电极材料的热传导系数 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$];

ϵ ——电极发射率;

σ_0 ——斯忒藩—玻耳兹曼常数 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$];

D_d ——电极直径 [m];

t_d ——电极端部温度 [K],其值由实验给出: $t_d = t_r + (30\text{K} \sim 70\text{K})$, 其中 t_r 为材料熔点。

②熔池金属蒸发热 Q_z 。熔池金属蒸发带走坩埚的热量由下式确定:

$$Q_z = (q_z + q_r) G_z \quad [\text{W}] \quad (10-43)$$

式中 G_z ——金属的蒸发速率 [kg/s],

$$G_z = 0.5 D^2 \left[1 - \left(\frac{D_d}{D} \right)^2 \right] g_z$$

$$g_z = g_z^0 \exp(-0.548 \sqrt{p}) \quad (\text{此为实验公式})$$

$$g_z^0 = 4.375 \times 10^{-3} p \sqrt{\frac{M}{t_b}} \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

q_z ——金属的蒸发潜热 [J/kg];

q_r ——金属的熔化热 [J/kg];

D_d ——电极直径 [m];

D ——锭子直径,即坩埚内径 [m];

P ——熔池上面蒸发材料在温度 t_b 时的蒸气压 [Pa];

M ——材料摩尔质量 [kg/mol];

t_b ——熔池表面温度 [K].

③熔池辐射给坩埚的热量 Q_f 。熔池表面通过没被电极遮盖的部分向坩埚辐射的热量用下式计算:

$$Q_f = \epsilon \pi \sigma_0 \frac{\pi}{4} (D^2 - D_d^2) \left[\left(\frac{t_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_g}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W}] \quad (10-44)$$

式中 ϵ_n ——熔池发射率;
 σ_0 ——玻耳兹曼常数 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$];
 D ——锭子直径 [m];
 D_d ——电极直径 [m];
 t_b ——熔池表面温度 [K];
 t_g ——坩埚温度 [K].

④熔融金属传给坩埚的热量 Q_y 。熔池中的温度分布基本上与电极的相似,因此根据稳定传热平衡条件的分析,可以得出

$$Q_y = 2.65 \lambda_y \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{A_k}{\lambda_y \cdot D}} (t_b - t_r)^{7/6} = \phi D^{3/2} \left(\frac{t_b}{t_r} - 1 \right)^{7/6} \quad [\text{W}] \quad (10-45)$$

$$\phi = 2.65 \frac{\pi}{4} \sqrt{A_k \cdot \lambda_y \cdot t_r^{7/3}} \quad [\text{W}/\text{m}^{3/2}]$$

式中 ϕ ——对于钢为 $2.24 \times 10^6 \text{W}/\text{m}^{3/2}$; 钛为 $2.92 \times 10^6 \text{W}/\text{m}^{3/2}$; 钨为 $1.38 \times 10^7 \text{W}/\text{m}^{3/2}$;
 A_k ——金属有关的常数,其值可按式计算

$$A_k = 0.106 (\beta)^{1/3} \cdot \lambda_y^{3/5} \cdot \gamma^{4/15} (c_y \cdot \rho)^{2/5}$$

β ——金属液的体膨胀系数 [K^{-1}];
 λ_y ——金属液的热传导系数 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$];
 γ ——金属液的动力粘度 [m^2/s];
 c_y ——金属液的比热容 [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$];
 ρ ——金属液的密度 [kg/m^3];
 t_b ——熔池表面温度 [K];
 t_r ——金属熔化温度 [K];
 D ——锭子直径 [m].

⑤锭子结晶时放出的热量 Q_n 。金属液由熔化温度冷凝到出炉温度,其热量全部传给了坩埚。在正常熔炼的情况下,熔化速度与凝固速度是相同的,故锭子结晶时放出的热量 Q_n 为

$$Q_n = \frac{G}{60} \left[\left(c_0 + c_t \frac{t_r + t_{ch}}{2} \right) (t_r - t_{ch}) + q_r \right] \quad [\text{W}] \quad (10-46)$$

式中 G ——熔化速度 [kg/min];
 c_0 —— 0°C 时金属的热容量 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$];
 c_t ——金属在熔点 t_r 和温度 t_{ch} 平均比热容的温度系数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2)$];
 q_r ——金属的溶解热 [J/kg];
 t_{ch} ——出炉温度。

⑥电弧辐射传给坩埚的热流量 Q_h 。热流量 Q_h 由下式给出:

$$Q_h = I^2 R L_h \frac{4 D L_h}{D_d^2 + D^2 + 4 D L_h} \quad (10-47)$$

式中 I ——电弧电流,即熔炼电流 [A];

L_h ——电弧长度[m];

D ——锭子直径,即坩埚内径[m];

D_d ——电极直径[m];

R ——单位长度电弧电阻[Ω/m],可由经验得到:钢为 8×10^{-2} ($L_h = 5 \sim 20$), 3.3×10^{-2} ($L_h > 20$); 钛为 1.2×10^{-2} (短弧); 钨为 20×10^{-2} ($L_h = 5 \sim 20$), 5.6×10^{-2} ($L_h > 20$)。

⑦坩埚接受的总热量。坩埚所受的总热量,来源于公式(10-41)~式(10-47),这些公式中,有的公式在导出中作了某些近似取舍,有的数据是经验值,有的公式是经验公式,故坩埚总热量计算还是近似计算。总热量 Q 为

$$Q = Q_d + Q_z + Q_f + Q_y + Q_n + Q_h \quad [\text{W}] \quad (10-48)$$

式中 符号见式(10-41)~式(10-47)。

(2)坩埚的冷却计算

坩埚的冷却水应带走坩埚所受的全部热量。根据受热与冷却的热平衡,可以得出

$$Q = V \cdot \rho \cdot c (t_c - t_m)$$

$$V = \frac{Q}{\rho \cdot c (t_c - t_m)} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (10-49)$$

式中 V 是坩埚需要的水流量; Q 是由(10-48)式计算出的坩埚受的总热量[W]; t_c 和 t_m 是出水和入水的温度,一般 $t_c < 45^\circ\text{C}$,否则会加剧水垢的形成。 ρ 和 c 是水在 $t_m \sim t_c$ 之间的平均密度(kg/m^3)和比热容($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)。

在熔炼过程中最大的热流量发生在熔池上部与坩埚壁仅有极薄的凝壳层处,如图 10-100 所示的 A-B 区间。它可由以下经验公式来确定

$$q_{\max} \approx 0.5 \frac{\lambda t_r}{D} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (10-50)$$

式中 q_{\max} ——坩埚接受的最大热流量[W/m^2];

t_r ——被熔金属的熔点[K];

λ ——被熔金属在室温到熔点的平均导热系数[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$];

D ——坩埚内径[m]。

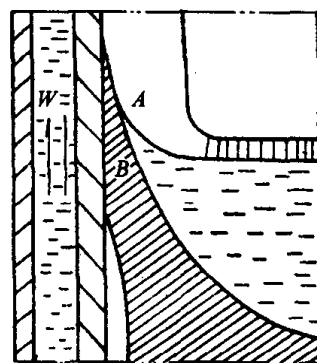


图 10-100 熔炼状态示意图

这个最大热流量必须由冷却水及时带走,否则冷却水将超过允许温度,产生气泡和水锈,使热传导恶化。根据冷却水不产生气泡的条件,可以得出冷却水所能带走的临界热流量 q_L 经验公式为

$$q_L = 4.19 \times 10^4 \omega^{1/2} P^{1/3} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (10-51)$$

式中 P ——冷却水的压力[Pa];

ω ——冷却水的流速[m/s]。 ω 可由下式求出

$$\omega = \frac{V}{\pi(D + 2\delta_g + \delta_s)\delta_s} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (10-52)$$

式中 V ——坩埚冷却水量[m^3/s];

δ_g ——坩埚壁厚[m];

δ_s ——水套中水层厚度[m];

D ——坩埚内径[m]。

在一般情况下要求

$$q_L = (2 \sim 3) q_{\max} \quad (10-53)$$

(3) 坩埚直径 D 的计算

根据现有国内外真空自耗炉的统计数据,坩埚的长度与直径比大体上为(3~5):1。最大的坩埚直径应满足炉子的容量要求。故有

$$D = \sqrt[3]{(3 \sim 5) 0.785 \frac{W}{r}} \quad [\text{m}] \quad (10-54)$$

式中 W ——炉子的容量(一般按钢计算)[kg];

r ——熔炼金属的密度[kg/m³]。

3. 真空系统的设计

真空电弧炉的工作压力,一般来说对于难熔金属为 10^{-2} Pa,对于高温合金、特种钢等为 10^{-1} Pa,对于海绵钛等为 6.7×10^{-1} Pa~1.3 Pa。试验证明,高于 13 Pa 压力范围有利于衍生电弧的形成,可能击穿坩埚,引起爆炸。因此从冶金控制、电弧稳定和防止击穿坩埚出发,上述炉膛工作压力是有利的。

真空电弧炉的真空系统设计除了常规的设计计算之外,尚应充分考虑以下几点:

①如果不是始终在坩埚口处熔炼,则弧区压力比坩埚口处压力高许多,其差值应该通过计算求出。不能把炉子的工作压力误认为弧区压力。

②弧区有相当高的金属蒸气分压存在,这也是维持真空中电弧稳定的一个必要条件。

③使用粉末或海绵状物料压制的电极,在熔炼过程中难免出现突然放气,真空系统应能适应这种情况。

④凝壳炉的真空系统还要考虑到浇注时压力突然上升的特殊性。

如图 10-101 所示为上述真空系统的典型方案,罗茨泵在 $1 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{ Pa}$ 下,抽气能力大并且启动快,油增压泵在 $10^{-2} \text{ Pa} \sim 1.3 \text{ Pa}$ 下能排出大量气体,尤其对氢的抽速高于对空气的两倍,因此它们并联就较好地达到了上述要求。

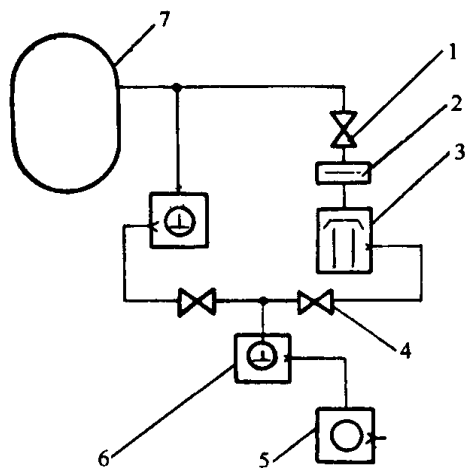


图 10-101 电弧炉的典型真空系统

- 1—阀门;2—水冷阱;
3—油增压泵;4—罗茨泵;
5—机械泵;6—阀门;7—炉子。

(五) 真空感应炉

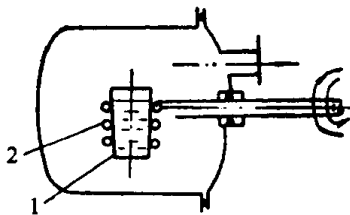
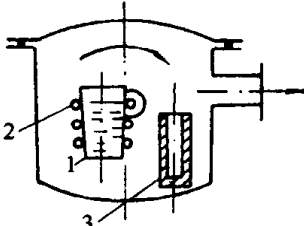
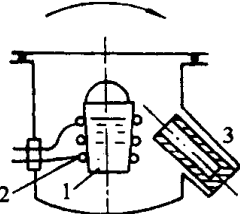
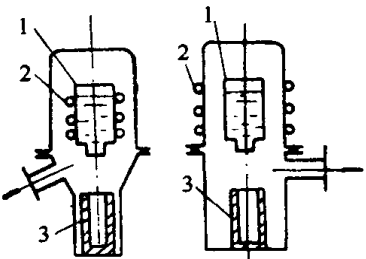
真空感应熔炼炉是利用电磁感应方法,将封闭于真空室中的坩埚加热,在真空状态下进行金属与合金的冶炼生产。

真空中感应加热作为一种新的热源,用途广泛,如钎焊、烧结、透热及真空冶炼、真空脱气、真空退火、真空蒸镀等。其优点很多,如冶炼材料成分准确、分布均匀、合金收得率高、加热速度快、效率高、生产劳动条件好等。

1. 真空感应电炉分类

真空感应熔炼炉应以炉体型式、坩埚型式、炉体和坩埚在设备中的相对位置与相对运动作为分类依据。按照这种方法分类,真空感应熔炼炉分为四种类型:即卧式炉,立式炉,炉体倾动式炉和下铸式(又称底漏式)炉。各种炉型的结构原理图及其特点见表 10-50。

表 10-50 各种炉型结构原理简图和特点

分类	结构简图	特点
卧式炉型		<ol style="list-style-type: none"> 1. 以 ZG-200 型电炉为代表,炉体为卧式; 2. 坩埚从上口倾翻浇注,炉体与坩埚有相对运动; 3. 感应器、坩埚等安装在炉盖上,裸露在外,操作容易,检修方便; 4. 应用广泛,适于大型炉
立式炉型		<ol style="list-style-type: none"> 1. 以 ZG-10 型电炉为代表,炉体立式; 2. 坩埚从上口倾翻浇注,炉体与坩埚间有相对运动; 3. 坩埚系统安装在炉体内,小炉操作灵便; 4. 应用广泛,适于中小型炉
炉体倾动式炉型		<ol style="list-style-type: none"> 1. 以 SL61-02 型电炉为代表,炉体立式; 2. 坩埚翻倒从上口浇注,炉体与坩埚间无相对运动;一同翻转; 3. 坩埚系统安装在炉体内,操作检修都不够便利; 4. 应用很少
下铸式炉型		<ol style="list-style-type: none"> 1. 炉体为立式; 2. 坩埚从下口浇注,坩埚与炉体都静止不动; 3. 允许把感应器移到炉体外,结构简单,维修方便; 4. 应用很少,只用于炼铀生产

注:表图中 1—坩埚;2—感应器;3—铸模

2. 坩埚设计

(1) 坩埚有效容积 V_i

能装下标准容量金属料的坩埚容积,叫做坩埚有效容积,以下式计算:

$$V_i = \frac{G}{r_{il}} \quad [\text{m}^3] \quad (10-55)$$

式中 G ——每次装料量[kg];

r_{il} ——被熔炼材料在液态下的密度[kg/m^3].

(2) 坩埚实际容积 V_q

$$V_q = 1.3 V_i \quad [\text{m}^3] \quad (10-56)$$

(3) 坩埚直径和高度

根据图 10-102,并令 $a = d_2/h_2$,可得

$$V_i = \frac{\pi}{4} d_2^2 h_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 h_2 \frac{d_2}{d_2} = \frac{\pi d_2^3}{4a}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{4aV_i}{\pi}} \quad [\text{m}] \quad (10-57)$$

a 值与炉子大小有关,表 10-51 为推荐值。

$$h_2 = \frac{d_2}{a} \quad [\text{m}] \quad (10-58)$$

注意 h_2 为料柱高度,坩埚实际高度大于 h_2 ,这要根据 V_i 与 V_q 的关系求得。

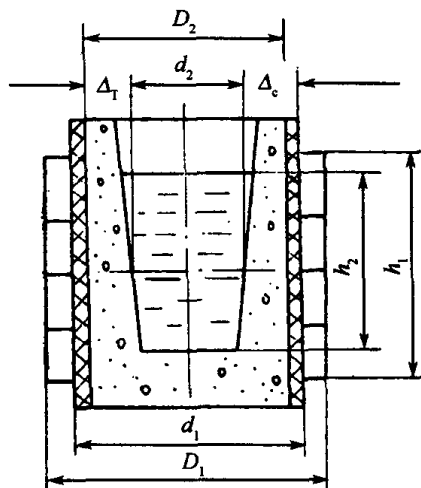


图 10-102 坩埚直径和高度简图

表 10-51 a 的推荐值

炉子容量/kg	推荐值 $a = d_2/h_2$	炉子容量/kg	推荐值 $a = d_2/h_2$
500 以下	1/2~2/3	1500~3000	3/4~4/5
500~1500	2/3~3/4	3000 以上	4/5~1

(4) 坩埚壁厚的求得

坩埚的壁厚与绝热层一般统称为炉衬,以 Δ_c 表示,此值也随炉子容量不同而不同,绝热层一般为 4mm~8mm,常取 5mm 的石棉板(4 层~8 层之间),由图 10-102 知,坩埚的壁厚

$$\Delta_T = \Delta_c - 0.5 \quad [\text{cm}] \quad (10-59)$$

在表 10-52 中有 Δ_c 的推荐值,可参考。

(5) 感应器的尺寸确定

感应器内径 d_1 的确定。根据图 10-102 可知

$$d_1 = d_2 + 2\Delta_c \quad [\text{cm}] \quad (10-60)$$

d_2 、 Δ_c 已由前面计算或查表求得。

感应器高度 h_1 的确定。若令 $h_1/d_1 = b$, 则

$$h_1 = b \cdot d_1 \quad [\text{cm}] \quad (10-61)$$

b 值与炉子容量之间关系见表 10-53 中的推荐值。

根据容量选出 b 值,则 h_1 即可求得。

表 10-52 Δ_c 的推荐值

炉子容量 /kg	Δ_c 推荐值
500 以下	$d_2/4 \sim d_2/6$
500 ~ 1500	$d_2/5 \sim d_2/7$
500 ~ 3000	$d_2/6 \sim d_2/8$
13000 以上	$d_2/8 \sim d_2/10$

表 10-53 b 的推荐值

炉子容量 /kg	推荐值 $b = h_1/d_1$
500 以下	1.2
500 ~ 1500	1.1 ~ 1.2
1500 以上	1.1 ~ 1.0

3. 真空感应炉主要参数设计

(1) 供电频率

经过理论分析,推导出来的最小频率计算公式如下

$$f_{\min} = \frac{25 \times 10^8 \rho_2}{d_2^2 \mu_r} \quad (10-62)$$

式中 ρ_2 ——熔炼材料的电阻率 $[\Omega \cdot \text{cm}]$;
 d_2 ——熔炼材料的直径(即坩埚直径) $[\text{cm}]$;
 μ_r ——熔炼材料的相对导磁率。

根据国内外的设计经验,可按表 10-54 选择。

表 10-54 供电频率

电炉容量 /kg	必需的功率 /kW	推荐的最佳频率 /Hz	推荐最佳电压 /V
25	30	10000	125 ~ 250
100	75	4000	250
500	300	2000	250 ~ 500
2000	660	500 ~ 1000	600
5000	1500	500 ~ 1000	600

(2) 炉子功率(不含坩埚辐射及传导损失热量) 计算

炉子有功功率是指单位时间内,为加热给定的材料所必须传给材料的热流量。其数值可用下式计算

$$P_L = \frac{G \Delta_i}{t} \quad [\text{kW}] \quad (10-63)$$

若设炉子的热效率为 $\eta_y = q_L / P_i$ (P_i 为实际功率),则 P_i 以下式计算

$$P_i = \frac{P_L}{\eta_y} = \frac{G \Delta_i}{\eta_y t} \quad (10-64)$$

式中 G ——炉子装料量 $[\text{kg}]$;
 Δ_i ——被冶炼材料开始加热与熔化时热熔之差 $[\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}]$;
 t ——熔炼时间 $[\text{h}]$;
 η_y ——炉子热效率, $\eta_y = 0.7 \sim 0.85$ 。

总功率计算。感应加热熔炼设备的电气原理如图 10-103 所示,故总功率可用下式计算

$$P_z = \frac{P_i}{\eta_z}$$

$$\eta_z = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$$

式中 η_1 ——中频发电机组的效率,等于 0.8(若用可控硅中频电源时 $\eta_1 = 0.92$);
 η_2 ——电容器组的效率,等于 0.97;
 η_3 ——中频感应器的电效率,等于 0.8;

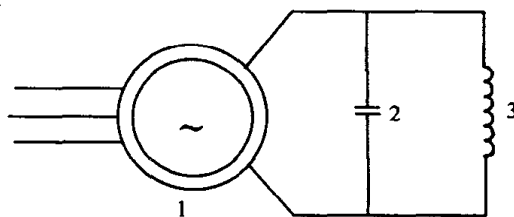


图 10-103 电气原理图

1—中频机组;2—电容器组;3—感应器。

η_4 ——输电线路的电效率,等于 0.95。

所以分别计算出总效率 $\eta_z = 0.59$ (中频发电机组)和 $\eta_z = 0.68$ (可控硅电源),总功率 P_z 即可求出。

(3) 感应器电参数计算

感应器电参数计算,均为半经验公式,供读者设计参考。参数计算包括下列各项:

① 在炉料中的电流透入深度 Δ_2

$$\Delta_2 = 5030 \sqrt{\frac{\rho_2}{f\mu_2}} \quad [\text{cm}] \quad (10-65)$$

式中 ρ_2 ——液态炉料的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$);
 μ_2 ——液态炉料的相对导磁率,根据假定 $\mu_2 = 1$;
 f ——电流频率(与电源频率相同)[Hz]。

② 感应器中的电流透入深度 Δ_1

$$\Delta_1 = 5030 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} \quad [\text{cm}] \quad (10-66)$$

式中 ρ_1 ——紫铜(感应器材料)的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$);
 f ——电源电流频率[Hz]。

③ 金属炉料的有效电阻 R_2

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi(d_2 - \Delta_2)}{\Delta_2 h_2} \quad [\Omega] \quad (10-67)$$

式中 d_2, h_2 ——分别为炉料的直径与高度,由公式(10-57)、(10-58)求得;
 Δ_2 ——其意义及计算公式见公式(10-65)[cm];
 ρ_2 ——炉料的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)。

④ 感应器的有效电阻 R_1

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\Delta_1 h_1 K_3} \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-68)$$

式中 d_1, h_1 ——分别为感应器的内径与高度,由公式(10-60)、(10-61)求得;
 Δ_1 ——见公式(10-66);
 K_3 ——感应器的填充系数,等于 0.7 ~ 0.95;
 ρ_1 ——紫铜材料的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)。

⑤ 金属炉料的自感系数 L_2

$$L_2 = \frac{\pi^2 (d_2)^2 K_2}{h_2} \quad [\text{cm}] \quad (10-69)$$

式中 h_2, d_2 ——见公式(10-67);
 K_2 ——系数,是(d_2/h_2)的函数, K_2 与(d_2/h_2)有如图 10-104 所示关系。

⑥ 感应器的自感系数 L_1

$$L_1 = \frac{\pi^2 d_1^2 K_1}{h_1} \quad [\text{cm}] \quad (10-70)$$

式中 K_1 ——系数,是 (d_1/h_1) 的函数,亦由图 10-104 给出。

⑦ 感应器—炉料系统的互感系数 M

$$M = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{d_2}{h_2} \right) \sqrt{K_4} \quad [\text{cm}] \quad (10-71)$$

式中 K_4 ——系数, $K_4 = f\left(\frac{h_1}{h_2}, \frac{d_1}{h_1}\right)$, 由图 10-105 查得。

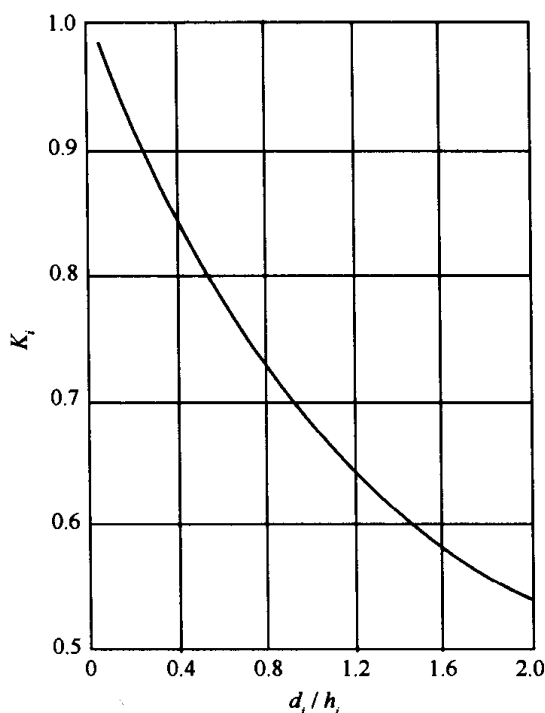


图 10-104 K_i 与 (d_i/h_i) ($i = 1, 2$) 关系

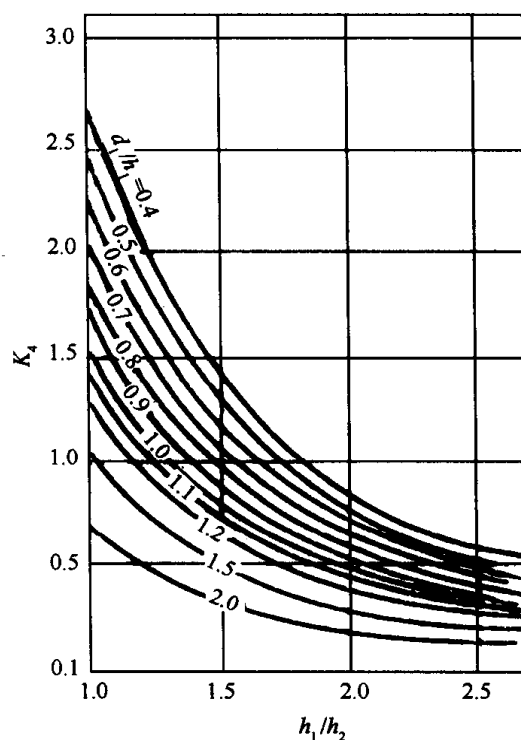


图 10-105 K_4 与 (h_1/h_2) 关系曲线

⑧ 金属炉料的感抗 X_2

$$X_2 = 2\pi f L_2 \times 10^{-9} \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-72)$$

式中 L_2 ——见公式(10-69);

f ——电流频率[Hz]。

⑨ 感应器的感抗 X_1

$$X_1 = 2\pi f L_1 \times 10^{-9} \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-73)$$

式中 L_1 ——见公式(10-70)。

⑩ 感应器—炉料系统的感抗 X

$$X = 2\pi f M \times 10^{-9} \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-74)$$

式中 M ——见(10-71)式。

⑪ 感应炉—炉料系统间的折换系数 P

$$P^2 = \frac{X^2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (10-75)$$

式中 X, R_2, X_2 ——分别见公式(10-74)、(10-67)和(10-72)。

⑫ 感应器—炉料系统的电阻 R_0

$$R_0 = R_1 + P^2 \cdot R_2 \quad (10-76)$$

式中 R_1, R_2, P^2 ——分别见公式(10-68)、(10-67)、(10-75)。

⑬ 感应器—炉料系统折换后的感抗 X_0

$$X_0 = X_1 - P^2 X_2 \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-77)$$

式中 X_1, P^2, X_2 ——分别见公式(10-73)、(10-75)、(10-72)。

⑭ 感应器—炉料系统的总阻抗 Z_0

$$Z_0 = \sqrt{X_0^2 + R_0^2} \quad [\Omega/\text{匝}] \quad (10-78)$$

式中 X_0, R_0 ——分别见公式(10-77)、(10-76)。

⑮ 感应器—炉料系统的电效率 η_{xd}

$$\eta_{\text{xd}} = \frac{P^2 R_2}{R_0} \times 100\% \quad (10-79)$$

式中 P^2, R_2, R_0 ——分别见公式(10-75)、(10-67)、(10-76)。

⑯ 系统的功率因数 $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{R_0}{Z_0} \quad (10-80)$$

式中 R_0, Z_0 ——分别见公式(10-76)、(10-78)。

⑰ 感应器的有效匝数 n

$$n = \frac{u_g}{Z_0} \sqrt{\frac{R_0}{P_g \times 10^3}} \quad [\text{匝}] \quad (10-81)$$

式中 u_g ——感应器的端电压[V];

P_g ——感应器功率,若发电机组功率全部输入时, P_g 就等于发电机功率[kW];

Z_0, R_0 ——分别见公式(10-78)、(10-76)。

⑱ 感应器之铜管外径 d_v

$$d_v = \frac{h_1 K_3}{n} \quad [\text{cm}] \quad (10-82)$$

式中 h_1, K_3, n ——分别见公式(10-61)、(10-68)、(10-81)。

⑲ 感应器铜管壁厚 a

根据电磁损耗最小条件,由经典电磁理论推导得出感应器铜管之壁厚应满足下式:

$$a \geq 1.3 \Delta_1 \quad (10-83)$$

式中 Δ_1 ——见公式(10-66)。

d_v 和 a 求得之后,就可查国家有关产品标准,选出合适的铜管。以所选定的铜管实际尺寸

作为以后的计算参数。

② 电容器组的无功功率 Q

$$Q = P_i / \cos \varphi \quad [\text{kW}] \quad (10-84)$$

式中 P_i ——见公式(10-64)。

$\cos \varphi$ ——感应器炉料系统的功率因数。

③ 所需补偿电容量 C

$$C = \frac{Q \times 10^9}{u_g^2 2\pi f} \quad [\mu\text{F}] \quad (10-85)$$

式中 u_g, f ——感应器端电压和电流频率；

Q ——见公式(10-84)。

④ 电容器数量 n_c

$$n_c = \frac{C}{C_m} \quad [\text{个}] \quad (10-86)$$

式中 C ——见公式(10-85)；

C_m ——每个电容器的电容量 $[\mu\text{F}]$ 。

⑤ 通过感应器的电流 I

$$I = \frac{Q}{u_g} \cdot 10^3 \quad [\text{A}] \quad (10-87)$$

⑥ 感应器有效截面上的电流密度 δ

$$\delta = \frac{I}{S} \quad [\text{A}/\text{mm}^2] \quad (10-88)$$

式中 S ——感应器铜管的有效截面积 $[\text{mm}^2]$ ；

I ——见公式(10-87)。

水冷紫铜管,在冷却良好的情况下,容许通过的中频电流密度可达 $100\text{A}/\text{mm}^2$,但在设计时,一般只许取值为 $40\text{A}/\text{mm}^2$,或低于此值。当实际计算值超过这个限度时,应予重新选铜管,重新计算。

4. 感应器的水冷计算

(1) 冷却水应带走的热量功率数 P_s

$$P_s = P_i (1 - \eta_y) \quad [\text{kW}] \quad (10-89)$$

(2) 冷却水消耗量 W

P_s 所产生的热量用冷却水带走,所以必须的水流量 W 为

$$W = \frac{0.24 P_s}{t_{\text{ch}} - t_{\text{ru}}} \quad [\text{L}/\text{s}] \quad (10-90)$$

式中 t_{ch} ——感应器出口水温 $[\text{℃}]$ $t_{\text{sc}} \leq 50\text{℃}$ ；

t_{ru} ——感应器入口水温 $[\text{℃}]$ ；

P_s ——见公式(10-89)。

(3) 感应器内水流速度 V

$$V = \frac{W}{S_k} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m/s}] \quad (10-91)$$

式中 S_k ——感应器铜管的孔口截面积 $[\text{m}^2]$ 。

(六) 真空炉产品

真空炉产品类型及用途汇于表 10-55 中。

表 10-55 真空炉类型及用途

名 称	用 途	生产 厂家
VQG 系列真空高压气体淬火炉	工具钢及模具钢淬火,磁性材料烧结,真空钎焊	沈阳真空技术研究所
VOG 系列真空油气淬火炉	高速钢、高合金工模具钢、不锈钢的淬火及退火,磁性材料烧结	
VPG 系列加压气冷真空炉	工具钢和模具钢热处理,真空钎焊	
VQB 系列高温钎焊炉	钛合金、不锈钢、碳素钢、铜合金等材料真空钎焊	
VAF 系列真空退火炉	高速钢、工模具钢、有色金属、不锈钢退火及时效	
VBV 系列真空铝钎焊炉	板翅式换热器、汽车散热器、空调蒸发器钎焊	
VTF 系列真空回火炉	合金工具钢、模具钢、高速钢、轴承钢、不锈钢回火	
VSF 系列(通用型)真空烧结炉	合金材料的真空烧结	
VPS 系列(加压型)真空烧结炉	稀土永磁材料真空烧结	
VCF 系列真空自耗电电极电弧炉	稀有金属及难熔金属熔炼和提纯	
VSC 系列真空自耗电电极电弧凝壳熔铸炉	钛及其合金,难熔金属熔炼与烧铸成型	
VIF 系列半连续真空感应熔炼炉	精密合金及磁性材料熔炼和提纯	
VISF 系列冷坩埚真空感应凝壳炉	活性金属、难溶金属熔炼	
ZR-B 系列真空钎焊炉	铝板翅式换热器钎焊	兰州真空设备制造有限责任公司
ZR-7GD 系列铝管带式、板翅式换热器真空钎焊炉	铝管带式散热器、蒸发器、冷凝器真空钎焊	
ZR-11 系列开关管真空钎焊炉	电子管钎焊、陶瓷或玻璃开关管封排,不锈钢管材退火及除气,金属及非金属材料钎焊	
ZR-13 系列高温真空钎焊炉	波导天线钎焊,柴油机冷却器、不锈钢板翅式换热器钎焊	
ZR-14 系列高温真空炉	金属、非金属钎焊,真空烧结,钽、铌、锆、铪等稀有金属去气及退火	
ZRJ 系列真空烧结炉	真空钎焊、真空热处理、真空脱气、真空烧结	
ZRT 系列真空提纯炉	真空钎焊、真空除气、真空热处理 真空重熔、真空提纯	

六、钢液真空脱气处理

(一) 概述

钢液真空脱气处理就是把钢液置于真空中进行脱气。这样可以使从平炉、转炉、电炉中熔炼出来的钢液免受大气污染,防止氢、氮、氧等气体存在钢中产生缺陷,解决了炼钢中的脱氢问题。目前,钢液真空脱气处理已不是单纯的脱气,而是同时采用了搅拌和加热技术,使钢液组织均化,提高精炼效果,确保浇注温度。

(二) 钢液真空脱气及排除夹杂原理

提高大钢锻件生产中的脱氢问题,是促进钢液真空处理的基本原因,如果钢中氢含量过高,会导致形成白点。过去消除钢中白点的方法是在 $1200^{\circ}\text{C} \sim 1400^{\circ}\text{C}$ 下对锻件进行长时间的退火,借以降低钢中氢的浓度,这种方法效率低,除气不彻底。而钢液进行真空处理除氢效果好。按质量作用定律,氢含量与氢分压有关,即

$$c_{\text{H}} = K_{\text{H}}(p_{\text{H}})^{1/2} \quad (10-92)$$

式中 c_{H} ——钢中溶解的氢含量;

p_{H} ——熔体上方的气相氢分压;

K_{H} ——与钢液温度有关的常数。

这一定律也适用于钢中溶解的氮含量,即

$$c_{\text{N}} = K_{\text{N}}[p_{\text{N}}]^{1/2} \quad (10-93)$$

图 10-106 与图 10-107 给出了高纯铁液中氢和氮的饱和浓度与熔体上方氢、氮分压的关系。

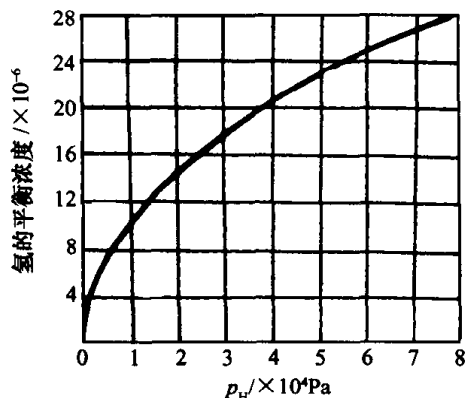


图 10-106 1600℃ 时高纯铁液中氢的饱和浓度与熔体上方氢分压的关系

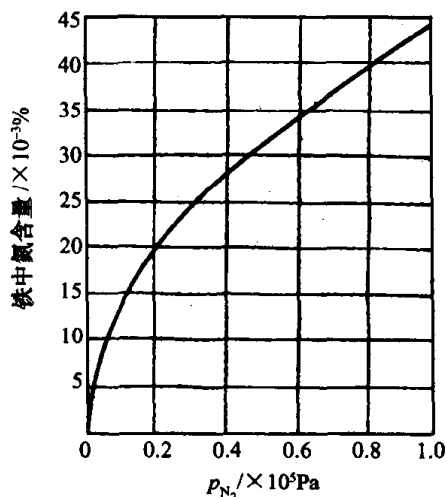


图 10-107 1600℃ 时高纯铁液中氮的饱和浓度与熔体上方氮分压的关系

在炼钢过程中,除降低氢含量外,降低氧含量也很重要。因为钢中溶解的氧与添加的合金元素亲和力较强,它们相互反应所生成的氧化物以非金属夹杂物的形态在钢中析出,从而影响钢的纯净度和使用性能。因此,降低熔体上方氧分压,也是解决这一问题的有效方法。与脱氢不同,从钢中脱氧只是利用溶解氧与钢中存在的碳反应而生成气态的 CO ,即



按质量定律,则

$$c_C \cdot c_O = K_{CO} \cdot p_{CO} \quad (10-95)$$

上式表明,钢中碳和氧的乘积与熔体上方 CO 分压成正比。各种碳含量在理论上所达到的氧含量对应于 CO 分压的关系如图 10-108 所示。

对钢脱碳的常规工艺是常压下添加铁矿石或吹氧,只有在非常高的氧含量下才能达到低的含碳量。但是过高的氧含量会导致炉渣中氧化铁含量增加而造成铁的大量损失。然而采用真空处理则比较容易降低碳含量,因为真空中熔体上方的 CO 分压较低。所以经过真空处理过的变压器钢、奥氏体不锈钢均比常规生产的同类钢种有较高的质量。

硫在钢中的含量也与氧有关,而且常常保持着恒定的比例,即

$$c_S : c_O \approx 4 \quad (10-96)$$

因此真空处理的脱氧过程也是脱硫过程。为了得到含硫量极低的钢种,在具有较强搅拌和电弧加热的设备中还可以采用冶金脱硫的方法。采用了对硫有强亲和力的一些元素作为脱硫剂而脱硫。各种脱硫剂的脱硫效果如图 10-109 所示。

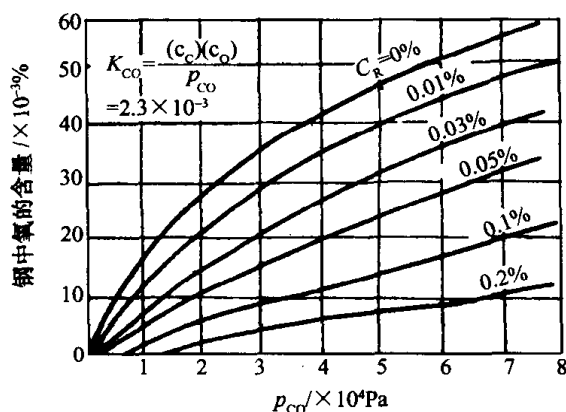


图 10-108 1600℃时含碳铁液中的饱和氧浓度与熔体上方 CO 分压的关系

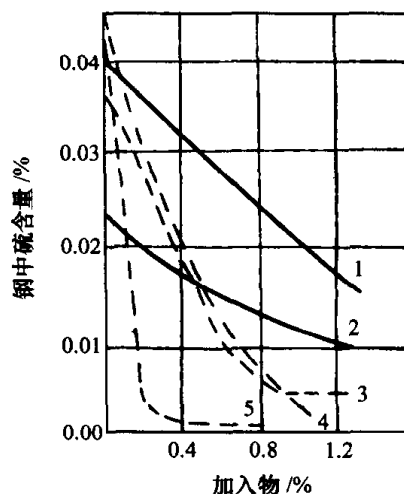


图 10-109 各种脱硫剂的脱硫效果
1—CaC₂; 2—CaO; 3—AlCa; 4—SiCa; 5—混合稀土金属。

(三) 钢液真空处理方法

钢液真空处理方法主要包括真空脱气和真空精炼两个方面。由于这种方法所能达到的冶金作用(脱气、脱碳、控制清洁度、合金化、晶粒度控制、温度调整、最终化学成分及均匀化调整、保证最佳的浇注状态等)不同,因而为完成各个冶金过程可采取多种真空处理方法。但是,归纳起来主要有表 10-56~表 10-61 所示的六种方法。

表 10-56 真空钢包脱气法

名 称	钢包脱气法	吹氩搅拌钢包脱气法	电磁感应搅拌钢包脱气法
装置			

(续)

名 称	钢包脱气法	吹氩搅拌钢包脱气法	电磁感应搅拌钢包脱气法
压力/Pa	$6.7 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^3$	$13 \sim 2.6 \times 10^2$	67
处理时间/min	12~15	20~30	20~30
搅拌方式	无	氩气搅拌	电磁感应搅拌
开始时间	1952 年	1958 年	1962 年
主要设备	真空室 真空系统	真空室,真空系统 搅拌气体供给系统	真空室,不锈钢制钢包 电磁感应搅拌装置

表 10-57 真空钢流脱气法

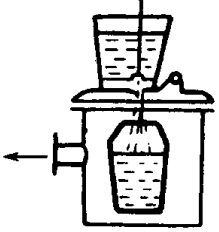
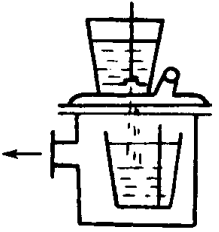
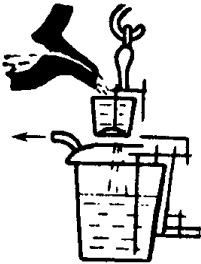
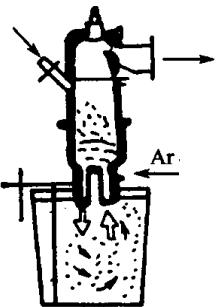
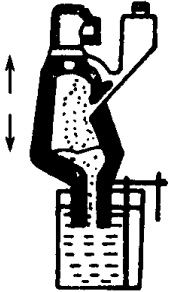
名 称	真空浇注法	倒包脱气法	出钢脱气法
装 置			
压力/Pa	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$
处理时间/min	3~10	3~10	出钢时间
处理量/t	300	500	500
开始时间	1952 年	1952 年	1961 年
主要设备	真空室,中间钢包钢锭模 真空系统	真空室,中间钢包熔铸钢包, 真空系统	中间钢包,真空钢包真空系统

表 10-58 真空吸入和真空循环脱气法

名 称	循环脱气法(RH 法)	吸入脱气法(DH 法)
装 置		
压力/Pa	66	66
处理时间/min	15~20	20
处理量/ $t \cdot \min^{-1}$	10~40	2.5~20
开始时间	1959 年	1956 年
主要设备	真空室,真空室升降机构,循环用供气装 置,真空系统	真空室,真空室或钢包升降机构,真空系 统,加热装置

六、钢液真空脱气处理

表 10-59 真空钢锭脱气法

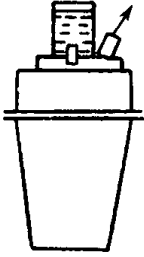
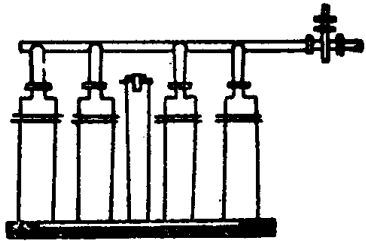
名 称	上注式钢锭模脱气法	下注式钢锭模脱气法
装 置		
压力/Pa	$10^3 \sim 10^4$	$10^3 \sim 10^4$
处理时间/min	20~60	20~60
处理量/t	5	
开始时间	1957 年	1957 年
主要设备	钢锭模真空封盖, 钢锭模, 真空系统	钢锭模真空封盖, 钢锭模真空系统

表 10-60 多功能真空脱气精炼法

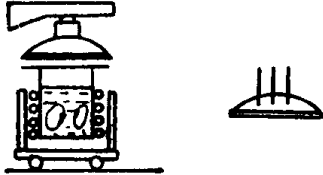
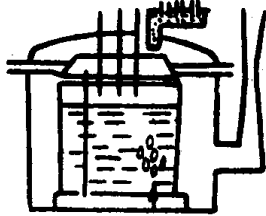
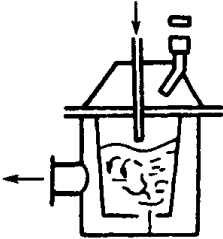
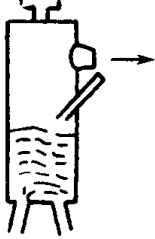
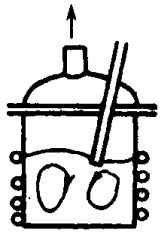
名 称	ASEA—SKF 法	FINKL—VAD 法
装 置		
压力/Pa	≤ 66	$1.3 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^2$
处理时间	碳素钢 1h~2h, 合金钢 2h~4h	30min~50min
处理量/t	15~150	70
搅拌方式	电磁感应搅拌	氩气搅拌
开始时间	1965 年	1976 年
主要设备	不锈钢制真空室, 电弧加热装置, 电磁感应搅拌装置, 真空系统	真空室, 电弧加热装置, 搅拌气体供给装置, 真空系统

表 10-61 真空脱碳精炼法

名 称	VOD 法	RH—OB 法	AVR 法
装 置			

(续)

名 称	VOD 法	RH—OB 法	AVR 法
压力 /Pa	$66 \sim 1.3 \times 10^4$		$66 \sim 2.4 \times 10^4$
处理时间/min		70	150
精炼气体	O_2	O_2	O_2
搅拌方式	氩气搅拌	氩气搅拌	电磁感应搅拌
开始时间	1967 年	1969 年	
主要设备	真空室, 精炼用钢包, 精炼气体及搅拌气体供给装置	RH 脱气设备上安氧枪	ASEA—SKF 装置上安氧枪

最后应指出, 由于钢包衬层耐火材料通常是由 SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 等氧化物组成, 这些材料在高温与沸腾钢液冲刷作用下, 可产生如下反应:



可见, 这些反应将导致耐火材料向钢液中输氧, 从而增加了钢中氧化物夹杂, 严重时甚至会产生漏钢事故。因此最大限度地降低耐火材料的浸蚀, 也是提高真空处理效果, 保证生产安全的必要条件。

(四) 钢液处理设备设计

1. 真空室设计中应注意的问题

真空室通常由圆柱形主体与顶盖所组成。由于工作时内部受 1600°C 以上高温的烘烤, 外部承受大气压力, 而且在真空室上部还要放置合金添加装置及中间钢包等部件, 因此必须根据这些受力条件来确定真空室的强度与刚度。为了保证气密性, 应注意高温下的变形及焊缝质量。

另一个问题是衬里耐火材料的选择。由于真空室的特定工作条件, 耐火材料的选择应注意如下几个问题。

首先衬里耐火材料应具有耐热冲击性能; 在强还原的真空条件下应具有抗钢液作用的能力, 在还原和氧化的条件下应具有化学抗渣能力。其次衬里耐火材料应具有低的饱和蒸气压和稳定的化学性能, 表 10-62 给出各种耐火材料在 1650°C 真空条件下的质量损失。最后, 衬里材料在高温下应具有足够的抗张和抗压强度。图 10-110 给出了温度对不同方法生产的碱性耐火砖的抗张强度的影响曲线。图中表明, 随着温度的升高, 耐火材料承受载荷的能力急剧地下降, 因此注意耐火材料在高温下的适应性也很重要。

表 10-62 在 1650°C 真空下耐火砖的质量损失(根据 Bonar 的数据)

耐火材料	质量损失 /%	测定的质量损失率/ $\times 10^{-4} \text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{min})^{-1}$	化学成分/%				
			MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	Fe_2O_3	CaO
机械压制碱性砖种类							
高纯氧化铝砖(四次数据的平均值)	6.2	5.4	97	—	—	—	1.4
直接结合的铬—镁砖	6.6	5.2	73	10.00	9.3	5.1	1.1
用熔融颗粒再结合的铬—镁砖(a)	5.0	4.2	62	8.1	17.6	10.5	0.6

(续)

耐火材料	质量损失 /%	测定的质量损 失率/ $\times 10^{-4} \text{g} \cdot$ $(\text{cm}^2 \cdot \text{min})^{-1}$	化学成分/%				
			MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
用熔融颗粒再结合的铬—镁砖(b)	6.9	5.9	62	10.3	22.7	11.8	0.9
铬砖	6.5	7.5	19.5	34.4	26.0	11.7	1.1
尖晶石结合的氧化镁砖	4.1	3.6	89	9.8	—	0.4	1.1
氧化钙砖(96% CaO)	1.0	0.6	2.7	0.3	—	0.3	96
熔融浇铸砖	0.6	0.4	—	—	—	—	—
铬镁砖(三个数据的平均值)	14.0	12.0	57	9.5	19.5	10.2	1.5
镁—尖晶石砖	4.8	3.2	80	16.0	—	1.0	0.8
高铝砖			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O
高纯氧化铝砖	0.2	0.2	99.5	0.2	—	—	—
90%氧化铝砖	0.8	0.6	89.3	10.2	0.2	—	—
东石砖	2.1	1.5	70.6	25.2	1.0	2.9	—
70%氧化铝砖	5.2	3.5	71.3	24	1.3	2.9	—
60%氧化铝砖	4.4	3.0	58.3	37.3	1.4	2.4	—
熔融浇铸的氧化铝砖	1.2	1.1	96	0.5	—	—	3.4
锆英砖和氧化砖			ZrO ₂	SiO ₂	CaO		
高纯氧化钙—稳定的氧化锆砖	0.15	0.17	96	—	4.0		
自结合锆英砖	3.8	3.9	66	32.3			

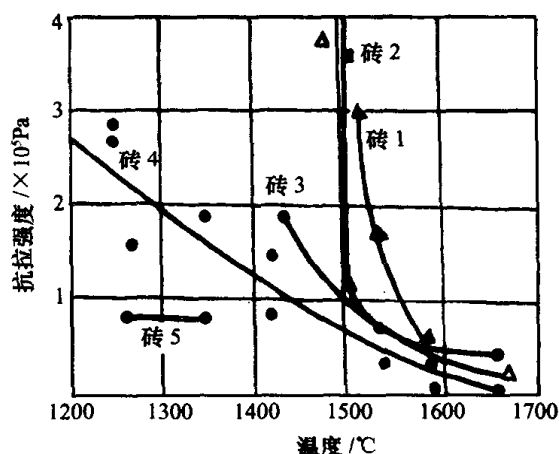


图 10-110 温度对不同方法生产的碱性砖的抗拉强度的影响

2. 钢液真空处理设备的抽气系统

设计钢液真空处理设备的抽气系统最主要的是选择真空泵、系统元件的配置以及系统的合理布置等。由于钢液真空处理时放气量大,而且会产生高温气体,因此要求抽气系统应具有抽气能力大、短时间抽气即可达到所需真空度的特点。

工业规模钢液脱气处理初期,多采用机械泵抽气系统(如油封式机械泵、罗茨泵、水环泵等)。但是,这些泵易被粉尘污染而损坏,而且热的废气也必须用专门的冷凝器把它冷却到真空泵能够工作的温度。使用水蒸气喷射泵只要在泵的管道前设置相当小的旋风式除尘器或粉尘捕集器,即可解决粉尘对泵的污染和沉积。蒸气喷射泵系统有获得低压范围宽,抽气量大,工作可靠,操作方便,使用寿命长,结构简单,占地面积小,既可安装在车间也可安装在厂房之外,可以利用冶金生产过程中的余热和废气,有利于综合利用等一系列优点,缺点是蒸气耗量大,用水量多。

3. 蒸气喷射泵系统的设计

设计钢液真空处理设备抽气系统的程序是：

①根据钢液真空处理的工艺要求,确定真空室的真空度。真空室所需真空度,是根据钢液脱气或精炼的目的而确定的。各种真空处理方法所需的真空度可查阅表 10-56 至表 10-61。

②根据钢液处理所需的真空度确定泵的级数。由于蒸气喷射泵的压缩比有一定限度,因此必须按处理时的压力要求合理地选择喷射泵的级数。不同工作压力与极限压力所必需的喷射泵级数见表 10-63。

表 10-63 不同工作压力与极限压力所必需的喷射泵级数

级数	工作压力/Pa	极限压力/Pa	级数	工作压力/Pa	极限压力/Pa
1	$1.3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$	1.3×10^3	4	$66 \sim 6.6 \times 10^2$	26
2	$2.6 \times 10^3 \sim 2.6 \times 10^4$	1.3×10^3	5	$6.6 \sim 1.3 \times 10^2$	2.6
3	$4 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$	2×10^2	6	0.6~13	0.2

③根据钢液最大放气量选择泵的大小。

(1) 钢液最大放气量的计算

钢液在真空处理过程中所放出的最大放气量是选择蒸汽喷射泵大小的依据。采用统计的方法,目前所给出的数据大约每吨钢液的放气量为 $0.2\text{m}^3 \sim 0.6\text{m}^3$ (STP)。对未脱氧钢取上限,脱氧钢取下限。但是由于被处理的钢种及方法不同,其放气量差别较大。因此,根据钢液进行真空处理后气体含量降低很大的特点,采用把钢液在处理前后所呈现出来的气体含量值之差,作为钢液最大放气量的计算方法是较准确的。表 10-64 给出了各种不同钢液在真空处理前后气体含量的最大差值。由于真空脱气和真空吹氧精炼的放气量有所不同,故分别予以介绍。

表 10-64 钢液真空处理前后气体含量的最大差值

$\Delta c_{\text{H}}/\times 10^{-6}$	$\Delta c_{\text{O}}/\times 10^{-6}$		$\Delta c_{\text{N}}/\times 10^{-6}$	
6	脱氧钢	未脱氧钢	低合金结构钢	不锈钢
	150	400	50	150

①真空脱气类 真空脱气类的气体放出量见表 10-65。

表 10-65 真空脱气类每吨钢液放气量

气体 放气量	H_2	CO		N_2	总量	
		脱氧钢	未脱氧钢		脱氧钢	未脱氧钢
放气量/ $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$	6	263	700	50	319	756
放出气体体积(STP)/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	0.067	0.21	0.56	0.04	0.317	0.677

②真空吹氧精炼类 因为真空吹氧精炼初始时的吹氧脱碳阶段,与碳降低到一定程度停止吹氧而进入真空下的碳脱氧阶段时的放气量截然不同,故应分别计算。

a. 真空吹氧脱碳阶段 真空精炼设备精炼低碳钢的工艺,一般在 $6.6 \times 10^3 \text{Pa}$ 时开始吹氧,这时氧与钢中的碳反应生成 CO。其值显然与钢液脱碳量的多少有关,即

$$q_{\text{CO}} = \frac{28 \times \Delta c_{\text{C}}}{12} \times W \quad (10-100)$$

式中 q_{CO} ——CO 气体量;

Δc_C ——脱碳量；

W ——钢水量。

因 CO 放出后在气相中遇到氧时，一部分生成 CO_2 ，所以计算时应考虑二者的混合量，如放出 $K\text{kgCO}$ ，与氧反应生成 $L\text{kgCO}_2$ ，则

$$K = \frac{28L}{44} \quad (10-101)$$

据国外资料介绍，在 CO 、 CO_2 共存的混合气体中，二者的比例关系大致为 $CO:CO_2 = 3.5$ 。所以， $(q_{CO} - K):L = 3.5$ 。故 $L = (q_{CO} - K)/3.5$ 。代入式(10-101)，则

$$K = \frac{28 \times q_{CO}}{3.5 \times 44 + 28} \quad (10-102)$$

因此，混合气体中 CO 及 CO_2 的气体量

$$q_{CO\text{混}} = q_{CO} - K \quad (10-103)$$

$$q_{CO\text{混}} = L \quad (10-104)$$

真空吹氧脱碳阶段也给氢、氧的去除提供了条件，其最大放气量的计算方法与真空脱气类相同，总放气量见表 10-66。

表 10-66 $6.6 \times 10^3 \text{Pa}$ 时每吨钢液放气量

气 体 气 量	H_2	混合气体比例 $CO:CO_2 = 3.5$		N_2		总 放 气 量	
		CO	CO_2	非不锈钢类	不锈钢类	非不锈钢类	不锈钢类
放出气体质量/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	0.006	9.87	2.82	0.05	0.15	12.746	12.846
放出气体体积(STP)/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	0.067	7.9	1.44	0.04	0.12	9.447	10.247

b. 真空碳脱氧阶段 这一段的计算方法同上，其值见表 10-67。

表 10-67 真空碳脱氧阶段每吨钢液放气量

	H_2	CO	N_2		总 量	
			非不锈钢类	不锈钢类	非不锈钢类	不锈钢类
放出气体质量/ $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$	6	Δc_C 取 0.025 % 583.3	Δc_N 取 50 1.5×10^{-4}	Δc_N 取 150 1.5×10^{-4}	639.3	739.3
放出气体体积(STP)/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	0.067	0.467	0.04	0.12	0.574	0.653

(2) 吹氩量计算

据国外资料统计，一般钢种每分钟每吨的吹氩量不大于 $2L(\text{STP})$ ，即每小时为 $120L/(t \cdot h)(\text{STP})$ 。

(3) 漏气量与真空室内衬材料放气量计算

漏气量可按下述几种方法确定：

①按泵抽气能力的 5%~7% 确定。

②按真空系统体积的大小确定。图 10-111 给出了真空室内不同压力下，系统体积与漏入空气最大量之间的关系。

③按设备所处理的钢水量的多少确定。100t 以上的设备，每立方米为 0.25kg/h ，小型设

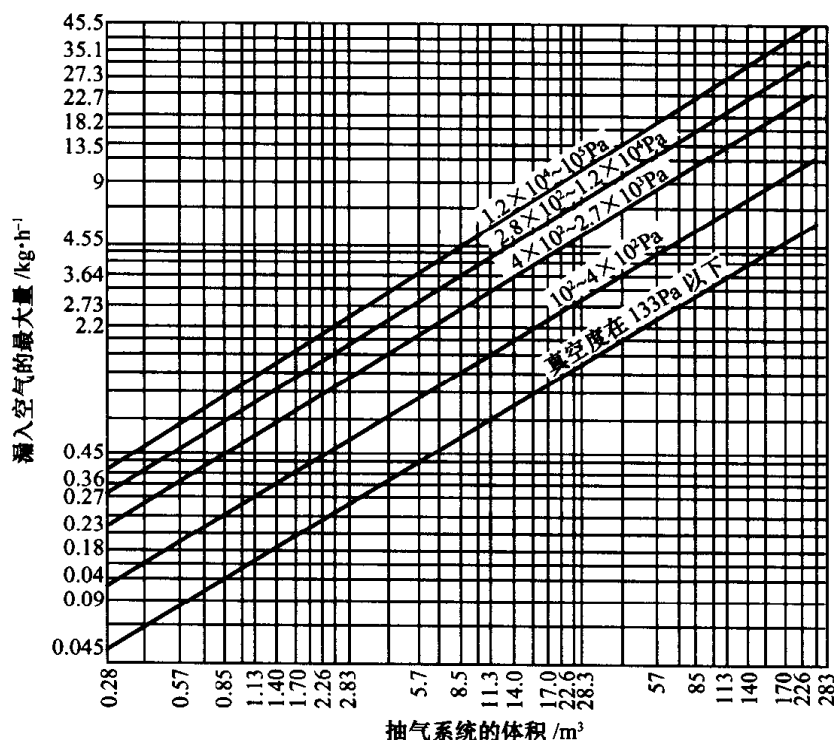


图 10-111 不同压力下真空系统体积与漏入空气的最大量之间的关系

备则按每立方米 0.5kg/h 确定。

真空室内衬耐水材料的放气量及室内各构件表面的放气量均较小,所以可忽略不计。

(4) 水蒸气喷射泵抽气能力的计算

按放气量的大小可通过下式估算泵的抽气能力

$$S = \frac{1}{t} W \cdot q \cdot \eta + q_{\text{放}} + q_{\text{漏}} + q_{\text{惰}} \quad (10-105)$$

式中 S ——泵的抽气量[Pa·m³/h];

t ——所处理钢液的抽气时间[min];

W ——被处理的钢液量[t];

q ——钢液的放气量[Pa·m³/t];

$q_{\text{放}}$ ——真空室的放气量[Pa·m³/h];

$q_{\text{漏}}$ ——真空室的漏气量[Pa·m³/h];

$q_{\text{惰}}$ ——单位时间内输入到真空室的惰性气体量或反应性气体量[Pa·m³/h]。

(5) 启动蒸气喷射泵抽气能力的计算

系统中配粗抽泵的目的在于缩短抽气时间,减少钢液的热量损失。在前述的各种处理方法中,除钢流法应进行预抽真空外,其它方法均要求在 1min~2min 内将系统抽到 $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ ~ $2.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的压力范围。根据这一要求,粗抽泵的抽气能力可按下式估计

$$S_{\text{启}} = \frac{60\rho}{K_L t} \left(\frac{p_0 - p_1}{p_0} V_{\text{总}} + a V_{\text{耐}} \right) \quad [\text{kg/h}] \quad (10-106)$$

式中 p_1 ——启动泵的压力[Pa];

$V_{\text{耐}}$ ——耐火材料的体积[m³];

a ——耐火材料的放气系数 $[\text{m}^3(\text{STP})/\text{m}^3]$;

t ——系统内压力从 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 抽到 $1.3 \times 10^4 \text{Pa} \sim 2.6 \times 10^4 \text{Pa}$ 压力范围时所需的时间 $[\text{min}]$;

ρ ——空气密度(STP) $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

K_L ——系统的漏气系数,取 $K_L = 0.95$ 。

如忽略耐火材料放气,则(10-106)式可写成

$$S_{\text{粗}} = \frac{82}{t} \left(\frac{p_0 - p_1}{p_0} V_{\text{总}} \right) \quad (10-107)$$

为了满足工艺过程的快速抽气要求和有效地利用蒸气源的潜力,可在真空系统中设置粗抽泵。其在系统中的安装位置如图 10-112 所示。

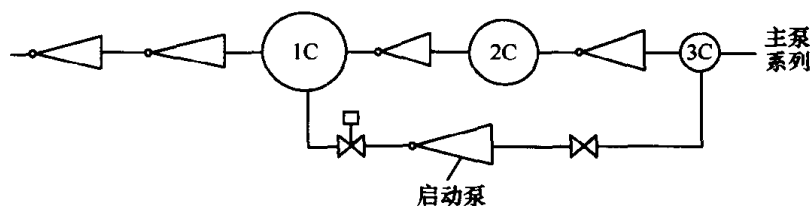


图 10-112 设置粗抽泵的蒸气喷射泵

启动泵与并联的喷射器的工作蒸气总耗量应等于真空系统正常运转时各级喷射器蒸气耗量的总和。这样可在不增加工作蒸气总供气量(即不增加锅炉容量)的前提下,最大限度地缩短抽气时间。

4. 蒸气喷射泵系统元件的组合与布置

如图 10-113 所示,多级水蒸气喷射泵系统由增压器、蒸气喷射泵、冷凝器、蒸气过滤器、真空室充气放气装置以及管道、阀门等元件组成。增压器实质上是位于中间冷凝器高真空侧的蒸气喷射泵,它的作用是将泵喷射出来的混合气体中的蒸气,从冷却水不能冷却的压力压缩到冷却水能够冷却的压力。增压器有直角式和倾斜式两种。前者安装拆卸方便,占用空间小,但

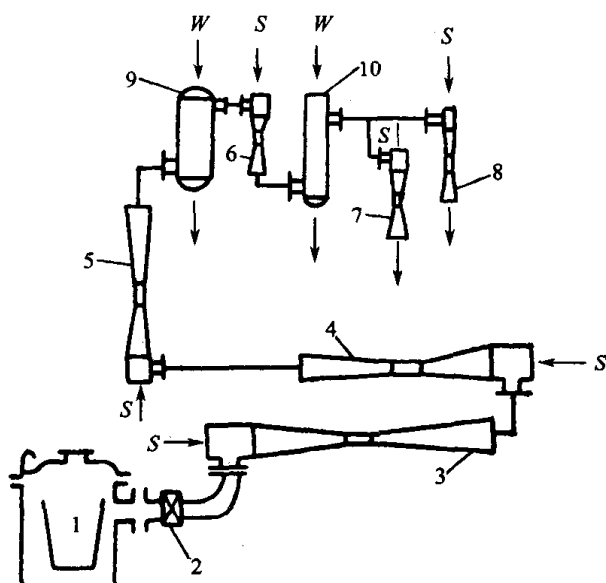


图 10-113 多级蒸气喷射泵系统示意图

1—真空室;2—阀门;3、4、5——二、三级增压泵;6、7——二级喷射泵;8—启动喷射泵;9、10—冷凝器。

S—工作蒸气;W—冷却水。

混合室内积水不易排出;后者能克服这一缺点,但占用空间大,安装和拆卸不够方便。

冷凝器是系统中冷凝蒸气的元件。气压式冷凝器的典型结构如图 10-114 所示。它的作用是降低蒸气含量,把前一级泵排出的蒸气冷凝成水排出系统,从而降低了下一级泵的负荷。

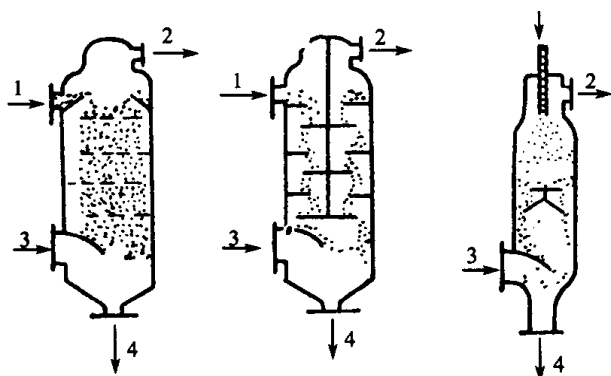


图 10-114 气压式冷凝器示意图

1—进水口;2—出气口;3—进气口;4—出水口。

冷凝器的排水方式有水泵法和真空水柱法。前者称低架式,后者称高架式。若冷却水温度上升 $\Delta t(^{\circ}\text{C})$,进入冷凝器中的水蒸气量为 $G_s[\text{kg/h}]$,则所需的冷却水量 $W[\text{t/h}]$ 可用下式近似计算

$$W = 0.6 G_s / \Delta t \quad (10-108)$$

抽气系统的布置形式与冷凝器的排水方式有关。高架式应布置在 10m 以上的高空,其特点是结构简单,不需水泵排水,运转可靠,不会产生真空抽吸作用,但安装维修不够方便。低架式可布置在 10m 以下,但需水泵排水,而且为了确保系统运转可靠,应在冷凝器上设置水位限制装置以防冷却水进入真空室造成事故。

七、真空热处理炉

(一) 概述

我国自 20 世纪 60 年代有了气冷式真空热处理炉后,才使工具钢、高速钢、不锈钢和耐热合金钢能进行真空淬火处理。到 70 年代又相继研制出油冷式真空热处理炉,水冷式真空热处理炉,这样更扩大了对钢材料和零件的真空热处理范围。

航空航天及计算机事业的发展,促进了真空热处理技术的发展,国内相继研制成功了不同类型的真空热处理炉,用于科研和生产中。

真空是一种良好的保护气氛,热处理后的零件表面光亮,这是真空热处理的最大优点。此外,真空热处理还有以下一些独特的优点:

①节省能源。很多真空热处理设备,都可用作多种热处理,如淬火、退火、渗碳,甚至钎焊、烧结、光亮淬火、消除应力、时效等,且机械化程度高,节省人力。

②无公害、安全、热处理环境好。

③一些要求高的特殊处理技术,在真空中处理时极易掌握,成为普通的操作。

④能把任何用油和空气淬火的材料淬到最高硬度,且操作简单。

⑤热处理后的零件直接用于电镀,不用除油、清洗或其它表面加工,免除了各种辅助工序。

⑥高速钢用真空热处理代替盐浴,收到非常好的效果,如增加刀具寿命,不会出现渗碳、脱

碳、氧化、氢脆等问题。

⑦真空热处理件变形小,不容易开裂。这可能是由于加热慢,加热过程中内外温差小的缘故。例如高速钢燕尾铣刀真空加热,随后急剧淬火也不会发生开裂,零件采用真空油淬,其变形仅为一般油淬的 $1/10$,热处理后可不经加工或作少量磨削加工。

在真空条件下加热,换热方式主要是热辐射而不是对流,因此炉温均匀,在 1200°C 下仅为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

但真空热处理也有缺点,主要是会导致某些工具钢的脱碳,且冷却速度慢,设备制造比较困难,需用贵的材料,有一定的噪声。

(二) 真空退火

金属在真空中退火是真空热处理的一种。用于真空退火的金属除一部分的钢、铜、Be-Cu 合金、K 蒙乃尔合金、因科镍 X 合金、埃林互合金和钴基合金等外,还有与气体的亲和力较大的如 Ti、Ta、Nb 和 Zr 等金属。退火时的真空度必须根据这些金属的氧化特性进行考虑。真空退火的脱气效果取决于炉子的加热温度、真空度和操作时间等工艺条件以及气体和金属的化合物的物理化学性能。真空退火的主要应用范围是:

- ①活性金属、耐热金属的退火;
- ②铜和铜合金的光亮退火;
- ③磁性材料的消除应力退火;
- ④真空管材料的脱气退火;
- ⑤不锈钢的退火。

各种材料的工作真空度和处理温度见表 10-68。

表 10-68 真空退火的热处理规范

材 料	处 理 方 法	压 力/Pa	温 度/ $^{\circ}\text{C}$
Be-Cu 合金	硬化	10^{-2}	343
不锈钢	硬化	10^{-2}	343
高速钢	回火	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	538
有色金属材料	银钎焊	10^{-2}	816~982
不锈钢	退火	10^{-1}	9
不锈钢	硬化	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	1093
不锈钢	烧结	10^{-2}	1093~1316
高速钢	硬化	10^{-1}	1260
Ta、Nb	退火	10^{-3}	1093~1427
TaC	烧结	1	1454
Ti、Zr	退火	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	688~788
Cu	退火	$10 \sim 10^{-1}$	371~427
坡莫合金	退火	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	899~1204
硅钢	退火	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	899~1204

1. 铜的退火

铜的真空退火极易取得洁净的光亮表面,而且所需的真空度在 133Pa 以下即可,同时退火温度是在 $350^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 的低温范围,所以炉子的制造和维护也很简单。使用油封机械泵和机械增压泵即可获得所需的真空度。一旦排气结束后,立即将真空泵与真空炉切断,因此无需高的真空技术,操作简单,设备费用低廉。铜在真空退火时,工件表面互相接触,处于受压状态,在其接触面上由于铜原子的扩散会产生铜原子集聚的现象,所以退火温度希望尽量低些。

2. 钛和锆的退火

钛、锆及其合金在高温下与氢、氧和氮等气体的化合力极强,因此如果在含有这类气体的气氛中加热,由于吸收氢,会产生氢脆,而吸收氧和氮会产生硬化现象。但是,在普通气氛中是不可能防止这些弊病的,为此,采用氩和氮等惰性气体。可是这类气氛的纯度和经济效果颇成问题,因而采用真空退火。

这些金属和合金真空退火的目的在于取得光亮的表面和提高脱气效果,防止因吸收气体使材质变坏。表 10-69 列出了这类金属和合金的退火温度。

表 10-69 钛、锆及其合金的退火温度

名 称	退火温度/℃	清除应力退火温度/℃	备 注
工业纯钛	700	540	α 型合金或 $\alpha + \beta$ 型合金 (缓冷至 550℃ 以下)
5Al-2.5Sn	850	540~650	
5Al-5Cr	750	750	
2Al-2Mn	700	550	
4Al-4Mn	750	750	
5Al-3Mn	750~800	750	
5Al-2.75Cr~1.75Fe	790	650	
6Al-4V	790~815	620	
2Fe-2Cr-2Mo	650	—	
3Mn-1.5Al	730	—	
8Mn	650~700	540~590	
锆	650~700	—	
锆合金 ⁻²	850	—	

3. 钼和钨的退火

钼、钨、钽、钼等金属都没有相变点,由于加工硬化,一般采用再结晶温度以下的软化退火。如果在再结晶温度以上加热,则反而产生脆化。此外,在普通气氛中加热时,因吸收气体而脆化。表 10-70 为这些金属的退火规范和所需真空度。

表 10-70 W、Mo、Ta、Co 的软化退火规范

金 属	真 空 度	退 火 规 范
钨	10^{-2} Pa 以下	1040℃~1400℃ 采用 1000℃~1200℃ 的低温
钽	10^{-1} Pa 以下	1200℃~1260℃
钨(热加工)	同上	1000℃~2000℃
钨(冷加工)	同上	550℃~600℃
钼	同上	820℃(3h~5h)~1090℃

4. 钢铁的退火

钢材的真空退火是从部分的钢丝开始的。从有关资料获悉,钢在真空退火时,其真空度和加热温度对处理后的光亮度的影响很大。

研究的钢材为结构钢。首先,在保持 $1\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的各种压力的真空炉内,将 S30C、S50C 和 SNC2 的钢材加热到 700℃、800℃ 和 850℃,在各温度范围内保温 40min 后,随炉冷却。测定试样的光亮度,结果是:当压力为 1Pa 时,平均光亮度为 60%~70%,并不理想,这是因为在 1Pa 的压力下,残存气体较多,产生氧化反应的缘故。当压力提高到 10^{-1}Pa 和 10^{-2}Pa 时,则光亮度可上升到 70%~80%。但是在工业上,习惯认为光亮度达到下限,即 60% 就可以了,所以对结构钢来说, 1Pa 的压力就可以满足要求。

出炉温度对光亮度有显著的影响,真空退火,出炉温度乃是一个重要的因素。在 $300^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 以上出炉时,则氧化剧烈,其试样的表面状态和光亮度显著下降。出炉温度如在 200°C 以下时,光亮度可超过 70%,因此可以认为,在这个温度下出炉是能够发挥真空退火的效果的。

工具钢和合金工具钢在压力为 1Pa 下,退火试样的光亮度极差,光亮度的极限值为 60%。当压力为 10^{-2}Pa 时,光亮度均达 90% 以上。

5. 不锈钢的退火

在不锈钢中选择了铁素体系的 SUS430、马氏体系的 SUS410 和奥氏体系的 SUS304 三种钢材,将这三种钢材的试样在 $1\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的压力范围内加热到 $850^{\circ}\text{C} \sim 1050^{\circ}\text{C}$,冷却到 200°C 进行光亮度的测定。测定结果表明在 8Pa 的真空中加热退火,加热温度愈高,光亮度愈好,但都在 60% 以下。这是因为钢材中含有较多的铬,试样的氧化速度快而造成的。但是当温度达到 1050°C 时,光亮度却有了好转,其原因估计是由于铬的氧化物(Cr_2O_3)的升华造成的。在 850°C 的低温时,产生氧化反应,但在 1050°C 的高温下加热时,氧化物的升华反应速度要比铬的氧化物的生长速度快。

在 950°C 下退火,如果压力是在 10^{-1}Pa 的高真空时,是可以获得 80% 的光亮度的。不过,像 SUS430 钢材虽有较好的光亮度,但表面并非镜面状态,较为粗糙,这反映表面氧化物曾经升华。表 10-71 列举了三种不锈钢的退火规范。

表 10-71 各种不锈钢的退火规范

名 称	钢 号	退 火 规 范
铁素体系不锈钢	SUS 430	750℃ 空冷
马氏体系不锈钢	SUS 410	800℃ ~ 900℃ 缓冷 750℃ 空冷
奥氏体系不锈钢	SUS 304	800℃ ~ 900℃ 缓冷 约 1100℃ 快冷

(三) 真空淬火

真空中加热的快速冷却方法有好几种,有用氮气等惰性气体冷却,也有用油和水冷却。能够进行真空淬火的材料有:空气淬火用的钢、各种高速工具钢、油淬火用的工具钢、不锈钢、镍合金和钛合金等。表 10-72 内所示为美国海斯公司推荐的各种钢材的真空度和淬火方法。表内真空度一栏中,(低)表示只用旋转泵,(中)表示使用罗茨增压泵,(高)表示与扩散泵并用。

表 10-72 各种钢材的真空度和淬火方法

钢 种	真 空 度 ^①			淬 火 方 法		
	低	中	高	油	水	气体
耐冲击钢						
S-1(SKS41)	A	B		A		
S-2(SKS4)	A	B		A		
S-3	A	B		A		
S-4	A	B		A		
S-5	A	B		A		

(续)

钢 种	真 空 度 ^①			淬 火 方 法		
	低	中	高	油	水	气体
油淬火钢						
0-1	A	B		A		
0-2	A	B		A		
0-6	A	B		A		
0-7(SKS21)	A	B		A		
4140(SCM4)	A	B		A		
4340(SNCM8)	A	B		A		
52100(SUJ2)	A	B		A		
空气淬火钢						
A-2(SKD12)	A	B		C		A
A-6	A	B		C		A
A-7	A	B		C		A
D-1	A	B		C		A
D-2(SKD11)	A	B		C		A
D-4	A	B		C		A
D-5	A	B		C		A
D-7	A	B		C		A
H-11(SKD6)	A	B		C		A
H-14	A	B		C		A
H-21(SKD4)	A	B		C		A
H-22	A	B		C		A
高速工具钢(W系)						
T-1(SKH2)	A	B		A		E
T-2	A	B		A		E
T-3	A	B		A		E
T-4(SKH3)	A	B		A		E
T-5(SKH4A)	A	B		A		E
T-15(SKH10)	A	B		A		E
高速工具钢(Mo系)						
M-1	A	B		A		E
M-2(SKH9)	A	B		A		E
M-6	A	B		A		E
M-10	A	B		A		E
M-30	A	B		A		E
M-50	A	B		A		A
钛合金						
Ti-2Al-4Mn	A	B	D		A	
Ti-6Al-4V	A	B	D		A	
Ti-679	A	B	D		A	
Ti-6Al-4V(低O ₂)	A	B	D		A	
Ti-6Al6V2-5Sn-1 (Fe, Cu)	A	B	D		A	

七、真空热处理炉

(续)

钢 种	真 空 度 ^①			淬 火 方 法		
	低	中	高	油	水	气体
不锈钢						
400	A	B				A
410	A	B				A
416	A	A				A
420	A	B				A
440	A	B				A
析出硬化型合金						
N1 - SpanC	A	B	A			A
AM - 350	A	B	A			A
AM 355	A	B	A			A
17 - 7PH	A	B	A			A
14 - 4PH	A	B	A			A
铁镍基合金						
901 合金	A	B	A			A
A - 286	A	B	A			A
Discaloy	A	B	A			A
Unitemp	A	B	A			A
钴量合金						
AL - Resist 213	A	B	A			A
H - 21	A	B				A
MAR - M 509	A	B	A			A
W1 - 52, HS 152	A	B				A
镍基合金						
718 合金	A	B	A			A
耐蚀耐热镍基合金 X	A	B				A
因科镍合金 X750	A	B	A			A
M - 252 - J - 1500	A	B	A			A
RA - 333	A	B	A			A
Rene, 41	A	B	A			A
Rene, 52	A	B	A			A
Rene, 63	A	B				A
TD 镍(棒)	A	B	A			A
Waspaloy A	A	B	A			A
Waspaloy B	A	B				A
Greek Ascaloy	A	B				A

注:①A—必要条件;B—改善泵的停车时间;C—为缩短热处理循环时间,最好在 550℃ 时用油淬;D—用扩散泵只排出氢气;E—在气体中缓冷后,在 1090℃ 下油冷

从表中可以看到,对耐冲击的合金工具钢(SKS4)、油淬火工具钢(SKS21)、油淬火结构钢(SCM4、SNCM8)和轴承钢(SUJ2)等来说,真空度在 10Pa~10⁻¹Pa 就可以了,不需使用扩散泵,但必须用油冷。空气淬火的合金工具钢(冷冲模具钢、热冲模具钢)为中真空度,原则上是

采用气体冷却,但是为了缩短热处理周期,在 550℃ 左右可用油冷。高速钢(W 系 SKH2、Mo 系 SKH9)由于淬火温度属高温,考虑到合金元素的蒸发,不采用扩散泵抽气,而采用中真空度。为了控制冷却过程中碳化物的析出,油淬是比较理想的,但是美国是采用先用气体缓冷,到 1090℃ 后再油淬的方法。

另外,钛合金一般也是采用中真空,但为了从这些合金中排出氢气,所以必须采用扩散泵,以达到高真空。淬火方法采用水冷。不锈钢、析出硬化型合金、铁镍、钴基合金等都必须在中真空下加热,如果需要高的光亮度,则应在 $10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$ 的较高真空中加热。冷却方法一般为气冷。

(四) 伊普森真空热处理炉

美国的伊普森真空热处理炉性能优良,其结构如图 10-115 和图 10-116 所示。主要由真空容器、加热室、排气系统和控制柜组成。加热室内有加热器,用石墨、钼或钨制成。加热器外设有炉衬,用钼和钨等材料制成,炉衬有热反射作用,使加热区温度均匀。加热室上下都有门,冷却时可以打开,以使冷却气体充分对流。

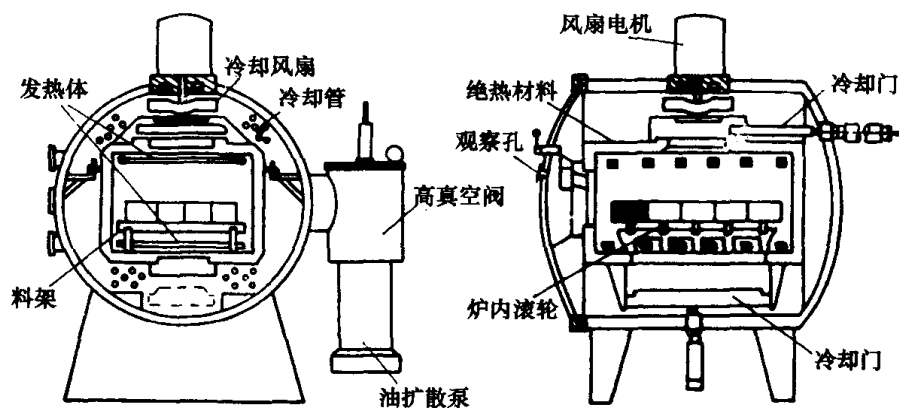


图 10-115 伊普森 VFC 卧式真空炉的截面图

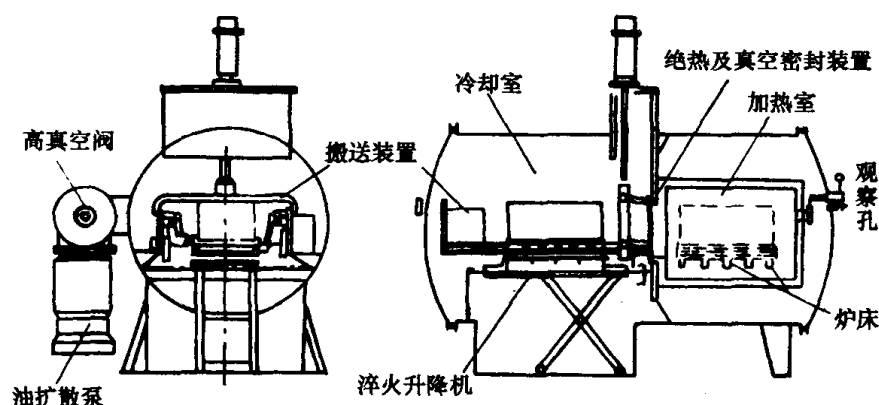


图 10-116 卧式油冷真空炉的截面图

伊普森真空热处理炉的特点如下:

①炉壁冷却效果好。真空容器全部水冷,当加热室处于最高温度时,其外部也能保持近似室温,绝热材料在 1310℃~2200℃ 下仍经久耐用。

②采用风扇强制冷却。冷却循环开始前,上部的冷却门把热流与冷却气体用的风扇隔断,风扇电机设在真空密封的水冷套中,再装上用于冷却循环气体的冷却管,可以提高冷却效率。

③真空系统简单。真空系统仅由油扩散泵—气镇式旋片真空泵组成,粗抽和维持仅用一台旋片式真空泵。漏气和其它故障很少发生。

④采用三级分馏增扩型扩散泵,泵在高压区有较大抽速。泵锅炉上装有防止过热的温度控制器。

⑤自动化程度高,能对真空度,二级预热加热温度、保温时间、加热速度和冷却方法等自动控制。

(五) HBV-200 型高压真空气淬炉

1. 总体方案

高压真空气淬炉的主要工作过程是:在真空条件下对工件进行加热以防止工件氧化并脱去工件中的一些有害气体,使工件的机械性能得以改善。在最终加热、保温结束后,向炉内回充高纯度惰性气体作为冷却介质,启动冷却风扇对工件实行快速强制冷却。炉内冷却气体压力可根据需要在 $10^5\text{Pa} \sim 5 \times 10^5\text{Pa}$ 之间任意调节,从而获得不同的冷却速率。随着炉内冷却气体压力的增加,冷却气体密度增大,炉子冷却能力也不断增强。但对于一台新型热处理设备来说,在大幅度提高炉子的冷却能力的前提下,还要同时解决加热及冷却均匀性,设备运行的安全可靠、经济性等诸问题。这些都是在确定总体方案时需着重考虑的。HPV-200 型高压气淬炉,其结构简图如图 10-117 所示。

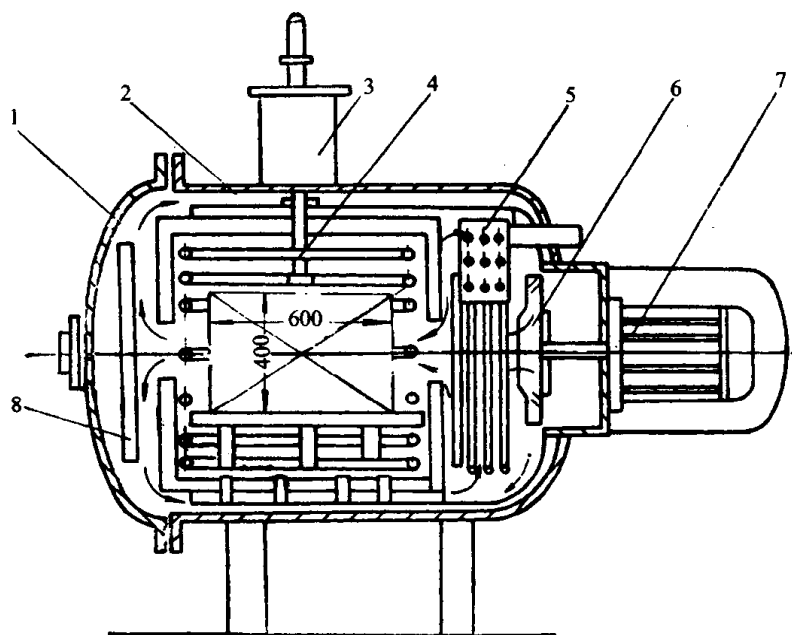


图 10-117 HPV-200 型高压气淬炉结构简图

1—炉门;2—炉体;3—电极;4—加热室;5—热交换器;6—风机;7—电机;8—喷管。

这种结构的主要特点是:

①加热及冷却更加均匀。加热器和冷却气体喷嘴的均布,避免了因工件屏蔽作用而造成的加热不均匀以及因冷却气体单向流动所造成的冷却不均匀,从而减少工件的变形,适于复杂截面工件的快速气淬处理。

②由于取消了加热室的上下活门,气流扰动器及外循环管路,减少了炉体上的开孔数,使炉子的设计制造更为简便。

HPV-200 型高压真空气淬炉的主要设计技术指标见表 10-73。

表 10-73 主要设计技术指标

性能指标名称	设计指标	备注
极限真空度	$1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$	
工作真空度	$10^{-2} \text{Pa} \sim 10 \text{Pa}$	
压升率	$\leq 6.7 \times 10^{-1} \text{Pa}$	
最高使用温度	1350°C	
炉温均匀性	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	
均温区尺寸	$400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 600\text{mm}$	
气冷时炉内最高压力		相对压力
空炉冷却时间	$< 12\text{min}$	从 1300°C 降至 150°C
最大装炉量	200kg	
加热功率	100kW	

2. 主要部件

(1) 炉体和炉门

炉体炉门的设计主要需解决在高真空与高压交变工况下,炉体与炉门间的密封,以及在高压力下炉体和炉门的强度问题。其次还要考虑炉门开启、关闭、锁紧的灵活简便和安全可靠等问题。

为解决这些问题,设计中采取了以下措施:

①设计时取消了常用的实心 O 型密封圈或充气式空心 O 型密封圈,特制了一种唇形密封圈作为炉体与炉门的密封件。炉子处于真空状态时,靠胶圈主体部分的压缩实现真空密封。向炉内回充高压氮气时,利用唇形胶圈的唇形薄边的扩张实现高压密封。

②在进行炉子内部结构设计时要充分考虑测量元件引入口、电极、冷却水出入口的位置与数量等。其对炉体和炉门所产生的影响,应符合压力容器设计标准。便如炉门、炉体主法兰等各部件的尺寸的确定均通过大型计算机利用 SAP5 程序进行应力分析与校核,直至其应力值均在许可范围内为止。

(2) 加热室

HPV 型高压真空气淬炉的加热室为圆形结构。如图 10-118 所示。十二支空心管状加热器与十二排冷却气体喷嘴沿加热室周边均布在加热室内,在 360° 方向上整个包围被处理工件。因此,可以最大限度地减少工件的屏蔽作用,得到更为理想的加热均匀性和冷却均匀性。

加热室的保温材料为石墨毡和柔性石墨纸。石墨毡具有良好的抗高温性和保温性,在真空或惰性气体保护条件下,完全可以胜任 1300°C 左右的工作温度。石墨毡表面附着一层柔性石墨纸,其光洁表面可以增加加热室的保温性能。同时,在高速气流的冲击下,可以有效地防止石墨纤维的飞扬,保持炉内清洁,延长了加热室的使用寿命。

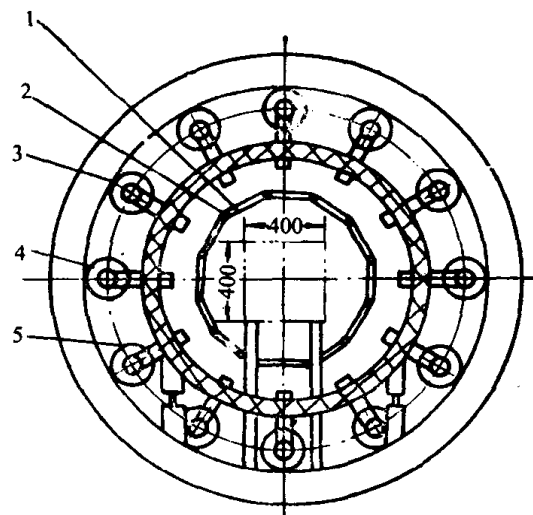


图 10-118 加热室结构图

1—连板;2—管状发热体;3—喷管;
4—喷嘴;5—石墨毡。

(3) 风冷系统

风冷系统由一台大功率高压鼓风机,一台高效热交换器和一套导流装置组成。这套风冷系统的主要特点是能够将冷却气体高速、均匀地送入加热室,并在加热室内产生充分的气流扰动。在冷却速率较高的情况下,可以有效地减少由于气流单向流动而产生的工件冷却变形。

冷却气体在进入风机前,经过热交换器进行冷却。这样风机就可以在较低温度下运转,有利于提高风机效率。

风机所配电机的功率达 55kW,是一种特制的水外冷式电机。体积小,效率高。

热交换器是风冷系统的关键部件。在冷却气体压力和流速一定的情况下,应尽量增加换热面积和增大冷却气体与冷却水的温差。增加换热面积一般要受炉内结构和换热管的加工工艺所限,提高温差可以通过增大冷却水流量和减少沿程阻力来解决。

(六) 真空渗碳炉

真空渗碳所用的炉子,多半是把以前的油淬火真空炉加以改造而成,其结构如图 10-119 所示。在这种炉上,装上渗碳气体供给装置,炉内气体搅拌装置以及控制装置,供真空渗碳处理使用。这便是真空渗碳炉的现状。

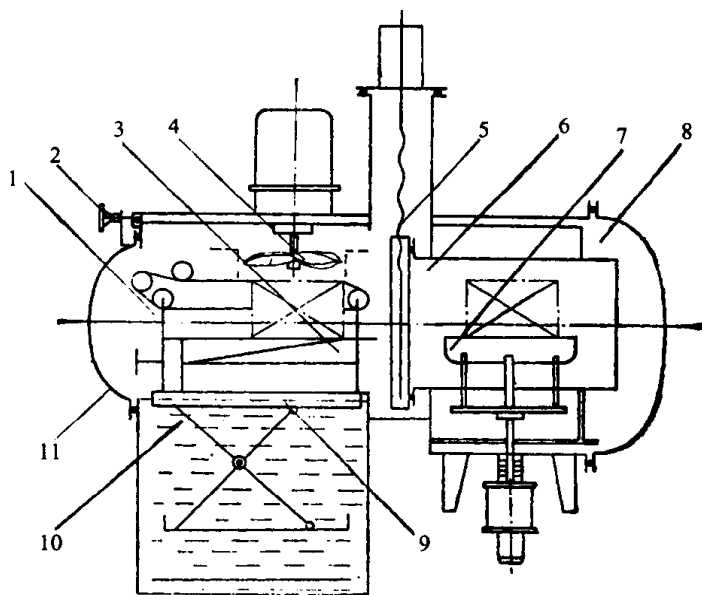


图 10-119 真空渗碳炉结构简图

1—淬火室;2—装料门夹紧机构;3—取料车;4—循环风扇;5—中间门;6—加热室;7—上下可动料托;
8—加热炉;9—油面;10—淬火升降机构;11—装料门。

八、辉光离子氮化

(一) 概述

辉光离子氮化工艺始于 20 世纪 60 年代末期,当时的西德和瑞士首先将此工艺用在枪炮内膛的氮化上,可提高寿命达三倍,后来美国及日本相继将辉光离子加热原理用于氮化、烧结、钎焊等方面。我国于 20 世纪 60 年代末开始研究,用此技术来改善零件表面性能。

离子氮化与一般气体氮化相比,具有如下特点:

①离子氮化时间能缩短到气体氮化的 $1/4 \sim 1/2$ 。以 38CrMoAlA 钢为例,一般要达到 $0.53\text{mm} \sim 0.7\text{mm}$,氮化层硬度 $\text{HRN}15 \geq 92$ 时,气体氮化持续时间需 70h 左右;而离子氮化只需 15h~20h。又如 4Cr14Ni14W2Mo 钢,要达到 $0.09\text{mm} \sim 0.12\text{mm}$, $\text{HRN}15 \geq 80$ 时,气体氮化时间需 47h,而离子氮化只需 15h~20h。

②零件的氮化表面形成单相结合层,而其脆性均为一级,所以零件在使用及磨削加工时,不会脆裂。因此,无需对已氮化表面为除脆性层而进行磨削加工,缩短加工周期。

③离子氮化时,只对要求氮化的表面进行离子轰击,故只有氮化表面加温到氮化温度,非氮化表面温度较低,加之在氮化过程中,加温、保温、冷却所用的时间短,因而有利于减少零件的变形。对于一些几何形状复杂、尺寸精度要求高的氮化零件,采用离子氮化更为优越。基于同一原因,使离子氮化设备功率小,且氮化时间短,故总的电能消耗只有一般气体氮化的 $1/5 \sim 1/2$ 。

④气体氮化时,加热炉内氨气压力一定要大于 105Pa;而离子氮化时,真空室内氨气压力只要求 $2.6 \times 10^2 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^3 \text{Pa}$,所耗氨气仅为气体氮化的 $1/5 \sim 1/20$ 。

⑤离子氮化的加热及冷却时间约为一般气体氮化的 $1/10$ 。

⑥有些局部氮化零件,如曲轴后半部、连轴套、支撑圈、排气门等,可以省去镀锡、镀镍工序。

⑦可省去氮化前零件表面的繁杂清理工序。由于氮离子轰击零件表面,它能还原高合金钢表面的氧化膜,不需要在氮化前对氮化表面进行喷砂、化学腐蚀,或在炉内撒放氯化铵。

⑧改善了劳动条件,基本上没有氨气臭味。

离子氮化虽然有上述优点,但也有其不足之处,如:

①离子氮化所使用的设备,较一般气体氮化的设备复杂些,操作不当时易损坏。

②离子氮化时,每一种氮化零件均要配置专用夹具,装炉量少。

③对操作人员要求具备真空、高电压、辉光原理等方面的专业知识。

根据离子氮化特点,可应用于各类齿轮、枪炮管、活塞销、气门、曲轴、衬套、气缸等氮化上。

(二) 工作原理

辉光离子氮化一般称为离子氮化。辉光离子氮化是在真空室内在高压(一般 $500\text{V} \sim 700\text{V}$)直流电场作用下进行的。氮化时把待处理的工件接在高压直流电源的阴极,工件的外围设置一个接高压直流电源的阳极。当真空度达到 13Pa 以上时,向真空室中通入氨气,并调节氨气量,使真空室内压力保持在 $1.3 \times 10^2 \text{Pa} \sim 6.6 \times 10^2 \text{Pa}$ 之间。

在阴阳极之间加高压后,氨气在高压电场作用下电离发生辉光放电,产生的氮正离子,在电场作用下,快速入射到阴极表面;在正离子轰击下,产生大量的热,使工件加热到所需温度,因此离子氮化不需外部加热。

正离子以一定的速度轰击阴极时,除产生大量的热外,同时使阴极溅射出电子和铁原子。阴极发射的电子,在向阳极运动的过程中,不断地从电场中获得能量,使氨电离。电离的氮正离子继续向阴极快速运动,使电离过程不断进行,真空室内辉光放电继续发生。

氮的正离子轰击阴极时,在阴极夺取电子还原成氮原子。并渗入到金属表面和向内部扩散形成氮化层。

(三) 辉光离子氮化炉

离子氮化生产设备简图如图 10-120 所示。各组件用途简要说明如下:气瓶 1 是气源,使

用氢氮混合气或单独使用液态氮都可以。使用氮气时,可以预先热分解,也可以直接使用,后者经济。使用氮氢混合气时,工作压力要比单独使用氮气时大1倍~2倍,否则氮化层硬度不高。气体调节阀2用来以调整及稳定气体流量。浮子式流量计3用以测定气体流量。真空阀门9用来调节气体流量及压力。关闭真空泵12时,必须先关闭阀门9,然后将三通真空阀10接通大气,避免泵油倒流入真空室7内。阳极6的形状及尺寸根据零件的外形来选定,可以用金属丝网或金属板材、管材做成,阳极材料以钢为主。金属丝网透气性好,并能看到零件上的辉光全貌,但易变形,影响氮化质量。真空室7及底座做成双层,夹层内通水冷却,保护密封橡皮。真空罩上要设置两个以上的观察窗,以便观察零件氮化过程中的辉光情况,便于调整气流及加热功率。另外在试用新氮化夹具时,观察其使用性能,便于修正。热电偶14用以测量零件温度。阴阳极电源接线柱及观察窗都需要用真空橡皮圈密封。总装后,整个真空系统的极限真空应高于13Pa。U形水银压力计8(或用麦氏真空计)用来测量真空室内气体压力。热偶规11用来测量真空室内压力小于53Pa时的真空度。当真空室内供气压力大于53Pa时,热偶真空计就读不出压力数值了,此时就必须用U形水银压力计8测量。旋片式真空泵12用来抽真空和维持真空室内需要的压力。真空泵用1号真空泵油,它必须及时更换,否则会使真空泵达不到额定的极限真空值。测温毫伏计15用来指示和控制氮化温度。控制箱16用以供给辉光氮化所需的电能,自动防止电弧放电,或自动灭弧并重新产生辉光的装置。吊车13用来启闭真空罩。整个气源管道用不锈钢做成,也能用普通无缝钢管,但容易生锈。有的地方可以用真空橡皮管或输血乳胶管连接。但是当使用乳胶管时,管内必须放置金属丝螺旋骨架,以防止低真空时被大气压扁而阻塞气流。乳胶管易老化,需要定期更换。真空室上的排气口,一

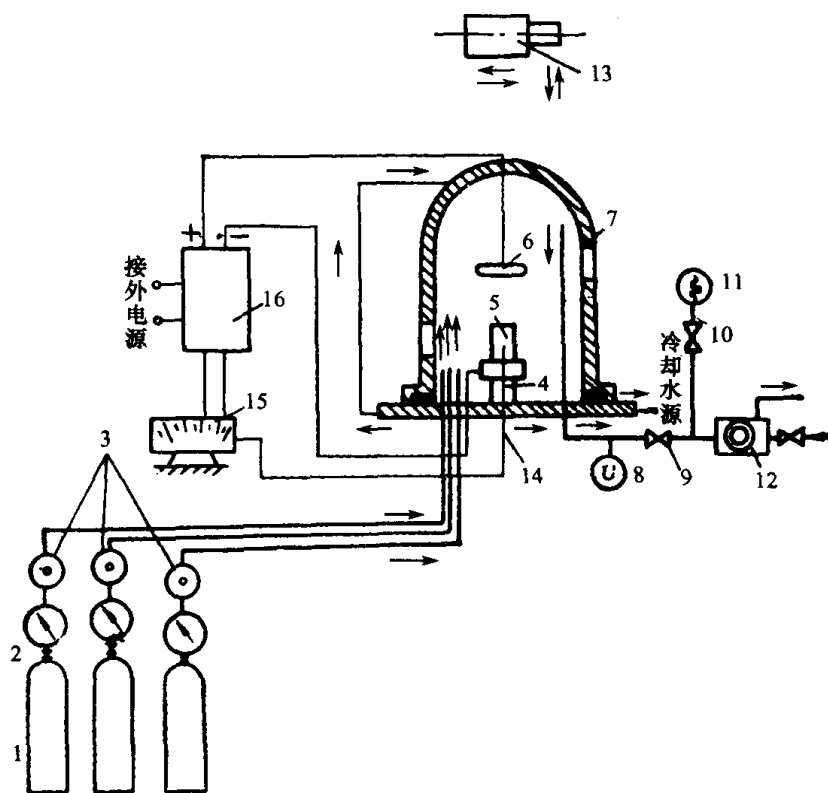


图 10-120 离子氮化生产设备平面布置示意图

- 1—氨气瓶;2—氨气调节阀;3—浮子式流量计;4—绝缘底座;5—氮化零件(阴极);6—阳极;7—真空室;
8—U型水银压力计或0~25 麦氏真空计;9—真空阀;10—真空阀;11—热偶规;12—旋片式真空泵;13—吊车;
14—热电偶;15—EFT-100 测温式毫伏计;16—离子氮化控制箱。

定要高出氮化零件所处位置 100mm 左右。

(四) D30 型辉光离子氮化炉

1. 技术指标

D30 型辉光离子氮化炉技术指标见表 10-74。

表 10-74 D30 型辉光离子氮化炉技术指标

基本参数	技术指标	基本参数	技术指标
输入电压	380V	装氮化件容积	普通 $\phi 550\text{mm} \times 800\text{mm}$ 加长 $\phi 550\text{mm} \times 1600\text{mm}$
最大输出电流	0~30A	真空度	13Pa~6.6Pa
最大输出电压	0~1000V	真空室氮气压力	$1.3 \times 10^2\text{Pa} \sim 6.6 \times 10^2\text{Pa}$
真空室容积	普通 $750\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 加长 $750\text{mm} \times 1800\text{mm}$	氮化件最大质量	1000kg

2. 离子氮化炉的结构

图 10-121 是离子氮化炉的示意图。

整个装置由供氮系统、真空系统、测量系统、供电系统四部分组成。

①供氮系统。氨气瓶 1 内盛有液态氨。工作时将氨气阀门 2 打开,经稳压进入 LZB-6 型浮子式流量计 3。根据真空室要求氨气压力大小,调节流量计阀门 4 控制氨的流量。氨气经过氨气管路进入真空室内。

要求供氮系统气源压力稳定,进气阀调节灵活。

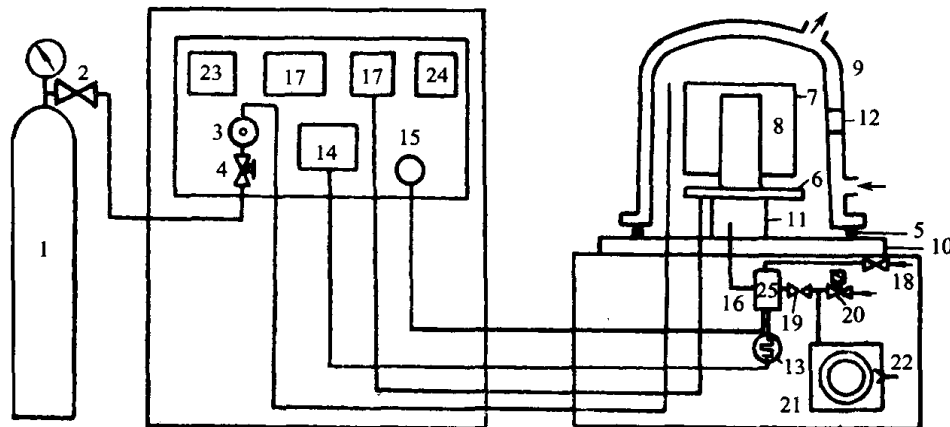


图 10-121 辉光离子氮化炉装置示意图

- 1—氨气瓶;2—氨气阀门;3—浮子流量计;4—流量计调节阀;5—密封橡胶垫;6—阴极盘;7—阳极;8—工件(阴极);
9—真空室外罩;10—真空室基板;11—阴极盘的绝缘底座;12—观察窗;13—热偶规;14—热偶真空计;
15—U型水银压力计;16—热电偶;17—XCT-101 测温计;18—放气阀;19—真空蝶阀;20—电磁阀;
21—真空泵;22—排废气管;23—电流表;24—电压表;25—五通。

②真空系统。真空系统包括真空室(辉光室),由真空泵 21、放气阀 18、真空蝶阀 19、电磁阀 20、排气管等部分组成。真空室采用双层水冷结构。在真空罩和炉基之间用橡胶垫密封。工作时启动真空泵(2X-15 型)将真空室抽到要求的真空度,废气从排废气管排出。

③测量系统。包括测量温度、测量压力和测量电流电压部分。通过它们能反映出氮化处理情况。温度测量用热电偶 16,把它插入阴极底盘部,通过连接导线或者热电偶补偿导线接到 XCT-101 调节式毫伏计上,来实现对工件温度的测量。当压力低于 $1.3 \times 10^2\text{Pa}$ 时,由热

偶规通过热偶真空计 14 测量;当压力在 $1.3 \times 10^2 \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^3 \text{Pa}$ 时,由 U 型管水银压力计进行测量。

④供电系统。供电系统即电源部分。它由三相变压器、整流器、电感、电容、振荡灭弧等部分组成,输入电压为交流 380V,输出为高压直流脉动电流,最大输出电压为 1000V,最大输出电流为 30A。

3. 炉子结构需要考虑的几个问题

①炉子结构紧凑合理。为使炉子结构紧凑合理、外型美观大方,把真空泵安放在炉体的下部。控制开关、真空蝶阀、手柄安置在真空室下部前方,便于坐着操作,改善劳动条件。

②真空系统调节灵活方便。炉子的真空度及氮气的压力大小直接影响氮化层的质量。抽气速率的灵活调节可以保证炉内保持一定的压力。排气管路安有真空蝶阀,通过蝶阀手柄可以在一定范围内调节抽气速率,使炉内压力控制在规定压力范围内。在真空室中配有放气阀,当工件处理完毕时,将放气阀打开、自动向真空室中放气,随后取出工件。

③真空炉罩的结构。真空炉罩的外型大小取决于处理工件大小和形状。一般采用钟罩形。考虑到处理长工件,采用笼屉式的结构,处理直径大而短的工件,用一节加封头。如处理轴类长工件,可再接上一节。真空炉罩结构采用双层水冷结构。用以保护橡胶密封件。内层钟罩表面要光滑,以降低出气量及对水气的吸附,以便提高真空度。

④真空系统的密封。在氮化处理时,炉内氮气压力应保持在 $1.3 \times 10^2 \text{Pa} \sim 6.6 \times 10^2 \text{Pa}$ 。但在通氮气前先将空气抽除,真空度要求在 $1.3 \text{Pa} \sim 6.6 \text{Pa}$ 内,而且能达到设备的设计极限真空。

⑤经过炉基的引线要很好地绝缘、阴极、阳极与热电偶的引线穿过炉基,它们与炉基之间要求绝缘,绝缘材料采用聚四氟乙烯。

九、真空钎焊

(一) 概述

真空钎焊是在真空气氛中,不用钎剂而进行钎焊的一种方法。最初仅在电子工业中钎焊铜和不锈钢。20 世纪 40 年代后期,随着航空工业的发展,真空钎焊成功地解决了发动机制造中的焊接问题。它广泛地用于宇航、原子能、电子化工、石油、医疗器械、工具制造、汽车制造中。但是,真空钎焊设备一次性投资大,使用时消耗费用高,维修较复杂,装配定位要求高,且钎料不宜含易挥发性元素,因此,应用受到一定限制。

真空钎焊与其它钎焊方法相比,具有如下的优越性:

①适宜钎焊不锈钢、高温合金,尤其是含铝、钛量较高的耐热合金,能获得优质的钎焊接头。同时还适合于钛、锆、铌、钼、钨、钽等同种难溶合金或异种金属的焊接。

②在加热过程中,零件处于真空气氛中,不会出现氧化、增碳、脱碳、污染变质等现象;且零件整体受热,热应力小,可将变形量控制到最小程度。

③基体金属和钎料周围为低压环境,能排除金属在钎焊温度下释放出来的挥发性杂质和气体,基体金属本身的性能也获得改善。

④真空钎焊不用钎剂,不会出现气孔、夹渣缺陷。还可省掉钎焊后清洗工序,节省时间,改善劳动条件。不用钎剂,对焊铝及其合金特别有利,因留在零件上的钎剂会产生腐蚀。

⑤可将零件热处理工序与真空钎焊一起进行,也可将钎焊安排为最终工序。

⑥真空钎焊后的零件表面清洁光亮,易于检查钎缝质量。

⑦可钎焊多道相近的钎缝,而且可根据炉子的容量,同炉钎焊多个组件,是一种高效的钎焊方法。

(二) 真空钎焊原理

钎焊时金属表面的氧化膜影响液态钎料对基体金属的润湿性。钎焊过程中,如果不能有效地除去基体金属表面的氧化膜,就难以形成优质钎焊接头。不同的钎焊方法采用不同的除氧化膜和防氧化措施。一般钎焊方法都是以钎剂的化学作用或者以还原气氛的还原作用来去除氧化膜的。

真空钎焊虽然没有钎剂的化学作用和还原性气氛的还原作用,不过,真空降低了钎焊区的氧分压,可以除去焊件表面的氧化膜,保护焊件不被氧化。这样在真空气氛中钎焊就能够获得高强度、光亮致密的接头。

1. 除金属氧化膜

真空钎焊时去除氧化膜的机理,有如下几个方面:

①氧化膜在高温、高真空中可自行分解。真空钎焊时,只要氧化物的分解压力大于真空系统中氧分压,零件表面的氧化物就会自动分解。表 10-75 是通过热力学计算得出的各种氧化物分解压力。可以看出,只有少数几种金属的氧化物在钎焊条件下可以自行分解。大多数金属氧化物不能分解。因此,氧化物自行分解不是真空钎焊时去除氧化膜的主要因素。

表 10-75 某些金属氧化物的分解条件

金属氧化物	1360K 时的分解压力 /Pa	金属氧化物	1360K 时的分解压力 /Pa
CuO	478	SiO ₂	10^{-11}
NiO	10^{-3}	MnO	10^{-17}
CoO	10^{-5}	B ₂ O ₃	10^{-18}
Fe ₂ O ₃	10^{-7}	V ₂ O ₃	10^{-18}
MoO ₂	10^{-7}	TiO ₂	10^{-22}
WO ₂	10^{-8}	Al ₂ O ₃	10^{-27}
Cr ₂ O ₃	10^{-8}		

②金属元素和金属氧化物的挥发破坏了金属表面的氧化膜。表 10-76 是一些金属和金属氧化物的挥发条件。

表 10-76 某些金属和金属氧化物的挥发条件

金属元素	在 10^{-2} Pa 时的挥发温度 /℃	金属元素	在 10^{-2} Pa 时的挥发温度 /℃	金属氧化物	在 10^{-3} Pa 时的挥发温度 /℃
Mn	790	Ti	1249	MnO ₂	600
Al	808	Ni	1257	WO ₂	800
Cr	992	Co	1362	NiO	1070
Cu	1035	V	1584	V ₂ O ₃	1000~1200
Si	1115	Mo	2093	Cr ₂ O ₃	1900
B	1140	W	2760		
Fe	1194				

由表 10-76 可知,在较高的真空条件下,某些金属元素的挥发温度并不高。金属氧化物(MnO₂、WO₂ 等)一旦挥发了,就除去了这些氧化物。

③钎焊铝及其合金时去除氧化膜的机理是,由于 Al₂O₃ 的热膨胀系数只有铝的 1/3,加热

时,铝及铝合金急剧膨胀,使得 Al_2O_3 膜开裂,液体钎料由裂开处流入氧化膜层下,把氧化膜揭起并进一步挤碎所致。

④对高合金钢而言,是由于氧化物破裂,钎料渗入后与碳反应产生二氧化碳。对铝合金而言,是由于 Al_2O_3 与碳作用生成了低价氧化物。钛合金则是因为表面化合物(C、N等)增厚而破裂。

真空钎焊可以去除铝、钛等氧化膜,因而提高真空度和钎焊温度,有利于除去金属氧化膜。

2. 液态钎料对基体金属的润湿

液态钎料润湿基体金属表面是形成钎焊接头的必要条件。衡量液态钎料对基体金属润湿性的指标是润湿系数,它是液态钎料、固体金属和钎焊气氛三者之间互相作用的结果。如图 10-122 所示,可通过公式计算

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{固气}} - \sigma_{\text{固液}}}{\sigma_{\text{液气}}} \quad (10-109)$$

式中 $\cos\theta$ ——润湿系数;

$\sigma_{\text{固气}}$ ——固体金属与钎焊气氛之间的界面张力;

$\sigma_{\text{固液}}$ ——固体金属与液态钎料之间的界面张力;

$\sigma_{\text{液气}}$ ——液态钎料与钎焊气氛之间的界面张力。

上式中 $\cos\theta$ 值越大,表示润湿性能越好,一般要求 $\cos\theta$ 值不小于 0.94(即 $\theta \geq 20^\circ$),提高 $\cos\theta$ 值的措施有:

①提高 $\sigma_{\text{固气}}$ 。在一定的真空度下钎焊某种材料时, $\sigma_{\text{固气}}$ 是一个定值,主要由基体金属的性质来决定。但是,基体金属的表面情况对 $\sigma_{\text{固气}}$ 的影响极大。表面的油污,锈蚀会大大降低 $\sigma_{\text{固气}}$ 值。因此,真空钎焊前清除零件表面的油、锈等污物,可提高 $\sigma_{\text{固气}}$ 值。

②减小 $\sigma_{\text{液固}}$ 。在固体金属和液态钎料面上,如存在氧化膜,就会妨碍液态钎料与基体金属的接触。削弱它们之间的附着力,使得液态钎料内部原子的内聚力和界面附着力的比值发生变化, $\sigma_{\text{液固}}$ 增大,润湿系数减小。因此,保证钎焊时炉内的所需真空度,可以有效地除去金属氧化膜。

③降低 $\sigma_{\text{液气}}$ 。在钎料中加入少量表面活性元素(Li、Si、B等)是降低 $\sigma_{\text{液气}}$ 的有效途径。

真空钎焊时,气相为压力极低的真空气氛,提高真空度能有效地降低 $\sigma_{\text{液气}}$,改善钎料的润湿性。

④提高钎焊温度。提高钎焊温度,使金属的原子活动能力增强,既可降低 $\sigma_{\text{液气}}$,又可降低 $\sigma_{\text{固液}}$,提高了钎料的润湿性。但是,钎焊温度的选择,首先应考虑对基体金属性能的影响,不能单考虑润湿性能。

3. 液态钎料与基体金属间的相互作用

液态钎料如果能够润湿基体金属,则在毛细作用下填满接头间隙,形成钎焊接头。此时,能否形成优质的钎焊接头,还要根据液态钎料与基体金属之间的相互作用来决定。

(1) 钎料元素向基体金属的扩散

钎焊时,钎料中合金元素会从高浓度向低浓度扩散,扩散量和扩散速度除与元素的浓度梯度有关外,还与扩散面积和扩散时间成正比。

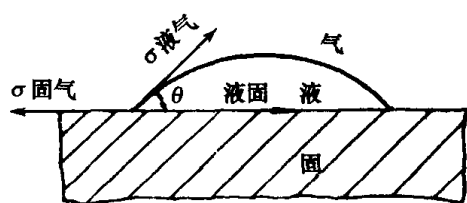


图 10-122 液态钎料对固体金属的润湿

扩散系数随着温度的升高而增加。扩散结果,在靠近基体金属的钎缝附近形成固溶体,这是钎焊时希望得到的钎焊接头组织。

当钎料元素能与基体金属形成共晶体时,钎料组元会向基体金属的晶界扩散,其扩散量随着元素在基体中溶解度的减小而增大。钎料元素扩散至基体晶界,形成的低熔共晶体叫做晶间渗入。由于它较脆,对接头性能有不良的影响。

(2) 基体金属在液态钎料中溶解

如果基体金属和液态钎料是互溶的,在钎焊过程中,一部分基体金属有可能溶解于钎料中。只要溶解量在适当的范围内,对于接头性能是有利的。但溶解量不适当时,则使钎料的熔点提高,从而产生焊不透等缺陷。基体金属如过多地溶解到钎料中,则在基体金属上就会出现凹陷,甚至溶穿的现象。这种缺陷叫做溶蚀,必须避免。

影响基体金属在液态钎料中溶解的因素有:

①钎焊温度。通常,随着钎焊温度的升高,原子的扩散系数增大,基体金属向液体钎料的溶解量也增大。

②钎焊保温时间愈长,基体金属的溶解量就愈多。延长保温时间会使钎料充分地扩散至基体内。当溶解度达到饱和后,基体金属即在钎料中溶解。

③与合金状态图有关。基体金属在钎料中的溶解量随着钎料在基体金属中的溶解度的减小而增大。例如,使用 Ni-B 钎料钎焊镍时的溶蚀倾向比使用 Ni-Si 钎料时要大些。这是因为硼在镍中的溶解度比硅小的缘故。在 1200℃ 时,硼在镍中的溶解度极小,而硅的溶解度可达 7.5%。

(3) 钎缝组织

①在合金状态图上,如果基体金属能与钎料形成固溶体,或者基体金属与钎料合金的基体元素相同,则可得到固溶体组织的钎焊缝。这些钎焊接头塑性好,强度高,是理想的钎焊接头组织。

②金属间化合物组织。金属间化合物一般硬而脆,会降低接头的塑性和强度。特别是当化合物形成连续层时,影响更大。因此,应尽量避免钎缝中出现化合物组织。

(三) 真空钎焊设备

1. 钎焊技术对真空设备的基本要求

真空钎焊时,零件是在氧分压较低的真空容器中加热、保温、冷却而形成钎焊接头的。因此,真空钎焊工艺对设备有如下要求:

①加热室应能容纳被钎焊组件;

②炉内真空度应能满足钎焊工艺要求,尤其是当钎料中含蒸气压高的元素时,设备应具有控制钎料中合金元素挥发的能力;

③加热室温度应能精确控制和自动调节;

④加热室的全部构件必须具有一定的机械强度和热强度的稳定性以及几何形状的稳定性;

⑤应具有强制冷却机能,一则满足某些材料的热处理要求,二则缩短钎焊周期;

⑥设备的控制系统应能获得理想的空载和装载时的特性曲线;

⑦设备的自动保护装置应先进可靠,确保安全。

2. 真空钎焊炉的分类及主要部件

(1) 分类

按照结构特点,真空钎焊炉有表 10-77 所表示的几种型式。

表 10-77 真空钎焊炉的分类

真 空 钎 焊 炉			
热 壁		冷 壁	
立 式 或 卧 式			
单套真空系统	双套真空系统	无气淬装置	有气淬装置

热壁真空炉既可用作真空钎焊,又可用作还原气氛、惰性气体保护钎焊炉。当把真空容器从加强炉中取出进行冷却时,其冷却速率基本上可以达到气淬要求。

在热壁炉中进行钎焊的零件受热主要是靠炉壁的热传导,钎焊温度一般不能高于 1150°C ,否则,炉壁热强度不足。现代航空发动机高温部件的钎焊,有的超过了 1200°C 。如果用加厚炉壁来提高强度,就会使热壁炉的热效率降低。所以这种热壁式真空炉使真空钎焊技术受到了一定限制。

在热壁真空炉的基础上发展起来的冷壁真空炉,不用隔热式的炉壁而用水冷式的炉壁。这样就使得炉壁材料可以使用一般钢或不锈钢即可承受外部的压力。冷壁真空炉靠炉内的辐射屏,把加热元件的热量辐射到工件上,热量损耗较小。

冷壁真空炉根据工件装卸的需要,同样可做成立式的或卧式的。立式冷壁真空炉的结构如图 10-123 所示。

一般手工操作的真空炉由炉体、抽真空系统、测量控制系统及供给系统组成。下面将简述炉体及抽真空系统。

(2) 炉体

炉体主要指真空室的外壳及位于真空室中的全部构件。外壳起承受外界大气压力、散失炉内热量等作用。大中型炉壳采用双层钢板圆筒结构;小型炉子外壳可用单层结构,外面绕以蛇形冷却水管。

加热室的作用是:承受载荷(夹具、工件等)、向焊件提供热量。它包括加热元件、辐射屏、绝热层、炉床、冷却管等部件。

加热元件的材料,高温炉一般用钼(丝、片)、石墨(管、棒、片)或钨(丝、棒)。低、中温炉可用镍铬合金或铁铬铝合金(丝、片)。

辐射屏用钼板或钨板与不锈钢板一起使用。其厚度按炉子大小可选用 $0.3\text{mm}\sim 1.0\text{mm}$ 。辐射屏的层数按炉子的最高加热温度而定。 1600°C 以下为 6 层~8 层, 1700°C 以上为 8 层~12 层。各层间距为 $5\text{mm}\sim 15\text{mm}$ 。

(3) 真空系统

用于钎焊的真空炉,要求具有中、高真空度。真空系统可选用:

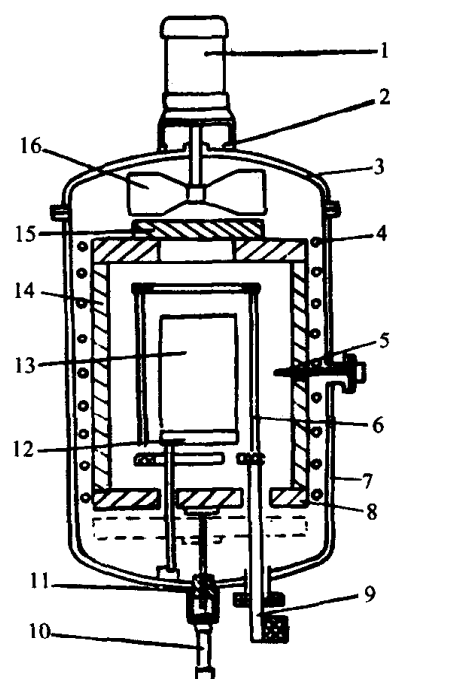


图 10-123 立式冷壁真空炉结构示意图

- 1—风扇电机;2—环形真空密封;3—水冷罩;
4—热交换器;5—控制热电偶;6—加热元件;
7—水冷罐;8、15—可伸缩隔热板;
9—馈电接头;10—收放油缸;11—真空密封;
12—装载架;13—负载;14—隔热板;16—风扇。

①机械泵 + 油扩散泵;

②机械泵 + 增压泵或罗茨泵 + 油扩散泵。

3. 典型真空炉简介

VFC-524-R(S)真空炉是美国伊普森公司的产品,简介绍下。

(1) 技术性能

额定功率:207kW;

额定电压:380V(三相、50Hz),58V(三相、50Hz);

允许使用的温度范围:500℃~1315℃;

温度稳定性:±5℃;

加热方式:电;

极限真空度: 4.6×10^{-4} Pa;

工作真空度: 1×10^{-3} Pa;

泄漏率: 1×10^{-10} Pa·L/min;

有效均温区:长×宽×高=910mm×610mm×610mm;

最大装载量:270kg;

炉内压力自动调节范围:6.6Pa~ 1×10^{-1} Pa;

允许使用的冷却气体:高纯氩气和氧气;

冷却水消耗量:正常 2.5m³/h,

快速 8m³/h;

每炉冷却气体消耗量:6m³;

每炉压缩空气消耗量:0.2m³;

冷却方式:真空冷却、气体冷却、气体风扇快速冷却;

抽气速率:机械泵 141.6L/s,

扩散泵 118L/s;

升温速率:在 100℃~1200℃/h 内分四段式无级调节。

(2) 结构形式

伊普森 VFC-524-R(S)型真空炉是一种卧式单室(加热冷却在同室进行)冷壁炉、其结构主要由炉体、加热室、抽气系统、电气控制部分、附件五大部分组成。

①炉体:如图 10-124 所示,炉体是一个具有水套结构的双壁钢质圆筒。前门与炉体用 O 型橡胶圈密封。水套结构的内壁和外壁分别用不锈钢和碳素钢制成。炉体右侧壁有三个法兰,用以安装工作热电偶校准热电偶及电离规。炉体左侧壁上也有三个法兰,一个用以安装超温控制热电偶,其余两个用盲板封住,作为检测时用。在真空室的顶部装有一个 18.4kW 真空密封的风扇电机,真空室底部有一个用来充中性冷却气体和调节炉内压力的气孔。在真空室的后部右侧壁上有一个与机械泵相接的排气口,在真空室前部右侧有与高真空阀连接的排气孔。在后部有控制加热室上塞盖作横向运动的气缸、安全报警喇叭和排水管、汇水槽。在底部有控制加热室下塞盖作纵向运动的气缸。在炉体左侧壁上有三根电流汇流排,引入加热室。

②加热室:加热室是由 5mm 厚的不锈钢板作壳体,用 50mm 厚的氧化铝纤维衬里,并用铝片和铝钩固定。如图 10-124 所示,12 根 $\phi 40$ mm 的石墨棒在加热室顶部均匀分布。炉床由高强度石墨构件组成。加热室有前门和上下盖,在加热室外部与冷壁之间有四个铜质热交换器,在加热室外壁有 6 根铜质冷却水管。加热室整体是利用两个导轮悬挂在真空室内。

③抽气系统:如图 10-125 所示。抽气系统包括:一台 7.5kW 抽速为 141L/s 的 STOKES412H 型单级旋片式机械泵,加热电炉功率为 12.25kW EDWARDS HS 20 型三级分馏式油扩散泵,一个油尘分离器,一个冷阱和高真空阀。在高真空阀顶部有控制高真空阀开关的气缸、压力表、手调中性气体进气压力开关、手动空气释放阀、两个热电偶真空计测量头,一个气体压力计。

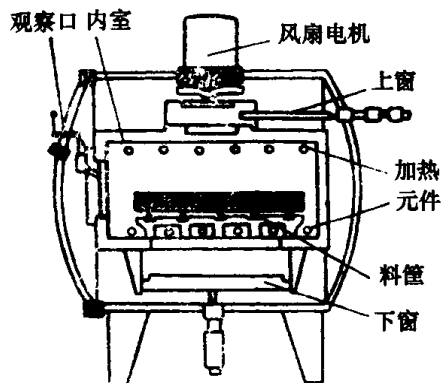


图 10-124 冷壁真空炉结构图

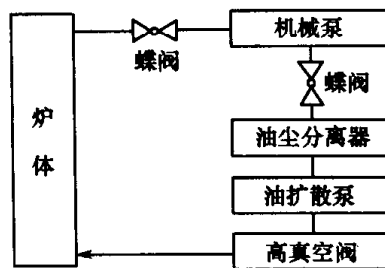


图 10-125 抽气系统方框图

④电气控制部分:电气控制部分主要由电源和控制柜组成。电源是一个磁饱和电抗器和控制变压器。在一个三开门式控制柜内主要包括:长图温度记录仪、真空计+长图真空记录仪、超温温度调节器、程序控制器、加热电流控制器、扩散泵油温控制器、3个单相加热电流表、差值放大器、功率放大器、冷却速率控制系统、时间继电器、电磁阀、操纵按钮、转换开关、各种指示灯、限位开关、联锁装置、声光指示报警装置。

⑤附件:主要包括置于炉体底部的 16kW60℃ 水加热器、电离真空计、8m³ 的中性气体储存罐、液压装载小车、加热室维修架、氮质谱检漏仪。

设备自动化程度高。设备启动后,机械泵首先对抽气管道预抽真空 3min~5min(由时间继电器控制),然后自动对真空室抽真空。当炉内压力达到 6.6Pa 以后,又自动转换(机械泵→油尘分离器→扩散泵)对真空室抽真空。当炉内压力达到工艺要求时便开始升温。伊普森程序器自动控制加热速率、保温温度、保温时间。设备在未启动前,按照工艺规程操作,当炉内压力达到要求之后,则自动进行加热-保温程序。保温结束后按三种方式(真空冷却、气体冷却、风扇冷却),五种冷却速率(真空冷却,气体回火冷却速率、气体淬火冷却速率、风扇回火冷却速率、风扇淬火冷却速率)自动冷却。保护和连锁系统相当完善,任何一部分发生故障都能自动停机,同时发出声和光的报警信号,便于查找故障。例如 4×10^4 Pa 触点确保风扇电机在低压下不烧毁。

设备维修方便。石墨棒加热元件可单件从炉室直接更换,整体加热室可用托架移出真空室外,进行修理。控制柜导线接头布局整齐,标记清楚,一旦出现故障,便有声光信号指示,易于寻找故障源。其它元件更换也方便,例如钼片可单片更换,大大降低了设备的维修费用。

(四) 真空铝钎焊设备

根据真空铝钎焊工艺的特点,对真空铝钎焊炉的要求,在真空度、漏气率、热区温度均匀性上都比真空热处理炉的要求高,这样才能满足工艺的要求。真空铝钎焊炉的机械部分如图 10-126 所示。炉子结构可以分为下列部分:①炉体部分;②真空系统部分;③气体强制循环冷却装置;④充气装置;⑤电气控制部分。

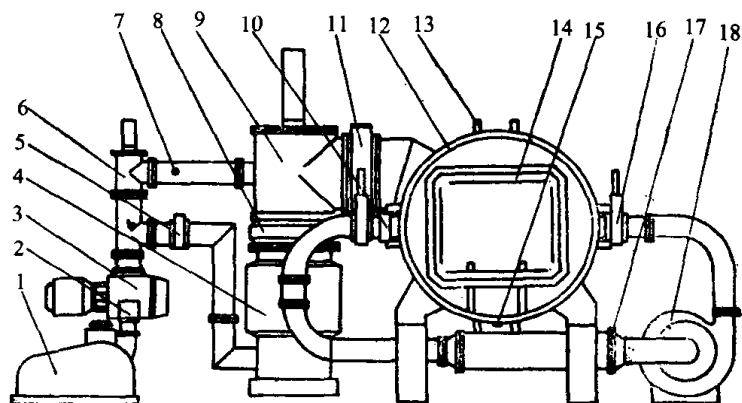


图 10-126 真空铝钎焊炉机械部分

1—机械泵;2—低真空阀;3—罗茨泵;4—油扩散泵;5—气动蝶阀;6— $\phi 150$ 真空阀;7—放气阀;8—冷阱;
9— $\phi 600$ 真空阀;10—调节阀;11—镁捕集器;12—炉体;13—电极;14—发热体;15—充气阀座;
16—气动插板阀;17—热交换器;18—真空风机。

1. 炉体部分

炉体由双层碳钢圆筒组成,前后设置两个炉门,便于布置前后发热体及炉内清洁之用。加热室由奥氏体不锈钢的框架及隔热屏构成。发热体由镍铬电阻材料制造,由氧化铝陶瓷支承并固定在框架上。隔热屏由奥氏体不锈钢薄板制造,并应解决在高真空下抽气及高温下薄板因热膨胀变形问题。前后发热体及隔热屏分别固定在各自的炉门上。六个面的发热体分别由六组单相电源供电,当炉内工件质量分布不匀时,可根据不同需要供给不同功率。为了防止氧化镁或镁蒸气进入真空系统,在炉体和真空系统连接处设置镁捕集器。

2. 真空系统

由于真空铝钎焊炉冷炉真空度要求达到 10^{-4} Pa,工作真空度要求 10^{-3} Pa,所以,用油扩散泵作主泵是合适的,但其抽气能力要比相应的真空热处理炉配置的油扩散泵为大,前级泵为旋片式机械真空泵。为了减少粗抽时间,设置一台合适的罗茨泵是必要的。

3. 气体强制循环冷却装置

为了提高生产率,缩短工件在炉内冷却时间,减少焊料中的硅向基体扩散,同时避免在炉内设置冷却水管,故采用炉外循环冷却方式,其结构由真空风机、热交换器、气动插板阀、调节阀和管路组成。在必要时,气动插板阀可使该装置与炉体隔离。

4. 电气控制部分

该部分设有六台单相磁性调压器供给六组发热体电源之用。控制柜分为真空操作控制柜和温度控制柜。真空操作控制柜设有图示操作板,显示真空系统的真空泵和阀的工作状态。复合式真空计显示炉内真空度。真空继电器是在炉内真空度下降时自动关闭主升温装置,供用户需要时任意选用。

十、真空电子束焊

(一) 概述

电子束焊是 20 世纪 60 年代发展起来的新技术,最初用于原子能工业、航空与航天工业中贵金属和特种金属的焊接,后来也广泛用在一般工业中。

电子束焊和其它焊接方法比较,具有如下一些优点:

①由于电子束焊通常都在真空中进行,因而可以焊接锆合金、钛合金、铍等这样一些在高温下极易与大气反应的材料,以及钨、钼、钽、铌等难熔合金及氧化铝、氧化铍陶瓷材料。

②电子束焊不需要热传导,由电子直接输送热能量,热输入量少而焊缝窄。焊接相同厚度金属时,熔池容积可缩小到钨极氩弧焊的 $1/25$,焊接速度也很快,电子束焊的焊缝窄,输入热量最少。由于这种焊接不需使用焊剂和焊丝,因此不存在污染问题。电子焊的功率密度与电压 V 的 $(7/4)^2$ 、电子束电流 I 的 $(1/4)^2$ 成正比。经研究证明,电子束焊对基体金属有以下影响:

a. 焊接热影响区晶粒细小。因为输入热量少,阻止晶粒长大,故焊接热影响区晶粒细小,避免了原高温下变脆而使难于加工的热脆性现象。晶粒细小也使热影响区塑性—脆性转变点的温度下降,增加其塑性。

b. 耐蚀性能好。焊接不锈钢温度在 800°C 时会析出碳,使焊接件的耐腐蚀性能下降。电子束焊时因焊件处于高温下的时间极短,几乎无碳析出,所以不会出现晶界腐蚀而导致机械性能的下降。

c. 组织应力减少,故变形量极小。电子束焊熔池比电弧焊的小,故热膨胀和收缩量都小,因而凝固过程中产生的微观裂纹也少,这样就避免了容积随相变而产生的缺陷。

③能准确控制焊接热源,焊接条件的再现性好。

④能方便而有效地控制电子束加速电压、束电流、焦点、焊接速度等,因而焊缝的宽窄、熔深的调节范围都很宽。

但电子束焊也有缺点,主要是:

①电子束焊机价格较高,真空电子束焊机焊接室的大小限制了焊接零件的尺寸。由于焊接室需要抽真空,因而焊接生产周期较长,生产效率较低。

②所有电子束发生系统都在超过 22kV 的电压下工作,因而会产生 Moka 线和 X 射线。加速的电压越高,发射的 X 射线强度越大。因此要采取必要的保护措施。

通常必须把 X 射线漏泄率控制在 10^{-4}R/h 以下。对加速电压为 35kV 以下的低压型电子束焊机,焊接室应用 12.7mm 的钢板屏蔽。在此电压级以上,真空室外需要包一层铅板。加速电压为 100kV 时,铅板最小厚度为 1.5mm , 150kV 时应为 2.3mm 。焊接室的观察窗要用钢化玻璃和铅玻璃制造,也有采用不锈钢和混凝土保护电子束发生装置。

③不易用于复杂焊缝的焊接。

(二) 电子束焊原理

轰击焊接件的高速电子能稍微穿透到金属焊接件表面的下层,在该处与零件撞碰并释放出大部分能量。此能量最初传递给点阵的电子,然后传给整个点阵,并加剧点阵的振动,使温度显著升高,从而使金属局部熔化和蒸发。蒸发蒸气的密度当然比固体低得多,在蒸气触动熔融材料的情况下,电子束更易透进。电子束和此蒸气的相互作用便在该区域形成等离子体。电子束、等离子体以及它们和材料的相互作用,获得非常大的穿透能力,而得到对接合有利的大的深宽比。熔深 H 与熔化宽度 B 的比值简称深宽比。最近证明,熔融区域形状和深度与电子束功率密度有关,随着功率密度增加,熔深增大。熔深与功率密度的关系曲线示于图 10-127。

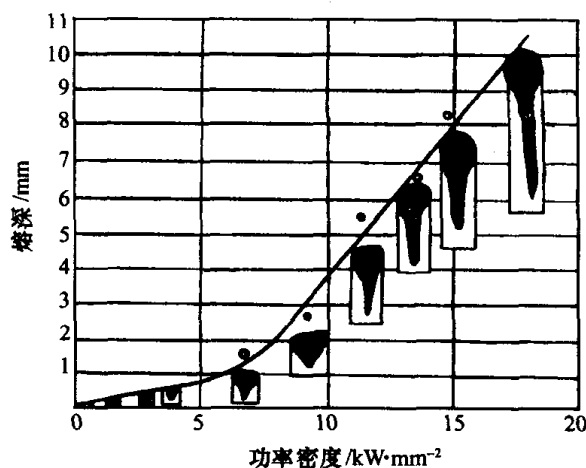


图 10-127 功率密度与熔深的关系

电子束焊接过程示于图 10-128。当高功率密度的电子束轰击到零件表面时,首先在 P_1 处穿透表面一个很小的深度 X_m ,这 X_m 薄层基本上能透过高速电子。接着在较深区域内,经过多次碰撞,电子束被散射,使零件内部一个梨形体积范围内的温度升高、材料熔化、内部压力增大(图 10-128(a))。在此内压力作用下,零件表面的 X_m 薄层裂开一个小口 O_1 ,内部高压高温的液体蒸发所形成的蒸气,从裂口 O_1 中喷射出来,并在小口周围形成一个液态的环形堤坝。之后这个环形堤坝对蒸气流的喷射起到了阻挡和压缩作用(图 10-128(b))。由于梨形区域内材料的气化,密度减小,因而电子的散射减弱,同时由于蒸气在高速电子碰撞下电离,起等离子弧的自磁压缩效应,电子束将不仅能继续穿过密度较低的蒸气,而且又被聚集起来打向第一个梨形区域的底部 P_2 。

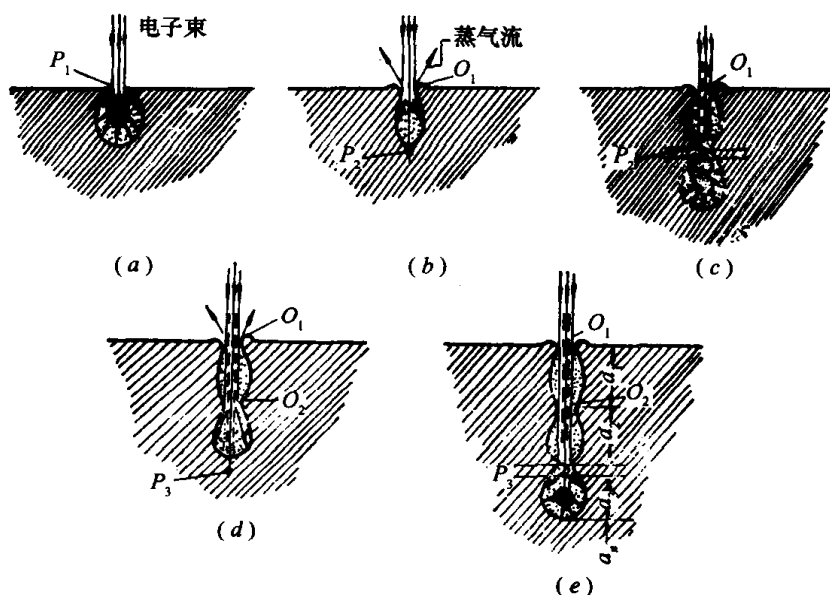


图 10-128 电子束焊机理示意图

这样,整个过程又重新从 P_2 的位置上开始重复进行(图 10-128(c))。电子束将再次穿透一个很小深度 X_m ,加热下一个梨形区域(图 10-128(d))。如此反复,直到电子束的能量耗尽为止。

当电子束轰击点移开之后,由于表面张力的作用,零件表面上的液体环形堤坝又从裂口 O_1 流回到零件内部,汇成内部的材料蒸气,一起冷凝下来形成焊缝。

(三) 电子束焊设备

所有电子束焊设备系统,都由如图 10-129 所示的部分组成,只是各类型的细节有所不同。此系统包括枪、可控电源、真空室、真空泵、操作和控制机构工作台。

1. 电子枪

电子枪是电子束焊装置最重要的组件。从原理上来说,电子枪实质上是一个能够加速和一定程度聚焦的电子光学系统,主要由两部分组成:①产生电子束的部件,即阴极和有关加热附件;②形成场的部件,这些部件使从阴极发射出的电子形成所需要的电子束形状。

阴极可以是自热式,也可借轰击间接加热,可制成发针或棒状。通常根据所需的性能 and 操作环境来设计各种电子发射器。电子束焊机通常用钨和钽阴极,也有加入硼化钨的。

评定电子束发射器材料的标准是它的逸出功,即是产生自由电子所必须克服的势能垒。表 10-78 列出了某些重要发射材料的逸出功值。利用强度足够大的电场,可以聚集所有可能利用的电子,在温度 T 的饱和电流密度为

$$I = AT^2 e^{-b_0/T} \quad (10-110)$$

式中 I ——电流密度 $[A/cm^2]$;

T ——温度 $[K]$;

A 和 b_0 ——常数,决定于取材; A 的近似理论值为 $120A/(cm^2 \cdot K^2)$ 。最近研究证明钨的 A 值为 60,钼为 55,钽为 40。

表 10-78 某些发射材料的逸出功

物 质	逸出功/eV	物 质	逸出功/eV
钨	2.1	铯	4.75~5.1
在氧化钨上的钨	1.0	钽	4.03~4.19
六硼化钨 BaB_6	3.45	六硼化钪 ThB_6	2.92
碳酸钨	10~1.5	涂钪的钨	2.5~2.6
六硼化钨 LaB_6	2.66	钨	4.25
钼	4.15~4.44		

实际设计电子枪所用电流通常小于它的饱和电流。饱和电流指的是为操作所限制的空间电荷。这种操作方式与阴极的温度无关。流过两平行板间的电流服从齐尔定律(Childs Law)

$$I_{\text{空间}} = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V^{3/2}}{D^2} \quad [A/cm^2] \quad (10-111)$$

式中的 D 为两极之间的距离; V 为加速电压。只要导入适当的常数,加速电压的 $\frac{3}{2}$ 次方实际上对各种形状电极都是正确的。

虽然上述两方程可作为电子枪设计的基本依据,但实际上要设计出性能优异的电子枪是不容易的。只有选择合适的结构材料,准确确定电子枪的操作环境,以及所需的电子束形状,才能设计出令人满意的电子束发生系统。最重要的是要准确确定电子枪的工作环境,因为沾

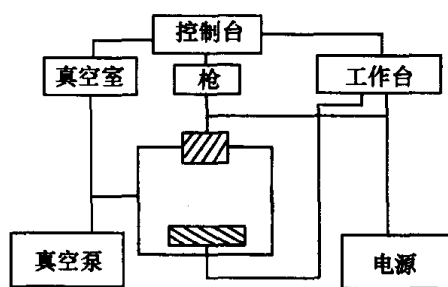


图 10-129 电子束焊机方块图

污会剧烈影响大多数阴极材料的电子发射性质。

有各种各样的电子束发生系统,但目前常用的主要有两种:皮耳斯(Pierce)型电子枪系统和斯迪格瓦尔(Steiger Wald)型电子枪系统。皮耳斯系统适用直接或间接加热阴极,而斯迪格瓦尔型系统主要是靠直接加热供给电子,从系统中发射出来的电子经电磁或静电透镜一级或多级聚焦。目前所生产的很多电子枪系统都设有振荡偏转装置,甚至能进行程序控制和使电子束按各种所需轨迹移动。

2. 工业用焊接系统

各种电子枪都沿用高质量的经过滤波和稳压的电源。滤波和稳压级取决于电子枪的系统,且在较大程度取决于电子枪的需要。

不管采用何种焊接方法,都可以把焊接系统分为两类:能焊接各种形状焊件的通用系统和专用系统。后者是为了解决特殊接合问题。目前美、法、英、德、日本、俄罗斯等国都制造出了具有各种质量和工作范围的电子束系统。当前在欧美用得更多的是哈密尔顿(Hamilton)焊机和西雅基(Sciaky)焊机。这两种焊机的真空室大,可以在宽的工作范围操作,也可以使电子束跟踪运动或偏转,可以按各种不同大纲或程序工作。哈密尔顿标准系统使用的是固定式的斯迪格瓦电子枪,而西雅基电子束焊机使用的是经改进的可移动的皮耳斯枪。大多数电子束焊接设备的功率可到 30kW,而且常在 30kV ~ 150kV 电压下工作。

硬真空电子束焊机如图 10-130 所示,此为哈密尔顿标准分公司生产的标准型电子束焊机。该电子束焊机各部分是独立的,可以单独更换,共分为五个主要部分:

①电子光学组件 利用自加速型斯迪格瓦尔型电子枪形成焦深很长的尖细聚焦电子束,由电磁透镜能把 6kW 的电子束聚焦成直径为 0.4mm 的束点。电磁透镜下方设有偏转线圈,电子束在线圈下方 300mm 处可以沿 X、Y 方向偏转,偏转的最大幅度为 16mm。

②焊接室 在焊接室内 X 方向上安装了齿条, Y 方向安装了滚珠丝杠,构成无间隙传动的工作台。工作台尺寸为 X 长 650mm, Y 长 430mm。工作台上设有焊接夹具和安装焊件用的 T 型槽。

③抽真空系统 抽真空系统安装在焊接室后面。控制盘上用开关控制所有真空泵和真空阀。在约 2min 可以达 13.3Pa (10^{-1}Torr), 5min 可达 0.0133Pa 。

④高压电源 单独设在油槽内。从 6kW 的高压电源可获得 150kV、40mA 的输出功率。输出功率决定于高压电源的大小。为了延长灯丝使用寿命,控制好开始焊接时电子束上升的时间,装备了灯丝电流渐增电路。

⑤控制台 电子枪控制部分, 低压电源、继电器盘都安装在控制台上。

软真空电子束焊机如图 10-131 所示。当装卸焊件而需要打开焊接室时, 可以用隔离阀把

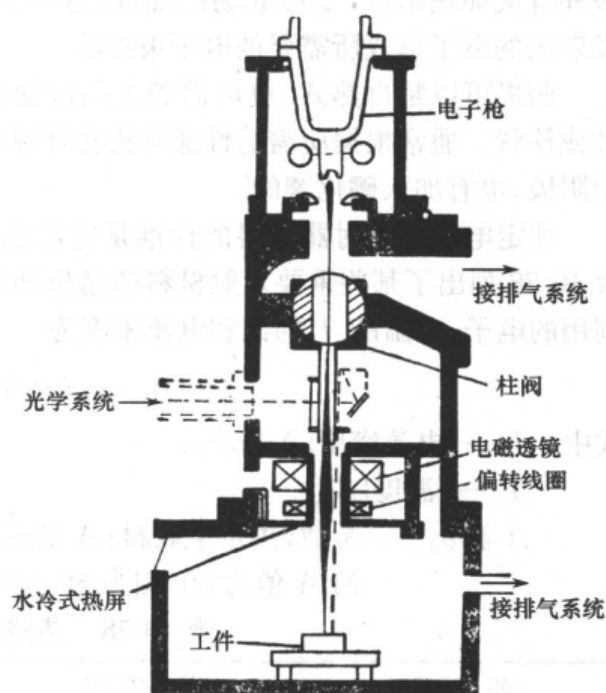


图 10-130 EBW(6)523636 电子束焊机的结构

高真空的电子枪室与焊接室隔开。

图 10-131 所示为 12 工位旋转工作的软真空电子束焊机。

图 10-132 所示为 LAEBW 电子束焊机示意图。这种焊机可以用于切割或焊接,不需在真空内操作,可以于惰性气体、大气或水中焊接。

图 10-132 所示为用电池工作的轻便式电子束焊机,适宜在空间焊接。

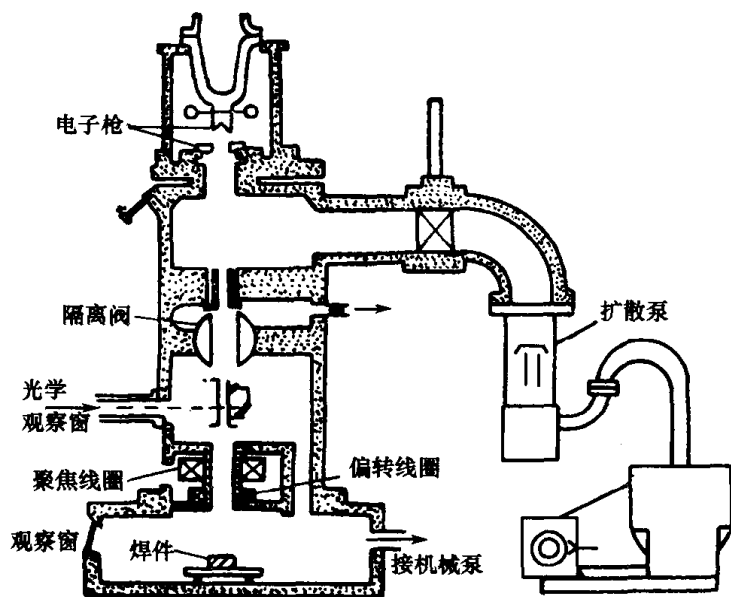


图 10-131 软真空电子束焊机

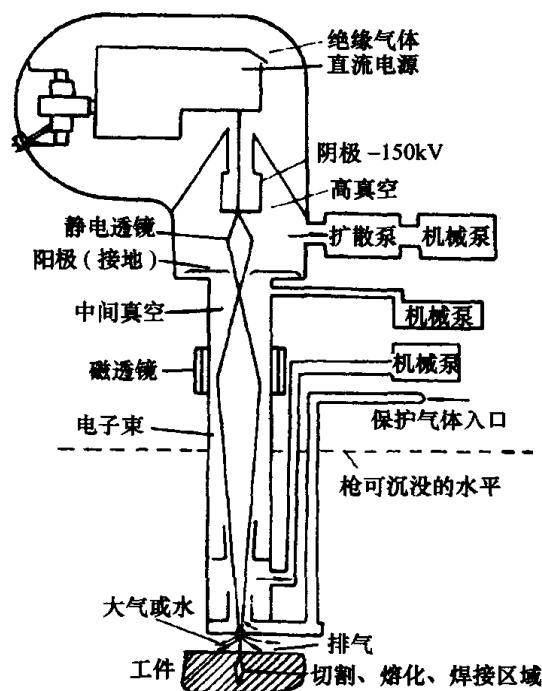


图 10-132 LAEBW 电子束焊机示意图

(四) 低真空电子束焊机的真空系统

低真空电子束焊接机具有真空系统简单,设备成本低,使用方便,更换被焊零件后抽气时间短,对被焊零件清洗要求低等优点。

低真空型电子束焊接机的真空系统必须满足如下几个要求:

- ①枪室和焊接室之间的压差要足够的大,以保证枪室的工作压强不高于 $6.6 \times 10^{-2} \text{Pa}$,而且要保证电子枪的阴阳极区域的气压尽可能稳定。
- ②焊接室的工作压力处于低真空状态,但要保证:电子束在工件上的穿透能力接近高真空条件下的穿透能力;在低真空状态下的焊接气氛要保障达到优良的焊缝冶金质量。
- ③电子束在低真空区飞行的距离尽可能短,以减少电子束的散射损失。

由于在气体中飞行的电子同气体分子和其它粒子间会发生相互作用,又由于核电场的作用,会造成部分电子偏离原来的路线,这一类的离散叫弹性散射。电子的弹性散射又同气体分子的种类、气体密度、电子能量(或加速电压)以及电子飞行的路程有关。国外在这方面作了不少研究工作。大量实践都证明了加速电压为 60kV 时,电子束飞行距离为 500mm 左右。当焊接室压力为 $3 \text{Pa} \sim 4 \text{Pa}$ 时,电子束在工件上的穿透能力基本上同高真空条件下一样。当焊接室压力升高到 6.6Pa 时,仍能得到非常满意的穿透性能。

当焊接室压力为 4Pa 时,如果把所有残余气体分子都作为杂质来看待,则气体的当量纯度达到 40×10^{-6} ,这比起商品供应的最纯氩气(纯度约为 50×10^{-6})还要好一些。从真空冶金角

度来看,焊接室压力为 $4\text{Pa}\sim 6.6\text{Pa}$ 时,对于绝大多数金属材料来说,去除焊缝中的杂质,提高焊缝的冶金质量可以达到相当满意的结果。

HDZ-6A 型中压低真空型电子束焊接机的真空系统如图 10-133 所示。

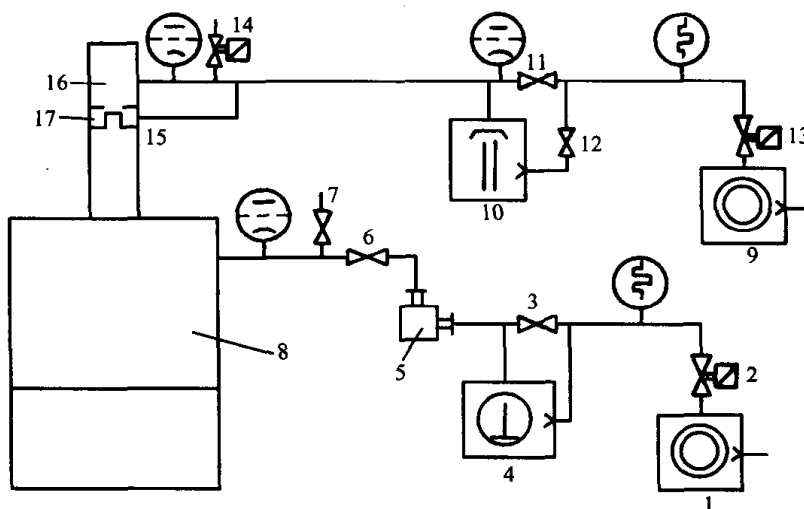


图 10-133 HDZ-6A 型中压低真空电子束焊机真空系统

- 1—2X-30 机械真空泵;2—DDC-60Q 电磁阀;3—GQF-60 气动阀;4—ZJ-150 罗茨泵;5—油过滤器;
6—GQF-100 高真空阀;7—QF-25 放气阀;8—焊接室;9—2X-8 机械泵;10—K-150 油扩散泵;
11—GQF-25 真空阀;12—DS-25A 真空阀;13—DDC-25Q 电磁阀;14—DF-2 电磁放气阀;
15—QFZ-25 隔离阀;16—电子枪室;17—隔离阀室。

为保证枪室和焊接室之间具有足够的压差和电子枪的工作稳定可靠,枪室真空系统选用了有效抽速为 150L/s 的 JK-150 型高真空机组,枪室和焊接室之间设置了一个经综合考虑的气阻管。

为了更换被焊零件后只需较短的抽气时间,特别是保证焊接室在满功率工作状态下具有不高于 4Pa 的压力,焊接室选用了一台 2X-30 型机械泵作为前级泵,一台 ZJ-150 型机械增压泵作为主泵。

十一、真空冷冻升华干燥

(一) 概述

1909 年沙克尔创建了真空冷冻升华干燥方法(亦称冻干或冷干),早期的冻干技术,主要用于生物制品和医药行业中。例如保存菌种、病毒、血清、生物细胞、人体组织、骨骼等。到了 20 世纪 60 年代,随着真空和低温技术的发展,这种技术在食品行业中开始应用,主要用来制作长期工作在边疆、海洋、山区、人烟稀少地方人们的食品,给他们生活带来了极大方便。到了 70 年代初,冷干食品发展更快。一些工业发达国家,如美国、苏联、法国、日本、德国、英国都相继建立了冻干食品脱水厂。目前我国冻干技术不仅应用于生化制药中,在食品及土特产加工行业中也得到了广泛的应用,已建立了一批冻干食品脱水厂。

经过真空冷冻升华干燥的食品优点是:①冷干食品食用方便。这种食品因为在制做过程中已洗净、切好、密封包装,食用时只需用水一泡便可复原食用。②从营养成分保持角度来讲,由于它采用的干燥工艺是先速冻、后在真空环境中升华干燥,可保持食品的物质结构不变、营

养价值不变。如在蔬菜和水果中,最易损失的维生素 C 亦能保持 90% 以上。③冷干后的食品,其组织像海绵一样疏松,放入水中,其复水率达 90%。④冷干蔬菜和水果外观好看,不开裂,不收缩,维持物品原形态和色泽。⑤冷干后的食品质量轻,肉类和蛋类可减轻 50% ~ 60%,蔬菜和水果可减轻 70% ~ 90%⑥冷干食品长时间保存不变质。一般冷藏和气调保鲜能保存几个月,最多也不能超过一年;而冷干食品可保存长达五年以上。

(二) 冷冻升华干燥原理

1. 纯水升华机理

物料中所含水分,有两种存在方式:①游离水,即机械结合水和物化结合水。它主要以吸附和渗透方式存在于物料表面、毛细管、孔隙之中。②结构水,以化学结合形式存在于物品的组织中。冷冻升华干燥主要是升华游离水,而不是结构水。升华游离水,先是将其冻成冰,然后在真空中加热升华。

图 10-134 是水的相变图,用来说明物料中水的升华机理。水在不同温度和压力下,可以为气态、液态或固态。

图中 OA 线为水气分界线,OB 为冰—水两相分界线,即为冰的融化线。OC 线为冰—气交界线,在此线上冰—气共存,即为冰直接由固相转为气相曲线。通常把这种由固相直接转变为气相的现象叫做升华。

图中 O 点,为固—液—气三相共存点,称做三相点或共晶点。纯水三相点对应的温度为 0°C ,此温度下所对应冰面上的饱和蒸气压为 $p_0 = 5.98 \times 10^2 \text{Pa}$ 。物料中所含水,均为水溶液,其三相点温度要低于纯水的温度。由图可见,在 O 点以上(图中虚线以上),冰需转化成水,水再转化为气,其过程是普通的蒸发干燥。只有在三相点压力 p_0 线以下,冰才能由固相直接转变为气相,这就是升华。因而,若要得到冻干食品,其升华温度必须低于三相点温度。否则得到的是蒸发干燥食品。

图 10-135 为物品水分升华过程示意图。其干燥过程是由周围逐渐向内部干燥,干燥层逐渐增厚,可看成多孔结构。升华热由加热体通过干燥层不断地传给冻结部分,在干燥与冻结交界的升华面上,水分子得到加热后,将脱离升华面,沿着毛细孔跑到周围环境中。而环境中的气压必须低于升华面上的饱和蒸气压 p_0 ,只有这样才能造成一个水分子向外迁移的动力。

这意味着升华干燥必须在真空环境中进行。另外物料是处于冻结状态,需维持温度低于三相点;在真空环境下,此温度易于保持。

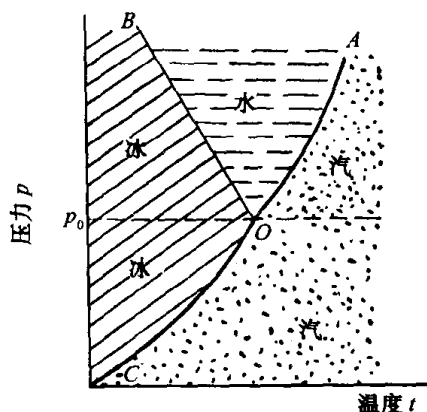


图 10-134 水的相变图

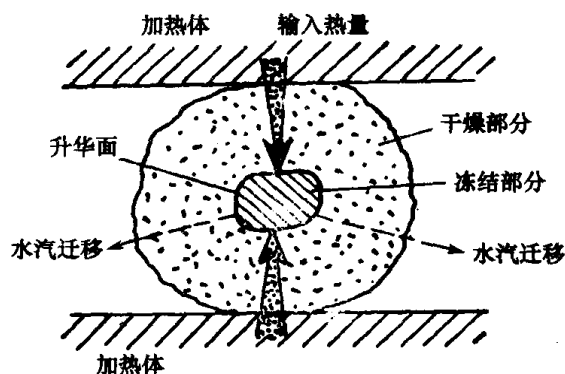


图 10-135 升华干燥过程

2. 食物中的升华速率

由上述可见,真空冷冻升华干燥过程首先是把食物中的水冻结成冰,然后供给升华热,使冰在三相点以下的温度下升华。升华速率的大小,显然与供给的热流量及冰升华潜热有关,可近似写成

$$v = f(Q/H) \quad (10-112)$$

式中 v ——升华速率;

Q ——外界供给的升华热流量;

H ——食物中冰的升华潜热。

当外界供给热流量与升华消耗热流量平衡时,升华温度保持不变,达到升华平衡。此时升华速率为

$$v = [M/(2\pi RT_s)]^{1/2} P_s \exp(-E/RT_s) \quad (10-113)$$

式中 v ——升华速率;

M ——水的相对分子量;

T_s, P_s ——升华平衡时,升华面上的温度及其对应的压力;

R ——摩尔气体常数;

E ——冰升华活化能。

由式(10-113)可见,升华速率与温度、压力及升华活化能有关。增加供给热流量,可以提高升华速率,但这样会使物品温度超过升华平衡温度,甚至使其融化。这是真空冷冻干燥应避免出现的状态。

3. 干冰层内水蒸气迁移速率

厚度很薄的物品,干燥层对水蒸气的迁移速率影响不大,升华出来的水气能很快地穿过。若是体积较大的块状物体,特别是厚度较大的肉、鱼或者粘稠胶体,干燥层对水蒸气迁移速率影响较大。干燥层内的水气压力随着厚度的增加呈指数上升。水蒸气迁移速率与干燥层内水蒸气分压有关,即

$$v = \frac{M}{RT} C_{\text{grad}} p_w \quad (10-114)$$

式中 M ——相对分子量;

T ——干燥层温度;

R ——摩尔气体常数;

C ——与真空度有关的常数;

p_w ——干燥层内水的分压。

(三) 食品冷干设备

食品冷干设备是真空与低温相结合的产物,既包括真空设备,也包括低温设备。通常由真空机组、冻结装置、物料车、干燥室、加热装置以及控制设备组成。

1. 干燥室(箱)

物料升华干燥是在干燥室中完成的。干燥室有圆形或箱形两种型式。圆形干燥室有效利用空间少、省材料、易加工。箱形干燥室内有效利用空间多、用材料多、不易加工。小型冷干设备的干燥室多选用箱形。大中型冷干设备的干燥室两种型式都采用。

2. 加热装置

加热装置处于干燥室中,用来供给物料的升华热。加热板有管式或板式结构,板中的工作

介质可选用水和油。热源可用电加热器或蒸气加热器,需根据设备具体情况而定。

加热板与物料之间可以选择接触传热或者辐射换热。接触式传热易造成物品受热过度,影响产品质量。其次是物料盘与加热板紧贴着,增加了物料升华出来的水气逸出阻力,影响干燥速度。辐射式换热克服了接触式换热的缺点,产品质量得到保障。

3. 冻结装置

小型冷干机冻结装置的蒸发器安装在干燥室中,要求干燥室具有低温冰箱作用。大中型冷干装置,冻结装置处于干燥室外,是一个独立设备,其温度低于升华温度。冻结装置常选择氟里昂作制冷剂,其优点是能得到低的温度、无毒、无臭、无腐蚀性。这些特点很适合食品卫生要求。

4. 物料车

物料车用于运送物料。食品经前处理工序后,装到物料车上的物料盘中,推入速冻设备进行速冻。冻结完毕后,再推入干燥室进行升华干燥,最后将成品送出来。在多层物料车上,装有许多干燥盘,盘中盛物品量为 $8\text{kg}/\text{m}^2 \sim 10\text{kg}/\text{m}^2$ 。

5. 真空系统

冷干设备真空系统有两种组合方式:

①冷凝器—罗茨泵—机械泵组,或者捕水器—机械泵机组。这种组合方式,在冷干设备中使用较多。图 10-136 为捕水器—真空泵机组冻干设备。冷凝器把物料升华出来的水蒸气绝大部分都冻结了,只有很少量的被机械泵抽走。机械泵主要用来抽非可凝性气体。这种组合方式占地面积很小,但能耗较大,制造复杂。

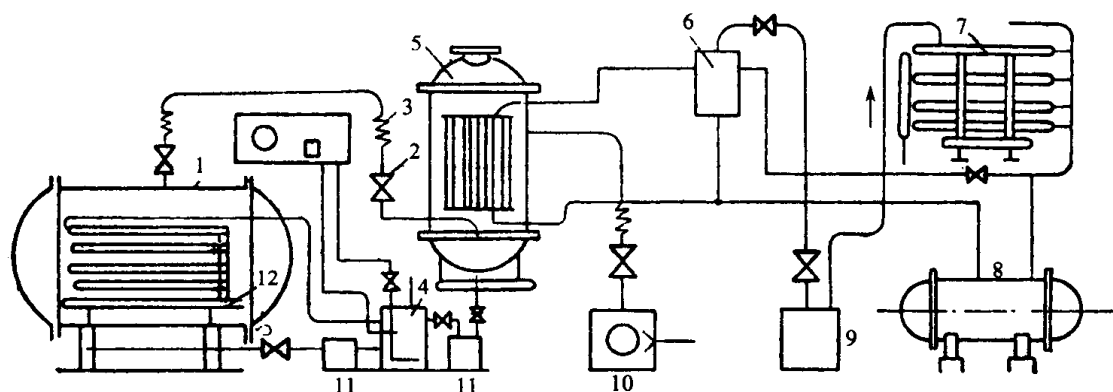


图 10-136 捕水器—真空泵机组冻干设备

1—干燥室;2—阀门;3—波纹管;4—热水箱;5—捕水器;6—水分离器;7—冷冻设备;8—氟贮存器;
9—压机;10—真空泵;11—水泵;12—物料盘。

②以水蒸气喷射泵作抽气手段,其工作介质是高压水蒸气,泵本身就具有抽除水蒸气的能力。这种组合方式的优点是结构简单、制造成本低、操作容易。缺点是占地面积大。大中型冷干设备适宜选择这种抽气手段。

(四) 真空冷冻升华干燥工艺

食品真空冷冻干燥工艺流程如图 10-137 所示,可分为前处理、预冻、升华干燥、解吸干燥和后处理五个阶段。

1. 食品冻干的前处理

(1) 固体食品

各种果蔬,如苹果、桃、李子、杏、葡萄、草莓、樱桃、菠菜、青豌豆、豆角、胡萝卜、土豆、菜花、

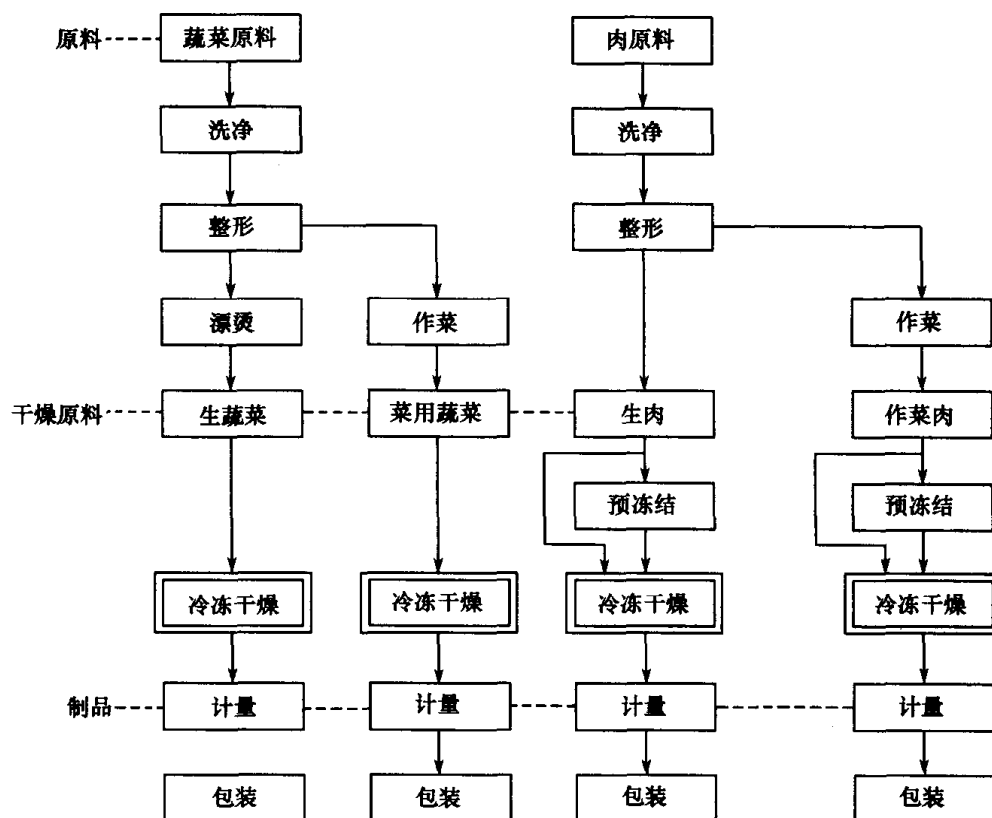


图 10-137 食品冻干的工艺流程图

小香菇、辣椒、蚕豆、大葱、蘑菇等。冻干前需先经挑选、清洗、漂洗、漂烫等工序。

①应选择品种优良、成熟度适宜、鲜嫩、大小长短粗细均匀的,并注意轻拿轻放、不能损伤。

②因果蔬表面都贴有泥土、沙子、灰尘、农药及活物(菌、虫),故应认真清洗。

③蔬菜洗涤后,一般要在 2% 左右盐水中浸泡 20min~30min,达到驱虫目的,必要时可延长。浸过盐水的蔬菜,需在清水中漂洗一次,以去除蔬菜表面的盐水和跑出来的小虫,并达到进一步洗净的目的。

④漂烫的原理与目的就是将果蔬放在沸水或常压蒸汽中一定时间使加热均匀并达到半熟程度,来全部或部分地破坏果蔬中的酶类活性(如过氧化酶、过氧化氢酶等),以便保持果蔬的原有色泽和营养成分,并防止果蔬在冷藏过程中和在解冻后的变质;同时漂烫还能消灭原料表面的微生物、虫卵,除去果蔬组织内的空气,有利于减少维生素 C 和胡萝卜素的损失,并能排除果蔬中的部分水分,使其体积缩小,便于包装时紧密地装入容器,保证成品优良。

漂烫中最重要的是使酶失去活性,降低酶的最小活性限度。若加热的温度控制不好,如漂烫过度或不足,都将引起不良现象。如漂烫不足,除了酶的活性残留外,还使果蔬的组织过硬,造成在加热烹调时味道不佳。如漂烫过度,变成煮的状态,将使果蔬变色(绿叶的变褐等),表面过度软化,表皮脱落及某些维生素的溶出和破坏等。因此,漂烫的操作方法要根据原料来适当掌握。

漂烫的温度和时间,因果蔬的种类及大小不同也均不一致。一般热烫温度是在 80℃~100℃ 的热水中,而多用 93℃~96℃,热烫时间 2min~3min。如用大气压强下的蒸气热烫,一般视情况比热水热烫延长 15%~30%~50% 的时间。因为蒸气比热水的热传导慢,热水漂烫所需时间见表 10-79。在沸水(100℃)中,若干蔬菜漂烫所需时间见表 10-80。

表 10-79 热水漂烫所需时间

品 名	漂烫条件及时间/min
龙须菜	热水,2~4
蚕豆	热水,2~4
青豆	5%食盐热水 5~10
菜豆	热水,2~4
菠菜	热水,1~2
白菜	热水,1~1.5
葱	热水,1~1.5
芋头	热水,8~12
辣椒	热水,2~4
菜花	蒸汽,4~5

表 10-80 沸水漂烫所需时间

品 名	时间/min
油菜	0.5~1
小白菜	0.5~1
荷兰豆	1~1.5
青刀豆	1.5~2
花菜(分朵)	2~3
青豆	2~3
切块土豆	2~3
冬笋片	2~3
南瓜	3
莴苣	3~4
蘑菇	3~5
菠菜	5~10s

对某些蔬菜热烫时,最好使用不锈钢蒸气双层锅,如蘑菇、菜花等蔬菜,与铁或铜直接接触,会变色而且味着也变坏。

检验漂烫是否适当,一般是用过氧化酶的活力测定数作为指标,看一下果蔬中的酶在漂烫后仍然残留多少。快速测定法,就是在短时间内进行过氧化酶定性试验的方法。即用一张含有过氧化酶作用基质和染色指示剂的干的试纸,与检验的试样接触,试纸如在 1s~15s 内变成蓝色,则表示漂烫后的含量超过过氧化酶指标,残留的过氧化酶的活性大。

漂烫能引起果蔬中某些可溶性物质如蛋白质、无机盐、维生素 C 以及糖和有机酸的破坏和流失。损失因品种不同大约为 10%~40%。例如梨可损失 40%,菠菜损失 30%。漂烫温度越高,时间越长,则损失越多。如漂烫温升很快,则损失就小,温升缓慢,酶没有被破坏,而维生素 C 的损失就很快。用蒸气漂烫时,果蔬的可溶性物质损失就少。所以果蔬的味道和营养成分等方面就比用热水漂烫更好,其损失只有热水漂烫的 1/3 左右。但是热水漂烫也有其优点,即能保护和改善果蔬的色泽。

(2) 液态食品

如果汁、饮料等,因含有 80%~95% 以上的水分,一下子冻干费用较大,事先要进行浓缩处理。一般应浓缩到固体量占全重的 30%~60% (称浓缩度),依制品而定,可参考表 10-81。为使食品质量不受影响,必须采用低温真空浓缩。然后放在金属盘子上,摊放不宜太厚。

表 10-81 适合冻干的浓缩度

品名	浓缩程度/%	品名	浓缩程度/%	品名	浓缩程度/%
葡萄汁	45~50	苹果	40~50	咖啡	30~35
柠檬汁	40~45	西红柿	25~35	全乳	40~50
蜜柑汁	50~55	绿茶	30	油	25~30
菠萝汁	50~60	红茶	30~35	味素	30~53

(3)一些食品的前处理情况

表 10-82 给出了各种水产品的预处理和冻干情况;表 10-83 给出了某些蔬菜的预处理和冻干情况;表 10-82 给出其它一些食品预处理和冻干情况。各表“结果”栏中 A 表示效果极佳;B 表示效果佳;C 表示效果一般。

表 10-82 一些水产品的前处理情况

品 名	结果	预 处 理	状 况
鳕鱼	B	生切片	恢复良好,味道较差
鲑鱼	A	冷冻切片	恢复良好,应防止发酸
墨鱼	C	新鲜	和干墨鱼相似,恢复后变形
对虾	A	冷时剥去部分虾皮	干燥状态良好,适于即席食用
毛蟹	A	煮熟,冷时剥去部分蟹壳	干燥状态良好,恢复良好,适于即席食用
蚝	B	生剥肉	恢复良好
干贝	B	新鲜	恢复良好,应防止发酸
蚶子	B	新鲜	恢复极佳,应防止发酸
蛤	B	新鲜	恢复时极佳,应防止发酸
海蜇	A	新鲜	恢复良好
海带	A	新鲜	恢复良好
裙带菜	A	热油内存放	恢复良好
烤鳗鱼	B	串状	恢复极佳,应防止发酸
鱼糕	C	市上出售品	恢复良好
鱼糕	B	特殊加工	恢复极佳
鱼肉山芋丸子	C		恢复不佳

表 10-83 一些蔬菜的前处理情况

品 名	结果	预 处 理	状 况
扁豆	B	水煮	恢复不佳,容易破碎
土豆	A	水煮,研碎	作为制成品极佳
山芋	B~A	新鲜,薄片	薄片状吸水不佳,粉末良好
胡萝卜	C	新鲜	恢复不佳
胡萝卜	B	水煮(加压)	有利用价值
姜	B	新鲜,擦碎成泥状	作为制成品极佳
山葵	B	新鲜,擦碎成泥状	作为制成品极佳
葱	A	新鲜(药味)	自然冻结方式,较佳
洋葱	B	新鲜	吸水性良好,纤维鲜明
荷兰芹	B	新鲜	吸水不佳
青豆	A	罐头,水煮	恢复良好,和原物无异
青豆	B	新鲜	恢复良好
蚕豆	B	新鲜	恢复良好
松蘑	A	罐头(水煮)	恢复极佳,和原物无异
松蘑	A	新鲜	
香菇	B	新鲜	恢复极佳,需预处理

(续)

品 名	结果	预 处 理	状 况
蘑菇	B	新鲜及罐头	恢复极佳
新鲜馅	A	不含糖分(豆沙干燥后制成的澄豆沙)	用真空干燥也良好,恢复良好
青菜汁	A		恢复良好
番茄	B	新鲜,搅碎	和番茄无异
番茄汁	B	罐头	
肉汁	A	调味及整理完毕者	恢复良好
饺子	C		恢复不佳会干透

表 10-84 其它一些食品的前处理情况

品 名	结果	预 处 理	状 况
肉汤	A		发泡恢复良好
鸡汤	A		发泡恢复良好
中国式汤	A		发泡恢复良好
干乳酪	A	粉末	恢复良好,色泽良好
生奶油	C		脂肪成黄油状
乳酸饮料	A		恢复良好,干燥方法研究
乳糖	C		干燥状态不佳
蜂蜜(A)	C		因烘糕状而有问题
蜂蜜(B)	A	1/10(稀释 10 倍)	恢复良好,吸湿性较强
酱油	A		难以完全冻结,但半冻结时干燥较好
菠菜	A	盐渍	恢复良好,预处理较麻烦
牛肉里脊肉	A	新鲜状态	恢复良好,应防止发酸
猪肉	A	新鲜状态	恢复较好,应防止发酸
牛肉	A	整只生肉	恢复良好,应防止发酸
鸡胸脯肉	A	淡味烹煮	煮后的肉,吸水性较佳
鸡蛋(整蛋)	B	新鲜	恢复较佳
鸡蛋(蛋黄)	B	新鲜	恢复较佳
鸡蛋(蛋白)	A	新鲜	恢复良好
汉堡牛肉饼	B	已调味及制成	恢复较佳,褪色
咖喱粉	A		恢复良好
嫩豌豆	B	生煮	恢复不佳,容易破碎

2. 预冻阶段

(1)进入冷冻干燥室预冻的物料应冷却、沥干,然后用搁盘盛放在搁板上,应尽量增大物料表面积,减少厚度,一般以不超过 20mm 为宜,较松散物料厚度取大值,较密实厚料取小值,一

般 10mm~15mm。太薄,虽然冻干时间缩短,但每批产量降低,而辅助时间基本不变,则相对辅助工序增加,导致总成本相应增加而不经济;太厚水蒸气升华阻力大,升华速率减慢,干燥时间延长,效率低。所以对不同品种应考虑物料及冷冻干燥阶段能耗和人力物力的消耗,选取一个最佳经济厚度。物料容量以 $8\text{kg}/\text{m}^2 \sim 10\text{kg}/\text{m}^2$ 为宜;搁盘宜用铝板或薄不锈钢板制作,底面应平整,和搁板接触应良好,过大的间隙会增大传热热阻,降低升华干燥速度。

(2) 预冻温度

预冻温度一般应低于物料的共晶点温度 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 。这是因为物料的冷冻干燥过程是在真空状态下进行的,只有物料中溶液全部冻解后才能在真空下升华。否则,若有部分液体存在,在真空下不仅会迅速蒸发,造成液体的浓缩,使冷冻干燥产品的体积缩小,而且溶解在溶液中的气体会在真空下迅速放出,使冻干产品鼓泡。不同的物料共晶点不同,测定共晶点的常用方法是电阻测定法。原理是物料在冻结过程中,温度降至冰点,冰结晶开始形成,随着物料温度下降,冰晶逐渐增多,当温度降至某一点,物料中的水分全部冻结,这时电阻会突然增大,几乎是无穷大,此时的温度就是物料的共晶点。通过同时测定物料的温度和电阻就可测得共晶点。最简单的仪器就是利用温度计和万用表。对冻结有两点要求:①冻结温度必须低于食物中溶液的三相点温度。如果冻结温度不在三相点以下,物品中必有液体存在。当处在真空中时,液体产生沸腾,生成气泡,使产品表面凹凸不平。②要速冻。冻结得愈快,物品中结晶愈小。结晶粒小,对物品组织结构破坏小,尤其对毛细管损坏更小。冻结时间短,在蛋白质凝聚和浓缩作用下,不会发生变质。

速冻有两种方式:①干燥量小时,速冻可在升华干燥室中冻结;②干燥量较大时,物品应采用专用的速冻设备。

物料预冻后,再移置到干燥室中进行干燥。通常由大气抽到 100Pa,允许时间为 15min~20min,这期间物料的温度会上升 $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ 。为防止融解,物料预冻的温度应比该物料的共晶点温度低,一般在 -30°C 以下。

某些食品冻结时容许温度见表 10-85。

表 10-85 某些食品冻结时容许温度

品 种	容许温度/ $^\circ\text{C}$	品 种	容许温度/ $^\circ\text{C}$
苹果	$-20 \sim -25$	人 参	$-25 \sim -30$
西红柿	$-15 \sim -22$	蛇 肉	$-30 \sim -35$
梨	$-18 \sim -25$	草 菇	$-25 \sim -30$
葱	$-10 \sim -15$	速溶茶	$-25 \sim -30$
胡萝卜	$-10 \sim -15$	海带速溶茶	$-25 \sim -30$

(3) 预冻时间

物料在冻干室的冻结应快速,一般 1h~2h 达到预冻温度。通常的做法是在物料达到预冻温度后,还需在此温度下停留 1h~2h,而不是立即进行升华干燥,这样可以使物料冻透。

值得说明的是这里提到的快速冻结不完全等同于目前流行的食品速冻加工。速冻是在 30min 内物料通过 $-1^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ 最大冰结晶生成带,使物料中心温度达 -18°C ,冰结晶小,冰晶粒不破坏物质的细胞结构,解冻时营养成分流失少。而冻干中的冻结则是慢于速冻,又快于慢冻,从时间上看介于两者之间,又接近速冻。这主要是虽然环境温度都差不多(-30°C 左

右),速冻基本上是单体,而且加大风速,强化换热,而慢冻主要是物料尺寸较厚,冻结时间加长。如果冻干中也进行速冻,要求物料在几分钟至 30min 冻至中心温度达 -18°C ,不但制冷机负荷会成倍增加,预冻后期负荷又很小,降低制冷机利用率;同时这种冻结也不利于水蒸气升华,对产品质量不利;也增加了能耗和运行费用,很不经济。如果实行慢速冻结,整个干燥时间会延长,也是不经济的。

(4)预冻速率

预冻速率直接影响干燥速率和产品质量。慢冻时,冰结晶颗粒较大,有利于物品的升华,复水速度快,但食品复原性差;快速冻结,产生的冰晶颗粒小,升华较慢,复水速度慢,干制品的复原性好。通常采取的方法是,如需冻结得快一些,先将干燥室预冷至较低温度,再将制品放入冷冻干燥室冻结;若冻干室和制品一起冻结,冻结速度较慢。

(5)捕水器的降温时间和温度

在产品预冻结束前 30min ~ 50min (视其制冷能力决定时间长短),使捕水器温度降至 -35°C 左右,启动真空泵抽真空,当冷冻干燥室真空度为 100Pa 时,就可启动电加热(或其它形式的加热源)和循环泵,给产品提供升华热。有些食品共晶点低,升华真空度应在 60Pa 左右。

一般水气凝结的温度低于制品的升华温度,但在升华初期使捕水器温度过分低是没有必要的。这是因为升华的最佳速度所需的压力是在产品升华温度对应的饱和蒸气压的 $1/2$ 左右时。过低的压力不仅不能加快升华,相反地还会影响产品的辐射传热,降低升华速率。假如产品的升华温度为 -26°C ,则其饱和蒸气压的二分之一为 28.7Pa,28.7Pa 对应的温度为 -33°C ,考虑到从制品升华面到水气凝结器表面水气流动阻力所需的压力差,捕水器表面温度保持在 -36°C 就可以了。

一般水气凝结器的温度在 $-30^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 之间。医用冻干机低于此值。

表 10-86 是冰的饱和蒸气压和升华热。

表 10-86 冰的饱和蒸气压与升华热

温度/ $^{\circ}\text{C}$	升华热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	蒸气压/Pa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	升华热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	蒸气压/Pa
-12	2837.3	217.6	-26	2838.9	57.4
-14	2837.6	181.5	-28	2839.0	46.9
-16	2837.9	151.0	-30	2839.0	38.1
-18	2838.2	125.2	-32	2839.1	30.9
-20	2838.4	103.5	-34	2839.1	25.0
-22	2838.6	85.3	-36	2839.1	20.1
-24	2838.7	70.1	-38	2839.0	16.1

3. 升华阶段

(1)产品升华温度

升华阶段产品的温度低于其共融点温度。所谓共融点就是指冻结的物料在升温升华过程中,当达到某一温度时,固体中开始出现液态,电阻值突然减小,此时的温度就是物料的共融点。它的测定方法与共晶点的测定方法相同,数值上相差不多。

产品温度低于共融点温度太多,升华速率低,升华时间加长;高于共融点温度,产品融化,影响产品质量和干燥过程。

干燥产品还有个崩解温度。若升华温度超过该产品的崩解温度,那么会由于产品干燥层

的崩解,影响产品的继续升华,使产品融化。因此,升华时加热的温度还应低于干燥产品的崩解温度。

为了加快升华温度,应在产品温度低于某共融点温度和崩解温度下尽量提高产品升华表面温度。

(2) 板层温度

冻干曲线的温度就是冷冻干燥箱搁板温度。控制搁板温度对冷冻干燥制品的质量起着重要作用。具体地说就是在升华阶段应保证搁板温度低于产品的共融点温度,以保证产品温度低于其共融点温度;在解吸阶段,搁板温度应低于最高允许温度,否则会出现物料中心温度超过物料的最高温度,使物料表面烧焦或变形。

决定已冻干部分允许温度的主要因素是组分的热变性、食品的颜色、风味、芳香成分等变化的程度。植物性食品多为 $40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$, 蔬菜类约为 60°C , 果品类多为 $45^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 升华阶段压力

在升华过程中,不仅搁板温度需要控制,箱内压力也是需要控制的参数。冻干室压力大小影响升华干燥过程的传热传质。压力高传热效果好,但不利于水蒸气的顺利溢出并达到捕水器冷凝面;压力低,对流传热减弱,因压力差大有利于水蒸气逸出。整个升华过程就是一个传热传质过程,只有压力适当,才能有一个经济的干燥速率。

当升华温度恒定,在箱内压力低于一定值时,压力再降低,升华速率也不再增加,而且升华压力低时,换热效果差,为提供相同的热量就需要高的搁板温度,前面提到高的搁板温度容易造成物料的融化崩解。通常应把压力控制在略低于最高升华温度对应饱和蒸气压的 $1/2$, 一般在 $30\text{Pa} \sim 90\text{Pa}$ 之间。例如物料升华温度为 -20°C , 其饱和蒸气压为 103Pa , 干燥箱内压力应控制在略低于 52Pa 附近如 40Pa 。冷凝器温度控制在 -30°C 以下。这样产品表面蒸气压和冷凝表面蒸气压比为 $103/40 = 2.6$, 这个压差 $\Delta p = 103 - 40 = 63\text{Pa}$ 就是水蒸气从干燥层表面移向冷凝器表面的压力。

在升华干燥后期,箱内压力较低,产品的干燥层已较厚,阻力较大,同时热阻也较大,干燥速率已不再升高,甚至下降,此时需增加箱内压力来改善传热。通常采用调压升华法来周期性地改善箱内压力。调压升华一般充入氮气或干燥后的空气。调压升华就是周期性地提高和降低干燥箱内压力的冻干方法。在前半周期提高箱内压力,以增加气体的对流换热和干燥层的导热;在后半周期箱内压力迅速降低,升华界面与外表面之间形成较大压差,水蒸气迅速逸出。在一个循环压力周期中,高压时间应适当延长,足以使制品的温度达到它所允许的最高值;低压时间应稍短,足以完成水蒸气的快速逸出即可。具体时间周期长短应通过实验来确定。

调压升华最简单的作法就是断续关闭冷冻干燥室和水气凝结器之间的真空蝶阀来实现。

(4) 升华时间

升华时间与物料的前处理工艺、物料的形状、厚度、制品的允许最高温度、向制品供热的多少和排除升华水蒸气的快慢有关。对于液态物料,正常的升华速率大约 1mm/h , 而对于固态物料则与其形状和尺寸有关,应通过实验确定。

可根据下面三点,判断升华过程结束:

- ① 产品温度上升到接近搁板温度;
- ② 干燥箱的压力下降到与水气凝结器的压力接近,且两者之间的压力差维持不变;
- ③ 关闭冻干箱与水气凝结器之间的蝶阀时,箱内压力上升速率与干燥箱的渗透率和材料放气率相近。

上述现象发生后,应再延长半个小时左右,以彻底消除产品中的残留冰晶及搁盘干燥速率的不均衡性。表 10-87 给出了某些食品冻干时间。

表 10-87 主要食品的冷冻干燥温度^①

食品名称	厚度/mm	干燥板温度/℃	压力/Pa	升华干燥时间/h
牛肉(煮熟)	8~10	55	1.3×10^2	6
金枪鱼(生)	6	40	1.3×10^2	6
金枪鱼(水煮)	10~20	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	8
虾(半剖水煮)	8~20	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	6
蛋白(生)	5	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	4
蛋黄(生)	5	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3
全蛋(生)	5	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3~4
白桃(8等份)	10~20	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	14
罐头桃	10~15	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	12
香蕉(切段)	5	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	6
番茄汁	5	50	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	4~5
圆椒	4	50	1.3×10^2	5
圆椒(早饭)	4	50	1.3×10^2	4
卷心菜	1~2	50	1.3×10^2	2~3
洋葱	3~4	50	1.3×10^2	5
胡萝卜	4	50	1.3×10^2	5
藕	4	50	1.3×10^2	4
土豆	10	55	1.3×10^2	5
山芋菜	2~3	50	1.3×10^2	3
浆果	2	50	1.3×10^2	3~4
松蘑	10	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	5
酱油	3	45	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3
豆酱	4	45	1.3×10^2	4~5
绿茶(浓茶水)	4	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3
红茶(浓茶水)	4	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3
咖啡(浓)	4	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	3
果子冻	4	40	$6.6 \times 10^1 \sim 1.3$	2~3

注:①用单一加热方式下冷冻干燥的示例

4. 解吸阶段

解吸阶段因物料内不存在冻结冰,产品温度可迅速上升到最高许可温度,并在该温度下保持一段时间,使结合水和吸附于干燥层中的水获得足够的能量从分子吸附中解析出来,产品温度一般为 30℃~40℃ 之间,而搁板温度略高于产品温度几度。一般干燥板的容许温度范围为

40℃~55℃,不超过60℃。表10-88是部分食品升华干燥板温度及工作压力。

表10-88 部分食品升华干燥板温度及工作压力

食 品	厚度/mm	干燥板温度/℃	压力/Pa
牛肉(煮熟)	8~10	55	133.3
白桃(8等份)	10~20	45	66.7~1.3
香蕉(圆切片)	5	45	66.7~1.3
藕	4	50	133.3
番茄汁	5	50	66.7~1.3
青椒(烫漂)	4	50	133.3
洋葱(圆切片)	4	50	133.3
土豆(烫漂)	10	55	133.3
松蘑	10	45	66.7~1.3
酱油	3	45	66.7~1.3
蜂王浆	4	40	66.7~1.3
胡萝卜(圆切片)	4	50	133.3

解吸阶段捕水器的温度会因水蒸气量小而下降,使冻干箱压力下降到20Pa附近,有利于水蒸气从产品中逸出,但此时产品需迅速升温,所需热量较多,而压力太低不利于传热,所以这时又需要采用调压升华法加速解吸。当冻干室压力下降到某一固定值时,搁板温度和产品温度差固定不变,再保持这种状态1h左右,以确保食品含水量低于5%。这是因为含水量低于5%时,在贮存中微生物不宜生长、繁殖。有的资料要求冻干食品含水率低于2%为宜,如果要将含水率控制在2%以内,就需要-50℃~-60℃左右才能使这部分结构水冻结升华,这在生产上是很不经济的。究竟哪一个好,应在实践中摸索,只要5%的含水量不影响冻干产品在贮藏中的质量变化,就应以5%为标准。

5. 冻干食品的后处理

经冻干的制品不仅含水量低,而且疏松多孔,因而吸湿性很强,再加上易受氧化影响的表面积增大,为便于保存,后处理不容忽视。后处理的主要内容是包装,制品不同包装也不同。对于食品,干燥终了时也要充入干燥空气或氮气,包装时室内保持相对湿度为20%左右。最好采用真空包装或真空充气包装。对冻干食品包装的要求有:

①密封性。冻干食品在相对湿度为70%的环境中放置30min,含水量会从1%上升到3%。吸湿的结果不仅使产品质量降低,粉类产品会结块,脂肪和维生素还易氧化而产生异臭。

②防护性。冻干产品成海绵状组织结构,比较脆弱。尤其是蔬菜和水果易碎,要防止碎成粉状而失去商品价值。

③易于运输。冻干产品质量轻,为便于运输,应选轻而保护功能好的包装材料。

④遮光性。遮光可防止食品质量下降。

目前常采用金属罐硬包装,罐用马口铁或铝制作,内部充氮。软包装材料由0.005cm~0.008cm厚的聚乙烯、0.00089cm厚的铝箔、0.0127cm厚的聚酯三层复全薄膜做成,铝箔不透水蒸气和光线,薄膜便于密封。介于硬包装和软包装之间的是半硬质容器。它用厚铝箔拉拔成型后再涂乙烯类涂料,加盖热封。冻干食品的包装,目前还是探索中的课题。

一些食品冻干实例见表10-89。

表 10-89 食品冻干实例

食 品	小 虾	油炸面鱼	鲑 鱼	烤 蛋	豆 酱	葱	胡萝卜	山 芋
装入形式	虾肉烹调	烹调	小火烹调	烹调	—	切片	切片	切片
冻结方式	预冻结		自身(蒸发)冻结					
装入率/kg·m ⁻²	13	10	20	10	20	10	10	10
加热方式	借热载体循环, 搁板辐射加热							
搁板尺寸长×宽/mm×mm	840×4 800							
有效搁板数	13							
热源温度/℃	110~40							
加工物的温度/℃	60~50							
工作压力/Pa	133.3~106.8							
干燥时间/h	15	10	20	15	18	13	15	20

图 10-138 给出了牛肉冷干曲线。干燥盘单位面积牛肉重 8kg/m²。牛肉含水量为 56%。由图可见,牛肉冻结温度为 -40℃,在此温度下开始升华干燥。随着水分的升华,牛肉温度逐渐上升,最后达到干燥板温度。干燥室内压力由初始几百帕,迅速降到了几十帕。随着物料(牛肉)中水分的降低,真空度逐渐上升,最后达到几帕。物料(牛肉)中的水分随着干燥时间增长逐渐下降,最后降低到 1%。

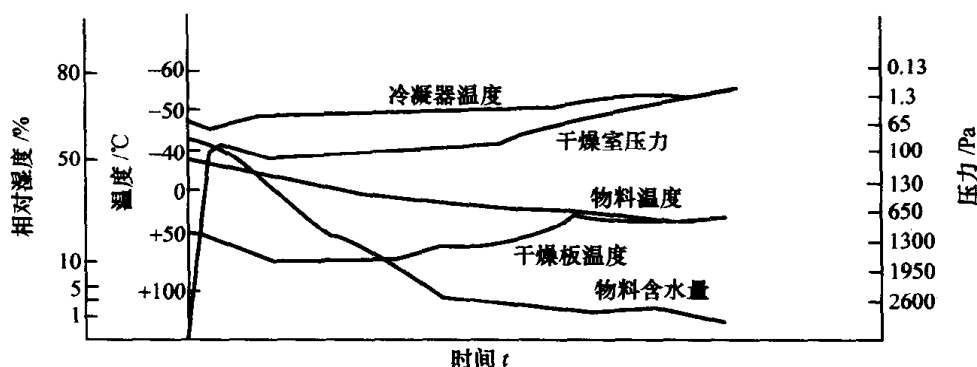


图 10-138 牛肉冻干曲线

(五) 食品冻干机与医药冻干机设计差异

食品冻干机与医药冻干机设计差异主要有传热方式、预冻方法、自动装卸装置、真空泵的选配、工作温度、制冷系统、热源选择等方面的差异。

1. 传热方式

医用冻干机是将配成溶液的药品在瓶(或托盘)中冻结后成为与瓶(或盘)紧密接触的冰,冰的导热性能较好,因而一般医药冻干机定型为药品瓶(或托盘)直接放在能制冷和加热的搁板上进行预冻和干燥。为了使传热良好,要求搁板平整光洁,其不平度公差小于 1mm/m。有时设计成抽屉托盘,让制品瓶直接放在搁板上。而固态食品是置于物料盘中的松散堆积物,食品有空隙,在真空下其导热性能很差。因此固态食品冻干机(亦可加工液态食品)是将物料盘悬置于两辐射加热板之间加热。这种方式比搁板式干燥快,效率高。为了增强辐射换热,要求加热板表面的辐射系数高达 90%~95%以上。至于加热板的平整度,要求不严格。但必须保证装料后,物料盘底(包括支架)和物料顶与辐射板上、下两表面间有足够的距离,通常不小于

5mm~10mm。

2. 预冻方式

为保证安全性,医药冻干从制品进箱、冻结、干燥到出箱的整个冻干过程,要尽量做到不与人或外界接触,所以预冻和干燥总是在冻干箱内进行。采用搁板制冷和加热亦能顺利有效地进行预冻和升华。而采用悬置辐射方式的食品,若预冻亦在干燥箱内进行的话,不仅要有既能供热又能供冷的辐射板,而且还需有使箱内空气流动的流道和设备,在制冷和加热交换中不可避免地有冷热抵消,增加了加工能耗;若用专门速冻库进行预冻,不仅可以避免这种冷热抵消的能耗,而且冷库的设备费用仅为冻干机设备费用的十几分之一,可充分发挥昂贵的冻干机的使用效率。所以食品冻干几乎总是用速冻库或其它专用冻结设备进行预冻后,再进入冻干机中干燥。

3. 自动装卸装置

医药冻干机为减少手工操作给制品带来污染而开发了(自动)机械装卸制品的装置,但这并非是必需的,因此目前多数医药冻干机均无此功能。但没有预冻功能(即在干燥箱外预冻)的食品冻干机,必须在很短的时间内将预冻好的制品装入冻干机,避免装箱过程中融化;还必须在很短的时间内卸出干燥箱转送到干燥的储存间和包装间,以免干燥制品吸湿;而且食品冻干机的容量都很大(托盘面积达 $50\text{m}^2 \sim 120\text{m}^2$),因此用机械装卸制品的装置设施是必需的,并且在干燥箱内部设计中,在速冻库—干燥箱—贮存间—包装间之间的通道设计中均要有相应的考虑和安排。

4. 真空泵的匹配

医药冻干机按一定时间(如 30min)将真空泵系统由常压抽到某一压力(如 50Pa)来匹配真空泵的容量。在干燥期间,所需真空泵的容量比这小,仍然用同一组泵抽空,因此降压时间的长短决定了真空泵的抽速,亦决定了整个冻干过程中真空泵的能耗。其实,降压时间稍长一点,对升华干燥的效率和产品的质量并无多大影响,相反地还可降低设备费用和抽空能耗。当然降压时间也不能过长,因为抽空必须在冷阱已降温的条件下进行,抽空时间过长,会导致制冷机能耗的增加,也影响干燥的效率。食品冻干机则不然,由于干燥箱无制冷能力,预冻好的制品进箱后必须在很短(例如 10min~15min)时间内抽空到某一压力(例如 100Pa),使被冻结的制品中的冰升华吸热,从而降低其本身的温度,维持在低温下升华,这个时间不能再长,否则被预冻的制品将融化,影响产品的质量。在正常升华阶段,所需真空泵的抽气量比这小得多(例如小于初期抽气的 $1/2$,甚至更小)。如仍用初期排气的泵来抽,则不仅增加了抽空能耗和加工成本,还会抽出许多水蒸气。因此食品冻干机总是匹配两套真空泵,一套初期排气用,另一套小的作为正常运行用。初期排气的容量不宜比所需的小,而经常运行的容量可以小一些,只要大于系统的漏气量与升华过程中产生的不凝性气体量之和就可以了。

另外,医药冻干机冷阱的温度较低(例如 $-50^\circ\text{C} \sim -60^\circ\text{C}$),抽气口处的水蒸气分压力也较低,只要抽气量不是过大(过大时则水蒸气来不及冷凝被真空泵抽走),将其压缩到大气压仍保持气态而不会凝结成液态,因此真空泵组的前级泵可以用油封机械泵。而食品冻干机冷阱温度较高(例如 -40°C),抽气口处的水蒸气分压较高,将其压缩到大气压时,就会有一部分水蒸气凝结成水滴。若前级泵用油封机械泵,水滴就会进入油中,造成油的乳化,降低了真空泵的密封性能。

5. 工作温度

许多药品及其添加剂的共熔点或晶解温度低于 $-35 \sim -40^\circ\text{C}$,预冻时搁板的温度需能达到

$-50^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$, 对应捕水器冷凝面温度应达 $-55^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 。多数固态食品(咖啡、桔子汁等液态食品除外)在温度下降到 $-3^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 时, 其大部分水分(例如 70%)已被冻结, 到 -25°C 时, 其冻结率可达 85%~97%, 未被冻结的大都为结合水。另外, 固态食品本身具有一定形状, 不会在冻干中产生崩解和塌陷。因此, 一般来说速冻库达 -30°C 即可, 而捕水器冷凝面温度为 $-40^{\circ}\text{C} \sim -45^{\circ}\text{C}$ 即可。

6. 捕水器制冷系统

捕水器供冷的特点是: ①冷负荷变化大, 其最小负荷只有最大负荷的几分之一甚至十分之一, 也即在解吸干燥后期, 制冷机几乎处于“零负荷”下工作; ②所有冷凝盘管在冻干周期中不能停止供冷, 否则会出现被凝结冰的迁移; ③工作温度低, 时间长; ④每一冻干周期均需由常温降至工作温度。即有变工况运行阶段, 这给不适合变工况运行的复叠式制冷机的运行带来一定困难。

医药冻干机工作时捕水器冷凝面温度为 $-50^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$ 的低温, 这只有采用低温用两级压缩直接蒸发的氟利昂(如 R404A, R507, R22 等)制冷系统才能达到。若用氨制冷, 因氨的凝固点(-77.9°C)太近, 运行不安全, 而且压比太大, 运行效率低, 排温过高, 使润滑油和制冷工质变质分解, 因此是不适宜的。

但是氟利昂(如 R404A 等)与润滑油能互溶, 由压缩机排气带到制冷系统中的润滑油必须能在运行过程中自动带回压缩机, 才能保证压缩机和系统的正常运行。为此, 一般此类压缩机不设能量调节装置(因能量变小时带不回油), 也不并联运行(避免相互串油), 即每台压缩机所构成的制冷系统是各自独立的。这种系统的构成所带来的问题是: 制冷机的冷量是按最大负荷确定, 而解吸干燥阶段特别是后期, 负荷很少, 压缩机处于“零负荷”下运行, 运行工况恶劣, 必须采取冷热抵消等措施改善其运行条件。再者压缩机的电机长时间处于“小负荷”下“空转”, 能量白白浪费了。若采用载冷介质间接制冷, 虽然可以用开部分压缩机来调节冷量, 但增加了一次传热温差, 使蒸发温度进一步降低。在如此低的温度下降低蒸发温度, 单位压缩功将增加很多, 加之载冷介质循环泵的耗功变成热量还要消耗一部分冷量。两者综合起来, 几乎要使能耗成倍增加。由于这部分消耗在药品成本中所占比例很小, 所以也不大引起人们的关注。但是冻干食品的售价低, 其加工成本特别引人注目。若仍采用这种系统, 其能量的浪费将不可忽视。

如前所述, 食品冻干机捕水器冷凝面温度为 $-40^{\circ}\text{C} \sim -45^{\circ}\text{C}$ 即可, 采用两级压缩氨泵循环制冷系统已可满足要求。氨与润滑油不相溶, 经压缩机排气带出的润滑油靠集油器收集并处理后再用人工或自动加入压缩机, 以保证压缩机的正常运行。因此这类压缩机本身就带有能量调节装置。多台机组组成的制冷系统也是并联运行的, 还可用停开部分压缩机来调节能量。捕水器可以根据其冷负荷的需要来调节开启的台数和工作的气缸数, 大大降低制冷机的能耗。因此, 冻干机的捕水器的压缩机应配两台以上。只配一台时, 既不能相互备用, 也不能调节能量, 是不合理的。

7. 热源的选用

电作为加热源的优点是干净、清洁、无污染, 便于准确地调节和控制。医药冻干机几乎无一例外地采用电作为加热热源。

现在虽然亦有用电作加热热源的食品冻干机, 但绝大多数生产用食品冻干机是用蒸气作加热热源的。

十二、果蔬食品的真空保鲜

(一) 概述

目前果蔬食品保鲜主要有三种手段,即真空预冷、真空包装以及真空气体置换保鲜。真空预冷是 20 世纪 70 年代未发展起来的一种果蔬保鲜技术,可以延长果蔬的货架寿命,提高鲜度。真空包装是 60 年代发展起来的保鲜技术,主要用于失去生物活性的食品保鲜,如各种酱菜、熟食等。真空气体置换保鲜是 70 年代发展起来的果蔬及肉类的保鲜技术,它与低温贮藏相结合,不仅能保持果蔬的鲜度,而且在超市上的货架寿命也得到了很大的提高,是目前国际上流行的果蔬及新鲜肉类保鲜的重要手段。

(二) 真空预冷保鲜

果蔬收获以后,生命并没有结束,仍然有呼吸作用,即吸收氧气,排出二氧化碳及水分。在新陈代谢的过程中,产生大量呼吸热,使养分不断地消耗,并损失大量水分。结果造成果蔬凋萎、变色软化、维生素减少,以致变质,失去商品价值。减弱果蔬的呼吸强度,唯一的方法是迅速降低果蔬温度使其呼吸热降低。表 10-90 给出了果蔬的呼吸热值。低温不仅能抑制微生物的生长繁殖,还能抑制食品中酶的活性,延缓果蔬中化学成分的变化,保持食品的营养价值和色、香、味品质。果蔬采摘后经适当处理,能提高果蔬的质量。真空预冷被认为是减缓果蔬采摘后成熟及保证食品质量的有效方法。真空预冷的特点是:①果蔬冷却速度快,一般只需 20min~30min,若用冷藏库冷却,则需 10h~12h,而且只能处理早晨收获的果蔬,而真空预冷则不受采集时间限制,随时可以处理;②处理时间短,水分损失小,果蔬不会发生局部干枯变形;③真空预冷的果蔬鲜度保持时间长,适合较长时间贮藏及长途运输。

表 10-90 果蔬的呼吸热

(单位:kJ/d·kg)

品 种	保持温度/℃			品 种	保持温度/℃		
	0	5	16		0	5	16
芦笋	6.3~13.8	12.533.4	23.0~53.9	甜玉米	7.5~12.1	11.3~13.8	40.1
甘蓝	1.3	1.8	4.6	莴苣	4.6	6.7	15.9
西洋甘蓝	3.4~8.8	6.9~11.7	13.8~33.4	苹果	0.3~3.0	0.6~2.9	2.5~8.4
芹菜	1.7	2.5	8.8				

真空预冷与一般机械制冷相比较,其优点汇于表 10-91 中。真空预冷贮藏与其它贮藏方式保存时间比较见表 10-92。

表 10-91 真空预冷优点

项 目	真 空 预 冷	强 制 通 风 预 冷
冷却时间	20min~30min	14h~20h(夜间也必须运转),差压式 5h~10h
冷却温度均匀度	从表面到芯部温度均匀	不均匀。容器的孔、空隙、风向、堆放方式、存放位置等均引起较大温度变化
局部冻结	完全不发生	直接与冷风接触的地方容易发生
除水	可能(质量分数的 3%~5%)	除了面对冷风的一面可以外,其它不行

(续)

项 目	真 空 预 冷	强 制 通 风 预 冷
薄膜包装无孔纸箱	可能,冷却时间几乎无差别	不朝冷风的地方,冷却时间延长数倍
采摘上市时间	因处理时间短,无限制	受很大限制
适应品种	最宜于叶类,通过改进处理方法,也可冷却根菜类	几乎适应全部果蔬
销售范围	收获后可以立即上市,因此可以销售到远方的市场	因为要到第二天才能出售,所以出售范围受到限制
预冷品的出售价格 (真空预冷品为 100)	100	60~70
处理费用	低(处理时间短)	高(处理时间长)
设备费和面积 (假如每日处理量相同)	便宜,设备面积小,而停放面积大	费用高,设备面积大,停放面积小
保冷库	须有保冷库	可以兼用

表 10-92 贮存方式保存时间比较

(单位:d)

果 蔬 品 种	冷 库	包装贮藏	通风预冷	真空预冷
芹菜	8	10~20	30	50
莴苣	3	10~20	30	50
菠菜	7~10	10~20	28	50
草莓	2	5~10	30	50
桃	3~8	10~15	30	50
荷兰芹菜	4	5~10	20	50
卷心菜	8	10~15	20	50
西红柿	30	/	/	67
青笋	3~4	4~6	14	21
青豌豆	4~7	7	14	30
鲜蘑菇	2~3	/	/	14

1. 真空预冷原理

水在大气压下的沸点为 100°C ,若水处于真空环境中,其沸点将随着压力的降低而下降。当压力降到 2330Pa 时,温度为 20°C 的水就能沸腾。若压力继续降低到 612Pa 时,水的沸点近似于 0°C 。真空预冷的基本原理是将果蔬置于真空容器中,并抽真空。当压力达 $2660\text{Pa}\sim 2000\text{Pa}$ 时,果蔬表面水分开始蒸发,水分蒸发随压力下降而加剧。在蒸发过程中,水所需要的气化热由果蔬来提供,其本身得到了冷却。通常在 20min 左右就可冷到 3°C 左右。此时,果蔬失去的水分只占其质量的 $1\%\sim 3\%$,不影响其鲜度。

在减压过程中水分愈容易蒸发的蔬菜,冷却效果愈高。而水分蒸发的速度,取决于体积与表面积之比。与萎体结构、组织密度、蜡质等也有一定关系。水从果蔬体内向表面移动的速度也影响水的蒸发。因此,不同果蔬真空预冷的效果是不同的。蔬菜按真空预冷的速度不同可分为三类:

A类蔬菜冷却到 0°C 附近时大约需 $10\text{min}\sim 20\text{min}$ 。几乎都是叶菜类,表面积比大、组织柔软,其结构有利于水分的蒸发。

B类蔬菜冷却速度较慢,如菜豆。表面积比小,组织坚硬。草莓与菜花也属此类,在真空冷却需较长时间。

C类蔬菜包括黄瓜、番茄等,在真空预冷中效果最差。这类蔬菜表面积比小、表皮厚、组织较致密,从而水分蒸发困难。马铃薯、胡萝卜等蔬菜也不适于真空预冷。

真空预冷时每蒸发蔬菜质量的1%水分,大约可使品温下降6℃。表10-93为日本资料介绍的几种蔬菜的真空预冷的工艺参数。

表 10-93 几种蔬菜真空预冷工艺参数

分 类	种 类	包装容器	处理量 /kg	最低气压 /Pa	处理时间 /min	品 温/℃		减量率 /%
						初温	终温	
A	莴苣	纸箱	10	600	9	17.5	0.1~3.5 ^①	2.6
	大葱	聚乙烯卷	7	600	7	17.5	0.0	2.4
	菠菜	聚乙烯卷	10	600	8	20.2	0.5	3.4
	白菜	有孔箱	15	600	17	19.2	0~2.5	3.8
	甘蓝	有孔箱	15	600	9	14.3	-0.2~2.5	2.2
	洋芹	开孔薄膜袋	10	600	8	11.4	0~4.2	1.1
	茼蒿	开孔薄膜袋	4	600	6	17.2	0.2	2.5
	豌豆荚	有孔薄膜袋	4	600	7	22.6	0	2.5
	甜玉米	纸 箱	45	600	24	32.0	1.5	4.1
	苔菜	聚乙烯卷	5	600	6	16.2	0.8	2.4
	大叶芹	聚乙烯卷	4	600	6	16.5	0.5	2.7
B	菜豆	有孔纸箱	4	400	26	28.0	8.0	—
	草莓	塑料箱	4	600	20	19.4	7.8	1.3
C	胡萝卜	网袋	10	400	10	14.5	10~12.8 ^①	0.7
	黄瓜	纸箱	5	400	17	22.2	19.2	0.7
	青椒	有孔薄膜袋	9	400	9	18.6	12.6	1.8

注:①此温度范围为表面和中心部的温度范围

2. 真空预冷装置主要部件

真空预冷装置通常由真空室、物料车、捕水器(冷阱)、真空抽气机组及主控制系统组成,如图10-139所示。

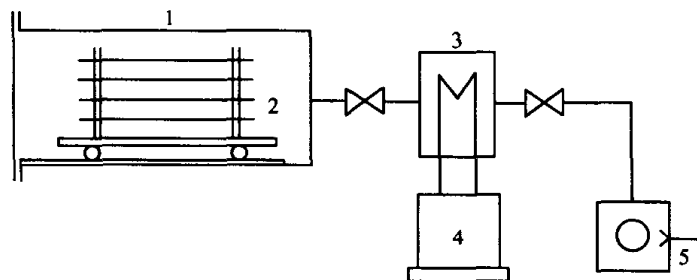


图 10-139 真空预冷装置简图

1—真空室;2—物料车;3—捕水器(冷阱);4—制冷机组;5—真空机组。

真空室为物料预冷提供了必要的真空环境,可以设计成箱式或圆筒式。为提高生产效率,通常设置2台真空室,配置一套捕水器(冷阱)及一套真空机组,真空室交替工作。

物料架(车)用于装载物料。要求进出真空室和装卸物要方便。为缩短装卸时间,物料架需多配几套。

捕水器用于捕集物料蒸发出来的水气,使之不易进入真空机组中。其内部有蒸发器,具有较低的温度,可使水气凝结,捕水器外部有保温层,以防冷量损失。

制冷机组给捕水器中的蒸发器提供冷量。

真空机组用于真空室获得一定的工作压力。

3. 真空预冷装置

真空预冷装置主要有三大部件,即真空室、捕水器及真空抽气机组。其中真空室壳体计算(已在第八章中详述),在此不再赘述。本节只讨论真空机组及捕水器。

(1) 真空抽气机组

真空预冷保鲜适宜的工作压力范围为 600Pa~700Pa,以果蔬不受冻伤的温度为限。在此工作压力下,真空预冷保鲜适用的真空泵或真空机组有:旋片式真空泵及滑阀式真空泵;罗茨泵-罗茨泵-双级水环泵机组;罗茨泵-旋片式真空泵机组;罗茨泵-滑阀式真空泵机组。油封式机械真空泵不适宜抽除含有大量水蒸气的气体,因水气会溶于机械泵油中,使油乳化,油的性能变坏,影响真空泵的性能。罗茨泵-罗茨泵-双级水环泵机组可抽水气,但抽大量水气,机组相当庞大,亦不适用,故通常均需要配置捕水器,用以捕集大量的果蔬蒸发水气,使进入泵中的水气尽可能减少。

真空机组的气体负荷由四部分组成,即真空室及捕水器容积中所含的大气压气体、装置的漏气量、物料所含的气体、以及捕水器未能捕集的水蒸气。通常粗略计算只考虑真空室及捕水器所含气体,其余可以忽略。在计算主泵抽速时可参见第九章相关公式。

(2) 捕水器

捕水器用于冷凝物料蒸发出来的水气。本身相当于一个热交换器,其管程走制冷剂工质,壳程走空气及水蒸气。壳体材料为不锈钢,蒸发器为铜管制成。壳体外部有保温层。设计捕水器时,需考虑气体通过时有较大的流导,同时又需考虑捕获水蒸气效率。一般设计中,捕集水蒸气效率应在 95% 以上。捕水器中的压力比工作压力低半个到一个数量级,并由此值确定蒸发器的温度。

捕水器的耗冷量包括三部分:①捕水器中蒸发器材料降温耗冷量 Q_1 ;②蒸发器结构支撑材料热传导及蒸发器辐射热损失 Q_2 ;③物料蒸发出来的水蒸气凝结耗冷量 Q_3 。

在确定捕水器所耗冷量时,应比较预冷耗冷量 $Q_1 + Q_2$ 和工作耗冷量 $Q_2 + Q_3$,取两者中较大值。制冷机选用单级压缩机即可,制冷剂选用 R22。

4. 真空预冷装置结构型式

真空预冷装置有三种结构型式,即单室式、双室均压式及双室交替式。

单室式真空预冷装置的原理如图 10-140 所示。装置中使用了三台并列安装的真空泵,果蔬预冷过程中分阶段运转,从而达到调节能耗的目的。其运转过程可用表 10-94 来说明。

表 10-94 单室式真空预冷装置的运转程序

预冷阶段程序	真空室压力范围/kPa	时间/min
果蔬搬入真空室	101.3	5
三台真空泵抽空	101.3→2.66	15
果蔬水分蒸发、冷却开始;1 台真空泵工作	2.666→0.8	10
果蔬搬出真空室	101.3	5

双室均压式真空预冷装置的原理如图 10-141 所示。它采用了三台并列安装的真空泵及两个真空室。真空泵的运行程序与单室式一样。当 1 号真空室预冷过程结束后,打开均压阀门,利用 1 号真空室的真空去降低 2 号真空室的压力,可以缩短 2 号真空室的抽空时间,节约能源。1 号和 2 号真空室交替使用。表 10-95 为这种设备运转的运转程序。

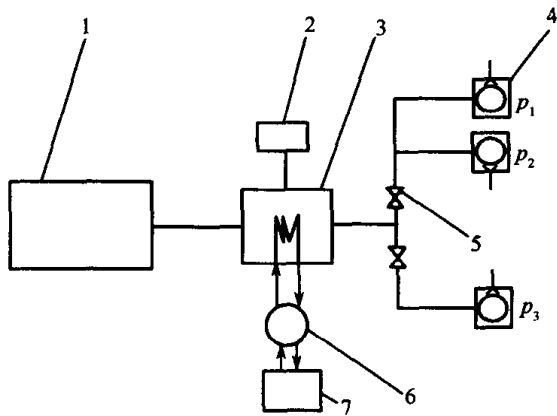


图 10-140 单室式真空预冷装置原理图
1—真空室;2—凝水接收器;3—捕水器;4—真空泵;
5—真空阀;6—盐水冷却器;7—制冷机组。

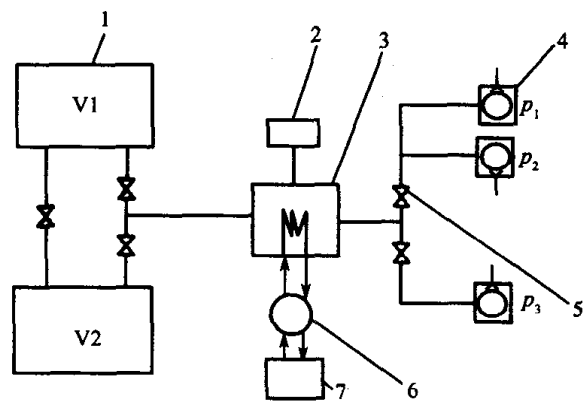


图 10-141 双室均压式真空预冷装置原理图
1—真空室;2—凝水接收器;3—捕水器;4—真空泵;
5—真空阀;6—盐水冷却器;7—制冷机组。

表 10-95 双室均压式真空预冷装置的运转程序

1 号真空室	2 号真空室	时间/min
3 台真空泵抽空:51.33kPa→2.666kPa	预冷结束:果蔬卸、装	10
1 台真空泵抽空:2.66kPa→0.8kPa	完成运转前的准备工作	10
预冷过程结束,打开均压阀	两真空室压力均为 51.33kPa	2
果蔬卸、装	3 台真空泵抽空:51.33kPa→2.666kPa	10
完成运转前的准备工作	1 台真空泵抽空:2.666kPa→0.8kPa	10
打开均压阀	两真空室压力均为 51.33kPa	2

双室交替式真空预冷装置的原理如图 10-142 所示。由表 10-96 所示运转程序可知,在双室式真空预冷装置中,所用的真空泵均连续运转,而不像双室均压式设备那样,当 1 台运转时,另两台要停止 2min。因此,这种装置要比前述两种装置性能优越。

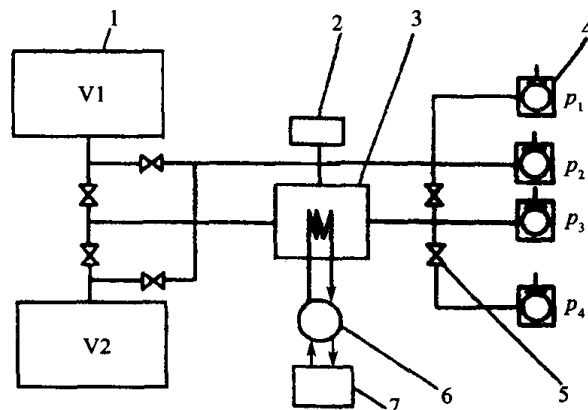


图 10-142 双室交替式真空预冷装置原理图
1—真空室;2—凝水接收器;3—捕水器;4—真空泵;5—真空阀;6—盐水冷却器;7—制冷机组。

表 10-96 双室交替式真空预冷装置运转程序

1号真空室				2号真空室			
进 程	压力/kPa	真空泵运转台数	时间/min	进 程	压力/kPa	真空泵运转台数	时间/min
果蔬搬入搬出	101.3	0	7.5	抽真空	4.0→2.4	4	7.5
抽真空	101.3→4.0	2	12.5	果蔬冷却	2.4→0.8	2	12.5
抽真空	4.0→2.4	4	7.5	果蔬搬入搬出	101.3	0	7.5
果蔬冷却	2.4→0.8	2	12.5	抽真空	101.3→4.0	2	12.5

值得注意的是,果蔬在真空冷却过程中,表面水分开始蒸发压力约为 2.4kPa,在此压力附近,果蔬的蒸发很快,需要加大真空泵的抽气速率。为了缩短抽气时间,减少能耗,故在双室交替式真空预冷装置中,设置 4 台真空泵进行 4.0kPa→2.4kPa 这一阶段的抽空。

不难看出,双室交替式真空预冷装置与其它形式的预冷装置相比,对运转中各个阶段的时间要求较严,特别是对果蔬的搬入搬出阶段。由于存在人工装卸的因素,要求必须保证搬运的速度,才能确保整个装置的正常运转。

(三) 真空包装保鲜食品

1. 环境对食品贮藏的影响

食品都是处于大气环境中,必会受到温度、水气、氧气和阳光的影响。与此同时,还会受到微生物、昆虫、老鼠的侵害。大气中含氧量约为 21%。氧气可使食品中的油脂氧化,使其变色或退色,维生素成分减少,并产生大量有害物质,改变味道。通常食品长时间存在大气中,可引起腐败,鲜度下降。其原因大多是微生物繁殖所致,包括细菌、霉菌和酵母菌,这些微生物在一定的温度影响下和有氧气存在时,生长繁殖很快,使食品迅速腐败。大气中的水气对食品存贮也有较大影响,它的存在除可以促进微生物生长繁殖外,还可使食品潮解,香味散失。另外,温度高可以加速果蔬衰老,使其失去商品价值。太阳紫外线可引起有机分子裂解,损坏商品,使之实用价值降低。而随着商品经济的发展,食品流通范围不断扩大,延长食品货架寿命势在必行。

上述食品变质原因,可以是单一因素引起,也可以是多种因素引起的。针对不同因素,可采取物理或化学方法加以预防。诸如低温冷藏,高温灭菌,将食品干制,或用糖、盐、有机酸腌制,加防腐剂、干燥、紫外灭菌、放射杀菌、功能性薄膜贮藏等。而真空包装贮藏食品是简而易行的方法。它是将包装袋中的空气抽走,然后再封好,使食品与大气隔绝。这样可防止食品氧化、发霉及腐败,减少变色退色,保持维生素 A 和 C 不损耗,防止食品色香味改变。

真空包装保鲜质量的好坏,取决于下列诸因素:

①脱气越彻底越好,使包装袋内氧气尽可能减少,以防食品氧化和喜氧菌繁殖,延长食品贮藏时间。

②最初的沾染细菌数越少越好,既要控制食品封装前的细菌感染,同时还要防止食品袋自身受微生物及昆虫污染。

③包装袋材料选择透气性小的薄膜,透气性越低,脱气后保持性越好,即维持袋中真空度越好。针对不同的包装对象,选择不同性能材料才能奏效。另外包装袋封口也很重要,封口不

好,同样会失掉保鲜作用。

④含气量越低的食物,封装后保质期越长。有的食物含气量高,当时看封好了,但过一段时间,发现有膨胀现象,这是脱气不彻底所造成的。

⑤材质柔软的薄膜,封装后粘附效果好。

⑥真空封装后,食物保持低的温度,保质期会相应增长。

真空包装后的食物,若在室温下贮藏,食物中的水分含量必须低于细菌繁殖界限以下。否则,真空封装食物,需使用食盐、糖分、有机酸、防腐剂作为辅助手段,才能达到较长时间保鲜目的。

以往食品行业中,对于保存性较差的食物,一般采用加热杀菌处理,或者冷藏。采用真空包装食物,也可以与热杀菌同时并用,效果更好。但最好是真空封装后再冷藏,效果最佳。

2. 真空保鲜原理

真空包装保鲜的工艺流程是将食物放入特制的塑料袋中,用真空泵抽走袋中的气体,再将袋的抽气口加热封装好。

袋中气体被抽走后,在袋中造成了一个真空环境,其特点是氧分压低;水气含量低;有利于食物内部气体或其它挥发性气体向空间扩散。真空保鲜也就是利用这三个特点来保存食物的。

微生物基本生命过程是营养和呼吸。呼吸氧是生物学的氧化过程,并随之放出来微生物进行生命活动时所必需的能量。微生物呼吸过程,也就是食物的氧化过程。以葡萄糖为例,氧化一个克分子的葡萄糖,可以放出 $2.8 \times 10^6 \text{J}$ 的热量,这些热量可供其维持生命活动。除醣类外,蛋白质、有机酸、醇类和脂肪都能成为细菌呼吸过程中的氧化物料,供其维持生命。在真空环境下,包装袋中的氧分压降低,在这种缺氧的环境下,霉菌、喜氧菌的生长敏殖得到了有效的抑制。一般认为霉菌在含氧量低于 $0.5\% \sim 1.0\%$ 的环境中就不会繁殖。可见真空包装对微生物引起的腐败有防止作用。另外,氧分压降低,还可以保护色素不受氧化,使食物保持原色。

低压下,食物内乙烯、可挥发性代谢物,如二氧化碳、酒精、醋酸等易于向外扩散,这样可以延缓或抑制果蔬类食物的衰老及老化过程。与此同时,异味气体亦被排除。

真空环境下,水气大量减少,而水分又是微生物生命活动所必须的条件。干燥的肉、鱼和菜都能长期保存,是因为微生物因缺水而丧失了生存条件,不易繁殖或者是死亡。真空封装可造成环境的相对湿度很低,甚至到零。即便这样干燥,有的细菌生命还没有终止,再次遇到适当的湿度,还会繁殖起来,造成食物腐烂。譬如真空包装后封口不好,包装袋材质透水气性好,都会使大气中的氧气和水气进入袋中,造成食物腐烂。

食物中所含的水分多少对微生物生存影响很大,可以用食物中水分活性 ϵ 来判定。 $\epsilon = p/p_0$, p 为食物的水蒸气压, p_0 为同温度下纯水的蒸气压。食物中微生物生长发育所需的最低 ϵ 值由表 10-97 给出。

由表 10-97 可见, ϵ 在 0.6 以下的食物,即使是耐干性霉和耐浸透压酵母也不易发育繁殖。这类食物,如长期保存在气密条件下,可以少考虑微生物的影响。任何食物都有一定的含水率,它与 ϵ 的关系见表 10-98。

真空包装袋是用材质很好的塑料薄膜制成的,通常需几层膜复合在一起才能使用。其中有的复合有铝膜,既可以对气体和水气产生高阻性,还可以防止太阳紫外照射食物,使其组织免于产生紫外裂解。同时塑料袋均有一定的强度,可以防止昆虫、鼠类损坏食物,也可以避免食物再次受环境中的微生物侵害,达到保鲜目的。

表 10-97 微生物生长发育所需最低的 ϵ 值

微生物	细菌	酵母菌	霉	嗜盐菌	耐干性霉	耐浸透压酵母
ϵ	0.91	0.88	0.80	0.75	0.65	0.61

表 10-98 食品中含水率与 ϵ 的关系

食品	水果	蔬菜	果汁	蛋	肉类	奶酪	面包	软糖	水果汁	蜂蜜	咸饼干
水分含量/%	90	90	80	70	70	40	40	30	20	20	10
ϵ	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.82~ 0.94	0.72~ 0.80	0.75	0.1

需要指出的是,真空包装保鲜有它的局限性,真空保鲜(非充气式)对于失去生命的物料有较好的保鲜作用,而对于果蔬类和鲜肉类保鲜作用较差。为使物料包装前携带细菌少,采取杀菌措施还是必要的。

3. 真空包装手段

真空包装可以用抽口式真空包装机、箱式真空包装机或者贴体式真空包装机来完成。这三种包装机都可以满足真空包装要求,就其包装效果而言,以箱式和贴体式真空包装机最好,抽口式包装机效果差一些。虽然使用包装机不一样,但其工艺过程都是一致的。

将食品放入塑料袋中,然后用真空泵抽气,当真空度达到预定值后,通常为 2000Pa~2500Pa,随即加热封口。

4. 食品包装材料选择

真空包装贮存食品效果不仅与包装手段有关,还与包装材料的性能息息相关。对包装材料要求主要有:①气体和水气透过率要小;②需要耐油、耐高温、耐寒;③热封性好,加热封口时易粘合;④有一定机械强度,不易破损;⑤不易带静电;⑥透明包装时要求材料透明度要好。

真空保鲜需要包装袋热封后保持真空状态。如果材料透气性高,氧会较快地充满袋中,失掉了真空保鲜作用。氧透过率小的薄膜有:①把偏二氯乙烯涂布在聚酯、玻璃纸、聚丙烯、尼龙上的复合薄膜;②把偏二氯乙烯和其它基材复合的复合薄膜;③乙烯醇共聚体薄膜作基材的复合薄膜;④聚乙烯醇和防湿性薄膜复合的复合薄膜;⑤把二氯乙烯涂布在双向拉伸维尼龙上的复合薄膜等。对氧和水分透过性要求更高的食品,可使用铝膜复合薄膜。

为了防止食品水解及自身水分逸散,包装材料应透水性小,这类材料有聚乙烯和聚丙烯等。

对材料热封性要求是易于加温封口或低温下封口,通常热封温度为 90℃~120℃,封口强度大于 2kg/mm~3kg/mm 幅度。

某些食品为延长其贮存寿命,除使用真空包装外,还配用冷藏或冷冻贮存,包装材料在低的温度下不允许变脆或出现微孔。

带电性强的薄膜,会给制袋或印刷带来麻烦,产生故障。薄膜带静电,还很易吸灰尘,影响商品质量。为此,有的包装薄膜涂有防静电剂。

根据不同的包装对象,选择不同的功能膜进行包装,才能达到保鲜目的。通常都是几层膜材复合而成,达到阻气性、阻湿性、耐油性等。

5. 食品氧化与变色的防止

食品置于空气中,时间一长,就会产生腐败、油耗、变色、返潮等变质现象而不能食用,采用真空包装可以防止。

(1) 油脂氧化的防止

油性食品受氧化的因素有两种:一是食品制造时出现的,与油脂的种类和金属离子的含量有关;二是食品贮藏与流通过程中出现的,与周围环境中的氧、温湿度、光线有关,它们影响食品的性质,尤其是影响油的稳定性。

一般来说在有空气的包装中有充分的使油脂氧化的氧。要防止油脂氧化可以采用化学方法,即添加抗氧化剂,或物理方法,即减少袋中的氧含量,后者更安全有效,还可用高屏蔽性薄膜做成气密性包装,以及使用脱氧剂。

油性食品的氧化很容易由光线,特别是紫外线引起。越是易氧化的食品,越易受光线的强烈影响。因此,易氧化的食品需用铝箔和不透明的材料复合成的复合薄膜,并用能阻挡紫外线的油墨印刷,或全面印刷的遮光薄膜以及本身能遮挡紫外线的薄膜来包装。对于可见内容物料的透明蒸煮袋来讲,则要用聚酯、尼龙等复合材料。蒸煮袋食品要求在常温下能长期保存,因此,对易产生油脂氧化、褐变、色素分解等化学变化的食品,必须使用氧透过率低的高屏蔽性薄膜。在无光条件下,包装材料透氧越少,温度越低,食品变质越少。目前,耐热性好、透明的高屏蔽性的、可用于蒸煮袋的塑料薄膜还在开发之中。

(2) 褐变的防止

豆酱等食品颜色的变暗和变褐是由氧引起的,即氧化褐变。采用真空包装或者除去包装袋中的氧,就可防止。这种食品包装常选用乙烯醇共聚体(EVAL)和拉伸维尼龙(OV)等高屏蔽性薄膜作包装材料。干燥蔬菜由于吸湿也会褐变,因此为防其变质,还需保持低水分和防潮,要求使用透水率小的包装材料。

(3) 色素分解的防止

食品的色素中,不稳定物质很多,受到氧和水气作用就会分解变色。干燥食品由于氧化表面积显著增大,最好充以保护性气体包装,以防色素氧化分解。

肉类也会因氧化变成褐色,要保持肉色,需用高屏蔽性包装材料包装,并用低温保存才能奏效。

叶绿素是果实和蔬菜中所包含的色素。如果受到氧和光线的影响,就会发生分解。叶绿素在低水分的情况下,难以分解。但水含量增加到6%~8%,它的分解就会显著增加,进而发生变色。因此,选择透水性小的包装材料为宜,如同时使用干燥剂,则效果更好。

6. 真空包装的应用

真空包装应用越来越广,我国早期应用于酱菜如榨菜的包装。封装的榨菜贮存60d,质量正常,色泽不变,到300天时略带暗红色。后来大量应用真空包装土特产品。如包装烧鸡、扒鸡、猪蹄、驴肉、兔肉、香肠等,市场上随处可见。

糕点选用真空包装,可以延长贮藏寿命,特别是含水量相对较多的糕点,在大气下保存易变质,如蛋糕一旦气温高、湿度大,很快就会发霉,如果采用真空包装,可以存放几周。包装材料选择阻气性好、阻湿气强的复合膜。

绿茶可以用真空包装方法来防止其氧化和失去香味。包装材料选择对氧高阻性的膜材,如拉伸聚丙烯、聚偏二氯乙烯、聚乙烯、牛皮纸等。包装薄膜一般用几层复合而成。复合层中需加铝箔,一般厚度为 $7\mu\text{m}$ ~ $12\mu\text{m}$,也可用真空蒸铝来代替铝箔。有了铝阻挡层之后,可以阻挡光线照射茶叶,避免裂解。

我国南北方人都爱吃的年糕,通过真空和高温加压杀菌也能长期保存,很适合于自选商场销售。加热包装杀菌时,要膜层强度高,耐热且气密性好。使用聚乙烯膜厚度为 $60\mu\text{m}$ ~

70 μm 。

豆酱是人们喜爱的大众化调味品,制成的豆酱中都含有酵母菌,在一定温度和湿度下,酵母菌会迅速繁殖,产生二氧化碳,使酱发泡,进而引起发霉与变色。抑制酵母菌可用加热方法或放入添加剂。若采用高阻性材料进行真空包装,既比瓶装方便,又可以保鲜,其贮藏时间大为增长。通常使用复合膜包装,一般内层的聚乙烯厚度为 50 μm ~70 μm 。

(四) 真空气体置换保鲜

1. 真空气体置换保鲜特点

常压下气体置换保鲜技术,人们早在 20 世纪 30 年代就开始应用了。当时澳大利亚和新西兰牧场很多,牧场主每年都有大量牛肉、羊肉出口,通常均使用机械制冷的冷藏船运往欧洲市场。常规冷藏可以保持肉类不变质,但肉的颜色却会发生变化,消费者的直观感觉鲜度变差。因此,他们采用冷藏船中充入二氧化碳方法来保鲜。由于二氧化碳能够抑制霉菌和腐败菌等微生物繁殖,即使冷藏船中温度不要很低,也能达到保鲜作用。肉的色泽有所改善,颇受消费者欢迎。到了 1938 年,这种运输肉类方式得到了进一步的发展,澳大利亚出口的猪肉,30% 采用了冷藏船充入二氧化碳来运输,而新西兰 60% 的出口牛肉,用充二氧化碳保护,运往世界各地。

直到 20 世纪 70 年代,由于真空技术的大发展,使这种常压下的气体置换技术,变为真空气体置换技术。这项技术能够更精确地控制气体成分,不仅应用于肉类贮藏和运输,也可以用于水果和蔬菜的贮运,以及其它各类食品的保鲜。

真空气体置换保鲜食品方式,之所以受到消费者的青睐,是因为它具有许多独特之处:①通过改变食品包装袋中的气体成分来达到保鲜目的,不用化学添加剂和防腐剂。免于消费者受化学制剂的危害。②不用高温灭菌,充入二氧化碳,即可抑制微生物繁殖,以达到保鲜作用。食品中的营养成分不受损失,特别是热敏性很强的维生素 C 不受损失,它能最大限度地保持食品的营养。③它能保持食品的色泽,特别是肉类色泽,消费者购买欲大大增加了。④延长了食品的货架寿命。如英国风味的烤饼使用气体置换包装后,货架寿命由 2d~3d 延长到 13d。西欧市场烘焙饼和肉攀用此包装技术后,可在货架上存放三个星期。⑤水果蔬菜能保持其水分,保持原有的鲜度。⑥由于包装袋透气性小,可以保持食品芳香和原始风味。⑦包装袋中充气,能完好地保持食品外观;⑧食品在包装袋中,免于环境再污染,干净卫生,食用方便。

气体置换保鲜改变了食品包装环境,对产品的保鲜起到了主导作用,但还需配上温度条件及食品生产时的卫生环境,并控制运输、储藏和销售流转的时间。各个环节做好了,才能取得最佳的综合效果。

气体置换包装,尽管由于使用较好的包装材料、必要的包装设备、各种气源等增加了产品的销售成本,但气体置换包装在产品的联销分配中,能获得多种的经济效益。

2. 气体置换保鲜原理

气体置换保鲜基本原理是将包装袋中的空气抽走,然后充入配置好的混合气体,利用气体和包装袋材自己的功能,来达到保鲜食品目的。

肉食品与果蔬类鲜度下降的机理各不相同,包装时充入气体和袋的材质也各有所异。保持生肉食品的鲜度,主要取决于控制和消除酶所进行的生化过程,以及微生物生命活动所引起的破坏作用。酶对肉类的生化作用可以改善肉的品质,使肉类更富于营养。酶也可以起到不良作用。如鱼组织在适宜的温度条件下,受到酶的作用后,在很短时间内,蛋白质和脂肪组织

发生化学变化而变质。酶的生化作用依赖于温度,在 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 以下酶有活性,高于 50°C 活性趋减,在 $70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 时全部丧失。温度低于 0°C ,活性也极为微弱。可见,为保持肉类的鲜度,真空气体置换包装需要适宜的温度环境。

微生物的生存和繁殖会使肉类变腐,气体置换包装可以改变微生物生存环境的气氛,造成微生物不易生存及繁殖,保持肉类的鲜度。活肌肉组织中的微生物数量很少,从健康动物获得的胴体能够保持组织无菌,因此,肌肉组织的大部分污染是在动物屠宰以后产生的。

新鲜肉的色泽取决于三种形式肌红蛋白的相对含量,即还原型肌红蛋白,氧合肌红蛋白和变肌红蛋白。在有氧存在条件下,还原型肌红蛋白是主要色素,因此,肉刚切开时略带紫色。氧合肌红蛋白是肌肉色素的氧化型,使肉呈现鲜红色。变肌红蛋白使肉产生不良的褐色。它是低氧条件下,由前两种肌红蛋白氧化而产生的,是不希望的。控制包装中氧的含量,可保持肉的色泽。

蔬菜和水果采摘后,虽然不能由土地供其维持生命的营养和水分,但其生理作用却还继续着,主要是呼吸作用,呼吸作用强,呼吸热增大,促使果蔬成熟与老化,变质加快。影响呼吸作用的主要因素有:温度、环境气体、水分蒸发。

温度是影响水果蔬菜呼吸作用的主要因素。温度高,呼吸作用增强,加快其老化,通常用低温保存,即可抑制其呼吸作用,延缓老化。

环境气体主要指氧、二氧化碳及乙烯,其浓度大小,对果蔬呼吸作用有较大影响。果蔬进行呼吸时,吸入氧气,呼出二氧化碳。如果环境气氛是低氧、高二氧化碳,就能抑制其呼吸作用。但二氧化碳浓度过高,引起呼吸系统异常,也会造成质量下降。而乙烯气体是促使果蔬成熟的激素,是影响其品质的重要气体。果蔬吸收乙烯后,对其呼吸、叶绿素分解、老化均起促进作用。果蔬自身或外界侵入的乙烯,对其鲜度保持均是无益的。

果蔬含水率随品种不同而异,大约在 $80\% \sim 90\%$ 的范围内。一般说来,果蔬中的水分在蒸发过程中,如果质量减少了 5% ,外观鲜度就明显下降,就会失去商品性。气体置换包装由于包装材料透水气很小,可以防止果蔬的水分弥散,在包装袋中处于高湿度下,使其水分蒸发得到抑制,以达到保持鲜度的目的。

气体置换包装保鲜,常用的气体有氧、氮和二氧化碳。三种气体对保鲜所起的作用不同。氧可以保持氧合肌红蛋白和使肉保持鲜红色。包装袋中氧压高于一定值后,从外观上看,可以明显增加和延长肉的新鲜度。因而采用高压氧气氛,就可以在一定的时间内抑制变肌红蛋白的形成。氮是一种惰性气体,可以作填充剂用。氮不影响肉的色泽,也不能抑制细菌的生长。采用氮的目的是为防止产品压碎,同时可避免食品氧化变褐,氮气还可以防止食品酸化及抑制微生物呼吸。二氧化碳在气体置换包装中得到广泛的应用,是因为它有抑制细菌的生长能力。在细菌刚刚生长的初期,使用二氧化碳,可以显著地延长货架寿命。冷藏肉上的革兰氏阴性败坏菌丝对二氧化碳特别敏感,而乳酸菌受其影响较小。它之所以能够防止食品腐败,是因为它能改变细菌细胞的渗透性和 pH 值,以及抑制酶的作用。一般要求其浓度高于 25% 。

3. 气体置换包装手段

气体置换包装手段有两种,都可以排走包装袋中的气体。一种是气冲法,这种方法是使用高速连续气流冲淡包装袋内的气体,使其残留氧降低到 $2\% \sim 5\%$;另一种方法是使用充气式真空包装机,抽除袋中的空气,再充进混合气体。这种方法包装效果好,被普遍应用。

气体置换包装过程是将食品放入塑料袋中,然后启动真空泵排走袋中的空气,再将配置好的混合气体充入袋中,随之加热封口。

4. 肉类气体置换保鲜

真空气体置换保鲜主要用于生肉类贮藏,以保持其鲜度。对肉类熟制品,一般采用真空封装保鲜。

(1) 新鲜红肉

用二氧化碳和氧组合的混合气体,对牛羊肉进行气体置换包装,可以延长它们的货架寿命。高浓度的二氧化碳可以抑制腐败细菌的生长,而氧气则可以保持肉有诱人的鲜红色。

20 世纪 70 年代,欧洲新鲜红肉包装工业中使用了规模充气包装(即气体置换包装方法),此方法是将带有保护材料的阻隔蒸煮袋置入瓦楞纸箱中,然后袋中装入分割肉,抽真空后,将二氧化碳和氧气充入蒸煮袋中,二氧化碳为 95%,氧为 5%。在良好的冷藏条件下,产品的货架寿命可达 14d~17d。用这种方法还成功地包装了大排骨和里脊。

欧洲市场还有一种包装方法出售碎牛肉。此包装方法是将牛肉盛到刚性盘中,然后用高阻隔柔软盖膜材料加封,加封前抽走盘中空气,并充入氧和二氧化碳混合气体,其中氧含量为 65%~80%,余者为二氧化碳。用这种方法可使碎牛肉的货架寿命达 7d~10d。商品颇受消费者欢迎。

预包装新鲜红肉的另一种方法是,将肉用高透氧薄膜封装,然后将其放入设计良好的具有阻隔蒸煮袋的外运容器内,脱气抽真空,充入二氧化碳或氧和二氧化碳混合气体,或者氮气。可以获得较长的销售寿命。到达销售地点后,再将外包装打开,主包装的高透氧薄膜,能使产品保持 2d~3d 的红色。

(2) 新鲜鱼类

鱼是肉类最易腐败的一种。其原因有两个,其一鱼在死之前会不停地跳动挣扎,耗费了肌肉中的乳酸含量,其二是新鲜鱼含 0.2%~2% 的氧化三甲胺,鱼死后氧化三甲胺在细菌作用下,分解成三甲胺及其它物质,三甲胺会产生臭味。其二,鱼的脂肪也会造成腐败,主要发生在大马哈鱼、鲱鱼和鲑鱼等多脂鱼类中。

鲜鱼的变质很快,有时在冷藏条件下也是如此,所以很难在鲜活状态下运输发散,冷冻方法仍是保存海鲜的主要手段。但气体置换能够安全地延长鱼产品的货架寿命,因为二氧化碳有很强的抑制细菌作用。使用气体置换包装的冷藏鱼货架寿命至少是冷藏条件下的二倍。

含 40%~60% 二氧化碳的混合气体适宜控制一般腐败菌的生长,法、英两国有不少家海鲜公司使用气体置换包装分运产品,使用的设备是与包装牛羊一样的热成形、充气封口机。有的公司使用 40% 的二氧化碳,30% 的氧气和 30% 的氮气组合的混合气体进行气体置换包装,可以使鱼的冷藏保存期达 5d,对于白鱼、虾、扁贝等用此种气氛比较好。而鲑鱼、大马哈鱼、鲱、鲑及鲱鱼等多脂肪鱼,不使用氧气,而用 60% 的二氧化碳及 40% 的氮气组合,比较适用。

(3) 家禽

新鲜家禽变质的主要原因是有害的微生物的繁殖所致。这些微生物能使家禽发粘、变味。据调查,美国市场上 1/3 的家禽由工厂预包装,其中有 5% 是用气体置换块状包装。其方法是先把整只或切成块的冷冻家禽预封在低气阻薄膜中,然后将此种小包装置于一个大的阻气袋中,再放入瓦楞纸箱中。随即抽净大袋中的空气,再注入二氧化碳或者二氧化碳和氮的混合气体。混合气体的组分是 60%~70% 的二氧化碳,20%~30% 的氮气。这种包装保鲜,可使鸡肉的货架寿命达到六个星期。

加拿大肉联公司,使用 100% 的二氧化碳气体,包装约 35kg 一箱的鸡肉,提供给麦当劳公司下属的饭店使用。

英国和法国使用气体置换包装的家禽制品有家常鸡肉、滚上面粉的鸡肉、火鸡片及其翅膀和腿。此外,还有肝之类的内脏等。

5. 水果和蔬菜

水果和蔬菜与鱼和肉不同,水果和蔬菜在收获后,相当长的一段时间一直是活的有机体。尽管它们不再吸收养料,但仍有呼出二氧化碳、吸入新鲜氧气的呼吸作用。如果用不透气的薄膜包装水果和蔬菜,袋内的空气成分会不断变化,二氧化碳增多,氧气则减少。若包装薄膜是透气的,过多的二氧化碳会穿透而出,氧气会渗透到包装袋内。所以这种呼吸速率可以通过增加二氧化碳和减少产品周围的氧气含量来减慢。气体置换包装蔬菜和水果的好处是:延迟果蔬成熟和变软;降低绿叶变黄速度,减少维生素损失。

由于水果和蔬菜等都有各自的呼吸速率,加之温度变化对呼吸速度和薄膜的影响,所以要准确给出不同产品的气体组合及包装材料是极其困难的。

食品工作者已开发出各种高透气性薄膜,为果蔬利用气体置换包装提供了优质材料。

6. 预制食品

预制食品的货架寿命,因酵母菌和霉菌的繁殖产生怪味和臭气,出现脂肪氧化,产品变干而缩短。在欧洲市场,已用二氧化碳和氮气来处理各种食品和半成品。用气体置换方法已使烘馅饼和肉松的货架存放期达三个星期。气体置换包装正在被用来延长色拉、新鲜熟食、鸡蛋卷甚至主食的寿命。北美生产鲜面团的工厂采用了气体置换包装,使它们处于冷藏条件下的产品,货架寿命从原来的几天,延长到几周。

7. 面包制品

面包类食品变质的原因是干瘪、失水和霉变。用阻湿薄膜能够延缓干硬的发生,然而产生的水气会使霉菌快速增长,这样就需要二氧化碳来抑制霉菌,也有人用氮气充填包装。

采用气体置换的主要目的是取代食品中的化学添加剂,且不再需要花费较大的冷藏环境。产品的货架寿命,由原来的 2d~3d,可延长到 17d,销售市场也随之扩大。

(五) 真空包装材料

1. 对包装材料的要求

在进行真空包装和充气包装时,除正确选择包装手段及气体组分外,选择好包装材料亦是包装成功与否的关键。真空包装材料性能,直接影响食品的存贮寿命及风味的变化。

食品在存贮阶段,由于微生物的影响,环境的物理及化学因素作用,以及各种昆虫、鼠类沾污,食品将变质、变味、变色,失去营养,失掉香味,出现潮解等现象,最终失掉商品价值。

微生物对食品的影响,人们到处可见。它的繁殖将使大量的食物腐烂变质和发霉。环境中的氧气是食品变色、退色,维生素损失的直接原因,它的作用是产生氧化反应,改变了食品的物质成分。阳光、紫外光及其它各种光对食品也会产生影响,使食品色素分解,细胞组织裂解,进而失掉原营养成分。空气中的水分会使食品潮解,可使干脆食品变软,甚至变质。昆虫和鼠类对食品的沾污,更是显而易见了。

针对这些贮存中的不利因素,可以选择真空包装、气体置换包装以及真空预冷等方法来保存食品。真空包装和气体置换包装时,目前主要使用薄膜材料,当然也有使用瓶装及罐装。对软包装所使用薄膜材料,提出的主要要求有:

①首要的是有一定的机械强度,不易拉破、撕裂,不起皱,耐冲击力,跌落不易损坏。这样可以保障食品不损失,使之处于真空环境中,或者特定的气体环境中。

②为了隔绝空气及水气,要求膜材有良好的阻隔性。真空包装或者气体置换包装,需要保持袋中的原始气氛条件,大气中的气体及水气不能进入袋中。如果大气中的氧进入袋中,会造成食品氧化。若是水气进入袋中,可以使食品潮解。要求膜材料有良好的气阻性,通常不是单一膜材能胜任的,需要阻水气薄膜与阻氧气薄膜复合起来,才能起到良好的阻气作用。一般要求材料对氧的渗透率要小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}$,要求材料透湿度小于 $15 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \sim 30 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。表 10-99 给出了各种材料对气体的渗透率及透湿度。从表中可见,维尼纶、聚偏二氯乙烯、尼龙都是很好的阻气材料。聚乙烯和聚丙烯是较好的阻水气材料。

③为避免光照及紫外线对食品的损坏,要求膜材不透光和紫外线。为此,还需要在膜材上镀上一层铝膜(通常采用真空蒸发工艺),才能起到对光和紫外的阻挡作用。

表 10-99 材料对气体的渗透率及透湿度

薄膜种类	气体渗透率/ $\times 10^{-5} \text{ mL} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$			透湿度 $/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
	CO_2	O_2	N_2	
聚乙烯(低密度)	18500	1000	1400	20
聚乙烯(高密度)	3000	600	220	10
聚丙烯(无延伸)	3800	860	200	11
聚丙烯(延伸)	1680	550	100	9
聚酯	420	60	25	27
尼龙(无延伸)	253	60	16	300
尼龙(延伸)	79	20	6	145
聚苯乙烯	2400	5000	800	160
聚碳酸酯	1225	200	85	30
聚氯乙烯(硬质)	142	150	56	10
聚偏二氯乙烯	70	15	2.2	1.5~5
氯化橡胶	165	10	7	20~30
普通玻璃纸	—	10~1000	—	非常大
防湿玻璃纸	—	70	—	50
维尼纶	10	7	—	非常大
PVDC 涂层 OPP	15	5~10	1.5	4~5

④包装所使用的材料,要求稳定性好。食品存贮条件是多种多样的,有时热,有时冷,有时有光照,有时处于高温环境中。要求材料无论在何种外界环境中,都必须稳定,不能失去初始的性能。故需要材料能耐热,不怕光照,耐冷,在低温条件下,不变脆或出现微孔,甚至还要求它不怕有机溶剂浸蚀,抗辐射,耐药品作用等。

⑤制作包装袋时,工艺性要好。主要包括热封强度高,或者是低温度下封口。通常热封温度为 $90^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 。封口强度大于 $2 \text{ kg}/15 \text{ mm} \sim 3 \text{ kg}/15 \text{ mm}$ 幅度。易粘接,不卷曲,不带静电。带电性强的薄膜会给制袋和印刷带来麻烦,产生故障;另外封装粉状物品时,若膜材带静电,粉尘易粘在封口处,不易封牢;薄膜带静电还很容易吸灰尘,影响商品质量。

⑥商品性好。包括白度、彩色效果、印刷性能、透明性、光泽性等。

⑦便利性佳。即要求材料易保管,易输送,易携带,易开封,废弃后易处理,再利用性强。

⑧卫生性好。要求材料本身不变质,无细菌感染,没有异味。

⑨经济性好。包括价格,标准化程度,生产难易,是否易贮存等。

2. 复合膜的用途及构成

目前国内市场儿童小食品、方便食品、干制及腌制食品种类繁多,琳琅满目。就其包装而言,大多数还是常压包装,即使是真空包装或气体置换包装,也是使用单层塑料膜较多,阻氧性及阻水气性能均不佳,存放时间不长,袋子就会鼓胀,干制品变湿。而国际上软塑包装的发展趋势,已由原来的2~3层向5~6层多层方向发展,由干式复合技术向共挤复合技术发展。共挤复合成本上较低,金属铝箔在软塑包装业上的应用愈来愈多。真空蒸镀铝也是软包装食品和医药的发展方向。

评价复合膜的优劣主要特性有:防湿性、防气性、防油性、防水性、耐蒸煮性、耐寒性、透明性、遮光性、成形性、热封性等。不同的食品对包装膜材功能要求不同。如米制点心要求膜材料具有防潮性、耐油性、耐寒性、耐破袋性。

(1) 保持食品风味的高阻隔薄膜材料

食品风味在贮存过程中,常常发生变化。其原因有:由于薄膜材料透气性好,其芳香成分通过膜材料而弥散到周围环境中;周围环境中异味也可以通过薄膜渗透到食品中,使食品沾上异味;在食品贮藏过程中,油脂和色素被氧化,不仅使食品变褐,改变颜色,还会产生异味;存放过程中,食品受到微生物的侵害,也会产生异味。

要克服这些不利因素对食品的影响,材料阻隔性能的重要性是不言而喻的。在包装时需选用高阻隔材料,阻挡香味弥散,阻挡氧气进入袋中,阻止细菌侵害。通常以对氧气的阻隔程度来衡量材料阻隔性好坏,把透氧率低于 $8 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa}$ 的材料,称之为高阻隔性材料。

常用的高阻隔性薄膜材料有:在聚丙烯、尼龙、聚酯等薄膜上涂覆聚偏二氯乙烯膜;聚偏二氯乙烯膜,或者将其复合在其它基材上组成的复合膜;以乙烯、乙烯醇共聚物为基材的复合薄膜;聚乙烯醇膜复合于有防湿性薄膜上所构成的复合膜;涂覆聚偏二氯乙烯的双向拉伸维尼纶薄膜;蒸镀 SiO_2 的薄膜。这些材料对氧均有较高的阻隔性,是非常好的透明的高阻隔包装材料。

(2) 蔬菜水果保鲜薄膜材料

前已叙及,为防止果蔬贮存过程中变质,可以用复合膜材料包装前进行气体置换,抑制其呼吸作用,达到保鲜目的,也可以利用功能性保鲜膜提高保鲜度。

吸附乙烯薄膜,这种薄膜是在塑料中掺入多孔矿物粉,如沸石、方英石、二氧化硅、绿凝灰石而制成的。多孔矿物粉可以吸附乙烯气体,其含量应高于5%,否则吸附性较差。但多孔材料掺到薄膜中去,会使透气性增强,故使用这种膜时,吸附性和透气性需均衡考虑。

控制气体成分的薄膜。近年来,国际上流行低温度、少氧、增加二氧化碳方法来贮存果蔬。利用这种低氧、高二氧化碳的环境来抑制水分蒸发和呼吸作用,从而达到防止老化,保持绿色的效果。以聚乙烯为基的有适当透气性的薄膜,就具备这种功能。在选用这种薄膜时,需考虑果蔬的种类、成熟程度、膜厚度、环境温度、贮存时间等。

防雾防结露薄膜。果蔬通常含水率为80%~98%。当水分蒸发后,一方面造成枯萎和鲜度下降,另一方面会使包装袋内湿度大大增加,引起膜内表面出现白雾和结露。这样不仅影响外观质量,同时结露形成水滴接触到果蔬后,引起腐烂,使之失去商品价值。防止的方法有:在脂肪酸酯膜上涂布防白雾剂,或者使用掺杂界面活性剂的薄膜,两者都有防雾结露的功能,从而可以保护果蔬不腐烂。

抗菌膜。抗菌薄膜是把无机物填充到塑料中而制成的,无机填充物是以氧化铝和二氧化

硅为原料合成的多孔性沸石,再使其与银离子相化合而得到的。沸石具有离子交换功能,其结晶构造中有能与其它金属离子产生置换作用的钠离子,当银离子和钠离子发生置换时,就产生银沸石。添加银沸石的薄膜,表面具有抗菌性。添加物中的银离子,不会向蔬菜水果中转移,不会影响其质量。对含银量为 2.5% 的银沸石抗菌性进行测定,已证明,当银离子浓度为 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ 时,就完全可抑制微生物的生长。另一种抗菌材料是银沸石层抗菌膜。它是把含银沸石的膜紧贴在普通薄膜的胶合层上,进行共挤而形成的复合膜,银沸石添加量为 1% ~ 2%。当银离子浓度为 $2.5 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-4}$ 时,就会有足够的抗菌能力。

(3) 保持食品香味的薄膜材料

评价食品通常以色香味来衡量。香气对食品风味起着举足轻重的作用,失去香味虽然可以食用,但风味变了,也就失去了商品价值,对需要存贮的食品来讲尤为重要。如加香饼干、糖果、巧克力、香肠、火腿、熏制品、奶酪、炒货、饮料、酒、中药材、化妆品、花茶等,均有自身特有的香味,近年国外把柠檬、桔子、草莓、甜瓜、苹果、葡萄等水果香味加到红茶中,制成香味茶,存放时更需保持水果香味。

目前阻水气、阻隔气体的膜材很多,但都不能阻止香气跑掉。可以说,阻止香气弥散还是待解决的难题。以往茶叶软包装材料为三种膜材复合而成,即聚酯、铝箔、低密度聚乙烯。这种复合膜袋不能阻止香气散发,货架上的袋装茶,时间一长,就会失去香气。香气是从热合处逸出的。已有的高阻隔材料,如乙烯、乙烯醇共聚物和聚酯,均有良好的阻隔性,但要求热封温度高,对包装机提出了更高的要求,不太适用。

目前研制出一种聚丙烯腈薄膜,它热封性好,热封温度为 $130^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$,阻隔性好。用它制成厚为 $30\mu\text{m}$ 的薄膜,分别对桔子、柠檬、桉叶、薄荷等芳香油进行了保香试验,30d 后香味如故,而用铝箔与聚乙烯复合膜,12d 后香味就出来了;低密度聚乙烯 4h 后,香味已大量泄漏。另外,聚丙烯腈还有一个特点是不吸收香气,而低密度聚乙烯吸收芳香成分,使材料拉伸强度降低,而聚丙烯腈没有变化。

由上述试验结果可知,聚丙烯腈是防止香味发散的较理想的包装材料。

(4) 鲜蘑菇包装膜材

鲜蘑菇是生命周期短,而经济价值营养价值高的产品。收获后很易枯萎和变质,出现发黄开裂、茎梗伸长等现象。如果使其处于高二氧化碳、低氧和低温条件下,就可以防止这种情况的出现。气体置换技术,就可以达到保鲜的目的。

鲜蘑菇可以选用聚氯乙烯单层膜进行软包装,膜厚为 $10\mu\text{m}$ 或 $15\mu\text{m}$ 。膜层透气性大小与温度有关。以对氧为例, $10\mu\text{m}$ 薄膜在 10°C 时的透气率为 3°C 时的 1.5 倍,而 20°C 时为 3 倍。可见温度低对贮藏是有利的。

温度还对蘑菇的呼吸强度有直接影响。试验表明蘑菇温度为 3°C 、 10°C 、 20°C 时排出二氧化碳分别为 $26\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 、 $65\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 、 $215\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$,氧的消耗量分别为 $27\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 、 $52\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 、 $164\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 。可见在 3°C 时,蘑菇排出二氧化碳最少,氧的耗量也最低,即意味着呼吸强度弱,老化速度慢,外观好看。

鲜蘑菇采集以后,若放在空气中,3d 后其质量损失达 40%,如放在聚氯乙烯包装袋中,同样是 3d,质量损失仅为 2% ~ 6%。

鲜蘑菇放到聚氯乙烯软包装袋中,若使袋中氧浓度为 4%,二氧化碳的浓度为 12%,蘑菇的外观会有较大的改善。如果氧浓度过低,会造成香味损失,同时迅速枯萎。二氧化碳过高,蘑菇帽盖会出现棕黄色,发生变质。

十三、真空包装机

(一) 概述

真空气氛作为食品保鲜技术始于 20 世纪 60 年代初期,它是在真空环境下,或者先造成食品真空环境,然后再充入保护气体来进行保鲜的。此种保鲜技术发展很快,像油炸土豆片、椒盐卷饼、玉米片、炸薯条、果仁……等小食品,采用金属化塑料膜真空包装保鲜,不但阻气性好,而且遮光性亦好。其它食品采用真空保鲜亦很好,如火腿、香肠、腊肉、熏制品、豆制品、水产品、糕点、家常菜、茶叶等。

我国真空包装保鲜技术是从 20 世纪 70 年代发展起来的,目前市场上真空包装保鲜食品触目皆是。真空保鲜得到人们的青睐,原因是它具有其它保鲜方法所不能比拟的特色,主要是真空保鲜食品是处于真空气氛中,氧气很少,食品不易腐烂变质,又使用塑料袋封装,可免于昆虫危害。同一般传统保鲜相比,食品保鲜程度及货架寿命均高,还能进行真空充气包装(即气体置换包装),这种包装手段对易破碎、脆性食品特别有利,充进包装袋中的气体不仅能抑制霉菌生长,同时可以起到对外界挤压的缓冲作用。

真空包装是一项很有发展前途的工业,国际包装组织顾问 E. A. 伦纳德(Leonard)教授指出,真空包装是延长水果、蔬菜、花卉、鲜肉、鲜鱼、奶制品货架寿命的一种保鲜方法,能使包装袋内氧气减到最低限度,同时又能控制袋内含水量及保鲜气体的渗透性。鉴于目前新鲜产品从收获至零售损失严重,使价格上涨过快,而真空包装的推广,将使新鲜产品价格和冷藏费用下降,缓解了这一供需之间的矛盾,真空保鲜将成为令人瞩目、有很大潜在市场的工业。

(二) 台式真空包装机

台式真空包装机与一般单、双室真空包装机在功能上没有多大差别,它的真空室也有单、双室之分,但主要的是单室,双室较少见。因为机器体积较小,要放在专门工作台上使用,故称为台式真空包装机。台式真空包装机适用包装物品包括食品类的生熟肉、调味品类、土特产类及制品类,药品类,精密仪器仪表类等。无论固状、粉状、糊状均可适用。

台式真空包装机的典型结构如图 10-143 所示。其特点为:

①结构简单,易于操作,体积小,质量轻,一般都在 70kg 以下,最重不超过 100kg,其真空泵一般选用 $20\text{m}^3/\text{h}$ 以下的规格,抽气速率不高,工作周期通常在 15s~30s 之间,生产效率较低。

②由于结构紧凑,散热不理想,加上生产效率不高,故台式真空包装机不适合于大批量、连续工作的包装作业,而较适用于餐馆、商店、博物馆、图书馆、科研单位等量不是太大的非连续性的包装。

常见食品对包装材料性能的要求见表 10-100。

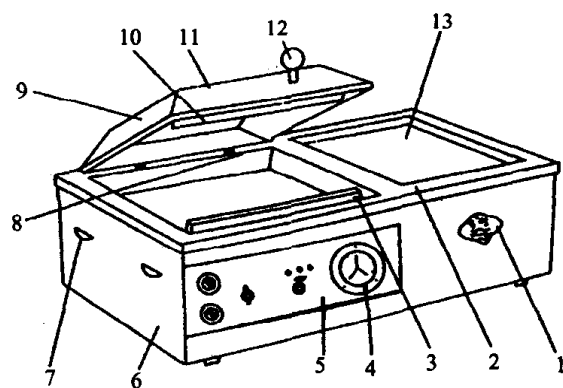


图 10-143 台式真空包装机典型结构

1—商标;2—箱底;3—电热头;4—真空表;5—控制面板;
6—机座;7—拉手;8—抽气口;9—箱盖;
10—压条;11—观察窗;12—合盖手柄;13—存物盘。

表 10-100 常见食品对包装材料性能的要求

类 别	要 求 性 能	复合膜的实例
米制点心	防潮性、耐油性、耐寒性、耐破袋性	KPT/PE、OPP/CPP、OPP/PE
方便面	防潮性、抗氧性、机械包装适应性、防虫性、保香性	PT/PE
快餐食品	气体阻隔性、防腐性	KPT/OPP、PVDC/OPP、KPT/PE/BOPP
果汁粉	防潮性、抗氧性	PET/PE、KPT/PE、PET/AL/PE、PET/PVDC/PE
豆酱	防霉性、气体阻隔性、耐热水杀菌性	ON/PVDC/PE、ONY/EVAL/PE
酱小菜	真空脱气性、耐针孔、抗静电	OPP/PE、PET/PE
奶粉	防潮性、阻氧性	涂 PVDC 玻璃纸/AL/PE
火腿、香肠	气体阻隔性、防潮性、真空气体充填性	涂 PVDC 玻璃纸/PE、PET/PE、PVDC/PET/PE、PVDC/PP/PE
茶叶	防潮性、遮光性、气体阻隔性、保香性、耐针孔性	OPP/AL/PE、PET/PE/纸/AL/PE
调味品	阻气性、保香性、耐油性	NY/PE、PVDC/PET/PE
冷冻食品	低温封闭性、耐油性	PA/PE、PET/PE、NY/PE
蒸汽杀菌食品	长期保存性、耐热 125℃	PET/AL/CPP

注:KPT—玻璃上涂有 PVDC;PE—聚乙烯;OPP—双向拉伸聚丙烯;CPP—无拉伸聚丙烯;PT—玻璃纸;PVDC—聚偏二氯乙烯;BOPP—涂有偏二氯乙烯的 OPP;PET—聚酯;AL—铝箔;ONY—双向拉伸尼龙;EVAL—乙烯、乙醇共聚体;NY—尼龙

常见复合薄膜的构成与特性、用途见表 10-101。

上面所介绍的包装材料也适用于后面将要陆续介绍的各种类型的真空包装机。

表 10-101 常用复合薄膜的构成与特性、用途

复合膜的构成	特 性										用 途
	防湿性	防气性	防油性	防水性	耐蒸煮性	耐寒性	透明性	遮光性	成形性	热封性	
PT/PE	①	①	○	×	×	×	①	×	×	①	快餐面、点心、医药
OPP/PE	①	○	○	①	①	①	①	×	○	①	干紫菜、快餐面、点心、冷冻食品、海味
PVDC 玻璃纸/PE	①	○	①	①	①	○	①	○—×	×	①	咸菜、火腿、果子酱、粉末果汁、鱼肉加工品
OPP/CPP	①	○	①	①	○	○	①	×	○	①	米糕点、豆糕点、油糕
PT/CPP	①	①	①	①	①	×	①	×	×	①	
OPP/PT/PE	①	①	○	①	①	①	①	×	×	①	咸菜、果酱、鱼贝、小菜
OPP/KPT/PE	①	①	①	①	①	○	①	○—×	×	①	高级加工食品、快餐面的调味汤
OPP/PVDC/PE	①	①	①	①	①	①	①	○—×	×	①	火腿、腊肠、鱼糕
PET/PE	①	①	①	①	①	①	①	○—×	○	①	调味品、冷冻食品、粉末果汁、汤料
PET/PVDC/PE	①	①	①	①	①	①	①	○—×	○	①	熏制鱼肉食品、冷冻食品
NY/PE	○	○	①	①	①	①	①	×	○	①	鱼糕、冷冻食品、粉末果汁
NY/PVDC/PE	①	①	①	①	①	①	①	○—×	○	①	
OPP/PVA/PE	①	①	①	①	○	○	①	×	○	①	粉末果汁、腊肠
PC/PE	○	×	①	①	①	①	①	○—×	○	①	火腿、肉片、水产品

(续)

复合膜的构成	特 性										用 途
	防湿性	防气性	防油性	防水性	耐蒸煮性	耐寒性	透明性	遮光性	成形性	热封性	
Al/PE	①	①	①	①	○	○	×	①	×	①	医药、相片、点心
PE/AL/PE	①	①	①	×	×	○—×	×	①	×	①	医药、点心、茶叶、快餐食品
PET/AL/PE	①	①	①	①	①	①	×	①	○	①	咖喱饭、炖食品、五香菜
PT/纸/PVDC	①	①	①	×	×	○	×	①	×	①	干紫菜、茶叶、干燥食品
PT/AL/纸/PE	①	①	①	×	×	○—×	×	①	×	①	茶、香波、固体汤料粉末、炼乳

注:1. 特性符号说明:①—优;○—良;×—不行。
2. 材质代号说明:PVA—聚乙烯醇;PC—聚碳酸酯

(三) 单室真空包装机

单室真空包装机与台式真空包装机在功能上没有多大差别,只是单室的真空室较台式大些,因此它可包装的物品体积略大于台式。单室真空包装机适用包装的物品有干果、粮食、豆类、酱菜、果脯、土产品、化工原料、药品药材、电子元件、精密仪器等。无论固状、粉状、糊状均可包装。

单室真空包装机的典型结构如图 10-144 所示。根据真空室的布置型式的不同,有卧式、立式、可倾斜式之分。机器下部支承脚处通常装有滚轮。

单室真空包装机的真空系统如图 10-145 所示。放好包装物品后,合上真空室盖。导入大气阀 2 处在闭合状态,使真空室与大气隔绝,阀 4 和 1 通电导通,使真空室 6 和小气室同时抽气。达到预定的真空度后,阀 4 断电,阀 3 通电导通向真空室充气。充气完毕,阀 3 和 1 断电,让大气进入小气室。在大气压的作用下,使热封装置对包装袋加压,同时电热带通电将包装袋封口。封口完毕断电停留片刻,使包装袋冷却。然后阀 2 通电导通,将大气引入真空室。此时

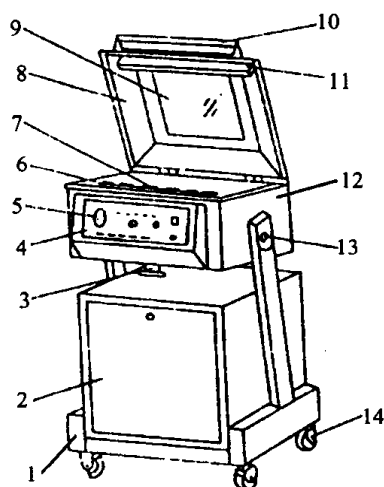


图 10-144 单室真空包装机典型结构

1—机座;2—前门;3—抽气管;4—控制面板;5—真空表;
6—电热头;7—压条;8—箱盖;9—观察窗;10—合盖手柄;
11—封口压块;12—箱底;13—调整螺钉;14—活动轮。

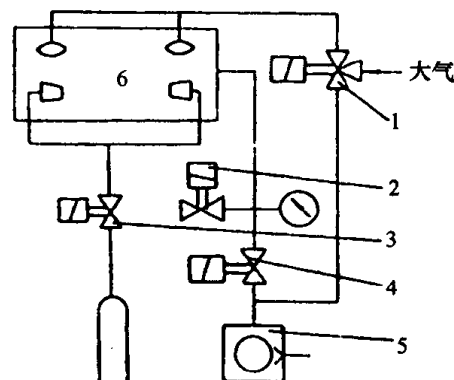


图 10-145 单室真空包装机的真空系统

1—小气室阀;2—导入大气阀;3—充气阀;
4—截止阀;5—真空泵;6—真空室。

方可开盖取出已包装好的物品,同时进入下一个循环。以上各工序电磁阀的状态可以通过一个电磁阀通断表来表示,见表 10-102。其中阀 1 为带充气的真空阀,通电时与真空泵接通,断电时与大气连通,其余均为电磁真空截止阀。

表 10-102 单室真空包装机电磁阀通断表

工 序	小气室阀 1		导入大气阀 2		充气阀 3		抽真空阀 4	
	气	电	气	电	气	电	气	电
抽真空	○	+	×	-	×	-	○	+
充 气	○	+	×	-	○	+	×	-
热 封	×	-	×	-	×	-	×	-
冷 却	×	-	×	-	×	-	×	-
导入大气	×	-	○	+	×	-	×	-

注:气:○一通;×一断。电: + 一通; - 一断

实际上,台式真空包装机的真空系统也与之基本相同,它们都属于单室性质。

单室真空包装机的特点为:

①关闭真空室后,可实现抽真空→充气→热封→冷却→向真空室导入大气的自动循环,一般可以调节各工序的时间和热封温度,以适合不同的包装要求和包装材料,有的还可以调节真空度和充气量以达到最佳包装效果。

②结构较简单,易于操作,体积较小,质量较轻,一般都在 300kg 以下(大型的除外),真空泵抽气速度可略高于台式,工作周期为 15s~60s。

③单室真空包装可适宜进行的包装作业范围与台式大致相同。因其真空室较大,生产率略高,故比台式有更大的应用范围,是我国目前真空包装机的主导产品。

此包装机的包装材料为各种塑料复合薄膜或塑料铝箔复合薄膜,如涤纶/聚乙烯、涤纶/聚丙烯、尼龙/聚乙烯、尼龙/聚丙烯、聚丙烯/聚乙烯、涤纶/铝箔/聚乙烯、双向拉伸聚丙烯/铝箔/聚乙烯、聚丙烯/尼龙/聚乙烯等。

(四) 双室真空包装机

双室真空包装机适用物品包括鱼肉制品、酱菜、粮食、果品、茶叶、药品、中药材、土特产、化工原料、金属制品、电子元件、纺织品、服装、医疗用具等。适用材料有聚乙烯、聚丙烯、聚酯、尼龙、聚偏二氯乙烯、铝箔等组成的二层以上复合薄膜。多用 2~3 层。

双室真空包装机的典型结构如图 10-146 所示(为单盖双室式)。双室真空包装机有两个真空室,真空室盖有时为一个,有时为两个,分别称为单盖双室和双盖双室。前者的盖子需左右移动,每次封闭一个真空室,后者是每个真空室各用一个。

单盖双室真空包装机的真空系统如图 10-147 所示。图中所示是小气室安装在真空室盖上的真空系统。因真空室的抽气口在两个真空室之间,无论盖在哪个真空室上,都用这个抽气口,结构较简单,只是比单室多一个充气阀。如果充气用三位三通阀,则可通过切换来改变所充气体的去向,此时阀数可和单室一样。另一种情况是小气室安装在真空室底部,这时不能共用小气室阀,两个真空室都必须有小气室,相应要增加一个小气室阀或只用一个两位三通阀。单盖双室真空包装机的各阀通断表见表 10-103(小气室在上盖时)。

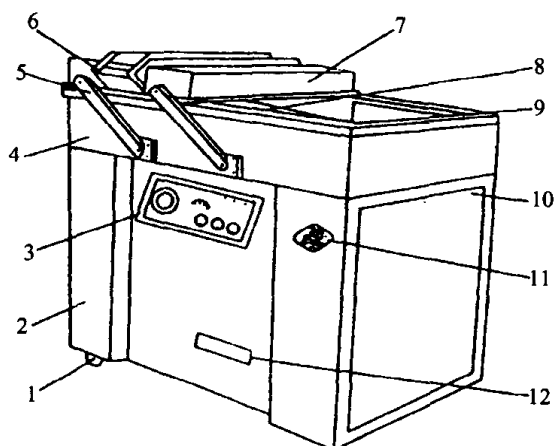


图 10-146 单盖双室真空包装机的典型结构

1—万向转轮；2—机座；3—控制面板；4—箱底；
5—四连杆；6—手柄；7—箱盖；8—充气嘴；
9—袋押；10—侧门；11—商标；12—铭牌。

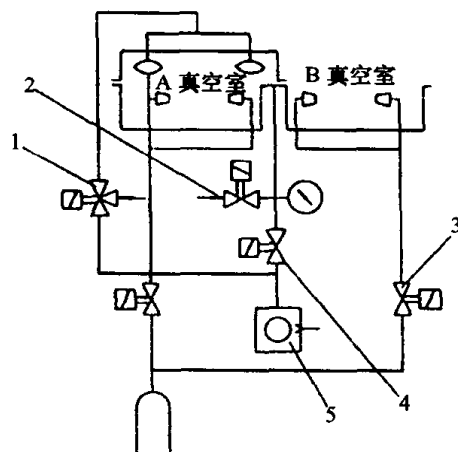


图 10-147 单盖双室真空包装机的真空系统

1—小气室阀；2—导入大气阀；3—充气阀；
4—截止阀；5—真空泵。

表 10-103 单盖双室真空包装机电磁阀通断表

工作室	工 序	小气室阀		导入大气阀 2		充 气 阀				真 空 阀 4	
		气	电	气	电	3A		3B		气	电
						气	电	气	电		
A 室	抽真空	○	+	×	-	×	-	×	-	○	+
	充 气	○	+	×	-	○	+	×	-	×	-
	热 封	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	冷 却	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	导入大气	×	-	○	+	×	-	×	-	×	-
B 室	抽真空	○	+	×	-	×	-	×	-	○	+
	充 气	○	+	×	-	×	-	○	+	×	-
	热 封	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	冷 却	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	导入大气	×	-	○	+	×	-	×	-	×	-

注：气：○—通；×—断。电：+—通；- —断

双盖双室真空包装机的真空系统如图 10-148 所示，此真空系统比单盖双室要复杂些，其特点为：两个真空室各有抽气口，可通过两个截止阀或一个三位三通阀来控制，分别实现对其其中一个真空室的抽气；两个真空室都有小气室，可能过两个截止阀或一个两位三通阀来控制；两个真空室分别需要导入大气时，亦可分别采用两个截止阀或一个两位三通阀来控制；充气时仍然可分别用两个截止阀或一个两位三通阀来控制。

图中的空气滤清器 7 和水分滤气器 6，这并非双室真空包装机所特有，其它真空包装机可以选用或不选用。

双盖双室真空包装机的工艺流程及各阀通断表见表 10-104（小气室在上盖时）。

双室真空包装机在功能上与单室基本相同，每一真空室的大小与单室的真空室相比较，只会相同或略小，真空室多为水平布置。

表 10-104 双盖双室真空包装机电磁阀通断表

工作室	工序	导入大气截止阀				抽真空三位三通阀				充气阀		小气室两位三通阀			
		1A		1B		2A		2B		4A		4B		5	
		气	电	气	电	气	电	气	电	气	电	气	电	气	电
A室	抽真空	×	-	×	-	○	+	×	-	×	-	×	-	○	+
	充气	×	-	×	-	×	-	×	-	○	+	×	-	○	+
	封口	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	冷却	○	+	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
	导入大气	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-
B室	抽真空	×	-	×	-	×	-	○	+	×	-	×	-	○	-
	充气	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	○	+	○	-
	封口	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	+
	冷却	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	-	×	+
	导入大气	×	-	○	+	×	-	×	-	×	-	×	-	×	+

注:1. 气:○—通;×—断。电: +—通、- —断。

2. 小气室为两位三通阀。通电时 A 室的小气室与泵通,断电时 B 室与泵通,所以表中该阀通断电时,电与气通、断状态的关系,B 室工作时与 A 室工作时相反

单盖双室除可省去一个盖子外,当工作装置装在上盖时,还可省去其中的热封装置等结构,真空系统也较双盖双室简单,但对支撑盖子的四连杆机构的精度要求较高,密封及运动的灵活性不易保证。还需设置平衡盖子质量的机构,劳动强度较大,大多用于工作连续性不强、生产率稍低的场合。

双盖双室由于每个真空室都有一个盖子,便多一套热封装置,每个真空室的密封性及运动灵活性容易得到保证。可利用杠杆机构连接两个质量相等的真空室盖,省去平衡机构。操作时稍微按一下即可关闭一个,掀开另一个盖子,较单盖双室减轻了劳动强度,用于连续工作、生产率要求较高的场合。

双室真空包装机的特点是:

①关闭真空室后,可实现抽真空→充气→热封→冷却→向真空室导入大气的自动循环。对不同的包装材料和不同的包装要求,均可调整参数,能达到最佳包装效果。

②操作方便,一台双室机可相当于两台单室机,但较两台单室机小,质量轻。因有两个真空室,可轮番作业,使准备工作与包装时间重合,因而较单室的工效大大提高,虽工作周期仍为 15s~60s,但排放包装件的时间与自动循环时间重合,效率可提高,是我国真空包装机产品中的又一种使用范围广,生产效率较高的主导产品。

(五) 输送带式真空包装机

输送带式真空包装机是另一类广泛使用的机型,凡室式真空包装机适于包装的物品,输送

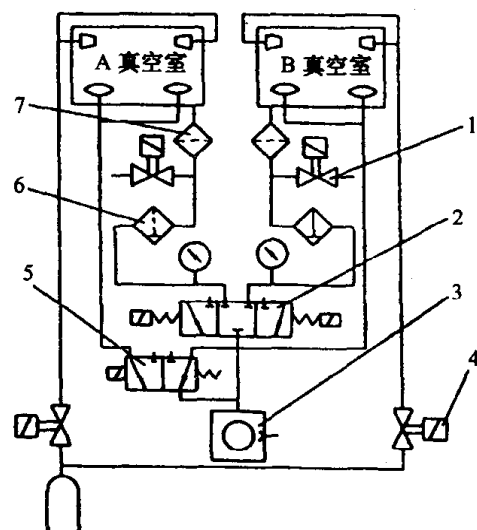


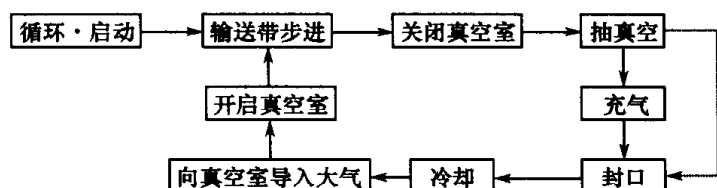
图 10-148 双盖双室真空包装机的真空系统

1—导入大气阀;2—三位三通阀;3—真空泵;
4—充气阀;5—两位三通阀;6—水分滤气器;
7—空气滤清器。

带式真空包装机均可适用,如水果、蔬菜、酱菜、粮食、鲜肉鱼及肉制品、调味品、茶叶、咖啡、土特产、中草药材、化学药品、电子元件、纺织品、机械零件、精密仪表、仪器等,无论固体、粉状、糊状及有液汁的物品都可包装,比较适合于有液汁的物品。

输送带式真空包装机适用材料为涤纶/聚乙烯、涤纶/聚丙烯、尼龙/聚乙烯、涤纶/铝箔/聚乙烯、聚丙烯/聚乙烯/铝箔等各种复合塑料薄膜。

输送带式真空包装机是利用输送带作为包装机的工作台和输送装置。输送带可作步进运动,它的真空室盖在输送带上方,平板在输送带下方,合拢时形成真空室,而输送带则夹在中间。输送带上使有使包装袋定位的挡板。只要将盛有包装物品的包装袋排放在输送带上,便可自动完成如下循环:



包装物品在进入真空室后的工作原理和过程与室式真空包装机几乎没有区别,只是在这里工作循环更快,周期更短,因此生产率更高而已。真空室盖的打开和关闭无需人工操作,可自动关闭,真空室也可以做得更大。

我国输送带式真空包装机基本属于同一类型,仅在真空室大小、热封条尺寸、输送带步进速度、生产率高度和部件的某些结构上有所不同。其真空室可以说都是属于单室的,所以它不像室式真空包装机有台式、单室和双室之分,本机型不再作进一步的分类,只要是用输送带作工作台和输送装置的真空包装机,都属于输送带式真空包装机。

输送带式真空包装机由传动系统、真空室、充气系统、电气系统、水冷及水洗装置、输送带、机身等组成,真空泵安装在机外。传动系统和电气系统在机身两侧的箱体内部。图 10-149 是其一种典型的真空系统,与单室真空包装机的真空系统差不多。差别在于:因输送带式真空包装机泵的抽速和规格较大,阀的通路相应也较大,主截止阀 3 往往需采用以先导阀带动的膜片式截止阀(图未示)。有的机型向真空室内导入大气的阀 2 也用先导阀控制(图未示)。此外,因泵电机功率较大,不宜频繁启动,故其启动与停止不纳入自动循环。主截止阀往往不用电磁真空带放气阀,而用电磁真空截止阀,再用一个通路较小的阀 5 在泵停止时向真空室导入大气。

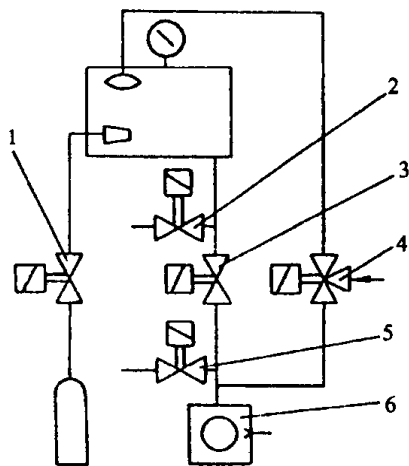


图 10-149 输送带式真空包装机真空系统图

1—充气阀;2、5—导入大气阀;3—截止阀;
4—小气室阀;6—真空泵。

主截止阀 3 往往需采用以先导阀带动的膜片式截止阀(图未示)。有的机型向真空室内导入大气的阀 2 也用先导阀控制(图未示)。此外,因泵电机功率较大,不宜频繁启动,故其启动与停止不纳入自动循环。主截止阀往往不用电磁真空带放气阀,而用电磁真空截止阀,再用一个通路较小的阀 5 在泵停止时向真空室导入大气。

输送带式真空包装机的特点为:

①输送带式真空包装机只有一个真空室,但其真空室可以做得较大,热封条尺寸也较长,因此可以用来包装尺寸较大的物品,也适用于小袋大批量的包装作业,可实施连续不断的循环生产,有较高的生产率。

②操作时只需将被包装物品按袋排放在输送带上,便可自动完成循环。抽气、充气、封口、冷却时间、封口温度均可预选,既可以按程序自动操作,又可单循环操作。

③输送带可作 0° 、 10° 、 20° 、 30° (有的只能到 20°) 的角度调整,使被包装物品在倾斜状态下完成包装工作,故特别适用于包装粉状、糊状及有液汁的物品,在倾斜状态下包装物品不易溢出袋外。

④包装袋热封后,在一定的压力状态下经循环水冷却,既可缩短冷却时间,又可使封口平整牢固,这是一种国际流行的先进冷却方法,其热封质量通常优于室式真空包装机。

⑤真空室盖的开闭由设备的传动系统自动完成,省去了人工开闭盖的手工劳作,既可减轻操作者的劳动强度,又使开闭盖时间恒定,可提高工效。

⑥与室式真空包装机相比,其自动化程度和生产率均较高,工作周期为 $12\text{s} \sim 30\text{s}$ 。

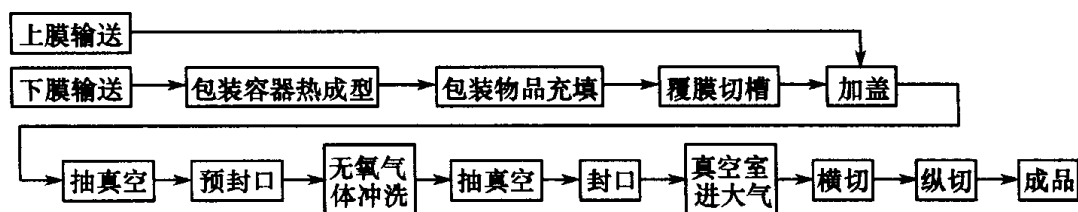
⑦阀、管道、传动装置等均为内置式,封闭在机器两侧的箱体内部,结构紧凑,外形美观,占地面积小,无需专门支承,安装调整甚为方便,移动也很轻巧(有脚轮)。

⑧输送带式真空包装机能耗较大,价格较贵,因其真空室较大,真空泵规格也相应较大,还多一套带动输送带运动的系统和自动开闭盖机构,也就多两个电动机和减速装置,因而总功耗加大了。通常室式真空包装机真空泵功率为 $0.75\text{kW} \sim 2.2\text{kW}$,总功率为 $1.1\text{kW} \sim 3\text{kW}$,而输送带式真空包装机的真空泵功率通常为 $1.5\text{kW} \sim 4\text{kW}$,总功率达到 $4\text{kW} \sim 9.5\text{kW}$ 。在结构和安装上相应也比室式要复杂些。

(六) 热成型真空包装机

1. 工作原理

热成型真空包装机又称连续式真空包装机或深冲真空包装机。它是将“热成型—充填—封口机”与“真空充气包装机”二者结合起来而形成的一种高效、自动、连续生产的多功能真空包装机,产品简称为“热成型真空包装机”。其工作过程为:利用热成型—充填—封口机在加热条件下对热塑性片材进行深冲,在包装机上自制包装容器,并对包装容器进行充填和封口;利用真空充气包装机在充填和封口工序之间进行抽真空及充气(需要时)工序,完整的工艺流程顺序为:



热成型真空包装机利用塑料片材在加热加压情况下可以成型的原理自制包装容器,利用真空和充气包装可以保质保鲜,延长物品保存期限的原理进行包装处理。按热成型的方法来分,可分为真空吸塑成型、压缩空气成型、浅冲拉伸成型、深冲拉伸成型等,也有以上两种方式混合成型的方法;按结构来分,可分为覆盖式、气动式、液压式、全机械式等。我国热成型真空包装机研制起步晚,品种少,生产企业也不多,尚没有形成完整的体系,也没有形成分门别类的系列产品。因此,本手册的介绍中,以 DZR 系列的热成型真空包装机来作为典型代表,也兼顾介绍其它机型。

2. 基本结构

热成型真空包装机的基本结构主要包括:包装材料运送装置,热成型装置,充填装置,槽孔开切装置,抽真空、封口装置,无氧气体冲洗装置,成品切割装置和控制系统等,如图 10-150 所示。

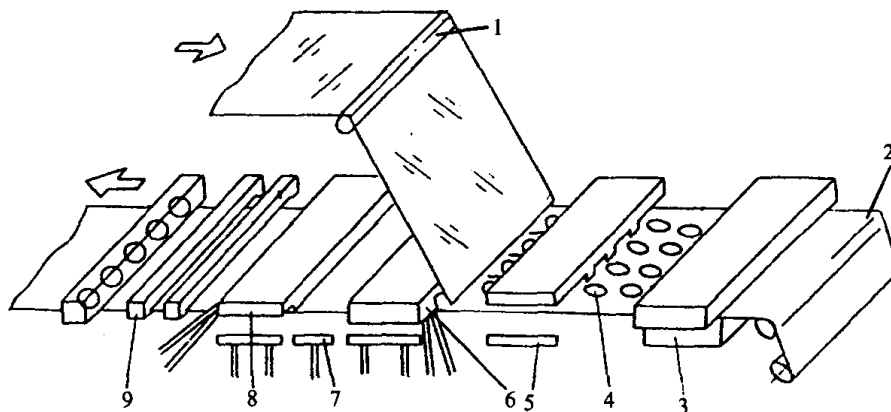


图 10-150 热成型真空包装机简图

1—上膜供给；2—下膜供给；3—热成型；4—充填工位；5—槽孔开切；6—第一真空室；
7—无氧气体冲洗；8—第二真空室；9—成品切割。

3. 特点

①每一台热成型真空包装机就相当于一个包装系统,除人工给包装材料供给装置装下膜及上膜和有时需人工或部分人工充填之外,其余工作均自动、连续完成,故有极高的生产率。适合于大批量的连续真空包装作业,特别适用于食品类、医药类物品,也用于制造软罐头。

②由于采用热成型方法自制包装容器,易于实现多列平行作业,比使用制好的包装容器的包装机生产周期短得多,可在 2s~6s 之间,循环次数可在 10 次/min~30 次/min 之间。每分钟可包装几百件。

③包装容器的形式多种多样,如盒状、盘形、杯形、圆形、方形等。包装容器的大小也可以根据需要来确定。对于体积较大的容器,一次可成型 1 件~2 件,而对于小容器,一次可成型几件、十几件,甚至更多。

④包装物品由一头进,另一头出,便于组成流水生产线。包装件的外形美观、货架陈列效果好。由于有两次抽真空,且在两次抽真空之间,设有无氧气体冲洗装置,可进一步提高除氧效果,延长保存期,提高包装质量。

⑤热成型真空包装机是机、电、气、液一体化的高技术产品,虽然结构上比较复杂,但由于采用模块化的设计原理,所以仍有较好的组合性及互换性,便于维护和维修。其充填工作既可自动充填,亦可人工充填,以利于实现多样化的包装功能。

⑥热成型真空包装机的零部件大多采用不锈钢和铝合金制造,不仅造型美观,而且耐酸、耐腐蚀、防锈,清洁卫生。

⑦该产品体积较大,特别是长度尺寸较大,整机质量也较大,制造成本较高,价格较贵,一旦安装固定之后,不像室式和输送带式真空包装机那样容易实现移动和搬运。另外,其对使用环境的要求也比上述机型更为严格,要求的技术力量也更强。

4. 适应范围

热成型真空包装机适合于大量包装各种块状、粒状、膏状物品,如鱼肉、家禽、肉制品、咸菜、果酱、黄油、奶制品、豆制品、药品等。还可用于现代化大医院中的无菌室,包装各种消毒注射器、导尿管、手术器械、绷带等物品。

5. 包装材料

热成型真空包装机所用的包装材料为复合软膜或片材,其中,下膜的材料和上膜有些差

别,有时也可相同。

①下膜材料 下膜材料必须是可以热成型和热封的,最常用的片材有聚氯乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯,其厚度在 0.2mm~0.6mm 之间。以上三种片材在我国均已批量生产,可大量供货,其特点及用途见表 10-105。

表 10-105 三种常用片材特点及用途

名称	代号	优点	缺点	用途	备注
聚氯乙烯	PVC	阻隔性好、阻燃时烟少、透明度高、着色力强、成本低、货架效果好	50℃ 以上容器易收缩变形	五金、药品、粉末状食品如调味品、干果等各种干燥食品,只能常温使用	包装食品时要用食品卫生级
聚丙烯	PP	无毒、无味、耐高温、耐腐蚀、热封性、透明性、刚度、强度、耐刮擦、阻湿、阻氧均好,成本低	—	用途广泛,可用于各种食品	通过改性,出现了 PP 均聚物和共聚物,改善了冲击强度、韧性、刚度和透明度
聚苯乙烯	PS	无毒、无臭、无味、耐寒	—	酸性食品(如酸奶、酸性干酪)、粉末状调味品	—

除以上三种之外,还可使用聚碳酸酯,ABS,醋酸纤维素,丙烯酸,改性丙烯酸,腈类聚合物,各种高、中、低密度聚乙烯等。多层(一般为 2 层~5 层)共挤复合片材是先进的下膜材料,它能提高容器的拉伸比和延长包装物品的贮存期。

②上膜材料 上膜通常使用一般制扁平袋的复合塑料薄膜或铝塑复合薄膜,如聚酯/聚丙烯、聚酯/聚乙烯等,也可使用片材。

③热成型真空包装机还可使用复合软膜制造软罐头。表 10-106 给出了适合于采用热成型制成软罐头的包装材料。

表 10-106 热成型软罐头的包装材料

形态	类型	材料构成
深拉伸 (透明)	普通	上膜:聚酯/聚丙烯 拉伸聚丙烯/未拉伸聚丙烯 下膜:聚丙烯/尼龙
	隔绝性	上膜:聚酯/聚偏二氯乙烯(或乙烯-乙醇醇共聚物)/聚丙烯 拉伸聚丙烯/聚偏二氯乙烯(或乙烯-乙醇醇共聚物)/未拉伸聚丙烯 下膜:聚丙烯/聚偏二氯乙烯(或乙烯-乙醇醇共聚物)/尼龙
透明盘	普通	聚丙烯单体
	隔绝性	上膜:聚酯/聚偏二氯乙烯/聚丙烯 下膜:聚丙烯/聚偏二氯乙烯/聚丙烯
铝箔盘	隔绝性	上膜:外面保护层/铝箔/聚丙烯 下膜:聚丙烯/铝箔/外面保护层

(七) 吸管式真空充气包装机

吸管式真空充气包装机又称抽口式或插管式真空充气包装机,有时可直接简称为吸管式真空包装机。其工作原理如图 10-151 所示。自袋的开口处插入抽气管和充气管,抽气由阀 1 控制,充气由阀 2 控制,打开阀 1 由真空泵抽出袋内空气然后封口。若要充气,则打开阀 2(关闭阀 1),充入所需气体然后再封口。只一次抽气时,真空度不是很高,若经多次抽充气,如 2 次

~3次抽充气,则可提高真空度,经多次抽、充气的机型又称为呼吸式真空包装机。

此类机型的最大特点是没有真空室,操作时将包装袋直接套在吸管上,并置于上下结构的密封装置和热封装置之间,先抽气后充气,吸管从袋口退出后封口,工作循环为自动程序控制。由于没有真空室,可带来一系列优点:

①省去真空室后使结构大大简化,体积小,重量轻,设备投资少,造价低,使用中故障发生率也降低;

②真空泵的规格较有真空室的真空包装机为小,充气包装时耗气量至少节省 $1/3 \sim 1/2$,能源消耗的降低,可大大节约运行费用;

③效率高,抽真空及充气时间的缩短使生产率明显提高,平均可比室式真空包装机提高 2 倍~3 倍;

④在封口长度允许的范围内,包装体积原则上不受限制,可实现以小包大的工作要求,可用于大包装。

缺点是真空度不及室式真空包装机,但当有呼吸功能时,真空度可大大提高。

吸管式真空充气包装机常有单工位和双工位之分。每个工位一般有 1 个~2 个吸管,所以在机型上有许多型式,如单位单嘴、单位双嘴、双位双嘴、双位四嘴等。在充气种类上也有一种及多种之分,充一种气体最常见,充多种气体时,最多一般不超过三种。

该机适用于各种可热合的塑料复合薄膜或塑料铝箔复合薄膜,如涤纶/聚乙烯、涤纶/聚丙烯、尼龙/聚丙烯、聚丙烯/尼龙/聚乙烯、涤纶/铝箔/聚乙烯等。可广泛应用于食品(粮食、茶叶、肉类制品、水产品、蔬菜加工制品、干鲜果品、乳制品、豆制品、调味品)、药材、化工原料、电子元件、精密器材、纺织品等。实现固体、颗粒状、糊状、液汁状物品的普通包装、真空包装、真空充气包装。

(八) 膨松柔软物品缩体包装机

膨松柔软物品指的是被服、羽绒服、毛衣等床上用品、各类服装等。这类物品因体积较大,前述的各种真空包装机因无大的真空室,故无法完成这类物品的真空包装工作。显然,如设计大真空室的真空包装机来完成其包装,将会带来设备笨重的问题。必须采取其它方法来满足这类物品的包装需求,这样用于膨松柔软物品的缩体包装机便应运而生了,其大致结构如图 10-152 所示。其特点是没有真空室,工作台面较大。工作时将被包装物品置于包装袋后,先用压缩空气驱动的主气缸压缩包装袋,以排除袋内的大部分空气,再由真空系统抽去剩余气体,使包装袋紧贴被压缩的包装物,然后由热封装置加热加压封合包装袋袋口。如真空度要求不高时,可省去抽真空工序,压缩后直接封口。

该机型与其它一般吸管式真空包装机的共同之处是都没有真空室,都使用插管插入包装袋,给包装袋抽气。不同之处在于后者包装袋体积小,用插管直接抽气,然后根据需要充气,还可进行 2 次~3 次的抽、充气。而前者包装袋体积大,先使用加压装置压出包装袋内的大部分空气后再抽气,不向包装袋内充气。

由于省去真空室,带来一系列优点,如真空泵规格小、能耗低、包装袋体积大、工作效率高

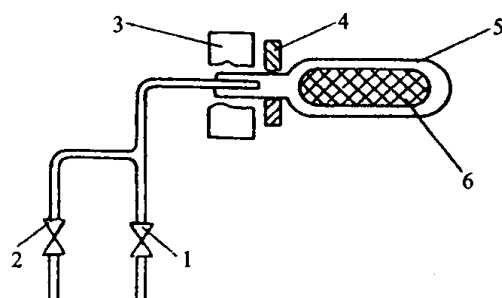


图 10-151 吸管式真空充气包装机原理

1—抽气阀;2—充气阀;3—密封装置;
4—热封装置;5—包装袋;6—包装物品。

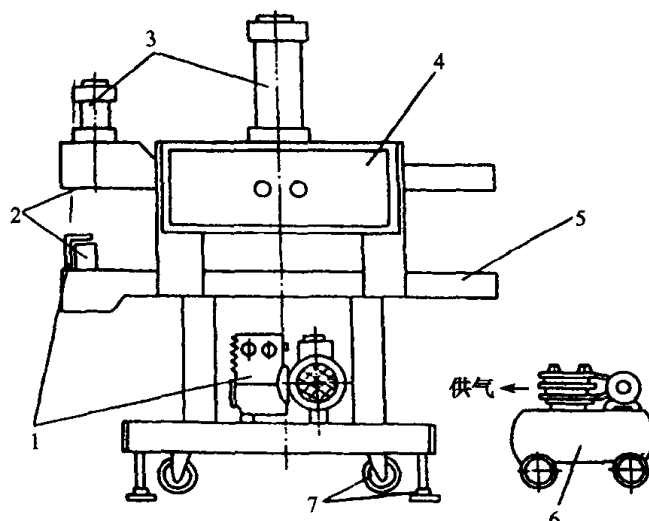


图 10-152 膨松柔软物品缩体包装机

1—真空抽气系统;2—热封装置;3—气缸;4—变压器;5—机架;6—空压机;7—脚轮与机脚。

等。

纺织品真空包装的目的除防潮、防霉、防虫蛀之外,还可使外形整齐美观,缩小体积。不仅给包装、运输、贮存带来极大方便,还可节省大量中间费用。对不同的物品,其减缩体积的百分比大致为:

①羊毛衫	30%~45%	④毛毯	40%~60%
②毛巾	30%~50%	⑤羽绒制品	50%~70%
③西服	50%左右	⑥滑雪衫	40%~60%

实践证明:服装在温度 20℃、相对湿度 65% 的条件下完成真空缩体包装,在去除包装后,在温度 20℃~45℃、相对湿度 55%~60% 的条件下,吊挂 24h,皱折基本消除,继续吊挂,皱折可全部消除,不必重新整烫,可见其包装性能是十分优良可靠的。

十四、真空气相干燥

(一) 概述

真空气相干燥设备(简称 VPD 设备)主要用于干燥大型变压器及其它电器设备,这种干燥方法始于 20 世纪 60 年代,70 年代开始用于生产。

变压器干燥的主要目的是排除绝缘材料中的水分。现代大型变压器所用的纤维绝缘材料,其初始的含水量一般高达 6%~8%,干燥终了要达到的标准含水率为 0.5%~0.1%。若排除的水量按其质量的 5.5% 计,一台 10t 的变压器在干燥过程中要排掉 550kg 水。

(二) 真空气相干燥原理

根据干燥理论,变压器绝缘材料中的水分都是以毛细吸附形式存在的。以这种形式存的水分,在上述的含水量范围内,干燥过程就是水蒸气分子从绝缘材料中往周围空间扩散的过程。驱使水分向绝缘材料外部迁移的动力主要是绝缘材料内部和周围空间的水蒸气分压差 Δp ,因此 Δp 越大,干燥速度越高。增加 Δp 有两种途径,提高绝缘材料温度(即对绝缘材料进

行加热),降低周围压力。从两个方面提高 Δp 的干燥方法就是所谓的热—真空干燥法。

降低绝缘周围空间压力的办法,在各种干燥设备中,都是将变压器芯体放在真空罐中或变压器本体油箱中,用适当的真空系统来抽真空。而对变压器的加热,由于载热介质和换热方式的不同,形成了许多具有不同特点的加热方式和加热设备。总的来讲,传统的真空干燥设备可分为两大类。

①以空气为载热介质的干燥方法。即在大气压下,用热风循环或自然对流方式,将变压器加热到 $110^{\circ}\text{C} \sim 115^{\circ}\text{C}$,然后再抽真空。

②以变压器油为载热介质的液相加热法。即在室温下先抽真空,然后再喷入或注入热变压器油,并进行循环,对变压器进行加热,然后再抽真空。

以上两种方法的干燥速度都比较低。

VPD 方法是介于上述两种方法之间的热—真空干燥法,它不再用气体或液体作为载热介质,而用特种煤油蒸气—气相作为载热介质进行加热,并利用相变换热机理。其特点如下:

①以煤油蒸气作为载热介质,可以实现在真空状态下进行加热。由于煤油的饱和压力远比水的饱和压力低,而又比变压器油的饱和压力高,所以在加热阶段,能顺利地排除水分,加热结束后,又能使煤油很快蒸发掉而不影响高真空阶段材料内部水分的扩散系数。

②变压器的加热是在真空状态下进行的,加热温度可以从 110°C 提高到 $125^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$ 而不用担心引起绝缘材料的老化。尽管加热温度仅提高十几度,但水蒸气分压提高到约 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$,对排除水分是非常有利的。

③煤油蒸气除以对流换热方式对绝缘材料加热外,在绝缘材料表面要发生相变冷凝放热,冷凝后的煤油又在绝缘表面进行膜层换热。这样的换热效率比别的任何一种加热方式都高,因此加热速度快。

④凝结后的煤油很容易渗透到绝缘内部、表面及加速了绝缘材料本身的热传导,并使绝缘材料深层温度分布均匀。温度分布均匀,对于干燥来讲,是至关重要的。

⑤在变压器上冷凝的煤油,作为一种良好的清洗溶剂,可以将变压器上的污物尘埃冲洗掉,这是 VPD 设备独具的优点。

(三) VPD 设备原理及组成

VPD 设备系统组成,如图 10-153 所示,其工作原理如下:

在准备阶段,以罗茨泵 7 为主泵,旋片泵 9 和 10 为前级泵的主真空系统,通过主真空阀 1,对真空罐 II 抽真空。蒸发器 I 中已通过泵 51 注入了适当量的煤油。在真空罐抽真空的同时,维持泵 34 通过冷凝液收集罐 III、冷凝器 38、旁通阀 52 对蒸发器抽真空。抽到接近于当时温度下煤油对应的饱和压力。这样可以认为整个系统的氧气全排除。然后过饱和水蒸气通过入口阀 50 对煤油加热蒸发。

准备阶段完了,主真空阀 1 关闭,主真空系统停止工作。煤油蒸气进入真空罐,直接冷凝成液体的煤油,返回到蒸发器。真空罐中还有部分没有被直接冷凝的煤油蒸气、水蒸气和泄漏空气,同时进入主冷凝器 38。蒸气冷凝成液体进入冷凝液收集罐 III 进行沉淀分离,空气则通过泵 34 排往大气。

降压阶段,蒸发器停止加热。煤油蒸气停止往真空罐中输送。其余通路仍保持与加热阶段相同状态。

高真空阶段与准备阶段一样,由主真空系统对真空罐抽真空。虽然在降压阶段真空罐中

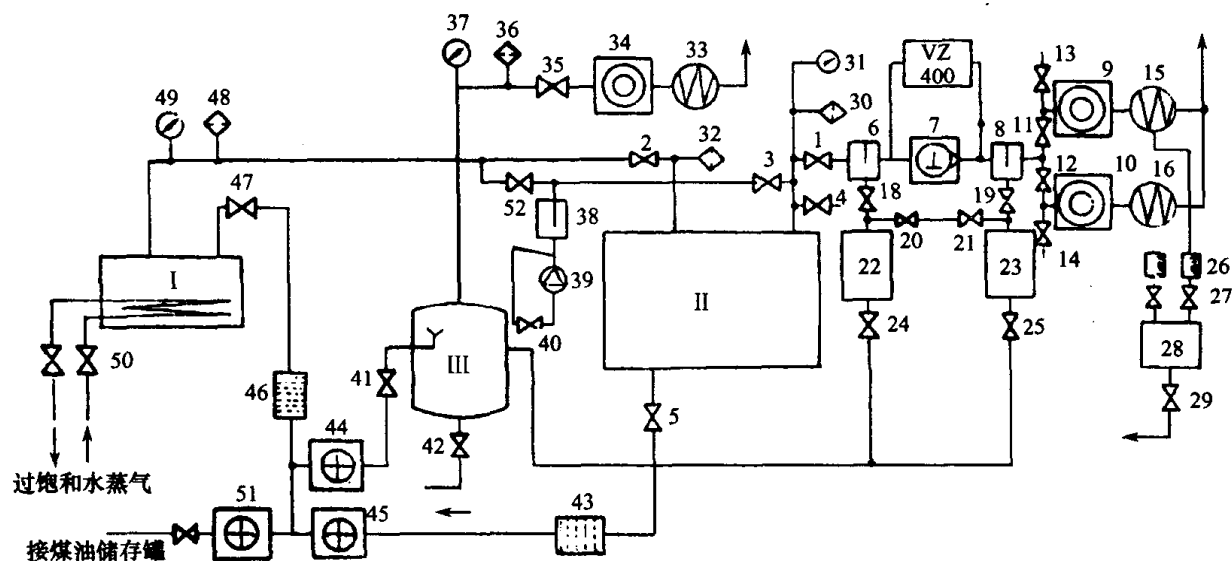


图 10-153 VPD 设备系统原理图

I—蒸发器；II—真空罐；III—冷凝液收集罐；VZ400—水蒸气分压测量仪。1—主真空阀；
2—煤油蒸气入口阀；3—煤油蒸气返回阀；4—放气阀；5—罐底排液阀；6、8—冷凝器；7—罗茨泵；
9、10、34—旋片真空泵；11、12—真空阀门；13、14—充气阀；15、16、33—油气分离器；22、23、28—收集罐；
26—量筒；29、42—放液阀；30、32、36、48—压力开关；31、49—真空表；38—主冷凝器；39—观察窗；44、45、51—输液泵；
43、46—粗精过滤器；47—返回煤油阀；50—水蒸气加热阀；52—旁通阀。

的煤油基本排净，但绝缘中还会有残留煤油。在高真空阶段进入真空系统的气体含有一定的煤油蒸气，在前级冷凝器 6 和中间冷凝器 8 中冷凝成液体，收集在罐 22 和 23 中，积累到一定的量，排入大收集罐 III 中。

阀 4 是放气阀干燥完了后，可向真空罐充气的阀门。

真空计 31、37 和 49 用以测量相应部位的压力。压力开关 30 用于真空罐中压力小于给定值时提供信号。压力开关 48 和 32 用于一旦系统发生漏气超过给定值时的报警。压力开关 36 和调节阀 35 配合工作，以自动调节冷凝系统的压力。手动阀 40 用以调节返回的煤油量，以反馈的方式调节蒸发器的加热功率。

阀 13、14 用于前级泵停止工作后泵入口充气。

(四) 主要工艺

VPD 的主要工艺过程为：

①准备阶段。将变压器放在真空罐中抽真空，使真空罐中的压力降到 700Pa 以下，同时蒸发器中用水蒸气排管对煤油进行加热，使蒸发器中的温度达到 115℃，煤油压力为该温度下煤油饱和压力，约为 10^4 Pa。

②加热阶段。真空系统停止工作。蒸发器中的煤油蒸气靠压差涌入真空罐对变压器进行加热，冷凝后从真空罐底排出，返回蒸发器，形成一个循环。随着真空罐中温度的升高，煤油蒸气不能完全冷凝而造成聚积，绝缘材料中的水分也开始排出来，以水蒸气状态聚积在真空罐中；再加上少量的空气可能漏入真空罐，使真空罐中压力逐渐升高。这些混合气体进入冷凝系统进行冷凝。然后再进入蒸发器形成第二个循环。靠这两个循环，使真空罐中的变压器逐步加热。

③降压阶段(或叫低真空级段)。停止煤油蒸气往真空罐中输送。把真空罐中的煤油和混

合气体排出真空罐,把残留在绝缘材料中的煤油重新蒸发。

④高真空阶段。利用主真空系统对真空罐抽真空。最终压力要达到 10Pa 以下。因为在高真空阶段以前,绝缘中 95% 以上的水分已经排除,所以高真空不需要很长的时间。确定高真空结束亦即干燥过程结束的重要条件是,绝缘材料的出水率达到每吨绝缘材料每小时少于 10g,即 $\leq 10\text{g/ht}$ 。

(五) 热利用及煤油净化系统

由上述系统原理知道,加热阶段,从真空罐中返回的混合蒸气必须进入冷凝系统冷凝,以把水分分离掉。经冷凝并分离后的煤油要通过泵 44, 返回阀 47 进入蒸发器重新加热蒸发。为了充分利用热量和节约冷却水,在返回的混合蒸气进入冷凝系统之前,经过热交换器 1(图 10-154),而把从冷凝液收集Ⅲ出来的煤油引入该热交换器进行预加热,然后再进入蒸发器。这样,使需要冷凝的混合蒸气进行预冷凝,可使温度降低 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$,又使需要加热的煤油进行预加热,油温度升到 50°C 以上。在热交换器 1 中冷凝得到的煤油与来自真空罐底的煤油一起进入蒸发器。而来自真空罐底的煤油温度较高,没有必要进入热交换器 1。

VPD 设备另一发展是煤油的净化系统。

在干燥处理浸过油的变压器时,煤油作为一种良好的清洗剂会把绝缘中的变压器油冲洗掉,变压器油混入煤油中,不能像水那样靠沉淀分离掉,必须用蒸馏的办法将变压器油分离掉。如图 10-154 所示,在蒸发器的端部增加了一个小的蒸馏室Ⅳ,用专门的导热油系统来加热。

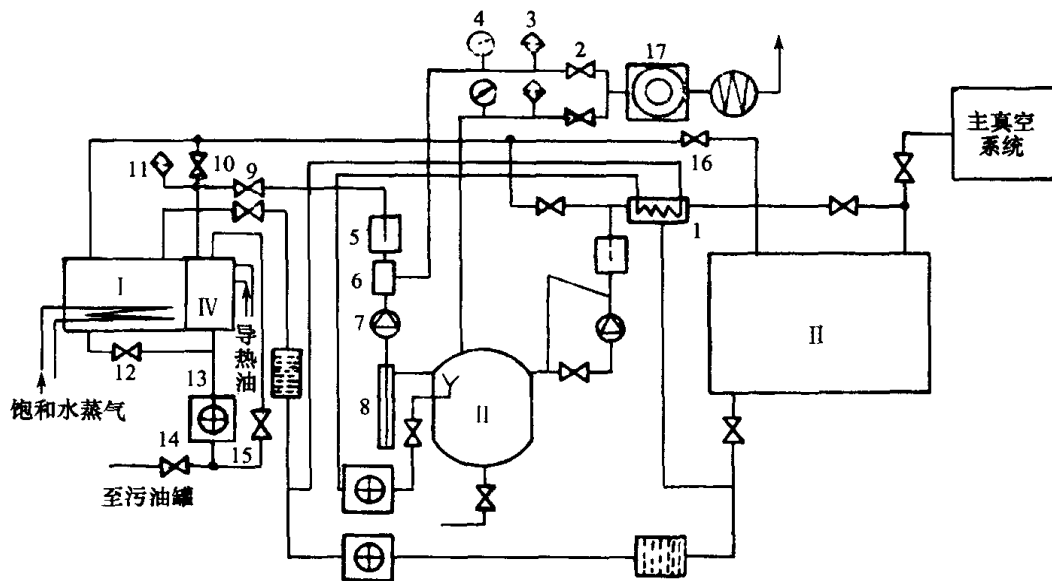


图 10-154 VPD 的热回收利用和煤油净化系统

1—热交换器;2—调节阀;3、11—压力开关;4—真空表;5—蒸馏冷凝器;6—小真空室;7—观察窗;8—虹吸管;
9、10—煤油蒸气阀;12—平衡阀;13—循环输液泵;14—污油阀;15—循环阀;16—入口阀;17—旋片机械泵。

连续蒸馏过程是这样进行的,即加热阶段开始不久,变压器油混入煤油的量达到一定的程度后,蒸馏系统便开始工作。蒸馏室中的混合液通过平衡阀 71 与蒸馏室Ⅳ中的液位平衡,12 阀关掉。蒸馏室中的混合液由循环泵 13 从蒸馏室下部打入蒸馏室上部,通过多孔喷管喷到载热油盘管上,进行充分的加热蒸发。在一个蒸馏周期开始阶段,蒸发出来的煤油蒸气同样可以用来加热变压器,所以可与蒸发室出来的蒸气一起通过入口阀 16 进入真空罐。但随着蒸馏室中煤油含量的减少,蒸馏室中蒸发出来的蒸气温度会升得过高,不宜于用来加热绝缘。这时,

就将蒸馏室中的煤油蒸气通过阀 9 引入蒸馏冷凝器 5 中,进行冷凝。冷凝后也收集在罐Ⅲ中。然后将所剩的变压器油作为废油排往系统外。如此叫做一个蒸馏周期。

由蒸馏室蒸馏出来的煤油蒸气进入蒸馏冷凝器 5 冷凝过程中,为了不致于使冷凝器 5 超负荷运行,进入该冷凝器的煤油蒸气量要加以控制。这个是靠多接点压力开关 11 和阀门 9 联合工作实现的。当压力在 $2.6 \times 10^4 \text{Pa} \sim 1.1 \times 10^4 \text{Pa}$ 时,阀 9 开启 $1/3$;在 $1.1 \times 10^3 \text{Pa} \sim 6 \times 10^3 \text{Pa}$ 时,开启 $1/2$;在 $6 \times 10^3 \text{Pa}$ 以下时,阀 9 全打开。

蒸馏冷凝器的压力与主冷凝器中压力的控制方法一样,仍靠维持泵 17 抽真空,但靠压力开关 3 和调节阀 2 的配合工作,使压力保持恒定。

十五、真 空 浸 渍

(一) 基本要素

充分掌握真空浸渍装置的基本要素,选取各个要素的最适宜的条件,是真空浸渍装置设计的重要方面。

真空浸渍的基本要素包括:①浸渍剂;②被浸渍物;③浸渍剂的前处理;④被浸渍物的前处理;⑤生产率。

(二) 浸渍主要工序

1. 前处理

在浸渍处理之前,先将被浸渍物体和浸渍剂进行抽除所含空气、水分的处理工序称为前处理。前处理的操作规程要根据被浸渍物、浸渍剂的特性以及浸渍目的来制定。一般说来,使用气体或易挥发液体浸渍剂不需要对浸渍剂进行前处理,以增加铸件强度为目的的浸渍也不需要前处理,电力元器件(电缆、变压器、电容器等)和多孔材料的浸渍,必须进行严格的前处理。

前处理根据工艺要求可分为常温抽气处理和高温(加热)抽气处理两种方式。除气除水效果以加热抽气处理最好,但处理温度受到处理材料的限制。

2. 浸渍处理

被浸渍物体和浸渍剂进行前处理之后,在真空条件下将浸渍剂灌入浸渍物中或注入专用的浸渍容器中的工艺过程称为浸渍处理。

浸渍处理的主要参数是操作(浸渍)压力,浸渍温度、浸渍时间。

表 10-107 给出了各种浸渍实例的工作压力。最佳的操作压力因浸渍物、浸渍剂的性质而异,通常以试验数据为制定操作压力的依据。

表 10-107 浸渍处理实例

目的	应 用 实 例	浸 渍 剂	工作压力/Pa	备 注
杀菌	绷带材料,小玻璃瓶,水果,谷物	福尔马林蒸气	6.6×10^3 $\sim 1.3 \times 10^4$	
消毒(杀虫)	棉花,烟草,果实,纺织物,皮制品	水蒸气,福尔马林,二硫化碳,二氯化乙烯		
化学反应	催化剂(硅藻土)	镍盐类溶液		
含湿	烟草,麦芽丝	水蒸气		

(续)

目的	应用实例	浸渍剂	工作压力/Pa	备注
浸渍(染色)	球棒,手杖,棒球棍,铅笔,纺线	染料,氨气及其它	1×10^3 $\sim 7 \times 10^3$	浸渍后加压
保存	铁道枕木,电线杆,肉	焦油,盐水	1×10^3 $\sim 1 \times 10^4$	浸渍后加压
防火	木材,纸,纺织物	合成树脂		浸渍后酌情加压
组织细化	铸件,瓦,砖	合成树脂,焦油		浸渍后酌情加压
防水	纺织物,鱼网,绳具	橡胶溶液		
增加强度	木材,钓具,家具	合成树脂		浸渍后加压
增加介电性	电容器,电缆,变压器,发电机等电气机械	绝缘油,石蜡,蜡,漆,合成树脂	$10^{-1} \sim 10^2$	浸渍后加压

使用液体浸渍剂时,为了提高浸渍效果,可在浸渍剂淹没被浸渍物之后通入压缩空气,进行加压浸渍。充入压力一般要大于或等于 10^5Pa 。

使用固体浸渍剂(石蜡、沥青等)或粘度因温度而变化的材料,在浸渍过程中要保持一定的加热时间,以确保浸渍剂能够浸入足够的深度。

根据不同的使用目的,选择最佳浸渍剂是极为重要的。表 10-108 给出了不同浸渍剂的浸渍工序分析。

表 10-108 对不同浸渍剂的工序分析

工序 浸渍剂		真空前处理		真 空		加 压		加 热			浸渍后	高真空
		被渍物	浸渍剂	浸渍中	浸渍后	浸渍中	浸渍后	浸渍剂	浸渍中	浸渍后	冷 却	排 气
		排气	脱气	排气	浸渍剂蒸发	强制渗透	追 加	粘度减少		溶剂的蒸发		
水溶液	染色食盐(冷)	+	-	+	○	○	-	-	-	○	-	-
	染料食盐(热)	+	-	-	○	○	-	+	○	○	-	-
	乳剂	+	-	+	○	○	-	+	○	○	-	-
溶液	橡胶液	+	-	-	○	-	-	-	-	+	-	-
	氯化橡胶	+	-	-	○	-	-	-	-	+	-	-
	沥青漆	+	-	-	○	-	-	-	-	+	-	-
	油漆	+	-	-	○	-	-	-	-	+	-	-
	合成树脂溶剂	+	-	-	○	-	+	-	-	+	-	-
	漆	+	-	○	-	-	-	○	-	+	-	-
油	石蜡油	+	+	○	-	-	-	○	○	-	○	○
	变压器油	+	+	○	-	-	-	○	○	-	○	○
	焦油	+	-	○	-	○	○	○	○	-	-	-
固体物	蜡	+	+	○	-	○	○	+	+	○	+	+
	石蜡	+	+	○	-	○	○	+	+	○	+	+
	沥青焦油	+	○	○	-	+	○	+	+	○	+	+
	电线材料	+	+	○	-	○	○	+	+	○	+	+
	合成树脂	+	+	○	-	○	+	+	+	+	-	+
	金属	+	○	○	-	○	○	+	+	○	-	+
气体	水蒸气	+	-	-	+	-	-	+	○	○	-	-
	福尔马林	+	-	-	+	-	-	○	○	○	-	-
	消毒气体	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
	杀虫气体	+	-	-	+	○	-	-	-	-	-	-

注: +—需要, - —不需要, ○—根据情况而定

(三) 浸渍工作压力与真空系统

表 10-107 给出了各种浸渍的工作压力范围。根据浸渍时的工作压力、被抽气体性质和气体的最大流量选用不同的真空抽气系统：

①被抽气体主要是非可凝性气体,工作压力在 $10^2\text{Pa} \sim 6 \times 10^3\text{Pa}$ 范围内,用油封机械泵抽气。工作压力在 $10^{-1}\text{Pa} \sim 1\text{Pa}$ 范围内用罗茨泵真空机组或油扩散喷射泵机组抽气。

②被抽气体主要是可凝性气体时,工作压力在 $10^2\text{Pa} \sim 6 \times 10^3\text{Pa}$ 范围内用大气喷射泵、水环泵机组或水蒸气喷射泵。工作压力为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 1\text{Pa}$ 时,一般使用罗茨泵机组或大气喷射、水环泵机组。

油封机械泵不能抽除大量的水蒸气和可凝性气体,用于真空浸渍中很容易被污染,影响抽气效率,必须采取措施降低蒸气对泵油的污染。最常用的方法是在机械泵进气口管道中串接低温挡板或冷阱,挡板或冷阱的温度根据被抽气体性质和气镇式机械泵处理蒸气的能力而定。大功率制冷低温板和机械泵组合抽气技术是解决抽除大量蒸气的最好途径。

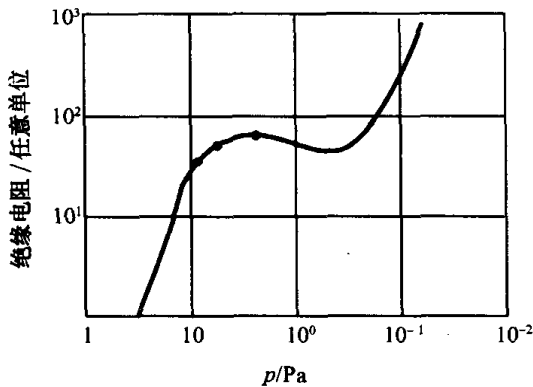


图 10-155 电缆绝缘纸的绝缘电阻与前处理过程的平衡水蒸气分压关系曲线

电力电缆和电力电容的真空浸渍需要在较低的压力下进行。图 10-155 是电缆绝缘纸浸渍中压力与绝缘电阻的关系曲线。图中曲线表明,真空浸渍的真空度不能低于 1Pa 。图 10-156 是工作压力与电缆绝缘纸的介电损失关系曲线。上述曲线表明,前处理的工作压力(平衡水蒸气分压)直接影响电缆的绝缘电阻及介电损失,工作压力的选取在电力元件真空浸渍工艺中,占有重要地位。

纸中含水量与浸渍前处理中平衡蒸气压力呈指数关系。假定 1g 纸在水蒸气压力 p 的环境条件下吸收的水量为 q ,它们之间应满足下列关系式

$$q = \alpha p^n \quad (10-115)$$

式中 n ——常数,见表 10-109;

α ——与温度有关的常数。

图 10-157 是干燥亚麻纸、牛皮纸的实验曲线,根据图中的实验结果求出的 n 值,见表 10-45。对牛皮纸的实验结果求解 100°C 下纸的含水量与环境水蒸气分压关系,得出水蒸气分压

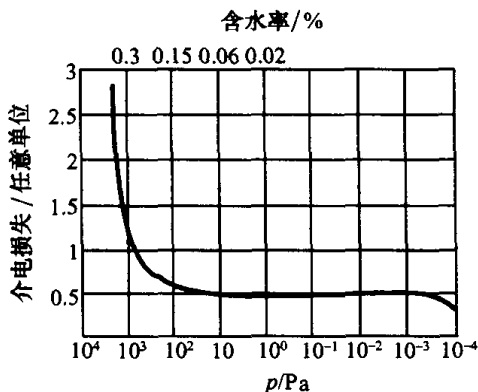


图 10-156 电缆绝缘纸的介电损失与前处理时平衡水蒸气分压关系

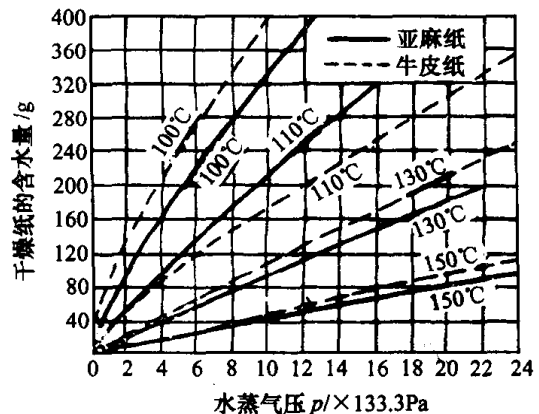


图 10-157 水蒸气气氛中干燥亚麻纸、牛皮纸的吸水量

为 10^2Pa 、 10Pa 、 1Pa 时对应的含水率为 0.07% 、 0.013% 、 0.0023% 。这些结果与图 10-155 电缆内含水率与平衡水蒸气压关系的差异,在确定浸渍装置的工作压力方面提供了宝贵的资料。

表 10-109 牛皮纸、亚麻纸的 n 值

纸的种类	牛皮纸					亚麻纸			
温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	110	120	130	150	100	110	130	150
n	0.767	0.783	0.796	0.837	0.879	0.802	0.872	0.989	0.991

图 10-158、图 10-159 给出了电缆油中含水率对油的性能的影响,变压器、电缆等的脱水除气,可参考这些数据确定处理工艺。

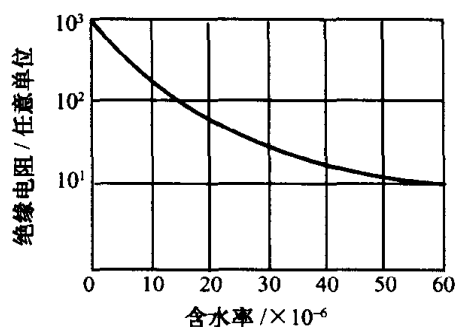


图 10-158 油中含水率与绝缘电阻的关系

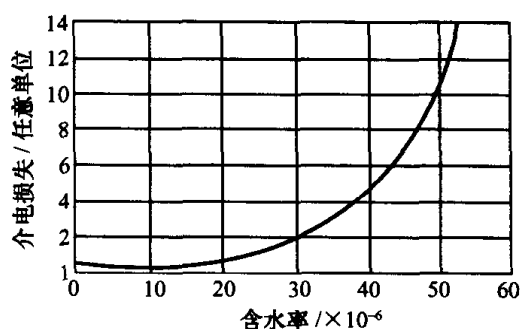


图 10-159 油中含水率与介电损失的关系

(四) 浸渍装置

1. 线材浸渍

这里叙述的线材浸渍,通常称为线的热处理。纤维线放在真空中用水蒸气加热进行处理,可以得到如下的效果:

- ①消除线材加工中的应力;
- ②提高线材加湿、染色的均匀性;
- ③能控制线材的光泽度及规定的含水量。

绕在线圈架上和卷在芯内部分的线材,要在短时间内均匀地加湿、加热,必须进行真空处理。处理工艺中的真空度、温度、含水量、加热保温时间、加热后的干燥冷却根据不同种类线的性质确定。图 10-160 是丙烯类线材的处理曲线。线材处理的温度范围为 $65^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 。

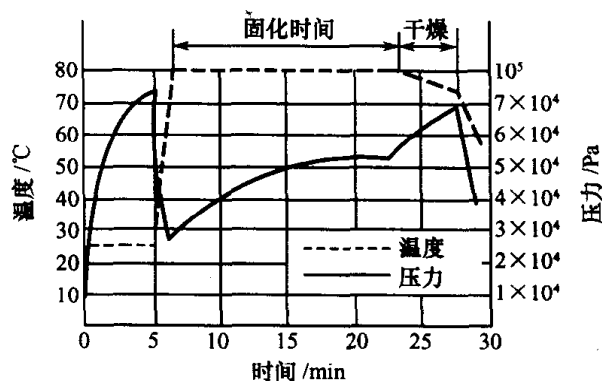


图 10-160 线材蒸气处理曲线

2. 以消毒、杀虫为目的的真空浸渍

为了杀死烟草、果实等收获后的害虫,可在真空容器内通入水蒸气和杀虫剂福尔马林、二硫化碳、二氯化乙烯等蒸气进行杀虫处理。图 10-161 是装入袋内的可可豆进行消毒处理的装置。真空浸渍消毒的处理时间是大气中消毒时间的 $1/10$ 。真空浸渍消毒法,不仅效率高,并且不存在药剂的公害污染问题。

3. 木材的真空浸渍

真空浸渍木材的目的是延长电杆、铁路枕木用材的使用寿命或增加木材的强度,提高木材

的染色质量等。

以增加强度为目的处理,可使用甲醛树脂浸渍剂。对质软多孔的木材经甲醛树脂处理后是耐水性很强的建筑材料,用以制做窗框、门板、隔墙和室内家具。图 10-162 是木材真空浸渍的装置简图。常用浸渍剂为焦油、树脂和盐水(矿山用材)。

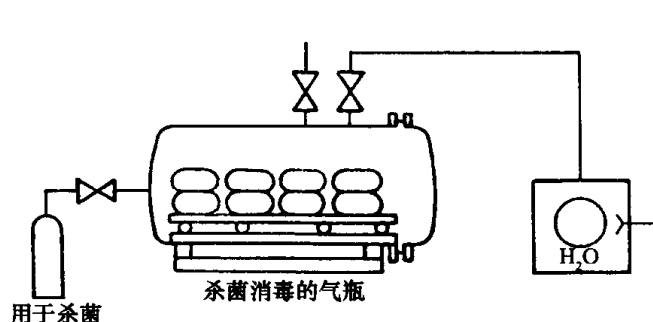


图 10-161 可可豆消毒用真空浸渍装置

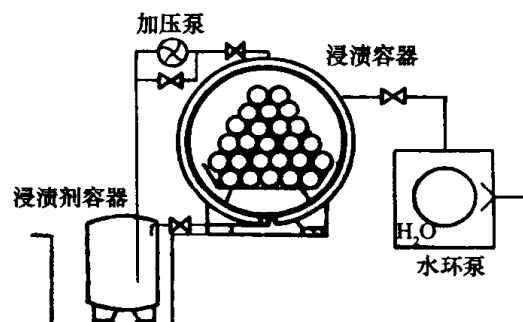


图 10-162 木材浸渍装置

4. 电容器的真空浸渍

在电气绝缘材料中,电容器对浸渍材料的电气绝缘特性要求最高。以绝缘纸为例,纸的耐压对注油变压器是 $3000\text{V}/\text{mm} \sim 4000\text{V}/\text{mm}$,对电缆是 $7000\text{V}/\text{mm} \sim 8000\text{V}/\text{mm}$,而注油电容器的要求超过 $13000\text{V}/\text{mm}$ 。图 10-163 是 M.P 电容器的真空浸渍装置结构简图。更大容量的电力电容器的真空浸渍是利用电容器壳体作为浸渍容器,用循环热风对壳体进行外部加热干燥处理。

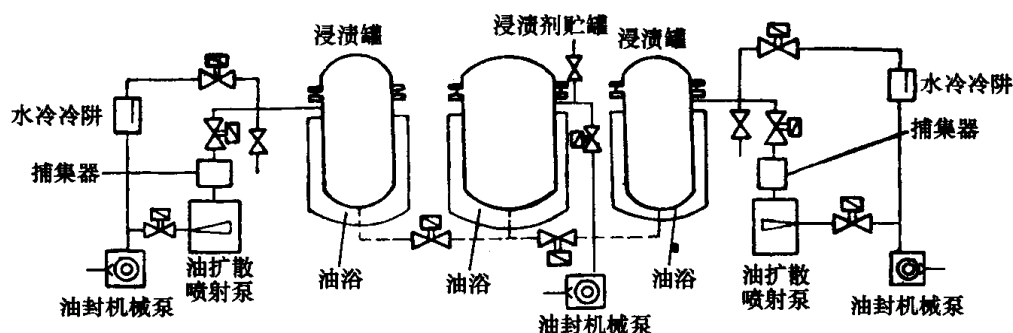


图 10-163 M.P 电容器真空浸渍处理装置

5. 变压器的真空浸渍

小型变压器、电动机线圈所用的真空浸渍装置类似于图 10-164。大型电力变压器的真空浸渍是在大型真空浸渍专用装置内进行的。140 吨的大型电力变压器处理设备的有效尺寸为 3m 宽, 6m 深,内部滚道上的台车有效高度 4.5m ,用内部蒸气管道加热。抽气机组由机械增压泵、水环泵和油封机械泵组成。

6. 电缆的真空浸渍

图 10-165 是电缆真空浸渍用的装置图。干燥浸渍容器为立方圆筒形,内径 5m ,高 3.5m ,容器外壁焊有对开的钢管,管中通高温蒸气对容器进行加热。干燥浸渍的最高温度为 130°C 。真空系统根据以下参数进行设计:电缆内绝缘纸的质量 7000kg ,在 100h 内需抽走的水量约 700kg ,泵在工作压力下的抽气量不应小于 $7\text{kg}/\text{h}$ 。为了排除出气高峰的最大气体负荷,图 10-165 的抽气系统中增加了一台空气引射器。前处理的加热除采用对流、强制热风循环及辐射加热外,还可以向电缆通直流电加热,电压 6.5V ,电流 3600A 。浸渍中加压 $3 \times 10^5\text{Pa}$,电缆导

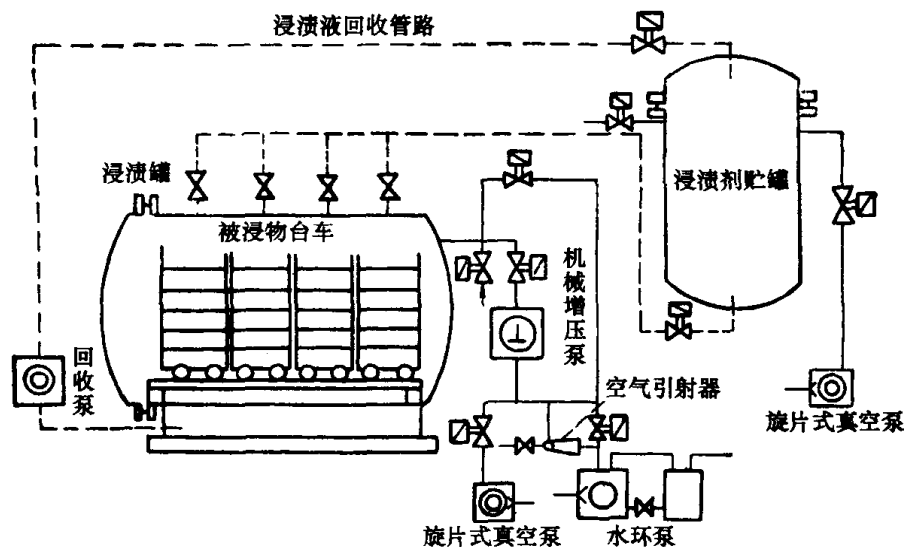


图 10-164 小型电容器及小型电气元件的真空浸渍装置

体直径 15mm, 由 2.3mm 多股铜线编织而成, 外裹厚度为 0.125mm, 宽为 17mm~20mm 的带状绝缘纸 70 层, 卷纸总厚度 8mm, 电缆外径 31mm, 全长 1200m。电缆绝缘纸的质量约 500kg, 含水量 40kg。电缆的干燥浸渍过程示于图 10-166。干燥过程中出气量的测定采用静态升压法, 每隔 1h 进行一次。经过 70h 抽气之后, 用费雪滴定法测量试件的含水率为 0.01%。

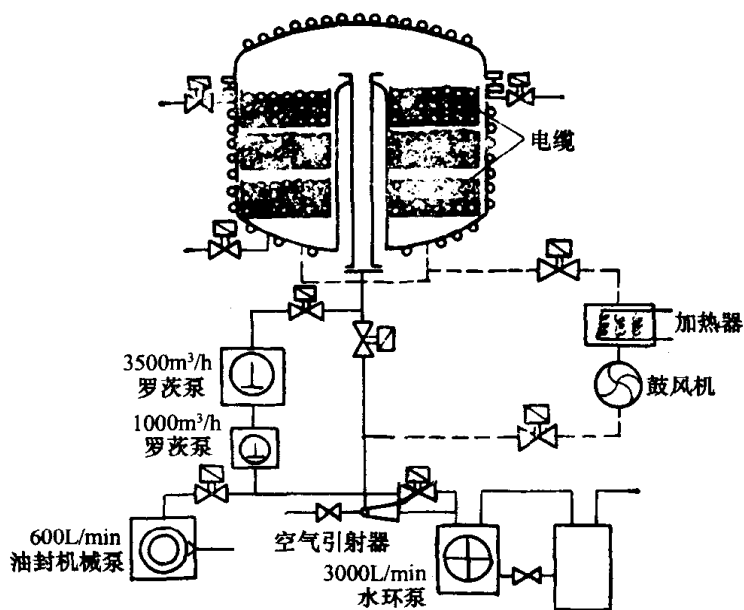


图 10-165 电力电缆真空浸渍装置

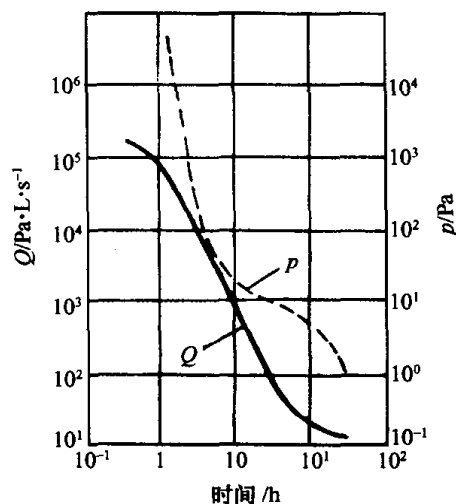


图 10-166 电缆干燥过程的操作压力及用升压法测得的出气量

十六、真空蒸馏

(一) 概述

真空蒸馏工艺在石油化工中使用较普遍, 与大气压下蒸馏相比, 它有许多特点: 使沸点降低; 分解聚合物危险性小, 能够低温处理; 容易加热, 热损失小; 空气中的氧、水蒸气等成分的影

响减小;相对挥发度大;平衡关系改变(如共沸点消失等)。但它也有不足之处:冷凝器、捕集器均要求低温;传热方式有一定要求;设备费及操作费较大。

按蒸馏系统操作压力的不同,真空蒸馏可分为:

①减压蒸馏 常见的减压蒸馏过程,大多在 10^4Pa 以上的压力范围内操作。减压蒸馏机理与常压蒸馏差不多,常压蒸馏装置形式基本上可用。

②粗真空蒸馏 压力范围为 $1.0 \times 10^4\text{Pa} \sim 2.7 \times 10^2\text{Pa}$,气体的流动属粘滞态。在这个压力范围内进行蒸馏操作是容易实现的。

③低真空蒸馏 压力范围为 $2.7 \times 10^2\text{Pa} \sim 1.0\text{Pa}$,此时气体接近过渡流状态,对真空蒸馏装置的选型、设计、制造、安装、操作等都有较为严格的要求。

④准分子蒸馏 压力范围为 $1.0 \sim 1.0 \times 10^{-2}\text{Pa}$,此时,气体分子的平均自由程与蒸馏器尺寸相近,气体呈过渡流状态。

⑤分子蒸馏 操作压力在 $1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 以下。在分子蒸馏或准分子蒸馏装置中,气体的流动为分子的自由运动,也就是说,可以忽视该系统中的其它分子的碰撞和干扰,此时,蒸馏过程受来自液面的蒸发所支配。

(二) 真空蒸馏装置

1. 间歇式蒸馏装置

间歇式真空蒸馏装置,在实验室及小批量生产中广泛应用。图 10-167 是常见的一种型式,其主要部件为:

①蒸馏罐 为外压容器,一般采用蛇管或夹套型换热器,用水蒸气或油加热。为改善传热状况,大多数罐上装有搅拌器,也可设置原料预热器或强制循环加热器,如图 10-168 所示。原料的加热、脱气、蒸馏等工序均在罐内进行。

②冷凝器 通常选用列管式(蒸气走壳程)、旋板式(蒸气走直通道)冷凝器。冷凝器和蒸馏罐通常是分开设置的。但有时也可将其直接放在蒸馏罐的上部构成一体,如图 10-169 所示。

③阱 由于从冷凝器出来的气体包括冷凝液温度下的蒸气及不可凝气体,有的真空泵不适宜抽除这些蒸气。为了保护真空泵和对蒸馏出物质进行捕集,常采用机械阱、低温阱或吸附阱。机械阱有离心型(旋风式、旋流板式)、碰撞型(挡板式、伞形、折流板式等)及气滤型(金属丝网过滤器、干式填充式等)。

2. 连续蒸馏装置

这类装置处于间歇式蒸馏装置和精馏装置之间,与间歇式相比,它没有长时间的高温加热部分,对热的安全性高。此外,装置的容量小,能够经常地进行连续操作,并有一定程度的精馏效果。由于它本身受到预热和停留时间的限制,因此只能用于相对挥发度较大,分离性较好的场合。一般用来进行脱气、脱水、脱溶剂和脱臭等操作。

图 10-170 给出了几种连续蒸馏装置的型式:

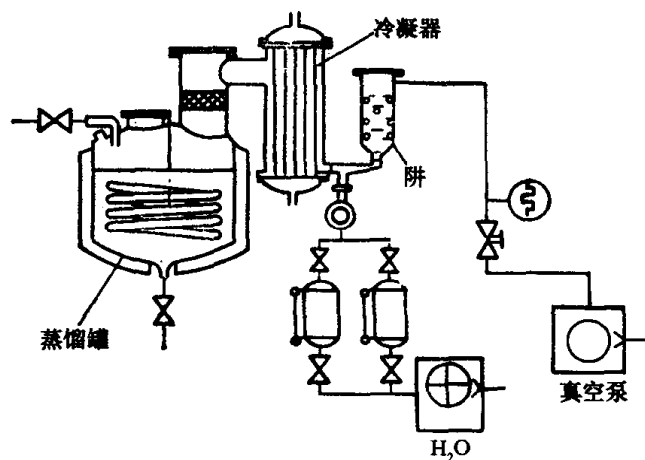


图 10-167 间歇式真空蒸馏装置

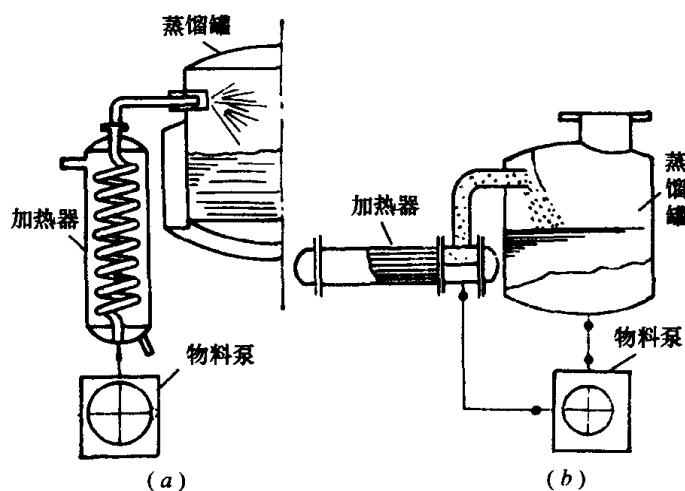


图 10-168 蒸馏罐
(a)预热式;(b)强制循环加热方式。

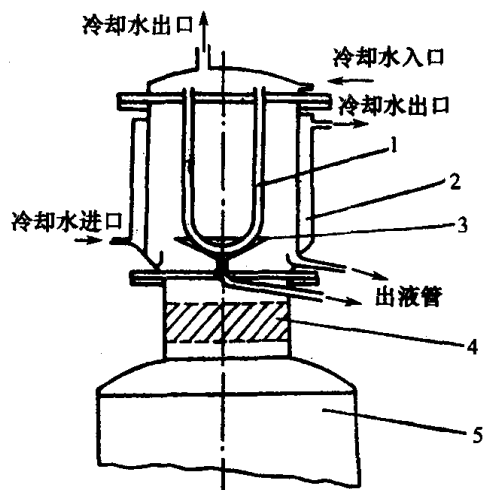


图 10-169 冷凝器直连形式
1—冷凝器管;2—冷却夹套;3—液集合板;
4—除沫器;5—蒸馏罐。

①喷雾式 利用分配管和喷雾喷嘴将预热过的原料以液滴形式分散到空塔中去,从而使其蒸发面积增大。由于首先要预热,因此有过热危险。

②薄膜式 液体流动沿塔板的水平方向或者沿管内壁及管外壁的垂直方向,以液膜的形式流下,能够加大蒸发面积及传热系数。水平流动的有多级平板型或阶式蒸发器型,垂直流动的有降膜、升膜及升降膜型。

③填料式 其特点是蒸发面积大,停留时间长,能起到一定程度的精馏效果。

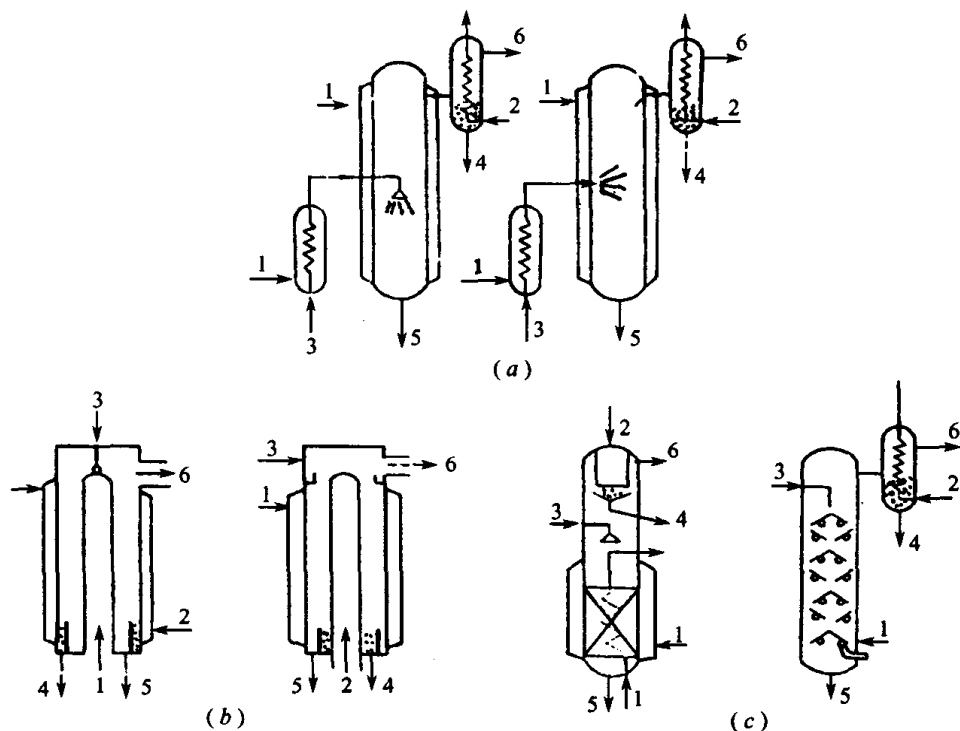


图 10-170 连续真空蒸馏装置

(a)喷雾式;(b)薄膜式;(c)填料式。

1—加热;2—冷却;3—进料;4—馏分;5—残分;6—真空泵接口。

3. 连续精馏塔

①板式塔 常压所用的各种板式塔,全部可用于真空蒸馏。为减少压力损失,多采用没有穿孔效应及压降少的板型如喷射板、穿流栅板等。

②填料塔 真空精馏时多采用填料塔。一般常压填料塔中所用的各种填料均可在真空精馏塔中使用。由于鲍尔环填料、波纹网填料以及压延孔板波纹填料的压力损失非常小,更适于作为真空蒸馏的填料。

③薄膜塔 在薄膜塔中,液体和蒸气之间不断地进行着蒸发和冷凝,从而带来一定的精馏效果。

④旋转塔 为了减少板式塔和填料塔的压力损失,保证良好的气液接触和提高精馏效果,提出了旋转式真空精馏塔,如图 10-171 所示。一般的结构是由一个旋转的作冷却用的内圆筒和一个固定的作加热用的外圆筒组合而成。旋转圆筒的转速达到每分钟几百甚至几千转,冷凝液受离心力的作用飞向外圆筒,在此重新再蒸发,如此不断反复地冷凝蒸发来进行精馏。为了加强液膜中的搅拌效果,还有在贴近外圆筒的内表面设置搅拌桨叶或搅拌刷的结构型式等。旋转塔大多用在实验室规模,可用于 1Pa 的高真空精馏装置。

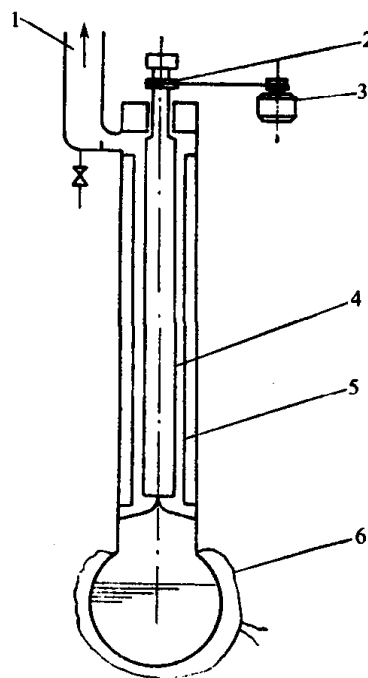


图 10-171 旋转式精馏塔

1—冷凝器;2—滑轮;3—电机;
4—回转冷却圆筒;5—加热面;
6—电加热器罩。

(三) 分子蒸馏装置

1. 基本原理

分子蒸馏是在 $1\text{Pa} \sim 1 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 的高真空下进行的特殊蒸馏过程。在此条件下,蒸发面和冷凝面的间距小于或等于被分离物料的蒸气分子的平均自由程,由蒸发表面逸出的分子凝集在冷凝面上。分子蒸馏广泛地用于浓缩或纯化高分子量、高沸点、高粘度的物质及热稳定性极差的有机化合物。

(1) 分子蒸馏过程

如图 10-172 所示,分子蒸馏过程的进行可分如下四步:

①组分的分子从液相主体向蒸发表面扩散。由传质理论可知,欲提高液相扩散速度,须减小液层厚度及强化液层的流动。

②分子在液层表面上的自由蒸发。蒸发速度随着温度的升高而升高,但分离因数有时却随着温度的升高而降低,所以,应以被加工物质的热稳定性为前提,选择经济合理的蒸馏温度。

③分子从蒸发表面向冷凝面飞射。蒸气分子从蒸发面向冷凝面飞射的过程中,可能彼此相互碰撞,也可能和残存于两面之间的空气分子发生碰撞。由于蒸气分子大都具有相同的运动方向,所以它们本身的碰撞对飞射方向和蒸发速度影响不大,而残气分子在两面间呈杂乱无章的热运动状态,故残气分子数目的多少是影响飞射速度和蒸发速度的主要因素。实际上,只要建立足够高的真空度,使蒸气分子的平均自由程大于或等于两面之间距,则飞射过程和蒸发

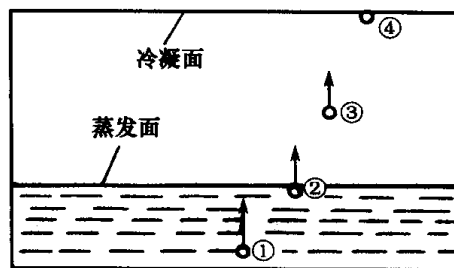


图 10-172 分子蒸馏过程示意图

过程就可以很快地进行。

④分子在冷凝面上冷凝。只要保证冷热两面间有足够的温差(一般为 $70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$), 冷凝表面的形状合理且很光滑, 则冷凝可以在瞬间完成。

(2) 分子蒸馏过程的特点

与普通蒸馏相比, 分子蒸馏有下列四个特点:

①普通蒸馏在沸点温度进行分离, 分子蒸馏可以在任何温度下进行, 只要冷热两面间存在着温差, 就能达到分离目的。

②普通蒸馏是蒸发与冷凝的可逆过程, 液相和气相间可以形成相平衡状态; 而分子蒸馏过程中, 从蒸发表面逸出的分子直接喷射到冷凝面上, 中间不与其它分子发生碰撞, 理论上没有返回蒸发面的可能性, 所以, 分子蒸馏是不可逆的。

③普通蒸馏有鼓泡、沸腾现象; 分子蒸馏是液层表面上的自由蒸发, 没有鼓泡现象。

④表示普通蒸馏分离能力的分离系数与组分的蒸气压之比有关; 表示分子蒸馏分离能力的分离系数则与组分的蒸气压和相对分子量之比有关, 并可由相对蒸发速度求出。

2. 分子蒸馏装置

(1) 分子蒸馏的标准流程

分子蒸馏的标准流程如图 10-173 所示。由图可见分子蒸馏装置主要由真空泵组、单级或多级除气装置、分子蒸馏设备和压力温度流量的测控仪表等四部分组成。

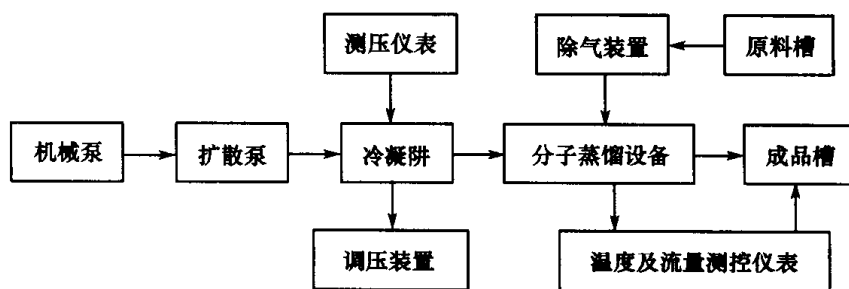


图 10-173 标准流程示意图

(2) 分子蒸馏器的分类

分子蒸馏设备大致可分下列三种形式:

①静止式 静止式分子蒸馏器结构最简单, 其特点是具有一个静止不动的水平蒸发表面。按其形状不同, 静止式可分为釜式、盘式等; 按其用途不同, 静止式又可分为普通分子蒸馏釜、平衡分子蒸馏釜、分析用微量分子蒸馏釜等等。静止式设备生产能力低, 分离效果差, 料液在釜内停留时间长, 热分解的危险性大, 一般适用于实验室及少量生产。

②降膜式 降膜式设备在实验室及工业生产中广泛采用。其优点是液膜厚度小, 并且沿蒸发表面流动, 被加工物料在蒸馏温度下停留时间短, 热分解的危险性较小; 蒸馏过程可连续进行, 生产能力大。缺点是液体分配装置难以完善, 很难保证所有的蒸发表面都被液膜均匀覆盖; 液体流动时常发生翻滚现象, 所产生的雾沫也常溅到冷凝面上, 降低了分离效果。图 10-174 是工业用降膜式分子蒸馏设备的一种。

图 10-175 所示的刷膜式分子蒸馏设备, 是降膜式设备的一种特例。从结构上看, 刷膜式釜中设置一硬碳或聚四氟乙烯制的转动刮板(或称刷片), 它既保证液体均匀覆盖蒸发表面, 又使下流液层得到充分搅动, 从而强化了传热和传质过程。为保证密封, 刷膜式设备结构比较复杂。但与离心式相比, 它还是比较简单的形式。

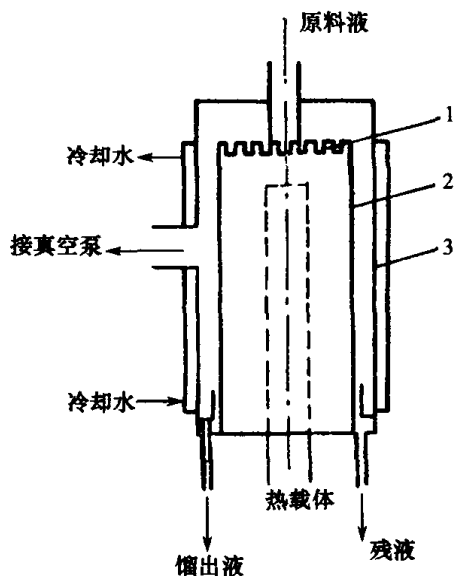


图 10-174 降膜式分子蒸馏设备

1—液体分配装置；2—蒸发表面（ $\phi 324\text{mm}$ ）；
3—冷凝面（ $\phi 406\text{mm}$ ）。

③离心式 离心式分子蒸馏器具有旋转的蒸发表面，多用于工业生产中，其优点是：

- a. 液膜非常薄，流动情况好，生产能力强。
- b. 料液在蒸馏温度下停留时间很短，可加工热稳定性极差的有机化合物。

c. 由于离心力作用，液膜分布很有规律，减少了雾沫飞溅现象，分离效果较好。

离心式分子蒸馏设备结构复杂（图 10-176），真空密封较困难，设备的成本较高。

3. 分子精馏设备

①带有旋转冷凝面的降膜式分子精馏器 旋转着的冷凝面靠离心力作用把冷凝液抛回蒸发表面，从而达到精馏的目的。

②动带式精馏器 动带式精馏器像一层层交叉运行着的皮带运输机，相邻两面分别为蒸发面与冷凝面，料液在旋转着的金属带上达到分离。

③多级逆流阶梯式精馏设备 图 10-177 表示了阶梯式精馏器中的流动情况，馏出液沿冷凝面向“塔顶”逐级传递，而“塔顶”槽内的液体则经溢流挡板向“塔底”逐级传递。

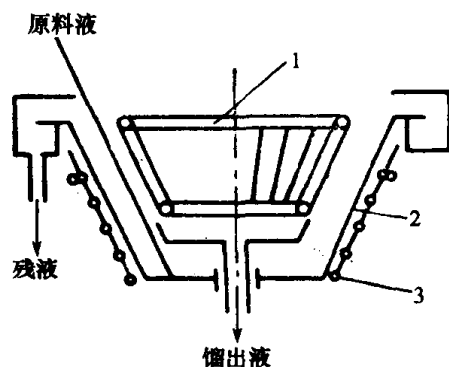


图 10-176 离心式分子蒸馏器

1—管式冷凝器；2—转子；3—电加热器。

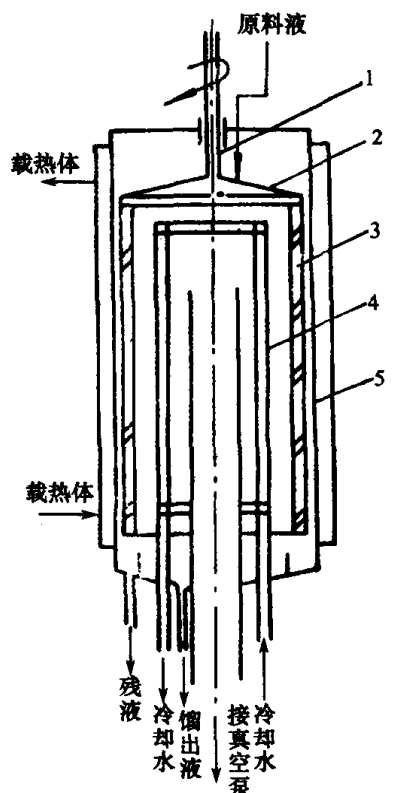


图 10-175 刷膜式分子蒸馏塔

1—旋转轴；2—原料液分配盘；3—刮板；
4—垂直翅片管冷凝器；5—蒸发表面。

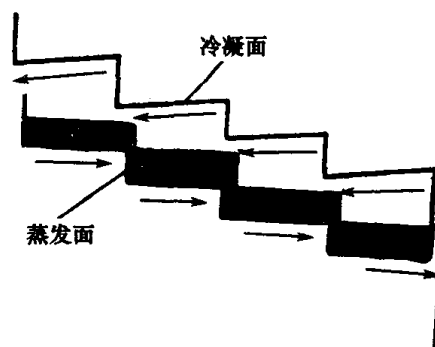


图 10-177 多级逆流阶梯式精馏器中的流动情况

4. 各种分子蒸馏设备的主要特征

前述各种分子蒸馏设备的主要特征列于表 10-110。

表 10-110 各种分子蒸馏器的主要特征

设备分类	液膜厚度/mm	液层上下面之温差/℃	料液在高温下的停留时间
釜式	10~50	3~18	1h~5h
盘式	1~10	1.5	5min~60min
试验室降膜式	0.1~0.3	不计	10s~50s
工业型降膜式	1~3	不计	2min~10min
试验室离心式	0.01~0.03	不计	0.04s~0.08s
工业型离心式	0.03~0.06	不计	0.1s~1s
高速离心式	0.001~0.005	不计	0.001s~0.005s
逆流阶梯式	5~15	5	5min~60min

5. 分子蒸馏装置的设计原则

①分子蒸馏在高真空条件下进行,则设备内要具有较低的残气压力。这要求:

a. 正确地选择真空泵组及管道尺寸,以保证足够快地从容器内抽出气体。

b. 正确选择蒸发面与冷凝面的形状、距离及相对位置,以保证从设备的蒸馏空间内无阻碍地引出残余气体。蒸发面与冷凝面之间的距离过小时,一方面不利于抽除残气,另一方面蒸馏液的雾沫也易溅到冷凝面上,从而降低了分离效果。蒸发面与冷凝面的间距都选得比较大,一般为 1cm~2cm,甚至有 5cm~6cm。

c. 分子蒸馏多用于分离热不稳定性物质,故要求被加工物料在蒸馏温度下停留较短的时间。从表 10-110 可知,离心式设备内物料停留时间最短。

d. 由机理分析可知,液层内部的扩散是影响分子蒸馏过程的重要因素,因而分子蒸馏设备应力求减少液层厚度及强化液层的位移,使之湍动。刷膜式设备内液层搅动最好。

②被蒸馏的液体必须预先除气。在大气压下,任何液体都含有或多或少的气体,此气体含量决定于液体本身的性质和它进入蒸馏装置之前所处的状态。每升鱼肝油中含有 0.6~0.8L 气体,在 $1.31 \times 10^2 \text{ Pa}$ 的压力下,此气体的体积为 0.45L~ $0.6 \times 10^6 \text{ L}$,可见未经除气的液体不能直接加入蒸馏釜,否则不能保证系统的真空度。

十七、真空输送

(一) 真空吊车

1. 概述

人们利用真空与大气压之间的压差,制造了真空吸盘。使用真空吸盘制成的真空吊车,在起吊运输业上显示出了它独特的优点:首先它不仅对磁性材料,而且对范围极广的非磁性金属和非金属都能实现吸附吊运;同时由于吸盘受力面积较均匀(吸盘内可做成带有缓冲凸肩),所以可以吊运强度较差或脆性较大的材料与设备——如玻璃板、纸筒等,对成套仪器设备可吸附薄壁外壳进行吊运,对油筒、化学溶剂筒等也可吸附在筒壁上进行吊运。除此之外,真空吊车还有以下特点:对于表面粗糙的物件,只要在工件上能放置下吸盘,并选择好合适的吸盘橡胶材料就可吊运。国外已有用它来吊运混凝土建筑材料。对于有些漏气的工件,选用抽气速率高的真空泵,也能吸附吊运。而温度较高的材料,可选用耐热性好的橡胶,如采用硅橡胶或氟橡胶也能吊运。日本某厂曾用它来吊运轧好的高温铝板。

2. 基本原理

真空吊是应用真空吸附原理,在被吸附的工件上紧贴橡胶制的吸盘,用真空泵抽掉吸盘与工件间空腔内的空气,使外界的大气压力与空腔内的真空产生一个压力差。依靠此压力差,使工件紧吸在吸盘上进行吊运。如图 10-178 所示。

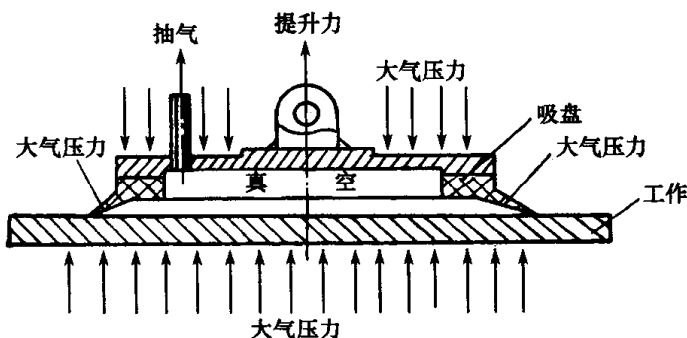


图 10-178 真空吸附原理图

造成的压力差越大,起吊的吸附力就越大;真空泵的抽气速率越大,吸盘内真空达到动态平衡时间越短,吊运的可靠性越大,起吊的速度也越快。

3. 结构简介

图 10-174 为门式真空吊车,两轨距离为 14.6m,最大起吊钢板长度 12m,车身宽度 3.4m,车身全高为 3.75m,而大车车身的大梁高度为 3.15m,吊车起吊质量为 5t。

这种真空吊车设计时选用气缸提升的方案来实现板材的吊运和升降。其最大提升高度为 0.8m。为了实现不同尺寸板材的吊运,具有大小两种吸盘。三只大吸盘(盘的外径 600mm),二只小吸盘(盘的外径 400mm)。每只吸盘有各自独立的气缸,吸盘之间可以联合工作,也可各个单独工作。例如,当起吊整张大钢板时,用 1、3、5 号大吸盘联合起吊,2、4 号小吸盘上升停止工作(如图 10-179 所示)。当起吊宽度较小的板材时,则可用 2、4 号小吸盘联合起吊,大吸盘上升停止工作。另外,当板材面积较小时,可以采用两只大吸盘,甚至一只大吸盘或一只小吸盘进行起吊。这样就能起吊运输所有尺寸的工件。

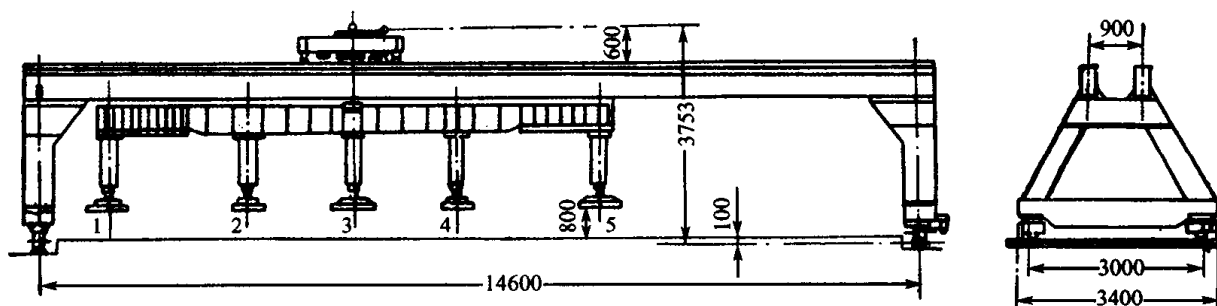


图 10-179 真空吊车外形结构

设备的大吸盘配用的气缸内径为 260mm;小吸盘配用的气缸内径为 180mm,以保证在任何气源状况下,大吸盘的吸附力永远大于大气缸的提升力;同样小吸盘的吸附力也永远大于小气缸的提升力,这样才能保证起吊的安全。因为当钢板的质量超过吸盘的吸力(钢板质量更超过气缸的提升力)时,钢板便吊不起来。

为了保证安全吊运,吊车的运动方位各极限位置都装有限位装置。同时为了防止吊梁与大车梁脚相碰,在大车的大梁两端装有限位开关。同时依靠另外一套限位装置,使吊梁只能在大车梁脚相碰,在大车的大梁两端装有限位开关。同时依靠另外一套限位装置,使吊梁只能在大车梁脚相碰,在大车的大梁两端装有限位开关。同时依靠另外一套限位装置,使吊梁只能在大车梁脚相碰,在大车的大梁两端装有限位开关。

大梁中间一定范围内旋转,超出这个范围吊梁旋转电动机自动断闸,停止旋转。吊车不仅能作普通门式吊车的动作——纵向和横向行走,而且吊梁沿中心轴能作左右各 90° 的旋转(即可作 180° 的调头),以便于调整板材的安放位置。吊梁的两端的大吸盘可向中心移动(每端可移动 1m),这样便能起吊长度小于 9.6m 和大于 7.6m 的厚钢板。此两端吸盘和气缸组的移动是通过 0.5kW 的三相异步电机传动,经涡轮蜗杆减速,再通过丝杠带动气缸上部的拖车来实现的。

(二) 物料的真空吸送

1. 概述

利用真空泵或风机为动力源,使系统内部造成真空,物料在悬浮状态下在管道中移动,通过分离器使工作气体和物料分开,这就是真空吸送。

真空吸送同其它物料输送方式相比,其优点在于设备简单,占地面积少,吸料输送可靠,操作简单,既可以由几处向一处集中输送,也可以由一处向几处分散输送,可以连续卸料和间断卸料;整个系统在工作时处于负压下,不扬尘,劳动条件较好。相比之下其缺点是能耗高,弯头处磨损较为严重,不过在国外有些设备通过弯头管道内壁镶衬软橡胶这点已得到解决。

根据真空度高低和真空泵不同,真空吸送可分高真空吸送和低真空吸送。高真空吸送一般多采用喷射泵、水环泵为动力源,系统的真空度较高,一般为 $5 \times 10^4 \text{Pa} \sim 3 \times 10^4 \text{Pa}$,气流量也较小,国内 SZ-4 水环真空泵在真空度为 60% 时,理论空气流量只有 $660 \text{m}^3/\text{h}$ 。低真空吸送一般多采用离心风机和通风机为动力源,系统的真空度较低,一般在 $9 \times 10^4 \text{Pa} \sim 8 \times 10^4 \text{Pa}$,所以输送距离较近,不超过 50m,但风量较大,如经常采用的 7-17-9 1/2 风机,风量可达 $1800 \text{m}^3/\text{h}$ 。真空吸送系统原理简图如图 10-180 所示。

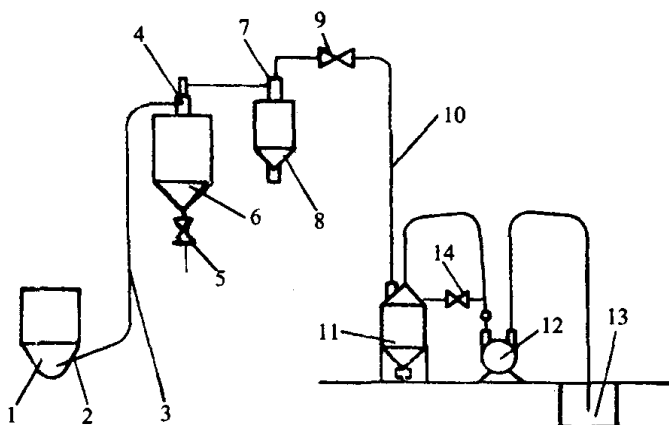


图 10-180 真空吸送系统原理简图

1—料仓;2—吸嘴;3—料管;4—座式分离器;5—球阀或蝶阀;
6—分离料仓;7—除尘器;8—除尘料仓;9—逆止阀;10—气管;
11—水浴除尘器;12—水环泵等;13—沉淀池;14—旁通阀。

真空吸送在国内外已经得到普遍的应用,从大型轮船的装卸到冶金、铸造工厂散状物料以及面粉厂、啤酒厂的运输、集尘、清灰、灰处理等,总之只要有散状料运输和处理的地方均可采用这种方法。资料报导国外已将真空吸送装置在专门厂家生产,并将整个系统定型部件做到标准化、系列化。

2. 真空吸送系统主要型式和组成

下面以高真空吸送系统为例介绍系统中的主要装置。

①吸嘴 吸嘴装置较简单(图 10-181),但又非常关键,一般吸嘴都是插入散状料中,主要型式有二种,一种是单筒式的,一种是双筒式的。当系统抽真空时,大气透过物料的一次风和吸嘴本体上开孔进去的二次风将物料带进料管中,无论是单筒还是双筒式,吸嘴的二次风量必须调节,经实践摸索调到最佳处可固定。

②分离器 一般为座式分离器(图 10-182),它将真空吸送系统中料管内的散状料、粉料分离下来。常见的分离器有离心式和重力式,其中重力式的结构简单、风量小。料管中 95% 的散状料和粉料被分离下来进入分离料仓,带有尘料的很少的气体进入除尘仓。

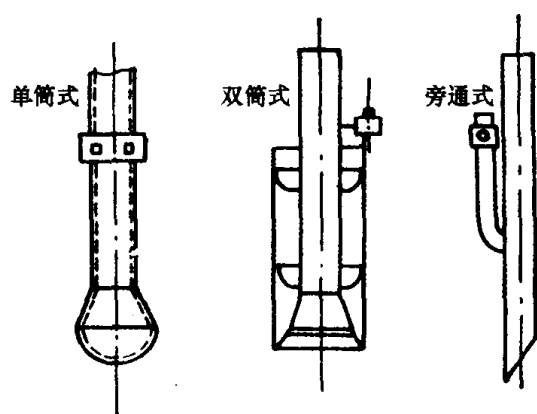


图 10-181 吸嘴结构示意图

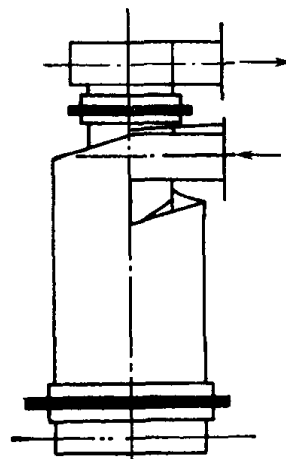


图 10-182 座式分离器示意图

③除尘器 为保证排出系统的尾气达到环保标准和减少有尘气体对真空泵的磨损,经分离后的气体需再经旋风除尘器(图 10-183)和水浴除尘器(图 10-184)。水浴除尘器内需保持一定的水面,进气管插入水中,尘灰和气流进入水中沉淀,净化的气流再进入水环泵中。

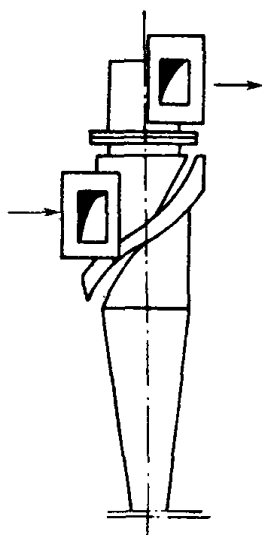


图 10-183 旋风除尘器示意图

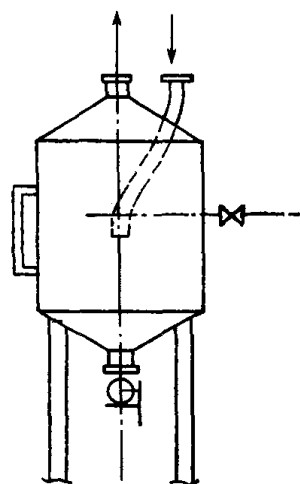


图 10-184 水浴除尘器示意图

④真空泵 在高真空吸送系统中多采用 SZ 型水环真空泵,水环真空泵噪声较小,在真空度为 60% 时,真空吸送系统的效率最高。

⑤管道和阀门 管道多采用水、煤气管和无缝钢管,输送管道的壁厚不应小于 4mm~6mm,为了减少真空压力损失,弯头半径不应小于管内径的 6 倍~10 倍。气管直径可等于料管直径或为料管的 0.8 倍。

真空吸送系统的阀门要求气密性很高,不然将影响吸送能力,一般采用球阀和蝶阀,要求连续卸料时,不宜采用星形给料机、重锤锁气器等,而采用双锥幅式密封闭锁器较好。

3. 高真空吸送系统设计的主要步骤

真空系统计算较为复杂,不同种类、状态的物料吸送工艺参数需经过试验才能取得,可以用生产实践数据和简化的方法进行设计。

(1) 确定物料/空气质量混合比 μ

任何一种气力输送装置总有一个混合比

$$\mu = \frac{Q_s}{1.2Q_A \cdot K} \quad (10-116)$$

式中 Q_s ——要求物料输送率[m³/h];

Q_A ——真空泵的抽速[m³/h];

K ——物料系数 0.9~2.2。密度小, K 值取大值, 如煤粉 K 可取 2.2; 密度大取小值, 如旧砂可取 0.9; 高真空吸送系统混合比 μ 可达 15~30。

(2) 系统风速 v_C 的选定

无论选用什么真空泵或输料管径, 吸送系统的风速 v_C 应在 7m/s~12m/s 范围内。风速过小则吸料不利, 甚至吸不起料; 风速过大, 管道磨损特别是弯头磨损严重。风速公式

$$v_C = \frac{Q_A}{3600F} \quad [\text{m/s}] \quad (10-117)$$

式中 $F = \frac{\pi d^2}{4} [\text{m}^2]$;

d ——管道内径[m]。

根据实际使用情况, 当选用 SZ-3 型水环泵时, 料管选用无缝钢管 $\phi 108 \times 4$ 比较合适, 风速 $v_C = 9.05 \text{ m/s}$ 。

(3) 系统中各部分真空压力损失

为了减小计算真空压力损失的工作量, 这里介绍一些真空压力损失的经验数据:

座式分离器 $\Delta p_{\text{分}}$ —— $6.7 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 9.3 \times 10^2 \text{ Pa}$;

旋风除尘器 $\Delta p_{\text{除}}$ —— $5.3 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 6.7 \times 10^2 \text{ Pa}$;

水浴除尘器 $\Delta p_{\text{水}}$ —— $6.7 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{ Pa}$;

单筒型吸嘴 $\Delta p_{\text{单}}$ —— $5.6 \times 10^4 \text{ Pa} \sim 1.8 \times 10^4 \text{ Pa}$;

双筒型吸嘴 $\Delta p_{\text{双}}$ —— $1 \times 10^4 \text{ Pa} \sim 1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$;

垂直料管 $\Delta p_{\text{垂}}$ —— $2.6 \times 10^2 \text{ Pa/m} \sim 3.3 \times 10^2 \text{ Pa/m}$;

水平料管 $\Delta p_{\text{平}}$ —— $1.6 \times 10^2 \text{ Pa/m} \sim 1.8 \times 10^2 \text{ Pa/m}$;

气管 $\Delta p_{\text{气}}$ —— 80 Pa/m 。

根据系统中各部分真空压力损失取值, 相加后, 系统的压力损失最佳范围应为 $5.6 \times 10^4 \text{ Pa} \sim 6.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。这里的真空度为 55%~65%, 属于系统效率最高范围内即可。

(三) 混凝土真空吸水软吸盘

1. 概述

混凝土施工的成型方法, 目前主要以振动成型最为普遍, 但产生的噪声十分有害。在混凝土成型后, 用真空吸盘将混凝土拌合时, 多余的水吸出来, 这就保证了水灰比大的混凝土的强度不致低于相同水泥用量的干硬性混凝土的强度, 达到节约水泥和改善劳动条件的目的。

目前造船行业用真空吸水技术来成型钢丝网水泥船, 取得了显著成效。

含水量较大的塑性混凝土成型, 拌合物处于常压状态。当把一个一侧能透水及另一侧周边密闭的真空吸盘紧紧地贴在已成型的混凝土表面上时, 开动真空泵使吸盘空腔形成一定的真空度, 于是, 拌合物的多余水从常压区向吸盘内负压区流动, 并不断蒸发, 进而以气和水的形式经真空管路被吸走。试验证明, 在吸水的初始阶段, 吸水速率较高。随着水的吸出, 混凝土产生了一定量的压缩。在压缩过程中, 水以紊流向吸盘方向流动, 水的流动又带动拌合物中的

细小颗粒,使它们找到稳定位置。在水中不能悬浮的颗粒,紊流对它们产生了不均匀的切向力,使之产生一定程度的转动而找到稳定位置。随着继续吸水,混凝土产生了第二阶段的微量压缩,即毛细管径越来越小,对吸水产生的阻力越来越大。当所生的阻力与负压所造成的吸附力平衡时,吸水过程随之结束。此时混凝土已经形成了很好的物理强度。

2. 真空吸水软吸盘结构

混凝土真空吸水用吸盘,大体上有刚性吸盘、柔性软吸盘及刚柔结合型三种。具有同样的吸水率的软吸盘,其质量只相当于刚性吸盘的几十分之一,可在没有起吊设备的场合用手工操作。构造简单,加工制作容易,而且不用钢材。在现场浇注的混凝土施工中使用,就有特殊意义。

软吸盘由互相分离的三大独立部分组成,如图 10-185 所示。

①真空密闭覆盖层(以下简称密闭层),该层用软质薄壁不透气的材料制成,如薄橡胶板、挂胶纤维布、薄塑料人造革等,以质地柔软为好。其作用在于隔绝空气,周边密封,造成在吸盘空腔内形成真空的条件。密闭层由吸口与真空管路相通。

②空腔骨架层,由柔性单层或多层、四周透气透水性能良好的材料制成。它们是多层塑料窗纱、双层竹帘、双层铅丝网等。其中以双层铅丝网的效果最好,若代之以较粗直径的塑料网会收到更好的效果。该层的作用是支撑密闭层以形成吸盘空腔,造成在负压状态下通气走水的条件。

③过滤层,即过滤布,作用在于滤掉泥浆、吸出净水,可用尼龙布、尼龙绸、维棉布、士林布等。当吸盘吸水面积较大时,为保证吸盘内各处负压相差不大,可适当设置真空通道。最简单的办法是取一小条骨架层材料,将其卷成圈,敷设在密闭层内侧,以形成空间较大的通道。

3. 参数选择

(1) 吸盘的作业半径

由于吸盘的空腔是由厚度约 3mm 的柔性编织网支撑形成的,这层网状物对抽气吸水产生一些阻力,因而吸盘内空腔负压随作业半径的增加而减少。吸盘内真空与作业半径间的关系如图 10-186 所示。

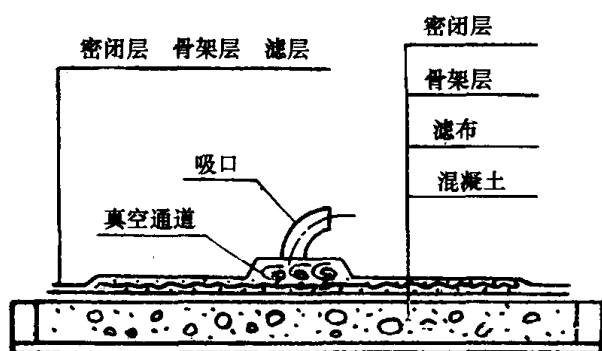


图 10-185 软吸盘构造示意图

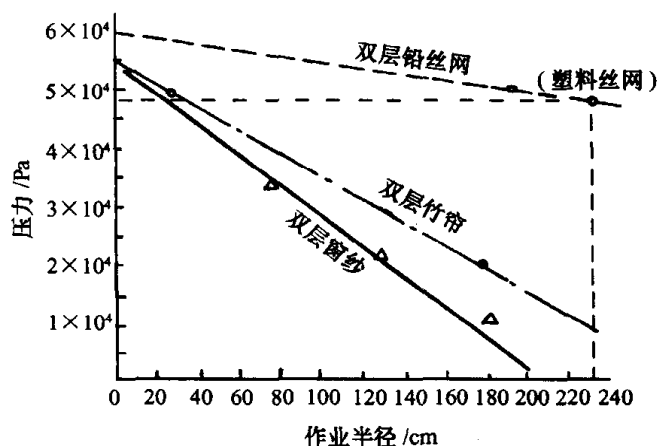


图 10-186 吸盘内真空与作业半径间的关系

由图 10-186 可见,用双层铅丝网(一层为 5mm × 5mm 至 10mm × 10mm 网眼;另一层为 2mm × 2mm 至 3mm × 3mm 网眼)或以双层直径相当的(丝径分别为 1.2mm 和 0.5mm)塑料

丝网做骨架层是比较好的。它们在作业半径为 2.4m 的条件下,吸盘内真空负压仍能维持不低于 $5 \times 10^4 \text{Pa}$,满足了吸水下限要求。

(2) 作业速度

在有效作业深度内,吸盘的作业速度为 1cm 厚混凝土,吸水时间 1.0min~1.5min。

(3) 吸水率

这是反映吸盘吸水效果的一个重要参数。它决定着混凝土的剩余水灰比的大小,并直接影响着处理后混凝土的各项物理力学性能。用八层窗纱做骨架层的吸盘,对 19mm 厚的混凝土试件作吸水处理,测得结果如图 10-187 所示。就 19cm 厚的试件而言,无论在哪个负压状态下,5min 吸水率已达到 25min 吸水率的 50%,而 20min 吸水率已达到 25min 吸水率的 90% 以上。再增加吸水时间,吸水率的增加已很小了。对 15cm 厚的试件吸水时,吸水率可达 20%;对 10cm 厚的试件吸水时,吸水率可达 20% 以上。

当改用双层铅丝网做骨架层的吸盘对 12cm 厚的试件吸水时,测得结果如图 10-188 所示。改用透气透水性能较好的骨架层材料,其吸水率也有显著提高。

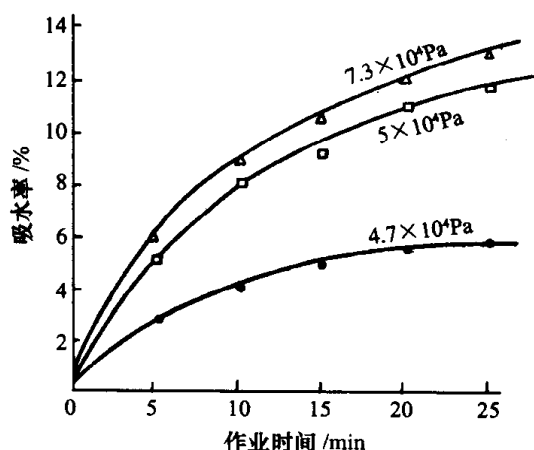


图 10-187 不同压力状态下吸水率同作业时间的关系

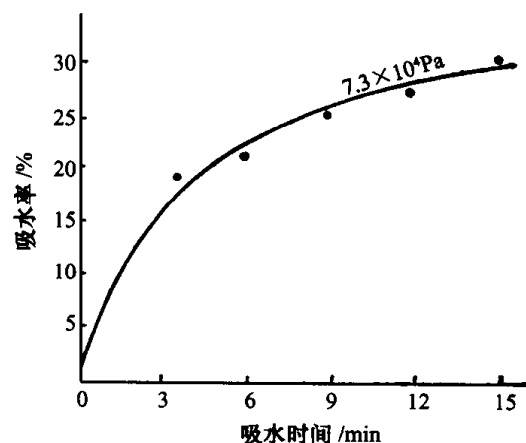


图 10-188 吸水率与吸水时间的关系

(4) 作业深度

对混凝土真空吸水,其作业深度不会随着压力的增加及作业时间的延长而无止境地加深。在不同条件下,存在着不同的有效作业深度。试验观察到单方水泥用量对作业深度有显著影响,随着水泥用量的增加作业深度逐渐减小。当单方用量超过 400kg 时,这一影响就更加明显。

按图 10-189 所示的装置,在 15cm×15cm、30cm 厚的试件上,对 200 号普通混凝土进行测试。在压力为 $7.3 \times 10^4 \text{Pa}$ 时,30cm 深处的压力变化见表 10-111。

表 10-111 作业深度测定结果

作业时间/min	5	10	15	20	25	30
压力/Pa	3.7×10^3	7×10^3	9.6×10^3	1×10^4	1.2×10^4	1.3×10^4
相邻时间压差/Pa	3.5×10^3	2.4×10^3	1.6×10^3	1.3×10^3	8×10^2	

试验表明,在 30cm 深处,吸水 30min 时,该点的压力才只有 $1.3 \times 10^4 \text{Pa}$,再延长时间也不会有多大增加,已接近了稳定状态。当压力低于 $1.3 \times 10^4 \text{Pa}$ 时,吸水作用几乎不会发生。因此 30cm 深处并非有效作业深度。当打开侧模,观察不同深度的软硬程度时,发现有效作业深

度不过 20cm,但此深度对混凝土作业已经足够了。

(5) 最优工作压力

吸水率同压力之间的关系曲线,如图 10-190 所示。

图 10-190 表明,当吸盘内压力在 $0 \sim 4.7 \times 10^4 \text{Pa}$ 内变化时,从吸水率的变化看到混凝土真空吸水作业存在着一个最优工作压力的问题,即所需压力下限不要低于 $6 \times 10^4 \text{Pa}$ 。当然在真空设备允许的前提下,工作压力用得高些更好。

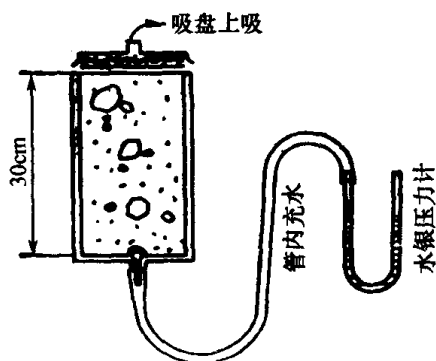


图 10-189 作业深度测定装置

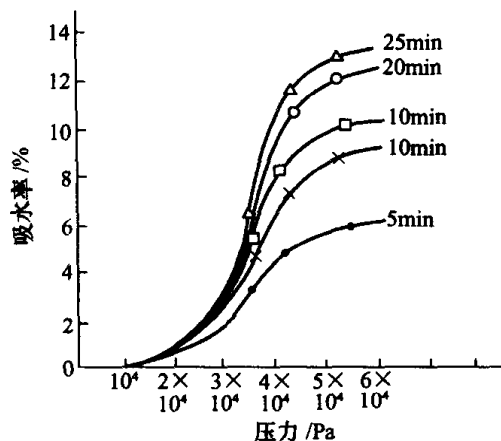


图 10-190 吸水率与压力之间的关系

十八、真空过滤

(一) 概述

所谓过滤,就是使滤布等多孔性过滤介质的两侧产生压力差,由过滤介质截留滤浆中的固体粒子,从而将液固两相分开。而真空过滤是利用过滤介质一侧的真空源与滤浆一侧的大气压之间的压力差(通常为 $4.9 \times 10^4 \text{Pa} \sim 6.68 \times 10^4 \text{Pa}$)进行过滤的。真空过滤的机理,多数属于滤饼过滤,个别属于深层过滤。用来实现真空过滤的是真空过滤机和其它附属装置。

真空过滤机分为连续式和间隙式两类。附属装置有:洗涤装置,目的是为了减少滤饼中的可溶性盐分;滤饼干燥装置,目的是为了减少非压缩性滤饼的湿含量;泵类,真空泵多采用水环真空泵和罗茨泵,水蒸气喷射泵也可作为真空源;吸收塔,如果吸入真空泵的空气中含有腐蚀性或毒性气体,则用填料塔、板式塔等将其吸收;此外还包括烟雾分离器、鼓风机和压缩机等。

(二) 真空过滤机

1. 多室转鼓真空过滤机

这类过滤机的共同特点是:转鼓浸以滤浆槽中旋转,转鼓外表面有过滤介质,可以连续过滤。转鼓的周围分隔成若干个过滤室,经各自的管线与装在转鼓主轴上的分配头相连接。分配头又同真空源和压缩空气源相连续,以便各滤室在回转过程中或与真空源相连接,或与压缩空气源相连通。通过转鼓的回转,各滤室连续地实现过滤、洗涤、干燥及卸饼。为了防止固体粒子沉降,过滤机上设置有搅拌装置。

根据滤饼剥离排出方式的不同,转鼓真空过滤机可分为以下几种类型。

(1) 刮刀卸料式转鼓真空过滤机

刮刀卸料式转鼓真空过滤机如图 10-191 所示。

当转鼓转至卸料区时,由于分配头的作用而开始向该区送压缩空气。在压缩空气反吹下,滤饼从滤布上剥离,并被刮刀刮落。空气反吹还有助于防止滤布堵塞。该机不适于卸粘性滤饼。对于浓度和粒度分布不能保持恒定的滤浆和沉降性快的滤浆,也不适用。此外,滤饼通气性好,容易从转鼓面上脱落,也不宜采用此机。由于利用刮刀卸滤饼,所以过滤面上至少要形成 6mm~10mm 厚的滤饼。由于用金属丝将滤布捆在转鼓上,以防反吹时隆起,所以要换滤布不方便。因为空气配管和滤液配管是兼用的,所以反吹时会将残留在配管里的滤液吹到滤饼上,从而增加了滤饼的湿含量。

(2) 绳索卸料式转鼓真空过滤机

绳索卸料式转鼓真空过滤机如图 10-192 所示。

该机用若干条无端绳索,按一定间隔绕在转鼓的部分过滤面上和导向辊上。所适用的滤浆,大致与刮刀卸料式转鼓真空过滤机所适用的滤浆相同。此外,还能卸除粘性滤饼。不适于容易引起滤布堵塞的滤浆和容易龟裂的滤浆。由于由绳索来卸料,所以厚度薄至 1.6mm 的滤饼也能卸除,不过,滤饼厚度最好在 5mm 以上。

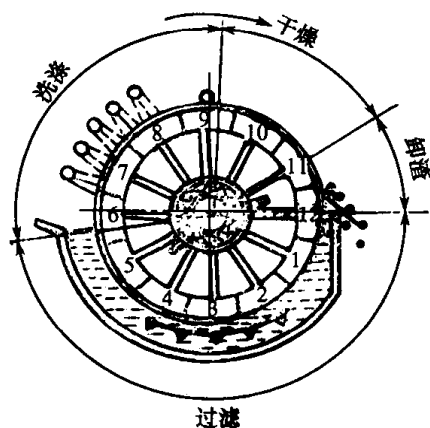


图 10-191 刮刀卸料式转鼓真空过滤机

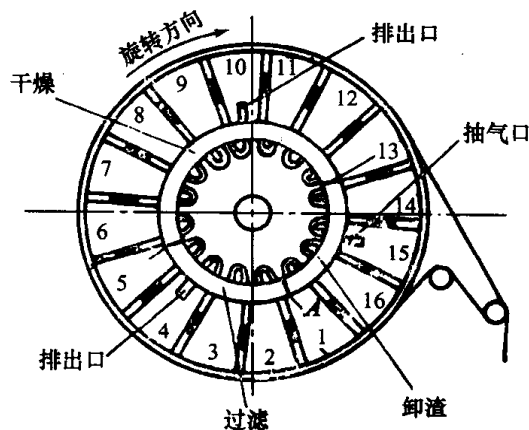


图 10-192 绳索卸料式转鼓真空过滤机

(3) 滤布行走卸料式转鼓真空过滤机

滤布行走卸料式转鼓真空过滤机如图 10-193 所示。

滤布呈无端状绕在部分转鼓面上和滤布导向辊以及张紧辊上。滤布由转鼓带动行走,并托着薄滤饼离开转鼓面,在滤布转向处卸掉滤饼。卸料的滤布,受到两侧喷嘴的洗涤。还有滤布防偏装置。该机适用于过滤易堵塞滤布的滤浆。因为滤饼是在滤布转向处卸掉的,该处辊子的曲率较大,所以厚度薄至 2mm 的滤饼也能卸掉。由于滤布不固定在转鼓上,所以容易更换。卸饼时无需反吹,也就没有滤饼增湿问题。不足之处是滤布洗涤水在排放前需要处理,且有少许滤浆会从滤布两端漏入转鼓内,影响滤液的澄清度。

(4) 辊子卸料式转鼓真空过滤机

辊子卸料式转鼓真空过滤机如图 10-194 所示。

在接近转鼓处,装有滤饼卷辊,其回转方向与转鼓相反。当转鼓表面上的滤饼接触到卷辊时,便被卷取,然后由刮刀从卷辊上刮下。即使薄到 1mm 的滤饼,也能被卸掉。该机适于过滤滤饼有粘性、过滤阻力大的滤浆。但是,滤布容易堵塞,厚度超过 5mm 的滤饼难以卸掉。

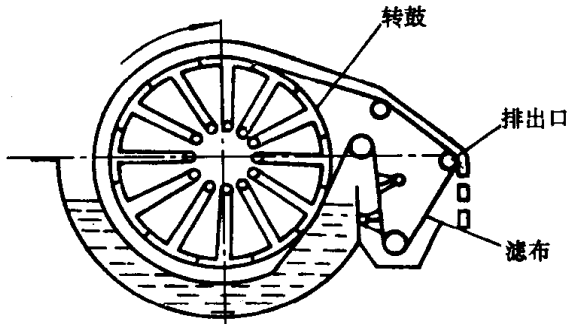


图 10-193 滤布行走卸料式转鼓真空过滤机

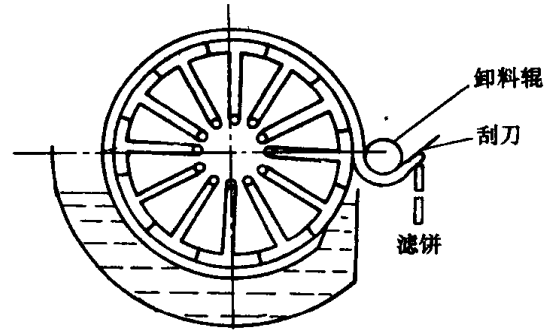


图 10-194 辊子卸料式转鼓真空过滤机

(5) 预涂层式转鼓真空过滤机

首先将硅藻土等助滤剂制备成浆液，然后用装有滤布的转鼓进行过滤，于是滤布上便形成了助滤剂预涂层，也就是过滤介质。因为正式过滤的滤饼是在预涂层表面上形成的，所以卸料时是用薄刮刀将滤饼连同一薄层预涂层都切掉。一般，预涂层的厚度为 40mm~90mm，若转鼓每转一周被切削掉 15 μ m~150 μ m 厚，则可连续工作半天至 1 周。当预涂层被切削得薄至一定程度时，便需要重新形成预涂层。用该机可获得相当澄清的滤液，适于过滤含固体量少至 1% 以下的滤浆，含有细微固体粒子的滤浆以及含胶质的滤浆。因为滤饼是与助滤剂混合排出的，所以该机不宜用在需要滤饼的场合。

2. 单室转鼓真空过滤机

单室转鼓真空过滤机如图 10-195 所示。

该机分为刮刀卸料式和滤布行走卸料式。转鼓内部不分隔成小滤室，全部处于真空状态。滤液经固定的空心轴排出。利用脉冲压缩空气的反吹，使滤布振动，以助于卸饼。由于反吹空气也是经空心轴吹入转鼓卸料区的，所以存在滤饼增湿问题，但却省去了分配头。

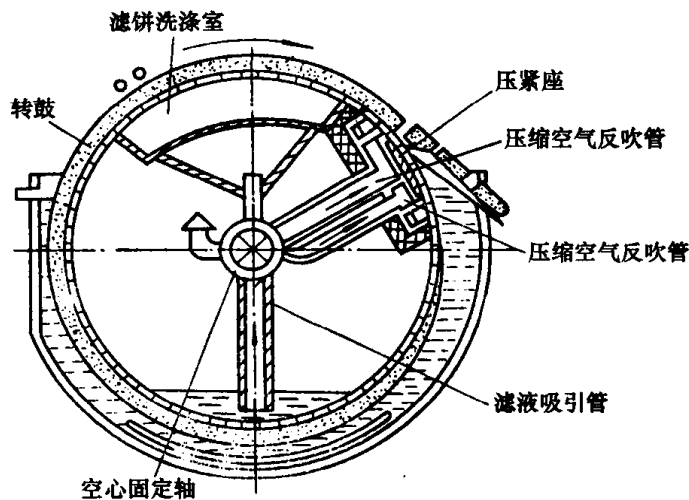


图 10-195 单室转鼓真空过滤机

厚度薄至 1mm 的滤饼也能剥离，滤布不被堵塞，寿命长。由于转鼓内部无配管，所以真空系统的压力损失小。同多室转鼓真空过滤机相比，该机的过滤能力大，但造价较高。

3. 内部给料式过滤机

内部给料式过滤机如图 10-196 所示。

在长度比直径短的圆筒内侧面设置滤布，圆筒还兼作滤浆槽。圆筒的一个端面为开口的环形，以便于检查过滤情况。滤浆从圆筒的内侧加入，并积存在下部。当一部分过滤面随着圆

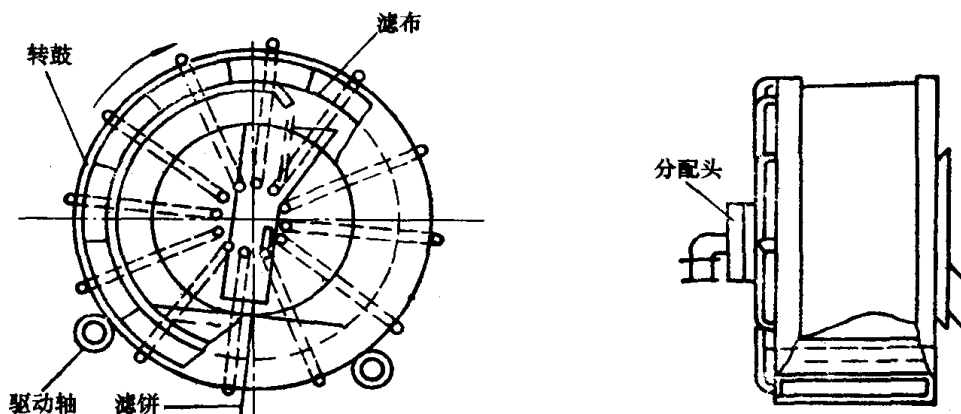


图 10-196 内部给料式过滤机

筒的旋转而进入滤浆液面时,便受到真空作用,从而形成滤饼。接着,滤饼转出液面,受到洗涤、干燥。在滤饼转至上位时,受到脉冲压缩空气的反吹而卸落到漏斗中。

4. 垂直回转圆盘真空过滤机

垂直回转圆盘真空过滤机如图 10-197 所示。

若干扇形滤叶垂直安装在空心面转轴上,形成一个圆盘。圆盘的下部浸在过滤槽中,边回转边过滤。滤布呈带状罩在扇形板上,形成了两侧过滤面。各滤叶经回转轴和分配头与真空系统和加压系统相连接。借助反吹使滤布鼓胀,以实现卸饼。有时在滤布鼓胀阶段用刮刀或者辊子卸除滤饼。

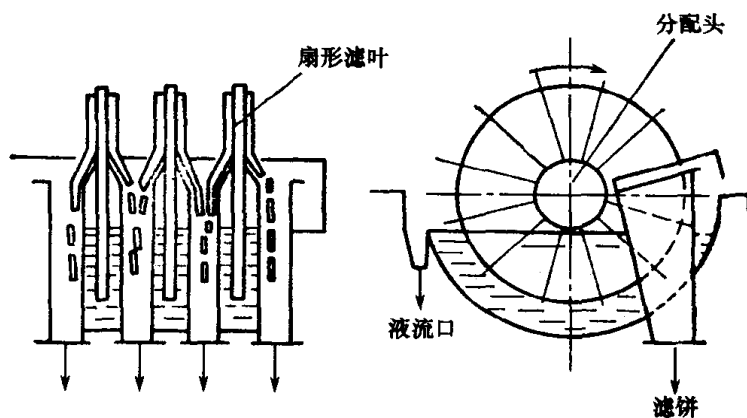


图 10-197 垂直回转圆盘真空过滤机

由于过滤面垂直,所以滤饼的洗涤效果差。凡能用刮刀卸料式转鼓过滤机过滤的滤浆,该机都适用。该机的优点是占地少,单位过滤面积造价低。

5. 水平型真空过滤机

在运行的水平过滤面上,连续进行过滤、洗涤、干燥、卸饼等操作,适于过滤沉降性快的粗粒子滤浆,尤其可进行逆流洗涤,洗涤效果好,节省水耗。该机有下列三种:

(1) 水平台型真空过滤机

水平台型真空过滤机如图 10-198 所示。

若干独立的扇形滤叶共同构成圆台型过滤面。圆台边回转,下面边抽真空,连续地完成过滤、洗涤和干燥。由螺旋输送机刮取并排出滤饼。为了保护滤布,卸料后过滤面上残留厚 3mm 左右的滤饼。残留的滤饼在运行到加料位置时,混入新加入的滤浆中。

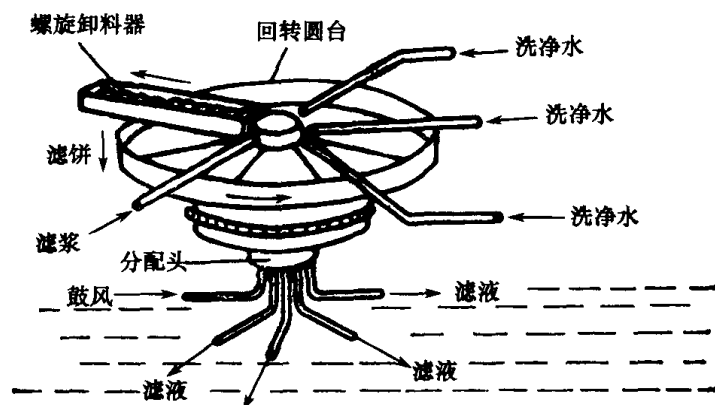


图 10-198 水平台型真空过滤机

(2) 水平回转翻盘型真空过滤机

水平回转翻盘型真空过滤机如图 10-199 所示。

若干独立的扇形平底滤室，水平配置在垂直轴的周围，并经管线与垂直轴相连接。各滤室的底部为过滤面，通过装在垂直轴上的分配头的作用，连续地进行过滤、洗涤、干燥和卸料等各项操作。卸料时，平底滤室要翻转 180°。

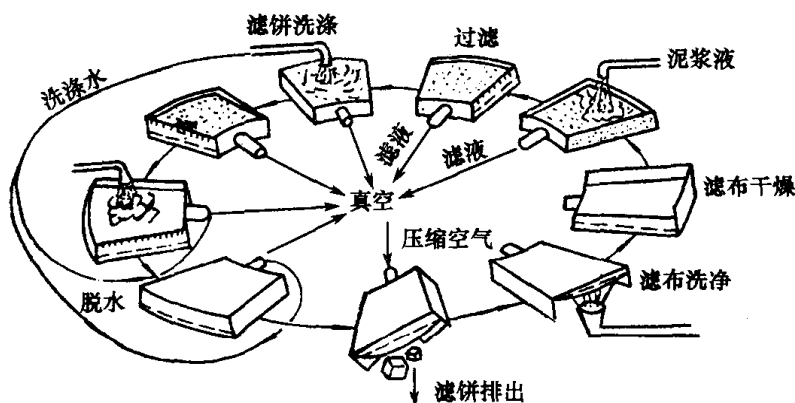


图 10-199 水平回转翻盘型真空过滤机

(3) 水平带型真空过滤机

该机与带式输送机有些相似。在无端橡胶带上装有无端滤布，橡胶带连同滤布在真空吸引箱上运行。橡胶带上有一些横向流液沟和纵向贯穿孔，液体透过滤布并经流液沟和贯穿孔进入真空吸引箱，然后排出机外。

滤浆被均匀地加到滤布带上，随着滤布带的运行而连续地受到过滤、洗涤和干燥。滤饼在滤布转向处卸掉。卸饼后，滤布离开橡胶带，并受到喷嘴的洗涤。

6. 滤布的选择

滤布的寿命和价格不仅决定着过滤机的运转费用，而且也影响到滤饼的剥离性、粒子的截留能力以及滤液的澄清度，在选择滤布时应全面考虑它的纤维材质、形状及织法以及耐腐蚀性等。纤维的材质有天然纤维、金属纤维及合成纤维，其形状有单纤维、长纤维和短纤维等。单纤维滤布上的滤饼易于剥落，适用于回收滤饼的场合；长纤维滤布的滤饼剥离性优于短纤维布，滤液的澄清度居于单纤维和短纤维滤布之间；短纤维滤布能截留细颗粒。

滤布的织法分平纹、缎纹和斜纹织及无纺布等。平纹滤布密实、强度好，可截留细小颗粒，滤液澄清，但其孔隙容易堵塞；斜纹滤布的孔隙大，不宜用于澄清过滤，但过滤阻力小，常用于泥浆的大量过滤；缎纹滤布的强度和滤饼的剥离性，介于平纹滤布和斜纹滤布之间。

十九、加速器真空系统

(一) 概述

加速器是把带电粒子加速到较高能量的装置。它是原子核及核工程研究不可少的工具,也是放射化学、放射生物学、放射医学、固体物理等基础研究不能少的手段,还可以作为工业照相、疾病诊断及治疗、活化分析、农产品和食品辐照处理等工作的设备。

加速器种类较多,按其工作原理分类,有静电加速器、高压倍加器、感应加速器、回旋加速器、稳相加速器、同步加速器、直线加速器、重离子加速器以及贮存加速器(对撞机)等。各种加速器尽管工作原理不同,但就其结构而言,都包含这样一些基本结构:真空室(或加速管)、离子源(或电子源)、真空系统、粒子聚焦及偏转系统、加速系统以及分离系统等。

现代加速器是一个复杂的工程,需多学科配合,其中真空条件是不可少的。加速器所需真空度取决于加速粒子运动路径长短。静电加速器真空度为 $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Pa}$;直线加速器为 $10^{-3} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$;回旋加速器为 $10^{-4} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$ 。贮存式加速器需要超高真空环境条件,意大利的电子-正电子贮存环的真空度为 10^{-7}Pa ;欧洲联合原子核研究中心的质子贮存环为 10^{-9}Pa ;美国布鲁克海文实验室长 2.5km 交叉环超导贮存加速器真空度为 10^{-10}Pa 。

(二) 高压加速器真空系统

图 10-200 是能量为 10MeV 的静电加速器真空系统原理图。加速管主泵为抽速 400L/s 的汞扩散泵,由于没有油蒸气,使加速管和离子源避免了污染。鉴于相同的理由,扩散泵的前级泵——油封机械泵进气口设有液氮冷阱,以防油蒸气进入扩散泵中。由于加速管较长,采用两端抽气。整个真空系统用 15 个真空机组抽气,各真空系统均可以用插板阀隔开来,进行单独检修。离子传输管道使用溅射离子泵抽气。真空度测量使用热偶规、电离规及冷阴极电离规。

图 10-201 为中子发生器真空系统原理图。图 10-202 为电子静电加速器真空系统原理图。

(三) 6MeV 串列加速器真空系统

在串联加速器中,采用平板型小孔径陶瓷—钛电极封接式加速管来提高加速器的电压梯度,从而对真空系统提出了比较严格的要求,希望系统中没有或者尽量减少碳氢化合物污染。此加速器在低能段加速负离子,实验表明,只有系统中真空度为 10^{-5}Pa 时,负重离子因残余气体引起的剥离损失才可小于 1%。为此,整个系统采用无油真空机组,极限真空可达 $6.6 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

加速器整个系统如图 10-203 所示。负离子自离子源出口处起,经过初聚焦透镜,双 30° 偏转磁铁、预加速管、导向器、四象限光阑及气阻管、 90° 偏转磁铁、缝隙仪、测束装置、单透镜等束流元件,进入低能加速管。通过高压头部气体剥离器后,转成正离子。再经过高压加速管、磁透镜、磁导向器、 90° 分析磁铁、开关磁铁以及一系列束流诊断和控制元件,到达靶室。

在开关磁铁后端,接有七根实验管道,全部管道总长约 100m,借助通径 150mm 气动闸阀把整个系统分隔成 13 个独立分系统,每个分系统都能独自进行抽气、测量及检修,而不影响相邻系统的运行。

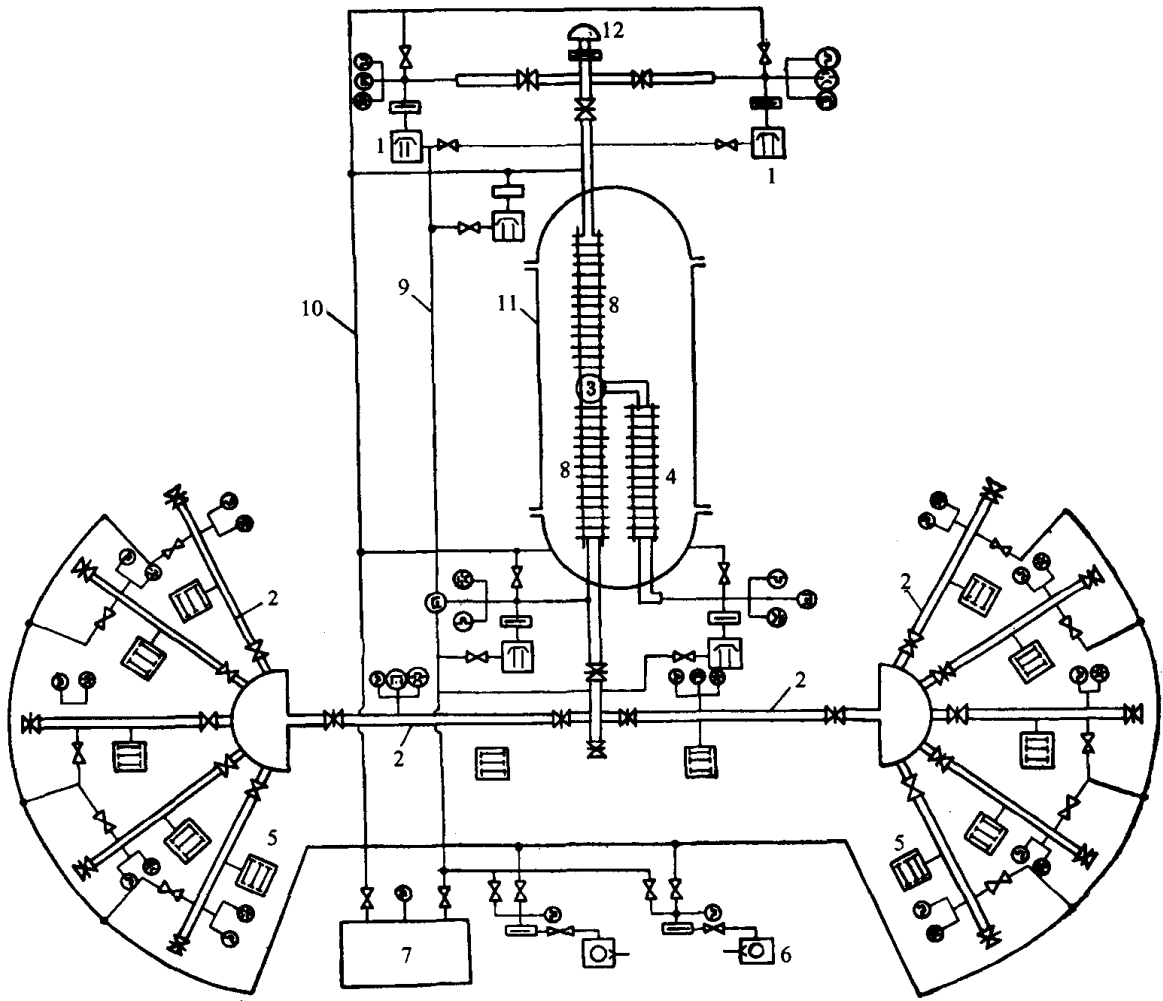


图 10-200 10MeV 静电加速器真空系统

1—汞扩散泵(抽速 400L/s); 2—离子传输管道; 3—气体靶; 4—辅助加速管; 5—溅射离子泵(抽速 100L/s);
6—油封机械泵(抽速 16L/s); 7—前级真空罐; 8—加速管; 9—前级真空总管道; 10—粗真空管道;
11—钢桶; 12—负离子注入器。

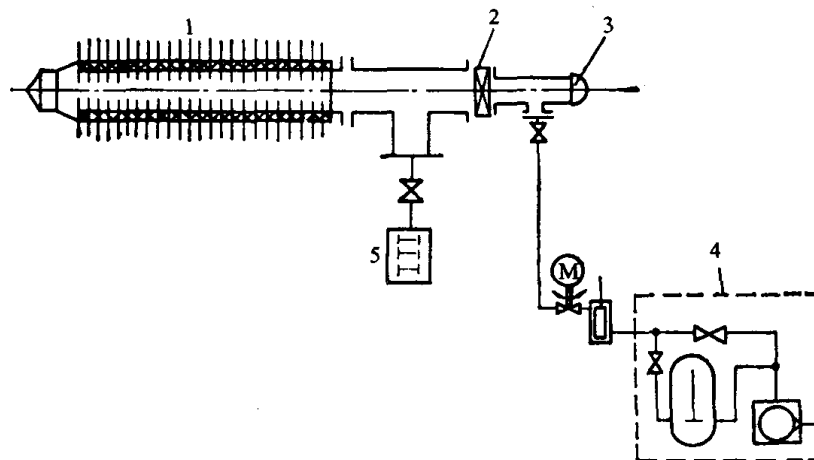


图 10-201 中子发生器真空系统

1—加速管; 2—闸阀; 3—靶; 4—罗茨泵机组(抽速 40L/s); 5—溅射离子泵(抽速 250L/s)。

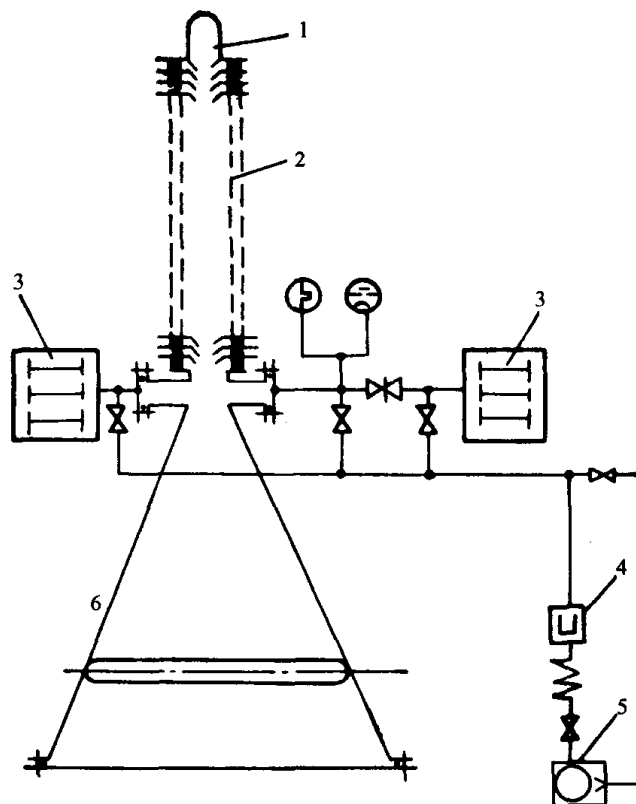


图 10-202 电子静电加速器真空系统

1—电子枪;2—加速管;3—溅射离子泵(抽速 100L/s);4—干燥器;5—油封机械泵(抽速 6L/s);6—靶室。

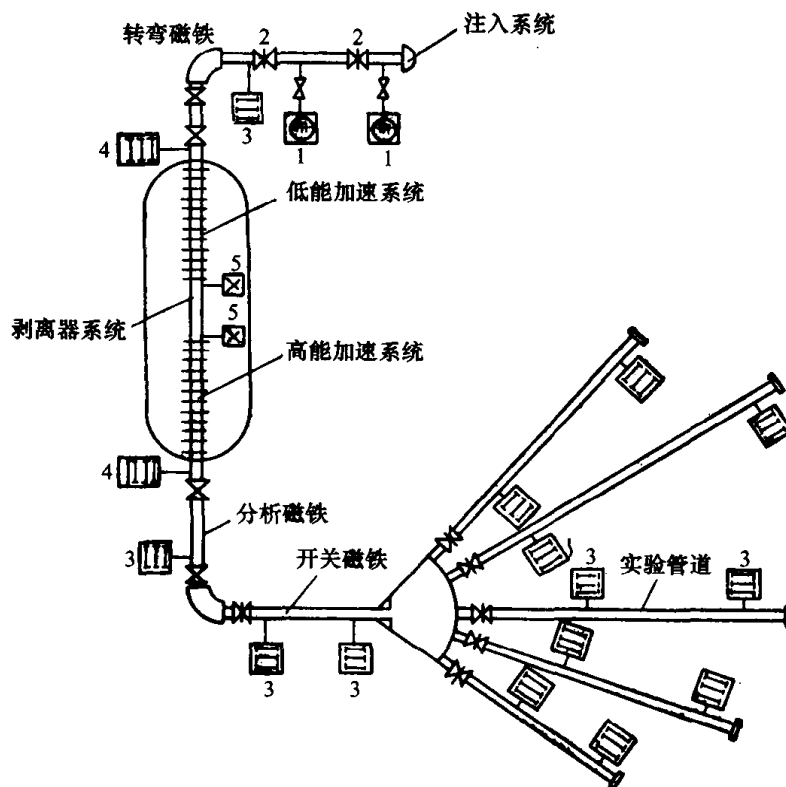


图 10-203 6MeV 串列加速器真空系统

1—涡轮分子泵(抽速 400L/s);2—超高真空闸阀;3—溅射离子泵(抽速 200L/s);
4—溅射离子泵(抽速 1000L/s);5—钛升华泵(抽速 140L/s)。

真空系统用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制成,并能经受 $200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 的烘烤。烘烤去气采用玻璃丝纤维包裹的电阻式带状加热器。加速管除了采用这种方法烘烤外,还可利用加速管段之间的光阑形加热器加热。

真空系统的粗抽采用油封式机械泵和分子筛冷阱串联,装在可移动的小车上,便于对不同部位进行粗抽。粗抽机组可将系统抽到 $6.6 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 。

(四) 高能同步加速器

1. 同步加速器真空室

设计同步加速器真空室的主要参数有:孔径、工作压力、抽气设备布局、辐射条件、主导磁场特性等。而这些原始数据是由加速器物理方案及技术经济效果统筹考虑来确定的。

同步加速器对真空室要求比较苛刻,有些要求还相互矛盾。通常对设计真空室提出的主要要求有:

①在磁铁间隙中设置真空室时,应该考虑对磁场干扰最小,一般不可超过中心磁场的 1%。所以,真空室的材料应该是非磁性的,并要有低的电导率。为使涡流引起的扰动场不超过允许值,真空室的金属部分应有良好的形状及尺寸以利于导电。

②真空室器壁有足够的导电性,以传走入射到壁上的粒子产生的静电荷,使表面电位近似等于地电位。

③真空室壁要薄,以保证充分利用磁铁间隙及减小涡流。

④器壁材料在强烈电磁辐射及微粒子辐射下出气率要小。

⑤器壁材料在粒子辐射下,机械性能、电学特性、磁特性要稳定。

⑥真空室工艺要简单,检修方便,造价要低。

满足上述要求最好是薄壁波纹管状真空室,波纹管材为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,或者电阻高的非磁性合金及铝材。波纹管壁厚、波高、波距取决于磁场特性。波形真空室可以用不同方法成型,如机械滚压、液压成型、焊接成型等。

波形真空室成功地用于能量为 7GeV 质子同步加速器上。此加速器真空室由 112 段处于磁铁间隙中的曲线节及相同数量直线节构成。大部分曲线节是椭圆形截面,轴长分别为 114mm 及 84mm,两端焊上法兰,总长约 2m。除椭圆管外,还有圆管,是用 0.3mm 不锈钢板滚压成型,再用接触焊焊制。此波纹管波高 3mm,波距 7mm。

为了消除波纹管的机械应力,曲线节在真空炉中加热到 800°C ,进行真空退火。

相似结构的真空室还用于能量 76GeV 的质子同步加速器中。加速器真空室共有 120 段,每段长约 11m。曲线节是椭圆形截面焊接波纹管,轴长分别为 195mm 及 115mm,波高为 5.8mm,波距为 10.8mm,壁厚为 0.4mm,材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

同步加速器椭圆形截面真空室,在静载荷(大气压、安装载荷)和动载荷(电磁铁振动)联合作用下,材料产生复杂的应力,又要受到涡流加热。因而,建造这种薄壁真空室时,必须仔细核算真空室壁的持久强度及稳定性。

在电子同步加速器中,加速循环频率变为 10Hz。在此条件下,由于磁场畸变及真空室受到涡流加热,甚至采用波纹管状真空室也很困难了。因此,这类加速器常采用内表面为金属的电介质材料真空室。苏联 EPΦИ 电子同步加速器便采用了这类材料。加速器每段由 48 个曲线节构成,其截面为椭圆形,轴长分别为 120mm 及 42mm,长为 380mm。曲线节里布有金属骨架,并有径向切口,口宽为 0.3mm~0.5mm,节距为 12mm,骨架壁厚 1.5mm。切口尺寸及位

置的选择需考虑对磁场影响。金属骨架的外面是环氧树脂粘接的玻璃纤维层,此层是在专用设备上,在 $150^{\circ}\text{C} \sim 160^{\circ}\text{C}$ 温度下,经 28h 加热压制而成的。覆盖层 1mm 厚便可以满足当时气密性要求。但是真空室运转了四年,发现气密性变差,改为氧化铝陶瓷材料。陶瓷成分为 97% Al_2O_3 , 1.5% SiO_2 , 以及少量的 MnO 、 MgO 、 TiO_2 。每个曲线节长 350mm,两端封接铜镍合金管,再用等离子体焊制成大的曲线节,每节长 3700mm。陶瓷内壁涂有金属层,电阻约 40Ω ,此电阻兼做电阻式加热器,用于烘烤。真空室可拆卸部分,用截面直径 2mm 铝丝密封。

同步加速器真空室很长,制造时需要分为若干段,分别时应考虑抽气机组的布置,以改善真空室中的压力分布。有的真空室使用嵌入式溅射离子泵,可以得到每米 100L/s 的抽速。这样,既利用了磁极的边缘磁场,又改善了压力分布。

电子贮存环(即高能电子同步加速器)由于存在较强的同步辐射,高通量光子打到真空室壁上,能量密度高达 $10\text{kW}/\text{cm}^2$ 。因而,真空室必须采用水冷却,把热量带走。此外,同步辐射还会使真空室壁产生激发解吸,比通常的热解吸高得多。如束流在真空室回旋时,系统的压力可升高三个数量级。

在大型电子贮存环中,有时瞬时束流高达 2000A,这种高强束流在真空室截面变化处,如波纹管、法兰等可能产生激发式高频寄生损失,将导致来流不稳定及真空元件过热。为此电子贮存环的真空室不能设计成不规则或有台阶的。真空室截面变化处要有良好的水冷。

2. 19GeV 电子—正电子贮存环

西德 PETRA 装置为能量为 19GeV 电子—正电子贮存环,1978 年夏季开始投入使用。加速器真空室周长 2300m,用闸阀分为 30 段,每段长约 70m。此长度由加速器几何尺寸、建造费用、排气速度、检漏方便诸因素来确定。

闸阀用氟橡胶密封,能耐 150°C 的烘烤。结构设计要考虑减少高频寄生损失问题。

标准真空室每段长 7.2m,其中约有 5.3m 处于转弯磁场中。真空室中设有嵌入式溅射离子泵,可以使真空室每米得到 110L/s 的抽速。为使溅射离子泵启动,每段装有一台涡轮分子泵。标准段真空室总长约 1800m,材料为 AlMgSi0.5 型铝合金,用挤压方法成型。

系统的低真空测量用热传导真空计、超高真空用溅射离子泵放电电流来监视。为了分析残余气体成分,每段上均装在四极质谱计。

3. NAL 质子同步加速器真空系统

美国国立加速器实验室(简称 NAL)质子同步加速器能量为 500GeV,是现代最大的加速器。加速器直径为 200m,椭圆形真空室,口径为 $125\text{mm} \times 50\text{mm}$,材料为不锈钢,壁厚为 1.27mm。真空室主泵是三极型溅射离子泵,抽速为 30L/s。每隔 8m 布置一个泵,室中极限真空可达 $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。溅射离子泵启动用抽速为 600L/s 的风冷油扩散泵。加速器环形真空室装有 24 只氟橡胶密封闸阀,用于系统检修时分段隔离真空室。真空室放气时充入干燥氮气,再启动时,3h 可以从 10^5Pa 抽到 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$,24h 可抽到 $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。

4. CERN 质子交叉贮存环真空系统

欧洲核子研究中心(简称 CERN)的交叉贮存环(ISR)是质子对撞机,环中贮存极限电流为 27A。此装置有两个环形真空室,两环为“8”字形,环直径约 300m。在环中回旋的质子,要求在 24h 内几乎没有什么损失,故要求真空度较高。原设计要求真空度为 10^{-7}Pa ,但从目前实验结果来看,真空度必须高于 $1 \times 10^{-8}\text{Pa}$,否则不仅贮存时间缩短,质子流强也受到限制。

真空室截面为椭圆形,轴长分别为 160mm 及 55mm,每个环周长约 1km。真空室材料为不锈钢,壁厚为 2mm。不锈钢板材,放在真空炉中加热到 900°C 除气 2h,可以减少氢在不锈钢

中的含量。用这种不锈钢板制做的真空室,在 $150^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 2h 后,氢的出气率为 $1.3\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{cm}^2\cdot\text{s} \sim 2.6 \times 10^{-11}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$,比没处理的不锈钢小一个数量级。真空室安装前在 300°C 温度下分段检漏,因为在热应力作用下,易发现漏孔。

真空室截面有变化的地方,将会形成波导和谐振腔,产生不希望的振荡,使束产生波动。为抑制这种振荡,在真空室各临界点上装有电阻器。电阻器是用直径 30mm,长 80mm \sim 200mm 的瓷管在真空中蒸镀镍铬合金制成的,装上之后,使束的贮存时间显著增大。在设计真空室时,还应考虑到束流有时可能突然打到器壁上,使壁过热而损坏,需要设置防扩装置。

真空系统抽气选用了 300 只三极型溅射离子泵做主泵,为了提高真空度又设置了 500 个钛升华泵。溅射离子泵的预抽选用了 70 个抽速 70L/s 的涡轮分子泵机组,在环中八处束交叉点还配有抽速 $2 \times 10^4\text{L}/\text{s}$ 的低温泵及钛升华泵,升华泵可以直接向真空室器壁蒸发钛,几个月内使此处压力保持 $1 \times 10^{-9}\text{Pa}$ 。真空度测量用 500 台调制 B-A 计,安装了 36 个质谱计用于残余气体成分分析。

为了检修系统,用 40 个气动闸板阀将真空室每隔 70m 分成一段。阀板用钛皮来密封,阀开闭 500 次,仍有良好的密封性。

贮存环初期运转中,当束流增加到一定值时,出现过真空度急剧变坏,使贮存束流迅速下降的现象。原因是束流与残余气体碰撞产生的离子打到器壁上,使吸附在器壁上的气体分子激发解吸,真空度变坏;进而产生更多的离子,打出更多的气体,造成了“雪崩”过程。质谱分析表明,解吸的气体中有 40% 的氢、40% 的二氧化碳、10% 的水蒸气及 10% 的碳化合物。后来增加了钛升华泵及改进了系统烘烤过程,使真空度提高到 $1 \times 10^{-9}\text{Pa}$,再没有发生过这种现象。

对撞机的贮存环中不仅要求具备超高真空的环境条件,而且还要消除质子势阱中的电子,防止束流变为中性,影响贮存环中压力的稳定性。实践已证明,质子势阱中的电子可以用电极清除方法消除。此外捕获电子的绝缘材料产生的 CaO 及 SiO_2 尘粒,也会影响环中压力的稳定性,也必须采取一定的手段予以清除。

5. 具有夹层真空室的质子同步加速器

此加速器是能量为 7GeV,注入器能量为 15MeV 的直线加速器,如图 10-204 所示。主加速器真空室平均直径为 48m,真空室分为八段,每段长约 15m,其截面为矩形 $1\text{m} \times 0.25\text{m}$ 。环形真空室处于截面为 C 型的磁铁之中,磁铁供电频率为 $1.4\text{MHz} \sim 8\text{MHz}$ 。

直线加速器真空室长 14m,截面为半圆形,直径为 2.5m,容积为 70m^3 ,表面积约 400m^2 ,各密封处采用橡胶 O 圈密封。真空室总气体量为 $3.3 \times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$,用四套汞扩散泵抽气,泵口有水冷挡板,泵的抽速为 2000L/s。汞扩散泵的前级选用抽速为 110L/s 的油封机械泵。为防止油蒸气进到汞扩散泵中,两泵之间设有 -50°C 的冷阱。

考虑到交变磁场及辐射的影响,主加速器真空室选用环氧树脂—玻璃丝材料。此种材料机械强度不高,难以承受大气压,用它做内室时,需要用金属材料做成外室套在外面,使内室和磁铁均处于外室之中。内外室之间用油封机械泵抽气,夹层中的真空度高于 133Pa。内真空室用 40 台口径为 60cm 的汞扩散泵抽气,每台抽速为 5000L/s。前级用油增压泵,为使油蒸气不进入汞扩散泵中,使用了 -20°C 的冷冻挡板。真空室总容积为 10^6L ,真空度可达 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

6. 北京质子同步加速器真空系统

我国北京高能物理实验中心建造了一台能量为 50GeV 的质子同步加速器,束流强度 1×10^{13} 粒子/脉冲;循环周期 4s \sim 5s;平均半径 215m。

此装置由四台加速器组成:

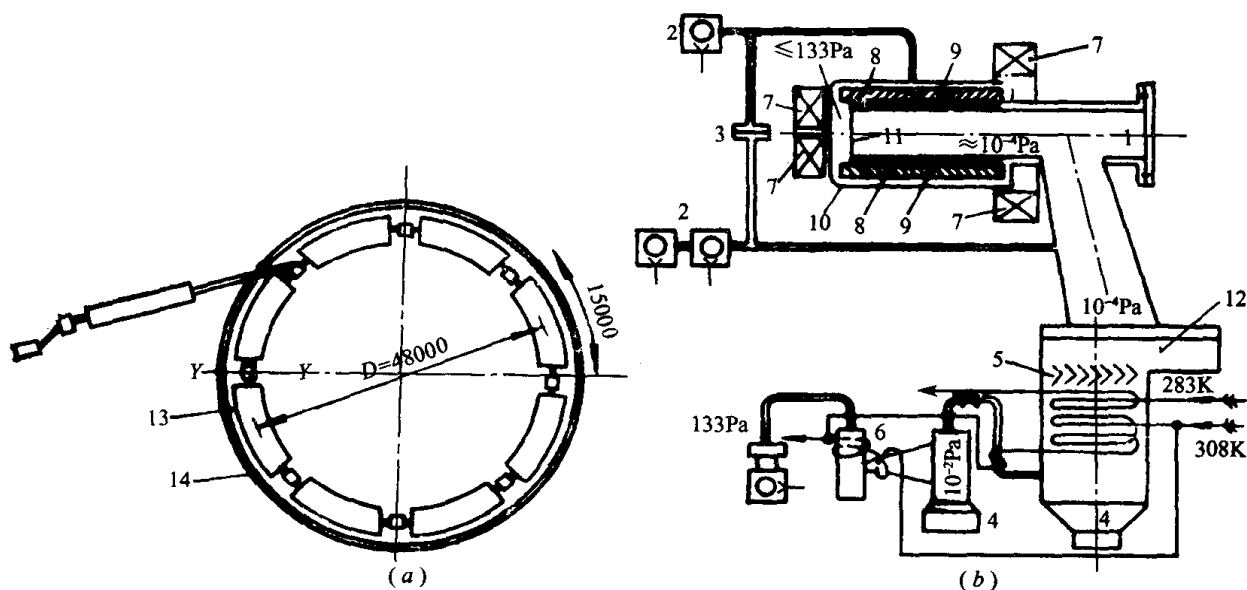


图 10-204 7GeV 质子同步加速器原理图

(a)注入器及环形加速器;(b)一个抽气单元真空系统原理图。

1—真空室;2—油封机械泵;3—保护膜片;4—汞扩散泵;5—挡板;6—增压泵;7—电磁铁线圈;

8—磁极;9—高频线圈;10—外室;11—内室;12—阀门;13—环形真空室弓形节;14—真空室。

①预注入器 是能量为 750keV 的高压倍加器,采用负氢离子源注入,经由高梯度加速管加速。重复频率为 12.5 次/s 脉冲。所需真空度为 6.6×10^{-3} Pa,采用涡轮分子泵抽气机组抽气。

②直线加速器 能量为 93MeV,总长 60m。由注入器注入的质子在高频场作用下加速。所需真空度为 10^{-5}Pa ,主泵采用二极加钽型溅射离子泵,预抽选用涡轮分子泵机组。

③增强型 是一台快循环型同步加速器,能量为 2GeV,束流强度 2×10^{12} 质子/脉冲。所需真空度为 6.6×10^{-5} Pa,主泵用二极加钼型溅射离子泵,预抽选用涡轮分子机组。

④主环 这是一台分离磁铁的同步加速器。由 180 块弯转磁铁和 120 块聚焦磁铁组成一个周长为 1.35km 的环。用 28 个高频加速站对由增强器注入的质子进一步加速。所需真空度为 4×10^{-5} Pa, 选用溅射离子泵及二极加钼型溅射离子泵做主泵, 以涡轮分子泵作预抽。

整个加速器是一个庞大的真空系统,总长约 2km,同时运行的真空设备包括真空泵、阀门、真空计等,约有数百台。

7.2GeV 增强器真空系统

此加速器是强聚焦快脉冲质子同步加速器。用来作为能量为 50GeV 的北京质子同步加速器的注入器,其前级设有 93MeV 的质子直线加速器。

此装置真空系统原理如图 10-205 所示,真空室为环型,平均半径为 22.5m,周长 140.4m,共有 16 个磁铁周期,每个周期长 8.7m,包含聚焦及散焦磁铁,长短直线节。全环由全金属闸阀分为六个真空区段,每个区段配有真空抽气机组与测量仪器。所需平均真空度为 $6.6 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

(五) 回旋加速器真空系统

回旋加速器所要求的真空度通常为 $10^{-3}\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。真空室中主要气体负荷是离子源泄漏气体及器壁出气。

现代回旋加速器抽气系统采用混合抽气,真空室中的气体负荷较大,用抽速大的油扩散泵抽气,束流输送系统气体负荷小,抽气机组采用抽速较小的溅射离子泵或涡轮分子泵。图 10-206 中,苏联 Y-240 型回旋加速器就采用了混合抽气手段。加速器磁极直径 240mm,

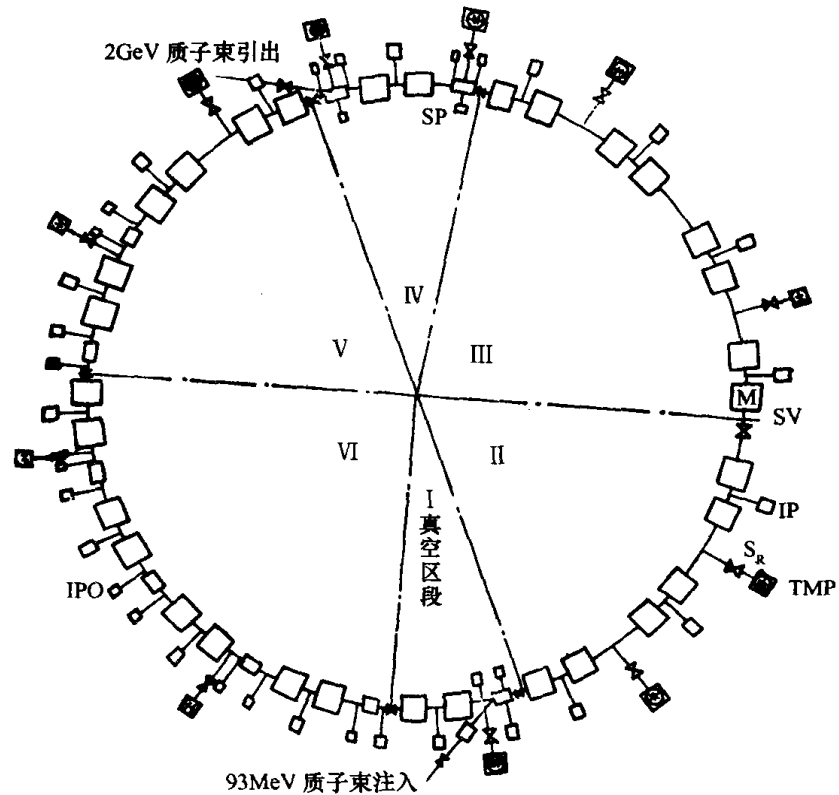


图 10-205 2GeV 增强器真空系统原理图

M—磁铁;TMP—涡轮分子泵机组(抽速 400L/s);IP—溅射离子泵;IPO—附加溅射离子泵;
SP—附加钛升华泵(抽速 1000L/s);SV—区段闸阀($D_N=150$);RY—二次阀($D_N=100$)。

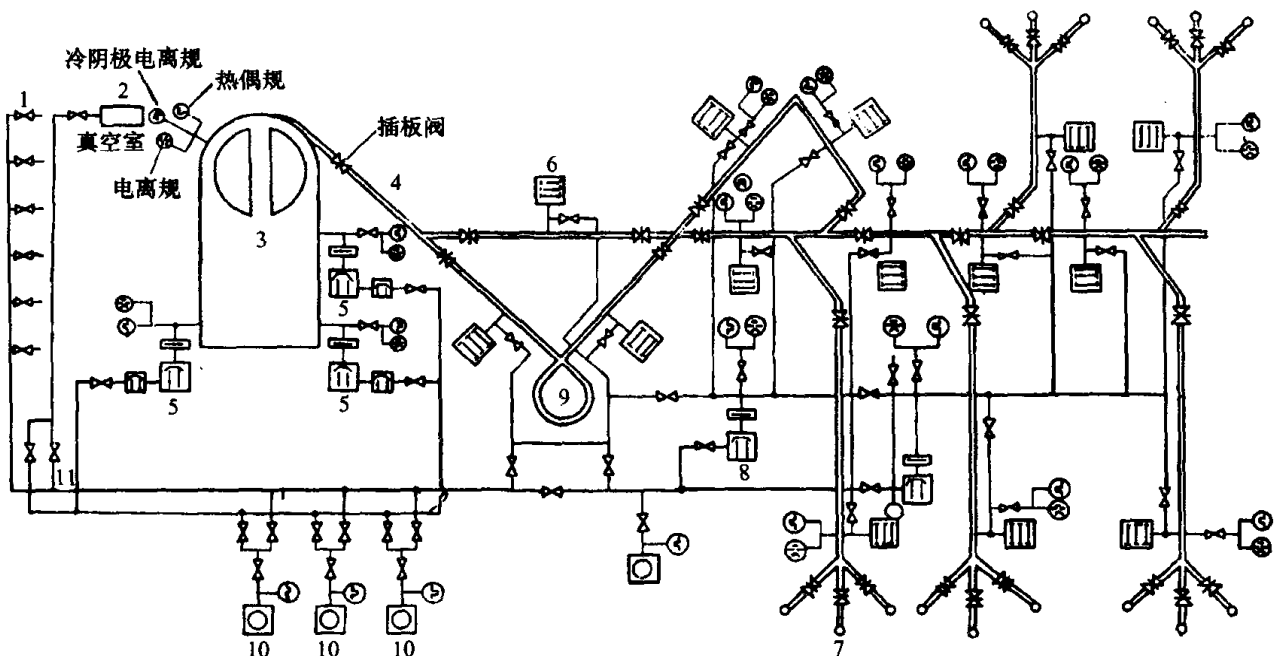


图 10-206 Y-240 型回旋加速器真空系统原理图

1—离子源供气及取样组合阀;2—前级真空室;3—真空室;4—离子传输管道;5—抽速为 2500L/s 的扩散泵机组;
6—溅射离子泵(抽速 300L/s);7—靶管道;8—抽速 200L/s 的扩散泵机组;9—单色器;
10—油封机械泵(抽速 45L/s);11—前级真空管路。

真空室用三台串联扩散泵机组作主抽泵,每台抽速为 2500L/s,极限真空为 6.6×10^{-5} Pa。

这类加速器能量最高的是苏联 ТЕТЦИНСКИЙ 同步回旋加速器,能量为 1GeV,磁极直径 6.85m,真空室容积 35m³,气体负荷为 5.3Pa·L/s。

加速器采用两个磁极作为真空室上下顶盖,盖厚达 300mm,磁极间隙为 500mm。真空室侧壁用不锈钢板制成,为保证壁的强度要求,壁之间装有可拆的钢柱和铝合金条,这种结构可以减轻真空室质量。

真空室用六台油扩散泵抽气,总的有效抽速为 4×10^4 L/s,加速器在工作状态下,真空度为 4Pa~ 5.3×10^{-4} Pa。为了防止油进入真空室中,扩散泵入口设有自动补给液氮的冷阱。

我国制造了磁极直径为 1.2m 的回旋加速器,电磁铁用 40mm 低碳钢制造,重 120t。励磁绕组铜重 7.5t,励磁功率约 100kW。真空室顶盖厚 72.5mm,上下顶盖间的空气隙高 170mm,垫补线圈用的空气气隙为 15mm。D 形电极间加速电压峰值约 760kV,电极高度 86mm。加速粒子最终半径为 525mm,能把氦核加速到 13.5MeV, α 粒子加速到约 30MeV。真空室采用油扩散泵机组抽气。

二十、受控核聚变装置

(一) 概述

受控核聚变装置是利用轻原子的聚变反应来获得巨大能量的装置。反应所用燃料是氢同位素氘(D)和氚(TT)。实现 D-D 反应,达到点火条件为

$$\begin{aligned} T &> 2 \times 10^8 \text{ K} \\ n\tau &> 10^{16} \text{ s/cm}^3 \end{aligned}$$

而 D-T 反应点火条件为

$$\begin{aligned} T &> 3 \times 10^7 \text{ K} \\ n\tau &> 10^{14} \text{ s/cm}^3 \end{aligned}$$

这里 T 是反应粒子温度; n 是反应粒子密度; τ 为能量约束时间。由点火条件可见,实现 D-T 反应较 D-D 反应低两个数量级,将来最先应用的将是 D-T 反应。

(二) 受控核聚变装置真空环境特点

受控核聚变装置中,大部分注入气体不参加等离子体储存过程,需用抽速非常大的真空泵。在 JET 装置中等离子体体积 150m³,真空室的体积 190m³,装置的中性注入器配置了抽速 9×10^4 L/s 的冷凝泵,而实验性功率堆需要抽速高达每秒数百万升的大型真空泵。

装置要求清洁超高真空条件。早期托卡马克装置采用油真空系统,得到等离子体参数较低。现在多采用无油抽气手段,并且各活动连结使用金属密封,可获得 10^{-7} Pa 的清洁超高真空。托克马克装置要求运行时工作压力为 10^{-1} Pa~ 10^{-3} Pa,磁压缩型装置为 10Pa~ 10^{-1} Pa。因而要求抽气设备能排走大量氢负载,同时需要宽量程真空计,放电时产生的高能等离子体与器壁相互作用,使器壁解吸大量杂质气体进入等离子体中,使辐射损失增大,影响反应能量,同时加速器壁材损失,降低反应堆寿命。

受控聚变装置真空系统必须考虑电磁场的影响。真空室的设计除考虑磁场的渗透影响外,还要考虑在磁场作用下产生的应力。选用溅射离子泵,需要考虑泵磁场对电磁场的影响。

装置对真空测量也有特殊要求,即要能快速反应,测量压强高,又要能防磁。

装置的真空检漏与一般真空设备不同,由于有强烈放射性,装置不易接近。为此,需要遥控检漏。装置中使用的氦与氩质量差不多,使用氦质谱检漏仪本底噪声高。需采用其它示踪气体,也可以用四极质谱仪检漏。

(三) 真空室

受控核聚变装置的真空室(即反应室)是反应堆的核心。其结构有单层和双层的。早期托卡马克装置为了获得超高真空,采用双层真空室,在内外真空室间有保护真空。使内真空室不受大气压力,这种结构很复杂。后来发现单层也能保证超高真空,于是多采用单层结构,使真空室大为简化。但有些装置又采用双层真空室。原因是夹层真空除了起保护真空作用外,还可以用于通过气流对内真空室加热,冷却及减少氦污染。为避免因外真空室漏入大气、压环内真空室,内外室之间必须设有安全保护装置。

托卡马克装置真空室为环形,为使磁场能渗透进去,在环向必须有很大的电阻。可以用两种方法解决:一种是利用陶瓷环,但这种上米直径的陶瓷环成型、烧制、封接都很困难;另一种是采用波纹管,此种结构能抗大气压力又易安装,一般是一个波一个波焊制而成。

真空室材料要有良好的真空性能、机械性能及耐辐射性能。要求有低的磁导率($\mu \leq 1.004$)、高的抗弯强度($\sigma \geq 4 \times 10^4 \text{MPa}$),而延伸率在 40% 以上;较高的电阻率($\rho \geq 74 \mu\Omega \cdot \text{cm}$);低的出气率 [$q \leq 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$] 以及良好的焊接性能。一般选用无磁不锈钢或镍铬合金钢。对于磁压缩和高频加热装置,由于磁场渗透的要求,一般采用非金属真空室,用氧化铝或玻璃。在未来反应堆中,引人注目的材料有铌、钼、钒、碳化硅及石墨等,但目前还未到应用阶段。

内真空室要能承受高温烘烤。托卡马克装置一般用欧姆变压器绕组加热真空室,温度为 $450^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 。

真空室制造过程中,室内的元件要求用化学去油和超声波清洗,零件运输和装配时要严格遵守真空卫生。大型真空室常用的清洗方法有两种:一种是喷砂处理,超声波去油、氟里昂蒸气去油;另一种方法是用过氯乙烯蒸气去油,超声波清洗。

装置的器壁在每次进行核反应实验之前需进行放电清洗或辉光放电处理。放电清洗已在许多托卡马克装置上取得了明显效果(清除器壁的碳和氧)。PLT 装置用低功率放电清洗,放电电流为 $2\text{kA} \sim 10\text{kA}$,器壁功率约 $0.05\text{W}/\text{cm}^2$,电子温度 $2\text{eV} \sim 5\text{eV}$,经 10^4 次放电后,使氧杂质降低到 1% 左右。

PDX 装置采用氢辉光放电清洗,氢压为 4Pa ,流量约 $1.3 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$,经过 120h 放电处理,从真空室表面清除碳原子 1.9×10^{23} 个,氧原子 2.4×10^{22} 个。

真空室器壁上蒸发上一层钛吸气膜,能大大降低等离子体中杂质含量。普林斯顿大学在 ATC 装置上,首先采用了伸缩式钛升华器,钛球伸入真空室,一次蒸发可使器壁覆盖 25%,将本底真空提高一个数量级,蒸发后升华器仍缩回原处。器壁存在着吸气层,在放电过程中,不仅使氧杂质减少,而且钛膜起保护器壁作用,使器壁材料溅射减小,进入等离子体中的杂质亦随之降低了。

托卡马克装置采用磁偏滤器,是减少等离子体中杂质含量的有效方法。通过偏滤线圈作用,使杂质含量较大的等离子体边缘壳层沿着偏滤磁力线进入净化室,带电的杂质粒子在中性化板上,中和成中性粒子,被安装在净化室中的大抽速吸气泵抽走。通常使用钛升华泵及锆—

铝吸气剂泵。

(四) 托卡马克装置

图 10-207 为托卡马克装置简图,装置主要参数有:环直径约 2m,等离子体直径 0.4m,等离子体电流 0.4MA。主要部件有欧姆变压器、主磁场线圈及真空室。这是早期设计的装置,选用双层真空室结构。内真空室由 16 节内径 500mm、厚 0.3mm~0.5mm 薄壁波纹管组成,波纹管之间有刚性不锈钢环吸收电磁力。通过两个抽气口连结两套以分子泵为主泵的超高真空机组,构成超高真空系统。要求内真空室本底压力不高于 1×10^{-7} Pa。外真空室由 4 段 5cm 铜板成形,通过抽气口连接两套扩散泵机组,构成高真空系统,室中压强不高于 5×10^{-4} Pa。

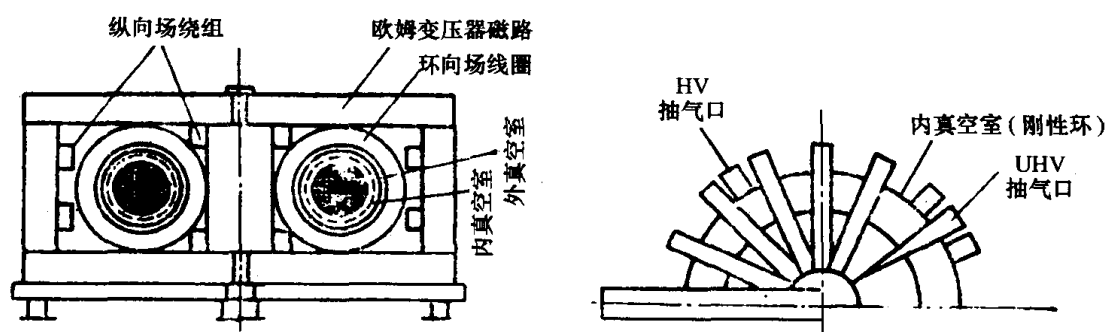


图 10-207 托卡马克装置简图

放电前,通过毫秒量级的脉冲送气阀,将高纯度中性气体 H_2 、 D_2 等注入内真空室。充气压力 10^{-1} Pa~ 10^{-3} Pa。在欧姆变压器绕组中,通过脉冲电流,使注入气体电离,并感应一个强大的次级电流——等离子体电流。主磁场线圈提供的强磁场产生一个相当大(10^7 Pa)的磁压力,将等离子体约束在一定范围内。欧姆加热可使等离子体温度升高至 10^7 K,在横切磁场方向将 20keV~150keV 的高速中性束注入,可对等离子体进行二次加热至 7keV。为达到这样高的等离子体温度,要求真空室中杂质气体分压不大于 6.6×10^{-7} Pa,注入气体杂质浓度不大于 1×10^{-6} 。

图 10-208 为某托卡马克装置真空系统原理图。内真空室用两台超高真空机组,外真空室用高真空机组。

超高真空机组以涡轮分子泵为主泵,泵口径为 300mm,抽速 600L/s,真空度 10^{-7} Pa~ 10^{-8} Pa。它用作系统预抽,烘烤时可使真空室保持 10^{-4} Pa~ 10^{-5} Pa;它又可与升华泵、复合钛泵联合工作,对系统抽本底真空;两次放电间它将工作气体抽出到 10^{-5} Pa;在放电过程中,它保持工作压强为 10^{-1} Pa~ 10^{-3} Pa。

复合钛泵口径 300mm,抽速 2500L/s,真空度 10^{-3} Pa,用于抽极限真空。

钛升华泵,在系统烘烤及两次放电间抽工作气体时,辅助涡轮分子泵抽气。

分子筛泵口径为 150mm,分子筛量 2kg,当真空室内工作气体(H_2 、 D_2 、He)不抽出时,利用分子筛选择性抽气作用,维持内真空室工作气体纯度。

机组使用通径 300mm 全金属钢密封超高真空阀,阀体漏率及阀口漏率均不大于 1×10^{-7} Pa·L/s,使用寿命不低于 1000 次。

高真空机组由钛升华器、带液氮阱扩散泵及有分子筛挡油阱的油封机械泵构成。

(五) HL-2A 托卡马克真空系统及烘烤

HL-2A(中国环流器二号 A)托卡马克装置将是我国第一台用于进行受控核聚变研究的具

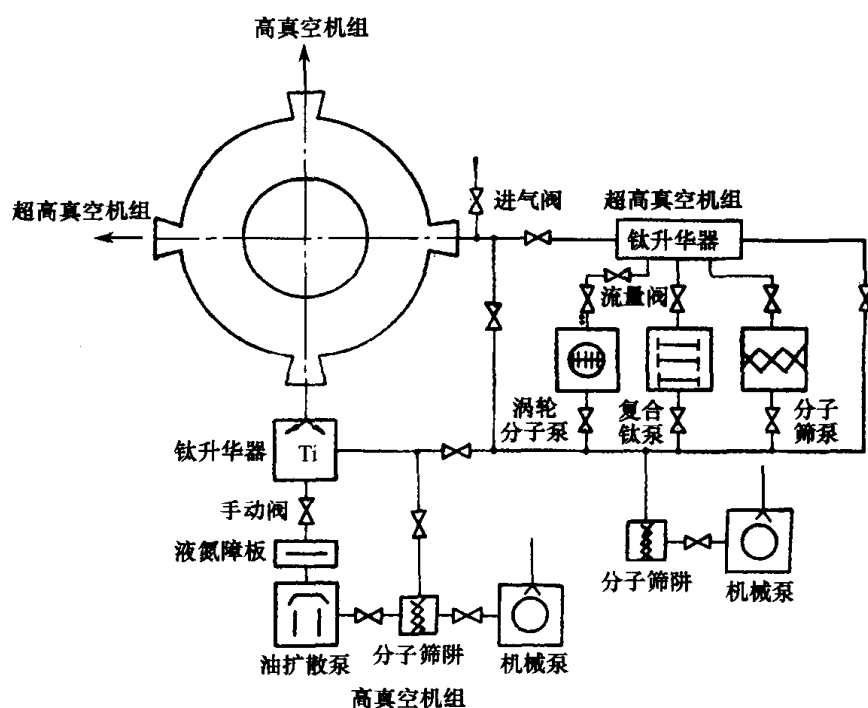


图 10-208 托卡马克装置真空系统原理图

有轴对称偏滤器的大型实验装置。真空室内具有上下对称的偏滤器是本装置的主要特点。图 10-209 为 HL-2A 托卡马克装置的概貌示意图。

1. 真空系统构成

HL-2A 托卡马克真空系统由真空室和真空抽气系统组成。真空室采用原 ASDEX 装置具有“D”形截面的两个“半环”真空室组合而成。连结处垫有聚酰亚胺绝缘板,实现电绝缘和真空密封。偏滤器室为真空室的重要组成部分,以隔板将其与等离子体放电室隔开。固定多极场线圈的“翼梁”将偏滤器室分隔为 16 段。为了真空抽气、工程实验、物理实验诊断、水管引进引出以及真空室内部件安装的需要,在真空室上顶面、下底面、上锥面及外圆柱面上共置 218 个直径从 35mm~60mm 的窗口,布在 30mm 厚的真空室壳体上。真空室两半环采用截面直径分别为 7.4mm 和 7.9mm 的 O 形氟橡胶圈,实现双道密封。

真空室外表面盘绕有水管,水管通热水时,能将真空室加热到 150℃。用以除去真空室内壁上吸附的水分,获得更高的真空度。真空室外覆盖有一层 15mm~25mm 厚的发泡硅橡胶,起保温作用。为使保温效果好,在烘烤之前所有的窗口用保温材料覆盖,以减少热损失。将真空室外表各点的温度差控制在较小的范围内。真空室烘烤过程中,必须保证各部位温度均匀,使各处热应力一致。为此,在真空室外壁上大致均布、对称地设置了 60 个测温点,以监测烘烤时的温度。真空系统抽气机组如图 10-210 所示。

由于真空室体积大,约 26m³,密封部位多达几百个,内部死空间多,真空室的整体抽空检漏相当困难。烘烤时采用 8 台分子泵做主泵的抽气系统,前级由罗茨泵+机械泵组成。为了烘烤结束后更好的抽除残余气体水分,设置了两套抽速为 600L/s 的低温泵机组。

2. 真空系统的烘烤

真空系统烘烤运行涉及三部分的内容;真空抽气系统运行、真空室本体温度及热变形测量及其水系统阀门控制、水循环系统及电加热器的运行控制及测量。各部分有相对的独立性,但

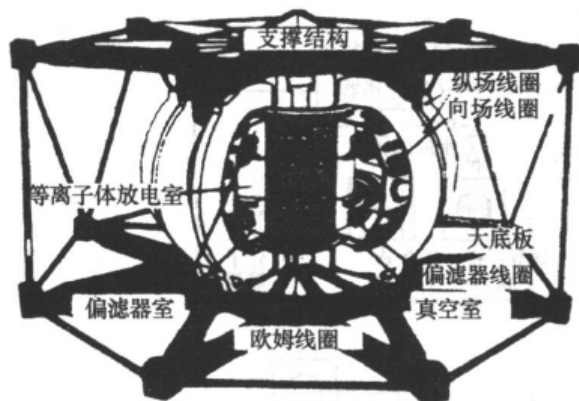


图 10-209 HL-2A 托卡马克装置概貌示意图

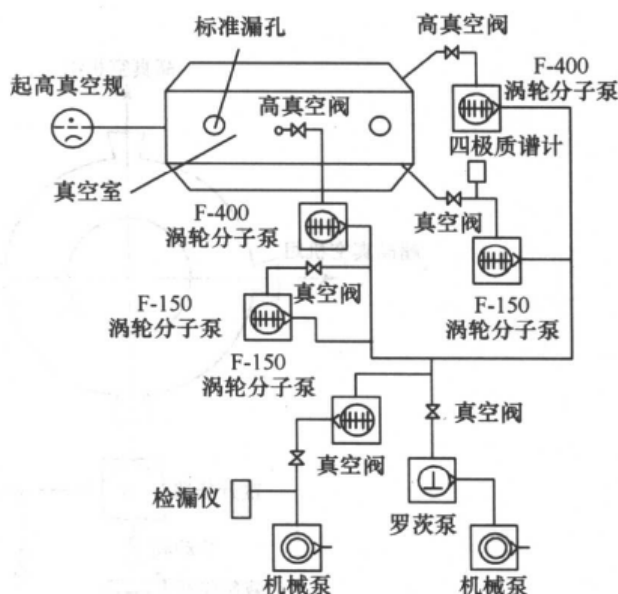


图 10-210 真空系统抽气机组布局示意图

也有关联性。首先烘烤水系统的升温、恒温、降温须由真空系统的测量结果来发出指令,真空室的变形监测结果对烘烤水系统运行过程中的调节提出要求。

第一次进行真空室烘烤,为了保证真空系统和烘烤水系统的运行安全,确定真空室的烘烤温度 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ 。真空室从室温到 100°C 的范围内,温升速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{h}$,真空室最高升温为 100°C ,保温时间为72h。然后降温,降温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。温度降至 40°C 时烘烤终止,关断供水系统,然后使真空室温度自然降至室温。由于真空室内多极场线圈与真空室本体的热膨胀不同步,因此,升温时真空室和多极场线圈同时供水,但当多极场线圈温度升至 85°C 时,将其供水管路关闭,真空室外壁继续供水,利用热辐射和热传导达到平衡。

抽气系统将真空室约经6h时间内从大气抽至 $3.7 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 后,烘烤系统开始投入运行。随着水温度的逐渐升高,吸附在真空室内壁的水分和其它气体逐渐脱附,真空度缓慢变坏。最高升至 $2.7 \times 10^{-3}\text{Pa}$,真空度降低了近一个量级。随着真空室烘烤恒温阶段的持续和逐渐降温,以及低温泵的运行及辉光放电清洗,真空度开始逐渐变好。抽气机组工作330h后,能获得 $1.9 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 真空度。

在最后的辉光放电清洗时,关断8套分子泵中的7套,送气开始进行辉光放电清洗。在真空烘烤运行期间,采用四极质谱计对 H_2O 、 N_2 、 O_2 等残余气体质谱峰进行常规监测。在监测过程中,根据 N_2 、 O_2 谱峰有无异常变化来判断真空室某些部位是否出有漏气。特别是在真空室烘烤降温时,收缩变形有可能导致真空室的密封部位漏气。因此当真空室本体温度降至室温后还须进行仔细检漏,对检出的漏气部位进行集中处理。主要是采用将漏气部位的紧固螺栓进一步紧固的方法来实现,用四极质谱计与氦质谱检漏仪相结合的方法对真空室进行总体检。氦质谱检漏仪达到的最小可检漏气率为 $9 \times 10^{-10}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

在运行的末期进行近10h的 H_2 及 $\text{H}_2 + \text{He}$ 的直流辉光放电清洗。真空室内安装了三个原ASDEX的直流辉光电极,其阳极为 $\phi 25 \times 450$ 的不锈钢杆,采用专门研制的直流辉光电源和送气系统。辉光放电清洗的典型工作参数为:起辉压力 $(5 \sim 7) \times 10^{-1}\text{Pa}$,起辉电压1100V,工作电压为500V,电流为2.5A。在真空系统停止运行后,关断8套分子泵和2套低温泵抽气机组与真空室相连的闸阀,采用静态升压法,得到真空室的总漏气率为 $9.3 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

(六) HT-7 超导托卡马克第一壁 He 辉光硼化

在受控核聚变实验中,等离子体杂质通常由于等离子体与第一壁的相互作用而产生,而杂质辐射等离子体能量对聚变实验是十分有害的。由于杂质辐射的能量随着等离子体有效电荷数的增大而急剧增大,所以必须尽可能地降低金属杂质的含量。为了达到这个目的,通常在托卡马克第一壁沉积一层低电荷数的碳膜,此碳膜阻止了等离子体直接与金属第一壁的作用,减少了金属杂质产生的机会。这种壁处理方式称为碳化。碳化大大降低了等离子体中金属杂质的含量,使等离子体性能有较大的改善。在碳化装置中,最主要的杂质是氧和碳,其主要危害是稀释等离子体浓度,限制等离子体向高参数进一步发展。实验表明,在碳化装置中,未被碳化到的表面释放的水蒸气是氧杂质的主要来源。水蒸气从托卡马克第一壁表面解吸,进入等离子体中,被裂解、电离,氧离子在鞘电位作用下又回到第一壁的碳膜中,随后以 CO 形式释放到等离子体中。CO 进入等离子体后又被电离成碳和氧,这样氧就在真空中循环。从上述分析来看,若能阻止氧的再循环,则碳、氧杂质都将减少。实验证明:硼(电荷数是 5)元素与氧有较强的亲和力,两者易于结合形成三氧化二硼固体。这样如果碳膜中有硼元素,那么实验时产生的氧杂质将被硼元素捕获,而中断氧的再循环。此时,氧、碳杂质的含量势必会减少。这种技术称硼化,即在托卡马克第一壁沉积一层由硼、碳元素组成的膜。

1989 年 TEXTOR 首先应用硼化技术。它以已硼烷(B_2H_6)和甲烷(CH_4)为原料,用射频辅助的氦气直流辉光放电进行硼化,获得了约 50nm 厚的 B/C 膜。硼化后等离子体有效电荷数(核聚变实验所用工作气体是氢,其电荷数是 1,若工作气体含有杂质,则其有效电荷数大于 1)接近 1,等离子体杂质辐射能量大大降低,等离子体品质有了全面的改善。随后许多其它装置都进行了硼化实验,如 JT-60U 和 T-3M 等,取得了理想的效果并且完善了硼化技术。

实验还发现采用等离子体增强化学气相沉积法形成的膜是一层多孔膜,它能吸入大量的氢气,称之为膜的驻氢性。当鲜膜暴露在氢气中,在最初的 20s 内膜强烈吸气,接着是漫长而缓慢的吸气过程,直到 3h 未见饱和。当托卡马克第一壁是不锈钢材料时,等离子体放电一段时间后,不锈钢壁上吸附的氢气会在放电期间返回真空室,使得等离子体密度不可控。对 B/C 膜来说,由于它的驻氢性,放电期间第一壁上的氢不易返回等离子体中,从而使等离子体密度可控,等离子体稳态运行区域扩展。另外 B/C 膜是一种耐腐蚀性好的膜,特别是硼碳之比为 3 的膜,其腐蚀产额只有碳膜的 1%。

HT-7 第一壁材料是不锈钢,硼化前聚变等离子体有效电荷数约为 5,说明等离子体杂质含量高,从而杂质辐射的能量损失较大,限制了等离子体向高参数发展。HT-7 用安全无毒白色粉末状碳甲硼烷($C_2B_{10}H_{12}$),进行了数次硼化实验,取得了很好的效果。硼化已成为 HT-7 常用的、重要的壁处理方式。

图 10-211 给出了 HT-7 硼化系统简图

HT-7 用射频辅助的等离子体增强化学气相沉积

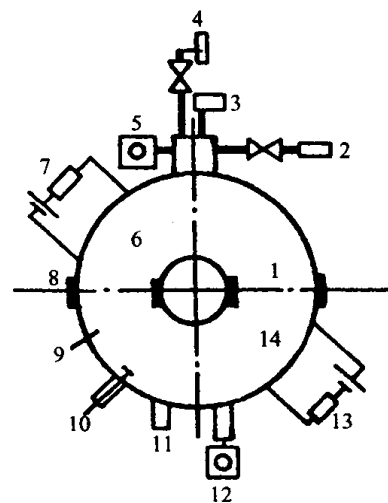


图 10-211 HT-7 硼化系统简图

- 1—真空室;2—盛硼化物的小瓶子;
- 3—原位质谱仪;4—盛 He 钢瓶;
- 5—2 号机组;6—活动限制器;
- 7—辉光放电系统;8—固定限制器;
- 9—微波天线;10—送样杆;
- 11—差分系统;12—1 号机组;
- 13—1 号辉光电极;14—射频天线。

技术对其第一壁进行硼化处理,获得非晶态的硼、碳膜(a-B/C:H),硼碳元素有膜的深度方向分布均匀,硼碳比约为3。这层膜沉积在第一壁而有效地保护着第一壁,减少了等离子体与第一壁直接作用,从而降低了等离子体中金属杂质的含量。膜的吸氧性使等离子体中氧杂质的再循环降低,减少了等离子体中氧杂质以及由氧引起的其它杂质的含量。杂质含量的降低使HT-7等离子体参数明显提高:有效电荷数降低到2以下,环电压低于1.5V,杂质辐射功率明显降低。由于多孔膜的良好驻氢性使第一壁氢的再循环得以改善,等离子体密度可控,扩大了等离子体稳态运行区域。另外硼化使HT-7能够快速进入稳态运行状态。从硼化效果可以看出,硼化为HT-7提供了良好的第一壁条件。

二十一、真空在核电工程中的应用

(一) 概述

核电站是解决世界能源最现实的途径之一。从1954年世界上第一座核电站建成以来,核电站发展很快,特别是进入20世纪70年代,核电站发展速度更快了。到1984年底,全世界有344座核电站在运行,总装机容量超过2亿kW,正在建造中的还有188座。随着世界石油储量的日益减少,核能在整个能源中的地位越来越重要。估计21世纪中叶核电站总装机容量将占世界总发电量的50%。

目前发展起来的核电站堆型主要有轻水堆(包括压力堆和沸水堆)、重水堆、石墨气冷堆和石墨水冷堆,这些都是热中子转换堆。第二代核电站——快中子增殖反应堆在国外已基本上完成试验阶段,并建造了几座工业性堆型。

(二) 真空在核电燃料生产中的应用

轻水堆普遍采用低浓度(铀235浓度2%~3%)的二氧化铀陶瓷燃料;重水堆采用加浓的二氧化铀陶瓷燃料。铀235只占天然铀的0.71%,所以核电燃料生产的第一步是将铀235从铀中分离出来并加以浓缩。世界上已实现工业应用的唯一大规模生产的是气体扩散法,这种方法是先将铀制成六氟化铀,它包含铀235和铀238两种同位素,经过几千个处于低真空状态的扩散级,含铀235的六氟化铀就被浓缩了。这种生产工艺系统的各分离级都必须在真空状态下运行。其原因是:①在低真空环境,六氟化铀50℃就可升华为气体,便于实现扩散分离;②真空状态下气体分子平均自由程较长,改善了分离系数;③可防止贵重、剧毒的六氟化铀向外泄漏。因此整个工艺系统必须保持严格的真空密封,这也可防止空气进入系统,因为空气中的水分会使六氟化铀分解,堵塞分离孔膜,腐蚀设备。扩散系统安装和运行期间,必须运用最先进的真空技术和分析监督。由于六氟化铀有腐蚀性,故对真空测量仪表有特殊要求。

设备耐腐蚀性是扩散工艺过程的主要问题之一。因此所有设备投入使用之前,都必须进行真空干燥,并往系统内通氟气以“烧掉”积存的污垢。真空干燥设备近年来国外都采用无油抽气手段。

浓缩铀生产工艺系统的最大特点是必须无油,如果真空系统内有油,油分子与介质的反应生成物会堵塞分离孔膜,造成严重后果。设备制造时要进行严格的真空试验(抽真空、检漏),最后充氮保存,整个过程必须是无油过程,以保证封存件内含油量不大于 10×10^{-6} 。

浓缩铀生产最后出厂的产品是浓缩六氟化铀,出厂前经去除氟化氢工序。近年来采用真

空蒸馏法去除氟化氢。浓缩铀生产的其它一些方法,如气体离心法、分离喷嘴法、激光分离法正在实验研究之中。据报导,由于采用了真空工艺,离心法得到了很大突破。

(三) 真空在核电设备制造中的应用

核电站是个庞大、复杂的系统,有上万件设备,品种繁多,它们共同的特点是必须在强辐射环境中长期可靠地工作。核电设备制造过程中应用真空技术的主要有:燃料元件和控制棒的制造,设备制造过程中的真空检漏,核电设备中一些特殊材料的制造。

1. 燃料元件制造

燃料元件是由铀芯块和包壳管组成的。不同堆型对燃料元件有不同的要求,但在制造过程中,都采用了真空工艺。

(1) 金属铀精炼

粗铀精炼,现在都是在专用的真空感应炉中进行,使之进一步纯化后,再加入合金元素,铸成便于加工的形状。精炼温度一般控制在 1400°C 左右,真空度控制在 $1.3 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 。

(2) 二氧化铀制备

水冷堆采用二氧化铀陶瓷燃料,方法是把六氟化铀溶于水,使之水解,再经过真空过滤和洗涤,制成二氧化铀。国外真空过滤工艺真空度已提高到 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 。水冷堆燃料棒组装时,铀芯块和包壳管都必须先经过高温真空除气处理,然后在真空室里将芯块装入包壳管内。经真空焊接,抽真空 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$,最后充氮并焊上密封端盖,对密封部位进行检漏。

(3) 弥散型燃料元件制备

高温气冷堆采用弥散型燃料元件,方法是將二氧化铀、二氧化钍和石墨粉按一定比例加入粘结剂制成块,在真空环境中加热到 2000°C 左右,烧结成直径为几百微米的密集球芯粒。

(4) 快中子堆燃料元件制备

快中子堆采用铀和钚混合氧化物燃料元件,必须先烧结成形后在真空条件下装入不锈钢包壳管内。钚有剧毒,一切操作都必须在 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 的真空手套箱中进行,手套箱所在的房间也要抽成真空,作为防止放射性物质逸出的第二道屏障。美国实验堆 II 号 (EBR-II) 的铀钚燃料采用另一种真空工序制做,全部设备都置于 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 真空室内,为此,安装了抽速极大的真空泵。

2. 控制棒制造

控制棒用于吸收反应堆中多余的中子,控制链式反应,保持一定的功率。控制棒芯块常用碳化硼,它在空气中会氧化而失效,因此碳化硼芯块制备要严格进行真空除气,而后装入特制的玻璃管内抽真空保存。在制造控制棒时,先将包壳管抽真空、再放进芯块并抽真空到 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$,最后充氮封存。

3. 核电专用检漏设备制造

防止放射性泄漏是核电站设备最起码的要求,一回路设备和二回路设备都要有良好的密封性能,在制造时必须进行严格的真空检漏。需要检漏的主要有一回路的各种容器、连接管道、蒸发器、换热器、冷凝器等。自 20 世纪 70 年代以来,核电设备检漏标准已提高到 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,即不允许 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的单个漏孔存在。

现代大型核电站需要检漏的大容器,其容积都在数十立方米以上,自世界上第一座核电站建立以来,核电大容器检漏始终是人们关心的研究课题。目前,国外已有核电设备专用的氦检漏仪,并配有专门用于大容器检漏的吸嘴。

4. 核电设备中一些特殊材料的制造

核电设备需要许多特殊的材料,它们共同的特点是纯度高、核性能好、耐磨蚀、耐辐射、耐高温。为了达到这些性能,在材料的生产工艺中都采用真空技术。活性炭广泛用于核电站三废处理,近年来利用真空法制取活性炭的方法得到很大发展。方法要点是将化合物树脂在高真空中炭化,制取致密性良好又有很大微孔容积的炭,真空法制取的活性炭,活化性能优异。石墨广泛用作反应堆慢化剂。为了提高石墨的密度和改善核性能,必须将石墨置于真空环境用沥青浸渍后再烘烤。高温气冷堆燃料元件包壳用的是不透气的石墨,必须将石墨在真空中加热到 1000℃ 左右,通入丙烷后热解出炭素,真空加热的目的是使石墨表面形成致密的涂层,得到透气率极低的石墨。锆合金作为包壳管和结构材料广泛用于水冷堆中。由于锆在不太高的温度下就会和空气中的氧、氮、氢起反应,所以锆及其合金的熔化、冷热加工和焊接都必须在真空中进行。

(四) 真空在核电站运行中的应用

核电站是包括主回路和许多辅助系统的庞大系统。以压堆为例,主回路系统包括一回路和二回路部件:反应堆、压力壳、蒸发器、汽轮机、冷凝器及各种泵。辅助系统包括净化冷却剂系统、保持冷却水系统、设备冷却水系统、停堆冷却水系统、安全注射系统、应急堆芯冷却系统、安全喷浴系统、消氢系统、空气循环净化系统、三废处理系统。下面分别介绍真空技术在主回路和辅助系统中的应用。

1. 主回路系统

核电站主回路系统大部分工作在高温高压状态,但也有处于真空状态运行的,主要是压力壳夹层、汽轮机冷凝器等。

(1) 压力壳夹层

现代大型压力堆的压力壳都是双层的,为了增加安全性,近年来国外一些大型压力堆电站,其压力壳都采用带真空的夹层。其目的是真空夹层可以防止压力壳内放射性气体通过夹层向壳外泄漏。因为压力壳不是绝对不漏的,国外核电站压力壳设计允许漏率为:每天为压力壳内空气总量的 1%(体积)。有了真空夹层,就可以通过大型真空泵抽取夹层气体送到高效过滤器,使之净化后排放到大气中。

(2) 汽轮机冷凝系统

核电站汽轮机下面有巨大的冷凝器,它处于真空状态。例如法国 90 万 kW 核电站的汽轮机冷凝器是由钛管组成的换热器,其外壳是处于 $4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 真空状态下进行的二回路介质。一般核电站汽轮机冷凝器是圆筒形或箱形,里面排列着数万根管子,冷却水在管内通过。二回路蒸气带动叶轮做功后,被真空吸管吸进冷凝器内,在管外壁受冷而结成冰掉下来又被送回蒸发器受热蒸发。核电站汽轮机与火电站不同,因为核电站蒸汽压比火电站小,温度比火电站低,因此容易形成小水滴,这些小水滴对汽轮机十分有害,使冷凝器处于真空状态,就可以把喷嘴壁上的水膜吸进冷凝器。冷凝器工作条件十分恶劣,它对真空维持设备有许多特殊要求,最主要的是要长期可靠地工作。

2. 辅助系统

核电站辅助系统应用的真空技术主要是真空净化、真空除气和真空精馏。

冷却剂质量控制系统:水作为压力堆冷却剂在主回路高温高压和强辐射场中流动,会发生一系列反应,并对材料产生腐蚀作用,所以水质控制是核电站运行中极为重要的工艺。一回路

水要严格控制氧、氯、氟和 pH 值以及固体量、放射性强度等。现代大型压力堆核电站的一回路冷却剂设有循环净化系统,连续地从主回路引出一股水流经净化处理后再使它返回主回路。进入 20 世纪 70 年代以来,国外不少压力堆采用先经真空净化,再经离子交换器净化的工艺流程。真空净化可方便地除去水中游离的氧、氢、氯等气体,比以往单纯采用离子交换器净化效果好得多。一回路水是高温,须降温后才能进行离子交换净化,而真空净化就安排在降温过程中。

(1) 三废处理系统

核电站的废水、废气、废固体含有放射性,三废处理是核电站正常运行的重要部分,目前还不是一个已经完全解决的问题。近年来,在核电站三废处理方面普遍采用了真空工艺。

(2) 二路冷却剂除气

二路冷却剂中 Kr、Xe、H₂ 等气体是难于用化学方法除去的。在极限条件下,冷却剂中裂变气体的放射性浓度可达 10^{-1}Ci/L ,如果冷却剂净化的目的是排放或复用,则至少要将裂变气体浓度降低 4 个~5 个数量级以上,这种要求是相当高的。国外研究表明,真空除气可以达到这个水平。目前常用除气法有热力法、惰性气体吹扫法和真空法。相比之下,真空除气法比其它两种方法有更大的优越性。它不需要热源,在常温下即可进行,在常温下对液体上部抽真空使水沸腾,达到除气目的。近年来真空除气法发展很快,已有专用的真空泵出现。

(3) 含氟废水处理

核燃料裂变及冷却剂活化,不可避免地产生氟。含氟废水处理是比较麻烦的。目前含氟废水处理除了稀释排放外,别无他法。从 20 世纪 60 年代后期起,国外开始了分离废水和废气中的氟的研究,但到目前为止,尚未有一种方法能付诸应用。从经济角度来看,较有希望的是真空精馏,它是在真空状态下精馏分离氟水和轻水,这种办法运行十分简便。

(4) 沸水堆水处理

沸水堆是水在堆内直接化为蒸汽,有放射性,使汽轮机及附件都带有放射性,并且排出的蒸汽和废水也带有放射性,其强度相当压力堆一回路水。近年来,由于这些问题得到较好解决,使沸水堆成为压力堆外建造较多的一种堆型。沸水堆废气废水处理比较成功的一种方法是利用真空工艺的活性炭吸附法,工艺流程如图 10-212 所示。

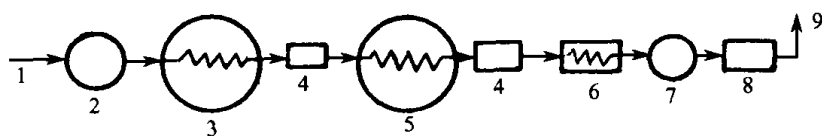


图 10-212 沸水堆水处理工艺流程图

1—来自汽轮机的废水;2—抽气机;3—加热器;4—干燥器;5—冷却器;

6—吸附塔;7—过滤器;8—真空泵;9—排出。

(5) 废气处理

压力堆的工艺废气里包含的放射气体主要是氦和氙的同位素。近年来普遍采用真空法除去氙 85。美国圣奥诺弗莱压力堆所用的真空除氙 85 的主要工艺流程是:首先将储存衰变后的废气的压力由 $7 \times 10^5 \text{Pa}$ 降至 $7 \times 10^4 \text{Pa}$,经过滤、预热,在催化复合气中除去氧气。冷却后依次通过气水分离器、干燥器、过滤器,彻底除去水分和 CO_2 以后,使气体冷却到 -190°C ,送到炭床运行。然后逐渐升温到 50°C ,同时抽真空,使吸附气体解吸下来,压入钢瓶。这种真空除去氙 85 的工艺,设备都简单,曾成功地用于温茨凯尔和爱尔荷厂。

二十二、真空环境制备纳米材料

(一) 概述

纳米材料是 20 世纪 80 年代中期发展的具有全新结构的材料,是指由极细晶粒组成、特征维度尺寸为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 的单晶体或多晶体。由于极细的晶粒,以及大量处于晶界和晶粒内缺陷中心的原子具有的量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应和宏观量子隧道效应等,纳米材料与相同成分的微米晶粒材料相比,在催化、光学、磁性、力学等方面具有许多奇异的性能和新的规律,因而成为材料科学和凝聚态物理领域中的研究热点。近年来,人们对纳米材料的制备、结构、性能及应用前景进行了广泛而深入的研究。科学家们已经将纳米材料誉为“21 世纪最有前途的材料”。

迄今制备纳米微粒的方法已有几十种之多。按照纳米微粒形成的途径,可分为两大类,即由粗大颗粒经破碎而成为超微粒的粉碎法和由原子、分子或离子通过成核、长大而形成超微粒的造粒法。根据所用原料物质状态的不同,又可分为固相法、液相法和气相法三种。根据超微粒形成过程中是否有新物质成分生成,还有人将其划分为物理方法和化学方法。粉碎法通常是利用机械手段逐步将金属或合金大颗粒研磨成细粉,是固相、物理方法的典型代表。气相法则是通过诱导原料气体发生化学反应,生成固相物质微粒后将其收集起来,属于化学造粒法。液相法是从化学溶液中生成、提取超微粒。根据原料成分及制备手段上的不同,既可以是物理方法,也可以是化学方法;既可以是造粒法,有时也可以是粉碎法。

(二) 纳米半导体薄膜制备

纳米半导体薄膜的制备技术很多。理论上任何能够制备多晶或单晶半导体薄膜的技术都可以用于纳米半导体薄膜的制备,但对相应的制备技术提出了更为严格的要求:①表面洁净;②晶粒形状及粒径、粒度分布可控,防止粒子团聚,能更好地控制膜厚;③有较好的热稳定性;④易于收集,产率高。以晶粒形状及粒径、粒度分布的控制为例,常通过控制衬底生长温度或成膜后退火温度与时间来实现。当然,真空蒸发、溅射、化学气相沉积、外延沉积、激光沉积及自组装与分子自组装等薄膜制备技术的提出已经为纳米半导体薄膜的研究开辟了广阔的领域。

1. 真空蒸发沉积

真空蒸发是制作纳米半导体薄膜最一般的物理方法。该法通常将真空室的极限真空抽到优于 10^{-2}Pa ,然后采用加热的方法将被蒸发物质蒸发后沉积在光滑的基片上,得到相应的纳米半导体薄膜。真空蒸发沉积具有材料纯度高、结晶度好、粒度可控的特点,但技术条件高。

目前,直热式的电阻加热蒸发源的采用已不多见,加热方式的不断改进是近年来真空蒸发法得以发展和完善的主要标志,主要的蒸发源有:电阻加热蒸发源、高频感应加热蒸发源、辐射加热蒸发源、离子束加热蒸发源等。其中又以离子束加热蒸发源较具代表性。采用离子束集中轰击膜料的一部分并将其加热的方法具有以下优点:能量可以高度集中,使得膜料的局部表面获得很高的温度;能够准确而方便地控制蒸发温度;有较大的温度调节范围。而电阻加热蒸发源则不具备这样的特点。最近,Raoul Weil 等人采用真空蒸发技术制备了光学质量(即具有较大的非线性光学特性)的 ZnCdTe 化合物纳米薄膜。

2. 溅射沉积

溅射镀膜技术在纳米半导体薄膜的制备领域已经得到广泛应用。较为典型的溅射技术有直流磁控溅射、射频磁控溅射、离子束溅射以及电子回旋共振等离子体增加溅射等技术。已利用磁控溅射技术制备出不同调制波长的 SiC/W 纳米多层膜,制备了 CaAs/SiO₂ 颗粒镶嵌薄膜,利用射频磁控溅射技术成功地制备了含纳米颗粒的二氧化硅薄膜,以及镶嵌于介质中的Ⅲ~Ⅴ族纳米半导体薄膜。

3. 外延沉积

外延技术是一种制备纳米半导体薄膜的新技术,采用该技术可以制备出结晶取向与衬底完全一致而且晶格结构完整的纳米半导体单晶薄膜。典型外延技术有气相外延(VPE)、液相外延(LPE)和分子束外延(MBE)。

近年来,金属有机气相外延(MOCPE)、等离子体辅助外延(PAE)、原子层外延(ALE)、选择区域外延(SAE)及金属有机分子束外延即化学束外延(CBE)等技术在纳米半导体薄膜的制备中日益受到关注。图 10-213 给出了化学束外延(CBE)的实验装置示意图。可制备Ⅲ~Ⅴ族的纳米半导体薄膜。

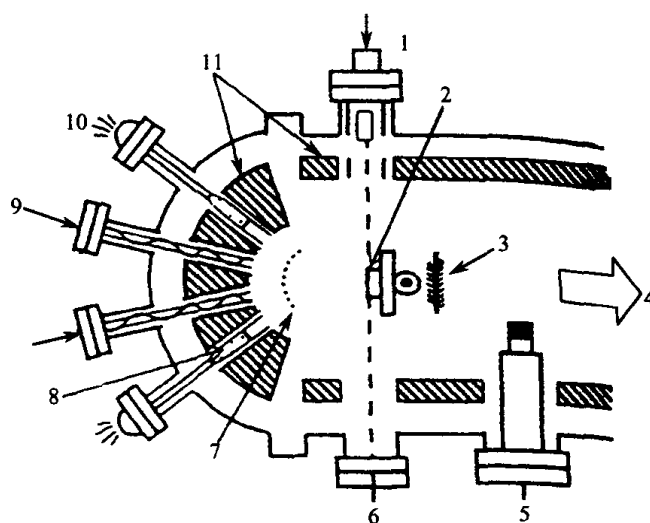


图 10-213 CBE 实验装置示意图

- 1—RHEED 枪;2—衬底;3—电离测量;4—真空系统;
5—剩余气体分析器;6—RHEED 屏;7—快门;
8—常规 MBE 烤炉;9—气态源;10—固态源;
11—液氮冷却套管。

(三) 制备银纳米颗粒与薄膜

制备银纳米粒子的常用方法有物理方法和化学方法。化学方法包括溶胶凝胶法、电镀法、氧化—还原法、静电喷涂法。利用化学方法所得到的银颗粒最小可达几纳米。实验简单、方便,但所得银颗粒不易转移和组装,且杂质含量较高,容易形成团聚大颗粒。

物理制备方法主要有真空蒸镀、溅射法和离子镀。溅射法又包括直流溅射镀、磁控溅射镀、射频溅射镀、反应溅射镀和新发展的微波控制的共溅射镀等。真空蒸发方法是发展最早、应用最广的银纳米粒子的制备方法,其原理简单,操作方便。通过控制蒸发参数可制备几纳米到几十纳米的颗粒,但所得纳米粒子定向生长性差,纳米粒子分散度大,颗粒形状和粒度分布不均匀。溅射方法是 20 世纪 40 年代开始发展的制备方法,在现代工业和科学研究中得到广泛应用。溅射方法与蒸发方法一样,操作简单。特别是 1970 年出现的磁控溅射技术,具有高速、低温两大特点,通过对溅射参数的控制,可以制备出几纳米到几十纳米的颗粒,所得纳米颗粒尺寸小,定向生长性好,颗粒形状较整齐,粒度小,较均匀。离子镀也是一种新型的制备方法,所制备的纳米颗粒尺寸小,粒子形状整齐,粒度也较均匀,但其设备较昂贵。最新的纳米粒子的制备设备是流动液面真空蒸镀装置,它可制备出 0.1nm 的团簇粒子,颗粒均匀度很高,是一种非常好的银纳米制备设备,但设备昂贵,不适合运用于工业生产中。

(四) 纳米颗粒铜薄膜制备

采用离子束溅射技术制备铜纳米颗粒薄膜。实验装置如图 10-214 所示。

用真空泵将真空室压力抽至 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 然后将旋转靶台的某一靶面转为水平, 以便避开主离子源的轰击。将高纯氩通入主离子源, 待放电正常后将离子束引出。打开挡板, 离子束轰击旋转着的基片架上的基片, 进行溅射清洗。清洗时间为 6min, 真空室压力为 $2 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 。然后关闭主源, 合上挡板, 再打开副离子源。待束流稳定后将铜靶转至与水平面呈 45° 的位置, 打开挡板, 铜就被溅射到基片上, 镀制一定时间后, 关闭副离子源, 合上挡板, 单层铜颗粒膜的镀制便完成了。镀制复合膜时, 可再将石英靶旋转到水平面呈 45° 的位置, 重复上述操作。交替一次为一个周期, 采用不同的周期数便可得到不同厚度的薄膜。

镀制的薄膜样品为 Cu/SiO_2 。为了使电镜样品的组织结构与具有反常光吸收特性的光学样品完全一致, 都先在基片上镀制石英膜层, 然后再镀制铜膜, 以便于透射电镜观测时取样。共镀了两种样品。各层镀制的时间分别为: 1 号样品 SiO_2 10min, Cu 30s; 2 号样品 SiO_2 10min, Cu 40s。

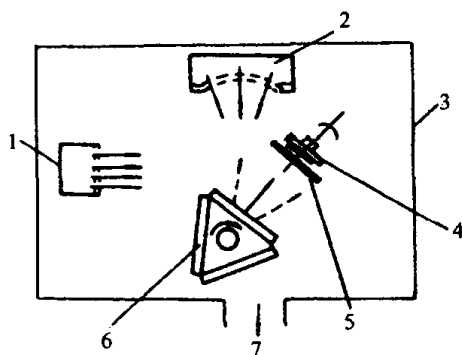


图 10-214 镀膜装置示意图

1—主离子源; 2—副离子源; 3—真空室;
4—旋转基片架; 5—挡板; 6—旋转靶台;
7—真空泵。

(五) 真空冷冻干燥方法制备纳米粉

金属氧化物、复合氧化物等陶瓷类工业纳米材料的制备, 大多采用液相法制取粉体前驱体, 经干燥后煅烧为粉体材料或烧结成型为固态块体材料, 主要包括溶液配制、造粒、干燥及烧结等步骤, 其中干燥工艺对材料的性能有重要的影响作用。干燥过程作为液相法制粉中的一个重要的步骤, 不仅要通过某种手段达到彻底去除液相溶剂以获得纯净固态粉体的目的, 同时还要使粉体获得或保持一些工艺特性, 如保持较好的分散性, 避免出现硬团聚; 对于需要烧结的陶瓷类粉体, 希望具有较高的烧结活性。真空冷冻干燥法制备纳米微粉, 属于化学液相法的范畴, 由于此法是在低温低压下进行的, 适合于制备易燃、易爆、有毒、易氧化等材料的高纯度微粉。因此, 在某些特殊场合制备某些特殊要求的微粉材料中, 真空冷冻干燥法得到了关注和应用。

1. 真空冷冻干燥方法制备纳米粉原理

利用真空冷冻干燥技术制备工业材料纳米级超细微粉材料时, 根据造粒过程的不同, 又可分为喷雾法和沉淀法两种具体方式。

喷雾冷冻干燥法(spray freeze drying)的基本原理是: 首先制得具有期望微粉准确成分的溶液, 然后利用喷雾器依靠适当的气流将其喷吹雾化, 雾化后的微小液滴直接进入干冰、液氮等低温物质中, 被急冻成固体溶液小颗粒, 过滤收集这些小微粒, 置于托盘之中并保持低温状态, 再将这些小颗粒进行真空冷冻干燥, 使溶剂升华, 溶质析出, 从而获得成品微粉。喷雾冷冻干燥法的造粒过程属于物理破碎法, 能够制得化学成分准确、均匀的微粉, 避免偏析现象的发生, 特别适合复合氧化物、混合物成分粉体的制备; 所制微粉的粒径大小和分布, 直接取决于溶液雾化的效果; 经过特殊工艺处理后, 可得到孔隙多、比表面积大的粉体, 尤其适合作为催化剂、超轻绝热材料。

沉淀法制粉的造粒过程属于化学造粒法, 通常是与配液过程同时进行。在混合原料溶液发生化学反应的同时, 产物也同步开始结晶、成核、长大成粉体颗粒, 并形成溶液、溶胶、凝胶或浊液。微粉粒径的大小和分布, 由反应进程所控制。将微粉前驱体如沉淀物、凝胶或溶液直接

置于浅托盘中进行真空冷冻干燥,使溶剂成分升华,直接成为干粉体。这种方法适用面广,具有产量大、成本低、粉体颗粒细小、形状规则等特点,目前广泛用于生产具有特殊光、电、磁、热等性能的纳米功能材料。

大量文献表明,采用真空冷冻干燥法制备纳米粉体,具有硬团聚少、分散性好、化学纯度高、化学活性好、粉体烧结活性高、可降低烧结温度、缩短烧结时间、可制得高密度块体陶瓷等优点。

真空冷冻干燥法所制粉体分散性好的原因在于:常规的干燥方法是直接将溶液中的溶剂蒸发除去,即液态→气态的过程。溶剂蒸发的后期,溶剂在颗粒之间构成“液桥”,气液界面上的巨大表面张力,使两颗粒相互吸引。当干燥进行至“液桥”消失时,会产生一个巨大的压缩力,而把两颗粒紧紧压缩在一起,使粉体间产生硬团聚。而冷冻干燥法是先将溶液冷冻成固态,再让溶液中的溶剂直接升华除去,即液态→固态→气态的过程。在冻干过程中,颗粒之间的“液桥”已被冻成“固桥”,两颗粒间的相对位置已经被固定下来,并且两颗粒之间不存在气液界面的表面张力。随着溶剂的不断升华,“固桥”不断减少,但两颗粒之间的相对位置已不再发生变化,直至“固桥”完全消失。因此冷冻干燥不会造成硬团聚,可制得分散性好、纯净度高的粉体。

2. 真空冷冻干燥方法制备纳米粉的应用

用真空冷冻干燥法所获得的氧化物和复合氧化物超细粉末在催化领域得到了特别成功的应用。这种粉料不仅组成偏析小、比表面积大,而且反应活性很高。如为了使锂能均匀地在 NiO 晶格中扩散,一般固相反应总要在 $900^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间,而冷冻干燥法只要 400°C 处理就可以了。宇宙飞船“阿波罗”号所用的燃料电池掺锂的 NiO 电极就是用喷雾冻干法制成的。近年来,用冻干法制成的氧化物超细粉末被广泛地应用于陶瓷材料领域,特别是作易烧结粉末原料、电子材料用粉末和粉末冶金用微粉。表 10-112 列出了其中一些重要应用的示例,如制备透光性氧化铝、高密度烧结体、三元系尖晶石氧化物、锂铁氧体、 β'' -氧化铝离子导体和陶瓷核燃料等。特别有意义的是,当某一种金属氧化物超微粒子均匀地弥散在金属或合金中时,将大大提高材料的强度、耐热性和其它机械性能,如用真空冷冻干燥法制备弥散有 1% (体积) ThO_2 的铜,其 ThO_2 分散体平均粒径 $6 \times 10^{-8}\text{m}$,互相之间间距约 $1.5\mu\text{m}$,几乎达到理论分散度,则其显微硬度大大增加,中西典彦还分别用硝酸盐水溶液和熔盐获得弥散强化型合金和用于电极材料的弥散强化 $\text{Cu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 材料,类似于这种金属—陶瓷体的材料还有 $\text{Ni}-\text{ThO}_2$ 、 $\text{Pb}-\text{MgO}$ 、 SiO_2W 、 $\text{Fe}-\text{ThO}_2$ 和 $\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ThO}_2$ 等。至于超微粉在无机非金属材料的强化和强韧作用研究中也已得到了足够的重视,现在已发展到用冷冻干燥法制备非金属系陶瓷材料,如超细 WC 、 WC_2 、 MoC 、 TiC 、 TaC 、 HfC 和 VC 等。由表 10-112 还可以看到,氧化物超细粉末对强化陶瓷材料各种性能和出现新的功能性质起着关键作用,显然对合成新型无机功能陶瓷材料很有价值。因此,作为制备氧化物和其它化合物超细粉末重要方法之一的喷雾冷冻干燥及其今后的发展和应用,必将更加受到人们的关注。

表 10-112 冷冻干燥法制备的氧化物超细粉末在陶瓷材料中的应用举例

应用领域	制造方法	性质特征及用途
透光性氧化铝	添加质量分数为 0.25% 的 MgSO_4 于硫酸铝中,冷冻干燥物 1700°C 烧结 1h 得 Al_2O_3 (MgO)	MgO 均匀分散在 Al_2O_3 中,理论浓度 99.98%,平均透过率 65%,表面平整,金刚石研磨后平滑度为 20nm,作半导体及集成电路基板

(续)

应用领域	制 造 方 法	性质特征及用途
高密度尖晶石烧结体	以 Mg/Al 混合硫酸盐水溶液为原料制得冷冻干燥物, 1100℃ ~ 1300℃ 下煅烧制成 MgAl_2O_4 尖晶石粉末	晶格常数 0.8082nm, 表观微晶尺寸 < 60nm, 比表面积为 $20\text{m}^2/\text{g} \sim 30\text{m}^2/\text{g}$, 浓度 97%, 烧结活性很高, 比混合氧化物、氢氧化物和共沉淀物 1500℃ 焙烧的性能还要好
Mn-Co-Ni 尖晶石氧化物	质量分数为 2.7% ~ 23.9% 的混合硫酸盐水溶液为原料制得冷冻干燥物, 1000℃ 烧结 1h 为尖晶石相	得到 $20\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 的球形多孔质二次粒子, 实质是 $1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 的连续海绵状的一次粒子, 当烧结温度达 1200℃ 以上时, 则二次粒子会迅速生长, 1400℃ 时, 气孔会完全消失, 完全烧结
锂铁氧体	作用草酸盐的冷冻干燥物, 1160℃ 空气下烧结 16h, 依组分不同可得 LiFe_3O_8 , $\text{LiFe}_{4.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_5$	比表面积可达 $53\text{m}^2/\text{g}$, 是共沉淀粉末的 2 倍, 烧结温度低, 粒径是共沉淀法的 1/20, 可作记忆储存材料
β' - Al_2O_3 离子导体	将 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2CO_3 、 Li_2CO_3 或 MgSO_4 的混合溶液喷雾冷冻, 121℃ 2d 真空干燥, 1250℃ 下烧结 5h	当 Na_2O 为 2%, MgO 为 2%, 1600℃ 烧结 15h, 烧结体中含 β' - Al_2O_3 90% 以上, 浓度为 98%, 避免了传统陶瓷工艺法长时间高温焙烧导致碱分挥发, 可用作固体电解质
UO_2 粉末	浓度为 1.5mol/L 的硝酸盐溶液于 -70℃ 下, 在经冷却的氟里昂中喷雾制得 $200\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$ 的冻结干燥物, -40 ~ -70℃ 下进行干燥, 在氩气流下 670℃ 制成 UO_3 , 最后在含 6% He 的 H_2 气流中还原 16h, 制得 $500\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ UO_2 粉末, 再在同样气氛下 1650℃ 烧结 3h	烧结体的浓度为 94%, 制备过程中放射性废物排出量少, 在生成氧化物时易形成粉尘, 成型性好, 工艺简单, 可制造含放射性物质的核燃料
氧化物超细粉末弥散强化	硬化强化材料 $\text{Cu}(\text{ThO}_2 \text{ 体积分数为 } 1\%)$ 对应的硫酸盐处理, 120℃ 干燥 8h, 空气中 980℃ 煅烧 1h, 再真空热压制得烧结体	ThO_2 平均粒径 60nm, 分散性好, 高温下的硬度比纯铜要好得多
	耐热强化材料 $\text{Cu}(\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 的质量分数为 } 1.5\%)$ 可分别采用水溶液和熔盐喷雾冷冻干燥, 前者是取对应的硫酸盐在液氮中喷雾冷冻, 真空干燥, 1000℃ 下热分解 5min, 同时进行氧化处理, 最后在 550℃ 下 H_2 还原 2h; 后者是 150℃ 加热对应的混合硝酸盐, 再冷冻, 冻结干燥物以 $0.039^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 400℃ 进行分解, 然后再烧结还原	Al_2O_3 分散接近理想状态, 其二次粒子为 $20\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 的球形粒子, 而一次粒子为 $0.8\mu\text{m}$
	强化材料 $\text{Cu}(\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 的质量分数为 } 0.3\% \sim 0.6\%)$ 硝酸盐溶盐冷冻干燥, -70℃ 真空下 1d, 室温下 1d ~ 3d, 95℃ 下 2d ~ 5d, 260℃ 下热分解 1h, 400℃ H_2 还原 2h, 再冷压和热压处理	可作钢板熔接材料

表 10-113 给出了真空冷冻干燥方法制备纳米粉的应用实例。

表 10-113 真空冷冻干燥法制备纳米微粉的应用实例

序号	粉体或块体材料的成分	原料	造粒方法	粉体粒度	粉体或块体材料的特性及用途
1	MgO、MgAl ₂ O ₄			10nm~50nm	烧结活性好
2	Ba _{0.55} Y _{0.45} CuO ₃	Ba(NO ₃) ₂ 、 Y(NO ₃) ₃ 、Cu(NO ₃) ₂	喷雾 冷冻	30nm	超导陶瓷
3	氧化铝	硫酸铝	喷雾 冷冻		
4	MgAl ₂ O ₄ 尖晶石	氧化铝、甲醇镁	喷雾 冷冻	50nm	光学透镜材料
5	CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	硝酸铜、硝酸锌、 硝酸铝	喷雾 冷冻		甲醇催化剂
6	Li-Zn 铁氧体 Li _{0.3} Zn _{0.4} Fe _{2.3} O ₄	碳酸锂、硝酸铁、 硝酸锌	喷雾 冷冻	3nm~7nm	微波器件
7	MgO-ZrO ₂	氢氧化锆、硝酸镁、氨水	凝胶	40nm	完全立方组成
8	Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	过氧化钡、钛酸四 丁酯、氨水、柠檬酸	沉淀	50nm	
9	SnO ₂	SnCl ₄ 、氨水	共沉 淀法	3.79nm	气敏材料
10	BaTiO ₃	钛酸丁酯、冰醋酸、 碳酸钡、氢氧化钠	沉淀	20nm	烧结活性好
11	(Bi,Pb) ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	硝酸盐	喷雾 冷冻	<1μm	超导材料
12	TiO ₂	有机氯化钛、 有机酸、氨水	共沉 淀法	210nm	多用途粉体材料
13	Coγ-Fe ₂ O ₃ 磁粉	Coγ-Fe ₂ O ₃ 磁粉	乳液 喷雾 冷冻		矫顽力大 航空、通信磁性材料
14	氧化锌	硝酸锌盐	喷雾 冷冻		多用途粉体材料
15	α-Al ₂ O ₃	AlCl ₃ ·6H ₂ O、氨水	溶胶 冷冻	42nm	多用途粉体材料
16	氧化锌	醋酸盐	冷冻	100nm	多用途粉体材料

二十三、真空装置自动控制

(一) 概述

1. 真空装置控制

真空装置是有关工业生产和科学实验中的重要机械设备。人们经常要按照一定的要求将真空装置中的真空泵启动或停止,将其真空阀门打开或关上,或者使真空装置中的真空室中的压力按照预先规定的量值进行变化。上述真空装置的操作过程及真空室中压力调节过程称为真空控制。控制的主体是人,或者是代替人的职能的控制装置。

早期的真空装置控制为手动控制,后来,随着科学技术的发展,真空装置控制从手动控制逐步发展为自动控制。所谓自动控制,实际上是对手动控制的一种模拟,在没有人直接参与的情况下,使真空装置自动地按照预定的程序或规律运行,从而使真空工艺过程稳定,提高产品质量和劳动生产率,减轻劳动强度,防止事故发生。

在大型的真空装置及真空工程中,除要求真空泵、真空阀门能按照预定的顺序自动地运行,真空室的压力能按规定的量值进行自动调节外,还要求真空工艺流程能自动切换,能自动地完成电压、电流、温度、束流、膜厚、张力等参数的数据采集、处理、显示及控制。这样,不仅增加了需要检测的参数,而且有的参数变化很快,允许波动的范围缩小。在这种情况下,若不用自动控制,真空装置就难以运行,其真空工艺也就无法完成。因而,在设计真空装置时,必须关注真空装置的自动控制,提高真空装置的自动化水平。真空装置自动化水平的高低,已成为反映装置技术水平的主要标志之一。

真空装置实现自动控制,从而实现真空工艺过程的自动化,使真空工艺过程安全、平稳、优质、高效。早期,我国真空装置主要是用继电器、接触器及相关仪表,辅之以手动操作,完成真空系统及真空工艺过程的程序控制、互锁、超限报警等。20世纪80年代以后,计算机控制广泛地应用于真空装置的自动控制中,真空装置的自动化水平前进了一步。近年来,集管理与真空装置控制于一体的计算机集成综合自动控制系统得到发展,这将为真空设备制造厂的车间自动化及工厂自动化奠定基础。

2. 常用名词术语

①被控制对象 要求实现控制的真空装置或生产过程,称之为被控制对象。例如真空阀、真空泵、真空镀膜机、真空热处理炉等。

②测量装置 测量被控制量变化的装置。例如:真空计、温度计、膜厚测量仪等。

③调节装置(调节器) 它把测量装置所测量的被控制量与真空工艺所需要保持的给定值相比较,得出偏差值,并按设计好的运算规律进行运算,发出信号,使控制执行机构动作,以消除被控制量与给定值的偏差。如模拟PID(比例、积分、微分)调节器、数字PID调节器(即单片机、计算机)等。在真空装置的真空度控制中,它通常与测量装置的真空规及执行机构的真空调节阀组合在一起,构成压力控制仪。

④执行机构 它接受调节装置发出的信号,产生调节作用,以消除被控制量与给定值的偏差。如真空室中调节真空度的调节阀及调节加热温度的调功器均属此类机构。

⑤被控制量 系指被控制对象内要求实现控制的参数。例如:压力、温度、流量、膜厚等。

⑥测量值 测量装置所测得的被控制量的实际值。

⑦给定值 被控制量要求保持恒定或按预定规律变化的规定值。

⑧偏差 测量值与给定值之差。

⑨扰动干扰 它是使被控制量产生变化的因素。扰动分两种:一种为控制系统内各个环节产生的扰动,称为内扰;另一种为控制系统以外对系统产生的干扰,称为外扰。

⑩反馈 把输出信号送回到输入端,以增强或减弱输入信号的效应称为反馈。凡使输入信号增强者称为正反馈;反之,则称为负反馈。在自动控制系统中多采用负反馈。

⑪调节过程 系指控制系统受到加外信号(给定值或扰动)作用后,原来的平衡状态遭到破坏,由于自动控制装置的调节作用,使被控制量回复到原来的平衡状态,或过渡到新的平衡状态的过程。

⑫位式调节 系指被控制量偏离给定值时,调节器使执行机构全开或全关的调节。如具

有上、下限压力给定的真空继电器的压力调节。

⑬比例调节 调节器输出的信号与偏差大小成比例,使执行机构的位置对应于偏差的大小,它能减小偏差,但是不能完全消除偏差。常用 P(Proportional)表示。

⑭比例积分调节 调节器输出的信号不仅与偏差成比例,且与偏差对时间的积分成比例,使执行机构按偏差的比例、积分规律进行调节,是理论上偏差为零的调节。常用 PI(Proportional Integral)表示。

⑮比例积分微分调节 是将比例、积分、微分三种调节规律结合起来的综合调节,调节器输出的信号不仅与偏差的大小及偏差存在的时间长短有关,还与偏差变化的速度有关。常用 PID(Proportional Integral Derivative)表示。

⑯比例放大倍数 K_p 增大 K_p ,可使静态偏差变小,但系统的稳定性变差;反之,则可提高系统的稳定性,但是,静态偏差变大。通常用调节器的比例放大倍数 K_p 的倒数 δ 表示,称为比例度。

⑰积分时间 T_i 表示积分调节作用速度和强弱的可调参数。在模拟积分调节器中,其数值等于调节器积分回路的时间常数。

⑱微分时间 T_d 表示调节器中微分调节作用强弱的可调参数。在模拟微分调节器中,其数值等于调节器微分回路的时间常数。

⑲稳定性 系指控制系统在扰动作用下,过渡过程能否结束并达到平衡状态的性能。在扰动消除后,系统能恢复原来的平衡状态的则是稳定的。

⑳稳态精度 系指系统处于平衡状态时,被控制量与给定值的偏差(即静态偏差)。

㉑动态精度 系指系统在随时间变化的给定信号作用下所具有的精度。在定值系统中,动态精度就是过渡过程最大动态偏差。

㉒自动控制系统 自动控制装置和被控制对象组成自动控制系统,它能够使被控制对象按预定的规律动作,自动完成真空工艺过程。如镀膜机微机控制系统等。

3. 真空自动控制系统的分类

(1)按控制系统的结构分

①开环控制系统。是指系统的输出量对系统的控制作用没有影响的系统(即无反馈回路),其原理方框图如图 10-215 所示。例如,真空泵的控制即为这类系统。

开环控制的缺点是控制过程受到各种扰动因素影响时,将会直接影响输出量,而控制系统不能自动补偿。

②闭环控制系统。若系统能够对被控制对象的输出信号(被控制量)进行连续测量,并通过反馈环节反馈到控制装置输入端,与输入信号(给定值)进行比较,形成偏差信号。控制装置对偏差信号进行运算(如 PID 运算),根据运算结果发出信号去控制被控制对象的输出,使被控制量与给定值的偏差保持在允许范围,整个控制系统形成闭合回路,故称为闭环控制系统,又称为反馈系统,如图 10-216 所示。

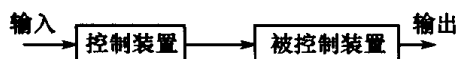


图 10-215 开环控制系统框图

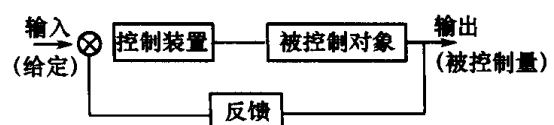


图 10-216 闭环控制系统框图

闭环控制系统的特点是可以纠正由于不可预测的扰动引起的被控制量大的波动,例如,真空度自动控制系统及连续蒸发镀膜中的恒张力自动控制系统等均为闭环系统。

(2)按给定值的运动规律分

①定值控制系统。是指系统的给定值在系统运行过程中始终或某一要求的时段内保持恒定的系统,从而使被控制量保持恒定或基本上保持恒定。这类系统又称为恒值调节系统。例如温度、真空度、流量等自动控制系统。

②程序控制系统。是指系统的输出是按预先给定的程序进行选择系统。例如,真空机组程序自动控制系统等。

③随动系统,也称为伺服系统或跟踪系统。其给定值随时间而随机变化,而被控制量始终快速而准确地跟踪给定值的变化而变化。例如,真空度及温度自动记录仪,从控制系统的角度分析,均可看作是随动系统。

(3)按控制装置类型分

①继电器控制系统。控制装置由继电器、接触器等电器元件组成。通常用来实现简单的顺序控制或参数的位式调节。

②工业仪表自控系统。整个控制装置为一台具有测量与控制功能的自动仪表。例如,温度控制仪、真空度(压力)控制仪等,常用来完成定值调节控制。

③可编程序控制系统。控制装置为可编程序控制器。中小型可编程序控制器用来实现程序控制,大型可编程序控制器既可完成程序控制,又可进行参数调节。

④计算机控制系统。控制装置为单片机、微型计算机或工业控制机。由于计算机具有强大的数学运算和逻辑运算能力,因而用计算机能够组成各种类型的、功能齐全的自动控制系统和自动检测系统。

4. 自动控制系统的性能指标

在真空装置控制中,表征程序控制系统的性能指标是其实现控制的速度、准确性和可靠性;而对于如真空度(压力)自动调节等自动控制系统,其具体的要求是:

(1)系统的稳定性

当系统给定值(或扰动)发生变化时,被控制量将会偏离原值,由于反馈环节的作用,通过系统内部控制装置的自动调节,系统可能回到(或接近)原来的稳定值或跟随给定值稳定下来。但是,也可能由于系统内部的相互作用,使系统出现不稳定状态。显然,不稳定的系统无法工作。因此,对任何自动控制系统的要求,首要的是系统的稳定性。

(2)系统的动态特性

由于系统的控制装置的某些元、部件和被控制对象通常具有一定的惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等),并且电源功率、气源流导、真空泵的抽气速率等为有限值,故系统中的各种量值(如压力、真空度、温度、电流等)的变化不可能是突变的,因此,系统从一个稳态过渡到新的稳态都需经历一个过渡过程。表征系统过程性能的参数叫做系统的动态性能指标。为了使这类控制系统在不同条件下其动态特性具有可比性,人们通常是在某一时刻系统加一个单位阶跃的给定值,然后,根据系统的过渡过程曲线(图 10-217)的参数,来表征系统的动态特性。

①衰减比:即两个相邻的波同方向幅值之比,如 B_1/B_2 等。衰减比是衡量系统稳定性的指标,通常以 4:1~10:1 为宜。

②最大偏差:即过渡过程曲线的最大峰值与给定值 1 的差,即 B_1 。它表示被控制量偏离给定值的最大差值。

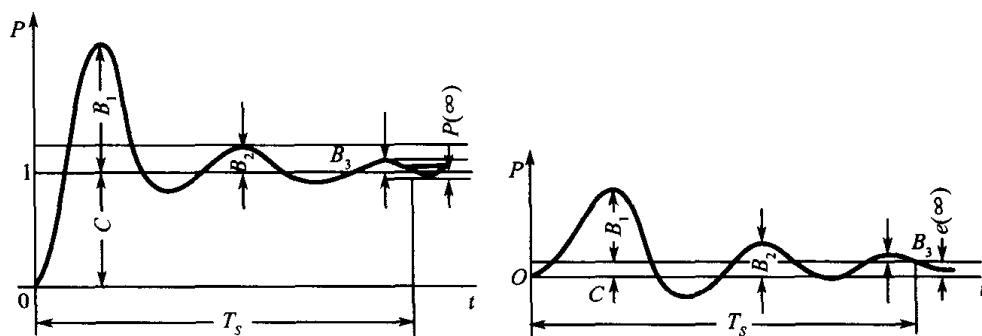


图 10-217 系统动态特性

③稳态偏差:即 $e(\infty)$, 是单位阶跃给定值作用后, 系统过渡到稳态时的余差。它是表征自动控制系统控制的精度的指标。

④调整时间:即 T_s , 也称回复时间, 是系统受到单位阶跃给定值信号作用时, 从过渡状态恢复到允许的偏差所需要的最短时间。它是表征自动控制系统控制速度的指标。

⑤振荡次数:在调整时间内被控制量振荡的次数, 其数值越小, 则表征系统的动态性能越好。

5. 自动控制系统的分析方法

自动控制系统分析的理论基础是自动控制理论。分析闭环控制系统运动规律的理论称为反馈控制理论, 也就是自动控制理论; 分析开环程序自动控制系统运动规律的理论叫继电或开关控制理论, 即逻辑控制理论。

逻辑控制理论是研究实现一定逻辑动作时, 各种逻辑元件的组成规律, 并从工程的角度, 提出构成最简化、最可靠的逻辑控制线路。已知逻辑线路求其动作规律, 则称为分析; 按一定的动作规律的要求构成相应的逻辑控制线路, 则称为设计或综合。可编程序控制器的问世, 使逻辑控制的设计大大简化。

分析闭环控制系统的理论可分为经典控制理论和现代控制理论两种。

①经典控制理论建立大线性微分方程及传递函数概念基础上, 主要应用单输入单输出 (SISO) 线性定常系统的分析与设计问题。系统的分析方法有时间域法, 频率响应法、根轨迹法等。在这些方法中, 以频率响应法为主要方法。系统的综合手段是输出反馈和校正, 综合的目标是使系统在满足性能指标要求的同时, 具有足够的稳定裕量, 以保证控制系统在被控制对象特性发生变化及受到外部干扰影响时, 仍能保证具有良好的控制品质。

②现代控制理论分析的对象是多输入多输出 (MIMO)、时变、非线性等复杂的自动控制系统。它是以动态规划理论、最优滤波理论和极大值原理为标志的、建立在状态空间概念上的理论。以现代控制理论为基础设计控制装置, 能有效地实现复杂系统的最优控制、自适应控制等。

(二) 自动控制元件及装置

在真空装置自动控制中, 经常采用一些通用自动控制元件, 有机械、电气、气动、液压等类型。例如, 按钮、开关、信号灯、继电器、接触器、熔断器、限位开关、变压器、电机、控制电机、气动阀、液压阀、液压缸等, 还采用一些工业自动化仪表 (如温度、压力等测量与控制仪表)、自动控制装置 (如可编程序控制器等) 以及单片机、微型计算机、工业控制机等。这些通用的自动控制元件、自动仪表、自动控制装置及计算机, 均可在相关的专用手册中查到。除此之外, 还广泛采用专用的真空自动控制元件、真空计、压力控制仪、真空阀及真空调节阀等。

1. 真空继电器

真空继电器是一种自动切换开关, 它根据真空装置中真空测量点气体压力的高低而接通

或断开。从原理上讲,除压缩式真空计外,其它真空计、真空表,均可配以适当的控制电路,构成真空继电器。特别是微机化真空计,更可方便地用软件设定压力控制点。真空继电器在其压力控制范围内,可任意设定压力控制点。当测量压力值等于设定的压力值时,发出相应的控制信号,使其内部的有触点或无触点开关断开或闭合,从而实现压力自动控制。当前除个别专门用作压力控制的真空继电器外,大多数真空计既可进行真空测量,又可实现压力的继电控制,已经难于严格区分真空计和真空继电器的界限。

表征真空继电器性能的主要技术指标是:压力控制范围、控制精度、控制点数、触点容量、控制响应时间及可靠性等。

真空继电器广泛应用于各种真空装置的自动控制中。它与其它控制元件配合,可实现真空装置的程序控制以及控制精度不高的位式压力控制,并可在真空装置发生漏气等意外事故时,进行报警或自动保护。

(1) 机电型真空继电器

机电型真空继电器是由机械型真空规,配以控制电路组成。其结构如图 10-218 所示。

静触点 1 是一个调节螺丝,用以调节设定控制压力值。膜盒及波纹管同属于弹性元件,它们具有相同的功能,均能把压力变成位移。当规管内压力达到设定的控制压力值时,动、静触点接通,通过控制电路使继电器 K 动作,从而实现真空装置的控制和保护。

(2) 电接点真空表

电接点真空表是在弹簧管真空表内装上电接点,配以适当的控制电路,构成真空继电器。它除了粗真空测量外,还可以设定压力控制点,实现压力控制。其原理如图 10-219 所示。

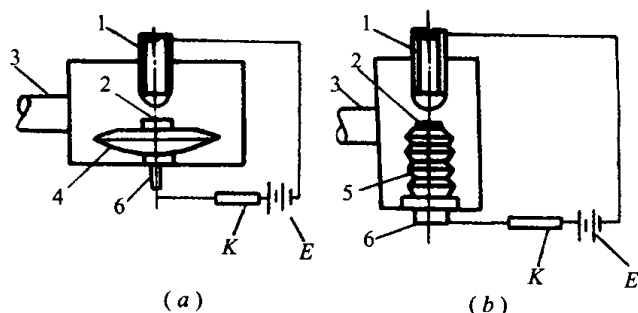


图 10-218 机电式真空继电器结构示意图

(a)膜盒型;(b)波纹管形。

1—静触点;2—动触点;3—壳体;4—膜盒;5—波纹管;

6—电极;E—电源;K—控制电路及继电器。

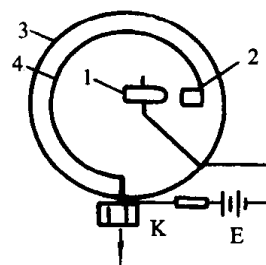


图 10-219 电接点真空表控制原理框图

1—静触点;2—动触点;3—壳体;4—弹簧管;

E—电源;K—控制电路及继电器。

其动作原理是:当弹簧管内压力达到设定的控制压力值时,动、静触点接通,通过控制电路使继电器 K 动作,从而实现真空装置的控制和保护。

常用的电接点真空表和电接点真空压力见表 10-114。

表 10-114 电接点真空表

名 称	型 号	压力控制范围 /Pa	精度等级	表盘直径 /mm
电接点真空表	ZX-150	$10^5 \sim 10$	2.5	150
	ZX-160		2.5	160
电接点压力真空表	YZX-150	$2 \times 10^5 \sim 10$	1.5, 2.5	150
防爆电接点压力真空表	YZXB-160	$2 \times 10^5 \sim 10$	1.5, 2.5	160

(3)带控制功能的真空计

带压力控制点的真空计在原真空计基础上拓展而成。它除了能进行真空测量外,还能完成一路到多路的压力控制。若原真空计的控制电路是分立元件构成,则在原测量电路上,再增加真空控制电路。通常是增加继电器控制电路或无触点开关控制电路。其真空测量与控制范围取决于该真空计所配用的真空规管。常用的真空规管有热偶规、电阻规、电离规等。其原理框图如图 10-220 所示。

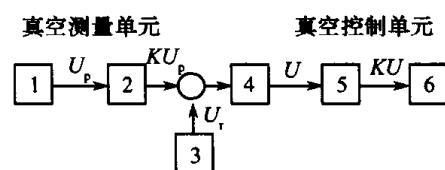


图 10-220 带控制功能真空计原理框图

1—真空测量单元;2—输入电路;

3—压力设定电路;4—比较电路;

5—驱动电路;6—继电器或无触点开关。

由图 10-220 可知,具有控制功能的真空计由六个基本单元组成,其中真空测量单元就是原真空计控制电路,用来测量被控制压力。虽然具有控制功能的真空计种类很多,结构原理也不相同,但是,其真空测量单元均输出与压力有关的电信号,故被看作是一个压力信号源,它输出与被控压力 p 有关的电信号 U_p 。输入电路 2 是将信号 U_p 进行放大或变换,以便与给定电压 U_r 进行比较。给定电路 3 用来设定被控压力。比较电路 4 是将压力测量值 U_p 与压力给定值 U_r 进行比较、鉴别。若 U_p 与 U_r 相等,则发出控制信号 U 。若真空控制单元 6 为继电器,则驱动电路 5 为功率放大电路,因为比较电路的负载能力一般较差,难于提供使继电器动作的足够驱动功率;若真空控制单元 6 为无触点开关,则驱动电路 5 为触发电路。这六个电路单元组成一个继电器式的自动开关。其工作过程是:首先是由给定电路 3 设定了一个与被控压力相对应的给定电压 U_r ,当真空测量单元测得的被控压力与给定压力相等时,比较电路发出一个控制信号 U ,通过驱动电路,使继电器或无触点开关动作,从而使被控真空装置的运行状态改变,实现真空装置的自动控制和保护。

若具有控制功能的真空计控制电路为单片微型计算机,则控制压力由面板上的键盘、码盘或电位器设定,其控制信号则由单片微型计算机的 I/O(输入/输出)接口引出。

目前具有控制功能的真空计,多数具有 2~4 路压力控制信号输出,但也可根据用户需要,任意扩展压力控制回路数。

2. 真空计

在真空装置自动控制中,往往要进行真空测量,由于真空装置种类繁多、工作压力范围也不尽相同,因此,从 10^5Pa ~ 10^{-5}Pa 的各个真空区域的真空测量均会遇到。通常使用的真空计有电阻真空计、热偶真空计、电容薄膜真空计、电离真空计、超高真空计等。为了拓展真空计的功能,真空仪器厂家还生产包括遥控遥测、模拟量输出、RS-232C 等通信接口、压力调节等功能模块板供用户选配。因此,一个配置齐全的真空计,不仅能进行真空度测量、数字显示、量程自动切换、误差自动修正,而且能在压力设定点发出控制信号去进行压力控制,按设定压力值进行压力自动调节,还能将测量值打印记录,并与上位机进行通信联系,甚至还能进行远距离真空测量与控制。

(1)压力控制仪

在工业生产和科学实验中,往往希望真空装置的真空室中的真空度能按真空工艺的要求,维持在某一给定值上。这种要求通常可以通过手动调节真空微调阀来完成,倘若希望自动地完成压力调节,就要借助于压力控制仪来完成。

压力控制仪通常由真空测量单元(真空计)、压力自动调节电路和真空调节阀组成,它是集真空测量与压力调节于一体的自动控制仪器。国产压力控制仪主要有 HY、ZDC、SYK、DL、

ZZK 等系列产品。

表征压力控制仪的主要技术指标是压力控制范围、控制精度、流量控制范围、反应时间等。它取决于其配用的真空规管、控制电路及真空调节阀的性能。

压力控制仪广泛应用于离子注入、离子束刻蚀、真空镀膜、激光技术及半导体材料等领域,其使用的环境条件与同类型的真空计大致相同。

(1) 结构与工作原理

压力控制仪通常是由压力给定单元、真空测量单元(真空计)、压力调节单元、驱动电路及真空调节阀等基本单元组成。它具有手动和自动压力调节功能,压力控制仪原理框图,如图 10-221 所示。

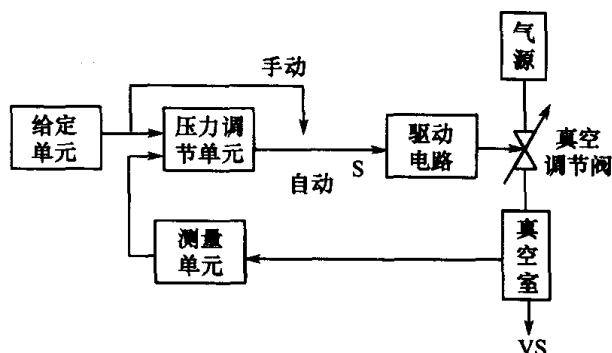


图 10-221 压力控制仪原理框图

S—功能开关;VS—真空系统。

对于采用分立元件的压力控制仪,其给定单元通常是一个电位器,而压力调节单元通常是具有比例积分(PI)或比例积分微分(PID)运算功能的运算电路;对于微机化的压力控制仪,其给定单元通常是通过键盘或码盘进行压力设定;而压力调节单元和测量单元合为一体,为一单片机系统,其压力调节功能是利用单片机系统,通过数字 PID 运算,实现压力调节。至于驱动电路及真空调节阀,同类型的两种不同电路结构的压力控制仪大致相同。

压力控制仪可在手动和自动两种工况下运行。当开关 S 打到手动位置时,压力控制仪相当于一个手动微调真空阀,进行手动压力调节;当开关 S 打到自动位置时,压力控制仪构成一个闭环的自动控制系统,可实现压力定值自动调节,其调节过程是:首先由给定单元设定希望控制的压力值,根据具体的被控对象的特性,选择好 PID 调节单元的比例度 δ 、积分时间 T_i 、微分时间 T_d 等参数,当真空测量单元输出一个表征被控真空装置真空室压力高低的电压信号时,压力调节单元可将压力设定值与压力测量值进行比较,并将差值进行运算(例如 P、PI、PID);然后通过驱动电路,驱动真空调节阀,改变进入真空室的气体流量,从而使真空室内的压力维持在给定值上。当然,这是理想的控制状态,实际上,由于压力控制仪的压力调节单元的特性所致,被控压力只能是趋近于给定压力值,并与给定压力值保持允许的偏差范围内。这个偏差值的大小,即表示压力控制仪压力控制精度的高低。

(2) 压力控制仪型式与基本参数

①型式:型号表示方法目前尚未统一。有的用汉语拼音字母表示,有的用英文缩写字母表示。

②基本参数。国产压力控制仪的基本参数见表 10-115。

表 10-115 国产压力控制仪基本参数

型 号	SKY-1	HY 系列	ZZK-1K	ZDC-I	ZDC-II
配用规管	ZJ-10	ZJ-10	ZJ-10(二只)	ZJ-10	
控制范围/Pa	$10 \sim 10^{-4}$	$10 \sim 1 \times 10^{-4}$	$20 \sim 1 \times 10^{-4}$	$100 \sim 1 \times 10^{-4}$	
控制精度/%	± 2	± 1.5	± 1.5	± 2	
控制方式	自动	手动/自动	手动/自动	手动/自动	

(续)

型 号	SKY-1	HY 系列	ZZK-1K	ZDC-I	ZDC-II
可控气路数	1	1 型-1 路, 2 型-3 路	1	1 路	2 路
配用调节阀	YE-1	YD-1	YD-3	电调节阀	D07 质量流量计
环境温度/℃	—	+10~35	—	—	—
环境相对湿度	—	≥80%	≥80%	—	—
消耗功率/W	40			40	
电源(50Hz, AC)/V	220±10%	220±10%	220±10%	220±10%	
最大流量 /Pa·m ³ ·s ⁻¹	≥0.5	≥0.33	≥2.6	0~2000SCCM(全气) 0~200SCCM(辅气)	
漏气率/Pa·m ³ ·s ⁻¹	≤9×10 ⁻⁸	≤1.3×10 ⁻⁹	≤1×10 ⁻⁸		
生产厂家	上海曙光机械制造厂	北京光华真空仪表厂	北京光华真空仪表厂	成都正华电子仪器有限公司	

注:标准状态下, 1ccm = 1.7×10⁻³Pa·m³/s

(2) 真空气体流量调节元件

从原理上讲,一般手动真空调节阀,配上适当的控制电机(如伺服电机、步进电机等)或液压缸,通过调节控制电机或液压缸的控制信号,使控制电机或液压缸动作,从而改变真空阀的流导,于是改变了流过真空阀的气体流量,完成在真空装置中真空室的真空度的自动调节。但是,目前我国真空仪器厂家生产的真空气体流量调节阀仅有电磁调节式、质量流量计式及压电式三种,而国产压力控制仪多选用压电阀作为真空气体流量调节元件。

压电阀是利用压电效应制成的一种真空气体流量调节阀。YD-1 型压电阀如图 10-222 所示。

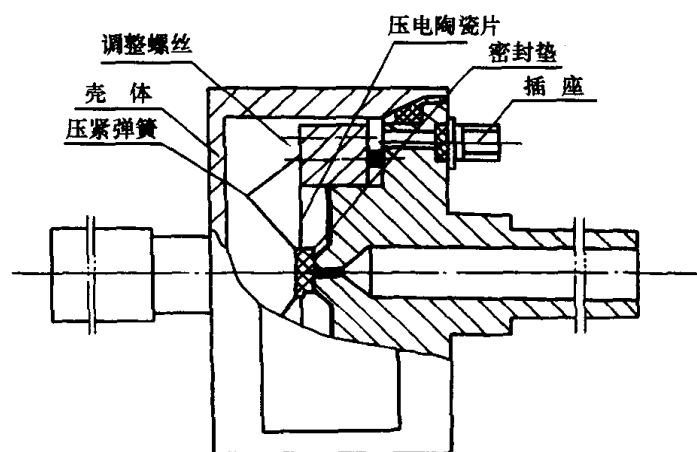


图 10-222 YD-1 型压电阀结构图

压电阀的核心部件是由压电陶瓷制成的具有压电特性的膜片。当在压电陶瓷膜片上施加一控制电压时,它将会产生正比于外加电压值大小的变形。同时,带动密封垫移动。于是压电阀流导产生变化,从而改变气体通过压电阀的流量。当压电陶瓷膜片上未施加控制电压时,由于弹簧的机械力作用在压电陶瓷膜片和密封垫上,使压电阀气路关闭。因而,可以通过改变施加在压电陶瓷膜片上的控制电压的大小,来改变压电阀的流导,从而改变流过压电阀的气体流量。于是,可实现真空装置的真空室中的真空度调节。压电阀的主要技术参数列于表 10-116。

表 10-116 压电阀技术参数

型号	电源电压(DC) /V	最低开启电压(DC) /V	最大流量 $/\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	最大漏率 $/\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	出气管直径 /mm
YD-1	0~100	$+40\pm 10$	$\geq 3.3\times 10^{-1}$	$\leq 1.3\times 10^{-9}$	11
YD-30	0~100	$+40\pm 10$	≥ 3.3	$\leq 1\times 10^{-8}$	17

(三) 真空装置自动控制系统

1. 概述

为实现真空装置的程序控制、真空工艺流程的自动转换、真空工艺参数的自动调节,通常是用一些自动控制元件、真空计、压力控制仪和工业自动化仪表、自动控制装置、微型计算机等组成的自动控制系统来实现。不同的真空装置其自动控制系统不同,即使是同一类型真空装置,因控制的技术要求不同,所采用的自动控制系统也不同。

常用的真空装置自动控制系统有继电器控制系统、压力控制仪或工业自动化调节仪表系统、可编程序控制系统、计算机控制系统等。它们各具特点,分别适用于不同的真空装置的控制。它们的性能比较列于表 10-117。

表 10-117 真空装置各类控制性能表

性能 方式	可靠性	功能	反应 速度	设计难 易程度	改变设计的 灵活程度	环 境 适应性	连接	维修	占地	功耗
继电器控制	不好	单一	慢	复杂	差	强	方便	较难	大	大
可编程控制器控制	好	中等	中等	简易	好	强	方便	容易	小	小
压力控制仪控制	中等	单一	中等	复杂	差	强	方便	较难	中等	中等
计算机控制	好	多功能	快	较难	中等	较差	复杂	较难	小	小

自动控制系统是真空装置的重要组成部分,它对提高真空装置的技术性能起着重要作用。在确定真空装置的控制系統时,应在最大限度地满足真空装置及其真空工艺对控制要求的前提下,妥善处理真空装置的机械结构和自动控制系统的关系,力求控制系统简单、经济,不宜盲目追求高度自动化;要合理选择自动控制元件、自动仪表及自动控制装置,保证真空装置安全、经济、可靠,并且便于操作和维修。

真空装置的自动控制系统的种类繁多,能实现的控制目标也不同,因而其设计方法也不相同。通常是根據真空装置的类型、技术指标、工艺流程、传动参数、动作要求及现场条件进行。自动控制系统设计包括原理设计和工艺设计。其原理设计主要是选择控制方案、绘制控制原理图、编制设计计算说明书等;工艺设计的目的是实现原理设计的技术指标,为控制装置的制造、调试、使用 and 维修提供控制系统的元器件布置图、总接线图,编写使用说明书等。

2. 继电器控制系统

(1) 结构和工作原理

继电器自 20 世纪 20 年代问世以来,一直是真空装置控制的主流。真空装置的继电器控制系统由控制真空泵、真空阀门、工件旋转机构等基本控制线路组成。现在,可编程控制器在真空装置的程序控制上越来越多地代替继电器控制,但是,在简单的真空装置控制中,仍然采

用继电器控制。图 10-223 为真空装置中常用的机械真空泵—扩散泵机组继电器控制系统电气原理图。

由图 10-223 可知,控制电路由主回路和控制回路组成,用以实现真空机组的程序控制。其动作过程是合上电源开关 S,按启动按钮 S1,通过接触器 K2 来启动机械真空泵。若冷却水已接通,则水压继电器 SL 触点闭合,当扩散泵前级压力达到要求的压力值(即压力设定值),则真空继电器 SP 的触点闭合,于是扩散泵按预先设定的程序自动启动。当断水或扩散泵前级压力超过设定压力值,则由于水压继电器或真空继电器的动作使扩散泵自动停止,保护扩散泵油不致于氧化;同时,扩散泵一旦启动,由于控制扩散泵的接触器 K3 的触点 K3-1 与机械真空泵控制回路联锁,使机械真空泵在扩散泵运行期间不因误操作而停止,故电路同时具有保护功能。

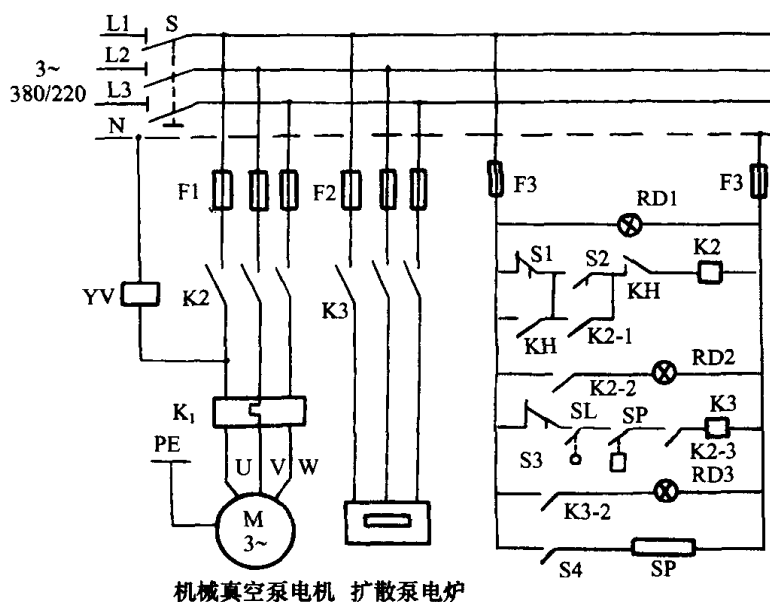


图 10-223 真空机组继电器控制电路

(2) 继电器控制电路设计

继电器控制电路设计的程序是首先进行主回路设计,然后,进行控制、信号、保护及联锁电路的设计。主回路的设计比较规范、单一,主要是根据负载(如真空泵电机)的容量及工作特点选用接触器、保护电器及供电导线。主回路的这种设计方法,也同样适用于可编程控制器控制系统和计算机控制系统中的主回路设计。至于控制回路的设计,由于被控真空装置控制要求的多样性,带来了控制回路设计的复杂性。通常控制回路的设计方法有分析法和逻辑法两种。

① 分析设计法。这种设计方法是根据真空装置及其工艺控制要求,选择适当的基本单元控制电路,再按照联锁控制要求组合起来,经反复分析和修改,最后确定合适的控制电路。分析设计法是以熟悉各种基本单元控制电路为基础,故又称为经验设计法。它仅适用于简单的真空装置的继电器控制电路的设计。例如,设计一台机械真空泵—扩散泵机组继电器自动控制电路,可先画出一台机械真空泵及扩散泵的基本单元控制电路,然后按扩散泵要求的前级压力和冷却水正常工作的条件,在扩散泵控制回路增加水压继电器和真空继电器的联锁触点,同时在机械真空泵控制回路增加扩散泵工作状态的联锁触点,加上必要的信号显示,就构成实用的控制电路(如图 10-223 所示)。

②逻辑设计法。这种设计方法是利用逻辑代数这一数学工具进行控制电路设计。首先,将真空装置的执行机构(如真空泵、真空阀门等)需要的工作信号及控制电器(如开关、继电器)的接通或断开状态看成逻辑变量,然后,根据真空装置及其工艺的控制要求,将它们之间的关系用逻辑函数关系表达,并动用逻辑函数的基本运算公式进行简化,使之成为所需要的最简“与”、“或”关系式,再根据最简逻辑关系式,画出相应的电路图,并通过检查和完善,即可得到需要的控制电路。

利用逻辑设计法设计的继电器控制电路,能获得理想、经济的方案,是常用的复杂的继电器控制系统电路设计方法。

3. 压力控制仪控制系统

(1) 控制系统的组成

在真空装置中,由于真空工艺的需要,希望真空室内的压力保持在某一给定值上,但是,由于真空室内放气量的变化或真空泵抽气速率变化等干扰因素的影响,致使真空室内的压力偏离给定值,因而需要对压力进行自动调节。对于小型真空装置的压力自动调节,通常选用压力控制仪去实现。图 10-224 为压力控制仪压力自动控制系统框图。

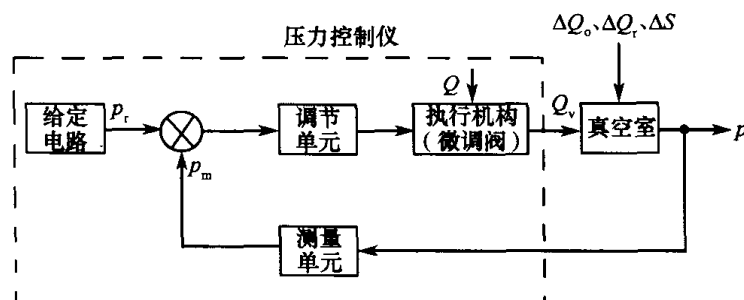


图 10-224 压力自动控制系统方框图

由图可知,这一控制系统是由被控对象及压力控制仪组成的闭环压力自动控制系统。真空室为被控对象,压力 p 是被控制量,流量 Q_r 是进气量。真空室器壁的放气量 Q_o 、工件放气量 Q_r 、真空系统抽气速率 S (对真空室)等参数的变化量 ΔQ_o 、 ΔQ_r 、 ΔS 都是引起被控制量压力 p 偏离给定值 p_r 的扰动。压力控制仪由给定电路、调节单元、测量单元及执行机构(真空微调阀)等单元组成。该系统能在压力控制范围内任意设定压力控制值;在系统出现扰动(即 Q_o 、 Q_r 或 S 变动)时,压力 p 将产生波动,由于系统的自动调节作用,使压力 p 回复到或趋近于给定值 p_r 。

(2) 压力控制仪的选择

压力控制仪选择的依据是真空装置及工艺对压力控制的技术要求,一般压力自动控制的技术要求是压力控制范围、控制精度、反应时间、控制气路数量、控制方式等。因此,所选用的压力控制仪必须满足如下要求:

- ①控制方式要符合控制要求;
- ②可控气路数要等于或大于所要求的气路控制数量;
- ③反应时间要小于要求的反应时间;
- ④真空测量范围要大于要求的压力调节范围;

⑤控制仪的压力调节范围要大于被控对象要求的压力调节范围,即真空微调阀流量调节范围要大于压力调节范围所要求的流量变化范围,即

$$p_{\max} \leq \frac{Q_{v\max}}{S_e} \quad (10-118)$$

$$p_{\min} \geq \frac{Q_{v\min}}{S_e} \quad (10-119)$$

式中 p_{\max} 、 p_{\min} ——最大和最小调节压力[Pa];

$Q_{v\max}$ 、 $Q_{v\min}$ ——微调阀能通过的最大和最小气体流量[Pa·m³/s];

S_e ——真空泵对被控对象(真空室)的有效抽气速率[m³/s]。

(3) 压力控制仪参数的整定

按被控对象基本控制要求选择压力控制仪构成的压力控制系统,因为真空工艺经常要求真空装置改变其工作参数,因而不一定会获得良好的控制品质。这样一来,被控对象的动态特性将产生变化。为了在不同情况下获得优良的控制品质,必须根据具体情况,设置和调整压力控制仪的 PID 参数,这一工作称为压力控制仪的参数整定。所谓具体情况,就是被控对象工作状态下的动态特性,通常被控对象(真空室)的特性在一定假设条件下可表示为

$$p = (Q/S_e) \cdot (1 - \exp S_e t / V) \quad (10-120)$$

式中 Q ——真空室的总放气量[Pa·m³/s];

S_e ——真空泵对真空室的有效抽气速率[m³/s];

V ——真空室的容积[m³];

t ——排气时间[S];

p ——真空室工作压力[Pa]。

上式中 Q/S 、 V/S 为表征被控对象特性的主要参数。 Q/S 为真空室的极限压力,若 Q/S 很大,则要求压力控制仪的输出作大幅度变化,才能收到所要求的调节效果;若 Q/S 很小,则要求压力控制仪有足够高的灵敏度。 V/S 表示真空室的时间常数,若压力控制仪的控制时间大于真空室的时间常数,则压力调节精度降低;若压力控制仪的控制时间太小,又会使调节过程变得不稳定而引起振荡。另外,压力控制仪的比例放大倍数太小或太大,都会引起压力控制精度变低(即偏差变大)或稳定性变差。为了适应被控对象不同的控制需要,压力控制仪通常设有 K_p 、 T_i 、 T_d 参数调节装置(如码盘等),调整 K_p 、 T_i 、 T_d 参数,以便寻求优良的调节品质。由于真空室中的放气量 Q 变化及真空泵抽气速率 S_e 波动是经常的、随机的,而压力控制仪的参数调节是手动的,很难达到最佳调节状态。为克服这一缺陷,只有利用计算机控制系统,进行自寻最佳控制。

4. 可编程控制器控制系统

(1) 概述

可编程控制器控制系统其核心控制装置为可编程控制器(Programmable Controller),缩写为 PC,为了与个人计算机 PC(Personal Computer)相区别,有时在 PC 中人为地增加个 L(Logical)而写成 PLC。早期的 PLC 只能用于程序控制场合,用来代替继电器,现在的 PLC 既保留原来的程序控制器所有的优点,同时又吸收并发展了过程控制仪表、微型计算机的一些原理和技术,能完成程序控制、自动调节以及数据采集、处理、显示等,是一种专门为在工业环境下应用而设计的工业控制计算机,中小型的 PLC 主要用于程序控制,大型 PLC 可以同时进行程序控制及自动调节。国内已批量生产中小型的 PLC。目前在真空装置的控制中,PLC 主要用于程序控制,其次是自动调节。

(2) PLC 程序控制系统的组成

PLC 程序控制系统与继电器控制系统相似,也是由输入、逻辑及输出三个基本单元组成,如图 10-225 所示:输入单元采集并保存真空装置运行的数据和信息;逻辑单元处理输入单元采集的信息,并判断是否需要输出信号;输出单元按逻辑单元输出的信号进行实时控制。其中,输出和输入单元仍与继电器控制系统结构相同,只是为了与 PLC 的微处理连接,增加了输入及输出变换器。逻辑单元由微处理器及存储器组成。因而,在结构、原理及运行方式上均与继电器控制系统的逻辑单元不同,它可以通过编程器灵活地改变控制逻辑,这相当于继电器控制系统通过改变继电器触点的接线来改变控制逻辑,这就是所谓的可编程序。若把程序比做软继电器,则可以把 PLC 控制系统看成是由许多软继电器组成的软继电器控制系统。

(3) PLC 结构和工作原理

PLC 通常由中央处理器、存储器、输入输出(I/O)通道、定时器(T)、计数器(C)等单元组成。有时还接有打印机、CRT 显示器等外部设备,并由编程器输入控制程序。如图 10-226 所示。

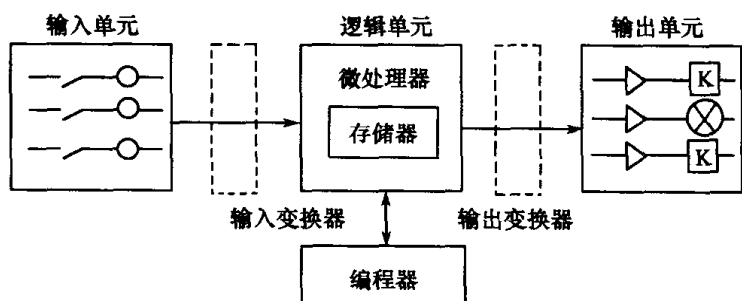


图 10-225 PLC 控制系统原理框图

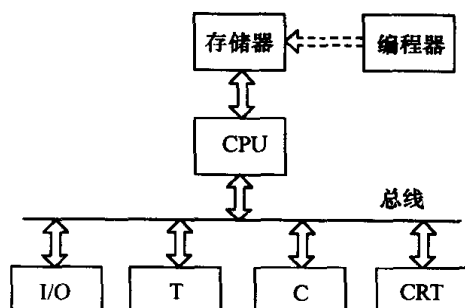


图 10-226 PLC 结构框图

从图中可以看出,PLC 的结构与计算机相似,各组成部分的功能是:

①中央处理器 CPU。它是 PLC 的核心部件,它由处理器、中间变量存储器等构成,与微型计算机的 CPU 相似。其功能是按 PLC 中系统程序赋予的功能,接收并存储从编程器输入的用户程序和数据;用扫描的方式接收现场输入装置的状态和数据,并存入数据寄存器中;诊断电源、PLC 内部电路工作状态和编程过程中的语法错误。在 PLC 运行时,从存储器中逐条读取用户程序,并按程序规定的任务,产生相应的信号,去开、关有关电路;分时、分渠道去执行数据的存取、传输、组合、比较和变换,完成用户程序中规定的逻辑控制或运算等任务;根据运算结果,更新有关标志位的状态或数据寄存器中的有关内容,实现输出控制、制表和数据通信等。

②程序存储器。其中系统程序存储器用以存放系统工程程序(监控程序)、功能子程序及管理程序。用户程序存储器用以存放控制算法系数(模拟量)及用户编制的程序。PLC 用户存储器通常以字(16 位/字)为单位来表示存储器的容量。在 PLC 产品资料中所给的存储器类型及容量,就是指用户存储器而言。由于用户存储器采用备用的锂电池供电,即使电网停电,用户存储器内的程序也不会丢失。

③输入/输出通道 I/O。I/O 是 CPU 与现场真空装置或其它外部设备之间的连接部件。PLC 提供了各种用途、各种操作电平与驱动能力的 I/O 供用户选用。I/O 具有电平转移、电气隔离、串/并行交换、数据传输、误码校验、A/D 或 D/A 变换及其它功能控制等。

④编程器。用于用户程序的编制、调试和监视,并可以调用和显示 PLC 的一些内部状态和系统参数。它利用通令接口与 CPU 联系,完成人一机对话。编程器上有供编程用的各种功能键和指示灯,以及编程/监控转换开关。编程的键盘采用梯形图语言键符或命令语言助记键符,也可以使用软件指定的功能键符,通过屏幕对话方式进行编辑。编程器分为简易型和智能

型两种,前者只能联机编程,后者既可以联机编程,又可以独立编程。

⑤外部设备。一般 PLC 配有盒式录音机、打印机、EPROM 写入器、屏幕显示装置等。

⑥电源为一般工业用电源。

由于各种 PLC 的功能及指令不同,因而其工作原理也不完全相同,图 10-227 为一般 PLC 的工作原理图。它通过编程器或其它输入设备,把用户程序输入并存放在 CPU 的用户存储器中。当 PLC 投入运行时,CPU 根据系统程序规定的顺序,不断循环扫描,完成各输入点的状态及数据采集,并存入输入通道的输入寄存器中,同时,扫描用户程序的每条指令,按指令规定的内容,对相应的输入、输出开关量及中间变量进行逻辑运算,将运算结果存入输出锁存器或中间变量存储器,驱动执行机构,完成真空装置及工艺的控制。一条指令执行完毕后,立即取出并执行下一条指令。此时如果程序中设置转移指令,则程序便跳转到指定地址的指令上,再按新的顺序执行。一般程序的扫描周期是几十毫秒。

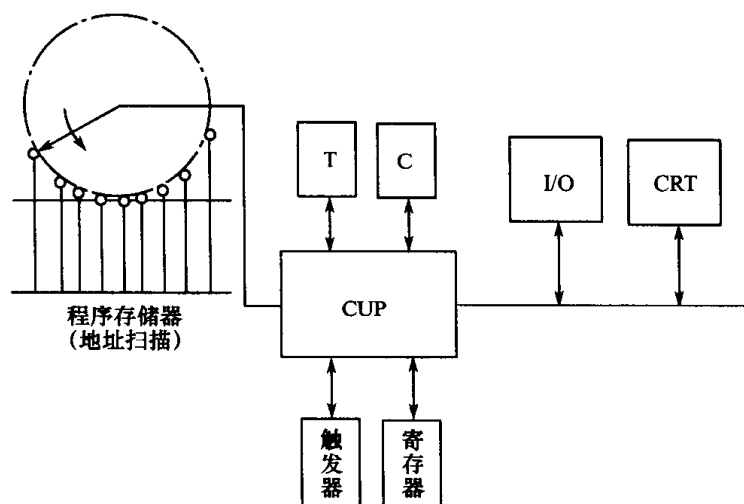


图 10-227 PLC 工作原理图

(4) PLC 控制的程序设计

PLC 的编程,就是把要求的控制功能变成程序。编程仅在特殊情况下按控制电路进行才有可能。可行的方法是首先将真空装置要求的控制功能转换成梯形图或控制系统流程图,再按 PLC 的编程规则编程,或者是用上述两种图编制的语句表去编程,其中以梯形图最为常用。梯形图与继电器控制图相似,图 10-228 为用这两种图描述的真空泵控制图。在继电器控制电路图中,用 KM1 和 HL 表示控制真空泵的接触器线圈及表征真空泵运行状态的信号灯;而在梯形图中,均用输出继电器 Y 表示。

从图中可以看出两种图基本相似;图形的结构形式大致相同;梯形图元件符号与继电器控制电路大部分相同;信号输入/输出形式及控制功能相同。不同之处是:组成器件不同,继电器控制电路是由真正的继电器组成,而梯形图则由触发器(即软继电器)组成;工作方式不同,在继电器控制电路中,当电源接通后,电路中的继电器都处于制约状态,而在梯形图中,各个软继电器处于周期的循环扫描接通状态;触点数量不同,在继电器控制电路中,继电器的触点数量有限,而在梯形图中,每只软继电器的触点数为无限,另外编程方式也不同。

程序设计的一般规则为(用于梯形图):

- ①触点应画在水平线上,不能画在垂直分支线上;
- ②不包含触点的分支应放在垂直方向,不可放在水平线上;

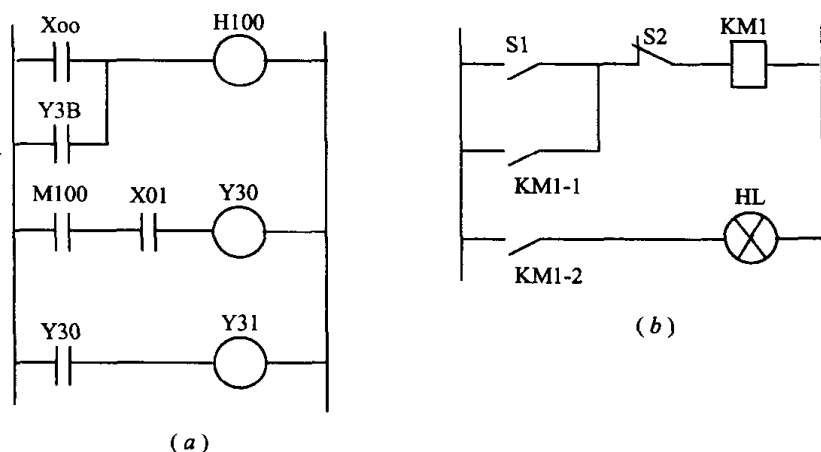


图 10-228 真空泵控制图

(a) 梯形图; (b) 继电器电路图。

③垂直分支右边所包含的触点,应当接在该支路的顶端;

④不带特殊功能的线圈,触点区域最多能容纳 7 排,每排最多有 8 个串联触点。

这些程序设计规则不是一成不变的,对于不同类型的 PLC 可能会不同,可按产品手册进行。

程序设计的一般步骤为:

①按真空装置的控制要求,把整个真空装置控制系统分解成相对独立的控制单元;

②用梯形图表示各控制单元的控制过程;

③根据梯形图和 PLC 产品规定的指令,按逻辑行(一个输出线圈构成一个逻辑行)自上而下、从左到右的顺序,每一个逻辑元件(元素)写一条语句,逐句编写程序。

PLC 用户程序通过编程器输入到 PLC 的用户程序存储器。编程器是实现人-机对话的装置,它除了用来输入用户程序,还可以实现用户程序的读出、搜索、更改、删除与插入以及常数设定和实现运行中的工作状态监视等。

编程器也是一台微处理器。按照其面板上的功能键及显示屏,将梯形图上的图形变成机器语言送入 PLC,使用简单、方便。

(5) PLC 控制系统与继电器控制系统的比较

①控制逻辑。继电器控制系统采用硬接线将各种继电器的触点组成控制逻辑,连线复杂、修改控制逻辑困难。PLC 采用存储器存储控制逻辑,修改控制逻辑只需要修改存储在存储器中的程序,灵活、方便。另外,PLC 还采用屏幕显示(CRT)和键盘,实现现场输入式修改程序。

②控制速度。继电器控制是依靠触点动作实现,触点动作一次要几十毫秒,还容易出现触点抖动、吸合不良等现象。PLC 实现一条控制命令的时间为纳秒,且动作可靠。

③定时控制。继电器控制中采用时间继电器定时,定时范围窄、调整困难。PLC 定时范围宽、定时准确、易于调整,并有计数功能。

④可靠性。继电器控制采用大量机械触点,噪声大、易打弧、寿命短、连线多、可靠性差。PLC 为无触点开关,噪声小、可靠性高,平均无故障时间为 4 万 h~5 万 h。PLC 还具有自检和监控功能,调试和维修方便。

⑤PLC 控制系统设计和施工比继电器控制系统方便,且周期短。

(6) PLC 控制系统与计算机控制的比较

①PLC 具有较强的抗干扰能力,在电网电压波动大(85%~115%)、条件差的工程现场可

以正常使用。微型计算机则要求在一定温、湿度的机房中使用。

②PLC使用的控制程序语言数量少,易于学习掌握。微型计算机程序设计语言复杂,要求使用者具有一定的计算机知识。

③PLC是仅用于工业控制的专用计算机,而微型计算机功能强、应用范围广,除能完成科学计算、生产管理和工业控制外,还可以实现办公自动化等。

5. 计算机控制系统

(1)概述

计算机发展初期,在真空技术领域中的应用主要是用来进行数值计算。自从20世纪70年代微处理器问世后,计算机在真空技术领域中的应用得到迅速发展,除了用来实现真空装置及工艺过程的自动控制、真空产品的计算机辅助设计和辅助制造(CAD/CAM)、真空产品性能的计算机辅助测试(CAT)外,还应用到真空设备生产厂的企业管理之中,使其逐步实现工厂自动化成为可能。但是,目前计算机在真空技术中主要还是应用在自动控制方面,以实现真空装置及工艺过程的程序控制,真空工艺过程工艺参数的数据采集、传输、计算、处理、显示、记录和调节,对真空装置的运行状态进行监视、诊断,从而提高真空装置的控制品质,使真空装置的控制实现真正的自动化。

(2)计算机控制系统的组成

真空装置的计算机控制系统是由硬件和软件组成。所谓硬件,即系统的控制装置,它是由计算机及相关的外围设备、测量装置(如真空计、测温仪表等)和执行机构等构成。至于计算机可以是工业控制机,也可以根据真空装置的要求,选择某种类型的微型计算机、单片机,配置适当的接口电路及外围设备构成。所谓软件,即控制系统的控制程序,也就是使硬件如何工作的指令,它使计算机自动地完成真空装置预定的控制任务。

真空装置计算机控制系统框图如图10-229所示。

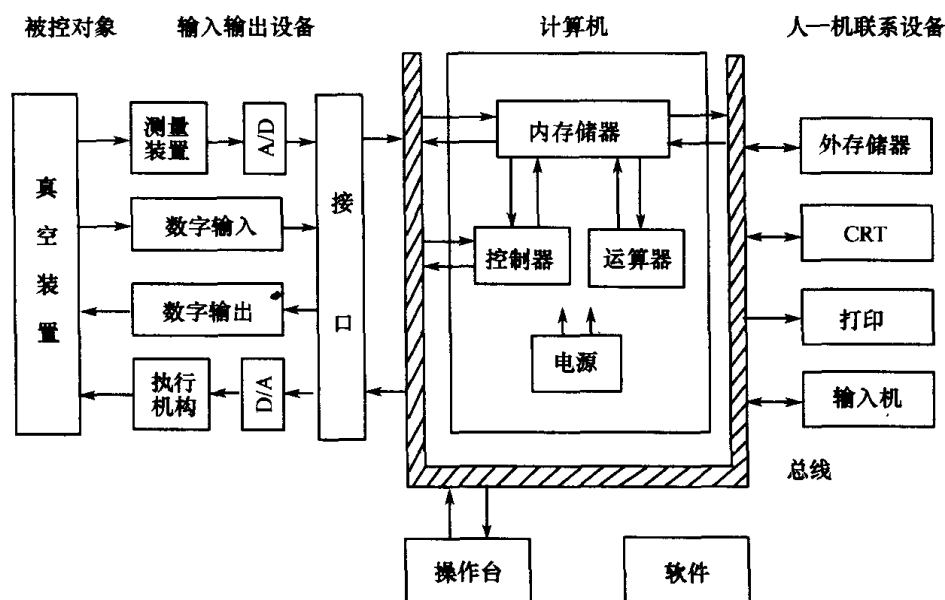


图 10-229 计算机控制系统结构框图

①计算机主机结构。不论哪种真空装置的计算机控制系统,其核心均为计算机,一般数字计算机主机在结构和原理上大致相似,它通常由运算器、控制器和内存存储器组成。人们往往把运算器和控制器合在一起称为中央处理单元——CPU(Central Processing Unit)。微型计算机

的 CPU 又称微处理器。

a. 运算器:主要用来对数据或信息进行加、减、乘、除等算术运算和逻辑运算。

b. 内存储器:存储器用来存储各种数据与信息,具有记忆功能。其中放在计算主机内部的称为内存储器或主存储器。

c. 控制器:它联系计算机各部分,向各部分发出协调工作的指令,是计算机的指挥和控制机构。

②计算机外围设备。

a. 人一机联系设备:常用的有键盘、纸带读入机、卡片读入机、盒式磁带机、打印机、CRT 显示器等,是操作人员与计算机联系的工具。

b. 输入/输出设备:它一方面把被控真空装置工作过程参数取出,经过模—数转换(A/D)变成计算机能够接收和识别的代码,以便计算机进行运算处理;另一方面,又把计算机作出的控制决定,经过数/模转换(D/A),变成真空装置上的执行机构(如真空阀)的控制信号。

c. 外存储器:装在计算机主机之外的存储器,其容量根据被控真空装置的控制需要选定,用以扩大主机的存储容量。

③测量装置及执行机构。测量装置将被控真空装置的工艺参数如压力、温度等物理量,转化为电信号,通过 A/D 送入计算机;执行机构将计算机输出的控制信号转变为被控真空设备工艺参数如压力、温度的变化,实现对真空装置及工艺的控制。计算机控制系统的控制精度及可靠性,在很大程度上取决于测量装置及执行机构的选取。

④控制系统软件。要想使真空装置按预定的要求进行工作,控制系统必须具备完善的控制程序即软件。控制系统软件分为:

a. 系统软件:通常包括程序设计系统、操作系统、诊断程序等,由计算机制造厂提供。

b. 应用软件:因真空装置的控制要求不同而异,通常应包括真空装置顺序控制程序、真空工艺过程控制程序、真空设备工作过程监视程序等。应用软件由配套厂或使用单位配置。

(3)计算机控制系统的分类

①数字程序控制。这是最简单的一种计算机控制,可以按照预定的时间顺序或逻辑顺序对真空装置或真空工艺进行控制。

②直接数字控制 DDC(Direct Digital Control)。在这种控制方式中,计算机取代模拟调节器(如压力控制仪),根据给定值和输出量,直接对被控真空工艺过程进行数字控制。其控制规律不是由 PID 电路实现,而是由数字 PID 去完成。由于控制规律是由数字计算完成,故利用计算机快速运算的功能,可完成更复杂的运算,从而可实现最优控制、自适应控制等。

③计算机监督控制 SCC(Supervisory Computer Control)。在多级计算机控制系统中,第一级是 DDC 作用于被控真空工艺过程,其给定值由上一级计算机提供,则上一级计算机便为监督控制级。若第一级不是 DDC 而是常规的模拟控制系统(如压力控制仪控制系统),第二级也称为监督控制级。

④分布控制。一个大型真空装置由许多分散又独立的子系统构成,若用一台计算机对真空装置进行集中的监督和控制,必然降低了控制系统的可靠性,通常是每个子系统配用一台微型计算机,进行分散控制,只有少量的必要信息被送到上位机(即上一级计算机),从而提高了控制系统的可靠性。

(4)主要技术指标的选择

计算机主要技术指标的选择,应满足被控真空装置对计算机功能的要求,主要考虑以下几

个方面:

①速度。由于真空装置中有关参数如压力、温度等属于缓慢变化的参量,且执行机构如真空阀的行程时间和接触器的吸合时间为秒级或毫秒级,而一般微型计算机的速度为 10 万次/s ~ 100 万次/s,故可满足真空装置的控制要求。

②容量。一般工业用真空装置规模不大,采用 4K~128K 容量的微型计算机即可满足要求。满足不了控制要求时,可适当进行扩展。

③字长。控制用微型计算机的字长的选择,主要根据真空装置要求的计算精度及控制指令去选择。通常选 8 位机即可满足要求,要求高的可选 16 位机。专门用来进行开关量控制的小型真空装置可选 1 位机。

④可靠性。衡量控制计算机可靠性的指标常用两次故障平均间隔时间(MTBF)来表示,其数值越大越好,微型计算机的 MTBF 一般大于 5000h。

⑤软件。要求具有可靠而又成熟的系统软件和应用软件。

(5) 计算机控制系统设计原则

① 计算机控制系统配置方案:

a. 成套微型计算机系统。此方案配置方便,但是价格较贵。当采用此方案时,要考虑微型计算机的机型、内存、外围设备及软件的选用。

b. 工业控制机。此方案方便、灵活,可根据被控真空装置及工艺的控制要求,购置适当的模块,构成控制系统。当采用此方案时,要求考虑工业控制机的系列类型、功能模块、外围设备及软件的选用。

c. 自己设计制造微机系统。根据需要购置中央处理单元、存储器(ROM、RAM)和接口器件,自己设计制造专用的微机控制系统。此方案实用性强、价格低,但是,它要求一定的保障条件。

d. 利用单片机及其扩展系统。

② 计算机控制系统方案选择:

大型真空装置由于控制要求高,故选用的微机要容量大、功能全、软件丰富,此时可选成套微机系统或工业控制机。

一般的真空装置,由于其结构简单,控制系统不复杂,根据具体情况可选用工业控制机、单片机扩展或自行设计制造微机系统。对于批量生产的真空装置的微机控制系统,最好是根据需要,自行设计制造微机系统。对于真空仪器智能化,最好采用单片机去实现。

③ 计算机控制系统的设计原则:

a. 根据被控真空装置的控制要求,以及模拟量输入、输出参数,开关量控制点数等基本条件,选择合适的控制方案、微机机型及各项技术参数。

b. 确定计算机与真空装置上其它常规仪器、设备(如真空计、压力控制仪、信号保护装置、控制装置等)的关系。原则上上述常规仪器应在计算机的统一指挥下工作,这样可以充分利用常规仪器的作用,以便最有效地发挥计算机的功能与特长。

c. 合理选用人—机联系设备如键盘、显示器、打印机等。

d. 做好计算机的施工方案,使计算机有一个良好的工作条件。

6. 其它控制系统

关于真空装置的温度、压力、流量、速度等控制系统,查阅有关专业设计手册。

第十一章 真空度测量与真空规校准

一、概 述

真空度测量与真空规校准是真空技术的重要组成部分。

真空度测量指的是在低于大气压的条件下,对气体全压力的测量。

真空计是测量低于 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ (一个大气压) 的全压力的测量仪器,一般由真空规和控制线路两部分组成。

真空规可分为绝对真空规和相对真空规。绝对真空规是从所测出的物理量就能直接计算出气体压力的真空规。相对真空规是根据输出信号与气体压力之间的关系,通过真空测量标准校准后才能确定的真空规。

真空测量标准可分为绝对真空校准装置和相对真空校准装置两大类。绝对真空校准装置是从所测出的物理量就能直接计算出压力来校准真空规。相对真空校准装置是相对真空规作为主标准器,必须经过绝对真空校准装置的校准,然后对真空规进行校准。

目前,从大气压到 10^{-10} Pa 压力范围内真空度的测量问题已经解决了。一般是采用不同类型的真空规去测量不同压力区间的气体压力。但是在解决 $10^{-11} \text{ Pa} \sim 10^{-13} \text{ Pa}$ 压力范围的极高真空测量方面,进展缓慢。要用已有的真空规直接测量特殊条件下的真空度是困难的,还要对规的结构、工艺、理论等多方面的问题进行探讨。真空系统中稀薄气流的非均匀分布问题,以及对非均匀气流的压力测量,已成为近年来详加研究的课题。

在从大气压到 10^{-10} Pa 压力范围内,已有各种类型的绝对真空规和绝对真空校准装置,并从大气压到 10^{-7} Pa 压力范围内开展了各种双边和多边真空量值的比对工作,取得了较好的一致性。在 $10^{-8} \text{ Pa} \sim 10^{-10} \text{ Pa}$ 压力范围内没有进行过任何比对。因此,要达到真空量值的国际统一,还有大量的工作要做。

二、真 空 规

(一) 液压式真空规

1. U 形压力计

U 形压力计采用水银或低蒸气压油作为工作液体,从这种压力计的两个支管的液面高度差 h 可计算出两个支管液面上的压力差

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h \quad (11-1)$$

式中 ρ ——工作液体的密度;

g ——重力加速度。

式(11-1)表明,U 形压力计是一种绝对真空计。对油 U 形压力计来说,因油密度约为水银密度的 $1/15$,所以它的灵敏度要比水银 U 形压力计高 15 倍。

在真空测量中,通常所用的 U 形压力计有如下几种形式:

图 11-1 为开管式 U 形压力计,它是一种以大气压作为参考压力的 U 形压力计。

图 11-2 为闭管式 U 形压力计,其封闭支管中的气体压力与被测气体压力相比,可以忽略。

图 11-3 是采用电学方法测量液面高度差的水银 U 形压力计,它的两个支管中装有电阻丝(钨丝或铂丝),随着水银液面的上升或下降,丝的电阻值随之减小或增大,以此来测出两液面高度之差。

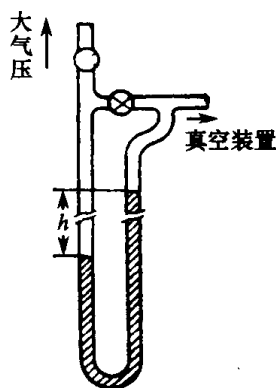


图 11-1 开管式 U 形压力计

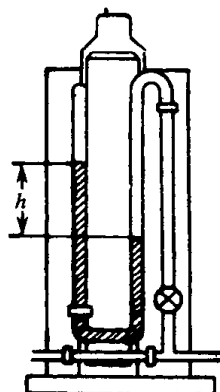


图 11-2 闭管式 U 形压力计

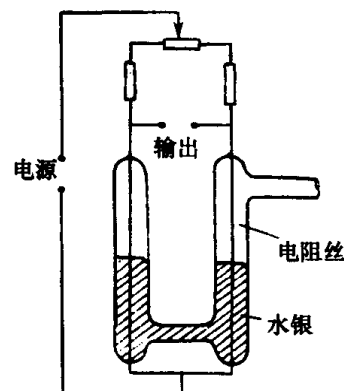


图 11-3 用电学法测量液面差的 U 形压力计

图 11-4 是倾斜式 U 形压力计,它根据所测出的 L 值由 $h = L \sin \theta$ 来算出液面高度差。此种结构形式可以提高灵敏度 5 倍~10 倍。

图 11-5 是一种油 U 形压力计。

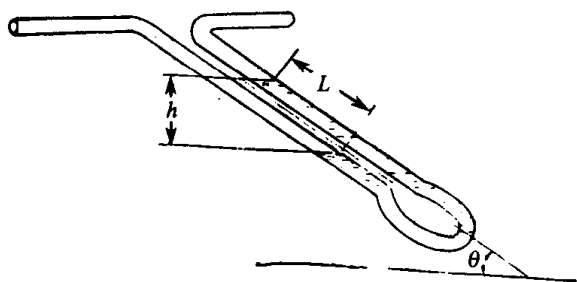


图 11-4 倾斜式 U 形压力计

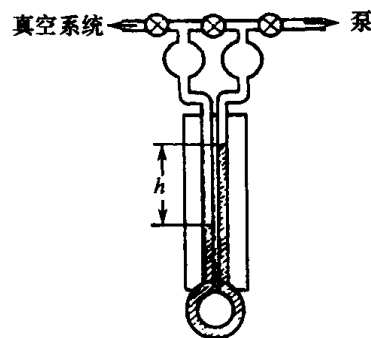


图 11-5 油 U 形压力计

除通常使用的 U 形压力计外,特殊设计的精密 U 形压力计可作为 $1 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ 压力范围的真空测量标准。它的历史悠久,经受了长期实践的考验,被公认为是真空测量标准中最成熟、可靠性最高的标准。

精密 U 形压力计是真空测量标准的基础,而另外三种主要真空测量标准都可以说是它的发展:压缩式真空规可认为是“具有放大系数的 U 形压力计”;膨胀式校准系统的前级标准是精密 U 形压力计;动态流量法校准系统的上游标准是压缩式真空规或精密 U 形压力计。

制做精密 U 形压力计时要考虑如下几点:

- ① 选用较大内径的玻璃管(约为 30mm),以降低毛细管作用。
- ② 选用透光性好的薄壁玻璃管,以降低光的不规则折射对读数的影响。
- ③ 采用三支管甚至四支管的结构,以降低安装倾斜所带来的误差。

④严格恒温,以减小温差和温度变化所引起的误差。

⑤采用先进的精密测长技术和仪器。已采用的测长仪器有测高仪(精度为 0.02mm)、点接触测微计(精度为 0.002mm)、光学干涉仪、超声干涉仪等。

带有点接触测微计的精密 U 形压力计如图 11-6 所示。这种结构的精密油 U 形压力计的误差为 $\left(1.6 \times 10^{-2} \text{Pa} + \frac{6}{10^5} \text{读数值}\right)$ 。这种结构的精密水银 U 形压力计的误差为 $\left(4 \times 10^{-1} \text{Pa} + \frac{3}{10^5} \text{读数值}\right)$ 。

美国国家标准局研制成功的脉冲超声干涉仪压力计是四支管结构的 U 形压力计(图 11-7),其测长分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ 。

日本研制成功的激光干涉仪 U 形压力计的测长分辨率为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

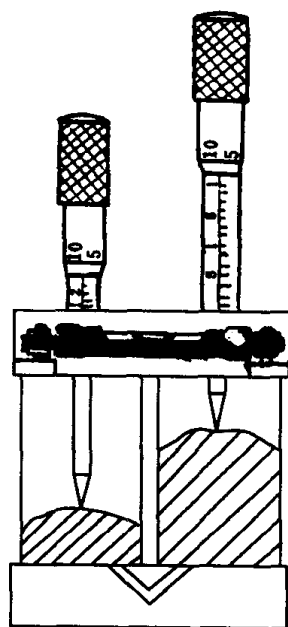


图 11-6 点接触测微计 U 形压力计

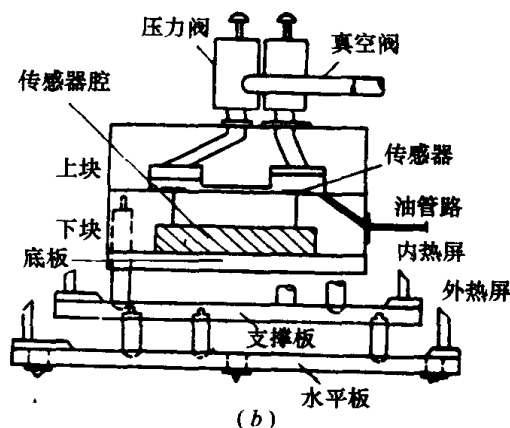
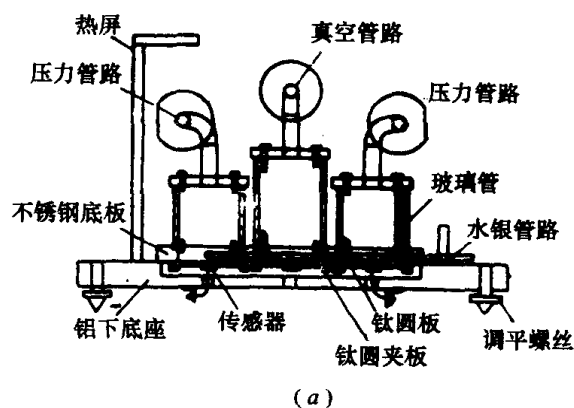


图 11-7 脉冲超声干涉仪压力计
(a) 汞压力计; (b) 油压力计。

2. 压缩式真空规

1874 年麦克劳制作的压缩式真空规是采用提升水银的方法把大体积 V 中压力为 p_1 的气体压缩到毛细管的小体积 v 中,使小体积中的压力增大到 p_2 ,再按 U 形压力计原理测出 p_2 ,根据波义耳定律 $p_1 = \frac{v}{V} p_2$ 计算出被测气体压力 p_1 。压缩式真空规又称麦克劳规,是一种绝对真空规。

图 11-8 是压缩式真空规的结构图, A 为抽气支管, D 为测量毛细管, B 为比较毛细管,两个毛细管的内径相同($d_1 = d_2 = d$)。当把大体积 V 中压力为 p 的气体压缩到测量毛细管 D 中后,就可得到下面的关系

$$pV = (p + \rho gh)v \quad (11-2)$$

式中 h ——两毛细管中水银面的高度差;

g ——重力加速度;

ρ ——汞的密度。

如 $\rho gh \gg p$, 则

$$p = \rho gh \frac{v}{V} \quad (11-3)$$

即从所测出的物理量 h 、 v 、 V , 按照式(11-3) 可直接计算出气体压力值 p 。

图 11-9 给出压缩式真空规的三种不同的定标方法。

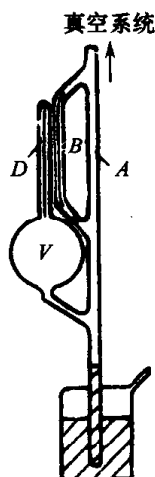


图 11-8 压缩式真空规结构

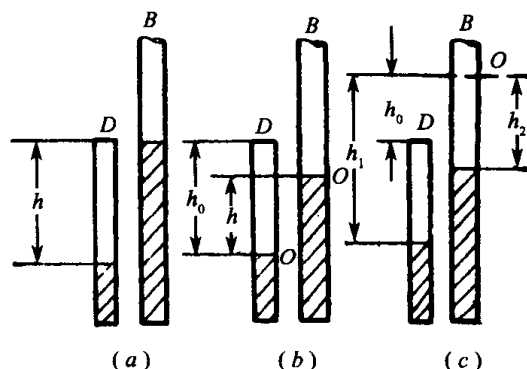


图 11-9 压缩式真空规的三种定标法

(a) 平方定标法; (b) 直线定标法;

(c) 无标定标法。

如把 B 中的水银面提升到 D 顶点进行读数(图 11-9(a)), 则得平方定标公式

$$pV = \rho ghv = \rho gh(\pi d^2/4) \cdot h = \rho g\pi d^2 h^2/4$$

令 $A = \rho g\pi d^2/4$, 其中 $\pi d^2/4$ 为毛细管截面面积

$$p = \frac{A}{V} h^2 \quad (11-4)$$

如把 D 中水银面提到一固定参考点 O 进行读数(图 11-9(b)), 则得直线定标公式

$$pV = \rho ghv = hAh_0$$

$$p = \frac{h_0 A}{V} h \quad (11-5)$$

式中 h_0 ——常数。

如任选一固定参考点 O , 将水银面提升到毛细管 D 中任意位置进行读数(图 11-9(c)), 则得无标定标公式

$$pV = (h_1 - h_2)A(h_1 - h_0)$$

$$p = \frac{A}{V} (h_1 - h_2)(h_1 - h_0) \quad (11-6)$$

一般情况下很少采用无标定标法, 只有在高精度测量中才采用。毛细管 D 的有效顶点与实际观察到的顶点会有差别, 采用无标定标法可以从实验中求出有效顶点的位置 h_0 。

对于日常的测量来说, 压缩式真空规并不是一种很好的测量工作。因为它的工作液水银对人体有伤害, 操作也比较复杂, 而且如果没有熟练的操作技术, 就很难获得精确可靠的读数。

但是压缩式真空规在 $1\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 压力范围内是一种很好的真空测量标准, 在它一百多

年的发展过程中,逐渐发现和消除了一些误差源,是一种研究得较深入的真空标准。曾经进行过压缩式真空规之间的互校、压缩式真空规与静态膨胀式校准系统之间的互校、压缩式真空规与动态流量法校准系统之间的互校,都获得了良好的一致性。在国际上已公认压缩式真空规具有很高的可靠性,并普遍将它定为国家级的真空测量标准。

压缩式真空规的误差源有:不稳定的毛细作用、水银蒸气流效应、静电效应、温度变化、结构尺寸不准和偏离理想气体的波义耳定律等。其中前两项是主要的误差源。

1939年卢森堡用磨毛的毛细管制作了压缩式真空规。由于对毛细管内壁进行了磨毛加工,因而该真空规能有一对均匀内径的毛细管,并降低了由水银在毛细管中的一些异常现象所引起的误差。他认为他的压缩式真空规在 10^{-3}Pa 时的精度为 $\pm 6\%$ 。

在卢森堡之后22年,日本人和德国人在1961年先后独立地发现了压缩式真空规的一个新误差源,即水银蒸气流效应可引起近20%的系统误差。他们还采取了相应措施,克服了85年来这种未被人们认识的误差源,使压缩式真空规的可信程度大大提高了一步。

然而,直到目前为止,在国外发表的文献中,对影响压缩式真空规测量精度的主要因素——毛细管中水银不规则运动所引起的一系列异常现象,尚未完全探清其本质,也没有从实践中找到根本消除这些异常现象的方法,因此卢森堡的方法一直延用到现在。

1963年兰州物理所为了提高压缩式真空规的测量精度,着重研究了水银在毛细管中的运动状态,基于大量的实验观察,提出了“摩擦阻力是引起毛细管中水银不规则运动的主要原因”的假设,用“流动”模型和“塞流”模型解释了毛细管中所发生的一系列异常现象。在此理论的指导下,从实践中找到了涂油润滑的新方法,即在毛细管内表面涂一层厚度约为 $3\mu\text{m}$ 的均匀油膜(DC-704油),较彻底地消除了毛细管中发生的一系列异常现象。

基于上述理论分析和实验研究,设计制作了一种新型标准压缩式真空规(图11-10)。这种真空规采用了内表面涂油的毛细管,消除了毛细管异常现象所引起的误差,而且在规的交叉口处安置了两个磨口阀门,配合使用这两个阀门可较彻底地消除水银蒸气流效应所引起的误差,致使新型标准压缩式真空规的测量精度有了很大提高。

一台新型标准压缩式真空规主要参数为:直径 $d = 0.6404\text{mm}$, 体积 $V = 1246.86\text{mL}$, 实验中测得有效顶点 h_0 的偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$, 在 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 时,测量误差为 $\pm 2.3\%$; 在 $1 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 时测量误差为 $\pm 0.83\%$; 在 $1 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 时,测量误差为 $\pm 0.48\%$ 。

已将新型标准压缩式真空规与高真空膨胀式校准系统进行了直接对比,取得了良好的一致性。

由于玻义耳定律仅适用于理想气体,对于真实气体则应该采用范德瓦尔方程

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (11-7)$$

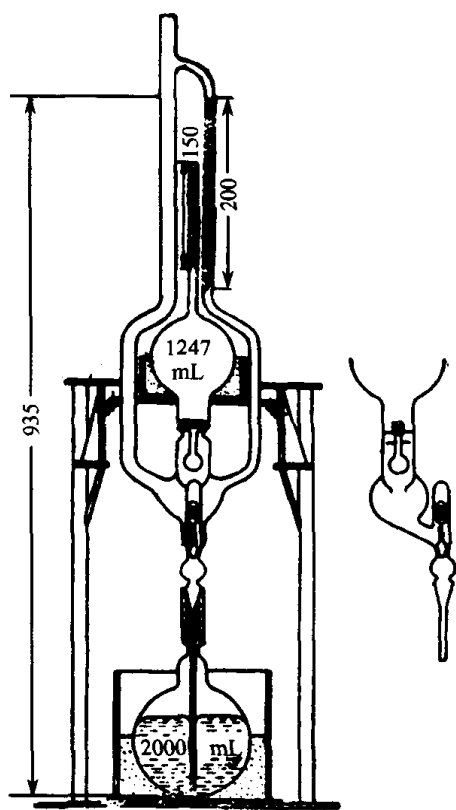


图 11-10 新型标准压缩式真空计

二、真空规

式中 a 和 b 是与气体性质有关的常数(见表 11-1)。

表 11-1 气体性质的有关常数

气 体	T_c/K	p_c/Pa	$a/\text{Pa}\cdot\text{cm}^6\cdot\text{mol}^{-2}$	$b/\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$	$p_d(T_k)/\text{Pa}$
$T_c < T_k \quad T_k = 288\text{K}$					
Ar	151	4.85×10^6	1.36×10^{11}	3.22×10^1	
CO	134	3.54×10^6	1.50×10^{11}	3.99×10^1	
He	5.1	2.29×10^6	3.43×10^{11}	2.37×10^1	
H ₂	33.1	1.29×10^6	2.46×10^{10}	2.66×10^1	
Kr	210	5.47×10^6	2.34×10^{11}	3.98×10^1	
CH ₄	190.5	4.63×10^6	2.27×10^{11}	4.28×10^1	
Ne	44.3	2.62×10^6	2.13×10^{10}	1.71×10^1	
NO	179	6.57×10^6	1.36×10^{11}	2.80×10^1	
N ₂	125.9	3.38×10^6	1.40×10^{11}	3.92×10^1	
O ₂	154.2	5.03×10^6	1.37×10^{11}	3.20×10^1	
$T_c > T_k \quad T_k = 288\text{K}$					
NH ₃	405.4	1.13×10^7	4.22×10^{11}	3.71×10^1	7.05×10^3
C ₂ H ₂	309	6.26×10^6	4.43×10^{11}	5.13×10^1	3.86×10^4
C ₆ H ₆	561.5	4.83×10^6	1.81×10^{12}	1.16×10^2	7.98×10^5
CO ₂	304.1	7.38×10^6	3.62×10^{11}	4.27×10^1	5.05×10^4
Hg	>1823	$>2.02 \times 10^7$	8.14×10^{11}	1.70×10^1	1.03×10^{-3}
NO ₂	431	1.00×10^7	5.33×10^{11}	4.43×10^1	7.51×10^2
SO ₂	430.2	7.86×10^6	6.76×10^{11}	5.65×10^1	2.79×10^3
H ₂ O	647	2.18×10^7	5.51×10^{11}	5.06×10^1	1.70×10^2
Xe	289.6	5.88×10^6	4.12×10^{11}	5.10×10^1	5.85×10^4

注: T_c —临界温度; T_k —测量温度; p_c —临界压力; $p_d(T_k)$ — T_k 时的饱和蒸气压

用压缩式真空规测量真实气体压力时,如果按照波义耳定律进行计算,将引起如下误差

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p}{RT} \left(\frac{a}{RT} - b \right) \quad (11-8)$$

式中 p ——被压缩后的气体压力;

R ——气体常数。

图 11-11 是一种改进型压缩式真空规,又称为摩塞尔—波尔兹(Moser-Poltz)规。此种规的测量下限可以延伸到 10^{-8}Pa 。

把这种规的水银面提升到毛细管小腔下端 R 处,再使水银稍微上升或下降,则水银面在 R 处可呈现出凸月面、平面、和凹月面三种情况。当水银面为平面时,就不会产生毛细压低值。但是完全调平水银面是困难的,所以还会有较小的毛细压低值。为了进一步消除这个残存的毛细压低值,这种规采用了两次压缩的方法来进行测量。在第一次压缩时的压缩体积为 V_1 ,第二次压缩时,压缩体积减小为 V_2 ,如果被测压力为 p ,则有

$$p = \frac{v}{V_1} (h_1 - h_r - h_a) \quad (11-9)$$

$$p = \frac{v}{V_2} (h_2 - h_r - h_a) \quad (11-10)$$

式中 v ——毛细管小腔体积;
 h_1 ——第一次压缩后粗比较管内水银面的高度;
 h_2 ——第二次压缩后粗比较管内水银面的高度;
 h_r ——毛细管小腔下端 R 处的高度;
 h_a ——水银面在小腔 R 处引起的毛细压低值。

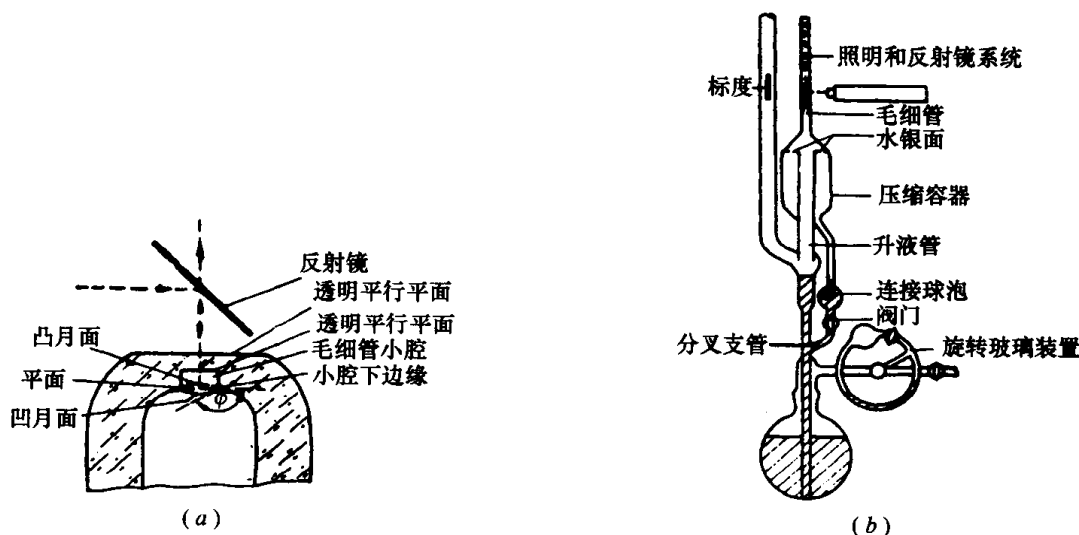


图 11-11 摩塞尔—波尔兹 (Moser-Poltz) 规
 (a) 毛细管顶端图; (b) 全图。

由式(11-9)和式(11-10)得

$$p = \frac{v}{V_1 - V_2} (h_1 - h_2) \quad (11-11)$$

由于此规结构复杂,制作工艺困难,测量重复性差,而且还需要采用精密的光学测量系统,致使它难以推广。有研究者对此规的误差源和重复性进行了许多研究,并对其光学测量系统进行了改进。

(二) 弹性变形真空规

弹性变形真空规是利用弹性元件随气压变化所产生的变形来测量压差的一种真空规。它的特点是:规管灵敏度与气体种类无关,对被测气体干扰小,可测腐蚀性气体和可凝蒸气的压力。此类规存在的主要问题是,金属弹性元件的蠕变现象和弹性系数的温度效应。

1. 布尔登规 (图 11-12)

布尔登规是一种用富有弹性的金属材料制成的椭圆形截面的空心管,全管弯成弧形,一端封死并与指针相连接,另一端与被测系统相连。当管内压力增高时,截面形状向圆形变化,使弯管向外扩张而拉动指针偏转。反之,当管内压力下降时,指针则朝相

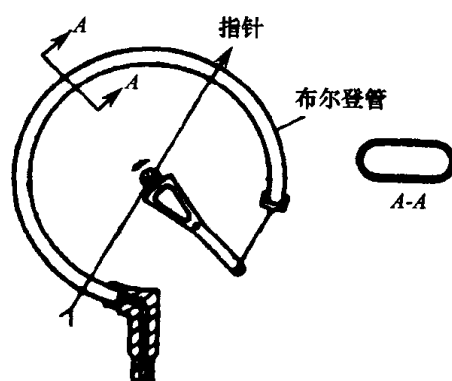


图 11-12 布尔登规

反方向偏转。

金属布尔登规主要用于测量高压，很少作为真空规使用。指示大气压以下的压力，表盘上用红线来标度，这种标度是很粗略的。

图 11-13 是用石英制成的布尔登规，空心的扁平石英管被绕成螺旋形，在封死的一端吊一个小镜，通过小镜用光杠杆的办法来测量布尔登管上下运动的距离，再求得压差值。此规灵敏度较高，可检测出 10Pa 的压差。

2. 波纹管规

此规的波纹管一端封死，另一端与被测系统相连，当管中压力变化时，波纹管内外的压力差产生变化，使得波纹管随之伸缩，规的灵敏度与波纹管的壁厚和形状有关。波纹管材料的弹性系数随温度变化而变化是此规的主要误差源。

图 11-14 是用光学方法检测波纹管变形的波纹管规，其测量下限可达 10^{-2} Pa。

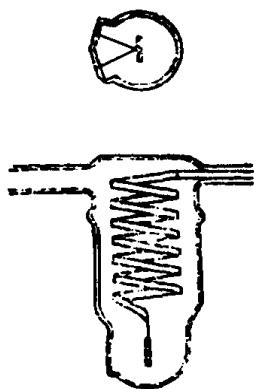


图 11-13 石英布尔登规

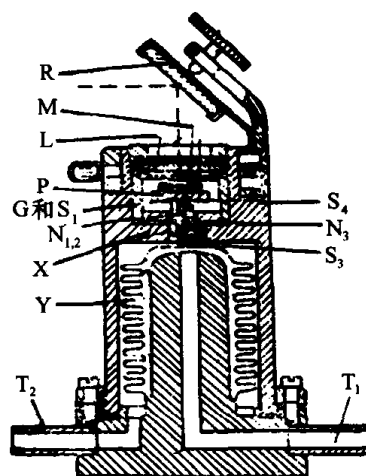


图 11-14 光学法检测型波纹管规

R—反射镜；M—平面镜；L—透镜；P—镜座；
G, S₁ S₃₋₄—槽；N₁, N₂, N₃—尖针；
X—支架；Y—波纹管；T₁, T₂—导管。

图 11-15 是一种用玻璃制作的波纹管规。当波纹管伸缩变化时，毛细管中的水银位置也随之变化。此种结构可提高仪器灵敏度，当压力从较高的真空度变到大气压时，水银位移可达 600mm。此规的缺点是对温度变化太敏感，并要求恒温。

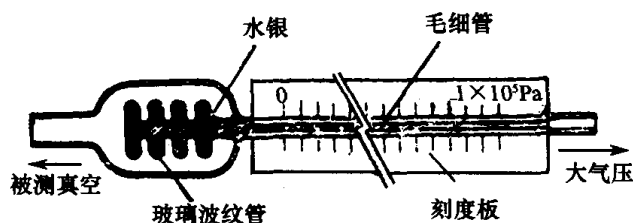


图 11-15 具有毛细管结构的波纹管规

3. 薄膜真空规

用金属弹性薄膜把规管分隔成两个小室，一侧接被测系统，另一侧作为参考压力室。当压力变化时薄膜随之而变形，其变形量可用光学方法测量，也可转换为电容或电感量的变化用电学方法来测量，还可用薄膜上粘附的应变规来进行测量。

近年来，电容薄膜规的发展很快，被广泛应用于科研和工业领域。电容薄膜规分为两种类

型:一种将薄膜的一边密封为参考真空,成为“绝压式”电容薄膜规;另一种是薄膜的两边均通入气体,成为“差压式”电容薄膜规。电容薄膜规具有卓越的线性、较高的测量精度和分辨率。单个传感器的测量范围可覆盖 5 个数量级的压力区间,短期稳定性优于 0.1%,长期稳定性(一年)优于 0.4%。电容薄膜规的灵敏度与气体种类无关,可测蒸气和腐蚀性气体的压力,结构牢固,使用方便,还可作为粗低真空的副标准和传递标准。

电容薄膜规的基本结构如图 11-16 所示。它由两个结构完全相同的圆形固定电极和一个公用的活动电极组成。活动电极薄膜将空间分成互相密封的测量室和参考室,固定电极和活动电极薄膜构成差动电容器并作为电桥的两个桥臂。当活动电极处于中间位置时,两个电容器的电容量相等,一旦活动电极由于压差作用偏离中间位置时,则一个电容器的电容增加而另一个电容器的电容减小,由于电容变化造成电桥不平衡,因而产生输出电压,这个电压经过放大器放大后,由检波器转换成直流电压进行测量。不同的输出电压对应于不同的压力,电容薄膜规就是利用这样的原理达到测量压力的目的。

电容薄膜规的压力测量范围与膜片的厚度、直径、材料、膜片的张力等有关,目前可供选择的电容薄膜规包括满量程 13.3Pa、133Pa、1.33kPa、13.3kPa、133kPa、1.33MPa 和 3.32MPa、的传感器,可覆盖的压力范围为 $10^{-3}\text{Pa} \sim 10^6\text{Pa}$ 。

4. 压阻式真空规

压阻式真空规的传感器为压阻式绝对压力传感器。它是利用集成电路的扩散工艺将四个等值电阻做在一块硅片薄膜上,联接为平衡电桥。硅膜片利用机械加工和化学腐蚀方法制成硅环,然后用金硅共熔工艺或用其他特殊工艺将硅环与衬片烧结在一起。硅环膜片内侧为标准压力(约 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$),外侧为待测压力。结构如图 11-17 所示。当硅膜片外侧的压力变化时,由于硅的压阻效应使电桥四个臂的阻值发生变化,电桥失去平衡,得到对应于待测压力的电压信号。此信号经过放大器、控制单元、显示单元等,显示出相应的压力数值。此规的测量范围为 $10^5\text{Pa} \sim 10\text{Pa}$ 。

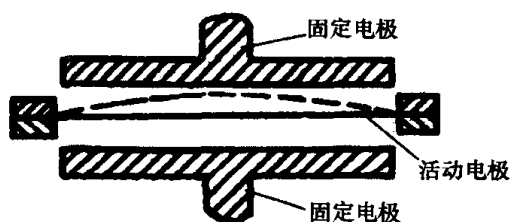


图 11-16 电容薄膜规结构示意图

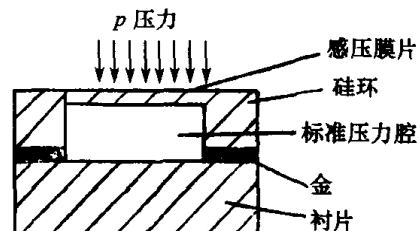


图 11-17 压阻式绝对压力传感器结构示意图

北京真空仪表厂采用压阻式绝对压力传感器生产的 HLP-03 型低真空计,其原理方框图如图 11-18 所示。

仪器的测量范围为 $1.1 \times 10^5\text{Pa} \sim 10\text{Pa}$,满量程的精度为 0.5%。仪器的特点是线性测量精度高,与被测气体种类无关,量程自动转换。

(三) 热传导真空规

1. 原理

将规管中的一根张紧的金属丝通以电流 I 加热(图 11-19),在热平衡时,输入的能量为辐射传热量(Q_R)、引线传热量(Q_L)和气体传热量(Q_C)之和,即

$$RI^2 = Q_R + Q_L + Q_C \quad (11-12)$$

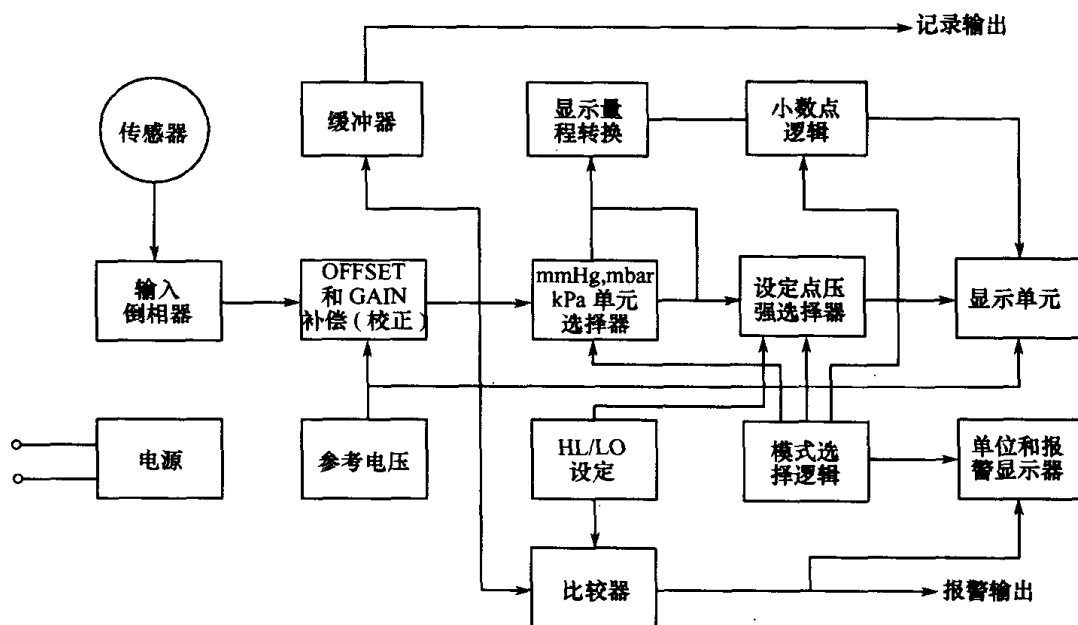


图 11-18 HLP-03 型低真空计原理方框图

$$Q_R = K_R A (\epsilon T^4 - \epsilon_0 T_0^4) \quad (11-13)$$

$$Q_L = K_L (T - T_0) \quad (11-14)$$

式中 R ——金属丝电阻；

T ——金属丝热力学温度；

T_0 ——规管壁热力学温度；

K_R ——斯蒂芬-玻耳兹曼常数 [5.67×10^{12} W/(cm²·K⁴)]；

A ——金属丝表面积；

ϵ ——金属丝热辐射率；

ϵ_0 ——规管壁热辐射率；

K_L ——与引线材料和结构有关的常数。

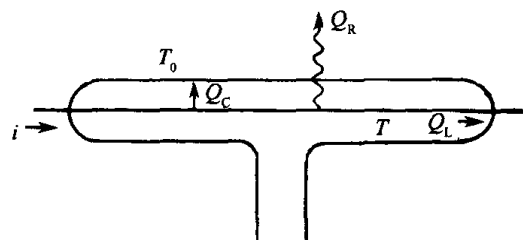


图 11-19 热传导真空规原理图

从式(11-13)和式(11-14)可知, Q_R 和 Q_L 与气体压力无关, 而 Q_C 则不同。在高压时, 气体分子自由程 $\lambda \ll$ 管径 d , 气体的传热量 Q_C 为

$$Q_C = -K_C \frac{\partial T}{\partial z} \quad (11-15)$$

$$K_C = \frac{1}{3} \rho v \lambda c_V \quad (11-16)$$

式中 K_C ——高压力下气体的热传导系数；

ρ ——气体密度；

v ——气体分子速度；

c_V ——比定容热容。

因式(11-16)中的 ρ 与压力 p 成正比, λ 与压力 p 成反比, 所以 K_C 与压力 p 是无关的, 式(11-15)可写成

$$Q_C = B(T - T_0) \quad (11-17)$$

式中 B ——常数。

从式(11-17)可知,在高压时,由于 Q_C 与压力 p 无关,所以不能利用气体热传导来测量气体压力(热传导规的测量上限也由此因素决定)。

在低压时, $\Lambda \gg d$, 分子间无碰撞, 气体热传导仅与 p 有关, 则

$$Q_C = \alpha \Lambda p (T - T_0) \quad (11-18)$$

式中 α ——热适应系数;

Λ ——自由分子的热传导系数,

$$\Lambda = \frac{c_V + \frac{1}{2}R}{\sqrt{2\pi MRT'}} \quad (11-19)$$

式中 R ——气体常数;

T' —— T 与 T_0 的平均值;

M ——气体的摩尔质量。

因此,可利用低压下 Q_C 与压力 p 成正比的关系来测量气体的压力。又由于 Λ 与 \sqrt{M} 成反比, α 和 c_V 与气体种类有关, 所以热传导真空规的灵敏度因气体种类而异。

在低—高压之间的过渡区域, Q_C 与压力 p 之间的关系如图 11-20 所示, 属于从式(11-18)的自由分子热传导的情况逐渐过渡到式(11-17)的与压力无关的热传导的情况。

式(11-18)中的热适应系数 α 定义为

$$\alpha = \frac{T_g - T_1}{T_2 - T_1} \quad (11-20)$$

式中 T_1 ——气体分子温度;

T_2 ——表面温度;

T_g ——气体分子(T_1)与表面(T_2)碰撞后所具有的温度。

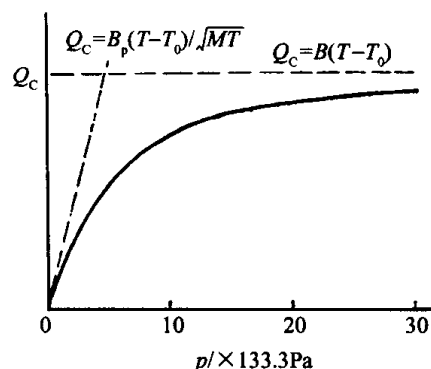


图 11-20 $Q_C - p$ 曲线

热适应系数 α 与金属丝的材料性质和表面状态有关, 也与气体的种类和温度有关。清洁表面的 α 值要比不清洁表面的 α 值为小。对于经常暴露在高压力下的规管, 由于热丝表面具有吸附层, 所以 α 值较大。 α 值对热传导真空规的精度和稳定性的影响很大。表 11-2 给出了一些气体-金属配组的热适应系数。

表 11-2 一些气体-金属配组的热适应系数 α

气 体	在真空中经过闪烁		表面具有吸附层		
	Pt	W	Pt	Ni	W
H ₂	0.11~0.20	—	0.287	0.294	0.357
D ₂	—	—	0.377	0.387	0.454
N ₂	—	—	0.816	0.824	0.868
O ₂	0.42	—	0.853	0.862	0.905
CO ₂	—	—	—	—	—
CO	—	—	0.772	—	—
He	0.03	0.057	0.368	0.385	0.470
Ne	—	0.07	0.716	0.732	0.802
Ar	0.55	—	0.925	0.935	0.967
Hg	1.00	—	—	—	—

热传导真空规的测量下限主要取决于 Q_R 和 Q_L 的大小, Q_C 则不存在理论下限。

热传导式真空计有好几种类型,最常用的是热偶真空计和电阻真空计,也是目前测量粗低真空的主要工具。

2. 热偶真空规

普通型热偶真空计分为长丝和短丝两种,长丝热偶的加热电流约在 $90\text{mA} \sim 150\text{mA}$,短丝热偶的加热电流约在 $28\text{mA} \sim 30\text{mA}$,测量范围一般在 $4 \times 10^2 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-1} \text{Pa}$,带温度补偿的定温式热偶真空计的测量范围 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 。图 11-21 给出最常用国产 DL-3 型热偶规的结构图。F 是加热丝(铂丝),J 是热偶(康铜—镍铬丝)。多数热偶规是按定流型的方式工作的,即加热电流 i 为常数。因加热丝 F 的温度是随压力 p 而变化的,所以可用热偶 J 来测量热丝温度,此时输出信号为热电势 E 。图 11-22 是热偶规的 p - E 校准曲线。

热偶规的缺点是热惰性、稳定性差,精度不高。但它结构简单,使用方便。

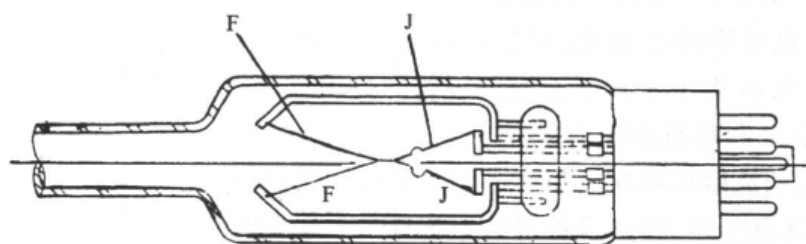
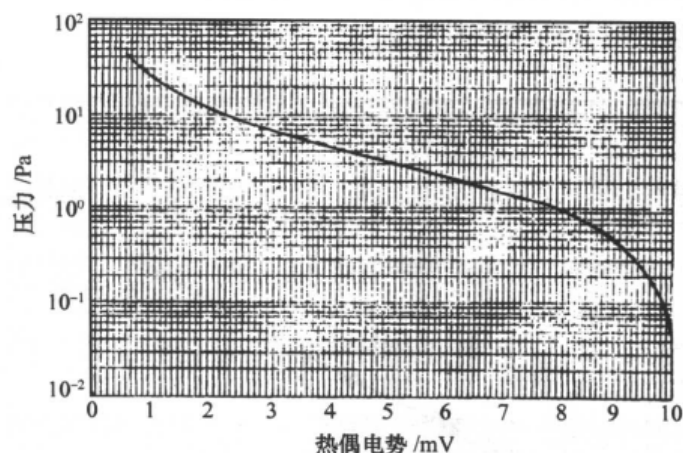
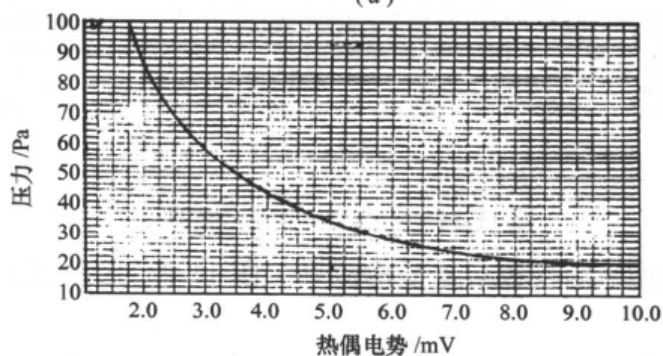


图 11-21 DL-3 型热偶真空规结构



(a)



(b)

图 11-22 热偶规校准曲线

(a) $10^{-2} \text{Pa} \sim 10 \text{Pa}$; (b) $10 \text{Pa} \sim 100 \text{Pa}$ 。

3. 电阻真空规(热阻真空规)

电阻真空规是皮拉尼在 1906 年发明的,故又称皮拉尼规。这种规的热丝温度是随压力而变化的,由于温度的改变导致热丝电阻的变化,用测量电阻的变化来测量真空度。此规要求热丝具有大的电阻温度系数,以提高灵敏度;还要求热丝具有良好的化学稳定性,以减少零点漂移。

表 11-3 列出了一些金属的电阻温度系数。

表 11-3 金属电阻温度系数

	Ag	Au	Cu	Fe	Mo	Re	Ni	Pt	Ta	W	Cr	Pt-Ir	Pt-Rh
电阻温度系数/ $\times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	4.1	4.0	4.3	6.2	4.3	3.9	6.3	3.9	3.5	4.6	0.1	2.0	1.4
电阻率(室温)/ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1.63	2.31	1.73	10.0	5.3	19.3	11.8	11	13.1	5.3	109	32	18.3

定温型电阻规的工作原理是,保持热丝温度不变,当压力变化时,热丝的加热功率随之变化,调节电阻 R_v ,以保持惠斯登电桥平衡(电流表 G 指示零),从而保持规管热丝温度恒定。借助电阻值的改变来测量真空度(图 11-23)。

定温型电阻规的灵敏度稳定,其测量上限压力可到 10^5 Pa ;但由于电表精度、室温变化、零点漂移等因素影响,此类电阻规的测量下限约为 10^{-1} Pa ,定温型电阻规的特点是量程宽,反应时间快,但是自动维持热丝温度恒定的电子学线路比较复杂。图 11-24 是定温型电阻规的校准曲线。

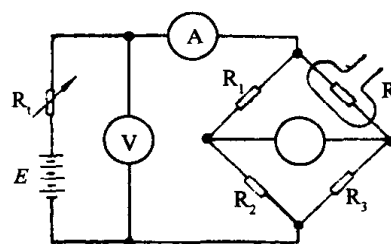


图 11-23 定温型电阻规测量原理图

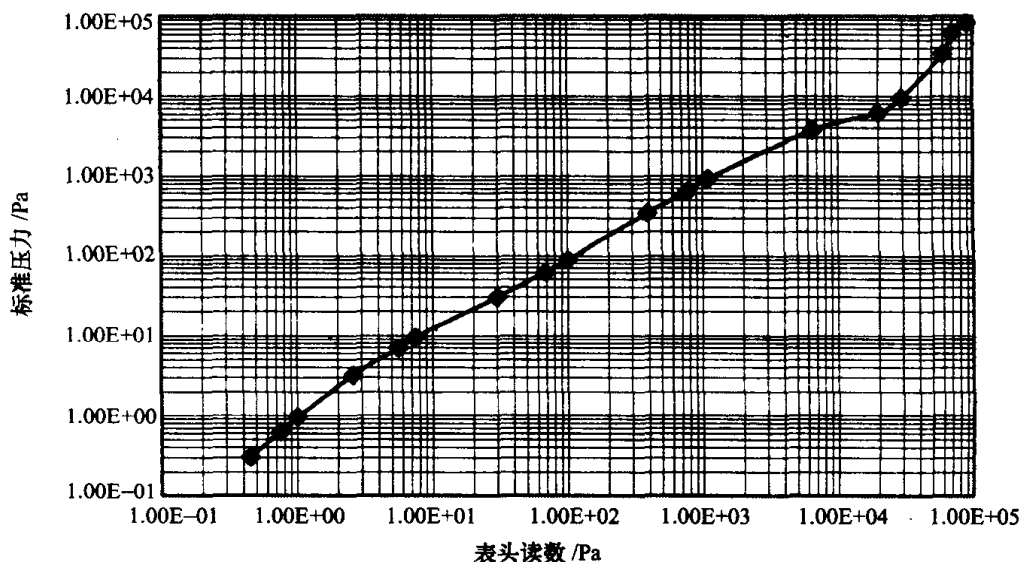


图 11-24 定温型电阻规校准曲线

定电压型和定电流型电阻规没有本质的区别。图 11-25 中 R_1 是电源的内阻。 R 是规管热丝电阻。

如果 $R_1 \ll R$,就是定电压型。当压力增大时,气体热传导增大,导致热丝温度下降、电阻 R 下降。由于电压不变, R 下降使电流 I 变大,使丝温下降稍稍变缓,这样灵敏度虽然变坏,但可拓宽量程。

如果 $R_1 \ll R$, 就是定电流型。当压力增大时, 气体热传导增大, 导致热丝温度下降和电阻 R 下降, 但是此时电流 I 保持不变。与定电压型相比, 定电流型丝温下降更快, 故其灵敏度较高。

这类电阻规的测量线路与定温型电阻规相同(图 11-23), 但此时惠斯登电桥是工作在非平衡状态, 输出信号由电流表 G 指示。这类电阻规使用方便, 已被广泛应用。在较高的压力下, 由于热丝温度下降过多, 使得这类电阻规的测量上限仅为 0.1Pa 左右。又由于辐射传热量 (Q_R)、引线传热量 (Q_L)、热丝表面状态的变化、规管壁温度波动和电流表灵敏度不高等因素的影响, 这类电阻规的测量下限约为 10^{-1}Pa 。如能稳定规管壁温度或采用结构相同的补偿规管, 则测量下限可扩展到 10^{-2}Pa 。

图 11-26 给出电阻规的定温特性和定电流特性。该规玻璃泡壳内径为 15mm , 热丝为直径 $25\mu\text{m}$ 长 100mm 的铂金丝。

对热传导规的改进和发展, 主要在扩展量程和提高反应速度两个方面。

例如, 一种单晶半导体的热传导规采用了微电子学的制造工艺, 在薄的硅单晶片上用固态扩散法形成电阻网络。这种电阻网络的表面积较大, 性能参数稳定, 使此规量程扩展为 $10^5\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$, 克服了一般热敏电阻规表面积小、性能参数不稳定和制作工艺困难等缺点。

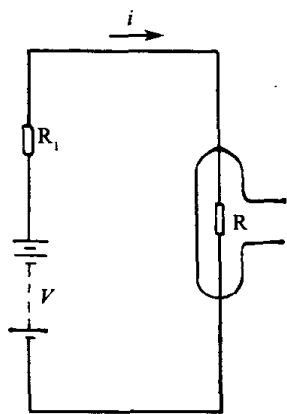


图 11-25 定电压型和定电流型电阻规原理图

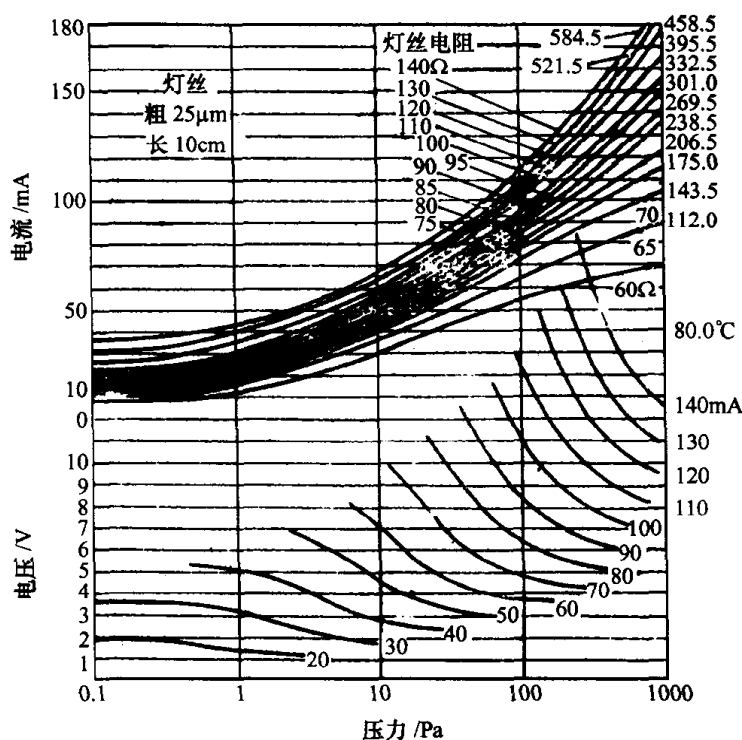


图 11-26 电阻规的定温特性和定电流特性

又如一种更新的超低噪声皮拉尼规, 其量程约 $1\text{Pa} \sim 6.7 \times 10^{-7}\text{Pa}$, 压力和输出讯号呈线性关系, 对氮气的灵敏度为 0.029V/Pa , 反应时间为 10s (99% 稳定值), 漂移为 $6.7 \times 10^{-7}\text{Pa/min}$ 。此规主要特点是: ①采用镀金的钨丝为热丝, 热丝的直径为 0.01mm , 长为 100mm 。热丝点焊在铂环上, 铂环紧套在与玻璃封接的钼引线上。为了消除镍—钼间大的热电动势, 所以管外引线不用镍, 而选用钼—银—铜丝连接。热丝温度为 220°C ; ②测量用规管和补偿用规管需经仔细挑选, 使两者的结构和性能尽可能一致。两支规管均放入 300K 的恒温水浴中, 再用泡沫聚苯乙烯盒把规管(包括水浴)和电桥电路包裹起来; ③采用非常灵敏的电子检流计进行连续记录。

(四) 辐射计型真空规

1. 原理

将两块间距为 d 的平行板 A 和 B 放置在低压气体中, 如热板 A 温度为 T_1 , 冷板 B 温度为 T_2 , 气体温度为 T (如图 11-27 所示), 则在两板上会产生一对方向相反的作用力, 作用力的大小与气体压力 p 成正比, 这就是有名的辐射计效应。1910 年克努曾利用此效应制成了辐射计型真空规, 故又称克努曾规。

如果假定: ① d 小于平板的线性尺寸; ② d 小于气体的平均自由程 $\bar{\lambda}$; ③ $T_2 = T$; ④ 热适应系数 $\alpha = 1$, 那么从气体运动论可以导出

$$f = \frac{p}{2} \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right) \quad (11-21)$$

式中 f ——两板单位面积上的作用力。

从式(11-21)可知, f 值与气体种类无关, 也与规的结构无关, 仅与两板的温度有关, 并正比于气体压力, 故克努曾规基本上是一种绝对真空规。

由于式(11-21)要求满足上述四个假定条件, 而实际上这是很难完全满足的, 所以要把克努曾规做成高准确度的绝对规并非易事。

如热适应系数 $\alpha \neq 1$, 则式(11-21)变为

$$f = \frac{p}{2} \frac{\alpha_1(2 - \alpha_2)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1\alpha_2} \left[\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right] \quad (11-22)$$

$$\alpha_1 = \frac{T'_1 - T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\alpha_2 = \frac{T'_2 - T_1}{T_2 - T_1}$$

式中 T_1 和 T_2 ——两板温度;

T'_1 和 T'_2 ——与两板碰撞后的气体分子的温度。

此外, 热适应系数还与气体种类和板的表面状态有关。采取适当的表面处理, 如将表面发黑, 可使热适应系数 $\alpha \rightarrow 1$ 。

克努曾规的优点是规本身对被测气体干扰小。但是由于它的结构脆弱, 对外部振动敏感, 所以没有多大实用价值。长期以来对此规所进行的研究工作主要集中于理论探讨、误差修正和结构改进等, 目的是探讨它作为真正的绝对规的可能性。

2. 规管结构

箔片型克努曾规(图 11-28)测量极板间作用力 f 的最简便的仪器是金箔验电器, 箔的自身质量要和 f 相匹配。用显微镜读出可动箔片的偏倾, 并作出此偏倾量与 f 之间的校准曲线。此法虽简便, 但不够精确, 仅可测量低到 10^{-3} Pa 的压力。

平板型克努曾规(图 11-29)这种规的两块热板 H 是通电流加热的, 回转板 V 则用细丝悬吊起来, 丝上附有平面镜 M。在辐射计力作用下使 V 板产生偏转, 在平衡条件下, 悬丝的扭转力矩是与 V 板的转动力矩相等的。因此可用光学的方法测出平面镜 M 的偏转角, 计算出气体压力。

平板型结构的一个缺点是当 V 板偏转时, 两板之间的距离 d 变大, 这就可能破坏 d 应小于

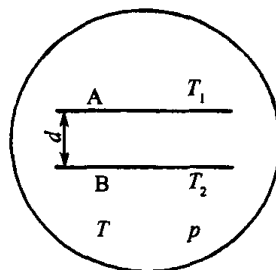


图 11-27 辐射计效应简图

平板线性尺寸的条件。

圆筒形克努曾规(图 11-30) 这种规的涡轮状回转圆筒 R 是用细丝悬吊起来的,在回转圆筒内部装有热筒 H。当热筒 H 加热时,在辐射计力作用下会使涡轮状圆筒 R 旋转,两圆筒之间的距离则可保持不变,这是圆筒结构的一个优点。圆筒型克努曾规还具有高灵敏度和能小型化等优点。

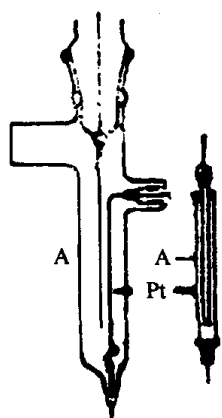


图 11-28 箔片型克努曾规
A—可动片; Pt—加热片。

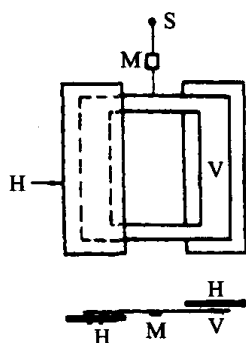


图 11-29 平板型克努曾规
H—热板; V—回转板;
M—小镜; S—吊丝。

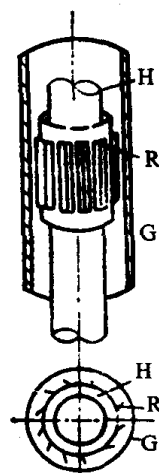


图 11-30 圆筒型克努曾规
H—热筒; R—涡轮状回转圆筒;
G—玻璃管。

偏转角的计算公式如下

$$\theta = Kp \left[\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right] \quad (11-23)$$

式中 θ ——偏转角;
 K ——常数。

此规在 $1\text{Pa} \sim 10^{-5}\text{Pa}$ 的压力区间内,偏转角 θ 与压力 p 之间具有线性关系。

3. 测量范围

当热板加热到 200°C 时,在热辐射的作用下使冷板偏转的效应称为光压效应。而光压效应是与气体压力无关的,因此这种效应限制了克努曾规测量更低的压力(测量下限约为 10^{-5}Pa)。

随着压力的增高,虽然传递热量的气体分子数增多了,但是气体分子之间的碰撞次数也增多子,来自热板的气体分子在飞向冷板的过程中,会与其它气体分子产生多次碰撞而失去能量,使得热分子对冷板的作用力减小。这种效应限制了用克努曾规测量更高的压力,故仪器的测量上限约为 1Pa 。

在工作压力区间内,辐射计力 f 与气体压力 p 之间的关系,可用如下经验公式来表示

$$f = \frac{1}{\frac{a}{p} + \frac{p}{b}} \quad (11-24)$$

式中 a 和 b ——常数。

在低压时,式(11-24) 中的 p/b 项可忽略, f 与 p 成正比

$$f = p/a \quad (11-25)$$

在高压时,式(11-24)中的 a/p 项可忽略, f 与 p 成反比:

$$f = b/p \quad (11-26)$$

从低压到高压的过渡区间(约在 1Pa 附近), f 与 p 之间已严重偏离线性关系(约 10%),而在 10^2 Pa 附近出现峰值,与此峰值对应的压力值与两板间距离有关,也与气体种类有关。

克努曾规的线性量程范围约为 $1\text{Pa} \sim 10^{-5}\text{Pa}$ 。

(五) 粘滞性真空规

1. 原理

气体的粘滞系数 η 用下式表示

$$\eta = C_1 n \bar{v} \bar{\lambda} \quad (11-27)$$

式中 C_1 ——常数;

n ——气体分子密度;

\bar{v} ——气体分子平均速度;

$\bar{\lambda}$ ——气体分子平均自由程。

在高气压下,由于 $\bar{\lambda}$ 与压力 p 成反比,而 n 与压力 p 成正比,所以 η 仅是气体温度的函数,而不随气体压力变化。这时如将两块相距为 d 的平板放置在气体中,并使一板静止、另一板以速度 u 运动,则由于气体具有粘滞性,动板通过气体会对静板作用一个切向力 F ,即

$$F = \eta \frac{u}{d} \quad (11-28)$$

此时 F 与气体压力无关。

在低气压下,气体分子之间的碰撞可以忽略。此时,在两平板之间气体分子的自由程受两板间距 d 的限制。故式(11-27)中的 $\bar{\lambda}$ 应该用 d 来代替,则有

$$\eta = C_1 n \bar{v} d = C_2 p \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (11-29)$$

$$F = C_3 u p \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (11-30)$$

式中 C_2 和 C_3 ——常数;

M ——气体分子量;

T ——气体分子温度(K)。

从式(11-30)可知,此时 F 与压力 p 成正比。粘滞性真空规就是利用式(11-30)的关系来测量气体压力的。

粘滞性真空规对被测气体干扰小,可测量蒸气和腐蚀性气体的压力,规管灵敏度与气体种类有关。

2. 规管结构

(1) 旋转型粘滞性规这类规中最典型的结构是旋转圆盘型粘滞规。图 11-31 中,下圆盘 A 是一个由钨轴 H 支撑的铝的薄片,上圆盘 C 为 $25\mu\text{m}$ 厚的云母片,由直径为 $2\mu\text{m}$ 、长为 15mm 的石英丝悬吊起来, J 是小镜。小型永久磁铁 NS 与 H 轴连成一体,用线圈 G 形成的旋转磁场使圆盘 A 旋转,转速为 $1000\text{r/min} \sim 10000\text{r/min}$ 。盘 A 通过气体对盘 C 作用一个力偶矩,此力偶矩与压力成正比。用光学方法测量小镜 J 的扭转角,就可计算出压力,则有

$$\theta = \frac{K \tau^2 r^4}{I} p \omega \left(\frac{M}{T} \right)^{1/2} \quad (11-31)$$

式中 θ ——小镜 J 的扭转角;
 K ——与气体性质和动量传递适应系数有关的常数;
 τ ——振荡周期;
 r ——旋转圆盘 A 的半径;
 I ——圆盘 C 的转动惯量;
 ω ——旋转角速率。

旋转圆盘粘滞性规的量程为 $10\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。

(2) 衰减型粘滞性规在低压气体中,用细丝悬吊的圆盘作水平摆动时,会因气体的阻尼作用使圆盘摆动的振幅逐渐衰减,其运动方程如下

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + (R_a + R_i) \frac{d\theta}{dt} + K\theta = 0 \quad (11-32)$$

式中 θ ——摆动角;
 I ——转动惯量;
 R_a ——气体粘滞性产生的阻尼;
 R_i ——细丝本身引起的阻尼;
 K ——常数。

圆盘振幅衰减一半所需的时间 t_r 与压力 p 的关系为

$$p\sqrt{\frac{M}{T}} = \frac{A}{t_r} - \frac{R_i}{B} \quad (11-33)$$

式中 A 和 B ——常数。

石英丝粘滞规是此类规中最简单的结构形式。图 11-32 中,石英丝的直径为 0.13mm ,长为 70mm ,其一端固定在玻璃壳上,敲击玻璃壳就可使石英丝振动。用光学方法测量半衰期 t_1 ,在 10^{-2}Pa 时, t_1 约为 200s 。石英丝粘滞性规的量程约为 $10\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。特别适于测量蒸气和腐蚀性气体。但是此规操作不方便,半衰期过长,结构脆弱,对外部振动干扰敏感,故不适宜在工业上使用。

磁悬浮转子粘滞性规是一种新型的衰减型粘滞性规。虽然它的原理早在 1937 年就由赫尔姆斯(Helmes)进行了描述,但直到 1973 年 Fremerey 应用一小尺寸永久磁体悬浮才真正完成了磁悬浮转子粘滞性规的实用性,通过在转子频率信号测量方面的一些改进,于 1979 年正式投入商业使用。磁悬浮转子粘滞性规的结构如图 11-33 所示,规管内有一个悬浮在真空中自由旋转的直径约 4.5mm 的金属小球(转子),规管外有一对永久磁体和三组电磁线圈。转子受到的重力和永久磁体所施加的磁力相互抵消,但这种悬浮不稳定,因此一组垂直布置的电磁线圈用以调节转子的悬浮位置,使转子悬浮在稳定位置。另两组水平对称布置的正交电磁线圈采用相移 90° 的双相电源供电,以形成旋转磁场,使转子加速到 410Hz 左右。当旋转磁场停止后,转子在真空中自由旋转,在气体分子的作用下转子转速将衰减,转子转速的衰减率通过一组旋转电磁线圈来测量,磁悬浮转子粘滞性规就是利用转子转速的相对衰减率与气体压力成正比的关系来测量压力的。

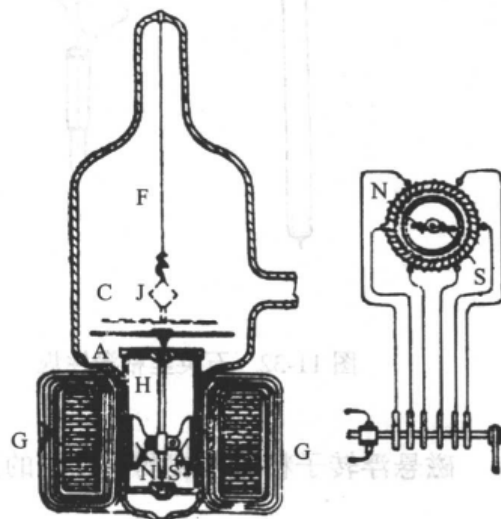


图 11-31 旋转圆盘粘滞性规

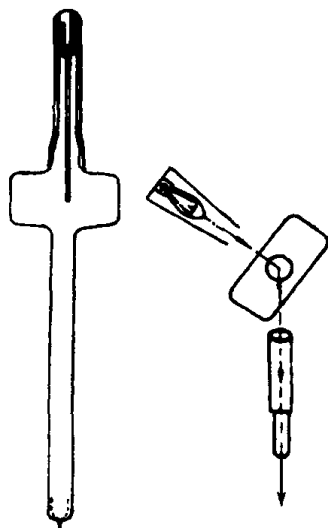


图 11-32 石英丝粘滞性规

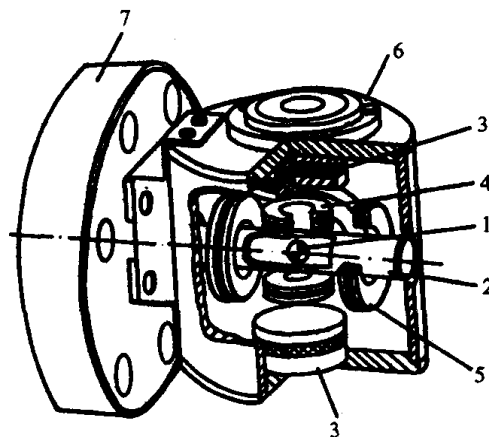


图 11-33 磁悬浮转子粘滞性规

1—转子；2—管壳；3—永久磁体；
4—转子垂直稳定线圈；5—转子旋转线圈；
6—水平仪；7—连接法兰。

磁悬浮转子粘滞性规测量压力的基本公式为

$$p = \frac{\pi \bar{v} \rho d}{20 \sigma} \left(- \frac{\dot{\omega}}{\omega} \right) \quad (11-34)$$

式中 p ——压力；
 \bar{v} ——气体分子的平均速度；
 ρ ——转子材料的密度；
 d ——转子的直径；
 σ ——切向动量传递系数；
 $\left(- \frac{\dot{\omega}}{\omega} \right)$ ——转子转速的相对衰减率。

式(11-34)在分子流条件下成立,随着气体压力的增大,气体的性质将从分子流向粘滞流过渡,式(11-34)不再适用,磁悬浮转子粘滞性规的测量范围约为 $1\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。

磁悬浮转子粘滞性规在气体分子存在的条件下工作时,转子转速将衰减,其原因有两个,一是转子的动量传递给与转子发生碰撞的分子(分子阻尼),二是转子磁矩的旋转分量产生的涡旋电流引起的损耗及杂散磁场产生的阻尼(残余阻尼)。考虑这两种阻尼,式(11-34)应修正为

$$p = \frac{\pi \bar{v} \rho d}{20 \sigma} \left[- \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right) + \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right)_0 \right] \quad (11-35)$$

第一种阻尼是测量压力的依据,第二种阻尼与气体的压力无关,测量时应扣除。式(11-35)中第一项代表两种阻尼的总和,第二项代表与压力无关的残余阻尼,二者抵消后就是气体分子引起的阻尼。因此实际测量时应采用式(11-35),这就要求在压力测量前准确确定残余阻尼。测量残余阻尼要在足够高的真空条件下进行,这时残余阻尼相对于分子阻尼成为主要的,分子阻尼可以忽略。

磁悬浮转子粘滞性规的转子无需机械悬吊,内部没有电子、离子、热和辐射产生,测量时不改变气体成分和压力,规壳体积小(仅几毫升),吸放气现象可以忽略,无抽气效应,这些显著优

点使磁悬浮转子粘滞性规获得越来越多的应用。该规还具有很好的稳定性,是目前中高真空范围内性能最为优良的一种真空规,经常作为参考标准对其它真空规进行校准或作为真空标准之间比对的传递标准。

(3) 谐振型粘滞性规此类规的早期结构是在规管的垂直方向安置一根张紧的细丝,当细丝在谐振频率下振动时,气体的阻尼效应会使细丝的振幅衰减,如采用一驱动信号使细丝维持等幅振荡,则通过测量驱动信号的大小就可以求得气体压力。

图 11-34 是一种称为“Reva”型的粘滞性规。把放置在永久磁铁 2 的缝隙间的金属丝 3 通以交流电,并使丝振动,随着压力的增减,要维持丝的振幅不变,丝中电流需随之增减,借此来测量真空度。此规量程为 $10^5\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 。但最常用的测量范围是 $10\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 。在压力区间内,规的输出信号与压力 p 间呈线性关系。

另一种谐振型粘滞性规是一个由石英晶体组成的振荡系统。借助电子学反馈技术,当压力改变时,要维持晶体在等幅谐振下工作,则必须改变驱动信号的大小,借此达到测量的目的。

振动薄膜规是一种更先进的谐振型粘滞性规(如图 11-35 所示)。

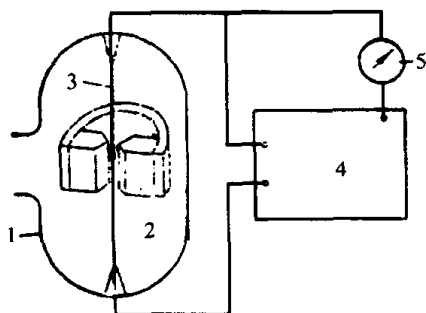


图 11-34 Reva 型粘滞性规

1—外壳; 2—磁铁; 3—金属丝; 4—电源; 5—电表。

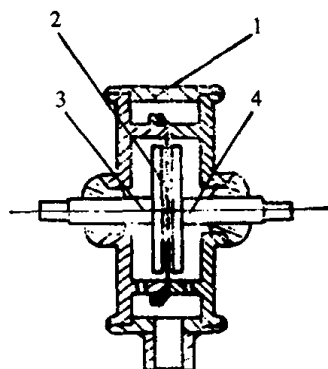


图 11-35 振动薄膜规

1—外壳; 2—薄膜; 3—驱动电极; 4—测量电极。

振动薄膜规的外壳直径为 25.5mm , 两个对称电极的直径均为 15mm , 薄膜厚度为 $3\mu\text{m}$, 两侧的电极与薄膜之间距离为 $70\mu\text{m}$ 左右, 在两电极上同时加有直流偏置电压 V_s (薄膜接地), 当驱动电极上叠加一个频率与薄膜的固有频率相同的交流电压时, 在静电力作用下薄膜会产生谐振。因气体的阻尼效应, 薄膜振幅会随压力而变化, 并引起振膜与测量电极之间的电容的变化, 从而导致测量电极输出一个随压力而变化的交流电压, 借以指示压力。

此外, 还可以用改变驱动电压大小, 维持振膜振幅不变的方法, 来测量气体压力。驱动电压与气体压力的关系如下:

在低压力时

$$V_1 = \frac{32\beta_0 X_p^2 \alpha_0}{9\epsilon\eta\omega r_p^2 V_s} p^n \quad (n = 1) \quad (11-36)$$

在高压力时

$$V_1 = \frac{16X_p^3 \alpha_0}{9\epsilon\eta\omega r_p^2 V_s} p^n \quad (1 < n < 2) \quad (11-37)$$

式中 V_1 ——交流驱动电压幅值;

r_p ——电极半径;

- X_p ——薄膜与电极间距;
 α_0 ——振膜平均振幅;
 ϵ ——介电常数;
 β ——气体动量传输系数;
 ω ——振动的角频率;
 η ——气体粘滞系数。

从式(11-36)和式(11-37)可知,当维持振膜的振幅不变时,驱动电压幅值 V_1 可用来指示气体压力。在低压力时, V_1 与压力 p 成正比;在高压力时, V_1 与 p^n 成正比($n \approx 1.4$)。

在更高压力时,由于规中存在声学谐振和薄膜振荡模式的跳变,甚至由于气体粘滞性过大而使薄膜不能起振,从而限制了振膜规测量更高的压力。另一方面由于薄膜自身的内摩擦损耗和电子线路的静电损耗,限制了振膜规测量更低的压力。振膜规的量程约为 $3.3 \times 10^4 \text{Pa} \sim 10^{-2} \text{Pa}$ 。

图 11-36 是振膜规的自动闭环电路图。

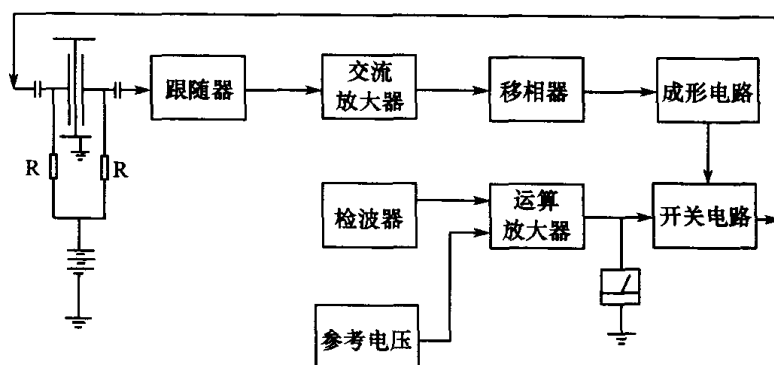


图 11-36 振动薄膜规闭环电路方块图

振动薄膜规具有量程宽、精度高($\leq \pm 2\%$)、反应快、结构牢固等特点,但由于结构复杂、制作工艺困难等原因,各规管特性之间零散性较大。因此要求每个规管与电子线路配套,逐台进行校准,这给成批生产和在工业上大量使用带来一定困难。

(六) 电离真空规

1. 概述

在低压力气体中,气体分子被电离所生成的正离子数通常是与气体分子密度成正比的,利用此关系可制成各种类型的电离真空规。

使气体分子电离有各种方法。例如可采用在电场中或在电磁场中被加速的电子去轰击气体分子使其电离,也可采用从放射性物质中放射出的具有一定能量的粒子(α 粒子或 β 粒子)去轰击气体分子使其电离等。

在真空测量中,电离真空规是最主要的一种规型。不同类型的电离真空规配合使用能够测量的压力范围,可以从大气压起直至目前所能测量的最低压力。在超高真空和极高真空区域中,电离真空规是最实用的规型。

2. 圆筒型电离规

这是在 1916 年最早发明的一种电离规。

在图 11-37 中,规管中心热阴极 F 的电位为零,栅极 G 的电位 V_g 为正,收集极 C 的电位

V_c 为负。从 F 上发射的电子在 V_g 的作用下飞向 G, 越过 G 趋向 C, 在 G-C 之间的拒斥场作用下电子逐渐减速, 在速度变为零以后, 电子返转并飞向 G, 再超过 G 趋向 F, 又在 G-F 之间的拒斥场作用下逐渐减速, 在速度变为零以后, 电子再一次返转并飞向 G。在这样的往返运动中, 电子不断地与气体分子碰撞, 把能量传递给气体分子, 使气体分子电离, 最后被栅极捕获。在 G-C 空间产生的正离子被收集极 C 接收形成离子流。离子流与气体压力 p 的关系如下

$$p = \frac{1}{K} - \frac{I_+}{I_e} \quad (11-38)$$

式中 K ——规管常数 [Pa^{-1}];

I_+ ——离子流 [A];

I_e ——电子流 [A]。

由于各种气体的电离电位 V_i 是不相同的 (见表 11-4), 所以电离规的常数 K 与气体种类有关。电离规的相对常数 R 被定义为

$$R = K/K_{N_2} \quad (11-39)$$

式中 K ——电离规对某种气体的常数 [Pa^{-1}];

K_{N_2} ——电离规对氮气的常数 [Pa^{-1}]。

表 11-4 气体电离电位 V_i

气体	V_i/V	气体	V_i/V	气体	V_i/V	气体	V_i/V
He	24.5	Na	5.1	Fe	7.9	O ₂	12.2
Ne	21.5	K	4.3	Ni	7.6	Cl ₂	11.6
Ar	15.7	Rb	4.2	W	8.0	CO	14.1
Kr	14	Cs	3.9	CO ₂	13.7	H ₂ O	12.6
Xe	12.1	Hg	10.4	NO ₂	11		
Rn	10.7	Cl	13	H ₂	15.4		
Li	5.4	Ca	6.1	N ₂	15.5		

电离规的常数还与规管结构和电参数有关。不同的作者用实验方法测定了一些气体的相对常数 R , 但他们所测定的 R 值之间零散性较大。这是由于每个人所选用的规管结构、电参数、实验条件不尽相同的缘故, 也和他们在实验中选用的真空标准有关。特别应当指出, 1960 年以前, 这些实验中的电离规是以压缩式真空规作为真空标准的, 因为那时还没有发现压缩式真空规中的水银蒸气流效应, 因此所获得的数据 R 是有问题的。

表 11-5 是综合了有关数据而得到的相对常数的平均值。表 11-6 是用压缩式真空规校准电离规时, 水银蒸气流效应对规管常数的影响。

表 11-5 电离规对各种气体的相对常数 R

气体	R	气体	R	气体	R	气体	R
N ₂	1.0	H ₂ O	1.29	Ar	1.38	C ₂ H ₆	2.6
O ₂	0.85	空气	0.98	Kr	1.81	NH ₃	1.2
H ₂	0.48	Hg	3.38	Xe	2.73		
CO	1.04	He	0.18	D ₂	0.38		
CO ₂	1.45	Ne	0.32	CH ₄	1.4		

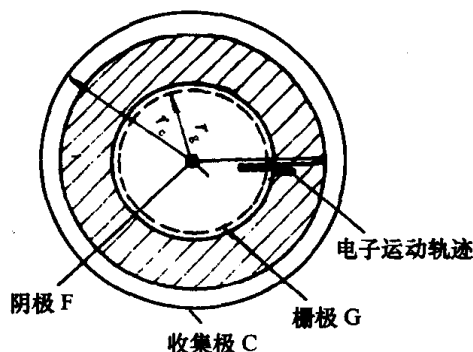


图 11-37 圆筒形电离规原理图

表 11-6 用压缩式真空规校准电离规时,水银蒸气流效应对电离规常数的影响

灵敏度 \ 气体	H ₂	He	Ne	N ₂	CO	Ar	Kr	Xe
K/Pa^{-1}	0.0743	0.0215	0.036	0.1373	0.147	0.177	0.256	0.36
K'/Pa^{-1}	0.0758	0.0218	0.0375	0.1463	0.1568	0.195	0.195	0.44

注: K —无水银蒸气流效应时的电离规常数;
 K' —有水银蒸气流效应时的电离规常数

圆筒型电离规具有同轴的电极结构,电极尺寸和位置容易保证,又由于外圆筒的屏蔽作用使规管性能稳定,不受玻壳电位影响。许多国家已选用这种规作为真空测量的副标准。

图 11-38 是国产 DL-2 型电离规结构,该规电参数为: $V_g = 225\text{V}$, $V_c = 0\text{V}$, $V_f = 25\text{V}$, $I_e = 5\text{mA}$, $K_{N_2} = 0.188\text{Pa}^{-1}$ 。

圆筒形电离规的量程一般为 $1 \times 10^{-1}\text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。在此量程内,离子流 I_+ 与压力 p 之间具有线性关系。

3. 中真空电离规

圆筒型电离规的测量上限为 0.1Pa 。高于此压力,离子流与气体压力之间的关系就要严重地偏离线性。这是由以下三个限制因素所造成的:

① 随着压力增高,由于气体分子密度增大,电子的平均自由程变短,在两次碰撞之间电子从电场中获得的能量减少,因此电子与气体之间的非电离碰撞数增加,使电离的效率降低,从而导致规管常数下降。

② 在气体分子被电离的同时,所产生的二次电子流 I_s 也能被栅极所接收,因此栅极电子流由两部分组成。即,阴极发射电子流 I_e 和二次电子流 I_s ($I_- = I_e + I_s$)。

如果电离规的自动稳流线路使栅极电子流保持稳定(即 $I_- = \text{常数}$),那么,在低气压时,由于 $I_e \gg I_s$, $I_- \approx I_e$,则有如下关系式

$$I_+ / I_- \approx I_+ / I_e = Kp \quad (11-40)$$

式中 K ——常数;

I_+ ——与 p 之间呈线性关系。

随着压力的增高,由于 I_s 在 I_- 中占有越来越大的比例,则关系式成为

$$\frac{I_+}{I_-} = \frac{I_+}{I_e + I_s} = \frac{\frac{I_+}{I_e}}{1 + \frac{I_s}{I_e}} = \left(\frac{K}{1 + Kp} \right) p = K'p \quad (11-41)$$

$$K' = \frac{K}{1 + Kp} \quad (11-42)$$

从式(11-42)可知,此时规管常数 K' 随压力增高而降低。

如果电离规的自动稳流线路使阴极电子流 I_e 保持恒定(即 $I_e = \text{常数}$),那么,随着压力增高,由二次电子流 I_s 电离气体分子所产生的那部分离子流就不可忽略,从而导致规管灵敏度

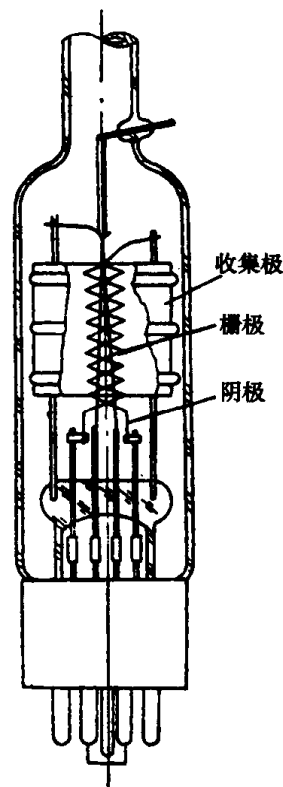


图 11-38 DL-2 型电离规

的增大。

③随着压力增高,正离子与气体分子之间的碰撞机会增多,于是离子被散射,使收集极收集离子的效率降低,从而导致规管常数下降。

为了减小上述三个因素的作用,扩散电离规的测量上限,设计了如图 11-39 所示的中真空电离规,它的结构是:一根直丝阴极放置在两平行板之间,一板作为阳极,另一板作为离子收集极,阴极与阳极之间的距离为 1.6mm。从阴极上发射出的电子经过 1.6mm 的行程,直接到达阳极。因为这样短的电子渡越行程,已经相当于气体压力为 10^2Pa 时电子在气体中的平均自由程,所以在气体压力低于 10^2Pa 时,此规中的电子行程不再受压力的影响,而与压力无关,从而减小了上述限制因素①的作用。由于电子行程短和阳极电压仅为 60V,所以此规管的常数低($K_{N_2} = 4.5 \times 10^{-3}/\text{Pa}$),当气体压力为 200Pa 时,电子电离气体分子所产生的二次电子流 I_s 才相当于发射电流 I_e 的 10%,从而减小了上述限制因素②的作用。又由于离子收集极面积远大于阴极面积,并且在收集极上施加了 $V_c = -60\text{V}$ 的电压,所以保证了收集极能够有效地收集大部分离子,从而减小了上述限制因素③的作用。

此外,图 11-39 所示的中真空电离规还采用了 $\phi 0.13\text{mm}$ 的敷氧化钽—铱丝作阴极,因而具有较好的抗氧化性能,适于在较高压力下工作。此规的量程为 $10^2\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 。

我国生产的 DL-5 型中真空电离规(图 11-40)采用盒式结构,离子流 I_+ 与压力 p 之间,在 $54\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 范围内呈线性关系。各极电参数为:阳极电位 $V_a = 170\text{V}$,收集极电位 $V_c = 0$,阴极电位 $V_f = 54\text{V}$;在 $54\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时, $I_e = 50\mu\text{A}$;在 $10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时, $I_e = 500\mu\text{A}$ 。此规采用敷氧化钽—铱丝作阴极,抗氧化性更好。

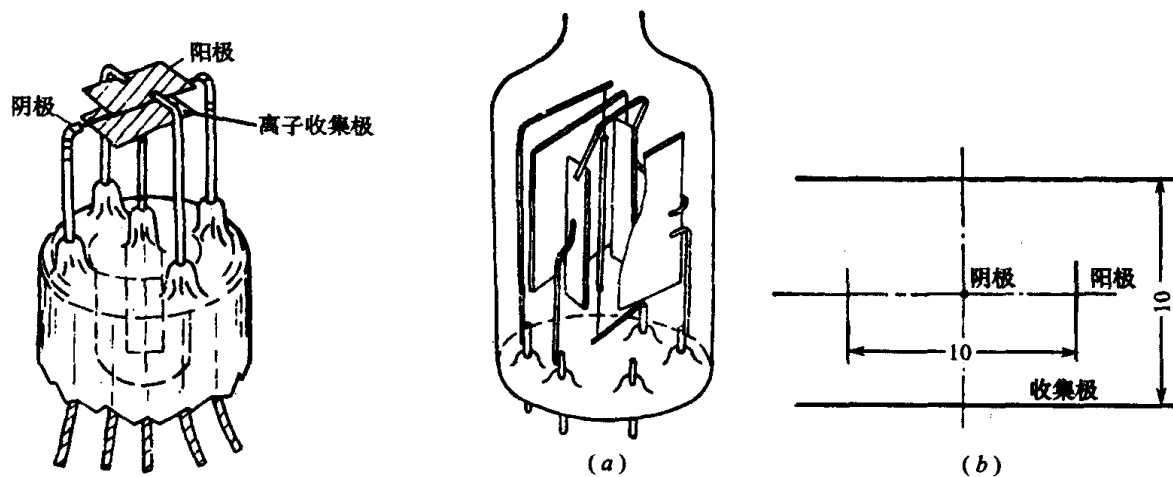


图 11-39 中真空电离规

图 11-40 DL-5 型中真空规

(a)规管电极外形;(b)各电极的相对位置和尺寸(mm)。

阳极(小极, 3×20);阴极(直径 0.15 铱丝, 氧化钽涂层厚 0.05);收集极(大板, 15×20)。

图 11-41 示出了上述中真空电离规的 I_+/I_e 与压力 p 的关系曲线,当压力进一步增高时,在 p_m 处 I_+/I_e 将达到一个峰值,然后急剧下降。

在电子平均自由程小于电极间距离的情况下,随着压力的增高,一方面,由于电子与气体分子之间碰撞次数的增多,导致离子流增大;另一方面,由于电子在连续两次碰撞之间从电场中获得的能量减少,又导致离子流衰减。这两个相反的因素综合作用的结果,就使规的特性出现了如图 11-41 所示的曲线形状。

为了进一步扩展电离规的测量上限,一方面,必须设法使图 11-41 曲线上峰值所对应的压力 p_m 尽可能增大(p_m 值主要由电场强度决定)。另一方面,为了保证在 $p < p_m$ 的压力区间内,离子流 I_+ 与压力 p 之间有线性关系,则要求规管的常数 K 尽可能降低。

我国生产的 DL-8 型中真空电离规采用了新的电极结构(图 11-42),两块间距为 d_1 的平行板 C 作为离子收集极,中心平面有四根相距为 d_2 的丝状电极, K 为阴极(敷氧化钨—依丝), A 为阳极,两侧为辅助电极 S。用改变辅助电极上负电位大小的办法,来改变阴极—阳极间的电位分布,从而降低规管常数和增强靠近阳极空间的电场强度,达到扩展测量上限的目的;在低气压工作时,用改变各极电参量的办法,使规管常数增大,从而扩展了测量下限。由于采用了上述办法,使 DL-8 型中真空规的量程达到了 $1 \times 10^3 \text{Pa} \sim 10^{-4} \text{Pa}$ 。

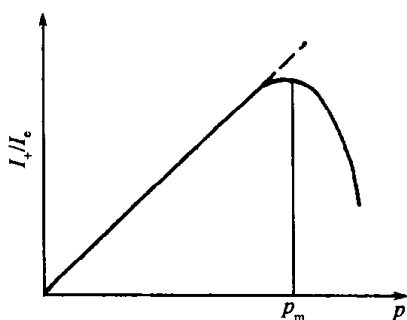


图 11-41 $I_+/I_e \sim p$ 曲线

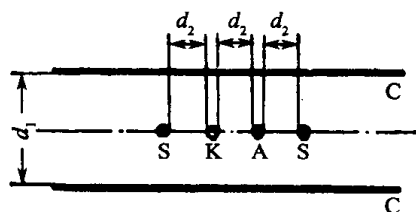


图 11-42 DL-8 型中真空规

目前我国生产的 DL-9(ZJ-27)宽量程电离真空规,是在圆筒型电离真空规的基础上改造而成,就是在圆筒型的收集极上打了许多小孔,减少了收集极的面积,使测量下限达到 $5 \times 10^{-6} \text{Pa}$,测量上限达到 10Pa ,满足科研生产中对宽量程真空度测量的需要。

4. B-A 规

圆筒型电离规的测量下限约为 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$,如果低于此压力,由于 X 射线的作用,会使离子流 I_+ 与压强 p 之间的关系严重偏离线性。

电离规的栅极在接受具有一定能量的电子流以后,要发射软 X 射线,此软 X 射线照射到离子收集极上,又引起收集极发射电子流 I_x ,由于这部分电子流的方向与离子流 I_+ 的方向相反,所以在离子流测量回路中叠加了一个与压力无关的剩余电流 I_x ,这就是所谓的电离规的 X 射线效应。因为与圆筒型电离规中的剩余电流 I_x 相对应的等效压力 $p_x \left(p_x = \frac{1}{K} \frac{I_x}{I_e} \right)$ 约为 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$,所以用圆筒型电离规测量 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 的压力时将引起 10% 的误差(即偏离线性 10%)。

1950 年发明的 B-A 规(图 11-43)采用直径为 0.1mm 的细钨丝作离子收集极,使接受 X 射线的面积降低了 1000 倍,因而使光电流 I_x 也降低了 1000 倍。此外,这种结构把离子收集极装在栅极中心,把灯丝装在栅极外侧,在栅极和收集极之间形成对数曲线分布的电场,进入栅极空间的电子能在栅极和收集极之间的 99% 的空间内产生电离作用,从而提高了电子电离气体的效率,也就提高了规管常数。这种结构虽然使离子收集极面积减小了 1000 倍,但是规管常数基本上仍与圆筒型相近,所以 B-A 规的测量下限能延伸到 10^{-8}Pa 。

图 11-44 给出了 B-A 规和圆筒型电离规中的电位分布情况,由此图可知 B-A 规中的有效电离电位空间要比圆筒型电离规中大得多。

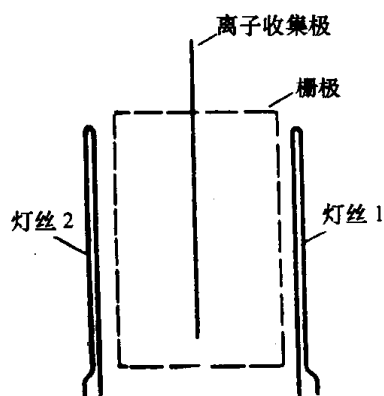


图 11-43 B-A 规

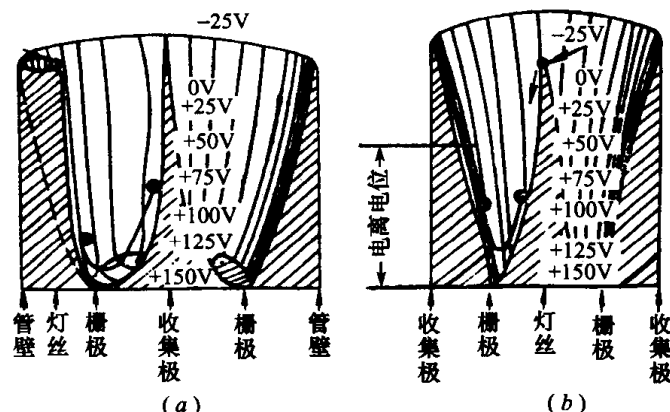


图 11-44 B-A 规和圆筒型电离规中电位分布

(a) B-A 规; (b) 圆筒型电离规。

图 11-45 为离子收集极电流 I_c 与栅极电压 V_g 的关系曲线 ($I_c = f(V_g)$ 曲线),

$$I_c = I_+ + I_x, I_x \propto A I_e V_g^n (n = 1.7 \sim 1.8)$$

式中 A ——收集极面积;

V_g ——栅极电压。

从图 11-45 中的曲线可知,在较高压力下,随 V_g 增大, $I_c = f(V_g)$ 曲线出现峰值,这说明 I_+ 是 I_c 的主要部分,这是 $I_c = f(V_g)$ 呈指数曲线。在很低的压力下,随 V_g 增大, $I_c = f(V_g)$ 呈指数曲线,这说明 I_x 已成为 I_c 的主要部分。比较两规的 $I_c = f(V_g)$ 曲线可知,对于圆筒型电离规,在压力为 10^{-6} Pa 时已呈指数曲线;而对于 B-A 规,直到压力低到 10^{-9} Pa 才呈指数曲线。从 $I_c = f(V_g)$ 的指数曲线外推到工作电压 $V_g = 150$ V,可找出与 V_g 对应的 I_c 值,此 I_c 值就是剩余电流 I_x 的近似值。

图 11-46 为我国生产的几种 B-A 规的结构。

B-A 规具有很多优点:量程宽、测量下限低、电极结构容易除气等,因而是一种优良的超高真空规。

B-A 规与圆筒型电离规相比有如下缺点:①B-A 规的灯丝装在栅网外侧,两者之间距离很小(几毫米),因此灯丝安装尺寸的精度对规管常数的影响较大。经验指出:在同一个 B-A 规中,对于两根不同的灯丝,规管的常数可有 10% 的偏差;同批 B-A 之间的灵敏度偏差可达 20%。②B-A 规的玻璃壳电位对规的常数影响很大。而圆筒型电离规由于筒状收集极的屏蔽作用,其玻璃壳电位对规管常数没有影响。

当电子或离子打到 B-A 规玻璃壳上时,可使玻璃壳带负电或正电。在玻璃壳没有经过严格烘烤除气时,玻璃壳表面上有一层气体吸附层,此时,玻璃壳表面的二次电子发射系数 $\sigma > 1$ 。在玻璃壳经过严格烘烤除气后,可使 $\sigma < 1$ 。玻璃壳电位的变化会使 B-A 规的常数也随之变化,甚至于出现“双值现象”。

没有经过严格除气的 B-A 规在电子碰撞玻璃壳表面时,因 $\sigma > 1$,玻璃壳会带正电,由于这些低能二次电子也加入规管的栅流中,但这些低能二次电子对气体的电离效率不高,因此在保持栅流为恒值的情况下,会使规管常数下降。随着规管在真空状态下的长时间连续工作,以及由于热灯丝的高温辐射作用使玻璃壳表面吸附的气体不断解吸,使玻璃壳内表面逐渐变得清洁起来,这样二次发射系数也不断减少,一旦到达 $\sigma < 1$ 时,玻璃壳电位将从正变为负,此时规管常数会突然增大到一个新的稳定值,这种现象称作“双值现象”,这个新的稳定值才是 B-A 规的正常数值。

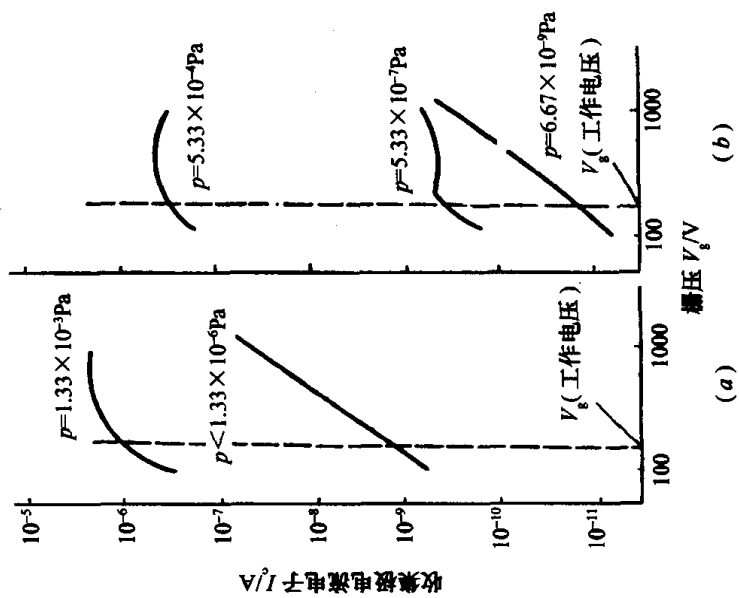


图 11-45 $I_c=f(V_g)$ 曲线
(a) 圆筒型电高规;(b) B-A 规。

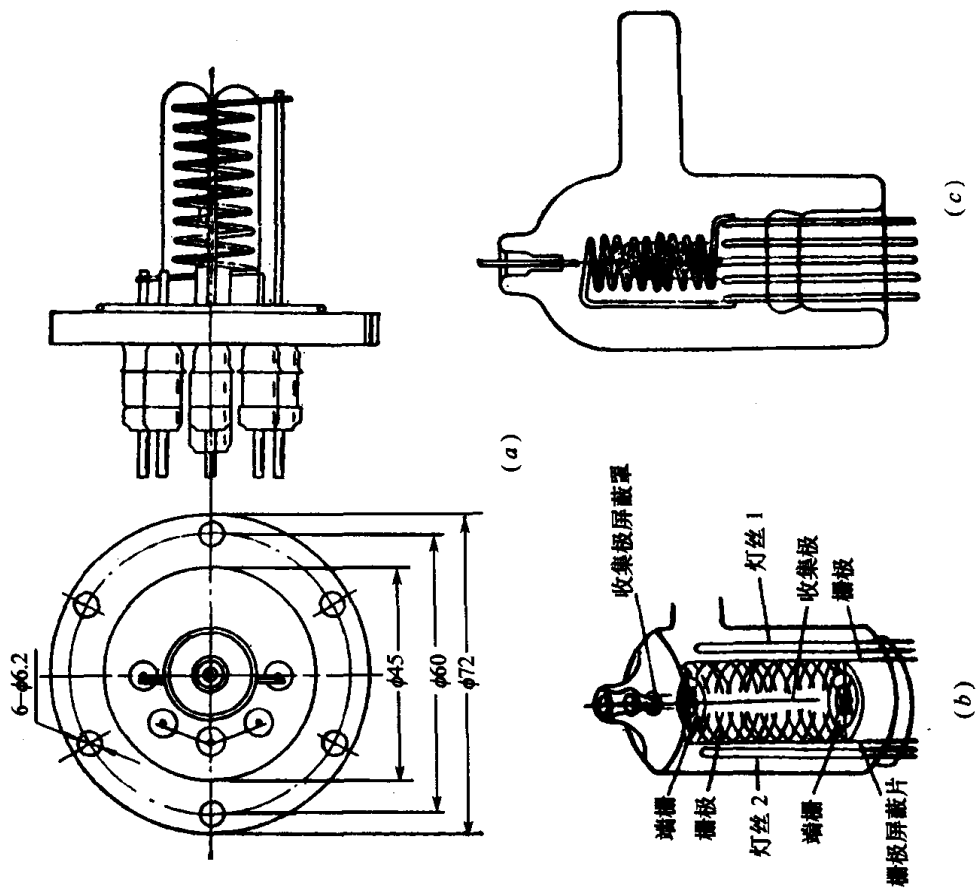


图 11-46 三种国产 B-A 规
(a) 金属 B-A 规;(b) 普通型 B-A 规;(c) 特殊型 B-A 规。

“双值现象”与电子流大小、栅压高低、玻壳清洁程度有关,一般在较大的电子流(几毫安)、较高的栅压、清洁的玻壳表面等情况下,不会出现“双值现象”。如果在玻壳表面镀一层导电膜,并使导电膜的电位处于阴极电位,也可消除“双值现象”。

裸 B-A 规没有玻壳,直接插入金属系统中,因为金属壁与收集极有相同的电位,故不存在壁电位变化的影响,但存在着 X 射线电子相互抵消的作用。从金属壁上发射的 X 射线电子的一部分穿过栅极被收集极接受,与收集极上发射的 X 射线电子起抵消作用。这种效应与规的电极结构、尺寸、材料、表面污染等因素有关。

5. 调制型 B-A 规

调制型 B-A 规的特点是,在 B-A 规的栅网中,增加一个细丝电极,叫调制极。如果调制极上电压 V_m 有时等于栅极电压 V_g ($V_m = V_g$),有时等于收集极电压 V_c ($V_m = V_c$),那么就能调制收集极上接收的离子流大小,而这种调制对收集极上接受的 X 射线电流基本上是没有作用的,利用这个原理制成的调制 B-A 规能够测量较低的压力。图 11-47 是调制型 B-A 规的结构。

当 $V_m = V_g$ 时,收集极上的电流为

$$I_1 = I_+ + I_x \quad (11-43)$$

当 $V_m = V_c$ 时,收集极上的电流为

$$I_2 = \alpha I_+ + I_x \quad (11-44)$$

在较高压力下,上述两式中的 I_x 可以忽略,使两式相除可以获得 α 值。在低压力下,上述两式相减,可以消去 I_x 而得到真正的离子流

$$I_+ = (I_1 + I_2)/(1 - \alpha) \quad (11-45)$$

但是更深入的研究指出,当调制极电压 V_m 从 V_g 变到 V_c 时,不但对离子流进行了调制,对 X 射线电流也进行了调制,而且还改变了栅网中的电位分布,使规管常数发生变化。再者在很低压力下,调制极处的两种不同电位时的出气状态也不同,从而改变了规中的压力。因此调制 B-A 规的测量下限一般仅能延伸到 10^{-9} Pa。

6. 放射线电离规

用放射线代替电子去电离气体分子的电离规称作放射线电离规。

放射物质放射出的带电粒子或射线,剂量稳定,能量较大,即使在相当高的压力下,也不失去其穿透气体的能力,所以克服了一般热阴极电离规中存在的上限因素,在高压下,依然能保持离子流 I_+ 与压力 p 之间的线性关系。但是在更高的压力下,由于存在气体离子的再复合效应,使离子流下降导致规的灵敏度减小。为了克服这种现象,要求离子行程越短越好。

图 11-48 是一种称作 α 规的放射线电离规。它具有大小两个电离室,收集极电压为 -108 V,容积为 51 mL 的大室用于测量 10^2 Pa $\sim 10^{-2}$ Pa 的压力,规管灵敏度 7.5×10^{-14} A/Pa,容积为 0.2 mL 的小室用于测量 10^5 Pa $\sim 10^2$ Pa 的压力,规管灵敏度 1.13×10^{-15} A/Pa。放射源用镭(Ra^{226}),大室和小室所采用的剂量分别为 3.7×10^6 Bq 和 5.55×10^4 Bq,镭的半衰期为 1020 a,因此规的寿命很长。镭除放射出 α 粒子外,还放射出微量的 γ 射线。 γ 射线有穿透出规壳的危险,故应有防护措施。

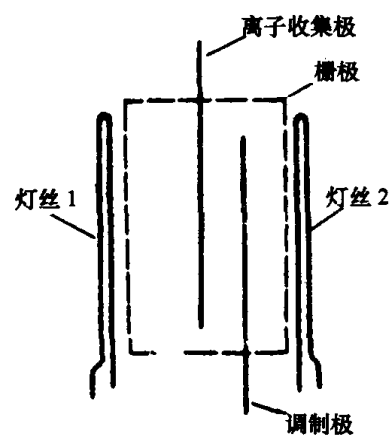


图 11-47 调制型 B-A 规

还可用氘制成另一种放射线电离规—— β 规,氘的半衰期为 12.46a, β 射线中最大的电子能量为 18keV。氘源不放射 γ 射线,没有辐射危险。

限制放射线电离规下限的因素主要是小电流测量技术,因为此类规的灵敏度很低,测量 10^{-2} Pa 压力,就需测量 10^{-14} A 的离子流。另一限制因素是 α 粒子打到收集极上,能产生二次电子,造成虚假的离子流。

7. 潘宁规

1937 年潘宁首先利用在磁场和电场中的冷阴极放电现象来测量低压力,制成了所谓的潘宁规,也称为冷阴极放电规(图 11-49)。

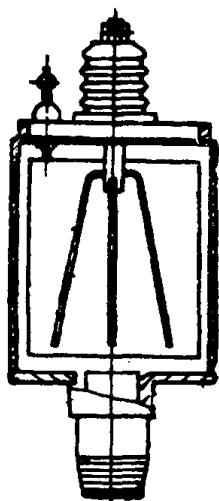


图 11-48 α 规

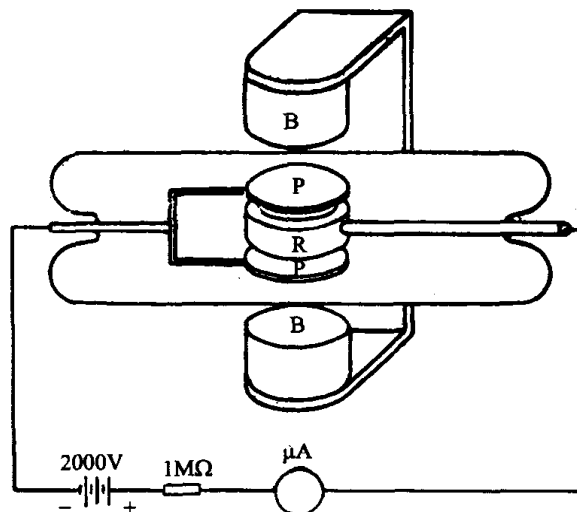


图 11-49 潘宁规原理图

此规的磁场与电场基本平行,中间圆筒 R 为阳极,阳极电压 $V_a = 2\text{kV}$ 。两块平行圆板 P 为阴极。磁场 $B = 4 \times 10^{-2}\text{T}$ 。由宇宙射线或场致发射所产生的初始电子在强电场和磁场作用下,在两片阴极板之间作螺旋形运动,不断和气体分子碰撞并使其电离。电子与气体经过多次碰撞后再被阳极所收集。因离子质量大,基本上沿直线打到阴极上,并使阴极发射出二次电子。电离过程中所产生的二次电子和阴极发射的二次电子又参加到电离气体的过程中去,如此不断发展,进而建立起稳定的自持放电。测量回路中的电流 I 为离子流 I_+ 和阴极二次电子流 I_s 之和

$$I = I_+ + I_s = Cp^n \quad (11-46)$$

式中 C ——常数;

n ——在 1~2 之间(与电极结构有关)。

潘宁规量程为 $1\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 。影响此规测量下限的因素主要是在较低的压力下建立和维持放电有困难,甚至于不能激起放电。此规的测量上限取决于两个因素,一是高压下的离子复合效应,二是在高压下回路限流电阻中流过的电流过大,导致工作电压降低。这两个因素都会使规管灵敏度降低。

潘宁规的优点是灵敏度高,没有热阴极,结构坚固,操作简便,寿命长,适于工业应用。

潘宁规的缺点是非线性,不稳定,抽气作用大,精度差。

如果潘宁规的阴极被油污染,就会改变阴极表面二次发射系数,使规的特性发生明显的变化。

(七) 极高真空测量

1. 概述

1950年B-A规的发明使测量下限扩展到超高真空(10^{-8} Pa)。1958年正、反磁控规的出现又把测量下限延伸到 10^{-12} Pa,从而跨进了极高真空领域。在许多高新技术领域,需要极高真空环境,如宇宙空间模拟、真空表面分析、超导技术、核聚变反应、高能加速器、真空微电子技术和空间航天器等,而在极高真空领域,极高真空规的研究则是必不可少的重要环节。自20世纪60年代以来,随着极高真空技术的不断发展,相继出现了很多类型的极高真空规,从表11-7中所列的数据可知,在实际应用中几乎所有的极高真空规都不能真正可靠地测量 $\leq 10^{-12}$ Pa的压力。因此 10^{-11} Pa~ 10^{-13} Pa压力区间的测量技术还有待于进一步解决。从极高真空规的发展历史来看,由于对规管性能研究的深入和校准水平的提高,不断发现新的下限因素和新的问题,致使多数极高真空规的测量下限指标反而趋于保守。

表 11-7 极高真空规性能表

规 管 名 称		预计测量下限/Pa	已测最低压力/Pa
外收集极型	抑制规	10^{-10}	10^{-10}
	分离规	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	10^{-9}
	掩埋收集极规	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	10^{-9}
	短收集规	10^{-12}	10^{-11}
	弯注规	10^{-12}	10^{-11}
	管型倍增器规	10^{-12}	10^{-10}
	球栅型离子谱规	10^{-12}	10^{-11}
	贝塞尔盒能量分析器规	10^{-12}	10^{-11}
冷阴极磁控规	正磁控规	10^{-12}	10^{-11}
	反磁控规	10^{-12}	10^{-11}
	放射性磁控规	10^{-12}	10^{-9}
	触发放电规	10^{-12}	10^{-8}
热阴极磁控规	普通热磁控规	10^{-12}	4×10^{-11}
	倍增器热磁控规	10^{-15}	4×10^{-11}
	抑制极型热磁控规	10^{-13}	10^{-11}
质谱计型规	回旋型	10^{-12}	10^{-9}
	偏转 180°型	10^{-12}	10^{-8}
	四极型	10^{-11}	10^{-8}
其它	轨道规	10^{-10}	10^{-8}
	场致显微镜	10^{-11}	10^{-9}
	静电透镜规	$< 10^{-10}$	
	激光电离规	10^{-11}	
	鞍场规	10^{-10}	

解决 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ Pa压力范围的测量技术之所以进展缓慢,可归结为以下几方面的原因:

- ①规本身存在各种下限因素;
- ②不易获得压力低于 10^{-11} Pa的极高真空;
- ③缺少低于 10^{-11} Pa压力的可靠的校准系统。

从规的本身限制因素来看,可归纳如下:

①限制热阴极规下限的因素:

a. 与压力无关的剩余电流:

正射、反射 X 射线产生的光电流;

电子碰撞解吸产生的离子流和中性分子流;

热阴极发射出碱金属离子;

紫外辐射产生的光电流;

污染电极表面的俄歇电子发射等。

b. 高温阴极的蒸气压和出气速率:

例如,纯钨阴极在发射电流 $I_e = 10\text{mA}$ 时,钨丝温度为 2300K ,由于钨蒸发引起规的下限压力为 $p_w = 1 \times 10^{-10}\text{Pa}$ 。

六硼化镧阴极在 650°C 下的出气速率约为 $2.7 \times 10^{-11}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

c. 测量微电流的困难:

例如,在 10^{-13}Pa 时,需要测量 10^{-17}A 的离子流,但由于干扰、漏电、噪声等影响,直接用电子线路检测这样小的电流是十分困难的。

②限制冷阴极磁控规下限的因素:

a. 非线性、不稳定性、不重复性、熄火等;

b. 高电压下介质极化电流和漏电电流;

c. 测量 10^{-17}A 离子流的困难。

③限制热阴极磁控规下限的因素:

此类规既有热阴极规和冷阴极磁控规的优点,又有两者的缺点。

热阴极规、冷磁控规、热磁控规三者比较起来,在解决更低压力测量中,热阴极规具有性能稳定可靠的优越性。冷磁控规和热磁控规的性能不稳定又不可靠。

2. 极高真空规简介

(1)抑制规(图 11-50)

抑制规较 B-A 规改进之处是把离子收集极移出了电离区(即移出栅极)。为了增大收集离子的效率,把丝状收集极改为圆片状,并用屏蔽盒将它包围起来,在屏蔽盒内还增加了一个抑制极,从而组成了一个新的离子收集系统。屏蔽盒的作用有如下几个方面:

①屏蔽抑制极,使其不受软 X 射线的直接照射;

②与栅极一起组成静电透镜,对正离子起加速与聚焦作用;

③阻挡大部分软 X 射线,使其不能直接照射到离子收集极;

④对离子收集极形成静电屏蔽,防止外界干扰,有利于小电流测量。

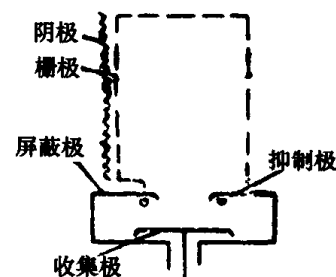


图 11-50 抑制规结构

抑制极上加有负电压,在离子收集极前面形成拒斥场,对离子收集极上发射的 X 射线光电子起抑制作用,使它返回收集极而不构成剩余电流。同样,它也能抑制屏蔽极上发射的 X 射线光电子,使其返回屏蔽极而不能抵达离子收集极。

基于上述改进,抑制规保持了与 B-A 规相近的规管常数($0.12/\text{Pa}$)。又由于软 X 射线产生的光电子被拒斥场所抑制,因此大大延伸了测量下限。在 1962 年发明此规时,认为已不存在 X 射线效应的限制了,但后来发现,还存在着反射 X 射线,即部分反射的软 X 射线打中抑制

极,使抑制极发射光电子,这些光电子在电场作用下,加速到达离子收集极而形成一个负的剩余电流。再加上电子碰撞解吸效应的限制,故抑制规尚不能测量低于 10^{-10}Pa 的压力。

抑制规的工作参数:阴极电压 $V_f=25\text{V}$,发射电流 $I_e=2\text{mA}$,栅极电压 $V_g=200\text{V}$,抑制极电压 $V_s=-450\text{V}$,屏蔽极处于地电位,离子收集极经过静电计接地。规管常数 $K=0.12/\text{Pa}$ 。

图 11-51 是抑制规的抑制特性曲线,被抑制的光电流为 $1.5 \times 10^{-11}\text{A}$ 。

(2) 弯注规(图 11-52)

弯注规是抑制规的发展,即在抑制规的电离区域与离子收集系统之间增加了一个静电偏转系统,使离子收集极系统的轴线相对栅极的轴线偏转了 90° 。

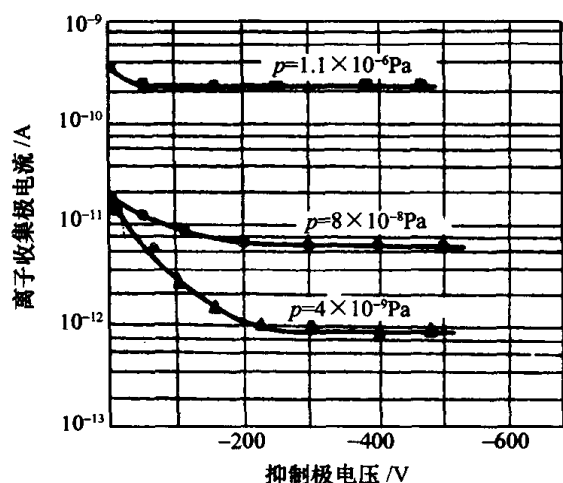


图 11-51 抑制特性曲线

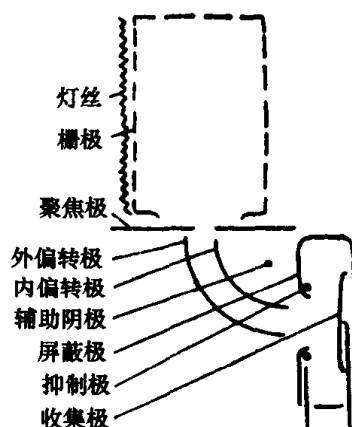


图 11-52 弯注规结构

静电偏转系统的作用如下：

①穿过聚焦极圆孔的离子束在偏转极的静电场的作用下,偏转 90° 后到达离子收集极。引出离子束的离子能量分散仅有 5eV 的宽度,所以只需要一个简单结构的静电偏转系统就能使大部分离子偏转到收集极上。

②偏转系统对软 X 射线来说是一个很好的屏蔽。从聚焦极圆孔射入的软 X 射线,只有经过多次反射才能打到离子收集极上,这使弯注规的 X 射线效应要比抑制规大为降低。

弯注规工作参数:阴极电压 $V_f=125\text{V}$,发射电流 $I_e=2\text{mA}$,栅极电压 $V_g=200\text{V}$,聚焦极、外偏转极、屏蔽极处于地电位;内偏转极电压 $V_b=-340\text{V}$,抑制极电压 $V_s=-450\text{V}$,收集极经过静电计接地。规管常数 $K=0.14/\text{Pa}$ 。

图 11-53 为弯注规的偏转特性曲线。

当内偏转极加正电压时,离子不能偏转到离子收集极上,离子收集极上测出的电流主要为剩余电流。当 $V_s=0$ 时,剩余电流为 $1 \times 10^{-14}\text{A}$;当 $V_s=-450\text{V}$ 时,剩余电流为 $1 \times 10^{-15}\text{A}$,相应的等效压力为 $3.3 \times 10^{-12}\text{Pa}$ 。由此可知,弯注规能够测量低到 10^{-11}Pa 的压力,也有希望粗略指示 10^{-12}Pa 的压力。但是由于高温阴极的存在,阴极的蒸气压和出气速率都可能妨碍获得 $<10^{-11}\text{Pa}$ 的压力。因此能否用弯注规测量低于 10^{-11}Pa 的压力,主要取决于阴极性能。

从目前情况看,弯注规是所有极高真空规中最好的一种,性能稳定可靠。实测到的最低压力已达 10^{-11}Pa 。在没有极高真空校准系统的条件下,研制新型极高真空规时,大都以弯注规的读数作为压力的参考值。

(3) 双弯注规

双弯注规是管型电子倍增器电离规的一种,其规管灵敏度系数 $K = 1.5 \times 10^{18} [(C/s)^{\text{①}} / (A \cdot Pa)]$,测量下限 $P_R \leq 1 \times 10^{-10} Pa$,预计可测 $10^{-12} Pa$ 的极高真空。双弯注规的结构原理如图 11-54 所示。

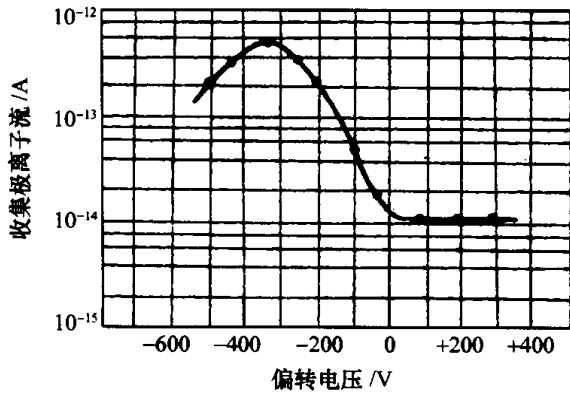


图 11-53 弯注规偏转特性

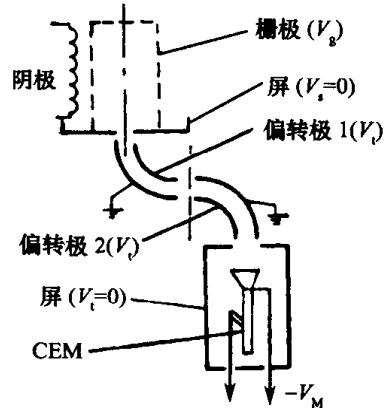


图 11-54 双弯注规结构原理图

离子在偏转极 V_1 的电场作用下,通过屏中心孔偏转 90° ,然后通过第二个屏中心孔,进入第二偏转极 V_2 ,再偏转 90° ,打在 CEM 电子倍增器的接收窗口,被 CEM 接收计数。由于离子流经过两级偏转,X 射线效应影响极小。

(4) 场致发射冷阴极弯注规场

致发射冷阴极弯注规由场致发射冷阴极、离子产生器、离子偏转器及离子收集极四部分组成,结构如图 11-55 所示。离子产生器主要部分是一个 Pt-clad-Mo 合金栅网,电子由冷阴极发射后在栅网空间振荡并使气体分子电离,离子偏转器利用静电场使离子偏转 256.4° 后打在收集极上。收集极由通道倍增器组成,规管主要部件均由含氢量低的特种不锈钢制成。

由于采用冷阴极消除了高温热阴极效应。规管工作前置于 $10^{-4} Pa$ 真空中 $1000^\circ C$ 烘烤 24h,大大降低了规管出气率。采用了 256.4° 的离子偏转器,能有效分开气相离子和 ESD 离子磁撞解吸离子,大大降低了 ESD 离子噪声,另外也使收集极免受 X 射线照射,大大减小了 X 射线效应。规管的 X 射线本底压力及 ESD 离子本底压力降至 $10^{-13} Pa$ 量级。采用通道倍增器提高了离子检测灵敏度,当测量 $1 \times 10^{-11} Pa$ 压力时,只需 0.01mA 的发射电流。

(5) 分离规、短收集极规、掩埋收集极规

分离规(图 11-56)与抑制规不同之处是收集极为短的细金属丝。增加了离子反射极,没有抑制极,环形阴极是环绕栅极安装的。阴极、屏和离子反射极的电压都是 200V,栅极电压 $V_g = 305V$,发射电流 $I_e = 2mA$,离子收集极通过静电计接地,规管灵敏度系数 $K = 0.98 A/Pa$,X 射线效应引起的下限压力 p_x 约 $4 \times 10^{-11} Pa$ 。此规的主要特点是电子碰撞解吸效应很小。

短收集极规(图 11-57)和掩埋收集极规(图 11-58)的结构与分离规相似,性能也大同小异。

1966 年文献[156]推算短收集规的 p_x 约 $6.7 \times 10^{-11} Pa$,预计可测 $10^{-10} Pa$ 的压力。但 1968 年的文献[157]报道,此规在压力 $p < 6.7 \times 10^{-8} Pa$ 时,已渐渐偏离线性。1972 年资料

① 符号 C/s 是每秒脉冲数。

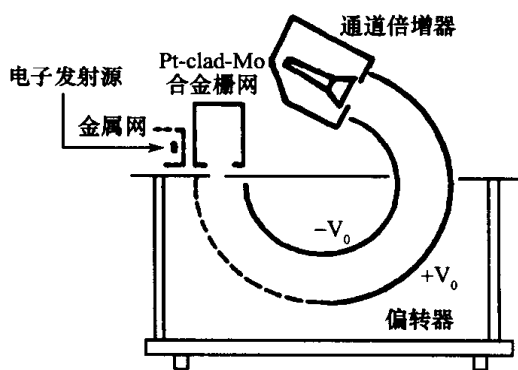


图 11-55 场致发射冷阴极弯注规

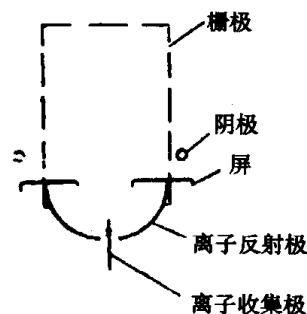


图 11-56 分离规结构

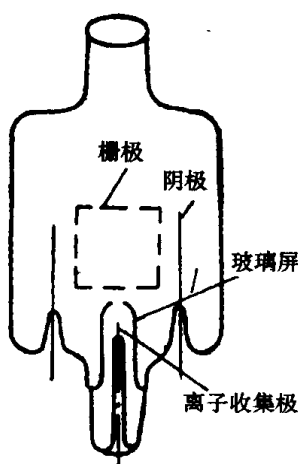


图 11-57 短收集极规

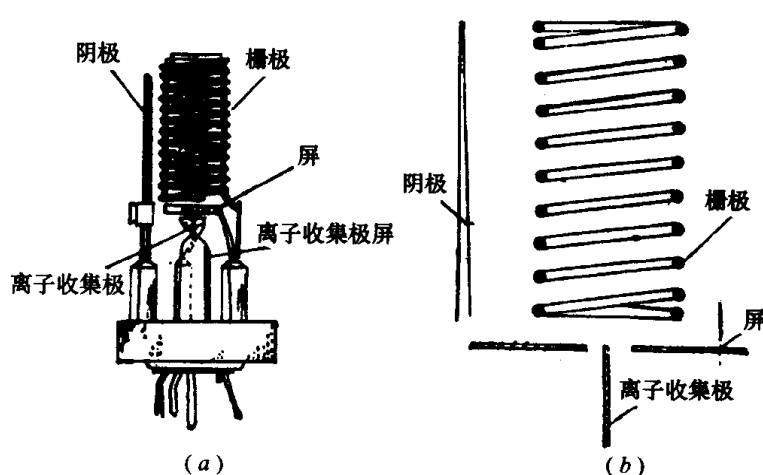


图 11-58 掩埋收集极规

(a) 结构图; (b) 示意图。

[158]认为一般短收集极规(包括上述三种类型)的测量下限约为 $1\text{Pa} \sim 5 \times 10^{-9}\text{Pa}$ 。

(6) 球栅型离子谱规

球栅型离子谱规的结构如图 11-59 所示。环形灯丝发射的电子射入球形栅网内,在球心附近形成一负空间电荷,电离产生的离子也聚集在球中心附近,因此可使气相电离离子(处于球中央负电位处)与 ESD 离子(栅极表面产生的离子)之间的能量差达 30eV ,而在一般 B-A 规中两者的能量差仅为 $5\text{eV} \sim 7\text{eV}$ 。这么大的能量差更有利于分离两类离子。从球栅空间拉出的离子进入一个由两个同心半球组成的偏转系统,偏转 180° 后到达收集极。偏转系统可以三维聚焦,是具有高分辨率的能量分析器,能有效地将能量差达 30eV 的两类离子分开,从而较彻底地去除 ESD 效应,同时也大大降低了 X 射线效应。此规的 p_x 为 $2 \times 10^{-13}\text{Pa}$,可测 10^{-12}Pa 的极高真空。

此规的特点是结构精巧,它装在一直径 100mm 的双面法兰上,法兰采用铝合金制造。阴极为 $\text{ThO}_2\text{-Re}$ 丝,工作温度较低。球形栅极位于环形灯丝中央,由 $\text{Pt}(80\%)\text{-Ir}(20\%)$ 合金网制成,降低了吸附效应。热阴极球栅离子源被一铝合金制作的半球屏与偏转系统和收集极隔开,降低了热辐射对其它电极的影响。而在热阴极球栅离子源附近,是经过研磨抛光成镜面的铝合金半球屏,它具有低的发射率,吸附辐射热小,并有高的热传导率,几乎可维持在室温,大大降低了出气速率。这些措施使该规本身的出气速率小于 $2 \times 10^{-9}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$,相当于裸 B-A 规

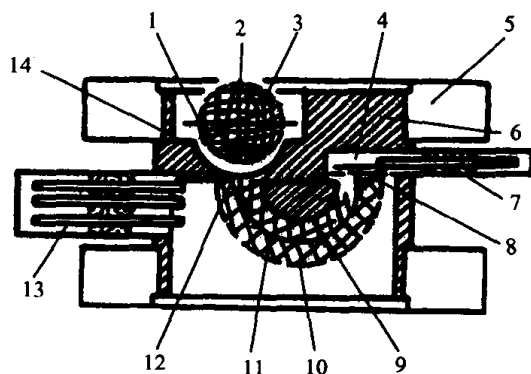


图 11-59 球栅型离子谱规

1—ThO₂-Re 环形灯丝;2—Pt-Rh 球形栅;3—Pt-Rh 托环;4—收集极;

5—法兰;6—铝合金半球栅;7—引线;8—抑制网;9—半球内偏转极;

10—半球外偏转极;11—离子束;12—屏蔽网;13—8 芯引线;14—镀金膜。

出气速率(约 $1.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$)的 1%。

当压力为 10^{-8}Pa ,对球栅在 700V、100mA 下经 1h 电子轰击除气后,ESD 效应几乎基本消除,这说明 ESD 效应的根源在于栅表面存在吸附分子层。研究者还证明热阴极的存在,并不是出气的主要原因,而有了电子发射才会引起大的出气,这是由于电子引起电子激励解吸和 X 射线引起的光解吸所致。

球栅型离子谱规是最近几年来出现的一种最有创新意义和最具实用价值的极高真空规。

(7) 正、反磁控规和双反磁控规

正、反磁控规均采用了交叉电磁场(即电场与磁场垂直),电子在场中的运动与微波磁控管相似,故称冷阴极磁控规。

图 11-60 所示的正磁控规的阴极直径为 30mm、长为 20mm,阴极中心圆杆的直径为 3mm、长为 20mm,与圆杆两端相连的两个圆片的直径为 30mm,阳极电压 $V_a = 5\text{kV} \sim 6\text{kV}$ 阴极经过静电计接地。磁场 $B = 0.1\text{T}$ 。在阳极与阴极间装有两个环形辅助阴极,其电位与阴极相同,起着屏蔽阴极的作用,使阴极不产生场致电子发射,从而消除了因场致发射而产生的剩余电流。而辅助阴极上产生的场致发射电子流是不流过离子流测量回路的,起着维持放电的作用,因此这类规能测量极低的压力。

图 11-61 所示的反磁控规将阳极设在阴极内部,阳极直径为 1mm、长为 20mm,阴极直径为 30mm、长为 20mm,辅助阴极直径为 30mm。阳极电压 $V_a = 5\text{kV} \sim 6\text{kV}$,磁场 $B = 2 \times 10^{-1}\text{T}$ 。

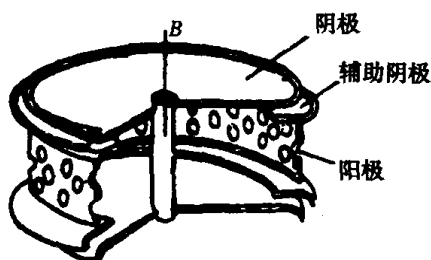


图 11-60 正磁控规

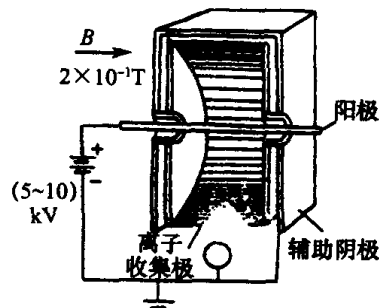


图 11-61 反磁控规

正、反磁控规的优点有:

①采用辅助阴极,不但消除了一般冷规中由于场致发射引起的剩余电流,而且改善了起始放电特性,使规在压力很低时也能建立起自持放电。

②冷阴极规中的电子流主要是由电离气体分子产生的二次电子和离子碰撞阴极产生的二次电子所组成,由于这两部分电子流都是与气体压力成正比的,所以冷规中电子碰撞阳极产生的 X 射线效应和电子碰撞解吸效应不构成限制测量下限的因素。

③没有热阴极的影响。

④测量下限可扩展至 $10^{-12}\text{Pa} \sim 10^{-11}\text{Pa}$,寿命长。

正磁控规在 $1\text{Pa} > p > 2.6 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 时, $I_+ = Kp$ 。如果取 $V_a = 6\text{kV}$, $B = 1 \times 10^{-1}\text{T}$ 则规管灵敏度系数 $K = 7.5 \times 10^{-2}\text{A/Pa}$ 。如果取 $V_a = 5\text{kV}$, $B = 10^{-3}\text{T}$, 则 $K = 0.038\text{A/Pa}$ 。在 $p < 2.6 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 时, $I_+ = Cp^n$,但在有关文章中 n 值很不一致,分别为 1.6、1.65、1.7,在临近下限处甚至大到 2.2。它的典型校准曲线如图 11-62 所示。这种规存在高频振荡和模式跳变等不稳定因素。熄火点相应的输出电流约为 $6.75 \times 10^{-13}\text{A}$,漏电电流约为 $1 \times 10^{-13}\text{A}$ 。

反磁控规在整个量程内的特性均呈非线性,有 $I_+ = Cp^n$ (n 在 1.1~1.4 范围内变化)。文献[164]指出在 $p < 10^{-7}\text{Pa}$ 时, $n = 1.65$ 文献[163]指出 $p < 10^{-9}\text{Pa}$ 时,规管的电噪声会大到静电计难以测量的程度。与正磁控规一样,这种规的特性也存在多种不稳定因素。

早期的正、反磁控规存在的缺点是非线性、不稳定性、抽速大、电噪声大、低压力下放电困难、存在电流—压力特性的非连续性以及介质极化和漏电等,故不能用于精确测量。但经过多年的研究和改进,现代反磁控规的性能有了很大提高,比如它的稳定性和抽气效应可与热阴极电离规相比拟:通过采用弱放射源 Am241 、 Ni63 或碳薄膜冷发射极等手段使反磁控规能在很低压力下迅速放电。现代反磁控规不仅避免了早期潘宁规存在的许多问题,而且由于出气率极低、X 射线和 ESD 效应小等,在很低压力下具有独特的优势。尽管现代反磁控规在电流—压力特性的非连续性方面有了明显改进,但完全消除电流—压力特性的非连续性仍然是反磁控规设计者面临的一项挑战性工作。

反磁控规的杂散磁场比较显著,在一些应用反磁控规的特殊场合,它会对邻近的电子设备或磁存储设备造成影响。为了解决这个问题,最近几年出现了另外两种反磁控规的结构。图 11-63 的结构是 Lethbridge 等人引入的,规管内部的磁场类似于反磁控规结构;另一种结构如图 11-64 所示,它是由 Drubetsky 等人引入的,这种结构基于双反磁控规结构,一对电极浸入在两个方向相反的轴向磁场中,其效果相当于两个反磁控规并联工作,因此称为双反磁控规。这

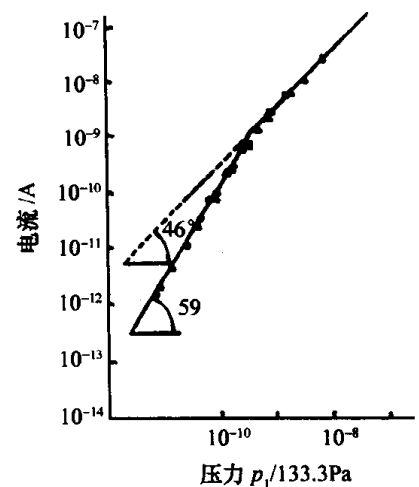


图 11-62 正磁控规校准曲线

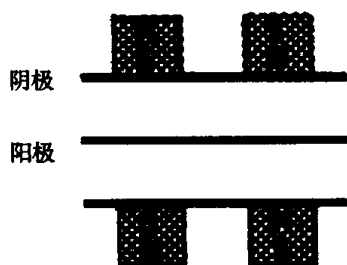


图 11-63 新型反磁控规结构

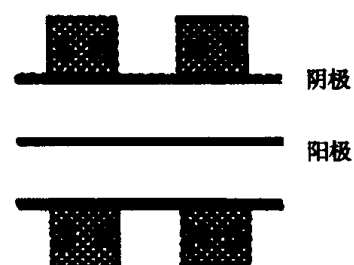


图 11-64 双反磁控规结构

两种规管外两个磁体的磁场趋于相互抵消,规管外的杂散磁场只有几个高斯,如果采用简单的屏蔽套可进一步将杂散磁场降低到地磁场的水平。

(8) 贝塞尔盒能量分析器规

贝塞尔盒能量分析器规由阴极、栅极、贝塞尔盒离子能量过滤器及离子收集极四部分组成,如图 11-65 所示,其阴极和栅极类似 B-A 规。热阴极由敷氧化钇的螺旋状钨丝制成,栅极由镀铂的钼丝网制成,热阴极置于栅网外,与圆筒形栅网的轴线垂直,收集极由二次电子倍增器组成。

贝塞尔盒离子能量过滤器由圆盘状引出极、圆筒状壁电极和中央圆片形电极组成。圆盘状引出极中间有孔,分别置于圆筒状壁电极的两端。圆片形电极由钽制成,用钨丝悬挂在圆筒电极中央,圆片电极的圆心位于圆筒电极轴线上,平行于引出极圆片。中央圆片电极可以挡住由栅极表面直接射向离子收集极的 X 射线,从而减小了 X 射线效应。在栅网空间内产生的离子被圆盘状引出极引入圆筒电极中,其中气相电离离子可以避开中央圆片电极而通过下端的引出极被收集极所收集,而 ESD 离子则打在中央圆片电极及圆筒壁上而被过滤掉。

贝塞尔盒能量分析器规的栅极没有端栅网,经实验证明可以更有效过滤掉 ESD 离子,其阴极位于筒形栅极的下端。

贝塞尔盒能量分析器规的性能如下:气相电离离子与 ESD 离子的能量差为 30eV,能有效将两者分开而将 ESD 离子过滤掉。贝塞尔盒能量分析器规对氩、氢的灵敏度分别为 $8 \times 10^{-3} \text{Pa}^{-1}$ 和 $3 \times 10^{-3} \text{Pa}^{-1}$ 。以上特性使其测量下限达到 $3 \times 10^{-12} \text{Pa}$ 。

目前,日本 ULVAC 公司生产贝塞尔盒能量分析器规,生产商给出该规的测量范围为 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-11} \text{Pa}$,这也是测量下限最低的商品化极高真空规。

3. 展望

目前,实际用于极高真空测量的真空计几乎全是不同类型的电离真空计。但电离型极高真空计的进一步发展,还有赖于新型阴极、小电流测量技术和倍增器的发展。

阴极极高真空测量对阴极的要求如下:

- ① 低温、低蒸气压、低出气率;
- ② 适当的发射电流,能分别在“测量”和“除气”两种状态下工作;
- ③ 在不工作的冷状态下不怕暴露大气。

现有的阴极只有氧化钪/钨(ThO_2/W)阴极的性能接近上述要求。一些阴极性能比较列于表 11-8,蒸发率与发射密度关系曲线如图 11-66 所示。

ThO_2/W 阴极功函数较小(2.96V),蒸发速率低,对于一般尺寸的电离规的阴极来说,在发射 1mA 电流时,阴极温度约为 1600K,冷状态下能重复暴露在大气中,是现在可用于超高真空测量的最好的阴极,并已开始用在极高真空测量中。

钨阴极是广泛采用的一种纯金属阴极,但功函数大(4.53V),在发射 10mA 电流时,钨蒸气在规管中所引起的等效氮压力 p_w 约为 $1.3 \times 10^{-10} \text{Pa}$,阴极温度为 2300K。此外,由于高温

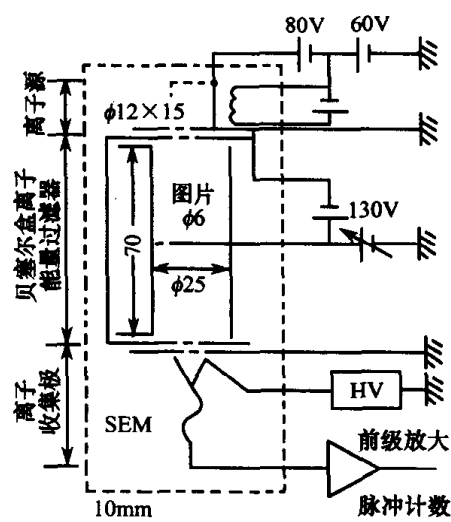


图 11-65 贝塞尔盒能量分析器规的结构及引线示意图

表 11-8 阴极性能比较

阴 极	ϕ/V	T_e/K	$W(T = T_e)/g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$	$\eta(T = T_e)/A \cdot W^{-1}$
W	4.53	2180	6.4×10^{-12}	1.3×10
LaB ₆ /C	2.66	1370	约 10^{-15}	约 10^{-3}
LaB ₆ /Rh	2.70	1370	约 10^{-10}	约 10^{-3}
ThO ₂ /W	2.96	1500	约 2×10^{-16}	约 10^{-3}
[BaSr]O	1.5	750	约 10^{-17}	约 10^{-2}

注： ϕ ——平均功函数； $W(T = T_e)$ ——阴极温度为 T_e 时的阴极蒸发速率；
 T_e ——发射密度为 $10^{-2} A/cm^2$ 时的阴极温度； $\eta(T = T_e)$ ——阴极温度为 T_e 时的阴极效率

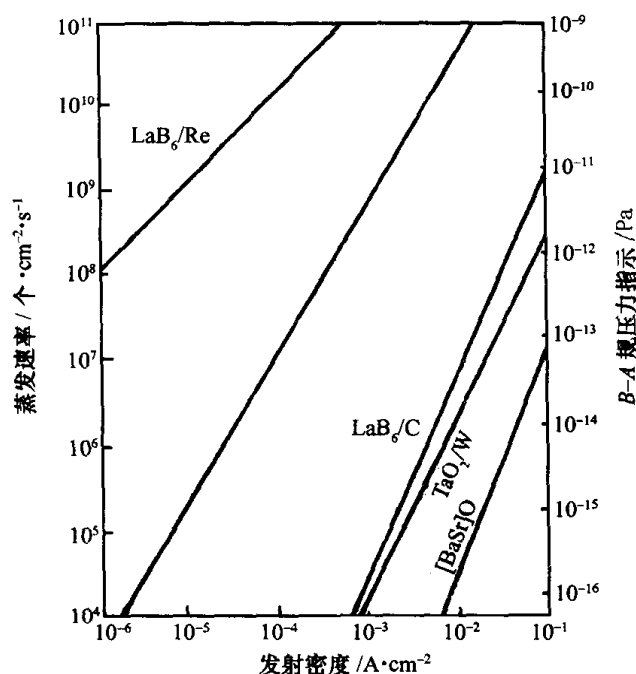


图 11-66 蒸发速率与发射密度曲线

阴极的热辐射作用会促使规中其它电极和规壳出气,所以不适宜于在极高真空下应用。

LaB₆/Rh 阴极功函数很小(2.66V),但因硼向铯中扩散,使铯的蒸发速率变得很高,所以不适宜在极高真空下应用。

[BaSr]O(氧化锶钡)阴极功函数更小(1.5V),蒸发速率也最低,但在较高的温度下它会发射各种负离子(Cl⁻、O⁻、H⁻、C⁻、F⁻、Ca⁻、O₂⁻、Br⁻),所以只能工作在很低温下,提供较小的发射电流($10^{-6} A$),故很少采用。

总之,对极高真空测量来说,需要进一步发展新型低温阴极。

小电流测量技术极高真空测量要求测量 $\leq 10^{-17} A$ 的离子流。真空规中影响精确测量小离子流的因素很多,例如:

- ①收集极上的离子反射会使收集的离子流降低;
- ②离子收集极的二次电子发射会使收集极电流增大;

③绝缘物漏电、极化电流、由摩擦产生的静电以及由电缆弯曲所产生的电荷等;

④交变电磁感应、辐射电场干扰等。

因此要求真空规选用合适的材料、合理的结构和严格的电磁屏蔽,把上述干扰信号尽可能地降低,否则是测不出真正的离子流信号的。

用电子线路(例如振簧式静电计)能测量的最小电流约为 10^{-15} A。采用“电荷累积法”虽反应时间较长,但能测量的最小电流可达 10^{-16} A。

把倍增器和静电计联合使用,采用直流法测量时,最小可测电流约为 10^{-18} A。

把倍增器和脉冲计数线路联合使用,采用脉冲计数法测量时,最小可测电流约为 10^{-19} A。

极高真空测量需要发展单粒子脉冲计数技术。

倍增器极高真空测量对倍增器的要求如下:

①高增益:增益 G 应 $\geq 10^7$;

②在高温(400°C)烘烤、极高真空和暴露大气等条件下保持增益稳定;

③低蒸气压和低出气率;

④结构简单、小巧。

分级式二次电子倍增器的结构复杂、增益不稳定、真空性能不好,不适宜在极高真空下应用。

毛细管型连续二次电子倍增器(CEM)的优点是结构简单、增益高(3×10^8)、功耗小(10mW)、本底计数低(0.03^{\uparrow} 脉冲/s)、脉冲幅度分布的分散度小(适于脉冲计数工作)。且因CEM是用特种高铅玻璃制成,故其蒸气压低,出气率小。这种倍增器允许长期存放于干燥空气之中。

铅玻璃的CEM能否经得起高温烘烤,是它能否用于极高真空测量的关键问题。实验证明,铅玻璃的CEM是能经得起高温(400°C)烘烤的。烘烤会使CEM表面上的气体吸附层被清除掉,使CEM表面的二次电子发射系数略微变小(增益损失两倍左右)。但经过这种损失后,增益不再随烘烤、累积计数以及真空度而变化,相当于一个“老炼”过程,达到恢复CEM本来面目的作用,使它能工作在稳定的增益下。当增益衰减两倍左右(从 $3 \times 10^8 \sim 1 \times 10^8$)时,对脉冲计数方式来说是没有什么影响的,只要不低于计数线路的门限,是不至于影响仪器灵敏度的。

由上述可知,CEM的性能接近于极高真空测量所提出的要求。

对极高真空测量来说,CEM是采用单粒子脉冲计数方式的有力工具,它为测量更低压力创造了条件。

从严格的要求来看,极高真空测量还有待于新的原理、新的技术、新的概念的突破。需要研究极高真空条件下的物理化学现象和表面效应对测量的影响。当存在定向流动和处于非热力学平衡状态时,压力和密度的关系是不明确的,因而还要探讨表征极高真空的更为本质的物理量,开拓非均匀稀薄气体环境下真空度测量的新领域。

三、真空规校准

(一) 概述

真空标准是真空测量的基础,也是研究和发展真空测量的有力工具。

在计量学中,计量标准的精度指的是单个量多次独立测量之间的相互一致的程度。为了确定计量标准的精度,需要对测量历史和偶然误差进行研究。计量标准的准确度指的是测量值与其真值之间的相互一致的程度。一般情况下,真值是未知的。为了确定计量标准的准确度,需要对许多测量方法进行互校和对系统误差进行研究。

建立国家级基准,要求以不同地区(或不同实验室)相同类型(或不同类型)的计量标准进行互校作为基础。

建立世界级基准,要求对国家级基准进行直接的(或间接的)国际比对。

目前,长度、质量、时间、温度等基本计量已做到了国际性的统一,但是,真空标准远没有达到这样的水平,还没有进行各国真空标准之间的比对,而且真空标准的精度不高,准确度还没有很好解决,要做到世界规模的真空量值的统一,还要付出巨大努力。

对于相对真空规的校准,可采用与绝对真空规直接比对的方法来进行。但是目前比较可靠的绝对真空规只有精密 U 形压力计和压缩式真空规。所以用直接对比法进行校准的压力区间仅为 $10^5\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$,为了扩展校准压力的下限,已发展了许多不同类型的绝对真空校准系统。

表 11-9 给出了六种类型的绝对真空校准系统的结构示意图。

表 11-10 给出了六种类型的绝对真空校准系统的主要特性。

表 11-9 六种类型的绝对校准系统结构示意图

序 号	名 称	示 意 图
1	静态膨胀法	
2	线性上升速率法	
3	单级动态流量法	
4	平方上升速率法	
5	平方上升速率法与动态流量法复合	
6	多级动态流量法	

表 11-10 六种校准系统特性

序号	型 式	校 准 压 力 /Pa	有效时间区间 /s	校准压力区间 /Pa	精 度
1	静态膨胀法 I 型	$p_s \frac{V_1}{V_1 + V_2}$	$t \gg \frac{V_2}{2U_A}$	$10^{-7} \sim 10^{-1}$	$\pm 2\%$
	II 型	$p_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2}$	$t \gg \frac{V_1}{U_A}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	$\pm 10\%$
2	线性上升速率法	$\frac{p_1 U_1}{V_2} (t - t_2)$	$t_L < t \ll \frac{V_2}{U_1}$	$10^{-6} \sim 10$	$\pm 3\%$
3	单级动态流量法	$p_1 \frac{U_1}{U_1 + U_2 [1 - (U_2/s)]}$	$t \gg \frac{V_2}{U_2}$	$10^{-9} \sim 10^{-1}$	约 $\pm 5\%$ ($p > 10^{-6} \text{Pa}$)
4	平方上升速率法	$\frac{p_1 U_1 U_2}{V_2 V_3} (t - t_2)^2$	$t_L < t \ll \frac{V_2 V_3}{U_1 U_2}$	$10^{-7} \sim 10^{-1}$	约 $\pm 10\%$
5	平方上升速率法 与动态流量法复 合	$\frac{p_1 U_1 U_2}{V_2 V_3} \frac{U_3 (t - t_L)^2}{U_3 + U_4 (1 - U_4/s)}$	$\frac{V_4}{U_4} \ll t \ll \frac{V_2 V_3}{U_1 U_2}$	$10^{-8} \sim 10^{-2}$	约 $\pm 10\%$
6	多级动态流量法	$\frac{p_1 C_1 C_2 C_3}{(U_2 + U'_2)(U_3 + U'_3)(U_4 + U'_4)}$	$t \gg \frac{V_2 V_3 V_4}{U'_2 U'_3 U'_4}$	$10^{-7} \sim 10^{-2}$	$\pm 10\%$

注:① p_s — V_1 中起始压力;
② U_A —阀门 A 打开时的流导

(二) 绝对真空规比对校准系统

以绝对真空规为标准,将被校真空规与绝对真空规进行直接比较的系统,称为绝对真空规比对校准系统。

绝对真空规除前面已分别介绍的精密 U 形压力计、压缩式真空规、磁悬转子粘滞性规和克努曾规以外,还有活塞规、叶片规、布朗运动规等。目前只有精密 U 形压力计和压缩式真空规被一些国家列为国家级标准。

图 11-67 是以新型标准压缩式真空规为标准的对比校准系统。

国际标准化组织(ISO)公布的草案(ISO/DIS5367, ISO/DIS5300)中,对设计比对校准系统作了如下具体规定:

- ① 校准室的体积至少应该是接在系统上的所有规管的总体积的 20 倍;
- ② 校准室形状应使它的表面积与体积之比尽可能小。故选用球形容器最理想。如选用圆筒形容器,则要求筒长与筒径之比不大于 4;
- ③ 规管连接管的形状要保证使气体分子进入规的工作区域前,至少能与管壁碰撞一次;
- ④ 安装在校准室上的所有规管之间的压力差和温差不应导致引进明显的测量误差;
- ⑤ 规管连接管的流导至少应为规管吸附速率(或解吸速率)的 100 倍;
- ⑥ 系统的极限压力应低于最低校准压力的 20%。

(三) 膨胀式校准系统

1910 年克努曾首次根据波义耳定律,采用气体膨胀的方法,建成了膨胀式校准系统。

图 11-68 是膨胀式校准系统的原理图。如果使小体积 v_0 中压力为 p_0 的气体膨胀到已被抽

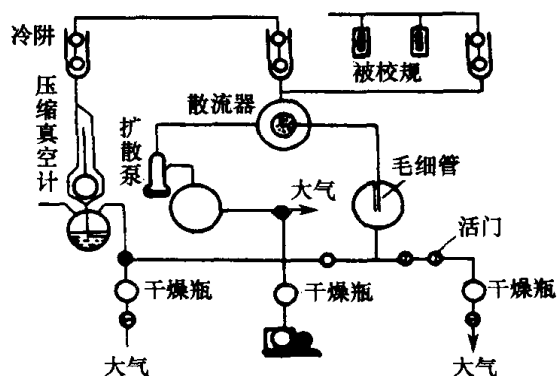


图 11-67 新型标准压缩式真空规
比对校准系统

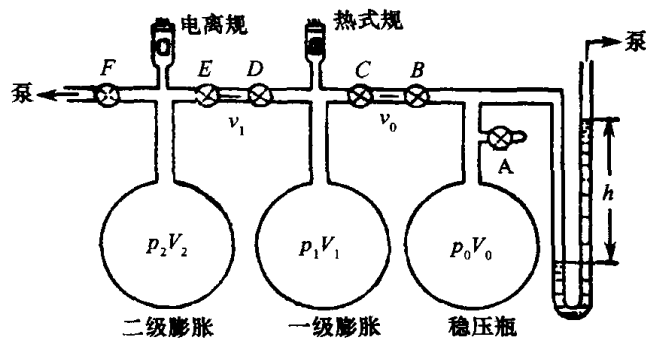


图 11-68 膨胀式校准系统原理图

空的大体积 V_1 中,那么在 V_1 中的气体压力 p_1 ,可根据波义耳定律来进行计算:

一次膨胀

$$p_1^{(1)} = p_0 \frac{v_0}{V_1 + v_0} \approx p_0 \frac{v_0}{V_1} \quad (11-47)$$

n 次膨胀

$$p_1^{(n)} = n p_0 \frac{v_0}{V_1} = n p_1^{(1)} \quad (11-48)$$

如果用质量法精确测量 V_1 和 v_0 ,用 U 形压力计测量 p_0 ,那么根据式(11-47)和式(11-48)就可以计算出 $p_1^{(1)}$ 和 $p_1^{(n)}$,于是就能对接于 V_1 上的真空规进行校准了。

另一种结构的膨胀式校准系统具有两个大小相近的容器 V_1 和 V_2 。两容器之间用阀门隔开,被校真空规接于 V_1 。如果 V_1 中的起始压力为 p_a 和 V_2 中的气体是被抽空的话,打开阀门,则在 V_1 和 V_2 中可建立起一个新的平衡压力 p_{b_1}

$$p_{b_1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_a \quad (11-49)$$

接着,关上阀门 A,在抽空 V_2 中的气体后,再次打开阀门 A,又在 V_1 和 V_2 中建立起平衡压力 p_{b_2} 。多次重复上述操作,经 n 次后在 V_1 和 V_2 中建立起的平衡压力为 p_{b_n}

$$p_{b_n} = p_a \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^n \quad (11-50)$$

从式(11-49)和式(11-50)可知,此种结构的系统可在 $p_a \sim p_b$ 压力区间对真空规进行校准。起始压力 p_a 可用压缩式真空规或 U 形压力计进行测量。

膨胀法真空标准是一种绝对真空标准,在低真空区间($p > 10^{-2}$ Pa)具有很高的准确度,在低真空区间得到广泛应用。但是,在更高真空下($p < 10^{-2}$ Pa)存在着容器内壁的吸附和解吸,以及被校规的抽气和出气等动态因素的影响,因此在相当长的时期内,膨胀法真空标准没能在高真空区间应用。20 世纪 60 年代以后,膨胀法真空标准在高真空区间的应用有了进展,并且与压缩式真空计和动态流量法真空标准进行了比对,取得了很好的一致性。

早期大多采用玻璃材料制作膨胀法真空标准,选用的主泵均为扩散泵,校准室和取样室体积都比较小,阀门有油脂阀门、液体合金阀门和球阀等,不确定度在 1%~5% 之间。20 世纪 70 年代和 80 年代初,金属膨胀法真空标准在国外得到发展,许多国家都建立了准确度高、量

程宽的此类标准,以英国物理研究院(NPL)和德国物理技术研究院(PTB)为代表,都有较高的水平。特别是 PTB 的多级膨胀标准装置,是国际高真空范围真空量值比对的核心标准,是当前世界上水平较高的中、高真空标准装置。图 11-69 是金属膨胀法真空标准原理图,校准范围为 $10^5\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$,校准电容薄膜规和磁悬浮转子规时不确定度为 $0.01\%\sim 1\%$ 。

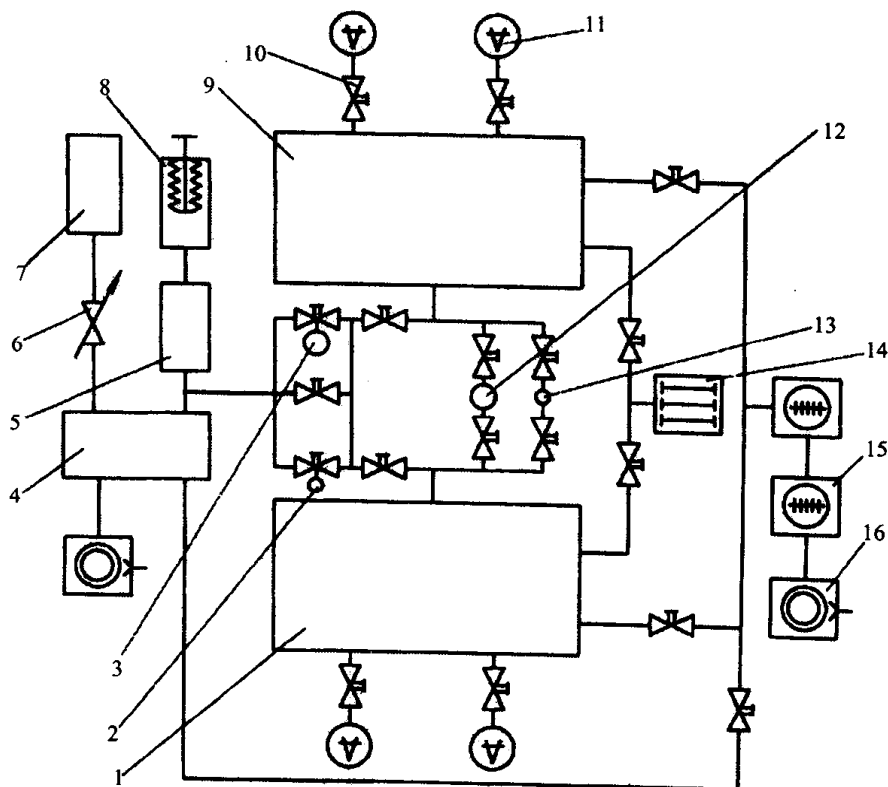


图 11-69 金属膨胀法真空标准原理图

- 1—校准室 V_R ; 2—取样室 V_{1s} ; 3—取样室 V_{1b} ; 4—石英规; 5—稳压室;
6—微调阀; 7—气源; 8—变容室; 9—校准室 V_L ; 10—手动阀; 11—被校真空规;
12—取样室 V_{2b} ; 13—取样室 V_{2s} ; 14—溅射离子泵; 15—涡轮分子泵; 16—机械泵。

在静态膨胀法真空标准的研制和使用中,应注意前级标准的选择和前级压力的精确测量,取样室和校准室的体积和体积比的精确测量,标准压力的计算和修正,还需考虑吸附效应、温度效应和实际气体效应对标准压力的影响。

从理论角度来看,静态膨胀法有一个很大的优点,真空系统中的气流分布是一种较理想的随机状态,能够满足气体分子运动论的基本假设。静态膨胀法的主要问题是容器表面的吸附和解吸效应。如果选用惰性气体作为校准气体,那么容器内表面的吸附效应将可以忽略。为了降低容器内表面的吸附和规管抽气的影响,应尽可能增大校准室体积。在系统烘烤后和正式进行校准前,用校准气体冲洗校准室,使容器清洁的内表面预先吸附一层气体,可以降低容器内表面吸附效应的影响。故深入研究不同表面的吸附、解吸和采用相应的表面处理工艺,降低容器内表面吸附解吸效应的影响,才能进一步提高静态膨胀法的准确度和可靠性。

(四) 动态流量法校准系统

1. 原理

图 11-70 是动态流量法校准系统的原理图。

根据气流连续性方程,有

$$(p_M - p)U_1 - (p - p_e)U_2 + Q_0 - pS_g = V \frac{dp}{dt} \quad (11-51)$$

在稳定平衡时

$$V \frac{dp}{dt} = 0$$

假设 $S \ll S_e$, $p_M \gg p$, $Q \gg Q_0$, $p \gg p_e$, 则式(11-51) 变为

$$p \approx \frac{U_1}{U_2} p_M \quad (11-52)$$

如果我们用绝对规测量 p_M , 并据分子流理论, 按结构尺寸计算出 U_1/U_2 , 那么从式(11-52) 就可计算出压力 p , 于是就能对接于校准室上的规管进行校准。

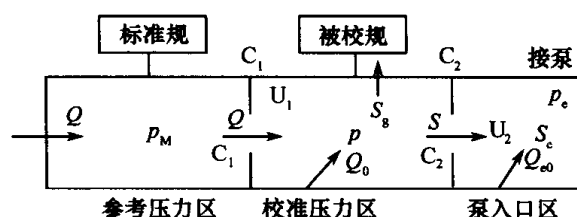


图 11-70 动态流量法原理图

p_M —参考压力; p —校准压力; p_e —泵入口区压力; U_1 、 U_2 —标准流导;

Q_0 —校准区放气量; Q_e —泵入口区放气量; Q —注入气体流量;

S_e —泵口区抽速; S —通过 C_2 的有效抽速; S_g —规管的抽速及壁吸附; V —校准区体积。

在气流处于热平衡的条件下, 圆形短管的分子流流导公式为

$$C = 3.638\pi r^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} K_c \quad [\text{L/s}] \quad (11-53)$$

式中 r ——圆管半径[cm];

T ——气体的热力学温度[K];

M ——气体的摩尔质量[g];

K_c ——克劳辛修正系数。

计算 K_c 的近似公式很多, 这里仅给出如下经验公式以供参考。

$$\frac{L}{r} \leq 1.5 \text{ 时}$$

$$K_c = \frac{1}{1 + 0.5 \frac{L}{r}} \quad (11-54)$$

$$\frac{L}{r} > 1.5 \text{ 时}$$

$$K_c = \frac{1 + 0.4 \frac{L}{r}}{1 + 0.95 \frac{L}{r} + 0.15 \left(\frac{L}{r} \right)^2} \quad (11-55)$$

式中 L ——管长[cm]。

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{K_{c1} r_1^2}{K_{c2} r_2^2} \quad (11-56)$$

式(11-56)说明分子流导之比仅是导管尺寸的函数,而与气体成分无关。这一点使动态流量法更具“绝对性”,也是此法的重要优点之一。

从上述原理可知,动态流量法是把大流量的气流注入系统中,用串联的流导建立起气流动态平衡的校准方法。此法具有如下特点:

- ① 吸附和解吸效应的影响很小;
- ② 在热平衡的分子流状态下,流导比仅是结构尺寸的函数,而与气体成分无关;
- ③ 校准压力下限可随真空获得水平的提高而延伸;
- ④ 结构和工艺不很复杂。

目前,动态流量法已广泛用于高真空和超高真空校准,并已成为最主要方法,其校准压力的下限已延伸到 10^{-10}Pa 。

2. 设计原则

概括地说,动态流量法应尽可能使系统工作在式(11-51)和式(11-52)所要求的条件下。具体地说,有如下四个原则:

① 尽可能保证分子流状态。例如要防止分子束射效应,避免定向流的存在。国际标准化组织公布的草案(ISO/DIS3570/1)中规定,流导 U_2 前后的两个容器的内切球表面积应比孔 U_2 的面积大 1000 倍,最好选用球形校准容器,因为球是一个各向同性的形状,有利于克服分子束射效应和建立起各向同性运动的分子流状态。

② 尽可能保证等温条件。例如要考虑热阴极、冷阱以及低温泵等冷、热辐射的影响。

③ 尽可能采用近于理想圆孔的流导。国际标准草案规定孔径和孔厚之比 $(d/L) \geq 50$;

④ 尽可能满足 $S \ll S_g$ 、 $p_M \gg p$ 、 $Q \gg Q_0$ 和 $p \gg p_e$ 的条件。这主要取决于抽气系统的设计和 p_M 、 U_1 、 U_2 的选择,其中最关键的是选择 U_2 。若选用大的 U_2 ,则要求 S 和 Q 增大并使 p 下降,这样就比较容易满足 $S \ll S_g$ 、 $Q \gg Q_0$ 和 $p_M \gg p$,但是如果所选择的 U_2 太大,则会导致定向气流过强,使校准室中产生非均匀气流。再者选择的 U_2 太大就要求泵抽速 S_e 进一步提高,才能满足 $p \gg p_e$ 。因此如何恰当地选择 U_2 ,需权衡这些相互制约的因素。国际标准草案规定 $S_e \geq 50U_2$ 。

3. 结构

已建成的动态流量法校准系统按结构分类有如下几种类型:固定流导法(图 11-71、图 11-72)、可变流导法(图 11-73)及参考转换器法(图 11-74)等。

所采用的上游参考标准有精密 U 形压力计、压缩式真空规、精密流量计、电容薄膜规、B-A 规等。后两种是相对规,要经过精确校准后才能用作参考标准。

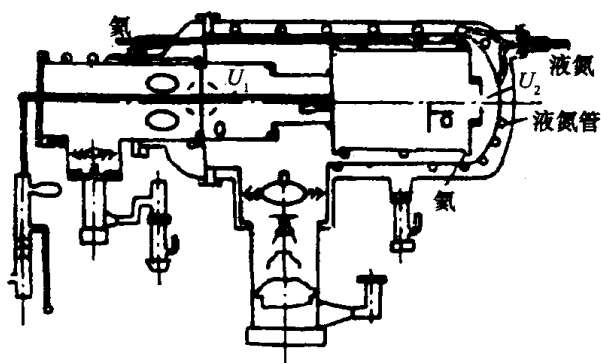


图 11-71 费克斯(Feaks)系统

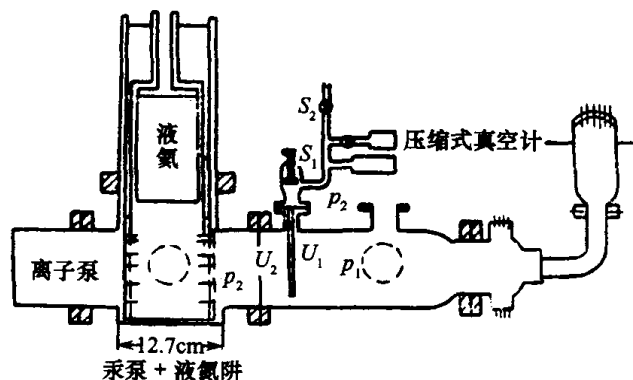


图 11-72 戴维斯(Davis)系统

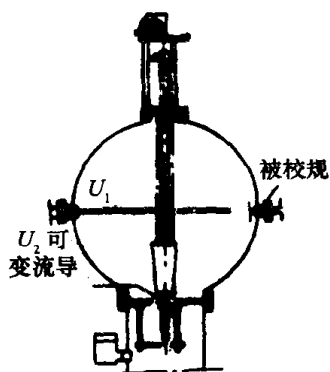


图 11-73 可变流导法系统

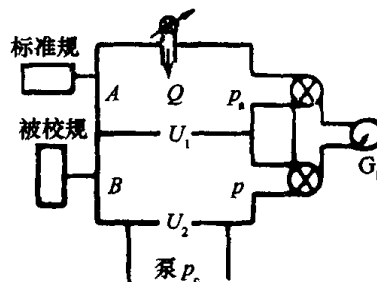


图 11-74 参考转换器系统

标准流导 U_1 可采用玻璃毛细管、金属毛细管、多孔玻璃塞以及金属微孔等。标准流导 U_2 可采用玻璃圆孔或金属圆孔。

1988 年美国国家标准技术研究院(NIST)建立了动态流量法真空校准装置,测量范围为 $10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-7}\text{Pa}$,不确定度为 $1.4\%\sim 8.2\%$ 。开展了磁悬浮转子规和热阴极电离规的绝对校准工作。1992 年德国物理技术研究院(PTB)也建立了动态流量法真空校准装置,测量范围为 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$,不确定度为 $1\%\sim 4\%$ 。进行了小孔流导法真空校准装置和静态膨胀法真空校准装置的比对工作。图 11-75 是动态流量法超高真空校准装置原理图,校准范围为 $10^{-7}\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$,不确定度为 $3\%(10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa})\sim 10\%(10^{-7}\text{Pa})$ 。

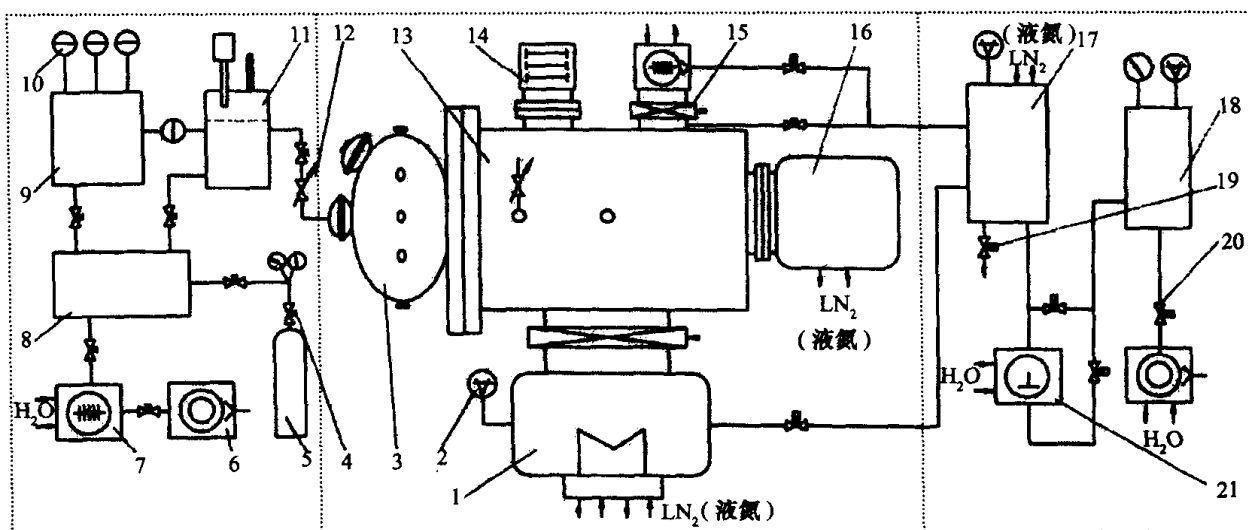


图 11-75 动态流量法超高真空校准装置原理图

- 1—低温泵; 2—真空规; 3—校准室; 4—手动阀; 5—气源; 6—机械泵; 7—分子泵; 8—稳压室;
9—参考室; 10—电容薄膜规; 11—变容室; 12—微调阀; 13—校准室; 14—溅射离子泵;
15—插板阀; 16—钛升华泵; 17—冷阱; 18—分子筛油阱; 19—电磁阀; 20—气动阀; 21—罗茨泵。

4. 误差

动态流量法的误差,来源于下列三个方面:

①与式(11-51)相比,式(11-52)忽略了一些次要因素的作用。如果采用式(11-52)进行计算,就要引入误差。但是由这些被忽略的因素所引起的误差,即使不能精确确定,也还是能够粗略估算的。

②式(11-51)中没有列入的、且是随时间变化的动态参量所引起的误差。例如由吸附、出气、残余气体成分、标准流导的污染或堵塞、高温烘烤的氧化作用导致金属小孔流导值的改变以及泵抽速变化所引起的误差等。这些动态参量所引入的误差,有的难以控制,有的无计计算。

③和动态流量法理论有关的问题。

5. 动态流量法的理论问题

分子流理论是动态流量法的理论基础。但是在超高真空和极高真空区间,分子流理论的前提假设条件已难以完全满足,一些基本定律已不完全适用。

动态流量法的特点是将大流量的气流注入到校准室中,通过比较大的流导 U_2 进行抽气,建立起动态平衡的气流状态,所以此法可以忽略吸附和解吸的影响。但是这种较强的定向气流,会使各向同性的分子流状态发生畸变。

通过理想小孔的分子流,其气流密度的角分布是符合余弦散射定律的,在极坐标上此气流密度角分布的花样是球面形的。但是通过实际小孔(短管)的分子流,其气流密度角分布的花样就不再是球面形的了,而呈椭球面形,即发生了分子聚束效应。这种聚束效应使容器中的气流状态具有方向性,从而使分子速度的分布偏离麦克斯韦分布定律。

容器壁存在着吸附效应,容器壁面过于光滑或粗糙将会使分子发生镜面反射或反向散射,在导管中存在气流的滑动、爬移、飞越等流动形式,都导致分子碰壁后的散射偏离余弦散射定律。

当校准系统中存在着低温泵、高温阴极等冷、热源时,会使气流的热平衡条件遭到破坏。在这样的非均匀热力学环境中,分子速度分布不再符合麦克斯韦分布定律。

总之,在超高真空和极高真空下,气体分子平均自由程越来越大,空间分子数越来越少,容器表面上发生的效应具有更大的重要性。以描述空间分子状态为主的分子流理论必须向前发展,才能描述这种压力下的物理现象。同时在超稀薄的非均匀的分子流状态下,“压力”这一属于各向同性的流体静力学的物理概念,已失去了它原来的物理意义,起伏效应变得明显,统计学的近似性就表现出来了。

由克努曾(1909年)和斯莫尔霍夫斯基(1910年)两人奠定的,随后由克劳辛(1932年)等人发展起来的分子流理论,随着扩散泵抽速测量等研究的发展,已有很大的提高。但是随着动态流量法校准研究的深入,又提出分子流理论尚未解决的许多新课题。目前,首先应该把分子流理论的已有成果进一步引进到动态流量法校准的设计中去,尽可能避免偏离分子流理论所要求的条件,以提高校准工作的精度。反过来,随着校准研究的发展,也必然会推动分子流理论向更高级的阶段前进。

(五) 趋势

真空标准的发展趋势,可以概括为如下几个方面:

1. 解决准确度问题

①出现更多类型的绝对真空标准。

②真空标准间互校的研究和进行国际性的比对。

③需加强有关基础理论的研究。例如开展与超高真空校准密切有关的超稀薄气流的研究;开展与膨胀法校准密切有关的吸附理论研究;开展新的校准原理研究;开展真空计量学基本问题的研究等。

2. 真空测量规程和校准规程的制订

真空测量规程和校准规程,是真空检测工作必须共同遵循的法定技术文件,是真空量值能够精确传递的重要保证。

3. 扩散校准的压力范围

扩散粗真空和极高真空的校准区间;对已建立的低真空、高真空、超高真空标准进一步深入的研究。

4. 发展原位置校准

原位置校准可以克服因校准条件和使用条件不一致所引起的误差,以适应某些高精度测量的需要。

5. 特殊环境条件下的校准研究

例如航天科学、高能物理、受控热核反应、冶金等领域中所遇到的高温、低温、磁场、电磁辐射、带电粒子辐射、粉尘环境等特殊环境条件下的校准。

6. 副标准真空规的研制

副标准真空规是真空量值传递系统的中间环节,也可以作为绝对真空标准间接互校的有力工具。

7. 普及工作

目前,在真空计量工作中除要注意提高外,更要注意普及。因为从实践中反映出来的问题看,真空量值测不准甚至于发生错误,主要还是如何使用真空规的问题。

四、真空测量技术

(一) 概述

在真空测量实践中,要用真空规比较精确地去测量被研究的稀薄气体压力,以达到预期的目的,必须考虑下列三个问题:

①首先要对被研究的对象有一般性的了解:

a. 是非可凝的气体还是可凝的蒸气? 是单一气体还是混合气体? 是惰性气体还是活泼性气体或腐蚀性气体?

b. 气流状态是稳态还是瞬态? 是均匀气流还是非均匀气流?

c. 所处的温度是等温还是不等温? 是高温还是低温?

d. 有无磁场、电场、振动、冲击、加速度、带电粒子、辐射等特殊条件?

②根据研究对象的情况和研究的目的,正确选用真空规,并需对所选用的真空规有较深入的了解,即了解其原理、量程、特殊和局限性,以便正确地使用它。

③要研究真空规与被测对象之间的相互作用。规的引入可能会使被测对象的原来状态发生畸变,同时被测对象也可能改变规的性能、干扰规的正常工作。

由此可知,要比较精确地进行真空测量,仅仅孤立地去研究真空规还是很不够的,必须全面地研究与上述三个方面问题有关的测量技术。

由于影响真空测量的因素较多,而且难以控制,所以测量精度是不高的。如果再不能很好地解决上述三个方面的问题,那么将会引起更大的误差,甚至发生明显的错误。

从真空应用角度看,多数情况并不需要过于高的精确度,只有在少数情况下(例如空间研

究中),才要求高的测量精度(误差 $\leq 1\%$)。这样的高精度对粗低真空范围的真空测量来说是可以满足的,但在更宽的量程内还不能达到。

(二) 气体种类与真空规

如果被测气体是氮气或惰性气体(如氦、氖等)就比较简单。但多数情况下,系统中的气体是氮、氧、氢、一氧化碳、二氧化碳、水蒸气、氩、氪、甲烷、汞和油蒸气等多种气体和蒸气的不同组合,其中尤以氧、水蒸气、油蒸气等组分会给真空规带来坏的影响,在选用真空规时必须认真考虑气体组分对真空测量的影响。

1. 氧气

氧是理想气体,所以可用压缩式真空规进行测量,但分压过高时,会使水银表面发生氧化,从而污染玻璃毛细管的内表面,导致水银毛细管压低的无规则变化,产生很大的测量误差。氧对水银 U 形压力计也有同样的影响。

氧气会使热传导规的热丝氧化,改变热丝的表面状态,引起规管零点漂移和灵敏度的改变。如采用抗氧化性好的白金丝作热丝,则能使规管性能稳定。

电离规的热阴极在氧气中工作会有明显的损耗。如果在高于 10^{-2}Pa 的氧压下工作,钨阴极很快就会被烧坏。如果在低于 10^{-3}Pa 的氧压下工作,钨阴极就可以长时间使用。热阴极电离规对氧气有较大的抽速,冷阴极电离规对氧气的抽速更大。

在粗低真空区间测定氧压的最好规型是薄膜规(尤其是不锈钢制的电容薄膜规)。也可采用 α 规和 β 规。

测量空气(N_2 、 O_2)压力时应考虑规与氧气的作用。

2. 水蒸气

可凝性水蒸气的压力一般不能用压缩式真空规来测量。

若用热传导真空规测量水蒸气的压力,也会与测氧压一样,引起规管零点的漂移和灵敏度的改变。

用具有钨阴极的电离规测量水蒸气压时,水蒸气会被高温钨表面分解并与钨反应生成氧化钨和原子态氢,氧化钨蒸发后附着在玻璃壁上,原子态氢则从玻璃壁上的氧化钨中夺取氧再变成水蒸气,这样循环下去,水蒸气就起着“输运”钨的作用,致使钨不断地“蒸发”。在高于 10^{-2}Pa 的水气压力下使用钨阴极时,会使钨严重“蒸发”,此时钨的消耗速率相当于在氧中的 $1/5$,与在大气中的消耗速率差不多。如在电离规中采用铯或铯钨阴极,则可用来测量高达 10^{-1}Pa 的水蒸气压力。

通常对可凝性水蒸气测量,在粗真空区间可用 U 形计,在低真空区间可用薄膜规和 α 规,在高真空区间可用粘滞规和克努曾规。

真空规对于水蒸气的可靠的校准方法至今还没有建立,一般只是用对氮气校准过的真空规来测量,而以等效氮压力来表征水蒸气压力。

3. 油蒸气

在用有油的抽气手段(扩散泵和机械泵)抽气的系统中存在分子量很大的有机油蒸气及其分裂物。它们的蒸气压一般比较低,因此不能用压缩式真空规测量。如果压缩式真空规测量机械泵的极限压力时,要比热传导规测得的数据约低一个数量级。

用油 U 形压力计测量油蒸气压力时,因工作油可以溶解油蒸气,所以也不能得到正确的指示。

用热传导规测量时,油蒸气附在热丝和规壁上,会改变表面性能,引起热传导规零点漂移和灵敏度的改变。用电离规测量时,油蒸气会被高温阴极表面所分解或由电子轰击而分解,生成碳氢化合物,污染电极和管壁,使规管的灵敏度和特性发生明显的变化。规管对油蒸气的灵敏度要比氮气高 10 倍。要校准电离规对高分子碳氢化合物的灵敏度是很困难的,不同资料对低分子碳氢化合物校准的结果也不很一致,但综合有关数据,可得出电离规对不同碳氢物的相对灵敏度的规律性。

通常测量油蒸气压力,在粗低真空区间,可用薄膜规测量,在高真空区间可用克努曾规测量。

(三) 作为“气沉”和“气源”的测量系统

测量系统(规管及其连接管)对被测系统的影响,可以概括为“气沉”和“气源”两种动态效应的综合。尤其是在很低压力的测量中,这两个效应的影响是十分严重的。例如用两支 B-A 规通过各自的导管接在静态真空系统上,去测量系统的压力。假设其中规 1 的“气源”效应强,而规 2 的“气源”效应弱,那么规 1 将比规 2 指示出较高的压力。也可假设规 1 中“气沉”效应小,而规 2 中“气沉”效应大,同样可得到规 1 比规 2 指示出较高压力的结果。因此仅从外表上看,很难断定哪支规管的测量值更正确些。要能作出正确的判断,必须研究规管和其连接管中“气沉”和“气源”的位置、大小和它的形成机制。

在不同形式的真空规中,以电离规的“气沉”和“气源”效应最严重,而其余各种规的影响很小,可以不考虑。

下面仅讨论电离规中的“气沉”和“气源”效应。

1. 电离规的抽气作用

(1) 电清除抽气

电子碰撞气体分子使其电离产生离子。具有一定能量的离子(约 100eV)打到规壁或收集极时,这些离子被束缚在固体表面或被埋入表层下面而被清除,束缚得最牢的分子要经过 300℃ 的烘烤才能再释放出来。如果规管内壁存在溅射的金属薄膜,则对氦气也有一定的抽气作用。

电清除抽气速率 S_E 的大小与电子流、各极电位、有无磁场、规壁温度等因素有关。若电子流增加,离子流也呈线性增加,所以电清除抽气速率 S_E 与电子流有近似的线性关系。栅极电位变化将改变电离概率和离子能量,因此电清除抽气速率 S_E 也随之变化(图 11-76)。

在冷磁控规中,因有磁场存在,电离效率更高,所以在冷磁控规中电清除作用也更大。

电离规规壁的温度和电位对电清除抽速有较大影响。当规壁温度下降时,会使电清除抽速增大和被束缚分子的再释放速率降低。当规壁处于栅极电位时的电清除抽速是规壁电位为阴极电位时的 1/5。

为了降低电清除作用,需降低灯丝发射的电子流和栅极电压。例如在 B-A 规中, $I_e =$

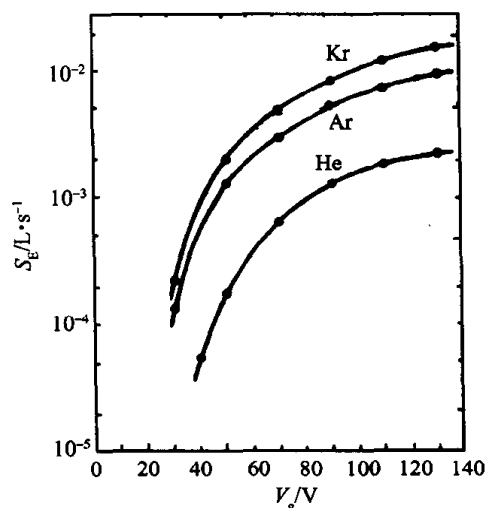


图 11-76 B-A 规对 He、Ar、Kr 的抽速与栅压 V_g 的关系曲线

10mA, $S_E = 0.03\text{L/s}$, $I_e = 100\mu\text{A}$, $S_E = 3 \times 10^{-4}\text{L/s}$ 。

当收集极和规壁已束缚了一个单分子层时,清除作用就逐渐衰减。

电离规对氮的清除作用较大,这是由于除上述的电离清除效应外,还由于电子碰撞氮分子可使氮处于激发态,变成了活性分子(或原子)而产生化学清除效应。

(2) 化学清除抽气化学清除作用的类型

①化学活性气体(H_2 、 N_2 、 CO_2 、 CO 等)在固体表面上的化学吸附效应。当表面形成了一个单分子层时,化学吸附效应渐趋饱和。

②高温钨丝的氧化作用。氧与钨作用形成三氧化钨,三氧化钨沉积在规壁上形成黑色膜。随阴极温度 T_w 上升,此效应增大,在 $T_w = 2200\text{K}$ 时,对氧的化学清除抽速 $S_c = 0.6\text{L/s}$ 。

③气体在高温钨表面上的分解作用。氢分子在高温钨表面可分解为原子氢,原子氢易被吸附在规壁上,在 $T_w = 1475\text{K}$ 时,这种作用对氢的抽速 $S_c \approx 0.1\text{L/s}$ 。氧分子亦能在钨表面分解为氧原子,然后被吸附在规壁上,在 $T_w = 1700\text{K}$ 时,对氧原子抽速 $S_c \approx 0.04\text{L/s}$ 。这些现象都存在饱和现象。

表 11-11 列出了超高真空规对不同气体的起始抽速。

表 11-11 超高真空规对不同气体的起始抽速

规 型	工作条件	抽 速/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$									
		He	Ne	Ar	Kr	Xe	H_2	N_2	O_2	CO	CH_4
B-A 规	$V_{\text{gr}} = 15\text{V}$ $I_e = 10\text{mA}$	6×10^{-3}	7×10^{-3}	2×10^{-2}	5×10^{-2}	6×10^{-2}	8×10^{-2}	3×10^{-1}	2.5	0.54	1.5×10^{-2}
正磁控规	$V_A = 6\text{kV}$ $B = 1 \times 10^{-1}\text{T}$	2×10^{-1}		1.7			2.0	2.5	1.5×10^{-1}		
反磁控规	$V_A = 6\text{kV}$ $B = 2 \times 10^{-1}\text{T}$	3×10^{-2}		2.5×10^{-1}				7.5×10^{-1}			

注:影响规管抽速的因素很多,此表数据仅供参考

2. 规中气体的再释放

①热解吸。热阴极电离规的高温阴极本身就是一种气源,它的高温热量辐射到其它电极和规壁上,将引起气体的热解吸。此外,栅极接受电子、收集极接受离子时,也会因发热而导致气体的热解吸。为了消除热解吸对测量的影响,要预先对规各电极和规壁进行充分除气。可以采用烘箱烘烤、电子轰击、欧姆加热、高频加热等方法来除气。尤其是在超高真空环境中使用热阴极规时,必须采用严格的除气规程。

②电解吸。由于电子收集极上存在气体吸附层,当电子打在其表面时会使吸附层的气体解吸,或先在表面将气体电离后再以离子形式解吸出来,这就是所谓的电子碰撞解吸(EID)效应,它是热阴极电离规的一个重要的下限因素。

③光解吸。光解吸指的是固体表面受光辐照时,表面上的分子解吸和分解现象。在超高真空测量中,需要注意此现象。光解吸截面与光的波长有关(图 11-77,图 11-78)。

由于在高能加速器和受控聚变反应器中存在着强烈的辐射,所以这种真空装置中的光解吸问题更为严重。

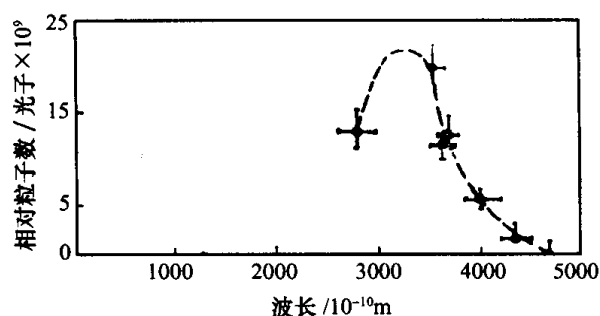


图 11-77 Ni 上 CO 的光解吸截面

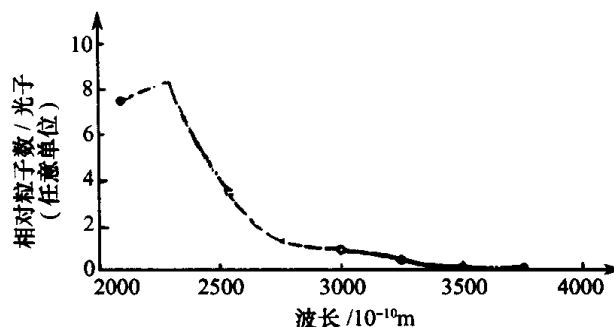
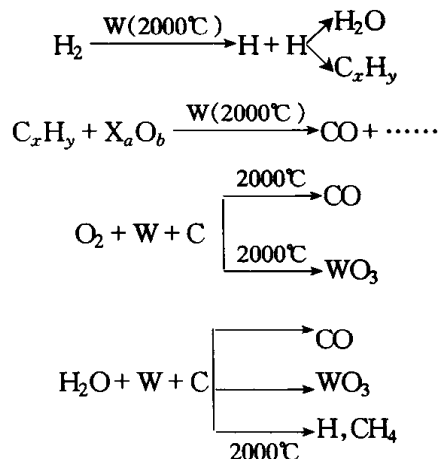


图 11-78 派列克斯玻璃上 CO 的光解吸截面

3. 热表面与气体的相互作用

规中的热丝与气体相作用会导致氧化、分解和生成新的气体。前两种作用造成化学清除，后一作用将引起系统中的气体成分产生很大的变化。例如，炽热钨丝与气体间的反应可能有由炽热钨丝表面分解成的原子氢，很容易被吸附在不同的表面上，并且在表面与其它气体化合生成一氧化碳、碳氢化物、水蒸气等新的气体，从而大大地改变了系统中的气体组成。



此外，二氧化碳与热丝作用可生成氧气和一氧化碳，甲烷也会被热丝所分解。

采用低功函数的低温阴极，如敷氧化钍-钨丝(ThO_2/W)等，可以降低上述效应。如果在氧气中进行高温预处理来降低钨丝中碳的杂质浓度，则可以大大降低所产生的一氧化碳的数量。

4. 管规和裸规

1947 年布利斯(Bleas)首先观察到，在用管规和裸规同时去测量油扩散泵系统的极限压力时，裸规读数要比管规高 10 倍。这现象称为布利斯效应。

产生布利斯效应的主要原因是由于管规连接导管对油蒸气的吸附作用。它相当于一个挡油阱，使管规只能测出理想气体的分压，而裸规测量的则是理想气体的分压与油蒸气分压之和。实验证明，连接导管对油蒸气的流导为对空气流导的 $1/10^4$ 。只有在连接导管内表面吸附的油蒸气达到饱和时，管规与裸规的读数才趋于一致。但是达到饱和的时间是十分长的，需 3 至 4 个星期。

除上述主要原因外，造成管规与裸规读数不同的原因还有：

① 电离规对油蒸气的规管灵敏度数要比对氮气的规管灵敏度大 10 倍。

② 油分子进入管规后，一方面被管壁吸附，另一方面因被热阴极分解而被清除。当规壁上因电极材料蒸发形成吸气膜时，对油分子和它的分解物的抽速会更大。

③由管规玻壳电位变化而引起规管灵敏度的改变。

④由于连接导管流导的限制和管规中的抽气效应(或出气效应)会使管规与被测容器之间产生压差。

一般说来,测量均匀平衡系统的全压时,裸规读数要比管规更正确。但存在定向气流的系统中,管规可测出反映方向性的“有效压力”,而裸规的读数则没有明确的含义。

(四) 非均匀环境下的真空测量

实际真空系统中,存在着从气源流向泵的气流,这些气源有的是经过漏孔注入的气流,也有的是由于各种出气效应造成的气流。不仅各种真空泵可以抽除气体,而且真空规和清洁表面也有吸附气体作用。因此,实际的真空系统中气流分布通常是不均匀的。流经管状导管的气体会被管子聚束,导致流入容器的气流分布更不均匀。真空系统中稀薄气流非均匀分布的影响,已成为近年来详加研究的课题,而这些研究结果则又促进了精确测量气体压力技术的发展。

一般情况下,在我们讨论压力测量时,无形中已假定了两个条件:

①在一包壳中,单位立体角的气流密度与方向和位置无关,在给定空间的一点只存在一个压力,此压力与在此点的压力规的方位无关。即气流各向同性的假设。

②系统所有部分是处在同一温度下,被引用的气体压力指的是此温度下的压力,即等温假设。

事实上,这两个条件在许多实际系统中是不满足的,举两个典型例子加以说明:

①如容器中的气流沿同一方向流向一个粘着系数为 1 的表面,那么当规管的开口对着此表面时,则读数为 0,而规管开口对着气流时读数则最大。这例子说明气流方向对测量的影响。

②一封闭的电离规,其中充有静压为 p_1 (T_1 为 300K) 的氮气,若将其浸入液氮中 (T_2 为 77K),则其中压力 p_2 为

$$p_2/p_1 = T_2/T_1 = 0.257$$

虽然压力降低了约 3/4,但因气体密度没变,所以电离规的指示不变。这例子说明温度对测量压斩的影响。

在超高真空系统中,定向流动和不等温状态往往同时存在,可见研究非均匀环境下的压力测量问题是实践中提出的一个十分重要的理论问题。

研究非均匀气流测量问题,导致碰撞压力转换器规的发展(图 11-79)。这是一种由两个小室构成的、具有小孔入口的管规。第一个室是球形的,它的作用是使经过小孔注入的定向分子束气流变成随机状态,然后由与此室相连的、具有挡板的管状电离规所测量,此规的压力读数可用来监测定向分子流量。规中的分子密度 n (其相应的压力为 $p = nkT$) 和规孔面对着气流方向时所进入的分子入射率 Γ_n 之间的关系如下

$$\Gamma_n = n(kT/2\pi m)^{1/2} = p/\sqrt{2\pi mkT} \quad [\text{分子数}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] \quad (11-57)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数;

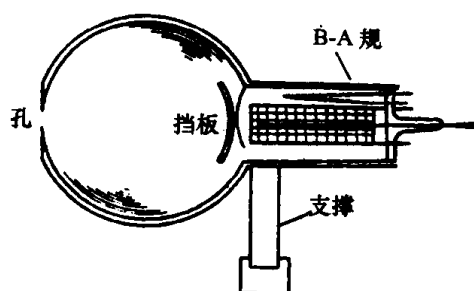


图 11-79 碰撞压强转换器规

T ——热力学温度。

采用装在移动臂上的压力转换器规的实验不但证明了通过薄孔和短管的气流花样是与理论相符的,同时还可研究球形容器中分子流分布。

在航天科学的空间环境模拟容器中模拟外层空间的分子沉条件时,从容器中心的试件上发出的分子在被容器壁捕集之前,要经碰撞多次才返回到试件上。返回次数 N 为

$$N = g(1 - \alpha_c)\alpha_c \quad (11-58)$$

式中 α_c ——壁的粘着系数;

g ——几何因素。

模拟的理想目标是使 $N \rightarrow 0$ (分子沉),这就要求 $\alpha_c \rightarrow 1$ 。为了用电离规监测模拟分子沉的效果,将管规放在容器中心,测量从壁上返回的分子流,用所谓“有效压力”来表征分子沉模拟的效果。

在分子流情况下,两容器间被一理想小孔分开,通过小孔没有有效的气流流动。如两容器处在不同的温度下 (T_1, T_2),则两处相应压力为 p_1 和 p_2

$$p_1/p_2 (T_1/T_2)^{1/2} \quad (11-59)$$

这是有名的热流逸定律。但是如果将两容器用一根玻璃管分开,则会发现

$$p_1/p_2 = b(T_1/T_2)^{1/2} \quad (11-60)$$

式中 b ——热流逸修正系数。

在 $T_1 > T_2$ 时, $b < 1$ 。这一结果说明导管聚束作用所产生的影响,导致偏离了热流逸定律。

对非均匀环境中压力测量的研究将使我们更真实地去反映客观事物的状态,具有重大的理论和实践意义。在这方面很多问题还有待深入研究。

(五) 特殊条件下的真空测量

一些尖端科学领域和工业部门的真空测量要求解决一系列新的课题。

① 航天科学中真空测量的研究可分为:a. 空间环境模拟室中的真空测量。b. 空间飞行器上的真空测量。c. 星体表面的真空测量。在解决分子沉、非稳定流、超声速流的测量问题时,还会遇到高温、低温、辐射、带电粒子、微流量、宇宙尘、振动、加速、冲击、自旋、着陆等环境条件。这种情况要求真空规具有体积小、质量轻、宽量程、高精度、长寿命、快速反应等特点。

② 高能粒子加速器中的真空测量。例如,CERN 质子交叉贮存环的真空室长为 2000m,其上接有 500 个 B-A 规,30 个残余气体分析器,整个系统的压力范围为 $10^{-3}\text{Pa} \sim 10^{-10}\text{Pa}$ 。在真空测量中要求解决自动检测、程序控制、计算机处理等要求,而且还具有磁场、高能粒子、辐射等环境条件,因而要求真空规具有量程宽、寿命长、小型化等特点。

③ 在受控热核反应器内的真空测量中将会遇到变化的磁场、辐射、带电粒子等环境条件,所以要求能有抗干扰的快速测量。

④ 冶金工业的真空测量会遇到高温、粉尘、腐蚀性气体、水蒸气等条件。要求真空规能测全压、量程宽、寿命长、牢固、可靠、使用方便。

⑤ 电子管工业中,在解决测量已封离的电子器件内的真空度时,通常用器件本身的电极构成电离规来进行测量。

近年来,在上述特殊条件下的真空测量都有些进展。

虽然上述特殊条件下的真空测量是解决特殊条件所局限的特殊矛盾,但是它对真空测量技术的发展具有深刻的意义。

(六) 测量值的评价和误差

1. 测量值的评价

真空规的测量值意味着什么?是全压还是其它?这是必须要搞清楚的。

弹性变形规和 U 形压力计是直接测出气体全压的,与气体种类无关。因此它的测量值是明确的。压缩规只能测出理想气体的分压,而与理想气体的种类无关,它不能测出可凝蒸气的分压。克努曾规只有在假定热适应系数 $\alpha = 1$ 时,其指标值与气体成分无关,才能够测出全压。其它一些常用规型,不能直接测量全压,而是测量与气体压力有关的某个物理量(如热传导、粘滞性、分子密度等),所以指示值与气体种类有关,需要对各种气体分别进行校准。实际系统中的气体氛围是各种气体和蒸气的混合,往往不清楚其组成,所以用这些真空规测量时,不能真实地表示出来被测气体的全压。这时只能用“等效氮压”来表示。在用电离计进行测量时,如果系统中的主要组分是油蒸气,那么所表示的“等效氮压”会比实际压力大 10 倍左右,如系统中主要是氦气,那么将比实际压力小 5 倍左右。在用电离计测水银扩散泵和油扩散泵的极限压力时,如两者读数一样,反而说明两泵真正的极限压力并不相同,因为两系统中的残余气体成分是不同的。

管规的指示值是与规壳中的压力有关,但是测量的目的应是,指示出连接导管开口处系统中的压力,所以校准时规的输出值需对应于导管口的压力,并且要求校准条件(温度、气体、连接管长短等)与实际使用时相同,否则需进行修正。由于实际条件往往难以控制和不能精确知道,致使修正十分困难,从而使得测量值不够明确。

因此,真空规测量值能否表征被测系统中的全压(即真空度),必须进行正确的判断和评价,才能获得明确的结果。对测量值的评价可归纳为下列几点:

- ① 测定值与真空规的安装位置有关;
- ② 应对管规导管开口处压力进行校准;
- ③ 在不知道气体组分时,如用“等效氮压”来表征,将使测量值不够明确。

在某些情况下,用气体分子密度、分子入射率、方向性压力等来表征真空度,可能比用气体全压的概念更明确。但是在采用新的表征真空度的物理量的同时,要求选择合适的规型和研究新的测量方法和技术。

2. 规管的抽气和出气所引起的误差

规管的抽气和出气作用是一个与规的历史条件和使用条件有关的变化参量,必须研究它对测量值的影响。图 11-80 给出一支通过导管和系统相连接的真空规,用来说明由规的导管所引起的误差。规管的抽气或出气引起的压力变化速率为

$$V \frac{dp_2}{dt} = Q - U(p_2 - p_1) \quad (11-61)$$

式中 $\frac{dp_2}{dt}$ —— 规管中压力变化速率;

U —— 导管流导;

$U(p_2 - p_1)$ —— 流过导管的流量;

Q —— 规管的出(抽)气量, $Q > 0$, 规管出气; $Q < 0$, 规管抽气。

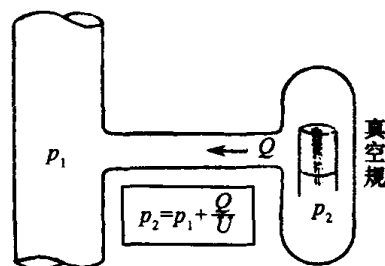


图 11-80 真空规导管引起的误差

在平衡时

$$p_2 = p_1 + Q/U \quad (11-62)$$

假设规不存在抽气和出气作用,即 $Q = 0$,则 $p_2 = p_1$ 。除电离规以外的其它规都属于这种情况。电离规虽存在抽气和出气作用,但只要校准和使用时的 $\frac{Q}{U}$ 相同,也不致引起误差,因为校准是相对 p_1 进行的。为了降低因 $\frac{Q}{U}$ 不同而带来的误差,希望尽可能增大导管流导 U (采用粗而短的导管),裸规则不存在此种误差。此外还希望尽可能降低出气(抽气)量 Q 。不同的压力下由 Q 所引起的相对误差是不同的(见表 11-12)。

表 11-12 规管出气对压力测量的影响(导管流导 $U = 2\text{L/s}$)

$\frac{Q/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}}{p_2/\text{Pa} \quad p_1/\text{Pa}}$	$p_1 = 1 \times 10^{-2}$	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}
10^{-3}	1.05×10^{-2}	1.5×10^{-3}	6×10^{-4}	5.1×10^{-4}
10^{-4}	1.01×10^{-2}	1.05×10^{-3}	1.5×10^{-4}	6×10^{-5}
10^{-5}	1.00×10^{-2}	1.01×10^{-3}	1.05×10^{-4}	1.5×10^{-5}
10^{-6}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	1.01×10^{-4}	1.05×10^{-5}
10^{-7}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-4}	1.01×10^{-5}

注:不进行加热除气的真空规,出气量一般为 $10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。
充分除气的真空规出气量约为 $10^{-10}\text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-11}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$

由表 11-12 可知,在 $p \leq 10^{-4}\text{Pa}$ 时,必须对规管进行严格除气,并且要求校准和使用时除气规范相同。在 $p > 10^{-2}\text{Pa}$ 时,没有必要对规除气。

经过彻底除气的电离规通常具有抽气作用,因而式(11-62)可改写为:

$$p_2 = p_1 \left[\frac{1}{1 + \frac{S}{U}} \right] \quad (11-63)$$

S 为规抽速。如对氮的抽速为 0.1L/s , $U = 2\text{L/s}$,将引起 5% 误差,若 $U = 10\text{L/s}$,则将引起 1% 误差。

3. 温差引起的误差

① 高压时,平衡条件下各处的压力是相等的,如规的温度为 T'_1 ,被测系统温度为 T'_2 ,则

$$p'_1 = p'_2, \quad n'_1 T'_1 k = n'_2 T'_2 k \quad (11-64)$$

采用 U 形压力计和弹性变形规测量真空时,温差不引起误差(指只考虑温差对气压影响而言)。

采用按密度 n 指示的真空规(如电离规、热传导规、粘滞规、克努曾规等)进行测量时,则必须修正到校准时的标准温度。

设校准时规中温度为 T_1 ,密度为 n_1 ,压力为 p_1 ,校准系统中温度为 T_2 ,密度为 n_2 ,压力为 p_2 。当平衡到高压时,规和校准系统中压力相等

$$p_1 = p_2 \quad n_1 T_1 k_1 = n_2 T_2 k_2 = p_2 \quad (11-65)$$

现在温度变到 T'_1 和 T'_2 , 如果假定 $n'_1 = n_1$, 那么规的输出指示为 $p_2 = n_1 T_1 k$, 而现在实际压力为 $p'_2 = n_1 T'_1 k$, 则要进行修正, 即

$$p'_2 = \frac{T'_1}{T_1} p_2 \quad (11-66)$$

② 在低压力时, 若规温为 T'_1 和被测系统温度为 T'_2 , 则平衡时两处压力与密度都不等, 其大小由热流逸效应决定

$$p'_1/p'_2 = \sqrt{T'_1/T'_2} \quad (11-67)$$

$$n'_1/n'_2 = \sqrt{T'_2/T'_1} \quad (11-68)$$

用直接测压力的规进行测量时, 可按式(11-67) 进行修正。

用测 n 的规测量时, 则要修正到校准时的标准温度(T_1 和 T_2)

$$n_1 \sqrt{T_1} = n_2 \sqrt{T_2} \quad (11-69)$$

现在温度变到 T'_1 和 T'_2 , 并假设 $n'_1 = n_1$, 则

$$n_1 \sqrt{T'_1} = n'_2 \sqrt{T'_2} \quad (11-70)$$

因 $n'_1 = n_1$, 在两种情况下规的输出指示相同, 但在校准时, 表征的是 $p_2 = n_2 T_2 k$, 而现在应该表征的是 $p'_2 = n'_2 T'_2 k$, 故要进行如下修正

$$p'_2 = \frac{n'_2 T'_2}{n_2 T_2} p_2 = \sqrt{\frac{T'_2}{T_2}} \sqrt{\frac{T'_1}{T_1}} p_2 \quad (11-71)$$

p_2 由规的被校准的压力刻度进行读数。

③ 在 $1\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 区间的中等压力下, 可表达为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{Ax^2 + Bx + U\sqrt{x} + \sqrt{T_1/T_2}}{Ax^2 + Bx + U\sqrt{x} + 1} T_1 < T_2 \quad (11-72)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{Ax^3 + Bx + U\sqrt{x} + \sqrt{T_2/T_1}}{Ax^2 + Bx + U\sqrt{x} + 1} T_1 > T_2 \quad (11-73)$$

$$x = dp_2 \quad [\text{mm} \cdot \text{Pa}] \quad (11-74)$$

p_2 是室温下真空规的测量值, d 为导管直径(mm), A 、 B 、 U 与 x 无关, 和温度 T 关系如下

$$A = a/T^2 \quad (11-75)$$

$$B = b/T \quad (11-76)$$

$$U = c/\sqrt{T} \quad (11-77)$$

$$T = (T_1 + T_2)/2 \quad (11-78)$$

表 11-13 列出了 a 、 b 、 c 的数值与气体成分的关系。在相应的压力区间, p_1/p_2 与 p 之间的

关系曲线如图 11-81 所示。

在中等压力区间,由温度差产生的压力差不但与温度差有关,还与导管直径 d 有关。如果此时在规和被测系统中间装一个冷阱,而且冷阱与规相连的导管和与被测系统相连的导管的粗细长短不同时,那么即使规和被测系统的温度是一样的,也将引起两处压力不等。因此在中等压力区间要求使用两端导管相对称的冷阱。

表 11-13 a 、 b 、 c 值

气体成分	$a \times 10^{-5}$	$b \times 10^{-2}$	c	温度区间 /K
H ₂	1.24	8.00	10.6	14 ~ 673
Ne	2.65	1.88	30.0	20.4 ~ 673
A	10.8	8.08	15.6	77 ~ 673
Kr	14.5	15.0	13.7	77 ~ 673
CH ₄	14.5	15.0	13	473 ~ 673
Xe	35.0	41.4	10	77 ~ 90
He	1.4 ~ 1.6	1.2 ~ 1.1	18 ~ 20	42 ~ 90
N ₂	12	10	10 ~ 18	77 ~ 195
O ₂	7 ~ 9	16 ~ 19	—	77

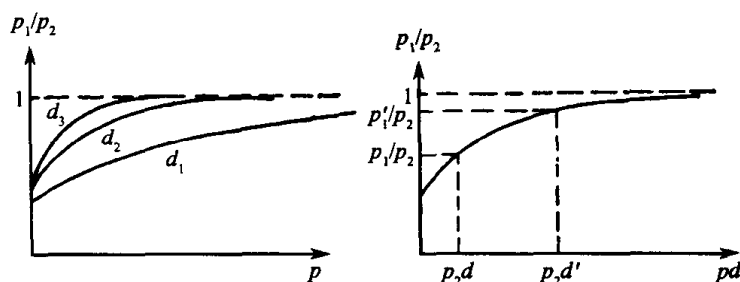


图 11-81 $p_1/p_2 \sim p$ 曲线

4. 冷阱引起的误差

在规与被测系统之间安置冷阱后,规就测不出可凝蒸气的分压。为简化起见,先假设规与被测系统的温度相等,再来研究下面的问题。

① 在高压下,平衡时各处全压相等,冷阱的存在会引起各处理想气体和可凝蒸气分压分布的变化,如图 11-82 所示。

规中测出的理想气体的压力等于被测系统中的理想气体和可凝气体分压之和。虽然此时真空规测不出可凝蒸气的分压,但各处的全压保持恒定。这时能测全压的规不会引起误差,但对与气体成分有关的规来说将引起很大误差。

② 在低压力下,平衡时各处的压力是由热流逸效应决定的。因规和系统中温度相等,所以两处理想气体的分压和分子密度都相等,但由于它们相对冷阱处存在温差,故有如下关系

$$p_{\text{规}}/p_{\text{阱}} = \sqrt{T_{\text{规}}/T_{\text{阱}}} \quad (11-79)$$

$$n_{\text{规}}/n_{\text{阱}} = \sqrt{T_{\text{规}}/T_{\text{阱}}} \quad (11-80)$$

对于可凝蒸气(其分压 $< 10^{-2}\text{Pa}$),由于冷阱的捕集作用,其分压力在系统中呈衰减分布,它在规中的分压为零(图 11-83)。在此情况下,能测全压的规也只能测出理想气体的分压。

③ 当可凝蒸气分压为 10^{-1}Pa 时,可凝蒸气的气流流向冷阱,因可凝蒸气与理想气体相碰

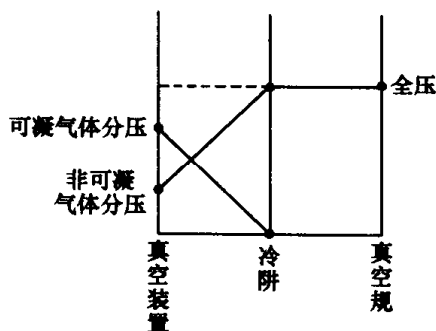


图 11-82 高压下冷阱引起的分压分布变化

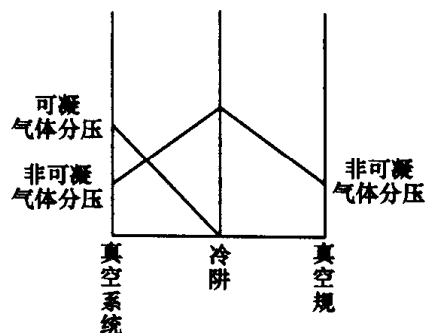


图 11-83 低压下冷阱引起的分压分布变化

撞,将导致理想气体聚集在冷阱处,即所谓拖曳作用。例如用汞压缩式真空规测量系统的压力时,规管升液管中的汞气流在流向冷阱的过程中会与理想气体相碰撞,把压缩球泡中的被测气体拖曳到冷阱方向,使理想气体沿导管产生浓度梯度,这就是所谓的汞蒸气拖曳效应(Hg-drag effect)。在平衡时,存在如图 11-84 所示的两个相反方向的气流——理想气体的扩散流和汞蒸气气流。因此冷阱处的理想气体的分压要比压缩式规中略高。

$$\frac{\Delta p}{p} = \exp\left(A \frac{r p' \sqrt{T}}{D_0}\right) - 1 \quad (11-81)$$

式中 Δp ——冷阱与压缩式规之间的压差;

p ——平均压力;

r ——连接管半径[cm];

p' ——汞蒸气分压;

T ——导管温度;

D_0 ——理想气体在汞蒸气中的扩散系数。例如 N_2 -Hg 的 D_0 为 $0.105\text{cm}^2/\text{s}$;

A ——常数(对 Hg 为 0.905)。

图 11-85 是式(11-81)的计算结果。在连接管很粗时,此效应将引起 10%~20% 的误差,

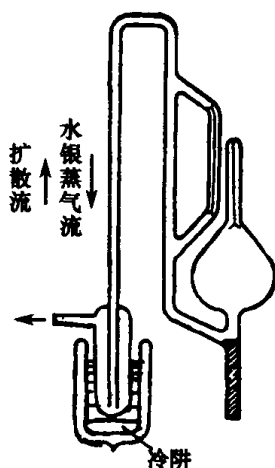


图 11-84 压缩式真空计中的汞蒸气气流

使压缩式规的指示压力偏低,如图 11-86 所示。

用电离规测量汞扩散泵系统的极限压力时,如果在规管与系统中间安置一个冷阱,则汞蒸气拖曳效应会使规指示的非可凝气体的分压偏高(图 11-87)。

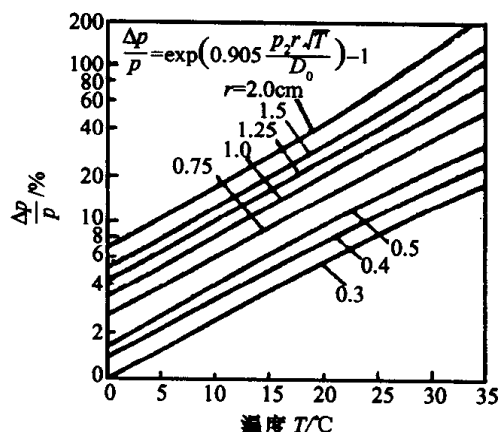


图 11-85 汞蒸气引起的误差

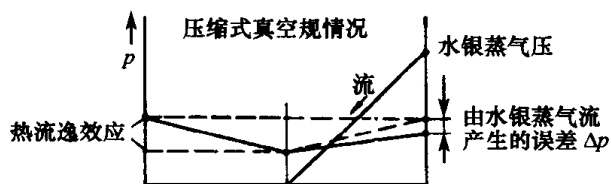


图 11-86 用压缩式规测量时的压力关系

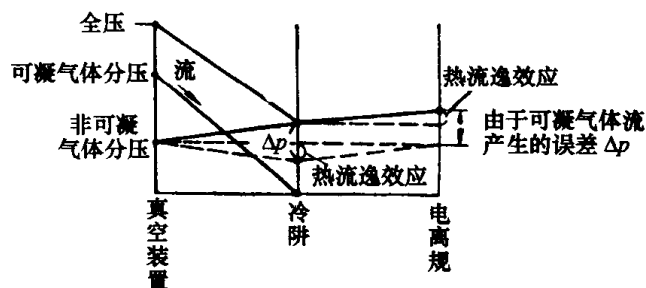


图 11-87 用电离规测汞扩散泵系统时的压力关系

(七) 选择、安装、规程

1. 选择

低于大气压的气体全压测量的范围很广,而且存在着各种气体成分组合、各种气流状态、不同环境条件等因素,情况比较复杂。在选用真空规和测量方法时要考虑如下各点:

- ①测量范围、精度、反应速度;
- ②所选规与被测气体间的相互作用;
- ③被测气体成分的性质;
- ④被测气流的状态;
- ⑤环境条件;
- ⑥特殊要求。

各类型真空规的性能比较见表 11-14。

表 11-14 真空规性能比较

名 称	量程/Pa	精 度	反应时间	注
汞 U 形压力计	$10^5 \sim 10^2$	10%	数秒	灵敏度与气体种类无关。 绝对真空规,可作为标准
油 U 形压力计	$2 \times 10^3 \sim 1$	1%	数秒~数分	
压缩式规	$10^3 \sim 10^{-3}$	<3%	测一次数分	绝对真空规,可作为高真空标准
布尔登规	$10^5 \sim 10^3$	<10%	数秒	灵敏度与气体种类无关,要 进行校准
机械膜盒规	$10^5 \sim 10^2$	<10%	数秒	
电容薄膜规	$10^3 \sim 10^{-2}$	<1%	<1s	
电阻规	$10^4 \sim 10^{-2}$	10%~100%	定温型约 1s	灵敏度与气体种类有关。 容易变化
热偶规	$10^2 \sim 10^{-1}$		数秒	
热敏电阻规	$10^2 \sim 10^{-1}$		数秒	
电离规	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	10%~20%	10^{-3} s	灵敏度与气体种类有关
B-A 规	$10^{-1} \sim 10^{-8}$			
α -规	$10^5 \sim 10^{-2}$	10%	0.1s	灵敏度与气体种类有关
潘宁规	$1 \sim 10^{-5}$	20%~50% 超高真空下仅 有指示意义	0.1s	灵敏度与气体种类有关。 规抽速大
磁控规	$10^{-1} \sim 10^{-4}$			
克努曾规	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	百分之几	数秒~数十秒	理想情况下($a=1$)为绝对 真空规,灵敏度与气体种类无 关
粘滞性规	$10 \sim 10^{-4}$	百分之几十		灵敏度与气体种类有关

2. 安装

真空规安装的位置和方法对测量值有明显的影响,尤其是当系统中存在气流、气源、温度分布等非均匀条件时,这种影响更大。

(1) 安装位置

应该尽可能地把真空规接在要测压力之处,如果由于某种原因必须在其间安置导管、冷阱、挡板、过滤器等部件时,要进行相应的修正。

(2) 安装方法

视测量目的和气流状态而定。对于没有定向气流的静态真空系统,由于各处压力一样,所以规管的安装位置是无关紧要的。当系统中存在定向气流时(图 11-88),如果要测静压,导管开口应如图 11-88 中(a)所示(这是一般情况下的接法)。如果要测方向性压力,则导管开口应如图中(b)所示。如果气源是在系统中心,要测定容器壁模拟分子沉的效果时,则管规应放在中心试件上,其开口应对着器壁。又如要测定系统空间内的气流的不均匀分布,则要采用具有球形散射装置的“碰撞压力转换器”规,并不断变换其小孔方位,以测出空间气流的各向导性特性。

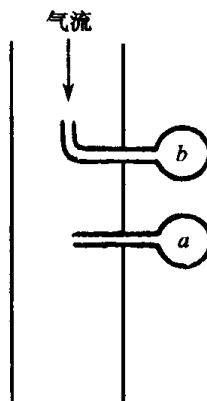


图 11-88 导管开口方向

3. 规程

要使真空规能获得精确的测量结果,必须科学地制订校准规程和测量规程。

要做到真空量值的国际统一,除要具有准确的真空测量标准和良好的相对规以外,还必须科学地制订出统一的校准规程和测量规程。

某一压力用同样的真空规去测量,如没有按照统一的校准规程和测量规程去操作,也会得出不同的结果。

科学地制订校准和测量规程,就要求对测量实践中提出的一系列问题进行深入的分析和探讨。

(八) 附表

1. 国产各类真空计主要技术性能表

我国生产真空计的主要厂家有:成都正华电子仪器有限公司、成都睿宝电子科技有限公司、北京北仪创新科技有限责任公司、成都仪器厂、成都滨江仪器厂、成都瑞普电子有限公司、上海曙光机械制造厂、上海真空泵厂、锦州真空仪表厂、益阳真空仪表厂、上海振太仪表厂。国产各类真空计主要技术性能见表 11-15 所示。

2. 国产各类真空规管技术性能表

我国生产真空规管的主要厂家有:成都国光电气股份有限公司、北京新特真空技术联合开发公司、北京大学无线电厂、北京北仪创新真空科技有限责任公司、核工业西南物理研究院电子仪器厂、上海灯泡厂等。

成都国光电气股份有限公司生产的国光牌热偶、电阻真空规管技术性能见表 11-16;热阴极电离真空规技术性能见表 11-17;冷电离真空规技术性能见表 11-18。

四、真空测量技术

表 11-15 国产各类真空计主要技术性能表

名 称	型 号	测量范围 /Pa	配套规管	消耗 功率 /W	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
电阻真空计	ZDR-I(单路)	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	25	225×280×119(箱式)	3	成都正 华电子 仪器有 限公司
	ZDR-II(双路)	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	25	265×280×119(上架式)	3	
热偶真空计	ZDO-I(单路)	$4 \times 10 \sim 10^{-1}$	ZJ-51	25	225×280×119(箱式)	3	
	ZDO-III(双路)	$4 \times 10^2 \sim 10^{-1}$	ZJ-53	25	265×280×119(上架式)	3	
		$4 \times 10^2 \sim 10^{-1}$	ZJ-53				
电 容 薄 膜 真空计	ZCM-I(单路)	$10^5 \sim 10^2$	CCM-1000(100kPa 规管)	25	225×280×119(箱式) 265×280×119(上架式)	3	
	ZCM-II(双路)	$10^4 \sim 10$	CCM-100(10kPa 规管)	25		3	
$10^3 \sim 1$		CCM-10(1kPa 规管)					
$10^2 \sim 0.1$		CCM-1(100Pa 规管)					
压阻真空计	ZDY-I(单路)	$10^5 \sim 10^2$	SGAP-03	25	225×280×119(箱式)	3	
热 阴 极 电 离真空计	ZDK-I(双路)	$10 \sim 10^{-6}$	ZJ-27	40	440×280×119(箱式)	5.5	
	ZDK-III(双路)	$10^2 \sim 10^{-4}$	ZJ-10	40	480×280×119(上架式)		
	ZDH-I(双路)	$10^{-1} \sim 10^{-8}$	ZJ-32	100			
冷 阴 极 电 离真空计	ZDV-I(单路)	$10^{-1} \sim 10^{-6}$	MO14(厂标)	25	440×280×119(箱式)	3.5	
		$10^0 \sim 10^{-5}$	MO14C		480×280×119(上架式)		
热偶、电离 复合真空计	ZDF-I(双路)	$4 \times 10^2 \sim 10^{-1}$	ZJ-53(热偶)	55	440×280×119(箱式)	6	
	ZDF-II(双路)	$10 \sim 10^{-6}$	ZJ-27(电离)	55	480×280×119(上架式)	6	
		$4 \times 10^{10} \sim 10^{-1}$	ZJ-51(DL-3)				
		$1 \sim 10^{-5}$	ZJ-2(DL-2)				
电阻、电离 复合真空计	ZDF-III(双路)	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52(电阻)	55	440×280×119(箱式)	6	
		$10 \sim 10^{-6}$	ZJ-27(电离)		480×280×119(上架式)		
电 阻 B-A 规 复 合 真 空 计	ZDF-IV(双路)	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52(电阻)	130	440×280×119(箱式)	7	
		$10^{-1} \sim 10^{-8}$	ZJ-32(B-A)	(最大)	480×280×119(上架式)		
电阻、冷规 复合计	ZDF-V(双路)	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	30	440×280×119(箱式)	6	
		$10^{-1} \sim 10^{-6}$	M014		480×280×119(上架式)		
		$10^0 \sim 10^{-4}$	M014C				
双路电阻 一路电离复 合真空计	ZDF-X	独立电阻单元 $10^5 \sim 10^{-1}$ 复合单元 $10^5 \sim 10^{-6}$	ZJ-52T ZJ-27	5	440×280×119(箱式) 480×280×119(上架式)	6.5	
双路热偶 一路电离真 空计	ZDF-IB(双路)	热偶计单元 $4 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 电离计单元 $10 \sim 10^{-6}$	ZJ-53(热偶) ZJ-27(电离)	65	440×280×119(箱式) 480×280×119(上架式)	6.5	
双路电阻 一路冷规复 合计	ZDF-VB	电阻计单元 $10^5 \sim 10^{-1}$ 冷规单元 $10^{-1} \sim 10^{-6}$	ZJ-52T(电阻) M014(冷规)	40	440×280×119(箱式) 480×280×119(上架式)	5	

第十一章 真空度测量与真空规校准

(续)

名 称	型 号	测量范围 /Pa	配套规管	消耗 功率 /W	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
电阻真空 规(皮拉尼真 空计)	ZDZ-52	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	10	140×180×90(F型)	≤1	成都睿 宝电子 科技有 限公司
	ZDZ-52T	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	20	260×240×88(D型)	≤1	
	ZDZ-52T-11	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	25	96×160×96(E型) 280×260×88(C型)	≤5	
	ZDZ-52TY	$10^5 \sim 10^{-1}$	ZJ-52T	20	480×260×88(B型) 120×260×132(A型)	≤3	
热偶真空计	ZDO-53B	$10^3 \sim 10^{-1}$	ZJ-53B	20	260×240×88(D型)	≤3	
压阻真空计	ZDY-1	$2 \times 10^5 \sim 10^2$ 量程范围 $10^2 \text{Pa} \sim 0.2 \text{MPa}$		20	96×160×96(E型)	≤2	
热阴极电 离真空计	ZDR-27B	$10^1 \sim 10^{-5}$	ZJ-27B	45	280×260×88(C型)	≤5	
	2DR-10B	$10^2 \sim 10^{-4}$	ZJ-10B	45	280×260×88(C型)	≤5	
	ZDR-1A	$10^{-1} \sim 10^{-8}$	ZJ-12	55	280×260×88(C型)	≤5	
冷阴极磁 控真空计	ZDL-14A	$10^{-1} \sim 10^{-7}$	MO14A	30	280×260×88(C型)	≤4	
	ZDL-14C	$10^{-1} \sim 5 \times 10^{-4}$	MO14C	30	280×260×88(C型)	≤4	
	ZDL-14CY	$10^0 \sim 5 \times 10^{-4}$	MO14C	55	122×260×132(A型)	≤4	
复合真空计	ZDF-5227	$10^5 \sim 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27B	65	480×260×88(B型)	≤7	北京北 仪创新 真空技 术有限 责任公 司
	ZDF-5227A	$10^5 \sim 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27B	55	280×260×88(C型)	≤7	
	ZDF-5227B	$10^5 \sim 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27B	75	480×260×88(B型)	≤7	
	ZDF-5227Y	$10^5 \sim 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27B	55	122×260×132(A型)	≤5	
	ZDF-5210	$10^5 \sim 10^{-4}$	ZJ-52T/ZJ-10B	65	480×260×88(B型)	≤7	
	ZDF-5327	$10^3 \sim 10^{-5}$	ZJ-53B/ZJ-27B	55	480×260×88(B型)	≤7	
	ZDF-5201	$10^5 \sim 10^{-8}$	ZJ-52T/ZJ-12	55	480×260×88(B型)	≤7	
	ZDF-5201B	$10^5 \sim 10^{-8}$	/	75	480×260×88(B型)	≤8	
	ZDF-5214B	$10^5 \sim 10^{-7}$	/	75	480×260×88(B型)	≤7	
	ZDF-5214	$10^5 \sim 10^{-7}$	ZJ-52T/MO144	45	480×260×88(B型)	≤7	
压强控制仪	ZDY-10	$10^2 \sim 10^{-4}$		45	480×260×88(B型)	<4	
数显复合 真空计	ZDF-2A	$2.7 \times 10^{-2} \sim$ 1×10^{-1} $1.0 \times 10^{-1} \sim$ 1.0×10^{-5}	ZJ-53B ZJ-2		440×280×119	7	北京北 仪创新 真空技 术有限 责任公 司
	ZDF-6	$2.7 \times 10^{-2} \sim$ 1×10^{-1} $13 \sim 1.3 \times 10^{-4}$	ZJ-53B ZJ-10		440×280×119		
	ZDF-7	$2.7 \times 10^2 \sim$ 1.0×10^{-1} $1.3 \sim 6.6 \times 10^{-6}$	ZJ-53B ZJ-27		440×280×119		

四、真空测量技术

(续)

名 称	型 号	测量范围 /Pa	配套规管	消耗 功率 /W	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
电阻电离 复合计	ZDF-8	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$ $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-52T ZJ-2		440×280×119		北京 北仪 创新 真空 技术 有限 责任 公司
	ZDF-9	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$ $13 \sim 1.3 \times 10^{-4}$ $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$	ZJ-52T ZJ-10		440×280×119		
	ZDF-10	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$ $1.3 \sim 6.6 \times 10^{-6}$	ZJ-52T ZJ-27		440×280×119		
数显电阻 真空计	ZDZ-6D ZDZ-6S(双路)	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$ $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$	ZJ-52T ZJ-52T		320×280×119 320×280×119	3 3	
数显电离计	ZDR-1	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-2		320×280×119		
数显中真 空计	ZDR-2	$13 \sim 1.3 \times 10^{-4}$	ZJ-10		320×280×119	3	
数显电离计	ZDR-3	$1.3 \sim 6.6 \times 10^{-6}$	ZJ-27		320×280×119		
副标准电 离计	SIM-1	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	FB-1		320×280×119		上海 曙光 机械 制造 厂
电阻真空计	ZDZ-2A	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-1}$	DZ-2		320×280×119		
热偶电离 复合真空计	SG-2	$10^{-1} \sim 10^{-8}$	DG-1 B-A	100	250×386×160	13	
	SG-3	$1.3 \times 10 \sim 10^{-5}$	DL-3 DL-2	55	350×250×165	8	
反磁控冷 规真空计	SG-4	$10^{-2} \sim 10^{-9}$	DG-3	30	250×386×160	9	
	SG-5	$10^{-1} \sim 10^{-7}$	ZJ-7	45	450×350×160	13	
冷阴极热偶 复合真空计	SG-6	$1.3 \times 10^2 \sim 10^{-4}$	ZJ-54 ZJ-22	30	440×360×136	8	
热偶电离 复合真空计	ZD-2	$10^{-1} \sim 10^{-8}$	ZJ-6 CTG-2	45	440×390×139	13	上海 真空 泵厂
	ZD-3	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	DL-2	45	440×390×139	13	
复合真空计	SL-6901C	1×10^{-8}			390×359×160	15	上海 真空 泵厂
冷磁控式 超高真空计	SZ-6902	$10^{-3} \sim 10^{-12}$	DG-3	30	390×259×190	10	
	SZ-82-1	$10^5 \sim 10^{-1}$			345×359×140	4.5	

(续)

名 称	型 号	测量范围 /Pa	配套规管	消耗 功率 /W	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
电容薄膜 真空计	SVG-CPC	$2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^{-1}$	JC23		212×180×80		成都 瑞普 电子 仪器 公司
电阻真空 计(数字型)	ZDZ-52M ZDZ-52-M-1V ZDZ-52M-11	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-1}$ $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-1}$ $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-1}$	ZJ-52T ZJ-52T×4 ZJ-52T×2		440×240×90 212×180×80		
热偶真空计	SVG-3TM (数字型) SVG-1TM (数字型) SVG-1TP GVG-1TPD	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-1}$ $1 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-1}$ $1 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-1}$ $1 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-1}$	ZJ-54D ZJ-54D ZJ-54D ZJ-54D×2		212×180×80 212×180×80 115×80×95 440×200×110		
电离真空 计(数字型)	SVG-1HM SVG-2HM SVG-3HM	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-8}$ $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^{-4}$ $1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^{-5}$	ZJ-32 ZJ-10 ZJ-27		240×280×90		
电离真空 计(二等标 准)	SVG-FB	$1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^{-4}$	FB-1		240×280×90		
冷磁控真 空计(数字 型)	ZDL-14M ZDL-14CM	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-7}$ $1 \sim 1 \times 10^{-4}$	MO14(冷规) MO14C(冷规)		240×280×90		
热偶电离 (双显)	ZDF-5432M	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-7}	ZJ-54D/ZJ-32		440×240×100		
热偶电离 (单显)	SVG-1FM	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-7}	ZJ-54D/ZJ-32				
电阻电离 (双显)	ZDF-5212M	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-8}	ZJ-52T/ZJ-12				
电阻电离 (单显)	SVG-2FM	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-8}	ZJ-52T/ZJ-12				
电阻电离 (双显)	ZDF-5210M	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-4}	ZJ-52T/ZJ-10				
电阻电离 (单显)	SVG-3FM	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-4}	ZJ-52T/ZJ-10				
电阻冷磁控 (双显)	ZDF-5214M	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-7}	ZJ-52T/M014A				
电阻冷磁控 (单显)	SVG-4FM	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-7}	ZJ-52T/M014A				
电阻电离 (双显)	ZDF-5227M	$1.0 \times 10^5 \sim$ 1.0×10^{-5}	ZJ-52T/ZJ-27				

四、真空测量技术

(续)

名 称	型 号	测量范围 /Pa	配套规管	消耗 功率 /W	外形尺寸 (长×宽×高) /mm×mm×mm	质量 /kg	生产 厂家
电阻电离 (单显)	SVG-5FM	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27		440×240×100		成都 瑞普 电子 仪器 公司
热偶电离 (双显)	ZDF-5327M	$1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				
热偶电离 (单显)	SVG-6FM	$1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				
热偶电离 (双显)	ZDF-5427M	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				
热偶电离 (单显)	SVG-7FM	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				
热偶电离 (双显)	ZDF-5412M	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-8}$	ZJ-54D/ZJ-12				
热偶电离 (单显)	SVG-8FM	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-8}$	ZJ-54D/ZJ-12				
热偶冷磁控 (双显)	ZDF-5314M	$1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^{-7}$	ZJ-54D/M014A				
电阻电离	ZDF-5210M-IIL①	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-4}$	ZJ-52T/ZJ-10				
电阻冷磁控	ZDF-5214M-IIL★	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-7}$	ZJ-52T/M014A				
电阻电离	ZDF-5227M-IIL★	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27				
电阻电离	ZDF-5227M-IIS②	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-52T/ZJ-27				
热偶冷磁控	ZDF-5314M-IIL★	$1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^{-7}$	ZJ-54D/M014A				
热偶电离	ZDF-5327M-IIL★	$1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				
热偶电离	ZDF-5427M-IIL★	$1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{-5}$	ZJ-54D/ZJ-27				

注:①一路低真空单独测量及一路低真空与高真空复合测量;

②两组低真空和高真空复合测量

表 11-16 国光牌热偶、电阻真空规管技术性能

类别	型 号	测量范围 /Pa	电 参 数	连接方式	材 料
热偶 规管	ZJ-51(DL-3)	$6.5 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-1}$	加热电流/mA 90~130 热丝冷阻/ Ω 7 \pm 1	$\phi 15.5 \pm 1$	ZJ-51 型 热丝:铂 热电偶:镍铬—康铜 支杆:DM-305 玻璃 ZJ-56 型 热丝:铂 热电偶:镍铬—康铜 支杆:镍 外壳:不锈钢
	ZJ-51 裸规			DN40 银丝法兰	
	ZJ-51 金属规			$\phi 50$	
	ZJ-51 金属规			DN25KF	
	ZJ-51 金属规			$\phi 15.5 \pm 0.1$	
	ZJ-51 金属规			$\phi 18 \pm 0.1$	
	ZJ-51 裸规			CX-4M 插座	
	ZJ-56 金属规		加热电流/mA 28 \pm 3 热丝冷阻/ Ω 7.5 \pm 1	$\phi 6$	
	ZJ-53B 玻璃规	$4 \times 10^2 \sim 1 \times 10^{-1}$	加热电流/mA 28 \pm 3 热丝冷阻/ Ω 9.5 \pm 1	$\phi 15.5 \pm 0.5$	ZJ-53B:外壳:DM-305 ZJ-54D:外壳:铝 热 丝:镍铬—康铜 热电偶:镍铬—康铜 支 杆:可伐
	ZJ-54D 金属规			$\phi 15.5 \pm 0.5$	
	带补偿对流玻璃规	$4 \times 10^2 \sim 1 \times 10^{-1}$	/	$\phi 15.5 \pm 0.5$	
	带补偿对流金属规			$\phi 15.5 \pm 10.5$	
电 阻 规管	ZJ-52 金属规	$3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^{-1}$	灯丝温度/ $^{\circ}\text{C}$ 40~300	$\phi 18 \pm 0.1$	ZJ-52 型、ZJ-52B、ZJ-52D 型 热丝:钨 支杆:镍 外壳:不锈钢 密封:丁腈橡胶 ZJ-52A、-52C、-52E、-52F 型 热丝:铂 支杆:镍 外壳:不锈钢 密封:丁腈橡胶
	ZJ-52 金属规			$\phi 18 \pm 0.1$	
	ZJ-52 金属规			DN16KF	
	ZJ-52 金属规			DN16KF	
	ZJ-52 金属规			DN16CF	
	ZJ-52 金属规			DN16CF	
	ZJ-52 金属规			Z3/8"	
	ZJ-52 玻璃规			$\phi 15.5 \pm 0.5$	
	ZJ-52 玻璃规			$\phi 15.5 \pm 0.5$	
	ZJ-52T(G)	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-1}$	灯丝温度/ $^{\circ}\text{C}$ 40~300	$\phi 15.5 \pm 0.5$	热丝:铂 支杆:镍 密封:丁腈橡胶 外壳:52T(G):DM-305 玻璃 52T(M):铝
	ZJ-52T(M)			DN16KF	
热偶 电离 复合 规管	ZJ-80 玻璃规	$6.5 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-5}$	热偶部分电参数同 ZJ-51(DL-3); 电离部分电参数同 ZJ-52	$\phi 15.5 \pm 10.5$	按厂代号 M010 所用材料提供
	ZJ-80 裸规			DN35CF	按厂代号 M009 所用材料提供

表 11-17 国光牌热阴极电离真空规技术性能

类别	高真空	中真空	高压力	宽量程		超高真空(B-A 规)					小型电离规
				ZJ-27	—	ZJ-32	—	—	—	ZJ-12	
型号	ZJ-2	ZJ-10	ZJ-13	M715A M715B	M734A M734B M734C	M001	M001A	M082	M082A	M082B	M734A
厂代号	MO23A MO23B	MO74A MO74B	MO02A MO02B	M715A M715B	M734A M734B M734C	M001	M001A	M082	M082A	M082B	M734A
连接直径/mm	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF	$\phi 20 \times 1$ DN35CF	DN35CF	$\phi 19.3 \pm 0.3$ $\phi 25.4 \pm 0.4$	$\phi 25.4 \pm 0.4$ DN40KF	$\phi 19.3 \pm 0.3$ $\phi 25.4 \pm 0.4$ DN35CF	$\phi 15.5 \pm 0.5$ DN40KF DN35CF
测量范围/Pa	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-5}$	$65 \sim 3 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^2 \sim 1.3 \times 10^{-4}$	$4 \sim 1 \times 10^{-5}$	$3 \sim 1 \times 10^{-4}$	$10^{-2} \sim 10^{-7}$	$10^{-1} \sim 1 \times 10^{-8}$	$10^{-2} \sim 10^{-7}$	$10^{-2} \sim 10^{-7}$	$10^0 \sim 10^{-8}$	$10^2 \sim 1 \times 10^{-5}$
X射线极限/Pa 灵敏度/Pa ⁻¹	1.6×10^{-6} 0.15	3×10^{-5} 0.015	$< 1 \times 10^{-5}$ 0.004 0.04 0.04	$< 1 \times 10^{-6}$ 0.15	$< 1 \times 10^{-6}$ 0.06	$< 1 \times 10^{-8}$ 0.075	$< 3 \times 10^{-9}$ 0.189	$\leq 3 \times 10^{-8}$ 0.075	3×10^{-8} 0.075	$\leq 10^{-8}$ 0.05 0.075	0.06
工作参数											
灯丝电压/V	3.5	1.3	1.3	1.3	1.3	3~5	3~5	2.5	3.5	2.5	
灯比电流/A	1.2	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5~3.5	2	2.5~3.5	1.4	
灯比电压/V	25	50	60 10 10	25	15	50	30	30	30	30	15
栅极电压/V	200	115	162 162 162	200	280	200	180	180	180	200	280
栅极电流 ϕ /mA	5	0.05 0.05	4×10^{-3} 0.05 0.5	0.11	0.011	1	0.044	2	2	0.12	0.011
辅助极电压/V			60 162 162								
收集极电压/V	0	0	0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0
加热除气											
栅极电压/V	12			11		6		7.5	7.5	8	
栅极电流 ϕ /A	3.2			3		5		10	10	9	
电子轰击除气											
栅极电压/V		300	300		500		600			800	500
收集极电压/V		—	—		500		600			800	500
除气电压/mA		20	20		75		70			70	75
烘烤温度/℃	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)	450	450	400	400	120	120(KF 法兰) 250(CF 法兰)

注:①栅极电流即发射电流

表 11-18 国光牌冷阴极电离真空规技术性能

代 号	测量范围 /Pa	工作 电压 /kV	工作 电流 /mA	连接 法兰	环境 温度 /℃	烘烤 温度 /℃	材 料					质 量 /kg
							阴极	阳极	绝缘体	芯柱压 封件	密封件	
MO14A	$5 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-5}$	3~3.3	0.7	DN40KF	0~40	150	不锈钢	不锈钢	95 陶瓷	纯银	氟橡胶	0.8
MO14	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-7}$	3~3.3	0.7	DN40KF	0~40	450	不锈钢	不锈钢	95 陶瓷	纯银	无氧铜	1

第十二章 真空系统的气体分析与分压测量

一、概 述

目前,真空获得技术已由超高真空发展到 $10^{-10}\text{Pa}\sim 10^{-11}\text{Pa}$ 的极高真空阶段。在超高真空和极高真空下,容器内部的气体组分和容器内部的表面状态关系十分密切。在研究这种条件下的真空物理和真空化学过程时,除了需要了解容器内部的表面状态外,还必须知道容器内的气体组分和相应的分压力。

超高真空系统的全压力测量除了最早采用的 B-A 型超高真空规外,又发展了许多极高真空规,如冷阴极磁控规、抑制规和弯注规等。但对许多研究工作来说,仅靠全压力数据是不够的。例如真空系统中的吸附、凝结、脱附过程等,它涉及到容器表面和系统内部物质和残余气体分子的相互作用。这时获得系统内气体组分和分压力的数据比全压力数据更能说明问题。

真空条件下的气体分析和分压力测量通常是由动态质谱计完成的。

第一个动态质谱计——射频速度过滤器是于 1926 年提出的。其它的动态质谱计如射频质谱计、回旋质谱计、飞行时间质谱计和四极质谱计都是于 20 世纪 40 年代末到 50 年代初提出的。早期的仪器主要用于同位素测量、带电粒子的质荷比测量。但当时正值真空技术处于向超高真空发展的重要阶段,因此这些质谱计出现不久就被作为专用的真空质谱计了。

真空分析质谱计按其能否进行定量分析,可分为残气分析器和分压力计。所谓分压力计是指能满足一定的定量分析精度要求的真空分析器。

(一) 真空分析质谱计的主要应用范围

1. 真空和表面物理研究

对于通常的真空研究,真空分析质谱计的主要用途是分析真空系统内的残余气体。而对表面研究来说,目前已逐步将真空质谱计和低能电子衍射仪、俄歇电子谱仪、二次离子质谱计、化学分析电子谱仪和场致发射显微镜等仪器联合使用,用来研究低压力下的真空物理过程。通常在 10^{-9}Pa 以至更低的压力下进行分压力测量。由于采用的真空系统多数为无油或少油的真空泵,所以一般并不要求质谱计有很宽的质量范围。

2. 专用器件(如电子显微镜、X 射线管、阴极射线管和大型超高频电真空器件)的残气分析
在这一类应用中,不像表面物理研究那样,需要检测那么低的分压力,而希望仪器具有较宽的工作质量范围,至少具有能检测真空泵油的裂解物的能力。

3. 薄膜工艺

制备薄膜时,用真空分析器控制其工艺过程是必要的。在蒸发工艺中,主要是减少残气气氛以防止氧化;在溅射工艺中则重视所充气体纯度,如控制氩和氧的杂质含量。

(二) 对真空分析质谱计的一般要求

真空分析质谱计的一般要求为：

- ①仪器探头尺寸小、质量轻、易于安装；
- ②对于磁偏转型仪器和摆线型仪器来说，仪器的杂散磁场必须很小；
- ③仪器探头应具有互换性，成本低，允许一机可配用数个探头；
- ④探头能经受 400℃ 烘烤，离子源能用电子轰击除气，以减小“记忆效应”；
- ⑤仪器的质量标度最好为线性标度，工作质量范围的调节要方便；
- ⑥仪器应易于操作，离子源的工作参数应尽量固定；
- ⑦具有较高的扫描速度，至少能将一部分质谱显示在示波器上。

对于分压计来说，还应要求：

- ①质谱的峰强和质谱的图形系数对应真空系统中的气体量之间应具有一定的定量关系；
- ②探头连接管的流导要大，减小压力差和质量歧视，最理想的是能作成裸规形式的探头；
- ③要求磁偏转型和摆线型质谱计，在重新安装磁铁后，对仪器性能不需再作校准；
- ④采用低工作温度的阴极和低发射电子流，以减小对分子的热分解、电清除及化学清除效应；
- ⑤采用标准的电子轰击能量，从而尽可能使用标准的碎片图形(离子谱)；
- ⑥良好的峰形、一致的峰宽，便于计算机处理数据。

为特定目的而选择仪器时，应首先从所需要的质量范围来确定所要求的最小可检分压力，再考虑在此灵敏度下仪器的分辨本领和扫描速度等。

(三) 可用于真空分析的质谱计

所有的真空质谱计都具有三个组成部分：离子源、分析器和离子检测器。按分析器工作原理的不同，真空质谱计可归纳为以下四类(图 12-1)：

第一类：磁偏转质谱计。在一定的人射速度下，根据不同质荷比的离子在磁场中偏转半径的不同来进行质量分离的质谱计。

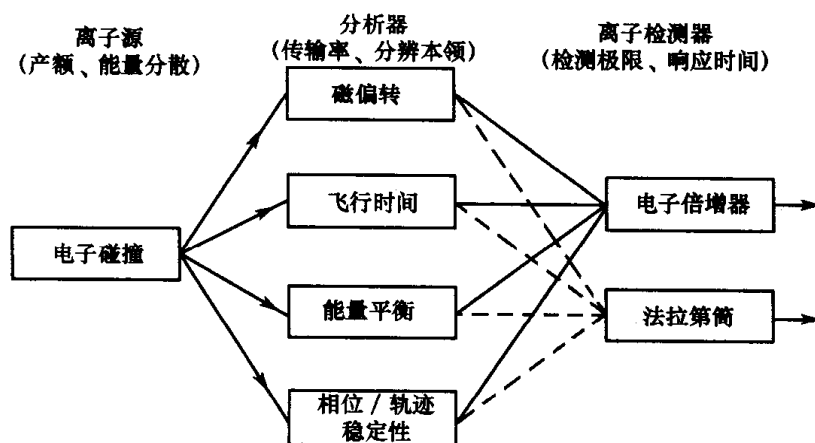


图 12-1 真空分析质谱计的分类

第二类:飞行时间质谱计。在这种仪器中,给定能量(或动能)的不同质荷比的离子按其通过漂移管的时间不同而进行质量分离。

第三类:能量平衡质谱计。根据离子在振荡电场中运动时其动能变化的不同而进行质量分离的仪器。属于这类的仪器有:射频质谱计和回旋质谱计。

第四类:稳定性质谱计。当不同质荷比的离子在分析场内作振荡运动时,按其相位或轨迹的稳定与否进行质量分离的仪器。属于这类的仪器有:线振质谱计、四极质谱计、单极质谱计和三维四极离子阱。

从摆线质谱计的工作原理来看,可将它与磁偏转质谱计归于同一类。所不同的是,摆线质谱计的分析场是采用直流电场和恒定磁场的复合场。

二、真空质谱计的离子源

真空质谱计离子源的功能是将气体分子或原子电离为离子,并将所产生的离子由离子光学透镜加速和聚焦,再引入分析器。

离子源的主要指标是离子产额和离子能量分散度。离子产额定义为离子源产生的离子流和离子源内压力之比。对于一般大小的离子源和 $10^{-4}\text{A} \sim 10^{-3}\text{A}$ 的发射电子流,离子产额的范围为 $10^{-8}\text{A/Pa} \sim 10^{-6}\text{A/Pa}$ 。但通常只有一部分离子可适应分析场的要求,其原因是离子必须:①聚焦到离子源的一个很小的出口处;②分析器入口孔很小;③分析器所适应的能量和角分散度有一定限度。所以有效的离子产额要更低一些。

真空质谱计离子源通常采用电子碰撞源。离子是由带一定能量的电子和中性气体分子(或原子)相碰撞而产生的。这种源的基础是尼尔(Nier)设计的正交式电子碰撞源,即所谓传统电子碰撞式离子源。当发射电子流一定时,离子源的离子产额的计算式可表达为

$$I^+ = \sigma s p \quad (12-1)$$

式中 I^+ ——能获得的离子流;
 s ——有效的电子轨迹长度;
 p ——样品环境压力;
 σ ——微分电离系数。

微分电离系数指一定能量电子在压力为 1Pa 、温度为 0°C 的气体中,每 1cm 路程中产生的离子数。它与气体种类有关,在电子能量约为 70eV 时,其典型数值为 $10^{-3}/\text{cm} \cdot \text{Pa} \sim 10^{-2}/\text{cm} \cdot \text{Pa}$ 。提高离子产额的最有效方法是增加电子的有效轨迹长度。图 12-2 给出真空质谱计的电子碰撞式离子源的分类。

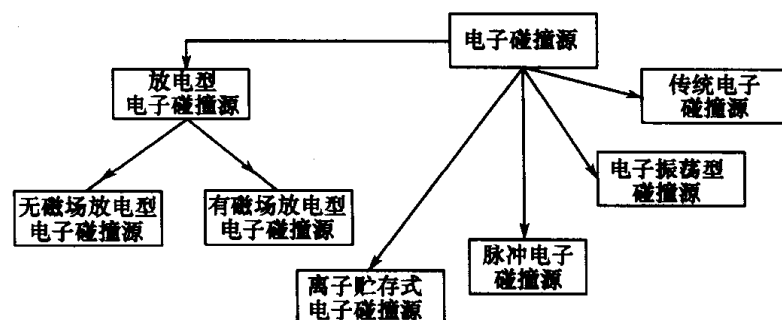


图 12-2 电子碰撞式离子源的分类

(一) 传统电子碰撞式离子源

尼尔型电子碰撞式离子源由电子枪、电离室和离子光学系统组成(图 12-3)。电离室中的气体分子受到热阴极发射的电子碰撞而电离。电子由阴极和隙缝 S_2 之间的电位差加速,通过准直隙缝 S_1 和 S_2 进入电离室。隙缝的宽度为 1mm。电子束由相对电离室为正电位的电子收集极所接受。电子收集极和隙缝 S_3 之间的正电位起阻止次级电子进入电离室的作用。 10^{-2}T 的弱磁场起准直电子束作用,使电子束宽度不发散,以保持最小的能量分散。为了使结构简单,中低分辨本领的真空分析器的离子源一般不采用外加磁场。离子在加速电压渗透入电离室的负渗透场和排斥极的正电场的联合作用下被引出电离室。

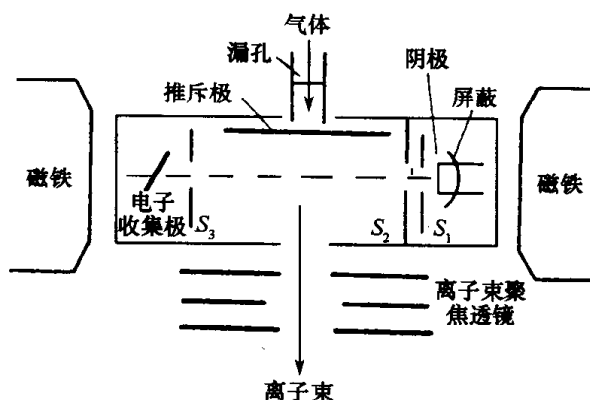


图 12-3 传统电子碰撞式离子源

离子加速电压大小与分析器的种类有关,例如,对四极质谱计而言约为 10V,而飞行时间质谱计的加速电压则为 3000V 左右。

常用的阴极材料为钨丝。但其缺点是,工作温度高、发射稳定性差以及高温工作后机械性能变脆等。为了提高阴极发射的稳定性,并保持再装配时的机械强度,可以采用钨—铼丝或铼丝。此外,为了减小因阴极对气体热分解带来的测量误差,除了让阴极远离电离室外,也可采用工作温度较低的敷氧化钽—钨阴极或六硼化镧—铼阴极。氧化钪—铈阴极具有抗中毒、允许短时间热状态下暴露大气的优点,适用于高压工作的离子源。

(二) 传统碰撞源的改进形式

文献[199]介绍了一种用于四极质谱计的高产额离子源(图 12-4)。这种离子源的电离区较大,而且在这较大的区域内都具有中等强度的引出电场,该引出场对离子还起会聚作用,因此离子源的离子产额较高。

又由于离子源的电离室是由许多片状圆环电极组成的,这就大大减小了由于电极表面污染所引起的性能变化。这种离子源的离子能量分散不超过离子引出电压的 0.5%,因而对仪器分辨本领影响较小。

图 12-5 给出低能量高束流的新型电子碰撞源。采用大面积氧化物阴极作为电子发射体,可发射出 0.5A 的电子流。气体的电离在双层屏蔽的“空心阴极”中发生。皮尔斯透镜和阳极间电压为离子引出电压。为了增加低离子能量的离子束流,可先用皮尔斯透镜电压将离子加速,然后再减至较低能量。离子源的离子能量可在数电子伏至数千电子伏之间调节,在 25V 时,离子束密度可达到 $5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。在最佳条件下,离子源效率(引出的离子流和发射

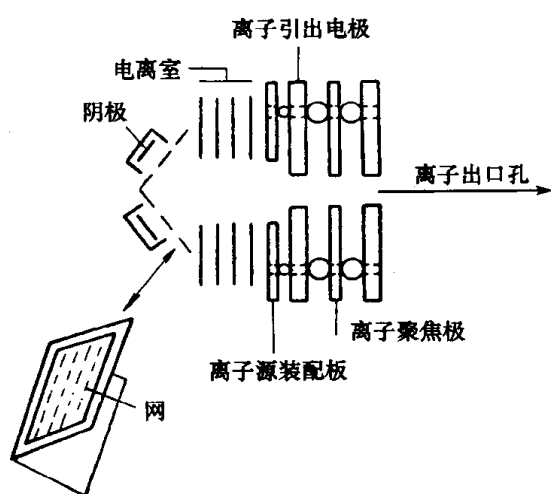


图 12-4 高产量的电子碰撞源

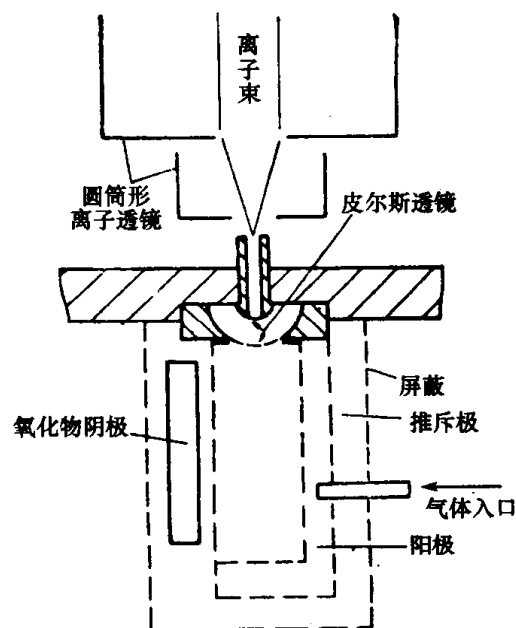


图 12-5 低能量高束流的电子碰撞源

电子流之比) 约为 10^{-6} , 离子能量分散小于 1eV 。

图 12-6 给出不用准直磁场的改进型正交束电子碰撞离子源。这种离子源的电子束具有较好的聚焦性能。由于电子碰撞源的离子引出效率和稳定性主要取决于离子引出极与电子束间的距离和引出场形式, 所以在离子源引出缝一侧采用引出电极来代替电离室, 从而提高离子引出效率和稳定性。在适当的几何尺寸和电极电压下, 当离子源内压力为 $6.5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ (氩) 时, 进入分析器的离子流可达到 $7 \times 10^{-7}\text{A}$, 离子源的离子能量分散小于 4eV 。

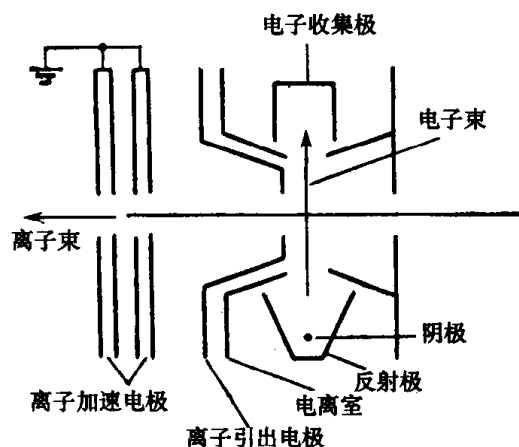


图 12-6 正交束流的电子碰撞源

(三) 磁控管型冷阴极离子源

布卢姆(Blum)等设计的用于四极质谱计的冷阴极离子源是由雷德黑德冷阴极磁控规演变来的。

这种离子源的电子是由高压放电产生的。由于存在磁场, 电子按螺旋形轨迹向阳极运动, 使其有效轨迹长度增加了 10^4 倍, 因而提高了灵敏度。离子源的阳极电压为 $2\text{kV} \sim 5\text{kV}$, 阴极电压为零。从改善性能出发, 阴极可适当加偏置电压。

整个离子源电极均固定在接地的圆筒形离子源外壳上, 辅助阴极直接焊在外壳上。阴极和阳极用绝缘子支撑起来。此外, 在离子源的设计中还设置一个保护环, 它可以防止极间漏电, 以免影响阴极电流的测量。从图 12-7 可以看出, 整个离子源外壳是和四极质谱计的入口电极直接连接的。

为了提高磁控管型冷阴极离子源的灵敏度, 戴维斯(Davis)发展了一种具有热灯丝的高灵

敏度磁控管型离子源。图 12-8 为该离子源简图。它采用了一个低工作温度(700℃~800℃)的六硼化镧—铯阴极,在阴极经过除气后,可以成功地分析 10^{-11} Pa 下的残余气体。这种离子源的能量分散较大,为 4eV~8eV,这在一定程度上降低了质谱计的分辨本领。但因这种离子源消除了由电子碰撞脱附引起的表面离子峰,故对于残余气体分析来说是可取的。

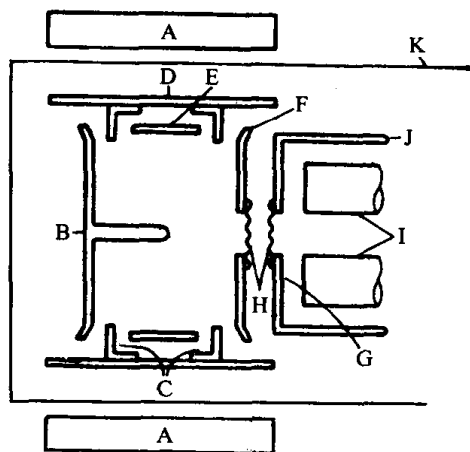


图 12-7 磁控管型冷阴极离子源
(包括四极滤质器的入口部)

A—磁铁;B—阴极;C—辅助阴极;D—离子源外壳;
E—阳极;F—阴极;G—滤质器入口电极;H—钨网;
I—滤质器杆系;J—滤质器杆系套筒;K—真空外壳。

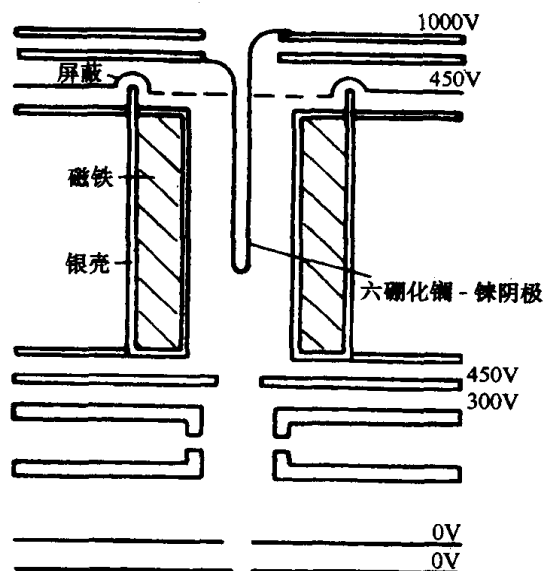


图 12-8 高灵敏度磁控管型离子源

(四) 无磁场放电型离子源

等离子体离子源有许多形式,多用于加速器、同位素分离器和二次离子质谱计等设备。长期以来,这类大型离子源不是用于真空质谱计的,但在最近报道的几篇资料表明,这类离子源对气体分析也适用。文献[204]介绍了一种阳极区电位均匀的无磁场等离子体气体弧光放电型离子源(图 12-9)。这种离子源用一个陶瓷管的衬套将放电区域限制在离子引出区,等离子体中的离子通过阳极上的小孔引出。离子的能量分散很小,接近于等离子体的热能分散。当

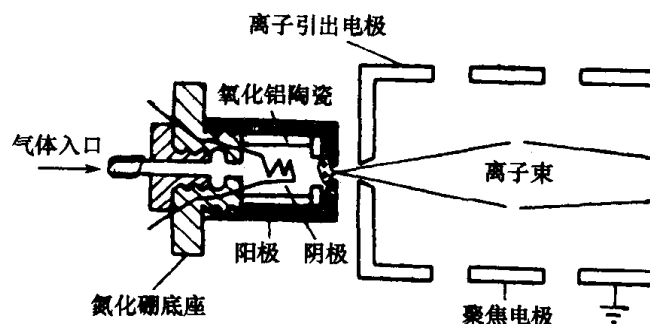


图 12-9 无磁场等离子体气体弧光放电型离子源

离子源工作在离子能量为 200eV 时,可获得能量分散为 0.1eV 的微安级的离子流。文献[205]详细报道了热阴极放电离子源(图 12-10)中的离子能量分布,发现在类似的工作条件下,离子源的能量变化可达 1eV 左右。

等离子体色谱源是一种可在大气压条件下进行电离的高灵敏度离子源,这种离子源通过一个直径为 25μm 的进样孔和四极质谱计的高抽速真空系统相连,而不采用差级抽气。从气

相色谱柱输出的气体是直接用放射性 $N^{63}i$ 箔进行电离的,由于源内可供电离的气体分子总数很多,而且电离后的碎片离子又少,所以它对有机气体检测灵敏度仍很高。如对这种离子源再作改进,则有望将其用于粗低真空条件下的气体分析器。此外,文献[208]介绍了一种在大气压下分析无机盐的离子源,不过其离子产额较低。

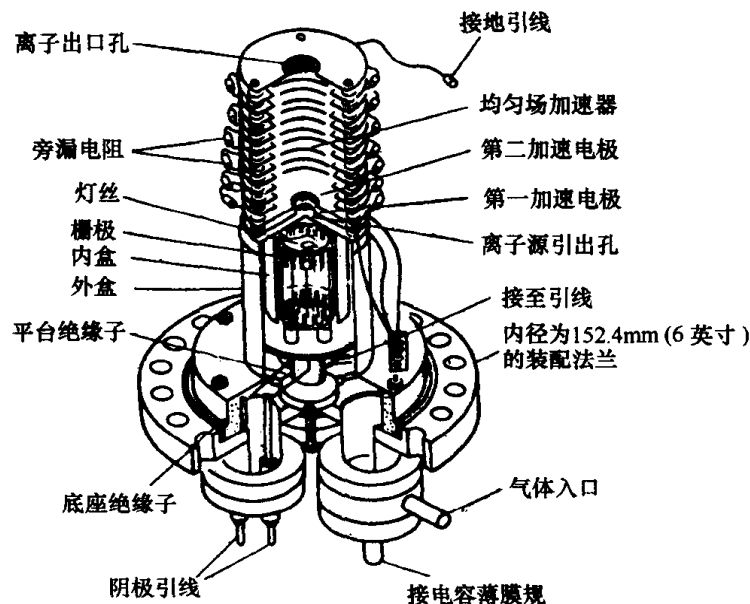


图 12-10 热阴极放电离子源

(五) 电子振荡型离子源

在一个简单的平行电子束的电子碰撞源中,离子源的电离效率主要取决于电离区内电子轨迹的平均长度。文献[214]介绍了一个简单的电子振荡型离子源如图 12-11 所示,对阴极处于和阴极相同的电位。从阴极发射的电子在阴极和对阴极之间往返振荡,增加了电子轨迹长度,提高了离子源的电离效率。

UTI-100B 四极质谱计采用了类似 B-A 规型无磁电子振荡离子源(图 12-12),电子由栅极加速后,通过电离区再被对面的反射极拒斥回转,在它损失之前要在电离区内往返振荡多次。由于增加了电子的有效轨迹长度,所以离子源的电离效率较高。又因为这种离子源通常是在较大的发射电子流下工作的(5mA 左右),因此,在电子空间电荷的作用下,离子源轴线上的电位就会降低,使得离子集中到源的轴线上,有利于离子引出。因而这种离子源的灵敏度要比普通尼尔源高一个数量级。

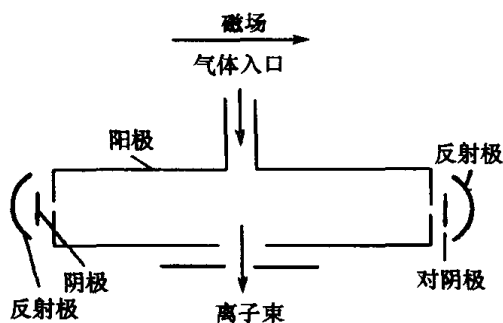


图 12-11 电子振荡型离子源

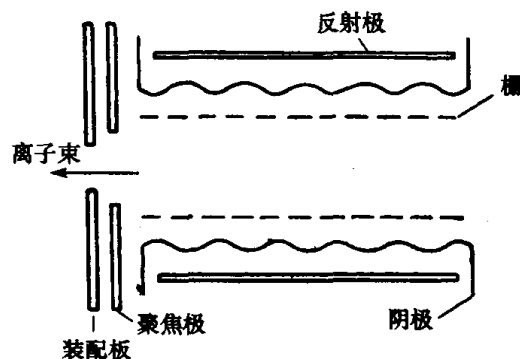


图 12-12 UTI-100B 四极质谱计离子源

(六) 脉冲电子碰撞源

脉冲电子碰撞源的基本结构和传统的尼尔源相似。它的特点是能提供均匀的离子能量和好的空间聚焦,以适应飞行时间质谱计的要求。

在这种离子源中(图 12-13),电子束的控制栅设置在相对阴极为负的电位上,当在该栅极上施加一个短暂的正脉冲时,电子就可通过。正脉冲的持续时间为 $0.1\text{s} \sim 0.5\text{s}$ 。当离子束截止后,在离子聚焦栅上施加 -250V 的脉冲电压,以 $1.5\mu\text{s} \sim 5\mu\text{s}$ 的时间将离子从离子源引入加速区。这种离子源的离子加速电压为 2.8kV 。

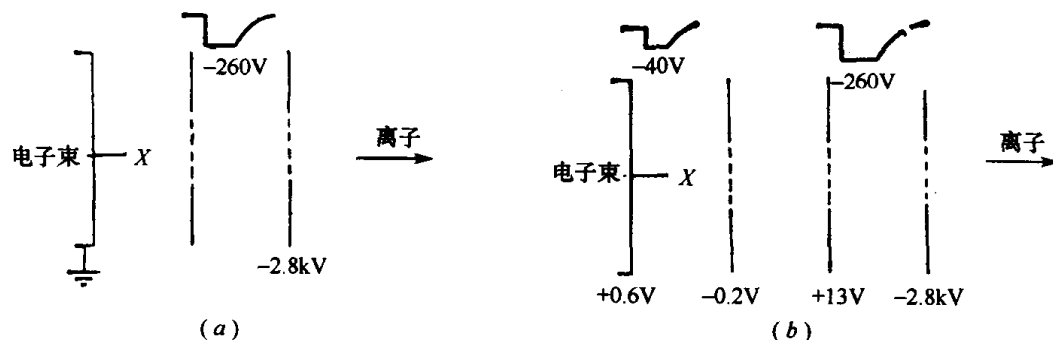


图 12-13 脉冲电子碰撞源

(a) 脉冲电子束与纸面垂直的双栅极飞行时间质谱计离子源;

(b) 连续电子束的三栅极飞行时间质谱计离子源。

飞行时间质谱计的一个重要进展是四栅式连续电子束离子源的出现(图 12-14)。

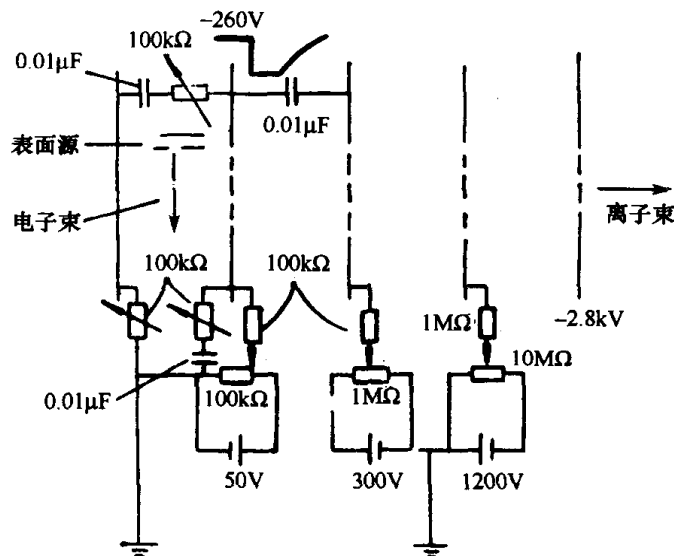


图 12-14 改进的四栅式飞行时间质谱计离子源

这种离子源的特点是控制栅极不加脉冲电压。引出脉冲的一部分经过一个电阻和一个电容耦合到推斥极上,在引出栅极上加直流偏压,电子控制栅极或第一电子狭缝相对阴极处于稍正的电位,以便供给离子源一个恒定的电子流,使整个工作周期都产生离子。在一个工作周期开始时,引出栅极上的脉冲电压就将离子引出。而电子束则由引出脉冲偏离出有效电离区。在引出脉冲下降时,耦合到推斥极上的延迟脉冲就吸引离子,阻止这些离子离开离子源成为散焦“噪声”。

经过改进后的这种连续电子束离子源的灵敏度要比脉冲电子束离子源高 300 倍,而且分

辨本领也有所提高。

(七) 离子贮存式电子碰撞源

文献[217]介绍了利用三维四极离子阱作为四极质谱计离子源的研究结果。作者研制了两种离子源,一种是用不锈钢精加工成的(图 12-15),另一种是用 38 目的铜丝网压制而成的(图 12-16)。由于三维四极离子阱具有贮存离子的功能,所以可以用调节端帽电极上脉冲引出电压的频率来控制离子源贮存离子的时间。

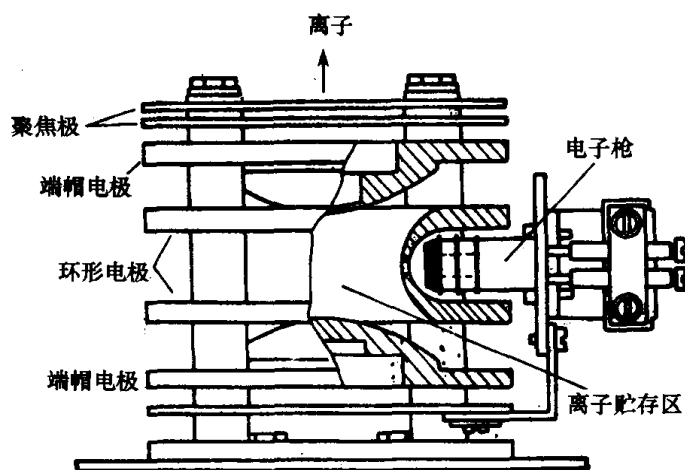


图 12-15 三维四极离子阱式离子源

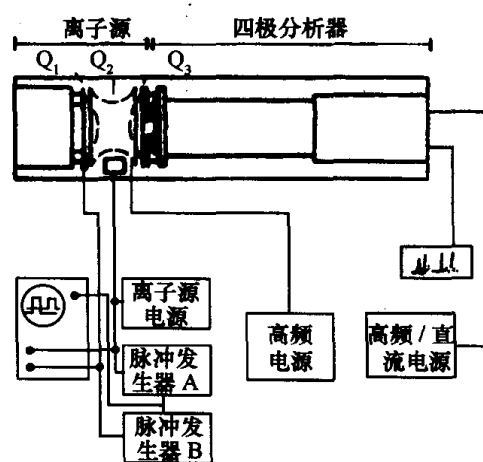


图 12-16 三维四极离子源与质谱计连接图

图 12-16 还给出了三维四极离子阱式离子源与四极滤质器的连接图。频率 3.0MHz 和 1.7MHz 峰—峰值为 1000V 的射频电压加在离子源的环形电极 Q_2 上,三维四极离子阱工作在全压力工作方式(即对全部离子均具有稳定的轨迹)。在端帽电极 Q_1 上施加一个重复频率可变的正脉冲(500 μ s、100V),将离子从离子源引入四极滤质器。离子源的灵敏度与正脉冲的重复频率有关。

以上各种电子碰撞源分别具有不同的特点,应根据不同的使用要求进行选择。

表 12-1 给出了各种电子碰撞源的技术参数和某些性能。

表 12-1 各种电子碰撞源的技术参数和性能

序号	资料来源文献号	电子流/A	电子能量/eV	电子流/A	离子能量范围/eV	离子能量分散/eV	离子源效率/%
1	[199]	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	10~100	$10^{-11} \sim 10^{-9}$	0~5000 ^①	—	0.02
2	[201]	2.5×10^{-4}	—	—	100	<10	12
3	[202]	0.5	62	10^{-6}	100	<1	—
4	[204]	3×10^{-3}	—	1.2×10^{-10}	100~300	—	1.0
5	[206]	10^{-6}	300	—	≈ 700	4~8	—
6	[210]	0.4	200	10^{-6}	5500	1.0	0.05
7	[219]	2×10^{-3}	70	10^{-9}	—	—	0.5
8	[217]	10^{-4}	≈ 70	$10^{-15} \sim 10^{-14}$ ^②	≈ 50	—	—

注:①和质谱计种类有关;②用 Quad-250A 型四极滤质器测得

三、不同质量分离原理的质谱计

(一)回旋质谱计

回旋质谱计的工作原理是基于离子在正交的高频电场和直流磁场的回旋共振现象,属于能量平衡质谱计的一种。

图 12-17 给出简单型回旋质谱计的结构图。其离子源、分析器和离子收集极均包含在一个边长约为 2cm 的盒状电极系统中。电极系统由阴极、电子加速极、盒电极(阱电极)、上下高频电极、电子收集极和离子收集极等电极组成。质谱管放在均匀的直流磁场中,电子束的方向和磁场严格平行。

从阴极发射的电子经电子加速极加速后,顺磁场方向穿过限束孔贯穿电离区,最后由电子收集极所接收。在电离区的电子束附近,被电离的各种气体离子在磁场 B 的作用下,以固有的回旋角频率 ω_0 旋转

$$\omega_0 = \frac{qB}{m} \quad (12-2)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度;

q ——离子的电荷量;

m ——离子的质量。

当对上下高频电极施加一个垂直于磁场方向的高频电场 $E = E_0 \sin \omega t$, 且满足条件 $\omega = \omega_0$ 时,这种离子便能不断从高频电场中获得能量,作不断增大回旋半径的螺旋线运动。这种离子称共振离子。如果 ω 和 ω_0 的差值较大,离子便不能从高频电场中获得较多的能量,所以其最大轨道半径的数值有限。这样的离子称为非共振离子。因此,若在离电子束较远处安装离子收集极,就能做到只收集共振状态的离子。

根据以上原理,仪器的质量扫描可以用固定磁场,连续改变高频电场频率;或者是固定高频电场频率,连续改变磁场强度来实现。不论采用哪一种扫描,谱峰的质量数均可按式(12-3)来计算

$$M = 1.525 \times 10^{-4} \frac{B}{f} \quad [\text{u}] \quad (12-3)$$

由于回旋质谱计的离子源和分析器都处在同一个小体积中,因此,非共振离子的存在会给电场带来一定的干扰。为了克服非共振离子所引起的电场畸变,在简单型回旋质谱计的基础上,发展了一种复杂管型的回旋质谱计(图 12-18)。这种质谱计设置了四个高频分压电极。在分压电极上还同时加有正零点几伏的阱电压,起防止共振离子逃逸的作用。此外,这种质谱计的盒电极被分割成四块独立的电极,平行于电子束的那两块电极称之为旁板电极。旁板电极施加数十伏负电压。在磁场和旁板电极形成的静电场的作用下,分析区内的非共振离子沿电场的等位线漂移出电极系统,排除了干扰离子。质谱计的电极用 0.2mm~0.3mm 的铂铱合金片制成,可用高频感应加热的方法在 900℃ 下彻底除气,因此其性能较简单型回旋质谱计更稳定。

回旋质谱计的主要参数:

①回旋共振频率

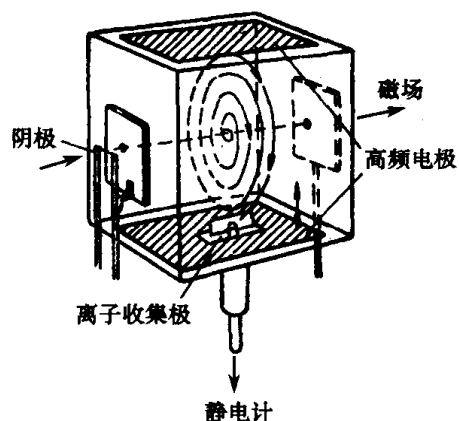


图 12-17 简单型回旋质谱计

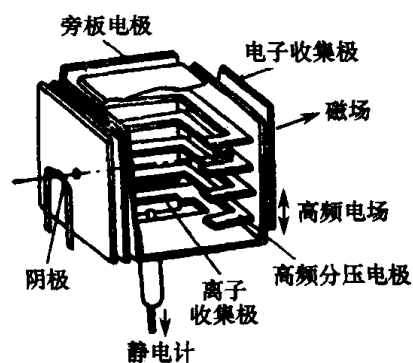


图 12-18 复杂型回旋质谱计

$$f = 1.525 \times 10^{-4} \frac{B}{M} \quad [\text{kHz}] \quad (12-4)$$

②共振离子的回旋圈数

$$N = 3.06 \times 10^{-13} \frac{R_0 B^2}{E_0 M} \quad (12-5)$$

③共振离子的飞行时间

$$T = 2 \times 10^{-11} \frac{R_0 B}{E_0 M} \quad [\mu\text{s}] \quad (12-6)$$

④共振离子的轨迹长度

$$L = 9.6 \times 10^{-13} \frac{R_0^2 B^2}{E_0 M} \quad [\text{cm}] \quad (12-7)$$

⑤共振离子的最终能量

$$\epsilon = 4.8 \times 10^{-13} \frac{R_0^2 B^2}{E_0 M} \quad [\text{eV}] \quad (12-8)$$

⑥分辨本领

$$\frac{M}{\Delta M} = 4.8 \times 10^{-13} \frac{R_0 B^2}{E_0 M} \quad (12-9)$$

⑦质量 $M + \Delta M$ 的非共振离子所能到达的最大半径

$$r_{\text{最大}} = \frac{2R_0}{\pi N} \cdot \frac{M}{\Delta M} \quad [\text{cm}] \quad (12-10)$$

⑧灵敏度常数

$$s = \frac{i^+}{i_e p} \quad [\text{Pa}^{-1}] \quad (12-11)$$

以上各式中

E_0 ——高频电场峰值[V/cm];

B ——磁感应强度[T];

M ——共振离子质量[u];

R_0 ——电子束与离子收集极间的距离[cm];

i^+ ——离子流[A];

i_e ——电子束电流[A];

p ——压力[Pa]。

回旋质谱计的突出优点是:零件少;电极薄;体积小;其电极可用高频加热除气,因而放气少;几乎没有“记忆效应”。特别适宜对超高真空小体积作残气分析。

回旋质谱计的缺点是:需用磁场;操作不便;不能用电子倍增器检测,使最小可检分压力受到限制;质标非线性;谱线自动记录复杂。

回旋质谱计的基本原理是由希普尔(Hipple)等在1949年提出的。托马斯(Thomas)等在1951年首次制成质谱计。1954年阿尔伯特(Alpert)等制成简单型回旋质谱计,并用来分析超高真空下的残余气体,大大地推进了超高真空技术的发展。国外许多工作者也报道了简单型回旋质谱计的性能研究结果。1960年克洛普弗(Klopfer)研制了一种可以去除非共振离子空间电荷影响的复杂型回旋质谱计。质谱计的灵敏度可保持在10%范围内不变,使定量分析成为可能。这种质谱计的缺点是结构比较复杂、参数调整困难、内部电极不易彻底除气。许多使用者对简单型回旋质谱计的定量分析精度极为关心。我国兰州物理研究所对简单型回旋质谱计的定量特性作了深入研究。研究结果表明,只要参数选择适当,简单型回旋质谱计的灵敏度的重复性可保持在20%以内(包括长期工作后灵敏度的稳定性和各管间灵敏度的重复性),是能满足一定要求的定量分析工作的。为了改善回旋质谱计的分辨本领,文献[230]报道了一种掩埋离子收集极式回旋质谱计。这种质谱计的分辨本领几乎要比具有相同磁场强度的传统回旋质谱计高一个数量级。其原理是,利用非共振离子在收集极附近的轨道半径的增量小于共振离子的半径增量的特性,在掩埋收集极前留一定宽度的空隙,不让非共振离子打上收集极,从而提高了仪器的分辨本领。

我国研制回旋质谱计的情况是:1960年首次由成都电讯工程学院研制成功,1963年中国科学院电子研究所对简单型回旋质谱计的工作特性进行了详细的研究,1965年中国科学院兰州物理研究所研制出定量精度为20%的简单型回旋质谱计的成套设备。此外,南开大学、复旦大学、北京电子管厂、虹光电子管厂和华东电子管厂等单位对回旋质谱计的理论、结构和应用都做了很多工作。

(二) 离子回旋共振质谱计

近年来,在进一步研究消除回旋质谱计非共振离子空间电荷影响的基础上,发展了一种离子回旋共振质谱计。仪器的基本工作原理和回旋质谱计相同。由于仪器的离子源和分析区(共振区)是分开的,因而消除了由非共振离子和电子束所产生的空间电荷的影响。仪器的结构如图12-19所示。离子检测原理和核磁共振波谱仪相同,是利用共振离子对高频电场的能量吸收来进行检测的。目前仪器的主要应用是离子—分子反应研究,在其它方面的应用也是有前途的。由Suurmeyer等介绍的一台仪器的性能指标为:磁感应强度1.5T,当高频电源的频率为50kHz~23MHz时,工作质量范围为1u~280u,分辨本领为1400。

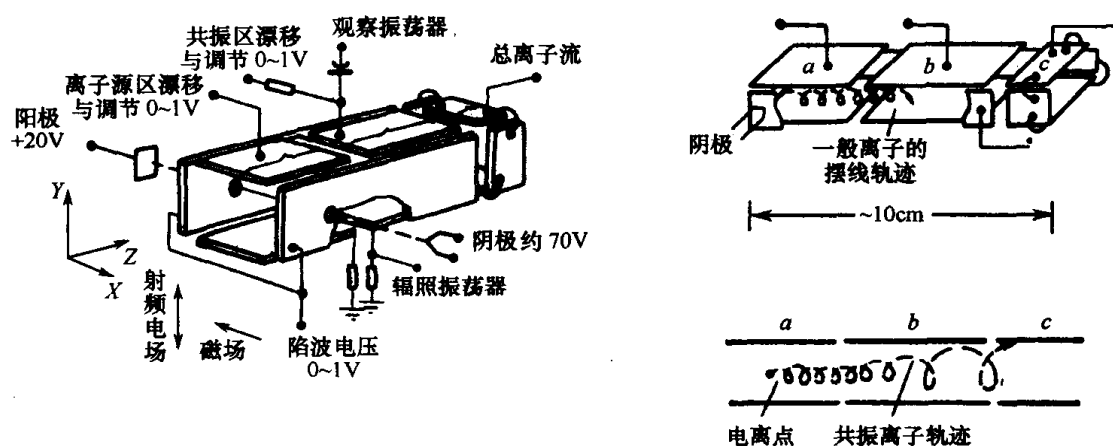


图 12-19 离子回旋共振质谱计

(三) 磁偏转质谱计

磁偏转质谱计是根据离子在垂直于直流磁场的平面运动时,不同质荷比的离子有不同的偏转半径原理来实现质量分离的。

用于真空分析的磁偏转质谱计的体积较小,它和同位素分析、化学分析等磁偏转质谱计的差异不大,仅在真空性能和某些结构方式上有所改进。真空磁偏转质谱计通常采用 60° 、 90° 、 180° 三种偏转角度的分析器。

现以 180° 偏转角的质谱计为例,介绍这类质谱计的工作原理。图 12-20 为质谱计的示意图。当质荷比为 m/e 的离子从离子源中引出后,经加速电压 U 的加速以速度 v 进入分析器,此时,离子的速度和加速电压间的关系可写作

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (12-12)$$

又因离子在垂直于直流磁场的平面中,是作半径为 R 的圆周运动,故离子受到的作用力是和磁场对它的作用力相等的

$$\frac{mv^2}{R} = Bev \quad (12-13)$$

将式(12-12)代入式(12-13)可得磁偏转质谱计的基本方程

$$\frac{m}{e} = 4.82 \times 10^{-13} \frac{R^2 B^2}{U} \quad (12-14)$$

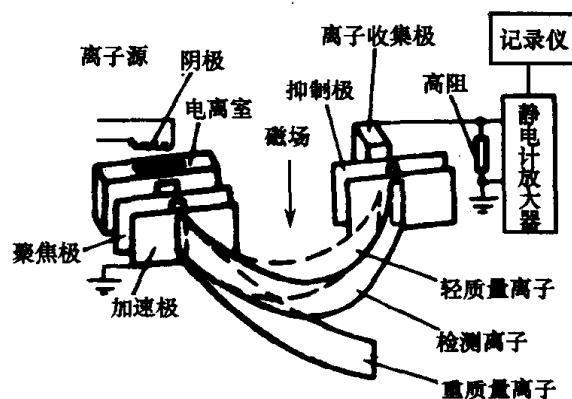
或

$$R = 1.436 \times 10^6 \sqrt{\frac{MU}{B^2}} \quad (12-15)$$

式中 R ——离子偏转半径[cm];

M ——单电荷离子的质量数[u];

U ——离子加速电压[V];


 图 12-20 180° 磁偏转质谱计

B ——磁感应强度[T]。

从式(12-15)可以看到,在离子加速电压和磁场强度保持不变的情况下,一定质量的离子具有一定的偏转半径。由于质谱计出口缝隙很窄,当某一质量的离子通过缝隙被离子检测器接收到时,其它质量的离子则不能通过此缝隙。因此,可保持磁场恒定,用连续扫描离子加速电压的方法,在离子检测器上收集不同质量的离子,得到完整的质谱。也可保持离子加速电压的不变,用扫描磁场的方法来获得质谱。为了使质谱计的结构简单,真空分析磁偏转质谱计通常采用扫描离子加速电压的方式,其磁场用永久磁铁产生。

磁偏转质谱计的分辨本领表达式为

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{R}{s_1 + s_2 + R \left(\alpha^2 + \frac{\Delta U}{U} + 2 \frac{\Delta B}{B} \right)} \quad (12-16)$$

式中 s_1 ——离子源出口缝隙宽度[cm];

s_2 ——离子检测器入口缝隙宽度[cm];

R ——离子偏转半径[cm];

α ——入射离子束分散角[rad];

$\frac{\Delta U}{U}$ ——离子加速电压的不稳定度;

$\frac{\Delta B}{B}$ ——磁场的稳定度。

磁偏转质谱计的优点是:结构简单,制造方便;质谱峰形好,质量歧视小;对污染不敏感;易于定量分析;仪器的分辨本领较好,采用电子倍增器后可获得很高的灵敏度(180°磁偏转质谱计因受结构限制,无法使用电子倍增器)。

磁偏转质谱计的缺点是:需用磁铁;烘烤后重新安装磁铁时要调整参数;质量扫描速度低(磁场扫描方式);质谱计不能作成裸规形式,不能作真空中的原位置测量。

真空分析磁偏转质谱计的历史大致是从1940年尼尔研制成偏转半径为15cm的磁质谱计开始的。该质谱计是按电子管的工艺原则设计的,故能经受烘烤,从而获得很低的本底压力。雷诺(Reynold)于1956年制成了一个能烘烤的玻璃外壳的质谱计,仪器的分压力测量极限为 10^{-10} Pa,分辨本领为130。此后,有人将这种质谱计的玻壳材料改为硅铝玻璃,使得仪器的氦渗透率比用派列克斯玻壳时低 10^4 倍。

1960年戴维斯等人制成了一种90°偏转角的小型仪器,其偏转半径为5cm,总长25cm~30cm,结构牢固,性能指标较高,特别适合于超高真空残气分析。图12-21为该仪器的示意图。它采用电子碰撞式离子源和一个10级的银—镁打拿极电子倍增器。在1mA发射电流下,不加倍增器能测量 10^{-8} Pa的分压力。使用电子倍增器时可测量 10^{-11} Pa的分压力。如将倍增器置于液氮中冷却,则因噪声的降低,可测量出 10^{-13} Pa数量级的分压力。仪器的常用分辨本领为40左右,最大分辨本领可达100~150。使用倍增器时的质量扫描速度为 $1.5\mu\text{s}/u$,并能用电子

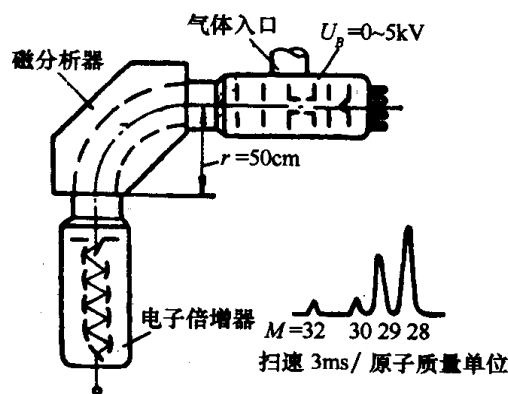


图 12-21 小型 90°磁偏转质谱计

示波器显示。

文献[238]介绍了一种偏转半径为 1cm 的 180° 偏转角的磁偏转质谱计。这种仪器性能稳定,经校准后可用作分压力计。它的最小可检分压力为 10^{-9} Pa。文献[239]报道了用英国 Vacuum Generators 公司制造的 Micromass-1A 型 180° 磁偏转质谱计分析机械真空泵、离子泵真空系统的残气谱。

值得重视的是,有文献报道了一台偏转半径为 100mm、偏转角为 90° 的可烘烤全金属磁偏转质谱计。它利用重复多道标度的质量扫描方式,分析了 4×10^{-9} Pa 下的 10^{-14} Pa 数量级的分压力。仪器采用金属网做成的尼尔源,它能用电子轰击彻底除气。电子发射体为钨钍阴极。离子检测器是 12 级艾伦型铍—铜电子倍增器。仪器的分辨本领为 140。

为了检测 10^{-14} Pa 数量级的分压力,仪器需测量 10^{-20} A 数量级的离子流。这对直流检测方式来说是极为困难的。因为此时离子流的统计噪声是测量精度的主要限制。如用一般的离子计数技术,则受电子倍增器的增益漂移和脉冲高度鉴别电平的漂移所引起的计数率起伏的干扰。重复多道标度的质量扫描方式是消除这种困难的有效方法。它使离子计数率起伏对质谱线的影响减到最小限度,这时有偶然噪声脉冲所产生的伪峰是很容易被识别和排除的。图 12-22 给出重复多道标度测量方式的电子线路方框图。

仪器所用电子倍增器的增益为 10^6 。它和一个等效噪声电荷为 500 个电子数的电荷灵敏前置放大器相连。为了获得最大的信噪比,主放大器的成形时间一般在 $2\mu\text{s}$ 左右,脉冲高度甄别阈设置在相当于前置放大器的输入为 5×10^3 个电子、噪声计数率为小于每秒一个计数处。电子倍增器的输出是用精密水银脉冲器校准过的。

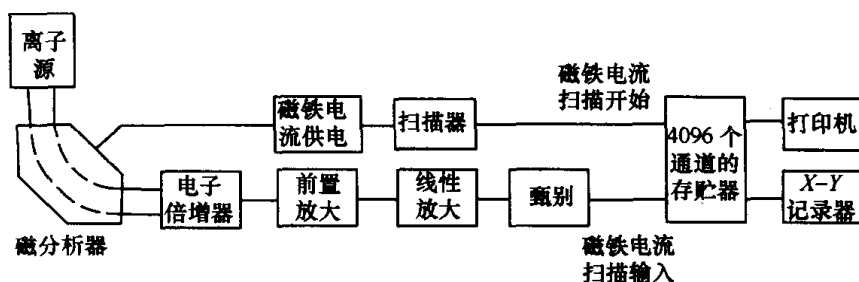


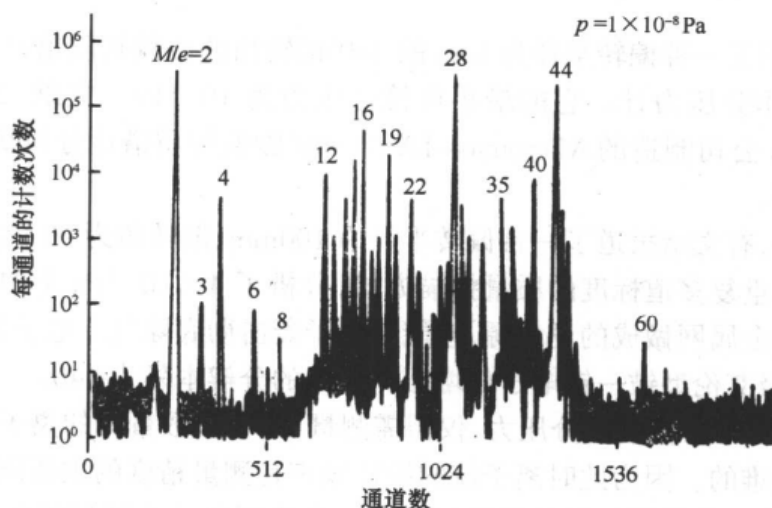
图 12-22 与分析器励磁电流同步扫描的重复多道标度的电子线路方框图

电子线路的存储系统有 4096 个通道,其容量为 10^6 。多道标度方式的最大脉冲输入率为 10M,内部定时在 $10\mu\text{s} \sim 0.9\text{s}$ 范围内可调。存储数据可由打印机或 X-Y 记录仪读出。分析器的磁铁电流是用电机驱动的电位器来扫描的。扫描间隔在 5min~120min 内可调。多道标度的启动是由扫描器的自动返转信号来触发的。存储规模和记忆闭锁时间选择在下次扫描返回以前提前停止。为了防止累计计数时间改变,在等待间隔中存储的数据可局部地被打印出来。实验结果表明,在两星期内对氮峰所作的 100 次测量中,氮峰宽度的变化仅为 $0.3u$ 。图 12-23 给出了 4×10^{-9} Pa 时的残气谱。

(四) 摆线质谱计

摆线质谱计的分析场是横向电场和与之相垂直的直流磁场的复合场。因此,摆线质谱计的分析场可看作是在 180° 磁偏转分析场上叠加一个与磁场相垂直的均匀电场而构成的。

在直角坐标系统中,设磁场 C 的方向为 Z 方向,电场 E 的方向为 Y 方向质荷比 m/e 的离


 图 12-23 全压力为 4×10^{-9} Pa 时的残气谱

 (M:2~90, 每个通道的计数间隔为 120s, 一个计数相当于 4×10^{-5} Pa)

子在 X-Y 坐标平面上的运动方程可写作

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = eB \frac{dy}{dt} \quad (12-17)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = eE - eB \frac{dx}{dt} \quad (12-18)$$

将式(12-17)和式(12-18)积分后, 可知离子运动的轨迹为一摆线, 摆线滚动的半径为

$$R = \frac{Em}{eB^2} \quad (12-19)$$

从摆线质谱计的原理图(图 12-24)中可看到, 从 A 点(离子源出口缝隙 s_1)出发的离子, 在正交电磁场的作用下, 按摆线轨迹经过一个周期后聚焦到 B 点(离子收集极入口缝隙 s_2)。离子源出口缝隙 s_1 和离子源入口缝隙 s_2 之间距 d 称为聚焦距离。其表达式为

$$d = 2\pi R = 2\pi \frac{m}{e} \cdot \frac{E}{B^2} \quad (12-20)$$

式(12-20)又可改写成

$$\frac{m}{e} = 4.8 \times 10^{-13} \frac{dB^2}{2\pi E} \quad (12-21)$$

式(12-21)称为摆线质谱计的基本方程。

 式中 d ——聚焦距离[cm];

 m/e ——离子的质荷比[u];

 B ——磁感应强度[T];

 E ——电场强度[V/cm]。

从摆线质谱计的基本方程可以看出, 在电场和磁场均保持恒定的条件下, 于离子收集极缝隙处可接收质荷比为 m/e 的离子, 也就是说, 这种仪器能实现很宽的初始速度与方向范围的双聚焦作用。

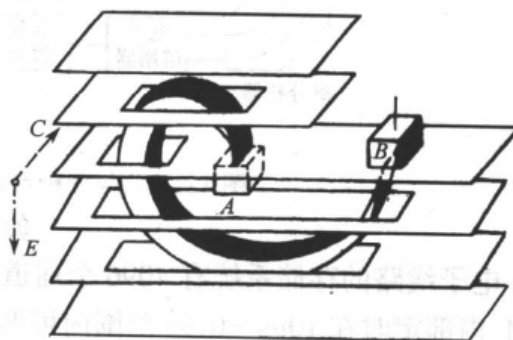


图 12-24 摆线质谱计原理图

C—磁场; E—电场; A—离子源; B—离子收集极。

仪器的质量扫描既可采用磁场扫描,也可采用电场扫描。如果采用电场扫描方式,离子加速电压和电场板电极(产生电场的一组电极)的电压必须同步扫描,否则会因轨迹偏离过大,使离子流被电场板电极所截获。

摆线质谱计的分辨本领与聚焦距离 d 成正比,与出口缝隙和入口缝隙的宽度之和($s_1 + s_2$)成反比,而与离子能量分散和束的角度分散无关。其表达式为

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{d}{\Delta d} = \frac{d}{s_1 + s_2} \quad (12-22)$$

因此,摆线质谱计的分辨本领要比 180° 磁偏转质谱计大一倍。

这种仪器的优缺点和 180° 磁偏转质谱计相似。但它具有双聚焦性质,所以分辨本领高。又因结构上的限制,仪器的离子源只能做得很小,故其发射电子流通常要比 180° 磁偏转质谱计小一个数量级。

摆线质谱计是由布利克尼(Bleakney)希普尔在 1938 年首次制成的。文献[243]介绍了一台质量范围为 $2u \sim 150u$ 的摆线质谱计。它在质量 $12u \sim 150u$ 范围内是根据摆线质谱计的原理工作的,在质量为 $2u \sim 12u$ 范围则按 180° 磁偏转质谱计的原理工作。珀金斯(Perkins)等根据真空系统残气分析的要求设计了一台聚焦距离为 1cm 的摆线质谱计。仪器的质量范围为 $2u \sim 80u$; 在 $100\mu A$ 的发射电流下,仪器对氮气的灵敏度为 $8.8 \times 10^{-4} A/Pa$; 分辨本领为 80。此外,一台用于分析超高真空系统残余气体的摆线质谱计,仪器的聚焦距离为 25mm。当发射电流为 $80\mu A$ 时,在质量数 40 以内的灵敏度为 $2.7 \times 10^{-2} A/Pa$, 分辨本领为 80, 可用来检测 $6.5 \times 10^{-10} Pa$ 的分压力。仪器的质量扫描是采用电压扫描方式。

休伯(Huber)等也研制了一台超高真空残气分析摆线质谱计,质量扫描是用磁场扫描来实现的。仪器聚焦距离为 40mm。它的质量范围较宽,为 $1u \sim 500u$ 。在 $100\mu A$ 发射电流时的最小可检分压力为 $2.7 \times 10^{-10} Pa$ 。分辨本领为 80, 在 $m/e = 160$ 处峰对其相邻峰位的影响是其强度的 1%。图 12-25 给出这种仪器的结构图。

此外,为了分析真空系统内的少量惰性气体,文献[247]介绍了一台聚焦距离 $b = 20mm$ 的摆线质谱计。由于采用了超高真空技术和选用了适当的材料,仪器具有很小的本底和较高的灵敏度,它可对真空系统进行静态测量(即测量和泵分离的真空系统中的气体成分)。

(五) 飞行时间质谱计

飞行时间质谱计是根据所谓“渡越时间”的原理进行质量分离的。仪器由离子源、无场漂移管、电子倍增器以及相应的测量与控制电路所组成。从图 12-26 可以看出,由阴极 F 发出的电子,受到电离室 A 上的正电位的加速,以很窄的束通过电离室到达电子收集极 P。在通常的本迪克(Bendix)飞行时间质谱计中,电子束在平时是处于截止状态的;工作时,将一个宽度很窄的(约 $0.25\mu s$)正脉冲加到控制栅上,把电子束引入电离室,使气体分子电离,电子束的能量在 $0 \sim 100eV$ 内可调;紧接电子束脉冲消退后不久,在聚焦栅 G_1 上加上一个约 270V 的负脉冲(宽度约为 $2.5\mu s$),把离子引出电离室 A,进入加速区;加速栅 G_2 上是施加 2.8kV 的负高压 U , 它使离子加速以速度 v 飞越长度为 L 的无场漂移管,最后到达离子检测管—电子倍增器 C。

如果位于漂移管的起始端的不同质量的离子群均具有相同的能量,那么,不同质量的离子将在漂移管内按其质量分成若干小群。轻质量离子的速度较快,先到达离子检测器,重质量离子的速度较慢,后到达离子检测器;测出这些离子到达离子检测器的时间,就可得到一个完整

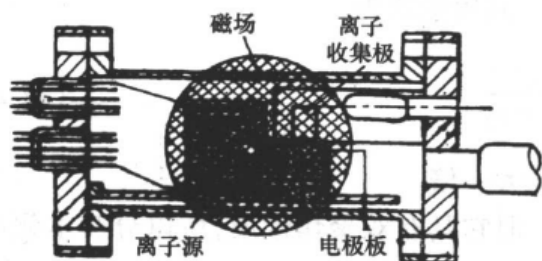


图 12-25 超高真空摆线质谱计

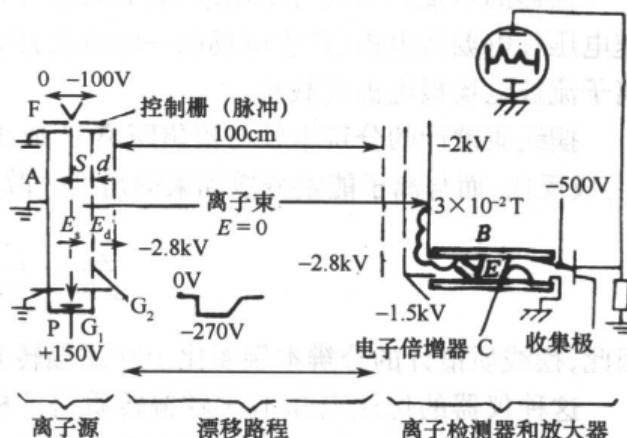


图 12-26 飞行时间质谱计原理图

的质谱。上述过程可以重复进行,重复频率可达数十 kHz。也就是说,这种仪器可以在几十微秒内记录一组质谱。

除了按很高的重复频率记录整个质谱外,仪器还可采用选峰扫描方式。此时,要求离子检测器具有多路输出能力,本迪克磁式连续打拿极倍增器就具有这种功能。这种倍增器可以有六个模拟门,如果在门电极上加一个负电压脉冲,就可收集到质谱信号的脉冲电流,并可将其按模拟形式输出到记录仪上。这样就可实现同时监控质谱中所感兴趣的六个峰。

在推导飞行时间质谱计的基本公式时,通常假定:离子源中的离子都是在同一个平面上产生的;各种离子的初始动能均为零。这样,离子加速后的动能关系式可写成

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = eU \quad (12-23)$$

因而离子的飞行速度为

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (12-24)$$

离子飞越长度为 L 的漂移管所需的时间为

$$t = \frac{L}{v} = L \sqrt{\frac{m}{2eU}} \quad (12-25)$$

式中 m ——离子质量;
 v ——离子速度;
 e ——离子电荷量;
 U ——离子加速电压;
 L ——漂移管长度。

以上参数的量纲采用静电单位制时,离子的飞行速度和飞越时间的单位分别为 cm/s 和 s 。

从以上关系式可看出,当漂移管的长度和离子加速电压一定时,离子在漂移管中的渡越时间仅与它的质荷比有关。对于两种具有相同电荷量的质量分别为 m_1 和 m_2 的离子,它们在漂移管中的渡越时间差是与 $L(m_1^{-1/2} - m_2^{-1/2})$ 成正比。这种仪器的分辨本领公式可表达为

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{t}{2\Delta t} \quad (12-26)$$

式中 t ——离子飞越漂移管的飞行时间[s];

Δt ——质量为 m 的离子群在记录仪器上所产生的时间分散[s]。

飞行时间质谱计的优点是:机械结构简单;不需要磁铁;反应和记录速度快,能在数十微秒内记录一组质谱;灵敏度高;能在较高的压力下工作。

其缺点为:仪器体积较大;测量与控制电路复杂。

飞行时间质谱计的工作原理是于 1946 年提出的。1948 年制成的离子速度器虽然离子漂移管长达 3m,但其分辨本领却只有 3。经沃尔夫(Wolff)等改进后,仪器的分辨本领增加到 10~20。为了进一步改善分辨本领,文献[250]提出的办法是,在离子收集极前加一个栅极,并施加一个延迟脉冲,用改变延迟时间的方法扫描谱线,这样使仪器的分辨本领达到了 75。

仪器的进一步发展是双场离子源(图 12-13)的出现,它使电离区内不同地点生成的同类离子能同时到达收集极。采用双场源后,威利(Wiley)等在一个漂移管长度为 100cm 的仪器中,将分辨本领提高到 200~500。另一个进展是 1961 年美国阿贡国家实验室提出的改进型连续式离子源(图 12-14)。这种离子源可以在不降低信噪比的情况下,将仪器的灵敏度提高 300 倍,而且分辨本领也有很大的提高。

1970 年乔治桑佐(George Sanzone)发展了一种动态场理论,使这类仪器的分辨本领提高到 4000 左右,此后,还出现了束调制理论、二维离子运动理论、非均匀振荡电场和离子反射镜理论,使这类仪器的理论和性能有了长足的进展。

20 世纪 60 年代初期开始,在世界各国出现了不少为真空技术专用的飞行时间质谱计。文献[253]所介绍的仪器就是为真空分析而专门设计的。该仪器采用了裸式离子源,为原位置测量提供了方便(图 12-27)。文献[254]报道了利用飞行时间质谱计分析冷凝泵真空系统的残余气体。有文献介绍了一种检测极限为 10^{-10} Pa、分辨本领为 60 的高灵敏真空分析的飞行时间质谱计。

1968 年苏联生产了 MCX-3A 型超高真空飞行时间质谱计。该仪器采用拍照的方法来记录分压力的快变化过程。美国本迪克公司也生产了一种 MA-1 型真空分析飞行时间质谱计。文献[256]介绍了一台 RGA-1 型真空残气分析飞行时间质谱计。仪器反应速度很快,1s 内可记录 5×10^4 个质谱。配有电子计算机,因而既可测量分压力,也可同时监控全压力;可以采用手动和半自动分析,也可用计算机控制连续记录真空状态。仪器的分析器头部可在 350℃ 下进行烘烤。

1969 年威尔逊(Wilson)详细介绍了一种残余气体分析飞行时间质谱计。它的漂移管长 37cm,采用了直热式阴极,发射电子流为 250 μ A,电子加速电压为 70V,离子加速电压为 3kV。离子检测系统采用了 15 级百叶窗式电子倍增器(高压 4kV 时增益为 5×10^6)和 100MHz 宽带示波器(灵敏度为 10mV/cm)。对质量范围 1u~200u,记录时间是 15 μ s,重复扫描频率为 10kHz。仪器的分辨本领为 60,灵敏度为 10^8 mV/Pa。

1972 年卡里柯(Carrico)等研制了一台用于真空残气分析的简单的飞行时间质谱计。其原理如图 12-28 所示。仪器采用两个管型电子倍增器(CEM)作为电子发射源和离子检测器。第一个管型倍增器(CEM1)用波长 1850nm 的紫外光子激发产生电子,两次激发时间间隔大于被检测离子的最大飞行时间。漂移管是用直径 1.6cm、长 13cm 的不锈钢制成的。仪器的典型参数为:发射电子流 3×10^{-10} A(100 个电荷脉冲/s);离子加速电压为 300V。当压力为 10^{-3} Pa 时,输给第二个管型倍增器(CEM2)的 N_2^+ 离子流为 2×10^{-6} A。

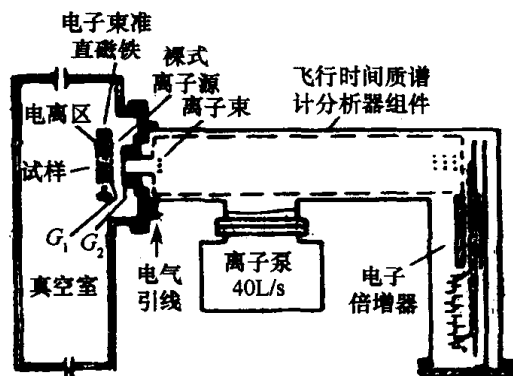


图 12-27 真空分析飞行时间质谱计

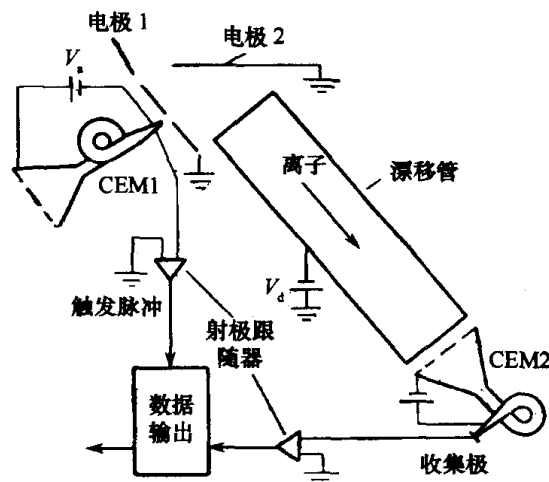


图 12-28 卡里柯等设计的残气分析飞行时间质谱计

(六) 射频质谱计

射频质谱计的工作原理是按不同质荷比的离子在通过射频分析场时增能的不同进行质量分离的。从图 12-29 可见，由阴极 F 发出的电子，受栅极 G_1 的加速，将栅极 G_1 和 G_2 之间的气体分子电离。所产生的离子在加速电压 U 的作用下，向栅极 G_2 、 G_3 和 G_4 组成的射频分析场运动。因为 G_2 、 G_3 和 G_4 所处的直流电位相同，栅距也均为 s ，所以当 G_3 上施加一个角频率为 ω 的射频电压时，在 G_2 和 G_3 间形成的射频电场为

$$E_{2,3} = E_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (12-27)$$

而 G_3 和 G_4 间的射频电场为

$$E_{3,4} = -E_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (12-28)$$

式中 $E_0 = V/s$ ， V 为射频电压幅值；

θ ——离子通过栅极 G_2 时的初始相位角。

假定离子束是均匀的，当其通过射频分析场时，有的离子失去能量，有的离子获得能量。能量的变化 ΔW 可按式(12-29)计算：

$$\Delta W = \int F ds = e \int E v dt \quad (12-29)$$

式中 e ——离子电荷量。

如果离子通过射频场时速度变化不大(即满足条件 $V_{\text{有效值}} \ll U$)，式(12-29)可写成

$$\Delta W = ev \int E dt = ev \left[\int_0^{s/v} E_0 \sin(\omega t + \theta) dt - \int_{s/v}^{2s/v} E_0 \sin(\omega t + \theta) dt \right] \quad (12-30)$$

取离子通过 G_2 的时间 $t=0$, v 为离子的初速。积分后得

$$\Delta W = \frac{evE_0}{\omega} \left[\cos\theta - 2\cos\left(\frac{\omega s}{v} + \theta\right) + \cos\left(\frac{2\omega s}{v} + \theta\right) \right] \quad (12-31)$$

先对 θ 微分求 ΔW 的极大值,得

$$\omega \frac{s}{v} + \theta = 180^\circ \quad (12-32)$$

式中 $\omega s/v$ 即为离子在两个栅极间的渡越角。此式表示了当射频电场改变方向时,通过栅极 G_3 的离子得到最大能量增加。再将式(12-31)对 ω 微分求 ΔW 的最大值,可得

$$\theta = 46^\circ 26' \quad (12-33)$$

此外

$$eU = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (12-34)$$

从式(12-32)、式(12-33)和式(12-34)可求得

$$M = \frac{2eU}{v^2} = \frac{0.266U}{s^2 f^2} \quad (12-35)$$

式中 U ——离子加速电压[V];

s ——射频分析器的栅距[cm];

f ——射频场的频率[MHz];

M ——离子质量[u]。

式(12-35)即为射频质谱计的质量调谐公式。能满足式(12-35)的离子便能获得最大增能,这种离子称为同步离子,其它离子则增能很小,甚至损失能量。为了不让增能小的离子打到收集极 C 上,在收集极前面设置带正电位的拒斥栅 G_5 ,只让能量大于拒斥电位的同步离子打上收集极。这种选择性增能效应构成了射频质谱计的质量分离原理。

从仪器的调谐公式可见,质量扫描有两种方式:一是改变射频电场的频率,二是改变离子加速电压。在第一种扫描方式中,质量标度呈非线性,但质量范围宽。后一方式的质量标度呈线性,但覆盖的质量范围窄,只能靠变换频率来扩大工作质量范围。

仪器的分辨本领与离子传输效率的调节,是用改变 G_5 上的拒斥电位来实现的。随着 G_5 对 G_2 相对电位的增加,相应能达到收集极的离子的人射角与最大增能相位角之间的差变小。此时仪器的分辨本领提高,而离子的传输效率降低。

为了改善分辨本领,实际仪器往往采用多级射频分析场。具有三个分析场、两个漂移空间的贝内特型射频质谱计性能较好。

射频质谱计的另一种形式是雷德黑德型无漂移空间射频质谱计,仪器的射频分析场由奇数个(通常为5个~11个)等间距的栅极构成。它又称直线加速器射频质谱计,国外商品名为 Topatron,意为一种既可测量分压力又可测全压力的仪器。其工作原理和直线加速器相似,但在结构上不同于贝内特型射频质谱计,也是按增能不同进行质量分离的。图 12-30 是这种仪器的结构图。由阴极 F 发出的电子受电离室 A 正电位 U_A 的加速,将气体分子碰撞电离。所生成的离子由栅极 G_1 上的电位 $-U_{G_1}$ 所加速,通过射频分析场进行质量分离。栅极 G_1 所截获的那部分未经质量分离的离子,可用来指示全压力。

除以上两种射频质谱计外,还有博伊德型射频质谱计和不等距栅射频质谱计,这里不一一

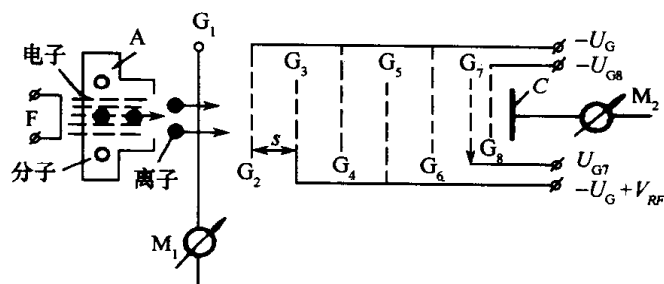


图 12-30 直线加速器射频质谱计(雷德黑德型射频质谱计)

赘述。

射频质谱计的优点是,不需要磁场,体积小,质量轻。其缺点为,离子在分析场内的传输效率低(因而仪器的灵敏度低),分辨本领差。雷德黑德型射频质谱计的特点是,探头的体积更小,能兼作全压力测量。

由贝内特在 1950 年发明的射频质谱计是一台具有漂移空间的三级式仪器,仪器的分辨本领为 15 左右,离子传输率只有 5%。单级的射频质谱计因分辨本领很差,只能用于检漏。一种国产的三级式贝内特型射频质谱计的仪器的性能参数:质量范围为 $10u \sim 90u$ (频率 $f = 2\text{MHz}$);分辨本领为 $5 \sim 20$;工作压力范围为 $1 \times 10^{-2}\text{Pa} \sim 1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

(七) 线振质谱计(静电质谱计)

1950 年特雷特纳(Tretner)发明了一种线振质谱计,它也是一种纯电场的质谱分析仪器。仪器探头的尺寸较小和电离规管相仿,可用来监测压力的快变化过程。

仪器的工作原理如图 12-31 所示。由阴极 K 发射的电子(发射的电子流的强度受控制极 W 所控制),将栅状端电极 A 内部的气体分子电离。生成的离子被抛物线状的电位阱所加速,沿分析场轴线作往返的直线振荡运动。离子在阱内振荡的频率与其质荷比的关系为

$$f = K \sqrt{\frac{eU_0}{m}} \quad (12-36)$$

式中 U_0 ——电位阱的最大直流电位;

K ——和阱长度有关的结构常数;

m/e ——质荷比。

如果在电极 A 上施加一个调制电压,其频率等于某种离子在阱内的振荡频率时,这种离子就处于共振状态。每次振荡中,都有新的离子加入到共振离子团中去。因此,这种同步离子团的电荷量会逐渐增加到某一平衡值,并在信号电极上

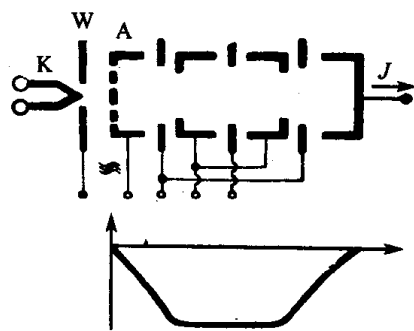


图 12-31 线振质谱计原理图

产生位移电流 J , 输出强度相当于某种气体组分分压的感应信号。分析场中的非共振离子,经过几次振荡形成空间电荷,但它不能输出感应信号,仅能以噪声的形式存在,其强度约占共振离子强度的 3%。在这种传统工作方式的仪器中,质量扫描是改变射频电压的频率来实现的。

1962 年特雷特纳从与光学系统相应的观点出发,对线振质谱计作了更详细的理论分析,推导出仪器的分辨本领表达式为

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{1}{4} \left(\frac{L}{r_{\text{最大}}} \right)^2 \quad (12-37)$$

式中 L ——电位阱的长度;

$r_{\text{最大}}$ ——共振离子团断面的最大半径。

德国 Leybold 公司的商品——Larvitron 的性能指标:质量范围为 $2u \sim 250u$,分辨本领约为 20;灵敏度常数为 $2.3 \times 10^{-4} 1/\text{Pa}$;工作压力范围 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-7} \text{Pa}$;频率范围为 $0.5 \text{Hz} \sim 1.7 \text{Hz}$;发射电流为 $0.5 \text{mA} \sim 10 \text{mA}$;探头长 100mm ,直径 25mm ;质量和频率的关系为 $f \sqrt{M} = 2.5 \text{Hz}$ 。苏联也生产了两种型号的线振质谱计。一种 AMH-1C 型线振质谱计,其指标为:质量范围 $2u \sim 250u$,工作压力范围 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$,分辨本领(50%峰高) $10 \sim 20$;另一种仪器 АПДП-2 型线振质谱计,其指标为:质量范围 $2u \sim 200u$,工作压力范围 $10^{-3} \text{Pa} \sim 10^{-7} \text{Pa}$,分辨本领(10%峰高) $15 \sim 25$,分辨本领(50%峰高) $25 \sim 40$ 。

托伊布纳(Teubner)在 1964 年提出了线振质谱计的另一种工作方式,即周期地改变电位阱的幅值,固定调制电压的频率(使离子的聚焦条件保持不变),以保证信号的选择放大。和传统的工作方式相比,这种方式的优点是:排除了非共振离子的干扰;消除了谐波峰;增加了输出信号的线性范围。其缺点为:为了在分析器中形成所需的电场,必须采用大幅值的排斥脉冲,使实现定量分析更为困难。

迈耶(Meyer)在 1974 年提出了一种消除线振质谱计非共振离子空间电荷、提高仪器的灵敏度和分辨本领的新方法。这种仪器采用了 17 片双曲面电极代替圆筒电极,电极片是按传统四极质谱仪器的供电方式供电的(图 12-32),每片电极由分压器分压供电(图 12-33)。分析场坐标 X 、 Y 、 Z 处的电位为

$$\Phi_{x,y,z} = -4U_0 \left[\left(\frac{z}{L} \right)^2 \frac{1}{4} \right] + \frac{(U + V \cos \omega t)(x^2 - y^2)}{r_0^2} \quad (12-38)$$

式中 r_0 ——双曲面电极的内切圆半径;

U_0 ——电位阱的最大直流电位;

L ——电位阱长度;

U ——四极场直流电压;

V ——四极场的交流电压幅值;

ω ——四极场交流电压的角频率。

当离子在电极组的一端生成后,动能为零的离子沿 Z 轴方向作简谐振荡,此时只有那些满足马蒂安(Mathieu)方程稳定解的离子才能留在分析场内,非共振离子则因轨道不稳定而消失,从而使分析场能贮存较多的共振离子,以改善线振质谱计的灵敏度和分辨本领。

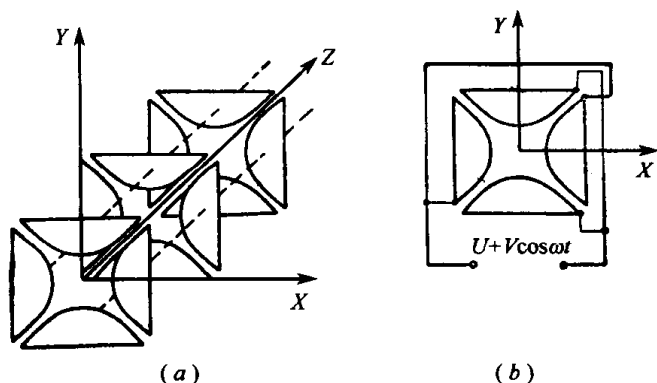


图 12-32

(a) 四极式线振质谱计的电极图;

(b) 四极式线振质谱计一组电极的供电图。

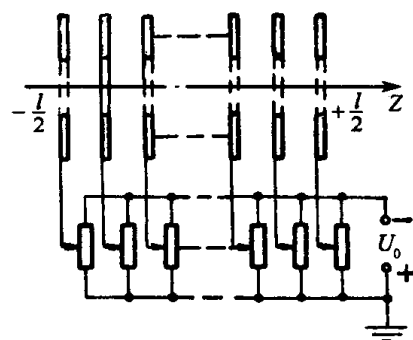


图 12-33 四极式线振质谱计
直流阱的供电图

(八) 四极质谱计(见本章“五、四极质谱计”)

(九) 单极质谱计

单极质谱计是四极仪器的一种,其分析场相当于四极滤质器分析场的一个象限。仪器除具有四极场的质量过滤作用外,这种有限的分析场还给仪器带来新的特性,即具有 Y 方向的局部聚焦特性。

从四极滤质器的结论中可看到,当在四极分析场垂直于离子入射方向的截面上画等位线时,可得两条正交的零电位的等位线(图 12-34),它和 X 、 Y 坐标成 45° 夹角,这条等位线与 Y 电极间所占有的部分就是单极分析场。因此,单极质谱计的质量分析器仅由处于地电位的直

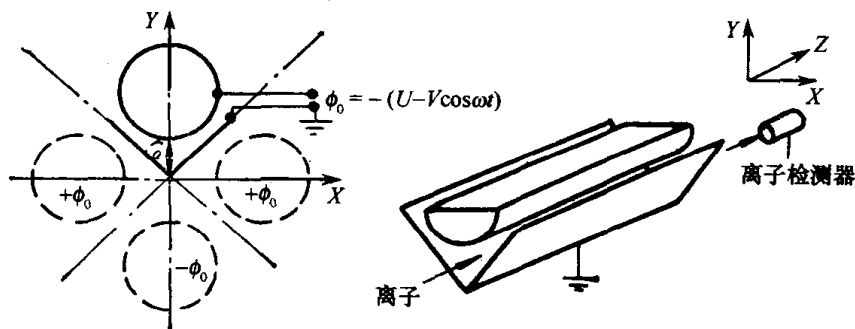


图 12-34 单极质谱极原理图

角电极和处于 $\phi_0 = -(U - V \cos \omega t)$ 电位的 Y 电极组成,其余三根电极均可省略。单极分析场中任一点电位可表达为

$$\phi(x, y, z, t) = (U - V \cos \omega t) \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \quad \left. \begin{array}{l} y \geq |x| \end{array} \right\} \quad (12-39)$$

对于检测正离子的单极质谱计来说,了解离子在 Y 方向的运动轨迹是十分重要的。参照四极滤质器 Y 方向离子运动的马蒂安微分方程式(12-39),并引入单极分析场的边界条件,可求得离子的 Y 、 Z 平面运动方程的稳定解近似式

$$y(t_0 + t) \approx g y_0 \beta^{-1} \sin \frac{\beta \omega t}{2} \sum_{s=0}^{\infty} s a_s \sin(s \omega t_0) \sum_{s=0}^{\infty} a_s \cos s \omega (t_0 + t) \quad (12-40)$$

当 $q = 0.705$ 时, $g = 2.38$ 。此方程仅在下列条件下成立

$$\omega t_0 \neq n\pi \text{ 和 } \omega t \neq 2n\pi \beta^{-1} \quad (12-41)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

式(12-40)中 $\sin \frac{\beta \omega t}{2}$ 的项代表一个“拍”,“拍”的长度仅和 β 有关,而与离子进入分析场时的初始条件无关;拍的周期为 τ_0 ,它等于 $4\pi/\beta\omega$ 或 $2/\beta$ 高频周期。由于 $|a_1| + |a_2| + \dots$ 是小于 $|a_0|$ 的,所以“拍”上叠加的高频振荡(级数的二次项)在时间 $\tau_0/2$ 以内是不会使离子穿过仪器的 Z 轴的。显然,只要满足 $y > |x|$ 和离子通过高频场的时间小于 $\tau_0/2$,并且使离子运动的振幅不超过 r_0 ,离子就能通过单极分析场。

从离子在单极分析场 X 、 Y 方向运动的稳定解范围,可得出单极质谱计的 a 、 q 稳定图,它是四极质谱计稳定区靠 Y 方向稳定边界的一条窄带(图 12-35 中的阴影部分),参见“五、四极质谱计”。

概括地讲,为了使离子能通过单极分析器,除了四极滤质器那样,要满足轨迹稳定(而且最大振幅要小于 r_0) 这个条件外,还要满足一个附加条件,即,离子在 Y 方向的运动方程的稳定解,还和在 Z 轴附近 Y 方向上的有限振幅的“拍”的长度有关,如果“拍”的长度小于分析器长度之半时,离子就无法通过分析器(如图 12-36 所示)。单极质谱计的这个特性和磁偏转质谱计的聚焦特性有类似之处,因此该仪器不称滤质器而称之为单极质谱计。

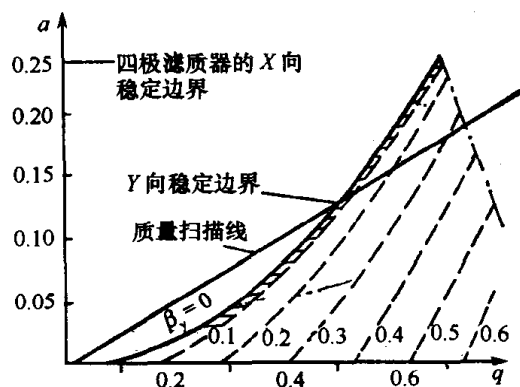
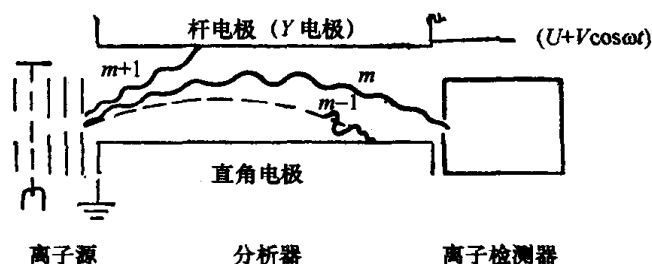


图 12-35 单极质谱计的稳定性图

图 12-36 单极质谱计 Y 方向的离子运动轨迹

和四极滤质器相比,单极质谱计的灵敏度稍低,但其结构简单、供电方便(高频功率也可节省一半);又由于单极质谱计的稳定工作区是一窄带,所以可用低斜率的质量扫描线来拓宽仪器的工作质量范围。

单极质谱计在四极滤质器问世 10 年后,由冯·察恩(Von·Zahn)发明。1965 年报道了一种在 X 、 Y 两个方向上均采用精确聚焦的理想单极质谱计。道森(Dawson)等对一般工作方式(电子扫描、离子按平行于 Z 轴的方向入射)的单极质谱计的离子轨迹作了计算。赫德森(Hudson)讨论了作为超高真空残气分析器的单极质谱计的设计参数。此外,不少文献对单极质谱计作了进一步的研究,如,道森研究了边缘场的作用;赫尔措格(Herzog)等报道了拓宽单极质谱计工作质量范围的方法。我国大连化学物理研究所、北京分析仪器厂和兰州物理研究所等单位都曾研制过这种质谱计。

(十) 三维四极离子阱

三维四极离子阱的基本工作原理和四极滤质器相仿,但在结构和性能上则具有特殊性。在这种仪器中,离子在三个坐标方向上都受振荡力的约束,使其捕集在仪器内部;在极低的压力下,离子能贮存在仪器内达数天之久。

三维四极离子阱的结构如图 12-37 所示。仪器的分析器由环形电极和上下端帽电极所组成(其中一个端帽电极上面加有离子引出电极)。由于仪器的电极系统是三个绕 Z 轴旋转对称的双曲面,故 $r_0^2 = 2z_0^2$ (r_0 为环形电极的最小半径, z_0 为两个端帽电极之间的最小距离之半)。直流电压 U 和高频电压 $V \cos \omega t$ 加在环形电极和端帽电极之间,两个端帽电极均处于地电位。

采用 r 、 Z 、 θ 圆柱坐标系时,因离子在 θ

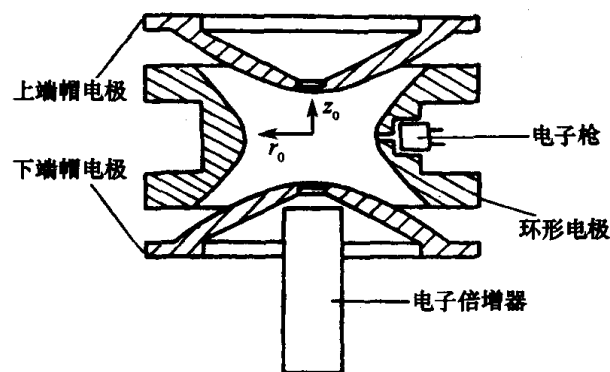


图 12-37 三维四极离子阱简图

方向不受作用力,故它在 r 、 Z 方向运动的马蒂安微分方程的一般形式可表达为

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} + (a_u - 2q_u \cos 2\xi) u = 0 \quad (12-42)$$

对于柱坐标

式中

$$\xi = \omega t / 2$$

$$a_z = -2a_r = -4eU / Mz_0^2 \omega^2$$

$$q_z = -2q_r = -2eV / mz_0^2 \omega^2$$

由于被分离的离子需要同时满足 r 与 Z 方向的轨道稳定条件,故可将两个 a 、 q 值相差负两倍的马蒂安稳定图重叠,得出三维四极离子阱的稳定图。图 12-38 是三维四极离子阱的稳定图。

这种仪器的质量扫描方式和四极滤质器相似,即在恒定的直交比下用电压或频率的扫描来获得质谱。离子的检测方法有两种:一种是离子共振感应吸收法;另一种是在引出电极上加负电压脉冲,将离子从分析器上引出再用电子倍增器检测。

三维四极离子阱的特点是,结构小巧、质量轻,能在极低的压强下长时间贮存离子来提高仪器的检测能力;但是在贮存离子的过程中,所发生的物理与化学过程是极为复杂的,从而给质谱数据的处理带来困难。

三维四极离子阱是由保罗在 1953 年发明的。费希尔(Fischer)等详细介绍了仪器的离子贮存理论。有文献报道一台用作真空残气分析的三维四极离子

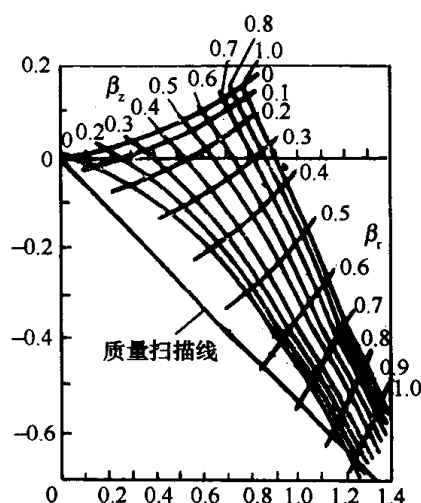


图 12-38 三维四极离子阱的稳定图

阱。在真空中包含四种气体组分的情况下,这种残气分析器可检测 10^{-11} Pa 的分压力,仪器的最大分辨本领为 300(50%峰高)。道森对仪器的结构和离子检测方法作了改进,在端帽电极上开一个小孔,用门脉冲电压将离子引入电子倍增器进行检测。在这以前,这类仪器的离子检测都采用离子共振感应技术。实验表明,在全压力为 10^{-11} Pa 时,离子在仪器中的贮存时间可达数天之久。文献[301]报道了一台灵敏度为 10^{-7} A/Pa,分辨本领为 120(50%峰高)的三维四极仪器。

早期三维四极仪器的电极都是用实心金属制成的,保罗的仪器是用黄铜制成的,后来的仪器采用不锈钢制作电极,提高了仪器的真空性能。道森和谢尔曼(Schermann)还分别用不锈钢网制作电极。道森的这台用不锈钢网制成的简易三维四极分析器,其质量只有 100g(包括十二级铍—铜电子倍增器),最小可检分压强为 10^{-10} Pa,分辨本领为 75(50%峰高)。此外,还研究了三维四极离子阱中的离子损失过程和分析器中的空间电荷效应及离子—分子反应过程。

四、真空质谱计的离子检测器

(一) 电测法离子检测器的分类

质谱仪器的离子检测,除了可用照相干板的感光度来检测外,大多采用电子学方法。电测

法又可分为:直接电测法,即,用金属电极接收离子流,再用电学方法记录离子流;二次效应电测法,即,用二次电子倍增器或光电倍增管检测由离子的二次效应所产生的二次电子或光子,再用电学方法记录离子流。

图 12-39 给出电测法离子检测器的分类。各类离子检测器按其特性有一定的使用范围。真空质谱计通常都采用法拉第筒和二次电子倍增器作为离子检测器。

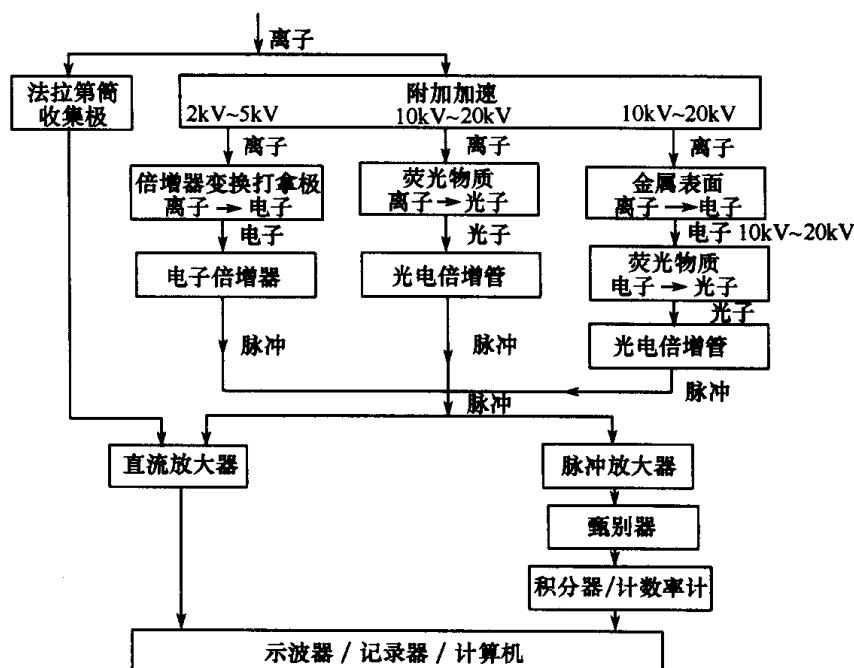


图 12-39 电测法离子检测器分类

真空质谱计对离子检测器的要求为:足够的动态检测范围;稳定性好(经曝露大气和在较大的电流负荷下,检测灵敏度保持稳定);质量歧视效应小;响应速度快;能耐 $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 的烘烤温度等。

(二) 法拉第筒

在采用法拉第筒作为离子检测器时,法拉第筒通过一个高值电阻和地电位相连,由离子流在高值电阻上产生的电压信号供给静电计放大器放大。

当从分析器上引出的离子的能量很低(例如,四极质谱计引出的离子能量一般约为 10V 左右),不足以产生二次电子发射时,可以采用简单的片状收集极或法拉第筒收集极;当被收集离子的能量较高时,为了避免因二次电子发射引起虚假离子流,在法拉第筒的前面需设置一个带负电位($-20\text{V} \sim -220\text{V}$)的抑制极和一个接地的保护环,以抑制从收集极发射的二次电子(图 12-40)。此外,为了避免二次电子逃出法拉第筒,法拉第筒应作成如图 12-41 所示的形状。

法拉第筒检测器的优点:结构简单、牢固;被检测的离子流信号是与离子数和离子的电荷量成正比的;灵敏度稳定;固有噪声水平小。缺点是:时间常数大;检测灵敏度低。

(三) 电子倍增器

电子倍增器的工作原理是基于二次电子发射的雪崩原理。常用的有三种形式:静电式分离打拿极电子倍增器,静电式连续打拿极电子倍增器和磁式电子倍增器。第一种电子倍增器

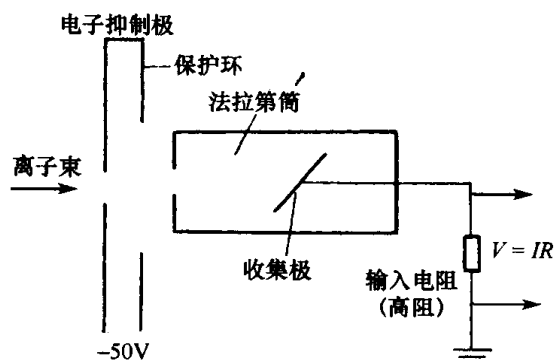


图 12-40 带抑制极的法拉第筒收集极

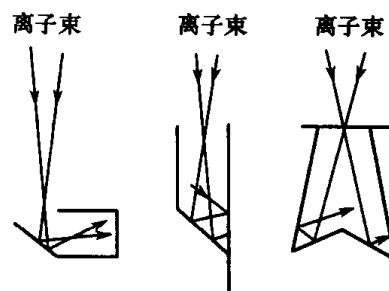


图 12-41 几种不同形状的法拉第筒

的二次电子发射体是经特殊处理的合金；第二种和第三种则大多是以玻璃或陶瓷为基底的半导体。

1. 静电式分离打拿极电子倍增器

(1) 聚焦曲面静电式分离打拿极电子倍增器

在静电式分离打拿极电子倍增器中，历时最久的是艾伦发明的聚焦曲面静电式分离打拿极电子倍增器。从图 12-42 可见，由分析器引出的离子在打到电位约为 -3000V 的第一打拿极（又称离子—电子转换极）后产生若干二次电子，这些二次电子被加速并聚焦到第二打拿极再次进行二次发射，这种过程可以重复 10 次~20 次，最后由收集极所接受。

设进入倍增器的离子流为 I^+ ，第一打拿极的离子—电子转换效率为 λ ，其余打拿极的二次电子发射系数为 σ ，倍增器的级数为 n ，则到达收集极的电子流可表达为

$$I_c = I^+ \lambda \sigma^n \quad (12-43)$$

倍增器的增益为

$$G = \frac{I_c}{I^+} = \lambda \sigma^n \quad (12-44)$$

对于 $n = 10$ 级~20 级的倍增器，通常可获得 $10^5 \sim 10^8$ 的增益。

通常第一打拿极的材料为镍，其余打拿极的材料一般为铍—铜（含铍量约 2%）、银—镁（含镁量约 2%~4%）、铝—镁（含镁量约 4%~5%）等。

用这些材料制成的打拿极，在暴露大气（特别是潮湿空气）或经碳氢化合物沾污后，其二次电子发射系数会有较大的衰减。贮存时应将它置真空或非化学活性气氛中，也可将它浸泡在隔绝潮湿空气的酒精中。为便于校核倍增器的增益，有些产品的第一打拿极是单独引出的，可用来直接测量离子流或校核倍增器的增益。

图 12-43 给出了国产电子倍增器的增益和工作电压间的关系曲线。

(2) 盒—栅静电式分离打拿极电子倍增器

图 12-44 为盒—栅式倍增器的结构图。它的优点是，结构牢固、紧凑，在烘烤温度下不易变形。我国华东电子管厂生产一种十六级的盒—栅式倍增器，工作电压 3000V 时，增益为 $10^6 \sim 10^7$ 。

(3) 百叶窗静电式分离打拿极电子倍增器

分离打拿极电子倍增器的另一种形式是百叶窗式倍增器（图 12-45），这种倍增器对二次电子的聚焦要求不严格，弥散磁场对它的影响也不大。它的特点是：结构更为紧凑、长度较短；它可以检测截面积较大的离子束，输出电流可达数毫安。

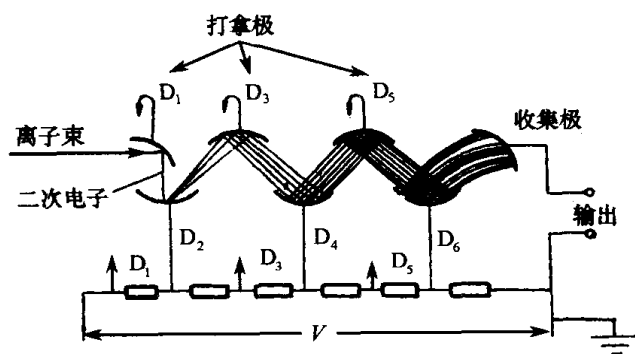


图 12-42 聚焦曲面静电式分离打拿极电子倍增器

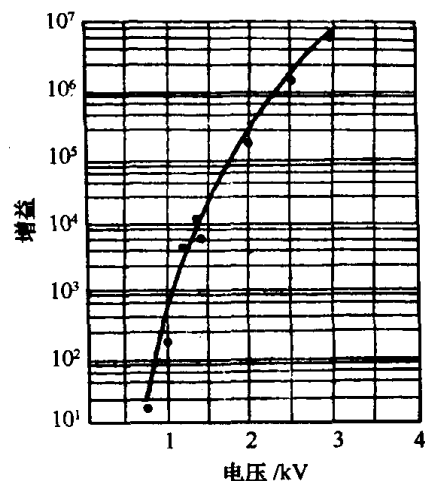


图 12-43 一种国产聚焦曲面倍增器的增益—电压曲线

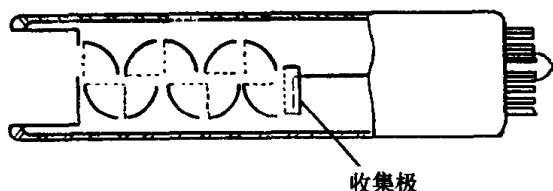


图 12-44 盒—栅静电式分离打拿极电子倍增器

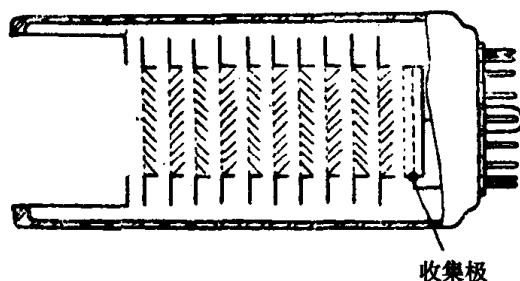


图 12-45 百叶窗静电式分离打拿极电子倍增器

(4) 聚焦网静电式分离打拿极电子倍增器

最新的静电式分离打拿极电子倍增器是所谓聚焦网倍增器(图 12-46)。这种倍增器的打拿极由数百个二次电子发射单元所组成。打拿极上的小孔是二次电子的通路，好多片打拿极是重叠安装的，安装时每个电子发射单元要和上一个打拿极上的小孔对准。除第一打拿极外，所有打拿极的上方都加一块防护板，从结构和电位分布上保证二次电子有良好的聚焦作用。

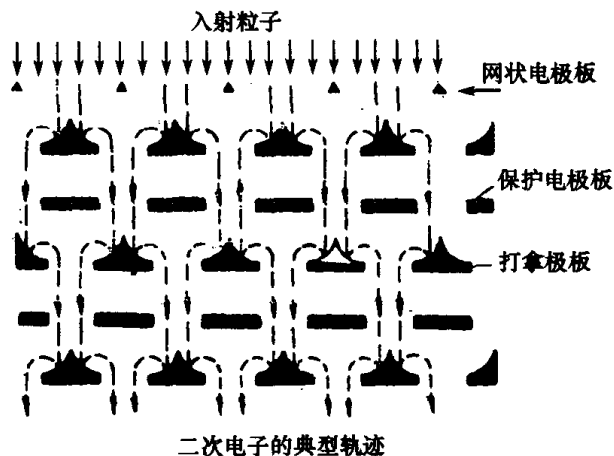


图 12-46 聚焦网静电式分离打拿极电子倍增器

这种倍增器的优点是,增益高(二十级的聚焦网式倍增器的增益是,2500V 时为 10^6 , 3000V 时为 10^8 , 3700V 时为 10^9),入射孔径大(直径约为 32mm),长度短(约为 34mm),输出电流大。缺点是:工艺复杂,成本高。

2. 静电式连续打拿极电子倍增器

(1) 管形静电式连续打拿极电子倍增器

图 12-47 所示的管形电子倍增器是由一根直径约为 1mm、长度与直径之比为 50~100 的高铅玻璃毛细管制成。毛细管内表面经激活后,是一层具有高二次电子发射系数的 N 型铅半导体电阻膜。这种倍增器的喇叭形入口端接 -3000V 高压,另一端则处于地电位。当离子射入入口端以后,在喇叭口部位产生离子-电子二次发射,这些二次电子在电场的作用下,向接地端逐次进行倍增,最终由收集极所接收。

这种倍增器在脉冲计数工作方式下的增益为 $10^7 \sim 10^8$;直流工作状态的增益约为 $10^4 \sim 10^5$ 。

当倍增器工作在高增益情况时,管内的二次电子会引起残余气体的电离,所生成的离子在电场中会产生反馈现象,从而干扰电子的倍增过程。为避免这种现象,可将毛细管做成螺旋状或弹簧状,以降低离子的能量,来减小离子的二次电子发射效应。

管形倍增器的优点是:结构小巧,增益较高,而且允许曝露于大气,也不需要分压电阻。缺点是:离子入口孔小(喇叭口的直径一般为 8mm 左右),输出电流较小(约为 μA 数量级,当输出电流增加到传导电流的 1% 以上时,输出电流逐渐呈现非线性)。

我国研制的管形倍增器的性能,其主要指标达到国外同类产品的先进水平(参见第十一章)。

(2) 平板静电式连续打拿极电子倍增器

图 12-48 为平板倍增器的结构和增益特性。倍增器的上下极板均为打拿极,电极两端加

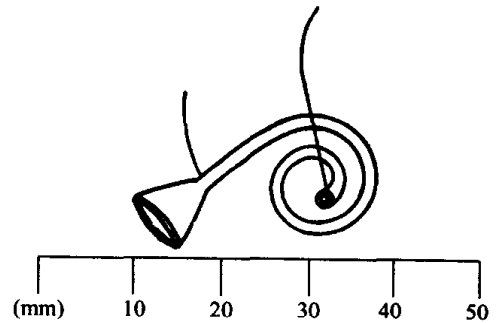
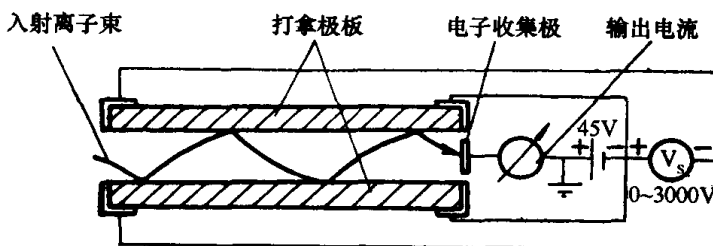
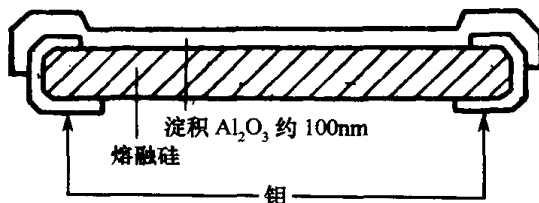


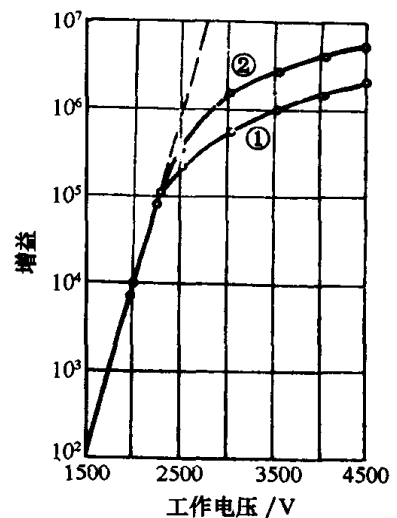
图 12-47 管形静电式连续打拿极电子倍增器



(a)



(b)



(c)

图 12-48 平板静电式连续打拿极电子倍增器结构与特性

(a)原理图;(b)打拿极结构图;(c)增益特性。

1—输入束流为 $3 \times 10^{-13}\text{A}$; 2— $1 \times 10^{-13}\text{A}$, 打拿极电阻为 $10^9\Omega$ 。

以 3000V 的直流电压, 二次电子从电场中取得能量后不断打击上下打拿极, 使电子不断倍增, 最终由收集极接收。

3. 磁式电子倍增器

(1) 磁式分离打拿极电子倍增器

磁式分离打拿极电子倍增器的结构如图 12-49 所示。在正交直流电磁场中, 二次电子按摆线轨迹在 L 形平板电极上逐次进行倍增, 最终由收集极接收。倍增器的打拿极通常用铍—铜合金制成, 级数在 15 级左右, 磁场强度为 $10^{-2}\text{T} \sim 0.1\text{T}$ 。这种倍增器的上升时间仅为 $10^{-10}\text{s} \sim 10^{-11}\text{s}$ (静电式倍增器的上升时间约为 10^{-9}s 数量级), 因此适用于快速测量。

(2) 磁式连续打拿极电子倍增器

这种倍增器是由美国本迪克公司作为其飞行时间质谱计的专用离子检测器而发展起来的, 图 12-50 为其示意图。

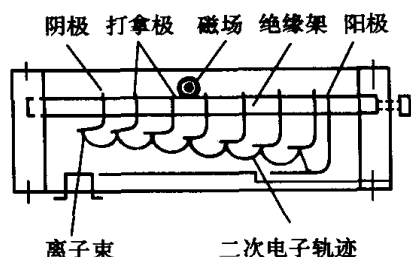


图 12-49 磁式分离打拿极电子倍增器

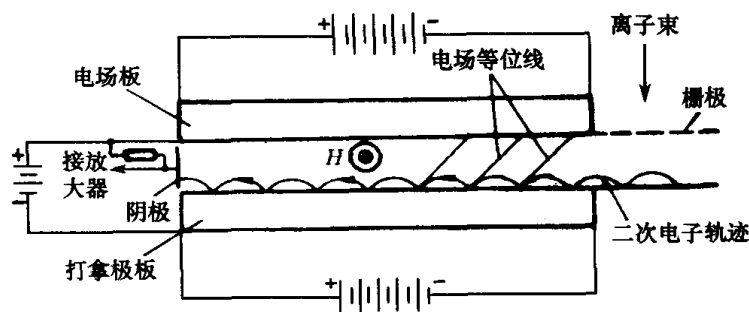


图 12-50 磁式连续打拿极电子倍增器

倍增器由电场板和打拿极板组成, 电场的方向和磁场相垂直, 两块极板的材料相同, 可以是 N 型铅半导体, 也可以是硅半导体等材料, 极板两端施加直流高压, 并给予一定的电位差。当离子射到阴极后便产生二次电子发射, 二次电子在电磁场的作用下按摆线轨迹不断倍增, 最终由收集极所接收。

这种倍增器的尺寸较小, 典型尺寸为 $18\text{mm} \times 20\text{mm} \times 64\text{mm}$, 磁场强度为 $3 \times 10^{-2}\text{T}$, 增益为 10^7 , 等效阴极暗电流为 10^{-21}A 数量级, 频带宽度为 $0 \sim 500\text{MHz}$ 。由于它的响应速度很快, 而且可以将几个这样的倍增器平行排列用于多路输出, 所以特别适宜于飞行时间质谱计的离子检测。

4. 电子倍增器的质量歧视效应

电子倍增器的一个固有特性是, 增益是第一打拿极相撞的离子的特性的函数, 因而也会造成质谱计的质量歧视, 这对绝对丰度测量来说是个严重的缺点。图 12-51 给出单电荷惰性气体离子的速度和倍增器增益间的关系。可以看到, 第一打拿极的二次电子发射系数是离子能量的函数, 在较小的离子能量下近似呈线性关系。在相同的离子能量下, 对于 m/e 为 40 的离子, 增益和 $m^{1/2}$ 成比例; 对于 m/e 为 20 的离子, 增益和 m 成比例; m/e 介乎上述二者之间时, 比例关系略有变化。当离子能量相同时, 增益随离子的原子数而增加。此外, X^+ 的离子的增益要比 X^{2+} 为大。

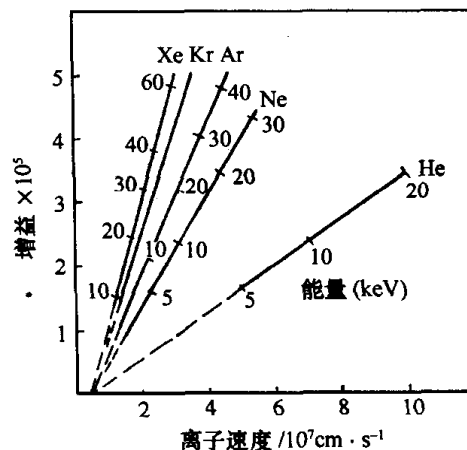


图 12-51 单电荷惰性气体离子的速度和倍增器增益间的关系

五、四极质谱计

(一) 基本原理

四极质谱计(四极滤质器)是根据不同质荷比的离子在直流—高频四极分析场中运动轨迹的稳定与否来实现质量分离的。其原理如图 12-52 所示。它由四根平行、对称放置的双曲面电极构成(图中以圆杆电极来近似代替双曲面电极),四根电极成对相连,加以直流—高频叠加电压

$$\Phi = U - V \cos \omega t \quad (12-45)$$

式中 U ——直流电压;

V ——高频电压幅值;

ω ——高频电压角频率 ($\omega = 2\pi f$)。

这样,在分析器内部就产生一个双曲面形式的电位分布

$$\phi(x, y, z, t) = (U - V \cos \omega t) \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \quad (12-46)$$

式中 r_0 ——双曲面电极的内切圆半径(简称场半径)。

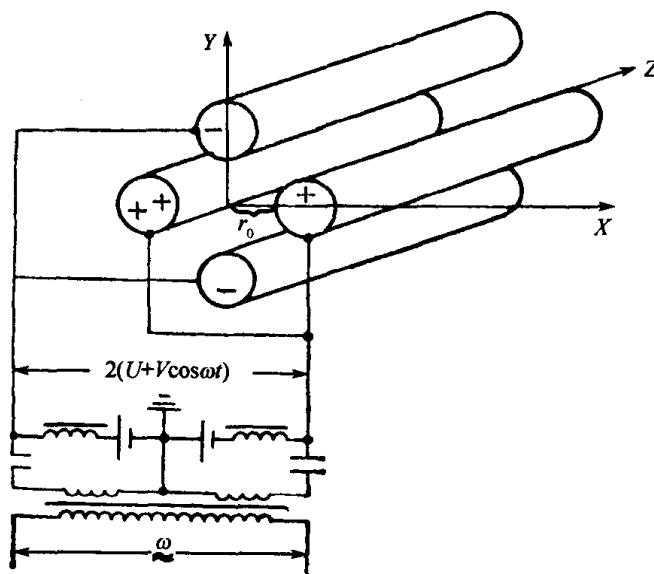


图 12-52 四极质谱计原理图

当质荷比为 m/e 的离子沿 Z 轴(分析场的场轴)进入分析场时,离子的运动方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{2e}{mr_0^2} (U - V \cos \omega t) x &= 0 \\ \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{2e}{mr_0^2} (U - V \cos \omega t) y &= 0 \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12-47)$$

式(12-47)表明,离子在 Z 方向作匀速运动,在 X 、 Y 方向的运动方程则是马蒂安微分方程。为了将其化成标准形式的马蒂安微分方程,采用以下变换

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{\omega t}{2} \\ a &= \frac{8eU}{mr_0^2 \omega^2} \\ q &= \frac{4eV}{mr_0^2 \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (12-48)$$

离子运动方程可以写成标准的马蒂安微分方程

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} + (a + 2q \cos 2\xi)u = 0 \quad (12-49)$$

为了解离子在四极场中的运动,就需要解马蒂安微分方程。该方程的通解为

$$u = a' e^{\mu\xi} \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s} e^{2is\xi} + a'' e^{-\mu\xi} \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s} e^{-2is\xi} \quad (12-50)$$

式中的 a' 和 a'' 是和初始条件 u_0, \dot{u}_0 和 ξ_0 有关的积分常数。常数 C_{2s} 仅取决于 a, q 值,而与初始条件无关。由此可看出,马蒂安微分方程的重要特点是,解中的常数 μ 决定了解的类型,即解的稳定与否。而 μ 值又单值地取决于 a, q 值,即取决于四极质谱计的分析场参数,而与初始条件无关。在给定的 μ 值下,当 $\xi \rightarrow \infty, u$ 为有限,这时的解为稳定解,当 $\xi \rightarrow \infty, u$ 值趋于无限,这时的解为不稳定解。

不同的 μ 值有以下四种情形:

- ① 当 μ 值为不等于零的实数时, $e^{\mu\xi}$ 和 $e^{-\mu\xi}$ 均会引起解的不稳定。
- ② 当 μ 为等于 $i\beta$ 的纯虚数,且 $0 < \beta < 1$ 时,解为周期性的稳定解。
- ③ 当 μ 值为复数时,除 u_0, \dot{u}_0 为零时的解是稳定的外,其余的解均为不稳定解。
- ④ 当 μ 值为纯虚数 in ,且 n 为整数时,解是不稳定的。

稳定离子的轨迹可以从 $\mu = i\beta, 0 < \beta < 1$ 时的稳定解求得

$$u = a' \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s} \cos\left(s + \frac{\beta}{2}\right)\omega t + a'' \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s} \sin\left(s + \frac{\beta}{2}\right)\omega t \quad (12-51)$$

它由许多不同频的正弦和余弦运动叠加而成。式中的 β 表征了离子的运动频率。由于具有相同荷质比的离子的 a, q 值是相同的,因此解中的 C_{2s} 和 β 值也相同,即解的频谱相同。

由解可得离子运动的基频频率为

$$\omega_0 = \frac{\beta}{2} \omega$$

较高次的谐波频率为

$$\omega_1 = \left(1 + \frac{\beta}{2}\right)\omega \quad \omega_2 = \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)\omega$$

解中的 C_{2s} 表征了每一不同频率成分的系数。

表 12-2 给出了 $q = \pm 0.705, \beta_y = 0, 0.02, 0.04, 0.08$ 和 $\beta_x = 1, 0.98, 0.96, 0.92$ 时, C_0 为 1 时的 C_{2s} 值。

表 12-2 在稳定区内, β_x, β_y 分别在 0 和 1 附近时的 C_{2s} 值

q_y	β_y	C_0	C_{-2}	C_2	C_{-4}	C_4	C_{-6}	C_6
0.705	0.00	1.0	-0.16736	-0.16763	0.00729	0.00729	-0.00014	-0.00014
	0.02		-0.17089	-0.16449	0.00750	0.00708	-0.00015	-0.00014
	0.04		-0.17427	-0.16145	0.00773	0.00688	-0.00015	-0.00013
	0.08		-0.18143	-0.15569	0.00821	0.00651	-0.00016	-0.00012
q_x	β_x	C_0	C_{-2}	C_2	C_{-4}	C_4	C_{-6}	C_6
-0.705	0.92	1.0	0.79504	0.08515	0.06065	0.00254	0.00167	0.00004
	0.96		0.89098	0.08288	0.06990	0.00240	0.00196	0.00004
	0.98		0.94383	0.08176	0.07508	0.00235	0.00212	0.00003
	1.00		1.00000	0.08065	0.08065	0.00230	0.00230	0.00003

从表中数据可看出,离子在 Y 方向上的运动以基频为主,在 X 方向的运动则以基频和一次谐波为主。图 12-53(a) 和 (b) 分别给出 $\beta_y = 0.05$ ($a_y = -0.233982, q_y = -0.704396$), 和 $\beta_x = 0.95$ ($a_x = +0.233982, q_x = +0.704396$) 时 Y 和 X 方向的稳定离子运动轨迹。

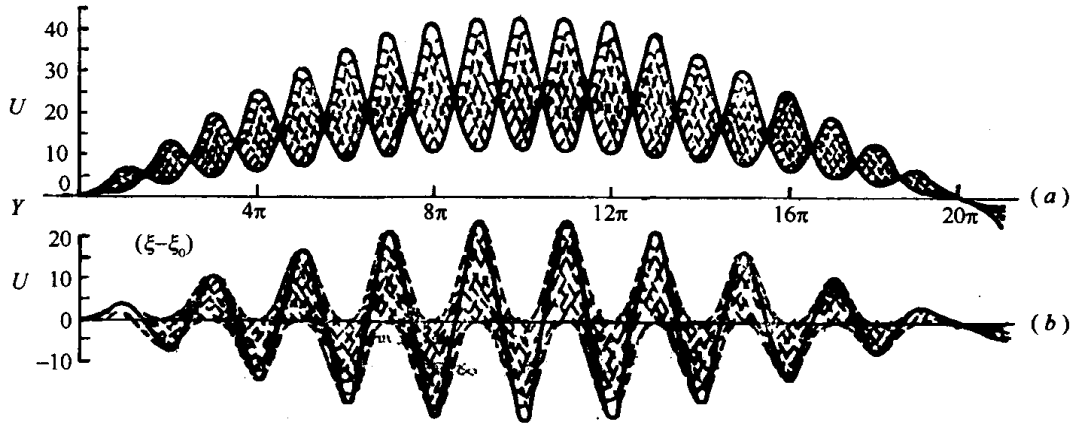


图 12-53 不同相位入射的离子轨迹

从图中可以看出, Y 方向的运动是以基频为主, X 方向的运动是以基频和一次谐波的差额为主。从马蒂安微分方程的解中,还可以得出稳定离子运动的最大振幅

$$|u_M| = \sqrt{a'^2 + a''^2} \sum_{-\infty}^{\infty} |C_{2s}| \quad (12-52)$$

再从 a' 和 a'' 与初始条件的关系求得稳定离子轨迹的最大振幅和初始条件间的关系式

$$|u_M| = \frac{1}{W} \sum_{-\infty}^{\infty} |C_{2s}| \sqrt{[u_0 \dot{u}'(\xi_0) - \dot{u}_0 u''(\xi_0)]^2 + [\dot{u}_0 u'(\xi_0) u_0 \dot{u}'(\xi_0)]^2} \quad (12-53)$$

式中 W 为 Wronskian 行列式,它与 ξ_0 无关;当 ξ_0 一定时, $u'(\xi_0)$ 、 $u''(\xi_0)$ 、 $\dot{u}'(\xi_0)$ 、 $\dot{u}''(\xi_0)$ 均为常数。

在 a 、 q 值和 r_0 一定的条件下,以不同相位 ξ_0 入射的离子只有一部分能通过四极场。只有初始位移和初始速度满足在图 12-54 中椭圆族公共区的离子才可能通过四极场。

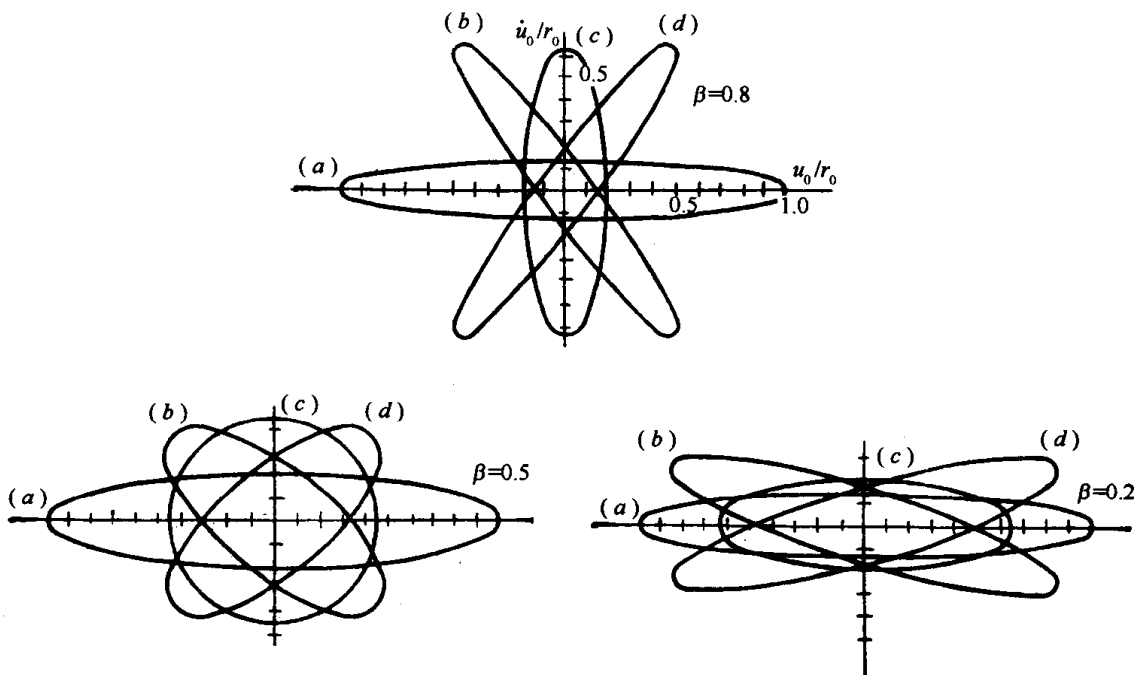


图 12-54 不同相位和 β 下分析场接入射离子的能力

(二) 稳定图与质量扫描线

马蒂安微分方程解的稳定与否仅取决于 a 、 q 值, 因此可以将稳定解对应的 a 、 q 值用平面坐标图加以描绘。通常四极质谱计选用参数的 a 、 q 值是处于靠近原点的稳定区域(图 12-55)。图中稳定三角形内的 a 、 q 值所对应的 μ 值均为纯虚数 $i\beta$; β 单值地取决于 a 、 q 值。将 β 值的点连接起来的线叫等 β 线。只有 a 、 q 值处于三角形内的离子运动轨迹才是稳定的。

稳定三角形的左边界是 Y 方向稳定边界, 右边界为稳定三角形的 X 方向稳定边界。边界方程的展开为

$$a = 1 - q - \frac{1}{8}q^2 + \frac{1}{64}q^3 - \frac{1}{1536}q^4 - \dots \quad X \text{ 向} \quad (12-54)$$

$$a = -\frac{1}{2}q^2 + \frac{7}{128}q^4 - \frac{29}{2304}q^6 + \dots \quad Y \text{ 向} \quad (12-55)$$

顶点坐标为: $a = 0.23699$, $q = 0.70600$ 。

从公式(12-48)看出, a 、 q 值和高频电压幅值 V 、直流电压 U 、高频电压角频率 ω 、场半径 r_0 及离子的质荷比 m/e 有关。四极质谱计的仪器设计, 是固定场半径 r_0 和高频电压角频率 ω 。因此对于一定的质荷比为 m/e 的离子的 a 、 q 值仅和高频电压幅值 V 、直流电压 U 有关。

多数四极质谱计仪器是将直流电压和高频电压幅值的比(直交比)维持恒定, 用扫描高频电压(同时也扫描直流电压)的方法进行质量扫描。当直交比恒定时, 对应在稳定图上, 通过坐标原点, 斜率为 $a/q = 2U/V$ 的直线称为质量扫描线。在某一电压值下, 不同质荷比离子的 a 、 q 值都落在这条线上。质荷比小的离子 a 、 q 值离坐标原点较远, 质荷比大的离子 a 、 q 值离坐标原点较近。当分析场的电压由小到大进行扫描时, 处于扫描线上不同质荷比离子的 a 、 q 值, 也由小到大顺次通过稳定区。于是, 在分析场出口端的离子检测器上, 连续收集到不同质荷比的离子, 记录下整个质谱。

从稳定图可以看出, 质量扫描线的斜率愈大, 它与稳定三角形相截部分愈短, 能够通过分析场的离子群的质量宽度愈小, 因而分辨本领也愈高。从理论上讲, 当质量扫描线和稳定三角形顶点相交时, 分辨本领可趋于无穷大, 而此时离子传输率却趋于零。

(三) 仪器基本参数之间的关系

当分辨质量数为 M 的单电荷离子时, 对应于稳定区顶点的高频电压幅值和直流电压的数值为

$$V = 7.219Mf^2r_0^2 \quad (12-56)$$

$$U = 1.212Mf^2r_0^2 \quad (12-57)$$

式中 V ——高频电压幅值[V];
 U ——直流电压[V];
 M ——离子质量[u];
 f ——高频电压频率[MHz];

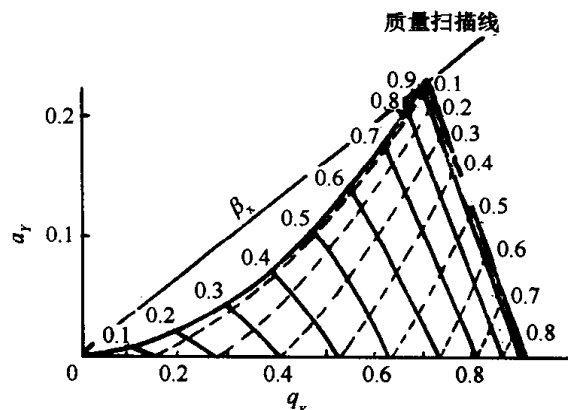


图 12-55 一维马蒂安微分方程解的近原点稳定图

r_0 ——分析场半径[cm]。

分析场所需高频功率为

$$P = 6.5 \times 10^{-4} \frac{CM^2 f^5 r_0^4}{Q} \quad (12-58)$$

式中 P ——高频功率[W];

C ——高频输出级的电容[pF];

Q ——高频输出级槽路的品质因数。

离子传输率为 100% 时,分析场的入口孔径为

$$D \approx \frac{r_0}{\left(\frac{M}{\Delta M}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (12-59)$$

式中 D ——入口孔直径[cm];

$\frac{M}{\Delta M}$ ——分辨本领, ΔM 为半峰高的峰宽。

离子传输率为 100% 时,离子轴向能量的最大值和分辨本领的关系为

$$U_{i\text{最大}} \approx \frac{4.2 \times 10^2 f^2 L^2 M}{\frac{M}{\Delta M}} \quad (12-60)$$

式中 $U_{i\text{最大}}$ ——离子轴向能量的最大值[V];

L ——分析场长度[m]。

与式(12-60) 相应,离子通过分析场时所经历的高频周期数与分辨本领的关系

$$n \approx 3.5 \left(\frac{M}{\Delta M}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12-61)$$

式中 n ——离子通过分析场时所经历的高频周期数。

(四) 仪器工作模式及质谱扫描

1. 模拟峰质量扫描

高频电压采用连续、随意选择和在一定选定点左右连续扫描三种不同形式。加到杆系上的电压值为连续增加变化模拟量。对应可以得到在全质量范围内的全谱、在某一段范围内的质谱和检测某一固定质量数的谱。

模拟峰扫描可为研究四极质谱计性能提供重要信息,仪器分辨本领测量、峰形畸变、离子源参数是否选择合理、污染程度等都可以通过模拟峰进行判别,为仪器最佳参数选择提供依据。

2. 棒峰扫描

施加在分析杆上高频电压为“跳跃”式扫描电压,对应于施加的电压值,属于稳定的质量数的离子流被收集并作为峰高处理,以棒的形式记录下来。该扫描方式的优点是:直观,特别在分辨本领较低时,可直接根据棒所处的质量坐标分析气体成分。

棒峰扫描要求峰位非常稳定,否则,施加的高频电压可能不在峰顶而在峰的两边,而测量

的数值不准。此外,快速扫描可能使施加的高频电压变形,有可能使一些小峰测量不到。

3. 多离子检测模式

多离子检测适用于对系统中某几种组分进行检测,使用者可根据自己研究目的,选择关心几种组分,研究其随时间变化趋势。如真空材料出气过程分析、系统抽气过程中,各组分的变化趋势分析、工业流程在线的真空质谱计对控制气体组分的监测等。

多离子检测的质量扫描采用“跳扫”模式,根据要求,预先设定被检测的组分及检测该组分的工作参数,仪器只对这几种组分进行检测并在计算机屏幕上显示峰强(或浓度)的走势曲线。不同质谱计给出的参数设置表不同,但应包括:通道、质量数、质量范围、离子接收模式(法拉第或倍增器)、扫描速度、静电计量程等。

(五) 四极质谱计特性

1. 分辨本领

影响质谱计分辨本领及峰形因素包括:

① 四极杆系结构及加工安装精度。四极杆长 L 的增加,使离子在四极场经历足够多的高频周期数,得到充分分离。因此可提高仪器的分辨本领。

从对公式(12-48)中的 a 全微分后可以得到 $\Delta M/M = 2\Delta r_0/r_0$ 关系式。因此,高精度的杆系加工和装配,可确保高分辨本领的获得。

② 高频电压频率高,增加离子在四极场经历高频周期数,可提高分辨本领。

③ 离子源入口条件。选用尼尔型电子碰撞离子源,具有最小的离子能量分散,可获得高分辨本领。离子源入口孔径应限制在一定范围内,确保高分辨本领的获得。此外,离子源装配及离子引入和四极场同轴度的精度影响分辨本领和峰形。

④ 调节质量扫描线斜率,即增加 U/V 的比值。从稳定三角形看出,随着质量扫描线斜率增加,扫描线通过三角形的区域 Δq 减小,因此处于 Δq 的对应质量数为 ΔM 的稳定的离子也减小,分辨本领 $M/\Delta M$ 增加。理论上扫描线的斜率为 $a/q = 0.16784$ 。分辨本领趋向无穷,但在实际仪器参数调节时,过于增加斜率,可导致灵敏度迅速下降和峰形畸变。因此利用调节质量扫描线斜率的方法提高分辨本领,只能根据不同仪器进行折衷选择,并通过实验确定最佳参数。

⑤ 离子引入能量的选择。离子引入能量低,可增加离子在分析场经历的高频周期数,达到提高分辨本领的目的,但同时灵敏度下降。

2. 峰形

四极质谱计的峰形通常为三角形,在一些高性能仪器中,在分辨本领不高的条件下,可以为圆顶峰。为了对峰形加以限制,引用峰形系数。峰形系数定义为一个峰的 50% 峰高处的 $\Delta M_{50\%}$ 和 10% 峰高处的 $\Delta M_{10\%}$ 的比。正常的峰形系数不大于 2.08。畸变的峰形有:

(1) 所谓“电视塔”形峰

该峰的主要特点是峰的底部很宽,峰的前沿和后沿均出现严重的拖尾。造成这种峰形的主要原因是离子能量和质量扫描斜率参数选择不当。离子能量大小主要影响峰的前沿。离子能量选择过大,使峰的拖尾增加,而质量扫描斜率增加并不能改变拖尾,如果不恰当地增加质量扫描斜率,使峰的底部拖尾很大而峰的上部很窄,出现“电视塔”形峰。在质谱计性能调试时,折衷的选择离子能量和质量扫描斜率参数,可以同时得到高的分辨本领和好的峰形。

此外,扫描速度过快,而静电计或记录仪的响应时间较大跟不上扫速,可能导致峰的后沿

拖尾,因此在静电计量程和记录仪选定后,应选择适当的扫描速度,才能获得好的质谱峰形。

(2)“前驱峰”和峰的分裂

图 12-56 为前驱峰。是指在每个峰的前沿均有一个小峰伴随,该小峰并不是系统中具有的成分,而是由于峰在前沿部分的分裂而造成的。峰的分裂是在峰顶部出现一个或多个峰。

造成前驱峰和峰的分裂主要原因来自:四极杆系加工的误差、离子源入口条件变坏和污染。由于圆形杆代替理想的双曲面杆电极产生的误差,在稳定三角形内形成了共振线,当质量扫描线斜率较高时,质量扫描线总要通过一条和 $\beta_y = 0$ 很靠近的共振线,因此在质量峰的前沿出现前驱峰。在低分辨的条件下,质量扫描线可能通过两条或三条共振线,因此可能出现峰的几个裂缝。另外,四极杆系加工及四极杆系安装的误差,也会导致峰的畸变。

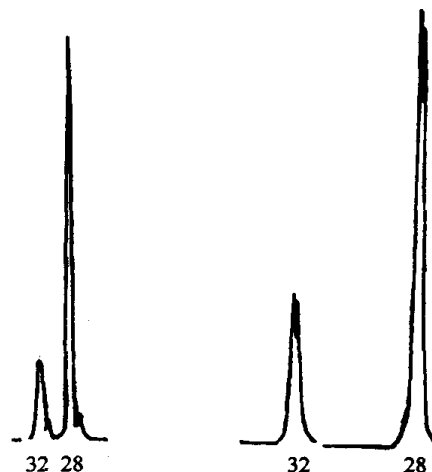


图 12-56 几种畸变的质谱峰形

实验表明,离子源安装精度,特别是离子入口的方向和四极场轴向偏离很大,使离子入口条件恶化,也将产生峰的分裂。离子源工作参数选择不合理,离子能量选过大,也会使离子入口条件恶化产生峰的分裂。

仪器长期使用,在离子源和四极杆的离子入口端产生一层绝缘污染膜,由于在污染膜上的电荷积累改变了离子入口条件而导致峰形畸变。

当使用仪器出现上述峰形畸变时,操作者可以通过调整仪器工作参数使峰形畸变得到改善:

① 适当改变质量扫描线的斜率(U/V 比),使扫描线尽量避开由于误差带来的共振线,消除前驱峰。实验中可改变 U/V 比,记录峰形,找到最佳的 U/V 比值,使峰形畸变最小;

② 调节离子源工作参数,选择较低的离子引入能量,改善峰形畸变;

③ 根据离子在四极场运动轨迹计算,要求施加负直流电压的一对电极(Y 方向)的精度比施加正直流电压的一对电极(X 方向)要高。因此,操作者可以通过交换加在高频电压方法得到较小畸变的峰形。

3. 灵敏度

四极质谱计的灵敏度通常由三个因素组成:离子源的灵敏度、四极场的传输率、离子收集效率。

① 离子源灵敏度和离子源结构、各级电压选择有关。通常四极质谱计选用的离子源有高离子产额的电子振荡型离子源(如 B-A 型离子源、斜向源)、轴向源和小能量分散的尼尔型横向离子源。操作者在使用仪器时,通过调整电压参数,获得较高的离子输出

② 四极场传输率。传输率和分辨本领及四极杆系结构之间的关系可以从图 12-57 看出,在低分辨本领下传输率和分辨本领基本无关,此时峰形呈平顶峰或圆顶峰,此时四极场的传输率可视为达到 100%。随着分辨本领增加,传输率下降,峰形呈三角形。另外,从图中还可看出,对于一定的分辨 ΔM 要求下,质量数大的离子传输率小。因此,为了能够保证大质量数的离子具有足够的传输率和一定的分辨,必须选择大的场半径(r_0),使 r_0/R_0 为较大数值。

③ 离子收集及离子信号的放大和记录。法拉第筒离子收集,通常接收效率近似为 1,只有

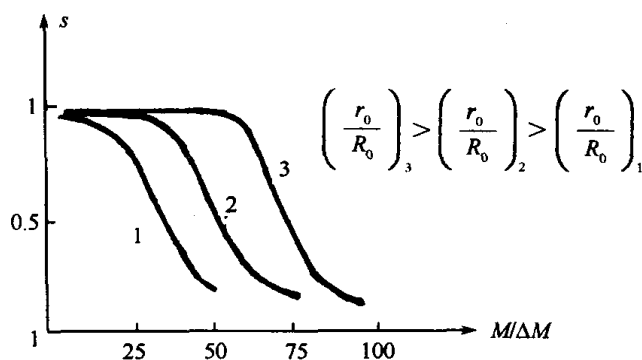


图 12-57 离子传输率和分辨本领关系

选用电子倍增器为离子收集时,可将离子通过转换为电子,经多级倍增后将信号放大。但在使用倍增器时应该考虑到,倍增器增益和离子质量、输出电流有关,并随使用时间增加而增益衰减。

4. 积分谱及总压力测量

四极质谱计的积分谱特性可以用于系统的总压力测量。从图 12-55 的稳定图可看出,当加在杆系上的直流电压为零时,质量扫描线和 q 轴重合。当加在杆电极上的电压很小,保证 $M = 1$ 离子的 q 值小于 0.9 时,则全部质量离子的 a 、 q 值均处在稳定区内,并通过分析场被收集。收集的离子流可视为全电流,它可作为总压力测量的信号。但由于四极质谱计的入口条件的限制,利用积分谱进行总压力测量的精度要比采用总压规测量差。

5. 污染

仪器长期使用,四极探头的污染是不可避免的。污染源主要来自两个方面:真空系统油污染、被分析样品的污染。在一般的高真空系统中,油污染是经常遇到的,如油扩散泵真空系统、涡轮泵系统,即使一些无油系统,利用质谱计进行残余气体分析,我们总可以记录到油的谱峰。此外,样品的分析,特别是强氧化的气体如含氧成分的分析,又加速了污染速度。

污染主要产生在离子源部位,在离子源的电极表面上可以看到一层不同厚度的膜,在自然光的照射下,这层膜会呈现不同颜色。对四极杆的污染主要出现在靠近离子入口的杆电极表面上。严重污染时,用放大镜观察,四极杆表面会有离子斑存在。污染对四极质谱计性能影响很大,污染严重时,使仪器无法工作。

① 污染对离子谱图形系数影响。由于污染使质量数大的离子传输率显著下降,因此改变了离子谱图形系数。例如,在一个油扩散泵真空系统中,利用质谱计测量空气中谱,计算 $N_2^+(M = 28)$ 和其二次峰 $N_2^{2+}(M = 14)$, 图形系数 $k = I_{14}/I_{28}$ 。实验表明,无污染(新探头)时, $k = 0.05$, 在仪器工作参数不变的条件下,仪器连续工作 5h 后 $k = 0.20$ 。随工作时间增加, k 也增加。严重时 $k > 1$, 就是说二次峰大于主峰。

② 污染对灵敏度影响。由于污染,电极表面的电荷积累,改变了离子源内的电位分布,使离子源的灵敏度下降。因此质谱计的灵敏度显著下降,污染严重时几乎检测不到信号。

③ 导致峰形畸变。为了防止四极质谱计的污染,真空系统最好选用无油系统。对已经轻度污染的质谱计,使用时可合理调节离子源工作参数或适当降低灯丝发射电流,可使仪器性能得到一定改善,测量结果比较满意。当出现严重污染时,必须对质谱探头进行清洗,彻底清除污染膜。

(六) 四极质谱计基本参数设计

1. 基本参数和仪器性能之间关系

(1) 四极杆半径 $r_{\text{杆}}$ 、杆长度 L 、安装形式及装配精度

杆半径 $r_{\text{杆}}$ 和场半径 r_0 的关系为: $r_{\text{杆}}/r_0 = 1.148$ 。杆半径 $r_{\text{杆}}$ 增加可提高离子传输率, 特别对大质量数的离子具有高的传输效率。但杆半径 $r_{\text{杆}}$ 增加, 必须按 2 次方增加高频电压幅值和 4 次方增加高频功率。

四极杆长 L 越长, 离子在四极场经历高频周期数越多, 分辨本领也越高。但 L 的增加, 使四极探头体积过大。此外杆加工和安装精度要求限制 L 的长度。

(2) 高频电压要求

提高高频电压频率 f , 可以提高分辨本领, 但对一定质量范围要求, 必须按 2 次方增加高频电压幅值和 5 次方增加高频功率 P 。显然不可能任意增加高频频率。此外, 高频电压必须为正弦波, 不允许其它谐波或有微小的波形调整, 否则将使分辨本领变坏。在进行“跳扫”模式时, 要求高频振荡和扫描调制波线性相随。

(3) 离子收集

四极质谱计离子收集通常采用法拉第筒和电子倍增器两种方式: 法拉第筒接收可使离子流稳定, 可以在最小可检分压力 10^{-8}Pa 时采用。电子倍增器可提高灵敏度, 当仪器最小可检分压力小于 10^{-8}Pa 时, 应采用倍增器收集。倍增器偏轴安装可降低噪声, 提高最小可检分压力。

2. 基本参数设计一般步骤

四极质谱计基本参数设计依据仪器指标要求, 根据加工条件和电子元器件进行折衷设计。以真空测量用的小型四极质谱计为例, 设计指标设定为: 质量范围 $1\text{u} \sim 50\text{u}$; 分辨本领为 $M/\Delta M = 50$; 最小可检分压力为 10^{-9}Pa ; 响应时间为 0.1s 。

(1) 高频频率及杆长度的计算

按公式(12-62) 计算, 离子在高频场经历的高频周期数应为

$$n \approx 3.5 \sqrt{\frac{M}{\Delta M}} = 25 \quad (12-62)$$

离子在四极场轴向运动为匀速运动, 其速度是由离子的初速度 v_0 决定的。 n 是由三个因素——高频电压频率 f 、离子进入分析场的能量 U_i 和分析场的长度 L 决定的, 其关系可表达为

$$n = 0.725 f L \sqrt{\frac{M}{U_i}} \quad (12-63)$$

式中 f ——高频电压频率[MHz];

U_i ——离子引入能量[V];

L ——分析场长度[cm]。

通常离子能量在 $6\text{V} \sim 15\text{V}$ 调节, 可选 $U_i = 10\text{V}$, 质量数 $M = 50\text{u}$, 根据公式(12-63) 可计算出一组在不同杆长(L) 下对应的高频频率(f) (表 12-3)。

表 12-3 不同杆长和高频频率

L/cm	3	3.5	4	5	6	8	10
f/Hz	5	4.4	3.8	3	2.5	2	1.5

(2) 不同高频频率下场半径(r_0)对应的最大高频电压幅值(V_{\max})的计算

从表 12-3 中,利用公式(12-56) 计算对应每个高频频率下一组场半径(r_0) 和最大高频电压幅值(V_{\max}) 见表 12-4、表 12-5。

表 12-4 $f = 5\text{MHz}$ 条件下半径(r_0) 和最大高频电压幅值(V_{\max})

r_0/cm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
V_{\max}/V	90.2	360	812	1433	2255	3248

表 12-5 $f = 4.4\text{MHz}$ 条件下半径(r_0) 和最大高频电压幅值(V_{\max})

r_0/cm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
V_{\max}/V	70	280	629	1180	1747	2515

依此方法可计算出高频频率 $f = 3.8\text{MHz}$ 、 3MHz 、 2.5MHz 、 2MHz 、 1.5MHz 下的数值。

(3) 高频功率(P) 与高频频率(f)、场半径(r_0) 关系的计算

如果考虑 $C/Q \approx 1$, 根据公式(12-58) 可计算出不同高频功率(P) 下, 高频频率(f)、场半径(r_0) 对应值(表 12-6)。

表 12-6 不同高频功率下高频频率、场半径关系

r_0/cm / f/MHz / P/W	5	4.4	3.8	3.0	2.5	2.0
10	0.210	0.245	0.296	0.399	0.500	0.660
20	0.250	0.294	0.350	0.474	0.596	0.787
30	0.277	0.325	0.390	0.525		
40	0.298	0.350	0.420	0.560		
100	0.445	0.520				
300	0.490	0.580				

(4) 基本参数的确定

根据上述计算数据,可以绘制出一组不同杆长(L) 下,对应的 f 、 r_0 、 V_{\max} 和 P 的曲线。从实际电路元器件可能达到的 V_{\max} 和 P 来考虑,对于分辨本领 $M/\Delta M = 50$,选择杆长 $L = 4\text{cm}$ 和 $L = 5\text{cm}$ 比较合理,对应的参数为:

$$L = 4\text{cm}; f = 3.8\text{MHz}; r_0 = 3\text{mm}; V_{\max} = 460\text{V}; P = 10\text{W}$$

$$L = 5\text{cm}; f = 3.0\text{MHz}; r_0 = 3\text{mm}; V_{\max} = 292\text{V}; P = 5\text{W}$$

(5) 其它参数的选择

离子入口孔径可采用公式(12-52) 计算结果作参考设计;根据最小可检分压力 10^{-9}Pa 要求,采用电子倍增器为离子收集,倍增器增益大于 10^4 ,可同轴或偏轴安装。

离子入口膜片到四极杆之间距离应考虑边缘场影响,最佳过渡场应保证质量数为处于质量范围中间的离子在过渡场经历 2 个高频周期数。

(七) 主要技术指标测试方法

1. 质量范围测试

对线性质量标度的四极质谱计的质量范围上限可采用下述方法进行:

① 选择分子量大于质量范围上限 2/3 的样品气体充入测试系统,调整仪器参数,记录该气

体谱峰;

② 手动调到该峰峰顶,并记录该峰质量数 M 和对应的可确切代表高频电压值的某一参数 V_m (如四极杆直流电压或高频检波电压);

③ 调到质量范围上限,记录对应的参数值 V_{mh} ;

④ 按式(12-64) 计算

$$M_h = \frac{MV_{mh}}{V_m} \quad (12-64)$$

式中 M_h ——质量范围上限[u]。

2. 分辨本领测试

由于四极质谱计线性质量标度,使仪器的分辨本领实际测量更为简单,采用测量距离方法进行:

① 选择同位素峰适于分辨本领测量的样品气体(如氩、氦、氙或汞)引入测试系统;

② 扫描上述气体离子谱,调节仪器参数(离子能量、分辨),使分辨本领最高且峰形符合要求,连续记录三次谱峰;

③ 按公式(12-65) 计算

$$R = \frac{ML}{DW} \quad (12-65)$$

式中 R ——分辨本领;

M ——被测峰对应的质量数[u];

L ——被测峰与相邻峰之间距离[mm];

D ——被测峰与相邻峰之间的质量差[u];

W ——被测峰 10% 或 50% 处的峰宽[mm]。

3. 分压灵敏度测试

四极质谱计分压灵敏度测量可按下述步骤进行:

① 将测试系统抽至极限压力后,向测试系统充入氮气,使电离计指示压力高于极限压力(1 ~ 2) 倍;

② 扫描氮分子峰,调节仪器参数,在保证分辨本领(10%) 达到 28 ~ 35 条件下,记录 $M = 28u$ 峰的离子流 I_1 和电离计的压力 P_1 ;

③ 调节进样,使电离计压力再增高(1 ~ 10) 倍,记录 $M = 28u$ 峰的离子流 I_2 和电离计的压力 P_2 ;

④ 按公式(12-66) 计算

$$S = \frac{C \times (I_2 - I_1)}{P_2 - P_1} \quad (12-66)$$

式中 C ——电离计校准系数。

4. 最小可检分压力测试

通常,指标高于 $10^{-9}Pa$ 的四极质谱计的最小可检分压力测试方法按下述步骤进行:

① 将测试系统抽至极限压力后,向测试系统充入氮气,使电离计指示压力高于极限压力(1 ~ 2) 倍。记录氮分子离子峰 $20u$ 的离子流 I_1 和电离计的指示压力 P_1 。

② 调节进样阀,使电离计指示压力增高 1 倍 ~ 10 倍(但不允许高于 $2 \times 10^{-4} \text{Pa}$),记录 20u 的离子流 I_2 和电离计的指示压力 P_2 。

③ 计算

$$S(\text{Ne}) = \frac{C\beta_{\text{Ne}}(I_2 - I_1)}{0.909(P_2 - P_1)} \quad (12-67)$$

式中 $S(\text{Ne})$ ——仪器对氖的灵敏度[A/Pa];

β_{Ne} ——电离计对氖的相对灵敏度;

0.909——氖 20 同位素的相对丰度。

③ 在最慢的扫描速度、最灵敏的静电计量程并保证峰高下降不超过 10% 的响应时间的条件下,记录氖 21 同位素峰高 $H_{21}(\text{mm})$;

④ 手动调节到氖 21 和氖 22 两个同位素峰之间的谷上;

⑤ 关闭进样阀,使测试系统压力恢复到极限压力,记录压力 P_0 ;

⑥ 记录仪器输出 $N(\text{mm})$,时间为 5min。按每分钟一段分五段,测量每段噪声的峰 — 峰值,五个峰 — 峰值的平均值为噪声;

⑦ 计算

$$P_{\min} = \frac{0.00257NS(\text{Ne})(P_2 - P_1)}{\beta_{\text{Ne}}CH_{21}S} \quad (12-68)$$

式中的 0.00257 为氖 21 同位素相对丰度。

对于最小可检分压力小于 10^{-9}Pa 的仪器,该技术指标测试可利用氦在空气中的体积分数为 5.2×10^{-6} 的关系,测量空气样品中氦,参考上述方法进行。

5. 最大工作压力测试

四极质谱计最大压力测定可按下述步骤进行:

① 按分压灵敏度测量方法,调节进样微调阀,记录测试系统压力 p 和对应的离子流 I ;

② 绘制灵敏度 — 压力曲线,对应 50% 灵敏度时的压力确定为最大工作压力。

6. 峰强稳定度

表征仪器长期工作条件下质谱探头及电路稳定性。四极质谱计的峰强稳定度测量可按下述步骤进行:

① 测试系统抽至极限压力,向系统充入氮气,使压力增高约两个数量级;

② 调整仪器工作参数,保证对氮分辨本领达到 28 ~ 35,离子流信号达到满量程 80%;

③ 仪器稳定 2h 后,每 20min 扫描一次氮分子离子峰,4h 内共记录 13 次,同时记录测试系统内压力;

④ 按公式(12-69) 计算

$$\delta = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \times 100\% \quad (12-69)$$

式中 δ ——峰强稳定度[%];

H_{\max} ——13 次测量中最大峰高[mm];

H_{\min} ——13 次测量中最小峰高[mm]。

如压力波动,峰高应按线性修正。

7. 最小可检浓度

最小可检浓度可采用已知浓度的标准混合气体测量或采用已知的同位素丰度比进行测量:

- ① 测试系统抽至极限压力,向系统充入一定压力标准混合气体,标准气体中被测组分的压力分数为 C_0 ;
- ② 调整仪器工作参数,测量被测组分基准峰的峰高 I ;
- ③ 在仪器工作参数和压力不变的条件下,测量噪声 I_N ;
- ④ 按公式(12-70) 计算

$$C_{\min} = \frac{2I_N C_0}{I} \quad (12-70)$$

式中 C_{\min} ——最小可检浓度(最小可检压力分数)。

(八) 真空系统离子的判别和残余气体分析

1. 真空系统残余气体分析

利用质谱计的模拟扫描模式(或棒扫描)在仪器的工作质量范围内,选择适当的参数对系统进行全谱扫描,记录系统残余气体的全谱图。一般扫描高真空系统全谱的质量范围选择 $1u \sim 100u$ 就够了。小型质谱计可以选择 $1u \sim 50u$ 。

在质谱图上确定谱峰质量数可用两种方法。最简单的方法是计算机控制的四极质谱计给出的谱图,可以在质量数坐标轴直接读出对应峰的质量数。而对于没有采用计算机控制的仪器,记录仪纵轴为峰高(离子流),横轴为走纸的长度,当记录仪走纸速度一定时,可以认为横轴为时间轴。四极质谱计为线性扫描,因此可在横轴上,根据峰间纸的距离计算出对应峰的质量数。

真空系统简单的残余气体可利用离子判别表,根据峰的质量数,直接判定该峰对应的气体种类。再利用真空系统常见的残余气体的碎片图形,对系统的组分作较详细的分析。可以利用下面几条规律来帮助识别真空系统残余气体谱:

- ① 存在碳氢化合物(油蒸气)污染的真空系统,会成组出现碳氢化合物一组峰,而且有明显的特征峰,如质量数 39、41、43 一组峰和 55、57 一组峰;
- ② 没有碳氢化合物(油蒸气)污染的真空系统的残余气体成分的质量数一般低于 44;在无油的真空系统中,惰性气体为主要成分,如质谱峰为 $2(H_2)$ 、 $40(Ar)$ 和 $44(CO_2)$;
- ③ 有漏气的真空系统,可以看到明显的氧峰,质量数为 32;
- ④ 可根据碎片图形区别系统中的 N_2 和 CO (质量数均为 28),质量数为 14 的峰为 N_2 的碎片,而 CO 的碎片峰的质量数为 12;
- ⑤ 未经烘烤或烘烤不彻底的真空系统,水为系统的主要成分,质谱峰的质量数为 18、17 和 1;
- ⑥ 在无油的超高系统中,质量数为 16 的甲烷成分出现的原因是由于碳、氢在质谱计热灯丝的表面作用下形成的;
- ⑦ 真空系统清洗剂残留物如酒精的基准峰为质量数 31,丙酮为质量数 42。

图 12-58 为油扩散泵高真空系统的残余气体质谱。系统压力为 $2 \times 10^{-3} Pa$,质谱计采用 SJX-4 小型四极质谱计,倍增器电压为 1800V,静电计量程为 $10^{-7} A$ 。

由于 SJX-4 小型四极质谱计没有计算机控制,模拟峰采用记录仪记录,因此,应利用四极

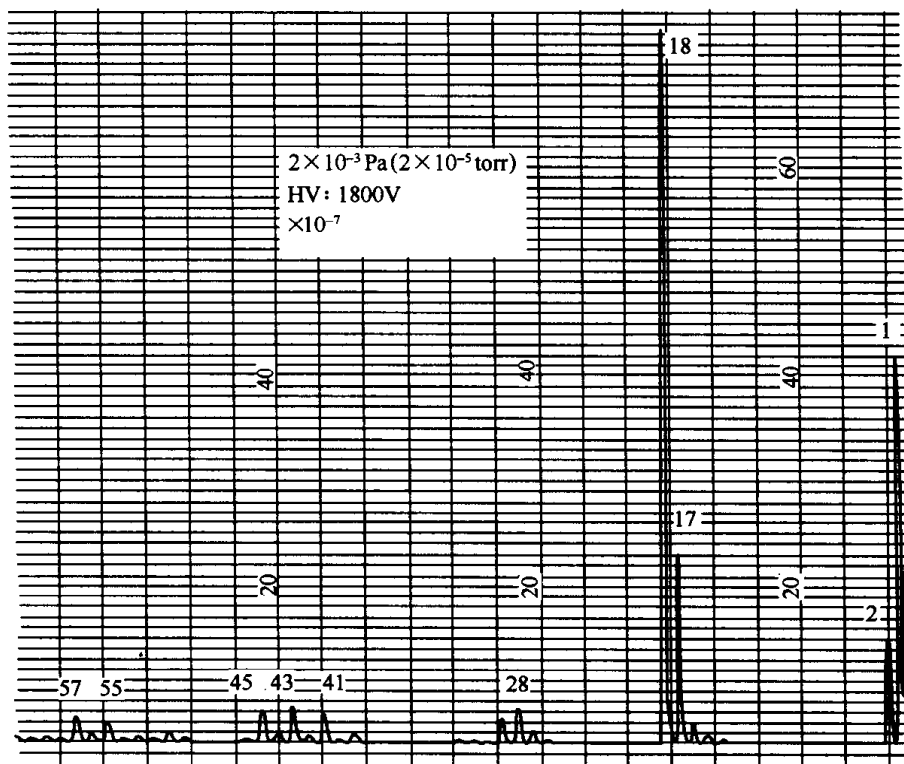


图 12-58 油扩散泵高真空系统残余气体质谱

质谱计线性标度的特点和对残余气体质谱峰的基本了解,确定出每个峰的质量数。根据质谱峰的质量可进行如下分析:

- ①根据质量数 18, 17 和 1 的峰最大,可判定系统主要成分为 H_2O 。质量数 18 为 H_2O 的分子峰,质量数 1, 17 为水的碎片峰,为离子 OH^+ , H^+ 。
- ②根据质量数 2,可判定系统主要成分为 H_2 ,该峰为氢的分子峰 H_2^+ 。
- ③根据质量数 41, 43 和质量数 55, 57, 39 峰可判定为油的裂解物的碎片峰。
- ④谱中质量数 28, 32 的很小峰存在,说明系统存在微漏。
- ⑤微量的清洗残留物酒精($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)的存在,在质谱中有很少的质量数为 31, 12 峰。

2. 定量测量

由于四极质谱计灵敏度变化因素很多,给定量测量带来很大困难,必须在进行大量实验的基础上,对仪器进行校准后才有可能进行定量测量。

利用标准混合气体校准方法,进行系统中的浓度测量已经得到较广泛应用。操作者可以在测试系统中,引入已知浓度的标准混合气体进行校准,得到每种组分的校准系数,并将校准系数输入到计算机给定的参数表中,计算机可将测到的谱强度分别乘校准系数后再进行计算,给出各组分的浓度值。为了提高浓度的测量精度,计算机可自动将标准气体引入系统,不断将校准系数进行刷新,测量时用刷新后的校准系数进行计算。刷新的时间间隔可根据测量的要求而确定。

(九) 仪器进展概况

四极质谱计的工作原理是由 Paul 等在 1953 年首先提出的,而后,在 1955 年又介绍了按此原理研制的实际仪器。1960 年文献[289]介绍了一台冷阴极的真空分析的四极滤质器。几

乎同时,于1963年我国研制出用于真空检漏的四极检漏仪,于1964年研制出四极滤质器。70年代,Holme等于1972年~1974年对用于高真空或超高真空残气分析的小型四极质谱计,作了一系列研究。同时在四极质谱计理论、结构及加工工艺、性能研究等方面有了很大进展,出现一批性能较好的商品仪器。我国在此期间出现研制四极质谱计的高潮,几乎同时,有多家研究所、高等院校和工厂相互合作,研制出性能较高的四极质谱计。其中有:兰州物理研究所和北京分析仪器厂研制的ZP4001四极分压强度;南京工学院和上海电动工具研究所研制的SZ_n-1四极质谱计;兰州物理研究所和虹光电子管厂研制的SJX-1小型四极分析器;清华大学和沈阳教学仪器厂研制的ZLS-150四极滤质器。20世纪80年代后期,随着计算机的发展和普及,几乎所有的四极质谱计都采用计算机控制和数据自动处理,而且针对不同应用的专用四极仪器等方面得到飞速发展。

计算机对质谱计控制包括:离子源各级电压设定、发射电流调节、高频电压扫描方式、静电计量程、电子倍增器高压选择等。操作者根据要求可在操作软件的不同的菜单中设定参数,计算机通过数—模转换控制质谱计电路各单元块、加在质谱探头上的各级电压。

计算机的使用为质谱计的数据处理开阔了很大的空间。根据使用要求,对系统的组分进行实时检测,给出模拟峰、棒峰、多组分离子强度走势图、多组分浓度走势图、多组分浓度表、多组分归一化表等。测试的数据可进行存储,实验结束后,操作者可以将测量数据进行再处理,如某一时段信号放大、求平均、计算误差等。

六、常用术语和真空质谱计的主要技术指标

(一) 常用术语

1. 质谱仪

由分析场将离子束分离成不同质荷比的组分,并在整个立体角上同时记录各种质荷比离子的仪器。

2. 质谱计

借助于改变分析场的工作参数来记录质谱的仪器,即,质谱的记录利用了时间因素。此外,这类仪器的质谱记录都利用了电子学方法。

3. 静态质谱计

仪器分析场的工作参数(电场、磁场和离子偏转半径)在质量分离过程中不随时间改变。随时间改变工作参数只是为了连续记录质谱,而不是质量分离所必须。

4. 动态质谱计

质谱计的分析场在质量分离过程中利用了时间因素,即,分析场一个或几个工作参数(电场、电场频率和磁场)是随时间而变化的。

5. 质谱

表征质谱计中由样品所产生的离子种类和相对量的任何一种显示,如,笔录式记录仪图形、示波器图形等。

6. 峰(质量峰,质谱峰)

质谱中,某种质荷比离子的输出信号图形。因为这种离子流图形是由某种质荷比的离子所产生的,因此也称之为质量峰。例如“质量28的峰”。

7. 碎片图形(离子谱)

质谱计在一定工作条件下,由给定的样品所产生的离子特征图形(即离子种类和它们的相对量)。

8. 图形系数

表征碎片图形(离子谱)中,各种质荷比的离子的相对丰度系数。它定义为图形系数

$$\left(\frac{m}{q}\right)_i = \frac{H\left(\frac{m}{e}\right)_i}{H\left(\frac{m}{e}\right)_b} \times 100\% \quad (12-71)$$

式中 $H(m/e)_b$ 为基准峰的质荷比。图形系数为 100 的峰称基准峰。

9. 母峰

未分解的分子态离子的峰。但母峰不一定是碎片图形中的基准峰。

10. 碎片峰

伴随分子电离而分解成碎片离子的峰。

11. 同位素峰

通常,同位素是天然存在的,为了区别于碎片峰,称之为同位素峰。当然,碎片离子峰也存在同位素峰。

12. 重排峰

碎片离子与别的原子或分子等重新排列结合成的峰。

13. 双电荷峰

因离子源的电子能量高于样品的电离电位,原子或分子在电离过程中可能失去两个电子,这种离子的峰称双电荷峰。在通常的电子能量下,三电荷峰是极小的。

14. 亚稳态峰

亚稳态离子所形成的峰。

15. 扫描参数

表征质谱计分析器的电场或磁场的参数(电压、频率和磁感应强度等)。这种参数的变化可以使离子检测器接受到不同质荷比的离子。

16. 扫描

改变扫描参数的过程。它使质谱计在整个工作质量范围或部分质量范围内获得一个质谱。

17. 质量数

最接近离子质量的整数,用 $[u]$ 表示,也可用原子量或分子量来表示。例如,氮的一种同位素的原子质量为 19.9987 $[u]$,称它的质量数为 20。另一种表达法为,质量数是原子核内质子和中子数的总和。

18. 质量范围(工作质量范围)

质谱计能进行有效分析的整个质量范围,用检测最小和最大的单电荷离子之间的质量范围来表示。

19. 质量歧视效应

对于具有相同压力的不同质量气体组分,质谱计给出不同的输出指示的特性。它是由离子源、分析器和离子检测器(如电子倍增器)的性能造成的。在分压力校准中,通常只能测量质

谱计全面的歧视效应,所以在实测的歧视效应中还包括电离截面效应。

20. 峰宽

质谱中峰底部的宽度。峰底被定义为峰的两个侧边和参考基线的交点或切点间的长度。单位为[u]。

21. 零输出基线

原则上讲,它是质谱中的一条直线,它是质谱计在没有检测到离子时的输出线。实际上是一条与许多被完全分辨的峰底相切的直线。在完全分辨的情况下,这些峰的原子质量和相邻峰的原子质量差别很大,因而这些峰不受邻峰的影响。

22. 峰距

平行于质量数坐标的两个峰顶之间的距离。单位为[u]。

23. 峰高

零输出基线到峰顶之间的距离。高度单位可任意选择。

24. 谷(峰谷)

高于零输出基线的两个相邻峰侧边的连接部分。谷的高度为,从零输出基线到谷最低点间的距离,用和峰相同的单位来度量。

25. 分辨本领的一般定义

质谱计分离不同荷质比离子产生峰的能力。

26. 绝对分辨

在质量数 M 处,分离不同荷质比的能力,用质量数 M 处峰宽 ΔM 表示。

27. 分辨本领(分辨能力)

在质量数 M 处,质量数 M 和对该峰某高度处的峰宽 ΔM 之比。

28. 单位质量分辨

在质量数 M 处,质量数对应该峰某高度处的峰宽 $\Delta M = 1u$ 。

29. 参考基线

根据对分辨本领的不同定义,在零输出基线上方,峰高的 50%、10% 或 5% 等处所作的平行于零输出基线的直线。

30. 质量标度(质标)

表征质量数的坐标(通常为横坐标)。不同原理的质谱计,扫描参数与质量数的关系有的呈线性关系,有的呈非线性关系。计算分辨时,必须将横坐标换算成线性质量标度。

31. 克分子分数

气体混合物中,某种组分的原子或分子数与总原子或分子数之比。对于理想气体,克分子分数和按其体积计算的分数相同。

32. 分压力

气体混合物中,给定组分的分压力为气体混合物的全压力和该组分的克分子分数的乘积。

33. 分压力灵敏度(灵敏度)

质谱计的分压力灵敏度为输出离子流的变化量除以引起这种变化的气体分压力的变化量。如不计其发射电子流的数值,其单位为 A/Pa 。

34. 最小可检浓度(最小可检体积分数或压力分数)

仪器对气体混合物中能检测到的某一组分体积分数或压力分数的最小值。

35. 最小可检分压力

质谱计可检测到的最小分压力,它等效于检测一个两倍噪声数值的输出。

36. 噪声

由虚假的输出指示所引起的零输出基线的快变化过程。

(二) 真空质谱计的主要技术指标**1. 质量范围**

质谱计在一定的灵敏度和分辨本领条件下,能够工作的质量数上限和下限之间的范围。质量数下限通常用真空系统残余气体峰(如原子态氢离子峰)质量数为 1 来确定。上限可以用气体相对分子量接近上限的气体测定(如选用氮、氙、全氟三丁胺等样品)。可以利用扫描参数和质量标度的关系,用外推法进行计算。

2. 分辨本领

它表征仪器分辨 M 和 $M + \Delta M$ 两个相邻峰的能力,通常用 $M/\Delta M$ 表示。由于作为残气分析的真空质谱计不需要很高分辨本领,所以,通常在 10% 或 50% 峰高处确定参考基线来测量 ΔM 。特殊使用条件下,可在 5% 或 1% 峰高处确定参考基线来测量 ΔM 。由于峰形对分辨本领测量影响很大,仅用 50% 峰高处的参考基线确定 ΔM 并不恰当,为此用峰形系数加以限制,峰形系数($\Delta M_{10\%}/\Delta M_{50\%}$)不得大于 2.08。不同定义下测试的分辨本领可按公式(12-72)进行换算

$$\frac{M}{\Delta M_{(50\%)}} = \frac{M}{\Delta M_{(X\%)}} \times K \frac{(X\%)}{(50\%)} \quad (12-72)$$

式中 K ——换算系数,数值可从表 12-7 查出。

表 12-7 不同定义的分辨本领的换算

质量数 (u)	换 算 系 数			
	$K = (10\% / 50\%)$	$K = (5\% / 50\%)$	$K = (1\% / 50\%)$	$K = (0.5\% / 50\%)$
<5	1.00	1.00	1.00	1.00
5~25	1.27	1.30	1.33	1.33
25~50	1.40	1.45	1.49	1.50
50~100	1.80	1.90	1.98	1.99
>100	1.82	2.08	2.57	2.76

3. 分压力灵敏度常数(灵敏度)

分压力灵敏度是衡量质谱计探头部分检测灵敏度的指标。与热阴极电离规相似,分压力灵敏度常数定义为

$$S = \frac{\Delta I^+}{\Delta p_p \cdot I_e} \quad (12-73)$$

式中 ΔI^+ ——被检测的某一种气体组分离子流的变化量[A];

Δp_p ——离子源内该种组分的分压力变化量[Pa];

I_e ——离子源的发射电子流[A];

S ——分压力灵敏度常数[Pa⁻¹]。

对于一定的发射电子流,如不计其数值,分压力灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta I^+}{\Delta p_p} \quad (12-74)$$

分压力灵敏度的单位为 A/Pa。

4. 最小可检分压力

它反映质谱计探头的分压力灵敏度和测量仪器检测离子流信号的综合指标。对于规定的气体的最小可检分压力是检测一个等于两倍噪声的离子流输出信号(即信噪比为 2)。

5. 最大工作压力

质谱计在不同应用条件下允许工作的最大全压力极限。一般这项指标是对质量数 28 的氮峰测定的。

在定性分析中,最大工作压力通常定义为,在该压力下仪器的分压灵敏度下降到线性值的一半,或定义为 $I^+ - p$ 曲线中最大 I^+ 值对应的 p 值。

某些仪器给出的指标是仪器能指示的最大工作压力。在该压力下,分析器仍具有一定的质量分离功能,离子源有一定的离子产额,灯丝仍可正常工作。

在进行定量测量时,仪器的最大工作压力表征为,在该压力范围内各种离子的离子流与压力的关系均呈线性。

6. 最小可检浓度

表征仪器对气体混合物中所能测量的某一组分的最小值。通常用 $P_{\text{最小}}/P_{\text{全}}$ 表示,这里, $P_{\text{最小}}$ 为气体混合物中某一组分的最小分压力, $P_{\text{全}}$ 为气体混合物的全压力。

七、附 表

表 12-8~表 12-21 给出了真空系统的气体分析与分压测量中的常用数据。

表 12-8 离子的判别

质荷比	离 子	分 子	质荷比	离 子	分 子
1	H ⁺	H ₂	26	C ₂ H ₂ ⁺ , CN ⁺	C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ O, CNH
2	H ₂ ⁺	H ₂	27	C ₂ H ₃ ⁺ , CNH ⁺	C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ O, CNH
4	He ⁺	He	28	C ₂ H ₄ ⁺ , CO ⁺ , N ₂ ⁺	C ₂ H ₄ , CO, CO ₂ , N ₂
8	O ⁺⁺	O ₂	29	¹³ CO ⁺ , C ₂ H ₃ ⁺ , ¹⁴ N ¹⁵ N ⁺	CO, C ₂ H ₆ O, C ₂ H ₆ , N ₂
10	²⁰ Ne ⁺⁺	²⁰ Ne	30	C ₂ H ₆ ⁺	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₆ O
11	²² Ne ⁺⁺	²² Ne	31	CH ₃ O ⁺	C ₂ H ₆ O
12	C ⁺	CH ₄ , C ₂ H ₂ , CO, CO ₂	32	O ₂ ⁺ , S ⁺	O ₂ , SO ₂ , H ₂ S
13	¹³ C ⁺ , CH ⁺	¹³ C, CH ₄ , C ₂ H ₄	33	HS ⁺	H ₂ S
14	N ⁺ , CH ₂ ⁺ , CO ⁺⁺	N ₂ , NH ₃ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , CO	34	H ₂ S ⁺	H ₂ S
15	NH ⁺ , CH ₃ ⁺	NH ₃ , CH ₄	35	³⁵ Cl ⁺	HCl, C ₂ HCl ₃
16	O ⁺ , CH ₄ ⁺ , NH ₂ ⁺	H ₂ O, CO, CO ₂ , O ₂ , CH ₄ , NH ₃	36	H ³⁵ Cl ⁺ , ³⁶ Ar	HCl, C ₂ HCl ₃ , ³⁶ Ar
17	OH ⁺ , NH ₃ ⁺	H ₂ O, NH ₃	37	³⁷ Cl ⁺ , C ₃ H ⁺	HCl, C ₂ HCl ₃ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
18	H ₂ O ⁺	H ₂ O	38	H ³⁷ Cl ⁺ , C ₃ H ₂ ⁺	HCl, C ₂ HCl ₃ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
19	F ⁺	F ₂	39	C ₃ H ₃ ⁺	C ₃ H ₆ , C ₆ H ₆ , 油
20	²⁰ Ne ⁺ , Ar ⁺⁺	²⁰ Ne, Ar	40	Ar ⁺ , C ₃ H ₄ ⁺	Ar, C ₃ H ₆
22	²² Ne ⁺ , CO ₂ ⁺⁺	²² Ne, CO ₂	41	C ₃ H ₅ ⁺	C ₃ H ₆ , 油
24	C ₂ ⁺	C ₂ H ₄	42	C ₃ H ₆	C ₃ H ₆ , C ₄ H ₁₀
25	C ₂ H ⁺	C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ O	43	C ₃ H ₇ ⁺ , C ₂ H ₃ O ⁺	C ₄ H ₁₀ , 油

七、附表

(续)

质荷比	离 子	分 子	质荷比	离 子	分 子
44	$\text{CO}_2, \text{C}_3\text{H}_6^+$	$\text{CO}_2, \text{C}_3\text{H}_8$	55	C_4H_7^+	油
45	$^{13}\text{CO}_2^+, \text{C}_2\text{H}_5\text{O}^+$	$\text{CO}_2, \text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	57	C_4H_9^+	油
48	SO^+	SO_2	64	SO_2^+	SO_2
50	C_4H_2^+	C_6H_6	69	C_5H_9^+	油
51	C_4H_3^+	C_6H_6	71	$\text{C}_5\text{H}_{11}^+$	油
52	C_4H_6^+	C_6H_6	78	C_6H_6^+	C_6H_6

表 12-9 SFITV 残气分析委员会提供的碎片图形
(电离能量为 75eV)

化学式与名称	相对 分子量	离子的质荷比与相对丰度									
		17	16	15	14	—	—	—	—	—	
NH_3 氨	17	100	92	8	3	—	—	—	—	—	
H_2O 水	18	100	27	3	0.2	—	—	—	—	—	
N_2 氮	28	100	5.2	0.8	0.01	—	—	—	—	—	
CO 一氧化碳	28	100	5	1.7	1.1	14	—	—	—	—	
NO 氧化氮	30	100	8	2	2	—	—	—	—	—	
H_2S 硫化氢	34	100	44	42	4	35	—	—	—	—	
Ar 氩	40	100	13	0.4	0.1	—	—	—	—	—	
CO_2 二氧化碳	44	100	9	9	4	45	46	—	—	—	
N_2O 氧化亚氮	44	100	31	13	11	16	15	45	—	—	
NO_2 二氧化氮	46	100	37	22	10	—	—	—	—	—	
SO_2 二氧化硫	64	100	49.8	10.4	2.3	66	65	34	33	—	
CH_3O 甲醇	32	100	65	64	6	—	—	—	—	—	
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ 乙醇	46	100	35	22	22	46	43	28	30	42	

(续)

化学式与名称	相对 分子量	离子的质荷比与相对丰度									
C ₃ H ₆ O 丙酮	58	42 100	58 37	42 7	27 5	28 5	39 4	44 4	26 3	29 3	— —
C ₄ H ₁₀ O 丁醇	74	31 100	59 47	29 40	45 38	74 30	27 18	43 7	41 5	28 5	42 5
C ₂ HCl ₃ 三氯乙烯	131	60 100	36 62	25 42	47 36	62 30	95 30	35 24	97 20	59 18	49 12
C ₂ Cl ₃ F ₃ 聚四氟 乙烯	187.5	101 100	103 62	85 43	31 23	66 15	87 15	36 14	105 11	47 9	35 5
CH ₄ 甲烷	16	16 100	15 86	14 16	13 8	12 3	17 1.1	— —	— —	— —	— —
C ₂ H ₂ 乙炔	26	26 100	25 20	24 6	13 6	12 3	27 2.2	— —	— —	— —	— —
C ₂ H ₄ 乙烯	28	28 100	27 65	26 62	25 12	14 6	13 4	24 4	29 2.2	12 2	— —
C ₂ H ₆ 乙烷	30	28 100	27 33	30 26	26 23	29 22	15 5	25 4	14 3	13 1	— —
C ₃ H ₈ 丙烷	44	29 100	28 59	27 39	44 29	43 23	39 17	41 12	26 9	15 6	42 6
C ₄ H ₁₀ 丁烷	58	43 100	29 44	27 37	28 32	41 28	39 13	58 12	42 12	26 6	15 5
C ₄ H ₁₀ 异丁烷	58	43 100	41 38	42 34	27 28	39 17	29 6	15 6	28 3	57 3	58 3
C ₅ H ₁₂ 戊烷	72	43 100	42 58	41 40	27 35	29 24	39 14	57 13	72 8	15 5	28 5
C ₅ H ₁₂ 异戊烷	72	43 100	42 86	41 67	57 54	29 46	27 42	39 22	56 17	15 8	72 6
C ₄ H ₈ 环丁烷	56	28 100	41 89	56 62	27 42	26 23	55 19	29 11	40 6	50 5	53 5
C ₅ H ₁₀ 环戊烷	70	42 100	41 29	55 29	70 29	39 22	27 15	40 7	28 4	29 4	43 3
C ₆ H ₁₂ 环己烷	84	56 100	84 71	41 67	55 34	42 31	27 30	39 28	69 22	28 14	43 14
C ₆ H ₆ 苯	78	78 100	52 19	51 19	50 16	77 14	39 14	29 6.5	76 6	38 6	74 5
C ₇ H ₈ 甲苯	92	91 100	92 76	39 19	65 13	51 9	63 9	90 8	27 5	38 5	93 5

七、附 表

表 12-10 某些元素和化合物的碎片图形

气体	相对 分子量	离子的质荷比与相对丰度									
H ₂	2	1 2.1	2 100	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
He	4	4 100	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Ne	20	20 100	21 0.8	22 10	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
N ₂	28	14 5.2	28 100	29 0.76	30 0.01	— —	— —	— —	— —	— —	— —
O ₂	32	16 8.15	32 100	33 0.03	34 0.4	— —	— —	— —	— —	— —	— —
HCl	36	35 17	36 100	37 57	38 32.4	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Ar	40	20 13	36 0.34	38 0.06	40 100	— —	— —	— —	— —	— —	— —
SO ₂	64	32 10.4	33 0.1	34 0.4	48 49.48	49 0.4	50 2.3	64 100	65 0.9	66 4.9	— —
HBr	80	39.5 6	40 8	40.5 4	41 3	79 45	80 100	81 44	82 98	— —	— —
Kr	84	78 0.68	80 4.29	82 29.6	83 20.5	84 100	86 30.6	— —	— —	— —	— —
Xe	132	124 0.36	126 0.33	128 7.14	129 98.39	130 15.17	131 78.78	132 100	134 38.82	136 32.99	— —

表 12-11 真空系统常见残气的碎片图形

化学式及名称		质荷比		12	13	14	15	16	17	18	19	22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	40	44	45	46	47
				12	13	14	15	16	17	18	19	22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	40	44	45	46	47
CH ₄	甲烷	3	8	16	86	100	1.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NH ₃	氨	—	—	3	8	92	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H ₂ O	水	—	—	—	—	3	27	100	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₂ H ₂	乙炔	3	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	20	100	2.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₂ H ₄	乙烯	2	4	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	2.2	—	—	—	—	—	—	—	—
CO	一氧化碳	5	—	0.7	—	1.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	1.1	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ₂	二氧化碳	7	—	—	—	9	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	9	—	—	—	—	100	1.20	4	—	—
	空气	—	—	8.8	—	1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	0.7	—	—	21.1	1.40	1	—	—	—
C ₂ H ₆ O	乙醇	—	—	—	—	—	—	5	3	—	—	2	8	22	5	22	6	100	—	—	0.2	2	33	16	0.4	—

表 12-12 某些真空泵工作液的碎片图形

名 称	离子的质荷比与相对丰度													
汞	99 6	99.5 10	100 14	100.5 8	101 19	102 3	198 29	199 52	200 74	201 51	202 100	204 17	— —	— —
硅油(DC 705)	41	43	57	77	78	91	105	107	119	135	150	151	152	157
	2	2	3	2	2	3	4	2	3	9	2	4	3	3
	180	181	182	189	531	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	34	17	16	4	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
矿物油(SOGEV)	26	27	29	39	41	42	43	55	56	57	67	69	70	—
	4	10	16	7	44	8	100	59	14	70	23	45	13	—
	71	79	81	84	85	95	96	97	106	109	111	123	125	—
	32	11	32	34	18	33	13	33	9	21	21	15	10	—
有机油 (phtalate aliphatique)	27	28	29	30	31	32	41	42	43	55	56	57	70	—
	15	84	17	39	26	15	23	13	34	22	11	40	33	—
	71	77	81	83	104	105	108	109	112	113	137	149	150	—
	29	10	15	12	14	18	20	15	12	18	13	100	12	—

表 12-13 Santovac5 扩散泵油^①质谱中的主要离子
(电离能量为 70eV)

质量数/u	占基准峰的百分比	质量数/u	占基准峰的百分比
447	38	260	7.0
446	10	234	2.1
354	1.2	233	6.7
353	1.6	232	3.7
352	3.2	231	6.5
278	2.5	223.5	10
277	1.4	223	30
276	1.4	169	2.5
275	1.4	168	8.5
261	3.1		

注:①Santovac 5 是一种高纯度的聚苯醚,由 Monsanto 化学公司制造

表 12-14 Apiezon C 扩散泵油^①质谱
中的主要离子(电离能量为 70eV)

质量数/u	占基准峰的百分比
195	13
181	16
167	27.5
153	35.5
139	53
125	66
111	74
97	81.5
83	79
69	100

注:①Apiezon C 是一种重碳氢化合物,由壳牌化学公司制造

表 12-15 Silicone MS. 704 扩散泵油^①质谱
中的主要离子(电离能量为 70eV)

质量数/u	占基准峰的百分比
499	<1
483	<1
469	7.7
405	2.3
391	10
329	7
313	5.5
259	36
229	20
213	2.5
199	100

注:①Silicone MS. 704 是一种扩散泵用硅油,由 Midland Silicones 公司制造

表 12-16 回旋质谱计的离子谱

m/e 气 体	2	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	25	26	27	28	29	30	31	32	36	37	38	39	40	41	43	44
H ₂	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ar	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	—	0.06	—	100	—	—	—
H ₂ O	0.6~1.5	—	—	—	—	1.8	21	100	11~17	0.23	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—
N ₂	—	—	—	7.4	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO	—	3.3	0.04	0.55	—	1.3	—	—	—	—	—	—	—	—	100	0.88	0.2	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ₂	—	3.5	0.03	0.08	—	7.8	—	—	—	—	—	—	—	—	11.5	0.1	—	—	0.4	—	—	—	—	—	—	—	100
CH ₄	—	1.8	5.7	12.5	8.1	100	2.7	—	—	—	—	—	—	—	—	1~5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₂ H ₂	3.5	1.4	4.0	0.3	0.04	—	—	—	—	—	5.1	19	100	3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₂ H ₄	—	0.6	1	2.3	0.3	0.4	—	—	—	—	2.0	6.8	47	57.5	100	3.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₂ H ₆	—	0.2	0.55	2.0	3.1	0.15	—	—	—	—	0.5	2.7	18.1	27.6	100	20.5	25.9	0.54	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₃ H ₈	—	0.18	0.36	1.13	3.8	0.12	—	—	—	—	0.13	0.64	8.2	39.1	60.3	100	100	—	—	0.64	4.1	5.8	20	—	16	30.8	44.9

第十二章 真空系统的气体分析与分压测量

表 12-17 单原子气体、双原子气体及其它气体的离子谱
(电离能量为 150eV)

单原子气体					
气 体	质 荷 比	占基准峰的百分比	电离电位 V_i/V		
He	4	100	24.5		
Ne	20	100	21.5		
	21	0.28	21.5		
	22	9.7	21.5		
Ar	36	0.40	15.7		
	38	0.06	15.7		
	40	100	15.7		
Kr	78	0.62	13.94		
	80	3.98	13.94		
	82	20.23	13.94		
	83	20.20	13.94		
	84	100	13.94		
	86	30.5	13.94		
双原子气体					
气 体	键	质荷比	占基准峰的百分比 /%	电离电位 V_i/V	电离过程
H ₂	H—H	1	2.1	18	H ₂ →H ⁺ +H
		2	100	15.6	H ₂ ⁺
N ₂	N≡N	14	6.2	23	N ₂ →H ⁺ +N
		28	100	15.8	¹⁴ N ₂ ⁺
		29	0.8	15.8	¹⁴ N ¹⁵ N ⁺
		30	极少	15.8	¹⁵ N ₂ ⁺
O ₂	O=O	16	8.5	19	O ₂ →O ⁺ +O
		32	100	12.5	¹⁶ O ₂ ⁺
		34	0.4	12.5	¹⁶ O ¹⁸ O ⁺
		36	极少	12.5	¹⁸ O ₂ ⁺
F ₂	F—F	19	100	18.4	F ₂ →F ⁺ +F
Cl ₂	Cl—Cl	35	100	13.0	Cl ₂ → ³⁵ Cl ⁺ +Cl
		37	32	13.0	³⁷ Cl ⁺ +Cl
H ₂ O		18	100	12.6	H ₂ O→H ₂ O ⁺
		17	27	17.3	OH ⁺ +H
		16	1.8	—	O ⁺ +2H
		1	—	19.2	H ⁺ +OH
CO		28	100	14.1	CO→CO ⁺
		16	0.2	—	O ⁺ +C
		14	0.9	—	CO ⁺⁺
		12	1.1	—	C ⁺ +O
CO ₂		44	100	14.4	CO ₂ →CO ₂ ⁺
		28	18.5	20.4	CO ⁺ +O
		22	2.8	—	CO ₂ ⁺⁺
		16	7.5	19.6	O ⁺ +CO
		12	3.5	28.3	C ⁺ +O ₂

七、附 表

表 12-18 轻元素的同位素丰度

元素符号	质量数/u	百分比/%	元素符号	质量数/u	百分比/%
H	1	99.985	Ne	20	90.92
	2	0.015		21	0.257
				22	8.82
C	12	98.89	S	32	95.0
	13	1.11		33	0.76
				34	4.22
N	14	99.63	Cl	35	75.53
	15	0.37		37	24.47
O	16	99.759	Ar	36	0.337
	17	0.037		38	0.063
	18	0.204		40	99.6

表 12-19 某些物质的电离截面 Q_i
(电离能量为 75eV, ${}_{75}Q_i$ 的单位为 10^{-16}cm^2)

物质	${}_{75}Q_i$	物质	${}_{75}Q_i$	物质	${}_{75}Q_i$
He	0.38	C_3H_6	9.73	C_7H_{16}	30.0
Ne	0.62	环- C_3H_6	10.8	CH_3Cl	9.46
Ar	3.52	C_3H_8	11.1	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	12.3
Kr	5.29	异- C_4H_8	12.9	CH_3Br	11.2
Xe	7.31	异- C_4H_{10}	14.4	CH_3I	12.9
Hg	4.00	正- C_4H_{10}	14.1	$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$	7.55
H_2	1.01	异- C_5H_{10}	17.5	CH_3CHO	7.95
N_2	2.75	环- C_5H_{10}	17.3	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	11.7
O_2	2.55	正- C_5H_{12}	18.6	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	12.8
NO	3.06	异- C_5H_{12}	18.0	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	12.1
CO	2.99	新- C_5H_{12}	16.9	NH_3	3.54
CO_2	4.31	C_6H_6	16.9	PH_3	11.3
H_2O	2.96	环- C_6H_8	17.9	H_2S	5.42
N_2O	6.45	环- C_6H_7	19.1	HCl	4.30
CH_4	4.30	1,5- C_6H_{10}	15.8	HCN	6.80
C_2H_2	4.98	环- C_6H_{17}	23.6	$(\text{CN})_2$	10.8
C_2H_4	6.66	1- C_6H_{12}	20.0	CS_2	14.0
C_2H_6	8.35	正- C_6H_{14}	22.3		

表 12-20 热阴极电离规和回旋质谱计的相对灵敏度平均系数 ϕ_i 和 C_i

物 质	ϕ_i	C_i	$\frac{\phi_i}{C_i}$
H_2	0.50	0.45	1.10
He	0.17	0.21	0.81
CH_4	1.40	0.67	2.08
H_2O	0.90	0.65	1.38
Ne	0.25	0.30	0.83
C_2H_2	—	1.40	—
N_2	1.00	1.00	1.00
CO	1.10	1.10	1.00

(续)

物 质	ϕ_i	C_i	$\frac{\phi_i}{C_i}$
C ₂ H ₄	—	1.04	—
C ₂ H ₆	2.80	1.30	2.15
O ₂	0.80	0.70	1.14
Ar	1.25	1.20	1.04
CO ₂	1.50	1.37	1.09
C ₃ H ₈	4.60	—	—
Cl	0.80	—	—
Kr	1.90	0.83	2.30
CCl ₄	0.70	—	—
Hg	3.40	—	—

表 12-21 SJX-1 型四极质谱计离子谱(%)

丰度比 质量数	组分	H ₂	N ₂	He	Air	NH ₃	CO	O ₂	CO ₂	Ar	C ₃ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₅ O
1		3.7			0.67	4.09							2.63	3.24
2		5			0.30		2.75				4.59	3.04	4.74	4.16
4		100		10	12.03									
12				0			6.57		11.77		1.81	1.84	0.37	
13											1.49	3.22	1.36	1.94
14			13.20			3.41	1.29				4.95	6.63	5.76	8.01
15						9.60					5.73		12.34	36.20
16					3.62	90.74	2.76	25.67	17.36					0.92
17					0.21	100								0.65
18					0.80	2.01	0.33						2.09	1.63
19													3.70	
20					0.23									
22									1.45	19.69				
24												3.59		
25												13.10	1.33	1.23
26											2.00	66.08	9.63	6.08
27											12.00	65.45	24.40	8.53
28			100		100		100		17.53		41.00	100	16.05	10.00
29					0.85		1.29				17.82	2.40	25.71	4.48
30														
31													100	
32					20.21		0.27	100						1.91
33					0.05									
34														
36										0.33	2.68			
37											16.56			2.21
38										0.11	24.07			2.51
39											82.00			4.12
40					1.30					100	28.51			
41											100		2.08	2.56
42											61.00		14.46	2.77
43														100
44					0.21				100				31.15	2.51
45									1.59				15.10	
46									0.53					
55														
58														18.36

七、附 表

表 12-22 QMS-200 四极质谱计离子谱

组 分	离子质荷比与相对丰度				
空气	28 100.00	32 16.00	14 7.20	16 1.28	40 1.44
Ar	40 100.00	20 20.00	14 0.34	18 0.70	23 0.60
C ₂ H ₂	26 100.00	25 20.10	13 5.60	24 5.60	27 2.80
C ₂ H ₄	28 100.00	27	26	25	14
C ₂ H ₅ OH	31 100.00	45 34.44	27 23.90	29 23.40	46 16.50
C ₃ H ₆	41 100.00	39 74.00	42 69.60	27 38.40	40 29.00
CF ₄	69 100.00	50 11.80	19 6.70	31 4.90	25 3.90
CH ₄	16 100.00	15 85.80	14 15.60	13 7.70	12 2.40
CO	28 100.00	12 4.50	29 1.10	16 0.90	14 0.60
CO ₂	44 100.00	28 11.40	16 8.50	12 6.00	45 1.30
H ₂	2 100.00	—	—	—	—
H ₂ O	18 100.00	17 23.00	16 1.10	20 0.30	19 0.10
He	4 100.00	—	—	—	—
Kr	84 100.00	86 30.50	82 20.32	83 20.30	42 100.00
N ₂	28 100.00	14 7.20	29 0.80	—	—
Ne	20 100.00	22 9.90	21 0.30	—	—
NH ₃	17 100.00	16 80.00	15 7.50	14 2.20	18 0.40
NO	30 100.00	14 7.50	15 2.40	16 1.50	31 0.40
NO ₂	30 100.00	46 37.00	16 22.30	14 9.60	31 0.40
O ₂	32 100.00	16 11.40	34 0.40	33 0.10	—
SF ₆	127 100.00	89 26.30	108 8.90	51 7.60	54 7.40
Xe	132 100.00	129 98.30	131 78.77	134 38.82	130 15.17

注:1. 按占比例大小顺序取前 5 个;
2. 表中数据上排为离子质荷比,下排为对应的相对丰度(%)

第十三章 真空检漏技术和仪器

一、概 述

(一)真空系统中漏气、虚漏与抽气之间的平衡

真空系统中漏气流量的平衡表示式如下

$$p = \frac{1}{S}(Q_0 + \Sigma Q_i) + p_0 \quad (13-1)$$

式中 p ——系统达到的压力;
 p_0 ——真空泵的极限压力;
 S ——系统的有效抽速;
 Q_0 ——由系统外部流向系统内部的总漏率;
 ΣQ_i ——虚漏所形成的总“漏”率。

所谓虚漏,其来源是多方面的,如真空系统结构材料表面的出气,试验物或工件的出气,系统内各种材料的蒸气,气体通过器壁向系统内的渗透以及系统的死空间中气体的流出等。

检漏中应注意区分 Q_0 与 ΣQ_i 。相对虚漏 ΣQ_i 而言,漏气 Q_0 也可称为实漏。在不特别加以说明时,所说的漏气都是指实漏。

对于与真空泵隔离开的密封容器或器件(如电子管、半导体器件等)来说, $S = 0$, 这时若 $p_0 \ll p$, 则式(13-1)变成

$$p_t = p + \frac{1}{V} \left[Q_0 t + \Sigma \left(\int Q_i dt \right) \right] \quad (13-2)$$

式中 t ——封离后所经历的时间;
 V ——密封容器的总体积;
 p_t ——经历时间 t 后系统(或容器)中的压力;
 p, Q_0, Q_i 与式(13-1) 相同。

(二)最大允许漏率

真空系统或真空容器的漏气是绝对的,不漏气是相对的。真空检漏技术中所指的“漏”的概念,是和最大允许漏率的概念联系在一起的。

对于动态真空系统来说,只要真空系统的平衡压力能达到所要求的真空度,这时即使存在着漏孔,也可认为系统是不漏的。

对于静态真空系统来说,则要求在一定的时间间隔内,系统内的压力能维持在所允许的真空中度以下,同样也可认为系统是不漏的。

动态系统当 $p \gg p_0$ 时,式(13-1)可改写成

$$p = \frac{1}{S}(Q_0 + \Sigma Q_i) \quad (13-3)$$

因此,为了满足 $p_p \gg p$ (p_p 为工作压力),要求 Q_0 不大于 $\frac{1}{10} p_p S$ 。

静态系统(密封容器) 设 $\Sigma Q_i \ll Q_0$, 如果要求在存放时间 t 内容器压力不超过 p_t , 则要求

$$Q_0 \ll (p_t - p) \frac{V}{t} \quad (13-4)$$

各种真空装置的最大允许总漏率可参考表 13-1 来制订。

表 13-1 各种真空装置的最大允许总漏率

装 置	允许的总漏率 /Pa·L·s ⁻¹	装 置	允许的总漏率 /Pa·L·s ⁻¹
减压蒸馏、真空脱气、真空浓缩	10 ³	与原子能有关的装置和真空蒸发装置	10 ⁻³
减压干燥、真空浸渍、真空输送	10	真空冶炼、电气冷藏车、真空电气	10 ⁻⁴
真空蒸馏	10	回旋加速器	10 ⁻⁵
高真空蒸馏	1	高真空排气装置(如分子束外延设备)	10 ⁻⁶
简单的真空过滤和真空成形	1	真空绝热与宇宙模拟	10 ⁻⁷
冷冻干燥	1	小型超高真空装置	10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹
分子蒸馏	10 ⁻¹	封离的真空装置	10 ⁻⁸
带真空泵的水银整流器	10 ⁻²	电子管	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰

有些系统或零、部件,除了规定出允许的总漏率外,还要规定单个漏孔的漏率不得超过的限值。在某些场合下,如果漏出的物质对环境会造成污染时,要以漏出物质的最大允许量来决定所允许的漏率值。

(三)真空检漏的目的

对于大多数真空系统、容器、器件来说,如果真空抽不上去,首先应判断漏气是不是主要因素,然后确定是否需要进行检漏。

真空检漏就是用一定的手段将示漏物质加到被检工件的器壁的某一侧,用仪器或某一方法在另一侧怀疑有漏的地方检测通过漏孔逸出的示漏物质,从而达到检测目的。

检漏人员的职责是:在制造、安装、调试过程中,判断漏与不漏、漏率大小,找出漏孔的位置;在运转使用过程中监视真空装置可能发生的漏泄及其变化。

检漏程序:一般先进行总漏率的测定工作,只有当总漏率超出允许值后,再进行漏孔的定位工作。这是因为找出漏孔位置的工作一般比漏率测量工作更困难一些。当然这也不是绝对的,它与漏孔大小及具体的检漏方法有关。如用气泡法检漏能容易地找出较大漏孔的位置,而用这种方法测定其总漏率却并不容易。

二、漏孔、漏率及标准漏孔

(一)漏孔

真空技术中所讲的漏孔是指当封闭的容器内部与外部的压力或浓度不同时,可以使气体由器壁的一侧泄漏到另一侧去的小孔、缺陷或隙缝以及渗透元件或漏气装置。

最容易产生漏孔的情况是:各种焊接和封接存在缺陷;器壁材料有气孔、夹渣或裂缝;冷加工后出现的裂缝;密封圈不完善或受损伤;密封面加工粗糙或有划痕;密封圈压得不紧;受冷、

热和机械冲击后引起的裂纹以及材料受腐蚀后形成的漏点等。

漏孔的存在可能造成下列后果：

- ①盛介质的容器由于漏孔的存在可能造成材料损失或污染环境；
- ②由于漏孔的存在可能使周围的气体和其它物质进入真空容器，改变其原有的气体组分并使压力升高，从而破坏所要求的工作条件；
- ③由于漏孔产生的形变、应力集中、腐蚀中心致使容器损坏。

1. 真空容器或器件中的漏孔形式

真空容器或器件中的漏孔形式大致有以下几种：①细圆管状；②断面复杂的管状；③隙缝；④连在一起的多孔组织；⑤由细管或隙缝把空穴连接起来的组合结构。图 13-1 给出几种漏孔的实例。

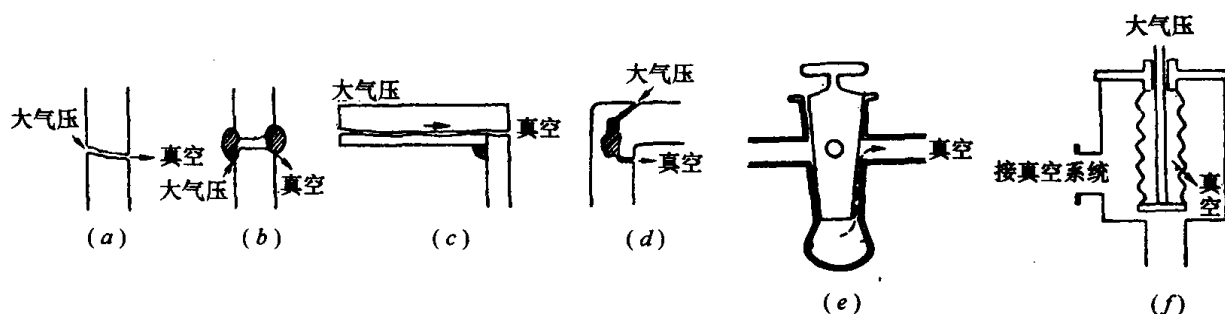


图 13-1 各种漏孔形式

2. 漏孔大小的表示方法

真空技术中所指的漏孔由于尺寸微小、形状复杂，无法用几何尺寸来表示其大小，所以一般用等效流导或者漏气速率（简称“漏率”）来表示其大小。

用漏率来表示漏孔的大小时，如果不加特别说明，则是指在标准条件下，露点温度低于 -25°C 的空气通过一个漏孔的流量。标准条件是：漏孔入口压力为 $100\text{kPa} (\pm 5\%)$ ，出口压力低于 1kPa ，温度是 $(23 \pm 7)^{\circ}\text{C}$ 。

3. 漏孔的气流特性

气体由高压端通过漏孔向低压端的流动可能包含有粘滞流、过渡流及分子流三种流动状态。对于均匀圆截面导管型漏孔来说，其漏率为：

$$Q = \left[\frac{\pi d^4 \bar{p}}{128 \eta L} + \frac{1}{6} \left(\frac{2\pi RT}{M} \right)^{1/2} \frac{d^3}{L} \left[\frac{1 + \left(\frac{M}{RT} \right)^{1/2} d \bar{p} / \eta}{1 + 1.24 \left(\frac{M}{RT} \right)^{1/2} d \bar{p} / \eta} \right] \right] (p_1 - p_2) \quad (13-5)$$

式中 d, L ——分别为圆管的直径和长度[m]；

M ——气体相对分子量[kg/mol]；

η ——气体粘滞系数[Pa·s]；

\bar{p} ——平均压力 $\bar{p} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ [Pa]；

p_1 ——圆管入口端的气体压力[Pa]；

p_2 ——圆管出口端的气体压力[Pa]；

R ——摩尔气体常数；

T ——环境温度[K]。

从式(13-5)不难看出,漏孔的漏率与下列因素有关:

- ① 漏孔的几何尺寸;
- ② 气体的相对分子量和粘滞系数;
- ③ 漏孔两端的压力;
- ④ 环境温度。温度不同,气体热平均速度就不同,漏率也就不同。

应该指出,式(13-5)是在假定温度改变时漏孔的几何尺寸不变的条件下推导出来的。实际上,当温度改变时漏孔的几何尺寸也会发生变化,从而导致漏率变化。因此,在使用实漏型标准漏孔时,要考虑温度对漏孔几何尺寸的影响。

当 $p_1 \gg p_2$ 时,如果令 $p_1 = p$, (13-5) 式可改写成

$$Q = \frac{1}{L} \left[\frac{a^2}{2} p^2 + \frac{bc}{f} p + \frac{b(f-c)}{f^2} \ln(1+fp) \right] \quad (13-6)$$

式中

$$a = \frac{\pi}{128} \frac{d^4}{\eta}, b = \frac{d^3}{6} \left(\frac{2\pi RT}{M} \right)^{1/2}$$

$$c = \frac{d}{\eta} \left(\frac{M}{RT} \right)^{1/2}, f = 1.24c$$

在 $p = 100\text{kPa}$, $T = 293\text{K}$ 的情况下,由(13-6)式可推导出空气通过漏孔的漏率为:

$$Q_A = \frac{1.33 \times 10^{-7}}{L} [5.4d^4 + 7.4d^3 + 0.074d^2 \ln(1+25d)] \quad (13-7)$$

Q_A 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$, L 的单位是 cm , d 的单位是 μm 。

在同样条件下,示漏气体通过漏孔的漏率应为

$$Q_A = \frac{1.33 \times 10^{-7}}{L} \left\{ 5.4 \frac{\eta_A}{\eta_t} d^4 + 7.4d^3 \left(\frac{M_A}{M_t} \right)^{1/2} + 0.074 \frac{M_A \eta_t}{M_t \eta_A} d^2 \ln \left[1 + 25d \frac{\eta_A}{\eta_t} \left(\frac{M_t}{M_A} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (13-8)$$

式中 M_A, M_t ——分别为空气的相对分子量与示漏气体的相对分子量;

η_A, η_t ——分别为空气的粘滞系数与示漏气体的粘滞系数。

当 $d \gg 10\mu\text{m}$ 时, $d^4 \gg d^3$, 由式(13-7)可以得到

$$Q_A = 7.2 \times 10^{-7} \frac{d^4}{L} \quad (13-7a)$$

当 $d < 1\mu\text{m}$ 时,由式(13-7)又可得到

$$Q_A \approx \frac{1.33 \times 10^{-7}}{L} [7.4d^3 + 0.074d^2 \ln(1+25d)] \quad (13-7b)$$

在 20°C , $p_1 = 100\text{kPa}$, $p_1 \gg p_2$ 时,理想圆管对空气的漏率见表 13-2。

表 13-2 理想圆管对空气的漏率 ($T = 293\text{K}$, $p_1 = 100\text{kPa}$, $p_1 \gg p_2$ 时)

$d/\mu\text{m}$	> 10		< 1	
L/cm	1	0.1	1	0.1
$Q_A/\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	$> 10^{-3}$	$> 10^{-2}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-5}$

4. 气体通过漏孔的时间

气体通过圆管状漏孔的平均速度 $\bar{v} = \frac{Q_A}{p} \frac{\pi d^2}{4}$ 。当漏孔直径 $d = 5\mu\text{m}$, 长度 $L = 0.5\text{cm}$, $p = 100\text{kPa}$ 时, $Q_A \approx 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$, $\bar{v} = 70\text{cm/s}$, 因此气体通过该漏孔的时间近似等于 $7 \times 10^{-3}\text{s}$ 。由此可见, 检漏时气体通过漏孔的时间一般来说是可忽略不计的。但是对于两侧为微小漏孔, 中间有一个小空间的那种组合式漏孔来说, 由于气体在小空间中建立平衡压力所需的时间(受真空时间常数 $(V \cdot \text{s}^{-1})$ 的限制)可能很长, 检漏中必须予以重视。例如, 当两端为直径 $d = 5\mu\text{m}$, 长度 $L = 0.5\text{cm}$ 的圆管形漏孔, 中间体积 $V = 1\text{cm}^3$ 时, 真空时间常数达 10^2s , 因此, 在使用喷吹法对这类漏孔进行检漏时, 喷吹时间需要很长, 否则灵敏度极低, 使漏孔检不出来。

(二) 漏率及漏率单位

漏率也叫漏气速率, 系指处于高压或高浓度下的气体, 在单位时间内通过漏孔流向低气压端(或低浓度端)的气体流量。

表示漏率单位的量纲是 $[\text{压力}] \cdot [\text{体积}] / [\text{时间}]$ 。常用的漏率单位是 $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

(三) 标准漏孔及其校准

1. 什么是标准漏孔

标准漏孔是指一个在给定条件下能向真空系统内提供已知的气体流量的装置。一般要指明这个气流量(即漏率)的气体种类、温度、压力条件。如不特别指明时, 就是指温度为 $23 \pm 7^\circ\text{C}$ 、入口压力为 $100\text{kPa} (\pm 5\%)$ 、出口压力低于 1kPa 时的干燥空气(露点温度低于 -25°C)的流量。

标准漏孔是用来校准检漏仪的灵敏度和标定检出漏孔的大小的。精密的标准漏孔也可用于真空泵抽速的测量及真空规的校准。

2. 标准漏孔的分类及特点

标准漏孔的分类方法有两种:

一种分类方法是把标准漏孔分成实漏型的和虚漏型的。属于实漏型的标准漏孔有金属压扁型标准漏孔、玻璃-铂丝型标准漏孔、玻璃毛细管型标准漏孔等。属于虚漏型的标准漏孔有薄膜渗氮型标准漏孔和放射性漏孔(即所谓的“绝对漏孔”)等。

另一种分类方法是把标准漏孔分成带气室型和不带气室型的两种。氮质谱检漏仪所备用的供校准用的标准漏孔是用带气室型标准漏孔, 气室内充有氮气。不带气室的漏孔在使用时需要有一个气体供应装置, 如配气系统等。

校准检漏仪用的标准漏孔应满足下列几项要求:

- ①具有或者易于调节到与被校准的检漏仪灵敏度相匹配的漏气量;
- ②标准漏孔的校准值要具有足够的准确度, 能满足检漏仪灵敏度校准的精度要求;
- ③在长时间使用中漏率稳定;
- ④容易校准, 使用方便, 抗污染力强。

3. 几种常用的标准漏孔

(1) 薄膜渗氮型标准漏孔

最早使用的薄膜渗氮型标准漏孔是石英薄膜渗氮型标准漏孔, 它是国外用于校准氮质谱检漏仪灵敏度的最通用的一种标准漏孔。

带氦室的石英薄膜渗氦漏孔(如图 13-2 所示)的漏率一般为 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ (氦室内氦气压力为 100kPa 左右)。

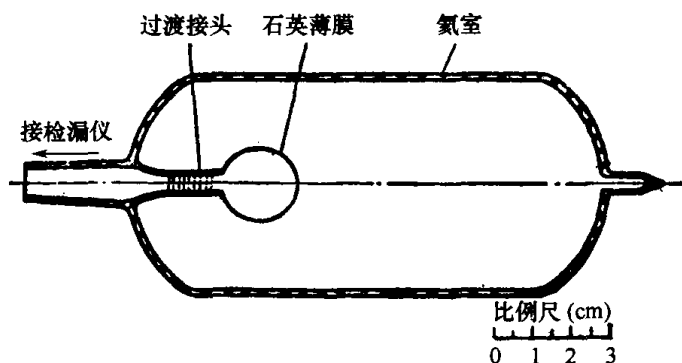


图 13-2 带氦室的石英薄膜漏孔

国内许多单位曾研制过此种漏孔,它对氦气的漏率可用下式表示

$$Q_{\text{He}} = K_0 S \frac{\Delta p}{d} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (13-9)$$

式中 K_0 ——常数 [$\text{L}\cdot\text{mm}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$];
 d ——石英薄膜的厚度 [mm];
 E ——氦在石英中的渗透激活能 [J/mol];
 Δp ——石英薄膜两侧的氦气压强差 [Pa];
 R ——摩尔气体常数 [$8.3\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$];
 T ——环境温度 [K];
 S ——石英薄膜面积 [cm^2].

由式(13-9)不难看出,选择不同的石英薄膜的厚度、面积和充入的氦压力,就可制成不同漏率的标准漏孔。

由式(13-9)也可以看出漏率与温度成指数关系。由于温度对漏率影响很大,使用时应注意修正由温度变化所带来的影响。利用漏率与温度有关这一性质可把石英薄膜渗氦型漏孔做成漏率可调的漏孔。例如,一支在 0°C 时漏率 $Q_{\text{He}} = 1.14 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 的石英渗氦漏孔,在 200°C 时,漏率 $Q_{\text{He}} = 6.8 \times 10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,变化近两个数量级,但是,这个变化过程很慢。

当石英薄膜渗氦型漏孔进气端的氦压力改变时,要重新建立稳定的氦流量需要经过比较长的时间,因此,这种漏孔大都做成带氦室的。

用硬质玻璃薄膜也可制成渗氦漏孔,其漏率为 $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

(2)金属压扁型标准漏孔

此种漏孔通常是用无氧铜管或者可伐管用模具压制而成,制做简单,性能稳定,不易堵塞,漏率为 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。具体结构如图 13-3 所示。

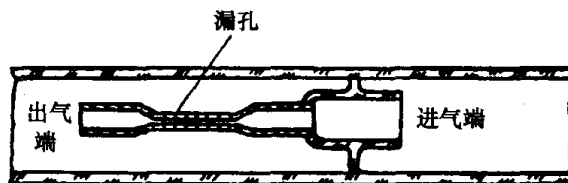


图 13-3 金属压扁型标准漏孔

(3) 玻璃铂丝型标准漏孔

利用铂丝与硬质玻璃的非匹配封接可得到漏率恒定的漏孔,具体结构如图 13-4 所示。一般来说,当铂丝直径 $d = 0.1\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$,封接长度 $l = 5\text{mm} \sim 10\text{mm}$ 时,可以得到漏率为 $10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 数量级的分子流特性的漏孔。设进气端压力为 p_1 ,漏气端压力为 p_2 ,若 $p_1 \gg p_2$,则漏率公式是

$$Q = \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} \left(\frac{KT}{m} \right)^{1/2} \frac{\delta^2 d}{L} G p_1 \quad (13-10)$$

式中 G ——修正系数;

δ ——铂丝与玻璃间的圆环间隙。

如果

$$\frac{d}{d + 2\delta} \rightarrow 1$$

则

$$G = \frac{3}{8} \left[1 + \ln \frac{2\pi d}{\delta} \right]$$

对于 DW-211 型玻璃,当 $p_1 = 100\text{kPa}$, $T = 293\text{K}$ 时,对空气的漏率

$$Q_A = 3.72 \times 10^6 \left(1 + \ln \frac{2\pi d}{\delta} \right) \frac{\delta^2 d}{L} \quad (13-11)$$

其中 $\delta = 1.32 \times 10^{-3} d$ 。

很明显,此种漏孔的漏率与其几何尺寸有很大关系。

可用调节漏孔进气端气体压力的办法来改变这种标准漏孔的漏率大小。当漏气端气体压力变化时,漏孔建立稳定漏率的时间极为短促。

当温度改变时,此种漏孔的漏率变化不大,当温度在 $0 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内变化时,漏率变化只有 20%。若 20°C 时的漏率为 $Q_{A,20^\circ\text{C}}$,则在任意温度 $t^\circ\text{C}$ 时的漏率可以写成

$$Q_{A,t^\circ\text{C}} = f(t) Q_{A,20^\circ\text{C}} \quad (13-12)$$

其中

$$f(t) = \left(\frac{293}{273 + t} \right)^{1/2} \left(\frac{500 + 20 - t}{500} \right)^2$$

$f(t)$ 曲线画在图 13-5 上。

由式(13-10)可知漏率与气体质量的平方根成反比。假如漏孔对于空气的漏率为 Q_A ,在同样的温度和压力下,对氦气的漏率为 Q_{He} ,二者关系是

$$Q_{\text{He}} = \left(\frac{29}{4} \right)^{1/2} Q_A \approx 2.7 Q_A$$

实践证明此种漏孔容易堵塞。对于被水蒸气堵塞的漏孔,在漏孔两端同时抽真空的条件下进行烘烤便可以使漏孔恢复。

(4) 玻璃毛细管型标准漏孔

此种漏孔是用局部拉细的玻璃毛细管制成的,漏率为 $10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$,漏率稳定,结构如图 13-6 所示。

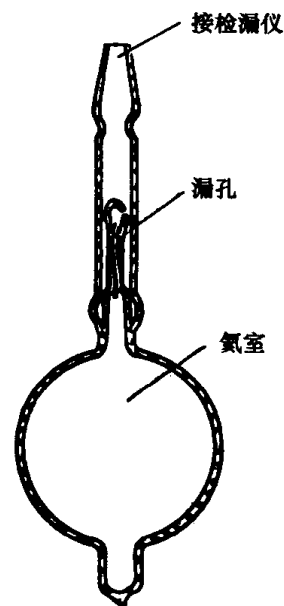


图 13-4 玻璃铂丝型标准漏孔

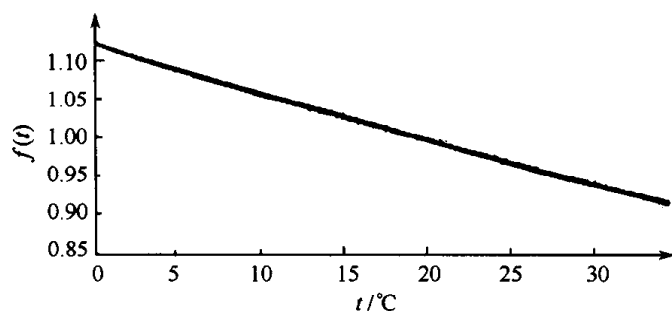
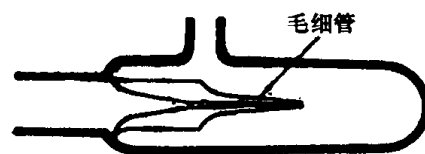

 图 13-5 $f(t)$ 曲线


图 13-6 玻璃毛细管型标准漏孔

(5) 多孔金属型标准漏孔

此种漏孔一般是用金属粉末压制而成的。例如,有一种漏孔是用 50% 的铝粉与 50% 的焊剂压制成的(压力为 $2.07 \times 10^2 \text{ kPa}$, 它的结构坚固, 制做容易, 漏率为 $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 左右)。

(6) 放射漏孔

它是一种绝对漏孔, 具体结构如图 13-7 所示。其原理是: 由钋放射出的 α 粒子在俘获电子后可成为中性氦原子。由放射性活度为 $3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$ 的钋所产生的氦流量为 $1.42 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 因此, 只要测出放射性活度就可知道漏孔的绝对漏率, 而无需校准。已制成功 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 和 $1 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 的放射性漏孔, 误差为 20%。

(7) 其它类型的标准漏孔

如人为的玻璃裂隙, 可加热的毛细管等。在检漏技术中很少使用。

(8) 带气室的标准漏孔

除放射性漏孔外, 上面介绍的标准漏孔都是开放型的, 在使用时要提供气源。为了使用方便起见, 有时也把一些开放型漏孔加上一个气室, 做成漏率稳定、使用方便的带气室的漏孔。例如, 普通的氦质谱检漏仪校准用的带氦室的渗氦型漏孔(漏率 $Q_{\text{He}} \approx 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 数量级), 在容积为 0.5L 的氦室内充入 100kPa 氦气后可长期使用, 漏率无太大变化。经过计算, 由于氦气通过薄膜渗透出去使氦室内氦气压力下降而引起的漏率变化, 在 50 年内不超过 5%。

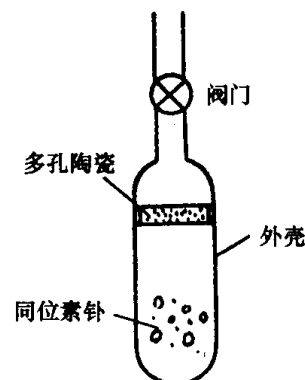


图 13-7 放射性漏孔

4. 标准漏孔的校准

标准漏孔的漏率一般都小于 $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 它的校准属于小流量测量问题, 有五种实验测定的方法: 已知流导的两端压降法, 恒定抽速的压力测量法, 压力容积法, 质谱计比较法: 放射性漏孔的 α -射线活度测量法。常用的校准方法是压力容积法和质谱计比较法。现分别介绍如下:

(1) 压力容积法

压力容积法的原理简述如下: 一个抽空了的封闭容器如有漏孔, 气体便通过漏孔进入容器内, 此时容器中包含的气量 pV 必然随时间而增加, 如果没有虚漏时, 漏孔漏率 $Q = \Delta(pV) / \Delta t$, Δt 为测量的时间。若压力 p 保持不变, 改变体积, 测量体积随时间的变化, 则 $Q = p \Delta V / \Delta t$, 这就是所说的定压变容法, 具体装置如图 13-8(a) 所示。此方法操作困难, 设备比较复杂, 因此用得不多。如果保持容器体积不变, 测量压力变化, 则 $Q = V \Delta p / \Delta t$, 这就是一般常采用的定容变压法, 定容变压法即 $p \sim t$ 曲线法或升压法, 其装置如图 13-8(b) 所示。校准过程如

下:首先转动阀门 S_1 , 利用机械真空泵将漏孔进气端抽空(使 p_1 小于 1.33kPa), 用扩散泵抽体积 V , 并将包括体积 V 在内的高真空系统部分彻底烘烤除气, 使其达到极限真空, 然后转动阀门 S_1 , 在漏孔进气端送入压力为一个大气压的校准气体, 当系统高真空部分压力 p_2 稳定后, 关阀门 S_2 , 此后由于漏孔漏进气体, 体积 V 中的压力 p_2 随时间上升, 如图 13-9(a) 所示。若漏孔很小, 时间间隔很短, 并保持 $p_2 \ll 100\text{kPa}$, 因此漏孔的漏率可用下式表示

$$Q = V \frac{\Delta p_2}{\Delta t} \frac{273}{T} \quad (13-13)$$

式中 Q —— 0°C 时漏孔的漏率 [$\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$];

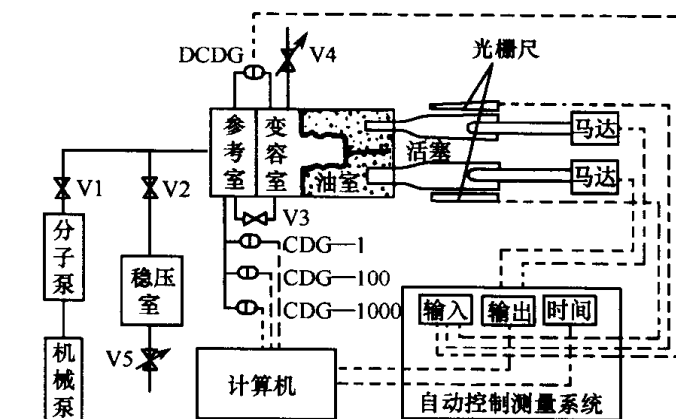
V ——封闭部分的体积 [L];

Δt ——测试的时间间隔 [s];

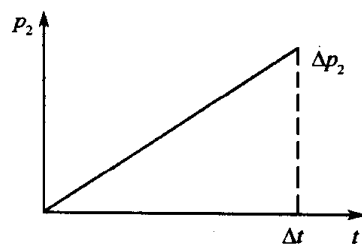
Δp_2 ——在 Δt 时间内, 体积 V 中的压力变化值 [Pa];

T ——测试时的环境温度 [K].

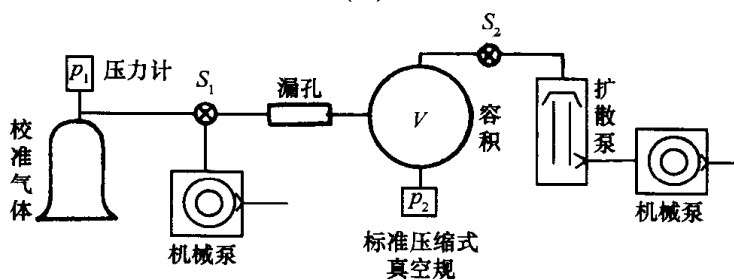
当系统内有放气和漏气源时, $p-t$ 曲线如图 13-9(b) 所示, 为修正系统固有出气及漏气



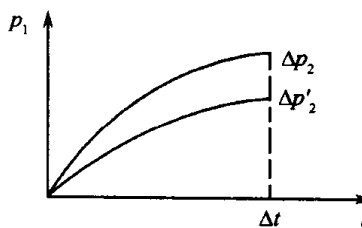
(a)



(a)



(b)



(b)

图 13-8 压力容积法所用装置

(a) 定压变容法; (b) 定容变压法。

图 13-9 $p-t$ 曲线图

造成的误差, 在被校漏孔的进气端抽空的条件下, 测出封闭体积内的压力—时间曲线 p'_2-t , 此即系统的固有出气和漏气曲线。若测 p'_2-t 时的环境温度为 T' , 修正后的漏率为

$$Q = 273 \frac{V}{\Delta t} \left(\frac{\Delta p_2}{T} - \frac{\Delta p'_2}{T'} \right) \quad (13-14)$$

$p-t$ 曲线法操作简单, 测量范围宽, 精度高。采用水银压缩式真空计作压力指示的校准系统如图 13-10 所示。图 13-11 给出了用电离真空规做压力指示的标准漏孔校准系统。

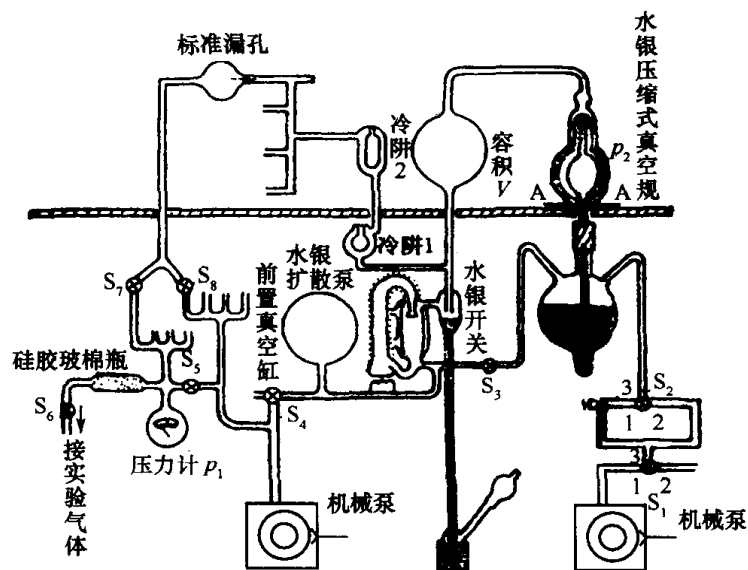


图 13-10 用压缩式真空计的校准系统

(2) 质谱计比较法

质谱计比较法具体装置如图 13-12 所示。假定用一个带氮室的已知漏率为 Q_1 的漏孔 L_1 来校准带氮室的薄膜漏孔 L_2 ，校准过程如下：将氮质谱检漏仪调到氮峰上，关阀门 S_1 和 S_2 ，记下输出仪表读数 N_0 ；打开阀门 S_1 ，记下输出仪表读数 N_1 ；关阀门 S_1 ，打开阀门 S_2 ，记下输出仪表读数 N_2 。则 L_2 的漏率 Q_2 为

$$Q_2 = Q_1 \frac{N_2 - N_0}{N_1 - N_0} \quad (13-15)$$

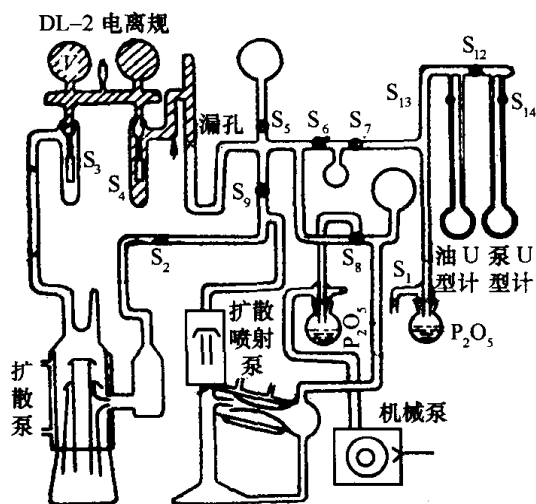


图 13-11 用电离真空计的校准系统

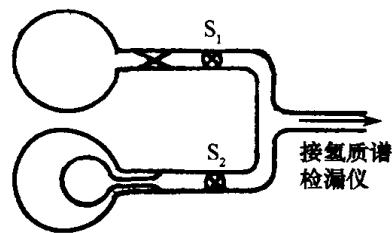


图 13-12 质谱计比较法示意图

5. 使用标准漏孔的注意事项

①标准漏孔漏率的标称值是指环境温度为 $(23 \pm 7)^\circ\text{C}$ ，漏孔进气端的压力为 $100\text{kPa} (\pm 5\%)$ 时干燥空气通过漏孔的漏率。如果使用条件与上述条件不同，对于满足分子流条件的实漏型漏孔，可按式换算

$$Q = Q_{\text{标}} \frac{273 + t}{296} \left(\frac{29}{M} \right)^{1/2} \frac{p}{p_A} \quad (13-16)$$

式中 p ——漏孔进气端的气体压力[Pa];
 p_A ——标准大气压力[Pa];
 t ——使用时的环境温度[℃];
 M ——进气端气体的摩尔质量[g·mol];
 $Q_{\text{标}}$ ——漏孔漏率的标称值[Pa·L/s]。

- ②避免油脂、水蒸气、灰尘及其它微粒进入漏孔造成漏孔局部的或完全的堵塞。
- ③不使用时最好将漏孔放在真空干燥箱内,或用脱脂纱布包好,妥善保存。
- ④尽量避免在振动大、温度变化较大的条件下运用,以免振裂、炸裂。
- ⑤定时校准。

三、检漏方法和仪器

(一)检漏方法的分类

检漏方法和仪器是很多的。根据所使用的设备可分为氦质谱检漏仪法、卤素检漏仪法及其它简易检漏法。根据被检容器所处的状态又可分为压力检漏法与真空检漏法。下面我们根据后一种分类法分别加以说明。

1. 压力检漏法

将被检容器充入一定压力的示漏物质,如果容器上有漏孔,示漏物质便从漏孔漏出,用一定的方法或仪器在容器外检测出从漏孔中漏出的示漏物质,从而判定漏孔的存在、漏孔的具体位置及漏率大小。属于压力检漏法的有:

- ①水压法;
- ②压降法;
- ③听音法;
- ④超声法;
- ⑤气泡法(水泡法和皂泡法);
- ⑥卤素检漏仪吸嘴法;
- ⑦氨检漏法;
- ⑧放射性同位素气体法;
- ⑨氦质谱检漏仪吸嘴法。

2. 真空检漏法

被检查的容器与检漏仪器的敏感元件均处于真空中,示漏物质施加在被检容器外面,如果被检容器有漏孔,示漏物质便通过漏孔进入容器和检漏仪器敏感元件所在的空间,由敏感元件检测出示漏物质来,从而可以判定漏孔的存在、漏孔大小和它的具体位置。属于真空检漏法的有:

- ①静态升压法;
- ②放电管法;
- ③高频火花检漏法;
- ④真空规检漏法;
- ⑤氢-钯法;
- ⑥卤素检漏仪内探头法;

⑦离子泵检漏法；

⑧氦质谱检漏法。

3. 其它方法如荧光法、放射性同位素法

压力检漏法与真空检漏法的检漏特点、现象、检漏设备及最小可检漏量示于表 13-3 和表 13-4。

本章主要介绍上述方法和仪器。

表 13-3 压力检漏法

检漏方法	工作条件	现 象	设 备	最小可检漏率 /Pa·L·s ⁻¹	注
水压法		漏水	人眼	$1.3 \sim 5.3 \times 10^{-4}$	
压降法	充 3 个大气 压的空气	压力下降	压力计	1.3	
听音法	同上	咝咝声	人耳	5.3	也可用听诊器
超声法	同上	超声波	超声波检测器	1.3	
气泡法	同上	水中气泡	人眼	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	
	同上	水中气泡	人眼	10^{-6}	24h 积累
	同上	涂抹肥皂液发生皂泡	人眼	6.7×10^{-3}	
氦检漏法	充 3 个大气 压的氦气	溴代麝香草酚蓝试带 变色	人眼	8×10^{-5}	观察时间 20s
	同上	溴酚蓝试纸变色	人眼	10^{-8}	24h 积累
卤素检漏仪吸嘴法		卤素检漏仪读数变化	卤素检漏仪	$10^{-3} \sim 10^{-7}$	可与空气混合充入
放射性同位素气体法			闪烁计数器	1.3×10^{-4}	
氦质谱检漏仪吸嘴法			氦质谱检漏仪	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	可与空气混合充入

表 13-4 真空检漏法

检 漏 方 法	工作压力 /Pa	现 象	设 备	最小可检漏率 /Pa·L·s ⁻¹
静态升压法		抽真空后与真空泵 隔离,压力上升	真空规	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
放电管法		放电颜色改变	放电管	$1 \sim 10^{-1}$
高频火花检漏法	$10^3 \sim 6.7 \times 10^{-1}$	亮点、放电颜色改变	高频火花检漏器	$1 \sim 10^{-1}$
真空规检漏法	热传导真空规法	真空规读数变化	热偶或电阻真空规	10^{-3}
	电离真空规法		电离真空规	10^{-6}
	差动热传导真空规法		热传导真空规差动组合	10^{-4}
	差动电离真空规法		电离真空规差动组合	10^{-7}
	具有吸附阱的热传导 真空规法		热传导规、液氮冷却活 性炭阱	10^{-4}
	具有吸附阱的电离真 空规法		冷阴极电离规、液氮冷 硅胶阱	$10^{-8} \sim 10^{-10}$

(续)

检漏方法	工作压力/Pa	现象	设备	最小可检漏率 /Pa·L·s ⁻¹
氢-钯法	6.7~10 ⁻⁵	氢气通过钯管进入真空规,引起读数变化	钯管、电离规	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁸
卤素检漏仪内探头法	10~10 ⁻¹	输出仪表读数变化	卤素检漏仪	10 ⁻⁴ ~4×10 ⁻⁶
离子泵检漏法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁷	离子流变化	离子泵	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁹
氮质谱检漏法	10 ⁻²	输出仪表读数及声响频率变化	氮质谱检漏仪	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹¹

(二)气泡检漏法

气泡检漏法属于压力检漏法。它适用于允许承受正压的容器、管道、零部件等的气密性检验。此种方法简单、方便、直观、经济。

气泡检漏法是在被检件内充入一定压力的示漏气体后放到液体中,气体通过漏孔进入周围的液体形成气泡,气泡形成的地方就是漏孔所在位置,根据气泡形成的速率、气泡大小以及所用的气体和液体的物理性质,可以大致估算出漏孔的漏率。

1. 打气试漏法

在被检容器充入高于一个大气压的气体后,将该容器浸入液体中进行检漏,此时液面处的压力是一个大气压。这是常用的一种方法,俗称打气试漏法。

(1)基本理论

假定漏孔是一个半径为 r [m] 长度为 L [m] 的毛细管,示漏气体通过此毛细管的漏率是

$$Q_t = \frac{3.04 \times 10^5 \Delta p r^3}{(L + 8r/3)} \left[\frac{1.28 \times 10^{-3} r \bar{p}}{\eta_t} + \left(\frac{T}{M_t} \right)^{1/2} \right] \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-17)$$

式中 Δp ——毛细管两端的压力差 $(p_t - p_b)$ [Pa];

\bar{p} ——平均压力 $\left[\frac{1}{2}(p_t + p_b) \right]$ [Pa];

T ——环境温度[K];

M_t ——示漏气体的相对分子量;

p_t ——毛细管一端示漏气体的压力[Pa];

p_b ——毛细管另一端的气泡内的压力[Pa];

η_t ——示漏气体的粘滞系数[Pa·s]

$$p_b = p_F + h\rho g + \frac{4\sigma}{D} \quad [\text{Pa}] \quad (13-18)$$

式中 p_F ——液体表面上的气压[Pa];

h ——气泡所在部位与液面间的距离[m];

ρ ——液体密度[kg/m³];

g ——重力加速度[m/s²];

σ ——液体的表面张力系数[N/m];

D ——气泡直径[m]。

设气泡形成速率为 n/s , 对应的漏气速率为

$$Q_t = \frac{n}{6} \times 10^3 \pi D^3 p_b \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-19)$$

在粘滞流时漏孔对空气的漏率 Q_A 为

$$Q_A = \frac{n}{6} \times 10^3 \pi D^3 p_b \frac{\eta_t}{\eta_A} \frac{p_A^2}{p_t^2 - p_b^2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-20)$$

在分子流时漏孔对空气的漏率 Q_A 为

$$Q_A = \frac{n}{6} \times 10^3 \pi D^3 p_b \frac{p_A}{p_t - p_b} \left(\frac{M_t}{M_A} \right)^{1/2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-21)$$

上述式中 p_A 为大气压力。

当 $p_F = p_A$ 时,在一般情况下 $p_A \gg h\rho g + \frac{4\sigma}{D}$,由(13-18)式可知 $p_b \approx p_A$,因此式(13-20)和式(13-21)可分别变为

$$Q_A = \frac{n}{6} \times 10^3 \pi D^3 p_A \frac{\eta_t}{\eta_A} \frac{p_A^2}{p_t^2 - p_A^2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-20a)$$

$$Q_A = \frac{n}{6} \times 10^3 \pi D^3 p_A \frac{p_A}{p_t - p_A} \left(\frac{M_t}{M_A} \right)^{1/2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-21a)$$

气泡形成速率是

$$n = 4.76 \times 10^{10} \frac{p_t - p_b}{p} \frac{r^2 \rho}{\sigma L} \left[\frac{6.4 \times 10^{-6} (p_t + p_b)}{\eta_t} + \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \right] \quad [\text{s}^{-1}] \quad (13-22)$$

能够形成气泡的毛细管的最小半径是

$$r_0 = \frac{2\sigma}{p_t - (p_A + \rho h g)} \quad [\text{m}] \quad (13-23)$$

气泡直径与毛细管半径的关系为

$$D = \left(12 \frac{r\sigma}{\rho g} \right)^{1/3} \quad [\text{m}] \quad (13-24)$$

(2) 灵敏度

从上面的理论公式中可以看出:液体表面张力系数越小,示漏气体压力越高,形成气泡的地方距液面距离越近,可检示的漏孔就越小,则灵敏度也越高。示漏气体的粘滞系数 η_t 越小,分子量 M_t 越小,灵敏度也越高。

打气试漏中,大多数用水作显示液体,示漏气体用空气。此方法的灵敏度可达 $10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

(3) 检漏时的注意事项

①首先要弄清楚被检件能否承受正压,能承受多大压力等问题,以便决定是否可以采用打气试漏法以及可以充入多大压力的气体。

②检漏前要细致、认真地清洗焊缝,清除焊渣、油污和粉尘。

③检漏场地的光线要充足,水槽内的背景要暗,水要清洁透明,水面上不要有汽雾。

④被检件一定要先充气,然后放入水中,否则如果有大的漏孔,水可能进入被检容器,小孔可能被水堵塞。放入水中之前先用听音法检查有无大漏,排除大漏后再放入水中,否则将会影响小漏孔的检测。

⑤被检件刚放入水中时,在被检件的表面上可能出现气泡,如果把这些气泡抹去或者捅破后气泡不再出现的话,可以判断原来产生气泡的地方并没有漏孔。如果气泡是有规律地连续

不断地出现的话,产生气泡的地方就有漏孔存在了。

⑥被检件在水中要放稳定,等水面静下来后再行观察。

⑦被检部位应尽可能地接近水面。

⑧发现漏孔要及时做上标记。有大漏孔时,要修补后再进行小漏孔的检查。

2. 外真空法

当充有示漏气体的密封被检容器(示漏气体压力为 p_t)放入液体中以后,将液面上方的空间抽成真空,如果被检容器上有漏孔,漏孔处就更容易形成气泡,观察气泡便可检查出漏孔来,此即外真空法。

此时, $p_F \approx 0$, 式(13-18)便变成

$$p_b = \frac{4\sigma}{D} + \rho hg \quad (13-25)$$

若 $p_t \gg p_b$, 由式(13-20)及式(13-25)可以得出在粘滞流时漏孔对空气的漏率 Q_A

$$Q_A = 16.6 \times \pi D^3 n \left(\frac{4\sigma}{D} + \rho hg \right) \frac{\eta_t}{\eta_A} \frac{p_A^4}{p_t^2} \quad (13-26)$$

由式(13-21)及式(13-25)同样可以得出在分子流时漏孔对空气的漏率 Q_A

$$Q_A = 16.6 \times \pi D^3 n \left(\frac{4\sigma}{D} + \rho hg \right) \frac{p_A}{p_t} \left(\frac{M_t}{M_A} \right)^{1/2} \quad (13-27)$$

此方法可比打气试漏法的灵敏度提高几十倍。

有人曾用此方法对扩散泵入口法兰上的内焊缝进行过检漏。入口法兰盘与泵体焊接时,外侧用断续焊,里面用连续焊。考虑到用氦质谱检漏法检漏时,从外面喷氦,很难确定内焊缝上的漏孔的位置,于是使用气泡法,泵内注入适量的泵油,泵口用一个有机玻璃盲法兰和橡胶“O”圈来密封,用机械泵将该泵体抽空,等泵油中无气泡以后,将泵体倾倒使泵油盖住被检焊缝,此时如发现气泡就可找出漏孔。

3. 热槽法

被检容器充入压力为 p_1 、温度为 T_1 的气体后封闭起来,再放到预热过的液体中,如果平衡温度为 T_2 ,被检容器内的气体压力便变到 p_2 ,且

$$p_2 - p_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} p_1 \quad (13-28)$$

因为 $T_2 > T_1$, 则 $p_2 > p_1$, 如果 p_2 能大于液体内的压力,这相当于给被检容器内充入了高压气体,有漏孔时就可能在液体中形成气泡从而被检查出来。有关的公式与打气试漏法类同。

例如,在 20°C 时容器充入 100kPa 的空气后,放到水中加热到 80°C , 则 $p_2 \approx 120\text{kPa}$, 就有可能检出 $10^{-2}\text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔来。

此方法使用中的注意事项与打气试漏法相同。此外,要注意液体温度不得超过沸点。

4. 皂泡法

此方法是打气试漏法的一种。对放到水槽内不大方便的管道和容器进行检漏时,先在被检件内充入高于一个大气压的气体,然后在怀疑有漏孔的地方涂抹肥皂液,形成肥皂泡的部位便是漏孔存在的部位。

在检漏时应注意肥皂液稀稠得当。太稀了易于流动和滴落而造成误检,太稠了透明度差容易漏检并且所混入的气体也可能形成泡沫而造成误检。

此方法的灵敏度为 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 数量级。

(三)放电管法与高频火花检漏器

放电管法应用了由于示漏气体通过漏孔进入抽空了的容器后,使放电管内放电光柱的颜色发生变化的现象来判断漏孔的存在。为了便于观察放电光柱的颜色,放电管的管壳采用玻璃泡壳。对于用放电管指示前级真空的真空系统来说,用此方法进行检漏是很方便的。它适用的压力范围为 $1\text{Pa}\sim 10^2\text{Pa}$ 在此范围内空气的放电颜色为玫瑰红色,示漏物质进入放电管后,放电光柱的颜色可参考表 13-5。此方法的灵敏度为 $1\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

表 13-5 各种气体和蒸气的辉光放电颜色

气 体	放 电 颜 色	气 体	放 电 颜 色
空 气	玫 瑰 红	水 银	蓝 绿
氮 气	金 红	水	天 蓝
氧 气	淡 黄	真空油脂	淡蓝(有荧光)
氢 气	浅 红	酒 精	淡 蓝
二氧化碳	白 蓝	乙 醚	淡 蓝 灰
氦 气	紫 红	丙 酮	蓝
氟 气	鲜 红	苯	蓝
氩 气	深 红	甲 醇	蓝

高频火花检漏器也叫高频火花真空测定仪,可用于玻璃真空容器的检漏与真空度测定。它的原理图如图 13-13 所示,当接通开关 K 时,在放电簧 F 处便产生高频火花。当放电簧与玻璃的真空容器接近时,在容器内激起高频放电,如果放电簧沿玻璃表面移动,当其尖端距表面 1cm 左右时,如果没有漏孔,则会在玻璃表面形成散开的杂乱火花,如果玻璃壁有漏孔,则可形成长而明亮的火花束,束的末端指向漏孔。

高频火花检漏仪在玻璃容器内激发放电的颜色与放电管相同,因此,与放电管一样也可根据放电颜色的改变进行检漏。

高频火花检漏仪不能直接用来检金属容器和管路的漏孔,因为高频火花在金属表面被短路,不能使容器内部激发放电。此时应该用真空胶管把一段玻璃管接到金属真空系统上,用高频火花检漏仪在玻璃管内激起放电,然后在系统怀疑有漏孔的地方施以示漏物质,观察玻璃管内放电颜色有无变化,从而判断有无漏孔及漏孔位置。

高频火花检漏仪的工作压力范围为 $10\text{kPa}\sim 0.5\text{Pa}$,灵敏度为 $1\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

使用注意事项:放电簧不要长时间停在一处,因为这样会将玻璃壁打穿而造成漏孔。放电簧不要接近金属架或其它金属零部件,以免发生触电事故。

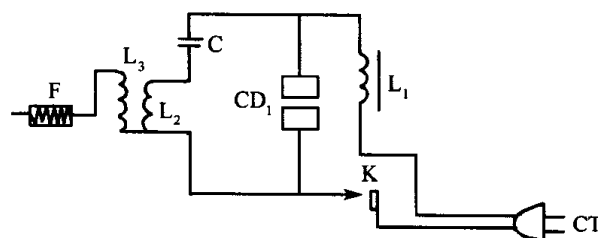


图 13-13 高频火花检漏器原理图

C—电容器;CD—接触器;CT—电源插头;
K—开关;L₁—振动线圈;L₂—谐振线圈;
F—放电簧;L₃—高压线圈。

(四)真空规检漏法

1. 热传导真空规法

热传导真空规(热阻真空规和热偶真空规)是基于低压力下气体热传导与压力有关的性

质来测量真空系统内的压力的。此外,还可以利用热传导真空规的读数不仅与压力有关,而且还与气体种类有关的性质来进行检漏。当示漏气体通过漏孔进入真空系统时,不但改变了系统内的压力,也改变了其中的气体成分,使热传导真空规读数发生变化,据此可检示漏孔的存在。

当漏孔处施以 100% 浓度的示漏气体时,热传导真空规的读数变化为

$$\Delta E = G \frac{q_A}{S_A} \left[\frac{q_t}{q_A} \frac{S_A}{S_t} \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t - \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_A \right] \sqrt{T} (T_2 - T_1) \quad (13-29)$$

式中 G ——常数;

q_A ——漏孔对空气的漏率;

q_t ——漏孔对示漏气体的漏率;

S_A ——系统对空气的抽速;

S_t ——系统对示漏气体的抽速;

c_V ——气体的热容;

M ——气体的相对分子量;

T ——环境温度;

$T_2 - T_1$ ——规管温差;

下标“A”代表空气;“t”代表示漏气体。

当抽速受流阻限制时,对于分子流漏孔来说

$$\Delta E \propto A' \left[\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t - \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_A \right] \sqrt{T} (T_2 - T_1) \quad (13-30)$$

可见读数变化(即灵敏度)取决于 $\left[\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t - \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_A \right]$ 和 $(T_2 - T_1)$ 。各种示漏气体的 $\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t$ 值列于表 13-6 内。

表 13-6 各种示漏气体的 $\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t$ 值

气 体	比热容 $c/[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	$\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right) / [J \cdot kg^{-1/2} \cdot K^{-1}]$	$\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t - \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_A / [J \cdot kg^{-1/2} \cdot K^{-1}]$
氩	0.523×10^3	105	-65
氧	0.921×10^3	164	-6
空 气	1.00×10^3	170	0
四氯化碳	0.553×10^3	217	47
水	2.01×10^3	270	70
丙 酮	1.45×10^3	350	180
乙 醇	1.68×10^3	354	189
乙 醚	1.93×10^3	524	354
氢	1.42×10^4	634	464

当 $\left[\left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_t - \left(\frac{c_V}{\sqrt{M}} \right)_A \right]$ 为负值时(即检漏时信号的变化为负值),表头读数下降。选用与

空气的 $\left(\frac{cV}{\sqrt{M}}\right)_A$ 差值较大的物质作示漏物质可提高检漏灵敏度。如, 选用氢气要比选用乙醇的检漏灵敏度为高。此外, 还应选用易于通过漏孔, 系统对其抽速又低的物质作示漏物质。适当提高热传导真空规的加热电流, 可使 $(T_2 - T_1)$ 加大, 也可提高灵敏度。

2. 电离真空规法

大多数高真空系统上都带有电离真空规, 此时也可用它来进行检漏。示漏物质通过漏孔进入系统后, 规管离子流的变化是

$$\Delta I_i = \left(\frac{K_t q_t}{S_t} - \frac{K_A q_A}{S_A} \right) I_e \quad (13-31)$$

式中 K_t 和 K_A 分别代表规管对示漏气体和空气的灵敏度常数, I_e 为灯丝发射电流, 其余符号与式(13-29) 相同。最小可检漏率为

$$q_{A,\min} = \frac{Q_0}{1 - \alpha} \left(\frac{\Delta I_i}{I_0} \right)_{\min} \quad (13-32)$$

式中 Q_0 ——检漏前系统中气体的总流量, $Q_0 = S_A p_0$;
 p_0 ——检漏前系统中的气体压力

$$I_0 = K_A I_e p_0$$

$\left(\frac{\Delta I_i}{I_0} \right)_{\min}$ —— 最小可检测的本底离子流的相对变化值。

当漏孔的气流特性为分子流时

$$\alpha = \left(\frac{M_A}{M_t} \right)^{1/2} \left(\frac{S_A}{S_t} \right) \left(\frac{K_t}{K_A} \right) \quad (13-33)$$

当抽速受流阻限制时

$$\alpha = \frac{K_t}{K_A} = \beta \quad (13-34)$$

β 是规管的相对灵敏度, 将式(13-34) 代入式(13-32) 可得

$$q_{A,\min} = \frac{Q_0}{1 - \beta} \left(\frac{\Delta I_i}{I_0} \right)_{\min} \quad (13-35)$$

由式(13-35) 可见, 本底流量 Q_0 越小, 灵敏度越高; 若抽速一定, 本底压力 p_0 越低, 灵敏度就越高; $|\beta - 1|$ 数值越大, 灵敏度越高; $\left(\frac{\Delta I_i}{I_0} \right)_{\min}$ 越小, 灵敏度越高。 $\frac{\Delta I_i}{I_0}$ 取决于系统压力的稳定度与测量线路的稳定度, 因而也就要求系统和规管除气要好, 抽速要稳定, 发射电流要稳定, 离子流放大器噪声要低等。

例如, 当 $p_0 = 10\text{Pa}$, $S_A = 10\text{L/s}$, 且 $\left(\frac{\Delta I_i}{I_0} \right)_{\min} = 0.02$ 时, 如果用氢气检漏, $\beta = 0.5$, 可知,
 $q_{A,\min} = 4 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

当漏孔气流特性为非分子流状态时, 可得类似的结果。当抽速不受流阻限制时, 应按式(13-32) 进行计算。

上面所有的结论对于磁放电真空规也基本上是适用的。

3. 差动真空规法

差动真空规法也叫桥式真空规法。其具体检漏装置如图 13-14 所示。它由两个真空规管和一个阻滞示漏气体通过的阱所组成,两个规管的输出信号以差分形式输出。

检漏前,将系统抽成真空,将阱加热除气,并将电路调平衡。检漏时,当示漏物质通过漏孔进入系统后,可不受限制地进入第一个规管内。由于阱的作用,示漏物质进入第二个规管的量要受到限制,这样,两个规管的输出讯号就不一致,给出差分信号,由此便可以指示漏孔存在与否并给出漏孔的大小。

差动真空规法中,规管可用热阻规、热偶真空规、热阴极电离规和冷阴极电离规。相应的阱和示漏气体有:①氢氧化钙阱,以二氧化碳为示漏气体;②活性炭阱,以氢气或丁烷为示漏气体。

差动真空规法的优点是:在使用中由于两个规管电参数的不稳定,真空系统抽速的不稳定等所造成的仪器噪声得到了补偿,所以检漏灵敏度比单管真空规法高得多,其数值见表 13-7。

表 13-7 差动真空规法的最小可检漏率

规 管	阱的类型	示漏物质	灵敏度/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
电阻真空规	氢氧化钙阱	CO_2	10^{-4}
电阻真空规	液氮或干冰冷却的活性炭阱	H_2	10^{-4}
电阻真空规	活性炭阱	C_4H_{10} (丁烷)	6.7×10^{-4}
冷阴极电离规(潘宁规)	液氮冷阱	CO_2	10^{-8}

4. 热传导真空规、电离真空规及差动真空规法的检漏灵敏度

关于热传导真空规法、电离真空规法及差动真空规法在前面已分别做了介绍,它们的灵敏度可用共同的表示式来表示。

设真空系统上有一个漏率为 q 的漏孔,当漏孔进气端为一个大气压的空气时,真空规读数为 N ,当漏孔进气端进入某一示漏物质时,真空规的读数为 N_2 ,若 $q = 0$ 时,真空规的读数为 N_0 。引进一个系数 Φ ,且令

$$\Phi = \frac{N_2 - N_1}{N_1 - N_0} \quad (13-36)$$

Φ 称为折合系数。

若真空系统抽速为 S ,真空规最小可读出的压力变化为 Δp_A (对空气),则最小可检漏率为:

$$q_{\min} = \frac{S \Delta p_A}{\Phi} \quad (13-37)$$

若工作压力为 p_A ,且令 $\theta = \frac{\Delta p_A}{p_A}$ 时的几种真空规法的 Φ 与 Δp_A 分别列于表 13-8 和表 13-9 中, Δp_A 与 p_A 的关系曲线如图 13-15 所示。

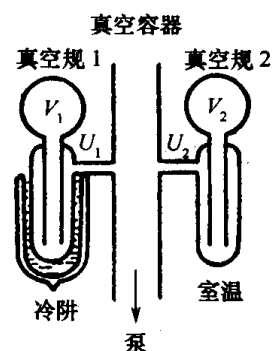


图 13-14 差动真空规法检漏

表 13-8 灵敏度折合系数 Φ

示漏气体	热阻真空规		电离真空规	
	单个规管	差动型	单个规管	差动型
丁 烷	1.0	2.0	10.0	11.0
乙 醚	0.7	1.7	5.4	6.4
丙 酮	—	—	3.5	4.5
氯 仿	—	—	3.5	4.5
二氧化碳	0.3	1.3	1.0	2.0
四氯化碳	0.05	1.0	1.0	2.0
汽 油	1.0	1.0	0.3	1.3
氢 气	0.4	—	-0.4	—

表 13-9 最小可读压力 Δp_A (单位: $1.33 \times 10^{-1} \text{Pa}$)

工作压力 p_A $/1.33 \times 10^{-1} \text{Pa}$	热阻真空规		电离真空规	
	单一规管	差动型	单一规管	差动型
10	4×10^{-2}	5×10^{-3}	—	—
1	4×10^{-3}	1×10^{-3}	—	—
10^{-1}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-3}	1×10^{-4}
10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-4}	1×10^{-5}
10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-5}	1×10^{-6}

表 13-8 和表 13-9 以及图 13-15 的使用方法举例说明如下:如以氢气为示漏气体,用单一电离真空规检漏,由表 13-9 可知 $\Phi = -0.4$,若抽速 $S = 10 \text{L/s}$, $p_A = 10^{-4} \text{Pa}$,由图 13-15 的曲线(1)可知 $\Delta p_A = 2 \times 10^{-6} \text{Pa}$,利用式(13-37)得出

$$q_{\min} = \frac{S \Delta p_A}{\Phi} = \frac{10 \times 2 \times 10^{-6}}{0.4} = 5 \times 10^{-5} \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$$

可见其结果与由式(13-32)计算的结果基本上是一致的。

5. 具有冷吸附阱的真空规检漏器

可以应用具有吸附阱的单个真空规管进行检漏。最早是用液态空气冷却的硅胶阱与冷阴极电离规配合进行的,灵敏度可到 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s} \sim 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

下面介绍一下此种检漏仪的工作原理。具体结构如图 13-16 所示,吸附阱内装有 20cm^3 的硅胶颗粒,颗粒的直径约为 $1 \text{mm} \sim 2 \text{mm}$ 。被检件接于阀门 S_1 和阀门 S_2 之间。开始时,打开阀门 1 和阀门 2,用真空泵抽被检件和吸附阱,并将吸附阱加热至 300°C 除气 $2 \text{h} \sim 3 \text{h}$ 后,关上阀门 1。当被检件抽到足够低的压力时,关阀门 2,打开阀门 1,用液氮冷却吸附阱,此时,由于低温条件下的硅胶对空气有较高的吸附能力,所以通过漏孔进来的空气只有很少一部分通过吸附阱,使真空计读数略有上升。当用示漏气体如氢气、氦气、氮气喷吹漏孔时,由于硅胶对其吸附能力比对空气差(约是对空气的 $\frac{1}{3000} \sim \frac{1}{4000}$),因此规管内压力升高,使读数有较大变化,从而可以指示出漏孔的存在。

本仪器特点:

①灵敏度比氢钯法高 100 倍。当容器内压力低于 10^{-3}Pa 时,可检出 $10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔;当容器内压力低于 10^{-5}Pa 时,可检出 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔;经过某些改进后,甚至可检出 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔。

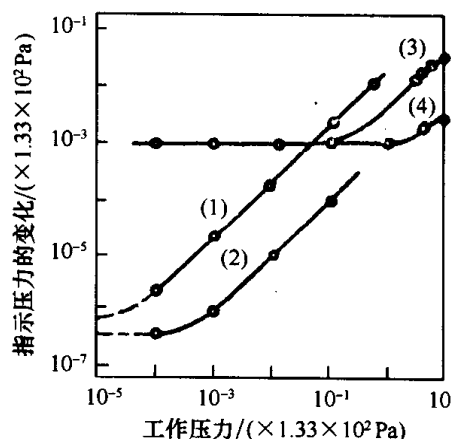


图 13-15 单管和差动真空规检漏的工作曲线

- (1) 单一电离真空规; (2) 差动电离真空规;
(3) 单一热阻真空规; (4) 差动热阻真空规。

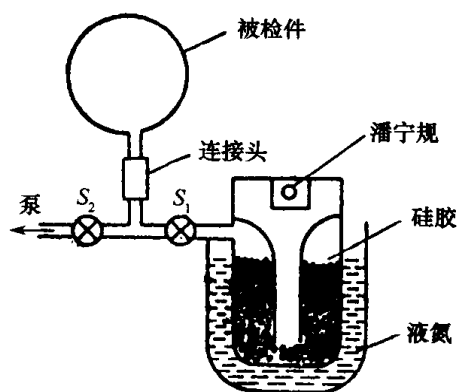


图 13-16 具有冷吸附阱的真空规检漏器

② 结构简单。

③ 适用于小型的易于除气的器件的检漏。

吸附阱内的吸气材料如果采用分子筛,其效果会更好些。

6. 扫描方向规检漏

近几年来有人用扫描方向规进行检漏。在真空容器中,当气体分子自由程大于容器尺寸时,从器壁上的漏孔进入的气流有分子束射效应,也就是在束流方向的气体密度要比其它地方大。因此当扫描方向规的管口对准漏孔时,指示的压力读数就会升高,于是可找到漏孔的位置。已经做成的实验仪器,如图 13-17 所示,根据理论计算与实验结果,其检漏灵敏度可达 $10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,与氦质谱检漏仪的灵敏度相当。它的优点是不用特殊的示漏气体,适于对真空中难以接近的部位进行检漏;缺点是,如果漏孔与规管之间有障碍物时,用此法检漏可能是无效的。

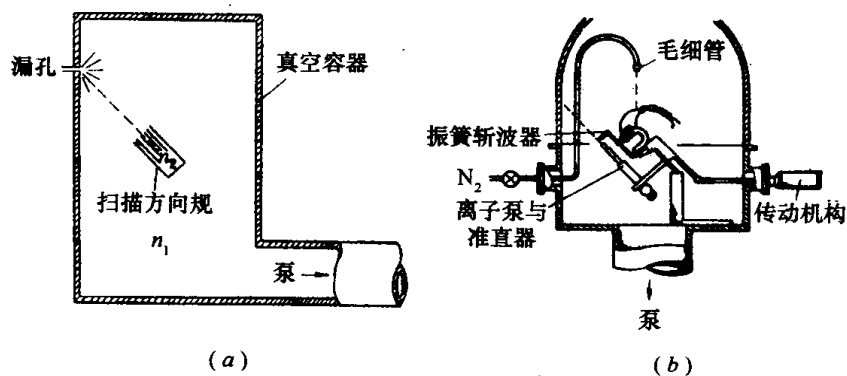


图 13-17 扫描方向规检漏器

(a) 原理图; (b) 具体装置。

7. 其它方法

上面介绍了使用真空规进行检漏的一些主要方法,下面再介绍几种使用真空规进行检漏的简单方法。这些方法尽管灵敏度低,但实践证明它们作为粗检手段效果还是很好的。

(1) 吸嘴抽空法

如图 13-18 所示,在对容器排气时,如果怀疑焊缝或某个部位存在大的漏孔,可用一个能与容器密封的吸嘴罩住该部分,并用机械泵将吸嘴抽空。如吸嘴所罩的部分有漏孔,由于漏孔

进气端的压力降低了,漏量便大大减小,甚至可以忽略,因此容器中的压力将会降低,并由真空规明显地反映出来。如果吸嘴重新放入大气,容器中的压力又将迅速上升到原来的数值。

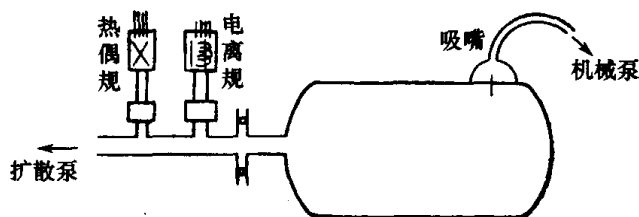


图 13-18 吸嘴抽空法

(2) 夹层抽空法

在对杜拉容器进行检漏时(如图 13-19 所示),如果怀疑内胆漏气,在结构强度允许的条件下,可将内胆(或夹层)接到带有真空规的高真空抽气装置上,而将夹层(或内胆)用机械泵抽空,如内胆有漏孔,机械泵抽气前后,高真空抽气装置上的真空规读数会有较明显的变化。同样,如果夹层(或内胆)中重新放入大气,放气前后真空规读数亦会有较大的变化。

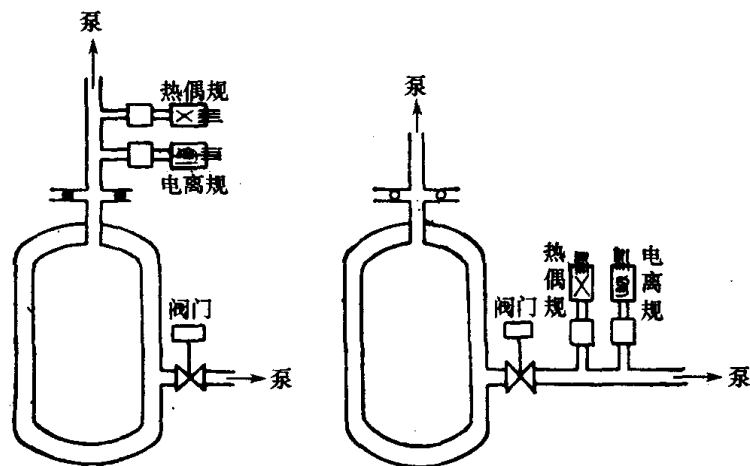


图 13-19 夹层抽真空检漏法

(3) 堵塞法

正在进行抽气的容器的壁上如果有较大漏孔,可用真空泥来堵(也可用真空漆或虫胶一点一点地刷),同时注意容器中真空度的变化,一旦堵上了漏孔,真空度就会有好转,如果除掉堵塞物,真空度又会明显变坏,以此来验证漏孔的存在及漏孔位置。此方法对于大漏孔是可靠的,对于小漏孔来说,由于真空度变化不明显以及堵塞物难以清除干净,会给验证工作带来一定困难。

(五) 氢—钯法

当钯管或钯片加热到 $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 时,由于氢对钯的渗透很强,使氢气可以通过钯,而其它气体则不能通过。根据此原理做成的一种检漏器叫氢—钯检漏器,其具体结构如图 13-20 所示。它是一个带有钯管的已抽成高真空的密封的电离规管,钯管外面有一个加热器可将钯管加热。被检件与这种电离规管一起接在真空系统上,在系统压力为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 时,加热钯管,系统与泵隔离,用氢气喷吹被检件的可疑部位。如果有漏孔,氢气通过漏孔进入系统并经钯管进入电离规管内,此时电离规读数便升高,指示了漏孔的存在。停止检漏时,使系统

与泵接通,电离规管内的氢气又通过钡管进入系统而被抽走。

一个典型的检漏系统如图 13-21 所示。此装置就是英国爱德华公司生产的 LT4A 型检漏仪。该检漏仪使用扩散泵 II 的原因是气体通过它流动使被检容器更加清洁。由于水蒸气和热钡起作用后要放出氢气干扰检漏工作,因此,使用了液氮冷阱防止水蒸气进入钡管。

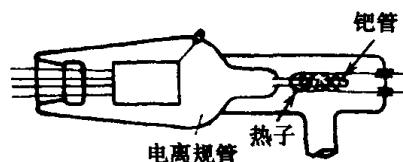


图 13-20 钡管电离规

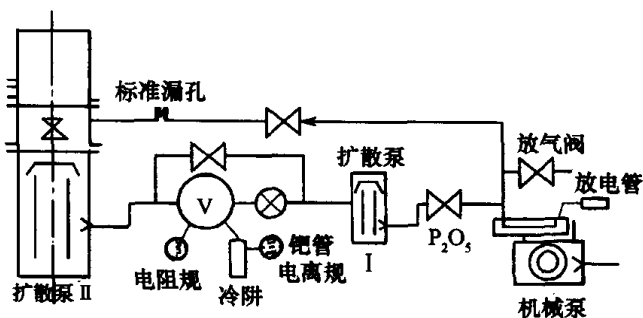


图 13-21 LT4A 氢—钡检漏仪

氢—钡法的最大工作压力为 4Pa,下限不受限制。此法的最大优点是灵敏度与压力无关。灵敏度一般为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

如果钡表面被污染了,可在空气中加热净化。

(六)静态升压法

静态升压法是一种常用的判断容器是否有漏并能测出总漏率的方法。

被检容器抽空后用阀门将它与泵隔开,测量其内部压力变化,并根据四种不同情况可画出如图 13-22 所示的四条压力—时间曲线:曲线 *a* 是一条平行于时间坐标轴的直线,说明容器既不漏气也没有放气;曲线 *b* 表示容器中的压力上升速度开始较快,然后逐渐减慢,最后趋于平衡,这说明容器只有放气而无漏气;曲线 *c* 是一条具有一定斜率的直线,表明容器中的漏气是主要的;曲线 *d* 开始上升较快然后变缓慢了,最后变成一条斜率不变的直线,直线前面的一段曲线是由漏气和放气共同形成的,直线部分是由漏气决定的。若容器体积为 V ,曲线 *c* 和 *d* 的直线部分斜率为 dp/dt ,则漏率为 $V\cdot(dp/dt)$ 。

此方法的优点是不需要什么特殊设备,只需用真空泵、阀门、真空规等这些极普通的设备。灵敏度与容器的本底压力有关,除气越好,本底压力越低,可检出的漏孔漏率就越小。对大容器检漏时,测量压力—时间曲线所需的时间较长,特别是检小漏孔时,时间更长。

(七)离子泵检漏器

离子泵检漏器的原理是:当示漏气体通过漏孔进入离子泵时,泵电流将发生变化,根据这种变化可检示真空系统的漏孔,并可估算漏孔之大小。

在使用具有离子泵的抽气系统时,人们可以在任何时间在压力低于 10^{-2}Pa 的条件下对系统本身进行检漏,而不需其它附件。示漏气体可用氧、氮、氩、氢等。

用离子泵做成的检漏器如图 13-23 所示。首先用机械泵将离子泵抽到低真空,关上阀门 S_2 ,接入被检件,打开阀门 S_3 用机械泵将被检件抽空。关阀门 S_1 ,打开阀门 S_2 ,用离子泵抽气。当压力稳定之后,用示漏气体检漏,通过漏孔进入泵中的示漏气体使泵电流发生变化,借助泵电流变化可指示漏率大小。

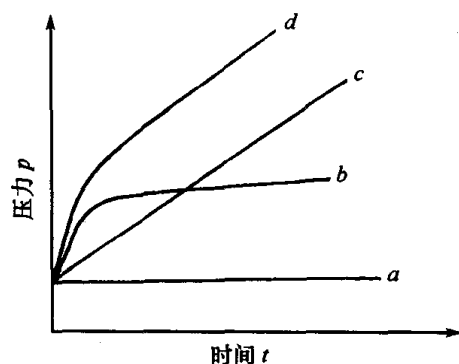


图 13-22 压力—时间曲线

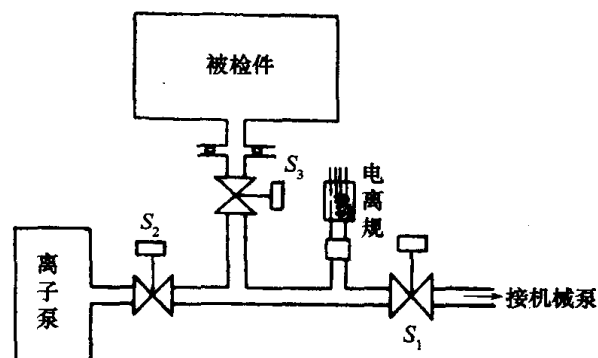


图 13-23 离子泵检漏器

假设 I_A 为空气通过漏孔时所对应的泵电流, I_t 为示漏气体通过漏孔时所对应的泵电流, 令

$$\frac{I_t}{I_A} = R \quad (13-38)$$

如果除漏气以外的其它气源形成的压力为 p_0 , 与 p_0 对应的泵电流为 I_0 , 则检漏前泵电流为

$$I_1 = I_0 + I_A$$

检漏时的泵电流为

$$I_2 = I_0 + I_t$$

检漏后的泵电流变化为

$$\Delta I = I_t - I_A \quad (13-39)$$

由式(13-38)和式(13-39)得出

$$\Delta I = I_A(R - 1)$$

即

$$I_A = \Delta I / (R - 1)$$

由于泵的抽气量 q 与泵电流 I 成正比, 比例因子为 K , 则

$$q = KI$$

对于空气

$$q = \Delta I K_A / (R - 1)$$

相应于最小可检泵电流变化 ΔI_{\min} 为最小可检漏率

$$q_{\min} = \frac{\Delta I_{\min} K_A}{R - 1} \quad (13-40)$$

因泵抽速 $S = q/p = KI/p$, 对应一定气体

$$S_1 p_1 = K_1 I$$

用 $S_1 p_1$ 和 $K_1 I$ 分别乘式(13-40)的分子和分母, 整理后得出

$$q_{\min} = \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\min} \frac{K_A p_1 S_1}{K_1 (R - 1)} \quad (13-41)$$

上式表明, 对于给定的示漏气体, 最小可检漏率正比于泵电流的相对变化及本底气体流量

$S_1 p_1$ 。通常 $K_1 = K_A$, 此时

$$q_{\min} = \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\min} \frac{p_1 S_1}{R - 1} \quad (13-42)$$

对于氧气和二氧化碳来说, $R = -0.5$, 对于氮气、氩气来说, $R = 0.5$; 对于 3kV 下工作的离子泵来说, $K_A = 6.7 \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{A} \cdot \text{s})$, 若取 $\left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\min} = 0.002$, 则 $q_{\min} = \frac{p_1 S_1}{250}$ 。例如: $p_1 = 10^{-7} \text{ Pa}$, $S_1 = 5 \text{ L/s}$, $I_1 = 10^{-7} \text{ A}$ 时, $q_{\min} = 2 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, $\Delta I = 2 \times 10^{-10} \text{ A}$ 。

离子泵检漏器的灵敏度取决于下列因素:

① 在灵敏度受仪表最小可检示信号限制情况下, 如果 $I/S p = 20$, $p_0 S_A \ll q$ 时, $q_{\min} = 0.1 I_{\min}$ (I_{\min} 为最小可检示信号, 单位为 A, q_{\min} 以 $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 为单位)。

② 在灵敏度受泵电流起伏限制的条件下, 当 $R = 0.5$ 时, $q_{\min} = 2 p_1 S_1 \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\min}$ 。

③ 本底流量 $p_1 S_1$ 越大, 灵敏度就越低。也就是说, 在较高的真空下工作时, 灵敏度较高。

(八) 卤素检漏仪

1. 一般介绍

当铂加热到 $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 时会产生正离子发射, 在卤素气氛中这种正离子发射将急剧增加, 这就是所说的“卤素效应”。利用此效应而设计的检漏仪称为卤素检漏仪, 其原理如图 13-24 所示。它的敏感元件是一个二极管, 这个二极管的内、外筒及加热丝都是用铂制成的。内筒被热丝加热后发射正离子, 外筒收集正离子, 离子流的大小可用检流计(或经放大器放大后)指示出来, 也可用音响来指示。有的仪器的敏感元件没有内筒而直接用加热的铂丝做发射极。加热丝的供电可用直流或交流电源。

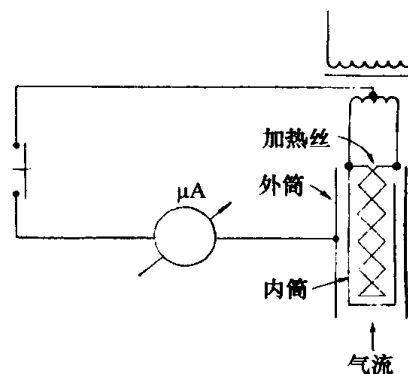


图 13-24 卤素检漏仪原理图

根据使用条件不同, 卤素检漏器可分为两类: 敏感元件与待检系统相连的称为固定式卤素检漏仪; 不与待检系统连接的称为便携式卤素检漏仪。前者在检漏时需要将被检系统抽到 $10^{-1} \text{ Pa} \sim 10 \text{ Pa}$ 的真空度, 示漏气体(卤素气体)通过漏孔从外面进入系统中, 并进入敏感元件所在空间。便携式卤素检漏仪则要求被检系统预先充以高于一个大气压的示漏气体, 仪器探头(敏感元件)在大气中工作, 将通过漏孔漏到外面来的示漏气体由探头检出出来。

卤素检漏仪的最小可检漏率可达 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。示漏气体采用氟里昂、氯仿、碘仿、四氯化碳等卤素化合物, 其中以氟里昂-12(CCl_2F_2)效果最好。

2. 仪器结构和技术性能

下面以北京真空仪表厂生产的 LX-2A 型便携式晶体管卤素检漏仪(如图 13-25 所示)为例, 来说明卤素检漏仪的结构与技术性能。

(1) 探头部分

此部分装有离子室、电机带动的吸风装置、小电流放大器及电表。离子室装在探头的前身, 由加热丝和收集极两个电极组成, 两个电极均用铂制成。工作时, 加热丝发射正离子, 当有卤素气体进入离子室时, 离子发射便增加, 离子被收集极收集后, 经电流放大器放大后在电流

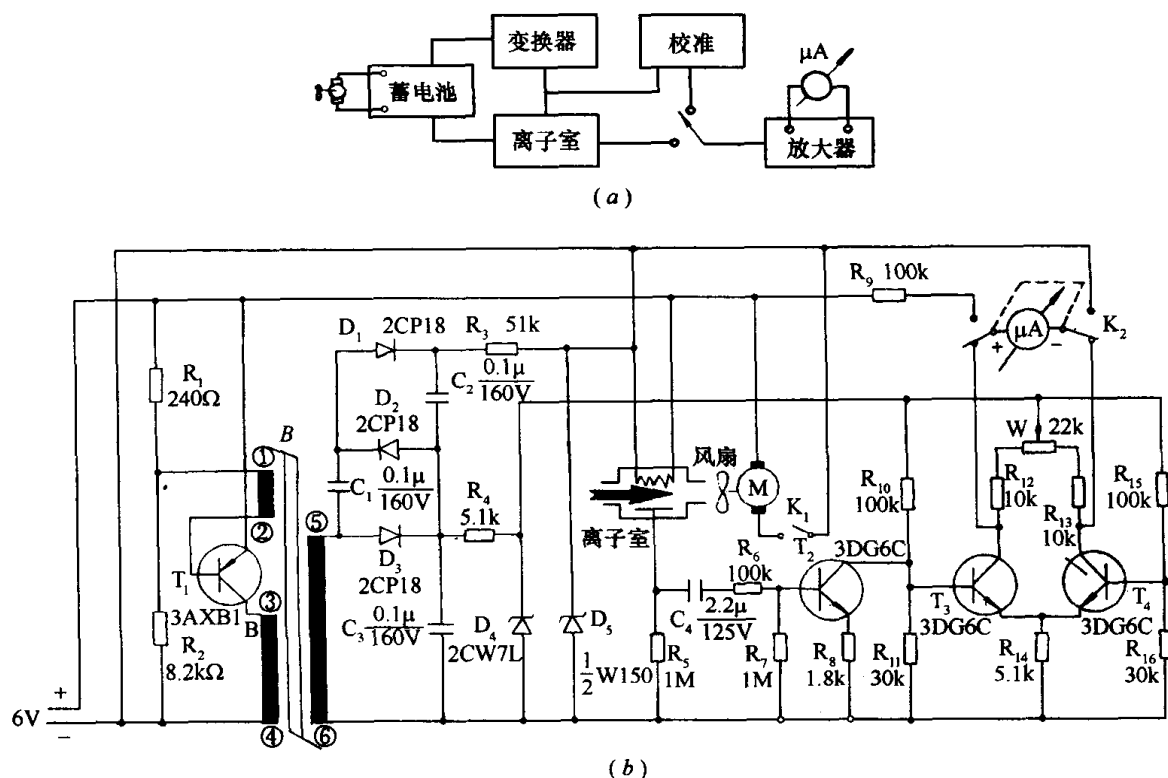


图 13-25 LX-2A 型卤素检漏仪

(a) 仪器方框图; (b) 电气原理图。

 $\mu = \mu\text{F}; k = k\Omega; M = M\Omega$ 。

表上指示出来。放大器及电表都装在探头上, 使用方便。

(2) 电源部分

电源部分由四节 1.5V、2A 的蓄电池及直流变换器组成, 以供给离子室、电机及电流放大器工作之用。

(3) 技术性能

灵敏度: $0.3\text{g}(\text{氟里昂-12})/\text{a}$ (相当于 $1.7 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$), 反应时间小于 1s, 离子室加热功率为 18W, 总质量为 5kg, 探头质量 1kg。

3. 使用与维护

在使用中, 若卤素检漏仪的敏感元件长时间处于浓度较高的卤素气体气氛中, 会产生中毒效应使灵敏度下降。当仪器短时间中毒时, 在清洁的不含卤素的空气中工作一段时间还可以恢复。但长时间中毒时, 恢复的可能性较小, 在使用中要特别注意。这就要求在仪器附近不得倾倒含有卤素化合物的污物, 检漏场地要有良好的通风设施。有人指出, 敏感元件不宜用酒精或其它碳氢化合物来洗涤, 因为这些物质会使敏感元件性能变坏。

卤素气体比空气重, 进行检漏时, 必须先从不被检件的下部开始。检出的漏孔要及时做临时性的堵塞或永久性的修补, 因为在大漏孔修补前要想检出小漏孔是比较困难的。在用携带式卤素检漏仪进行检漏时, 通过大漏孔漏出的较多的卤素气体将逸散到所有角落和裂缝附近, 由于停留时间较长, 也可能被探头探及, 给出不应有的干扰信号。当然这种情况与滞留空间的几何形状及通风情况有关。所以对于实际检漏来说良好的通风是非常重要的。

橡皮和塑料易于吸收卤素气体, 而且还会逐渐放出来, 使卤素检漏仪出现不稳定现象, 干扰检漏工作。因此, 检漏系统中最好避免使用橡皮和塑料。

卤素气体的扩散系数比较小,在用携带式卤素检漏仪进行检漏时,为了使被检件内各处的示漏气体浓度一致,应有较长的等待时间。

当卤素气体浓度较高时,卤素检漏仪的指示值与浓度的关系是非线性的。因此在做定量测量时,进入探头的卤素气体的浓度不宜高于百万分之一。

固定式卤素检漏仪的敏感元件是在真空条件下工作的,适应的工作压力范围为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10\text{Pa}$,压力太低了灵敏度反而低,所以在作高真空系统检漏时,探头应装在扩散泵的前级。

(九)氨气检漏法

氨气检漏法的原理是:把允许充压的被检容器抽成真空(不抽真空也可以,其效果稍差),在器壁外面可疑有漏孔处贴上具有对氨敏感的 pH 指示剂的显影带,然后在容器内部充入高于一个大气压的氨气,当有漏孔时,氨气通过漏孔逸出,使显影带改变颜色,据此可找出漏孔的位置,由显影时间、变色区域大小可大致估计出漏孔大小。

1. 设备与操作

氨检漏设备如图 13-26 所示,操作过程如下:

(1)被检件的清洁处理

对被检件必须进行去渣、去锈、去油、清洗和干燥,使漏孔充分疏通,并减少反应时间。

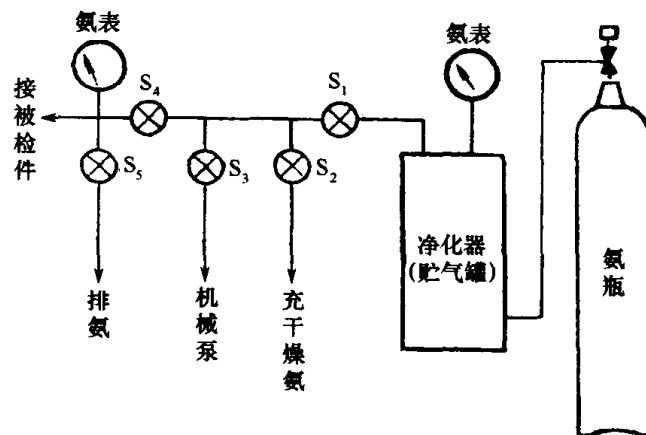


图 13-26 氨检漏设备

(2)贴显影带

拿显影带时应戴干净的手套,不戴手套时必须保持手的清洁与干燥,切忌用经肥皂洗过而未彻底冲洗干净的手接触显影带,否则会使显影带变色。如果使用湿的显影带,则必须用蒸馏水润湿(自来水呈碱性,易使显影带变色)。显影带要贴在可疑部位上,尽量减少寄生空间,贴好后用透明的聚乙烯薄膜保护起来,并用胶布将薄膜边缘同金属部分密闭起来,使显影带与大气隔离,防止大气中的本底氨的干扰,同时避免通过漏孔进入显影带上的氨气迅速消失,以提高检漏灵敏度。显影带贴好后,先观察一下是否有存在碱性物质而使显影带变色。如有,应记下变色位置,以区别于漏气造成的显影。最后向待检件内充进氨气。

(3)充氨与排氨

①将被检件用耐压橡皮管接到氨检漏设备上,关好阀门 S_2 和 S_5 及氨瓶总阀门,打开阀门 S_1 、 S_3 和 S_4 ,用机械泵抽真空。

②当被检件的压力抽到几百帕后,关阀门 S_3 和机械泵,然后关阀门 S_1 ,打开氨瓶总阀门,使氨气慢慢充入贮气罐(亦起净化作用),当氨压达到 $100\text{kPa} \sim 200\text{kPa}$ 时,打开阀门 S_1 ,使被

检件内获得所需的压力,然后关上总阀门。充气过程中要慢慢升压并随时观察有无大漏孔存在。一经发现大漏孔应立即防止升压,并及时采取措施排除大漏孔后再升压。

③当氨压升到所需数值时,定时观察显影带的变色情况,如发现变色斑点,可更换显影带进行复核。由于通过漏孔的氨气流已很稳定,所以显影会很快,因此复核工作能很快完成。

④检漏完毕后关闭阀门 S_1 , 打开阀门 S_5 , 用橡胶管把氨气引入水槽或下水道中。由于氨极易溶于水中,这个过程可进行得很快。然后关闭阀门 S_5 , 打开阀门 S_3 , 用机械泵排氨,同时通过阀门 S_2 放入干燥氮气或空气,对被检件及管道等进行 2 次~3 次“冲洗”,使其中的氨气尽量排除(排除的气体也要通入水中)。

2. 灵敏度

氨检漏法的灵敏度与充氨的压力、指示剂的灵敏程度和曝光时间有关。在漏率一定时,显影斑点的大小与所用指示剂、曝光时间及氨压有关。表 13-10 给出了漏孔漏率为 $9.6 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 、指示剂为溴酚蓝时,氨压、曝光时间与斑点直径的关系。如果用溴代麝香草酚蓝显影带时,对于 $8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔,当氨压为 303kPa 时,20min 便可显示出明显的斑点。对于 $2.1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔,出现明显斑点的时间与氨压的关系见表 13-11。

表 13-10 不同氨压、曝光时间下的斑点大小

(单位:mm)

氨压/kPa \ 曝光时间/s	49	98	147	196
10	0.5	0.6	1.0	1.2
20	0.8	1.2	1.8	2.0
30	1.1	1.6	2.2	2.6
40	1.3	2.0	2.6	3.0
50	1.5	2.1	2.8	3.4
60	1.8	—	3.0	—

注:漏孔漏率为 $9.6 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 指示剂为溴酚蓝

表 13-11 可见明显斑点的氨压与曝光时间

氨压/kPa	300	200	150
曝光时间/s	1	2	3

注:漏孔漏率为 $2.1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 指示剂为溴代麝香草酚蓝

有人对最小可检漏率进行了理论分析与计算。当充入 152kPa 的氨气时,用溴酚蓝做显影剂,形成 1mm 直径斑点所需的时间与漏率的关系列于表 13-12 内。

表 13-12 理论计算的曝光时间与漏率关系

曝光时间	1s	10s	1min	10min	1h	10h	24h
漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	6.7×10^{-3}	6.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-5}	1.86×10^{-6}	1.86×10^{-7}	7.7×10^{-8}

由表可见累积的时间越长,可检漏率越小。

一般认为氨检漏法的灵敏度为 $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$,但也有人认为可能检出 $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 的漏孔。

3. 特点及注意事项

氨检漏法的优点是:

①装置简单、操作方便、易于掌握、便于普及。

②成本低,氨气来源充足。

③由于氨气能穿过被油、水阻塞的漏孔,因此可以适当降低对被检件的清洁程度的要求。

④检漏灵敏度随着氨压的升高及曝光时间的加长而提高。因此,只要被检件允许提高氨压并适当延长曝光时间,就可以检出更小的漏孔。

⑤灵敏度与被检件的容积大小无关。如果无特大漏孔,一次充氨便可以检完所有的焊缝。因此此方法特别适于对大容器、大型复杂结构以及长管道进行检漏。

⑥可准确地找出漏孔位置。

但是,氨检漏法也存在不少缺点:

①此方法虽能检示每个漏孔的位置,但却很难给出准确的总漏率。

②氨对铜及铜合金有腐蚀作用,故不能对含有这些材料的设备进行检漏。

③氨检漏只适用于耐高压的容器的检漏。

④氨气对呼吸道和眼睛有强烈的刺激,严重时还会引起中毒、视力损伤乃至失明,故要特别注意防护。

⑤氨气易燃、易爆。

使用氨检漏法应注意下述安全事项:

①试验设备要牢固可靠。

②室内要有良好的通风设备,废氨要妥善处理,防止污染环境。

③工作人员要戴防毒面具和风镜。

④用氨检漏法检过漏的部件,如需补焊,必须保证其中的氨浓度低于 0.2%,以防爆炸和燃烧。

4. 对显影带的要求及显影带的制作

氨检漏法的关键在于制造一种使用方便、灵敏度高的显影带。显影带最好对氨气具有较好的积累特性,并要有较好的重复性。

(1) 指示剂的特性及选择

可采用的 pH 指示剂的种类很多,见表 13-13。但是从灵敏度高、防腐、无毒、安全与被检件不起化学作用等要求来考虑,可用的并不多。

(2) 对显影带基料的要求:

①柔软而富有弹性、无绒毛、吸水性好、薄而致密,既要便于与不太平整的焊缝贴紧,从而减少寄生空间,又要便于指示剂溶质的附着和观察。

②基料颜色需浅色或白色,与指示剂变色后的颜色差别明显。

③成本低,来源容易。通常选用白色棉织品比较合适。

(3) 指示剂的配制及显影带的制作

①溴代麝香草酚蓝。用 200mg 克溴代麝香草酚蓝溶于 500cm³ 的蒸馏水中,得到饱和溶液,再滤去未溶解的溶质,此时溶液呈深蓝色,其 pH 值大于 6。为调整溶液的 pH 值,可再滴入少量磷酸,使其 pH 值小于 6,此时的溶液呈较深的草黄色。

用布料作显影带的基料时,将布料浸在溶液中,浸泡后取出、拧干、晾干。为了提高显影带的灵敏度,布料要多次浸泡和晾干。晾干的显影带用塑料袋封装保存。

由于布料大多呈碱性,浸泡一定次数后的溶液的颜色会变蓝(pH 值大于 6),此时应再滴入少量磷酸来进行调整。

表 13-13 常用指示剂及其变色的 pH 值范围

pH 值 指示剂	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
硝胺										无色		10.8~13.0	红
茜素黄										黄	10.1~12.0	紫	
麝香草酚酞									无色	9.4~10.6	蓝		
酚酞								无色	8.2~10.0	紫红			
麝香草酚蓝 2								黄	8.0~9.6	蓝			
α 奈酚酞							蔷薇黄	7.3~8.7	蓝绿				
甲酚红							琥珀黄	7.2~8.8	紫红				
中性红							红	6.8~8.0	琥珀黄				
苯酚红							黄	6.8~8.4	红				
溴代麝香草酚蓝							黄	6.0~7.6	蓝				
石蕊					红	5.0~8.0	蓝						
氯酚红					黄	5.0~6.6	红						
甲基红				红	4.4~6.2	黄							
溴甲酚蓝				黄	3.8~5.4	蓝							
甲基橙			红	3.1~4.4	橙黄								
溴酚蓝			黄	3.0~4.6	蓝紫								
甲基黄			红	2.0~4.0	黄								
苯胺黄	红	1.0~3.2	黄										
麝香草酚蓝 1	红	1.0~2.8	黄										

②甲酚红。溶液配制及显影带的制作方法与上同,不过甲酚红的过饱和溶液呈紫红色,加磷酸调整后应呈琥珀黄色,pH 值以调整到稍大于 7 为宜。潮湿的显影带呈深黄色,晾干后呈浅黄色。

③氯化钙—甲基红。上面介绍的溴代麝香草酚蓝与甲酚红两种显影带,在显影后,当切断氨气时,由于氨气迅速蒸发,数分钟后显影斑点便自行消失。在检漏过程中,这两种显影带需处于湿润状态。但湿润的显影带会使斑点扩散、浓度降低,灵敏度下降。氯化钙—甲基红法具有氨累积效应以及能在干燥状态下操作的优点,使灵敏度提高了 2 个数量级。使用方法是:先将氯化钙的干燥显影带贴于内部充氨的被检容器的焊缝处,氨气通过漏孔在显影带上形成化合物 $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$,然后再用甲基红溶液显影。这种化合物在室温下的稳定性较好,能保证通过累积方法(即延长曝光时间),去发现更小的漏孔。

④溴酚蓝。把宽 1cm~1.5cm 的色层滤纸浸入溴酚蓝的无水酒精饱和溶液中,把浸透的滤纸放在凸纹的纸板上,用红外灯烘干,再放在磨口瓶内保存,以备使用。

(十)氨质谱检漏仪

见本章第四部分。

(十一)其它检漏法

1. 超声检漏法

被检容器充入高压气体后,气流通过大漏孔时会发出滋滋之声。若漏孔较小,就可能产生

频率为 35000Hz~45000Hz 的超声波,可通过声强计由仪表指示出来,也可用检测器和耳机把超声波转换成人耳听得到的声波。其灵敏度为 $1\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。此方法一般用作低温管路、真空管路等的粗检手段。

2. 放射性同位素检漏法

此方法可用于成批生产的小型密封器件(如电子管、半导体器件等)的检漏。使用的放射性同位素一般为氪-85(Kr^{85}),其半衰期为 10.3 年,放射线中 99% 是 β -射线,0.7% 是 γ -射线。

检漏步骤:先将被检器件清洗、烘干,而后放在一个密封的试验箱内。试验箱抽成真空(10^2Pa 即可)后,充入高压的 Kr^{85} 气体,使器件在高压力的 Kr^{85} 气氛中浸泡。浸泡的时间视所要求检出的最小漏率值而定(从几分钟到数百小时不等)。浸泡结束后,从试验箱中抽除 Kr^{85} ,取出箱内的器件,清除这些器件表面上残留的 Kr^{85} 。然后用闪烁计数器在器件外面进行检测,根据测得的 γ -射线强度、浸泡时间、器件的容积及充入试验箱内的 Kr^{85} 气体的压力可计算出漏孔的大小。

此方法的检漏灵敏度为 $10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。应用此方法时应特别注意放射性物质的处理和防护。

3. 荧光检漏法

荧光检漏法是把荧光物质溶于有机溶剂中,将此溶液灌注于被检的容器中,或者使被检部位与溶液接触,如果有漏孔存在,溶液因毛细作用可渗到漏孔的另一侧,待溶剂蒸发后,漏孔的另一侧便沉积了干燥的荧光物质,此时如用紫外线灯照射就可发出荧光,即说明该处有漏孔。照射光源也可以用汞灯,但为了便于观察,最好加上只能使紫外光通过的滤光镜。

这种方法的灵敏度比较高。例如用葱(溶于丙酮)进行检漏时,灵敏度可达 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

荧光检漏法的主要优点是对被检容器既不需加压也不需抽真空,很方便。但当含有荧光物质的溶液从被检漏孔的一侧靠漏孔的毛细作用渗到另一侧,其时间过程较长,因此所需的等待时间较长。

四、氦质谱检漏仪

(一)质谱仪器与检漏技术

用于真空残余气体分析的质谱计都可用来检漏(其示漏物质可用氢、氦、氩等),但检漏灵敏度各不相同,见表 13-14。自 20 世纪 40 年代把质谱计用于检漏之后,检漏技术有了长足的发展。

表 13-14 各类质谱计的检漏灵敏度

类 型	示漏物质	工作压力 /Pa	灵敏度/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$
射频质谱计(单级)	H_2	$10^{-1}\sim 10^{-5}$	3.7×10^{-6}
射频质谱计(三级)	H_2	$10^{-2}\sim 10^{-6}$	5.1×10^{-6}
回旋质谱计	Ar, He	—	10^{-12}
四极滤质器	H_2 , Ar, CHF_3	—	$10^{-9}\sim 10^{-13}$
磁偏转质谱计	He	$10^{-2}\sim 10^{-3}$	$10^{-6}\sim 10^{-11}$

专门用来检漏的质谱计叫质谱检漏仪。其特点是灵敏度高,性能稳定。特别是用氦做示漏气体的质谱检漏仪,是真空检漏中灵敏度最高、用得最普遍的一种检漏仪器。

(二) 氦质谱检漏仪的基本原理与组成

氦质谱检漏仪由离子源、分析器、接收器、真空系统、电子线路及其它电气部分组成。

目前的氦质谱检漏仪基本上都是磁偏转型的。现以 180° 的磁偏转型仪器(例如 HZJ-1 型氦质谱检漏仪)为例加以说明。图 13-27 是仪器的原理图。

在质谱室的离子源 N 内气体被电离成离子。在电场作用下离子聚焦成束,并以一定的速度经由缝隙 S_1 进入磁分析器,在均匀磁场的作用下,具有一定速度的离子束,将按圆轨迹运动。其偏转半径可按式计算

$$R = \frac{1.8}{H} (MU)^{1/2}$$

式中 R ——偏转半径[cm];

H ——磁场强度[A/m];

M ——有效质量,即离子质量与电荷数之比;

U ——加速电压[V]。

由上式可以看出,当 H 和 U 为定值时,对应于不同的 M 有不同的 R 。HZJ-1 型仪器的 H 和 R 是固定的($R=4\text{cm}$)。调节加速电压 U 使氦离子束 M_2 恰能通过缝隙 S_2 到达收集极 K 而形成离子流。利用弱电流量测设备,使之在输出仪表与音响装置上反映出来。而其它不同于 M_2 的离子束(如图中 M_1, M_3)则以不同的偏转半径而被分开。



图 13-27 180° 磁偏转型氦质谱检漏仪原理图

(三) 氦质谱检漏仪的主要参数

评价一台氦质谱检漏仪,需要全面地看它的主要性能指标,这些指标是:

1. 灵敏度及其校准

关于氦质谱检漏仪灵敏度的定义,在世界各国还不很一致,在我国基本上都是用最小可检漏率来表示的。

氦质谱检漏仪的灵敏度,即最小可检漏率 q_{\min} ,就是在仪器处于最佳工作条件下,以一个大气压的纯氦为示漏气体,进行动态检漏时所能检出的最小漏孔的漏率。所谓“最佳工作条件”系指被检件出气很少,且没有较大漏孔,同时仪器本身的参数调整到最佳工作状态等条件;所谓“动态检漏”即指检漏时不用累积法,检漏仪本身的真空系统仍在正常抽气,仪器的反应时间不大于 3s(其中真空系统的时间常数不大于 1s)等情况;所谓“最小可检”是指信号是本底噪声的两倍(美国规定为一倍);所说的“漏孔的漏率”系指 100kPa 的干燥空气通过漏孔向真空端(压力远比 100kPa 低)的漏率。 q_{\min} 可表示如下

$$q_{\min} = Q_0 \frac{NI_n}{\Delta I^+} \quad (13-43)$$

式中 Q_0 ——校准时标准漏孔对空气的漏率;

ΔI^+ ——对应于 Q_0 的输出仪表指示的变化;

I_n ——仪器的噪声。一般指 2min 内输出仪表的摆动范围,如果这个摆动值小于最灵敏档的一个分格时,取 1 个分格;

$N=1$ 或 2。

氦质谱检漏仪只是一种对氦分压变化有反应的仪器。为了表征仪器的这种性能,以便于

在实际使用时(如当质谱室处于工作压力下,用辅助泵抽气或用累积法检漏时)能方便地估计检漏效果,最好给出仪器的最小可检浓度 γ_{\min} ,即浓度灵敏度。

检漏仪的浓度灵敏度 γ_{\min} ,就是在质谱室处于工作压力下,使用该仪器所能检示的大气中的最小氦浓度的变化。工作压力一般为 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$,最小可检浓度系指信号与仪器噪声比为 2 或 1 时的氦浓度。因此,浓度灵敏度可由下式表示

$$\gamma_{\min} = \Delta\gamma \frac{NI_n}{\Delta I^+} \quad (13-44)$$

式中 $\Delta\gamma$ ——送给氦气后,质谱室内氦浓度的变化量;

ΔI^+ ——对应于 $\Delta\gamma$ 的输出仪表指示的变化;

I_n 和 N 的意义与式(13-43)相同。

关于灵敏度校准的方法在资料[357,408~410]中均有说明。从式(13-43)与式(13-44)可看出,灵敏度的定义是建立在漏率与输出指示成正比的基础上的,因此灵敏度的校准就必须在仪器的线性工作范围内进行。而且校准时用的标准漏孔的漏率最好接近仪器的灵敏度的数值,以免因输出指示的非线性造成较大误差。为慎重起见,新研制出来的仪器应测出 $\Delta I^+ \sim Q_0$ 曲线,以判断线性关系的范围。

校准装置如图 13-28 所示。 L 是标称漏率为 Q_0 的玻璃白金丝型标准漏孔, T 为针阀, q 为流量计(用来测量通过针阀的干燥空气的流量)。

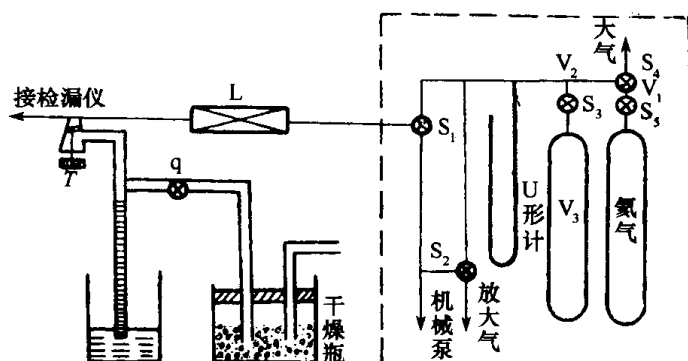


图 13-28 灵敏度校准系统

漏量灵敏度校准启动仪器,调整好工作状态,完全打开截流阀,用针阀调节仪器工作压力,关好阀门 S_2 ,打开阀门 S_1 ,用机械泵把标准漏孔进气端抽空,测仪器的噪声,转动阀门 S_1 ,使漏孔进气端与配气系统接通,由配气系统向漏孔进气端送入压力为 p_{He} 的氦气,测出与之相对应的输出仪表的指示变化 ΔI^+ ,则

$$q_{\min} = Q_0 \frac{p_{\text{He}} NI_n}{10^5 \Delta I^+} \quad (13-45)$$

校准漏量灵敏度时,不需测量通过针阀的空气流量,所以可以不用流量计。

浓度灵敏度校准 如果检漏仪的极限真空远高于工作真空时,可用针阀 T 放进空气使质谱室中的压力调节到工作压力。此时,通过针阀 T 的流量 Q_T ,相当于工作真空时质谱室内的空气的总流量,有

$$\gamma_{\min} = Q_0 \frac{p_{\text{He}} NI_n}{10^5 Q_T \Delta I^+} \quad (13-46)$$

比较式(13-45)与式(13-46)两式,可知

$$q_{\min} = Q_T \gamma_{\min}$$

为了在检漏中标定被检漏孔的大小以及所检示的浓度大小,有时还需要知道偏转灵敏度(即静态灵敏度)。

静态漏量灵敏度 s_q 为检漏仪处于工作状态下,维持抽速不变,引起输出仪表产生一个分格变化时的示漏气体的流量,即

$$s_q = Q_{\text{He}} / \alpha \quad [\text{Pa} \cdot \text{L/s}] \quad (13-47)$$

式中 Q_{He} ——氦气流量;

α ——由 Q_{He} 引起的读数变化的格数。

静态浓度灵敏度 s_γ 是在工作压力下,引起检漏仪输出表产生一个分格的变化时,所对应的检漏仪内示漏气体的浓度变化值,即

$$s_\gamma = \Delta\gamma / \alpha \quad (13-48)$$

式中 $\Delta\gamma$ ——检漏仪内氦浓度变化;

α ——由 $\Delta\gamma$ 引起的读数变化的格数。

不难看出

$$q_{\min} = \frac{1}{2.7} s_q N I_n \quad (13-49)$$

当 $\Delta I^+ \gg N I_n$ 时,检出的漏孔漏率是

$$q = \frac{1}{2.7} \Delta I^+ s_q \quad (13-50)$$

同时

$$\gamma_{\min} = s_\gamma N I_n \quad (13-51)$$

当 $\Delta I^+ \geq N I_n$ 时,检出的氦浓度是

$$\Delta\gamma = \Delta I^+ s_\gamma \quad (13-52)$$

在美国真空协会推荐的《质谱检漏仪的校准》标准中,关于灵敏度有如下定义

$$\text{灵敏度} = \frac{\text{标准漏孔产生的信号}}{\text{标准漏孔的空气漏率}}$$

灵敏度的单位是单位漏率产生的偏转格数。因此,灵敏度与最小可检漏率的关系是

$$\text{最小可检漏率} = \frac{\text{最小可检信号}}{\text{灵敏度}}$$

可见此处的灵敏度 $= 1/s_q$ 。

在校准氦质谱检漏仪灵敏度时,如果所使用的是不带氦室的开放型标准漏孔,那就需要由配气系统向漏孔提供一定压力的氦气。配气系统如图 13-29 所示。图 13-28 右侧的虚线框是另一种配气系统。

图 13-29(a) 的配气系统是用来降低漏孔进气端的氦压力的。活门 S_2 与 S_3 之间的体积为 V , 活门 S_3 与 S_4 之间的体积为 v , 活门 S_3 的小体积为 v' , 如图 13-29(b) 所示。活门 S_1 、 S_2 与漏孔间的体积远小于 V 。开始配气时,把放气活门 S_8 关上,打开所有的活门后用机械泵将整个系统抽空。再关上活门 S_1 、 S_2 、 S_3 , 在 S_3 与 S_4 之间的体积 v 中充入压力为 p_1 之氦气。压力 p_1 由 U 形计读出。 p_1 的大小由活门 S_9 、 S_{10} 调节。关上 S_4 , 打开 S_3 , 将体积 v 内的氦气膨胀到大体积 V 中,因此在大体积 V 内便可得到氦压力 p_0

$$p_0 = \frac{v}{V + v + v'} p_1$$

打开 S_2 , 让氦气进入标准漏孔进气端, 由于活门 S_1 、 S_2 与漏孔间的体积远小于 V , 因此在标准漏孔进气端便可得到氦压力 p_0 。

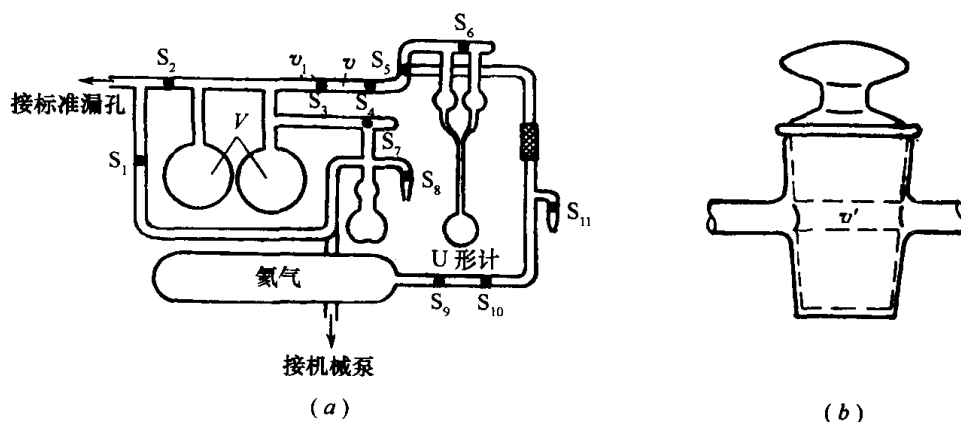


图 13-29 配气系统图

2. 反应时间、清除时间及其测定

反应时间与清除时间表明了检漏仪的动态特性。一般规定氦质谱检漏仪的反应时间与清除时间不得大于 $3s_0$ 。

定义: 若仪器本底输出指示为零(或补偿到零), 质谱仪节流阀完全开启, 由节流阀处送入一个恒定的氦流量, 输出仪表指示上升到最大值的 $(1 - e^{-1})$ 倍处, 即 63.2% 处所需的时间定义为反应时间 τ_R 。达到稳定的最大指示值后, 停止送氦, 输出指示下降到最大值的 e^{-1} 倍处, 即 36.8% 处所需时间定义为清除时间 τ_C 。通常 $\tau_R = \tau_C = \tau$ 。

反应时间 τ_R 与清除时间 τ_C 是由仪器抽气系统的抽速、流导、体积等真空系统的参数所决定的, 也与离子流放大器等电子学线路的时间常数有关。如检漏仪内含有能吸收或放出氦气的材料和零件, 也会影响 τ_R 和 τ_C 的测定。当输出指示与漏率的关系为非线性时, 会对 τ_R 和 τ_C 的测定带来较大的误差。

因此, 测 τ_R 和 τ_C 时, 送进的氦流量不宜与 q_{\min} 值差得太多。

测试方法: 测试装置如图 13-30 所示。 S_1 和 S_2 为两个快动阀门。阀门 S_1 以及和它相连的管道的流导应大于节流阀的抽速。送氦前将漏孔进气端抽成真空, 关阀 S_2 , 打开阀 S_1 , 测出仪器本底输出读数 I_1 。配好氦气后, 打开 S_2 , 使氦气进入漏孔进气端, 当输出仪表指示稳定后读出指示值 I_2 。关阀 S_2 , 打开阀 S_3 把漏孔进气端重新抽空待输出指示恢复到 I_1 后, 关阀 S_3 , 打开阀 S_2 , 记下从打开阀 S_2 到输出仪表指示值为 $I_1 + (I_2 - I_1) \times 63\%$ 时所需的时间, 即得到 τ_R 。待升到 I_2 后, 关阀门 S_1 , 记下从关阀 S_1 到输出仪表指示值为 $I_1 + (I_2 - I_1) \times 37\%$ 时所需的时间即为 τ_C 。

这里假定 L 、 S_2 、 S_3 之间的体积很小, 操作中对氦压力的影响也很小。

应该注意的是, 此处所测得的 τ_R 已包括漏孔 L 的时间常数在内。对于玻璃白金丝型漏孔, 因漏孔的时间常数很小, 对 τ_R 没有太大影响。但是, 有些漏孔的时间常数很大, 在测定 τ_R 时不宜采用这样的漏孔。

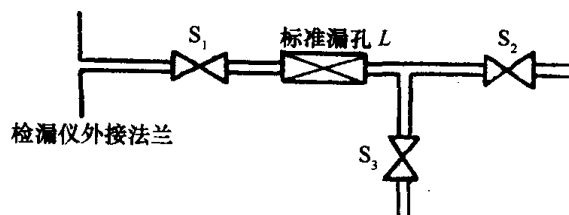


图 13-30 测量反应时间与清除时间的装置

3. 工作真空、极限真空与节流阀处的抽速

在选择与使用氦质谱检漏仪时,要注意工作真空 p_p 、极限真空 p_L 及节流阀的抽速 S_j 。这些都是仪器的重要参数。

检漏时,被检件除了可能有漏气外,不可避免地还会有出气,如果不加辅助真空系统的话,被检件的漏气与虚漏的总气流量 $Q_0 + \sum Q_i$ [参考式(13-1)]就要全部通过检漏仪系统。为了保证仪器能正常工作,应满足这样的条件,即:

$$Q_0 + \sum Q_i \leq S_j(p_p - p_L) \quad (13-53)$$

通常 $p_L \ll p_p$, 所以

$$Q_0 + \sum Q_i \leq S_j \cdot p_p$$

由此可见,工作压力 p_p 越高,节流阀处抽速 S_j 越大,检漏仪就越能适应在恶劣条件下进行检漏,对于大容器检漏此问题尤为重要。

$S_j p_p$ 比较小的仪器,只适用于小型的、去气较好的器件的检漏。仪器的 p_p 不应设计得太低,因为仪器运转时,要达到较低的 p_p 是费时间的。一般 p_p 选择在 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-3} \text{Pa}$ 范围。

检漏时如果质谱室中的压力太低,需要通过针阀放入气量 Q_T 使质谱室的压力达到 p_p 值。如果节流阀的抽速为 S_j , 即 $Q_T = S_j p_p$ 。由式(13-46)可知,对于某一给定仪器来说, q_{\min} 是一定值,因此, $S_j p_p$ 越大,即 Q_T 越大, γ_{\min} 就越小,也就是仪器的浓度、灵敏度就越高,对检漏越有利。对漏气和出气都很大的被检件进行检漏时, $S_j p_p$ 也是越大越好。因为此时必须加辅助真空系统来帮助仪器抽气,辅助系统起分流作用,会降低检漏灵敏度。但 $S_j p_p$ 越大,辅助系统的分流作用就会越小,检漏灵敏度也就降低得少一些。

(四)高灵敏度氦质谱检漏仪

上面讲过的 180° 磁偏转型和一级扇形磁场氦质谱检漏仪灵敏度为 $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。这种仪器的灵敏度主要受仪器的本底和噪声所限制。提高灵敏度的关键是需要增加仪器的信号噪声比。

1959年,彼得斯(Peters)报导了两级串联磁偏转氦质谱检漏仪的研制结果。他指出,如果只用一个分析器的话,由于工作压力一般不是很低(多数为 $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-3} \text{Pa}$),被气体分子散射的离子就较多。加之,从离子源出来的离子能量不均匀以及空间电荷的散焦作用等都会使氦峰附近其它的质谱峰加宽,并可能将较小的氦峰淹没。同时,那些与氦离子动量相同的非氦离子所形成的不稳定的虚假峰也叠加在氦的本底峰上,这样,造成了较大的本底与噪声,如图13-31(a)所示。他采用了两个分析器相串联的结构(图13-32),由于在中间狭缝 S_2 与邻近的挡板间有个加速电场,使离子在进入第二分析器前再次被加速,因此那些具有与氦离子动量相同的非氦离子虽然可以通过第一个分析器,但经第二次加速进入第二个分析器时,它们的动量就与氦离子不同了。这样,第二个分析器便把这些非氦离子与氦离子分开了,使原来加宽了的质谱峰分成了几个单独的峰,所以重叠在氦峰上的虚假峰就被减掉了(如图13-31(b)所示),使本底及本底噪声大为减少。这台仪器在信噪比为1:1时,灵敏度达到 $10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

1961年多克托夫(Doctoff)由于应用了高效率的轴向离子源和差级抽气装置,使得信号大大提高,做出了灵敏度为 $6.7 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的仪器。

1965年兰州物理所对改善氦质谱检漏仪的灵敏度,提高信噪比做了实验研究,研制出了灵敏度为 $6.7 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的仪器。他们采用了双方向聚焦的非均匀磁场分析器,减小了氦离子的损失。我们知道,常用的均匀磁场分析器只有单方向的角度聚焦,在离子运动平面的垂

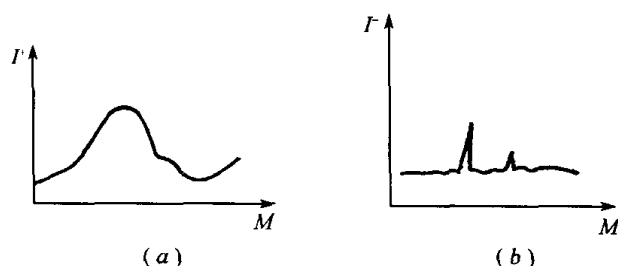


图 13-31 单级与两级串联氮质谱检漏仪质谱图

(a)单级;(b)两级串联。

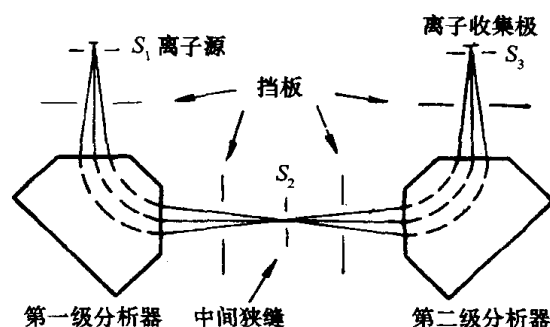


图 13-32 两级串联磁分析器原理图

直方向无聚焦作用,使离子受到一定损失。使用了两个分析器之后,离子路径加长了,这一损失也加大了。在一定条件下非均匀磁场具有径向与轴向两个方向聚焦的性质,可使离子损失大为减少。此外,为了减少本底和噪声,他们还做了不少努力,如采用氮的反扩散率低于 10^{-5} 数量级的扩散泵,法兰密封圈用金属的而不用橡胶的,用热阴极电离规代替磁放电视,并针对机械振动产生的微音效应,采取了相应的有效措施等。

在高灵敏的氮质谱检漏仪的研制与使用中,要特别注意降低仪器的噪声。

仪器的噪声来源,大体上可分为两种:①离子流接收放大及输出电路的噪声;②本底噪声。

离子流的接收放大及输出电路的噪声,通过电子线路的改进已能降得很低。就目前的水平来说,已不是限制灵敏度的主要因素了。如果它仍然是限制灵敏度的主要因素的话,还可以用放大信号的办法来提高信噪比,改善灵敏度。

本底噪声是由本底峰的不稳定造成的。显然它与本底的大小及电磁场参数的稳定度有关,即与下列因素有关:①离子源中发射电子流的不稳定性,加速电压、分析器电磁参数的不稳定性;②氮气在真空系统内的吸附和再放出(如真空油脂、人造橡胶、有机绝缘材料都可吸附和再放出氮气),电离真空计特别是磁放电真空计对氮气的记忆效应(在被污染了的情况下更为严重);③抽气系统中氮气的反扩散与对氮气抽速的不稳定性;④检漏仪本身漏气和氮气的渗透;⑤残余气体分子对氮离子的散射等。

上述因素对本底噪声及灵敏度的影响是很大的。例如有一台灵敏度为 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的仪器,抽速 $S = 1 \text{L/s}$,反应时间与清除时间 $\tau = 3 \text{s}$,若送入流量为 $10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 的氮气,当读数稳定之后,停止送氮气,根据计算,1min 之内便可以恢复到原始的本底与本底噪声值了,能够达到 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 灵敏度,但实际上往往在半个小时内本底及本底噪声还降不下来,使仪器的灵敏度会大大降低,这说明氮气记忆效应的严重影响。

(五)返流氮质谱检漏仪

氮质谱检漏仪的一个新发展是返流检漏仪的出现,如图 13-33 所示。此仪器的优点是,由于它的质谱室是处在高真空一侧,被检件则接在前级位置,因此能在较低真空度下对被检件进行检漏,且减少了被检件中的污物对质谱室的污染。这种仪器是根据油扩散泵各级喷嘴的压力比是与气体质量有关的原理制成的。

扩散泵每级喷口的压力比(即压缩比)可以表示为:

$$\frac{p_2}{p_1} = \exp \left[\frac{p_v V_v L_v}{M_v M_g / (M_v + M_g)} \right]$$

式中 p_1 、 p_2 ——该级入口、出口处的压力;

p_v ——油蒸气的密度;
 V_v ——油蒸气流的的速度;
 L_v ——油蒸气流的宽度;
 M_v ——油蒸气分子的摩尔质量;
 M_g ——气体分子的摩尔质量。

由上式可以看出,气体质量越小,压力比也越小。多级扩散泵的压力比可达到:对氦为 10^2 ,对空气中的其它气体成分为 $10^4 \sim 10^6$ 。当质谱计管接在泵的入口处,被检件接在泵的前级管道时,氦气通过漏孔进入前级管道后,仍有部分氦气返流到质谱计管中去,并给出漏气信号。此种检漏仪的灵敏度估计可达到 $10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

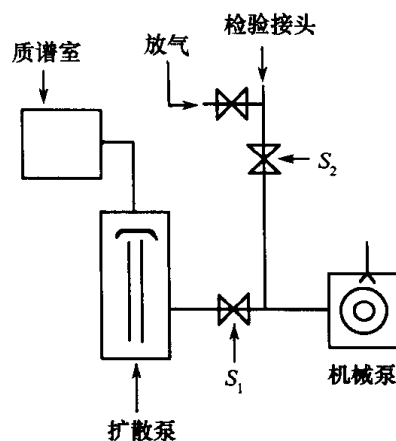


图 13-33 返流氦质谱检漏仪

(六)国产氦质谱检漏仪

我国从 20 世纪 60 年代初期开始研制、生产氦质谱检漏仪,此后,在仪器的研制生产方面有了飞速的发展。已正式投产的国产仪器有 10 余种,现将部分仪器性能、指标分述如下:

1. HZJ-1 型、TL-1 型和 JLH-1 型氦质谱检漏仪

它们在结构上是完全相同的,性能上也比较接近。下面仅以 HZJ-1 型为例加以介绍。

(1) 技术性能

仪器灵敏度: $5 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$;

工作真空: $2 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 。

(2) 仪器的主要组成

仪器的方块图如图 13-34 所示。仪器由两大部分组成:真空部分——包括节流阀、冷阱、质谱室、扩散泵、机械泵等。电器部分——包括放大器、振荡器、发射电流稳定器、稳压电源等。仪器箱架由角铁制成,电气部分装在箱架的前半部,真空部分装在后半部,操纵面板倾斜安装在箱架的顶部。仪器底部装有滚轮。

此仪器的真空系统中只设有一个节流阀(没有前级阀、抽速阀、放气阀),也没有前级真空指示,使用与维修不太方便。

2. 6104 型氦质谱检漏仪

它是一种 180° 单级磁偏转型仪器,是在 HZJ-1 型这类仪器的基础上改进而成的。特点是:被检件、节流阀、质谱室与真空系统串联,采用水冷扩散泵,电子线路稳定,灵敏度为 $6.7 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。由于增加了预抽阀、放气阀、控制阀和前置阀,并附有标准漏孔,使用和维修都比较方便。其方块图如图 13-35 所示。

(1) 技术性能

灵敏度为 $6.7 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,反应时间与清除时间均不大于 3s。

(2) 仪器的主要组成

质谱室:质谱室位于磁铁的中央,内有阴极、电离室、加速极、离子闸、抑制栅、离子收集极、潘宁真空规、电测管和高阻等。磁场强度 $H = 115 \text{kA/m}$,离子加速电压 $300 \text{V} \sim 400 \text{V}$ (可调)。

真空系统:前级泵是 2X-1 型机械泵。主泵是 K-70 型三级水冷油扩散泵,泵入口有水冷

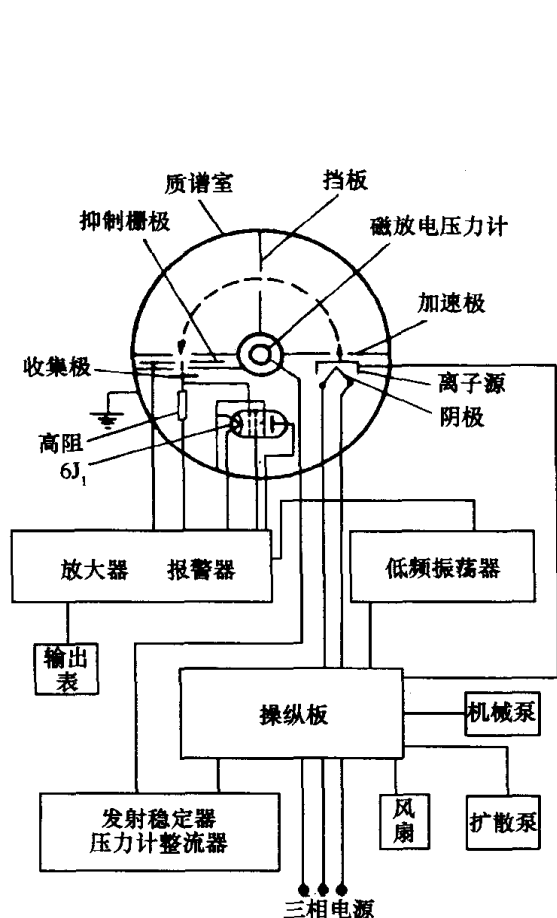


图 13-34 HZJ-1 型氦质谱检漏仪方块图

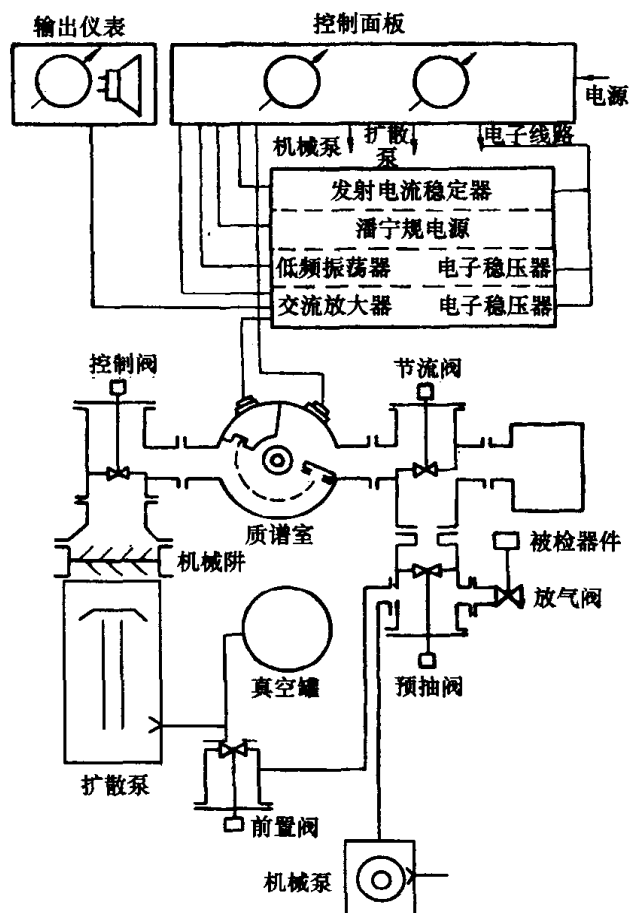


图 13-35 6104 型氦质谱检漏仪方块图

机械阱,防止油蒸气进入质谱室。仪器装有水压继电器,断水后可自动报警并切断扩散泵电源。系统上有五个阀门和一个前级真空罐,因此,仪器可以在扩散泵持续工作的情况下更换灯丝和更换被检件。

利用控制阀可调节泵对质谱室的抽速,以调节仪器的灵敏度。

3. ZLS-21 型和 ZLS-22 型高灵敏度氦质谱检漏仪

这两种仪器都是离子轨道半径为 40mm 的单级 90°扇形磁偏转型仪器。其特点是结构小巧,对机械泵和扩散泵冷却风扇均采取了减振措施,离子流放大器的前级采用了 DC-4B 静电计管提高了放大器的灵敏度。现以 ZLS-21 型为例介绍如下:

(1) 技术性能

灵敏度为 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,反应时间小于 2s,启动时间不大于 2h。

(2) 仪器的主要组成(如图 13-36 所示)

ZLS-22 型与 ZLS-21 型基本上相同,仅在电子学线路上有一些改进。

两种仪器的真空系统中均有一个调速阀,用调节扩散泵对质谱室的抽速来改变仪器的灵敏度。

4. ZLS-23 型氦质谱检漏仪

此仪器是一种单级 180°磁偏转型仪器。结构小巧,便于移动,对机械泵及扩散泵冷却风扇采取了减振措施,离子流的前级放大器使用了 DC-4B 静电计管,仪器灵敏度高。

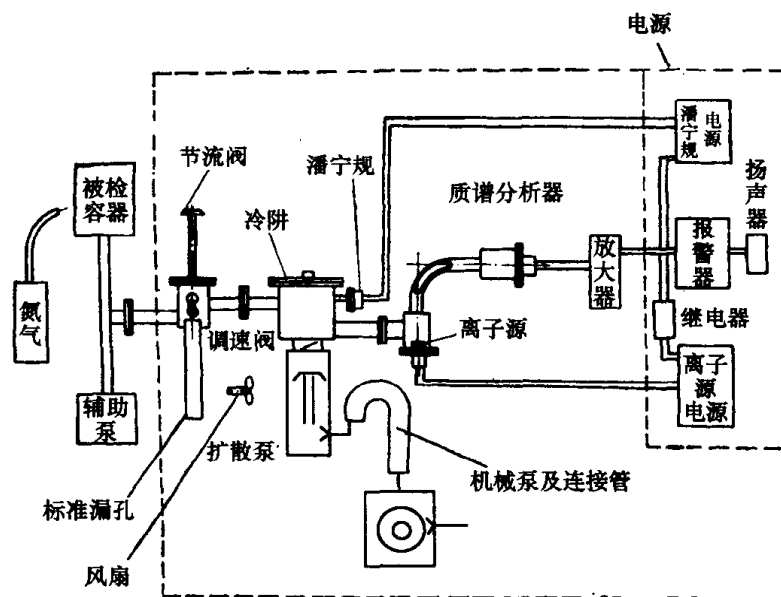


图 13-36 ZLS-21 型氮质谱检漏仪方框图

(1)性能指标

灵敏度:不用液氮,调整阀完全打开时为 $6.7 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,用液氮,部分关闭调速阀时为 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$;

反应时间:不大于 3s;

质谱室工作压力:低于 10^{-2}Pa ;

仪器启动时间:不大于 2h;

液氮消耗:1L/24h;

入口法兰处的抽速:5L/s;

功率消耗:1kW。

(2)仪器主要组成(图 13-37)

质谱室:氮离子轨道半径 $R = 10 \text{mm}$,磁场强度 $H = 175 \text{kA/m} \sim 199 \text{kA/m}$,离子加速电压为 100V 左右。质谱室内有:阴极、离化室、加速极(引出极)、中间缝隙、抑制栅、收集极、放大器前级静电计管 DC-4B 及高电阻。

真空系统:前级泵是 2X-0.5 型机械泵。主泵是抽速为 120L/s 的风冷三级油扩散泵,泵口设有挡油板,扩散泵的功率用负反馈可控硅控制电路来调节,使加热电流可稳定在 $\pm 5\%$ 之内,从而保证抽速的稳定。系统共有五个阀门:三个电磁阀,两个手动阀。节流阀装在外接法兰与质谱室之间,用来控制质谱室内的工作压力;粗抽阀用于预抽被检件;放气阀用于对机械泵和质谱室放大气;抽速阀用于调节主泵对质谱室的抽速,它与冷阱配合可使仪器的灵敏度进入 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 数量级,此阀还可以使质谱室与扩散泵隔离,以便在不停扩散泵的情况下对质谱室进行检修。此外,因扩散泵开始加热和停止加热的 20min 内反油率较大,关闭此阀可减少油蒸气对质谱室的污染;前置阀可使机械泵与扩散泵隔离;在前置阀与扩散泵之间有一个容积为 1.25L 的贮气罐,用于稳定扩散泵的前级压力。当前置阀关闭后,扩散泵可以继续工作 20min。高真空部分有一个容量为 1L 的液氮冷阱,加入液氮可缩短系统的抽气时间,以及防止由被检件产生的水蒸气、油蒸气及其它污物对质谱室的污染。冷阱加入液氮后,可关小抽速阀,减少仪器的本底和噪声,提高仪器的灵敏度。真空系统高真空部分的真空度用潘宁规测

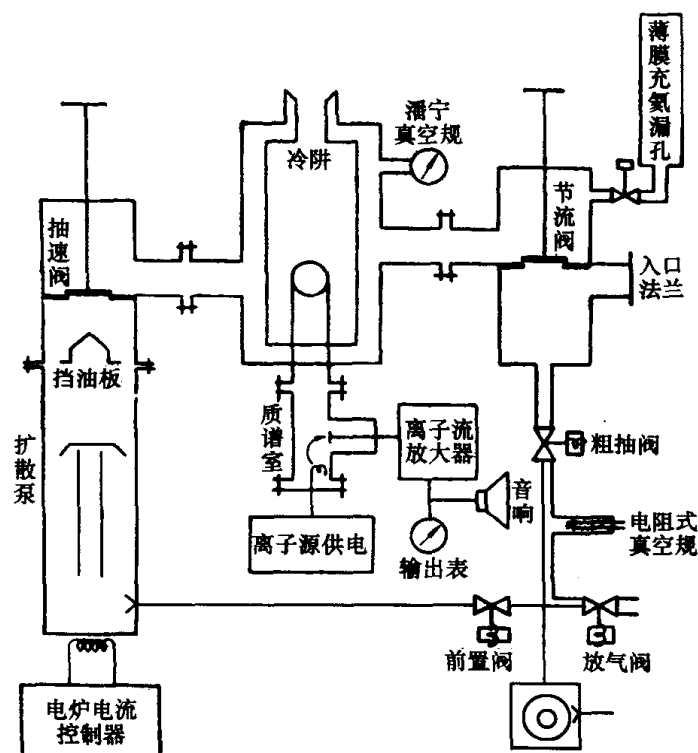


图 13-37 ZLS-23 型氮质谱检漏仪方框图

量,前级压力用热阻规测量。

供电线路:包括离子流放大器、音响装置、离子源电源、潘宁规电源、真空保护继电器、扩散泵加热的可控硅稳流源、电磁阀电源等。

5. ZhP-4A 型超高灵敏度质谱探漏仪

ZhP-4A 型超高灵敏度氮质谱检漏仪的特点是采用了两级串联的磁场强度相同的 90° 扇形磁场分析器和两个串联的水冷扩散泵,并且应用了差级抽气,因此,离子源处的抽速稳定,仪器灵敏度可达 $6.7 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$

(1) 性能指标

灵敏度:	$6.7 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$
反应时间:	3s
灵敏度稳定性:	不低于 $6.7 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$
极限压力:	$1 \times 10^{-4} \text{Pa}$
启动时间:	1.5h

(2) 主要组成(图 13-38)

分析器:分析器是两级 90° 扇形成 C 形串联的磁偏转型分析器(用永久磁铁),两级之间没有第二次加速,电磁参数也相同,氮离子轨迹半径均为 60mm。

离子源:离子源是用磁场准直的尼尔型源,它由加速透镜、聚焦电极、电离室和两个阴极组成。

接收放大器:包括接收缝组和静电计级。

真空系统:真空系统由机械泵、两个水冷油扩散泵、节流阀、冷阱、组合阀、贮气瓶、三个低真空阀、两个热偶规管、冷规等组成。真空系统是串联差动抽气系统,抽速高度稳定。不停扩散泵可以换阴极。工作时允许短时间停机械泵。仪器在启动时可用大抽速,工作时用小抽速。

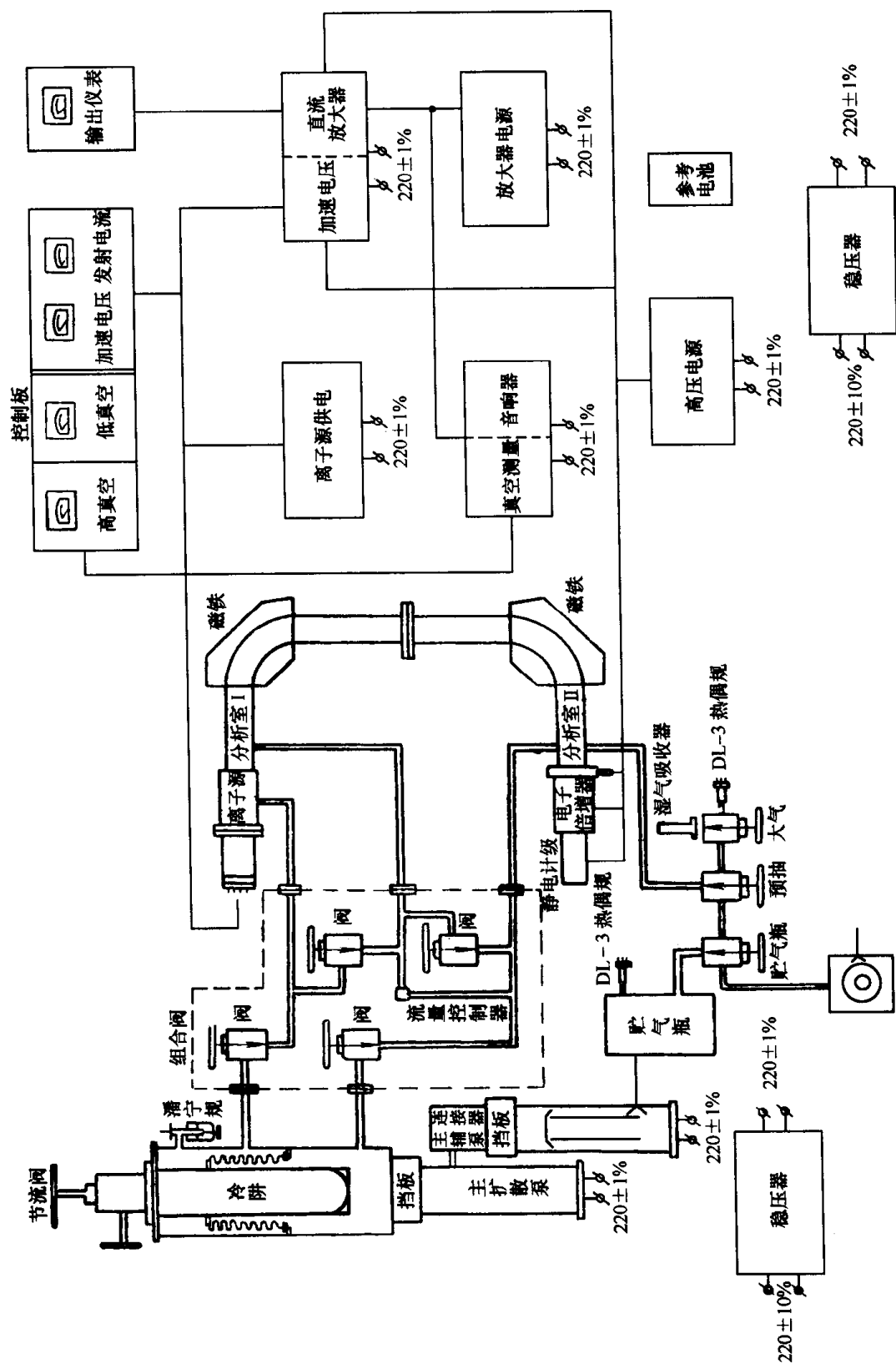


图 13-38 ZhP-4A 型超高灵敏氮质谱探漏仪方块图

电气部分:它包括离子源供电线路、放大器电源、真空测量线路、加速电压源与直流放大器、高压电源、铁磁谐振稳压器Ⅰ和Ⅱ、输出仪表、静电计以及操纵面板等。

仪器装有真空联锁及停水警报器。

6. ZLS-24 型氦质谱检漏仪

这是一种单级的 180° 磁偏转仪器,可检测漏率范围是 $10\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,漏率可在主机上直接显示,显示范围是 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{L/s}\sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,可在无液氮条件下工作。仪器内设置了粗抽泵以及相应的电磁阀,小型容器的检漏工作不需再配置辅助抽气装置。仪器备有自动快速检漏附件,可自动地检出各种小型密封元件的微小漏隙。

(1) 技术性能

仪器灵敏度:不使用液氮,全开抽速阀时,优于 $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$;使用液氮,部分关闭抽速阀时,为 $10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。清除时间不大于 3s,质谱室允许最高工作压力为 10^{-2}Pa 。配上“快检附件”,用小型密封器件背压法检漏时,最小可检漏率: $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,检漏周期:2s~30s;配上“吸枪”,用于密封器件吸氮法检漏时,最小可检漏率 $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

(2) 仪器主要组成

仪器由下列两个主要部分构成:

真空系统部分。主系统由机械泵、扩散泵、冷阱、质谱室、各种真空阀门、冷规和连接管道组成,辅助系统由进气管、粗抽泵、电磁阀、电阻规、低真空继电器和连接管道构成。

电器部分。用于主系统所需的电器测量、控制线路,以及辅助系统用的手动、自动控制线路。

7. ZhP-10 型氦质谱检漏仪

此检漏仪是磁偏型以氦为示踪气体的高灵敏度的质谱计。它具有常规检漏和逆扩散检漏两种方式,漏率能自动显示。可实现高压下(10Pa)检漏。

技术性能:灵敏度优于 $2\times 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,反应时间小于 3s,启动时间小于 40min,液氮消耗量 1L/24h。

8. ZLS 系列某些新型号氦质谱检漏仪

目前 ZLS 系列氦质谱检漏仪已陆续有近 10 个型号产品问世,新型号有 ZLS-23B、ZLS-34B、ZLS-24C 和 ZLS-26D/T 等

①ZLS-23B、ZLS-24B、ZLS-24C 型氦质谱检漏仪技术性能见表 13-15。

表 13-15 ZLS 系列新型氦质谱检漏仪技术性能

型 号	ZLS-23B	ZLS-24B	ZLS-24C
最小可检漏率/ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	2×10^{-11}	2×10^{-11}	2×10^{-11}
反应(清除)时间/s	<3	<3	<3
读数方式	表头/mV	表头和数字	表头和数字
特点	单主机,带标准漏空	带一套粗抽系统,适用于各种检漏方法,带标准漏孔	带二套粗抽系统,适用于批量检漏,带标准漏孔
注:北京中科科仪技术发展有限责任公司生产			

②ZLS-26D/T 型氦质谱检漏仪由北京中科科仪技术发展有限责任公司生产,是新型的全功能氦质谱检漏仪,机内采用涡轮分子泵作主排气机,启动快(仅 5min 即可使用)。仪器可以在测试口压强近似大气时,采用逆扩散方式进行检漏,也可以在测试口压强为 50Pa 以下时采用常规方式进行检漏。用常规方式检漏时,可以在分流状态下检较大的漏隙(测试口压强在

50Pa~ 10^{-1} Pa),也可以在不分流状态下检小漏隙(测试口压强在 10^{-1} Pa以下)。测量范围 2×10^{-1} Pa·m³/s~ 2×10^{-12} Pa·m³/s。采用光柱和数码管直接显示漏率,且可按需要选用适当的漏率单位(仪器已给出四种常用单位 Pa·m³/s、Torr·L/s、mb·l/s、atm·cc/s),读数方便。仪器有音响报警装置,报警点可以任意设定,使用方便。本仪器适用对各种零部件作喷吹法(真空检漏法)、吸枪法(压力检漏法)、背压法检漏。

主要技术参数:

最小可检漏率	优于 5Pa·m ³ /s~ 10^{-12} Pa·m ³ /s
最大可检漏率	2×10^{-1} Pa·m ³ /s
漏率显示范围	2×10^{-1} Pa·m ³ /s~ 2×10^{-13} Pa·m ³ /s
反应时间	不大于 3s
质谱室允许工作的最高压强	1×10^{-2} Pa
测试口允许工作的最高压强	1000Pa
被检件由粗抽至检漏的自动切换点,检漏点可调范围	50Pa~ 10^{-1} Pa
背压法检漏时间可调范围	5s~30s
仪器的启动时间	不大于 5min
仪器体积	640mm×550mm×980mm

9. ZQJ 系列某些新型号氦质谱检漏仪

目前 ZQJ 系列氦质谱检漏仪有:ZQJ-220、ZQJ-230D、ZQJ-230E、ZQJ-240、ZQJ-291 等新型号产品,由北京中科科仪技术发展有限责任公司生产。

①ZQJ-220 型氦质谱检漏仪 具有常规和逆扩散两种检漏方式,检测范围宽,自动阀门控制系统可防止误操作,采用油扩散泵作为高真空抽气泵,需要较长的启动时间和液氮。

②ZQJ-230D 型氦质谱检漏仪 采用逆扩散检漏,可在较高压力下开始检漏。采用了涡轮分子泵和机械泵组成的抽气系统,启动快。该仪器既可用于抽空检漏,也可用于吸枪检漏。

技术指标:

响应时间	<3s
最小可检漏率	5×10^{-11} Pa·m ³ /s
启动时间	<8min
漏率显示范围	2×10^{-11} Pa·m ³ /s~ 1×10^{-4} Pa·m ³ /s
允许检漏口最高工作压力(普通)	20Pa~50Pa
仪器体积	600mm×540mm×920mm

③ZQJ-230E 型氦质谱检漏仪 有一个独立的预抽泵。特别适合于大容积系统检漏。操作检漏过程的电磁阀用一单片机控制,可靠灵活。ZQJ-230E 型氦质谱检漏仪是以全套(3个)电磁阀替换 ZQJ-230 型仪器的手动阀,避免了操作人员的误操作。ZQJ-230E 型氦质谱检漏仪采用逆扩散检漏,所以能在较高压力下开始检漏。仪器本身的高真空系统采用了涡轮分子泵和机械泵组成的排气系统,启动快。它采用手动组合阀完成检漏的全过程操作(预抽、检漏和放气)。用 50 个发光条和相应的数字量程指数显示漏率。ZQJ-230E 既可用于抽空检漏,亦可用于吸枪检漏。

技术指标:

响应时间	<3s
------	-----

最小可检漏率	$5 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
启动时间	$< 8 \text{min}$
漏率显示范围	$2 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
允许检漏口最高工作压力(普通)	$20 \text{Pa} \sim 50 \text{Pa}$
仪器体积	$540 \text{mm} \times 500 \text{mm} \times 950 \text{mm}$

④ZQJ-240 型氮质谱检漏仪 采用了涡轮分子泵和机械泵组成的抽气系统,具有常规和逆扩散两种检漏方式,自动阀门控制系统可防止误操作,其自动量程转换和报废点设置功能适合快速循环检漏。

技术指标:

最小可检漏率	$5 \times 10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
响应时间	$< 3 \text{s}$
启动时间	$< 10 \text{min}$
漏率显示范围	$2 \times 10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 8 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
仪器体积	$600 \text{mm} \times 650 \text{mm} \times 1030 \text{mm}$

五、如何选择检漏仪器、检漏方法和示漏物质

检漏人员在进行检漏之前要认真、正确地选择检漏仪器、检漏方法和示漏物质,以求多、快、好、省地保证检漏任务的完成。

(一)选择检漏仪器和方法应注意的几个问题

1. 确定所需灵敏度时应注意的问题

检漏仪最小可检漏率(即仪器灵敏度)与在检漏过程中能够达到的灵敏度(即检漏灵敏度)是不完全相同的。例如,氮质谱检漏仪的灵敏度都是在一定的、不接被检件的最佳化条件下测出的,而在具体使用中能够达到的检漏灵敏度则与被检件的实际状况以及检漏方法有很大关系。当然,当使用条件相同时,一般讲,那些灵敏度高的仪器能达到较高的检漏灵敏度。但是,并不是高灵敏度的检漏方法和仪器在任何时候都能达到最好的效果,即达到最好的检漏灵敏度。

选择什么样的检漏仪器和方法,最重要的是要求能达到一定的检漏灵敏度。

检漏灵敏度,即确定被检件最大允许的总(或单个漏孔的)漏率时,要以满足设计、安装、运输的要求为原则。通常,灵敏度较高的方法能可靠地检出所存在的漏孔,但就检漏工作而言,提高对检漏灵敏度的要求,意味着要用高灵敏度的仪器和方法,势必使设备和运转费用增加。

图 13-39 给出灵敏度的增加与设备运转容易程度间的关系(对于某种检漏方法而言)。这种曲线有一个平坦区(最佳工作区),超过这个区域,使灵敏度提高或降低,但会使运转的容易程度急剧下降。例如打气试漏法,对于检示大于 $10 \text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$ 的漏孔时,会由于气体迅速放出,被检件内的充气压力急剧下降,使检漏工作造成困难。而在检示小于 $10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$ 的漏孔时,会由于形成气泡时间过长,使检测变得困难。再如质谱检漏法,当采用动态检漏时,灵敏度低,操作容易,反应时间与清除时间小。而在采用静态检漏时,灵敏度高,但运转困难,费时间。

检漏灵敏度高的方法和仪器,其设备费和运转费用也是高昂的,如图 13-40 所示。对于同一种方法和仪器,提高灵敏度需要增加附加的设备和复杂的操作程序,检验费用自然也就增

加。在图 13-39 曲线的平坦区右端,运转容易程度下降,运转时间加长,都引起成本的增加。

2. 测量漏率时应注意的问题

漏率测量的办法是以示漏物质覆盖被检容器的整个可疑区(或者被检容器内充入示漏物质),另一侧抽真空(或是大气);或是在被检容器的内外两侧形成压差(或示漏物质的浓度差),在低压(或低浓度)侧测量示漏物质的漏率和浓度变化。

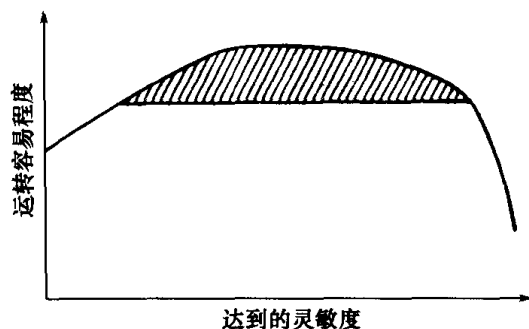


图 13-39 运转容易程度与灵敏度的关系

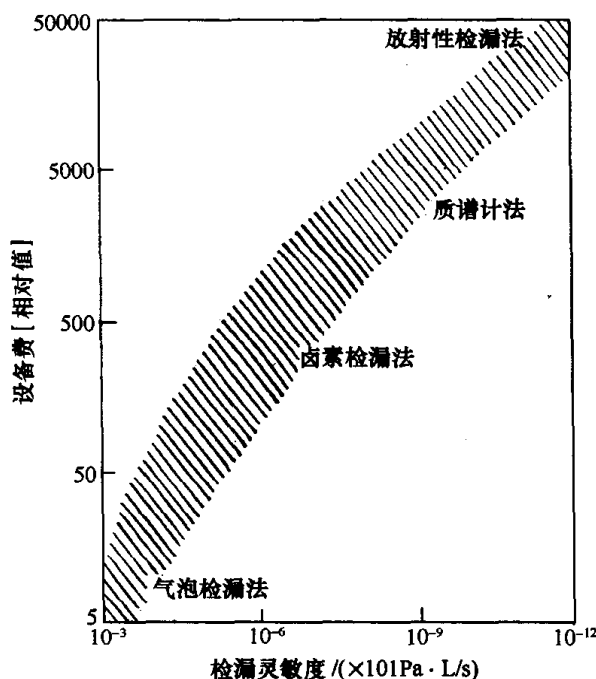


图 13-40 设备费与灵敏度关系

(1) 加压条件下容器漏率的测定

在加压条件下测量容器漏率的方法有：气泡法、超声法、气敏半导体检漏仪法、氨检漏法、卤素检漏仪法、氮质谱检漏仪法等。

(2) 真空条件下容器漏率的测定

①利用接入真空容器的真空规、离子泵及残气分析质谱计来测定容器的漏率。

②可以选用流量测量、压力测量、卤素检漏仪以及氮质谱检漏仪等方法来测量漏率。

(3) 密封件的无损检漏

①尽量利用密封件上可用来指示密封器件内部压力和示漏物质分压力的规管和残气分析质谱计等进行检漏。

②有些原来不是测量压力的装置,如:电子管、显像管等,若改换馈电方式,将其电极接成电离规的方式,测量出管内离子流的变化,便可知管内压力的变化率。大批量生产这类器件时,可以通过校准的方法把离子流的变化率直接换算成漏率。

③如果密封件内部具有可作为示漏的物质时,采用动态法或静态法对漏到外面的示漏物质进行检测,就可测出漏孔来。通常这类密封件内部的示漏气体的分压力要比采用背压法时的压力为高。因此,检漏灵敏度高,费用低。

④背压法检漏适用于成批生产小型密封件时的检漏;可以使用卤素检漏仪,氮质谱检漏仪,放射性同位素等检漏方法和仪器。

3. 寻找漏孔位置时应注意的几个问题

找出漏孔位置的基本方法有两种:喷吹法和吸嘴法(即内探头法与外探头法)。当检漏仪器的敏感元件与被检件相连时,叫内探头法或喷吹法,不相连时叫外探头法或吸嘴法。

喷吹法的检漏速率比吸嘴法快,但吸嘴法可以使被检件器壁两侧压力差高于 100kPa,因此便于检出更小的漏孔。

喷吹法和吸嘴法的适用范围和检示方法如下:

①喷吹法 喷吹法适用于可以被抽空的系统和零部件的检漏。用示漏液体涂抹在可疑处或用示漏气体喷吹可疑处都属于这类方法。

在采用喷吹法时,首先要考虑被检件上是否有可作为检漏用的探测器,如真空规管、残气分析质谱计等,能否使用高频火花检漏仪。

其次再考虑选用下述方法和仪器中的哪一种:放电管法、规管法、卤素检漏仪、氢—钯法、氦质谱检漏仪等。

②吸嘴法 此方法适用于下列情况:被检件不允许抽真空,因此试件必须在大于大气压的压力下检漏;试件内放气量很大;待检件是复杂的长管道等。使示漏物质充入部件内部,检查示漏物质通过漏孔漏到外面的方法,都是属于吸嘴法。所以可选用下列方法和仪器:气泡法、超声法、荧光法、氦检漏法、卤素检漏仪、质谱检漏仪等。

(二)示漏物质的选择及使用中应注意的事项

示漏物质的选择和使用是检漏工作中的重要问题。因此需要全面了解检漏元件对示漏物质的敏感情况以及示漏物质的物理、化学性质。

1. 检漏仪的敏感元件对示漏物质的灵敏程度

检漏的过程,就是用敏感元件来检示是否有示漏物质通过漏孔。因此,检漏敏感元件对示漏物质的灵敏程度是选择示漏物质的主要根据。例如,卤素检漏仪一般用氟里昂作示漏物质,如果没有氟里昂,则可用其它卤族化合物,如碘仿、四氯化碳等来代替。再如热真空规检漏法中,用氢气就比用氧气更为灵敏。

2. 示漏物质在空气中的含量要小

示漏物质在空气中的含量会直接影响检漏仪器的本底及噪声。如质谱法检漏也可使用氢作为示漏气体,但由于氢的本底峰和仪器的噪声都很大,不能检出较小的漏孔,而使用氦气为示漏气体时情况就好得多。

3. 示漏气体的物理和化学性质对检漏的影响

(1)气体浓度

有时需把所使用的示漏气体进行稀释,其原因是:

- ①低浓度的示漏气体可以得到良好的线性和稳定的反应;
- ②当所要求的检漏灵敏度不高时,不必使用纯气体,用较低浓度的示漏气体就可达到要求;
- ③易燃性示漏气体稀释成混合物后,可减少燃烧和爆炸的危险性(但有时正相反,如纯氢气危险性并不大,而经空气稀释后的氢气在一定浓度下反而有爆炸的危险);
- ④纯气的费用太高。

检漏仪的反应值正比于示漏气体的浓度,因此,若漏孔为粘滞流时,则对纯示漏气体的估算漏率是

$$Q_{\text{估, 纯示漏气体}} = \frac{Q_{\text{示漏气体指示的}}}{N_{\text{示漏气体}}} \frac{\eta_{\text{混合}}}{\eta_{\text{示漏气体}}} \quad (13-54)$$

式中 $Q_{\text{示漏气体指示的}}$ ——检漏时,用示漏气体指示的漏率大小;

$N_{\text{示漏气体}}$ ——在混合气体中,示漏气体的百分比浓度;

$\eta_{\text{混合}}$ ——混合气体的粘滞系数

$$\eta_{\text{混合}} = N_A \eta_A + N_B \eta_B + N_C \eta_C + \cdots + N_{\text{示漏气体}} \eta_{\text{示漏气体}}$$

$N_A, N_B, N_C \cdots$ 为气体 A、B、C \cdots 的浓度; $\eta_A, \eta_B, \eta_C \cdots$ 为气体 A、B、C \cdots 的粘滞系数, $\eta_{\text{示漏气体}}$ 为示漏气体的粘滞系数, 若 $\eta_A = \eta_B = \eta_C = \cdots = \eta_{\text{示漏气体}}$ 时, 因 $N_A + N_B + N_C + \cdots + N_{\text{示漏气体}} = 1$, 则 $\eta_{\text{混合}} = (N_A + N_B + N_C + \cdots + N_{\text{示漏气体}}) \eta_{\text{示漏气体}} = \eta_{\text{示漏气体}}$, 于是

$$Q_{\text{估, 纯示漏气体}} = \frac{Q_{\text{示漏气体指示的}}}{N_{\text{示漏气体}}} \quad (13-55)$$

如果漏孔中的气流为分子流, 则

$$Q_{\text{估, 纯示漏气体}} = \left(\frac{Q_{\text{示漏气体指示的}}}{N_{\text{示漏气体}}} \right) \left(\frac{M_{\text{混合气体}}}{M_{\text{示漏气体}}} \right)^{1/2} \quad (13-56)$$

式中 M ——相对分子量。

(2) 气体的扩散率

在使用吸嘴法检漏时, 采用低扩散率的示漏气体可有利于漏孔的检示, 因为从漏孔中出来的示漏气体不易散去。但是, 低扩散率的示漏气体在短时间内是难于充满各种管道和死空间的, 因此, 等待时间需要长些。

高扩散率的气体能较快地通过漏孔和充填死空间, 因而反应时间较短, 对喷吹法检漏来说这是很重要的。

(3) 分层作用

在被检件未抽空的情况下充入示漏气体时, 气体的混合可能是不均匀的。轻的气体升到顶上, 重的沉在底下。对于相对分子量大、扩散率低的气体, 这种分层作用更为明显。由于分层作用, 示漏气体的浓度在不同高度上是不同的, 当采用吸嘴法检漏时, 不同高度处的检漏灵敏度就不同了。因此, 必须克服这种分层现象, 其办法是, 使气体循环或者同时加入示漏气体和稀释气体。

4. 示漏气体对真空系统的污染问题

所选择的示漏物质不应造成系统或部件的污染或腐蚀。如氨检漏法不宜用于铜制的系统和部件; 对于清洁程度要求较高的真空系统或器件, 不允许充入卤族化合物, 就是说不能用卤素检漏仪来检漏。

5. 避免示漏物质堵塞漏孔

在检示小漏率的漏孔时, 要注意防止示漏物质堵塞漏孔。例如: 气泡检漏法和以液体为示漏物质的计管检漏法, 小漏孔易于堵塞。

(三) 选择检漏方法和示漏物质时还要考虑的安全因素

选择检漏方案和示漏物质时, 必须考虑有关工作人员和设备的安全问题。例如: 示漏物质是否易燃, 是否会引起人的窒息和中毒。采用压力检漏法时, 被检件有无爆裂的可能性等等, 都要事先采取相应的安全措施。

1. 易燃性

氢气、甲烷、丁烷、丙酮、乙醇、乙醚、氯仿等示漏物质都是易燃的, 当它们与空气的混合比例达到一定程度时易于爆炸, 故必须采取通风、防火、防爆措施。

2. 中毒

有些示漏物质是有毒的, 或对人体器官有较大的刺激性, 如丙酮、乙醚、氯仿、氨气等应尽可能少用或不用。使用时要有安全措施, 注意通风, 戴口罩, 不要沾到皮肤上。

3. 窒息

尽管有些示漏气体是无毒的,但在检漏时,当某处空气被示漏气体大量置换后,检漏工作人员就有可能由于缺氧而造成窒息,因此要有良好的通风设施。

4. 爆裂

加压检漏时,被检容器需充入高于 100kPa 压力的示漏气体,可能造成容器爆裂损坏设备,以致危及人身安全,因此对容器的承压能力必须予以足够重视。

进行压力法检漏前,要预先对容器强度进行计算,并经水压试验(但水压试验可能将小漏孔堵塞,要求检出漏率小于 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 的漏孔时不宜采用水压试验)。

耐压强度差的抽空容器也存在爆炸的危险。如内应力大的玻璃钟罩、玻璃真空系统、大型电子管、示波管和显像管等,在抽空时都可能爆裂。抽空前应在被检件外部用罩子套起来,方可进行检漏。

此外,不能因检漏而使被检件造成损坏。有些被检件在压力法或真空法检漏中虽然没有爆裂,但可能产生较大的形变,从而破坏被检件的形状和工作性能。如大型真空系统用压力法检漏时,很容易使大型法兰产生翘曲,影响真空密封,这也是不能允许的。

六、氦质谱检漏技术

用氦质谱检漏仪进行检漏时,被检件的全部或局部是处于加压或抽空的状态,检漏仪总是处于被检件器壁的低压一侧。示漏物质通过被检件上的漏孔进入检漏仪之前,一部分被辅助真空系统抽走,只有一部分进入检漏仪,致使灵敏度降低。因此,如何充分发挥检漏仪的能力,以求得检漏灵敏度高、运转费用少、检漏时间短、可靠等等问题均应引起注意。

(一) 检漏的物理过程及有关公式

下面以真空检漏法为例,对氦质谱检漏仪法的物理过程做一简要的叙述。

检漏仪与被检件及辅助真空系统的连接方式有图 13-41 所示的两种方式。按图 13-41 的方式接好系统,系统正常运转后就可开始工作。当氦气没有喷到漏孔上时,检漏仪本底值可认为是零(或补偿到零)。喷氦气后,氦气通过漏孔进入检漏系统,系统内各处氦的分压开始上升,直到稳定状态(即进入的氦气量等于被抽走的量)。此时,若停止喷氦,由泵的抽气作用,系统内各处氦分压就逐渐降低,最后趋于初始的零本底值。下面将对这种过渡过程和稳定状态进行研究,以了解检漏灵敏度、反应时间以及清除时间等与系统参数间的关系。

1. 稳定状态

(1) 检漏仪接在前级一侧

令前级泵对氦气的抽速为 S_1 , 检漏仪支路对氦的抽速为 S_d , 漏孔对氦气的漏率为 q 。

当前级阀关闭时,由漏孔漏进的氦气全部通过检漏仪,因此,检漏仪在稳定状态时读数变为

$$\Delta I^+ = K \frac{q}{S_c} \quad (13-57)$$

式中 S_c ——检漏仪离子源处对氦的抽速;

K ——常数。

此时,检漏灵敏度等于仪器的灵敏度。

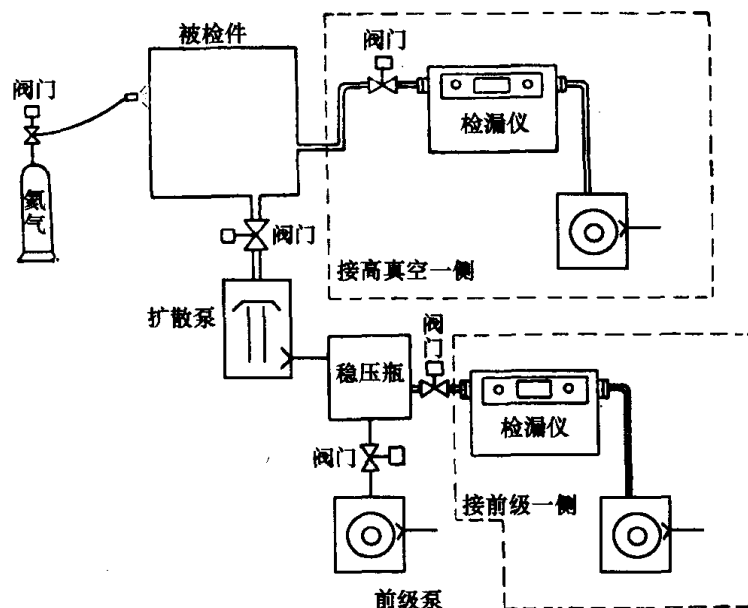


图 13-41 检漏仪与被检件及辅助系统的连接方式

当前级阀打开时

$$\Delta I^+ = K \frac{q S_d}{(S_d + S_1) S_c} \quad (13-58)$$

最小可检漏率 q_{\min}

$$q_{\min} = \frac{S_d + S_1}{S_d} Q_{\min} \quad (13-59)$$

其中, Q_{\min} 是仪器的灵敏度。不难看出, 此时检漏灵敏度降低到原来的 $(S_d + S_1)/S_d$ 。

基于以上分析, 可得不同条件下仪器的检漏公式:

① $S_1 \rightarrow 0$, 即前级阀关闭时, 式(13-58) 就变成式(13-57), $q_{\min} = Q_{\min}$ 。

② q_{\min} 与次级泵抽速 S_2 无关, 即在稳定状态下次级泵无助于灵敏度的改善(但以后将说明, 使用次级泵对减少反应时间有好处)。

③ 若 C_i 和 C_l 分别为检漏仪自身和连接管道的流导, 有

$$\frac{1}{S_d} = \frac{1}{S_c} + \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_l}$$

则式(13-53) 可表示为

$$\Delta I^+ = K \frac{q}{S_c S_1} \left[\frac{1}{S_c} + \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_l} + \frac{1}{S_1} \right]^{-1} \quad (13-60)$$

由式(13-60) 可知, 当 S_c 和 S_1 为恒值时, C_i 和 C_l 越大读数变化越大, 即检漏灵敏度越高。

④ S_c 越小, ΔI^+ 越大, 检漏灵敏度越高。当 $S_c \rightarrow 0$ 时, 也就是检漏仪内的调速阀关闭时

$$\Delta I^+ = K \frac{q}{S_1} \quad (13-61)$$

如果检漏仪正常工作的灵敏度为 Q_{\min} , $S_c = S_{c_0}$ 。一般情况下 $S_{c_0} \ll C_i$, $S_{c_0} \ll C_l$, 若 $S_1 \gg S_{c_0}$, 则检漏灵敏度为

$$q_{\min} = \frac{S_1}{S_{c_0}} Q_{\min} \quad (13-62)$$

⑤ 若 $S_c = S_1 = 0$ (调速阀和前级阀完全关闭时)

$$\Delta I^+ = K \frac{q \Delta t}{\Sigma V_i} \quad (13-63)$$

其中 Δt 为送氮时间, ΣV_i 为检漏系统所有零部件的体积之和。此时的检漏灵敏度为

$$q_{\min} = \frac{\Sigma V_i}{S_c \Delta t} Q_{\min} \quad (13-64)$$

⑥ 用标准漏孔校准时 (标准漏孔漏率为 Q_0), 仪器读数变化为 ΔI_0^+ 。若被检漏孔所对应的仪器读数变化为 ΔI^+ , 则被检漏孔的漏率为

$$q = \frac{\Delta I^+}{\Delta I_0^+} Q_0 \quad (13-65)$$

⑦ 如果校准所用的氮气是压力为 100kPa 的纯氮气, 而检漏时是用浓度为 γ , 压力为 p 的氮气, 则被检漏孔的漏率为

$$q = \frac{\Delta I^+}{\gamma p \Delta I_0^+} Q_0 \quad (13-66)$$

式中 p 以 Pa 为单位。

(2) 检漏仪接在高真空一侧

此种情况下的检漏公式与检漏仪接在前级一侧时相似, 所不同的是所有公式中的 S_1 要用 S_2 代替。

2. 过渡状态

在确定过渡状态的变化规律时, 假定漏孔是畅通无阻的, 它的时间常数很小, 不足以影响信号的建立与消失。同时, 假定氮质谱检漏仪测量电路的时间常数也很小, 也不影响信号的建立与消失。

(1) 检漏仪接在前级一侧

设 V 为被检件的体积, v 是前级泵、次级泵和检漏仪之间的体积。

① 漏率为 q 的漏孔被喷氮后, 引起检漏仪读数的变化是

$$\Delta I^+ = \frac{Kq}{S_1 + S_d} \frac{S_d}{S_c} \left[\left(1 - \frac{1}{1 - \tau_1/\tau_2} \right) e^{-t/\tau_2} + \frac{\tau_1/\tau_2}{1 - \tau_1/\tau_2} e^{-t/\tau_1} \right] \quad (13-67)$$

其中, $\tau_2 = V/S_2$ 是检漏系统高真空部分的时间常数, $\tau_1 = v/(S_d + S_1)$ 是检漏仪低真空部分的时间常数。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(13-67) 就变成式(13-58)。

若 $\tau_2 \gg \tau_1$ 时

$$\Delta I^+ = \frac{Kq}{S_1 + S_d} \cdot \frac{S_d}{S_c} (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (13-68)$$

在经过时间 T 之后停止喷氮气时

$$\Delta I_{t>T}^+ = \frac{Kq}{S_1 + S_d} \cdot \frac{S_d}{S_c} (1 - e^{-T/\tau_2}) e^{-(t-T)/\tau_2} \quad (13-69)$$

② 检漏灵敏度的变化。

令 $\tau_2 \gg \tau_1$, 信号上升过程中检漏灵敏度的变化是

$$q_{\min} = \frac{Q_{\min}(S_1 + S_2)}{S_d} (1 - e^{-t/\tau_2})^{-1} \quad (13-70)$$

停止喷氦后,检漏灵敏度变化为

$$q_{\min, t > T} = \frac{Q_{\min}(S_1 + S_d)}{S_d} (1 - e^{-T/\tau_2})^{-1} e^{-(t-T)/\tau_2} \quad (13-71)$$

在喷氦时,若 $t \rightarrow \infty$,由式(13-70) 得出

$$q = \frac{Q_{\min}(S_1 + S_d)}{S_d}$$

此式与式(13-59) 完全相同。可以看出,在稳定状态下次级泵对检漏灵敏度没有影响,但对过渡过程中的检漏灵敏度则有影响。

③ 反应时间 τ_R 与清除时间 τ_C 。由式(13-70) 和式(13-71) 可知, $\tau_R = \tau_C = \tau_2 = V/S_2$, 即在 $V/S_2 \gg v/(S_d + S_1)$ 时,前级泵的抽速对 τ_R 和 τ_C 基本上没有影响。 τ_R 和 τ_C 只决定于体积 V 和次级泵的抽速 S_1 。

(2) 检漏仪接在高真空一侧

① 信号变化。漏孔喷氦后

$$\Delta I^+ = \frac{Kq}{S_2 + S_d} \cdot \frac{S_d}{S_c} (1 - e^{-t/\tau'_2}) \quad (13-72)$$

式中 $\tau'_2 = V/(S_2 + S_d)$ 。

在经过时间 T 之后停止送氦气时

$$\Delta I^+_{t > T} = \frac{Kq}{S_2 + S_d} \cdot \frac{S_d}{S_c} (1 - e^{-T/\tau'_2}) e^{-(t-T)/\tau'_2} \quad (13-73)$$

对于式(13-72),当 $t \rightarrow 0$ 时,即在稳定状态时,可得与(13-58) 式类似之结果,即

$$\Delta I^+ = K \frac{qS_d}{(S_d + S_2)S_c}$$

② 灵敏度。喷氦时和停止喷氦时的检漏灵敏度分别为

$$q_{\min} = \frac{Q_{\min}(S_2 + S_d)}{S_d} (1 - e^{-t/\tau'_2})^{-1} \quad (13-74)$$

$$q_{\min, t > T} = \frac{Q_{\min}(S_2 + S_d)}{S_d} (1 - e^{-T/\tau'_2})^{-1} e^{-(t-T)/\tau'_2} \quad (13-75)$$

③ 反应时间 τ_R 与清除时间 τ_C

$$\tau_R = \tau_C = \tau'_2 = V/(S_2 + S_d) \quad (13-76)$$

由上面的讨论可知前级泵的参数对检漏灵敏度、反应时间和清除时间均无影响。

3. 关于反应时间与清除时间

前面已分别对反应时间和清除时间在不同情况下的意义作了说明。这两个参数是衡量检漏系统动态特性的标志,检漏前应对其进行认真的估算和测量。当 τ_R 较大时,信号就上升得慢, τ_R 小,则信号上升得快,所以检漏速度也必须与之配合,检漏速度太快,灵敏度会降低。清除时间 τ_C 是说明氦气去掉后信号下降的速度,它决定检漏仪恢复到检漏前的状态所需的时间,也就是决定了两次检漏之间的时间间隔大小。表 13-16 给出了反应信号与最大信号(稳定信号)的百分数和 t/τ 的关系($\tau = \tau_R = \tau_C$)。由此表可知,送氦条件下,当 $t = 3\tau$ 时,信号可上升到最大值的 95%,而停止送氦时,信号则下降到开始值的 5.0%。检漏系统的这种响应可绘成诺模图(图 13-42)。此图由五个平行的轴组成:体积 V 轴、抽速 S (等于 $S_1 + S_d$ 或 $S_2 +$

S_d) 轴、参考轴、经历时间 t 轴及相应的反应值(A 、 B 和 C) 轴。此图的使用方法是,当知道抽速 S 、体积 V 及经过的时间 t 时,连接 S 和 t 的两点的直线与参考轴相交于一点,过此交点与 V 轴上的相应点作连线,延长后与反应值轴相交。 A 表示 t/τ , $\tau = V/S$, B 表示漏气去掉后的 t 时间时反应值与平衡值之比 $e^{-t/\tau}$, C 表示加漏气体 t 时间时反应值与平衡值之比 $(1 - e^{-t/\tau})$ 。例如 $V = 500\text{L}$, $S = 20\text{L/s}$, $\tau = 25\text{s}$, 当 $t = 25\text{s}$ 时,可知 $A = t/\tau = 1$, $B = 0.368$, $C = 0.632$ 。

表 13-16 反应信号与最大信号值的百分数与 t/τ 的关系

t/τ	0.5	1	2	3	4
信号上升 $\Delta I^+ / \Delta I_\infty$	39.4%	63.2%	86.5%	55.0%	98.2%
信号下降 $\Delta I^- / \Delta I_0$	60.6%	36.8%	13.5%	5.0%	1.8%

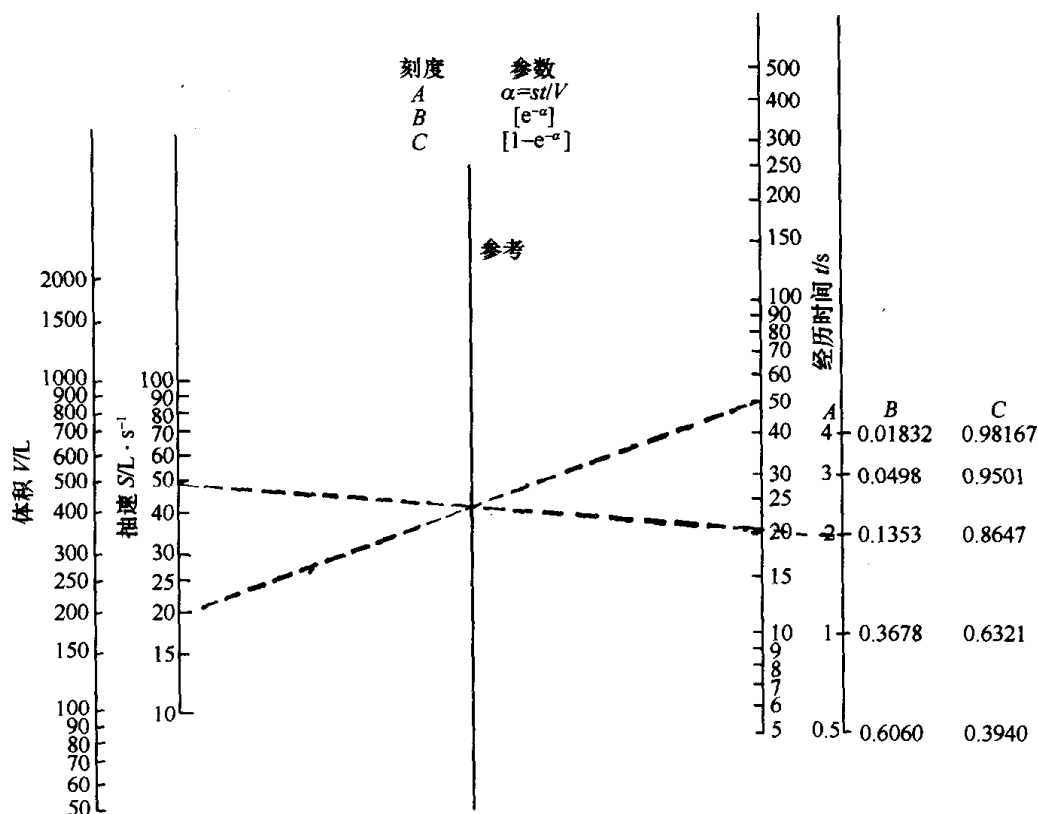


图 13-42 反应时间诺模图

如何缩短反应时间的问题一直为人们所重视。例如,人们在氦质谱检漏中应用载体气体的办法来缩短反应时间,如在吸嘴法检漏中,容器中送入二氧化碳使流过漏孔的气流由分子流变为粘滞流,加快了流动速度,使反应时间大为减少。二氧化碳则可被检漏仪的液氮冷阱所抽除;也有人提出加氮气扫描的办法来减少反应时间。在大容器检漏中,可在容器上加上一个凹形法兰进行局部检漏,使被检容器的体积减小,从而缩短反应时间。

应该指出,以上在讨论反应时间与清除时间时,都有一个假定条件,就是任何时候体积 V 内示漏气体的浓度总是均匀的。这一假定对于处于较低压力的小容器是符合的。但对于处于中等压力的大容器,由于气体分子平均自由程小于容器尺寸,简单地把反应时间与清除时间用 V/S 来表示显然是不准确的。因此,式(13-67) ~ 式(13-75)并不能准确地描述检漏的动态过程。实际的反应时间要比上面那些公式中给出的反应时间为大。由此可见用载体气体来缩短反应时间的做法也是有条件的。

(二) 辅助真空系统

1. 辅助真空系统的功用及组成

对于体积小、放气速率和漏气速率都小的被检件可直接与检漏仪的外接法兰连接进行检漏,无需辅助真空系统。对于漏气速率和放气速率较大或者体积较大的被检件,若直接与检漏仪相连接时,检漏仪的真空气度可能抽不上去,使检漏仪无法工作。要在此种情况下进行检漏,只有调节节流阀,使之稍稍开启,但这又会使反应时间加长。此外,被检件初次抽真空时,其中的水气、油蒸气等都可能污染检漏仪,因此也需要有辅助真空系统。

即使是体积很小的被检件,如果要进行大批量的检漏也还是需要辅助系统的。例如,当使用 HZJ-1 型这类检漏仪时,如果没有辅助系统,检完一个被检件,需重复以下步骤:关紧节流阀、取下被检件、换上另一个被检件、停止检漏仪工作、扩散泵停止加热、待扩散泵冷却后打开节流阀对被检件抽气、再开扩散泵……。这种操作程序使检漏效率极低,而增加辅助系统后可节省系统的操作时间。

辅助系统由前级泵、次级泵、阀门、真空规及标准漏孔等组成,如图 13-43 所示。次级泵可用扩散泵或罗茨泵(是否需要次级泵视具体情况而定),前级泵最好用气镇式机械泵。

有些检漏仪本身带有一系列阀门,借助于这些阀门便可用检漏仪的抽气系统对小型的、放气与漏气都不大的被检件完成预抽和检漏工作,而不需另加辅助抽气系统。但是,从保持检漏仪灵敏度的稳定性的观点来看,最好不要用仪器本身的真空泵进行预抽。国外有些检漏仪附有一个辅助抽气系统,使用时较为方便。

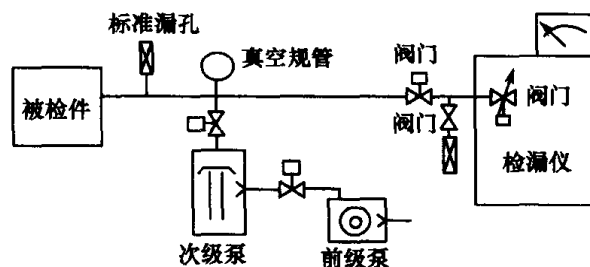


图 13-43 辅助真空系统

2. 辅助系统的参数选择

如上所述,辅助系统是用来抽除被检件中的一部分气体,使检漏仪能处于稳定的工作状态,并缩短反应时间与清除时间的设备。从抽除被检件的气量来考虑,对辅助系统的抽速应有一定的要求。由于

$$Q_g \geq S'_c p' \quad (13-77)$$

式中 $Q_g = Q_0 + \sum Q_i$ [见式(13-1)];

S'_c ——检漏仪离子源处,系统对空气的抽速;

p' ——检漏仪的工作压力。

所以要求辅助系统的抽速(对空气)

$$S'_{1,2} = \frac{S'_d}{S'_c} \left(\frac{Q_g}{p'} - S'_c \right) \quad (13-78)$$

S'_c 为检漏仪支路对空气抽速。如果 $S'_c \approx S'_d$ 时,则

$$S'_{1,2} > \left(\frac{Q_g}{p'} - S'_d \right) \quad (13-79)$$

其次,辅助系统的抽速选择要从反应时间与清除时间来考虑,如式(13-67)和式(13-72)所示。

第三,辅助系统抽速的选择还应从检漏系统的抽气时间来加以考虑。因为在大批量检漏时,希望预抽时间尽可能短些。

3. 检漏仪在辅助系统中的位置

检漏仪与辅助系统的连接方式有图 13-41 所示的两种情况,两种方式的特点各不相同。资料[430]认为,在对清洁的没有大漏的容器进行检漏时,检漏仪应接在前级(低真空)一侧;反之,对于被污染了的容器,要在有大漏的情况下找出小漏时,检漏仪应处于高真空一侧。资料[416]指出,连接检漏仪的位置应该是使仪器和被检件之间的流导为最大,使进入检漏仪中的氦浓度较高。

检漏仪接在前级一侧时,前级泵抽速的不稳定会使仪器噪声加大并使检漏灵敏度有所降低,为此最好在前级加一个稳压瓶,或者再串接一个扩散泵。

在设计辅助系统时,应在高真空一侧与低真空一侧都留有连接检漏仪的法兰。

(三) 氦罩法检漏

氦罩法也叫氦室法,这种方法是用一个检验罩把被检件包起来(如图 13-44 所示),检漏时,先排除罩内空气,然后充入 100kPa 的氦气(或氦气与其它气体的混合气),当检漏仪输出指示有变化时,表明处于氦罩下的被检件有漏孔。罩子可用塑料薄膜制成;对于大批量的小零件,也可制作专用的刚性好的罩子,使所充示漏气体的压力高于 100kPa,以提高检漏灵敏度。

检漏的具体步骤及注意事项:

① 先向罩内通入示漏气体,打开通向标准漏孔的阀门 S_1 ,此时,检漏仪的输出指示变化 ΔI_i^+ ,此变化正比于标准漏孔的漏率 Q_s 与被检件的漏率 Q_t 之和。

② 关阀门 S_1 后,输出仪表的指示减小 ΔI_s^+ ,所以被检件的漏率为

$$Q_t = \frac{\Delta I_i^+ - \Delta I_s^+}{\Delta I_s^+} Q_s \quad (13-80)$$

③ 在读数期间内要保持氦气的浓度与压力恒定。

④ 排空或回收罩内示漏气体,准备再次进行检漏。

应用图 13-45 的装置可对大批量小部件进行连续检漏。

(四) 压力检漏法

压力检漏法的一种形式是,被检件内部充入示漏气体,外部抽真空(如图 13-46 所示)。与氦罩法不同的是,外罩与检漏仪相连并抽成真空。它的工作原理与氦罩法完全相同,具体检漏步骤也与氦罩法类似。

(五) 检漏盒法

对焊接件的焊缝进行气密性检查时,大多采用检漏盒法(如图 13-47 所示)。检漏盒与辅助机械泵及检漏仪连接,检漏盒罩在所检焊缝上,用机械泵抽气,使检漏盒与被检件表面密合。调整检漏仪使其处于工作状态。在焊缝背面与检漏盒相对应的部位加上氦罩,并充入 100kPa 的氦气,这样就可对检漏盒覆盖范围内的焊缝进行检漏了。当发现有漏孔时再逐渐缩小氦罩的范围,找出漏孔的具体位置。

设计检漏盒时应满足下列要求:盒内的压力至少应能抽到 10Pa 以下;检漏盒与被检部位

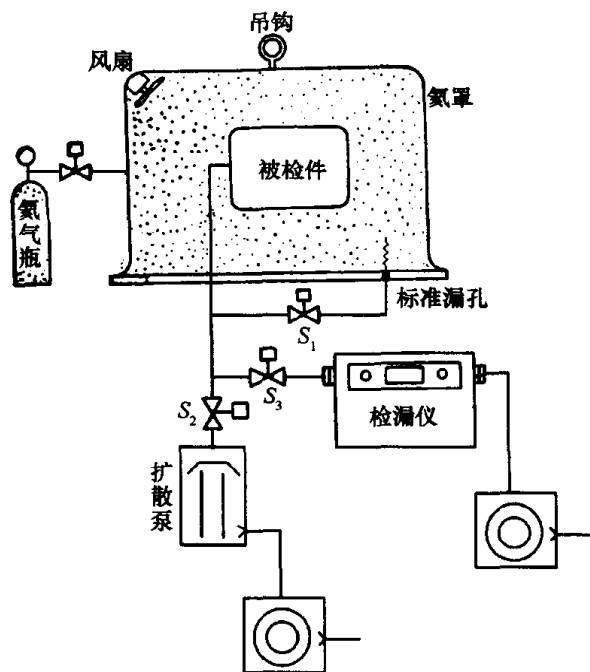


图 13-44 氦罩法检漏

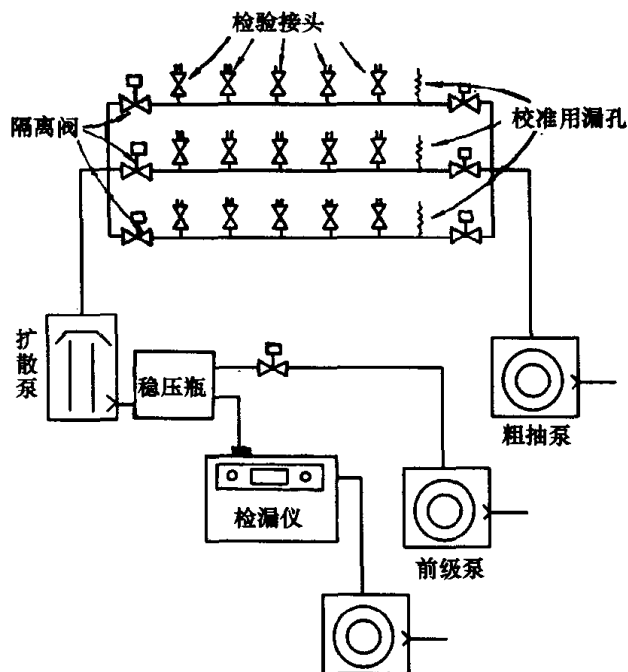


图 13-45 对小部件进行连续检漏的装置

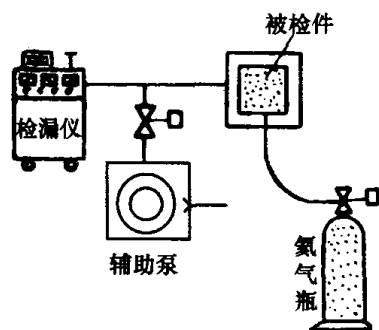


图 13-46 压力检漏法装置

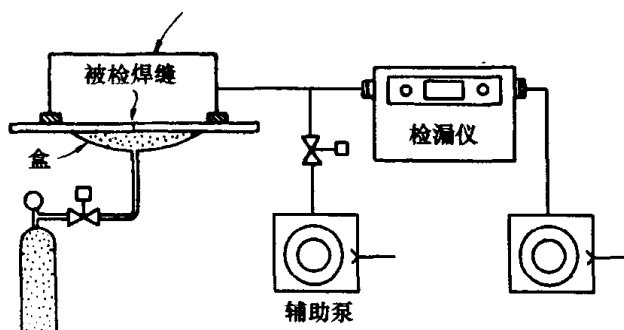


图 13-47 检漏盒法示意图

的连接、密封要可靠、方便;盒的形状与尺寸要尽可能用于多种形式的焊缝。检漏盒可做成金属的,也可用弹性较好的硬橡胶制成(内部加上弹簧钢丝以保持一定形状)。

(六)背压法检漏

背压法检漏广泛用于对封离电子器件、半导体器件等密封件的无损检漏。检漏时将被检件在充有高压示漏气体(氦气或氦气和其它气体的混合气)的容器内存放一定时间,如果被检件有漏孔,示漏气体便通过漏孔进入被检件内部。再检测由漏孔中逸出的示漏气体便可判定漏孔的存在及其大小,具体装置如图 13-48 所示。检漏步骤:将被检件放入检漏箱(充氦箱)中,关好检漏箱的“大门”,将检漏箱抽空后充入一定压力的示漏气体,经过一定的时间后,排出箱内的示漏气体,并再次将检漏箱抽真空。如果在一定的时间内检漏箱真空度抽不上去,或者停止抽气时真空度下降较快,就是说明被检件有较大的漏孔(应注意取样阀不要打开,防止有大量氦气进入氦质谱检漏仪)。此时应将被检件取出,用其它方法将大漏找出来。如果检漏箱能抽到较高的真空度,就可打开取样阀进行取样。如果被检件的漏率小,取样阀就可完全打开,使检漏系统处于最灵敏状态(上述操作可以按一定程序自动进行操作)。然后打开检漏仪的节流阀,如被检件有漏,仪器输出指示便会发生变化。

令被检件在高压示漏气体中浸泡的时间为 t_1 , 从排除高压示漏气体到进行检漏的时间间隔为净化等待时间 t_2 , 则检漏仪直接指示的漏率 q_t 与漏孔的漏率的关系(在漏孔的气流特性为分子流时)是

$$q_t = p[1 - \exp(-at_1)]\exp(-at_2) \frac{q}{p_A} \quad (13-81)$$

式中 q ——漏孔的漏率 [$\text{Pa} \cdot \text{L/s}$];
 p ——所浸泡的示漏气体的压力 [Pa];
 p_A ——大气压力 [Pa];

$$a = \frac{q_{\text{He}}}{Vp_A}, \quad q_{\text{He}} = 2.7q$$

V ——被检件的体积 [L].

q_t 的单位为: $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$.

背压法检漏中, 检漏灵敏度与下列因素有关:

- ① 所浸泡的示漏气体的压力越高越容易检出小漏孔;
- ② 浸泡时间 t_1 越长、净化等待时间 t_2 越短, 检漏灵敏度越高;
- ③ 被检件的体积越小, 检漏灵敏度就越高;
- ④ 由于被检件外表面在浸泡时会吸附示漏气体, 故可能增加检漏时的氦本底和噪声, 从而使灵敏度有所降低。因此, 在净化等待时间内应尽量除去被检件外表面所吸附的示漏气体。

背压检漏法不适宜于检示大漏孔。因为在浸泡中进入被检件的示漏气体, 会在净化等待时间内很快地漏掉, 使检漏灵敏度降低, 甚至检不出漏孔来。这样反而可能把大漏孔误认为小漏孔。为了避免此类错误, 在背压法检漏合格后, 还需再作气泡试验。

(七) 喷吹法

喷吹法是最常用、最方便的检漏方法。具体装置如图 13-41 所示。检漏中, 用连接在装有示漏气体的气瓶(或气囊)上的喷嘴在疑有漏孔处进行喷吹。令喷吹的时间间隔为 Δt , 示漏气体浓度为 γ 。如果检漏仪接在前级一侧, 且 $\tau_2 \gg \tau_1$, 根据式(13-70), 此时检漏灵敏度 q_{\min} 的表示式是

$$q_{\min} = \frac{Q_{\min}(S_1 + S_d)}{\gamma S_d} (1 - e^{-\Delta t/\tau_2})^{-1} \quad (13-82)$$

当检漏仪接在高真空一侧时, 检漏灵敏度是

$$q_{\min} = \frac{Q_{\min}(S_2 + S_d)}{\gamma S_d} (1 - e^{-\Delta t/\tau'_2})^{-1} \quad (13-83)$$

由此可知, 当其它条件相同时, γ 越大, Δt 越长, 检漏灵敏度就越高。

喷吹时间 Δt 要适宜。 Δt 太短, 灵敏度太低; Δt 太长了, 检漏工作的速度太慢。根据所要求的检漏灵敏度 q_{\min} , 可确定喷吹时间 Δt 。

当检漏仪接在前级一侧时, 喷吹时间 Δt 为

$$\Delta t = -\tau_2 \ln \left[1 - \frac{Q_{\min}(S_1 + S_d)}{\gamma q_{\min} S_d} \right] \quad (13-84)$$

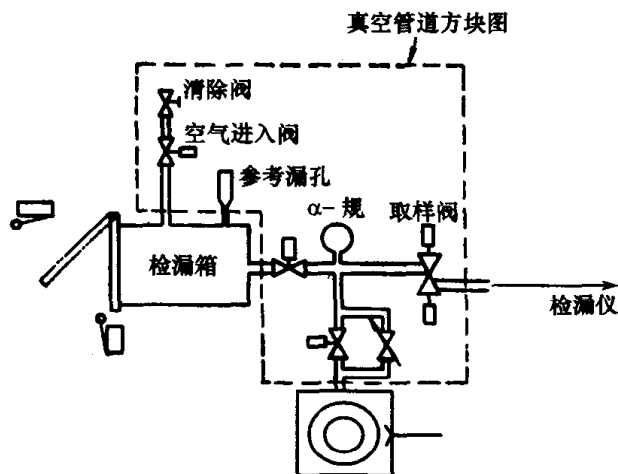


图 13-48 背压法检漏系统

此式在 $Q_{\min}(S_1 + S_d) < \gamma q_{\min} S_d$ 条件下成立。

当检漏仪接在高真空一侧时,喷吹时间 Δt 为

$$\Delta t = -\tau'_2 \ln \left[1 - \frac{Q_{\min}(S_2 + S_d)}{\gamma q_{\min} S_d} \right] \quad (13-85)$$

同样式(13-85)只有在 $Q_{\min}(S_2 + S_d) < \gamma q_{\min} S_d$ 时才有意义。

喷嘴直径 D 与喷嘴移动速度 v 和 Δt 的关系是

$$D = 0.1 v \Delta t \quad (13-86)$$

喷吹法检漏中应注意以下几个问题:

① 上面有关公式所给出的检漏灵敏度是在理想条件下得到的,实际的检漏灵敏度可能比计算值低得多。其原因之一是由于喷嘴所喷出的氦气流是散开的,并掺有一定数量的空气,使氦气浓度有所降低;原因之二是喷出气流的方向不可能完全对准漏孔的方向。此外,在凹缺处所存在的空气会使得进入漏孔的氦气浓度降低。

② 检漏次序:从被检件的上方至下方、由靠近检漏仪处向远离检漏仪处逐点进行喷吹。

③ 粗检时用大口径的喷嘴使氦气流的覆盖面积较大些,找出漏孔所在的区域后,改用小口径喷嘴去寻找漏孔的准确位置。

④ 检出的大漏孔要经修补后再去找小漏孔。

⑤ 当存在两个相距很近的可疑的漏孔点时,应先把一个点盖住,再用最细的喷嘴喷吹另一点。

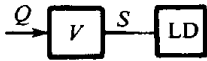
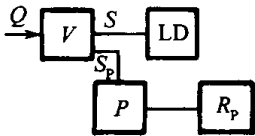
⑥ 当喷嘴喷吹某点时,如果检漏仪指示有变化,但其上升速度很慢且指示值很不一致,这表明邻近的其它地方有大漏孔。

⑦ 检示出漏孔后,还应再作几次复检。

⑧ 检漏场地要有良好通风条件,但不应影响喷嘴喷出的氦气流的方向。

检漏仪与试件的连接方式及相应的检漏灵敏度和反应时间见表 13-17。

表 13-17 检漏仪与试件连接方式及相应的检漏灵敏度和反应时间

连接方式	氦分压力的响应	最小探漏量
	喷吹开始后 $P(t) = \frac{Q}{S} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$ 喷吹停止后 $P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ $\tau = \frac{V}{S}$	ΔQ
	喷吹开始后 $P(t) = \frac{Q}{S + S_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$ 喷吹停止后 $P(t) = p_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ $\tau = \frac{V}{S + S_p}$	$\frac{S + S_p}{S} \Delta Q$

(续)

连接方式	氮分压力的响应	最小探漏量
	<p>喷吹开始后</p> $p(t) = \frac{Q}{S + S_R} \left[\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} - \frac{\tau'}{\tau' - \tau} \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} \right] \quad (\tau \neq \tau')$ $p(t) = \frac{Q}{S + S_R} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (\tau = \tau')$ <p>喷吹停止后</p> $p(t) = p_0 \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{\tau'}{\tau' - \tau} \left\{ \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} \right] \quad (\tau \neq \tau')$ $p(t) = p_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (\tau = \tau')$ $\tau = \frac{V'}{S + S_R} \tau' = \frac{V}{S_P}$	$\frac{S + S_R}{S} \Delta Q$
<p>注: τ—反应时间; P—氮分压; t—时间; ΔQ—最小可检漏率; p_0—起始氮分压; Q—漏量; V—试件的容积; S—探漏仪的抽速; S_P—主泵的抽速; S_R—旋转真空泵的抽速; LD—检漏仪; D—主泵; RP—旋转真空泵; V'—连接管的容积</p>		

(八) 吸入法检漏

质谱检漏的正压检漏法最常用的是吸入法,如图 13-49 所示。

1. 吸入法检漏过程

吸枪通过细长管道与氮质谱检漏仪相连,被检件充入压力 p 高于环境大气压力的氮气(或氮与氮混合或氮与大气混合气体),吸枪的吸嘴在被检件可疑有漏孔的表面以一定速度移动,通过漏孔漏出的气体的一部分进入吸嘴,随之进入检漏仪质谱室,可指出漏孔的存在。与喷吹法类似,检漏仪指示有漏时,漏孔不一定正好在吸嘴所对的被检件的部位,在发现漏孔的范围内,减小吸枪移动速度、减小吸嘴与被检件的距离并反复查找,可以找到漏孔的准确位置,在吸嘴正好对准漏孔,吸枪不移动时,检漏仪指示的漏率可能等于或接近于漏孔的实际漏率。吸入法检漏灵敏度受很多因素限制,如漏孔的形状、吸嘴相对于漏孔的距离、吸枪相对于漏孔的夹角和移动速度、吸嘴的形状和尺寸、吸枪的吸气能力以及大气中氮气本底浓度大小及稳定情况等。

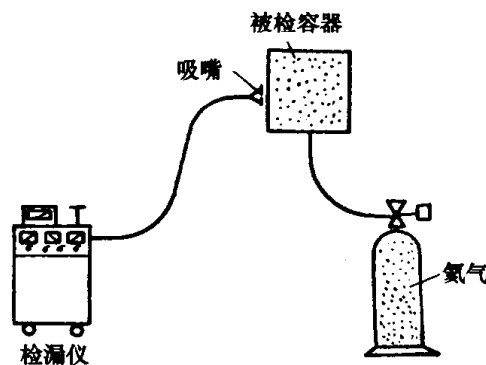


图 13-49 吸嘴法检漏

吸嘴法检漏中应注意的问题是:

① 灵敏度受连接管道的流导限制。在有辅助泵时,还会受辅助泵分流作用的影响。

② 初检时,被检件切勿充入过高压力的示漏气体,因为,如果有大漏孔,示漏气体会从被检件中漏出,造成较大浪费,而且示漏气体到处扩散后,会给检漏仪带来很大干扰。因此,一般应先向被检件内充以低压力、低浓度的示漏气体,在检出大漏并加以修补后,再充入高压力、高浓度的示漏气体,对小漏孔进行检查。

③ 检漏完毕后,应将示漏气体回收或放空,并注意检漏场地通风。

2. 吸入法检漏灵敏度及校准

(1) 浓度灵敏度

吸入法检测的是大气中氦浓度的变化,令在大气中氦质谱检漏仪指示的本底及本底噪声为 I_1 和 ΔI ,对应于氦浓度变化 $\Delta\gamma$ 时,信号为 I_2 ,则最小可检氦浓度

$$\gamma_{\min} = (\Delta I \cdot \Delta\gamma) / (I_2 - I_1) \quad (13-87)$$

其中 $I_2 - I_1$ 为信号, ΔI 为噪声,认为信噪比为 1 时为最小可检。

① 一定浓度氦气的配置。配置一定浓度 $\Delta\gamma$ (认为 $\Delta\gamma$ 远大于大气中的氦浓度) 的气体,有两种方法:

a. 流量法 最简单的装置是在一个体积为 V 的容器上面装一个标准漏孔并充以氦气,容器内为大气压 p_A 下的空气,相应的漏气率(对氦)为 q , t_s 时间后,在 V 内建立的氦浓度

$$\Delta\gamma = \frac{q \cdot t_s}{p_A \cdot V} \quad (13-88)$$

其中,假定 $\Delta\gamma$ 远大于大气中的氦浓度,以及 $p_A V \gg qt_s$ 。

b. 注气法 这是一个在真空校准中常用的方法,很简单,往容器 V (容器内为大气压 p_A 的空气) 中注入体积为 v 压力为 p 的氦气,若 $p_A V \gg pv$,建立的氦浓度

$$\Delta\gamma = \frac{pv}{p_A V} \quad (13-89)$$

其中,假定 $\Delta\gamma$ 远大于空气中的氦浓度。

② 吸入法检漏的浓度灵敏度校准。将吸枪的吸嘴插入到上面讲的具有一定浓度氦气的容器 V 中,由式(13-87) 和式(13-88) 或式(13-89),可知浓度灵敏度(即最小可检氦浓度)为

$$\gamma_{\min} = \frac{\Delta I}{I_2 - I_1} \cdot \frac{qt_s}{p_A V} \quad (13-90)$$

或者

$$\gamma_{\min} = \frac{\Delta I}{I_2 - I_1} \cdot \frac{pv}{p_A V} \quad (13-91)$$

其中, $I_2 - I_1$ 为信号, ΔI 为噪声,认为信噪比为 1 时最小可检。

(2) 漏量灵敏度的校准

上面给出了氦质谱检漏仪吸入法检漏浓度灵敏度校准方法,相应的流量(或漏量)灵敏度,即最小可检漏率是人们所关心的。吸枪在大气中工作时,以一定速率将空气吸入,设吸入的流量为 Q ,则最小可检漏率

$$q_{\min} = \gamma_{\min} Q \quad (13-92)$$

(3) 检漏灵敏度及校准中的问题

吸入法检漏时,吸入的气体可能只含有部分从漏孔漏出的氦气,由漏孔中漏出的氦气在大气中的浓度在不同的地方可能不同,实际能检出的漏孔比式(13-92) 给出的要大得多,这决定于实施检漏的具体条件(吸嘴相对于漏孔的距离、吸枪移动速度……)。现在有人正在对这些条件的影响进行研究,用一只正压真空漏孔(出气端为大气压环境,进气端为高于一个大气压力的氦气),测量检测到的漏率因检漏条件不同所发生的变化。

(九) 检漏台

为了适应对不同大小的零、部件进行检漏,制作一个检漏台是很必要的。检漏台由检漏仪、辅助真空系统和连接被检件的大圆盘所组成。圆盘上具有许多不同直径的密封橡皮槽,能使具有不同直径的法兰的容器直接压在上面,靠大气对被检件的压力来密封,也可用真空封泥将零件封在圆盘上,用喷吹法或氦罩法来进行检漏。

(十) 累积法检漏

此种检漏方法适用于对出气和漏气量都不大的小型器件进行检漏,其特点是灵敏度高(当正确使用这种方法时可以使检漏灵敏度高出仪器灵敏度几个数量级)。具体检漏系统可参考图 13-44。累积法的检漏过程是:将仪器正常运转并将被检件抽成真空,关阀门 S_2 使被检件及检漏仪与辅助系统隔离,打开检漏仪的节流阀,在被检件外面加上氦罩,关上检漏仪本身的高真空阀门(即 $S_c = 0$),就是说将检漏仪的质谱室与被检件均停止抽气,此时如果被检件有一个漏率为 q 的漏孔,在 Δt 时间后,输出仪表指示会变化到(假定漏孔是分子流漏孔)

$$\Delta I^+ = K \frac{2.7q\Delta t}{\Sigma V_i} \quad (13-93)$$

最小可检漏率

$$q_{\min} = \frac{\Sigma V_i}{\Delta t S_{c_0}} Q_{\min} \quad (13-94)$$

式中 ΣV_i ——被检件及系统有关部分的体积之积;

Q_{\min} ——检漏仪的最小可检漏率;

S_{c_0} ——与 Q_{\min} 相对应的离子源处的抽速。

可见 Δt 越长, ΣV_i 越小,检漏灵敏度就越高。

但是,并不是随着 Δt 的增加检漏灵敏度可无限提高,因为停止抽气之后,由于出气与漏气等原因,质谱室的压力是会升高的,当超过工作压力时,会使检漏无法进行。此外,在累积过程中仪器的本底与本底噪声也可能变大。

具体操作应按下列步骤进行:

① 氦罩未充气前,关闭检漏仪的高真空阀,经 Δt 时间后,记录输出仪表读数 I_1^+ ;

② 打开检漏仪的高真空阀,使检漏仪恢复到起始状态;

③ 氦罩通氦,关闭检漏仪高真空阀,经过 Δt 时间,读出输出仪表读数 ΔI_2^+ ;

④ 将 ΔI_1^+ 和 ΔI_2^+ 代入式(13-93)就可大致推算出漏孔的漏率 q 。此时,应注意式(13-93)和式(13-94)的前提是,在累积时间 Δt 内检漏仪噪声是不变的。但实际上噪声是会有较大变化的,假设时间 Δt 后噪声增大到初始值的 f 倍,则

$$q = f \frac{\Sigma V_i}{\Delta t S_{c_0}} \quad (13-95)$$

⑤ 被检件中应尽可能不用或者少用容易吸氮的真空橡胶、油脂、塑料等材料。

有些检漏仪的扩散泵与质谱室之间没有阀门,这时,可在外接法兰处增设一个供累积法检漏使用的阀门,不过此时式(13-93)~式(13-95)不再成立。

(十一) 用选择性抽气方法提高检漏灵敏度

采用对氮气、氧气、二氧化碳等抽气能力强、而对氦气抽气能力弱的选择性抽气方法可以

大大提高仪器的检漏灵敏度,常用的选择性抽气泵是分子筛吸附泵,其装置如图 13-50 所示。在超高真空条件下也可用钛升华泵。这种方法的操作步骤与累积法相同。由于采用了选择性抽气泵,可使累积时间大大增加,从而进一步提高仪器的检漏灵敏度。

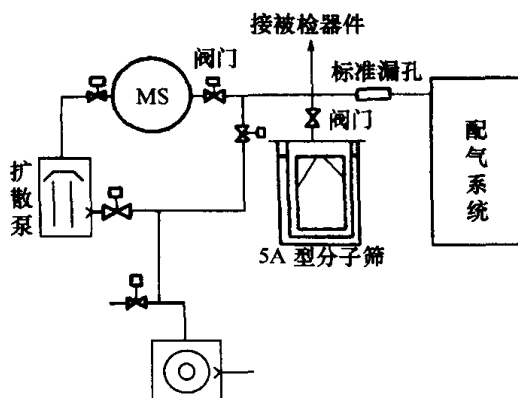


图 13-50 用分子筛吸附泵提高检漏灵敏度

(十二) 各种氦质谱检漏方法的应用

上面共讲了八种氦质谱检漏方法。此外,还有许多种由上述八种方法演变而来的方法。这八种方法,从原理上看可归纳为喷吹法(内探头法)与吸入法(外探头法),也可称之为真空法与加压法。

从实际应用的角度来看,所有的检漏方法也可归纳成测漏与找漏两大类。

测量漏率的方法有:氦罩法、检漏盒法、背压法、累积法与选择性抽气法。这些方法适用于测量总漏率,也可用来测量局部位置与单个漏孔的漏率。

测量漏率时的误差来源主要有:

①校准时标准漏孔所处的位置与被测漏孔的位置相距太远,使得进入检漏仪的示漏气体的气量不等。

②所用标准漏孔的标称漏率值有误差。

③检漏仪的输出指示与漏率间的关系不成线性。

④检漏时进入被检漏孔的示漏气体的压力和浓度和校准标准漏孔时进入标准漏孔的示漏气体的压力和浓度有所不同。或因压力与浓度的数值都不能准确给出而无法换算。

⑤校准用的标准漏孔与被测漏孔的气流特性不同。

当容器的总漏率超过允许值而需要确定漏孔具体位置时,可再用喷吹法或吸嘴法找出漏孔的位置。

检漏方法的灵活运用是很重要的,某些时候不一定非按照测漏、找漏的程序不可。有些部件如小器件的检漏就可以同时完成测漏、找漏两个步骤。在用氦质谱检漏仪进行检漏之前最好先用简易方法进行粗检。

七、检漏的实践

(一)在真空工作的各个阶段都要考虑检漏工作

由于冶金、原子能、电子、宇航技术的发展,要求制造不同用途的高真空、超高真空,甚至极

高真空设备。这些设备中的某些设备结构复杂,内部有很多管道和传动机构,有的体积很大,达几十立方米,甚至数百立方米,连接管道和内部管道的总长度可达几公里,焊缝、密封圈的总长度可达数十公里,必须投入很大力量对设备严格进行检漏,所以且应该从设备开始设计时起就考虑检漏问题。如果等到进行安装时再考虑检漏问题就可能给检漏工作带来很大困难。以下对设计、加工、安装调试以及运行中的检漏工作作一说明。

1. 在设计阶段应考虑的问题

①合理规定真空设备的最大允许漏率,由此再规定各零、部件的最大允许漏率。

②要考虑加工、安装、运转过程中,对不同零、部件(或整个设备)采用哪种检漏仪器和哪种检漏方法。

如采用压力检漏法时,要考虑:

- a. 容器充气后的耐压性能;
- b. 容器中有无会被示漏气体腐蚀的材料;
- c. 检漏时焊缝的位置是否暴露在外面;
- d. 如何通进示漏气体。

如采用真空检漏法时,要考虑:

- a. 容器是否允许处于负压状态;
- b. 检漏仪的连接方法。

③在设计中要避免“寄生空间”,这种“寄生空间”会使检漏的反应时间增长。

④工艺设计要合理。例如,通常只允许容器的一侧有焊缝,如需加强焊缝的强度,在真空一侧应采用连续焊,在非真空一侧则采用断续焊。

2. 加工过程中应考虑的检测问题

(1) 焊接件的检漏

真空设备零、部件的焊缝是否需要进行检测,应根据焊接质量和设备所允许的最大漏率来确定。

焊缝的检漏是在零、部件的加工过程中进行,还是在总装以后进行,需视具体情况而定。例如,在总装后对冷阱内胆的焊缝进行检测时,由于装配后焊缝不能暴露在外面,即使发现了漏孔也无法进行补焊。又如某些大容器在总装后的容积过大,使检漏灵敏度降得很低,检不出小漏孔,从而达不到检测的要求。考虑到类似于这样的情况,应在零、部件的加工过程中就对焊缝进行检测。

已检测了的零件在对焊缝进行切削加工后,还需要再次进行检测。补焊后的焊缝也需要重新检测。

(2) 其它加工件的检测

对金属板材一般不需检测(除铸件外),但对表面和内部有缺陷(夹渣、气孔、裂纹)的金属材料,则必须进行检测。

机械加工后的工件一般也不需要检测。但薄壁管材经弯曲后可能出现裂纹,因此需要对弯曲部位进行检测。

3. 安装调试阶段应考虑的检测问题

①经过检测的零、部件如受到较大的机械冲击或振动,需在总装前再次进行检测。

②根据安装顺序按步骤进行检测。最好是在每装好一个部件后,便对该部件和连接处进行检测,检测合格后再安装下一个部件。

③在安装中,对经过再次加工过的某些零、部件要重新检漏。例如有些管道,在装配时受了较大的拉应力,或者重新弯曲过,都会造成焊缝和原材料的拉裂,必须重新检漏。

④安装后首先对密封圈、转动密封处进行检漏,其次再做总体静态升压试验,测量其总漏率是否满足要求。

⑤对于需进行烘烤或加冷却剂的部件,必须经过冷、热冲击试验后再进行检漏。例如,冷阱、冷却障板等部件,在烘烤除气后,应立即注入冷却剂(液氮、氟里昂等),然后测量其漏率。在这些过程中,漏孔不一定是在最冷态或最热态出现,应予以注意。

4. 运行及维修时的检漏

一台真空设备在投入使用后,还可能出现漏孔。因此,真空设备在使用中要有详细的运转记录,以便查找漏气的原因。

①真空设备在使用中,有时需打开某些法兰进行清洗或放置实验件等。重装后,若发现漏气就需对密封处进行检漏。

②对更换的部件要进行检漏。

③经过运转的真空设备,如果发现真空度变坏,应考虑是否是由漏气造成的,这可用静态升压试验来判断。

(二)检漏工作人员与检漏实验室(车间)

1. 检漏工作人员

对检漏人员的要求是:

①要具有一定的真空技术知识,熟悉各种检漏方法和仪器的原理、灵敏度、优缺点、适用范围等。

②能熟练地调整仪器,使仪器工作最佳状态。

③具有一定的工艺知识。

④具有一定的电子线路方面的知识。

2. 检漏实验室(车间)

①应有专职的检漏工作人员。

②要有一个宽敞的专用房间,房间的采光要好并具有良好的通风设备。对于大型真空设备的检漏实验室,应具备必要的常用设备,如吊车、检漏工作台等。

③依据所检设备的特点,配备各种不同的检漏仪器。

(三)如何进行检漏

除特殊情况外,一般的检漏步骤如下:

①查看图纸,了解对总漏量、分布漏量的要求。了解被检的零部件和整个设备的结构与材料;了解加工工艺、加工水平及装配过程;了解使用要求。查明哪些地方需要检漏,什么地方有死空间等。查明有没有易漏的材料,如铸件、焊接管等。了解是否使用了容易出现漏孔的工艺(例如薄壁管材的熔化焊)等。

②根据所提出的最大允许漏率以及是否需要找出漏孔的具体位置的要求,从经济、快速、可靠的原则出发,选择检漏仪器与方法,再准备必要的辅助设备,例如质谱检漏的辅助真空系统、连接管道和法兰等,并拟定检漏程序。

③对被检件进行清洁处理。去除焊渣、油垢、再进行清洁处理(见第十五章)。清洗后要将

被检件烘干,对于要求较高的小型器件,在清洗后应放入真空烘箱内烘烤。清洁处理的目的是为了使漏孔不被污物、油、有机溶液等堵塞,并使检漏仪器不致被沾污。

④对所使用的检漏方法和检漏设备进行检漏灵敏度校准,并确定检漏系统的反应时间。

⑤使用真空检漏法时,为了提高仪器的检漏灵敏度,应尽可能将被检器件抽到较高的真空度(必要时要进行烘烤除气)。例如,当采用氦质谱检漏仪进行检漏时,如果被检器件的出气量太大,为了维持检漏仪的工作真空度,节流阀就不能开大,否则会使大部分示漏气体被辅助泵抽走,降低检漏灵敏度。如果在检漏仪的冷阱中注入冷却剂,则可冷凝的气体就能被捕集,使情况大为改善。

⑥由于氦质谱检漏法的设备和氦气都较为昂贵,应尽可能采用其它较为经济的检漏方法。

⑦当用氦质谱检漏仪检漏时,对那些检漏灵敏度要求不高或者有大漏的被检件,检漏初期应尽量使用低浓度的氦气进行检漏,以节省氦气。

⑧对已检出的大漏洞进行补修后,再进行小漏孔的检查。

⑨检出的漏孔要经过复检。

第十四章 真空技术常用材料

一、材料的真空性能

(一) 概述

真空技术的用材范围包括真空规管、真空应用和真空工业设备的壳体,以及各种固定、活动、可拆连接机构、各类真空获得手段的工作物质,等等。

在上述应用中,除了对材料的物理、化学、机械、电气、热学等性能有各种不同的要求之外,还对材料的真空性能有特殊的要求,如:气密性和低的渗气性能,溶解气体量少和较低的出气速率,低蒸气压和低分解压力等等。

材料的物理化学性能在物理、机械、化学方面的手册中已有叙述,本章只给出少数必要的。关于真空性能的数据则将作详细介绍。

任何真空系统都应满足如下动态平衡方程

$$pS = Q - V \frac{dp}{dt} \quad (14-1)$$

式中 p ——真空度[Pa];

S ——有效抽速[L/s];

V ——真空室容积[L];

Q ——气源的出气量[Pa·L/s]。

当 $dp/dt = 0$ 时,真空系统处于抽气与各种气源之间的动态平衡状态,即

$$p_0 = Q/S \quad (14-2)$$

Q 的来源有以下几种,分别以 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 表示:

Q_1 ——漏气孔的漏气量;

Q_2 ——真空泵本身构成的气源,如:扩散泵的反扩散气体、返流蒸气、溅射离子泵或冷冻泵中气体的再释等;

Q_3 ——大气通过真空室器壁材料渗透的气体;

Q_4 ——材料的出气;

Q_5 ——材料蒸发、升华的蒸气和分解出来的气体。

上述气源绝大多数都直接或间接地与材料的真空性能有关。

(二) 扩散、溶解、渗透

1. 概述

因为壁两侧的气体总存在压差,所以任何壁面材料或多或少地能够渗透一些气体。从微观的

角度来看渗透过程是按以下步骤进行的(如图 14-1 所示):

- ① 气体原子或分子碰撞到壁面表面;
- ② 吸附;
- ③ 吸附时气体分子有的能离解成原子态;
- ④ 气体在入射一侧的壁面表层达到一个平衡溶解度;
- ⑤ 由于浓度梯度的存在,气体向壁面的另一侧扩散;
- ⑥ 气体原子在壁面的另一侧重新结合成分子态(如果存在步骤 ③ 时);
- ⑦ 解吸和释出。

一般来说,扩散是 7 个步骤中最慢的又是最关键的步骤,它和渗透与溶解有密切的关系。只有金属材料才存在第 ③、⑥ 两个步骤。譬如,氢气通过铁的渗透过程是先以分子态吸附在铁的表面,然后由铁表面的亲和力引起氢分子较弱的 H—H 键断裂,使氢离解成原子态并透过铁,在壁面的另一侧重新结合成分子态氢。

从理论上可推导出:

对于不产生离解的分子态渗透(如氮对玻璃的渗透),有

$$q = KA\Delta p/d \quad (14-3)$$

对于双原子气体分子离解后的原子态渗透(如,氢对金属的渗透),有

$$q = KA\Delta p^{1/2}/d \quad (14-3a)$$

式中 q ——气体透过固体壁面的渗透速率;

Δp ——壁两侧的气压差;

d ——壁厚;

A ——壁的面积;

K ——某种气体对某种固体的渗透系数。

K 值与气体—固体配偶的性质有关。只要知道渗透系数 K ,就可以根据该材料的壁厚 d 、壁的面积 A 、壁两侧的气压差,由(14-3a)式求得渗透速率。所以, K 是非常重要的渗透参数。 K 的单位有下述几种:

① [cm^2/s]——与扩散系数的单位一致,形式简单,但物理意义不够明确。

② [$\text{cm}^3(\text{STP})/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{mm}^{-1})$]——每毫米厚的材料,在每帕的压差下,每秒通过每平方厘米面积的渗透气量,气量用标准状态(即, $0^\circ\text{C} \cdot 10^5\text{Pa}$ 。一般用英文缩写 STP 表示)下的立方厘米数来表示。此单位形式比较复杂,但物理意义比较明确。

渗透系数 K 、扩散系数 D 、溶解度 S 之间存在以下关系

$$K = DS \quad (14-4)$$

式中 D ——气体在固体中的扩散系数 [cm^2/s];

S ——气体在固体中的溶解度 [$\text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3 \cdot \text{Pa}$]; 表示在压力为 $1 \times 10^5\text{Pa}$ 的平衡条件下,单位体积的固体材料中所溶解的气体体积数;

K ——渗透系数 [cm^2/s] 或 [$\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$];

扩散系数、溶解度、渗透系数这三个参数都是温度的指数函数

$$D = D_0 \exp(-E_D/jRT) \quad (14-5a)$$

$$S = S_0 \exp(-H/jRT) \quad (14-5b)$$

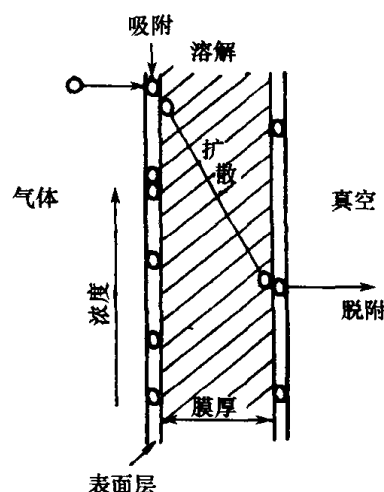


图 14-1 渗透过程示意图

$$K = K_0 \exp(-E_K/jRT) \quad (14-5c)$$

式中 D_0 、 S_0 、 K_0 ——与气体—固体配偶有关的常数；

R ——摩尔气体常数, $8.31441\text{J/mol} \cdot \text{K}$ ；

T ——绝对温度[K]；

E_D ——扩散活化能[J/mol]；

H ——溶解热[J/mol]；

E_K ——渗透活化能[J/mol]；

j ——离解度。

溶解热、扩散和渗透活化能只与气体—固体配偶有关,与温度几乎无关。因 $\lg D \sim 1/T$ 、 $\lg S \sim 1/T$ 、 $\lg K \sim 1/T$ 都是呈直线关系的,所以通常把这些参数的对数值与温度倒数的关系绘制在单对数坐标图上。

由式(14-4)、式(14-5) 还可以得到

$$H = E_K - E_D \quad (14-6)$$

$$K_0 = D_0 S_0 \quad (14-7)$$

在实际应用中常常要估算壁面的一侧处于大气压时的渗透速率,为此还应对大气成分有定量的了解。表 14-1 给出了标准状态的大气成分。

表 14-1 标准大气成分

成 分	分 子 量	含 量 比 例		分压 / $\times 133.3\text{Pa}$
		/(%) (体积)	/(%) (质量)	
N_2	28.0134	78.084	75.520	593.44
O_2	31.9988	20.948	23.142	159.20
Ar	39.948	0.934	1.288	7.10
CO_2	44.00995	3.14×10^{-2}	4.8×10^{-2}	2.4×10^{-10}
Ne	20.183	1.82×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.4×10^{-2}
He	4.0026	5.24×10^{-4}	6.9×10^{-5}	4.0×10^{-3}
Kr	83.80	1.14×10^{-4}	3.3×10^{-4}	8.7×10^{-4}
Xe	131.30	8.7×10^{-6}	3.9×10^{-5}	6.6×10^{-5}
H_2	2.01594	5×10^{-5}	3.5×10^{-6}	4×10^{-4}
CH_4	16.04303	2×10^{-4}	1×10^{-4}	1.5×10^{-3}
N_2O	44.0128	5×10^{-5}	8×10^{-4}	4×10^{-3}
O_3	47.9982	夏: $0 \sim 7 \times 10^{-6}$	$0 \sim 1 \times 10^{-5}$	$0 \sim 5 \times 10^{-50}$
		冬: $0 \sim 2 \times 10^{-6}$	$0 \sim 0.3 \times 10^{-5}$	$0 \sim 1.5 \times 10^{-40}$
SO_2	64.0628	$0 \sim 1 \times 10^{-4}$	$0 \sim 2 \times 10^{-4}$	$0 \sim 8 \times 10^{-40}$
NO_2	46.0055	$0 \sim 2 \times 10^{-6}$	$0 \sim 3 \times 10^{-6}$	$0 \sim 1.5 \times 10^{-50}$
NH_3	17.03061	0 ~ 微量	0 ~ 微量	0 ~ 微量
CO	28.01055	0 ~ 微量	0 ~ 微量	0 ~ 微量
$\text{I}(\text{蒸气})$	253.8088	$0 \sim 1 \times 10^{-6}$	$0 \sim 9 \times 10^{-6}$	$0 \sim 8 \times 10^{-60}$

注:① 随时间和地点的变动而变动

2. 石英、玻璃、陶瓷

气体对玻璃、陶瓷等的扩散、溶解、渗透一般是以分子态的形式进行的,因此这些过程和气体分子的体积以及材料内部的微孔大小有关。含纯二氧化硅的石英玻璃的微孔孔径约为 0.4nm ,其它玻璃因碱金属离子填充于微孔之中,其有效孔径变小。在各种气体分子中,氢分子的直径最小,所以氢对含纯二氧化硅的石英玻璃的扩散、渗透在各种气体—固体配偶中是最

大的。

以石英玻璃为例,气体分子直径与渗透系数的关系见表 14-2。表 14-3 给出 25℃ 下,大气中各种气体对石英玻璃的渗透量。渗透系数与温度的关系见表 14-4。

表 14-2 各种气体对石英玻璃的渗透系数与气体分子直径的关系

气 体	分子直径 /nm	渗透系数 $K/7.5 \times 10^{-4} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	
		25℃	700℃
He	0.195	5×10^{-11}	2.1×10^{-8}
H ₂	0.250	2.8×10^{-14}	2.1×10^{-9}
D ₂	0.255	—	1.7×10^{-9}
Ne	0.240	2.0×10^{-15}	4.2×10^{-10}
Ar	0.315	2×10^{-29}	$< 10^{-15}$
O ₂	0.320	1×10^{-28}	$< 10^{-15}$
N ₂	0.340	2×10^{-29}	$< 10^{-15}$

表 14-3 在 25℃ 下,大气中各种气体对石英玻璃的渗透量

气体	大气分压 / $\times 133.3\text{Pa}$	渗透系数 $K/7.5 \times 10^{-4} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	大气下的渗透量	
			$/\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	原子 $/\text{s}^{-1}$
N ₂	59.5	2.0×10^{-29}	1.2×10^{-27}	—
O ₂	15.9	1.0×10^{-28}	1.6×10^{-27}	—
Ar	7.05×10^{-1}	2.0×10^{-29}	1.4×10^{-29}	—
Ne	1.8×10^{-2}	2.0×10^{-15}	3.6×10^{-17}	9×10^2
He	4.0×10^{-4}	5.0×10^{-11}	2.0×10^{-14}	5×10^5
H ₂	3.8×10^{-5}	2.8×10^{-14}	1.0×10^{-18}	25

表 14-4 石英的气体渗透系数与温度的关系

温度 /℃	渗透系数 $K/7.5 \times 10^{-13} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$											
	He	Ar			H ₂						N ₂	
200	—	—	—	—	0.022	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	0.099	—	—	—	—	0.051	—	—
400	—	—	—	—	0.366	0.48	0.44	—	0.50	—	0.275	—
500	0.139	—	—	—	0.70	0.92	0.84	—	1.06	—	0.58	—
600	0.282	—	—	—	1.43	1.75	1.54	—	2.16	2.00	0.81	—
650	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.065	0.066
700	0.50	—	—	—	2.52	3.1	2.70	2.45	3.9	2.76	1.70	0.132
750	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.268	0.271
800	0.81	—	—	—	4.25	4.8	4.4	4.0	6.0	4.5	2.53	0.43
850	—	0.0161	—	—	—	—	—	—	—	—	0.80	0.64
900	1.18	—	0.58	—	6.4	—	7.0	5.9	—	—	3.6	1.19
950	—	0.062 或 0.031	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.44
1000	1.63	—	—	—	10.0	—	—	—	—	—	5.1	—

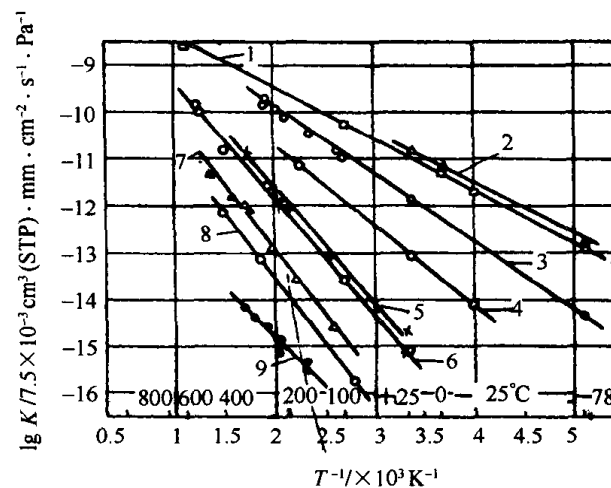
注:表中同种气体在不同列中的数据系由不同研究者所测

对真空技术来说,氮的数据是很有用的。氮对国产玻璃的扩散系数、溶解度、渗透系数见表 14-5。

表 14-5 氮对国产玻璃的扩散系数、溶解度和渗透系数

玻璃牌号	温度 /℃	扩散系数 $D/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	溶解度 $S/\times 10^{-5}\text{cm}^3$ (STP) $\cdot \text{cm}^{-3} \cdot$ Pa^{-1}	渗透系数 $K/\times 7.5 \times 10^{-4}$ $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot$ $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	渗透常数 $K_0/\times 7.5 \times 10^{-4}$ $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot$ $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	渗透活化能 $E_K/4.186$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
上海 95 号	18.5	5.2×10^{-9}	4.8×10^{-3}	2.5×10^{-12}	5.5×10^{-7}	7620
	23.0	6.0×10^{-9}	3.0×10^{-3}	2.4×10^{-12}		
	26.0	6.0×10^{-9}	3.9×10^{-3}	3.0×10^{-12}		
	100.0	5.5×10^{-8}	2.8×10^{-3}	2.0×10^{-11}		
	150.0	1.7×10^{-7}	2.5×10^{-3}	5.6×10^{-11}		
	200.0	4.3×10^{-7}	2.5×10^{-3}	1.4×10^{-10}		
	250.0	1.1×10^{-6}	2.3×10^{-3}	3.3×10^{-10}		
沈阳 11 号	153.0	7.5×10^{-8}	6.3×10^{-3}	6.2×10^{-11}	5.5×10^{-7}	7620
	201.0	2.1×10^{-7}	5.8×10^{-3}	1.6×10^{-10}		
	232.0	3.6×10^{-7}	5.6×10^{-3}	2.7×10^{-10}		
	270.0	6.3×10^{-7}	4.7×10^{-3}	3.9×10^{-10}		

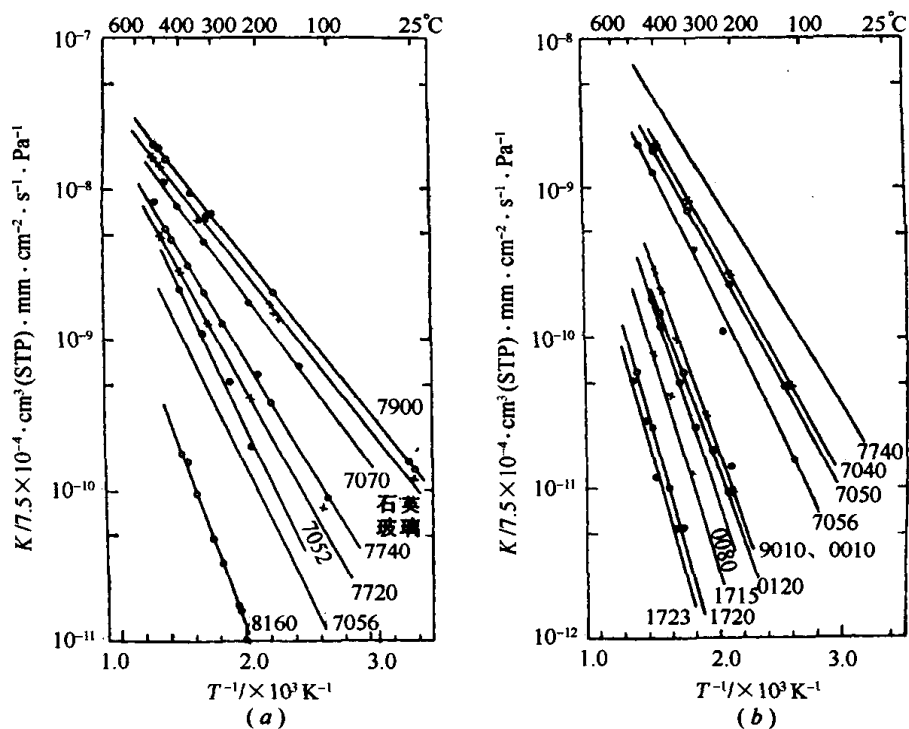
氮对国外的玻璃、陶瓷的扩散、溶解、渗透数据有：氮—玻璃的渗透系数如图 14-2、图 14-3 所示；气体—玻璃、气体—陶瓷的渗透系数如图 14-4 所示；氮—玻璃的扩散系数、溶解度见表 14-6；其它气体的扩散、溶解性能如图 14-5、图 14-6 所示。



图线号 玻璃名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9
组成	石英玻璃	外柯玻璃 7900	派列克斯 玻璃 7740	硼硅玻璃 650	磷玻璃	钠钙玻璃 0080	铝硅玻璃 1720	X 射线 防护玻璃	铅硼 玻璃
SiO ₂	100	96	81	—	—	72	62	31	—
B ₂ O ₃	—	3	13	90	5	—	5	—	22
P ₂ O ₅	—	—	—	—	77	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	—	1	2	3	11	1	18	—	—
CaO, MgO	—	—	—	—	—	10	15	—	—
BaO	—	—	—	—	—	—	—	8	—
PbO	—	—	—	—	—	—	—	61	78
ZnO	—	—	—	—	7	—	—	—	—
Na ₂ O, K ₂ O	—	—	4	7	—	17	—	—	—
组分中 SiO ₂ + B ₂ O ₃ + P ₂ O ₅ 的总和	100	99	94	90	82	72	67	31	22

注：因为玻璃成分不同时 K 值不同，故选用图中的数据时应参考成分

图 14-2 氮通过各种玻璃的渗透系数



玻璃牌号	SiO ₂ + B ₂ O ₃ + P ₂ O ₅ /(%) (质量)	SiO ₂ + B ₂ O ₃ + P ₂ O ₅ /(%) (mol)	Na ₂ O + Li ₂ O + K ₂ O /(%) (mol)	PbO /(%) (mol)	其它氧化物 /(%) (mol)
7900	99	99	—	—	1
石英玻璃	—	100	—	—	—
7070	99	98	2	—	—
7740	94	94	5	—	1
7720	88	93	4	2	1
7052	83	86	6	—	5
7040	91	92	7	—	2
7050	91	92	7	—	1
7056	86	90	8	—	1
0010	61	77	14	8	1
9010	68	75	14	—	8
8160	56	74	12	8	5
0120	56	76	12	11	1
0080	74	73	16	—	11
1715	66	72	—	—	28
1720	64	66	1	—	33
1723	62	65	—	—	35

图 14-3 氮通过各种牌号玻璃的渗透系数

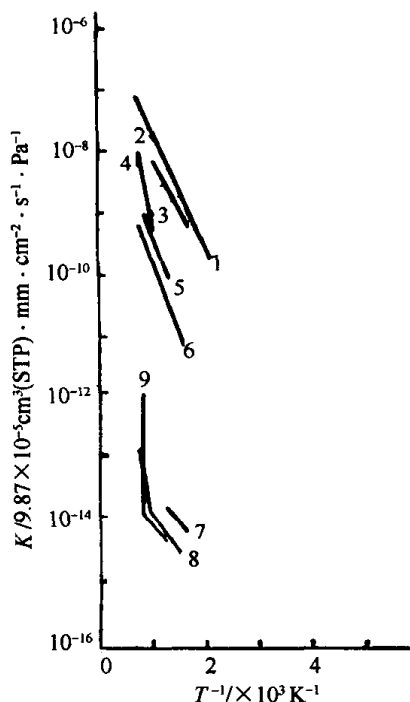


图 14-4 各种气体—玻璃、陶瓷的渗透系数

- 1—氢—石英玻璃；2—氢—派列克斯玻璃；
3—氮—微晶玻璃；4—氮—石英玻璃；
5—氖—外柯玻璃；6—氮—97% 氧化铝陶瓷；
7—空气—派列克斯玻璃；8—空气—97% 氧化铝陶瓷；9—空气—微晶玻璃。

表 14-6 氮在各种玻璃中的扩散系数和溶解度

玻璃牌号	温度 /℃	扩散系数 D / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	溶解度 S / $\times 10^{-5} \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$
7740	199	5.4×10^{-7}	0.0084
7740	310	3.8×10^{-8}	0.0038
7740	492	1.4×10^{-5}	0.0046
7720	109	6.8×10^{-8}	0.0086
7720	392	2.2×10^{-6}	0.010
7050	388	6.2×10^{-7}	0.027
7040	393	2.7×10^{-6}	0.005
7050	400	2.7×10^{-6}	0.005
7056	115	3.1×10^{-8}	0.0039
7056	402	1.7×10^{-6}	0.0059
9010	393	7.2×10^{-7}	0.0022
8160	369	5.6×10^{-7}	0.0022
8160	342	4.2×10^{-7}	0.0017
0080	394	7.6×10^{-7}	0.0012
1723	414	5.7×10^{-8}	0.0016

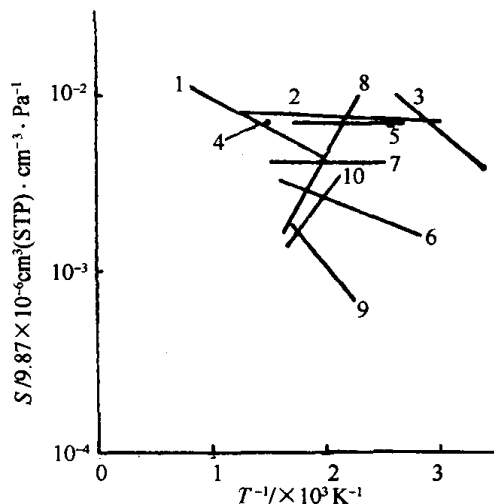


图 线 号	玻 璃 成 分 /%					
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PbO
5	76.1	16.0	1.75	5.4	0.6	—
6	75.9	16.0	0.4	4.9	0.8	—
7	64.7	23.2	4.0	4.0	4.1	—
8	75.3	7.6	6.2	5.7	0.8	—
9	56.2	—	1.2	7.6	4.5	30.0
10	69.1	—	3.3	13.2	1.7	—

图 14-5 各种气体—玻璃配偶的溶解度

- 1—氢—石英玻璃；2—氮—派列克斯玻璃 7740；3,4—氮—外柯玻璃；5~10—氮—玻璃(成分见附表)。

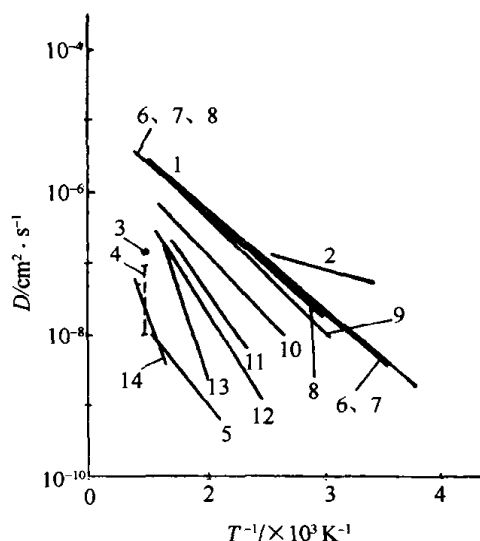


图 线 号	玻 璃 成 分 /%					
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PbO
7	76.1	16.0	1.75	5.4	0.6	—
8	75.9	16.0	0.4	4.9	0.8	—
9	64.7	23.2	4.0	4.0	4.1	—
10	75.3	7.6	6.2	5.7	0.8	—
11	56.2	—	1.2	7.6	4.5	30.0
12	69.1	—	3.3	13.2	1.7	—
13	76.1	16.0	1.75	5.4	0.6	—
14	75.9	16.0	0.4	4.9	0.8	—

图 14-6 各种气体—玻璃配偶的扩散系数

1—氢—派列克斯玻璃 7740；2—氢—外柯玻璃；3—氢—外柯玻璃；4—氮—外柯玻璃；
5—氢—石英玻璃；6—氮—杜拉玻璃；7~12—氮—玻璃(成分见附表)；13、14—氢—玻璃(成分见附表)。

3. 金属

气体对金属的扩散、溶解、渗透过程，一般是以原子态的形式进行的。由于氢原子的直径最小，所以氢原子对金属的扩散和渗透最为显著。

各种气体—金属配偶的渗透系数如图 14-7 所示。表面处理对氢渗透的影响见表 14-7。氢

表 14-7 氢气穿透金属的渗透系数

金属	表面 处 理	温度 /℃	压 差 / $\times 133.3\text{Pa}$	单位面积单位长度的渗透速率 $q' = K\sqrt{p}$ / $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
镍	抛光	750	4.2×10^{-2}	1.39×10^{-6}
	氧化和还原	750	4.2×10^{-2}	2.70×10^{-6}
	抛光	750	9.1×10^{-2}	2.91×10^{-6}
	氧化和还原	750	9.1×10^{-2}	4.23×10^{-6}
铁	抛光	400	7.7×10^{-1}	0.47×10^{-7}
	腐蚀	400	7.7×10^{-1}	4.40×10^{-7}
	抛光	590	7.3×10^{-2}	1.28×10^{-7}
	600℃ 氧化和还原	590	7.3×10^{-2}	0.76×10^{-7}
	800℃ 氧化和还原	590	7.3×10^{-2}	1.54×10^{-7}

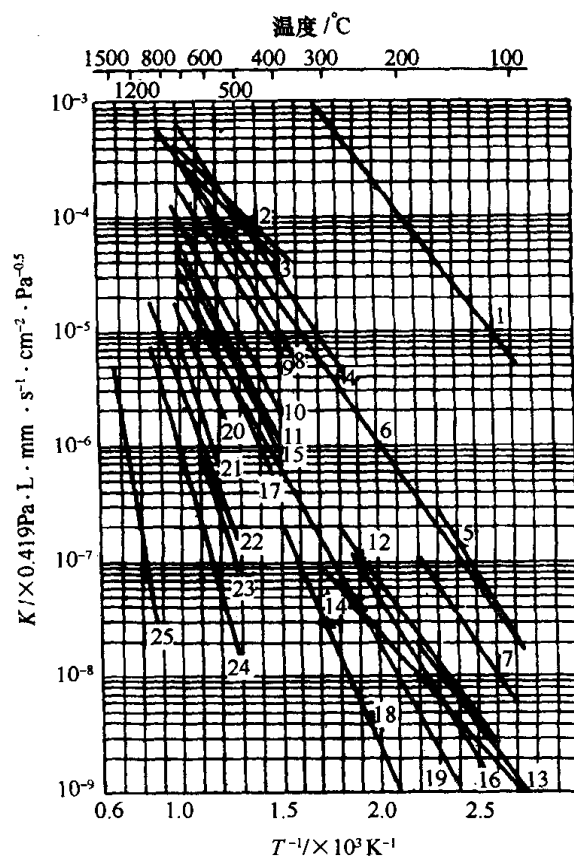


图 14-7 各种金属的渗透系数随温度的变化曲线

1—氢—钯；2—氢—铁；3—氢—钢；4、7、8—氢—镍；5—氢—蒙乃尔(Monel)合金；
6—氢—铁；9—氢—蒙乃尔合金；10—氢—因康耐尔(Inconel)合金；11—氢—可伐；
12—氢—可伐；13—氢—因科尼尔合金；14—氢—52合金；15、16—氢—304不锈钢；
17、18—氢—铜；19—氢—27%铬钢；20—氢—铂；21—氢—钨；22—一氧化碳—铁；
23—氢—铝；24—氮—铁；25—氮—钨。

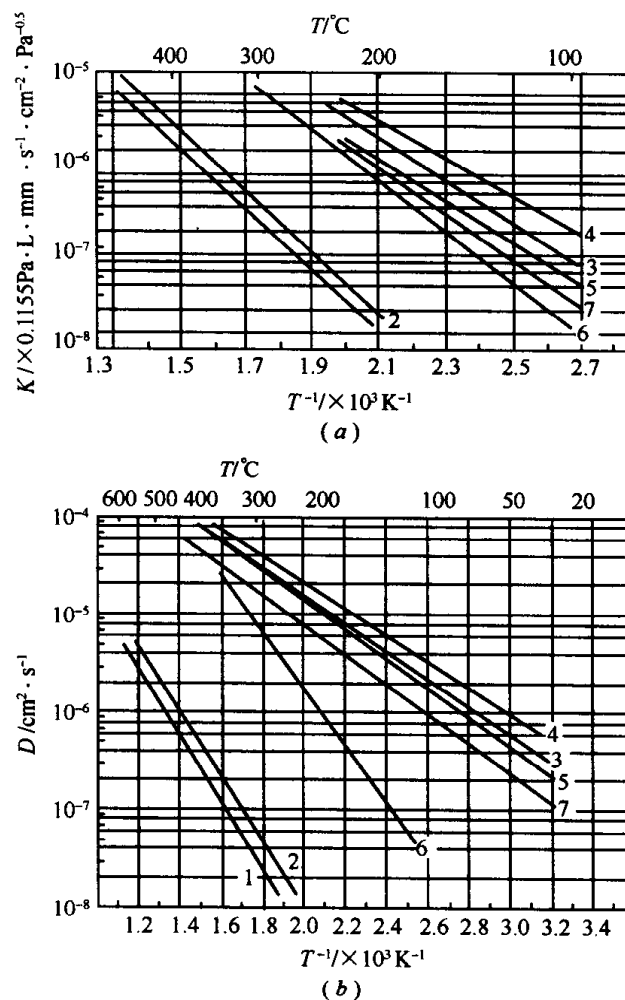
(图中同种配偶的不同数据系由不同作者所测)

气对不同金相的钢材渗透与扩散如图 14-8 所示。各种气体—金属配偶的扩散系数如图 14-9 所示。氢、氧、氮在金属中的溶解度数据可参如图 14-10、图 14-11 所示。

4. 橡胶、塑料

气体对有机材料的扩散、溶解、渗过过程，一般以分子态进行。由于有机材料的微孔比较大，因此各种气体都几乎可以透过，其透过能力也比玻璃、金属大得多。对大多数有机材料来说，水蒸气的扩散、溶解、渗透值都较高。

在 20℃ ~ 30℃ 下，各种气体对有机材料的渗透系数汇集于表 14-8 和图 14-12。橡胶的渗透系数、扩散系数和溶解度见表 14-9。



图线号	钢 材	成 分 / %					渗透活化能 $E_K / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	扩散活化能 $E_D / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	溶解热 $H / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
		C	Cr	Ni	Mn	Si			
1	奥氏体	0.07	18.0	8.7	—	—	17800	15600	2200
2	焊接后的铁素体, 残存有奥氏体	0.07	18.0	8.7	—	—	17600	15100	2500
3	铁素体	0.12	—	—	0.50	0.01	11700	6700	5000
4	铁素体	0.09	—	—	0.51	0.05	10800	6400	4000
5	铁素体—珠光体	0.12	—	—	0.53	< 0.1	11700	6900	4800
6	珠光体	0.26	14.1	1.3	0.41	0.46	14900	13800	1100
7	铁素体—珠光体	0.11	—	—	0.53	< 0.1	12800	6600	6200

图 14-8 氢—钢的渗透、扩散

(a) 渗透系数; (b) 扩散系数。

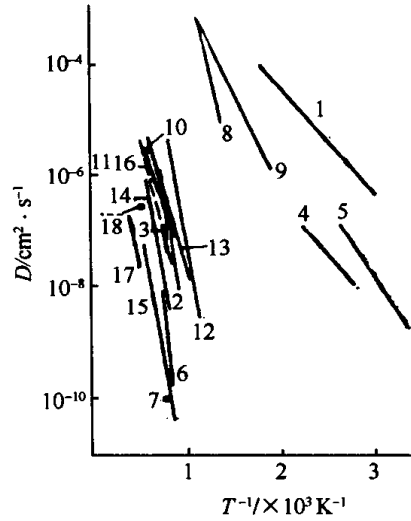


图 14-9 各种气体—金属扩散系数

1—氢—钼; 2—氮—铁; 3—一氧化碳—镍; 4—氢—镍; 5—氢—铁; 6—氧—镍; 7—氧—铁;
8—氢—铝; 9—氢—铜; 10—氮—钽; 11—氮— β 钽; 12—氧—铜; 13—氧—钽;
14—氧—钛; 15—氮— α 钛; 16—氮— β 钛; 17—氢—钨; 18—氢—钼。

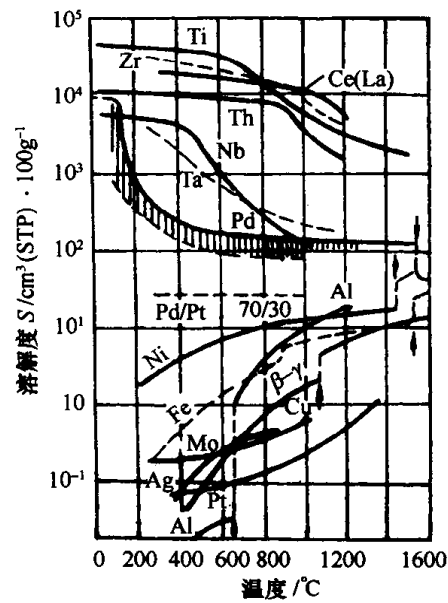


图 14-10 各种金属内的氢的溶解度

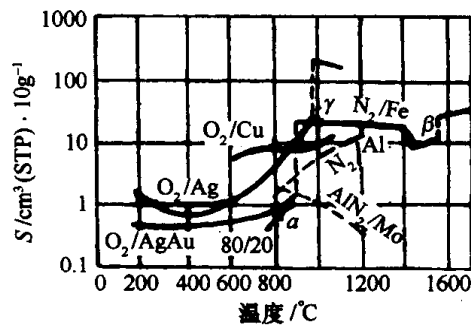
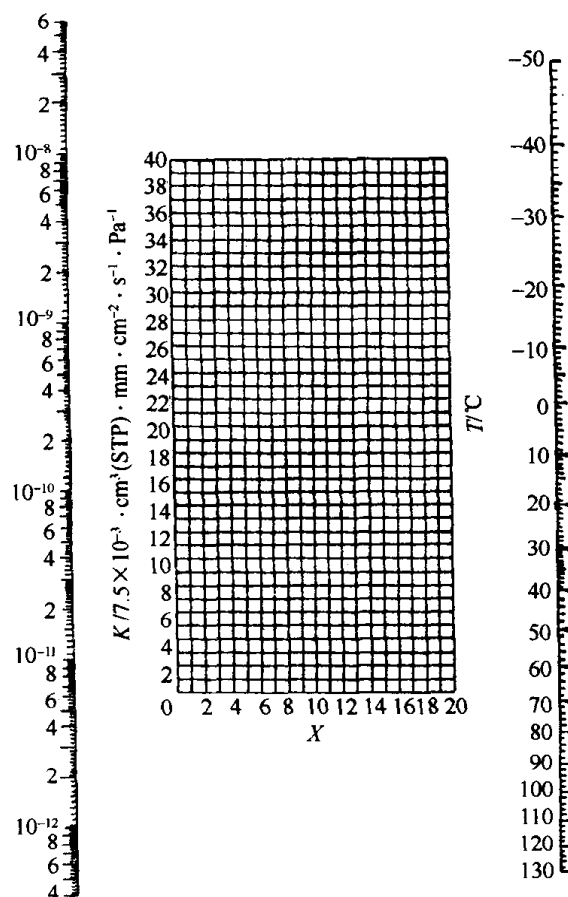


图 14-11 各种金属内的氧、氮的溶解度

表 14-8 各种气体对有机材料常温下的渗透系数

材 料	渗透系数 K $7.5 \times 10^{-14} \cdot \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$							
	N ₂	O ₂	H ₂	He	Ar	Xe	CO ₂	H ₂ O
赛纶(Saran)	0.01	0.05	—	—	—	—	0.29	14~1000
聚氟乙烯	0.04	0.2	—	—	—	—	0.9	3300
涤纶	0.05	0.3	6.3	10.5	—	—	1.0	1300~2300
普利奥软片(氯化物橡胶)	0.08~6.2	0.25~5.4	—	—	—	—	1.7~18.2	250~19000
聚三氟氯乙烯	0.09~1.3	0.25~5.4	—	—	—	—	0.48~12.5	3~360
电木	0.95	—	—	—	—	—	—	—
尼龙	0.1~0.2	0.38	1.6~6.3	3.7~11	<1	—	1.6	700~17000
环氧树脂	—	0.49~16	—	—	—	—	0.86~14	—
苯乙烯—甲基丙烯腈共聚物(橡胶)	0.21	1.6	—	—	—	—	—	—
聚甲醛	0.22	0.38	—	—	—	—	1.9	5000~10000
聚氯乙烯	0.4~1.7	1.2~6	—	—	—	—	10.2~37	2600~6300
苯乙烯—丙烯腈共聚物(橡胶)	0.46	3.4	—	—	—	—	10.8	9000
醋酸纤维素	1.6~5	4.0~7.8	—	—	—	—	24~180	15000~106000
丁腈橡胶哈卡橡胶(Hycar)	2.4~25	9.6~82	100	380	17	8	75~636	10000
聚碳酸酯	3	20	—	—	—	—	85	7000
聚苯乙烯	3~80	15~250	200	180	<1	—	75~370	10000
丁基橡胶	3.2	13	60	40	—	11	52	400~2000
聚乙烯	3.3~20	11~59	100	70	33	—	43~280	120~2100
维顿 A(Viton A)	4.4	15	26.6	100	<1	—	78	520
聚丙烯	4.4	23	—	—	—	—	92	700
聚氨酯	4.9	15.2~48	—	—	—	—	140~400	3500~125000
甲基橡胶	4.8	21	—	—	—	—	75	—
海普纶	11.6	28	—	—	—	—	208	12000
氯丁橡胶	11.8	40	100~140	45~100	16~28	100	250	18000
氟乙烯—丙烯共聚物	21.5	59	—	—	—	—	17	500
聚四氟乙烯	31	100	240	7000	58	—	—	360
丁苯橡胶	63.5	172	110	—	—	—	1240	24000
丁钠橡胶	64.5	191	450	290	200	430	1380	49000
天然橡胶	84	230	—	—	—	—	1330	30000
聚硫橡胶	—	—	40	—	—	—	—	—
硅橡胶	3600	1000~6000	7160	3840	7000	—	6000~30000	106000
有机玻璃	<1	<1	33	70	<1	—	—	—
乙基纤维素	84	265	—	—	—	—	410	14000~130000
聚乙烯醇	—	—	—	—	—	—	—	29000~140000
玻璃纸	—	—	—	—	—	—	—	470

一、材料的真空性能



材 料	氮		氧		氢		氦		二氧化碳		其它气体		
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	种类	X	Y
酚醛塑料	12.5	2.8	—	—	8.0	6.3	—	—	—	—			
丁苯橡胶	11.2	19.5	10.1	22.9	8.7	26.5	8.6	24.6	6.95	31.4	甲烷	10.4	23.4
丁腈橡胶	14.8	12.6	—	—	—	—	—	—	—	—			
丁钠橡胶	11.2	19.5	9.3	23.7	6.1	28.8	—	—	6.4	32.3			
丁二烯—异丁烯甲酯共聚物	10.0	17.2	—	—	—	—	—	—	—	—	氩	12.0	19.7
丁基橡胶(98%异丁烯, 2% 2-甲基丁二烯共聚物)	17.8	10.6	13.8	14.3	11.6	19.7	9.8	20.9	12.8	18.9	乙炔	14.3	15.0
丁基橡胶	14.1	11.0	—	—	—	—	—	—	—	—	乙烯	14.6	13.8
玻璃纸	—	—	—	—	—	—	—	13.0	3.5	—	丙烷	13.6	15.1
赛璐珞	—	—	—	—	7.05	0.25	—	—	—	—	—		
醋酸纤维素	—	—	—	—	5.0	22.1	—	—	2.6	23.2			
醋酸—丁酸纤维素	—	—	—	—	4.0	26.6	—	—	4.4	28.0			
硬质橡胶(硬橡胶 32% S)	—	—	—	—	8.3	10.1	—	—	—	—			
乙基纤维素	7.0	17.5	5.2	22.4	5.8	28.2	5.0	27.4	—	—			

第十四章 真空技术常用材料

(续)

材 料	氮		氧		氢		氩		二氧化碳		其它气体		
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	种类	X	Y
杜仲胶(<43℃)	17.0	15.2	14.3	18.5	14.2	20.8	—	—	13.2	23.8			
杜仲胶(>43℃)	7.5	23.6	6.9	27.2	7.3	29.2	—	—	3.4	36.6			
哈卡橡胶(61% 丁二烯, 39% 丙烯腈共聚物)	15.0	10.1	14.8	13.4	11.9	19.6	9.9	20.1	13.6	19.2			
74% 2-甲基丁二烯, 26% 丙烯腈共聚物(硫化)	17.1	9.4	15.5	13.0	12.0	19.7	10.1	20.5	15.4	17.2			
74% 2-甲基丁二烯, 26% 异丁烯腈共聚物	15.6	12.2	14.1	15.8	10.8	22.0	—	—	13.3	21.1			
甲基橡胶	15.8	11.5	14.6	15.5	10.9	22.7	9.0	22.9	14.45	18.25	甲烷	17.0	13.0
密普隆(氯乙烯, 异丁烯酯共聚物 27% 软化剂)	16.0	15.7	14.6	13.2	11.7	19.0	—	—	14.1	18.0			
涤纶	—	—	—	—	6.7	12.1	6.7	14.0	7.8	6.5			
天然橡胶(硫化)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	乙炔环丙烷	9.7 8.8	29.0 32.7
天然橡胶(7.15% S)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	丁烷 乙烷 丙烷 乙烯	11.8 12.8 11.4 12.1	24.3 20.6 22.5 21.3
天然橡胶(1.7% S)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	乙烯	8.1	29.3
天然橡胶	12.4	19.9	10.3	24.0	9.3	27.0	9.1	25.3	8.15	30.95	甲烷	12.3	23.6
氯丁橡胶(G)	—	—	12.4	17.7	—	—	—	—	11.3	23.6	甲烷	13.9	16.9
氯丁橡胶(硫化的商业氯丁橡胶)	13.1	14.2	—	—	10.6	21.7	9.9	20.2	—	—	氩	13.0	17.2
氯丁橡胶(未硫化的商业氯丁橡胶)	—	—	—	—	13.5	16.9	15.5	16.9	—	—			
尼龙	—	—	—	—	10.6	13.9	16.2	10.4	—	—			
异丁橡胶	25.3	10.3	13.8	14.0	12.6	18.9	10.6	20.0	13.1	18.1	甲烷	15.6	12.6
丁腈 18(80% 丁二烯, 20% 丙烯腈共聚物)	12.8	16.3	11.4	20.2	9.45	24.65	9.0	23.4	5.9	32.8			
丁腈 G(73% 丁二烯, 27% 丙烯腈共聚物)	13.7	14.0	12.0	18.0	10.7	22.2	8.7	22.2	11.0	24.25	甲烷 乙炔	14.1 12.8	16.7 22.9
氯化橡皮软片	—	—	—	—	11.4	16.4	—	—	12.35	14.9	水气	15.4	20.3
丁钠橡胶	10.8	19.6	—	—	8.8	26.6	—	—	—	—			
聚乙烯	—	—	—	—	14.5	19.8	11.0	20.6	—	—			
聚乙烯	14.3	13.4	12.4	17.0	10.0	20.7	10.3	19.3	10.0	22.3			
聚乙烯(压延过的)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	10.6	26.8
聚乙烯(铸)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	12.0	25.0

一、材料的真空性能

(续)

材 料	氮		氧		氢		氩		二氧化碳		其它气体		
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	种类	X	Y
聚甲基戊二烯(85%2 甲基 15%4 甲基 1-3 戊二烯共 聚物)	19.3	16.2	12.5	20.3	9.5	26.3	—	—	11.1	25.6			
聚乙烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	17.8	20.3
聚苯乙烯	10.0	17.9	—	—	—	—	—	—	—	—	氩	10.8	22.0
聚氯乙烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	0.2	36.7
聚氯乙烯(有增塑剂)	—	—	—	—	8.2	22.9	—	—	11.3	20.7			
聚氯乙烯—醋酸酯共聚物 (乙烯基树脂浇铸)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	3.2	38.3
聚氯乙烯—醋酸酯共聚物	15.1	12.4	12.7	16.6	9.7	21.4	—	—	10.8	22.7			
聚偏二氯乙烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	19.0	15.0
橡皮(2% S, 5min 硫化)	—	—	—	—	—	—	7.8	20.5	—	—			
聚硫橡胶 B	—	—	16.3	10.3	13.3	15.0	—	—	15.05	16.45			
氯乙烯	—	—	—	—	8.45	23.0	—	—	7.6	21.4			
乙烯基树脂 IV	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	水气	8.2	35.4
聚酯—酰胺-2 异氰酸酯	15.0	11.7	13.9	14.7	11.9	19.2	—	—	12.8	22.3			

图 14-12 不同温度下气体对聚合物的渗透系数诺模图

表 14-9 气体在橡胶中的扩散系数、渗透系数、溶解度

材料	温度 /°C	H ₂			O ₂			N ₂			CO ₂			CH ₄		He	NH ₃	SO ₂
		K	D	S	K	D	S	K	D	S	K	D	S	K	S	K	S	S
天然橡胶	17	37	790	0.037	16	125	0.099	5.4	80	0.049	95	67	1.01	16.5	0.26	21.7	—	—
	25	51	1050	0.039	24	175	0.099	8.7	115	0.052	134	105	0.90	29	0.25	30	6.9	23.6
	35	77	1400	0.041	38	270	0.100	14.5	200	0.053	191	170	0.78	47	0.25	44	—	—
	43	101	1850	0.042	51	360	0.100	21	280	0.055	244	250	0.70	66	0.24	58	4.1	11.6
	50	128	2200	0.043	65.2	490	0.101	29.6	370	0.056	290	320	0.64	84	0.23	—	—	—
丁苯橡胶	17	29.6	800	—	12	96	—	4.0	72	—	94	68	—	13.8	—	17	—	—
	25	40.2	1000	0.036	17	140	0.093	6.3	100	0.048	124	100	0.87	21	—	23	8.1	17.2
	35	58	1350	—	26	200	—	10.3	145	—	171	155	—	34	—	33	—	—
	43	77.8	1650	0.039	36.2	280	0.093	15.1	210	0.050	217	230	0.69	46	—	44	6.6	9.8
	50	97	2000	—	45.5	340	—	19.1	280	—	257	290	—	57	—	55	—	—
丁腈橡胶	17	10.0	310	—	2.6	24	—	0.66	14.5	—	20	10	—	1.7	—	7.6	—	—
	25	15.1	420	0.028	4.2	36	0.079	1.17	23	0.035	30	17	1.28	3.2	—	11.4	13.5	48.0
	35	23.1	640	—	7.0	63	—	2.18	41	—	49	31	—	6.2	—	16.5	—	—
	43	33.6	860	0.031	10.1	91	0.080	3.3	62	0.040	69	47	0.98	9.2	—	21.7	8.0	23.5
	50	41.5	1100	—	13.8	130	—	4.9	86	—	87	70	—	13.3	—	28	—	—

(续)

材料	温度 /℃	H ₂			O ₂			N ₂			CO ₂			CH ₄		He	NH ₃	SO ₂
		K	D	S	K	D	S	K	D	S	K	D	S	K	S	K	S	S
氯丁橡胶 G	17	9.0	290	—	2.30	25	—	0.70	15.5	—	16.3	13	—	1.8	—	—	—	—
	25	13.6	380	0.029	3.9	38	0.075	1.17	24	0.036	25.7	23	0.83	3.3	—	—	8.8	18.1
	35	21	560	—	6.7	62	—	2.17	44	—	41	42	—	6.3	—	—	—	—
	43	30	740	0.032	10.1	100	0.076	3.36	72	0.038	57.2	68	0.64	9.5	—	—	6.7	10.5
	50	37.5	940	—	13.3	130	—	4.18	94	—	74.5	91	—	12.9	—	—	—	—
聚异丁烯橡胶	17	4.0	100	—	0.71	5.0	—	0.14	2.7	—	3.0	3.2	—	0.26	—	5.0	—	—
	25	6.5	140	0.035	1.18	7.8	0.107	0.29	4.3	0.052	5.0	5.4	0.69	0.72	—	7.4	1.25	3.6
	35	10.9	210	—	2.1	15.5	—	0.58	8.4	—	8.7	10.5	—	1.5	—	11.2	—	—
	43	16	310	0.040	3.4	24	0.102	1.03	15	0.054	13.2	18	0.57	2.5	—	16	1.05	2.4
	50	21.7	380	—	4.9	34	—	1.51	21	—	18	25	—	3.8	—	20.4	—	—
丁钠橡胶	17	30	750	—	13.3	110	—	4.5	81	—	105	76	—	—	—	—	—	—
	25	42	960	—	19.1	150	—	6.5	110	—	138	105	—	—	—	—	—	—
	35	61	1250	—	28	220	—	10.3	160	—	184	160	—	—	—	—	—	—
	43	79	1600	—	37	300	—	14	220	—	230	220	—	—	—	—	—	—
	50	101	1800	—	47	370	—	19.1	290	—	263	280	—	—	—	—	—	—
甲基橡胶	17	11.9	270	—	1.22	8.8	—	0.26	4.6	—	3.9	3.6	—	—	—	10.7	—	—
	25	17	390	—	2.1	14	—	0.47	7.9	—	7.5	6.3	—	0.79	—	14	—	—
	35	26	610	—	4.1	25	—	1.03	17	—	13.8	13	—	1.91	—	21	—	—
	43	38	800	—	6.6	41	—	1.7	28	—	22	22	—	3.6	—	29	—	—
	50	50	1050	—	9.4	61	—	2.9	41	—	32	36	—	5.8	—	36	—	—
氯乙炔异丁烯共聚物	17	3.8	150	—	0.54	9.0	—	—	—	—	3.0	2.3	—	—	—	—	—	—
	25	5.8	200	—	0.92	13	—	0.26	—	—	5.3	4.4	—	—	—	—	—	—
	35	9.6	300	—	1.8	24	—	0.53	—	—	10.0	8.3	—	—	—	—	—	—
	43	13.8	390	—	2.8	39	—	0.92	—	—	15.2	14	—	—	—	—	—	—
	50	18	500	—	4.2	52	—	—	—	—	20	19	—	—	—	—	—	—
聚硫橡胶	17	0.94	78	—	0.14	—	—	—	—	—	1.7	4.3	—	—	—	—	—	—
	25	1.6	105	—	0.29	—	—	—	—	—	3.2	8.1	—	—	—	—	—	—
	35	2.9	180	—	0.65	—	—	—	—	—	6.3	17	—	—	—	—	—	—
	43	4.4	260	—	1.12	—	—	—	—	—	10.1	28	—	—	—	—	—	—
	50	6.1	350	—	1.7	—	—	—	—	—	14.5	40	—	—	—	—	—	—

注: K—渗透系数/ $\times 7.5 \times 10^{-13} \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$; D—扩散系数/ $10^{-8} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; S—溶解度/ $\times 10^{-5} \text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$

(三) 出气

1. 概述

任何固体材料在大气环境下都能溶解、吸附一些气体。当材料置于真空中时就会因溶解、解吸而出气。对一般真空设备来说,材料的出气是真空系统最主要的气源。

常用的出气速率的单位为 $[\text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)]$ 。

出气速率通常和材料中的气体含量成正比。所以有时(如电真空器件)也用高温下的出气

总量作为选材依据。出气总量的单位如考虑体积含量为主时可用 $[\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{g}]$; 考虑表面含量为主时则用 $[\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{cm}^2]$ 。

材料的出气速率除与材料性质有关外,还和材料的制造工艺、贮存状况有关。预处理工艺(如清洗、烘烤、气体放电轰击、表面处理等)对材料出气速率的影响也很大。因此选用出气速率的数据时必须考虑这些情况。

材料出气速率是温度和时间的函数,其关系如下^[449]

$$\lg q = \lg q_1 - a \lg t \quad (14-8)$$

及

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (14-9)$$

式中 q ——出气速率;

q_1, q_0 ——常数;

t ——时间;

E ——出气活化能;

R ——摩尔气体常数;

T ——热力学温度;

a ——出气速率的衰减系数(一般有机材料 $a \approx 0.5$, 金属材料 $a \approx 1$, 但也有例外情况)。

因为出气速率与温度有关,所以在设计真空系统时必须选用实际使用温度时的数据。如无此数据,则可根据两个不同温度下的数值按式(14-9)进行估算。

由式(14-8)可看出,出气速率是时间的慢变化函数,即,时间延长一个数量级,出气速率只降低半个或一个数量级。

已经出过气的材料经长时间暴露大气后,能重新吸气并恢复到原来的情况。经常运转的系统,如果只是在两次运转之间短时间暴露大气的话(如 1h 以内),则等效为材料在真空中经历 10h 的出气时间;对于经常运转而只暴露于低真空的材料,则可等效于经历 100h 的出气时间。

测量出气速率的方法可参考文献[450],常用的测量方法有两类:

动态法(流量率法) 用此方法测得的数据比较可靠;

静态法(定容法) 用此方法测得的数据往往偏低。

因此本书所提供的各种材料的出气数据均注明测量方法,以供查阅时参考。

根据材料出气速率的数据估算真空系统的动态平衡压力时,可用公式(14-10)

$$p = \sum_i K q_i A_i / S \quad (14-10)$$

式中 q_i ——第 i 种材料的出气速率 $[\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s}/\text{cm}^2]$;

A_i ——第 i 种材料在真空中的暴露面积 $[\text{cm}^2]$;

S ——真空系统的有效抽速 $[\text{L}/\text{s}]$;

K ——校正系数,一般情况下可取 $K \approx 1$,如果出气的材料所在部位通道狭窄,流阻较大时,可按经验在 0.1 ~ 1 之间估取。

2. 常温下材料的出气速率

(1) 钢的常温出气速率

不同表面状况的不锈钢的常温出气速率数据有,未经过烘烤的不锈钢的常温出气速率(动

态法测试)、经过烘烤的不锈钢的常温出气速率(动态法测试)和未经过烘烤的不锈钢的常温出气速率(静态法测试)三种,见表 14-10、表 14-11、表 14-12。

表 14-10 未经过烘烤的不锈钢的常温出气速率
(动态法测试)

预 处 理	牌 号	出 气 速 率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$		
		1h	10h	25h
未处理	1Cr18Ni9Ti	2.8×10^{-8}	3×10^{-9}	1.3×10^{-9}
	ICN472(法)	1.3×10^{-8}	1.5×10^{-9}	6.1×10^{-10}
	NS22S(法)	1.4×10^{-8}	1.3×10^{-9}	3.3×10^{-10}
四氯化碳去脂	SUS27(日)	$>1\times 10^{-7}$	1×10^{-9}	—
喷砂	ICN472(法)	8.2×10^{-9}	1×10^{-9}	—
布抛光	1Cr18Ni9Ti	7×10^{-9}	1×10^{-9}	4.5×10^{-10}
超声波清洗	1Cr18Ni9Ti	3.2×10^{-9}	5.5×10^{-10}	2.2×10^{-10}
真空退火	1Cr18Ni9Ti	2.5×10^{-9}	4.5×10^{-10}	2.3×10^{-10}
电抛光	1Cr18Ni9Ti	8×10^{-9}	6×10^{-10}	2×10^{-10}
	EN58B(英)	—	4.6×10^{-10}	2×10^{-10}
	NS22S(法)	4.3×10^{-9}	4.3×10^{-10}	1.5×10^{-10}
机械抛光	1Cr18Ni9Ti	2.2×10^{-9}	4×10^{-10}	2×10^{-10}
	NS22S(法)	1.7×10^{-9}	4.6×10^{-10}	2.2×10^{-10}
化学抛光	1Cr18Ni9Ti	1.8×10^{-9}	3.5×10^{-10}	2×10^{-10}
三氯乙烯去脂,丙酮洗,氮干燥	—	1.1×10^{-9}	2×10^{-10}	—

表 14-11 经过真空烘烤的不锈钢的常温出气速率
(动态法测试)

烘烤规范		预 处 理	牌 号	出 气 速 率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$		
温度 $^{\circ}\text{C}$	时间 h			1h	10h	24h~25h
100	3	去脂	SUS27(日)	1.5×10^{-9}	1.2×10^{-10}	—
150	1	化学抛光	Z3CN18-8(法)	—	$1.1\sim 1.7\times 10^{-10}$	$2\sim 8\times 10^{-11}$
150	1	电抛光	Z3CN18-8(法)	—	$2.9\sim 5\times 10^{-10}$	$0.7\sim 2.3\times 10^{-11}$
150	1	玻璃球抛光,去脂,化学清洗	304(美)	—	2×10^{-12} (外推)	—
200	7	电抛光	1Cr18Ni9Ti	4×10^{-12} (外推)	—	—
250	30	电抛光或玻璃球抛光	304(美)	—	—	$2\sim 3\times 10^{-12}$
300	3	去脂	SUS27(日)	6×10^{-11}	1.5×10^{-12}	—
300	25	未处理	U15C(法)	4.5×10^{-12}	—	—

一、材料的真空性能

(续)

烘烤规范		预 处 理	牌 号	出 气 速 率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$		
温度 $/^{\circ}\text{C}$	时间 $/\text{h}$			1h	10h	24h~25h
350	10	未处理	1Cr18Ni9Ti	3×10^{-12} (外推)	—	—
360	45	未处理	U15C(法)	2.6×10^{-12}	—	—
380	20	未处理	1Cr18Ni9Ti	1×10^{-12} (外推)	—	—
400	16	电抛光	EN58B(英)	3×10^{-14}	—	—
430	7	电抛光	1Cr18Ni9Ti	9.7×10^{-13} (外推)	—	—
440	10	超声波清洗	1Cr18Ni9Ti	8.6×10^{-12} (外推)	—	—
440	10	机械抛光	1Cr18Ni9Ti	2.6×10^{-13} (外推)	—	—
450	5	去脂	SUS27(日)	3×10^{-12}	1×10^{-13}	—
1000 + 360	3 25	未处理	U15BM(法)	1.3×10^{-14}	—	—

表 14-12 未经过烘烤的不锈钢的常温出气速率
(静态法测试)

预 处 理	牌 号	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$		
		5h	10h	25h
未处理	304ELC(美)	1.2×10^{-9}	—	—
去脂,然后擦猪油	18/9/1(英)	—	—	5×10^{-10}
三氯乙烯去脂	18/9/1(英)	—	1.3×10^{-10}	4.7×10^{-11}
化学抛光	18/9/1(英)	—	2.6×10^{-10}	1.15×10^{-10}
	304(美)	4.3×10^{-11}	2.5×10^{-11}	1.3×10^{-11}
布抛光	304ELC(美)	5×10^{-10}	—	—
去脂,抽真空 100h,玻璃球抛光,空气干燥	18/9/1(英)	—	2×10^{-10}	6.9×10^{-11}
电抛光	18/9/1(英)	—	1.3×10^{-10}	4.7×10^{-11}
	304(美)	4.3×10^{-10}	1×10^{-10}	2.5×10^{-11}
烧氢	304(美)	—	1.5×10^{-10}	9×10^{-11}
去脂,抽真空 100h,400℃ 真空烘烤 18h,冷却后暴露大气 24h,抽真空 100h,取出用手摸	18/9/1(英)	—	8×10^{-11}	2.2×10^{-11}
去脂,400℃ 真空烘烤,暴露大气 24h	18/9/1(英)	—	7×10^{-11}	3.2×10^{-11}
电抛光,抽真空 50h,去脂,抽真空 100h,软水洗,空气干燥,抽真空 120h,500℃ 大气烘烤 1h	18/9/1(英)	—	5.2×10^{-11}	2.2×10^{-11}
去脂,擦猪油,等离子清除	18/9/1(英)	—	5.2×10^{-11}	1.8×10^{-11}
化学清洗	304(美)	$\leq 3.3\times 10^{-10}$	$\leq 4.5\times 10^{-11}$	$\leq 1\times 10^{-11}$

经不同预处理之后的各种低碳钢常温出气速率数据见表 14-13。

出气速率不仅和所经历的出气时间有关(降低),而且和材料的表面预处理方法有很大关

表 14-13 各种低碳钢的常温出气速率

牌号	加工	处 理	出 气 速 率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$			
			1h	2h	10h	25h
冷轧钢	机加工	四氯化碳去脂,热风吹	5.8×10^{-8}	—	9.8×10^{-9}	5.1×10^{-9}
20 号钢			8.5×10^{-9}	—	5.5×10^{-10}	2.0×10^{-10}
S15C			—	6×10^{-8}	7×10^{-9}	—
			3.06×10^{-7}	—	2.9×10^{-7}	—
		磨光	6×10^{-8}	—	1×10^{-8}	—
		喷铝	4.2×10^{-9}	—	4.2×10^{-10}	1.7×10^{-10}
		镀镍	2.7×10^{-9}	—	2.3×10^{-10}	9.1×10^{-11}
		电抛光	8.2×10^{-9}	—	7.0×10^{-10}	2.7×10^{-10}
		化学处理	5.1×10^{-9}	—	4.5×10^{-10}	1.8×10^{-10}
		化学抛光	7.0×10^{-9}	—	5.7×10^{-10}	2.4×10^{-10}
		镀铬	9.0×10^{-9}	—	7.9×10^{-10}	3.0×10^{-10}
		电抛光	—	4×10^{-9}	1.1×10^{-9}	—
S15C		镀铬	—	4×10^{-9}	1.1×10^{-9}	—
20 号钢	机加工	420℃ 真空烘 7h	3.5×10^{-13}	—	—	—
20 号钢	机加工	200℃ 真空烘 7h	2.8×10^{-11}	—	—	—
S15C		100℃ 真空烘 3h	—	1.8×10^{-8}	1.2×10^{-9}	—
S15C		300℃ 真空烘 3h	—	2×10^{-9}	1.8×10^{-11}	—
S15C	镀铬	100℃ 或 200℃ 真空烘 3h	—	1.9×10^{-9}	3.5×10^{-10}	—
S15C	镀铬	300℃ 真空烘 3h	—	6×10^{-10}	6×10^{-11}	—

系。这是因为表面可能有不同程度的油污染。此外,由于金属在室温下出气的主要成分是水气(占 90% 以上),而水气的出气速率在一定程度上又和表面预处理有关。例如:

对于清洁的表面来说,表面粗糙度越低(粗糙度不仅与抛光方法有关,而且和加工工艺有关),吸附的水气就越少;在干燥氮气或空气中烘烤,使不锈钢表面形成一层密实的淡黄色氧化膜,也可以减少水的出气,而且可以把表面的污染物氧化成气体或烧掉;用有机溶剂去脂时,表面的单分子层污染是无法除掉的,只能靠真空下的烘烤来除掉;温度在 200℃ 以上的真空烘烤可有效地除掉水气,但要有效地除掉氢,则必须在 400℃ 以上的温度下进行真空烘烤。

此外,不同实验方法所测得的出气速率数据也不尽相同。当采用静态法测试时,由于材料所处环境的气体压强不断上升,使出气受到阻碍,所以测得的出气速率数据明显偏低。这样的数据不宜直接引用,仅能作为参考。

(2) 国产材料的常温出气速率

国产金属、橡胶、氟橡胶、塑料、玻璃钢、涂料、润滑剂、粘接剂、油脂、纤维和薄膜材料的常温出气速率的测量结果均如图 14-13~图 14-21 所示。

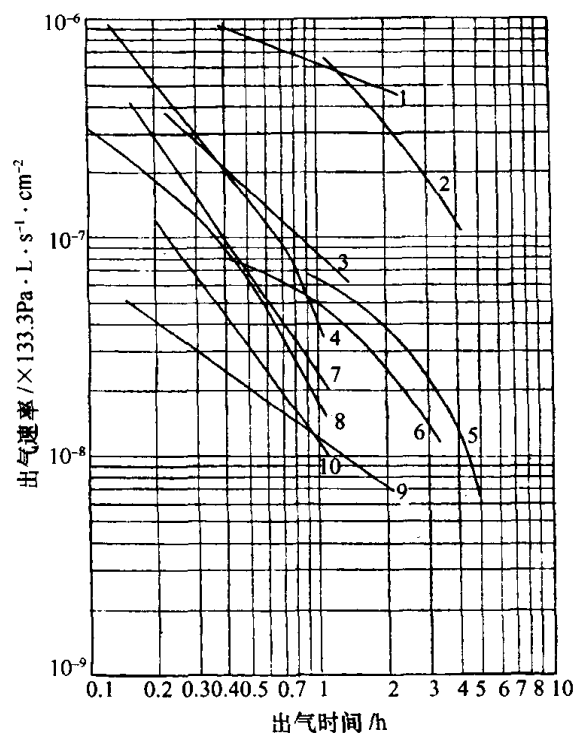
(3) 其它金属的常温出气速率

铜、铝等其它金属的常温出气速率无机材料的常温出气速率见表 14-14、表 14-15、表 14-16。

(4) 无机材料的常温出气速率

见表 14-17、表 14-18。

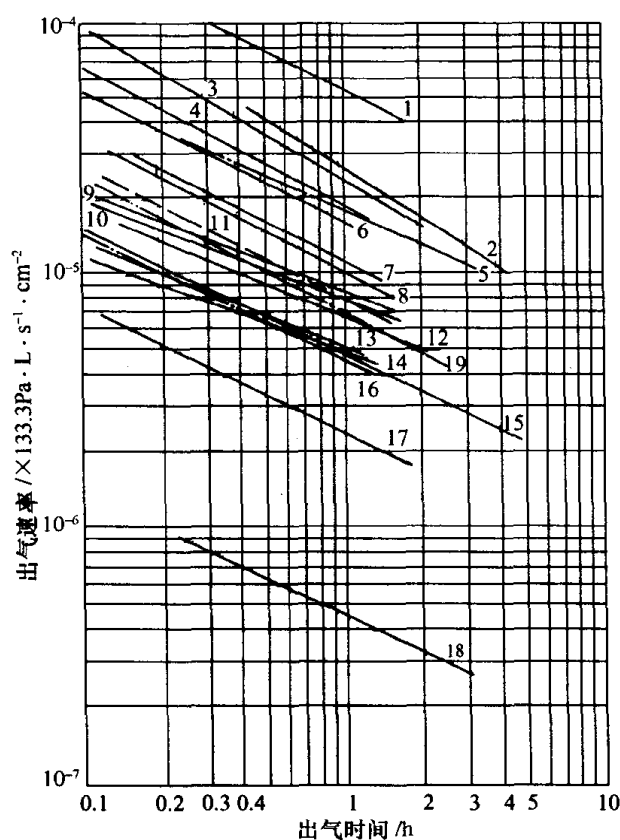
一、材料的真空性能



图线号	金属名称	预处理	出气温度/℃
1	磁钢	丙酮擦洗	25
2	铁板	未加工	6
3	铝板	表面锉光	20
4	镀铝碳钢	未加工	23
5	紫铜片	未加工	12
6	镍片	未加工	11
7	铜板	表面锉光	12
8	保险丝	未加工	20
9	碳钢(AT3F)	车制, 丙酮清洗	20
10	碳钢(AT3F)	车制, 甲苯, 乙醚中各泡 1min	22

注: 因为出气速率较低, 测量误差较大。如对弯曲线外推使用时, 可取沿尾部切向外推的保守值

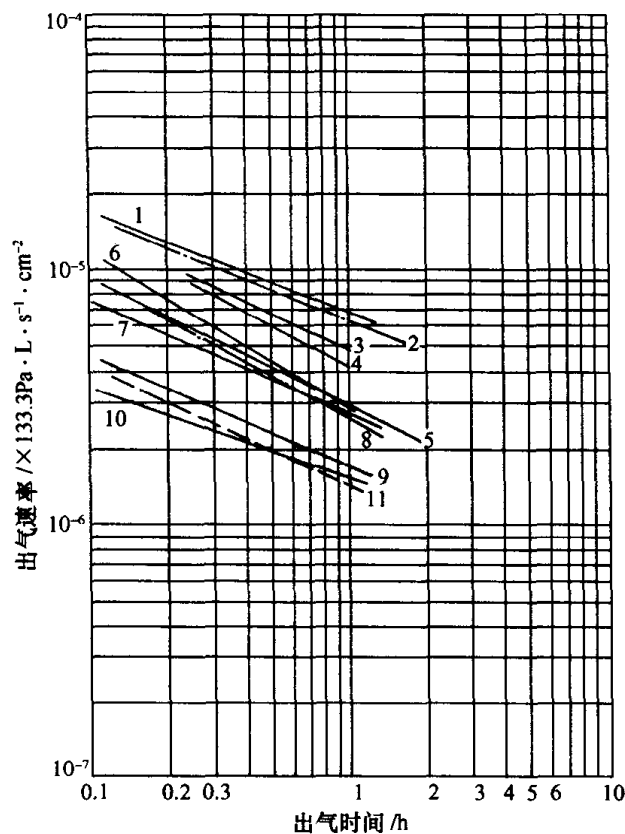
图 14-13 国产金属材料的出气速率



图线号	橡胶名称	产地
1	乙烯基硅橡胶	上海橡胶工业制品研究所
2	聚氨酯 1 号	上海橡胶工业制品研究所
3	二甲基硅橡胶	上海橡胶工业制品研究所
4	乙烯基硅橡胶 (SiO ₂ , TiO ₂)	西北橡胶工业制品研究所
5	聚氨酯 2 [#]	西北橡胶工业制品研究所
6	乙烯基硅橡胶 (SiO ₂ , 过氧化苯甲酰)	西北橡胶工业制品研究所
7	丁腈 40	上海橡胶工业制品研究所
8	丁腈	上海长宁橡胶厂
9	丁腈	上海大成橡胶厂
10	丁腈	上海大成橡胶厂
11	天然橡胶	辽宁铁岭橡胶研究所
12	丁腈	西北橡胶工业制品研究所
13	丁腈 52-10	西北橡胶工业制品研究所
14	丁腈(真腈-1大1)	西北橡胶工业制品研究所
15	真空橡皮管	上海橡胶厂
16	丁钠	沈阳橡胶制品研究所
17	氯丁	沈阳橡胶制品研究所
18	丁基 301	沈阳橡胶制品研究所
19	天然橡胶 + 海布隆	沈阳橡胶制品研究所

注: 出气温度为 20℃ ~ 25℃, 测试前在 20% NaOH 蒸馏水中煮洗, 在 45% 相对湿度下预置 3d 以上。实际使用环境中湿度如不同, 应把查得的出气速率乘以湿度校正系数 ($\eta = \frac{\text{实际湿度}}{45\%}$)

图 14-14 国产橡胶的出气速率



图线号	橡 胶 名 称	产 地
1	开尔—氟橡胶, 65G-5, 氟 5 型	上海橡胶工业制品所
2	开尔—氟橡胶, 65G-5, 氟 3 型	上海橡胶工业制品所
	氟橡胶, Fz-16 型	西北橡胶工业制品所
3	开尔—氟橡胶, 65G-5, 氟 3 型	上海橡胶工业制品所
4	开尔—氟橡胶, 65G-5, 氟 4 型	上海橡胶工业制品所
5	开尔—氟橡胶, 65G-5, 氟 6 型	上海橡胶工业制品所
	维通氟橡胶	上海橡胶工业制品所
	氟橡胶, F26-41 型	上海橡胶工业制品所
6	氟橡胶, 81512×40 型	西北橡胶工业制品所
7	氟橡胶, 81501×40 型	西北橡胶工业制品所
8	维通 26, 超 26-01-1 型	辽宁铁岭橡胶研究所
9	氟 23, 超 23-03 型	辽宁铁岭橡胶研究所
10	氟 23, 超 K-5501 型	辽宁铁岭橡胶研究所
	维通 26, 超 26-04 型	辽宁铁岭橡胶研究所
11	氟橡胶, 81506 型	西北橡胶工业制品所
	再生氟橡胶, 81506 型再生 82	西北橡胶工业制品所

注: 测试前, 先后在 20% NaOH 蒸馏水中煮洗, 45% 湿度下放置 3d 以上, 出气温度 20℃ ~ 25℃。实际使用中环境湿度如不同, 应把查得的出气速率乘以湿度校正系数

$$\eta = \frac{\text{实际湿度}}{45\%}$$

①用乙醚擦洗过

图 14-15 国产氟橡胶的出气速率

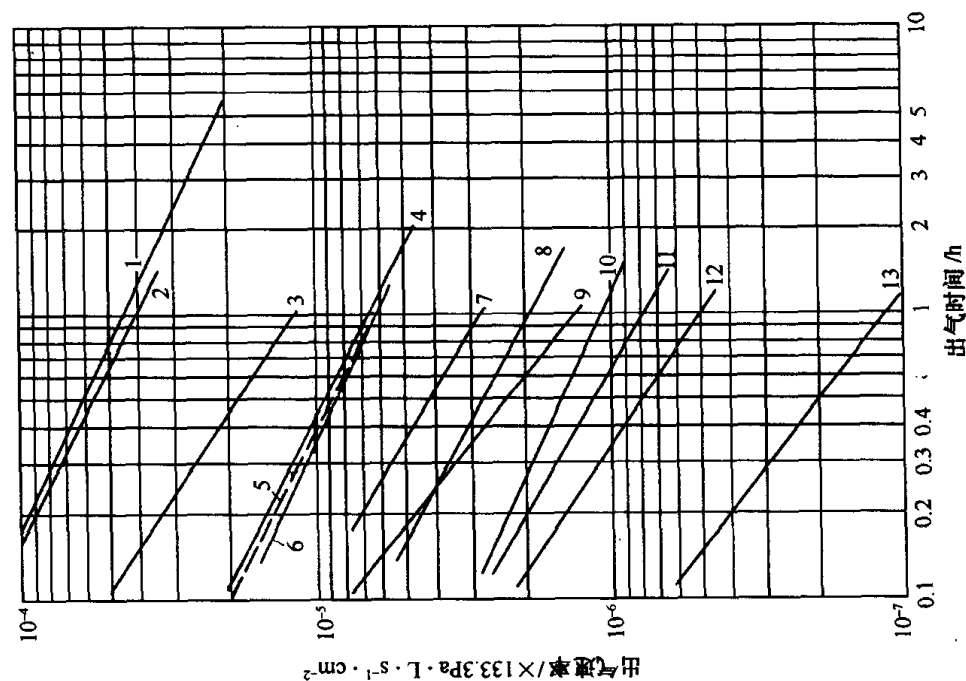


图 14-16 国产塑料的出气速率

1—赛璐珞; 2—酚醛胶布板; 3—胶木 (AT-4); 砂纸打磨; 4—有机玻璃; 5—聚酞亚胺, 砂纸打磨;
6—软聚氯乙烯; 7—聚碳酸酯, 砂纸打磨; 8—聚苯乙烯; 9—特氟隆 TFP (FS-46); 10—硬聚氯乙烯, 砂纸
打磨; 11—聚四氟乙烯; 12—特氟隆 TFE (聚四氟乙烯); 13—硬聚氯乙烯, 砂纸打磨, 硬聚四氟乙烯, 砂纸打磨;
试样在 45% 湿度下放置 3d 以上, 出气温度为 25°C。实际使用中环境湿度如不同, 应把查得的出气速率
乘以湿度校正系数

$$\eta = \frac{\text{实际湿度}}{45\%}$$

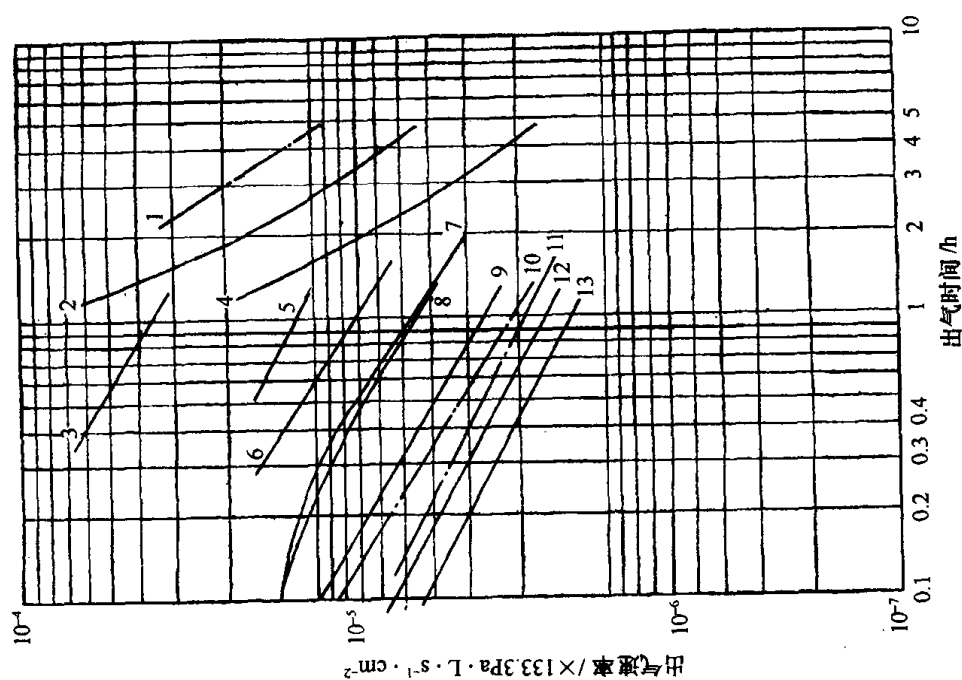
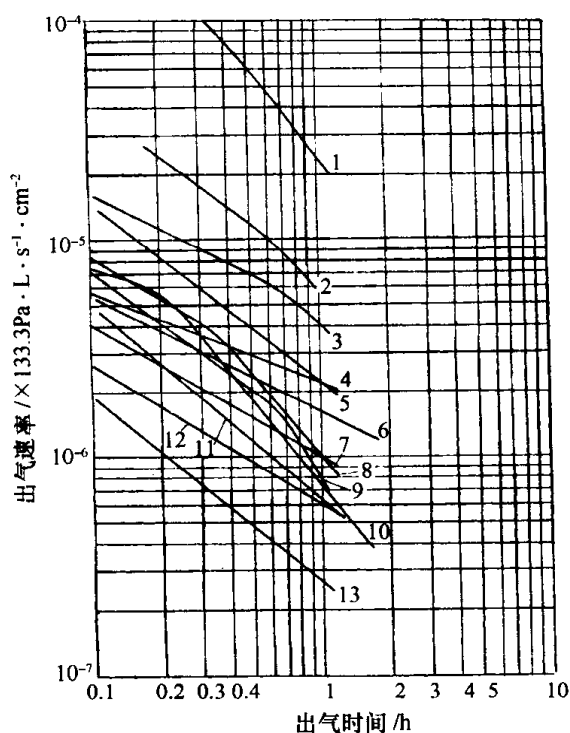


图 14-17 国产玻璃钢的出气速率

1—PBX; 2—PBT; 3—701Ph; 4—PI; 5—咪唑 Ph; 6—BPF;
7—6911; 8—7101-650; 9—648-650; 10—252-650;
11—618-650; 12—648+Na; 13—634-616。

试样在 45% 湿度下放置 3d 以上, 出气温度为 25°C。实际使用中环境湿度如不同, 应把所查得的出气速率乘以湿度校正系数

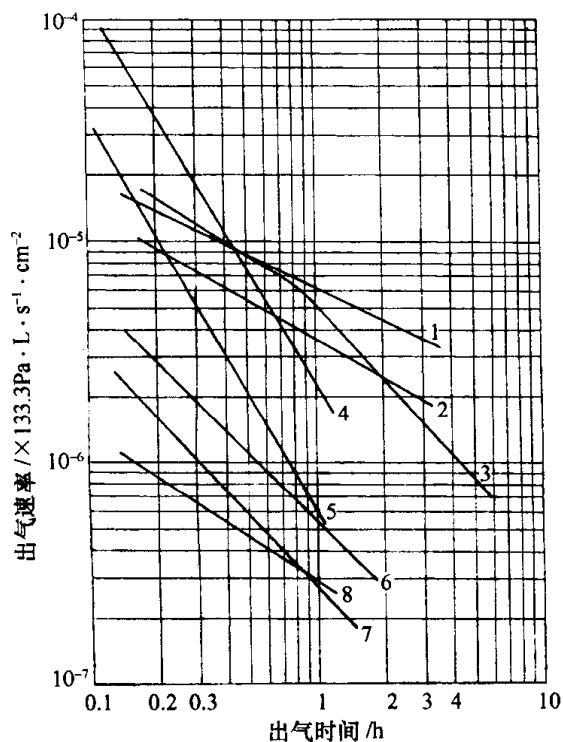
$$\eta = \frac{\text{实际湿度}}{45\%}$$



图线号	涂 料 名	产 地
1	硅酸钠,氧化锌混合涂料	
2	醇酸磁漆	
3	防锈漆:9063(2)-75-2,158,521	上海有机化学研究所
4	防锈漆:9063(2)-24-2,0077,49,F24-14	上海有机化学研究所
5	防锈漆:9063(2)-26-2,504,189	上海有机化学研究所
6	防锈漆:9063(2)-21-3,0016,159,556,F650	上海有机化学研究所
7	防锈漆:9063(2)-21-3,0047,003,F650	上海有机化学研究所
8	防锈漆:9063(2)-24-1,515,113,F246	上海有机化学研究所
9	防锈漆:9063(2)-24-1,554,0085,F246	上海有机化学研究所
10	防锈漆:9063(2)-27-2,169,568,F26	上海有机化学研究所
11	防锈漆:9063(2)-27-2,538,162,F26	上海有机化学研究所
12	防锈漆:9063(2)-56,F26(2),20%铝粉漆	上海有机化学研究所
	防锈漆:9060-56,F246(4),20%铝粉漆	上海有机化学研究所
13	防锈漆:9060-56,F650(1),20%铝粉漆	上海有机化学研究所

注:试样在45%湿度下放置三天以上,出气温度20℃。实际使用环境湿度如不同,应把查得的出气速率乘以系数 $\left(\frac{\text{实际湿度}}{45\%}\right)$ 。
某些曲线尾部下弯,是因为出气达到了扩散作用的“转折时间”,外推使用时,应按转折以前的直线部分外推为更可靠

图 14-18 国产涂料的出气速率



曲线	材 料 名	生 产 厂 家
1	环氧树脂	
2	环氧树脂,E-3 聚丁二烯环氧	
3	真空玻璃活门用的硅油膏	
4	304 润滑脂	兰州化学物理所
5	KK-3 低温航空润滑油	兰州化学物理所
6	固体润滑剂(含二硫化钼、石墨的聚四氟乙烯),1号	
7	固体润滑剂(含二硫化钼、石墨的聚四氟乙烯),2号	
8	固体润滑剂(含二硫化钼的聚四氟乙烯)	

注:试样出气温度20℃~25℃

图 14-19 国产润滑剂、粘结剂和油脂类的出气速率

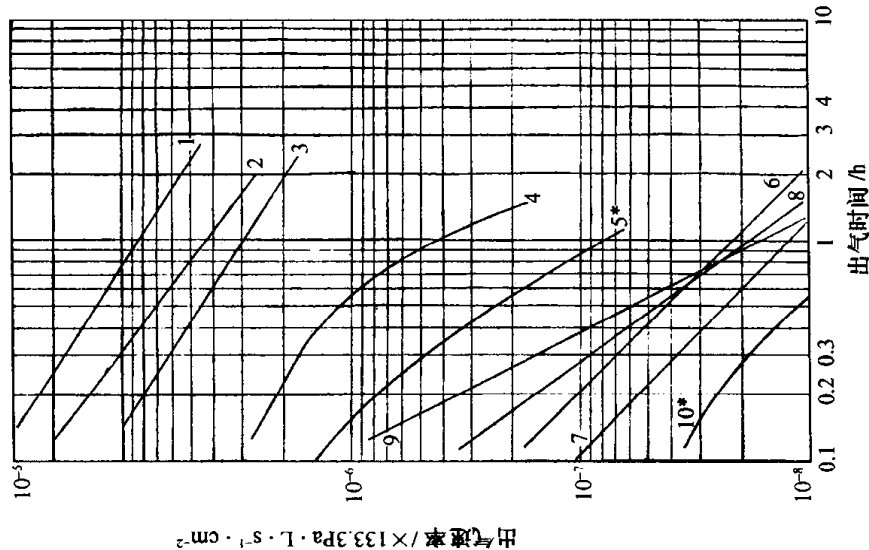


图 14-20 国产纤维、薄膜等材料的出气速率

- 1—天然橡胶 + 海布隆 + 尼龙布; 2—氯丁橡胶 + 尼龙布; 3—丁基橡胶 + 尼龙布;
4—白云母(厚 20 μ m); 5—天然丝; 6—无碱玻璃纤维布(未处理);
7—无碱玻璃纤维布(丙酮中浸泡三小时); 8—镀铝聚酯薄膜(丙酮擦洗);
9—镀铝聚酯薄膜(未处理); 10—玻璃纤维。

试样在 45% 湿度下放置三天以上, 出气温度为 20 $^{\circ}$ C ~ 25 $^{\circ}$ C。其中天然丝和玻璃纤维以单位长度的出气速率计。实际使用环境湿度如不同, 应把查得的出气速率乘以系数 $\left(\frac{\text{实际湿度}}{45\%}\right)$ 。

某些曲线尾部下弯, 是因为出气达到了扩散作用的“转折时间”, 外推时, 应按转折前的直线部分外推更为可靠。

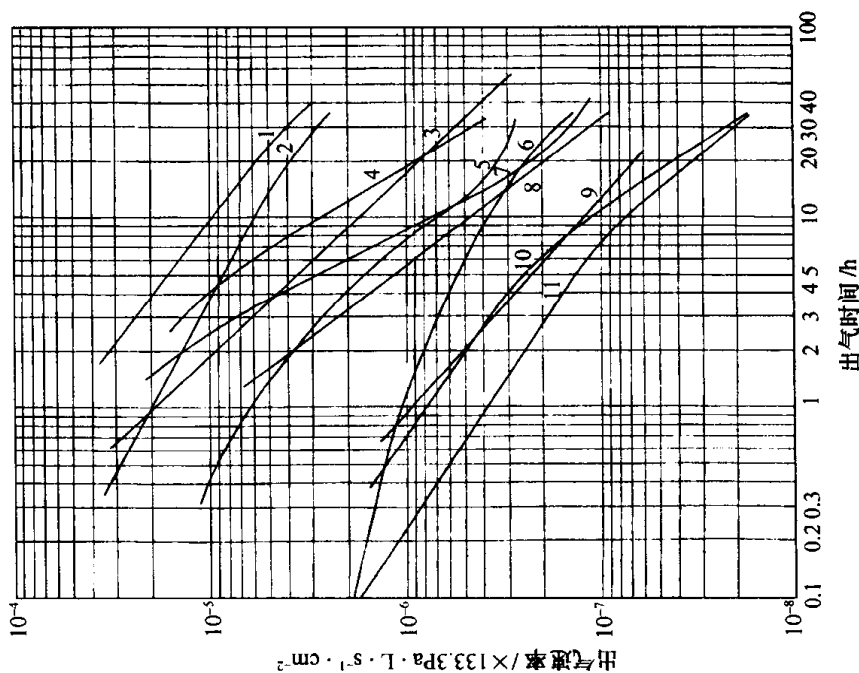


图 14-21 国产有机材料 55 $^{\circ}$ C 下的出气速率

- 1—酚醛; 2—聚酞亚胺; 3—环氧树脂 + 650 聚酞胺; 4—邻苯二甲酸二丙烯酯;
5—聚氯乙稀; 6—聚乙稀[原子核辐照改性(一)]; 7—苯基硅橡胶;
8—聚苯撑氧(PPO); 9—聚乙稀[原子核辐照改性(二)];
10—氟塑料(FS-40); 11—聚四氯乙稀(TFE)。

试样在 45% 湿度下放置三天以上, 出气温度为 55 $^{\circ}$ C。实际使用环境湿度如不同, 应把查得的出气速率乘以系数 $\left(\frac{\text{实际湿度}}{45\%}\right)$ 。

某些曲线尾部下弯, 是因为出气达到了扩散作用的“转折时间”, 外推使用时, 应按转折以前的直线部分外推更为可靠。其中, 有两条曲线下弯后再度上弯, 是因为材料出气除一种主要成分外尚有其它成分。外推使用时, 应按上弯线外推。

表 14-14 铜的常温出气速率

类 别	处 理	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$			
		1h	5h	10h	25h
普通紫铜	未处理	3.9×10^{-8}	—	4.1×10^{-9}	1.7×10^{-9}
	未处理	—	4.9×10^{-8}	—	—
	450℃烘烤	1.6×10^{-6}	—	—	—
	去脂,450℃烘烤	1.4×10^{-6}	—	—	—
	去脂,酸洗,450℃烘烤	2.6×10^{-7}	—	—	—
	用苯和丙酮洗	—	7.8×10^{-9}	—	—
	腐蚀,用苯和丙酮洗	—	6.3×10^{-10}	—	—
	机械抛光	3.5×10^{-9}	—	3.5×10^{-10}	1.4×10^{-10}
无氧铜	未处理	1.85×10^{-8}	—	1.2×10^{-9}	4.1×10^{-10}
	机械抛光	1.9×10^{-9}	—	1.6×10^{-10}	6.0×10^{-11}
紫铜(M1) 0.5mm 板	未处理	2.8×10^{-8}	—	2.0×10^{-9}	—
	漂洗	7.5×10^{-9}	—	4.8×10^{-10}	—
	亮蚀	3.7×10^{-9}	—	2.3×10^{-10}	—
紫铜(M1)管	漂洗	4.5×10^{-8}	—	3.9×10^{-9}	—
	车制	4.8×10^{-9}	—	3.0×10^{-10}	—
紫铜(M1)	超声波洗,395℃烘 10h	$7.4\times 10^{-12}\text{①}$	—	—	—
	腐蚀,375℃烘 7h	$7.0\times 10^{-13}\text{①}$	—	—	—
	腐蚀,480℃烘 5h	$4.0\times 10^{-14}\text{①}$	—	—	—
	腐蚀,175℃烘 7h	$6.8\times 10^{-12}\text{①}$	—	—	—
	机加工,400℃烘 7h	$8.0\times 10^{-14}\text{①}$	—	—	—
	机加工,200℃烘 7h	$3.5\times 10^{-11}\text{①}$	—	—	—
黄铜		1.5×10^{-8}	—	—	—
铸黄铜		1×10^{-6}	—	1.1×10^{-7}	—
黄铜波导管截面		4×10^{-7}	—	1×10^{-8}	—
黄铜	未处理	—	9.1×10^{-8}	—	—
黄铜	用苯和丙酮洗	—	6.8×10^{-8}	—	—
黄铜	腐蚀,用苯和丙酮洗	—	1.2×10^{-9}	—	—

注:①是由高温外推到室温的数据

(5)有机材料的常温出气速率

常用有机材料,如橡胶、塑料、合成纤维,它们的常温出气数据分别列于表 14-19、表 14-20。表中同种材料的不同数据系由不同作者所测。

3. 常温下材料中各种气体的出气速率

对真空系统设计来说,仅有出气速率的数据往往是不够的,因为有许多真空泵的抽气能力是具有选择性的。所以,如果能进一步知道出气中的各种气体的比例,就能有针对性地选配合适的泵种。表 14-21 汇集了不同牌号的不锈钢的常温出气组分。白云母常温出气分压见表 14-22,维顿 A、玻璃钢常温出气质谱分别见表 14-23、图 14-22。常温下塑料的各种气体的出气速率如图 14-23 所示。

一、材料的真空性能

表 14-15 铝的常温出气速率

类别	处 理	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$					
		1h	4h	5h	10h	24h	25h
纯 铝	—	1.8×10^{-7}	—	—	2.2×10^{-8}	—	7×10^{-9}
	未处理	6.1×10^{-9}	—	—	3.3×10^{-10}	—	2.6×10^{-10}
	新鲜的	6.2×10^{-9}	—	—	5.9×10^{-10}	—	2.3×10^{-10}
99% 铝	光滑的	—	—	6.8×10^{-10}	—	1.5×10^{-10}	—
纯铝	—	—	—	—	2.5×10^{-9}	—	—
	轧光,清洗	—	2.2×10^{-8}	—	7.5×10^{-9}	—	—
	溶剂处理	—	—	—	8×10^{-9}	—	—
	阳极氧化	—	3.6×10^{-7}	—	1.1×10^{-7}	—	—
	去气 24h	4.1×10^{-9}	—	—	3.0×10^{-10}	—	1.6×10^{-10}
	200℃ 烘烤	—	—	—	4.5×10^{-9}	—	—
	200℃ 烘 13.5h	—	—	—	3.7×10^{-10}	—	—
	300℃ 烘烤	—	—	—	1.4×10^{-8}	—	—
	300℃ 烘 15h	—	—	—	1.6×10^{-10}	—	—
1100 铝	洗涤剂清洗,丙酮冲洗,真空中 250℃ 烘 15h	—	—	—	—	4×10^{-13}	—
99% 铝	光滑,400℃ 烘 16h	2×10^{-14}	—	—	—	—	—
杜拉铝	—	1.7×10^{-7}	—	—	3.5×10^{-8}	—	—
	未处理	—	—	1.4×10^{-7}	—	—	—
	用苯和丙酮洗	—	—	1.1×10^{-7}	—	—	—
	腐蚀,用苯和丙酮洗	—	—	3.0×10^{-9}	—	—	—
铝合金	1.5mm 厚板,未处理轧制,化学抛光	7×10^{-9}	—	—	7.7×10^{-10}	—	—
	轧制,研磨,化学抛光	4.3×10^{-9}	—	—	3.4×10^{-10}	—	—
	轧制,研磨,化学抛光	4.3×10^{-9}	—	—	3.4×10^{-10}	—	—

表 14-16 其它金属的常温出气速率

金 属	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$			
	1h	4h	10h	25h
银	6×10^{-7}	—	—	—
	8×10^{-9}	—	—	—
金	1.56×10^{-7}	—	5.4×10^{-10}	2.1×10^{-10}
铂	5.1×10^{-9}	—	3.6×10^{-10}	1.5×10^{-10}
	7×10^{-7}	1.7×10^{-7}	—	—
镍	6×10^{-7}	1.5×10^{-7}	—	—
钽	9×10^{-7}	—	—	—
钛	1.1×10^{-8}	—	1.8×10^{-9}	5.1×10^{-10}
	3.9×10^{-9}	—	3.6×10^{-10}	1.2×10^{-10}
钨	2×10^{-7}	—	—	—
	3×10^{-9}	—	—	—
锆	1.3×10^{-6}	—	—	—
	6×10^{-9}	—	—	—

表 14-17 耐火材料的常温出气速率

成 分/%										出气速率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$			材料能耐 最高工作 温度/ $^{\circ}\text{C}$
Al_2O_3	SiO_2	SiO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	C	Si	N_2	1h	4h	20h	
96.5	2.5	—	—	—	0.7	—	—	—	—	5×10^{-7}	1.2×10^{-7}	8×10^{-8}	1690
88	9	—	—	—	—	2.6	—	—	—	4×10^{-7}	9×10^{-8}	5×10^{-8}	1650
82.3	15.4	—	—	—	—	—	—	—	—	1.8×10^{-6}	7×10^{-7}	2×10^{-7}	1760
73	25.1	—	—	—	—	1	—	—	—	5.5×10^{-7}	2×10^{-7}	6×10^{-8}	1650
72.5	24.3	—	0.7	0.7	—	—	—	—	—	8×10^{-7}	2×10^{-7}	6×10^{-8}	1880
64.8	30.5	—	—	1.33	—	—	—	—	—	9×10^{-7}	2×10^{-7}	7×10^{-8}	1600
62	34	—	0.8	—	—	2.3	—	—	—	4.8×10^{-7}	1.2×10^{-7}	3×10^{-8}	1810
61	36.3	—	—	—	—	1.6	—	—	—	5.5×10^{-7}	2×10^{-7}	6×10^{-8}	1540
57.6	40	—	1	1	—	—	—	—	—	5.2×10^{-7}	1.5×10^{-7}	8×10^{-8}	1600
47.3	52.6	—	1.1	—	—	—	—	—	—	6.8×10^{-7}	1.5×10^{-7}	6×10^{-8}	1540
47	49.6	—	—	—	—	1.6	—	—	—	5.5×10^{-7}	2×10^{-7}	6×10^{-8}	1425
42	55	—	—	—	—	—	—	—	—	4.2×10^{-7}	3×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1350
39.4	56.5	—	1	—	—	—	—	—	—	4.4×10^{-7}	1.3×10^{-7}	5×10^{-8}	1430
38.5	54.1	—	2.8	—	—	1.2	—	—	—	5.2×10^{-7}	2×10^{-7}	8×10^{-8}	1260
38.3	56.2	—	2.3	—	—	1.3	—	—	—	2×10^{-6}	1×10^{-7}	2.5×10^{-8}	1710
37.6	53.2	—	3.8	—	—	1.6	—	—	—	4.1×10^{-7}	1.8×10^{-7}	4×10^{-8}	1260
15	—	12	2	—	—	—	35	35	—	8.8×10^{-6}	1.5×10^{-6}	5×10^{-7}	1300
2	—	40	4.75	—	—	—	35	10	—	1.3×10^{-5}	3×10^{-6}	10^{-6}	1550
0.64	—	79.15	0.66	—	—	—	—	—	7	8×10^{-7}	4×10^{-7}	1×10^{-7}	1750

表 14-18 各种无机材料的常温出气速率

材 料	成分及处理	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$				
		1h	4h	10h	20h	25h
陶瓷	上釉	6.5×10^{-7}	3.0×10^{-7}	—	—	—
陶瓷(烧结白刚玉)	99.9% Al_2O_3	1.2×10^{-5}	7×10^{-7}	—	2.5×10^{-7}	—
陶瓷	97.5% Al_2O_3	2×10^{-6}	4.5×10^{-7}	—	2×10^{-7}	—
陶瓷(烧结氧化铝车刀)	95% Al_2O_3	1.0×10^{-6}	2.5×10^{-7}	—	8×10^{-8}	—
陶瓷板	45.1% Al_2O_3 , 51.9% SiO_2 , 1.3% Fe_2O_3 , 1.7% TiO_2	1.1~ 7.2×10^{-6}	$4\sim 10\times 10^{-7}$	—	$4\sim 20\times 10^{-8}$	—
陶瓷板	50.9% Al_2O_3 , 46.8% SiO_2 , 1.2% B_2O_3 , 0.08% Na_2O	2.9~ 53×10^{-7}	6~ 200×10^{-8}	—	$2\sim 10\times 10^{-8}$	—
陶瓷	400℃ 烘 24h	$10^{-4}\sim 10^{-15}$	—	—	—	—
叶蜡石	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$	1.9×10^{-7}	4.5×10^{-8}	—	—	—
叶蜡石矿	未焙烧	5.5×10^{-5}	8×10^{-6}	—	1.25×10^{-6}	—
叶蜡石	焙烧	1.5×10^{-6}	5.4×10^{-7}	—	2.1×10^{-7}	—
富铝红柱石	62.9% Al_2O_3 , 37.1% SiO_2	6.2×10^{-7}	1.4×10^{-7}	—	8×10^{-8}	—
托 凡 克 斯 ($\text{MR}_2\text{B}_{10}\text{N}$)	96% α 矾, 3% 镁铝石, 1% 富铝红柱石	8.3×10^{-7}	1.5×10^{-7}	—	6×10^{-8}	—
块滑石		9×10^{-8}	2.4×10^{-8}	—	—	—
多孔石英		5.4×10^{-7}	1.5×10^{-7}	—	5.2×10^{-8}	—
派列克斯玻璃		7.3×10^{-9}	—	5.4×10^{-10}	—	—
钼玻璃		6.3×10^{-9}	—	3.9×10^{-10}	—	—
玻璃带		5×10^{-5}	4.9×10^{-6}	—	2×10^{-6}	—
Si_3N_4		5×10^{-5}	5×10^{-7}	—	1.8×10^{-7}	—
硫化锌		2.2×10^{-7}	—	3.2×10^{-8}	—	1.9×10^{-8}
氧化锆	ZrO_2	1.2×10^{-6}	2.5×10^{-7}	—	5×10^{-8}	—
玻璃	400℃ 烘 24h	$10^{-14}\sim 10^{-15}$	—	—	—	—
多孔石墨	小	$2.5\sim 10\times 10^{-6}$	$5\sim 11\times 10^{-7}$	—	3×10^{-7}	—
多孔石墨	大	1.5×10^{-6}	3×10^{-7}	—	1×10^{-7}	—
石墨绒		$8.6\sim 10\times 10^{-7}$	$2\sim 3\times 10^{-7}$	—	$5\sim 9\times 10^{-8}$	—
石墨板		9.2×10^{-6}	3×10^{-6}	—	9×10^{-7}	—
石墨毡		8×10^{-7}	2×10^{-7}	—	3×10^{-8}	—
多孔碳		9×10^{-6}	1×10^{-6}	—	3×10^{-7}	—
碳绒		7×10^{-6}	1.1×10^{-6}	—	2×10^{-7}	—
碳毡		2.6×10^{-6}	3×10^{-7}	—	6×10^{-8}	—

表 14-19 橡胶的常温出气速率

材 料	处理(或测试条件)	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$						
		1h	4h	5h	9h	10h	24h	25h
天然橡胶	—	6.3×10^{-6}	—	—	1.72×10^{-6}	—	8.6×10^{-7}	—
	树胶	1.3×10^{-6}	6.5×10^{-7}	—	—	—	—	—
	白橡皮	1.15×10^{-6}	6.6×10^{-7}	—	—	—	—	—
	皱胶橡皮	7.3×10^{-6}	3.1×10^{-6}	—	—	—	—	—
丁基橡胶		2.0×10^{-6}	6×10^{-6}	—	—	—	—	—
哈卡橡胶 (Hycar)		1.4×10^{-5}	7.4×10^{-6}	—	—	—	—	—
		2.1×10^{-6}	—	—	—	1.1×10^{-6}	—	5.8×10^{-7}
氯丁橡胶	100℃下测	$3\sim 8\times 10^{-6}$	$1.5\sim 4.3\times 10^{-6}$	—	—	—	—	—
		$3\sim 8\times 10^{-6}$	—	—	$8\sim 16\times 10^{-7}$	—	$3\sim 7\times 10^{-7}$	—
		9.5×10^{-7}	—	—	—	1.04×10^{-7}	—	9.7×10^{-9}
		2×10^{-4}	—	—	—	2.6×10^{-5}	—	5.3×10^{-6}
丁腈橡胶	100℃下测	3×10^{-6}	—	—	—	9×10^{-7}	—	—
		$2\sim 9\times 10^{-6}$	$1\sim 4\times 10^{-6}$	—	—	—	—	—
		$5\sim 11\times 10^{-6}$	—	—	$6\sim 31\times 10^{-7}$	—	$2.7\sim 16\times 10^{-7}$	—
		4×10^{-5}	—	—	—	6.7×10^{-7}	—	2.3×10^{-7}
丁腈橡胶	— 再曝露大气 0.5h 再 50℃烘 4h, 曝露大气 0.5h 再 100℃烘 4h, 曝露大气 0.5h 再曝露大气 64h	—	—	—	—	1.1×10^{-6}	—	8.8×10^{-7}
		—	—	—	—	3.7×10^{-7}	—	2.8×10^{-7}
		—	—	—	—	1.3×10^{-7}	—	160×10^{-7}
		—	—	—	—	3.9×10^{-8}	—	2.6×10^{-8}
		—	—	—	—	7.2×10^{-8}	—	3.0×10^{-8}

(续)

材 料	处理(或测试条件)	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$							
		1h	4h	5h	9h	10h	24h	25h	
丁腈丁苯混胶		9.06×10^{-6}	—	—	2.48×10^{-6}	—	1.23×10^{-6}	—	
聚异氰酸橡胶		2.8×10^{-5}	1.27×10^{-5}	—	—	—	—	—	
尼贡(Nygon)		1.3×10^{-5}	6.5×10^{-6}	—	—	—	—	—	
聚丙烯酸酯		1.3×10^{-5}	—	—	3.3×10^{-6}	—	1.3×10^{-6}	—	
聚氨基 甲酸乙酯		$1.8\sim 2.6\times 10^{-5}$ 6.9×10^{-6}	— —	— —	$3.5\sim 5.2\times 10^{-6}$ —	— 3.5×10^{-6}	$1.1\sim 1.9\times 10^{-6}$ —	— 1.5×10^{-6}	
海普纶		1.8×10^{-6}	—	—	3.8×10^{-7}	—	1.9×10^{-7}	—	
硅橡胶	100℃下测	$1.2\sim 18\times 10^{-6}$ $4.4\sim 8.9\times 10^{-6}$ 1.7×10^{-5}	$3.7\sim 44\times 10^{-7}$ — —	— — —	— $3.1\sim 7.8\times 10^{-7}$ —	— — 2.2×10^{-7}	— $7.9\sim 14.9\times 10^{-8}$ —	— — 5.6×10^{-8}	
维顿(Viton)	100℃下测	3.8×10^{-7} $4.9\sim 21\times 10^{-7}$ 3.7×10^{-5}	1.8×10^{-7} — —	— — —	— $1.1\sim 4.9\times 10^{-7}$ —	— — 3.2×10^{-7}	— $5.2\sim 20\times 10^{-8}$ —	— — 6.4×10^{-8}	
维顿 A	— 真空中 170℃ 3h 200℃ 烘 24h	1.12×10^{-6} 3.92×10^{-7} 1.3×10^{-9}	— — —	— — —	— 3.02×10^{-8} —	3.02×10^{-7} — —	— 1.21×10^{-8} —	1.82×10^{-7} — —	
维顿 A	— 再曝露大气 0.5h 再 100℃ 烘 4h, 曝露大气 0.5h 再 100℃ 烘 16h, 曝露大气 0.5h 再 150℃ 烘 4h, 曝露大气 0.5h 再 200℃ 烘 16h, 曝露大气 0.5h 再曝露大气 64h	— — — — — — —	— — — — — — —	— — — — — 3.8×10^{-10} —	— — — — — — —	2.65×10^{-7} 1.8×10^{-7} 6.3×10^{-10} 3.1×10^{-10} 1.9×10^{-10} — 1.5×10^{-7}	— — — — — — —	1.5×10^{-7} 1.05×10^{-7} 4.7×10^{-10} 2.0×10^{-10} 1.3×10^{-10} — 5.5×10^{-8}	

表 14-20 塑料、合成纤维的常温出气速率

名 称	处 理	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$				
		1h	4h	10h	20h	25h
酚醛纸板	120℃烘 烤 24h	6.5×10^{-5}	2×10^{-6}	—	1.0×10^{-6}	—
酚醛布板		$1.6\sim 9\times 10^{-5}$	$3.7\sim 44\times 10^{-6}$	—	$1.9\sim 13\times 10^{-6}$	—
酚醛		5.9×10^{-6}	—	3.0×10^{-6}	—	2.0×10^{-6}
尼龙		1.2×10^{-5}	6.0×10^{-6}	—	—	—
尼龙 51		4×10^{-11}	—	—	—	—
赛璐珞		8.6×10^{-6}	4.3×10^{-6}	—	—	—
聚醋酸乙酯		5.6×10^{-6}	2.8×10^{-6}	—	—	—
聚乙烯醇缩醛		3.5×10^{-6}	2.7×10^{-6}	—	—	—
聚酰胺		2.5×10^{-6}	1.1×10^{-6}	—	—	—
		4.6×10^{-6}	2.3×10^{-6}	—	—	—
涤纶 AF-31 腈 酚胶合剂		$1.6\sim 3.4\times 10^{-6}$	$7\sim 14\times 10^{-7}$	—	—	—
		2.3×10^{-6}	—	1.2×10^{-6}	—	6×10^{-7}
阿拉地胶	增塑 未加工	1.15×10^{-6}	—	3.48×10^{-7}	—	2.12×10^{-7}
		6.13×10^{-7}	—	1.66×10^{-7}	—	1.0×10^{-7}
	100℃烘 烤 24h	4.0×10^{-7}	1.9×10^{-7}	—	—	—
		$1.5\sim 8\times 10^{-6}$	$7.2\sim 22\times 10^{-7}$	—	—	—
		10^{-10}	—	—	—	—
改性环氧布板		3.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	—	1.5×10^{-6}	—
环氧树脂		2.7×10^{-6}	1.5×10^{-6}	—	6×10^{-7}	—
		$2.5\sim 4.0\times 10^{-6}$	$8.5\sim 13\times 10^{-7}$	—	—	—
液态环氧 固态环氧		$6.8\sim 54\times 10^{-7}$	—	$1.8\sim 11\times 10^{-7}$	—	$1.0\sim 6.7\times 10^{-7}$
		7.2×10^{-7}	—	1.3×10^{-7}	—	6.5×10^{-8}
有机玻璃		1.1×10^{-6}	6.0×10^{-7}	—	—	—
		$1.9\sim 4.2\times 10^{-6}$	$1.0\sim 1.8\times 10^{-6}$	—	—	—
		7.4×10^{-7}	—	2.7×10^{-7}	—	1.7×10^{-7}
聚乙烯		2×10^{-6}	4.5×10^{-7}	—	1.5×10^{-7}	—
		1.2×10^{-7}	3.8×10^{-8}	—	—	—
		2×10^{-5}	2×10^{-6}	—	—	—
		2.6×10^{-7}	1.3×10^{-7}	—	—	—
聚乙烯吡唑		8.5×10^{-7}	5×10^{-7}	—	—	—
		1.6×10^{-6}	8.0×10^{-7}	—	—	—
聚苯乙烯		2.7×10^{-7}	1.3×10^{-7}	—	—	—
		$6\sim 15\times 10^{-7}$	$3\sim 7.5\times 10^{-7}$	—	—	—
		5.5×10^{-7}	—	1.4×10^{-7}	8.0×10^{-8}	—
聚碳酸酯 聚氯乙稀		8.1×10^{-7}	4.5×10^{-7}	—	—	—
		4.9×10^{-7}	2.8×10^{-7}	—	—	—
聚氨基甲 酸乙酯 聚三氟氯乙稀		3.5×10^{-7}	1.7×10^{-7}	—	—	—
		5×10^{-7}	2.5×10^{-7}	—	—	—
		4.0×10^{-8}	1.7×10^{-8}	—	—	—
聚四氟乙稀	100℃下测	1.3×10^{-8}	—	$3.4\times 10^{-10}(9\text{h})$	—	—
		6.3×10^{-8}	—	2.5×10^{-8}	—	2×10^{-8}
		$6\sim 20\times 10^{-8}$	$3.2\sim 7.8\times 10^{-8}$	—	—	—
		1.6×10^{-7}	—	3.3×10^{-8}	—	1.7×10^{-8}
		$3\sim 5\times 10^{-7}$	$1.2\sim 1.6\times 10^{-7}$	—	—	—
		4.9×10^{-7}	—	2.1×10^{-7}	—	1.5×10^{-7}
		$3.3\sim 8.6\times 10^{-7}$	—	$7.6\sim 20.5\times 10^{-8}(9\text{h})$	—	$3.0\sim 4.1\times 10^{-8}$
		1×10^{-6}	—	6.5×10^{-8}	—	(24h) 1×10^{-8}

表 14-21 不锈钢的各种气体组分的出气速率

牌 号	处 理	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$										合 计
		H ₂	H ₂ O	CO	N ₂	O ₂	CO ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	惰性气体		
U15C(法)	300℃ 烘烤 25h 后降 至 20℃	3.9×10^{-12}	—	1.7×10^{-14}	—	—	1.9×10^{-14}	—	—	—	3.9×10^{-12}	
304 或 304L (美)	33% HNO ₃ 、33% HF 洗涤,抽气 13h 后,升温 2h 至 150℃, 维持 10h, 然后降温 5h 至 23℃	5×10^{-12}	2.3×10^{-15}	7×10^{-14}	1.5×10^{-13}	1.4×10^{-15}	2.5×10^{-15}	3×10^{-14}	1.7×10^{-14}	—	5.3×10^{-12}	
	三氟乙烯去脂,抽气 15h 后, 升温 2.5h 至 150℃, 维持 10h, 然后降 温 5h 至 23℃	6.5×10^{-12}	6.5×10^{-16}	35×10^{-14}	5.5×10^{-14}	1.5×10^{-16}	3.5×10^{-15}	3×10^{-14}	5.5×10^{-15}	—	6.6×10^{-12}	
	2% HF 洗涤, 22℃ 下抽 气 100min	—	9.8×10^{-9}	3.2×10^{-9}	—	6.7×10^{-11}	2.5×10^{-10}	1.4×10^{-11}	7.4×10^{-13}	—	1.3×10^{-8}	
	33% HNO ₃ 、33% HF 洗 涤, 23℃ 下抽气 10min	—	1.4×10^{-9}	1.8×10^{-10}	—	3.5×10^{-12}	1.0×10^{-11}	1.1×10^{-11}	8.7×10^{-12}	—	1.6×10^{-9}	
304(美)	抽气 4h	—	1×10^{-9}	4×10^{-11}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-12}	1×10^{-11}	1×10^{-11}	1.8×10^{-11}	—	1×10^{-9}	
	DS-9 洗涤抽气 10h	—	3.2×10^{-10}	1.2×10^{-11}	1.0×10^{-12}	1.1×10^{-12}	4.4×10^{-12}	3.8×10^{-12}	5.6×10^{-12}	—	3.5×10^{-10}	
	抽气 25h	—	1.6×10^{-10}	6.2×10^{-12}	6.7×10^{-13}	1.1×10^{-12}	2.5×10^{-12}	1.5×10^{-12}	2.2×10^{-12}	—	1.7×10^{-10}	
EN58B(英)	抽气 20h	2.5×10^{-11}	8.7×10^{-11}	6×10^{-12}	—	—	9×10^{-12}	—	—	—	1.3×10^{-10}	
	氩中辉光放电 ^① , 抽气 20h	6×10^{-11}	—	—	—	—	—	—	—	1.4×10^{-10}	2.0×10^{-10}	
	氮中辉光放电 ^① , 抽气 20h	8.3×10^{-11}	—	—	—	—	—	—	—	2×10^{-12}	9×10^{-11}	
	氩中辉光放电 ^① , 抽气 20h	1.5×10^{-10}	—	—	—	—	—	—	—	3×10^{-12}	1.5×10^{-10}	

注:①容器直径 15.7cm, 长 75cm, 抽气至 10^{-5}Pa 后, 充惰性气体至 $1\text{Pa}\sim 10\text{Pa}$, 然后在容器壁及中心轴所置之电极间以 200V~600V 0.5A 辉光放电

注:①容器直径 15.7cm,长 75cm,抽气至 10^{-5}Pa 后,充惰性气体至 $1\text{Pa}\sim 10\text{Pa}$,然后在容器壁及中心轴所置之电极间以 200V~600V 0.5A 辉光放电

表 14-22 白云母常温出气分压

时间/min	分 压 力/ $\times 133.3\text{Pa}$					
	N_2	H_2	CO_2	CH_4	Ar	O_2
0	3.5×10^{-8}	5×10^{-9}	3.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}	7×10^{-10}	1.5×10^{-9}
5	1.75×10^{-8}	2.6×10^{-9}	1.8×10^{-9}	5×10^{-10}	3.6×10^{-10}	1.6×10^{-10}
15	4.1×10^{-9}	7×10^{-10}	4.3×10^{-10}	1.2×10^{-10}	1.0×10^{-10}	—

注:云母尺寸为 $80\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ 。测试时在真空中劈开

表 14-23 氟橡胶维顿 A 的常温出气质谱

相对谱峰高度 条件	质量数										总出气速率 q $/\times 133.3\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
	1	2	16	17	18	28	29	32	43	44	
室温下抽气 51h 后	3	1	2	23	100	17	1	2	4	2	1×10^{-7}
200℃ 烘烤 24h 后	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	2×10^{-9}
烘烤后暴露于大气 24h, 重新抽气 48h 后	—	—	—	8	33	2	—	—	—	1	3×10^{-8}

注:把室温下抽气 51h 后,质量数为 18 的值作为 100

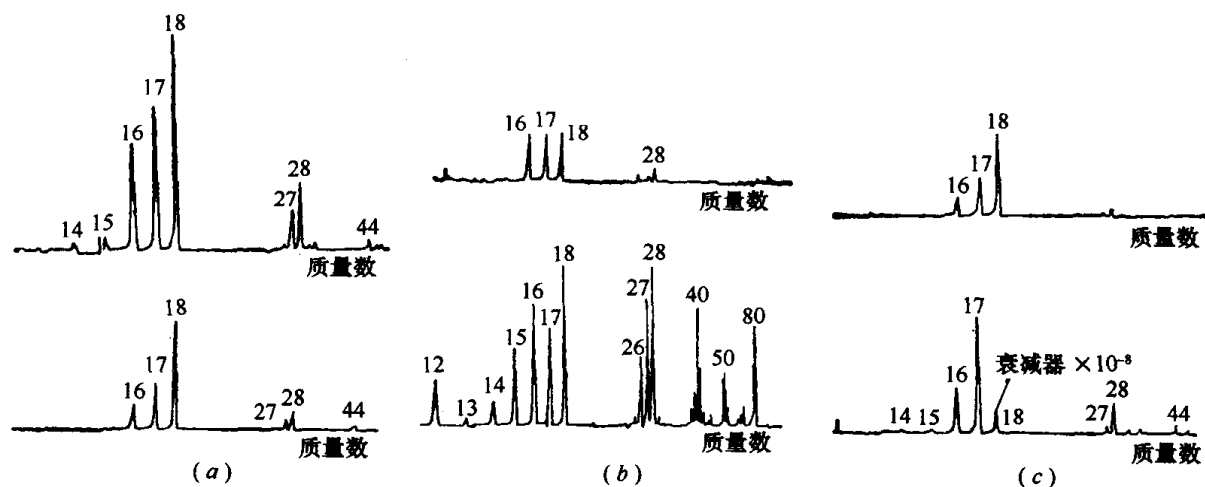


图 14-22 环氧玻璃钢的常温出气质谱

(a) 在真空中暴露 2h 以后的常温出气;

上图 分析器压力 $6.7 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 下的本底质谱图(衰减器在 10^{-10} 挡)。下图 分析器压力 $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 容器压力 $1.3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 下的质谱图(衰减器在 10^{-9} 挡)。

(b) 220℃ 时的出气;

上图 分析器压力 $9 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 下的本底质谱图(衰减器在 10^{-10} 挡)。下图 分析器压力 $1.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$, 容器压力 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 下的质谱图(衰减器在 10^{-10} 挡)。

(c) 在真空中暴露 32h 以后的常温出气。

上图 分析器压力 $1.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 下的本底质谱图(衰减器在 10^{-9} 挡)。下图 分析器压力 $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 容器压力 $1.3 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 下的质谱图(衰减器在 10^{-9} 挡)。

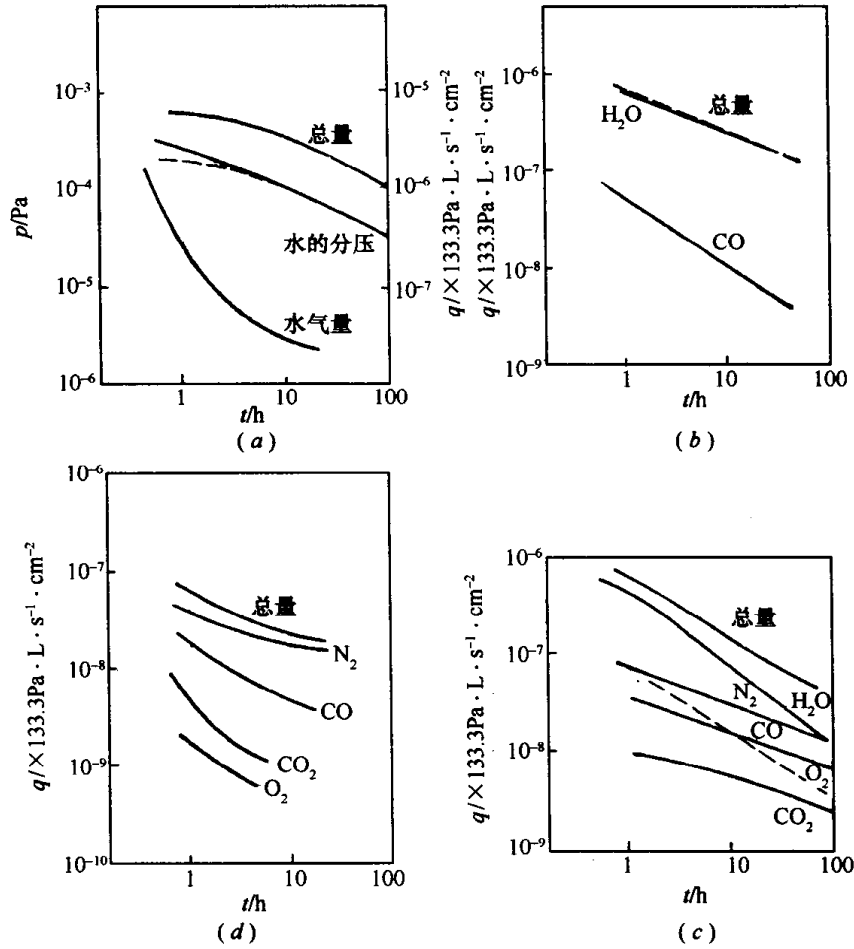


图 14-23 常温下塑料出气的组分

(a) 酚醛塑料中水气的出气分压；

(b) 有机玻璃中水气及一氧化碳的出气速率随时间变化曲线；

(c) 聚苯乙烯中水气、氮、一氧化碳、氧、二氧化碳的出气速率随时间变化曲线；

(d) 聚四氟乙烯中氮、一氧化碳、二氧化碳、氧的出气速率随时间变化曲线。

4. 高温下材料的出气速率及组分

为了获得较高的真空度,通常采用升温烘烤的方法来降低材料的出气速率。

(1) 国产材料的高温出气速率

Cr16Ni14Mn2 不锈钢片在不同温度下的出气如图 14-24 所示,不同预处理后镍片在 900℃ 下的高温出气比较如图 14-25 所示,不锈钢氧化处理后并经过不同存放时间后的 900℃ 高温出气如图 14-26 所示,不同厚度的材料在 900℃ 时的出气如图 14-27 所示,较厚材料在 900℃、700℃ 时的高温出气如图 14-28 所示,以及材料经手摸前、后的高温出气如图 14-29 所示。

(2) 钢、铁的高温出气速率

钢和铜在烘烤过程中的出气速率变化如图 14-30 所示,在升温 and 冷却过程中,U15C 不锈钢的出气组分见表 14-24,1Cr18Ni9Ti 不锈钢出气速率及组分见表 14-25,钢和铜在烘烤过程的出气速率如图 14-30 所示,304 和 304L 不锈钢(经过各种清洗)的出气组分及速率如图 14-31~图 14-33 所示,EN58B、EN58G、EN60 不锈钢的出气组分及速率如图 14-34 所示,18/8/1 不锈钢的出气组分及出气速率如图 14-35 所示,V2A 不锈钢 1000℃ 烘烤过程、全压、分压的变化如图 14-36 所示,1880ST、1880SST、1880SW 不锈钢(经过不同预处理)的出气(全压)如图 14-37 所示,覆铝铁皮的出气(全压和分压)随温度的变化曲线如图 14-38 所示。

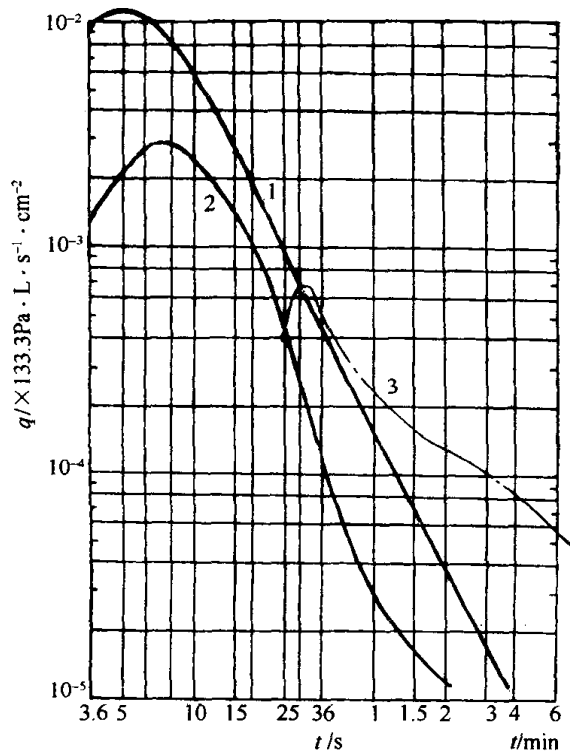


图 14-24 Cr16Ni14Mn2 不锈钢片(厚 0.09mm)
不同温度下的出气
1—900℃; 2—700℃; 3—500℃。

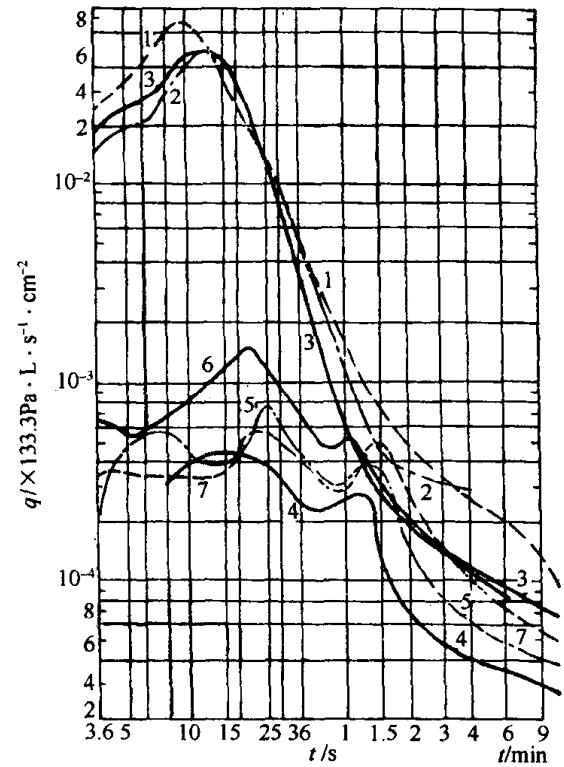


图 14-25 不同预处理后镍片(厚 0.28mm)在 900℃
下高温出气之比较
1—未处理; 2—烧氢后手摸; 3—900℃真空热除气后手摸;
4—烧氢后存放 22h; 5—烧氢后存放 24h;
6—烧氢后存放 3d; 7—烧氢后存放 13d。

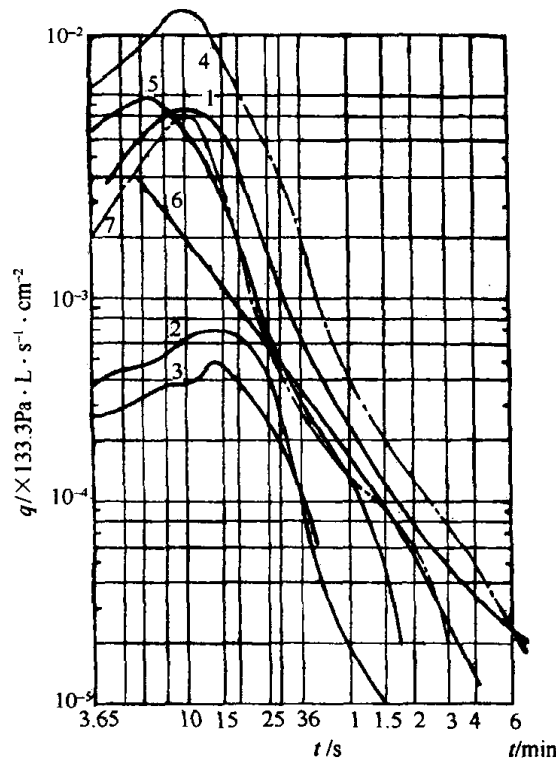


图 14-26 不锈钢氧化处理后并经过不同存放时间后的 900℃ 高温出气
1~4—Cr16Ni14Mn2 片(厚 0.28mm);
1—未处理; 2—存放 3.5d; 3—存放 7d; 4—存放 0.5d 后手摸;
5~7—1Cr18Ni9Ti 片(厚 0.21mm); 5—未处理; 6—存放 16h; 7—存放 13d。

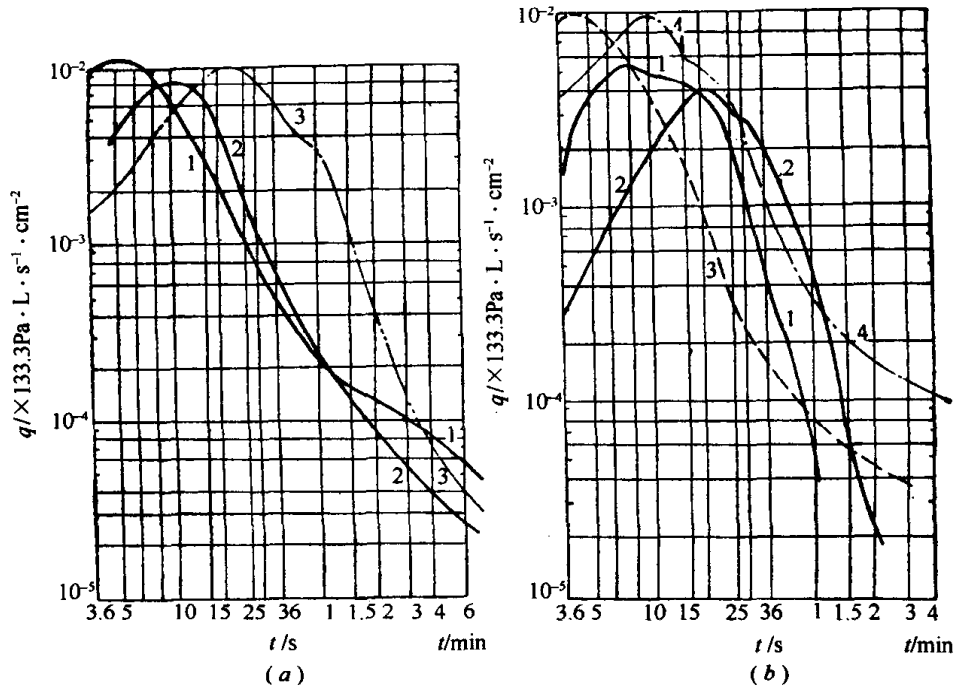


图 14-27 不同厚度的材料在 900℃ 时的出气

(a) Cr16Ni14Mn2 不锈钢片 1—厚 0.09mm; 2—厚 0.28mm; 3—厚 0.75mm。

(b) 钼和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢片 1—钼 Mo1, 厚 0.13mm;

2—钼 Mo1, 厚 0.31mm; 3—1Cr18Ni9, 厚 0.08mm; 4—1Cr18Ni9, 厚 0.28mm。

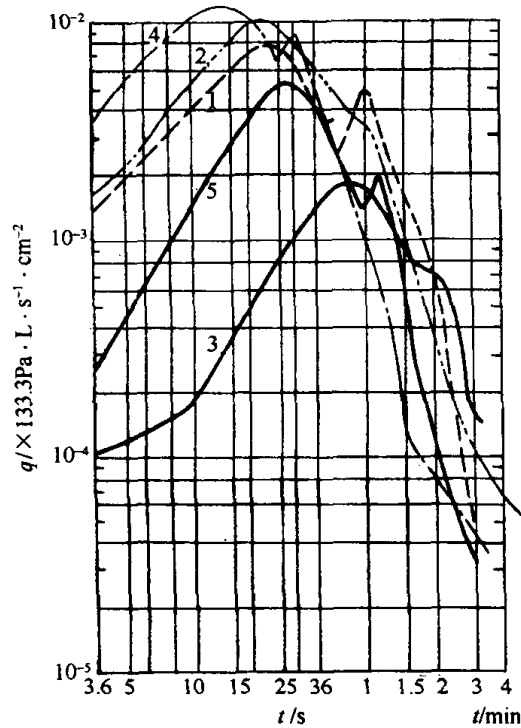


图 14-28 较厚的材料的高温出气

1—DTSA 纯铁, 厚 0.8mm, 900℃; 2—Cr16Ni14Mn2, 厚 0.75mm, 900℃;

3—Cr16Ni14Mn2, 厚 0.75mm, 700℃; 4—1Cr18Ni9, 厚 0.5mm, 900℃; 5—1Cr18Ni9, 厚 0.5mm, 700℃。

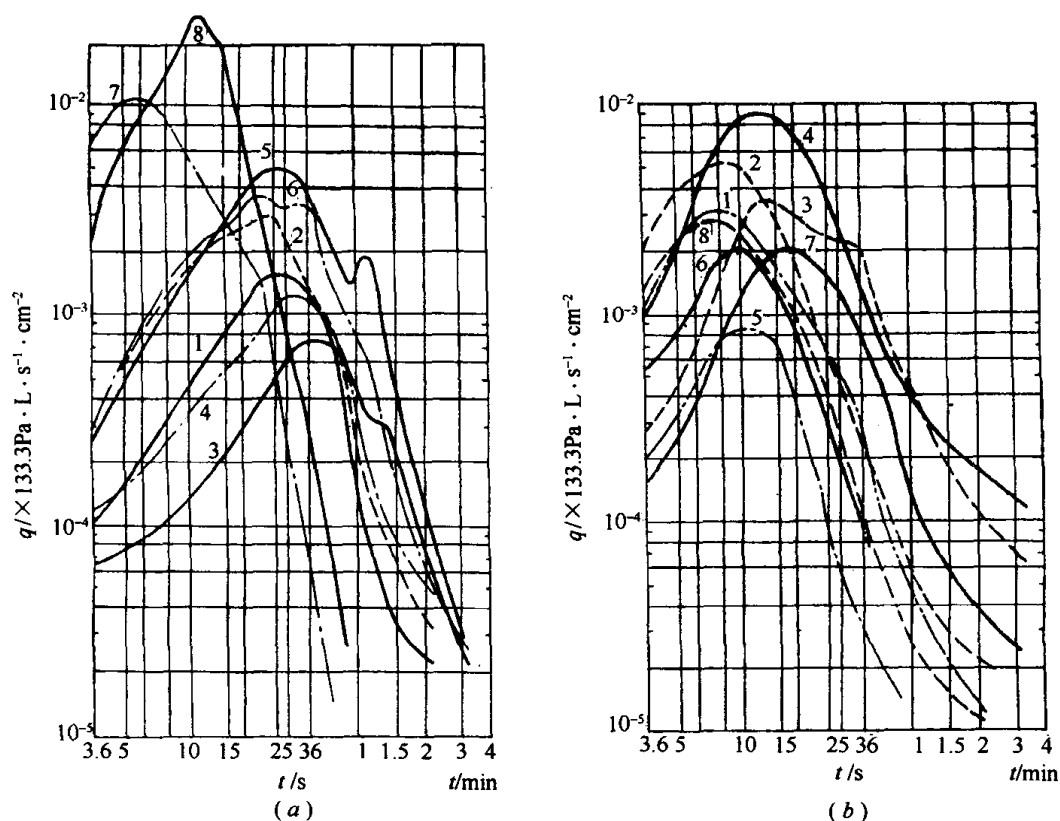


图 14-29 材料经手摸前、后的高温出气

(a) 1—Cr16Ni14Mn2(厚 0.28mm), 700℃; 2—经“1”后手摸再测; 3—钼 Mo1(厚 0.31mm), 700℃; 4—经“3”后手摸再测; 5—1Cr18Ni9(厚 0.5mm), 700℃; 6—经“5”后手摸再测; 7—1Cr18Ni9Ti(厚 0.13mm), 900℃; 8—经“7”后手摸再测。(b) 1—Cr16Ni14Mn2(厚 0.09mm), 700℃; 2—经“1”后手摸再测; 3—无氧铜 Tu1(厚 0.10mm), 700℃; 4—经“3”后手摸再测; 5—钽 Ta3(厚 0.11mm), 700℃; 6—经“5”后手摸再测; 7—钼 Mo1(厚 0.13mm), 700℃; 8—经“7”后手摸再测。

表 14-24 U15C 不锈钢容器(壁厚 2mm)烘烤过程中的出气速率

 (单位: $133.3\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

预烘过程	冷却后再升温 ℃	H ₂	H ₂ O	CO + N ₂	O ₂	CO ₂
已经在 300℃ 下烘烤 过 25h	20	3.9×10^{-12}	—	1.7×10^{-14}	—	1.9×10^{-14}
	40	1.3×10^{-11}	—	—	—	—
	100	2.1×10^{-10}	1.3×10^{-13}	4.7×10^{-13}	1.8×10^{-12}	1.7×10^{-12}
300℃ 再烘烤 25h 后	20	3.0×10^{-12}	—	—	—	1.7×10^{-14}
	35	5.6×10^{-12}	—	—	—	2.5×10^{-14}
	53	1.6×10^{-12}	—	—	—	3.3×10^{-14}
	75	4.4×10^{-11}	4.6×10^{-14}	—	—	5.8×10^{-14}
300℃ 再烘烤 25h 后	20	1.5×10^{-12}	—	—	—	—
	47	5.3×10^{-12}	—	—	—	1.7×10^{-15}
	72	1.5×10^{-11}	—	2.8×10^{-14}	—	5.4×10^{-15}
	105	3.9×10^{-11}	—	6.3×10^{-14}	—	8.7×10^{-15}
300℃ 再烘烤 25h 后	145	9.2×10^{-11}	3.1×10^{-13}	1.4×10^{-13}	—	1.0×10^{-14}
	200	2.5×10^{-10}	6.1×10^{-13}	2.6×10^{-13}	—	3.6×10^{-14}
	20	1.2×10^{-12}	—	4.3×10^{-15}	—	—

表 14-25 1Cr18Ni9Ti 不锈钢烘烤过程中的出气速率及组分

预处理	烘烤程序	温度 /℃	出气速率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	气体组分/%					
				H ₂	H ₂ O	N ₂ , CO	CH ₄	C _n H _m	CO ₂
机械加工	开始升温 1h 后	180	2.5×10^{-7}	94	4	2	—	—	—
	7h 烘烤后	380	2.1×10^{-7}	99	0.5	0.5	—	—	—
	开始降温 1h 后	270	6.2×10^{-9}	90	2	3	1	2	2
电抛光	开始升温 1h 后	290	2.6×10^{-6}	75	10	3	1	7.5	3.5
	7h 烘烤后	430	3.8×10^{-8}	89	1	2	1	5	2
	开始降温 1h 后	270	5.9×10^{-9}	86	1	2	1	7	3

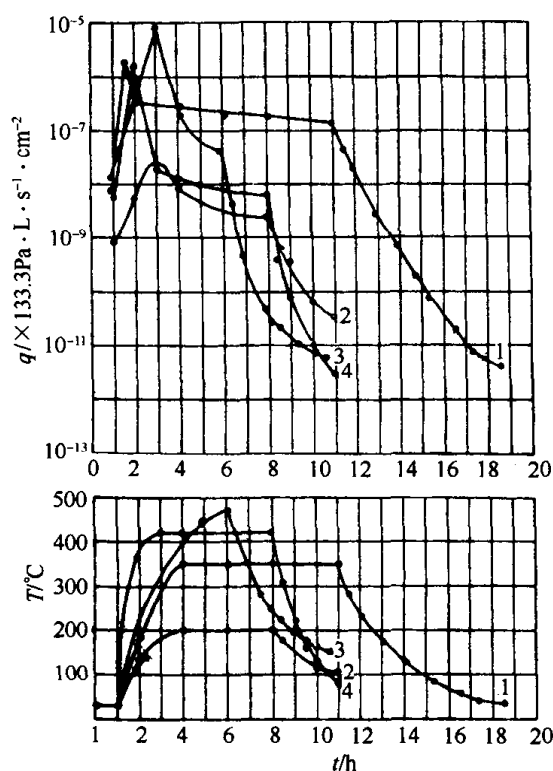


图 14-30 钢和铜在烘烤过程中的出气速率变化

1—1Cr18Ni9Ti; 机械加工; 2—1Cr18Ni9Ti, 电抛光; 3—铜 M1, 腐蚀; 4—20 钢, 机械加工。

(3) 其它金属的高温出气

无氧铜(经过各种预处理)的各种气体的高温出气如图 14-39 所示;铜烘烤过程出气速率的变化如图 14-30 所示;铜箔的高温出气速率及气体组分见表 14-26。

铝的高温出气情况如图 14-40 所示。铝箔的高温出气速率及气体组分见表 14-26。

镍(经过各种预处理后)的高温出气(全压和分压)如图 14-41 所示。镍箔和钽箔的高温出气速率及气体组分见表 14-26。

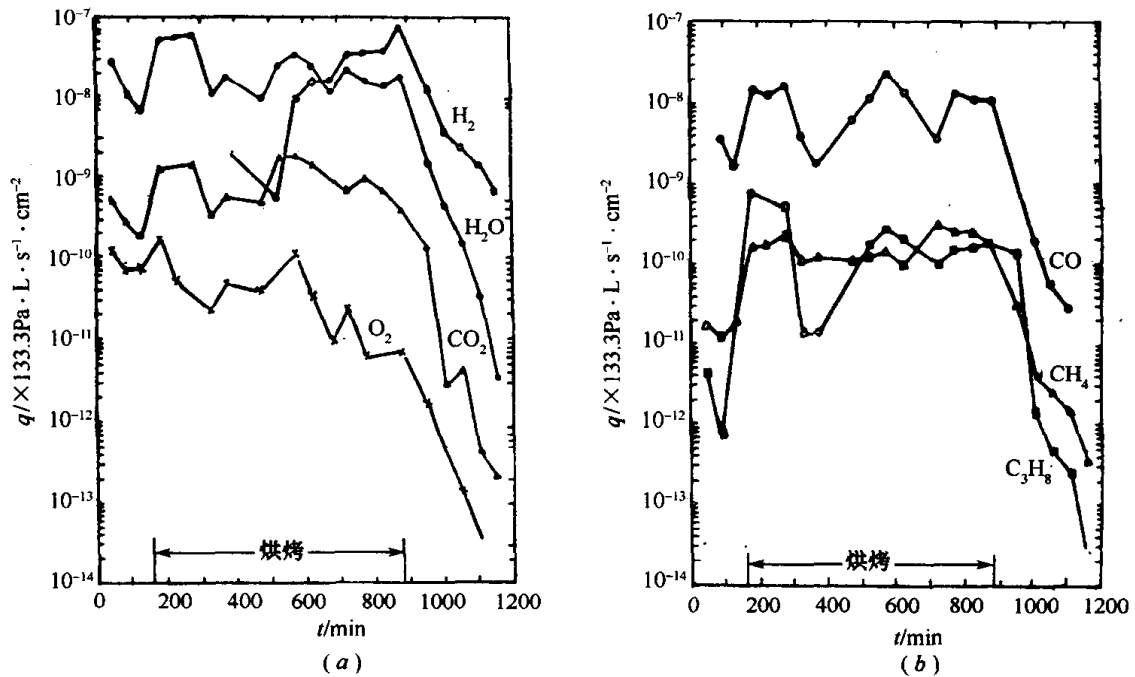


图 14-31 304 或 304L 不锈钢钟罩(2%氢氟酸洗涤)在 350℃ 烘烤下, 各种气体的出气速率及出气组分
(a) O_2 、 H_2O 、 CO_2 、 H_2 ; (b) CO 、 CH_4 、 C_3H_8 。

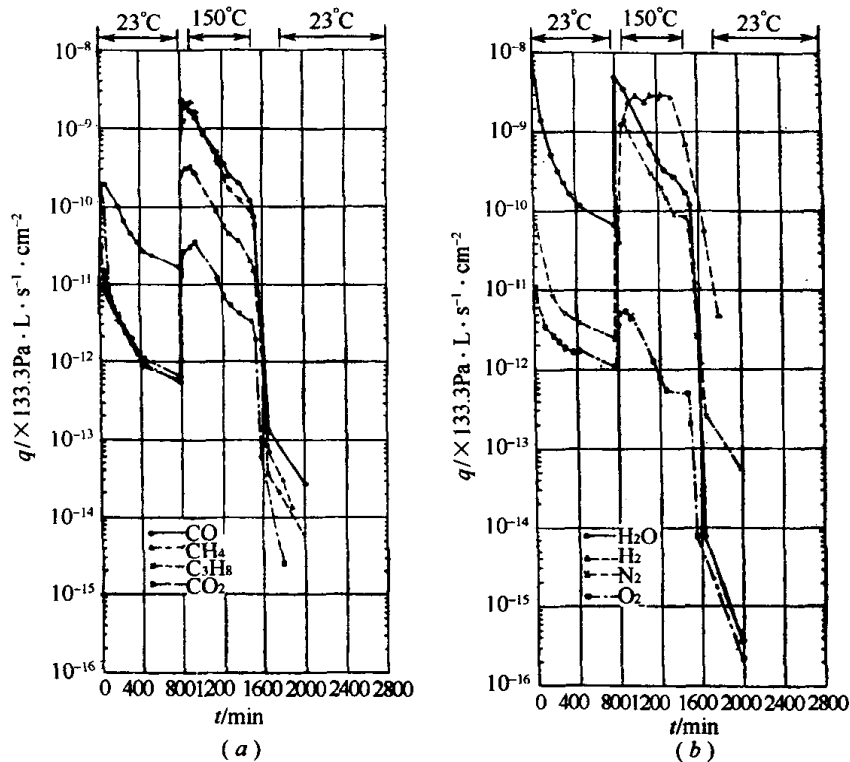


图 14-32 304 或 304L 不锈钢钟罩(33%硝酸、33%氢氟酸洗涤) 在 150℃ 烘烤下, 各种气体的出气速率及出气组分
(a) CO 、 CH_4 、 C_3H_8 、 CO_2 ; (b) H_2O 、 H_2 、 N_2 、 O_2 。

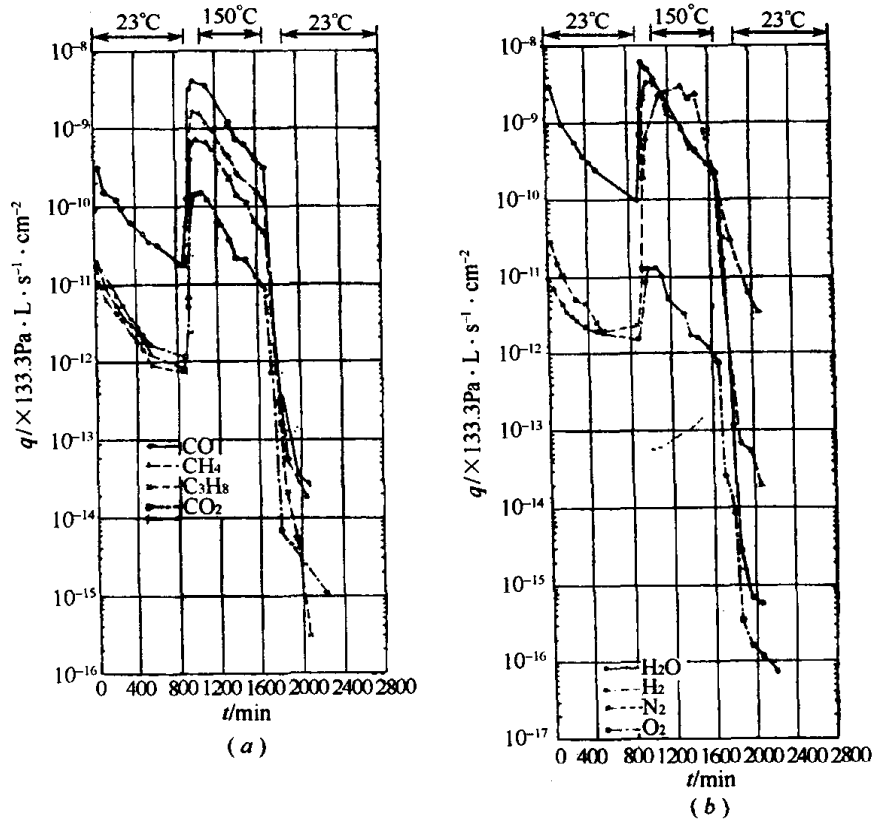


图 14-33 304 或 304L 不锈钢钟罩(三氯乙烯去脂)在 150℃ 烘烤下, 各种气体的出气速率及出气组分
(a)CO、CH₄、C₃H₈、CO₂; (b)H₂O、H₂、N₂、O₂。

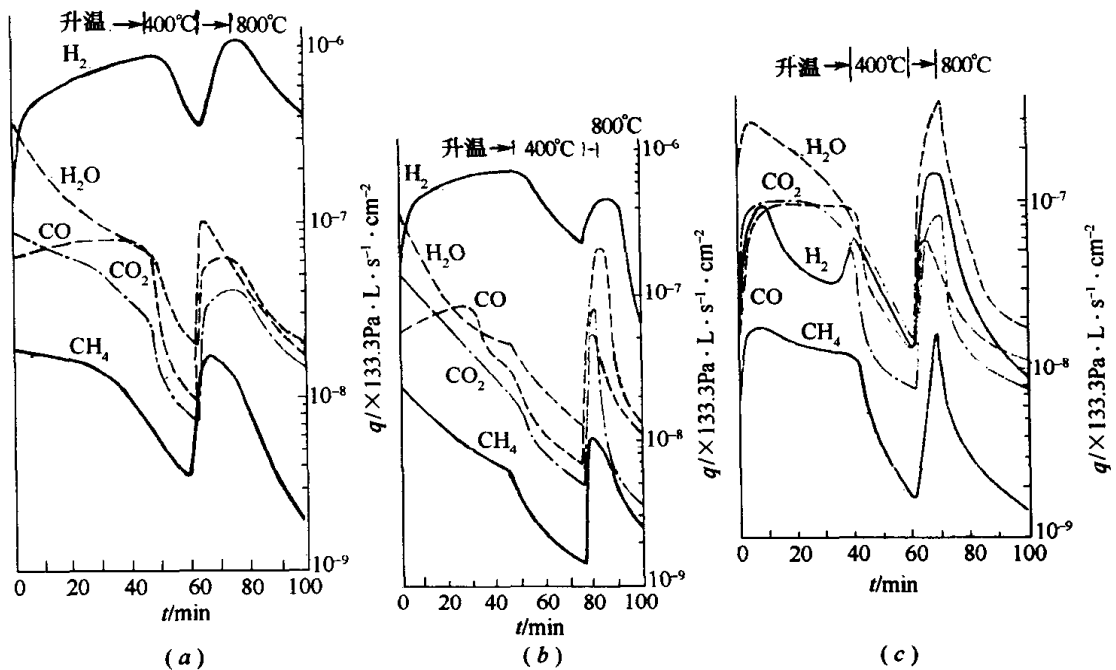
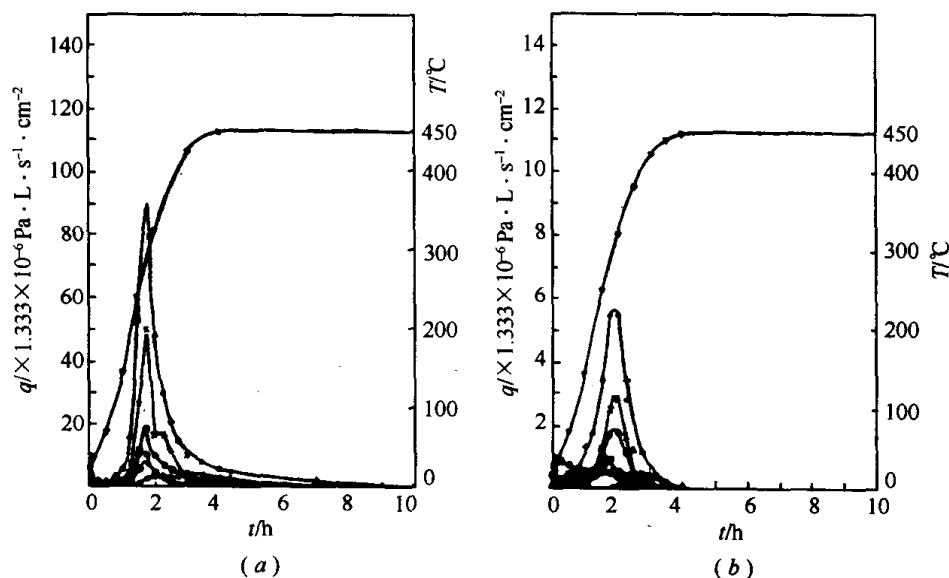


图 14-34 EN58B、EN58G、EN60 不锈钢空心圆筒样品
(三氯乙烯去脂、丙酮中漂洗)烘烤过程中各种气体的出气速率及出气组分
(a)EN58B; (b)EN58G; (c)EN60。

图 14-35 18/8/1 不锈钢圆柱样品(机械抛光, $R_a 0.4$)

在烘烤过程中出气速率及出气组分

(a) 450°C 烘烤 24h; (b) 暴露大气 24h 后再 450°C 烘烤 20h。

+—质量数 2; ○—质量数 18; □—质量数 28; ·—质量数 44; ×—碳氢化合物总量; △—总量; ▽—温度, °C。

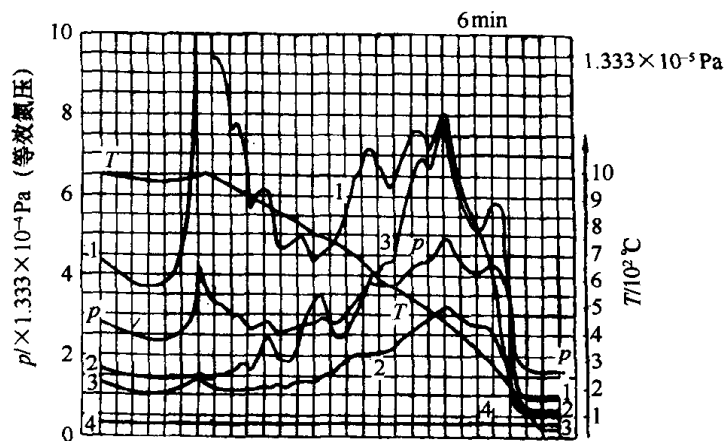


图 14-36 0.2mm V2A 不锈钢(10CrNiTi18、10) 1000°C 烘烤过程、全压、分压的变化

 p —全压; T —温度; 1— CO/N_2 ; 2— H_2O ; 3— CO_2 ; 4— H_2 。

(4) 无机材料的高温出气

红云母的高温出气见表 14-27, 白云母高温出气质谱随时间及温度的变化如图 14-42 所示。派列克斯玻璃经 450°C 真空烘烤后的四种情况的高温出气如图 14-43 所示。50 μm ~380 μm 厚的绝缘垫片的高温出气速率及组分见表 14-28。

5. 高温下的出气总量和气体组分

各种材料在足够高的温度下, 经过一定时间的出气后, 有可能将内部所含气体的大部分释放出来, 这时出气速率的累积量(出气总量)在一定程度上可近似反映材料的全部含气量。一般用每 100g 材料所含标准状态的气体体积数[mL]来表示。“出气总量”这个参数可作为设计高温真空系统以及电真空器件的选材的标准之一。各类材料的含气情况列于表 14-29。500°C 加热前、加热中及加热后, 核聚变实验装置第一层真空容器壁、材料的放气量见表 14-30。

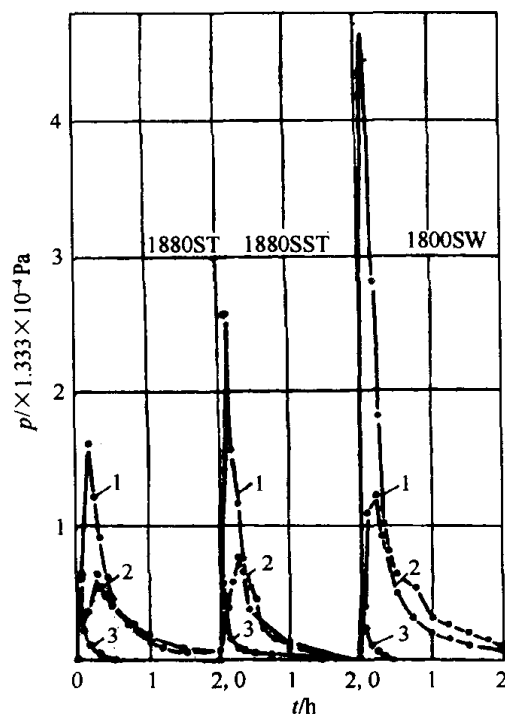


图 14-37 1880ST、1880SST、1880SW 不锈钢在烘烤过程中压强随时间变化曲线
1—未处理；2—蒸气去脂；3—灼热。

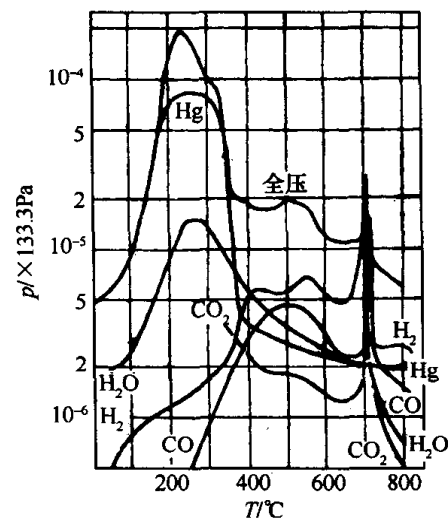


图 14-38 覆铝铁皮(铝厚 $10\mu\text{m}$)样品 800°C 烘烤($100^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 内每秒温升 0.58°C),全压、分压随温度变化曲线

表 14-26 几种金属箔的高温出气速率及气体组分

材料	预处理温度 $^\circ\text{C}$	程序 ^①	出气温度 $T/^\circ\text{C}$	出气速率 q $/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	组 分/%				
					H_2	CO_2	H_2O	碳氢化物	$\text{N}_2 + \text{CO}$
铝箔	未处理	第一周期	482	1.85×10^{-11}	99.36	—	—	0.50	0.14
		第二周期		1.45×10^{-11}	99.42	—	—	0.42	0.15
	未处理	第一周期	38	-2.42×10^{-11}	40.95	—	54.26	—	4.79
		第二周期		1.28×10^{-11}	57.47	—	35.13	0.17	7.22
钽箔	未处理	第一周期	982	1.18×10^{-11}	99.64	—	—	0.17	0.18
		第二周期		2.68×10^{-12}	—	—	—	0.17	0.18
铜箔	843	第一周期	688	-2.32×10^{-11}	96.60	—	—	1.54	1.85
		第二周期		-1.75×10^{-12}	95.44	0.04	—	1.92	2.58
镍箔	未处理	第一周期	893	1.04×10^{-13}	98.63	—	—	0.09	1.26
		第二周期		9.7×10^{-14}	97.94	—	—	0.16	1.88

注:①在 $(T+55.5^\circ\text{C})$ 下抽真空 17h,再抽 0.5h 并冷却到 $T^\circ\text{C}$,然后关阀门,压力上升 8h,由压力上升曲线用“最小二乘法”计算出气速率,并在压力上升的最后时刻测量气体组分。所谓第二周期是指把上述程序再重复一次

表 14-27 红云母(0.05g)的高温出气速率

未 处 理	温度 $^\circ\text{C}$	650	783	910	944
	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	2.6×10^{-5}	4.8×10^{-4}	9.3×10^{-4}	1.06×10^{-3}
850 $^\circ\text{C}$ 真空预除气 4h	温度 $^\circ\text{C}$	747	767	800	900
	出气速率 $q/\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	8.8×10^{-7}	1.7×10^{-6}	4.7×10^{-6}	8.2×10^{-5}

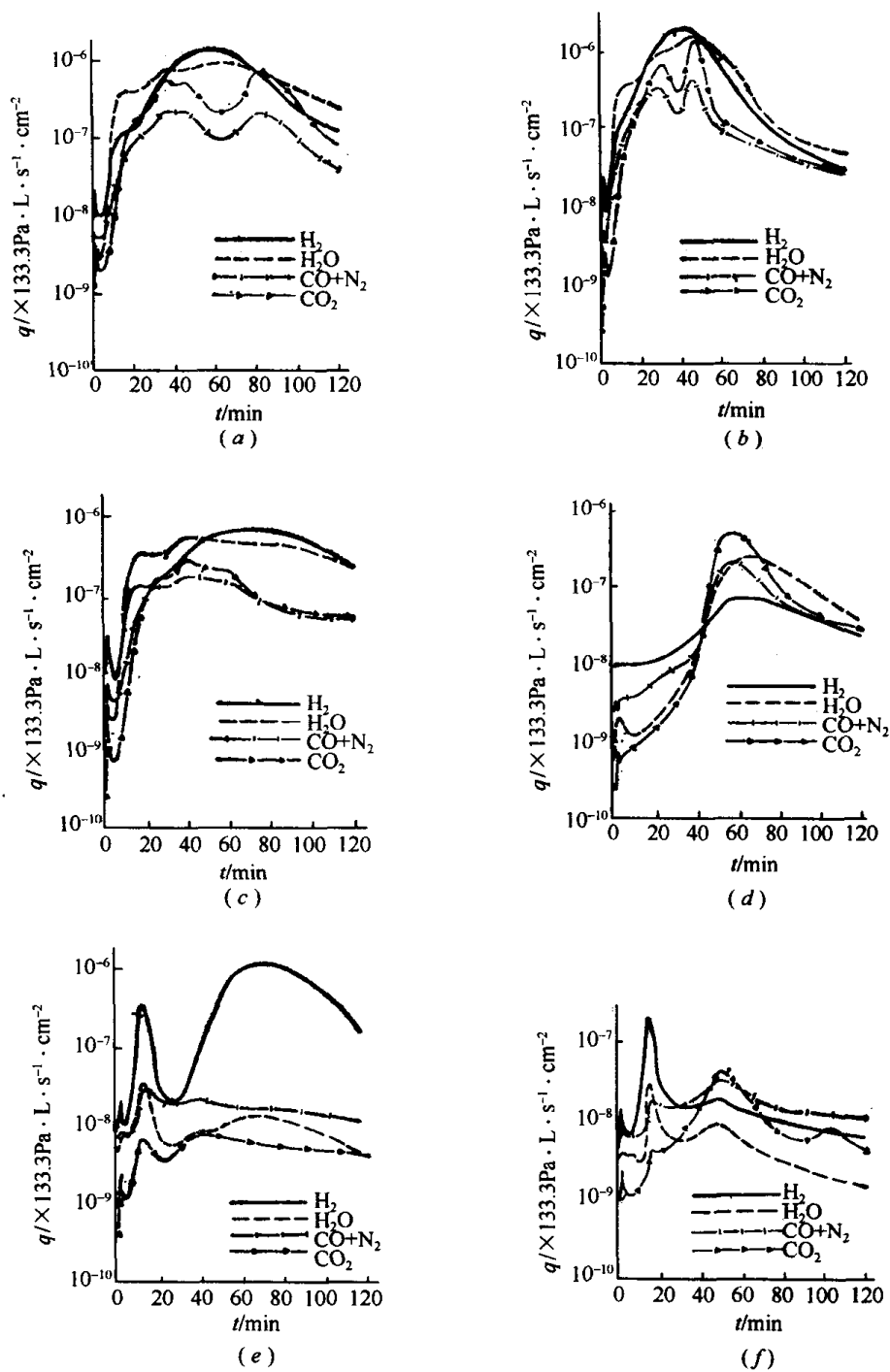
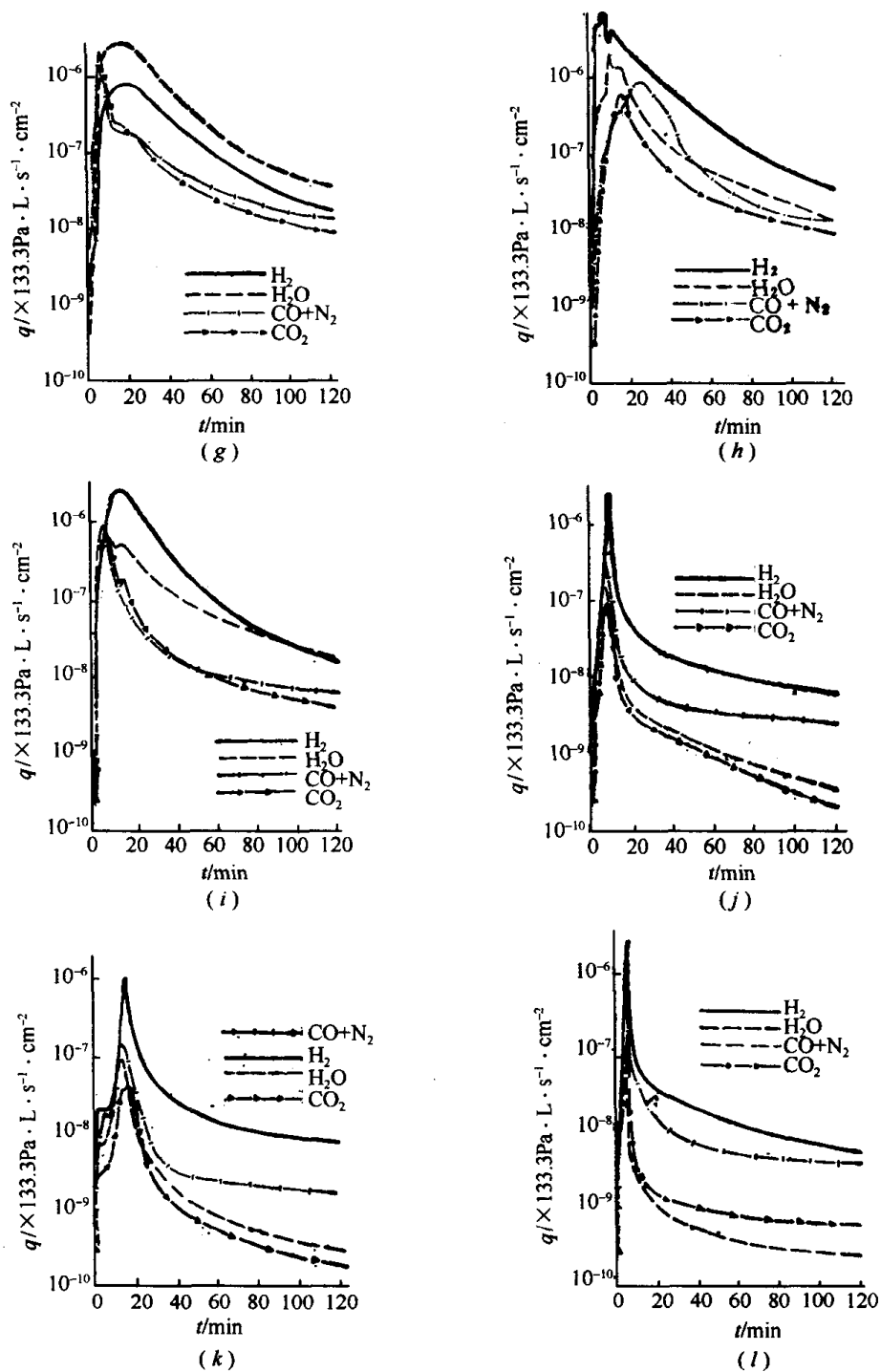


图 14-39 无氧铜各种气体

(a)用氯乙烷去脂,硫酸-硝酸溶液化学抛光,600℃出气;(b)同图(a)之处理,700℃
 却到室温,再次重新升温到600℃(升温时间1h);(c)980℃下烧干燥氢(露点-35℃)
 化10min,样品表面形成淡红-棕色 Cu_2O 层,600℃下出气;(d)镀镍无氧铜600℃下出气;
 (e)沉积钛,500℃下出气;



组分的高温出气速率

下出气; (c)同图(a)之处理, 500℃下出气; (d)图(c)样品 500℃除气 2h后, 冷 1h, 600℃下出气; (f)700℃下真空除气 2.5h, 600℃下出气; (g)480℃大气下烘烤氧 (i)镀金(0.68μm厚)无氧铜, 600℃下出气; (j)真空沉积 2μm厚钛层, 600℃下出气; (l)沉积钛, 700℃下出气。

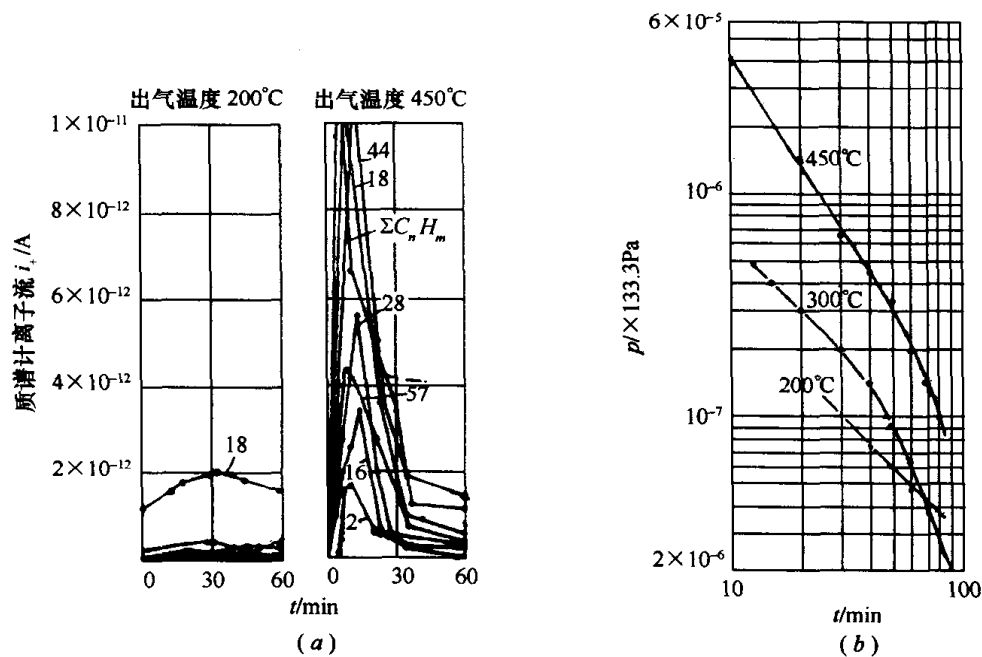


图 14-40 铝(99.5%)的高温出气

(a) 100℃及450℃的出气质谱; (b) 200℃、300℃、45℃的出气压力变化。

表 14-28 50 μm ~380 μm 厚的绝缘垫片的高温出气速率及组分(静态法测试)

材 料	处理温度 ℃	出气温度 ℃	程序 ^①	出气速率 q $/\times 133.3\text{Pa}$ $\cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	组 分/%							压力 $/\times 133.3\text{Pa}$
					H ₂	CO ₂	H ₂ O	碳氢 化合物	N ₂ , CO	最多 N ₂	最少 CO	
玻璃纤维纸	555	482	第一次	-2.11×10^{-11}	85.53	—	—	1.36	13.09	4.88	8.21	3×10^{-4}
			第二次	-3.47×10^{-12}	78.02	0.63	—	0.63	20.70	0.50	20.19	
		38	第一次	-9.7×10^{-11}	13.50	—	78.05	—	8.45	3.15	5.30	3×10^{-4}
			第二次	-4.27×10^{-11}	50.22	—	42.56	—	7.22	0	7.22	
覆铝片 不透明玻璃纤 维纸	555	482	第一次	-9.6×10^{-11}	99.00	0.01	—	0.35	0.63	—	—	3×10^{-4}
			第二次	-4.15×10^{-11}	98.19	0.03	—	0.63	1.14	—	—	
覆铜片 不透明折光石 英纤维纸	649	588	第一次	1.98×10^{-9}	17.55	4.55	—	6.39	71.48	3.09	68.39	3×10^{-4}
			第二次	9.05×10^{-10}	27.68	4.53	—	5.16	62.61	4.65	57.96	
	759	588	第一次	7.16×10^{-11}	8.73	15.44	—	8.88	66.92	2.12	64.79	3×10^{-4}
			第二次	-7.14×10^{-13}	67.56	—	—	2.12	27.84	1.85	25.98	
航天用石英布	926	926	第一次	8.35×10^{-13}	58.57	0.37	—	3.41	37.63	7.00	30.63	3×10^{-4}
			第二次	3.97×10^{-13}	47.18	0.38	—	2.90	49.52	12.78	36.73	
	926	982	第一次	1.19×10^{-9}	59.25	0.03	—	0.48	40.23	27.18	13.04	2×10^{-3}
			第二次	8.50×10^{-10}	25.74	—	—	0.15	74.23	53.59	20.62	
折光石英纤维 纸	926	926	第一次	-3.4×10^{-11}	64.88	0.40	—	2.86	31.85	3.12	28.70	3×10^{-4}
			第二次	-6×10^{-14}	50.32	0.38	—	2.59	46.69	6.69	39.99	
	926	982	第一次	1.04×10^{-9}	31.68	0.43	—	1.80	66.07	27.52	38.55	2×10^{-3}
			第二次	3.52×10^{-10}	1.19	0.01	—	0.13	98.66	64.87	33.80	

注:①比出气温度高 55.5℃ 下抽真空 17h, 冷到出气温度下再抽 0.5h, 然后关阀, 压力上升 8h, 由压力上升曲线用“最小二乘法”计算出气速率, 并在压力上升的最后时刻测气体组分

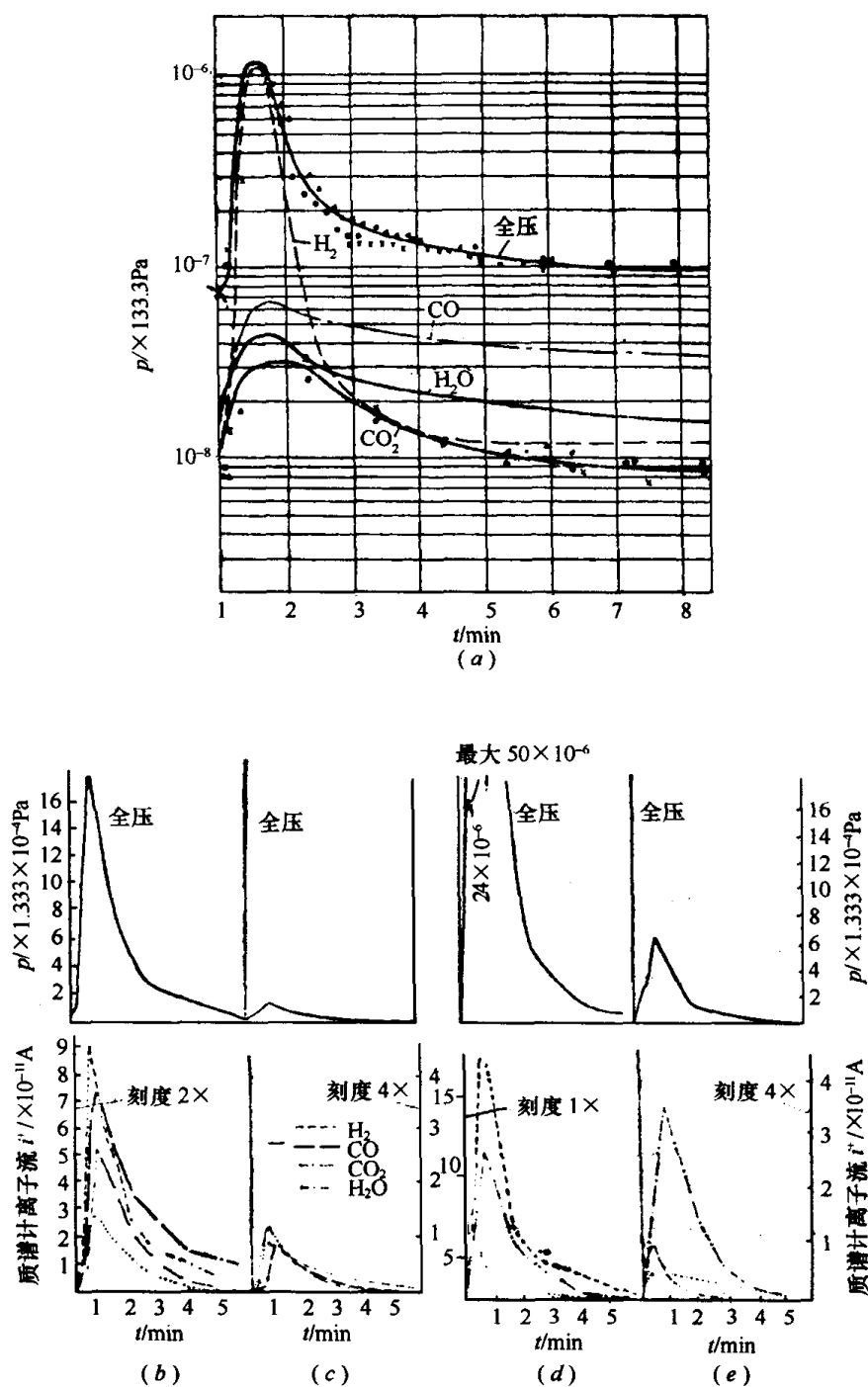


图 14-41 220 镍(重 0.3g, 体积 0.035cm^3 , 表面积 1.84cm^2)于 850°C 下出气, 全压及分压随时间变化曲线

(a) 1150°C 下烧氢 1h; (b) 有机溶剂去脂, 超声波清洗; (c) 1150°C 下烧氢 4h;

(d) 同(c)处理, 之后用手摸并在室温空气下暴露几个 h;

(e) 同(c)处理, 之后在 1050°C 氮和空气中烧。

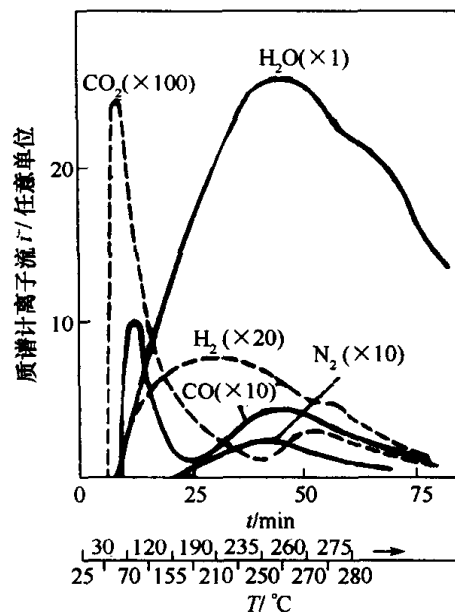


图 14-42 新劈开的白云母高温出气质谱随时间及温度的变化

注: 由于使用玻璃系统并烘烤到 350°C, 器壁将强烈地凝结水气, 而质谱计通过毛细管与容器相连, 扫描速度又较慢, 所以得到的水气含量偏低

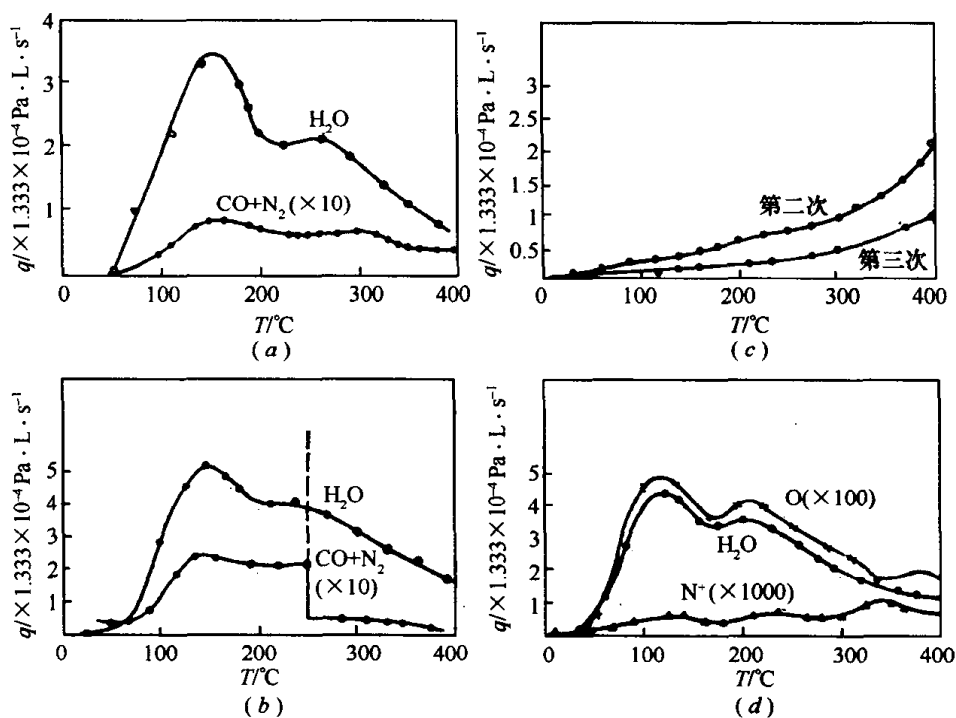


图 14-43 派列克斯玻璃(1/4L 的玻璃泡, 表面积 180cm²)经 450°C 真空烘烤后按(a)、(b)、(c)、(d)四种情况的高温出气

(a) 暴露大气以后再烘烤(升温速率 1/3°C · s⁻¹)的过程中, H₂O 和 CO + N₂ 的出气速率;
 (b) 同(a), 中途关掉 B-A 规时, H₂O 和 CO + N₂ 的出气速率; (c) 在(a)以后, 第二、第三次烘烤(升温速率 1/3°C · s⁻¹)过程中 H₂O 的出气速率; (d) 同(a)过程, H₂O、O、N⁺ 的出气速率。

表 14-29 各种材料的高温出气总量及气体组分

材 料	牌 号 或 品 种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气体组分/cm ³ (STP)·100g ⁻¹						备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	其它
低碳钢, 1200℃			70	—	—	—	—	—	—	—
碳素钢 08			13.7	3.28	—	2	—	—	8.4	—
碳素钢 20			7.5	3.44	—	2	—	—	2.1	—
碳素钢 CK8			13.7	8	—	—	—	—	3.5	—
碳素钢 CK35			7.7	4.8	—	—	—	—	2.9	—
碳素钢 CK45			8.0	5.2	—	—	—	—	2.8	—
合金钢 75Mn3			6.9	4.8	—	—	—	—	2.1	—
合金钢 46MnSi4			8.4	5.6	—	—	—	—	2.8	—
合金钢 30CrMnSiA			7.2	3.2	—	1.2	—	—	2.8	—
锰铝铸钢, 1200℃			17.4	—	—	—	—	—	—	—
铬铝铸钢, 1430℃			15.5	—	—	—	—	—	—	—
变压器钢			15.4	—	—	3.4	—	—	12	—
真空熔炼			2.1	—	—	0.56	—	—	1.54	—
真空熔炼			12.82	4.72	—	6	—	—	2.1	—
不锈钢 1Cr18Ni9Ti			160.3	113	39.5	6.7	1.05	—	—	—
不锈钢 1Cr18Ni9, 1000℃		仅去脂	107.3	88.2	15.8	2.1	1.2	—	—	—
不锈钢 1Cr18Ni9, 1000℃		去脂, 烧氢								
不锈钢 1Cr18Ni9, 1000℃		去脂, 烧氢, 真空烘烤	34.4	15.8	17.1	0.8	0.66	—	—	—
不锈钢 1Cr18Ni9, 1000℃		镀镍, 烧氢	22	2.6	14.5	1.3	3.56	—	—	—
镍基耐热合金钢			21.8	3.2	—	6.7	—	—	11.9	—
镍基耐热合金钢			8.95	1.6	—	5.6	—	—	1.75	—
耐热合金钢		真空熔炼	14.35	11.2	—	—	—	—	3.15	—
耐热合金钢			9.71	8.8	—	—	—	—	0.91	—
× 10CrNiTi189		真空熔炼	7.3	6.6	—	—	—	—	0.7	—
× 8CrNiMoNb1616			32.5	30.4	—	—	—	—	2.1	—
冷轧钢, 1000℃			337.5	329		1.84	6.7	—	—	—
钢管, 1000℃			408	332		57.5	18.5	—	0.037	—
覆铝钢, 1000℃			50.2	21		23.7	5.5	—	—	—
覆碳化镍钢, 1000℃			739	593		103	33	—	0.066	—
镀镍钢, 1000℃			41.8	33.2		2.5	6.06	—	—	—

(续)

材 料	牌 号 或 品 种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气 体 组 分 /cm ³ (STP)·100g ⁻¹						备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	
铁	纯铁		13.62	—	8.2	0.52	2.2	1.7	—	—
	铁(化学纯)	电解,真空冶炼	20	—	—	—	—	—	0.01	
	铁(化学纯)		6.5	0.068	—	—	—	—	—	
	新铁,1350℃		8.46	—	—	—	—	—	—	
	纯铁板	清洗	0.15	—	—	—	—	—	—	
	纯铁板	800℃烧氢 10min	10.6	—	—	—	—	—	—	
	电子管用纯铁	电弧冶炼	7.5	—	8.01	2	0.59	—	—	
	电子管用纯铁	电弧冶炼 铝脱 氧	13.3	—	5.08	1.61	0.81	0.6	—	
	电子管用纯铁	电解铁粉烧结	9.15	—	9.2	2.7	1.4	0.49	—	
	带孔镀镍铁(镍厚 0.1μm)		3.69	—	7.2	0.52	0.83	0.46	—	
	带孔镀镍铁(镍厚 1.3μm)		2.99	—	2.3	0.70	0.2	0.52	—	
	带孔镀镍铁(镍厚 2.6μm)		2.74	—	1.58	0.77	0.18	0.69	—	
	带孔镀镍铁(镍厚 6.0μm)		3.48	—	1.16	0.98	0.18	—	—	
	带孔镀镍铁(镍厚 16μm)		10.2	—	2.0	0.13	0.66	—	—	
	镀镍铁,850℃,20min	清洗	4.18	—	—	—	—	—	—	
	镀镍铁,850℃,20min	600℃烧氢	0.92	—	—	—	—	—	—	
	镀镍铁,850℃,20min	800℃烧氢	0.64	—	—	—	—	—	—	
	镀镍铁,850℃,20min	1000℃烧氢	44.5~330	—	—	—	—	—	—	
	表面碳化铁	清洗	3.3~33.3	—	—	—	—	—	—	
	表面碳化铁	800℃烧氢	21.6	—	—	—	—	—	—	
	电工铁		18.9	2.96	—	11.2	1.72	—	7.0	
	阿姆克铁		22.44	1.44	16.2	1.04	—	—	2.1	
	阿姆克铁		2.34	0.24	—	—	—	—	2.1	
	阿姆克铁	1475℃烧氢 3min	13.33	—	—	—	—	—	—	
	电解铁	1000℃烧氢 15min	0.6	—	—	—	—	—	—	
	电解铁		15	—	—	—	—	—	—	
	羰基铁		1.5	—	—	—	—	—	—	
	羰基铁	1000℃烧氢 15min		—	—	—	—	—	—	

(续)

材 料	牌 号 或 品 种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气 体 组 分 /cm ³ (STP)·100g ⁻¹							备 注	
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	其它		
铜	电解铜	未处理	0.5~7.97	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	真空熔炼铜	800℃ 烧 氢 30min	4.2	0.17	1.3	0.4	0.04	—	—	—	2.2(SO ₂)	
	真空熔炼铜		0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	
	真空熔炼铜		0.15	—	—	—	—	—	—	—	—	
	真空熔炼铜		0.7	—	0.27	0.25	0.007	—	—	—	0.18(SO ₂)	
	工业纯铜	未处理	0.22	—	—	—	—	—	—	—	—	
	工业纯铜	800℃ 烧 氢 30min	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	
	压延铜板		0.61	—	0.02	0.52	—	—	—	—	0.07	
	铸铜		0.79	—	0.08	0.64	—	—	—	—	0.07	
	无氧铜	未处理	0.24	—	—	—	—	—	—	—	—	
	无氧铜	800℃ 烧 氢 30min	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—	
	无氧铜		2.42	—	0.80	0.15	1.1	—	—	—	0.06	
	无氧铜		1.66	—	—	1.34	—	—	—	0.315	—	
	无氧铜	真空熔炼	0.133	—	—	0.112	—	—	—	—	0.0218	
	无氧铜, 600℃12min	清洗	1.5	0.032	0.09	0.566	0.28	0.53	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$	
	无氧铜, 600℃12min	烧氢	0.49	0.001	0.015	0.46	0.005	0.008	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$	
无氧铜, 600℃12min	真空烘烤	0.29	0.001	0.015	0.018	0.145	0.006	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$		
无氧铜, 600℃12min	氧化(Cu ₂ O)	1.06	—	0.075	0.22	0.116	0.645	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$		
无氧铜, 600℃12min	镀金	0.74	0.005	0.04	0.5	0.051	0.145	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$		
无氧铜, 600℃12min	镀镍	1.37	0.024	0.134	0.94	0.061	0.21	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$		
无氧铜, 600℃12min	沉积钛	0.08	0.001	0.012	0.055	0.0045	0.006	—	—	单位是 $\left[\frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{100\text{cm}^2}\right]$		

(续)

材 料	牌号或品种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气体组分/cm ³ (STP)·100g ⁻¹						备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	
纯镍			2.91	—	1.0	0.13	0.75	0.98	—	在 N ₂ + CO 中 N ₂ < 10%
高纯镍 CA-450, 1000℃		仅去脂	45.8	36.2		0.26	9.4	—	—	在 N ₂ + CO 中 N ₂ < 10%
高纯镍 CA-450, 1000℃		表面腐蚀	22.6	12.5		0.4	9.7	—	—	在 N ₂ + CO 中 N ₂ < 10%
高纯镍 CA-450, 1000℃		表面腐蚀, 烧氢	20.4	13.7		0.8	5.9	—	—	在 N ₂ + CO 中 N ₂ < 10%
DH399 镍管, 1000℃			10.57~ 11.94	8.1~8.9		0.37~0.44	2.1~2.6	—	—	在 N ₂ + CO 中 N ₂ < 10%
330 镍, 1000℃			40.8	29.4		2.5	9.0	—	—	
220 镍, 850℃		仅去脂	3	2.3		1.05	0.57	0.34	—	
220 镍, 850℃		烧氢, 干燥存放	0.27	0.045		0.05	0.05	0.015	—	
220 镍, 850℃		烧氢, 手摸	6	—	—	1.8	1.4	0.348	—	
220 镍, 850℃		烧氢, 手摸, 去脂	0.59	0.11		2.22	0.07	0.015	—	
220 镍, 850℃		烧氢, 橡皮手指套摸	0.8	0.3		0.3	0.11	0.25	—	
220 镍, 850℃		烧氢, 清洁棉纱手套摸	1.15	0.8		0.55	0.2	0.06	—	
220 镍, 850℃		空气中烘烤	1.1	—	—	0.062	0.38	0.11	—	
220 镍, 850℃		酸洗	0.29	—	—	0.12	0.055	—	—	
镍, 850℃ 20min		清洗	6.14	—	—	—	—	—	—	
镍, 850℃ 20min		600℃ 烧氢	4.54	—	—	—	—	—	—	
镍, 850℃ 20min		800℃ 烧氢	2.94	—	—	—	—	—	—	
镍, 850℃ 20min		1000℃ 烧氢	0.46	—	—	—	—	—	—	
镍板 (厚 0.12~0.13mm), 850℃ 30min		清洗	4.06~5.96	—	—	—	—	—	—	

(续)

材 料	牌号或品种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气体组分/cm ³ (STP)·100g ⁻¹							备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	其它	
镍	镍板(厚0.12mm~ 0.13mm), 850℃ 30min	800℃ 烧 氢 10min	2.42~2.68	—	—	—	—	—	—	—	
	镍丝(φ1mm), 1150℃		2.46	—	1.81	0.43	0.22	—	—	—	
	镍 电解镍板		7.88	—	—	—	—	—	—	—	
	镍锭		4.82	—	—	—	—	—	—	—	
	羰基镍		113	—	—	—	—	—	—	—	
	碳化镍板, 850℃ 30min	清洗	3.8	—	—	—	—	—	—	—	
	碳化镍板, 850℃ 30min	800℃ 烧 氢 10min	0.83	—	—	—	—	—	—	—	
钼	钼	未处理	16.2~19.9	0.8~2.4	—	11.2	—	—	4.2~6.3	—	
	钼	6.7×10^{-1} Pa 真空熔炼	1.48~2.53	0.08	—	—	—	—	1.4~2.45	—	
	钼	1.3×10^{-2} Pa 真空熔炼	0.7	—	—	—	—	—	0.7	—	
	钼管, 1000℃		17.3	11.8	—	0.92	4.6	—	—	—	
	钼, 1760℃		0.441~ 0.546	0.261~ 0.395	0.119	0.03	0.03	—	—	—	
钛	钛		158.4	24	—	50.4	—	—	84	—	
	钛管, 1000℃		688.3	1.3	—	685	2.0	—	—	—	
钨	钨管, 1000℃		6.3	0.53	—	5.4	0.4	—	—	—	
钨	钨, 2490℃, 25min		0.028~ 0.041	—	—	—	—	—	—	—	
	钨管, 1000℃		11.2	8.8	—	1.3	3.7	—	—	—	
铝	铝		4~7	—	—	—	—	—	—	—	

(续)

材 料	牌 号 或 品 种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP) 100g ⁻¹	气 体 组 分 /cm ³ (STP)·100g ⁻¹							备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	其它	
复 合 材 料 或 合 金	复合铝-铁-镍		3~5	—	0.4	2.5~4.2	0.2	—	—	—	54% Fe, 28% Ni, 8% Co 54% Fe, 28% Ni, 8% Co 70% Ni, 30% Cu 80% Ni, 15% Cr, 5% Fe 60% Ni, 24% Fe, 16% Cr 50% Ni, 50% Fe 在 N ₂ + CO 中, N ₂ < 10% 在 N ₂ + CO 中, N ₂ < 10% 在 N ₂ + CO 中, N ₂ < 10% 在 N ₂ + CO 中, N ₂ < 10%
	复合镍-铁-铝		3~5	—	0.6	2.4~4	0.2	—	—	—	
	可伐管, 1000℃		33	27.6		1.6	3.8	—	—	—	
	可伐	烧氢	50.1	6.6	39.5	2.4	1.7	—	—	—	
	铜镍合金管, 1000℃	烧氢	17.4	1.3	13.2	0.53	2.37	—	—	—	
	因科尼尔管, 1000℃	烧氢	49	5.3	39.5	0.79	3.4	—	—	—	
	镍铬 V 管, 1000℃	烧氢	33.2	22.4	7.9	1.3	1.58	—	—	—	
	52 合金管, 1000℃	烧氢	15.8	1.3	12	1.45	1.05	—	—	—	
	蒙乃尔 403, 1000℃	仅去脂	35.1	27.6		3.7	3.8	—	—	—	
	蒙乃尔 403, 1000℃	去脂, 烧氢	106.8	93.5		1.3	12	—	—	—	
	蒙乃尔 403, 1000℃	去脂, 烧干爆氢	12.34	8.8		1.3	2.24	—	—	—	
	蒙乃尔 403, 1000℃	去脂, 烧干爆氢, 真空烘烤	10.63	8.4		0.13	2.1	—	—	—	

(续)

材 料	牌号或品种 ^①	预 处 理	总出气量 /cm ³ (STP)· 100g ⁻¹	气体组分/cm ³ (STP)·100g ⁻¹						备 注
				N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	
玻 璃	钠钙		32.6	—	3.6	—	0.65	26.7	—	—
	钠钙铅		29.5	—	3.54	—	0.89	25.1	—	—
	铅		24.5	—	4.95	—	0.12	18.4	—	—
	硼硅		11~14	—	—	—	0.69	11.8	—	—
	硼硅铅		12	—	2.82	—	—	9.18	—	—
	透明石英		4	—	1.5	2.3	0.12	0.04	—	—
云 母	不透明石英		9	—	2	6.7	0.09	0.27	—	—
	云母, 400℃ 40h	400℃ 1h 除气	2.6~3.3	0.26		1.98	0.4	0.013~0.66	—	—
	红云母, 850℃	820℃, 2h 真空 除气	1800~6300	—	—	—	—	—	—	—
	琥珀色云母, 850℃	820℃, 2h 真空 除气	170	—	—	—	—	—	—	—
陶 瓷	合成云母, 850℃	820℃, 2h 真空 除气	13	—	—	—	—	—	—	—
	块滑石, 400℃ 40h	800℃ 10min 除 气		0.0013		0.013	0.0026	—	0.00026	—
	镁橄榄石, 400℃ 40h	800℃ 10min 除 气	0.174	0.0013		0.013	0.0026	—	0.00026	—
陶 瓷	三氧化二铝, 400℃ 40h	800℃ 10min 除 气		0.0013		0.013	0.0026	—	0.00026	—

注: ①所注温度是指测量时样品的温度; 所注时间是指测量时出气量的累积时间。未注温度、时间的是原著提供的条件不详, 但根据一般的习惯来看, 凡是未提供条件的, 多半是指在足够高的温度(甚至处于熔融状态)和足够长的时间下所收集到的气体总量

表 14-30 500℃ 加热前、加热中及加热后,真空容器壁、核聚变实验装置第一层壁的材料的气量

(单位:Pa·m³·s⁻¹·m⁻²)

	清洗方法 ^①				常 温/h						500℃ 加热中 ^② /h						加 热 后/h ^③			
	A	B	C	D	1	5	10	20	1	5	10	50	1	5	10	20	1	5	10	20
不锈钢 (SUS-304L)					2.9E-5 ^④	5.3E-6	2.7E-6	1.3E-6	3.5E-4	7.6E-5	4.0E-5	2.3E-6	9.0E-8	2.5E-8	1.3E-8	6.7E-9				
	○			○	1.9E-6	5.6E-7	2.9E-7	1.7E-7	2.5E-4	6.5E-5	2.7E-5	1.9E-6	8.5E-8	2.0E-8	9.3E-9	—				
					1.5E-5	2.4E-6	1.3E-6	7.8E-7	3.9E-6	—	—	—	1.7E-9	—	—	—				
不锈钢 (YUS-170)					1.5E-6	3.6E-7	1.5E-7	1.1E-7	8.2E-5	7.3E-6	2.3E-6	3.9E-7	1.5E-9	3.4E-10	—	—				
					5.2E-6	3.1E-7	1.3E-7	4.1E-8	3.7E-6	1.1E-6	5.7E-7	1.7E-7	3.4E-8 ^⑤	(4.0E-9)	(2.0E-9)	(8.0E-10)				
	○			○	8.4E-7	3.2E-8	1.6E-8	3.8E-9	5.7E-7	2.5E-7	2.3E-7	4.3E-8	3.1E-8 ^⑤	—	—	—				
因康耐尔合金 625					1.7E-7	1.3E-7	2.3E-8	2.0E-8	1.0E-7	1.3E-8	—	—	—	—	—	—				
					2.7E-7	2.9E-8	1.3E-8	5.6E-9	2.3E-6	4.9E-7	2.7E-7	4.9E-8	1.3E-10 ^⑤	—	—	—				
					9.3E-5	1.3E-5	6.4E-6	2.6E-6	—	—	5.2E-5	2.4E-6	3.3E-9	1.4E-9	1.1E-9	7.3E-10				
哈斯特合金-X					9.0E-6	1.7E-6	1.2E-6	9.0E-7	—	—	4.1E-5	5.7E-7	1.7E-9	6.7E-10	6.9E-10	5.3E-10				
	○				2.1E-5	4.5E-6	2.2E-6	1.6E-6	—	—	—	—	—	—	—	—				
					7.7E-6	2.1E-6	1.3E-6	1.0E-6	—	—	8.3E-6	1.7E-6	6.0E-11	4.1E-11	3.4E-11	2.9E-11				
钼					1.7E-5	1.3E-6	6.7E-7	3.3E-7	—	1.6E-5	9.6E-6	2.0E-6	(3.7E-9)	(3.6E-10)	—	—				
					2.8E-6	1.9E-7	1.0E-7	5.3E-8	—	2.0E-6	6.9E-7	2.4E-7	(2.3E-9)	(1.1E-10)	—	—				
	○			○	5.1E-7	5.1E-8	2.8E-8	1.3E-8	—	—	—	—	(1.7E-10)	—	—	—				
钨					7.3E-6	5.3E-7	2.7E-7	1.1E-7	—	3.6E-7	—	—	—	—	—	—				
					8.0E-7	6.7E-8	3.7E-8	2.1E-8	—	1.2E-5	6.0E-6	1.3E-6	(1.1E-10) ^⑥	(6.7E-10) ^⑥	—	—				
					1.1E-4	1.6E-6	3.2E-7	4.7E-8	2.5E-5	6.3E-6	4.0E-6	1.6E-6	1.7E-9	9.3E-10	6.9E-10	5.1E-10				
钨					1.1E-5	1.3E-7	4.0E-8	5.3E-9	6.2E-6	1.6E-6	8.0E-7	2.0E-7	9.3E-10	4.4E-10	2.7E-10	1.5E-10				
	○			○	4.0E-5	7.6E-7	1.3E-7	1.9E-8	5.2E-6	1.3E-6	8.0E-7	1.7E-7	1.7E-11	9.3E-12	8.0E-12	8.0E-12				
					8.0E-6	1.2E-7	3.1E-8	3.3E-9	7.7E-6	1.7E-6	1.3E-6	7.3E-7	3.2E-10 ^⑥	2.3E-10 ^⑥	2.7E-11 ^⑥	2.7E-11 ^⑥				
钨					3.6E-6	2.9E-8	6.7E-9	—	—	—	—	—	—	1.6E-11	1.1E-11	7.7E-12				

(续)

	清洗方法 ^①				常温/h						500℃加热中 ^② /h						加热后/h ^③			
	A	B	C	D	1	5	10	20	1	5	10	50	1	5	10	20	1	5	10	20
热分解石墨					1.1E-5	1.3E-6	5.3E-7	2.0E-7	1.1E-4	4.7E-5	2.6E-5	1.0E-5	(1.2E-8)	(1.6E-9)	(1.3E-9)	(1.3E-9)	(1.2E-8)	(1.6E-9)	(1.3E-9)	(1.3E-9)
					2.4E-6	1.7E-7	7.3E-8	3.7E-8	1.5E-5	1.8E-6	1.0E-6	4.0E-7	(8.6E-9)	(1.3E-9)	(1.0E-9)	(8.0E-10)	(8.6E-9)	(1.3E-9)	(1.0E-9)	(8.0E-10)
			○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	(6.0E-10)	(4.7E-11)	(2.7E-11)	(2.0E-11)	(6.0E-10)	(4.7E-11)	(2.7E-11)	(2.0E-11)
					4.8E-6	6.4E-7	2.5E-7	9.3E-8	6.9E-6	6.7E-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
碳化硅涂层					1.0E-6	1.1E-7	4.7E-8	1.9E-8	7.3E-5	3.3E-5	2.0E-5	7.3E-6	(3.3E-10)	(8.0E-11)	(5.6E-11)	(2.7E-11)	(3.3E-10)	(8.0E-11)	(5.6E-11)	(2.7E-11)
					1.5E-4 ^④	3.6E-5	1.3E-5	4.8E-5	2.4E-4	5.2E-5	3.3E-5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
					4.8E-5 ^⑤	8.0E-6	4.0E-6	1.5E-6	1.5E-4	4.8E-5	1.9E-5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			○	○	4.5E-6 ^⑥	6.7E-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
					2.7E-5 ^⑦	4.0E-6	1.6E-6	3.7E-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
					2.3E-5 ^⑧	8.0E-6	2.7E-6	1.3E-6	2.8E-5	5.3E-6	1.5E-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注:参考文献:H Yoshikawa, Y Gornay, Y Sugiyama, M Mizuno, S Komiya, T Tazima. Proc. 7th intern. Vac. Congr. and 3rd Intern Conf. Solid Surface. (维也纳)1, (1977)367~370

①○钼、哈斯特合金-X、热分解石墨材料,预先在真空中加热到500℃时分别经过200h、50h、51h之后,暴露在大气中重新测定。

A:玻璃熔接,喷砂

B:热水清洗

C:超声波清洗(洗涤剂是异丙醇)

D:氟里昂、蒸汽清洗

②:将材料加热到500℃时,记作0h;

③:关闭加热电炉时,记作0h;

④:开始抽气2h后的放气量;

⑤:关闭加热电炉后0.35h的放气量;

⑥: $m/e=28$,大部分是 N_2 ;

⑦:2.9E-5即表示 2.9×10^{-5}

(四) 蒸气压、蒸发、蒸发(升华)速率

1. 概述

物质通常有三种不同的状态,即气态、液态、固态。它们依据一定条件而相互变化。液态转化成气态的过程称为蒸发;固态转化成气态的过程称为升华。

一定温度下,在封闭的真空空间中,液体(或固体)气化的结果,使空间的蒸气密度逐渐增加,当达到一定的蒸气压之后,单位时间内脱离液体(或固体)表面的气化分子数与从空间返回液体(或固体)表面的再凝结分子数相等,即蒸发(或升华)速率与凝结速率达到动态平衡,可认为气化停止,这时的蒸气压称为该温度下液体(或固体)的饱和蒸气压。

饱和蒸气压与温度之间有如下近似关系

$$\ln p = C - \frac{\Delta H}{RT} \quad (14-11)$$

或

$$\lg p = A - \frac{B}{T}$$

式中 p ——饱和蒸气压;
 A, B, C ——常数;
 R ——摩尔气体常数;
 T ——热力学温度;
 ΔH ——气化潜热。

一般来说,在一定温度下饱和蒸气压高的材料,其蒸发(或升华)速率也大。蒸气压和蒸发(或升华)速率之间有以下关系

$$W = 4.35 \times 10^{-4} p \sqrt{M/T} \quad (14-12)$$

式中 W ——蒸发(升华)速率 [$\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$];
 p ——温度 T 时的饱和蒸气压 [Pa];
 M ——摩尔气体质量 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$];
 T ——热力学温度 [K].

在真空技术中,材料的蒸气压和蒸发(升华)速率是需要重视的参数,如:真空油脂、真空规灼热灯丝的饱和蒸气压,均能成为影响极限真空度的气源;真空镀膜用材和吸气剂的升华速率是设计真空镀膜设备和吸气剂泵时需要考虑的参量;低温液化气体的饱和蒸气压则与深冷泵极限真空有关的参量。

2. 各种元素和无机物的蒸气压

某些金属和氧化物的蒸气压曲线如图 14-44 所示。各种元素的蒸气压如图 14-45 所示、见表 14-31。凝聚态气体和蒸气的蒸气压如图 14-46 所示。冰和水的蒸气压见表 14-32。无机化合物的蒸气压见表 14-33。各种耐高温材料的蒸气压见表 14-34。

3. 有机物的蒸气压

真空技术中常用有机溶剂的蒸气压见表 14-35。橡胶、塑料的蒸气压见表 14-36。国产真空油脂的蒸气压见表 14-37。国外真空泵油的蒸气压见表 14-38。真空泵油的性能^[95]见表 14-39。上海惠丰生产的 HFV 系列油的主要物理特性见表 14-40。

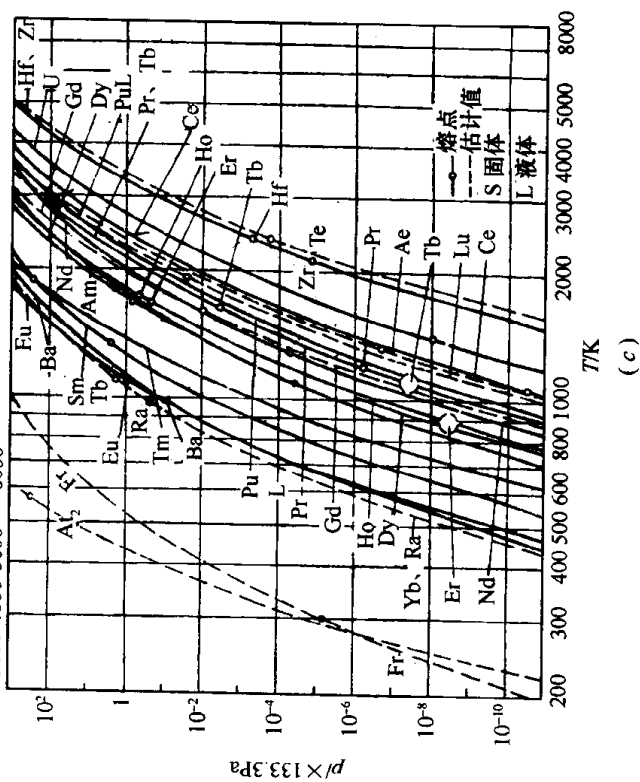
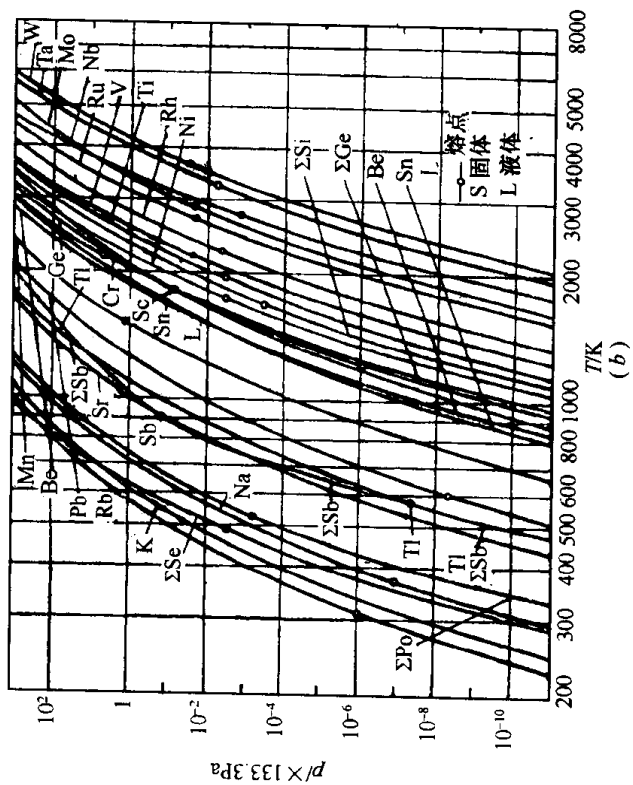
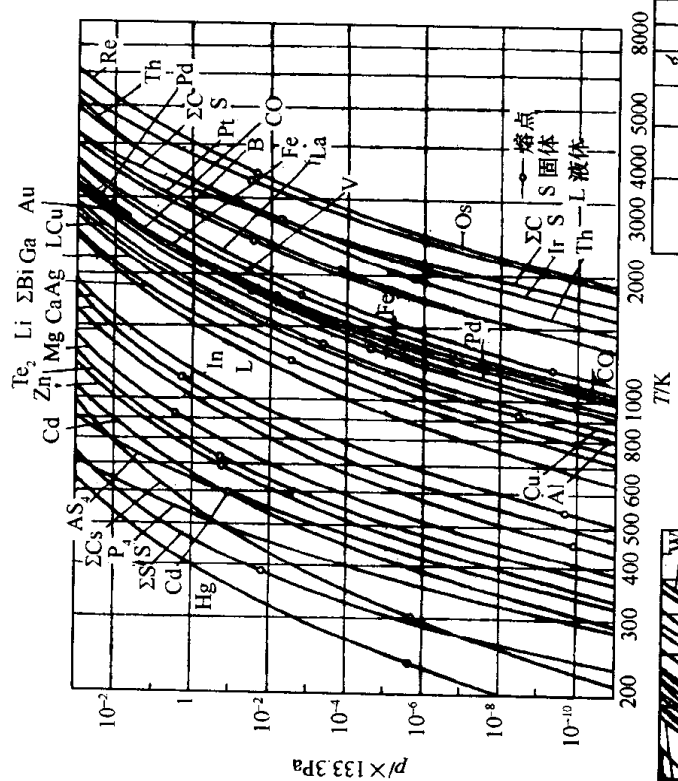
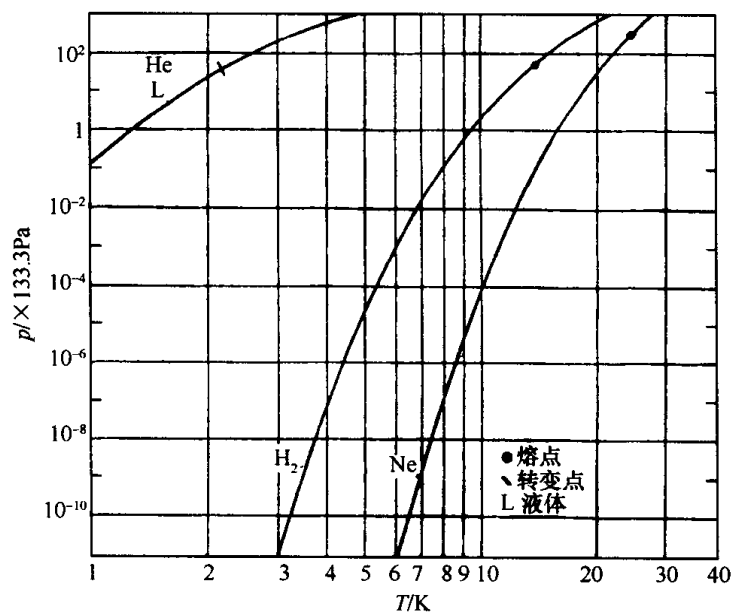
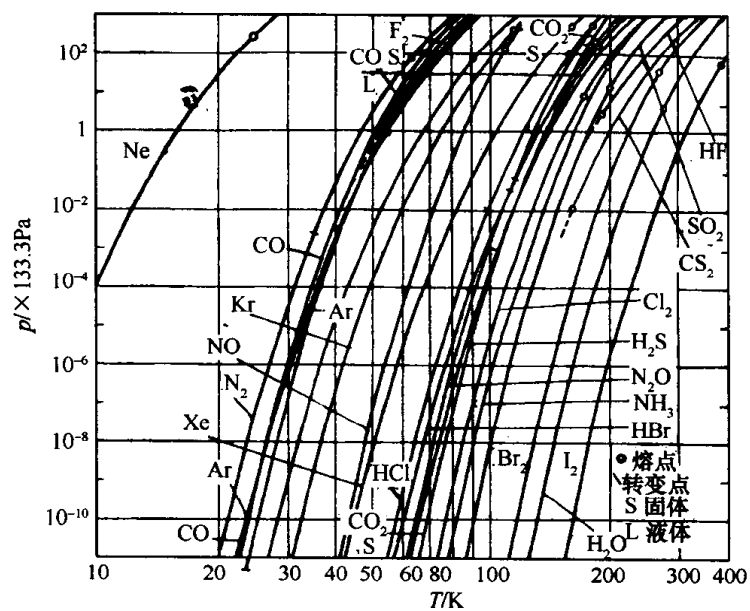


图 14-45 元素的蒸气压



(a)



(b)

图 14.46 气体和蒸气的蒸气压

第十四章 真空技术常用材料

表 14-31 单质物质的蒸气压

物 质	符 号	原子 序 数	蒸 气 压/Pa(Torr)							熔点 /K
			1.33×10^{-1} (1×10^{-6})	1.33×10^{-3} (1×10^{-6})	1.33×10^{-2} (1×10^{-1})	1.33×10^{-1} (1×10^{-3})	1.33 (1×10^{-2})	13.3 (1×10^{-1})	133 (1)	
			温度/K							
银	Ag	47	957	1024	1097	1187	1301	1436	1603	1233.8
铝	Al	13	1039	1114	1200	1297	1421	1566	1745	933.1
砷	AS ₄	33	420	445	474	507	546	590	644	1090
砷	AS ₂		613	649	686	722	758	793	827	
砷	AS		881	937	1012	1110	1246	410	1696	
金	Au	79	1226	1311	1413	1533	1676	1847	2059	1336
硼	B	5	1821	1939	2072	2226	2409	2631	2893	2303
钡	Ba	56	638	687	741	812	895	997	1134	983
铍	Be	4	1097	1173	1261	1364	1485	1634	1821	1553
铋	ΣBi	83	569	600	638	688	760	887	1040	544.3
铋	Bi ₂		660	709	768	837	922	1027	1161	
铋	Bi		624	671	726	790	868	963	1083	
碳	C ₁	6	2200	2336	2491	2669	2874	3114	3397	3773
碳	C ₂		2339	2475	2628	2802	3001	3232	3502	
碳	C ₃		2061	2171	2293	2430	2589	2763	2968	
钙	Ca	20	525	672	726	790	867	962	1081	1123
镉	Cd	48	393	420	445	492	538	594	667	593.9
铈	Ce	58	—	1277	1364	1463	1578	1712	1872	1077
钴	Co	27	1095	1166	1247	1343	1454	1586	1744	1765
铬	Cr	24	1229	1311	1403	1510	1637	1786	1968	2173
铯	Cs	55	295	319	348	382	424	476	545	301.6
铜	Cu	29	1130	1197	1298	1406	1537	1692	1890	1356
铕	Eu	63	640	687	741	805	881	975	1093	
铁	Fe	26	1271	1350	1453	1566	1698	1859	2063	1812
镉	Fr	87	267	289	315	364	385	434	497	
镓	Ga	31	954	1024	1106	1201	1315	1453	1625	302.8
钆	Gd	64	728	779	838	906	986	1082	1199	1593
锗	Ge	32	1230	1319	1422	1543	1687	1861	2075	1231
铪	Hf	72	2117	2260	2430	2627	2860	3143	3478	2495
水银	Hg	80	231	248	267	290	319	355	398	234.13
铟	In	49	850	914	989	1078	1185	1315	1478	429.4
铱	Ir	77	1944	2071	2214	2379	2570	2798	3082	2716
钾	K	19	338.5	365.6	397.7	436	482.9	542	617	336.2
镧	La	57	1485	1540	1661	1803	1972	2177	2429	1193
锂	Li	3	579	623	675	737	811	902	1017	453
镥	Lu	71	1057	1130	1213	1310	1424	1560	1726	1973
镁	Mg	12	517	554	598	649	710	783	875	923
锰	Mn	25	924	988	1060	1146	1247	1363	1522	1523
钼	Mo	42	2090	2228	2386	2572	2797	3046		2893
钠	Na	11	397	428	465	509	562	628	712	307.8
铌	Nb	41	2250	2400	2560	2750	2980	3250	3570	2693
钕	Nd	60	1144	1231	1335	1463	1618	1808	2049	1297
镍	Ni	28	1061	1129	1207	1296	1402	1528	1681	1726
锇	Os	76	2234	2375	2535	2719	2932	3193	3512	2973

一、材料的真空性能

(续)

物 质	符 号	原子 序 数	蒸 气 压/Pa(Torr)							熔点 /K
			1.33×10^{-1} (1×10^{-6})	1.33×10^{-3} (1×10^{-5})	1.33×10^{-2} (1×10^{-1})	1.33×10^{-1} (1×10^{-3})	1.33 (1×10^{-2})	13.3 (1×10^{-1})	133 (1)	
			温度/K							
黄磷	P ₄	15	205	220	238	259	282	311	348	317.2
红磷	P ₄		361	380	403	428	457	491	530	
红磷	P ₂		524	556	592	633	680	735	800	
红磷	P		1174	1250	1337	1435	1547	1675	1822	
铅	Pb	82	708	762	827	903	995	1110	1250	600.3
钯	Pd	46	1336	1430	1539	1667	1820	2011	2246	1825
钋	Po	84	448	479	515	560	616	684	771	527
	PO ₂		453	483	517	564	623	698	796	
白金	Pt	78	1744	1858	1988	2140	2316	2540	2804	2042
镭	Ra	88	593	638	691	754	832	928	1058	973
铷	Rb	37	310	335	364	400	443	497	568	311.8
铈	Re	75	2480	2649	2844	3069	3333	3648	4036	3443
铈	Rh	45	1735	1847	1976	2124	2303	2529	2794	2233
钌	Ru	44	2051	2180	2328	2496	2692	2929	3213	2673
硫黄	ΣS	16	292	310	216	352	377	410	455	392
硫黄	S ₂		387	410	439	472	511	557	613	
硫黄	S		790	856	911	988	1080	1190	1330	
锑	ΣSb	51	617	656	700	749	806	873	1004	903.5
锑	Sb ₄		617	656	700	749	806	873	1024	
锑	Sb ₂		717	763	816	877	958	1063	1198	
锑	Sb		870	933	1008	1097	1204	1334	1498	
钪	Sc	21	1110	1187	1275	1375	1497	1636	1820	1673
硒	ΣSe	34	394	417	432	471	504	560	623	490
硒	Se ₆		398	419	443	470	508	560	629	
硒	Se ₂		410	435	464	497	539	590	652	
硒	Se		691	741	798	867	948	1047	1170	
硅	Si	14	1204	1282	1370	1475	1600	1750	1938	1683
钆	Sm	62	733	786	846	917	1001	1103	1229	1325
锡	Sn	50	1096	1179	1275	1387	1521	1685	1890	505
锶	Sr	38	582	625	676	735	806	894	1006	1043
钽	Ta	73	2507	2675	2862	3077	3329	3625	3978	3273
锝	Tc	43	2070	2200	2360	2540	2760	—	—	
碲	Te ₂	52	497	527	562	602	649	705	790	723
钍	Th	90	—	1959	2104	2272	2469	2704	2990	1973
钛	Ti	22	1508	1609	1726	1861	2020	2219	2464	1953
铊	Tl	81	675	681	736	801	880	979	1101	577
铥	Tm	69	827	885	953	1025	1121	1237	—	1873
铀	U	92	1600	1717	1854	2014	2206	2439	2729	1406
钒	V	23	1604	1708	1826	1963	2133	2317	2555	2193
钨	W	74	2667	2837	3029	3249	3502	3728	4141	3653
镱	Yb	70	599	644	695	757	830	920	1032	1097
钇	Y	39	1246	1392	1430	1544	1678	1842	2048	1773
锌	Zn	30	453	485	523	566	618	681	763	692.5
锆	Zr	40	1975	2109	2265	2447	2662	2918	3227	2123

表 14-32 冰、水的蒸气压($-90^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$)

冰				水			
温 度		压 力		温 度		压 力	
K	$^{\circ}\text{C}$	Pa	Torr	K	$^{\circ}\text{C}$	Pa	Torr
180	-93	0.0053	0.00004	260	-13	225.4	1.691
183	-90	0.0093	0.00007	263	-10	286.5	2.149
186	-87	0.016	0.00012	266	-7	361.9	2.715
190	-83	0.033	0.00024	270	-3	489.6	3.673
193	-80	0.053	0.0004	273	0	610.4	4.579
196	-77	0.085	0.00064	276	3	757.8	5.685
200	-73	0.167	0.00125	280	7	1001	7.513
203	-70	0.259	0.0019	283	10	1228	9.209
206	-67	0.413	0.0031	286	13	1497	11.23
210	-63	0.693	0.0052	290	17	1937	14.53
213	-60	1.08	0.0081	293	20	2337	17.54
216	-57	1.60	0.0120	296	23	2808	21.07
220	-53	2.60	0.0195	300	27	3564	26.74
223	-50	3.93	0.0295	303	30	4242	31.82
226	-47	5.73	0.043	306	33	5029	37.73
230	-43	9.20	0.069	310	37	6274	47.07
233	-40	12.9	0.097	313	40	7378	55.32
236	-37	17.6	0.13	316	43	8638	64.80
240	-33	26.7	0.20	320	47	10610	79.60
243	-30	38.1	0.29	323	50	12330	92.51
246	-27	51.85	0.39	326	53	14290	107.2
250	-23	77.31	0.58	330	57	17310	129.8
253	-20	103.4	0.78	330	60	19910	149.4
256	-17	137.4	1.03	336	63	22840	171.4
260	-13	198.6	1.49	340	67	27320	205.0
263	-10	259.9	1.95	346	73	35420	265.7
266	-7	338.2	2.54	350	77	41870	314.1
270	-3	475.9	3.57	356	83	53400	400.6
273	0	610.4	4.579	360	87	62480	468.7
				366	93	78460	588.6
				370	97	90920	682.1
				373	100	101310	760.0
				374	101	104980	787.6

表 14-33 无机化合物的蒸气压

物 质	分 子 式	相对 分子量	蒸 气 压/Pa(Torr)								熔点 /K	温度测量 范 围 /K
			1.33×10^{-3} (1×10^{-5})	1.33×10^{-2} (1×10^{-4})	1.33×10^{-1} (1×10^{-3})	1.33 (1×10^{-2})	13.3 (1×10^{-1})	133 (1)	1330 (10)	1.01×10^5 (760)		
			温 度 /K									
氯化锂	LiCl	42.40	(491)	(643)	(707)	(784)	(879)	(1002)	1164			
								1056	1205		883	1133~1263
氯化钠	NaCl	58.45	(657)	(712)	(777)	(856)	(652)	(1072)	1227			
								1138	1290	1738	1081	1133~1263
氯化钾	KCl	74.56	732	783	840	908(5)	993	1091				711~870
								1094	1241	1680	1045	855~1024
氯化铷	RbCl	120.94	696	748	807	876	958	(1057)				
								1065	1210	1654	988	831~948
氯化铯	CsCl	168.37	667	715	770	835	910	(1003)				
								1017	1157	1573	919	780~908
氟化锂	LiF	25.94	(829)	886	953	1030	(1120)	(1228)				
								1320	1484	1954	1118	926~1053
氟化钠	NaF	41.99	(910)	969	1036	(1114)	905	1319				
								1350	1513	1977	1268	1207~1348
氟化钾	KF	58.10						1158	1312	1775	1129	
氟化铍	BeF ₂	47.01	(763)	(810)	(866)	(928)	1001	1085				1013~1076
								1044	1152	1432	1076	1076~1241
氟化钙	CaF ₂	78.08	(1268)	(1354)	(1452)	1566	1699	1858	(2048)		1690	1503~1853
氟化铝	AlF ₃	83.98	(873)	(920)	973	1032	1099	1175	1262	1530		980~1123
氟化钍	ThF ₄	308.05	(992)	1055	1125	1205	1298	1411	1554	1924		1055~1297
												1437~1595
溴化锂	LiBr	86.86						1021	1161	1583	820	
溴化钠	NaBr	102.90						1079	1225	1665	1023	
溴化钾	KBr	119.02						1068	1213	1656	1008	
碘化锂	LiI	133.85						996	1114	1444	722	
碘化钠	NaI	149.90						1040	1176	1577	935	
碘化钾	KI	166.01						1018	1160	1597	958	
碘化锆	ZrI	598.86						537	584	704	772	
硫化锌	ZnS	97.45	(866)	950	1056	1186	(1081)					923~1223

第十四章 真空技术常用材料

(续)

物 质	分 子 式	相对 分子 量	蒸 气 压/Pa(Torr)								熔点 /K	温度测量 范 围 /K
			1.33×10^{-3} (1×10^{-5})	1.33×10^{-2} (1×10^{-4})	1.33×10^{-1} (1×10^{-3})	1.33 (1×10^{-2})	13.3 (1×10^{-1})	133 (1)	1330 (10)	1.01×10^5 (760)		
			温 度 /K									
硫化锗	GeS	104.67	(494)	(532)	(576)	(628)	690	766	860		803	706~869
硫化铅	PbS	239.28	(768)	(822)	(884)	(955)	1040	1140	1262			
								1125	1248	1554	1387	1048~1193
氧化铍	BeO	25.01	2070	2207	2365	2546	(2757)	(3007)			2823	2103~2583
氧化镁	MgO	40.32	(1507)	(1595)	(1694)	1806	1933	2080			3073	1773~2173
氧化钙	CaO	56.08	1855	1990	2146	2328	2544	2804			2873	1603~1753
氧化锶	SrO	103.63	1694	(1793)	(1904)	(2030)	(2174)	(2340)				
								2341	2535		2688	1503~1653
氧化钡	BaO	153.36	1423	1536	1668	1825	2014	(2247)			2190	1473~2073
氧化硼	B ₂ O ₃	69.64	(1160)	(1245)	1344	1459	1597	1762	(1967)		723	1331~1808
氧化铝	Al ₂ O ₃	101.96	1676	1786	1910	2055	2222	2418	2653			
								2421	2658	3250	2313	2600~2900
二氧化硅	SiO ₂	60.09	1489	1635	1814	2037	2322	2699	(2005)	(2500)	1983	1601~1754
一氧化硅	SiO	44.09	(1096)	1173	1262	1365	(1487)	(1633)				1173~1428
氧化钍	ThO ₂	264.05	2095	2244	2416	2616	2852	3135			3323	2073~2273
			2244	2389	(2553)	(2740)	(2962)	(3218)			983	
氧化锗	GeO	88.60	1522	1712	1954	2277	2728	3400				
一氧化铅	PbO	223.21	(836)	(889)	(950)	1020	1102	(1197)				
								1216	1358	1745	1161	1055~1153
二氧化碲	TeO ₂	159.61	(752)	(803)	860	827	1004	1103	(1222)		1006	846~1121
三氧化钼	MoO ₃	143.95	(580)	(627)	(682)	(749)	(830)	(930)	(1059)		-	
								1007	1087	1424	1068	1093~1273
三氧化钨	WO ₃	231.86	(1188)	(1242)	(1300)	(1367)	1439	1520	1608		1743	1400~1500
注:在温度栏内附加()的数值,虽然在测量温度域以外,但仍被认为有效												

注:在温度栏内附加()的数值,虽然在测量温度域以外,但仍被认为有效

一、材料的真空性能

表 14-34 各种耐高温材料的蒸气压

材料名称	分子式	到达下列蒸气压的温度/℃							熔点 /℃
		$1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$	$1.3 \times 10^{-2} \text{Pa}$	$1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$	1.3Pa	13.3Pa	133.3Pa	10^5Pa	
钛	Ti	1320	1440	1600	1755	1940	2200	3250	1668
锆	Zr	1540	1650	1820	2010	2220	2510	3700	1830
铪	Hf	—	—	—	—	—	—	>3200	2230
铌	Nb	2194	2355	2539	—	—	—	5000	2410
钼	Mo	1923	2095	2295	2533	2767	3118	4800	2622
钽	Ta	2407	2600	2820	3065	—	—	5500	2996
铼	Re	2504	2717	2966	3259	3555	3940	5900	3172
钨	W	2554	2767	3016	3309	3605	3990	5950	3380
石墨		2126	2300	2470	2677	2926	3200	4500	3900
三氧化二铝	Al ₂ O ₃	1050	1150	1280	1440	1640	1860	3000	2034
氧化铍	BeO	1500	1620	1755	1965	2190	2440	3900	2570
氧化镁	MgO	1040	1130	1260	1410	1600	1800	2900	2672
氧化钍	Th ₂ O	1600	1750	1900	2100	2330	2620	4400	3300
氧化锆	ZrO ₂	—	—	1430	1620	1820	2050	3600	2710
氧化铀	UO ₂	—	—	—	—	—	—	—	2800
氧化锌	ZnO	—	1210	—	—	—	—	—	1975
氧化钡	BaO	1150	1260	1380	1550	1760	2000	3200	1923
氧化锶	SrO	1400	1520	1665	1820	2020	2300	3700	2430
碳化硼	B ₄ C	—	—	—	—	—	—	>3500	2530
碳化钨	HfC	—	—	—	—	—	—	>3500	3887
碳化钽	TaC	—	3100	—	—	—	—	5500	3877
碳化钛	TiC	—	—	—	—	—	—	4300	3137
碳化钨	WC	—	—	—	—	—	—	6000	2870
碳化二钨	W ₂ C	—	—	—	—	—	—	6000	2730
碳化锆	ZrC	—	—	—	—	—	—	5100	3532
	4TaC + 1HfC	—	—	—	—	—	—	—	3942
硼化钨	HfB ₂	—	—	—	—	—	—	—	2964
硼化镧	LaB ₆	1760	1882	2000	2180	—	—	4500	2210
硫化锌	ZnS	870	925	980	1050	1120	1220	—	1850
石英		—	—	—	1220	1380	1830	2227	1710

表 14-35 有机溶剂在 20℃ 时的蒸气压

溶 剂	蒸气压/×133.3Pa	溶 剂	蒸气压/×133.3Pa
丙酮	184.8	乙醇	43.9
苯	74.65	甲醇	96.0
二硫化碳	297.5	乙醚	422.2
四氯化碳	91.0	溴乙烷	386.0
氯仿	159.6		

表 14-36 橡胶、塑料的蒸气压

材 料	$\lg p = A - B/T$		25℃的蒸气压 $p/\times 133.3\text{Pa}$
	A	B	
聚酯	3.09	3000	10^{-7}
赛纶(Saran)	6.4	4200	3×10^{-8}
乙烯基弹性体	11.5	5900	10^{-8}
聚四氟乙烯	4.3	3400	10^{-7}
尼龙	10.0	5600	10^{-9}
哈卡橡胶(Hycar)	19.4	7400	4×10^{-6}
丁基橡胶	11.4	4900	10^{-5}
聚乙烯	7.4	4500	3×10^{-8}

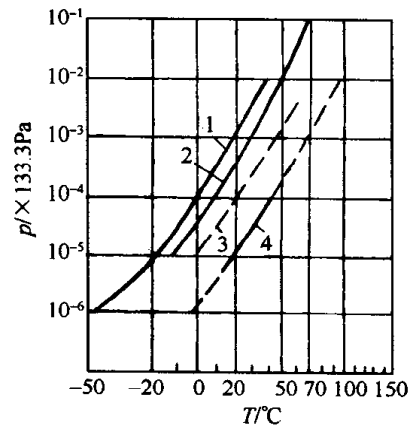


图 14-47 几种橡胶、塑料的蒸气压
1—丁腈橡胶；2—硅橡胶；3—特种真空橡胶(Myvaseal)；4—聚四氟乙烯。

表 14-37 国产真空油脂蒸气压

类别	牌 号	相对 分子量	$\lg p = A - B/T$		25℃的蒸气压 p/Pa	样 品 来 源
			A	B		
扩散 泵油	274 硅油	484	8.5	4760	8.4×10^{-6}	上海树脂厂(1970 年)
	275 硅油	546	11.46	5720	2.4×10^{-6}	上海树脂厂(1974 年)
	275 硅油	546	11.46	5700	3.2×10^{-6}	北京化工院(1973 年)
	276 硅油	640	9.96	5400	9.6×10^{-6}	上海树脂厂(1973 年)
	扩-中-1	434	9.92	4950	3.6×10^{-5}	玉门炼油厂(1965 年)
	扩-轻-1	411	9.57	5000	7.9×10^{-6}	玉门炼油厂(1965 年)
	KS-2 扩散泵油	332	12.18	5400	7.5×10^{-5}	玉门炼油厂(1982 年)
	KS-2 扩散泵油	332	—	—	$2.7\times 10^{-6}(20^\circ\text{C})$	大连石油七厂(1974 年)
	KS-3 扩散泵油	458	9.24	5000	$2.1\times 10^{-6}(20^\circ\text{C})$	大连石油七厂(1974 年)
增压 泵油		330	9.75	4400	$7.2\times 10^{-4}(20^\circ\text{C})$	大连石油七厂(1981 年)
		—	14.81	6380	1.5×10^{-5}	上海炼油厂
		383	11.58	5000	$4.4\times 10^{-4}(20^\circ\text{C})$	玉门炼油厂(1982 年)
真空 封脂	3 号封脂	1500	6.98	4500	6.4×10^{-7}	兰州化学物理所(1971 年)
	4 号封脂	3100	2.63	3330	4.0×10^{-7}	兰州化学物理所(1971 年)
	5 号封脂	5200	4.31	3620	2.7×10^{-6}	兰州化学物理所(1971 年)
真空 泵油	1 号真空泵油	372	11.75	5200	1.3×10^{-4}	玉门炼油厂(1982 年)
	1 号真空泵油	468	9.65	4300	1.3×10^{-3}	兰州石油站(1982 年)
其 它	苯二甲酸二丁酯	278	13.14	5330	2.3×10^{-3}	西安电力电容器厂 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所 兰州化学物理所
	三氯联苯	257	8.01	3300	8.4×10^{-2}	
	聚丙二醇醚	1000	5.46	4350	9.7×10^{-8}	
	季戊四醇酯	557	6.19	3570	2.1×10^{-4}	
	萘二酸二辛酯	426	8.31	4350	6.8×10^{-5}	
	萘二酸二异辛酯	426	8.24	4350	5.9×10^{-5}	
	邻苯二甲酸二丁酯	278	10.64	4650	1.5×10^{-3}	
	邻苯二甲酸二壬酯	—	9.37	4650	7.9×10^{-5}	
	邻苯二甲酸二苄酯	346	6.13	3600	1.8×10^{-4}	
	双乙—乙基己基己二酸酯	323	8.69	4200	5.2×10^{-4}	
	邻酸二甲酯	352	11.97	5500	7.9×10^{-5}	

表 14-38 国外扩散泵、增压泵油蒸气压

类别	名称	化学成分	相对分子量	25℃ 密度	蒸发热/ 4.186kJ ·mol ⁻¹	log p = A - B/T		达到下列之蒸气压时温度/℃					25℃蒸气压 /×133.3Pa	极限真空 /×133.3Pa	备注
						A	B	1.3× 10 ⁻⁴ Pa	1.3× 10 ⁻³ Pa	1.3× 10 ⁻¹ Pa	1.3Pa	133.3Pa			
碳氢化合物混合物	阿皮松 A(列依鲍尔德 D 或 G)	石油馏分	414	0.85	[22.3]	[10.7]	[4860]	20	37	82	110	186	2×10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	扩散-增压泵
	阿皮松 B(列依鲍尔德 E 或 H)	石油馏分	468	0.865	22.1 [22.9]	9.91 [10.5]	4831 [5000]	—	—	97	—	214 206	[4.8×10 ⁻⁷] 4×10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	
	阿皮松 C	石油馏分	574	0.872 0.881	22.0 27.1	9.21 11.67	4808 5925	—	—	119 131	—	246 235	[1.1×10 ⁻⁷] 1×10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	
	阿皮松 G	石油馏分	—	0.877	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁶	—	扩散-增压泵
	阿皮松 AW	石油馏分	414	0.875	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁵	—	
	阿皮松 BW	石油馏分	468	0.872	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁷	—	
	阿皮松 GW	石油馏分	445	0.877	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁶	—	
	柯里芬 A30	碳氢加氯	—	—	[18.35]	10.05	4005	—	—	—	—	—	[4.2×10 ⁻⁴]	—	
	柯里芬 A40	碳氢加氯	—	—	[18.95]	10.05	4135	—	—	—	—	—	[1.4×10 ⁻⁴]	—	
	柯里芬 A50	碳氢加氯	—	—	[19.93]	10.15	4350	—	—	—	—	—	[3.6×10 ⁻⁵]	—	
	171-Dist	阿皮松 B 的分馏物	—	—	[24.6]	[11.2]	[5380]	42	60	106	135	213	9×10 ⁻⁸	—	
	马依凡 10	石油馏分	250	0.868	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁶	
	马依凡 20(埃马克 A)	石油馏分	326	0.853	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10 ⁻⁶	
	里东 C	石油馏分	—	0.877	[24.3]	[11.1]	[5300]	38	57	103	132	209	1.4×10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	
	莱昂 A	烷基苯(C=16~18)	350	0.903	22.6	10.24	4950	—	—	101	—	210	[4.4×10 ⁻⁷]	10 ⁻⁷	
	NeoVac MD350	石油馏分	360	0.887	18.9	8.62	4132	—	—	82	—	206	[5.5×10 ⁻⁶]	10 ⁻⁶	增压泵
	NeoVac MD400	石油馏分	410	0.878	20.0	8.48	4349	—	—	106	—	240	[6.2×10 ⁻⁷]	10 ⁻⁷	增压泵
	NeoVac MD250	石油馏分	260	0.853	14.5	7.90	3165	—	—	17	—	127	2×10 ⁻³	10 ⁻³	
	NeoVac ME300	石油馏分	300	0.872	18.4	8.96	4016	—	—	63	—	175	3×10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	
	Д11А(ВМ-1)	石油馏分	470	0.887	20.8	10.55	4440	—	—	—	—	—	4.5×10 ⁻⁵	—	
	Diffoil61	石油馏分	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2~40×10 ⁻⁹ <3×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁶	

(续)

类别	名 称	化学成分	相对分 子量	25℃ 密度	蒸发热/ 4.186kJ ·mol ⁻¹	log p = A - B/T		达到下列之蒸气压力时温度/℃					25℃ 蒸气压 /×133.3Pa	极限真空 /×133.3Pa	备注
						A	B	1.3× 10 ⁻⁴ Pa	1.3× 10 ⁻³ Pa	1.3× 10 ⁻¹ Pa	1.3Pa	133.3Pa			
酯	邻苯二甲酸二乙酯(DEP)	C ₆ H ₄ (COOC ₂ H ₅) ₂	222	1.118	16.0	9.15	3509	—	—	16	—	110	[1.5×10 ⁻⁴]	10 ⁻⁸	增压泵
	邻苯二甲酸二丁酯 (DBP)	C ₆ H ₄ (COOC ₄ H ₉) ₂	278	1.047	21.5	11.215	4680	-1	15	56	81	144	3.3×10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	
					[23.5]	12.59	5120	2	18	55	78	134	2.5×10 ⁻⁵	—	
					[21.2]	11.05	4625	4	20	57	81	145	2.0×10 ⁻⁵	—	
					[21.9]	11.50	4780	6	17	57	81	143	2.9×10 ⁻⁵	—	
	癸二酸二丁酯	C ₈ H ₁₆ (COOC ₄ H ₉) ₂	314	0.933	17.7	9.25	3876	—	—	43	—	146	[8.5×10 ⁻⁶]	—	
					[24.0]	12.88	5240	—	—	—	—	[3.2×10 ⁻⁵]	—		
	奥克脱依耳(纳克依耳 30, DOP)	C ₈ H ₁₆ (COOC ₈ H ₁₇) ₂	390	0.983	—	—	—	—	—	—	90	—	3.7×10 ⁻⁶	1~2×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁵
					—	—	—	—	—	—	—	—	1×10 ⁻⁵	—	
					—	—	—	—	—	—	—	—	2×10 ⁻⁵	—	
22.0					10.30	4808	—	—	88	—	194	[1.4×10 ⁻⁶]	10 ⁻⁷		
奥克脱依耳 S(纳克依耳 20, DOS)	C ₈ H ₁₆ (COOC ₈ H ₁₇) ₂	426	0.910	25.6	12.12	5590	35	54	97	123	188	2.3×10 ⁻⁷	—		
				23.8	11.15	5205	35	53	95	128	194	2.2×10 ⁻⁷	—		
				[22.3]	10.00	4870	31	52	102	133	214	4.6×10 ⁻⁷	—		
				[27.1]	13.10	5920	—	—	—	—	10 ⁻⁷	—			
纳克依耳 10	C ₈ H ₁₆ (COOC ₇ H ₁₅) ₂	418	0.973	22.3	10.02	4878	—	—	101	—	213	[4.3×10 ⁻⁷]	10 ⁻⁸		
				25.2	11.26	5514	50	68	114	142	215	2×10 ⁻⁸	—		
				[29.5]	13.54	6434	50	74	116	141	205	9×10 ⁻⁸	—		
				[27.4]	12.50	6000	—	—	—	—	1.5×10 ⁻⁸	—			
阿莫依耳 阿莫依耳 S b-S(DBZS)	C ₆ H ₄ (COOC ₃ H ₇) ₂	306	1.019	27.2	12.88	5936	41	—	100	—	188	6×10 ⁻⁸	—		
				[27.2]	12.95	5950	—	—	—	—	5×10 ⁻⁸	—			
				21.1	10.60	4610	5	22	66	93	162	1.3×10 ⁻⁵	10 ⁻⁵		
				23.7	11.40	5190	25	43	87	114	182	1×10 ⁻⁶	10 ⁻⁶		
醚	克瓦莱克斯 10 蒙山特 OS-124(纳克依耳 50)	聚苯醚混合物	447	1.199	28.9	12.78	6320	64	82	128	155	222	4×10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	
					—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	间二苯氧基苯基醚	C ₆ H ₅ OC ₆ H ₄ OC ₆ H ₄ — —OC ₆ H ₄	354	—	25.3	9.97	5525	—	—	152	—	281	≈10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	
					25.3	10.00	5525	—	—	152	—	279	5×10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	
	间二苯氧基苯氧基苯 混合五苯基醚	C ₆ H ₅ O(C ₆ H ₅ O) ₃ C ₆ H ₅	447	—	[22.5]	[9.83]	[4920]	38	59	109	143	228	2×10 ⁻⁷	—	4.5×10 ⁻¹⁰
					28.2	11.0	6120	85	109	165	200	285	3.0×10 ⁻¹⁰	—	
间二苯氧基苯基聚苯醚	C ₆ H ₅ O(C ₆ H ₅ O) ₄ C ₆ H ₅	539	—	25.0	9.7	5450	73	100	159	193	285	1.7×10 ⁻⁹	—	—	
				32.7	12.1	7140	125	150	210	236	323	8.5×10 ⁻¹³	—	—	

(续)

类别	名称	化学成分	相对分子质量	25℃ 密度	蒸发热/ 4.186kJ ·mol ⁻¹	log p = A - B/T		达到下列之蒸气压力时温度/℃					25℃ 蒸气压 /×133.3Pa	极限真空 /×133.3Pa	备注
						A	B	1.3× 10 ⁻⁴ Pa	1.3× 10 ⁻³ Pa	1.3× 10 ⁻¹ Pa	1.3Pa	133.3Pa			
硅油	DC701	苯基甲基聚硅氧烷	—	1.027	18.3	[11.41]	[4810]	—	—	—	—	148	1.9×10 ⁻⁵	—	
	DC702	苯基甲基聚硅氧烷	530	1.027	22.0	10.42	4820	20	—	86	—	189	[1.7×10 ⁻⁷]	10 ⁻⁷	
	DC703	苯基甲基聚硅氧烷	570	1.087	23.8	10.02	5210	52	—	127	—	247	[3.3×10 ⁻⁸]	—	
	DC704	四苯基四甲基三硅氧烷	484	1.063	25.5	11.03	5570	54	76	124	—	232	4×10 ⁻⁸	—	
	DC705	五苯基三甲基三硅氧烷	546	1.095	24.6	11.02	5376	—	—	111	—	215	[3.4×10 ⁻⁸]	10 ⁻⁸	
	DC-XF4660		—	1.20	26.1	11.49	5700	—	—	—	—	—	3×10 ⁻⁸	—	
	聚硅氧烷 x = 12		[1052]	—	28.2	12.31	6490	81	—	151	—	253	[3.2×10 ⁻¹⁰]	—	
	聚硅氧烷 x = 13		[1126]	—	27.9	11.65	6098	—	—	143	—	250	4×10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	
	聚硅氧烷 x = 14		[1210]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<10 ⁻⁹	—	
	聚硅氧烷 x = 15	(CH ₃) ₃ SiO[Si	[1275]	—	[24.5]	11.60	5350	—	152	93	49	—	4.4×10 ⁻⁷	—	
卤化联苯	阿若氯 1254	(CH ₃) ₂ O] _x ·Si(CH ₃) ₃	[1349]	—	[26.1]	12.04	5710	—	165	107	62	—	7.6×10 ⁻⁸	—	
	纳克依耳 10		[1423]	—	[27.8]	12.48	6070	—	177	119	81	—	1.3×10 ⁻⁸	—	
	(可伐赫罗尔 12)		[1497]	—	[29.4]	12.93	6430	—	189	131	86	—	2.2×10 ⁻⁹	—	
	(卡尼氯 500 中间馏分)		—	—	[31.1]	13.37	6790	—	200	142	97	—	3.8×10 ⁻¹⁰	—	
	卡尼氯 300		—	—	[32.7]	13.81	7150	—	210	152	107	—	6.5×10 ⁻¹¹	—	
	卡尼氯 400		—	—	[34.3]	14.25	7510	—	219	162	117	—	1.2×10 ⁻¹¹	—	
	五氯联苯		326	1.54	[22.3]	[11.24]	[4880]	10	27	67	93	161	8×10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	增压泵
	五氯联苯		326	1.538	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5×10 ⁻⁴	—	
	五氯联苯		326	1.538	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5×10 ⁻⁴	—	
	五氯联苯		326	1.52	17.0	8.67	3731	—	—	47	—	158	[1.4×10 ⁻⁴]	—	
磷酸酯	三氯联苯		—	1.375	15.0	[8.28]	[3280]	—	—	—	—	123	[1.9×10 ⁻³]	—	
	四氯联苯		—	1.454	16.3	[8.66]	[3560]	—	—	—	—	138	[5.1×10 ⁻⁴]	—	
	磷酸对三苯甲酯		368	—	27.8	12.89	6088	50	67	110	136	199	9×10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	
	p-TCP(p-cr)	磷酸间三苯甲酯	368	—	27.1	12.22	5926	52	71	116	144	212	2×10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	
	Cellulube 220	三芳基磷酸酯	—	1.141	26.4	11.61	5780	—	—	123	—	225	≈5×10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	

注:加方括号的数据系编者推算

表 14-39 真空泵油的性能

油 名	化学名	相对分子量	密度(20℃)	蒸气压力/ $\times 133.3\text{Pa}$		蒸气压常数 A, B	蒸发热 / $4.186\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	最高到达压力 / $\times 133.3\text{Pa}$	适用泵
				-25℃	25℃				
Apiezon-A	石油馏分	414	0.87	$<10^{-6}$	5×10^{-6}			$3\times 10^{-5}(\text{II})$	B
Apiezon-B	石油馏分	468	0.92	3×10^{-8}	5×10^{-7}	9.91, 4831 ($10\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$)	22.1	$2\times 10^{-6}(\text{I})$	D
Apiezon-C	石油馏分	574	0.872(25℃)		10^{-8}	11.67	28.2	$6\times 10^{-6}(\text{II})$ $6\sim 7\times 10^{-8}(\text{II})$	D
Apiezon-BW	石油馏分	472	0.92		5×10^{-7}	5925		$10^{-8}(\text{II})$	D
Apiezon-G(GW)	石油馏分	(453)			$<10^{-6}$			$6\times 10^{-6}(\text{II})$ $10^{-6}(\text{II})$	D
Electronoil-A	石油馏分							$5\times 10^{-6}(\text{II})$	B
Electronoil-B	石油馏分							$3\times 10^{-7}(\text{I})$	D
NeovacME-250	石油馏分		0.853(25℃)				14.5	$10^{-4}\sim 10^{-5}$ (II)	E
NeovacME-300	石油馏分		0.872(25℃)				18.4	$10^{-5}(\text{II})$	B, E
NeovacMD-350	石油馏分	360	0.887(25℃)				18.8	$10^{-6}(\text{II})$	D
NeovacMD-400	石油馏分	400	0.878(25℃)				20.0	$10^{-7}(\text{II})$	D
Sandifue-DE	石油馏分		0.844(25℃)			($16^\circ\text{C}\sim 230^\circ\text{C}$) 7.605, 3289		8×10^{-5}	E
Sandifue-DB	石油馏分		0.886(25℃)			—		$1\times 10^{-5}(\text{I})$	B
Sandifue-DH	石油馏分		0.880(25℃)					$3\times 10^{-7}(\text{I})$	D
狮牌增压泵油	萘类		0.932(25℃)			($16^\circ\text{C}\sim 220^\circ\text{C}$) 10.240, 4464	20.4	$5\times 10^{-5}(\text{II})$	B
狮牌扩散泵油-A	B己葵 或辛葵	350	0.903(25℃)		1.3×10^{-7}	($208^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$) 9.840, 4785	21.9	$2\times 10^{-7}(\text{I})$ $5\times 10^{-7}(\text{II})$	D
狮牌扩散泵油-B	烷葵							$10^{-6}(\text{II})$	D
Narcooil-10	五氯化二苯	326	1.54(25℃)	10^{-8}	10^{-5}	($170^\circ\text{C}\sim 235^\circ\text{C}$) 8.670, 3731	17.0	$2\times 10^{-5}(\text{II})$	B
Arochlor-1254	五氯化二苯							$2\times 10^{-5}(\text{II})$	B
D.E.P	苯二甲酸 二乙酯	222	1.12				16.04	$1\times 10^{-4}(\text{II})$	E
n. C. B. P	苯二甲酸	278	1.047	$<10^{-7}$	10^{-5}	($50^\circ\text{C}\sim 105^\circ\text{C}$) 10.58, 4450	20.3	$4\times 10^{-5}(\text{I})$	E, D
	二 n 丁酯					($40^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$) 12.88, 5240	24.0	$4\times 10^{-5}(\text{I})$	
	苯二甲酸					($142^\circ\text{C}\sim 190^\circ\text{C}$) 9.242, 3876			
	二 n 丁酯						17.7	$4\times 10^{-5}(\text{I})$	

(续)

油 名	化学名	相对分子量	密度(20℃)	蒸气压/ $\times 133.3\text{Pa}$		蒸气压常数 A, B	蒸发热 / $4.186\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	最高到达压力 / $\times 133.3\text{Pa}$	适用泵
				-25℃	25℃				
酯 类	n. D. B. S	314	0.933	10^{-9}	1.5×10^{-5}	(60℃~120℃) 11.10, 4850 (55℃~110℃)	22.2	$7 \times 10^{-5}(\text{I})$	B
	Amoil	306	1.019	10^{-8}	1.7×10^{-5}	(55℃~110℃) 10.57, 4560 (80℃~135℃)	20.9	$7 \times 10^{-6}(\text{I})$	B
	Amoil-S	343	0.925	$< 10^{-9}$	1×10^{-6}	(80℃~135℃) 11.42, 5180 (75℃~140℃)	23.7	$2 \times 10^{-6}(\text{I})$	D
	octoil (D. E. H. P)	390	0.980		2×10^{-7}	(75℃~140℃) 11.62, 5440 (105℃~245℃)	24.9	$2 \times 10^{-7}(\text{I})$	D
	octoil (D. E. H. P)					(105℃~245℃) 10.31~4808 (110℃~170℃)	22.0		
	octoil-s (D. E. H. S)	426	0.91		2×10^{-8}	(110℃~170℃) 11.90, 5780 (70℃~150℃)	26.4	$5 \times 10^{-8}(\text{I})$	D
						(70℃~150℃) 12.50, 6000 (208℃~250℃)	27.4	$2 \times 10^{-6}(\text{II})$	D
	P. T. C. P	388			2×10^{-8}	(100℃~170℃) 11.12, 5480 (90℃~150℃)	22.3	$< 10^{-6}(\text{II})$	D
	P. T. C. P					(90℃~150℃) 12.223, 5926 (90~150℃)	21.1	$1 \times 10^{-6}(\text{II})$ $7 \times 10^{-7}(\text{II})$	D D
	m. T. C. D T. X. P	368			9×10^{-8}	13.982, 5373			
		414							
硅 类	DC-701		1.027(25℃)			(101~210℃) 0.500, 4000 (85~140℃)	18.3		E
	DC-702	550	1.07	$< 10^{-7}$	2×10^{-6}	(85~140℃) 10.42, 4820 (115~160℃)	22.0	$2 \times 10^{-7}(\text{I})$	D, DE
	DC-703	570	1.09	$< 10^{-9}$	6×10^{-8}	(115~160℃) 18.02, 5210 10.02, 5570	23.8	$5 \times 10^{-8}(\text{I})$	D
	DC-704[二]	484	1.063(25℃)		2×10^{-9}		25.5	$5 \times 10^{-8}(\text{II})$	D
	DC-705[二] Silikolen-mol Silikolen-ultra	546	1.092		4×10^{-10}	12.31, 6490 (66~100℃)	28.2 33.0	$5 \times 10^{-8}(\text{II})$ $2 \times 10^{-8}(\text{II})$	D D

注: I—玻璃泵; I'—级玻璃泵; II—金属分馏泵; II'—级金属泵; D—扩散泵; DE—扩散喷射泵; B—增压泵; E—喷射泵

表 14-40 HFV 系列油的主要物理特性^①

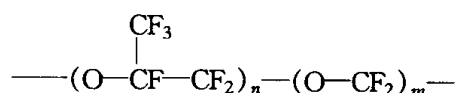
类型	名 称	牌号 HFC—	蒸气压 /Pa(60℃)	运动粘度 /mm ² ·s ⁻¹ (40℃)范围	闪点(开口) /℃≥	粘度指数 ≥	备 注
矿物油型	高真空油	M100	5×10^{-3}	41.4~50.6	225	100	油水分离性极强,不易乳 化,直联高速真空泵、增 压泵
		M200	5×10^{-4}	61.2~74.8	240		
		M250	5×10^{-5}	90~110	250		
	高温高 负荷真 空泵油	A100	5×10^{-3}	41.4~50.6	225		最高使用温度达 120℃, 各类真空泵、增压泵
		A200	5×10^{-4}	61.2~74.8	240		
		A250	5×10^{-5}	90~110	250		
	真空 泵油	46	6.7×10^{-3}	41.4~50.6	220	95	优级品真空泵
		68	6.7×10^{-4}	61.2~74.8	230		
		100	1.3×10^{-4}	90~110	240		
		22	5×10^{-3}	19.8~24.2	200	100	小型单极泵,直联泵
		32		28.8~35.2	200		
		150	4×10^{-4}	145~165	255	90	30L~70L 真空泵、滑阀 泵及更大真空泵
		220		198~242	260		
合成油型	酯类真 空泵油	ZS46	1×10^{-3}	41.4~50.6	265	130	直联真空泵
		ZS68		61.2~74.8	275		
	高低温真 空泵油	WS32	5×10^{-4}	28.8~35.2	200	75	适用于 -25℃~100℃ 真 空泵;及特殊气体如 N ₂ HeH ₂ 等
		WS68		61.2~74.8	200	90	
矿物油型	扩散泵油	K46	$1.5 \times 10^{-6}(20^\circ\text{C})$	19.8~24.2	220	100	高真空扩散泵工作液
		K68	$1 \times 10^{-6}(20^\circ\text{C})$	28.8~35.2	230		
		K100	$5 \times 10^{-7}(20^\circ\text{C})$	90~110	250		
		K150	$1 \times 10^{-7}(20^\circ\text{C})$	135~165	270		
合成油型	扩散泵硅油	KS275	$4.5 \times 10^{-8}(25^\circ\text{C})$	45~55	243	—	超高真空扩散泵工作液, 不易氧化
	分子泵油	FS22	5×10^{-4}	19.8~24.2	261		高速真空泵的润滑
矿物油型	增压泵油	Z22	1×10^{-3}	19.8~24.2	180	105	高速转动的增压泵,蒸气 流增压泵及转速为 2000 转以下的机械增压泵
		Z32	9×10^{-4}	28.8~35.2	200		
		Z46	1.2×10^{-4}	41.4~50.6	210		
		Zk46	5×10^{-4}	41.4~50.6	210	—	适用真空冶炼等装置的 抽气设备
		Zk68		61.2~74.8	270		
	真空 淬火油	CZ1	$3 \times 10^{-3}(20^\circ\text{C})$	32~42	180	—	适用轴承钢、工模具、刀 具、特种钢及真空下的淬 火
		CZ2		80~90	220		

(续)

类型	名 称	牌号 HFC—	蒸气压 /Pa(60℃)	运动粘度 /mm ² ·s ⁻¹ (40℃)范围	闪点(开口) /℃≥	粘度指数 ≥	备 注
矿物油型	真空密封油	MF150	1.3×10^{-1} (20℃)	145~165	260	—	密封与润滑
		MF220		198~242	270		
		MF320		298~352	270		
		MF460		414~506	270		
		MF680		712~748	270		
		MF1000		900~1100	280		
类型	名 称	牌号 HFC—	蒸气压 /Pa(60℃)	相对分子量	滴点/℃≥	锥度 0.1mm (150g, 25)	备 注
合成油型	高低温真空密封脂	GS2	2×10^{-6}	1000	330	265	使用温度: - 50℃ ~ 300℃密封与润滑
	真空密封脂	GS1	2×10^{-6}	1000	60	180	密封, 润滑

注:①上海惠丰石油化工公司生产,其它特性参考产品介绍

全氟醚油(Fomblin)是由碳、氟和氧组成的化合物,它不含氢和硅,其分子链结构式为:



Fomblin 油裂解时,不会使表面有任何的污染反应,既不会生成碳氢化合物和氢,也不会生成硅化物。该油与大多数腐蚀性化学品不起反应,而这些化学品能够以气态和蒸气态被抽掉。

Fomblin 油具有低的蒸气压和良好润滑特性,适合于需要清洁真空和低挥发性的场合,能够满足各种机械泵、涡轮分子泵以及罗茨泵的要求(Fomblin Y-L Vac 泵油,绿标牌)。分馏物的相对分子量范围窄和极低的蒸气压的油,适用于蒸气流泵(Fomblin Y-H Vac 泵油,红标牌)。

Y-Vac(商标号)泵油具有许多独特的性质。

表 14-41、表 14-42 分别是该油的主要物理特性及典型的真空性能。

表 14-41 Fomblin Y-LVac 油的主要物理特性

牌 号	运动粘度范围 /m ² ·s ⁻¹ (20℃)	蒸气压/Pa		气化热 /J·g ⁻¹ (200℃)	凝点/℃	平均相对 分子量	应 用
		(20℃)	(100℃)				
Y-L Vac06/6	$6 \times 10^{-2} \pm 10\%$	$\leq 2 \times 10^{-6}$	$\leq 5 \times 10^{-3}$	—	- 50	1800 ± 100	涡轮分子泵
Y-L Vac25/5	$2.7 \times 10^{-4} \pm 7.4\%$	$\leq 2 \times 10^{-8}$	$\leq 2 \times 10^{-3}$	—	- 35	3300 ± 150	粗抽机械泵
Y-H Vac18/8	$1.8 \times 10^{-1} \pm 11\%$	$\leq 2 \times 10^{-8}$	$\leq 2 \times 10^{-4}$	37.7	- 42	2800 ± 150	扩散泵 涡轮分子泵 机械泵(清洁真空)
Y-H Vac25/9	$2.7 \times 10^{-4} \pm 13.5\%$	$\leq 2 \times 10^{-9}$	$\leq 2 \times 10^{-5}$	29.3	- 35	3300 ± 150	扩散泵

注:该油的密度(20℃), $1.9 \pm 0.02 \cdot \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; 表面张力(20℃), $2 \times 10^{-2} \text{N/m}$; 热容(20℃), $1 \text{J/g} \cdot \text{K}$; 热导率(20℃ ~ 150℃), $(8.8 \pm 0.1) \times 10^{-4} \cdot \text{J} \cdot \text{cm/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}$

表 14-42 Fomblin Y-L Vac 油的典型的真空性能

设 备 特 性		牌 号	Fomblin Y-L Vac		
			25/5	18/8	25/9
机械泵	极限压力/Pa		$(3\sim 7)\times 10^{-1}$		
扩 散 泵	极限压力/Pa				
	没有冷却障板			$\leq 2\times 10^{-5}$	$\leq 2\times 10^{-5}$
	水冷却障板			$\leq 2\times 10^{-6}$	$\leq \times 10^{-6}$
	抽速的稳定性 (%, 对空气在 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$)			1.2	1.5
	抽速(对空气, %与一般油对比)			90~100	80~90
	临界前级压力/Pa			53~133	27~67
	蒸气返流(在 360h 抽气之后)			极小	极小

4. 蒸发(升华)速率

蒸发速率即单位时间内单位面积的蒸发量,可用下式求出。在实际蒸镀中,蒸发速率必须在 $10^{-4}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}\sim 10^{-1}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 范围内。

$$a_v = 4.37 \times 10^{-4} p_s \sqrt{\frac{M_d}{T}} \quad (14-13)$$

式中 a_v ——理想条件下的单位面积蒸发速率 [$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$];

p_s ——温度为 T 时的饱和蒸气压(见表 14-31) [Pa];

M_d ——蒸发分子的摩尔质量 [g/mol];

T ——蒸发表面的热力学温度 [K]。

表 14-43 给出了几种物质为了得到蒸发速率所需的温度值。真空管用各种材料的蒸发速率见表 14-44。

表 14-43 几种物质的蒸发速率与相应的温度 T

(单位:K)

名 称	相对原子量	密度 / $10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$a_v = 10^{-4}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-3}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-2}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-1}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$
Ag	107.9	10.49	1 170	1 300	1 410	1 580
Al	26.98	2.69	1 310	1 430	1 580	1 770
Au	197.0	18.88	1 550	1 700	1 890	2 100
B	10.82	2.53	1 540	1 660	1 820	1 990
Ba	137.4	3.5	785	875	980	1 085
Be	9.013	1.85	1 440	1 560	1 720	1 900
Bi	209.0	9.78	835	915	1 020	1 140
C	12.01	2.25	2 800	3 000	3 320	3 650
Ca	40.08	1.55	785	870	965	1 070
Cd	112.4	8.65	470	520	570	630
Ce	140.1	6.90	1 420	1 540	1 690	1 870
Co	58.94	8.71	1 760	1 920	2 100	2 340
Cr	52.01	7.14	1 340	1 450	1 590	1 770
Cs	132.9	1.87	358	400	450	512

一、材料的真空性能

(续)

名 称	相对原子量	密度 / $10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$a_v = 10^{-4}\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	$a_v = 10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
Cu	63.54	8.93	1 400	1 530	1 690	1 880
Fe	55.85	7.86	1 580	1 710	1 870	2 060
Ga	69.72	5.93	1 210	1 340	1 500	1 700
Ge	72.60	5.46	1 350	1 500	1 660	1 900
Hg	200.6	14.19		303	331	371
Ir	192.2	22.42	2 550	2 780	3 010	3 350
K	39.10	0.87	421	465	523	595
La	138.9	6.15	1 470	1 620	1 780	1 980
Li	6.94	0.534	715	803	910	1 030
Mg	24.32	174	643	705	780	875
Nn	54.94	7.3	1 130	1 240	1 370	1 510
Mo	95.95	9.01	2 550	2 790	3 100	3 450
Na	22.99	0.971	502	554	623	703
Ni	58.71	8.8	1 640	1 780	1 940	2 140
Os	190.2	22.5	2 650	2 870	3 140	3 450
Pb	207.2	11.34	855	950	1 050	1 180
Pd	106.4	12.16	1 630	1 800	1 990	2 240
Pt	195.1	21.37	2 120	2 310	2 520	2 800
Rb	85.48	1.53	278	422	467	528
Rh	102.9	12.44	2 210	2 400	2 630	2 900
Ru	101.1	12.1	2 480	2 690	2 920	3 230
Se	44.96	(3.02)	1 520	1 690	1 870	2 090
Si	28.09	2.42	1 500	1 630	1 790	1 970
Sn	118.7	7.29	1 270	1 410	1 600	1 830
Sr	87.63	2.60	715	790	887	995
Ta	180.9	16.6	3 020	3 320	3 600	
Th	232.0	11.00	2 210	2 410	2 650	2 940
Ti	47.90	4.5	1 630	1 810	2 010	2 280
Tl	204.4	11.86	750	830	920	1 040
U	238.1	18.7	1 930	2 110	2 320	2 570
V	50.95	5.87	1 990	2 160	2 380	2 610
W	183.8	19.3	3 230	3 550	3 880	
Zn	65.38	6.92	540	590	650	730
Zr	91.22	6.44	2 040	2 240	2 460	2 720

表 14-44 用在真空管中的各种材料的蒸发速率

(单位: $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)

T/K	T/°C	W	Ta	Mo	Pt	Pe	Ni	Cu	Ag	Ba
700	427					1.25×10^{-20}	8.41×10^{-21}	1.16×10^{-18}	3.26×10^{-15}	1.7×10^{-3}
800	527				1.29×10^{-26}	3.17×10^{-17}	7.35×10^{-17}	1.64×10^{-15}	1.64×10^{-12}	9.1×10^{-7}
900	627				7.21×10^{-23}	1.38×10^{-14}	1.08×10^{-14}	3.64×10^{-13}	2.10×10^{-10}	2.0×10^{-3}
1000	727			1.37×10^{-24}	6.70×10^{-20}	6.70×10^{-12}	1.42×10^{-12}	3.96×10^{-11}	9.97×10^{-9}	2.5×10^{-4}
1100	827		1.33×10^{-28}	9.77×10^{-22}	1.81×10^{-17}	9.35×10^{-11}	7.48×10^{-11}	1.51×10^{-9}	2.29×10^{-7}	1.9×10^{-3}
1200	927	8.2×10^{-28}	1.27×10^{-25}	2.44×10^{-19}	2.06×10^{-15}	2.43×10^{-9}	2.00×10^{-9}	3.11×10^{-8}	3.13×10^{-6}	1.0×10^{-2}
1300	1027	3.16×10^{-25}	4.18×10^{-23}	2.53×10^{-17}	9.73×10^{-14}	3.89×10^{-8}	3.19×10^{-8}	3.94×10^{-7}		4.3×10^{-2}
1400	1127	1.26×10^{-23}	6.04×10^{-21}	1.29×10^{-15}	2.92×10^{-12}	4.04×10^{-7}	3.38×10^{-7}	3.5×10^{-6}	1.6×10^{-4}	0.15
1500	1227	7.83×10^{-21}	4.5×10^{-19}	3.81×10^{-14}	5.23×10^{-11}	3.04×10^{-6}	2.55×10^{-6}			0.43

(续)

T/K	T/°C	W	Ta	Mo	Pt	Pe	Ni	Cu	Ag	Ba
1600	1327	4.36×10^{-19}	1.95×10^{-17}	7.6×10^{-13}	6.56×10^{-10}	1.74×10^{-5}	1.46×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.9×10^{-3}	1.1
1700	1427	1.51×10^{-17}	5.45×10^{-16}	1.05×10^{-11}	6.18×10^{-9}	8.11×10^{-5}	6.82×10^{-5}			2.5
1800	1527	3.52×10^{-16}	1.05×10^{-14}	1.06×10^{-10}	4.42×10^{-8}	3.08×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.4×10^{-3}	2.6×10^{-2}	5.2
1900	1627	5.92×10^{-15}	1.36×10^{-13}	7.52×10^{-10}	2.57×10^{-7}					10.0
2000	1727	7.48×10^{-14}	1.60×10^{-12}	5.34×10^{-9}	1.24×10^{-6}	2.9×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.1×10^{-2}	1.5×10^{-1}	18.0
2100	1827	7.43×10^{-13}	1.38×10^{-11}	2.82×10^{-8}						
2200	1927	6.00×10^{-12}	9.78×10^{-11}	1.30×10^{-7}	1.7×10^{-5}	2.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	5.9×10^{-2}	6.0×10^{-1}	
2300	2027	4.03×10^{-12}	5.88×10^{-10}	5.00×10^{-7}						
2400	2127	2.31×10^{-11}	3.04×10^{-9}	1.80×10^{-6}	1.5×10^{-4}	6.9×10^{-2}	5.0×10^{-2}	2.3×10^{-1}	1.9	
2500	2227	1.16×10^{-9}	1.37×10^{-8}	5.62×10^{-6}						
2600	2327	5.07×10^{-9}	5.54×10^{-8}	1.57×10^{-5}	8.5×10^{-4}	2.2×10^{-1}	1.6×10^{-1}	7.3×10^{-1}		
2700	2427	2.01×10^{-8}	2.00×10^{-7}	4.18×10^{-5}						
2800	2527	7.20×10^{-8}	6.61×10^{-7}	1.04×10^{-5}	4.0×10^{-3}					
2900	2627	2.36×10^{-7}	2.00×10^{-6}	2.35×10^{-4}						
3000	2727	7.15×10^{-7}	5.79×10^{-6}	5.00×10^{-4}						
3100	2827	2.01×10^{-6}	1.51×10^{-5}							
3200	2927	5.32×10^{-6}	3.82×10^{-5}							
3300	3027	1.27×10^{-5}								
3400	3127	3.13×10^{-5}								
3500	3227									
3600	3327									

二、真空材料

(一) 壳体材料

对真空设备壳体材料的主要要求如下：

- ①一定的机械强度；
- ②气密性好，不应是多孔结构，不能有裂缝、小孔以及能造成漏气的其它缺陷；
- ③较低的出气速率和渗透速率；
- ④在工作温度和烘烤温度下的饱和蒸气压要足够低；
- ⑤化学稳定性好，不易氧化和腐蚀，不与系统中的工作液体（如油、汞）起化学作用；
- ⑥温度稳定性好，在一定温度范围内能保持其真空性能及机械强度；
- ⑦加工容易，有较好的焊接性能，价格便宜。

常用壳体材料有两大类：金属和玻璃。金属的优点是：机械强度好；容易实现高精度的加工。玻璃的优点是：透明，便于观察设备内部情况；电绝缘；可对内部的金属零件用高频加热的方法除气；能用高频火花枪检漏；加工方便等。玻璃的缺点是质脆易碎。

1. 金属及合金

金属真空壳体材料主要有以铁、铜、铝为基础的金属及合金。如：低碳钢、不锈钢、无氧铜、紫铜、铝以及覆铝、铜、镍的钢或铁材。其中不锈钢耐锈蚀，有较低的出气速率，是常用的优良的超高真空壳体材料。氢在铝中的扩散速率低，故烘烤后的出气速率低，是今后有希望发展的超高真空壳体材料。

金属的物理性能见表 14-45。常用合金的性质见表 14-46。常用钢的成分、物理与机械性能见表 14-47、表 14-48。铜、铝的物理、机械性能见表 14-49。

表 14-45 金属的物理性能

名称	密度 (20℃) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点 /℃	沸点 /℃	熔化潜热 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	汽化潜热 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	比热容 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	电阻系数 $/\mu\Omega\cdot\text{cm}$	热导率 $/4.186\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	线膨胀系数 $/10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	弹性模量 E /MPa	HB /MPa
铝	2.7	600	2450	96	3050	0.214(20℃)	2.66(20℃)	0.503(25℃)	23.86(20~100℃)	72100	250
铍	6.68	680.5	1440	38.3	383	0.0504(20℃)	41.7(20℃)	0.045(25℃)	10.8(0~100℃)	79100	420
硼	5.727	814	615(升华)	88.5	102(升华)	0.078	33.3(20℃)	—	5.6(40℃)	—	1470
铈	3.5	710	1500	13.3	262	0.068(20℃)	—	—	19	—	—
铈	1.845	1284	2507	250~275	5917	0.425(20℃)	4.2(20℃)	0.35	12	252000~308000	600~1250
铈	9.8	271.3	1627	12.5	204.3	0.0294(20℃)	106.8(0℃)	0.020	13.3	32200	70
镨	2.34	2300	2550	489	8300	0.307(25℃)	$650\times 10^8(27^\circ\text{C})$	—	8.3(20~750℃)	—	—
镨	8.65	320.9	767	13.2	286.4	0.055(28℃)	6.83(0℃)	0.222(18℃)	29.8(25℃)	56000	207
钙	1.54	851	1482	55.7	918	0.149(20℃)	4.6(20℃)	0.3	22	21000~28000	170
钾	6.66	795	3468	15.7	679	0.049(20℃)	75(25℃)	0.026	8.5(25℃)	—	420
铬	7.19	1875	2199	61.5	1474	0.1068(20℃)	12.8(20℃)	0.16(20℃)	6.2(20℃)	—	1080
钴	8.9	1493	3100	62	1500	0.1056(20℃)	5.68(0℃)	0.165(0~100℃)	12.36(40℃)	210000	1240
镍	8.57	2468	4927	69	1782	0.0642(20℃)	14.6(20℃)	0.125(0℃)	7.1(20℃)	—	750
铜	8.94	1083	2595	48.9	1150	0.092(20℃)	1.692(20℃)	0.934(20℃)	16.6(20℃)	112000	RB370
镓	5.907	29.75	1983	19.16	1014	0.0977(29℃)	56.8(20℃)	0.08(30℃)	18(0~30℃)	—	—
锗	5.32	936	2700	111.5	1200	0.086(25℃)	$60\times 10^6(25^\circ\text{C})$	—	6	—	—
金	19.32	1063	2966	14.96	415	0.0312(18℃)	2.44(20℃)	0.707(25℃)	14.2(20℃)	72100	280
铂	21.50	1556.6	5400	29.1	885	0.0352(20℃)	3.55(20℃)	0.0533(50℃)	5.9(0~1000℃)	140000	HV1520
铟	7.31	2410	2075	6.8	484	0.058(20℃)	8.8(22℃)	0.06	24.8	10990	0.9
铊	22.42	2410	5300	32.6	790	0.032(20℃)	5.3(0℃)	0.35	6.5	532000	HV1700
铁	7.87	1535	3000	66.2	1515	0.107(20℃)	10.7(20℃)	0.175	11.7(20℃)	199500	600
镍	6.174	920	3469	17.3	690	0.048(20℃)	57(25℃)	0.033	4.9(25℃)	—	—
铅	11.34	327.4	1737	5.89	204.6	0.031(20℃)	22(20℃)	0.0827(18℃)	29.1(20℃)	18200	3.9
锂	0.534	179	1317	158	4680	0.784(0℃)	8.55(0℃)	0.17(0℃)	56	—	—
镁	1.74	651	1103	82.2	1337	0.25(25℃)	4.46(20℃)	0.376(20℃)	25.8(20℃)	45500	300
锰	7.44	1244	2097	63.7	977.6	0.114(20℃)	185(20℃)	—	22(20℃)	—	—
汞	13.55	-38.87	357	2.8	69.7	0.0333(20℃)	95.78(20℃)	0.02(0~100℃)	182(20℃) (体膨胀系数)	—	—
铀	10.22	2610	5560	69.8	1222	0.066(0℃)	5.78(27℃)	0.298(204℃)	5.44(20℃)	350000	1400~1850

(续)

名称	密度 (20℃) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点 ℃	沸点 ℃	熔化潜热 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	汽化潜热 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	比热容 $/4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	电阻系数 $/\mu\Omega\cdot\text{cm}$	热导率 $/4.186\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	线膨胀系数 $/10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	弹性模量 E /MPa	HB /MPa
镍	8.9	1452	2900	73.8	1487	0.105(20℃)	7.8(20℃)	0.215(25℃)	13.3(25℃)	210000	1100
钨	22.5	3000	5500	36.9	790	0.039(20℃)	9.5(0℃)	—	4.6(50℃)	560000	HV3500
钼	12.02	1552	3980	37.8	88.3	0.0584(20℃)	10.3(20℃)	0.17	11.67(20℃)	112000~123200	HV370
铀	19.3	3410	5900	46	1038	0.032(20℃)	5.5(20℃)	0.31(20℃)	4.45(0~500℃)	350000	RC370~470
铀	19.07	1132	3813	19.75	420	0.028(20℃)	30(25℃)	0.0645(25℃)	$a_0 + 36.1; b_0 - 8.7;$ $c_0 + 31.3$	207900	1850~3850
钒	6.11	1919	3000	82.5	2150	0.120(0℃)	24.8(20℃)	0.074(100℃)	8.95	112600~133000	RB750~800
钇	4.472	1509	3200	46.2	1045.8	0.074(50℃)	65(25℃)	0.024	10.8(25~1000℃)	—	—
铟	7.133	419.5	906	24.4	419.5	0.0925 (20℃)	5.75(0℃)	0.2653(18℃)	29.2(40℃)	84000	310
铈	6.45	1852	3580	60.3	1360	0.0659 (20℃)	44(20℃)	0.04(25℃)	5.89	79100	RB800
铂	21.40	1769	4530	24.1	625	0.0314(20℃)	10.58(20℃)	0.17	8.9(20℃)	154000	HV400
铑	6.782	935	3127	17.0	560	0.0458(0℃)	68(25℃)	0.028	4.8(25℃)	—	—
铈	21.02	3180	5900	42.4	815	0.03262(20℃)	19.14(0℃)	0.17	6.6	—	2500
铈	12.44	1960	4500	50.5	1150	0.059(20℃)	4.7(0℃)	0.36	8.5(20℃)	378000	HV1220
钨	12.4	2250	4900	60.3	1340	0.057(20℃)	7.16~7.6(0℃)	—	9.1(20℃)	420000	HV2200
钨	7.536	1072	1900	17.3	306	0.0431(20℃)	92(25℃)	—	—	—	—
钨	4.79	217	685	16.5	79.6	0.081(20℃)	12(0℃)	0.0007~0.00183	37(40℃)	58800	—
硅	2.33	1410	2480	395	2530	0.1597(0℃)	$15 \times 10^6(300^\circ\text{C})$	0.20	4.68	108500	2400
银	10.49	960.5	2212	25	556	0.056(20℃)	1.59(20℃)	0.934(100℃)	19.68(0~100℃)	72100	RF910
钠	0.97	97.9	883	27.05	1005	0.295(20℃)	4.3(0℃)	0.317(21℃)	71(20℃)	—	—
铯	2.6	770	1380	25	383	0.176(20℃)	23(20℃)	—	23(20℃)	—	—
钽	16.6	2996	6100	41.5	995	0.034(0℃)	13.6(25℃)	0.130(20℃)	6.6(25℃)	189000	RE600
铋	6.25	449.5	990	32	95	0.047(20℃)	52700(25℃)	0.014(25℃)	16.75(40℃)	42000	—
铊	11.85	303	1457	5.04	189.9	0.031(20℃)	18(0℃)	0.093	28(20℃)	—	20
钍	11.66	1750	4200	19.8	560	0.0282(20℃)	18(25℃)	0.09(200℃)	12.5(20℃)	79800	HV750~800
锡	7.3	232	2270	14.5	573	0.0542 (20℃)	11.5(20℃)	0.1528(0℃)	20(20~163℃)	41300	52
钛	4.54	1668	3260	104.5	2350	0.125(20℃)	42(20℃)	0.041	8.4	108500	HV800~1000

二、真空材料

表 14-46 常用合金的性质

合 金 名	成 分 /(%)	密度	0℃时电 阻系数 / $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	电阻温度 系 数 (20℃~100℃) / $10^{-6}\Omega\cdot\text{K}^{-1}$	线膨胀系数 (20℃~100℃) / $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	熔点 /℃	加 工	硬 焊	软 焊	点 焊
阿范斯(Advance)	Ni43, Cu57	8.9	47~49	± 0.00002	14.9	1210	良	良	良	良
奥吕美(Alumel)	Ni94, Fe0.5, Mn2.5	8~9	—	0.0014	12.0	1380	良	—	良	良
铍青铜 25# (Be-Copper 25#)	Be2, Co1, Cu97	8	—	—	—	900	良	良	良	劣
黄铜(Low Brass)	Cu80, Zn20	8.6	7.0	0.002	19.1	1004	良	良	良	可
各若美 A(ChromelA)	Ni80, Cr20	8.4	100	0.000219	13.6	1400	可	劣	良	良
各若美 C(ChromelC)	Ni64, Cr11, Fe25	8.24	—	0.00026	13.2	1400	—	—	良	良
康铜(Constantan)	Ni44~45, Cu55~60	8.9	44.1	± 0.00001	—	1190	良	良	良	良
德银(German Silver)	Cu60, Zn25, Ni15	—	33	0.00036	18.4		良	良	良	良
殷钢(InVar)	Fe63.8, Ni36, Mn0.2	8.0	81	—	0.8	1495	可	良	良	良
锰铜(Manganin)	Cu87, Mn13	8.192	38.8	± 0.000015	18.7	1020	良	良	良	良
莫涅耳(Monel)	Ni + Co63~67, 其它 Cu	8.8	42	0.0020	7.8	1300	良	良	良	—
磷铜 16#(P-Bronze16#)	Cu95.7, Sn4, P0.3	8.9	10	0.0040	17.8	1050	良	良	良	良
托番 C(Tophet C)	Ni60, Fe28, Cr12	8.19	—	—	13.7	1350	—	—	—	—

表 14-47 几种国产钢的物理性质

牌 号	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容 / $4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	热传导系数 / $4.186\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	线膨胀系数 / $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	20℃电阻系数 / $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$	弹性模量 /MPa
08 号钢	7.846	0.111(0~100℃)	0.193(100℃)	12.19(20℃~100℃)	0.142	198000
10 号钢	7.85	0.111(0~100℃)	0.193(100℃)	11.6(20℃~100℃)	0.132	198000
45 号钢	7.81	0.110(0~100℃)	0.120(100℃)	11.59(0℃~100℃)	0.132	204000
70(OBC)	7.81	0.115(0~100℃)	0.161(100℃)	11.5(20℃~100℃)	—	210000
1Cr13 不锈钢	7.75	0.113(0~100℃)	0.066(100℃)	10.1(20℃~100℃)	0.53	220000
1Cr18Ni9 不锈钢 (无磁、熔点 1410℃, 抗氧化)	7.9	0.12(20℃)	0.039(100℃) 0.045(300℃) 0.048(400℃) 0.051(500℃)	16(20℃~100℃) 16(20℃~200℃) 17.5(20℃~300℃) 18.1(20℃~400℃)	0.73	202000
1Cr18Ni9Ti 不锈钢 (无磁、熔点 1410℃, 抗氧化温度 900℃)	7.75	0.12(20℃)	0.039(100℃) 0.042(200℃) 0.045(300℃) 0.049(400℃) 0.052(500℃)	16.6(0℃~100℃) 17.6(0℃~200℃) 17.5(0℃~400℃) 17.9(0℃~500℃) 18.2(0℃~700℃)	0.73	202000

表 14-48 常用不锈钢的牌号、成分、机械性能

牌 号				成 分/%									机械强度(棒材)				
中 国 YB	美 AISI	日 JIS	苏 ГОСТ	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	P	S	Ni	抗拉 强度 /MPa	屈服点 /MPa	伸长率 /%	收缩率 /%	冲击韧性 /N·m·cm ⁻²
1Cr13	410	SUS21	1X13	≤0.15	≤0.6	≤0.6	12~14	—	—	≤0.03	≤0.035	—	550	350	25	55	100
2Cr13	403	SUS22	2X13	0.16~0.24	≤0.6	≤0.6	12~14	—	—	≤0.03	≤0.035	—	600	400	25	55	130
3Cr13	420	SUS23	3X13	0.25~0.34	≤0.6	≤0.6	12~14	—	—	≤0.03	≤0.035	—	750	550	12	30	40
Cr17	430	SUS24	X17	≤0.12	≤0.8	≤0.7	16~18	—	—	≤0.03	≤0.035	—	450	—	20	45	—
1Cr18N	304	SUS27	1X18H9	≤0.14	≤0.8	≤2.0	17~19	—	—	≤0.03	≤0.035	8~11	520	—	50	60	—
0Cr18Ni9	304L	SUS28	0X18H9	≤0.06	≤0.8	≤2.0	17~19	—	—	≤0.03	≤0.035	8~11	490	—	50	60	—
1Cr18Ni9Ti	321	SUS29	1X18H9T	≤0.12	≤0.8	≤2.0	17~19	—	~0.8	≤0.03	≤0.035	8~11	520	—	45	60	—
Cr18Ni12Mo2Ti	316	SUS32	X18H12M2T	≤0.12	≤0.8	≤2.0	16~19	2.0~3.00	0.3~0.6	≤0.03	≤0.035	11~14	520	—	45	60	—

表 14-49 铜和铝的物理、机械性能

性 质		材 料	
		铝	铜
密度(20℃)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		2.7	8.95
熔点/℃		658	1083
线膨胀系数(0~100℃)/ $10^{-7}\cdot\text{K}^{-1}$		238	165
热传导系数(20℃)/ $4.186\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		0.50	0.92
比热容(20℃)/ $4.186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		0.214	0.095(100℃)
电阻率(20℃)/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$		2.69	1.56
电阻温度系数/ $10^{-3}\Omega\cdot\text{K}^{-1}$		4.26	4.3
逸出功/eV		3.74	4.47
布氏硬度/MPa	未退火的	400~550	800~1200
	退火的	150~250	374
相对延伸率/%	未退火的	4~8	6
	退火的	32~40	60
抗拉强度极限/MPa	未退火的	150~250	400~500
	退火的	80~110	220
屈服点/MPa	未退火的	120~240	380
	退火的	50~80	70
弹性模量/MPa		66500~73000	108000~125000

2. 玻璃和石英

玻璃的种类很多,从真空技术的角度来看,大体上可分为:石英玻璃、“硬”玻璃、“软”玻璃三类。软玻璃有较低的软化温度($490^{\circ}\text{C}\sim 610^{\circ}\text{C}$)和较大的线膨胀系数($82\times 10^{-7}\text{K}^{-1}\sim 92\times 10^{-7}\text{K}^{-1}$)。硬玻璃有较高的软化温度($555^{\circ}\text{C}\sim 806^{\circ}\text{C}$)和较小的线膨胀系数($35\times 10^{-7}\text{K}^{-1}\sim 50\times 10^{-7}\text{K}^{-1}$)。石英玻璃软化温度高达 1500°C ,线膨胀系数只有 $5.8\times 10^{-7}\text{K}^{-1}$ 。

由于软玻璃价格便宜,氢渗透速率很低,所以常选作电子管的壳体材料,这类玻璃可与铂丝、杜美丝封接。石英玻璃价格贵,氢渗透速率最高,只用在高温设备和要求透过紫外光的真空设备中。硬玻璃软化温度适中,便于加工和烘烤除气,耐温差性能好,是真空技术中最常用的玻璃,硬玻璃按不同的膨胀系数又可分为钨组玻璃和钼组玻璃。

石英玻璃的物理性质见表 14-50。常用玻璃的成分及性质见表 14-51、表 14-52 和表 14-53。陶瓷性能见表 14-54 和表 14-55。详细可参考第十五章。

表 14-50 石英的物理性质

性 质	单 位	结 晶 石 英		熔 融 石 英
		平行于轴	垂直于轴	
密度		2.65		2.2
抗张强度	MPa			70~90
抗压强度	MPa			1600~2000
弹性模量	MPa			62000~72000
抗扭强度	MPa			24000~31500
热膨胀系数	K ⁻¹	140×10 ⁻⁷ (0~567℃)	240×10 ⁻⁷ (0~567℃)	(0~100℃)5.2×10 ⁻⁷ (0~1000℃)5.6×10 ⁻⁷
热导率(20℃)	4.186J/cm·s·K	32×10 ⁻³	17×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³
(950℃)				6.4×10 ⁻³
转变温度	℃			~1050
热容(100℃)	4.186J/g·K			20
比电阻(20℃)	μΩ·cm	10 ¹³ ~10 ¹⁵	10 ¹⁸ ~10 ²⁰	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸
(350℃)				~10 ¹⁰
介电系数		4.3~4.4	4.6~4.7	3.5~3.8
介电损失		1×10 ⁻⁴		(20℃)2~3×10 ⁻⁴
(1Mc~500Mc)				(400℃)5~6×10 ⁻⁴
绝缘破坏(20℃)	kV·cm ⁻¹	250~400		250~400
(500℃)		40~50		40~50

表 14-51 真空技术常用的几种玻璃的性质

性 质		石英玻璃	硼 硅 玻 璃					钠玻璃		铅玻璃	
			派列克 斯玻璃	钨组玻璃		钼组玻璃					
			7740	7720	B37	7052	B47	0080	S95	0120	L92
化学成分/%	SiO ₂	100	80.8	72.2	75.5	64.3	66.8	73.2	71.5	56.2	56.0
	B ₂ O ₃	—	12.8	15.2	16.5	19.1	21.8	—	—	—	—
	Na ₂ O	—	4.2	3.9	4.0	5.2	3.9	16.8	14.0	3.9	4.5
	K ₂ O	—	—	0.3	1.8	—	4.3	0.3	1.5	8.5	8.0
	Al ₂ O ₃	—	2.2	1.0	2.2	7.1	2.4	1.4	2.2	1.6	1.3
	PbO	—	—	6.9	—	—	0.2	—	—	28.7	30.0
	Li ₂ O	—	—	—	—	1.2	0.3	—	—	—	—
	BaO、MgO、CaO	—	—	—	—	2.7	—	8.2	10.4	—	—
粘度温度特性①	应变温度点/℃	990	515	485	455	435	435	470	475	395	390
	退火温度点/℃	1050	565	525	525	480	490	510	515	435	435
	软化温度点/℃	1580	820	755	775	710	715	710	710	630	630
	加工温度点/℃	—	1245	1140	—	1115	—	1005	—	980	—
线膨胀系数/10 ⁻⁷ ·K ⁻¹		5.5	33	36	37.5	46	48.5	92	92	89	90
耐热冲击(厚 6.35mm 板)/℃		1000	150	130	—	100	—	50	—	50	—
密度/g·cm ⁻³		2.20	2.23	2.35	2.25	2.28	2.27	2.47	2.50	3.05	3.07
注:①应变温度点表示几小时内可消除内应力的温度;退火温度点表示几分钟内可消除内应力的温度											

表 14-52 几种国产玻璃的特性

类 别	成 分	软化 温度 /℃	冷热急变 破裂温度 (水温 20℃) /℃	膨胀系数 /10 ⁻⁷ ·K ⁻¹	抗水试验,水 煮沸 5h 质损 /mg·100cm ⁻²	抗酸试验, 1N 硫酸煮沸 3h 质损/ mg·100cm ⁻²	抗碱试验, 2N 苛性钠煮 沸 3h 质损/ mg·100cm ⁻²	抗折强度 /MPa
硬玻璃	硼硅	760	220	47.46	0.2~0.5	0.3~0.5	105~120	—
九五玻璃	含硼较高的硼硅	780	240	42.22	0.2~0.5	0.3~0.5	105~120	180
特硬玻璃	硼硅	—	240	42.59	0.5~0.7	0.4~0.5	108~125	—
十一号玻璃	高硼硅钨封玻璃	780	—	51	0.5~0.7	0.406	60~70	—
灯工焊接玻璃	钠钙	682	>80	93.32	1.12	0.4	50.61	—
软质量器玻璃	钠钙	665	>80	105	1.22	1.11	40	—
软质瓶玻璃		—	>60	81.05	—	—	—	—

注:沈阳玻璃仪器厂生产中字牌

(二) 焊接、连接和封接材料

1. 永久性连接(见第十五章)

2. 可拆连接

真空系统的可拆卸部件可以用真空橡皮管或橡胶、塑料和软金属的密封垫圈来连接。

(1) 橡胶、塑料类垫圈材料

橡胶具有很好的弹性,所以是可拆连接件的良好过渡密封材料。对真空橡胶的要求是,弹性好、含硫少、耐油,并适用于一定的工作温度范围。橡胶的缺点是出气速率较大,不耐烘烤,因而不适用于超高真空(采用特殊措施者例外)。

常用橡胶的性质如下:

- ①天然橡胶 弹性好,强度好,使用温度为 $-60^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$,不耐油,耐老化性能差。
- ②丁苯橡胶 是丁二烯、苯乙烯的共聚物。耐寒,耐磨,不耐油。
- ③氯丁橡胶 是氯丁二烯的聚合物。在大气条件下耐老化,耐臭氧性能好,有一定耐油性能。
- ④丁腈橡胶 是丁二烯、丙烯腈的共聚物。有较好的耐油性能。这种橡胶中的丙烯腈含量越高,耐油、耐热性就越好,但低温性能也越差。缺点是大气条件下耐老化、耐臭氧性能差。
- ⑤硅橡胶 是硅氧烷的聚合物,有甲基硅橡胶、甲基乙烯基硅橡胶、甲基苯基乙烯基硅橡胶、硅腈橡胶、硅氟橡胶等。耐热(250°C ,短期 300°C),耐寒(-70°C 以下),耐臭氧,大气条件下耐老化,并有很好的电绝缘性能。缺点是机械性能差,出气速率较高。
- ⑥氟橡胶 是偏二氟乙烯和全氟丙烯或三氟氯乙烯和偏二氟乙烯的共聚物。特点是耐高温和耐油性均好,出气速率低。
- ⑦聚硫橡胶 耐油、耐臭氧,大气条件下耐老化。

一般来说,上述几种橡胶均可用作前级真空的橡皮管道和真空密封垫圈,但以氯丁、丁腈橡胶最为常用。硅橡胶可用于航天星船的密封件,氟橡胶可用于超高真空设备的密封件。

我国橡胶型号及命名原则见表 14-56。各种橡胶的极限真空试验结果见表 14-57。

表 14-53 常用的各种玻璃成分及性能

类型	名称	所含成分的百分数/%										线膨胀系数 $\times 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$ (20°C ~ 100°C)	软化温度 °C	退火温度 °C	密度
		SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	PbO	ZnO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃			
软玻璃 (铅封接类)	C-90-1(BZL-1)	69.5			5.5	3.5	5.0			12.5	4.0	≥0.3	550	400~505	
	C-89-2(Nb2)	71.9			5.5	3.5	2.0			16.1	1.0	≥0.3	550	410~520	
	C-88-4(3C-4 Nb12)	55.3		1.7				30.0		3.8	9.2	≥0.3	490	360~450	3.05
	C-88-13	69.5	2.0		5.5	3.5	2.0			11.0	6.5		590		
	C-82-36(Nb36)	71.5		1.8	14.0					11.5	1.2	≥0.3	610	425~545	
硼硅玻璃 (钎封接类)	713(钎封玻璃)	67.5		5.0			12.5			7.0	7.0	≥0.9	520	358~456	
	C-49-5(3C-5)	67.5	20.3	3.5						8.7		≥0.04	580	410~540	
	C-49-5K(3C-5K)	66.9	20.3	3.5						3.9	5.4	≥0.04	575	410~535	2.29
	C-48-8(3C-8)	66.5	23.0	3.0						3.7	3.8	≥0.05	555	360~500	2.25
	C-47-46(Nb46)	68.5	17.2	2.5					5.0	6.8		≥0.05	590	420~555	
硼硅玻璃 (钎封接类)	3C-11	74.8	18.0	1.0	0.3					4.2	1.7		620	530	2.2
	C-39-17(3C-9)	73.0	16.5					6.0		3.0	1.5	≥0.04	640	410~540	
	上海“95”料	78.5	14.0	2.0						(Na ₂ O+K ₂ O) 5.0					
低损耗玻璃	7070	69.0	28							0.68	0.75	(Li ₂ O)1.1	590	470~620	2.14
铁玻璃	DT-2	46.2		30		0.3		(Pb ₃ O ₄)30		6.7	12	(CaFe)2	455	420	3.12
高铝玻璃		52	7.9	11	0.1	7.1							844	740	2.74
石英玻璃		99.5		~0.01		~0.01				0.04	0.03		1500		2.2

二、真空材料

表 14-54 用于真空技术的几种陶瓷的性能

类 别	主要成分	线膨胀系数 $/10^{-7} \cdot K^{-1}$	软化温度 $^{\circ}C$	机械强度 (抗张强度)/Pa	密度 $/g \cdot cm^{-3}$
块滑石	$MgOSiO_2$	70~90	1400	6×10^7	2.6
镁橄榄石	$2MgOSiO_2$	90~120	1400	7×10^7	2.9
锆石	ZrO_2SiO_2	30~50	1500	8×10^7	3.7
85%氧化铝	Al_2O_3	50~70	1400	14×10^7	3.4
95%氧化铝	Al_2O_3	50~70	1650	18×10^7	3.6
98%氧化铝	Al_2O_3	30~70	1700	20×10^7	3.8
微晶玻璃 9606		57	1250	14×10^7	—

表 14-55 常用陶瓷性能

性 能		氧化铝瓷				B型滑石瓷	镁橄榄瓷	氧化铍瓷
		75 瓷	旧 95 瓷	新 95 瓷	99 瓷			
化 学 成 分	SiO ₂	16.9	1.87	3.1		63.1	41.8	
	MgO	0.73		0.47	0.5	31	51.2	0.5
	AlO ₃	79.3	95.9	95.93	99.3	2.65	0.92	0.5
	CaO	3.2	2.22	0.51		0.86	0.26	
	Fe ₂ O ₃	0.04	0.03			0.05	0.1	(BeO)99
	BaO						5.8	
	B ₂ O ₃					2.18		
物 理 机 械 性 能	密度	3.2~3.4	3.2~3.4	>3.55			2.8~3	
	吸红	不吸红	不吸红				不吸红	
	烧成温度/ $^{\circ}C$		1600~1620	1600~1620	1650~1670			1670
	烧成收缩率/%	11.3~11.5	10.5~10.7				10	
	抗断强度/MPa	>18000	>30000	32000	>35000	>15000	>12000	>14000
	膨胀系数 $/\times 10^{-6} \cdot K^{-1}$ (室温~500 $^{\circ}C$)	6.5~7.5	7.3~7.7	7.4	7.5	8.7~9.0	9.8~10.3	7.5~7.8
	热稳定性 25 $^{\circ}C$ ~800 $^{\circ}C$ ~25 $^{\circ}C$	8 次	10 次	10 次	10 次	(25 $^{\circ}C$ ~500 $^{\circ}C$ ~25 $^{\circ}C$)4 次	(25 $^{\circ}C$ ~400 $^{\circ}C$ ~25 $^{\circ}C$)4 次	
	介质损耗角 300Mc	<12.5	<6	4.5~5	<1	<10	<7	<6
	$/\tan\delta \times 10^{-4}$ 3000Mc			4~6	<2	<7	<8	<7
	介电常数 300Mc	<8.5	<10	8.8	<10			
	ϵ 3000Mc			8	<10			
	体积电阻率 200 $^{\circ}C$	>10 ¹²	>10 ¹²		>10 ¹¹	>10 ¹³	>10 ¹²	
	$/\Omega \cdot cm$ 300 $^{\circ}C$	>10 ¹⁰	>10 ¹¹	10 ¹¹	>10 ¹¹	>10 ¹¹	>10 ¹⁰	
	表面电阻率 200 $^{\circ}C$	>10 ¹²	>10 ¹²			>10 ¹²	>10 ¹²	
	$/\Omega$ 300 $^{\circ}C$	>10 ¹⁰	>10 ¹¹	10 ¹³	>10 ¹¹	>10 ¹⁰	>10 ¹⁰	
	击穿电压/kV· mm ⁻¹	≤14	≤13	13.5	≤14		>11	
可封接金属		钨、钼、可伐、无氧铜及 Fe-Ni-Co 合金可与上述瓷封接						

表 14-56 我国橡胶型号及命名原则

百位 千位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	天然	天然	天然	丁基	—	异丁	—	天然+丁苯	天然+顺丁	—
2	丁钠	丁锂	顺丁	—	—	—	—	—	—	异丁+聚乙烯
3	丁苯 10	—	丁苯 30	—	—	—	—	—	—	丁苯 30+丁苯 10
4	氯丁	—	—	—	—	—	—	氯丁+天然	丁苯 10+氯丁	—
5	丁腈 18	丁腈 26	—	丁腈 40	—	—	—	丁腈+氯丁	丁腈+聚乙烯	丁腈 18+丁腈 26
6	乙烯基硅	二甲基硅	苯基硅	氟硅	氟硅	—	—	—	—	—
7	氟橡胶	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	乙丙胶	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注例如:丁腈 40,按这个原则,用“54 × ×”表示
 序号(01~99)

表 14-57 橡胶密封的极限真空试验结果

类 别	法兰温度 6℃ 时的极限真空度	法兰温度 -25℃ 时的极限真空度
	/×133.3Pa	/×133.3Pa
丁基	1.0×10^{-9}	1.75×10^{-10}
天然	4.5×10^{-9}	1.2×10^{-9}
氯丁	2.1×10^{-9}	2.1×10^{-10}
丁腈	3.8×10^{-9}	4.8×10^{-10}
硅橡胶(红)	2.2×10^{-7}	—
硅橡胶(绿)	3.2×10^{-7}	—
维顿 A	1.3×10^{-9}	5.6×10^{-10}
聚四氟乙烯	4.2×10^{-9}	1.0×10^{-9}

天然橡胶的物理性质:

密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.92~0.93
线膨胀系数($20^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$)/ $10^{-4} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	1.4~1.95
热导率/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$(3 \sim 5) \times 10^{-4}$
弹性模量/MPa	1~7
伸长率/%	350~1000
比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{13} \sim 10^{16}$
介电系数	2.4~3
介电损耗/ $10^3 \text{c} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5×10^{-3}
绝缘破坏电压/ $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	1mm 厚 40 4mm 厚 15~20

(2) 软金属垫圈

由于橡胶出气速率大,不能耐高温,因此超高真空法兰密封大多采用软金属垫圈。可用作垫圈的软金属材料有纯金、银、铜、铝和用于电气设备上的熔断丝(俗称保险丝),可根据不同的烘烤温度加以选用。

3. 活动连接和堵漏材料

用于活动连接和堵漏的材料有真空油膏、封蜡、封泥和粘接剂。它们的国产产品见表 14-58、表 14-59。国外产品见表 14-60。

表 14-58 真空脂的主要性能

名 称	成 分	性 能 指 标					说 明
		熔点/℃	刺入度 1/10 mm(25℃)	粘度 /mm ² ·s ⁻¹ (100℃)	饱和蒸气压/×133.3Pa	胶粘性	最高使用温度
(英)阿皮松 L	高分子碳 氢化合物	47.5 ^②	201 ^②	80~100 ^②	19 ⁻³ (300℃) 10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹¹ (20℃)	拉丝长,细	30℃
(英)阿皮松 M	同上	51.7 ^②	156 ^②	47~51 ^②	10 ⁻³ (200℃) ^② 7×10 ⁻⁹ (20℃) ^②	拉丝差于 L	30℃
(英)阿皮松 N	高分子碳氢化合物 加橡胶类物质	47 ^②	183 ^②	140 ^②	2×10 ⁻³ (250℃) ^② 2.9×10 ⁻⁹ (20℃)	拉丝最长且细	30℃
(英)阿皮松 T	皂基脂	130 ^②	230 ^②	—	3×10 ⁻⁷ (20℃) ^②	拉丝中等	120℃
(英)阿皮松 H	非烃脂加橡胶类物 质	没有熔点	—	—	10 ⁻⁹ (20℃)	拉丝长	-15℃ +250℃
(英)高真空硅脂	硅油加硅粉	没有熔点	—	—	可用于 10 ⁻⁶ 的真空系统中	拉丝性差	-40℃~ +200℃
(西德)Leybold P	烃基脂加橡胶	65	—	—	1.3×10 ⁻⁸ (20℃)	拉丝中等	25℃
(西德)Leybold R	同上	65	—	—	1×10 ⁻⁸ (20℃)	拉丝长	30℃
(西德)高真空硅脂	硅油加硅粉	没有熔点	—	—	<10 ⁻¹⁰	拉丝性差	150℃
(中国)7501 高 真空硅脂	硅油加硅粉	没有熔点	—	—	可用于 10 ⁻⁶ 的真空系统中	拉丝性差	-40℃~ +200℃
(中国)上炼 1 号 真空脂	高分子碳氢化合物	67	190~210	80~100	2.2×10 ⁻⁸ (20℃)	拉丝长、细	30℃
(中国)上炼 2 号 真空脂	高分子碳氢化合物	69	170~190	120~140	3.1×10 ⁻⁸ (20℃)	拉丝长又细	30℃
(中国)上炼 3 号 真空脂	高分子碳氢化合物	71	150~160	45~55	10 ⁻⁹ (20℃)	拉丝稍差于 1 ^①	35℃
(中国)上炼 4 号 真空脂	皂基脂	210	220~230	—	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁸ (20℃)	拉丝长	130℃

注:①这些数值的测量方法不可靠;
②上炼研究所提供

表 14-59 真空封蜡和封泥的饱和蒸气压

名 称	饱和蒸气压/ $\times 133.3\text{Pa}$		备 注
	20℃	180℃	
阿皮松 W	1.2×10^{-8}	1.05×10^{-3}	
上炼 85 号真空封蜡	4.4×10^{-9}	4.4×10^{-4}	分别为三个样品
	5.8×10^{-8}	8.0×10^{-4}	
	3.7×10^{-7}	1.24×10^{-3}	
阿皮松 W-100		1.8×10^{-3}	
阿皮松 W-40	8.2×10^{-8}	1.47×10^{-3}	
上炼 50 号真空封蜡	3.1×10^{-8}	8.3×10^{-4}	
上炼 30 号真空封蜡	6.8×10^{-8}	1.5×10^{-3}	
30 号真空封泥	5.0×10^{-4}		使用温度不得超过 30℃
阿皮松 Q	$(1 \sim 2) \times 10^{-4}$		

①真空油膏 用于可动的磨砂接头,如活门、磨口等的密封。对这类密封物质的主要要求是蒸气压要低($< 10^{-4}\text{Pa}$)和粘度要适当。这类油膏主要有两种;

a. 重碳氢化物的混合物。如国产真空油膏和阿皮松油膏。

b. 硅的有机化合物。如硅油膏(Silicone Grease),其优点是温度稳定性好,在 $-40^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ 的温度范围内有适当的粘度。

②真空封蜡(黑膏) 用于不能熔接或临时性的半固定连接及高真空堵漏。它在室温下呈固态,使用时需加热软化(软化温度 $50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$)。

③真空封泥(橡皮泥) 用作临时性的连接或堵漏。在室温下能塑性变形,密封性能稍差,其饱和蒸气压较高($\approx 10^{-2}\text{Pa}$),一般只能用于低真空。

由于油膏的蒸气压和出气速率都比较大,不适合在超高真空活门中使用,此时可使用低熔点液态金属或合金的活门。这种低熔点金属或合金主要采用汞和以镓、铟、锡为主的合金。液态合金的配制方法如下:

①铟合金,其比例为

49% 铋	} 熔点 57.8°C
12% 锡	
18% 铅	
21% 铟	

方法:按上述比例配好原料,放入盛有熔融石蜡的坩埚中(石蜡可以保护铟合金在熔融状态不被氧化),加热至 300°C (防止石蜡着火!),并用玻璃棒搅拌,使各原料熔化并均匀混合,冷却后则得到凝固的铟合金,用苯和乙醚洗去表面的石蜡,就得到清洁的铟合金。

②镓铟锡合金,其比例为

62% 镓	} 熔点约 5°C	62.5% 镓	} 熔点 10.7°C
25% 铟		21.5% 铟	
13% 锡		16% 锡	

方法:按比例配好原料,放入玻璃管中并抽空至 10^{-1}Pa ,加热熔化后即成为均匀的镓铟锡合金。室温下为液态,收藏时将它充分冷却为固态。液态合金之表面有一些杂质,可以用针形吸管从杂质下面吸取清洁的液态合金。

用浓度为 $2\% \sim 5\%$ 的氢氧化钠溶液,回收粘附在玻璃管上的液态合金。

表 14-60 国外真空酯、蜡、粘接力

类别	名称	化学成分	$\log p = A - B/T$		蒸气压 $p/133.3\text{Pa}$		使用温度 $^{\circ}\text{C}$	最高工作 温度 $^{\circ}\text{C}$	软化点 $^{\circ}\text{C}$	应用特点
			A	B	20 $^{\circ}\text{C}$	高温				
真空脂(油膏)	拉姆查	石蜡, 凡士林, 生橡胶	—	—	10^{-4}	—	—	25~30	—	磨口活门(下面均同), 溶于苯、汽油
	阿皮松 L	重碳氢化物	—	—	$10^{-10} \sim 10^{-11}$	$10^{-3}(300^{\circ}\text{C})$	室温	30	47	玻璃结合的暂时密封
	阿皮松 M	重碳氢化物	—	—	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	$10^{-3}(200^{\circ}\text{C})$	室温	30	44	磨口“O”圈、润滑等
	阿皮松 N	重碳氢化物, 生橡胶	—	—	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	$10^{-3}(250^{\circ}\text{C})$	室温	30	43	玻璃活门最合用
	阿皮松 T	重碳氢化物	—	—	10^{-8}	—	室温	110	125	较高温下用
	列依鲍尔德 P	重碳氢化物	13.91	7590	$<10^{-8}$	—	—	25	56	比 P 粘性大, 溶于苯、汽油
	列依鲍尔德 R	重碳氢化物	12.54	7050	$<10^{-8}$	—	—	30	56	比 P 粘性大, 溶于苯、汽油
	列依鲍尔德 S	重碳氢化物, 生橡胶	—	—	$<10^{-8}$	—	—	30	—	夏或冬用
	电气油膏		—	—	$\approx <10^{-7}$	—	—	—	—	
	润滑密封油膏		—	—	$<10^{-5}$	—	—	—	40	
	真空密封油膏(轻)		—	—	10^{-5}	—	—	—	50	低粘度
	真空密封油膏(重)		—	—	10^{-6}	—	—	—	60	高粘度
	赛勒维生(轻)		—	—	10^{-6}	—	—	—	90	玻璃磨口活门
	赛勒维生(中)		—	—	$<10^{-6}$	—	—	—	120	玻璃磨口活门, 橡胶表面处理
	赛勒维生(重)		—	—	$<10^{-6}$	—	—	—	130	橡胶表面处理
	旋塞油膏		—	—	$<10^{-5}$	—	—	—	215	活门
	硅油膏	硅有机化合物	10.17	6735	$<10^{-6}$	—	-40~200	200	215	温度适应范围宽
	里泽兰		—	—	$<10^{-8}$	—	—	—	210	高温下粘性变化小
	油膏 PB ₁		—	—	—	—	—	—	—	低粘度
	油膏 PB ₂		—	—	—	—	—	—	—	中粘度
	油膏 PB ₃		—	—	—	—	—	—	—	高粘度
	接合油膏 D.D		—	—	$<10^{-8}$	—	—	—	120	活门的旋转过渡

(续)

类别	名称	化学成分	$\log p = A - B/T$		蒸气压 $p/133.3\text{Pa}$		使用温度 /℃	最高工作 温度/℃	软化点 /℃	应用特点
			A	B	20℃	高温				
真空封蜡(黑膏)封泥	阿皮松封泥 Q	具有矿物填充剂的凡士林	—	—	10^{-4}	—	室温	30	45	低真空临时堵漏
	列依鲍尔德封泥 V		—	—	10^{-4}	—	—	30	—	低真空临时堵漏
	电气封泥		—	—	$\approx 10^{-6}$	—	—	—	30~35	低真空临时堵漏
	皮欣(蜡)	云杉(苷)	—	—	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	—	<50	60	80	溶于苯、汽油、松节油
	阿皮松封蜡 W	重碳酸化物(沥青、虫胶、蜂蜡)	—	—	10^{-6}	$10^{-3}(180^\circ\text{C})$	100	80	85	永久连接
	阿皮松封蜡 W100		—	—	10^{-6}	$10^{-3}(180^\circ\text{C})$	80	50	55	半永久连接
	阿皮松封蜡 W40		—	—	10^{-6}	$10^{-3}(180^\circ\text{C})$	40~50	30	45	受力半永久连接
	电气封蜡		—	—	$\approx 10^{-6}$	—	—	—	35	在一般溶剂中有低的溶解度 溶于酒精,不溶于苯和甲苯 溶于酒精,不溶于苯和甲苯
	顺尼森封蜡		—	—	10^{-5}	—	—	60~80	>80	
	密伐封蜡 S		—	—	10^{-6}	—	—	—	73	
	白蜡		—	—	10^{-3}	—	—	50	108	
	爱德华 WE 封蜡 3		—	—	10^{-6}	—	—	—	80	
	爱德华 WE 封蜡 6		—	—	10^{-6}	—	—	—	90	
粘接剂	高亨斯基胶	环氧树脂类	—	—	10^{-6}	—	<40	45	≈ 65	高温硬化用 耐高温的胶合剂
	阿拉地胶 A		—	—	< 10^{-7}	—	200	150	110	
	氟化银		—	—	—	$10^{-5}(400^\circ\text{C})$ $10^{-7}(300^\circ\text{C})$	—	—	融点 300°C	
	醇醛漆	甘油与苯二甲酸浓缩产品	—	—	硬化后 < 10^{-6}	—	室温	150	—	

(三) 泵工作物质

1. 机械泵、蒸气流泵工作液

水、汞、油是水环泵、机械泵、分子泵、喷射泵、扩散泵所采用的工作液体与密封液体。蒸气喷射泵、扩散泵依靠工作液蒸气进行喷流或扩散抽气。因此在泵的锅炉工作温度下,希望工作液具有足够的蒸气压,而在常温下由于油蒸气可能会弥漫整个被抽真空容器,成为极限真空的限制因素,因此又希望它在常温下有低的饱和蒸气压。除了对其蒸气压特性有一定要求外,好的热稳定性、抗氧化性及在室温下有适中的流动性也是蒸气喷射泵、扩散泵所要求的。

真空泵的典型锅炉压力,水、泵以及某些真空泵油的蒸气压曲线如图 14-48 所示。

真空泵油大体可分为:石油烃、酯、硅油、卤化碳氢化物、醚五大类,其性能见表 14-38。

2. 吸气剂和吸气剂泵材料

(1) 电子管用吸气剂

吸气剂一般分蒸散型和非蒸散型二类。蒸散型有时也称扩散型或闪烧型,如:钙、镁、锶、钡等,其中以钡最为常用。非蒸散型有时也称涂层型或体积型,如:锆、钛、钽等,其中锆是常用吸气剂的主要组分。近年来发展的蒸散型掺氮吸气剂,非蒸散型的锆铝、锆石墨体吸气剂有着优异的吸气性能。

国产锆铝合金吸气剂的吸气性能见表 14-61。常用吸气剂材料的特性见表 14-62。国外几种优质吸气剂的吸气性能见表 14-63。

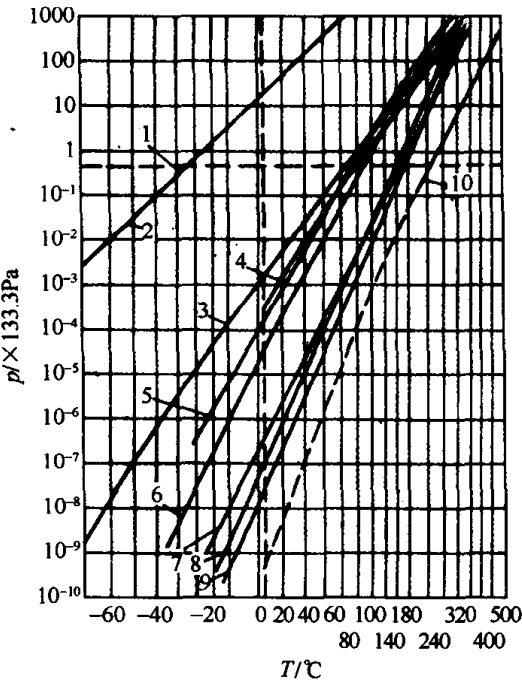


图 14-48 扩散泵工作液蒸气压

- 1—典型的扩散泵锅炉压强; 2—水; 3—汞;
- 4—可伐赫罗尔 12(Convaclar12); 5—甘油;
- 6—邻苯二甲酸二丁酯; 7—康复依尔 20(Convoil20);
- 8—DC704; 9—奥克脱依尔 S(Octoil S);
- 10—纳克依尔 50(Narcoil 50)。

表 14-61 锆铝吸气剂性能

测试单位	测试法	样 品	激活规范		工作条件		性能		备 注
			温度 /℃	时间 /s	温度 /℃	起始压力 /Pa	吸气容量 /10 ⁻¹ Pa·L·cm ⁻²	吸气速率 /cm ³ (STP)·cm ⁻² ·s ⁻¹	
四机部 1412 所			—	—	500	—	$\frac{10^{-1} \sim 10^{-3}}{2}$ (空气)	65(空气)	
广播科研所	静态法	粉末滚轧镍基 厚 30μm~100μm	900	10	400	0.13	5.5×10 ⁻¹ (空气)	—	
			900	10	700	1.33	2.4(氮气)	—	
			900	10	700	1.33	3.4(氮气)	216(氮气)	再次激活
			870	90	700	0.13	3.3×10 ⁻¹ (氮气)	165(氮气)	
			900	30	600	0.13	3.0×10 ⁻¹ (氧气)	30(氧气)	
			900	10	600	1.33	5.3(二氧化碳)	163(二氧化碳)	

(续)

测试单位	测试法	样 品	激活规范		工作条件		性能		备 注
			温度 /℃	时间 /s	温度 /℃	起始压力 /Pa	吸气容量 /10 ⁻¹ Pa·L·cm ⁻²	吸气速率 /cm ³ (STP)·cm ⁻² ·s ⁻¹	
中国科学院 电子所	动态	不锈钢基, 硝棉涂 敷, 22.2mg·cm ⁻²	926	60	740	1.3× 10 ⁻³	>24(氮气)	360(空气)	样品未经 高温烧结
			900	30	600	13.33		130(氮气)	
	静态法	镍基, 粉末滚轧 140~350 目粉	900	30	600	13.3	—	180(氮气)	
			900	30	750	13.33	—	104(氮气)	
			950	60	600	1.33	—	110(氮气)	
			350 目粉末压块	950	60	600	13.33	—	
北京电 子管厂	定压法	100 目粉末压块, 密度 0.6~0.7 g/cm ⁻³	620	120	400	10 ⁻²	—	118(氮气)	
			620	120	560	10 ⁻²	—	119(氮气)	
			800	180	600	10 ⁻²	—	130(氮气)	
			840	60	800	10 ⁻²	—	180(氮气)	
			850	60	600	10 ⁻²	—	170(氮气)	
			900	60	600	10 ⁻²	—	123(氮气)	
			950	40	800	10 ⁻²	—	140(氮气)	
			1000	10	800	10 ⁻²	—	105(氮气)	
赛司公司 (SAES)	定压法	粉末压环	100	30	400	10 ⁻⁴	15~50(氮气) 30~120 (一氧化碳)	240(氮气) 1500(一氧化碳)	意大利产品

表 14-62 吸气剂材料的特性

材 料	熔点 ℃	$T_{p1}(p_1 = 10^{-5}\text{Pa})$ ℃	$T_{p2}(p_2 = 10^{-2}\text{Pa})$ ℃	吸收剂 类型	激活 温度	工作 温度	被吸收 的气体	初速吸收速率 ^① $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)	吸收容量	
						℃			$0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ (T℃) ^②	$0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)
铝	660	900	1220	薄膜		500	O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO ₂	 0 0 ＜0.005(a) ＜0.005(a)	7.5~38.5(20) 0 0 0	1
钼	717	417	687	薄膜	900	 ＞40 200 ＞100 ＞80	空气 O ₂ H ₂ H ₂ O N ₂ CO ₂ CO CH ₄	 0.3(a) 0.05(a) 0.003(a) 5.0(a) 3.5(a)	56(400) 57(300) 100(400) 72(300) 3~25(＜100) 43~51(＞100) 66(400) 100(400)	 1 0 0 0.2 0.2 0
Ba/Al 合金 (50 : 50 质量比)(烧结 的环状吸气 剂)				薄膜	1100		空气 O ₂ H ₂ H ₂ O N ₂ CO ₂ CO		50(20) 61(20)	2.6 13 2.25 1.8 3.7

二、真空材料

(续)

材 料	熔点 ℃	$T_{p1}(p_1=10^{-5}\text{Pa})$ ℃	$T_{p2}(p_2=10^{-2}\text{Pa})$ ℃	吸收 剂 类型	激活	工作温度	被吸收 的气体	初速吸收速率 ^① $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)	吸收容量	
					温度 ℃	℃			$0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ ($T^\circ\text{C}$) ^②	$0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)
镁	651	287	437		650		O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO	0 0 <0.005(a) <0.005(a)	20~200(20) ~0(30)	 0
钼	2622	1987	2627	薄膜			O ₂ H ₂ N ₂ CO CH ₄	 2.7(a) 3.5(a)	 1.0(30) 3.0(30~200)	0.5 0.05 0.05 0.15 0
钽 片 (0.1mm厚)	2996	2400	3075	薄膜 块	 1200		O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO CO	 >2.5(a) >2.5(a)		1 0.5 0.1 0 0.08 0 0.01(600℃) 9.0(900℃)
钽	1827	1637		薄膜 块	 900	450 650	O ₂ H ₂ CO ₂ O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO	 0.40(a) (675℃) 0.020(a) (675℃) 0.010(a)(675℃) 0.75(a)(675℃) 0.6(a)(675℃)	7.5~33.1(20) 19.5~53.7(20)	 0.2(75℃) 6.5(675℃) 0.04(75℃) 0.25(225℃) 0.55(350℃) 0.50(475℃) 0.08(675℃)
米希金属 (Ce/La)	785			薄膜	1000		O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂		21.7~51(20) 46.1~64(20) 3.2~16(20) 2.2~45(20)	
钛	1660	1327	1727	薄膜 块	2000 1000	 650 20~400 300~400 >700 >700	O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO CH ₄ O ₂ H ₂ H ₂ O N ₂ CO ₂	 3.0(a) 4.3(a) 12.0(a) 2.01(b)(800℃) 0.08(b)(1000℃) 0.81(b)(1100℃)	 1.9~2.5 (30~300) 4.3(20) 3.4~4.2 (30~200) 90(800) 160(1000) 50(1100)	1.0 2.0 0.05 0.13 0.15 0

(续)

材 料	熔点 ℃	$T_{p1}(p_1 = 10^{-5}\text{Pa})$ ℃	$T_{p2}(p_2 = 10^{-2}\text{Pa})$ ℃	吸收剂 类型	激活	工作温度	被吸收 的气体	初速吸收速率 ^① $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)	吸收容量	
					温度 ℃	℃			$\times 0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ (T℃) ^②	$\times 0.13\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$ (20℃)
钛						CO			0.003 0.020(325℃) 0.10(450℃) 1.4(600℃) 7.0(700℃)	
钨	3370	2547	3297	薄膜			N ₂ CO	>2.5(a) >2.5(b)		
铀	1132	1462	1750	薄膜		240	O ₂ H ₂		10.6~9.3(20) 8.9~21.5(20)	
锆	1857	1857		块	1300		O ₂ H ₂ N ₂ CO ₂ CO			1.5(25℃) 8.0(400℃) 0.35(25℃) 53(350℃) 3.4(500℃) 5.8(800℃) 2.3(500℃) 12.2(800℃) 0(25℃) 1.7(500℃) 14.6(800℃)

注:①(a) $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) $\text{L}\cdot\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$;
②引用两个数值的情况,第二个数字是对扩散的或黑色的淀积层而言的

表 14-63 几种吸气剂在 25℃ 下的吸气容量 (单位: $10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{cm}^2$)

吸 气 剂	CO	N ₂	H ₂
锆铝(st101,涂覆型)	0.5	0.1	2.5
锆铝(st101,环状)	1.3	0.5	>20(100)
锆石墨(st171,环状)	5	2	>20(100)
钡膜	0.5	0.1	2.5

(2) 升华泵和溅射离子泵的工作金属

钛、钽、铌、钼、钨、钨等金属均曾用作各种吸气剂泵和离子泵的工作金属。钛、钽、钼、铌的物理特性见表 14-64、表 14-65。

表 14-64 钛、锆、钍的物理特性

性 质	单 位	Ti	Zr	Th
原子序数		22	40	90
原子量		47.90	91.22	232.05
同位素		46, 47, 48, 49, 50, (51)	(89), 90, 91, 92, 94, (95), 96, (97)	224, 225, 226, 227
原子价		3, 4	4	4
价轨道		$3d^2 4s^2$	$4d^2 5s^2$	$6d^2 7s^2$
晶格类型		$\alpha(<882^\circ\text{C})\beta$ 密集六角体心立方	$\alpha(<863^\circ\text{C})\beta$ 密集六角体心立方	面心立方
晶格常数	$\times 0.1\text{nm}$	$\alpha = 2.904$ $\alpha = 3.3065$	$\alpha = 3.2321$ $\alpha = 3.16$	$\alpha = 5.0871$

二、真空材料

(续)

性 质	单 位	Ti			Zr		Th			
		$c = 4.683(900^{\circ}\text{C})$			$c = 5.1474(867^{\circ}\text{C})$		(26.2°C)			
原子半径	$\times 0.1\text{nm}$						1.745			
原子体积	cm^3/mol	10.6			14		20.2			
原子间最近间距	nm	0.291			0.316		0.359			
密度	g/cm^3	4.51			6.4		11.2			
熔点	$^{\circ}\text{C}$	1660 ± 10			1852 ± 2		1690 ± 10			
沸点	$^{\circ}\text{C}$	3535			>2900		>3000			
比热容($0 \sim 100^{\circ}\text{C}$)	$\times 4.186\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$	0.126			0.066		0.034			
热导率	$\times 4.186\text{J}/(\text{cm}\cdot\text{s})\cdot\text{K}$	0.0407(20°C)			0.051		0.090(100°C)			
		0.0383(100°C)					0.108(650°C)			
		0.0354(300°C)								
		0.0364(500°C)								
热膨胀系数	$10^{-7}\cdot\text{K}^{-1}$	89($0 \sim 100$)			$61.5(c \text{ 轴})25^{\circ}\text{C}$					
		91($30 \sim 200$)			$56.9(a \text{ 轴})$					
		94($30 \sim 400$)					113($20 \sim 100$)			
		97($30 \sim 900$)					121($20 \sim 300$)			
		99($30 \sim 800$)					137($20 \sim 600$)			
		98($20 \sim 400$)								
		102($400 \sim 600$)								
		106($600 \sim 800$)								
蒸气压		10^{-6}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1.3	13.3	133.3 Pa
	Ti	1330	1415	1500	1600	1715	1850	2000	2200	2450 K
	Zr	1745	1850	1975	2110	2275	2460	2670	2920	3250 K
热辐射率	$C_{\lambda}\%$				48(α) 43(β)					
					$(\lambda = 0.652\mu\text{m})$					
电阻率	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	55.4(20°C)			40(0°C)		18(20°C)			
		70.1(100°C)			58(100°C)					
		137(516°C)			100(400°C)					
电子功函数	eV	3.9			4.12; 3.57		3.4			
李查生常数	$\text{A}\cdot\text{cm}^2/\text{K}^2$				330; 120		70			
二次发射系数	δ 最大				1.1(300V)					
磁化率	$10^{-6}\text{cm}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$	3.15 ± 0.02			-0.45		0.13			
机械性质 ^①		高纯度碘化物精炼的								
硬度	HV	80~100			100~250		40~80			
抗张强度	MPa	209~279			181~265		154~209			
屈服强度	MPa	112~168			~119		~175			
延伸率	%	40~60			25~40		~60			
面缩率	%	70~90								
弹性模量	MPa	108000			96300		69800			
泊松比					0.32~0.35		0.25~0.27			

注:①与制备方法、杂质含量和冷加工有很大关系

表 14-65 钨、钼、钽、铌的物理特性

特 性	单 位	钨(W)	钼(Mo)	钽(Ta)	铌(Nb)
原子量		183.92	95.95	180.95	92.91
原子价		2, 4, 5, 6	2, 3, 4, 5, 6	5	5, 3
晶格常数	nm	0.31648(25℃)	0.31403(20℃)	0.33026	0.33004(20℃)
原子半径	nm	0.141(12号配位) 0.137(8号配位)	0.136(8号配位)	0.147	0.147
原子体积	cm ³ /mol	9.53	9.4	10.89	10.83
原子间最近距离	nm	0.274	0.272	0.285	0.285
密度(20℃)	g/cm ³	19.3	10.2	16.6	8.66
熔点	℃	3395 ± 15	2620 ± 10, 2577	2996 ± 50	2415 ± 15, 2468 ± 10
沸点	℃	5530	5560, 5687, 4827	5427	3300
比热容(0℃)	4.186J/g·K	0.032(20℃)	0.0589	0.036	0.065
热导率	4.186J/cm·s·K	0.39(100℃) 0.40(0℃)	0.32(0℃)	0.13(20℃ ~ 100℃)	0.13(20℃)
线热膨胀系数	cm/cm·K	44.4 × 10 ⁻⁷ (27℃)	51 × 10 ⁻⁷ (500℃)	72.9 × 10 ⁻⁷ (827℃)	71 × 10 ⁻⁷ (20℃)
蒸汽压温度	K	2340	1855	2230	2304(2.7 × 10 ⁻⁴ Pa)
p [Pa] = 10 ⁻⁶	K	2640	2110	2510	2358(8.2 × 10 ⁻⁴ Pa)
10 ⁻⁴	K	3030	2440	2860	2404(1.67 × 10 ⁻³ Pa)
10 ⁻²	K	3570	2900	3340	2485(5.58 × 10 ⁻³ Pa)
10	K	5.5	5.78(27℃)	15.5	15.22(0℃)
电阻率(20℃)	10 ⁻⁸ × Ω·cm	5.1	5	3.82	3.96(0 ~ 600℃)
电阻率温度系数(0 ~ 100℃)	10 ⁻³ × °C ⁻¹	4.55	4.1	4.1	4.01
电子功函数	eV	1	4	19.5 × 10 ⁻³	
电子表面产额(2000K)	mA/cm ²	74.7(1500℃)		34.9(退过火的)	355 ~ 412(退过火的)
极限抗张强度	MPa	349(杨氏)	272 ~ 349(21℃)	188(杨氏)	87(20℃)
弹性模量	GPa			40	30(退过火的)
延伸率	%	255(烧结过的)	159.2(退过火的)	85(E)(HR)	80(洛氏)(退过火的)
硬度 HV					

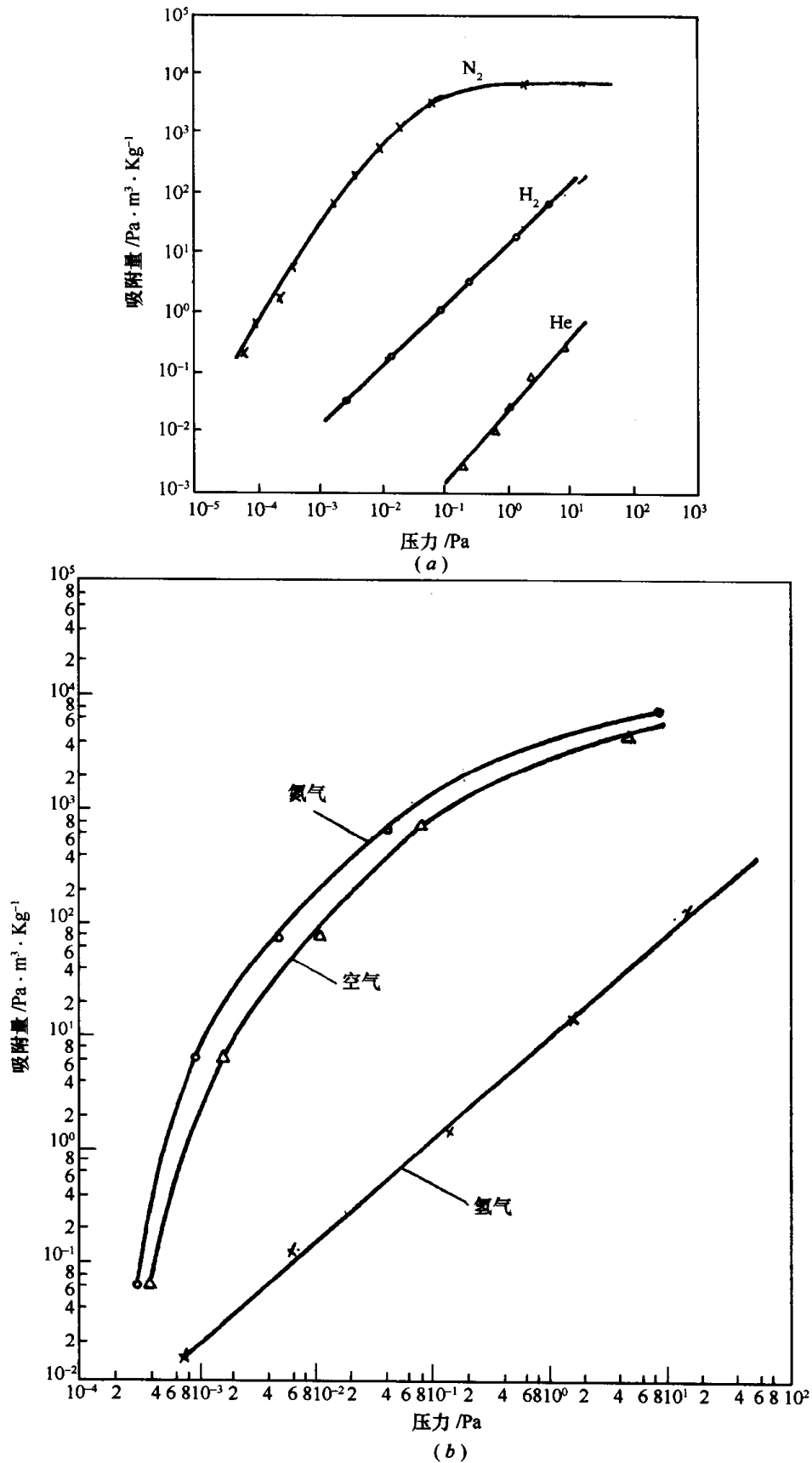


图 14-50 吸附等温线

(a) 5A 分子筛在 -196°C 下对 N_2 、 H_2 、 He 低压吸附等温线；

(b) 活性炭在 -196°C 下对 N_2 、 H_2 、空气吸附等温线。

表 14-67 活性炭的吸气性能

气 体	吸 气 容 量/ $\text{cm}^3(\text{STP})\cdot\text{g}^{-1}$							
	0℃		-18℃		-78℃		-196℃	
	133.3Pa	13.3Pa	133.3Pa	13.3Pa	133.3Pa	13.3Pa	133.3Pa	13.3Pa
He	—	—	—	—	—	—	2.78×10^{-3}	2.78×10^{-2}
H ₂	2.2×10^{-3}	2.2×10^{-2}	—	—	7.7×10^{-3}	7.7×10^{-2}	—	—
Ar	0.058	0.581	0.076	0.764	0.21	2.00	3.63	36.3
N ₂	0.033	0.318	—	—	0.396	3.65	8.45	46.5
CO	0.036	0.359	—	—	0.794	7.10	—	—
CO ₂	0.497	4.67	—	—	—	—	—	—
CH ₄	0.115	1.12	0.249	2.37	—	—	—	—
C ₂ H ₄	0.985	8.71	—	—	—	—	—	—
NH ₃	1.068	10.05	—	—	—	—	—	—
Kr	0.340	3.40	0.497	3.81	2.93	15.03	—	—
Xe	1.58	9.32	2.46	12.10	16.0	60.0	—	—
O ₂	—	—	—	—	—	—	7.35	57.25

表 14-68 13X 分子筛的最大吸气速率和吸气容量

气 体	N ₂	空气	Ar	H ₂
最大吸气速率/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	0.8	0.48	0.27	0.01
吸气容量/ $\times 133.3\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$	61.5	57	50	可略

表 14-69 几种吸气剂对气体的吸附热 (单位: 4.186kJ/mol)

材 料	He	H ₂	Ne	N ₂	Ar	O ₂	CH ₄	Kr	Xe
多孔玻璃	0.68	1.97	1.54	4.26	3.78	4.09	—	—	—
活性炭	0.63	1.98	1.28	3.70	3.66	—	4.64	—	—
炭黑	0.60	—	1.36	—	4.34	—	—	3.46	—
氧化铝	—	—	—	—	2.80	—	—	3.30	4.23
石墨化炭黑(2700℃处理)	—	—	—	—	2.46	—	—	—	—

表 14-70 几种吸附剂的比表面积

吸 附 剂	成 分	比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	孔径/nm
活性炭	无烟煤炭	500~580	$\sim 2^{\text{D}}$
重整催化剂	0.35% 铂在氧化铝中	460	3.2^{D}
分子筛 4A	铝钠硅酸盐	505	0.42~0.47
分子筛 5A	铝钠硅酸盐	588	0.5~0.56
分子筛 13X	铝钠硅酸盐	520	0.9~1

注: ①平均值

4. 低温泵、阱用冷冻剂

液态气体的蒸气压如图 14-46 所示。几种液化气体的性质见表 14-71。常用冷冻流体氟里昂的蒸气压见表 14-72。

表 14-71 液化气体的性能

名 称	分子式	下列蒸气压力所需温度/℃						凝固点 /℃	蒸发热/ 4.186kJ·kg ⁻¹	液密度 /kg·L ⁻¹	毒性	臭气	爆炸极限 /%
		10(10 ⁵ Pa)	5(10 ⁵ Pa)	2(10 ⁵ Pa)	10 ⁵ Pa	5.3×10 ⁴ Pa	1.3×10 ⁴ Pa						
氨	NH ₃	25.7	4.7	-18.7	-33.6	-45.4	-68.4	-77.7	313.5 (-15)	0.817 (-79)	猛	猛	13.5~79
二氧化硫	SO ₂	55.5	32.1	6.3	-10	-23	-46.9	-72.7	94.8 (-15)	1.46 (-10)	有	猛	—
二氧化碳	CO ₂	-39.5	-56.7	-69.1*	-78.2 ^①	-85.7 ^①	-100.2 ^①	-78.5	65.3 (-15)	1.19 (-60)	大量窒息	无	无
	CH ₃ Cl	47.3	22.0	-6.4	-24	-33.0	-63	-98	100.5 (-15)	0.99 (-20)	麻醉性	殆无	8.2~18.6
氟里昂 ₁₁	CFCl ₃	108.2	77.3	44.1	23.7	6.8	-23	-111	45.8 (-15)	—	少	无	无
氟里昂 ₁₂	CF ₂ Cl ₂	42.4	16.1	-12.2	-29.8	-43.9	-68.9	-150	38.6 (-15)	1.48 (-30)	少	无	—
氟里昂 ₂₂	CHClF ₂	24	0.3	-24.7	-40.8	-53.6	-76.4	-160	51.3 (-15)	—	—	—	—
	CH ₂ Cl ₂	—	90	62	40.3	22	-5	-97	87.3 (-15)	1.29 (+40)	有	无	12~15.7
氧	O ₂	-153.2	-164.5	-176	-183.1	-188.8	-198.8	-218.4	51.2 (-183)	1.14 (-183)	无	无	与可燃物 一起爆炸
氮	N ₂	-169.8	-179.1	-189.2	-195.8	-200.9	-209.7	-209.9	46.3 (-196)	0.808 (-196)	无	无	无
氢	H ₂	-241.8	-246	-250.2	-252.8	-254.5	-257.9	-259.18	1060 (-252.8)	0.070 (-253)	无	无	4.65~93.9
氦	He	—	—	-268	-268.9	-269.3	-270.3	26(10 ⁵ Pa) -272.2	4.54 (-268.9)	0.125 (-268.9)	无	无	无

注:①固态,表中()内数值为测定温度[℃]

表 14-72 氟里昂的饱和蒸气压

(单位: 10^{-1} MPa)

温度/℃	氟里昂-12	氟里昂-22	温度/℃	氟里昂-12	氟里昂-22
100	—	0.0210	-20	1.5366	2.51
-90	—	0.0489	-10	2.2342	3.63
-80	—	0.1050	0	3.1465	5.10
-70	0.1258	0.2088	10	4.3135	6.99
-60	0.2315	0.382	20	5.7788	9.35
-50	0.3999	0.660	30	7.5810	12.26
-40	0.6551	1.076	40	9.7707	15.79
-30	1.0245	1.679	50	12.386	20.03

(四) 真空规、质谱计用材

1. 电极材料

真空规的电极材料需满足耐高温、易除气、一定的工艺性能、出气速率低等要求。常用的材料有不锈钢、镍、钼、无氧铜等。有关金属的性能见表14-73。

表 14-73 几种金属的物理和机械性能

名称	20℃密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点/℃	线膨胀系数/ $10^{-7}\cdot\text{K}^{-1}$ (0~100K)	20℃时的热传导系数/ $4.186\cdot\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0~100℃时的热容/ $4.186\cdot\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	20℃时的电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	20℃时的电阻温度系数/ 10^{-3}	逸出功/eV	布氏硬度/MPa (未退火状态)	抗拉强度极限/MPa (退火状态)	相对延伸率% (退火状态)	弹性模量/ 10^3MPa	屈服点/MPa (退火状态)
钨	19.3	3410	44.0	0.48	0.034	5.5	4.0	4.50	3500	1100	—	352	720
钼	10.2	2625	53.0	0.35	0.065	5.17	3.3	4.27	2000	800~1200	20~25	280~300	38.5
铌	21.0	3160	67.0	—	0.0365	19.8	3.11	5.1	2500	500	25	471	—
镍	8.9	1452	733.0	0.198	0.120	6.8	6.8	4.84	1300~1600	420~530	40~50	205	140~210
铁	7.86	1535	119.0	0.17~0.20	0.111	10.0	6.57	4.36	450~700	180~250	40~50	210	100~140
铜	8.95	1083	165.0	0.92	0.095	1.56	4.33	4.47	800~1200	220	60	125	700
高铬钢(26%)	7.6	—	102.0	0.03	—	68	—	—	—	610~640	18~20	—	—

2. 灯丝材料

电离真空规与电真空器件不同,由于它需经常暴露于大气中,一般不采用氧化物阴极。灯丝材料的主要要求为:高温下具有低蒸气压,一定的发射性能,长寿命。最常用的灯丝材料是钨,也有的采用敷氧化钍钨丝,六硼化镧—铌丝,铌等材料。

元素的逸出功见表 14-74。理想钨灯丝的比特性见表 14-75。有关金属的性能见表14-73。

3. 电绝缘材料

常用电绝缘材料的介电常数见表 14-76。云母的物理性能见表 14-77。陶瓷的性能见表 14-54 和表 14-55。

表 14-74 元素的功函数

I 族	Li	Na	K	Rb		Cs	Cu	Ag	Au
ϕ_0/eV	2.4	2.3	2.2	2.15		1.9	4.6	4.5	4.9
T_e/K	750	440	360	340		320	1040	1010	1200
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	3.2	5.0	6.1	6.3		5.9	4.4	4.5	4.1
II 族	Be	Mg	Ca	Sr		Ba	Zn	Cd	Hg
ϕ_0/eV	3.9	3.6	3.2	2.6		2.5	4.3	4.1	4.5
T_e/K	1100	550	700	620		680	500	420	250
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	3.5	6.5	4.6	3.9		3.5	8.6	9.8	18
III 族	Al		Ga				La	Ce	Pr
ϕ_0/eV	4.2		3.8				3.3	2.8	2.7
T_e/K	1170		—				—	—	—
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	3.6		—				—	—	—
IV 族	Ti	Zr	Hf	Th	C	Si	Ge	Sn	Pb
ϕ_0/eV	3.9	3.57	3.65	3.4	4.4	3.6	4.8	4.4	4.0
$A_0^{-a/k}$	—	120	31.9	70	48	8	—	—	—
T_e/K	1600	—	2350	1910	2400	—	—	1180	760
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	2.4	—	1.65	1.8	1.8	—	—	3.7	5.2
V 族	V	Cb	Ta	As	Sb	B ₁			
ϕ_0/eV	4.1	4.0	4.1	5.2	4.0	4.6			
$A_{0e}^{-a/k}$	—	37	37	—	—	—			
T_e/K	—	—	2680	—	730	750			
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	—	—	1.5	—	5.5	6.1			
VI 族	Cr	Mo	W	U		—			
ϕ_0/eV	4.6	4.2	4.5	3.3					
$A_0^{-a/k}$	48	55	70	—					
T_e/K	1040	2230	2860	—					
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	4.4	1.9	1.6	—					
VII 族	Mn	Re							
ϕ_0/eV	4.0	4.7							
$A_{0e}^{-a/k}$	—	700							
T/K	1000	—							
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	4.0	—							
VIII 族	Fe	Co	Ni	Rh	Pd	Os		Ir	Pt
ϕ_0/eV	4.5	4.4	4.6	4.80	4.99	4.7		5.40	5.32
$A_{0e}^{-a/k}$	26	41	30	33	60	—		63	32
T_e/K	1320	1420	1330	2640	—	—		—	1860
$\phi_0 T_e^{-1} \times 10^3$	3.4	3.1	3.5	1.83	—	—		—	2.8

二、真空材料

表 14-75 理想钨灯丝的比特性(1cm 长和 1cm 直径)

T/K	$W', \frac{W}{ld}$ $/W \cdot cm^{-2}$	$R' \times 10^{-6},$ $\frac{Rd^2}{l} \times 10^{-6}$ $/\Omega \cdot cm$	$A', \frac{A}{d^{3/2}}$ $/A \cdot cm^{-3/2}$	$V' \times 10^3,$ $V \frac{\sqrt{d}}{l} \times 10^3$ $/V \cdot cm^{-1/2}$	$I', \frac{I}{ld}$ $/A \cdot \pi^{-1} \cdot cm^{-2}$	$M', \frac{M}{ld}$ $/g \cdot \pi^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 蒸发率	$\frac{R'T}{R'293}, \frac{RT}{R293}$
273		6.37					0.911
293	0.0	6.99	0.0	0.0			1.00
300	0.000100	7.20	3.727	0.02683			1.03
400	0.00624	10.26	24.67	0.2530			1.467
500	0.0305	13.45	47.62	0.6404			1.924
600	0.0954	16.85	75.25	1.268			2.41
700	0.0240	20.49	108.2	2.218			4.93
800	0.530	24.19	148.0	3.581			3.46
900	1.041	27.94	193.1	5.393			4.00
1000	1.891	31.74	244.1	7.749	3.36×10^{-15}	1.16×10^{-33}	4.54
1100	3.223	35.58	301.0	10.71	4.77×10^{-13}	6.81×10^{-30}	5.08
1200	5.210	39.46	363.4	14.34	3.06×10^{-11}	1.01×10^{-26}	5.65
1300	8.060	43.40	430.9	18.70	1.01×10^{-9}	4.22×10^{-24}	6.22
1400	12.01	47.37	503.5	23.85	2.08×10^{-8}	7.88×10^{-22}	6.78
1500	17.33	51.40	580.6	29.85	2.87×10^{-7}	7.42×10^{-20}	7.36
1600	24.32	55.46	662.2	36.73	2.91×10^{-6}	3.92×10^{-18}	7.93
1700	33.28	59.58	747.3	44.52	2.22×10^{-5}	1.31×10^{-16}	8.52
1800	44.54	63.74	836.0	53.28	1.40×10^{-4}	2.97×10^{-15}	9.12
1900	58.45	67.94	927.4	63.02	7.15×10^{-4}	4.62×10^{-14}	9.72
2000	75.37	72.19	1022	73.75	3.15×10^{-3}	5.51×10^{-13}	10.33
2100	95.69	76.49	1119	85.57	1.23×10^{-2}	4.95×10^{-12}	10.93
2200	119.8	80.83	1217	98.40	4.17×10^{-2}	3.92×10^{-11}	11.57
2300	148.2	85.22	1319	112.4	1.28×10^{-1}	2.45×10^{-10}	12.19
2400	181.2	89.65	1422	127.5	0.364	1.37×10^{-9}	12.83
2500	219.3	94.13	1526	143.6	0.935	6.36×10^{-9}	13.47
2600	263.0	98.66	1632	161.1	2.25	2.76×10^{-8}	14.12
2700	312.7	103.22	1741	179.7	5.12	9.95×10^{-7}	14.76
2800	368.9	107.85	1849	199.5	11.11	3.51×10^{-7}	15.43
2900	432.4	112.51	1961	220.6	22.95	1.08×10^{-6}	16.10
3000	503.5	117.21	2072	243.0	44.40	3.04×10^{-6}	16.77
3100	583.0	121.95	2187	266.7	83.0	8.35×10^{-6}	17.46
3200	671.5	126.76	2301	291.7	150.2	2.09×10^{-5}	18.15
3300	769.7	131.60	2418	318.3	265.2	5.02×10^{-5}	18.83
3400	878.3	136.49	2537	346.2	446.0	1.12×10^{-4}	19.53
3500	998.0	141.42	2657	375.7	732.0	2.38×10^{-4}	20.24
3600	1130	146.40	2777	406.7	1173	4.86×10^{-4}	20.95
3655	1202	149.15	2838	423.4	1505	7.15×10^{-4}	21.34

注:发射密度 I' 和蒸发率 M' 都是 $\pi \cdot cm^2$ 区域内的数据

表 14-76 常用电绝缘材料的介电常数

名 称	确定 ϵ 的温度 $t/^\circ\text{C}$	介电常数 ϵ	名 称	确定 ϵ 的温度 $t/^\circ\text{C}$	介电常数 ϵ
电木	18	3~5	石油、煤油	21	2.1
水	18	80.4	石蜡	20	2.0~2.5
胶纸板	18	3.5~5.0	云母	18	5.7~7.0
甘油	15	39.1	钛酸钡	20	1200
变压器油	18	2.2~2.5	瓷器	18	5.0~6.8
虫胶	18	3.1~3.7	氧	0	1.000524
硬橡胶	18	2.5~2.8	一氧化碳	0	1.000690
氢	0	1.000264	二氧化碳	0	1.000946
空气	0	1.000590	聚苯乙烯	20	2.6
	19	1.000576	聚四氟乙烯 ^①	20	1.8~2.2

注:①测定频率为 10^6Hz 。

表列数值是物质对不变电场或低频率而波长可以认为是无穷大的电场的介电常数。对气体物质,表中的 ϵ 是假定在标准大气压下的数值

表 14-77 云母的物理性能

	白 云 母	金 云 母	备 注
化学组成	$\text{KAl}_2 \cdot \text{AlSi}_3\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2$	$\text{KMg}_3 \cdot \text{AlSi}_3\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2$	
密度	2.6~3.2	2.6~3.2	
硬度(莫氏)	2.6~3.2	2.5~3.0	
纯度	大致可以	不太好	
透明度	大体上透明	不透明~不太透明	
脱水温度/ $^\circ\text{C}$	625	1000	
最高使用温度/ $^\circ\text{C}$	600	850	
熔点/ $^\circ\text{C}$	1200~1300	1200~1300	
含水量/%	4.5	3	
弹性模量/MPa	160000~210000	157000~194000	
屈服点/MPa	350~390	200~280	
弹性模量偏差/MPa($d = 50\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$)	235~265	100~130	
热容/ $4.186\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.208	0.206	
热导率/ $4.186\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$(0.8 \sim 1.4) \times 10^{-3}$	$0.8 \times 1.4 \times 10^{-3}$	
热膨胀系数/ $1 \cdot \text{K}^{-1}$ (20~200 $^\circ\text{C}$)	$(0.83 \sim 0.98) \times 10^{-5}$	1.35×10^{-5}	平行于劈开面
屈折率	1.56~1.60	1.58~1.61	
比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$10^{16} \sim 10^{17}$	比白云母稍小	
(500 $^\circ\text{C}$)	$10^8 \sim 10^{10}$	比白云母稍大	
介电系数	5~9	5~6	随产地而异
介电损失($f = 50\text{c} \sim 800\text{c}$)	$(2 \sim 8) \times 10^{-4}$		随纯度而异
($f = 1\text{Mc}$)	1.7×10^{-4}	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	
($f = 50\text{Mc}$)	1.6×10^{-4}		
($f = 500\text{Mc}$)	$\sim 2 \times 10^{-4}$		
绝缘强度/ $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ($d = 1\text{mm}$)	60~70	50	20 $^\circ\text{C}$, 50 $^\circ\text{C}$
($d = 0.1\text{mm}$)	200~210	150	空气中的值
($d = 0.01\text{mm}$)	240~400		
剥离容易程度	优	大致良好	
穿通容易程度	良好	良好	
耐放射性能力	良好	良好	
氩的渗透系数 (100 $^\circ\text{C}$)	$< 10^{-15}$	$< 10^{-15}$	
$/\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}(415^\circ\text{C})$	$< 10^{-13}$	$< 10^{-13}$	

(五)高温真空装置用材

高温真空装置包括真空蒸镀、冶炼、钎焊、退火等真空设备。用材涉及面很宽,其热性能难以一一列举,择其主要叙述如下:

1. 高温热辐射

各种材料的辐射率见表 14-78。

表 14-78 各种材料的辐射率

材 料	状 态	温度范围 ^① /℃	辐射率/ ϵ
铝	高级抛光表面	227~580	0.039~0.057
	普通抛光表面	23	0.040
	粗糙表面	25.5	0.055
	经 600℃ 氧化的表面	200~378	0.11~0.19
黄铜	高级抛光表面	258~378	0.033~0.037
	经喷砂处理的压延面	22	0.20
	经 600℃ 氧化的表面	200~600	0.61~0.59
铬	抛光表面	38~600	0.08~0.36
铜	经仔细抛光的电工铜	80	0.018
	普通抛光表面	100	0.052
	商品光泽表面,但非镜面	22	0.072
	经 600℃ 氧化的表面	200~600	0.57
	经长时间加热,有较厚的氧化层表面	2.5	0.78
	熔融状态	1080~1275	0.16~0.13
金	纯金,高度抛光	227~628	0.018~0.035
铁与钢的金属面 (有一层氧化薄膜)	高度抛光,电工铁	177~227	0.052~0.064
	钢:抛光表面	100	0.066
	铁:抛光表面	427~1025	0.14~0.38
	铁:粗糙表面	100	0.17
	铁:喷砂处理表面	20	0.24
	铸铁:普通抛光表面	200	0.21
	铸钢:抛光表面	770~1010	0.52~0.56
	钢板:冷轧光面	900~1010	0.55~0.60
铁与钢的氧化面	铁板:酸浸泡,呈红色	20	0.61
	铁:暗褐色表面	100	0.31
	钢板:经过压延	21	0.66
	铸铁:经 600℃ 氧化的表面	198~600	0.64~0.78
	钢:经 600℃ 氧化的表面	198~600	0.79
	铁:坯料的粗糙表面	928~1118	0.87~0.95
铅	未经氧化的纯金属面	127~227	0.057~0.075
	呈灰色的氧化面	24	0.28
	经 198℃ 氧化的表面	198	0.63

(续)

材 料	状 态	温度范围 ^① /℃	辐射率/ ϵ
汞	纯汞的干净表面	0~100	0.09~0.12
钼	细丝	727~2600	0.096~0.292
蒙乃尔合金	经 600℃ 氧化的表面	198~600	0.41~0.46
镍	纯镍, 抛光表面	21~371	0.045~0.087
	线	187~1010	0.096~0.186
	经 600℃ 氧化的表面	198~600	0.37~0.48
镍合金	铬镍	52~1030	0.64~0.76
	铬镍抛光面	100	0.059
	发亮的镍铬合金丝	49~1000	0.65~0.79
	氧化的镍铬合金丝	49~500	0.95~0.98
白金	纯白金抛光板	227~627	0.054~0.104
	带状	928~1630	0.11~0.17
	细丝	27~1227	0.036~0.192
	线	227~1380	0.073~0.182
银	纯银抛光表面	38~628	0.020~0.032
不锈钢	KA-2S(8Ni, 18Cr)呈银光的粗面, 加热后呈褐色	215~490	0.44~0.36
	KA-2S(8Ni, 18Cr), 在 526℃ 时加热 24h	215~526	0.62~0.73
	NCT-3(20Ni, 25Cr)在炉上使用氧化后呈褐色, 有锈蚀点产生	215~526	0.90~0.97
	NCT-6(60Ni, 12Cr)使用后生成光滑的黑色氧化膜状态	272~564	0.89~0.82
钽	细丝	1340~3000	0.194~0.33
锡	光泽表面	245	0.043~0.064
钨	长期使用后的细丝	26.7~3320	0.032~0.35
	细丝(另外测定)	3320	0.39
锌	商品抛光面	227~527	0.045~0.053
	经 400℃ 氧化	450	0.11
	发亮的电镀铁板	28	0.23
	发亮的电度铁板, 氧化成褐色	24	0.28
玻璃		20	0.94
纸		100	0.92
石英玻璃		22	0.932

注: ①温度范围的上下限分别对应着辐射率的上下限

2. 加热体

真空炉加热材料的性能见表 14-79。常用电阻材料的主要数据见表 14-80。石墨的物理机械性能见表 14-81。

3. 热绝缘材料

常用陶瓷的性能见表 14-55。陶瓷零件的公差见表 14-82。

表 14-79 真空炉用各种发热材料的性能

材料 性能		钨	钽	钼	石墨	镍铬铁合金		铬 铁		钼 镍				备 注
						1 种	2 种	1 种	2 种	A-1250	A	A-1	C	
最高使用温度 (发热体温度) /℃		2750	2600	2100	2300	1150	1000	1200	1100	1100	1200	1250	1100	蒸汽压为 1×10^{-2} Pa 时 允 许的温度
密度/g·cm ⁻³		19.6	16.6	10.2	2.24(1.6)	8.4	8.25	7.2	7.35	7.2	7.15	7.1	7	7.16
熔点/℃		3400±50	3000±50	2630±50	3850±50	1400		1495		1510	1510	1510	1490	1500
比热容 /4.186J·g ⁻¹ . K ⁻¹		0.034 0.044 0.047	0.034 0.038 0.044	0.062 0.080	0.17 0.3 0.4									20℃ 500℃ 1000℃ 1500℃ 2000℃
比电阻/ (20℃)μΩ·cm		5.5	12.4	5	900	108	112	140	122	137	139	145	165	140
电阻温度系数		4.8×10 ⁻³	3.3×10 ⁻³	4.57×10 ⁻³	1.26×10 ⁻³	1.5×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻⁴	5.5×10 ⁻⁵	4.9×10 ⁻⁵	3.2×10 ⁻⁵	-7×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
热膨胀系数/ ×10 ⁻⁷ K ⁻¹		44.4 51.9 72.6	65 66 80	55 60										20℃ 500℃ 1000℃ 1500℃ 2000℃
热传导系数/ 4.186J·cm ⁻¹ . s ⁻¹ .℃ ⁻¹		0.23 0.28 0.32 0.355	0.13 0.18 0.2	0.35 0.236	0.315 0.22 0.13 0.06 0.04					0.045	0.045	0.045		20℃ 500℃ 1000℃ 1500℃ 2000℃

(续)

材料 性能	钨	钽	钼	石墨	镍铬铁合金		铬 铁		钼			派罗马克斯电合金		备注
					1种	2种	1种	2种	A-1250	A	A-1	C	D	
蒸气压 /×133.3Pa	2×10 ⁻⁹ 1×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁸ 3×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁹ 3×10 ⁻⁵ 1×10 ⁻²	1×10 ⁻⁶ 1.5×10 ⁻³										室温 1000℃ 1500℃ 2000℃ 2500℃
	0.03~0.3	0.2~0.3	0.1~0.3	0.95	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	0.05~0.75	
与耐火材料 的反应	1900℃ 2500℃ 2000℃	1900℃ 1600℃ 1800℃	1900℃ 1900℃ 1800℃	2300℃ 1800℃	使用45%~50%以上 Al ₂ O ₃ 时		使用45%以上 Al ₂ O ₃ 时							Al ₂ O ₃ BeO MgO
成分/%	W	Ta	Mo	C	75~79Ni 18~20Cr	57~65Ni 15~18Cr 其余 Fe	3.5~5.5 Al 23~26Cr 其余 Fe	2~4Al 17~21Cr 其余 Fe	4Al,21Cr 1~2.5Co 其余 Fe	5Al,23Cr 1~2.5Co 其余 Fe	5.5Al, 24Cr 1~2.5Co 其余 Fe	8Al,28Cr 0.5Ti 其余 Fe	5Al,20Cr 0.5Ti 其余 Fe	
特性及用途	高温用, 加工性良好, 与水蒸气不可共存	高温用, 加工性良好, 不可有氢气	中高温用, 加工性良好, 氧化性弱	高温用, 加工性良好, 还原性氮	中温用, 加工性一般	中低温用, 加工性优良	中高温用, 加工性良好, 强度弱	中温用, 加工性一般	低温用, 氧化膜的性变好	中温用, 氧化膜的性变好	中高温用, 氧化膜性好, 一般用	中高温用, 负电阻性, 加工性劣	中低温用, 正电阻性	

二、真空材料

表 14-80 常用电阻材料的主要数据

材料名称	20℃时 电阻系数 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	电阻温 度系数 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	电阻丝最高 工作温度 $^{\circ}\text{C}$	材料名称	20℃时 电阻系数 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	电阻温 度系数 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	电阻丝最高 工作温度 $^{\circ}\text{C}$
康铜	0.49	0.00001	400	铋	1.07~1.2	0.0040	—
镍铬(高阻)合金	1.10	0.0004	1000	钨	0.055	0.0052	—
锰镍 ^①	0.195	0.0036	200	锌	0.058~0.059	0.0035	—
锰镍铜合金 ^②	0.43	0.00002	300	镍	0.068~0.072	0.0067	—
德银	0.28	~0.0003	150	汞	0.957	0.00089	—
铝	0.027	0.0040	—	黄铜	0.06~0.08	~0.0015	—
银	0.016	0.0036	—	铅	0.206~0.221	0.0040	—
铜	0.0165	0.0043	—	合金钢	~0.45	~0.0015	—

注:①锰镍是苏联牌号,有 HMLI5 和 HMLI2.5 两种;

②锰镍铜合金德国名称为锰铜(含铜 86%、锰 12%、镍 2%)

表 14-81 石墨的物理机械性能

性 能	人造石墨	浸渍不透性石墨 ^①	压制不透性石墨
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.2~2.27	2.03~2.07	
增重率		14~15	
抗拉强度/MPa	25~35	8~10	10~23
抗压强度/MPa	20~24	60~70	90~100
抗弯强度/MPa	8.5~10	24~28	37.4
冲击值/ $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.4~1.6	2.8~3.2	2.64
硬度(布氏)/MPa	100~120	250~350	
弹性模量/MPa		$(0.7 \sim 1.0) \times 10^4$	
膨胀系数/ K^{-1}		5.5×10^{-6}	1.989×10^{-5}
热容(40℃~50℃) $/4.186 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		0.4	
导热系数/ $1.16 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	100~110	100~110	100~110
浸渍深度/mm		12~15	
许用温度/℃		-15~+170	
渗透性/		不渗透 ^②	
全孔率/%	28~32		
氧化温度/℃	400		
吸水率/%	12~14		

注:①以酚醛树脂浸渍;

②厚度 10mm 在 2 倍工作压力(不小于 0.1MPa)下不浸透

4. 热电偶

常用热电偶的热电势见表 14-83。

5. 真空热处理

各种材料的热处理温度和真空度之间的关系见表 14-84。电子器件常用材料的退火温度见表 14-85。镀铜、镍、金的零件的烧氢温度见表 14-86。

表 14-82 陶瓷装置零件公差(选自 NE0.010.016)
(线值尺寸极限偏差)

零件公称 尺寸 L /mm	各级的偏差/mm							
	I 级		II 级		III 级		IV 级	
	单面 + 或 -	双面 ±	单面 + 或 -	双面 ±	单面 + 或 -	双面 ±	单面 + 或 -	双面 ±
≤5	0.2	0.1	0.3	0.2	0.5	0.3	0.8	0.4
>5~10	0.3	0.2	0.4	0.2	0.7	0.4	1.2	0.6
>10~15	0.4	0.2	0.5	0.3	1.0	0.5	1.6	0.6
>15~20	0.5	0.3	0.6	0.3	1.2	0.6	2.0	1.0
>20~25	0.6	0.3	0.8	0.4	1.4	0.7	2.2	1.1
>25~30	0.7	0.4	1.0	0.5	1.6	0.8	2.5	1.3
>30~40	0.8	0.4	1.2	0.6	1.8	0.9	3.0	1.5
>40~50	1.0	0.5	1.4	0.7	2.0	1.0	3.5	1.8
>50~60	1.0	0.5	1.6	0.8	2.4	1.2	4.0	2.0
>60~70	1.2	0.6	1.8	0.9	2.6	1.3	4.4	2.2
>70~80	1.2	0.6	2.0	1.0	3.0	1.5	4.8	2.4
>80~90	1.4	0.7	2.2	1.1	3.4	1.7	5.2	2.6
>90~100	1.4	0.7	2.4	1.2	3.6	1.8	5.6	2.8
>100~120	1.6	0.8	2.8	1.4	4.2	2.1	6.6	3.3
>120~140	1.6	0.8	3.2	1.6	4.8	2.4	7.6	3.8
>140~160	1.8	0.9	3.6	1.8	5.4	2.7	8.6	4.3
>160~180	1.8	0.9	4.0	2.0	6.0	3.0	9.6	4.8
>180~220	2.0	1.0	4.4	2.2	6.6	3.3	10.6	5.3
>220 以上	—	—	—	—	3L%	1.5L%	5L%	2.5L%

注:1. 第IV级偏差数值为推荐数据;
2. 在特殊情况下,允许采用双面不同数值的尺寸极限偏差,但其公差应符合上表单面偏差数值;
3. 零件曲面上孔的尺寸极限偏差一般不超过III级

表 14-83 常用热电偶的热电势

热端温度 t/℃	冷端温度为 0℃ 时热电偶的热电势/mV					
	康铜-铜	康铜-银	康铜-铁	镍-碳	镍-镍铬合金	康铜-镍铬合金
-200	-5.46	—	-7.50	—	—	—
-100	-3.32	—	-4.40	—	—	—
0	0	0	0	—	0	0
20	0.76	0.78	—	0	0.82	1.25
100	4.1	4.12	5.15	1.76	4.07	5.62
200	8.8	8.84	10.48	4.17	8.12	11.08
300	14.1	14.1	15.77	6.54	12.22	19.09
400	19.9	9.77	20.96	8.38	16.32	26.48
500	26.3	25.79	26.12	10.28	20.62	34.18
600	—	32.15	31.47	12.50	24.87	41.95
700	—	—	37.15	15.29	29.12	50.02
800	—	—	43.25	18.30	33.12	57.94
900	—	—	49.26	21.80	37.27	65.76
1000	—	—	—	25.63	41.45	—
1100	—	—	—	29.79	45.62	—
1200	—	—	—	34.35	49.77	—

注:在接合点处,电流由热电偶的前一种材料流向后一种材料,热电势视为正值

二、真空材料

表 14-84 各种材料热处理温度和真空度的关系

热处 理 材 料		淬 火				退 火	
		预热温度/℃ 和真空度	淬火温度/℃ 和真空度	冷却速度	回火温度 /℃	最后硬度	温度/℃ 真空度/Pa
铁素体不锈钢							630~830 10^{-1}
马氏体不锈钢							830~900 10^{-1}
奥氏体 不锈钢	不稳定的						1010~1120 10^{-1}
	稳定的						950~1120 $10^{-2} \sim 10^{-3}$
空冷低合金模具 钢 高碳高铬冷压模 具钢 含碳 5%~7% 的 热压模具钢 含钨 9%~18% 的 热压模具钢 含钼 5%~8% 的 热压模具钢		750~800 以上	850~980	20min~25min 内从 淬火温度冷却到 100℃			730~870 10^{-1}
		800~820 以上(1Pa)	950~1025 (1Pa)	20min~25min 内从 淬火温度冷却到 0℃	200~350	RC54~61	870~900 1
		800~820 以上(1Pa)	900~1060 (1Pa)	25min~30min 内从 淬火温度冷却到 100℃	540~680	RC35~58	
		810~870 以上(1Pa)	990~1275 (1Pa)	25min~30min 内从 淬火温度冷却到 100℃	540~680	RC35~58	815~900 1
		730~840	1090~1230	25min 内从淬火温 度冷却到 55℃	500~650	RC15~58	
含钨高速钢		810~970 保温 15min~ 20min(1Pa)	1180~1320 (1Pa)	18min 内从淬火温 度冷却到 200℃	二次硬化 550~570, 1h~2h	RC61~64	870~900 1
含钼高速钢		800℃~850℃ 以上保温 15min~30min (1Pa)	1190~1240℃ (1Pa)	18min 内从淬火温 度冷却到 200℃	二次硬化 550~570, 1h~2h	RC60~64	
钼							1000~1100 $10^{-1} \sim 10^{-4}$
钨							1400 以上 $10^{-1} \sim 10^{-2}$
钛							700~750 $1 \sim 10^2$
锆							900~1000 $1 \sim 10^{-2}$
磁性材料							900~1200 $10^{-2} \sim 10^{-3}$

表 14-85 电子器件常用材料退火温度

材料名称	烧氢温度/℃	真空退火	
		温度/℃	真空度/Pa
无氧铜	600~800	700~850	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
可伐	1000~1100	1000~1050	$4 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-3}$
镍	800~900	800~900	$4 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-3}$
钼	900~1100	950~1000	$4 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
康铜	800~850	800	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
敷镍铁	900~950		
覆铝铁	550~700		
不锈钢	950~1000	950~1000	$1 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$
钨	850~900		
铁镍合金	900~1000	750~800	$1 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-3}$
钛		950~1050	1×10^{-3}
钽		1800~2000	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$
陶瓷		1100	$1 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4}$
阿母可铁		900~1000	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$

表 14-86 镀铜、镍、金零件烧氢温度

材料	烧氢温度/℃	材料	烧氢温度/℃
镀铜件:		镀镍件:	
可伐	900~950	无氧铜	800~820
钼	850	可伐	850~900
不锈钢	800~850	钼	850
铁	900~950	钢	750~800
		镀金件钼	600~650

三、航天器用材料质量损失性能

(一) 空间环境和航天器的相互作用

空间环境是一个包括真空、低温、太阳辐射、宇宙辐射、空间碎片、原子氧等多种因素的综合环境。运行在空间环境轨道上的航天器将不同程度地和空间环境相互作用,并产生多种效应,这些效应可能引发一系列光、热、电、机械特性的变化,从而使航天器可靠性大大降低,甚至失效。如:太阳辐射将会使航天器表面的温度上升,产生热效应;原子氧是一种非常强的氧化剂,化学性质极活泼,因此它与低地球轨道的航天器表面材料发生化学反应生成氧化物,表面粗糙度变劣,因而导致表面材料放气加快,结构材料变形,质量损失率增加,机械强度下降,温控失效;空间碎片与航天器相撞会造成航天器表面的剥蚀、穿孔甚至造成灾难性破坏。又如:在空间真空环境下,易挥发的液体快速蒸发,使润滑表面变成摩擦面;由于空间气体分子密度大大降低,气体热传导能力丧失,由于太阳辐射、地球反射和辐射的热能及航天器设备产生的

热能使航天器表面温度上升,这将会使航天器上的材料、元件、电子仪器受到损害;由于空间真空环境中缺氧,有些发动机不易点火;在空间真空环境下,航天器任何一处微小的放气或漏气,都会产生一个附加的加速度,改变航天器的运行轨道和姿态;材料在空间真空环境中,由于蒸发(液体)、升华(固体)以及有机聚合物材料在制造中添加的催化剂、抗氧化剂、增塑剂、增粘剂等挥发产生材料的质量损失,带来材料成分上的变化,可能引起材料性能的变化,导致材料硬化、脆化和龟裂,造成防护层的分层、破裂等现象。另外,材料表面和内部吸附的水气、二氧化碳和其它气体及氧化物在真空环境中会产生材料放气,虽然使材料表面更加清洁,使材料的电学、光学性能得到改善,然而活动部件表面吸附的气体分子逃逸到空间中去,使活动部件驱动力矩加大,逐渐发展到接触面粘结或焊死(冷焊),使活动部件失效;此外,由于材料的质量损失和放气,其挥发物将会污染航天器上的敏感表面如光学镜头、热控涂层、继电器触点等,将使其功能降低甚至失效。

(二) 航天器用材料出气筛选的主要指标

空间环境影响航天器的工作性能、工作寿命,航天器的许多故障与空间环境直接和间接作用有关,因此,研究空间环境与航天器的相互作用,进而采取相应措施去减少各种因素的影响,这对空间技术的发展是非常重要的。对于空间荷能粒子的影响来说,主要是采取各种防护措施。对于空间真空环境的影响,主要是对航天器所用结构和功能材料在出气方面进行筛选。

在航天器中,金属材料很少因出气指标而被淘汰,而在航天器中广泛采用了出气较大的有机材料和复合材料,因此必须进行筛选。

在出气方面对材料进行筛选的主要指标有以下几种:

1. 材料出气筛选的异位测试指标

①总质量损失(TML)。用试验前后试样的质量差占试样初始质量的百分数来表示。总质量损失不仅包含材料本身的质量损失,同时包含材料放气引起的质量损失,它反映可能引起材料性能变化的程度。

②收集到的可凝挥发物(CVCM)。用试验前后收集板的质量差占试样初始质量的百分数来表示。材料在真空环境中所损失的那部分质量中,有些有可能在较冷的表面上重新凝结,有可能对航天器敏感表面造成污染。收集到的可凝挥发物指标主要反映材料逸出物在冷凝面上冷凝量的大小,也就反映了材料逸出物对敏感表面造成污染的程度。

③水蒸气回收量(WVR)。用试样刚刚于热真空中暴露完毕时的质量与随后重新在 50% 湿度下放置 24h 后的质量之差占试样初始质量的百分数来表示。该指标主要反映材料对水蒸气的吸附能力。由于水气对光学装置特别是红外光学装置非常有害,因此该项指标对光学材料的选择来说无疑是很有意义的。

2. 材料出气筛选的原位测试指标

为了预估长寿命航天器在整个寿命期间的质量损失情况,就需要了解质量损失及可凝挥发物随时间的变化情况,分析它们的变化规律,因此直接用 TML、CVCM、WVR 三项指标来预估是不可能的,必须实现真空中质量损失及可凝挥发物的原位测试。材料出气筛选的原位测试的指标有:

(1)质量损失百分率(MLR)随时间的变化。即测试时间内累积损失的质量占初始质量的百分率,单位为%。

(2)可凝挥发物逸出率随时间的变化(VCMER)。即测试时间内累积逸出的可凝挥发物

的质量占初始质量的百分率,单位为%。

(三) 航天器用材料出气筛选的试验方法标准及材料出气筛选的取舍判据

要对材料出气进行筛选,首先必须规定材料出气试验方法标准及材料取舍的判据。

1. 材料出气筛选试验方法标准

我国于 1988 年制定了航天工业部标准 QJ1558-1988《真空中材料挥发性能测试方法》。该标准与世界各国普遍采用的 ASTM(美国材料试验学会)标准 E595-90《真空环境中出气引起的总质量损失和收集到的可凝挥发物标准试验方法》相一致。

对航天器用材料出气筛选的原位测试试验方法,已制定了航天工业部标准 QJ1332-1987《真空中材料质量损失测试方法》及 QJ1371-1988《真空中材料可凝挥发物测试方法》。

2. 材料出气筛选的取舍判据

材料出气筛选取舍的判据应由用户根据具体部件和系统的需要而定。但历史上一直把航天器用材料出气筛选的取舍判据规定为:

TML 的淘汰线为 1.00%

CVCM 的淘汰线为 0.10%

把 TML 的淘汰线定为 1.00%,是因为 TML 大于 5%就可能影响材料的物理与机械性能,若小于 1%,通常认为质量损失的是吸附的水分、气体和溶剂,因此不会影响材料的性能。

把 CVCM 的淘汰线定为 0.10%,是因为 $0.5\text{g}/\text{cm}^2$ 的聚合物如果具有 0.1% 的 CVCM,并且全部凝结在同样面积的敏感表面上,会形成厚度为 $4\mu\text{m}$ 的污染层,足以污染触点或光学器件。

(四) 航天器用材料出气筛选的异位测试

在标准 QJ1558-1988《真空中材料挥发性能测试方法》中,规定了测试装置的结构尺寸、试样质量、预处理方法、试样加热温度、可凝挥发物收集温度、测试时间及数据处理方法等。

1. 试验装置

试验装置示意图如图 14-51 所示,它共有 24 个测试单元(工位),可一次测试七种材料,每种材料三份试样,每份试样占一个工位,另有三个工位用于分析交叉污染的影响。抽气系统采用 $300\text{L}/\text{s}$ 的溅射离子泵做主抽泵,当挥发物在 24h 内合计不超过 80mg 时,可以在 1h 内将测试室抽到小于 $7 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的压力。预抽泵为分子筛吸附泵,另用机械泵作卷席预抽。测控装置采用 TDW-3902 型温度电子调节器,恒温水循环装置采用 501 型超级恒温器供水。

图 14-52 给出了测试单元示意图,其中 A~F 以及 H、J 为关键尺寸,标准对各种尺寸、偏差、同轴度均有要求。铜加热棒的加热功率为满载 360W ,它在 1h 内可将加热棒加热到 125°C ,温度稳定度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。需要清洁加热棒时,可以将加热棒加热到 200°C 以上。水冷基座采用恒温器供给 $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 的恒温水。

2. 试验步骤

- ①试样预处理:将试样放在相对湿度为 50% 的大气中放置 24h;
- ②对铝制小盒进行清洗和干燥处理,并且用灵敏度为 $0.1\mu\text{g}$ 的天平称质量,设质量为 m_1 ;
- ③将试样($100\text{mg} \sim 300\text{mg}$)放置在铝制小盒内后,连小盒一起称质量,设质量为 m_2 ;
- ④将放置在收集板上的铝箔片称质量,设质量为 m_3 ;

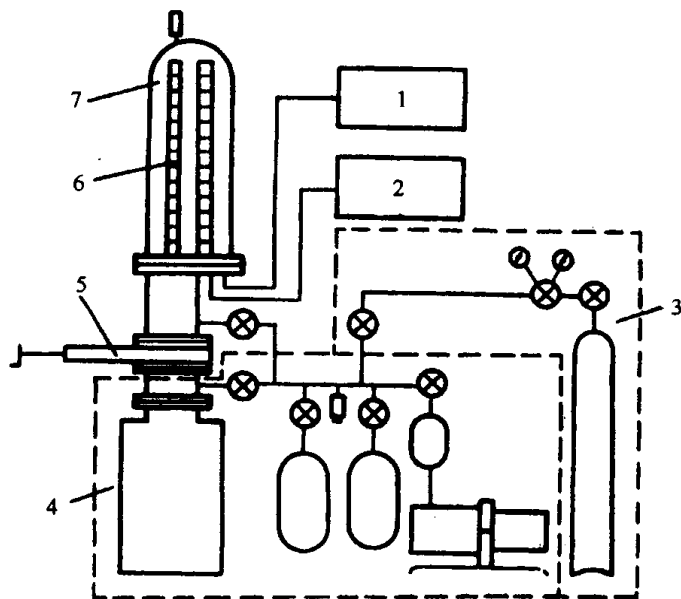


图 14-51 可凝挥发物测试装置示意图

1—测温、控温装置；2—恒温水循环装置；3—充气装置；
4—抽气系统；5—高真空阀门；6—测试单元；7—真空测试室。

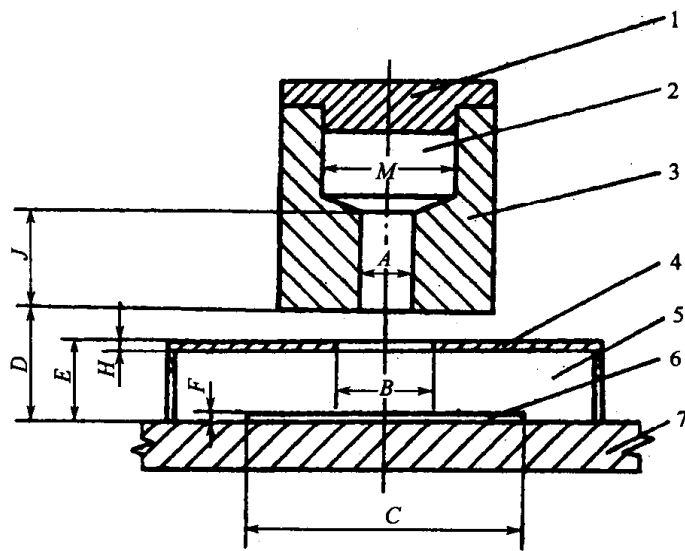


图 14-52 测试单元示意图

1—端盖；2—试样室；3—铜加热棒；4—隔板；5—收集腔；6—收集板；7—水冷基座。

- ⑤将铝箔片放在收集板上，将装试样的小盒装入真空测试室的试样室中，并用铜盖密封；
- ⑥启动真空系统，将测试室抽至高真空后，收集板通恒温水使其温度保持在 25°C ；
- ⑦将试样室加热到 125°C ，保持 24h，此时试样中的挥发物从试样室的出口不断放出，挥发物中的可凝成分被温度较低的收集板上的铝箔片收集；
- ⑧经过 24h 后，真空测试室放气，打开测试室，从中取出装试样的小盒及铝箔片；
- ⑨在恒温恒湿间内，对铝箔片及装试样的小盒称质量，设此时铝箔片质量为 m_4 ；装试样的小盒质量为 m_5 ；
- ⑩将装试样的小盒放在常温下湿度为 50 的空气中放置 24h；
- ⑪对装试样的小盒再次称质量，设为 m_6 ；

⑫测试结果计算

$$\text{TML} = \frac{m_2 - m_5}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

$$\text{CVCm} = \frac{m_4 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

$$\text{WVR} = \frac{m_6 - m_5}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (14-14)$$

选择 125℃ 作为试样受热温度, 因为它是航天器在轨飞行时有可能遇到的最高温度, 而且高度交链的聚合物在 125℃ 时不蒸发, 也没有明显的降解。选择 25℃ 作为收集板温度, 因为它是航天器常见的舱内温度。选择 24h 的热真空暴露时间, 是因为试验证明收集到的可凝挥发物的数值在 24h 后接近最大值, 时间继续增加至 48h、96h……, 此值无明显变化。

3. 材料出气的范围

美国国家航空航天局(NASA)发表的材料出气范围见表 14-87。它是以美国 1978 年发表的分属 417 个厂家和公司的 2807 种材料的出气数据为基础, 按使用条件分为 17 类, 经过统计分析得到的, 其测试条件符合 ASTM 标准。

表 14-87 材料出气的范围

类 别	统计品种	TML 的范围/(%)	CVCm 的范围/(%)
粘合剂	577	0.01~51.85	0.00~14.60
电缆绝缘材料和热缩套管	191	0.00~24.03	0.00~10.03
涂料	176	0.06~43.89	0.00~12.16
电器元件	100	0.00~18.48	0.00~6.85
电屏蔽	44	0.03~14.06	0.00~8.58
膜材与片材	136	0.00~10.70	0.00~4.78
泡沫塑料	137	0.12~23.20	0.00~1.86
润滑脂及润滑剂	47	0.00~96.00	0.00~40.00
编织带及软电缆束	103	0.03~9.08	0.00~4.05
层压制品及电路板	112	0.01~7.55	0.00~0.97
记号材料和墨水	71	0.08~88.60	0.00~15.90
模塑材料	123	0.00~36.32	0.00~2.78
颜料、漆、清漆	244	0.03~19.75	0.00~7.60
封装材料	324	0.03~38.03	0.00~5.48
橡胶制品和合成橡胶	237	0.01~57.38	0.00~25.00
胶带	173	0.05~12.69	0.00~6.54
热脂	12	0.05~38.88	0.02~22.20

4. 部分国产航天器用材料的出气数据

利用异位测试装置在标准规定的条件下测得的部分国产航天器用材料的出气数据见表 14-88。

三、航天器用材料质量损失性能

表 14-88 部分国产空间材料的出气数据

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCM /(%)	WVR /(%)
粘 <						

(续)

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCN /(%)	WVR /(%)
粘剂合剂	—	EA9320	—	1.90	0.02	0.63
	—	EA9320	40℃,48h 真空出气	0.80	0.07	0.71
	—	MY0510/HT976	—	1.62	0.00	0.53
	—	MY0510/HT976	40℃,48h 真空出气	0.96	0.03	0.53
	胶膜	FM73	—	1.74	0.02	0.41
	胶膜	FM73	40℃,48h 真空出气	1.02	0.02	0.38
	胶膜	SJ-2 (A+C)	180℃,2h	1.30	0.04	0.70
	胶膜	J-78B	90℃,3~4h	2.10	0.23	0.42
	9304~2 胶膜	—	—	2.13	0.11	0.26
	胶膜	J-47(B+C)	130℃,2.5h	2.30	0.24	0.47
	泡沫胶	J-78D	90℃,3~4h	1.46	0.21	0.64
	泡沫胶	J-47D	130℃,2.5h	1.51	0.29	0.63
	泡沫胶	FM410-1	—	0.55	0.03	0.52
	泡沫胶	FM410-1	—	0.04	0.00	0.41
	—	TDE86	—	2.05	0.00	1.17
	—	TDE86	40℃,48h 真空出气	0.68	0.00	1.00
	—	SOLITHANE 113	—	0.29	0.02	0.15
	—	SOLITHANE 113	40℃,48h 真空出气	0.16	0.00	0.14
	—	QY8911	—	1.37	0.03	0.89
	—	QY8911	40℃,48h 真空出气	0.40	0.00	0.72
	—	仿 934	—	3.12	0.04	0.62
	—	仿 934	40℃,48h 真空出气	1.79	0.00	0.57
	室温固化胶	—	—	1.23	0.02	0.58
	室温固化胶	—	40℃,48h 真空出气	0.41	0.00	0.55
	—	Redux312	—	1.35	0.19	0.38
	—	Redux312	40℃,48h 真空出气	0.47	0.18	0.42
	—	Redux312	60℃,48h 真空出气	0.44	0.15	0.26
	—	Redux420	—	2.74	0.02	1.03
	—	Redux420	40℃,48h 真空出气	0.69	0.06	1.14
	—	Redux420	60℃,48h 真空出气	0.49	0.02	1.05
—	Tactic123	—	3.70	2.05	0.24	
—	Tactic123	40℃,48h 真空出气	3.10	2.07	0.26	
—	Tactic123	60℃,48h 真空出气	0.59	0.27	0.26	
—	EA9320	60℃,48h 真空出气	0.55	0.05	0.64	

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCN /(%)	WVR /(%)
电和热缩绝缘材料	电缆芯线绝缘皮	—	—	0.07	0.00	0.02
	电缆引出线防尘胶管	—	—	0.04	0.01	0.02
	电缆外衣	—	—	7.71	2.23	0.38
	电缆芯线绝缘皮	—	—	0.11	0.01	0.03
涂料	温控涂层	C24	—	0.49	0.06	0.13
	温控涂层	ZS5	—	0.35	0.11	0.12
电器元件	Y4-4IK 型插头	—	—	0.66	0.01	0.11
	固线柱	—	钴 60 辐照, 剂量: $4.7 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.90	0.04	0.24
	固线柱	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.65	0.04	0.22
	固线柱	—	—	1.11	0.03	0.25
	尼龙	—	—	31.49	5.41	0.07
膜材与片材	耐辐照聚乙烯	—	—	0.43	0.03	0.03
	镀铝薄膜	—	—	0.12	0.00	0.09
	片基	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	3.23	0.00	1.93
	聚酰亚胺镀铝膜	—	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.82	0.00	0.40
	铝箔	—	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.04	0.01	0.03
	防火隔热复合膜	LC-5	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.78	0.17	0.14
	防火隔热复合膜	LC-1	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.05	0.00	0.04
	防辐射、防原子氧膜	F4-0.1	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.00	0.00	0.01
	防辐射、防原子氧膜	F4-0.05	(20 ± 3)℃, 相对湿度 55% \pm 10%, 24h	0.00	0.00	0.02
	内用复合膜	—	—	0.13	0.01	0.01
编织带与软电缆束	尼龙搭带	—	—	2.58	0.13	1.54
	尼龙带	—	—	2.34	0.09	1.33
	阻燃带	TM-17	—	0.39	0.04	0.03
	碳铝阻燃带	—	—	7.02	0.02	5.85
	金色阻燃带	—	—	0.98	0.00	0.47
	阻燃带	—	—	0.63	0.01	0.09

第十四章 真空技术常用材料

(续)

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCM /(%)	WVR /(%)
层 压 制 品 与 电 路 板	环氧层板	—	—	1.38	0.01	0.53
	玻璃纤维布	—	—	0.04	0.01	0.00
	碳纤维复合材料	—	—	0.39	0.00	0.33
	高硅氧玻璃钢	—	—	4.20	0.00	3.43
	碳纤维原料	—	—	0.41	0.00	0.22
	环氧酚醛层压玻璃布板	3240	—	0.54	0.01	0.11
	As-70 胶高强 一号碳纤维	—	—	1.52	0.11	0.73
	环氧酚醛玻璃钢	3840	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.54	0.00	0.07
	碳纤维/环氧板 (648 环氧)	—	钴 60 辐照, 剂量: $5 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.63	0.03	0.49
	环氧 648 中 强碳纤维	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.52	0.00	0.22
	印刷电路板	—	—	0.58	0.01	0.08
	铝基碳纤维	—	—	0.16	0.01	0.03
	Nomex 纸	—	—	3.24	0.00	2.75
	环氧层板 K-49	—	钴 60 辐照, 剂量: $5 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.30	0.03	0.21
	环氧层板 K-49	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}$ (Si)	0.36	0.01	0.16
	碳纤维	—	—	0.96	0.00	0.33
	碳纤维	—	—	0.57	0.00	0.40
	环氧酚醛层 压玻璃布板	—	—	0.84	0.02	0.24
	沪塘防火隔热材料	—	—	0.14	0.01	0.03
	复合材料	—	—	4.56	0.36	0.44
模 塑 材 料	聚酰亚胺 (润滑改性)	—	—	1.29	0.00	0.44
	氟 4-1 棒	—	—	0.04	0.00	0.01
	改性聚四氟乙烯	—	—	0.06	0.01	0.02
	改性聚酰亚胺	—	—	1.04	0.01	0.41
	增强尼龙六号	—	—	2.84	0.16	0.34

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCMM /(%)	WVR /(%)
颜 料 与 油 漆	环氧树脂绝缘漆	H31-3	(25±1)℃, 24h (60±2)℃, 24h	11.29	1.34	0.43
	环氧树脂底漆	—	—	1.96	0.01	0.20
	白漆	SR107A	—	0.60	0.15	0.02
	浸渍漆	8930	—	2.84	0.16	0.34
	黑漆	Z306	—	1.02	0.00	0.61
	黑漆	SB-3	50℃, 2.5h 90℃, 4h 120℃, 24h 125℃, 1.2×10 ⁻⁴ Pa, 24h	0.29	0.06	0.06
	黑漆	SB-3	室温固化	2.66	0.31	0.08
	黑漆	SB-3	50℃, 2.5h 90℃, 4h 120℃, 24h	0.75	0.18	0.05
	黑漆	F2603	—	0.97	0.01	0.97
	黑漆	Z306	室温固化 90℃, 8h	3.84	0.00	1.01
	黑漆	Z306	室温固化	9.03	0.00	1.01
封 装 材 料	液态腻子	W29-3	室温固化	3.98	0.02	0.35
	灌封胶	W29-4	室温固化	6.61	0.05	0.37
	有机硅凝胶	—	—	1.34	0.46	0.02
	封固胶	HY-914	—	3.70	0.14	0.35
	密封胶	XM-23	钴 60 辐照, 剂量: 4.7×10 ⁴ rad(Si)	5.61	0.17	0.26
	高温环氧树脂	—	—	0.61	0.00	0.31
	高温环氧树脂	—	—	0.62	0.00	0.30
	环氧树脂	—	—	0.61	0.04	0.25
橡 胶 制 品 与 合 成 橡 胶	橡胶垫片	—	钴 60 辐照, 剂量: 5×10 ⁴ rad(Si)	10.50	0.51	0.31
	航空用橡胶板	—	钴 60 辐照, 剂量: 2.35×10 ⁴ rad(Si)	8.78	2.11	0.18
	橡胶垫片	—	—	10.56	0.54	0.30
	航空用减震密封海绵胶板	—	钴 60 辐照, 剂量: 5×10 ⁴ rad(Si)	8.45	1.41	0.46
	甲基硅橡胶 RTV566	—	—	0.10	0.01	0.03
	O 型密封圈	—	—	1.69	0.04	0.19
	O 型密封圈	—	钴 60 辐照, 剂量: 4.7×10 ⁴ rad(Si)	1.50	0.04	0.16
	氟橡胶	—	—	0.73	0.00	0.23
	单组份室温固化硅橡胶	GD-414	—	1.63	0.24	0.08
	单组份室温固化硅橡胶	940602	—	1.59	0.29	0.17

(续)

类别	名 称	代 号	预 处 理	TML /(%)	CVCN /(%)	WVR /(%)
胶 带	双面镀铝聚脂膜胶带	—	—	0.55	0.01	0.14
	3M 双面胶带	—	—	3.86	0.94	0.11
	聚酰亚胺胶带	—	—	0.85	0.20	0.17
	蓝色电工胶带	—	无胶面与胶面叠合 4 层	28.06	8.80	0.15
	聚酰亚胺膜胶带	—	—	0.92	0.01	0.52
	双面压敏胶带	—	—	0.65	0.01	0.19
	压敏胶膜	—	—	1.03	0.06	0.34
	双面压敏胶带	—	—	0.62	0.00	0.18
非 匀 质 材 料	碳纤维复合材料 涂 SB-3 黑漆	—	50℃, 2.5h 90℃, 4h 120℃, 12h	0.53	0.03	0.27
	环氧层板涂 SB-3 黑漆	—	50℃, 2.5h 90℃, 4h 120℃, 24h 125℃, 24h	0.67	0.04	0.45
	环氧层板涂 SB-3 黑漆	—	50℃, 2.5h	1.12	0.07	0.41
	Nomex 蜂窝/浸低压 钨酚醛树脂	—	钴 60 辐照, 剂量: $5 \times 10^4 \text{rad}(\text{Si})$	3.41	0.07	2.83
	Nomex 蜂窝/浸低压 钨酚醛树脂	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}(\text{Si})$	3.36	0.08	2.73
	K-49 + Nomex 蜂窝	—	钴 60 辐照, 剂量: $2.35 \times 10^4 \text{rad}(\text{Si})$	2.67	0.10	1.42
	Nomex 蜂窝/喷 956 漆	—	钴 60 辐照, 剂量: $5 \times 10^4 \text{rad}(\text{Si})$	3.75	0.11	2.05
	Nomex 蜂窝	—	—	2.76	0.01	1.72
其 它 材 料	SiC 铝基复合材料	—	—	0.06	0.00	0.03
	高硅氧玻璃纤维布	—	—	1.69	0.04	1.51
	C-C	—	—	0.09	0.00	0.05
	真空陶瓷管	—	—	0.03	0.01	0.01
	陶棉	—	—	4.56	0.36	0.44

(五) 航天器用材料出气筛选的原位测试

1. MLR 的测试

(1) 试验装置

MLR 测试装置如图 14-53 所示。该装置采用以溅射离子泵为主泵的无油超高真空系统, 工作压力为 $10^{-5} \text{Pa} \sim 10^{-6} \text{Pa}$ 。采用卡恩 (Cahn) 型真空微量天平来称质量, 天平灵敏度为 $10^{-5} \text{g}/\mu\text{A}$, 最大称量为 10^{-2}g 。样品室温度采用 DWT-702 型精密自动控制仪控制, 控制范围

为 $(45\sim 125)^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。测试过程用微机控制,测试数据经微机处理后由打印机给出。

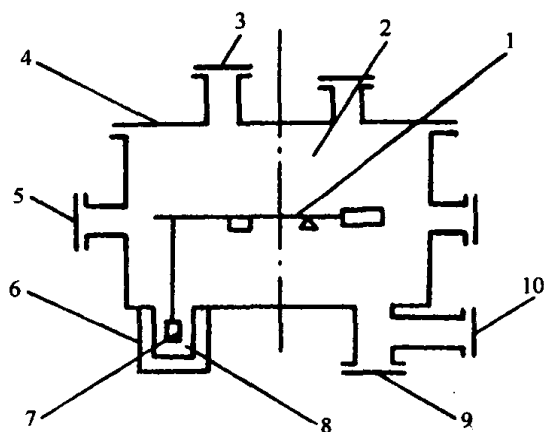


图 14-53 MLR 测试装置示意图

1—天平；2—真空室；3—备用法兰；4—大法兰；5—引线；6—样品室加热电源；
7—试样；8—样品室；9—超高真空系统；10—预抽真空法兰。

(2) 试验条件

工作压力 $10^{-3}\text{Pa} \sim 10^{-6}\text{Pa}$;

试样加热温度 $(50\sim 125)^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;

辐照①电子辐照,电子能量为 $0.4\text{MeV} \sim 0.5\text{MeV}$,总通量为 1.1×10^{15} 个电子/ cm^2 ,通量率为 1.1×10^{12} 个电子/ cm^2 ,辐照时间为 1000s。

② $\text{Co}^{60}\gamma$ 辐照,剂量 $27 \times 10^4 \text{rad}$,辐照时间为 25min。

③紫外辐照,在 $200\text{nm} \sim 400\text{nm}$ 范围内,最大紫外线强度 $60\text{mW}/\text{cm}^2$,其均匀度在 120nm 内优于 80%;

测试时间 最长为 5500h;

测试温度 最低为 25°C ,最高为 150°C 。

(3) 测试数据

部分国产航天器用材料的质量损失百分率 MLR 测试数据见表 14-89。

表 14-89 真空中部分国产空间材料 MLR 随时间变化数据

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 $^{\circ}\text{C}$	辐照	3min	36min	1h	10h	24h	48h	72h	3a
粘 合 剂	胶粘剂	J-15	25	—	0.20	1.28	1.56	3.50	4.06	4.39	4.57	5.68
	胶粘剂	J30	25	—	0.08	0.52	1.21	3.97	5.33	5.79	5.95	7.88
	胶粘剂	J39	25	—	0.34	2.00	2.81	4.14	4.73	5.33	5.61	7.84
	胶粘剂	J40	25	—	0.31	1.50	2.39	5.37	6.82	8.12	8.51	10.56
	丁基胶	—	25	—	0.04	0.05	0.05	0.05 (2h)	0.05 (4h)	0.05 (6h)	0.05 (8h)	0.05 (10h)
	氯丁胶	—	70	—	0.07	0.21	0.27	0.46 (5h)	0.52 (7h)	0.55 (10h)	0.57 (14h)	0.64 (18h)

第十四章 真空技术常用材料

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%									
			测试温度 ℃	辐照	3min	36min	1h	10h	24h	48h	72h	3a		
粘 合 剂	有机硅橡胶	南大 87		—	0.05	0.44	0.52	0.89	1.06	1.11	1.14	1.70 (2a)		
					Co ⁶⁰ 辐照	1 d	0.12	0.47	0.45	0.87	1.00	1.02	—	1.18 (2a)
						10 d	0.24	0.32	0.43	0.95	1.00	1.18	—	1.58 (2a)
	有机硅橡胶	南大 705	70	—	0.12	0.58	0.58	1.33	1.50	1.57	—	2.50 (2a)		
					Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.26	0.51	0.67	1.34	1.38	1.45	—	1.77 (2a)
						10d	0.23	0.51	0.66	1.07 (6h)	1.23 (8h)	1.27 (10h)	—	—
					MLR/%									
					6min	30min	1h	10h	18h	26h	48h	72h		
	硅橡胶	1102- V ₁ V ₂ 893	100	—	0.48	0.22	0.27	0.39	0.39	0.40	0.41	0.41		
	硅橡胶	120V ₁ V ₂ 10	100	—	0.78	0.96	0.88	1.14	1.18	1.19	1.23	—		
	胶	110-2	100	—	0.28	0.20	0.25	0.51	0.58	0.61	0.65	0.71 (144h)		
	胶	131	100	—	0.39	0.31	0.25	0.61	0.70	0.74	0.82	—		
	胶粘剂	FCBN-35	125	—	0.88	0.65	0.84	1.36 (6h)	1.47 (10h)	1.51 (14h)	1.64 (20h)	1.65 (24h)		
	胶粘剂	HYJ-66	125	—	0.14	1.04	1.31	2.54 (6h)	2.84 (10h)	2.99 (14h)	3.20 (20h)	3.29 (24h)		
	胶粘剂	HYJ-65	125	—	0.59	2.16	2.79	4.53 (6h)	4.93 (10h)	5.10 (14h)	5.26 (20h)	5.43 (24h)		
	硅橡胶	—	45		0.68	1.35 (36min)	1.71	2.34	2.39	2.49	2.49	2.62 (3a)		
	胶	JX-10	50	—	0.02	0.05	0.15	0.29 (4h)	0.43 (8h)	0.45 (10h)	0.48 (12h)	0.50 (14h)		
					电子 辐照	原位	0.03	0.15	0.18	0.39 (4h)	0.41 (8h)	0.45 (10h)	0.50 (12h)	—
						异位	0.06	0.08	0.11	0.25 (4h)	0.36 (8h)	0.42 (10h)	0.45 (12h)	—

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 /℃	Co ⁶⁰ γ 辐照	6min	30min	1h	10h	18h	26h	48h	72h
粘合剂	防潮胶	—	50	—	0.06	0.14	0.28	0.37 (3h)	0.68 (5h)	0.82 (8h)	0.93 (10h)	1.19 (14h)
				电子辐照	0.03	0.14	0.42	0.65 (3h)	0.85 (5h)	0.91 (8h)	0.99 (10h)	1.02 (12h)
	硅胶	231	50	—	0.08	0.27	0.49	0.85 (3h)	1.01 (5h)	1.29 (8h)	1.37 (10h)	1.43 (14h)
				电子辐照	0.05	0.32	0.56 (2h)	0.67 (3h)	0.81 (5h)	0.91 (8h)	0.99 (10h)	1.26 (14h)
	硅胶	232	50	—	0.20	0.47	0.72	1.14 (3h)	1.31 (5h)	1.53 (8h)	1.61 (10h)	1.68 (14h)
				电子辐照	0.05	0.30	0.34	0.70 (3h)	0.83 (5h)	0.93 (8h)	0.98 (10h)	1.06 (14h)
	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 /℃	辐照	3min	36min	1h	5h	10h	40h	72h	3a
	硫化硅橡胶	106-1	25	—	0.03	1.83	2.36	3.62	3.84	4.19	4.21	5.30
	硫化硅橡胶	106-2	25	—	0.12	2.05	2.54	3.96	4.28	4.82	5.20	7.88
	硫化硅橡胶	107-1	25	—	0.15	2.75	3.56	4.52	4.46	5.16	5.34	7.10
	硫化硅橡胶	KH-802	125	—	0.22	2.28	2.65	4.04	4.57	6.23	6.90 (54h)	7.25 (64h)
			25	—	0.79 (6min)	1.82	2.24	3.30	3.63	4.06	4.12	5.25
	硫化硅橡胶	703	45	—	1.13	4.19	4.99	6.34	6.52	6.49 (14h)		
	硫化硅橡胶	705	45	—	0.16	0.27	1.06	1.27	1.59	1.59 (14h)		
	硫化硅橡胶	703(中)	45	—	0.11	1.89	2.76	4.34	4.79	4.87 (14h)		
	室温硫化 硅橡胶	1#	45	—	0.15 (6min)	0.26	0.30	0.45	0.60	0.67 (14h)		
	室温硫化 硅橡胶	2#	45	—	0.07 (6min)	0.15	0.37	0.67	0.82	0.90 (14h)		
	金属导电胶	—	45	—	0.12	0.23	0.23	0.40	0.42	0.48	0.48	0.96
	环氧树脂胶	—	45	—	0.22	0.49	0.49	0.67	0.67	0.99	0.99	1.66
				电子辐照	0.32	0.32	0.40	0.80	0.92	0.97	0.97	1.97
	环氧树脂胶	914 917	60	—	0.22	0.49	0.49	0.67	0.67	0.96	0.46	1.66
				电子辐照	0.30	0.32	0.40	0.81	0.92	0.97	0.97	1.97

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 /℃	辐照	3min	36min	1h	5h	10h	40h	72h	3a
粘合剂	苯基硅橡胶	—	55	—	0.21 (5min)	0.56 (30min)	0.77	0.77	0.84	0.84	0.84	—
	缩醛烘干胶液	X98-11	60	—	0.34	1.30	1.62	2.94	3.43	5.16 (100h)	6.13 (500h)	6.59 (1600h)
			125	—	0.26 (3min)	6.44 (30min)	8.64	10.73	10.99	11.4 (100h)	11.44 (100h)	11.44 (240h)
	压敏胶	9304-1	50	—	0.12 (5min)	0.045 (30min)	0.32	0.40	0.45	0.65	0.71 (60h)	0.78 (75h)
电缆绝缘材料与热缩套管					MLR/%							
					3min	1h	5h	10h	20h	40h	72h	89h
	聚四氟乙烯导线 (抽出导线)	聚四氟乙烯直径为 0.35mm	50	—	0.04 (50min)	0.08	0.27	0.37	0.21 (22h)	0.27	0.27	0.27
				—	—	0.22	0.21	0.25	0.21	0.25 (44h)	0.29	0.32
	聚四氟乙烯导线	—	50	电子辐照 (异位)	—	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	—
	粗导线	抽出铜丝	50	—	0.00	0.44	0.63	0.76	0.96	1.02	1.04 (45h)	—
				电子辐照 (异位)	0.00 (20min)	0.04	0.23	0.31	0.37	0.43	0.62 (70h)	—
	腊扎线	—	70	—	0.66	1.12	1.36	1.45	1.49	1.48	1.48	1.68 (2a)
				Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.27	0.63	0.68	0.73	0.74	0.74	0.90 (2a)
					14d	0.78	0.87	0.97	1.01	1.01	1.01	1.36 (2a)
	耐辐照聚 四氟乙烯 安装线	AR-100	70	—	0.00 (4min)	0.24	0.24	0.25	0.27	0.31	0.34	0.64 (2a)
				Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.03	0.06	0.10	0.12	0.13	0.14	0.14 (48h)
					18d	0.08	0.03	0.09	0.13	0.13	0.13	0.13 (48h)
	热缩套管	RSC	70	—	0.10	0.11	0.18	0.23	0.29	0.30 (24h)	—	0.50 (2a)
				Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.14	0.30	0.36	0.54	0.55	0.53	0.74 (2a)
					26d	0.31	0.47	0.55	0.57	0.59	0.60	0.76 (2a)

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐照	6min	30min	1h	10h	22h	48h	72h	2a	
涂 料	涂层	OSR-1	125	—	—	0.01	0.05	0.56	0.82 (20h)	1.13 (50h)	1.29 (80h)	3.90	
	涂层	OSR-2	125	—	—	—	0.02 (7h)	0.02	0.09 (20h)	0.18 (50h)	0.22 (80h)	0.92	
	涂层材料	—	100	—	0.13	0.40	0.51	1.06	1.13	1.19	1.23	1.22 (90h)	
	防潮涂层	—	100	—	0.21	0.58	0.49	0.63	0.66	0.67 (30h)	0.67 (38h)	0.67 (48h)	
	有涂层的 96#低密 度材料	—	100	—	0.48	0.37	0.44	0.72	0.86	0.99 (40h)	1.03 (48h)	1.20 (144h)	
	有涂层的 88#低密 度材料	—	100	—	0.54	0.48	0.36	0.68	0.84	1.04	—	1.28 (168)	
	有涂层的 MD ₂ 玻璃钢	—	125	—	0.78	1.27	1.67	2.18	2.28 (20h)	2.28 (30h)	2.31 (34h)	2.34 (44h)	
电 器 元 件					MLR/%								
					10min	30min	40min	1h	1.5h	2h	2.5h	3h	
	保险丝	5A	150	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
	天然丝	—	150	—	0.12	0.85	0.97	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	
膜 材 与 片 材					MLR/%								
					3min	30min	1h	10h	24h	48h	72h	2a	
	聚砒棒	—	70	—		0.78	0.54	0.52	0.90	0.86	—	—	1.08
				Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.04	0.06	0.13	0.30	0.33	0.31	0.30	0.58
					15d	0.15	0.35	0.31	0.50	0.47	0.46	0.46	0.68
	聚酰亚胺膜	6050	70	—		0.17	0.17	0.17	0.19	0.23	0.24	0.25	0.40
				Co ⁶⁰ 辐照	1d	0.16	0.22	0.22	0.28	0.33	0.33	0.33	0.56
					11d	0.41	0.55	0.55	0.62	0.65	0.67	0.68	0.88
	合成压敏 胶镀铝膜	JW-37	50	—		—	0.33	0.33	0.42	0.46	0.47 (32h)	0.47 (38h)	0.48 (48h)

第十四章 真空技术常用材料

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 ℃	辐照	3min	30min	1h	5h	10h	24h	48h	72h
膜 材 与 片 材	天然压敏 胶镀铝膜	—	50	—	0.38 (6min)	0.62	0.65	0.94 (6h)	1.06	1.35 (26h)		1.72
	聚酰亚 胺薄膜	—	50	—	1.08 (8min)	1.82 (20min)	1.96	2.68 (2.5h)	2.13	—	2.07 (20h)	2.07 (26h)
				电子辐照 (异位)	1.44 (4min)	1.88 (20min)	1.90	1.90	1.90	1.90 (15h)	1.90 (20h)	1.90 (26h)
	铝箔 + 9304-1 胶膜 + 双 面镀铝 聚脂膜	—	125	—	0.08	0.31	0.36	1.23	1.50	1.17	2.00 (50h)	4.32 (2a)
	铝箔 + 9304-1 胶膜 + 聚酰 亚胺膜	—	125	—	0.08	0.71	0.80	1.43	1.68	1.90	2.23 (50h)	4.44 (2a)
	铝箔 + 9304-1 胶膜	—	125	—	0.09	0.34	1.84	5.96	7.23	8.69	9.61 (40h)	10.05 (50h)
	皱纹镀铝	—	25	—	0.41	0.38	0.38	0.45	0.46	0.46 (12h)	0.46 (14h)	0.46 (18h)
	小花纹镀铝	—	25	—	0.47	0.32	0.34	0.45	0.47	0.47 (12h)	0.47 (14h)	0.47 (18h)
	聚酰亚胺	—	25	—	0.00	0.17	0.19	0.23	0.25	0.25 (12h)	0.25 (14h)	0.25 (18h)
	聚酰胺	—	25	—	0.92	1.82	1.91	1.93	1.94	1.94 (12h)	1.94 (14h)	1.94 (18h)
	聚脂薄膜	—	45	—	0.13 (6min)	0.13	0.13	0.13	0.13 (8h)	0.13 (10h)	0.13 (12h)	0.13 (14h)
	聚酰亚 胺薄膜	—	45	—	0.24 (6min)	0.21	0.28	0.35	0.35 (8h)	0.35 (10h)	0.35 (10h)	0.35 (14h)
	聚酰亚 胺引出线	—	45	—	0.13 (6min)	0.26	0.26	0.26	0.26 (8h)	0.26 (10h)	0.26 (12h)	0.26 (14h)
	聚砒	—	45	—	0.01 (6min)	0.14	0.14	0.21	0.28 (8h)	0.28 (10h)	0.28 (12h)	0.28 (14h)
	聚脂	—	25	—	0.126	0.23	0.27	0.27	0.27	0.27 (14h)	0.27 (16h)	0.27 (18h)

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%							
			测试温度 /℃	辐照	3min	30min	1h	5h	10h	24h	48h	72h/3a
膜 材 与 片 材	聚脂	—	25	—	0.18	0.29	0.32	0.36	0.36	0.36 (14h)	0.36 (16h)	0.36 (18h)
	聚碳酸脂	—	45	—	0.23 (6min)	0.31	0.31	0.31	0.31 (8h)	0.29 (10h)	0.31 (12h)	0.31 (14h)
	聚醚环 氧树脂	—	45	—	0.06 (6min)	0.26	0.50	1.08	1.27	1.46	1.55	1.72/ 3.00
	聚酰亚胺 保持架	—	50	—	—	0.51 (18min)	0.82	—	1.35	0.46 (20h)	1.55 (50h)	1.55
				电子辐照 (异位)	—	0.32 (18min)	0.73	—	1.24	0.41 (20h)	1.49 (50h)	—
	聚四氟 乙烯	—	55	—	—	0.02	0.05	0.05	0.05	0.06 (14h)	0.06 (16h)	0.06 (18h)
			150	—	0.024 (10min)	0.121	0.914	0.291 (1.6h)	0.315 (1.8h)	0.315 (2.1h)	—	—
	聚氯乙烯	—	55	—	—	0.08 (20min)	0.70 (1.5h)	1.79	3.35 (12h)	5.66	7.09 (50h)	8.60
	酚醛	AT-4	55	—	—	0.09 (15min)	0.63	1.27	1.52 (12h)	1.80	1.97	1.98
	聚酰亚胺	Ⅲ 新方法成型	55	—	—	0.59	0.88	1.18 (3h)	1.75	1.32	1.40 (50h)	1.40
	邻苯二 甲酸脂	DNP	55	—	0.04 (5min)	0.09 (20min)	0.16	0.40 (6h)	0.42	0.50	0.50 (30h)	0.50 (34h)
	辐照改性 聚乙烯	—	55	—	0.02 (16min)	0.08	0.13	0.30	0.32	0.35 (14h)	0.35 (16h)	0.35 (22h)
	聚苯撑脂	—	55	—	0.08 (10min)	0.13	0.15	0.24	0.26	0.26	0.26 (30h)	0.26 (34h)
	聚乙烯	—	150	—	0.148 (25min)	0.396 (50min)	0.420 (1h20min)	0.445 (2h)	0.495 (2.5h)	0.569 (3h)	—	—
	聚碳酸脂	—	150	—	0.13 (20min)	0.18	0.13	0.13 (1.5h)	0.13 (2h)	0.13 (2.5h)	—	—
	聚四氟乙烯 与聚六氟丙 烯共聚物	FS-40	55	—	0.03 (10min)	0.05	0.09	0.24 (6h)	0.27	0.31 (16h)	0.31 (20h)	0.31 (26h)
	低压钡 酚醛	—	100	—	0.42 (6min)	0.89	1.27	2.20	2.33	0.42 (26h)	2.46	2.57 (96h)

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐照	30min	50min	1h	2h	2.5h	3h	4h	5h	6h
膜材与片材	酚醛	AT-4	150	—	—	1.12	1.20 (1.2h)	1.77 (2.1h)	1.77	1.77	1.96 (4.3h)	1.96	1.96
	辐照改性聚乙烯	—	150	—	0.124	0.514	0.627	0.998 (2.1h)	—	1.250	1.250	0.900	0.950
			150	—	0.323 (45min)	0.376	0.404 (1.2h)	0.457	0.457	—	—	—	—
	聚四氟乙烯	—	150	—	0.121	0.145 (45min)	0.914	0.315	0.315	—	—	—	—
	聚酰亚胺 新方法成型	Ⅲ	150	—	0.28	0.85	0.95	1.23	1.30	1.30	1.30	—	—
				—	0.75	1.01 (40min)	1.06	1.22 (1:50)	1.27	1.38	1.43	1.38	—
泡沫塑料	聚四氟乙烯 与聚六氟丙烯 共聚物	FS-40	150	—	0.08	0.12	0.16 (1:10)	0.16	0.16	0.16	—	—	—
					MLR/%								
					2min	30min	1h	5h	10h	24h	48h	72h	3a
	泡沫塑料	1#	45	—	0.00	2.15	4.13	5.38	5.59	5.95	6.08	—	6.95
		2#			0.08	2.11	2.74	3.92	4.47	4.56	4.64	4.64	4.81
		3#			0.21	0.75	1.30	2.51	2.96	3.30	3.51	3.62	4.45
		4#			0.04	2.14	2.73	3.70	4.04	4.33	4.50	4.75	6.81
		5#			0.00	1.27	2.23	3.16	3.58	3.80	4.09	4.30	6.52
	硬聚胺脂 泡沫塑料	1#	45	—	0.37	4.50	4.50	4.50	4.60	4.60	4.65	4.65	4.90
		2#			0.08	0.92	1.01	1.18	1.18	1.22	1.26	1.26	1.90
		3#			0.34	5.15	5.15	5.36	5.60	5.60	5.60	5.60	5.80
		4#			0.04	0.69	0.69	0.82	0.82	0.91	0.91	0.95	1.40
		5#			0.09	8.51	3.42	3.64	3.64	4.06	4.06	4.06	4.80

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐照	3min	6min	24min	30min	48min	1h	5h	8h	10h
润滑脂与润滑剂	硅油	4116	50	—	0.53	1.30	1.32	1.49	1.86	2.12	5.33	7.70	8.00
	东风	—	50	—	0.71	0.87	18.7	2.20	—	—	—	—	—
	硅油	法国	50	—	0.30	0.30	0.80	0.80	—	0.90	0.90	0.92 (7h)	1.03
	仿 F-50	—	50	—	0.28	0.50	0.67	0.73	1.00	1.17	2.30	2.74	—
	三羟甲基丙烷脂	—	50	—	0.12	0.40	1.09	1.44	1.94	3.30	10.5	15.4	19.7
编织带与软电缆束					MLR/%								
					3min	1h	10h	24h	40h	60h	80h	2a	
	尼龙搭扣	—	150	—	0.33	1.80	2.39	2.68	3.44	3.88	4.01	—	
	涤纶网	—	150	—	0.28	0.41	0.76	0.98	1.06	1.08	1.13	1.76	
层压制品与电路板					MRL/%								
					6min	24min	1h	5h	10h	24h	48h	72h	3a
	开美拉层压板	—	60	—	0.37	0.67	1.03	1.43	1.56	1.63	1.69	1.72	—
	开美拉层压遮阳板 (黑色向上)	—	60	—	0.42	0.73	1.09	1.60	1.98 (14h)	2.05	2.16	2.18	—
	开美拉层压遮阳板 (白色向上)	—											
	环氧—聚硫胶 (黑褐色)	—	45	—	0.45	1.09	1.13	1.93	2.32	2.96	3.56	3.65	4.22
	环氧—聚硫胶 (黄色)	—	45	—	0.83	0.76	1.08	1.85	2.55	3.06	3.50	3.63	4.22
	环氧树脂	—	45	—	0.07	0.71	1.16	2.44	2.84	3.21	3.37	3.37	3.80
	环氧板	634	45	—	0.11	0.23	0.15	0.19	0.27	0.30	0.34	0.33	0.66
	环氧玻璃布板	—	45	—	0.15	0.15	0.15	0.30	0.37	0.37	0.45	0.49	0.80
	有机硅玻璃布板	—	45	—	0.08	0.15	0.15	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	单向碳纤维板	—	100	紫外辐照		0.00 (18min)	0.03	0.06	0.33	1.27 (26h)	1.45 (48h)	1.71 (100h)	1.90 (400h)

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐照	6min	30min	1h	5h	10h	24h	48h	72h	3a
模 塑 材 料	环氧试件	1	45	—	0.01	0.07	0.15	0.15	0.22	0.29	0.29	0.29	0.48
	环氧试件	2	45	—	0.04	0.17	0.20	0.38	0.69	0.78	0.69	0.73	1.00
	环氧试件	3	45	—	0.13	0.26	0.22	0.43	0.52	0.52	0.60	0.65	1.20
	环氧试件	4	45	—	0.04	0.47	0.78	1.85	2.33	2.76	3.14	3.40	7.20
	高温环氧	—	45	—	0.12	0.23	0.39	0.63	0.63	0.97	1.03	1.09	2.10
	增强涤纶	—	45	—	0.10	0.22	0.26	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
					MLR/%								
					10min	30min	1h	5h	10h	20h	60h	72h/3a	
	环氧树 脂片状	—	50	—	—	0.26 (32min)	0.45 (1.4h)	1.03	1.24	1.44 (21h)	1.64	1.64/ 1.73 (216h)	
				电子辐照 (异位)	—	0.07 (32min)	0.32	1.01	1.33	1.55	1.80	1.82	
	环氧树 脂条状	5207- 012(b)	50	—	0.02	0.12	0.16	0.31	0.39	0.54	0.75	0.83/ 0.87 (89h)	
				电子辐照 (异位)	0.03	0.31	0.14	0.45	0.63	0.73	0.97	0.97/ 1.01 (85h)	
	环氧树 脂条状	6207-09(b)	50	—	0.06	0.31	0.35	0.60	0.74	0.93	1.17	1.17/ 1.17 (80h)	
				电子辐照 (异位)	—	0.00	0.07	0.45	0.63	0.76	0.96	0.96	
漆					MLR/%								
					1min	6min	30min	1h	5h	10h	24h	48h	72h
	灰漆	JW-14	125	—	0.00	0.26	0.94	0.81	1.08	1.37	1.90	2.55	2.95
	白漆	KS-900	125	—	0.06	0.13	0.18	0.26	0.46 (16h)	0.46	0.48	0.49	
	白漆	S-853	125	—	0.10	0.20	0.32	0.26	0.27	0.32	0.34	0.36	
	白漆	S-781	125	—	—	0.00 (9min)	0.06	0.09	0.08	0.10	0.11	0.11	0.11
	白漆	JW-28	125	—	0.00	0.27	0.86	0.67	0.91	1.20	1.98	2.62	3.09
	深绿漆	JW-24	125	—	0.18	0.26	0.86	0.93	1.17	1.43	2.32	2.82	3.00 (58h)
	铝粉漆	JW-2	125	—	0.23	0.42	0.60	0.34	0.38	0.51	0.46	0.48	0.49
	环氧铁 红清漆	629	45	—	—	0.08	0.22	0.27	0.37	0.37	0.42	0.61 (60h)	0.66

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐照	2min	30min	1h	10h	24h	48h	72h	2a	
封装材料	有机硅凝胶	GN-521	70	未辐照	0.14	1.20	1.68	4.36	4.89	5.16	5.30	8.20	
				Co ⁶⁰ γ 辐照 1d	0.22	2.10	2.94	5.84	6.51	6.87	—	10.50	
类别	名称	代号			MLR/%								
					6min	30min	1h	5h	10h	14h	18h	20h	24h
橡胶制品与合成橡胶	氟橡胶	F-08	50	—	0.05	0.10	0.12	0.28	0.30	0.32	0.36	0.36	0.36
	氟橡胶	F-11	50	—	0.02	0.02	0.02	0.19	0.24	0.26	0.30	0.30	0.30
	氟橡胶	F-13	50	—	0.15	0.18	0.18	0.29	0.31	0.37	0.39	0.39	0.39
	氟橡胶	F-23	50	—	0.07	0.10	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	硅橡胶	Si-4 Si-7	50	—	0.18	0.30	0.35	0.44	0.45	0.48	0.48	0.50	0.50
					0.05	0.14	0.19	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
	天然+ 海帕隆	—	25	—	0.09	0.19	0.28	0.47	0.47	0.47	0.47	—	—
橡胶	管 0-1	50	—	0.41 (8min)	0.95	1.35 (42min)	1.79 (54min)	1.95 (1h)	3.35 (2h)	3.90 (3h)	4.30 (4h)	4.50 (5h)	
胶带					MLR/%								
					3min	30min	5h	10h	12h	20h	24h	36h	2a
	单面镀铝 压敏胶带	聚酯膜	125	—	0.21	0.34	0.68	0.81	0.89	1.11	1.16	1.90 (140h)	3.90
	单面镀铝 压敏胶带	聚酰亚胺膜	125	—	0.24	1.03	1.07	1.13	1.13	1.18	1.22	1.25	1.96
	双面压 敏胶带	无基材	125	—	0.23	0.60	0.60	1.12	1.28	1.87	2.02	4.53 (160h)	9.96
	双面压 敏胶带	本材为 聚酯膜	125	—	0.01	0.90	1.78	2.41	2.74	2.88	3.02	4.89 (400)	6.98

(续)

类别	名称	代号	测试条件		MLR/%								
			测试温度 /℃	辐射	6min	30min	1h	5h	10h	22h	30h	48h	8d
非 匀 质 材 料	玻璃钢+ 黑漆+黑 绒布	—	135	—	0.19	1.10	0.86	1.12	1.30	1.52	1.62	1.93	2.24
	开芙拉+ 黑漆+黑 绒布	—	135	—	0.31	1.93	2.20	3.18	3.72	4.23	4.50	5.56	5.56
	MD ₂ 玻璃钢	—	100	—	1.01	1.36	1.59	1.91 (6h)	1.95	2.02	2.02	—	2.19 (168h)
	8D-1	—	100	—	0.38	0.19	0.29	0.41	0.45	0.45	0.54	0.49	—
	浸没介质	—	45	—	0.08	0.08	0.23	0.23	0.15	0.23	0.15 (32h)	0.15	0.15
	浸没介质	—	45	—	0.15	0.14	0.05	0.05	0.05	0.05 (20h)	0.05 (24h)	0.05	0.05
	硒碲硫铈	049		—	0.58	0.35 (36min)	0.35	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
	硒碲	—	45	—	0.21	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	—	0.42
					MLR/%								
					5min	1h	2h	3h	5h	8h	10h	28h	
	浸没介质	—	50	—	0.03	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	—	
				电子辐照 (异位)	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	浸没介质	—	50	—	0.06	0.28	—	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
				电子辐照 (异位)	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	9713-4	—	25	—	0.21	0.24	0.24	0.27	0.27	0.30	0.33	0.33 (18h)	
			90	—	0.52 (2min)	0.93 (3min)	2.20 (4min)	3.23 (6min)	3.93 (8min)	4.42 (10min)	4.42 (12min)	4.26 (15min)	
其 它 材 料					MLR/%								
					3min	30min	1h	10h	16h	20h	24h	30h	72h
	甲苯丙烯	—	50	—	0.26	0.39	0.47	0.45	0.46	0.46	0.46	0.46	—
	全F辛酸 络合物	2 [#] FCR	50	—	0.10	0.31	0.50	1.08	1.08	1.15	1.15	1.15	1.41
	全F辛酸	—	50	—	0.22	0.70	0.88	2.11	2.38	2.48	2.52	2.52	—

2. VCMER 的测试

(1) 试验装置

VCMER 的测试装置如图 14-54 所示。测试中的质量采用石英晶体微量天平测量。样品台控温范围为 $(25 \sim 180)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 连续可调。晶体收集温度采用恒温浴槽控制, $25^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 可用水浴槽, $-30^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 可用酒精浴槽。

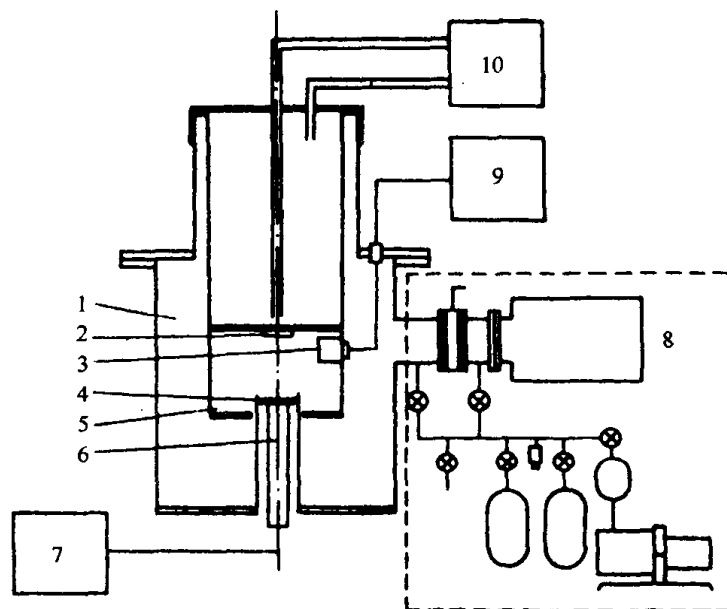


图 14-54 材料 VCMER 测试装置

1—真空测试室；2—石英晶体微量天平；3—前置电路；4—样品台；5—分子沉；6—加热器；
7—测控温装置；8—无油抽气机组；9—供电及检测装置；10—恒温液循环装置。

(2) 试验条件

工作压力 $10^{-5}\text{Pa} \sim 10^{-6}\text{Pa}$;

加热温度 $45^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$;

凝聚温度 25°C 、 0°C 及 0°C 以下;

加热温度与凝聚温度的配置为 125°C 、 25°C ; 125°C 、 10°C ; 125°C 、 0°C ; 100°C 、 0°C ; 100°C 、 -180°C ; 70°C 、 5°C ; 70°C 、 -80°C 等;

测试时间最短 24h, 最长 48h。

(3) 测试数据

部分国产航天器用材料的 VCMER 测试数值见表 14-90。

表 14-90 真空中部分国产空间材料可凝挥发物逸出率(VCMER)随时间变化数据

类别	名称	代号	测试条件		VCMER/ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \times 10^{-3}$							
			加热温度 $^\circ\text{C}$	凝聚温度 $^\circ\text{C}$	3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
粘合剂	硅橡胶	704	55	15	—			0.00	3.00	9.50	12.00	12.00
	硅橡胶	108-1	125	25	13.00	14.00	14.00	19.00	23.00	22.00	12.00	14.00
	胶	88	125	25	0.035	0.368 (31min)	0.613	1.289	1.933	2.127	2.507	2.718

第十四章 真空技术常用材料

(续)

类别	名称	代号	测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
粘 合 剂	胶	101	125	25	0.003 (10min)	—	0.006 (2h)	0.022	0.035	0.332	0.270	0.267	
	硅橡胶	KH-SP- LTV	125	25	—	0.016	0.021	0.092	0.150	0.160	0.180	0.190	
	甲基硅橡胶	GD-414	125	25	0.077	1.01	1.86	4.80	7.98	9.57	11.70	12.50	
	有机硅橡胶	南大 703	125	25	—	1.80 (24min)	3.70	4.90	5.40	5.50	5.30	5.80	
			测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	Co ⁶⁰ γ 辐照	3min	30min	1h	5h	10h	14h	20h	24h
	有机硅橡胶	南大 87	70	5	—	0.09	0.18	0.22	0.41	0.37	0.48	0.54	0.65
					1d	0.00	5.60	5.00	7.30	5.10	5.90	8.70	8.40
					10d	0.27	0.90	1.00	1.60	1.70	1.60	1.70	1.70
	有机硅橡胶	南大 705	70	5	—	—	—	—	—	—	—	—	
					1d	—	—	—	—	—	—	—	—
					10d	0.09	2.90	3.10	3.60	3.90	4.10	3.90	4.10
	光学透明胶	DG-4	70	5	—	0.00	0.92	2.00	4.70	7.20	8.30	9.20	9.90
					1d	0.10	0.51	0.63	0.86	1.10	1.20	1.40	1.40
					10d	0.31	0.29	0.49	1.10	1.20	1.40	1.60	1.50
	甲基硅橡胶	RTV-566	125	25	—	0.96	1.56	1.79 (2h)	1.92 (4h)	2.06	2.12	2.06	2.06
	光学结构胶	GJJ82-1	28	12	—	0.40 (4min)	0.60	0.65	0.99 (4h)	1.00 (20h)	1.00 (48h)	1.00 (100h)	1.00 (200h)
	结构胶	SE14-8D	28	12	—	0.18 (6min)	0.42	0.43	0.57 (4h)	0.66 (20h)	0.72 (48h)	0.83 (100h)	0.94 (200h)
	缩醛烘 干胶液	X98-11	125	25	—	0.80	44.00	47.00	47.00	47.00	47.00	47.00	47.00
			250	25	—	—	—	47.00	830.00	880.00	890.00	890.00	890.00
		测试条件		VCMER/g·cm ⁻² ×10 ⁻⁵									
		加热温度 /℃	凝聚温度 /℃		3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
硅胶	—	25	0	—	1.70	1.80	2.20	1.30	1.10	1.80	2.70		
		40	0	—	1.00	1.40	1.90 (3h)	—	—	—	—		

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴							
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
涂 料	涂料	OSR-2	125	25	0.007	0.008	0.014	0.027	0.081	0.100	0.120	0.160
	白漆涂层	F650	125	0	—	1.20	1.60	1.40	2.10	2.50	3.00	3.60
	白漆涂层	S781	125	0	—	0.65	1.87	1.60	1.70	1.40	2.10	2.10
	有机白漆涂层	107	125	0	—	0.99	1.10	1.90	2.60	2.20	3.10	3.20
	温控带	F650	125	0	—	1.10	1.10	1.60	2.10	2.30	2.40	2.70
	耐空温温控带	—	125	0	0.05	1.10	0.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	有机白漆温控带	—	125	0	0.035	0.14	0.15	0.16	0.15	0.15	0.14	0.16
	金属片上涂氟橡胶	—	55	15	—	0.07	0.27	1.30	2.90	2.90	2.90	4.60
膜 材 与 片 材					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³							
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
	偏四氯乙烯	—	55	15	—	—	—	0.29 (8h)	0.20	0.30	0.33	0.55
	硅橡胶上镀偏上氯乙烯	—	55	15	—	—	0.14	0.28	1.80	4.00	5.30	6.20
	合成压敏胶镀铝膜	JW-37	125	0	0.00	73.00	76.00	67.00	72.00	72.00	79.00	79.00
					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³							
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
	天然压敏胶镀铝膜	JW-36	125	0	0.73	4.20	5.10	7.40	9.20	10.00	11.00	12.00
	导热片	—	125	25	0.035	0.49	0.53	0.60	0.81	0.88	0.95	1.02
	康铜加层薄膜	—	125	0	0.24	0.64	0.72	0.72	0.75	0.71	0.77	0.78
	铝箔+9304-1胶膜+双面镀铝聚脂膜	—	125	10	—	0.22	0.26	0.61	0.22	1.00	1.50 (28h)	1.90 (48h)
	铝箔+9304-1胶膜	—	125	10	0.02 (6min)	0.09	0.10	0.12	2.10	0.28	0.85 (28h)	1.20 (48h)
	铝箔+9304-1胶膜	—	125	10	0.00 (6min)	0.88	1.10	1.50	2.10	2.10	2.40 (28h)	2.70 (18h)

(续)

类别	名称	代号	测试条件			VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴							
			加热温度 ℃	凝聚温度 ℃	Co ⁶⁰ γ 辐照	3min	30min	1h	5h	10h	14h	20h	24h
膜材与片材	聚四氟 乙烯棒	—	70	5	—	0.08	0.16	0.47	0.84	0.73	0.86	0.87	0.83
					1d	0.30	0.46	0.73	1.00	1.10	1.20	1.20	1.20
					10d	0.50	0.20	0.25	0.30	0.44	0.47	0.47	0.62
	聚砷棒	—	70	5	—	—	—	—	—	—	—	—	
					1d	0.39	0.90	0.74	0.28	0.66	0.68	0.66	0.66
					10d	0.00	0.80	1.10	1.70	2.10	2.30	2.70	3.00
			测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁵								
			加热温度 ℃	凝聚温度 ℃	3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
泡沫塑料	泡沫塑料	—	25	0	3.90	6.20	5.20	5.30	5.60	6.10	7.60	8.20	
编织带与软电缆束					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³								
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
	尼龙搭带	—	125	25	0.06	0.21	0.20	0.15	0.67	0.74	0.84	0.87	
层压制品与电路板					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁵								
					6min	36min	1h	10h	20h	30h	38h	48h	
	开美拉层压板	—	125	0	0.80	4.40	5.10	10.5	14.00	15.00	15.00	16.00	
	开美拉层压遮阳板 (黑色向上)		125	0	0.00	3.60	4.00	8.30	9.10	9.50	9.80	10.10	
	开美拉层压遮阳板 (白色向上)		125	0	0.00	4.60	5.70	17.7	24.0	25.7	27.00	31.00	

三、航天器用材料质量损失性能

(续)

类别	名称	代号	测试条件			VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	Co ⁶⁰ γ 辐照	3min	30min	1h	5h	10h	14h	20h	24h	
记号材料 与墨水	标记油墨 (蓝色)	—	70	5	—		0.09	0.89	2.20	4.40	4.90	5.00	6.30	7.40
					1d		—	0.00	0.67	2.80	4.50	4.60	4.60	4.60
					12d		1.50	5.90	6.40	7.90	9.50	10.00	11.00	12.00
	标记油墨 (红色)	—	70	5	—		1.50	5.90	8.30	11.00	11.00	11.00	12.00	12.00
					1d		0.00 (12min)	0.97	1.70	3.30	4.00	4.50	5.10	5.30
					14d		0.16	1.10	2.30	6.50	8.70	9.60	9.80	11.00
	标记油墨 (白色)	—	70	5	—	2d	0.31	1.80	3.80	10.00	14.00	15.00	16.00	17.00
					—	10d	0.78	2.50	5.10	7.20	8.40	9.00	10.00	12.00
	玻璃油墨 (红色)	—	70	5	—		0.50	1.90	4.10	5.70	6.20	6.50	7.10	7.10
					1d		0.19	0.72	1.20	2.30	3.50	4.00	5.20	6.40
					10d		0.00 (18min)	0.17	1.40	3.10	4.10	4.30	4.30	4.30
	玻璃油墨 (深蓝色)	—	70	5	—	1d	0.37	1.80	2.60	3.00	3.70	4.30	4.20	5.10
—					10d	0.00	3.80	4.90	9.50	29.00	39.00	54.00	62.00	
颜 料 与 油 漆			测试条件			VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃		3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
	白漆	S-853	125	25		0.08 (6min)	0.68 (15min)	0.72	1.00 (8h)	1.20	1.60	2.00	2.10	
	黑漆	SB-3	125	25		—	0.29	0.29	0.89	1.12	1.25	1.52	1.58	
		SB-3	130	20		—	0.00	0.0024	0.0042	0.0084	0.001 (30h)	0.00113 (58h)	0.00117 (72h)	
	深绿漆	JW-24	125	0		0.034	0.30	0.33	0.32	0.35	0.38	0.41	0.41	
	铝粉漆	JW-2	125	0		0	0.27	0.34	0.47	0.56	0.55	0.61	0.65	
						VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
						3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
	灰漆	JW-14	125	0		0.53	1.80	2.40	2.30	2.50	2.50	2.30	2.60	
白漆	JW-25	125	0		0.92	2.90	3.40	3.40	3.70	3.80	4.60	4.70		

第十四章 真空技术常用材料

(续)

类别	名称	代号	测试条件		VCMER/g·cm ⁻² ×10 ⁻³								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
封 装 材 料	硅凝胶仓 封材料 1#	RTV	125	0	0.00	0.50	0.66	1.30	1.20	1.00	0.98	0.94	
	硅凝胶仓 封材料 2#	RTV	125	0	0.24	0.62	—	—	—	0.90	0.80	0.72	
			测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃	Co ⁶⁰ γ 辐照	3min	30min	1h	5h	10h	14h	20h	24h
	有机硅凝胶	GN-521	70	5	—	0.52	1.20	1.30	1.80	2.40	2.80	3.20	3.50
					1d	0.25	1.60	2.40	9.00	18.00	28.00	37.00	37.00
					10d	0.47	1.20	1.40	2.80	4.20	4.70	5.10	6.10
			测试条件		VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
			加热温度 /℃	凝聚温度 /℃		6min	1h	20h	200h	600h	800h	1000h	1362h
	密封胶	XM-23	28	12		0.22	1.70	1.80	2.30	2.50	2.60	2.70	2.80
合成橡胶 制品与					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻⁴								
					3min	31min	1h	5h	10h	14h	20h	24h	
	变阻尼胶板	311	125	25	1.439	8.770	13.25	33.63	42.26	50.31	65.27	72.88	
胶 带					VCMER/g·g ⁻¹ ×10 ⁻³								
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h	
	单面镀铝 压敏胶带	聚酯膜	125	0	0.13	1.04	1.08	1.12	1.00	1.00	1.01	1.10	
	单面镀铝 压敏胶带	聚酰亚 胺膜	125	0	0.39	1.53	1.58	1.60	1.59	1.58	1.63	1.64	
	单面镀铝 压敏胶带	—	125	25	0.00	3.30	5.00	6.50	5.00	6.10	7.00	7.10	
	单面镀铝 压敏胶带	—	125	25	0.00	0.27	0.64	1.40 (6h)	1.50	1.50	1.80 (18h)	1.70	
	压敏胶带	—	125	25	0.322	0.524 (31min)	0.67	1.31	1.74	1.84	2.01	2.00	
	防污染压 敏胶带	—	125	0	0.19	2.29	2.32	2.42	2.39	2.28	2.24	2.50	
	双面压 敏胶带	1	125	25	—	0.66	0.88	0.54	0.83	1.30	1.00	1.10	
	双面压 敏胶带	2	125	25	—	1.20	1.40	1.70	2.20	2.50	1.70	1.90	
	双面压 敏胶带	5	125	25	—	—	0.96	1.70	1.50	1.50	1.50	1.50	
	双面压 敏胶带	—	125	25	0.00	0.89	1.10	1.80	1.80	1.90	2.00	2.00	
125			0	0.36	2.13	2.16	2.17	2.13	2.11	2.03	2.40		

(续)

类别	名称	代号	测试条件		VCMER/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\times 10^{-5}$							
			加热温度 $^{\circ}\text{C}$	凝聚温度 $^{\circ}\text{C}$	6min	30min	1h	4h	10h	24h	34h	48h
非 匀 质 材 料	玻璃钢 + 黑漆 + 黑绒布	—	125	0	0.00		3.20	7.60	16.00	25.00	39.00	46.00
					VCMER/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\times 10^{-3}$							
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
	导热填料	89-7	125	25	0.010	0.031	0.064	0.163	0.437	0.640	1.040	1.170
					VCMER/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\times 10^{-3}$							
					3min	30min	1h	4h	10h	14h	20h	24h
其 它 材 料	导热填料	2-4	125	25	0.00	2.42	3.20	4.90	6.10	6.60	11.0	11.0
	导热填料	2-7	125	25	0.00	0.42	0.41	4.10	5.20	5.60	5.80	5.80
					VCMER/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\times 10^{-6}$							
					3min	30min	1h	5h	10h	14h	20h	24h
	电路单板 (红外载 流焊)		70	5	IC 块	0.17	1.20	1.50	1.70	1.50	1.80	1.80
					三极管	0.05	0.70	0.77	1.00	1.00	1.00	1.30
	电路单板 (手工焊)		70	5	IC 块	—	0.67	0.73	0.86	0.94	0.88	0.82
					三极管	0.12	0.63	0.49	0.80	0.83	0.78	0.83
	电路单板 (空白板)		70	5	IC 块	—	0.21	0.30	0.73	0.75	0.71	0.73
					三极管	0.13	0.91	0.95	1.10	1.10	0.95	0.91
	T ₂ -0-2	—	125	25	0.784	0.551 (31min)	0.515	0.614	0.548	0.548	0.471	0.471

(六) 航天器用润滑油(硅油)饱和蒸气压

对于空间应用的油脂来说,饱和蒸气压是它的主要技术指标,因为饱和蒸气压决定了油脂在空间真空条件下的损耗量及污染程度。油脂饱和蒸气压的测定方法很多,航天部已制定了相应测试方法标准 QJ2667-94《真空用油脂饱和蒸气压测试方法》。根据标准,对国产航天器用的几种润滑油的饱和蒸气压的测试结果见表 14-91。

表 14-91 润滑油(硅油)饱和蒸气压的数据

名 称	牌号或代号技术标准	状态配比固化条件	A	B	$p_{25^{\circ}\text{C}}/\text{Pa}$
硅油	112	—	8.34	5270	5.9×10^{-8}
硅油	113	—	8.86	5000	1.9×10^{-6}
硅油	114	—	4.42	3700	1.5×10^{-6}
硅油	115	—	4.63	4350	1.5×10^{-6}
注: A、B 为式(14-11)中的常数					

(七) 原子氧对航天器用材作用的效应

1. 概述

原子氧的氧化作用对航天器的影响主要有:使结构材料减薄、发生变形、强度下降;使光学材料的性能改变,特别是使一些材料的反射率下降,漫反射显著增加;使热控涂层的光学性能改变,热控失效;使活动部件外露部分的润滑性能变化,影响活动;使一些材料的电学性能改变等。此外,原子氧与材料作用时放出的气体可能加重附近表面的污染,反应时伴生的发光、发热改变航天器的热控,或干扰测控。这些效应将显著影响航天器的性能和寿命。所以,对低轨道、长寿命航天器表面用材进行抗原子氧作用的评价、筛选是非常必要的。

原子氧的密度并不算高,在 200km 高度,其数密度为 $2.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 。但由于航天器在轨高速飞行,典型的飞行速度为 8km/s,这样,撞击到航天器表面的原子氧的束流密度可达 $10^{15} / \text{cm}^2 \text{ s}$ 。

航天器在轨飞行,造成原子氧与航天器碰撞,相当于定向的原子氧束与航天表面相撞击。航天器上处于不同位置和方向的表面,接受到的原子氧通量不同。处于航天器前部、与航天器飞行方向垂直的表面(压头方向)接受到的原子氧通量就要比其它表面大。由于航天器外形不完全规则,使原子氧在某些表面受到屏蔽、反射和散射,从而导致某些部位接受到更多的原子氧束流。

轨道中原子氧的温度一般在 1000K ~ 1500K 范围内,即平均热运动速率为 1.15km/s ~ 1.41km/s。但由于航天器以 8km/s 高速飞行,原子氧与航天器之间有约 8km/s 的相对速度,相当于原子氧以约 5eV 能量与表面相撞。

原子氧是极强的氧化剂,其氧化性能远大于分子氧。因此,原子氧对低地球轨道航天器表面的危害比其它因素(热真空、紫外辐照、冷热交变、微流星等)要严重。但是,由于其它因素在材料表面形成的裂痕或缺陷,使原子氧的氧化作用深入到表层以下的基体中,从而加重了原子氧的剥蚀效应。此外,太阳紫外线特别是短波长的紫外线与原子氧的共同作用增加了原子氧的剥蚀效应。

原子氧与材料作用,主要是使材料氧化,导致性能变化。材料氧化导致质量变化的程度与原子氧通量有关,即与大气密度、轨道速度、暴露的时间成正比。单质材料中只有碳、银和钽反应速度较快,会引起宏观变化。原子氧与碳反应生成挥发性氧化物;与银反应形成典型的氧化物并以剥落形式引起材料质量损失,氧化速率与银的微观结构有关;钽通过形成高蒸气压的氧化物 OsO_4 而损失质量。一些金属材料在原子氧作用下表面的光学和电学性能会发生变化。有机物由于多含碳、氢、氧、氮等元素,通常与原子氧反应速率较大,而含氟聚合物、硅氧烷与原子氧的反应速率则比其它有机聚合物低。

2. 原子氧效应的评估方法

由于原子氧与材料作用的主要效应之一是使材料的质量即体积减小,所以一种材料耐原子氧作用的能力用这种材料的原子氧作用系数来表示。原子氧作用系数定义为每个原子氧使该材料表面体积的减小量,单位为 $\text{cm}^3 / \text{个}$ 。因此,原子氧作用系数越小,耐原子氧作用的能力越强。对于特定的功能材料,除原子氧作用系数外,还应该测量其主要性能的变化。例如,对光学材料,应该测量原子氧作用后太阳反射率和半球发射率的变化,有时还应该测量漫反射的变化;对热控材料,应该测量原子氧作用后太阳吸收率和半球发射率的变化;对导电材料,应该测量电导率的变化,特别是表面电导率的变化。

3. 测试设备及测试数据

原子氧效应的测试设备不尽相同,测试方法目前尚无标准。

(1) 氧等离子体空间材料试验装置

它采用射频放电在放电管内产生氧等离子体。试验装置方框图如图 14-55 所示,试样在氧等离子体中受到包括原子氧、分子氧、氧离子以及电子、紫外光等成分的联合作用。试验条件与空间条件的原子氧环境有较大偏离,而且不容易进行定量测试,但与材料的作用也是使材料氧化,与材料作用的效应与空间原子氧效应相似,可以作为一种相对性试验手段。

氧等离子体对各种材料的作用结果见表 14-92。

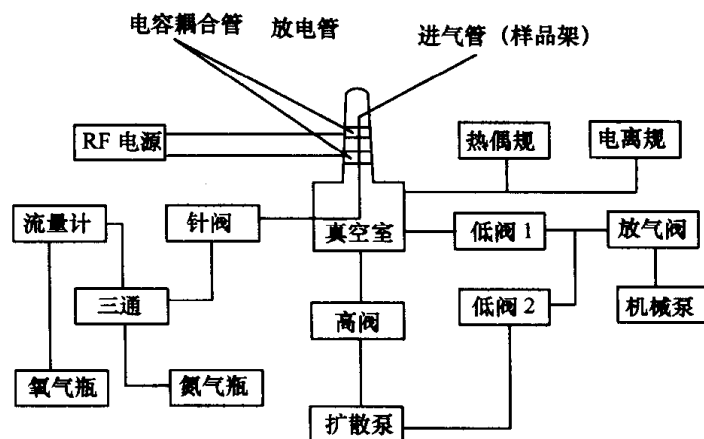


图 14-55 射频放电氧等离子体试验装置方框图

表 14-92 氧等离子体对各种材料的作用结果

材 料	试样性能			试验条件				试验前 质量 /mg	作用后 质量 /mg	作用面积 /cm ²	单位面 积质损 /mg· cm ⁻²	作用强度 /mg·cm ⁻² ·h ⁻¹
	厚度 /cm ²	面积 /cm ²	其它	放电功率 /W	氧压 /Pa	样品温度 /℃	作用时间 /h					
单面镀铝 Kapton	0.04	12	非镀铝面	40	8.0	39	2	67.7	53.7	9.0	1.56	0.78
聚酰亚胺	0.12	12	—	40	8.8	39	2	230.0	215.0	9.0	1.67	0.48
聚四氟乙烯	0.28	12	—	40	8.5	36	2	587.4	565.0	9.0	2.49	1.25
聚酯膜	0.10	12	—	40	8.0	49	2	161.0	144.5	9.0	1.83	0.92
开芙拉*	0.40	7.0	—	40	8.5	71	2	349.5	323.0	14	1.89	0.95
碳纤维*	1.66	3.3	—	40	8.5	84	4	860.2	842.0	6.6	2.78	0.69
硅橡胶*	1.60	1.1	牌号 116-14	40	2.7	70	2	547.8	546.9	2.1	0.43	0.21
太阳二 次表面镜	0.0005	4.8	衬底面 聚酰亚胺	40	8.0	47	2	92.3	90.0	4.8	0.35	0.18
Ag 箔	0.10	12	牌号 Agl	80	13	120	3	973.5	982.1	9.0	-0.96	-0.32
Al 箔	0.013	12	—	80	13	61	3	40.3	41.3	9.0	-0.11	-0.4
Cu 箔	0.10	12	牌号 T2	80	13	55	3	964.1	965.9	9.0	-0.2	-0.07

注:有*号者为试样吊挂在放电室内

单面镀铝 Kapton 光学参量随氧等离子体作用时间的变化见表 14-93。

表 14-93 单面镀铝 Kapton 的光学参量随氧等离子体作用时间的变化

光学参数	氧等离子体作用时间					
	0h	1h	2h	4h	6h	8h
太阳吸收率	0.436	0.437	0.420	0.456	0.472	0.449
红外辐射率	0.76	0.74	0.74	0.66	0.64	0.56

(2)同轴源型原子氧模拟装置

模拟装置工作原理图如图 14-56 所示。它是将微波功率耦合到同轴腔内,使注入的氧气电离,形成氧等离子体,在磁场的约束下,形成氧等离子体束。加负偏压的金属板(中性化板)加速氧离子,使其获得能量,撞击到该金属板上的氧离子得到电子,成为中性氧原子,并被该金属板反射。反射的氧原子保留了大部分入射能量,形成具有一定能量的氧原子束。装置的主要性能为:原子氧能量为 $5\text{eV}\sim 10\text{eV}$;原子氧束流强度为 $(3\sim 4)\times 10^{15}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。原子氧束中氧离子的束流强度比原子氧约低三个数量级。

原子氧模拟装置试验获得的几种试样的质量变化和原子氧作用系数见表 14-94。

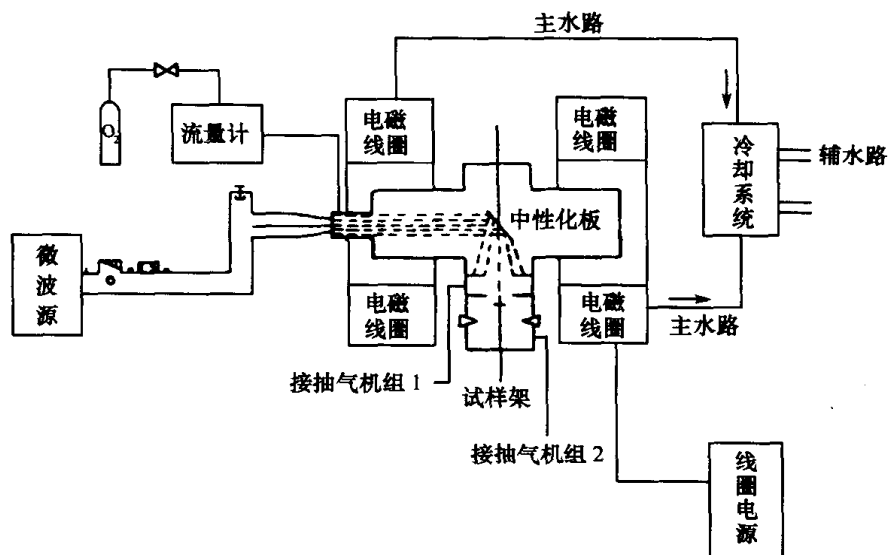


图 14-56 原子氧模拟试验装置工作原理图

表 14-94 原子氧模拟装置试验的几种材料试样的质量变化和原子氧作用系数

材料	厚度 /mm	暴露面积 /mm ²	作用时间 /min	作用前质量 /mg	作用后质量 /mg	质量损失 /mg	单位时间单位 面积质量损失 /mg·cm ⁻² ·h ⁻¹	原子氧作用系数 /cm ² ·个 ⁻¹
银	0.1	$9.8^2\pi$	120	395.1	395.5	-0.4	-0.064	0.56×10^{-24}
石墨	0.3	$9.8^2\pi$	150	110.2	110.0	0.2	0.025	1.07×10^{-24}
镀铝 Kapton	0.02	$9.8^2\pi$	120	16.3	15.9	0.4	0.064	10.3×10^{-24}
聚酰亚胺	0.12	$9.8^2\pi$	120	99.4	98.0	1.4	0.223	7.4×10^{-24}
开美拉	0.4	$9.8^2\pi$	480	273.2	270.2	3.0	0.119	1.5×10^{-24}
碳纤维/环氧树脂	3.46	$9.8^2\pi$	601	2559.1	2556.4	2.7	0.086	2.1×10^{-24}
外用膜 96121	0.1	$9.8^2\pi$	120	60.1	60.0	0.1	0.017	0.55×10^{-24}
外用膜 96121	0.1	$9.8^2\pi$	121	60.0	59.9	0.1	0.017	0.55×10^{-24}

图 14-57 给出了几种材料的质量损失和原子氧作用时间的关系曲线。图 14-58 示出了镀铝 Kapton 在试验前后的光谱反射率和光谱漫反射率。由图可见, Kapton 在原子氧作用后其反射率变化不大, 但漫反射率明显增加, 这与国外试验结果相吻合。

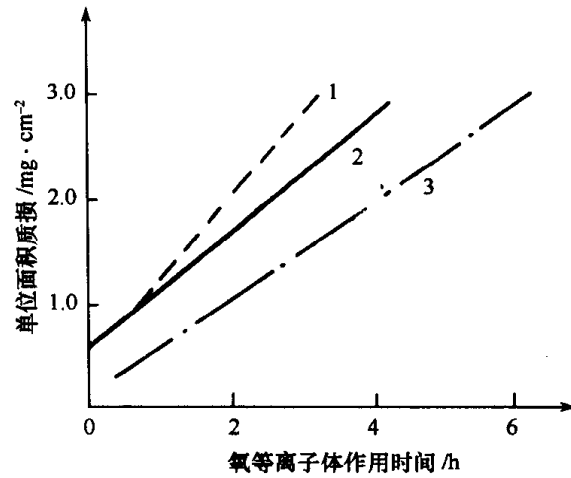


图 14-57 几种材料质量变化与氧等离子体作用时间的关系
1—开美拉；2—碳纤维/环氧树脂；3—单面镀铝 Kapton。

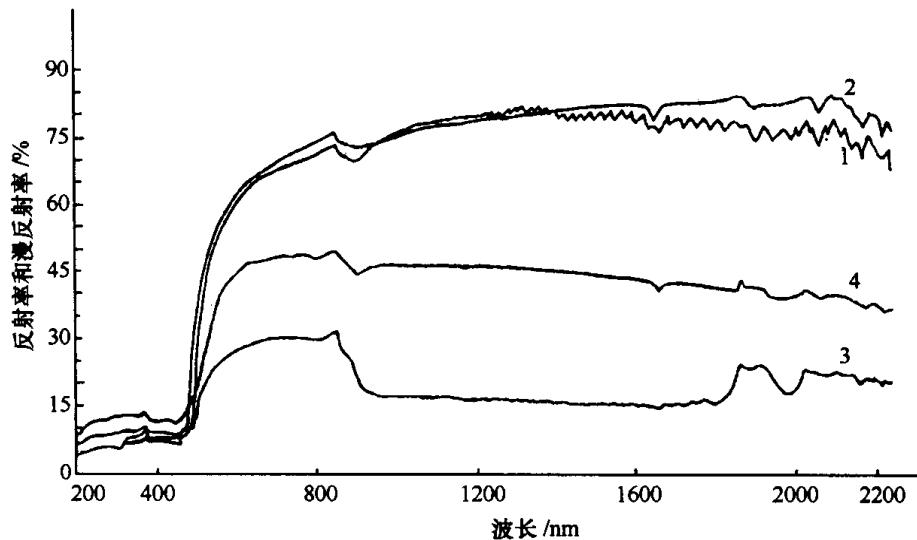


图 14-58 镀铝 Kapton 在试验前后的光谱反射率和光谱漫反射率
1—原样反射；2—原子氧作用后反射；3—原样漫反射；4—原子氧作用后漫反射。

4. 国外空间用材飞行实测原子氧作用系数

下面给出了国外在飞行试验中获得的数种空间用材的原子氧作用系数的数据。

表 14-95 给出了原子氧与金属材料的作用系数。表 14-96 给出了原子氧与各种形态碳的作用系数。表 14-97 给出了原子氧与聚合物材料的作用系数。

表 14-95 原子氧与金属材料的作用系数

材料名称	测试条件 ^①	作用系数/cm ³ ·个 ⁻¹	其 它
Al	—	0	—
Cu	—	0	—
Cu	STS-8	—	质量增加 0.5mg/cm ²
Cu	LDEF	0.87×10^{-26}	—

(续)

材料名称	测试条件 ^①	作用系数/cm ³ ·个 ⁻¹	其 它
Au	*	0	—
Pt	STS-8	—	无可观察变化,无质量变化
Mg	LDEF	0.45×10^{-26}	无可观察变化,无质量变化
Mg	STS-8	—	—
Mo	STS-8	—	无可观察变化,无质量变化, 微量氧进入基材,MoO ₃ 增加
Mo	LDEF	0.14×10^{-26}	—
Ni	STS-8	—	无可观察变化,无质量变化
Nb	LDEF	0.14×10^{-26}	—
Os	STS-5, STS-8, STS41-G	0.026×10^{-24}	形成 OsO ₄ 损失质量
Pt	STS-8	—	无可观察变化,无质量变化
Ag	—	10.5×10^{-24}	—
Ag	LDEF	2.9×10^{-26}	银膜微粒化
Ag	STS-8, STS-5, STS41-G	—	严重侵蚀
Ta	LDEF	0.60×10^{-26}	—
Ti	LDEF	0.39×10^{-26}	—
W	STS-8	—	无可观察变化,无质量变化,折 射率减小,吸收率无变化趋势
W	LDEF	0.044×10^{-26}	—

注:①LDEF(Long Duration Exposure Facility)—(美国)空间长期暴露试验装置;LEO(Low Earth Orbit)—低地球轨道;
STS-*n* (Space Transportation System)—航天飞机第 *n* 次飞行。
测试条件:原子氧能量为 (5 ± 0.8) eV,原子氧束流强度为 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$

表 14-96 原子氧与各种形态碳的作用系数

材 料 名 称	测试条件 ^①	作用系数/ $10^{-24} \text{cm}^3 \cdot \text{个}^{-1}$
金刚石	STS-8	0.022
碳	STS-4	0.043
无定形碳	STS-5	0.23
非晶态碳	STS-8	0.23
碳膜	STS-8	0.36
基本定向石墨	STS-8	0.63
光亮的石墨	STS-8	0.8
改性石墨	STS-8	1.3
单晶石墨	STS-8	1.4
碳膜 ^①	—	2.1
高温热解石墨 ^①	—	9.2
热解石墨 ^①	—	29~36

注:①见表 14-95 所注测试条件

三、航天器用材料质量损失性能

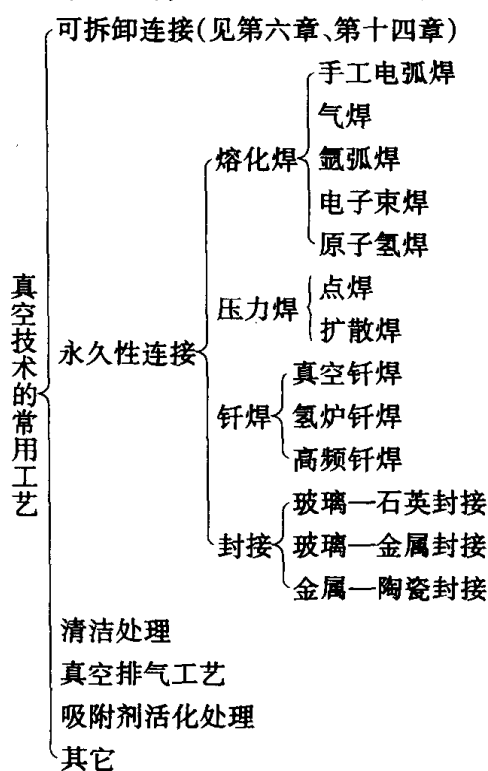
表 14-97 原子氧与聚合物材料的作用系数

材料名称	测试条件 ^①	作用系数/ $\times 10^{-24}\text{cm}^3\cdot\text{个}^{-1}$
碳纤维	LDEF	0.92~2.3
环氧树脂	STS-5, STS-8	1.7
1034C 环氧树脂	STS-8	2.1
5208/T300 环氧树脂	STS-8	2.6
环氧树脂	LEO	1.97~2.53
环氧树脂	—	1.7
全氟乙丙烯共聚物	—	0.037
全氟乙丙烯共聚物	LDEF	0.35
全氟乙丙烯共聚物	—	7.7
全氟乙丙烯共聚物	LEO	<0.05
全氟乙丙烯共聚物(太阳峰年)	LEO	1.0
玻璃纤维	LDEF	0.130
碳纤维/环氧树脂	STS-6, STS-8, STS41-G	2.1
Kapton	STS-5, STS-8	3.0
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Kapton}$	—	<2.0
$\text{SiO}_2 + \text{Kapton}$	—	≤ 0.0008
$\geq 96\% \text{SiO}_2 \leq 4\% \text{聚四氟乙烯} + \text{Kapton}$	—	≤ 0.0008
聚甲基丙烯酸甲酯	LEO	3.04
有抗氧化层的聚酯	STS-8	严重侵蚀
聚四氟乙烯	STS-8	<0.05
全氟乙丙烯共聚物	STS-8	<0.05
忒得拉	STS-8	3.2
白色忒得拉	LDEF	0.29
忒得拉	LEO	3.19
硅氧烷—亚胺黑色共聚物	LEO	0.3
开美拉 29	LDEF	1.5 ± 0.5
开美拉 49	LDEF	4.0
勒克森(聚碳酸酯纤维)	超声原子氧源	4.6 ± 2.4
聚酯薄膜	STS-8	3.4
聚酯薄膜	LEO	3.56
聚酯薄膜	—	2.7~3.9
聚乙烯	—	3.3~3.7
聚乙烯	STS-8	3.7
聚乙烯	—	3.69
聚乙烯	—	2.8
聚碳酸酯	—	2.9~6.09
聚苯乙烯	STS-5, STS-8	1.7
聚砒	STS-8	2.4
聚砒	LDEF	2.3
聚砒	LEO	2.41
聚酰亚胺	STS-8	3.3
聚甲基丙烯酸甲酯	STS-8	3.1

第十五章 真空技术常用工艺

一、概 述

在真空获得和真空测量技术中,经常遇到各种工艺问题。这些工艺问题涉及面很广,除一般的机械加工外,主要有材料及零(部)件的清洁处理,不同材料的焊接、粘结和封接,设备的真空排气工艺以及吸附剂活化处理等。现将主要工艺问题列举如下:



真空技术对工艺的要求:

- ①材料表面放气率低;
- ②气密性好;
- ③有利于获得真空的光滑“清洁”表面;
- ④化学性质稳定;
- ⑤在高、低温冲击下有一定的机械强度;
- ⑥超高真空和极高真空设备上的有关零(部)件应能承受 400℃ 的高温烘烤。

二、真空技术中的清洁处理

(一) 概述

真空技术中的清洁处理一般指的是真空装置的结构材料、填充材料和真空零(部)件的清

洁处理。去除或减少污染物将有利于获得良好真空,增加连接强度和气密性,提高产品的寿命和可靠性。

(二) 污染物的几种类型

- ①油脂:加工、安装和操作时沾染的润滑剂、真空油脂等;
- ②水滴:操作时的手汗,吹玻璃时的唾液等;
- ③表面氧化物:易氧化材料长期暴露或放置在潮湿大气中所形成的表面氧化物;
- ④酸、碱、盐类物质:清洗后的残余物质、手汗、自来水中的矿物质等;
- ⑤空气中的尘埃及其它有机物。

(三) 污染的形成及其影响

真空装置由许多不同的零件组成,它们都是经过各种机械加工完成的,如车、铣、刨、磨、镗、焊接等。这样,零件表面不可避免地会沾上许多加工油脂、汗痕、抛光膏、焊剂、金属屑、油垢等污染物。这些污染物在真空中易挥发,影响真空设备的极限真空。此外,污染物在大气压下吸附了大量的气体,在真空环境中,这些气体也要被释放出来,构成了限制真空设备极限真空的因素。为此,零件组装前必须清除掉污染物。

真空装置使用过程中,零件还会受到污染。这种污染与使用条件及真空泵有关。如真空干燥系统,经常使用后会受到蒸发出来的物质的污染;真空镀膜机的内壁会被蒸镀材料污染;离子束刻蚀设备的内壁会被工件溅射的溅散物污染;真空中的电子枪的灯丝,由于高温蒸发会使其附近表面形成金属膜;规管灯丝在高温下蒸发,使陶瓷绝缘子上形成薄膜,破坏绝缘强度,影响测量的准确性。真空系统中的机械泵油和扩散泵油更是污染源,设备长期工作后会使设备内部形成明显的油膜。这些污染同样会影响设备的性能,应注意随时清除。

超高真空系统中,清洁处理更为重要。良好的清洁处理工艺,可以使材料放气率降低几个数量级。如不锈钢长期暴露于大气后,不进行任何处理,抽气 1h 后的出气率为 $2.7 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,清除油污后抽气 4h,可降到 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。在 250°C 下烘烤 15h,出气率进一步降到 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。好的清洁处理工艺,可以提高设备的极限真空。

此外,在各类真空工艺生产中,例如电真空工艺、真空镀膜工艺、真空焊接工艺等,都十分重视真空卫生问题。在电真空工艺中,要求装配到高真空环境的零件,事先都必须小心地进行清洗处理,否则各种污染物可成为大量气体和蒸气的来源,会大大延长真空器件的排气时间,不易获得高真空;对离子管而言,这种意外的气体和蒸气来源将使管内原有气体的纯度变差,以致无法得到预期的特性。其次,污染物可使元件本身变质,例如使阴极毒化(特别是非金属阴极),在电极间引起漏电,某些部分(例如控制栅)产生不必要的次级发射等。利用各种清洗方法,使油脂、金属细屑、灰尘、表面附着物以及不需要的氧化膜和石墨膜等彻底去除,可以提高电真空器件的寿命和可靠性。在真空镀膜技术(包括玻璃镀膜技术)中,基片(衬底)表面的清洁处理也十分重要。暴露于大气中的衬底表面普遍受到污染。表面污染就其物理状态来看,可以是气体,也可以是液体或固体,它们以膜或散粒形式存在。就其化学特性来看,它可以处于离子态或共价态;可以是无机物或有机物。污染的来源有多种,而最初的污染常常是表面本身形成过程中的一部分。吸附现象、化学反应、浸析和干燥过程、机械处理以及扩散和离析过程都会使各种成分的表面污染物增加。表面在镀膜之前必须是清洁的,否则镀的膜与表面将不能很好地粘附。在真空扩散焊接工艺中,焊接接头的强度与表面清洁处理关系很大。有

资料报导,焊接接头表面粗糙度达到 $12.5\mu\text{m}$ 以后,用超声波振荡来净化被焊接零件表面,焊接接头强度可从 $70\text{kg}/\text{mm}^2$ 提高到 $110\text{kg}/\text{mm}^2$ 。利用各种不同的清洁方法,如用酒精、丙酮、四氯化碳擦洗和真空中加热等可提高焊接接头的强度和接头的特性稳定性。

环境污染对真空卫生影响很大。环境污染来自空气、地板、墙壁、天花板、家具、衣服的灰尘、棉绒、烟灰、头发和头屑。为此,电真空器件的生产,一些特殊零、部件的生产,都要求在清洁车间或超洁净车间里进行操作。在电子管制造中,管子装架和零件处理必须在封闭良好的洁净间里进行,空气必须经过两级或多级过滤,相对湿度保持在 50% 以下。

综上所述,真空卫生涉及到真空系统、真空装置和真空工艺生产各方面,涉及到真空装置本身和特殊真空工艺对周围环境的要求,这是一个值得重视的问题。

(四) 真空对环境的要求

真空对环境的要求一般包括真空设备对所处实验室(或车间)的温度、湿度、空气中的微粒等周围环境的要求,和对处于真空状态或真空中的零件或表面的要求两个方面。这两个方面是有密切联系的。周围环境的好坏直接影响真空设备的正常使用;而真空设备的真空室或装入里面的零件是否清洁,直接影响设备的性能。如果空气中含有大量的水蒸气和灰尘,在真空室没有经过清洗的情况下,用油封机械泵去抽气,要达到预期的真空度是很难的。众所周知,油封式机械泵不适宜抽除对金属有腐蚀性、对真空油起化学反应的以及含有颗粒尘埃的气体。水蒸气为可凝性气体,当泵大量抽除可凝性气体时,对泵油的污染会更加严重,结果使泵的极限真空下降,破坏了泵的抽气性能。

工业环境中的粉尘是以粉状体、烟雾体、粉尘来区分的。粉状体是粉末或固体颗粒的集合或分散状态的物质。所谓粉末是指微小的固体颗粒的集合,而颗粒是指能够一个一个计数的微小物质。烟雾体是以固体或液体的微小颗粒呈悬浮状态存在于气体中的物质体系。物质无论是固体或液体,凡是呈颗粒状态的均可统称为尘粒。以尘粒直径的大小来确定空气清洁度的标准,从而制订出洁净室的等级,不仅适合于有洁净要求的工业部门,也适合于真空对洁净环境的要求。

1. 常规真空工艺对环境的要求

所谓常规真空工艺系指没有特殊要求的真空工艺过程。这类真空装置(设备)对真空卫生的要求是:

①凡是处于真空状态或真空中的真空设备的零件或表面,都要求无积存的污染源。表面无尘埃、无铁屑、无锈蚀。

②真空设备的真空室表面要光滑,无松软组织和气孔,无死空间,内焊缝无影响真空的缺陷。

③高真空设备中,真空室内的运动部件不得用机油作润滑剂,要用饱和蒸气压低的扩散泵油、硅油作润滑剂。法兰、大门、观察窗的密封部位可涂以高真空油脂。

④无油超高真空系统(也称“清洁的超高真空系统”)应避免油蒸气影响工作介质的纯度、表面特性或工作性能,为某种工艺过程提供清洁的超高真空环境。

超高真空金属系统常用 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 为结构材料。有些部位可使用无氧铜、可伐合金、纯金、纯银、钨、钼、钽、钛等。绝缘材料常用玻璃和 95 真空瓷。而高分子聚合物由于可能分解出碳氢化合物污染系统,不能使用。饱和蒸气压较高的材料,如锌及其合金也不能使用。

超高真空系统中材料的出气是限制真空度上升的重要因素。一方面采用清洗、抛光、把零

部件放在真空柜中保存或真空预热除气等方法降低出气速率,以改善材料的原始处理情况。另一方面还可以采用真空系统高温烘烤除气的办法,加速材料的出气过程,使材料表面吸附和吸收的气体分子加速放出并被排出,冷却后材料的出气速率会降低几个数量级。因此,对于一般需要达到 10^{-7} Pa 以下压力的真空系统,都必须烘烤除气。

⑤真空设备一般应在温度为 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$,相对湿度不高于 70% 的清洁的空气流通的环境中工作,冷却水进水温度不高于 25°C 。

真空设备所在的实验室或车间应保持清洁卫生。地面为水磨石或木质涂漆地面、无尘埃。为防止机械泵工作时排出的气体对实验室环境的污染,可采用在泵的排气口上面装设排气管道(金属、橡胶管)的办法,将气体排出室外。

2. 特殊真空工艺对环境的要求

(1) 电真空工艺对环境的要求

由于电真空结构材料除机械性能和加工性能外,还要满足其它性能的要求:容易除气、低的饱和蒸气压、一定的化学稳定性、一定的纯度和清洁度,要有合适的辐射能力、温度性质和光学性质等。所以电真空工艺具有特殊性,对清洁处理要求是严格的,应最大限度清除或减少零件的污染。

电子管的生产、管子的装架和零件处理必须在封闭良好的房间里进行。房间里的墙壁和天花板都用高质量的半光泽的韧性油漆涂覆。地面用干净且打上蜡的沥青合成物或磨砂瓷砖铺盖。空气必须经过两级或多级过滤。相对湿度保持在 50% 以下。

在进行精密装架的房间里,人员往来应尽可能少。零件和其它用品通过滑动橱门送入。精密装架的房间与空调的大房间隔开。里屋的空气要进一步过滤。除空调器和过滤器开口外,墙壁、地板、天花板以及门必须尽可能封闭严实。墙上灰泥、建筑板、木板以及水泥等建筑材料都均匀地涂上光泽的或半光泽的高级油漆。

对于有特殊要求的工作,要用干燥箱来防止用其它方法未能阻挡的沾污物(操作者的呼吸物、头皮等)。当需要时,如在处理待激活的阴极表面时,干燥箱也只能使用特定的惰性气体。

为适合集成电路工艺生产的需要,生产车间应达到相应的洁净室等级标准。

(2) 真空镀膜工艺对环境的要求

真空镀膜工艺衬底(基片)表面的清洁处理很重要。基片进入镀膜室前均应进行认真的镀前清洁处理,达到工件去油、去污和脱水的目的。

基片表面污染来自零件在加工、传输、包装过程所粘附的各种粉尘、润滑油、机油、抛光膏、油脂、汗渍等物;零件表面在潮湿空气中生成的氧化膜;零件表面吸收和吸附的气体。这些污物基本上均可采用去油或化学清洗方法将其去掉。

对经过清洗处理的清洁表面,不能在大气环境中存放,要用封闭容器或保洁柜贮存,以减小灰尘的沾污。用刚氧化的铝容器贮存玻璃衬底,可使碳氢化合物蒸气的吸附减至最小。因为这些容器优先吸附碳氢化合物。对于高度不稳定的、对水蒸气敏感的表面,一般应贮存在真空干燥箱中。

清除镀膜室内的灰尘,设置清洁度高的工作间,保持室内高度清洁是镀膜工艺对环境的基本要求。空气湿度大的地区,除镀前要对基片、真空室内各部件认真清洗外,还要进行烘烤除气。要防止油带入真空室内,注意油扩散泵返油,对加热功率高的扩散泵必须采取挡油措施。

(3) 空间技术对真空环境的要求

真空在航天工业中得到广泛应用。卫星、飞船、航天飞机等飞行器在空间飞行,除了受到

真空环境影响之外,还要受到太阳辐射、各种带电粒子及温度的影响。这些因素将造成材料性能的改变,使材料损伤,仪器失灵,破坏航天器的正常工作,甚至造成人身伤亡。为此,必须建立与空间环境相似的模拟设备,使飞行器上天之前通过地面模拟实验,消除隐患,以确保飞行时的可靠性。模拟设备种类很多,与真空环境息息相关的设备有四类:火箭发动机模拟设备、宇航员训练密封舱、热真空模拟设备、元件材料试验设备。

宇航员训练密封舱这类设备真空度要求不高,低真空或中真空即可。但为了长期保障人的生命安全及训练环境的要求,对舱内环境的要求是严格的。如我国研制的载人飞船舱内气候环境的地面模拟设备(称之MBC设备),主要用途是对载人飞船舱内的气体成分、压力制度和微小气候进行医学研究;对宇航员的生活、饮食制度及能量代谢进行医学研究;对舱内生命保险系统(包括空气再生和净化系统及测试设备)进行考验和实验研究;对宇宙服的压力制度及通风散热去湿性能进行实验研究。为确保宇航员在舱内生活与工作的安全,其舱内气体环境参数为:

压力: $(10^5 \sim 2.5 \times 10^4) \text{Pa} \pm 2.6 \times 10^2 \text{Pa}$,减压和复压速度可调; O_2 分压为 $9.3 \times 10^3 \text{Pa} \sim 5.3 \times 10^4 \text{Pa}$; N_2 分压为 $2.6 \times 10^2 \text{Pa}$; He 分压为 $1.3 \times 10^4 \text{Pa} \sim 8 \times 10^4 \text{Pa}$; CO_2 分压为 $6 \times 10^2 \text{Pa} \sim 6.6 \times 10^3 \text{Pa}$ 。有害气体控制在允许范围之内,过滤设备保证空气新鲜。

微小气候:温度 $10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ (常用温度 $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$,若进行 40°C 实验,时间不大于 4h);水蒸气分压为 $6.6 \times 10^2 \text{Pa} \sim 3 \times 10^3 \text{Pa}$,保证相对湿度为 30%~70%;风速小于 0.3m/s。

舱内备有的消音、照明、防交流电干扰、灭火设备及整个密闭循环系统,包括舱内的设备必须符合高浓度氧气的实验要求,绝对防止产生火灾。必要时可在 60s 内紧急复压至地面水平。

热真空模拟设备主要用于对卫星、飞船整体或部件进行热平衡和热真空试验。这类设备主要包括真空系统、太阳模拟器、热沉三大部分。试验的目的是在鉴定或验收级温度条件下,暴露卫星的设计与工艺问题,考核工作性能,验证飞行功能,以保证卫星在空间运行的可靠性。美国戈达德宇宙飞行中心对五个卫星试验结果作出的统计表明,热真空试验发现的故障占总故障的一半以上。

卫星研制过程中对洁净度的等级要求是明确的,它将按照航天产品环境分类和等级的要求提出具体技术指标。如某型号卫星研制过程中,机械产品组装(包括储箱、高压气瓶在内)环境的洁净度规定为 10 万级。为此用于焊接储箱的高真空电子束焊机,焊接真空室的洁净度就必须是 10 万级。整个储箱的工艺装配应在 10 万级洁净车间里进行。

(五) 真空环境的有关标准

1. 粉尘性质和空气洁净度标准

(1) 粉状体、烟雾体的定义

粉状体:是粉末或固体颗粒的集合或分散状态的物质。所谓粉末是指微小的固体颗粒的集合体,而颗粒是指能够一个一个计数的物质微小部分。

烟雾体:是固体或液体的微小颗粒呈悬浮状态存在于气体中的物质体系。

粉尘:从狭义的定义说,即为工业用粉尘。物质无论是固体或液体,凡是呈颗粒状态的均可统称为粉尘。

(2) 主要粉尘体、烟雾体的颗粒直径

主要粉尘体、烟雾体的颗粒直径见表 15-1。

表 15-1 主要粉尘体、烟雾体的颗粒直径

颗粒名称	颗粒直径/ μm	颗粒名称	颗粒直径/ μm
煤粉	400~10	油烟	1~0.03
铸造厂的悬浮粉尘	200~1	树脂烟	1~0.01
水泥粉	150~1	烟草烟	0.15~0.01
飞扬灰烬	80~3	炭烟	0.2~0.01
矿坑内煤粉尘	10	硫酸烟	10~1
颜料类	8~1	SO ₃ 烟	3~0.5
金属精炼	100~0.1	雾	40~1
NH ₄ Cl	2~0.1	露	500~40
碱	2~0.1	雨滴	5000~500
ZnO	0.3~0.03	静止大气中的粉尘	1~0.01

(3) 粒度测定法

粒度测定法见表 15-2。

表 15-2 粒度测定法一览表

测定法原理	测定法或测定仪器名称	测定范围/ μm	①	备注
用显微镜直接测定	光学显微镜 电子显微镜 超级显微镜	0.2~500 0.001~10 0.2~10	○	
气相沉积测定法	显微麦朗固拉夫仪 康宁夫基仪 盒式分光仪	2~250 0.001~100 0.03~5	○ ○	重力沉积法 离心沉积法 离心沉积法
利用冲击原理的测定法	级联冲击装置	0.2~100	○	
利用光学原理的测定法	光散射法 高阶丁达尔光谱法 激光散射法 光透射法 微粒检验器	0.2~0.1 0.1~1 0.05~10 0.2~(60) 0.001~0.1	○ ○ ○ ○ ○	使用光电池、光电管 用红色光谱 使用反射 利用水蒸气凝结的光散射
用光电扫描的测定法	颗粒直径自动分析法	0.3~200		
其它测定法	X 射线散射法 离子核散法 声波法	0.01~0.1 0.2~0.6 <40	○ ○	利用布朗运动 利用声波的振动

注：①对气相中悬浮而不下降的颗粒，即烟雾体颗粒的粒度测定，以○符号表示可采用的测定法

(4) 大气中和低真空中烟雾体颗粒的运动

烟雾体颗粒是以气体为载体，因而一般来说重力下沉性强，颗粒的稳定性不好。但是若颗粒变小，重力下沉性就会减弱，布朗运动使颗粒的扩散显著。1s 内布朗运动引起颗粒平均移动的距离 x 与由重力引起的下沉距离 y 的比较见表 15-3。

表 15-3 x 和 y 的估算值(单位: μm)

颗粒直径	压力/Pa						
	1.0×10^4	5.1×10^4	2.7×10^3	3.2×10^2	84	13	1.3
10	2.2 3.1×10^3	2.2 3.1×10^3	2.7 4.9×10^3	5.9 2.2×10^4	11 7.9×10^4	27 4.9×10^5	87 —
5	3.1 7.9×10^2	3.0 7.9×10^2	4.7 1.8×10^3	1.1×10 1.1×10^4	2.2×10 3.9×10^4	5.5×10 —	1.7×10^2 —
1	7.4 3.5×10	7.8 4.0×10	2.0×10 2.6×10^2	5.6×10 2.0×10^3	1.1×10^2 —	2.7×10^2 —	8.7×10^2 —
0.5	1.1×10 1.0×10	1.3×10 1.3×10	3.9×10 1.2×10^2	1.1×10^2 1.0×10^3	2.2×10^2 —	5.5×10^2 —	1.7×10^3 —
0.1	3.7×10 3.8×10^{-1}	4.8×10 1.2	1.9×10^2 2.4×10	5.6×10^2 —	1.1×10^3 —	2.7×10^3 —	8.7×10^3 —
0.05	6.8×10 3.8×10^{-1}	9.2×10 6.9×10^{-1}	3.8×10^2 1.2×10	1.1×10^3 —	2.2×10^3 —	5.5×10^3 —	1.7×10^4 —
0.01	3.2×10^2 6.7×10^{-2}	4.5×10^2 1.3×10^{-1}	1.9×10^3 —	5.6×10^3 —	1.1×10^4 —	2.7×10^4 —	8.7×10^4 —

注:表中上行表示 x 值,下行表示 y 值

(5) 空气洁净度标准

世界上许多国家采用或沿用美国制订的洁净室空气洁净度技术标准。表 15-4 给出了美国洁净室空气洁净度有关标准。

表 15-4 美国洁净室的空气洁净度^①标准

颗粒浓度/ m^{-3}	颗粒直径		
		0.5 μm 以上	5.0 μm 以上
级 别			
100 级		3.5×10^3	—
10000 级		350×10^3	2.3×10^3
100000 级		3500×10^3	25×10^3

注:①洁净度等级的划分以 0.5 μm 以上的颗粒在每 0.028 m^3 内所含颗粒的数量表示。如级 100 即 100 粒/0.028 m^3

2. 我国对洁净室和空气净化化的要求

空气净化系指向室内或某特定空间送风的除尘净化,不包括除臭、灭菌和有毒气体等的净化处理。对于绝大多数以温、湿度要求为主的空调系统来说,设置一道粗效过滤器,将大颗粒的灰尘滤掉即可。对有一定洁净度要求,但又提不出确切的洁净标准,或者提出的洁净度指标还不到最低级别洁净度的要求的这类空调系统,可设置两道过滤器,便可满足要求。

所谓洁净室系指对空气的洁净度、温度、湿度、静压等项参数,根据需要实行控制的密闭性较好的空间,该空间的各项空气参数均满足“洁净室级别”的规定。洁净度系指洁净空气中空气中含尘量多少的程度。含尘浓度高则洁净度低;含尘浓度低则洁净度高。

先将我国洁净室等级标准摘录如下:

(1) 电子工业洁净室等级

电子工业洁净室等级见表 15-5。表中, a. 级洁净室只有产品生产工艺确实需要, 而且生产中的原材料、气体、水、化学试剂等也达到相应的净化和纯化要求时才可选用。b. 正压差值逐级不小于 4.89Pa, 例如 10 级对 100 级洁净室, 其正压值不低于 4.89Pa, 对 1000 级洁净室, 则不低于 9.78Pa。

表 15-5 电子工业洁净室等级

级别	尘粒径 / μm	含尘浓度 / L^{-1}	温度范围 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度 范围/%	正压值 /Pa	噪声 (A 声级) /dB	适用范围举例 (以集成电路工艺为例)
1 级	≥ 0.5	≤ 1	18~27	40~60	逐级相差 ≥ 4.89	≤ 70	光刻、制版 扩散 封装 腐蚀
10 级	≥ 0.5	≤ 10	18~27	40~60	逐级相差 ≥ 4.89	≤ 70	
100 级	≥ 0.5	≤ 100	18~27	40~60	逐级相差 ≥ 4.89	≤ 70	
1000 级	≥ 0.5	≤ 1000	18~27	40~60	逐级相差 ≥ 4.89	≤ 70	
10000 级	≥ 0.5	≤ 10000	18~27	40~60	逐级相差 ≥ 4.89	≤ 70	

(2) 航天工业洁净室等级

航天工业洁净室等级按空气洁净度级别来划分, 见表 15-6。

表 15-6 航天工业洁净室空气洁净度级别

(单位: 粒/ m^3)

级 别	检测的粒径/ μm				
	0.1	0.2	0.3	0.5	5.0
0.1 μm 1 级	35 \times 1	(35 \times 0.2)	—	—	—
0.1 μm 5 级	35 \times 5	35 \times 1	—	—	—
0.1 μm 10 级	35 \times 10	35 \times 2	35 \times 0.86	—	—
1 级(0.1 μm 35 级)	35 \times 35	35 \times 7.5	35 \times 3	35 \times 1	—
10 级	35 \times 350	35 \times 75	35 \times 30	35 \times 10	—
100 级	—	35 \times 750	35 \times 300	35 \times 100	—
1000 级	—	—	—	35 \times 1000	35 \times 7
10000 级	—	—	—	35 \times 10000	35 \times 70
100000 级	—	—	—	35 \times 100000	35 \times 700

3. 电子工艺对洁净室环境的要求

根据美国洁净室标准, 空气洁净度的分级是依据每 0.028 m^3 中的尘埃粒数, 那么 10000 级洁净室每 0.028 m^3 空气中含有的 0.5 μm 或更大的尘埃粒数少于 10000 颗。采用绝对过滤层流技术措施和室内套室结构, 每 0.028 m^3 尘粒数可少于 100 颗。

(1) 电子组装件所需的洁净室环境

电子组装件所需的洁净室环境通用最低标准见表 15-7。

洁净室最低标准, 也应包括温湿度控制。保持工作区温度在 20 $^{\circ}\text{C}$ ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 相对湿度为 45% ~ 55% 时, 就可以避免类似的汗水和静电污染。

表 15-7 电子组装所需洁净室环境通用最低标准

电子组装件类型	洁净室等级
航天系统和分系统电子部件的组装、测试和返修	100000
小型电路组装件、积木式组装、精密元件	10000
混合电路和集成电路非关键的外部装配	10000
关键的内部装配	100

(2) 洁净室使用要求

洁净室使用要求见表 15-8。

表 15-8 洁净室使用要求

序号	洁净室使用要求	洁净室等级		
		10 ⁵	10 ⁴	100
1	室内不允许有内燃机	×	×	×
2	工作服应清洁不起毛	×	×	×
3	室内不许吸烟或吃东西	×	×	×
4	不许打砂纸及进行钻、镗、磨、油漆、喷涂等	×	×	×
5	所有设备、工作区域、工作台等,应保持无尘土、油污、油脂、油和其它污染			
6	不允许扫灰或掸灰。清扫应当用湿拖把或吸尘器	×	×	×
7	只允许必须的通行		×	×
8	任何明显的污垢和尘土应立即清除		×	×
9	挪动零件及容器等应戴不起毛的工作服和手套		×	×
10	所有进入该室的材料和零件,应具有与室内所需控制的水平相当的洁净度		×	×
11	离开本室应脱去工作服			×
12	人员应戴不起毛的鞋套和帽子			×
13	不允许将产生污染的东西带入室内,如纸、碎片、起毛的布、干拖把或掸帚等			×
14	应为所有室内工作人员订出训练计划,对所有参观人员应简明介绍有关规定		×	×
15	室内不许使用铅笔			×

4. 表面净化方法

评价清洁表面的方法见表 15-9。

表 15-9 评价清洁表面的方法

分 类	方 法	净化功能	评价方法 ^⑤	应用举例	备 注
脱脂法	用有机溶剂 ^① 洗涤	比较厚的油脂	用蒸馏水作润湿试验	金属、玻璃、塑料	冲洗或换液清洗
	用肥皂、合成洗涤剂洗涤	油脂、盐分、灰尘		金属、玻璃、塑料	最后用蒸馏水洗
	用氟里昂蒸气洗涤	油脂	测定摩擦系数	金属	
	用碱 ^② 煮沸	油脂类的吸附膜		金属	最后用蒸馏水洗
	用超声波洗涤 ^③	油脂、盐分、灰尘			
	用酒精蒸气洗涤	油脂、水分	用油性着色剂做着色试验	金属、玻璃、塑料、陶瓷	
化学洗涤法	酸洗	除氧化物(表面出现光泽)	宏观检查是否呈镜面	金属、玻璃、塑料	用于前处理除油脂
	化学研磨	母材有腐蚀(表面呈镜面)	C	金属、半导体	用于前处理除油脂
电解洗涤法	碱 ^② 洗涤液,试样为阴极	除油脂	用蒸馏水作润湿试验,测定摩擦系数	金属、半导体	电极也可反接

二、真空技术中的清洁处理

(续)

分 类	方 法	净化功能	评价方法 ^⑤	应用举例	备 注
电解研磨法	酸性电解液, 试样为阴极	母材有腐蚀(表面呈镜面)	宏观检查是否呈镜面 C	金属、半导体	用于前处理除油脂
G.B.B ^④	空气喷射或液体珩磨	可除去母材的表层	宏观检查表面的光泽 C	金属、玻璃、塑料、陶瓷	可使用压缩空气水洗除尘
机械研磨法	金刚砂研磨	可除去母材的表层	宏观检查缺陷大小	金属、玻璃、陶瓷	可使用水、油和有机溶剂作冷却剂
	用氧化铝、氧化铬、氧化铁抛光研磨, 涂浆研磨	一般用金刚砂研磨后除去其粉末, 表面呈镜面	宏观检查表面的光泽 C		
氧化还原法	在反应气体中加热	可除去碳化物、氧化物	A、B、C	金属	使用氧、氢
放电清洗法	使用辉光放电产生稀有气体的离子喷射	母材受腐蚀	A、B、C	金属	
离子轰击法	使用稀有气体的离子喷射	母材受腐蚀	A、B、C	金属、玻璃、陶瓷	使用离子枪
真空加热法	130℃	可放出水蒸气	用质量分析计	氟化橡胶真空装置	使用真空装置和脱气材料
	250℃	可放出水蒸气中的微量油	用升温法放出气体 用光谱分析	玻璃制品真空装置	C 是作为氧化物放出
	450℃	可从母材中放出气体 (H ₂ 、N ₂ 、O ₂ 、C)		金属制品超高真空装置(450℃以下)	
在超高真空中的升温法	W:2400℃ Mo:1400℃ Si:1200℃ GaAs:600℃	可使原子的表面保持干净	A、B	用于研究原子均匀分布情况下的表面现象(金属、半导体、陶瓷)	提高温度应根据母材和要除去的杂质而定。退火温度视材料而定
离子轰击退火法	用稀有气体离子轰击后在 150℃~800℃ 条件下经过数分钟到 1h				
在超高真空下的真空蒸镀	用蒸镀离子镀				
电场蒸发法	喷射蒸镀				
真空爆破法	用液氮温度来使材料爆破				
场强计					

注:①汽油、醚、煤油、苯、甲苯、氯苯、四氯化碳、丙酮、异丙醇等;
②Na₂CO₃、NaHCO₃、NaOH、Na₃PO₄·12H₂O(有时用酒精混合液代替水溶液, 氢氧化钾代替碳酸钠);
③可用水、碱水、合成洗涤液, 有机溶剂(异丙醇、酒精、丙酮等)作为溶液;
④代表玻璃熔接, 喷砂;
⑤表中的 A 表示分析其结晶构造; B 表示分析其杂质浓度; C 表示分析其研磨缺陷和平滑性。各用相应的表面分析仪器进行分析

(六)真空装置常见污染及其防治

1. 低真空装置及真空系统

低真空装置如真空输送、真空浸渍、真空过滤、真空干燥、真空脱气(钢水处理)等要求具有工作压力高、排气量大的低真空抽气机组。这类低真空抽气机组主泵常用往复式真空泵、油封式真空泵、水蒸气喷射泵、水环泵、罗茨泵等。使用的低真空抽气机组还需根据被抽气体清洁程度、湿度或其它特殊要求,配置必要的除尘器、干燥罐等部件。

往复泵、油封机械泵不适于抽含有灰尘的气体。灰尘能污染泵油并且磨损泵腔内表面产生漏气,使极限真空度下降。防止灰尘的办法是装置除尘器。

油封机械泵不适于抽除含有大量水蒸气的气体。水蒸气在压缩过程中会凝结成水滴,并与泵油混合形成悬浮液,不仅会使真空度下降,也能使泵腔与转子生锈,破坏密封面,使泵的极限真空度下降。为此,防止水蒸气对机械泵的污染很重要。防止的措施有:①选用带有气镇装置的油封机械泵,当泵温为 $70^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 时,可允许抽除含有水蒸气分压为 $1.3 \times 10^3 \text{Pa} \sim 4 \times 10^3 \text{Pa}$ 的气体;②装油分离器、离心式分离器或油水分离器,将混有水的机械泵油进行处理,处理过的油再流入泵中使用;③使用吸水性强的干燥剂,如五氧化二磷、三氧化二铝、氯化钙、分子筛等做成捕集阱吸收水蒸气;④使用液氮冷阱,不仅能有效地吸附水蒸气,同时还可以阻挡机械泵油向高真空室返流。工业上常用前两种方法,实验室及小型抽气系统常用后两种方法。

2. 油扩散泵真空系统污染与防治

油扩散泵真空系统是使用最广泛的真空系统,其获得真空度范围为 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa} \sim 1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。油扩散泵真空系统构成的各类真空装置,长期使用后,常见的故障是真空度抽不上去,或真空度抽不到原来的极限真空水平。真空度抽不上去的原因需要仔细分析,可能是活动密封处松动、焊缝漏气、真空泵或真空阀门等元件损坏等原因所导致。此外,真空室内壁的油蒸气污染,真空工艺过程各种污染物的污染也可能是主要原因。防止的办法是:①定期清洗真空室;②定期对油封机械真空泵和油金属扩散泵进行清洗。

对真空室进行清洗时须注意的是,在打开真空室之前要关闭好位于油扩散泵与真空室之间的真空阀门,以免污染物落到扩散泵内。真空室内壁的颗粒状污染物可用纱布或绸布擦掉。表面锈痕、氧化层可用细砂纸轻轻磨掉。表面的油污先后用干净汽油、酒精、丙酮或甲醇进行擦洗,最后用绸布擦表面直至不见灰痕为止。

对油封机械泵,将泵拆开后可按下面方法进行清洗:

①先用废汽油清洗,再用汽油清洗,最后用航空汽油清洗。

②用棉布或绸布蘸少量甲醇或丙酮逐一擦洗零件表面。不要用棉纱,以免棉丝留在零件表面上。

③如果有锈或毛刺,用细油石或金相砂纸轻轻地擦,注意不要损伤零件表面。

④应将油路通孔、油槽、气体通道内部的污垢彻底清除干净,并用压缩空气将油路吹通吹干。油路中不要留下清洗用的汽油、甲醇、丙酮等残余物。

⑤清洗后的零件用绸布擦净,并用热风吹干后放在贮柜中,以免落上灰尘。

清洗无明显故障的油封机械泵,一般不需要将泵拆开,只需从放油孔放出旧油及脏物。然后再从进气口注入新油,用手慢慢地将泵转动几圈后,再把油放出。这样,重复一二次,最后注入新油。

对金属油扩散泵的清洗,可按下列步骤进行:

- ①将泵芯取出并拆开。用于净棉纱擦去各部位的泵油。
- ②用棉纱或绸布擦去泵内壁上的泵油。
- ③用酒精、丙酮,或用加热到 $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 的氢氧化钠水溶液直接清洗泵体内壁表面和泵芯。
- ④用吹风机的热风吹干。

3. 超高真空系统的烘烤与清洗

由溅射离子泵和钛升华泵组成的真空系统是目前获得清洁超高真空的主要抽气手段,能获得低于 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的压力。中小型真空系统以溅射离子泵做主泵,大型真空系统以钛升华泵做主泵。超高真空系统要求真空室内壁相当干净,零件表面粗糙度要求高,材料放气量要小。真空室零件要进行严格的清洁处理,不要用手接触零件表面。真空室的漏率也要严加控制。除此以外,还要对真空室进行烘烤,烘烤温度一般为 $200^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$,烘烤时间为 $10\text{h} \sim 12\text{h}$ (或者加热到 $350^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$,烘烤 4h)。

国产溅射离子泵启动压力为 $6.7 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 左右。压力再高,启动不了。溅射离子泵装配后,第一次启动比较麻烦。为了加速启动,最好卸下磁铁,将泵烘烤。烘烤温度为 $400^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$,烘烤时间为 $24\text{h} \sim 30\text{h}$ 。使泵彻底除气后,就容易启动。在烘烤过程中,用预抽泵不断抽走烘烤时放出来的气体。溅射离子泵使用一段时间后,可能出现不易启动或极限真空度下降的现象。若不是漏气造成的,那就可能是泵受大气中水蒸气或机械泵油蒸气作用所造成的。这时采取烘烤措施便能使泵恢复原来的性能。若污染严重,性能恢复不了,需将泵卸开,对泵内零部件进行彻底清洗。

超高真空系统真空室材料多为不锈钢,对不锈钢的清洗极为重要。清洗是为了减少不锈钢表面物理吸附和化学吸附的气体。不清洁的不锈钢表面利用二次离子谱仪和俄歇谱仪观察,主要污染是碳和它的化合物,是有机物,因此利用各种化学溶剂除去表面有机物、碳化物是常用的方法。表 5-10、表 15-11 比较了几种清洗方法及不锈钢经各种处理后的典型放气率。

表 15-10 对不锈钢各种清洗方法的比较

清 洗 方 法	抽气 48h 后的放气率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
表面机械抛光、用三氯化乙烯蒸气除油	4×10^{-9}
仅仅电抛光	3.3×10^{-9}
在空气中烘烤到 500°C ,用蒸馏水清洗(烘烤能使有机物分解蒸发,能使表面的杂质氧化,所以烘烤也为一种清洗方法)	1.3×10^{-9}
用化学酸洗去氧化膜	8×10^{-9}

表 15-11 不锈钢在各种处理后的典型放气率

处 理 方 法	抽气 48h 后的放气率/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
长期暴露大气,不进行任何处理,抽气 1h	2.6×10^{-5}
除油清洗,不烘烤,抽气 4h	1.3×10^{-7}
除油清洗, 250°C 烘烤,同时抽气 15h	10^{-10}
真空炉 1000°C 烘烤 3h ,真空度为 $2.6 \times 10^{-4} \text{Pa}$	10^{-12}

4. 真空镀膜中基片表面污染及清洗

真空镀膜工艺中,基片表面的洁净度直接影响着镀层的牢固度。基片表面的污染来源主要有:①零件在加工、传输、包装过程中及放置时所粘附的各种粉尘;②零件在加工、储运过程

中粘附的润滑油、机油、抛光膏及油脂、汗渍等污物；③零件表面在潮湿空气中生成的氧化膜；④零件表面吸收和吸附的气体。这些污染物基本上均可采用去油或化学清洗方法将其去掉。实验室及工业上常用的基片清洗方法见表 15-12。几种常用的镀前处理工艺过程及配方见表 15-13。

表 15-12 基片的各种清洗方法

清洗方法	清洗目的	清洗手段	清洗过程
洗涤剂清洗法	去除油脂污物	采用纯水、洗涤剂、乙醇等溶液	在沸腾的洗涤剂中将基片浸泡 10min 后用纯水充分冲洗,再在乙醇中浸泡,然后烘干。也可用洗涤剂将纱布浸透后对基片进行充分的擦洗后烘干
化学药剂和溶剂清洗法	去除油脂污物	在丙酮溶液或强碱溶液或铬酸和硫酸混合液中浸泡	在采用上述方法去除油污之后进行化学清洗,然后进行水洗、淡氨水中和、去离子水洗、去水、烘干等
擦洗清洗法	去除附着性强的各种污物	对有化学作用的可选用中性洗涤剂对基片进行擦洗	边喷射纯水和中性洗涤剂,边用旋转的刷子对基片进行擦洗,然后用纯水冲洗,再用干燥空气或氮气脱水烘干
超声波清洗法	去除附着性强的各种污物	采用纯水、中性洗涤剂、异丙醇液体、甲基羧丸酮等洗涤介质	本法作为擦洗清洗后的后处理工艺清除油脂污物,其过程是先中性洗涤剂进行擦洗,然后用纯水超声波清洗 15min,之后纯水冲洗。再用异丙醇超声波清洗 15min,之后异丙醇清洗。最后用纯水超声波清洗后纯水冲洗。然后经氮气吹风机吹干
离子轰击清洗法	去除表面污物和吸附物	采用离子轰击	基片置于 10Pa~1000Pa 的真空室中,施加 0.5kV~1kV 高压产生低能量的辉光放电后,使加速的正离子轰击基片表面
烘烤清洗法	去除水分子	采用加热使基片升温	在高真空中将基片加热到 300℃ 后,去除基片上残余的清洗液及水分。也可在大气下加热到 300℃~500℃ 高温,加热时间为 30min~60min
蒸气清洗法	去除油脂等碳氢化合物	采用甲基羧丸丙酮、异丙醇、三氯乙烯等蒸气	先进行擦洗清洗或超声波清洗后再用此法。其过程是将基片放在沸腾的甲基羧丸酮、异丙醇或三氯乙烯蒸气中使附着的油脂溶解
紫外线和臭氧清洗法	去除动物脂等有机物	采用紫外线和臭氧的物理化学作用	本法是作为上述各种方法的后处理工艺来使用,其过程是将基片放置在低压紫外线辐照器和臭氧发生器下面用紫外线和臭氧照射几十秒。紫外线强度距在基片 5mm 处为 $1.6\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$,臭氧发生器距基片约为 6cm

表 15-13 几种常用的镀前处理工艺过程及配方

镀前处理	清洗目的	工艺过程和配方	备注
有机溶剂去油	去油	三氯乙烯、三氯三氟乙烷、二氯二氟乙烷、汽油、丙酮、四氯化碳溶剂等溶液。去油规程是:汽油擦去零件表面油脂,溶液缸内浸洗 3min~10min,放入三氯乙烯槽中超声波去油 5min~10min	三氯乙烯去油效果最好,但毒性大,用时应注意通风
汽油、丙酮联合去油	去油	先对零件表面用浸泡汽油的棉纱擦洗,或在汽油内超声波清洗 15min~50min,用汽油除油后再用丙酮除油,方法如上	
碱溶液化学去油	利用浮化作用去掉金属表面上的矿物油	可在海鸥洗净剂与水配比为 1:10 的溶液中煮沸 10min~15min 或超声波振动 20min~30min 去油	
乳化去油	去除金属上粘附的润滑油	配方:0.P 乳化剂:5g/L~8g/L 水玻璃:50g/L~60g/L 105 号洗涤剂:5g/L~10g/L 焦磷酸钠:3g/L~15g/L 将焦磷酸钠放入油槽搅拌均匀,按规定量放入 0.P 乳化剂、水玻璃和 105 号洗涤剂,不断搅拌,注入适量水,保持温度 30℃ 左右即可	
电化学去油(即电解去油)	去油	以待去油零件为一个电极(常用阴极)加上直流电压,电解液为 10%~20% 的 NaOH 的纯碱,温度为 30℃~80℃	
金属零件去污	去除零件表面的氧化物、毛刺、疏松结构	用一定流速的氧化镁细粉和水的混合物向金属零件表面喷射,也可在滚筒内加磨料(如金刚细砂、木屑、棉籽皮等)进行抛磨	
金属零件化学清洗	去掉零件表面氧化物、氧化膜和各种污物	一般是先按上法去油再在化学清洗液中浸洗,用自来水冲洗 5min~15min,再浸入 2%~5% 的氨水中中和,再用自来水冲洗后去离子水浸洗两次,最后用无水乙醇浸泡脱水,再用 80℃~100℃ 干燥箱烘干或热风吹干	工业上应用时可用氟里昂代替无水乙醇
刀具镀 TiN 的镀前处理	去油、去污、清除表面疏松组织及毛刺、脱水等	三氯乙烯浸泡 3min 去油,带有蒸汽的三氯乙烯浸泡和蒸汽浴 3min,50℃ 碱性金属清洗剂超声波清洗 3min,25℃ 去离子水浸泡,可用流动水冲洗及超声波处理,氟里昂 113 浸泡 3min 并附以手动喷枪射 F113。处理过程应在良好通风的系统中进行	

5. 电真空工艺的清洁处理

由于各种污染可以使电真空器件变质,影响使用寿命和可靠性,因而电真空工艺具有特殊性。一般而言,电真空器件所用的金属材料或零件在经过机械加工后都要进行去油。利用碱性溶液和有机溶剂都可以去除金属表面的油脂和其它脏物。在去油之后,如果金属表面还留有氧化物,则一般还要用酸洗来浸蚀金属。酸洗以后,要用氨水中和,或在沸水中煮,否则金属容易重新生锈。最好的清洗方法是,零件经过化学处理后,再进行烧氢处理,除去残留在表面上的杂质或氧化物,驱走大部分金属吸附的气体。最后一次冲洗用蒸馏水或去离子水。因为水不干净,杂质还会污染材料。最后需注意的是,装入真空系统或器件的材料,最好是刚刚经过清洁处理的。如果要贮存一段时间,则必须用无纤维的清洁纸或铝箔包扎,然后放入干燥器或真空贮存柜内,以免材料表面重新污脏或氧化。

为了保证清洁工作的成功,除了盛装器件的容器要非常干净外,持取和揩擦的工具也是值得注意的。赤裸的手是非常可怕的,它会带来有机油脂和其它脏物,而使任何严格去污的结果归于失败。因此在一般情况下要用不锈钢的小镊子(可以避免在空气中生锈,也抵抗了酸碱的浸蚀)钳取物品。用以拭揩器件外部的材料一般用脱脂棉,但在拭揩内部或表面比较粗糙的物体时,则用干净的白绸,以避免残留纤维。丝织手套或棉纱手套会很快吸足汗液而渗透出汗液来,橡皮手套含有硫而且套卸不便,白色的塑胶手套比较好,但在使用氰化物溶液时则必须带橡皮手套。即使在一般场合下口罩也是很必要的,口罩带用橡筋带比纱带更合适。

经过清洁处理的干燥材料,要用不易掉落纤维的半透明纸或铝箔包扎,然后放入真空柜或干燥器内保存。

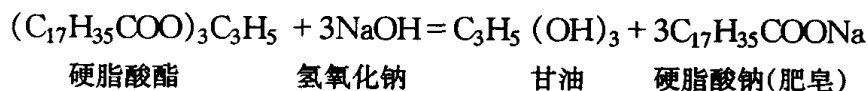
(七)表面处理的基本方法

1. 溶剂去油

零件所粘附的油脂分为矿物油、动植物油两大类。矿物油可用有机溶剂去除;动植物油可用碱溶液化学去除。但实际上两类油脂经常同时存在,所以在清洗时往往需要先后采用数种不同的溶剂。

(1) 碱液去油

当零件浸入碱液时,由于碱液与油脂的化学作用可使动植物油(即可皂化油脂)转化为脂肪酸盐类(皂化作用),这些盐类能溶解于水,从而能使零件除去油脂。以氢氧化钠为例,反应方程式如下:



矿物油与氢氧化钠不起反应,但在一定的条件下(例如在碱溶液中加入少量的肥皂)可使油膜遭到破坏,形成很小的油滴,悬浮在溶液中(即乳化作用),达到部分去油的目的。

常用的碱液有氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH) (浓度 $50\text{g/L} \sim 100\text{g/L}$)、碳酸钠(Na_2CO_3)及碳酸钾(K_2CO_3) (浓度 $100\text{g/L} \sim 150\text{g/L}$)。去油时加热到 $70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$,可加速去油过程。此外也可用碳酸钠(Na_2CO_3)、磷酸钠(Na_3PO_4)、硅酸钠(Na_2SiO_4)及氰化钠(NaCN)的混合物溶液进行去油。

金属零件从去油溶液中取出后应立即在温水中彻底清洗,然后再用冷水清洗。若金属表面不被水湿润(有水滴)即表示油污尚未除尽,应再次进行处理。

目前已普遍采用合成洗净剂去油(如海鸥洗净剂)。用合成洗净剂与水以 $1:9$ 比例配成溶

液,将待去油零件放入沸腾溶液中,煮 10min~15min(或用超声波振动 20min~30min),可获得良好的去油效果。

(2)有机溶剂去油

有机溶剂能够溶解矿物油和动植物油,通常可与碱液去油配合使用。常用有机溶剂有三氯乙烯(C_2HCl_3)、四氯化碳(CCl_4)、丙酮(C_3H_6O)、汽油、乙醚等。

三氯乙烯不燃烧,比汽油安全,它能很好地溶解矿物油、石蜡、树脂、橡胶等。其缺点是加热时(125℃以上)容易分解出氯化氢、氯气和一氧化碳等有毒气体。此外三氯乙烯不能直接用火焰加热,如与火焰接触会分解出非常有毒的光气($COCl_2$);光照亦会加速分解,因此储放三氯乙烯时要采用暗色玻璃瓶;湿空气、酸和铝与三氯乙烯接触时也能促使三氯乙烯分解,因此零件上若有酸性物质时应经过中和,而沾水零件必须烘干后再用三氯乙烯清洗。铝零件和碱金属、碱土金属零件不能用三氯乙烯清洗。零件用三氯乙烯清洗后可在去离子水中清洗,最后用无水乙醇脱水,再用温度为 70℃~80℃的烘箱烘干。

四氯化碳几乎不溶于水,但溶解于乙醇及其它有机溶剂。有毒。

丙酮是易燃的有机溶剂,使用时需注意安全。它的去油能力较强,能和水及乙醇以任意比例混合。零件经丙酮去油后,应再用无水乙醇浸洗,然后烘干。

汽油易燃烧,使用时必须注意安全。它可用来清洗不耐碱的零件,如铝等。通常使用的汽油为含杂质少的航空汽油。

甲醇可以和水以及其它溶剂很好地混合,它的沸点低,易挥发,所以零件清洗后可用它来进行二次清洗、脱水和加速干燥。

乙醇可与水及其它溶剂很好地混合,用于零件的二次清洗、脱水和加速干燥。通常使用无水乙醇。

乙醚能很好地溶解油脂和其它有机化合物。它的沸点很低,极易挥发,但难溶于水,其蒸气进入机械泵后很难被抽走。

水是各种无机物和其它物质的良好溶剂。由于自来水中含有较多的氯离子,所以一般均用加热后的自来水进行清洗。当要求较高时,可采用蒸馏水或去离子水。通常用流动的热水清洗电镀后和用酸、碱腐蚀后的零件。

2. 酸、碱侵蚀处理

去油后进行浸蚀处理,目的是去除金属表面的氧化物。经过热处理的零件,油污已不存在,可直接进行浸蚀处理,以去除退火后的氧化层。

浸蚀处理一般在酸性溶液中进行。大多数金属的氧化物以及金属本身都能与适当浓度的酸溶液起化学反应。氧化物与酸反应生成盐和水,金属与酸作用生成盐和氢气。氢气的一部分被金属表面吸附后,会使某些金属变脆。为了避免金属变脆和过度腐蚀,可在浸蚀液中加入缓蚀剂,并适当控制浸蚀溶液的浓度及温度。过高的溶液浓度和温度都会加速浸蚀作用。

某些金属则适宜用碱性溶液进行浸蚀。

3. 电化学清洗及抛光

(1)电化学清洗

将待清洗的金属零件放在某种溶液中,并将零件接在电源的正极或负极,另外再用某一材料制作成的极板接电源的另一极,调节电源电压,获得一定电流密度,达到去油和去除金属表面氧化层的目的。

电解去油的效率比化学去油高好几倍。如果用碱液作为电解液,可用交流或直流作为电

源,但交流的电解去油速率不如直流快。电解去油的原理是:电解时在电极上产生剧烈的气泡(在阴极上产生氢气,阳极上产生氧气),零件上附着的油脂薄层因受机械力的冲击而破坏,同时油脂和碱液起皂化和乳化作用,加速了去油过程。

电解用的电源电压通常为 $2V \sim 12V$,极间距离为 $5cm \sim 15cm$ 。

当零件上有深坑时电解去油效果不好,此时应与碱性去油法配合使用,并且最好在电解去油前先经碱液去油。另外,在阴极去油时(零件接阴极),阴极产生的氢气能渗入某些金属内部使金属变脆,对于这样的金属只能用阳极去油。

电解去油所用碱液配方和碱液去油相同。常用配方及电解规范为:

烧碱($NaOH$)	60g/L
纯碱(Na_2CO_3)	20g/L
氰化钠($NaCN$)	20g/L
水玻璃(Na_2SiO_3)	8g/L
温度	$25^{\circ}C$
电压(零件接阴极,用不锈钢作阳极)	$6V \sim 10V$
电流密度	$40mA/cm^2 \sim 80mA/cm^2$
时间	$1min \sim 2min$

电解浸蚀和电解去油的工艺是一样的。和一般浸蚀方法相比,电解浸蚀对某些金属的浸蚀作用更为有效,并能缩短浸蚀时间,减少溶液消耗,得到化学浸蚀所不易收到的效果。

电解浸蚀也分阴极浸蚀和阳极浸蚀两种。阴极浸蚀容易渗氢发脆,因此常用阳极浸蚀,但阳极浸蚀容易使零件浸蚀得不均匀。

阳极浸蚀是把金属零件接阳极,阴极采用铅、钢或铁。电解时在阳极产生氧气,由于受氧气气泡的机械冲击,而把氧化物剥离。

阴极浸蚀则将零件接至阴极,用铅、铅锡合金或硅铁作为阳极,电解时阴极受氢气气泡的机械冲击而去除氧化层,同时氢气还将氧化物还原,起到去除氧化层的作用。

(2) 电化学抛光

电化学抛光法的电解液与电解浸蚀液不同,抛光时,待抛光金属零件作为阳极,阴极通常用紫铜、铅、钢等金属制成,其面积为阳极 5 倍以上,阴、阳极距离 $50mm \sim 120mm$ 。在抛光过程中零件损耗极少,而金属表面却变得很均匀,因而可得到理想的光洁表面。

电抛光前零件的表面粗糙度以 $R_a 1.6 \sim R_a 0.8$ 为宜,并需彻底去油。电解液配方及抛光规范为:

正磷酸(H_3PO_4)	65%(质量百分比)
硫酸(H_2SO_4)	15%
铬酐(CrO_3)	6%
去离子水	14%
电流密度	$0.2A/cm^2 \sim 0.5A/cm^2$
电压	$6V \sim 12V$
工作温度	$75^{\circ}C$ 左右
时间	$5min \sim 10min$

不同金属材料的电抛光规范见表 15-14。

表 15-14 不同金属材料的电抛光规范

材 料	电流密度/ $A \cdot cm^{-2}$	时 间/min	抛光液温度/ $^{\circ}C$
不锈钢(小件)	0.2~0.3	2~5	室温~50
不锈钢(大件)	0.2~0.3	2~5	80~90
钼	0.2~0.3	2~5	室温~50
镍	0.2~0.3	2~5	室温~50
康铜	0.2~0.3	2~5	室温~50
可伐	0.2~0.3	2~5	室温~50

电抛光后,将零件放入 2%~5% 氨水内中和 15s~20s,再用水清洗,无水乙醇脱水,烘干。

4. 超声波清洗

超声波清洗的原理是利用它所造成的介质的“空隙现象”,即由超声波的振动引起清洗介质疏密的变化而达到清洗目的。振动使介质时而稀疏形成瞬时的空隙,时而闭合,闭合时产生的瞬时冲击压力可大到几个大气压,这个强大的冲击能破坏物体表面的油膜,使之和污染物一起脱离物体表面被冲落到溶液中。

超声波清洗可以去掉零件上孔内部的污染物,这是一般清洗方法所无法实现的。超声波清洗的溶液可以用水和其它溶剂,若用三氯乙烯会有更好的去油效果。常用工作频率为 4MHz~10MHz。

(八)清洗实例

1. 可伐的清洗和化学抛光

(1)可伐的清洗

①酸洗液配方:硝酸(HNO_3)10%,盐酸(HCl)10%,去离子水 80%。

②铬酸液配方:铬酐(CrO_3)100g,硫酸(H_2SO_4)30mL,去离子水 1000mL(此配方用于可伐、无氧铜、钼去氧化膜)。

③清洗过程(以先后为序):去油后浸入 70℃~80℃ 酸洗液中,时间 2min~3min,自来水冲洗,在铬酸液中浸洗 3s~5s 后,自来水冲洗,去离子水清洗(两次),无水乙醇脱水后烘干(70℃~80℃)。

(2)可伐的化学抛光

①可抛光液配方:硝酸(HNO_3)300mL,醋酸 700mL。

②抛光过程(以先后为序):去油,5%盐酸溶液中清洗(去掉氧化物),自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干,零件浸入 100℃~110℃ 抛光液(大零件 15s~30s,小零件 3s~10s),自来水冲洗,2%~5%氨水中和,自来水冲洗,去离子水洗,无水乙醇脱水,烘干。

2. 钨的清洗

(1)钨丝与细钨杆清洗法(钼丝、钨钼合金丝同此法)

三氯乙烯去油 3min~10min(两次),取出后烘干,20% 氢氧化钠($NaOH$)溶液中煮 15min~20min(使石墨层脱落),自来水洗,2%~5%氨水中和,自来水洗,去离子水煮两次(每次 10min~15min),无水乙醇脱水,烘干。

(2)钨杆(粗)电解清洗(钼的电解清洗和此法相同)

将零件放入 20% 氢氧化钠($NaOH$)溶液中,以石墨和零件作电极,用交流电源电解清洗

30s 左右(溶液可重复使用),再用热水冲洗,去离子水清洗,烘干。

(3) 钨零件的弱浸蚀

将亚硝酸钠(NaNO_2)熔化于铁坩锅中,然后将零件放在亚硝酸钠熔融体中迅速浸蚀(时间不超过 1s),急速在沸水、流水及无水乙醇中轮流清洗并烘干。

(4) 钨零件强浸蚀

①配方:铁氰化钾($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)6.15g,氢氧化钠(NaOH)1000g,去离子水 1000mL。

②方法:将零件浸入温度为 70℃ 溶液中(时间 0.5h~2h),经热水冲洗后迅速在 50% 的盐酸溶液和热水中冲洗并烘干。

3. 钼的清洗

(1) 钼的清洗及电解清洗

钼丝与细钼杆的清洗以及粗钼杆、钼板的电解清洗可分别参照钨零件的清洗。

(2) 钼的弱浸蚀(亦适用于钽及铌)

将氢氧化钾(KOH)9 份、亚硝酸钠(NaNO_2)1 份(按重量计)熔化于铁坩锅中,然后将零件放在其熔融体中迅速浸蚀(时间小于 1s),再急速在沸水、流水及无水乙醇中轮流清洗并烘干。

(3) 钼的强浸蚀(此法可用于镍)

①配方:硫酸(H_2SO_4)100 份、硝酸(HNO_3)20 份(按容量计)。

②清洗过程(以先后为序):去油,在 80℃ 酸洗液中浸蚀,自来水冲洗,2%~5%氨水中和,无水乙醇脱水,烘干。

(4) 清洗钼的其它方法

①清洗液配方:铁氰化钾($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)150g,氢氧化钠(NaOH)25g,去离子水 500mL。

②清洗过程(以先后为序):零件去油,放入温度为 80℃~90℃ 的清洗液中(时间 2min~5min),自来水冲洗,在铬酸液(可伐的清洗)中浸 3s~5s,自来水冲洗,2%~5%氨水中和,自来水冲洗,去离子水冲洗,无水乙醇脱水,烘干。

4. 铜及其合金的清洗

(1) 弱浸蚀

①配方:氯化钠(NaCl)15g,亚硝酸钠(NaNO_2)20g,硝酸(HNO_3)1000mL,硫酸(H_2SO_4)1000mL,去离子水 2000mL。

②清洗过程(以先后为序):零件去油后在溶液中浸蚀(温度 25℃,时间 1s~5s),自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干。

(2) 强浸蚀

①配方:硝酸(HNO_3)1 份,硫酸(H_2SO_4)2 份,水 7 份(按容量计)。

②清洗过程(以先后为序):去油,温度为 25℃ 溶液中浸蚀(时间 2h~4h),自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干。

浸入 55% 蚁酸(HCOOH)溶液中,温度 25℃,时间 2h~4h,自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干。

(3) 无氧铜零件化学抛光

①抛光液配方:硝酸(HNO_3)200mL,醋酸(CH_3COOH)500mL,磷酸(H_3PO_4)550mL,硫脲 0.2g~0.3g。

②酸洗配方:硫酸(H_2SO_4)50mL,硫酸亚铁(FeSO_4)饱和溶液 950mL(此配方仅去除氧化

铜,对铜则不起作用)。

③化学抛光过程(以先后为序):去油,浸入 $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 酸洗液,时间 $3\text{min} \sim 5\text{min}$ (若表面无氧化层可不进行酸洗),自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干,浸入 $40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 抛光液,时间 $10\text{s} \sim 30\text{s}$,自来水冲洗,2%~5%氨水中和,去离子水洗,无水乙醇脱水,烘干。

5. 不锈钢的清洗

(1) 配方

①盐酸(HCl)5.5份,硝酸(HNO_3)2份,水2.5份(按质量计),再加2%~3%的尿素,温度 70°C 。

②氢氟酸(HF)1.5份,硝酸(HNO_3)1份,水7.5份(按质量计),温度 50°C 。

(2) 清洗过程(以先后为序)

去油,浸入配方①或②的溶液中,自来水冲洗,2%~5%氨水中和,自来水冲洗,无水乙醇脱水,烘干。

6. 镍的清洗

(1) 配方(强侵蚀)

①硝酸(HNO_3)5份,硫酸(H_2SO_4)5份(按容量计)。

②硝酸(HNO_3)290mL,硫酸(H_2SO_4)150mL,水60mL。

(2) 清洗过程(以先后为序)

去油,在配方①或②的溶液中清洗(温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$,时间 5s),自来水冲洗,2%~5%氨水中和,去离子水洗两次,无水乙醇脱水,烘干。

7. 银焊料清洗

(1) 配方

铬酐(CrO_3)120g,氯化钠(8g),去离子水1000mL。

(2) 清洗过程(以先后为序)

去油,烘干,在清洗液中浸洗 30s ,自来水冲洗;在5%氨水中浸 $30\text{s} \sim 60\text{s}$,自来水冲洗;在5%盐酸溶液中浸洗 30s ,自来水冲洗;去离子水洗两次,烘干(若氧化层厚可用砂纸打光,再去油,清洗)。洗好后焊料应无污痕、酸印、水印。

8. 银铜焊料清洗

清洗过程(以先后为序):去油,烘干,在50%盐酸溶液中浸洗(温度 $70^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$)时间 $3\text{min} \sim 5\text{min}$,自来水冲洗,2%~5%氨水中和,自来水冲洗,去离子水洗,无水乙醇脱水,烘干。洗好后的焊料应无污痕、酸印、水印。

9. 陶瓷件清洗

清洗过程(以先后为序):用去污粉、肥皂水刷洗(也可用超声波清洗),在10%氢氧化钠溶液中煮 20min ,自来水冲洗,再用去离子水煮 15min (1~2次),烘干(一般不允许用酸洗、酸煮,不用三氯乙烯去油,以避免留下导电层,若有金属痕迹、锈斑等,可用棉球浸5%盐酸擦净)。

10. 玻璃件清洗

(1) 配方

重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)饱和溶液35mL(也可用铬酐(CrO_3)代替),硫酸1mL。

(2) 清洗过程(以先后为序)

甲苯去油,丙酮清洗(也可用汽油去油、清洗),在温度为 70°C 的20%氢氧化钠中浸泡

24h,洗液加热到 $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 浸泡 24h,自来水冲洗,去离子水冲洗,烘干($70^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$)。

11. 真空橡皮去硫

在 20% 氢氧化钠溶液中煮 1h,自来水冲洗,去离子水冲洗,烘干。

12. 钛及钛合金的清洗

(1) 配方

① 氢氟酸(HF)20mL,硝酸(HNO_3)500mL,去离子水 500mL。

② 氟化钠(NaF)50g,盐酸(HCl)50g,去离子水 350g。

(2) 清洗过程(以先后为序)

去油,室温放入配方①或②的酸洗液中洗 10min~30min,自来水冲洗,用 2%~5% 氨水溶液中中和,自来水冲洗,去离子水冲洗两次,无水乙醇脱水、烘干。

三、真空设备制造中常用的几种永久性连接方法

(一) 氩弧焊

1. 概述

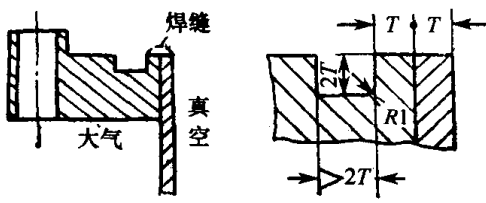
氩弧焊是气电焊的一种,它是以氩气作为保护气体的电弧焊。由于焊缝受到氩气的保护,所以焊缝质量比较高,同时又由于热源集中,所以焊接时的热影响区小,工件变形小,保证了工件的气密性和机械强度。此法适用于焊接高强度合金钢、有色难熔和化学性质活泼的金属及其合金,也可用于补焊、定位焊、反面成型的打底焊及异种金属的焊接。在真空设备制造中的超高真空不锈钢容器、管道阀门、波纹管连接件、可伐陶瓷封接接头与法兰盘的连接件、钛泵中零部件的连接件,以及许多电真空器件外壳的连接件、零部件点焊和塞焊等都广泛采用氩弧焊。氩弧焊可分为不熔化电极氩弧焊和熔化电极氩弧焊,手工、半自动、自动氩弧焊。真空技术中大多采用不熔化电极的手工或半自动氩弧焊。

2. 氩弧焊接头形式

(1) 同种材料氩弧焊接头结构

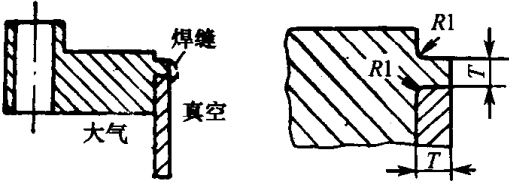
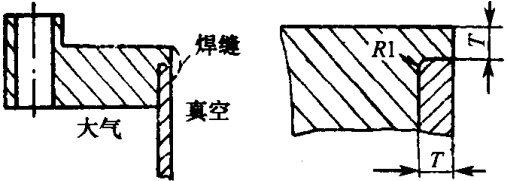
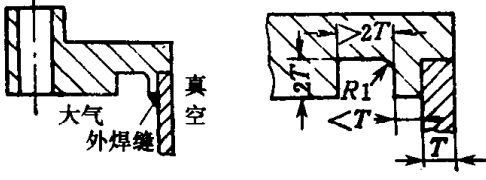
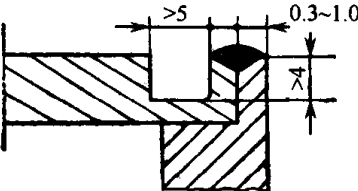
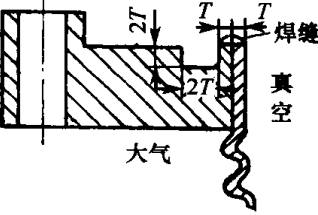
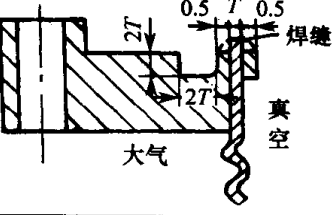

属于这类结构的有,真空管道和法兰盘的连接、管道与管道的连接、波纹管 and 法兰盘的连接、金属-陶瓷封接件的翻边与法兰盘的连接等。所用材料一般为不锈钢-不锈钢、可伐-可伐。为了保证接头的真空性能,焊缝应尽可能处在真空内侧,以避免形成不利于抽空的“死空间”,并严格禁止内外侧同时有焊缝的结构。但外侧可以断续焊进行定位和加固。常用接头形式见表 15-15。

表 15-15 同种金属材料氩弧焊接头形式


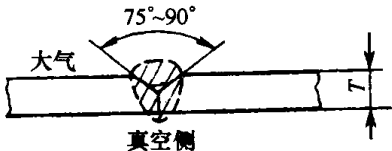
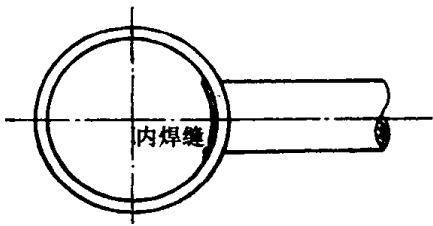
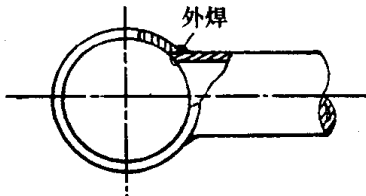
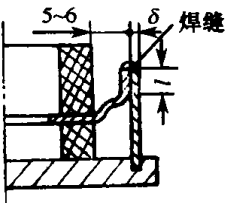
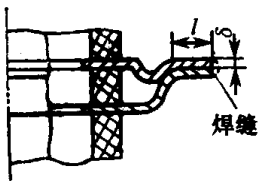
材 料	接头形式	备 注
不锈钢(可伐)法兰—不锈钢 (可伐)管		过渡圆角 $R1$ 的作用是防止裂缝,焊缝尽可能选在真空内侧

三、真空设备制造中常用的几种永久性连接方法

(续)

材 料	接头形式	备 注
不锈钢(可伐)法兰—不锈钢(可伐)管		同上
不锈钢(可伐)法兰—不锈钢(可伐)管		同上
不锈钢(可伐)法兰—不锈钢(可伐)管		适用于不允许内焊的结构
不锈钢(可伐)—不锈钢(可伐)		厚大零件的焊接可用薄边焊接法
不锈钢波纹管—不锈钢法兰		波纹管壁 $T > 0.4\text{mm}$
不锈钢法兰—不锈钢波纹管—不锈钢环		波纹管壁 $T < 0.4\text{mm}$, 在内侧加一较紧配合的不锈钢环
不锈钢—不锈钢		$T < 0.8\text{mm}$

(续)

材 料	接头形式	备 注
不锈钢—不锈钢		$0.8\text{mm} < T < 2\text{mm}$, 焊透至真空内侧
不锈钢—不锈钢		$T > 2\text{mm}$, 焊缝坡口需要填充材料, 焊透直至真空内侧
不锈钢管—不锈钢管(交叉接头)		尽量采用内焊
不锈钢管—不锈钢管(交叉接头)		由于零件太小, 不能将焊枪插到管内, 采用外焊
铜—铜, 不锈钢—不锈钢, 可伐—可伐, 金属陶瓷封接卷边焊(立焊缝)		铜 $\delta = 0.5\text{mm} \sim 0.7\text{mm}$ 不锈钢 $\delta = 0.3\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ 可伐 $\delta = 0.3\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ 可拆卸长度 l 最大为 8mm
可伐—可伐, 金属陶瓷封接卷边焊(平焊缝)		$\delta = 0.5\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ $l = 6\text{mm} \sim 10\text{mm}$

(2) 异种材料的氩弧焊接头结构

在金属真空系统和泵体设计中常常遇到异种金属的焊接结构, 如不锈钢法兰盘与可伐管、铜管的连接等。此时在结构和工艺上要结合不同材料的热膨胀特性、熔化温度、导热率和深冷条件下的收缩等情况综合予以考虑, 才能得到气密性焊缝。其接头形式见表 15-16。

3. 常用材料的氩弧焊

真空工艺中经常遇到不锈钢—不锈钢、可伐—可伐、无氧铜—无氧铜的氩弧焊。此外还有不锈钢—可伐, 不锈钢—无氧铜、钛、钨、钼等金属材料的氩弧焊。

表 15-16 异种金属材料氩弧焊接头形式

材 料	接头形式	备 注
不锈钢法兰—可伐管		
不锈钢法兰—可伐管		
不锈钢法兰—铜管		焊弧需处在铜管边缘
不锈钢—可伐		

常用的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在氩弧焊时,遇到的主要问题是热状态下的开裂问题,所以设计不锈钢接头时应考虑消除应力问题。不锈钢工件的焊缝附近不允许有镀铜层及银铜焊料的残余。镀有镍层的不锈钢,氩弧焊焊缝是气密的,并且是高强度的。

可伐的焊接性能较好,镀镍后进行焊接仍能获得良好的气密性。焊前对可伐零件要进行去应力退火,防止由应力引起的热裂缝。由于可伐的热阻较大(导热系数小),导热很慢,当金属—陶瓷(金属—玻璃)封接件与可伐法兰或其它可伐零件进行氩弧焊时,焊缝应距陶瓷或玻璃的封接面 5mm~6mm,防止引起陶瓷或玻璃炸裂。焊缝附近不得有银及其合金,以免产生可伐开裂。

铜的热导性很好,为减少焊接功率,所设计的焊缝结构应有较大的热阻。由于铜的膨胀系数大,焊后的变形也大,所以要防止薄小件的变形和防止刚性大的工件因应力过大而产生裂纹。焊接时要注意对熔池和近缝区进行保护,防止铜的氧化。

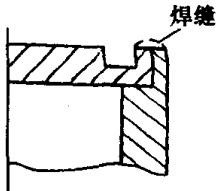
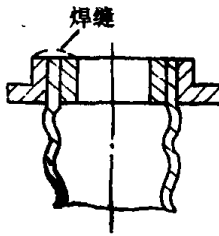
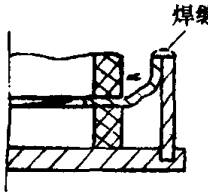
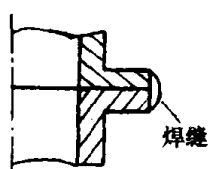
不锈钢与铜,可伐与铜进行焊接时,要使铜高出焊缝一个适当的高度,焊接时使电弧偏向铜的一方,防止电弧烧偏到可伐上,以得到气密的焊缝。

钨、钼、钽等难熔金属也可以采用氩弧焊,但极易氧化,因而焊接时要用高纯度的氩气保

护,最好在充氩的小室中进行焊接,防止氧和氮进入焊缝,因为氧和氮会使焊缝严重变脆。由于钨、钼有再结晶发脆的倾向,要尽可能采用高的焊接速度。焊接钨时最好先预热至 $400^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 左右。

一些常用材料的薄壁件的氩弧焊焊接规范见表 15-17。

表 15-17 常用材料的薄壁件的氩弧焊焊接规范

材料名称	焊缝结构	厚度 /mm	焊接电流 /A	焊接速度 /cm·min ⁻¹	氩气流量 /L·min ⁻¹	钨丝直径 /mm	备注
不锈钢—不锈钢 可伐—可伐 低碳钢—低碳钢		0.5+0.5	5~8	30~50	7~8	1.0	
		1.0+1.0	25~35	40~60	7~8	1.0	
		1.5+1.5	40~60	50~70	7~8	1.5	
		0.3+0.12+0.3	4~6	20~30	—	1.0 (细磨)	氩气室内焊接
		0.5+0.12+0.5	9~11	30~40	—	1.0 (细磨)	
无氧铜		0.5+0.5	80~100	60~100	8~10	1.0	氩气室内焊接
		0.5+0.5	50~80	80~100	—	1.0	
		0.7+0.7	100~120	50~80	8~10	1.0	
		1.5+1.5	120~150	50~70	—	1.5	氩气室内焊接
		1.5+1.5	150~180	50~70	8~10	2.0	

(二) 钎焊

1. 概述

钎焊是由高温液态焊料填满被钎焊的固态基金属(钎接金属或简称基金属)间的间隙,使被钎焊金属产生结合的一种工艺方法。

与其它焊接方法比较,钎焊具有变形小、基金属性能变化小、可同时完成多个零件的连接、并可连接不同的金属等优点。

按照焊料的熔点和强度,钎焊可分为硬焊和软焊两类。硬焊焊料的熔点在 500°C 以上,接头强度较高;软焊焊料的熔点在 500°C 以下,接头强度低。

2. 常用焊料及其性能

(1) 对真空工艺用焊料的要求

钎焊接头的质量很大程度上取决于焊料的性能。对真空工艺用焊料的要求如下:

①要有合适的熔点和流点。熔点是焊料开始熔化时的温度,流点是焊料熔化终了时的温度。通常焊料的流点应比被焊金属熔点低 60°C 左右,但希望熔、流点要尽量接近。对于多级钎焊,相邻两级焊料的熔点应相差 $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

②液态焊料对所焊金属应具有良好的润湿性和流散性,并能与基金属形成合金(最好形成固溶体),而不形成脆性的化合物。

③不能含有高蒸气压的元素。高蒸气压元素是指汞、硫、铯、铅、锌、镉、钾、硒、钠、磷、镁、铟、锑、铋、砷、钙等。焊料中单一杂质元素的含量应小于 0.002% ,杂质含量的总和应小于 0.05% 。

④焊料应具有良好的强度、塑性、导电性、导热性和抗腐蚀等性能。最好没有晶间扩散,不生成易熔共晶脆性物。

⑤只许含极少量空气(不许超过 0.001%)及有机和无机的非金属杂质。否则,在真空中钎焊时,熔化的焊料便会“沸腾”,致使焊缝多孔。

(2) 几种常用焊料性能

①纯银焊料。这种焊料可钎焊镍、可伐等。纯银焊料的纯度应 $\geq 99.99\%$ 。其熔、流点均为 960.5°C 。

②银铜焊料。最常用的是 AgCu28 和 AgCu50 两种。AgCu28 是银铜共晶合金,熔点和流点相同,均为 779°C ,可用来钎焊铜、镍、钼、可伐和不锈钢等。它具有良好的流动性、导热性、导电性。其钎焊接头具有较高的强度。AgCu50 熔点为 779°C ,流点为 850°C 。由于熔、流点相差较大,钎焊温度低于流点时,焊料流散性差。

值得注意的是,当存在应力时,银铜焊料对可伐会产生晶间渗透,造成开裂、漏气。因而需要在退火和结构设计等方面采取措施,以减少晶间渗透的可能。

③纯铜焊料。这种焊料通常用于钎焊钨与钼等金属及其合金、镍、镍基合金、可伐等材料。铜焊料必须是无氧铜。钎焊需在氢或真空中进行。由于液态铜具有良好的流动性和较高的表面张力,故焊缝间隙要小(间隙不大于 0.05mm)。铜的熔点是 1083°C 。钎焊温度为 $1100^{\circ}\text{C} \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 。

④钼基焊料。钼基焊料对不锈钢、耐热钢、钨合金、钽合金、钨、钼等具有良好的润湿性和流散性。不锈钢、钨、钼等不经电镀就可直接钎焊,并有良好的气密性。钼基焊料熔化时很少浸蚀基金属和很少对基金属产生晶间腐蚀,故利于钎焊细薄零件。用银铜钼焊料焊可伐时,可大大降低焊料沿可伐的晶界渗透,不致像银铜焊料那样引起可伐的开裂。

钼基焊料的蒸气压低,将钼加入银铜等其它焊料中能降低这些焊料的蒸气压。常用焊料有 Ag58Cu32Pd10(熔点 827°C ,流点 852°C)、Ag65Cu20Pb15(熔点 852°C ,流点 898°C)和 Ag52Cu28Pd20(熔点 880°C ,流点 898°C)。

⑤用于钎焊钨钼的高温焊料。钎焊钨、钼等高熔点材料时,常用纯铂(Pt)(熔、流点为 1769°C)、钼-钨合金粉(Mo58Ru42 , $1900^{\circ}\text{C} \sim 1945^{\circ}\text{C}$)、硼化二钼(Mo2B95.3-4.7 ; $2000^{\circ}\text{C} \sim 2080^{\circ}\text{C}$)等焊料。铂成本太高,来源稀缺,后两种焊料则都是粉状的,故这类焊料不常使用。

常用焊料性能见表 15-18、表 15-19、表 15-20。

表 15-18 真空工艺中常用焊料一览表

名 称	主要成分/% (质量)	熔点/℃	流点/℃	用 途
镍 铜	Ni25Cu75	1150	1205	焊铝、钨
铜	Cu100	1083	1083	焊低碳钢、可伐、不锈钢、蒙乃尔
银	>99.99	960.5	960.5	焊镍、可伐、铜
金 镍	Au82.5Ni17.5	950	950	同上
锗 铜	Ge12Cu 余量 Ni0.25	850	965	焊铜、可伐、铝
银铜钯	Ag65Cu20Pd15	852	898	焊钨、铝、铌、铜、可伐、不锈钢
金 铜	Au80Cu20	889	889	焊钨、铝、镍、铜、可伐、不锈钢
银铜钯	Ag58Pd10Cu32	824	852	同上
金银铜	Au60Ag20Cu20	835	845	同上
银 铜	Ag50Cu50	779	850	同上
银 铜	Ag72Cu28	779	779	同上
银铜锡	Ag68Cu24Sn8	672	746	同上
银铜铟	Ag63Cu27In10	685	710	同上

表 15-19 一些低蒸气压焊料的膨胀系数表

焊料成分/% (质量)	在下列温度范围(℃)内的线膨胀系数/ $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$						
	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700	20~800
Cu100	17.30	17.60	17.90	18.00	18.60	19.00	19.40
Cu88Ge12	18.38	18.60	18.80	19.05	19.25	19.45	19.65
Cu98Si2	17.10	17.45	17.75	17.85	18.15	18.55	—
Cu97Si3	17.15	17.42	17.70	18.00	18.27	18.55	18.85
Cu96Si4	17.38	17.88	18.15	18.30	18.20	17.25	16.70
Cu95Si5	17.08	17.45	17.80	18.20	18.00	16.85	—
Cu96.3Si2.8Ni0.9	17.10	17.30	17.50	17.70	17.95	18.15	18.35
Cu98Ni2	16.55	16.95	17.35	17.65	18.05	18.45	18.90
Cu75Ni25	15.02	15.73	15.95	16.47	16.68	17.25	17.75

表 15-20 某些焊料的蒸气压

焊料成分/% (质量)	在下列温度(℃)时的蒸气压/Pa			
	400	627	727	1027
Ag100	—	1.4×10^{-5}	6.1×10^{-4}	—
Ag72Cu28	5.3×10^{-9}	8.5×10^{-6}	3.64×10^{-4}	—
Ag63Cu27In10	1.24×10^{-7}	7.45×10^{-5}	9.58×10^{-4}	—
Ag68Cu27Pd5	—	8.1×10^{-6}	3.47×10^{-4}	—
Ag52Cu28Pd20	—	6.25×10^{-6}	2.65×10^{-4}	—
Ag45Cu30Zn25	—	7.1×10^2	3.48×10^3	—
Au100	—	—	4.39×10^{-8}	—
Au37.5Cu62.5	—	—	1.12×10^{-6}	—
Au35Cu62Ni3	—	—	1.6×10^{-6}	—
Au80Cu20	—	—	5.32×10^{-7}	—
Au60Cu20Ag20	—	—	1.4×10^{-4}	—
Au80Sn0.2Cu19.8	—	—	5.99×10^{-7}	—
Au85Pd15	—	—	—	7.14×10^{-4}
Cu100	—	1.54×10^{-8}	1.37×10^{-6}	—
Cu90Ga10	—	—	6.12×10^{-5}	—
Cu98Ni2	—	1.85×10^{-8}	1.64×10^{-6}	—

(续)

焊料成分/%(质量)	在下列温度(℃)时的蒸气压/Pa			
	400	627	727	1027
Cu96Si4	—	—	6.0×10^{-7}	—
Cu88Ge12	—	—	1.73×10^{-6}	—
Cu88Ge10Pd2	—	—	—	1.28×10^{-3}
Cu93Ge5Ni2	—	—	7.32×10^{-7}	—
Ni100	—	1.42×10^{-7}	1.25×10^{-5}	2.15×10^{-4}
Pd60Ni40	—	—	1.24×10^{-6}	1.18×10^{-1}
Fe64Ni36	—	—	—	7.5×10^{-2}
Ni60Cr40	—	—	—	1.23×10^{-1}
Ni92.5Si4.5B3	—	—	—	1.69×10^{-1}

3. 钎焊接头的结构

(1) 钎焊接头的结构设计原则

①要正确选择钎接头钎焊面结构,以保证真空零部件的气密性、导电性及导热性等要求。

②从结构设计上限制焊料的流失,使焊料充满焊缝。

③焊缝部位在冷却后希望获得压应力,以免焊缝拉裂。通常均选用热膨胀系数大的基体金属围绕在热膨胀系数小的基体金属外部的结构形式。

(2) 真空设备中的钎焊接头的结构

①板状零件的钎焊结构,如图 15-1 所示。

②棒状零件钎焊结构,如图 15-2 所示。

③管状零件钎焊结构,如图 15-3 所示。

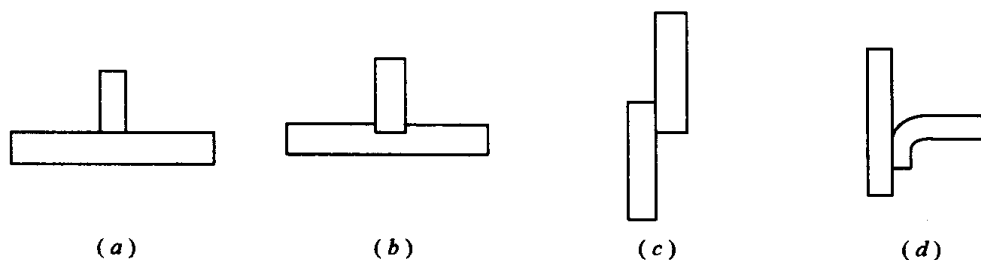


图 15-1 板状零件的钎焊结构
(a)不受力、不密封;(b)、(c)、(d)受力。

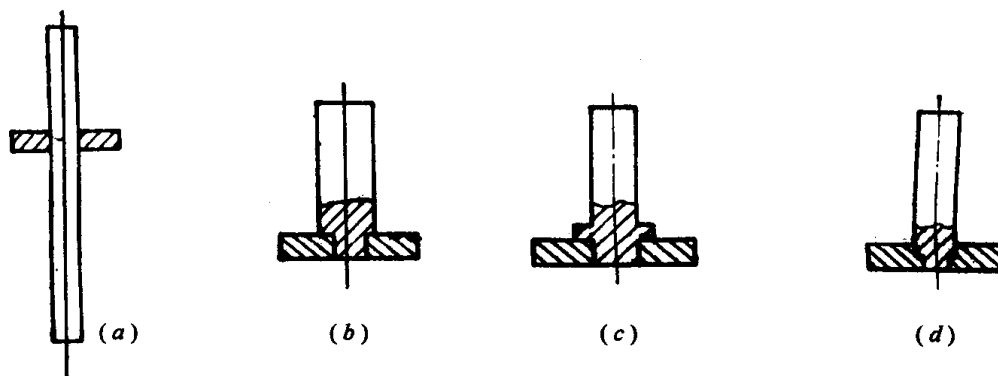


图 15-2 棒状零件钎焊结构
(a)不受力,不气密;(b)、(c)、(d)受力、气密。

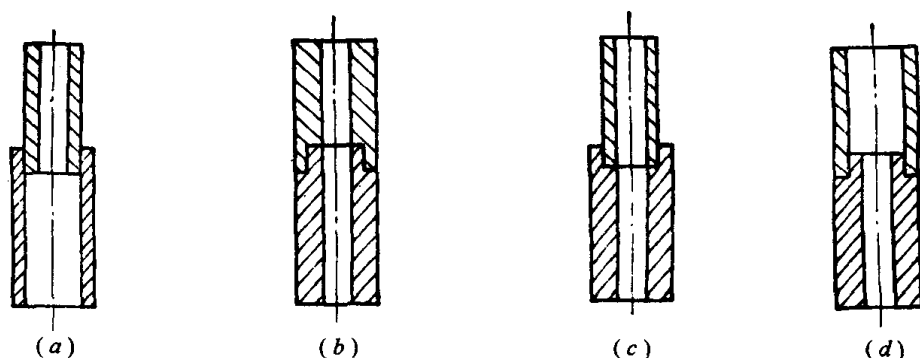


图 15-3 管状零件钎焊结构

(a)不易达到真空密封;(b)、(c)、(d)可靠的连接形式。

④薄壁管和法兰盘的钎焊结构,如图 15-4 所示。其中(a)、(b)为单边焊料槽的钎焊结构形式,其加工简单,但焊料流失可能性大;(c)为双边焊料槽,它的加工较复杂,但焊料不易流失;(d)、(e)为较高强度的钎焊结构形式。

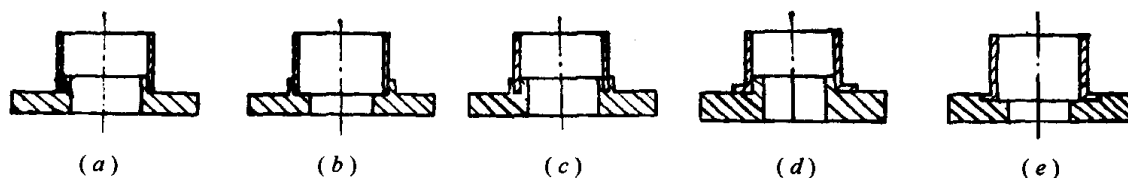


图 15-4 薄壁管和法兰盘的钎焊结构

(a)、(b)单边焊料槽结构;(c)双边焊料槽结构;(d)、(e)高强度焊结构。

⑤其它形式的钎焊结构,如图 15-5 所示。其中(a)为薄边叠合结构;(b)为螺纹连接的钎焊结构;(c)为具有盲孔的接头结构,工件上的气孔用来防止焊接时因盲孔内气压增高而阻碍焊料填满焊缝。

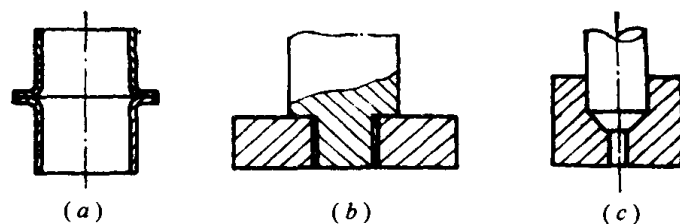


图 15-5 其它形式的钎焊结构

(a)薄边叠合结构;(b)螺纹连接结构;(c)具有盲孔的接头结构。

(3) 焊缝间隙的选择

为了保证钎焊接头的强度和气密性,需正确选择焊缝的间隙尺寸。选择焊缝间隙时要考虑以下几个问题:

①对同种材料的零件进行钎焊时,其钎焊温度下的间隙应与室温时相同。异种材料钎焊时,由于膨胀系数的不同,可能引起间隙过大或过小,因此应按钎焊温度下的实际间隙来进行设计。

②采用不同焊料时对间隙的要求是各不相同的。这是由基金属与焊料在钎焊时的相互作用特性所决定的。当焊料与金属作用强烈时,间隙可放大一些,反之可减小一些。

③钎焊件的配合间隙不仅取决于机械加工的公差配合,还与工件的清洗、腐蚀情况和电镀

层的厚薄有关。间隙太小对零件的公差要求太苛刻,而且装配也不方便,还会使钎焊时焊缝中的气体不易排出来,造成焊料填不满缝隙。间隙太大,会降低钎焊时的毛细作用,致使焊料填不满焊缝。

由上可见,钎焊焊缝的间隙大小是由多种因素确定的,需根据钎焊接头形式、钎焊件的材料、形状、焊料及钎焊时的加热方法等来确定。

不同钎焊焊料的合理间隙可见表 15-21。

表 15-21 不同钎焊焊料的合理间隙

(单位:mm)

焊件金属类别 焊料种类	铜	铜合金	钢	铝合金	不锈钢
银焊料	0.03~0.15	0.03~0.15	0.025~0.15	—	0.05~0.15
铜焊料	—	—	0.03~0.15	—	—
银铜磷焊料	0.06~0.30	0.06~0.30	—	—	—
铜锌焊料	0.10~0.30	0.10~0.30	0.05~0.25	—	0.05~0.25
铜磷焊料	0.05~0.30	0.05~0.30	—	—	—
铝基焊料	—	—	0.2~0.75	0.10~0.30	—
锡铅焊料	0.05~0.20	0.05~0.20	0.05~0.20	0.05~0.20	0.05~0.20

(4) 焊料的放置

焊料形状一般有丝状、片状或粉状,而以丝料用得最为普遍。焊料用量以能填满焊缝为原则,焊料过多会造成基金属的腐蚀或焊料的堆积。焊料的放置方法有所谓“明焊料”(即将焊料放置在焊料槽的表面)和“暗焊料”(即将焊料安放在专门设计的料槽中)(如图 15-6 所示)。

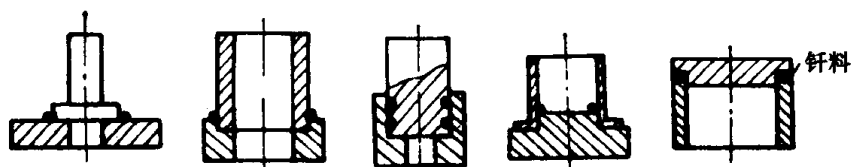


图 15-6 焊料的安放位置

4. 钎焊工艺

(1) 钎焊前对焊件的处理

①零件的清洗。当零件表面含有杂质、氧化层和油污时,会降低焊料对零件的润湿和流散,并且在加热时会放出大量气体,使焊缝产生缺陷,故钎焊前必须认真去除零件的氧化层和杂质。

②零件的退火。退火的目的是为了去除应力、清除表面氧化层和内部易蒸散的杂质,并除去内部所含之气体,以保证零件有良好的真空性能。焊料退火后比较柔软,易于成形。

常用材料退火规范见表 15-22。

③表面镀覆。基金属表面镀覆金属的目的是,加强焊料对基金属的润湿性能;防止基金属的氧化,使之能在低纯度和露点较低的保护气体下,或在较低的真空度下进行钎焊;保护基金属,防止焊料向基金属晶格中扩散,以免基金属开裂;某些镀层还可起焊料的作用,如铜镀银或钼镀金等。

电镀后必须在氢或真空中烧结,防止镀层起皮。常用金属的电镀层及用途见表 15-23。

表 15-22 常用材料的退火规范

材料名称			烧氢退火		真空退火		
			温度/℃	保温时间/min	温度/℃	保温时间/min	真空度/Pa
无氧铜			600~800	15~30	700~850	10~120	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
可伐			800~880	30	800~880	30	$4 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-3}$
镍、蒙乃尔			800~900	10~20	800~900	5~10	$4 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-3}$
钼			900~1100	5~20	950~1000	5~10	$4 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
钨			850~900	10~15	—	—	—
不锈钢			950~1000	15~20	950~1000	20~90	$7 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$
纯铁			—	—	900~1000	10~30	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
铁镍合金			900~1000	15~20	750~800	5~10	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
康铜			800~850	5~15	800	5~15	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
覆镍铁			900~950	—	—	—	—
覆铝铁			550~700	—	—	—	—
银基焊料			500~550	10~15	—	—	—
陶瓷			—	—	1100	—	$7 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$
钛	厚度/mm	≥ 0.5	—	—	900~1000	15~30	1×10^{-3}
		≤ 0.3	—	—	700	10~15	
钽、铌		≥ 0.5	—	—	1200	10~15	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$
		≤ 0.3	—	—	1100	10~15	
锆		≥ 0.5	—	—	700	10~15	$\leq 7 \times 10^{-3}$
		≤ 0.3	—	—	650	10~15	

表 15-23 常用金属的电镀层及用途

基体金属	镀覆材料	镀层厚度/ μm		镀层烧氢		目的
		气密	非气密	温度/℃	时间/min	
铁和低碳钢	铜	5~15	1~5	900~950	10~20	防止基体氧化,增加焊料的润湿性
	镍	5~15	1~5	800~1000	10~30	
不锈钢	铜	10~30	—	800~850	真空中 10~20	同上(不锈钢镀层在真空中烧结最佳)
	镍	10~30	—	850~900	真空中 10~20	
可伐	铜	10~30	—	900~1000	10~30	保护基体防止晶间开裂
	镍	—	—	850~900	10~15	
钼	铜	—	10~20	850	5~8	增加焊料对基体的润湿
	镍	—	10~20	850~1000	5~10	

(2) 钎焊方法

钎焊可分为辐射炉钎焊、高频钎焊、大电流钎焊、电阻钎焊、火焰钎焊等。各种方法都需要具有必要的焊料熔化温度和气氛条件,防止工件金属表面氧化并能使其表面的氧化物分解,使焊料均匀布满焊缝,获得合乎质量要求的钎焊接头。

①辐射炉钎焊。辐射炉钎焊是利用炉子发热元件的高温,以辐射和对流的形式将热量传播给零件,使零件达到钎焊温度。常用的辐射炉钎焊有氢炉钎焊和真空炉钎焊(又称真空钎焊)等。这种钎焊方法的主要特点是:工件加热比较均匀,不易变形。采用氢炉钎焊时,还原效果强,能去除工件上的金属氧化物。氢的热传导率极高,故加热冷却效率也高。由于钛、锆、钽、铌具有很强的吸氢能力,未经电镀的含有铝、钛的不锈钢又极易氧化,因此需在真空炉中进行钎焊。在真空度为 $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 的高温真空炉中进行钎焊,可有利于焊件表面氧化物的分解和蒸发,并能使金属表面净化。

利用辐射炉进行钎焊时,要掌握好炉腔内温度分布情况。用热电偶分段测量,并应用各种不同熔点的焊料直接观察,确定炉内的温度分布,使工件尽可能放置在“等温区”内。

因为炉子热惯性大,钎焊时需缓慢升温,以防止炉温过高。当温度升到离焊料熔点差 $50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 时,要保温一段时间,使炉内各部位的温度均匀。为了加速真空炉的冷却,必要时可向炉内通入氢气。

②高频钎焊。置于交变电磁场中的金属工件,在感应电势的作用下,会在金属内部产生涡流,这种涡流所产生的焦耳热可使金属工件加热到很高的温度。对于磁性材料来说,除上述涡流作用外,还存在着由磁滞效应所产生的焦耳热。这种利用高频电磁能量加热工件进行钎焊的方法称为高频钎焊。

高频钎焊的特点是热区集中,加温迅速,对基金属的影响小。这种方法简单易行,但需要有一定功率的高频炉。钎焊可在真空或充有气体的玻璃钟罩中进行,便于观察钎焊过程。高频钎焊的缺点是温度不易控制,特别是在加热薄壁铁磁材料时,零件升温会异常迅速,使温度难以掌握。

(3) 钎焊模具

为了保持钎焊接头焊缝间隙,防止在钎焊过程中零件位置的移动,常采取一些措施来固定工件,如依靠钎焊件配合公差来定位、冲窝“毛刺”定位、点焊定位、螺钉和销钉定位、模夹具定位等。模夹具定位是对于尺寸精度要求高的钎焊工件的一种重要定位方法。

钎焊的模夹具材料应具有良好的导热性和高温强度,并需具有与钎焊金属有相近的热膨胀系数。

钎焊模夹具材料应不被液态焊料润湿、粘附。

模夹具的结构应具有足够的强度和刚性,同时尽可能设计得轻巧(热容量小)、结构简单、易于装配。

常用模具材料有高铬钢(1Cr13)、不锈钢(1Cr18Ni9Ti)、耐热钢(4Cr14Ni14W2Mo)、铁铬铝(0Cr25Al5,1Cr25Al5)、石墨、陶瓷等。普通碳钢和纯铁一般不宜用作模具材料,因为这些材料易被液态焊料粘住,而且在高温下易发生形变。

用不锈钢(1Cr18Ni9Ti)做模具时,模具的毛坯要在 900°C 的氢炉中退火 $15\text{min} \sim 30\text{min}$,然后精车到所需尺寸,再在湿氢中加温到 1100°C 进行热处理,使模具表面形成稳定、牢固的黑色氧化膜。

5. 常用材料的钎焊

(1) 钎焊规范的选择

钎焊规范为升温速度、钎焊温度、钎焊保温时间及降温速度等。

升温速度主要取决于基体金属的性能和零件的大小和形状。对于大而复杂、有陶瓷封接件和导热率低的零件,升温速率要慢一些,尽量使零件各处的温度一致。

钎焊温度取决于焊料的熔点及其流点,一般应比焊料流点高 $20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。温度过低将影响焊料的流动性,过高则将引起焊料流失,并使基金属和焊料的组织和化学性能发生变化。

钎焊的保温时间是很重要的。适当的保温时间可保证焊料充满缝隙,并使焊料与基体金属相互溶解、扩散形成合金。保温时间过长会导致基金属晶粒明显增大并造成焊料对基金属过分熔蚀。此外保温时间还与钎焊温度有关,钎焊温度较高时,保温时间可相应减少。保温时间一般取数秒到数分钟之间。

降温速度可以快一些,但也必须适当掌握,以免因膨胀系数的差异而在焊缝处形成应力,甚至在接头处产生裂纹。

(2) 铜及其合金的钎焊

真空零件的铜材一般采用无氧铜。钎焊可在氢炉或真空炉中进行。焊料用 Ag100、AgCu10、AgCu28。但也可用金—铜、金—镍、锕—镍、银—铜—钯等焊料。铜与铜合金在电镀银或金后,钎焊性能更好。

含有铬、铝、铍、钛、锆的铜合金,由于这些元素极易氧化,焊前需进行电镀,并最好在真空炉中进行钎焊。

(3) 可伐的钎焊

可伐(铁、镍、钴合金)易于钎焊。其常用焊料为银—铜、金—镍、银—铜—钯、金—铜、锕—铜等。当用银系焊料进行钎焊时,需进行焊前退火,以消除机械加工所产生的应力。可伐表面应镀铜或镍以防止焊料渗透所引起的开裂。钎焊可在氢炉或真空炉中进行。

(4) 不锈钢的钎焊

1Cr18Ni9Ti 不锈钢钎焊时可选用银基、铜基、金基焊料,但钎焊前表面需镀铜或镀镍(以镀镍为好),防止不锈钢表面形成稳定氧化物;并增加焊料的浸润性。当采用银铜钯合金作焊料时,不锈钢的表面可不进行电镀。钎焊不锈钢可在氢炉或真空炉中进行。

(5) 钛的钎焊

常用焊料为镍、铜、钛镍等。焊接需在压力低于 10^{-3}Pa 的真空炉中进行。由于高温下钛和氢可生成氢化钛,所以不能在氢炉中进行钎焊。

(三) 电子束焊

1. 概述

电子束焊的工作原理是:在真空条件下,从电子枪发射的电子束在高电压(通常为 $20\text{kV} \sim 300\text{kV}$)加速下,通过电磁透镜聚焦成高能量密度的电子束,当电子束轰击工件时,电子的动能转化为热能,焊区的局部温度骤升到 6000°C 以上,使工件材料熔化,实现焊接。电子束焊的特点为:

①能量密度大,最高可达 $10\text{kW}/\text{cm}^2$,比普通弧焊高 5000 倍~10000 倍。焊缝深宽比可达 1:20 以上(普通的弧焊为 1:1.5)。焊区的热影响区小,变形小。这些都是目前大多数熔焊方

法无法比拟的。

②焊接是在 $10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 真空环境中进行的,残余气体中所存在的氧和氮的量要比纯度为 99.99% 的惰性气体还要少。

③焊接规范可精确控制。

电子束焊的缺点是:设备较复杂,成本较高,零件大小受真空室尺寸的限制,工作电压高,因而需要对 X 射线进行防护。

2. 电子束焊的应用

①难熔金属的焊接。由于电子束焊能对钨、钼、钽等难熔金属进行焊接,故在一定程度上解决了此类材料焊接时产生的再结晶发脆问题。

②化学性质活泼材料的焊接。电子束焊也能对如铌、锆、钛、钛合金、铝、铝合金、镁等活泼金属及其合金进行焊接。

③耐热合金和各种强化合金的焊接。电子束焊还能对各种不锈钢、镍基合金、弹簧钢、高速钢进行焊接。

④不同性质材料的焊接。如对于钢与青铜、钢与硬质合金、钢与高速钢、金属与陶瓷以及厚度相差悬殊零件都可用电子束焊进行焊接。

在真空工艺中,上述不同类型材料的焊接是经常遇到的。例如,99.97% Al_2O_3 瓷与铌的电子束焊接。在制作振动薄膜规时,为了避免厚度为 $3\mu\text{m}$ 的绷紧的可伐薄膜因受热而损坏和因焊接应力而引起电极间距离的变动,就可以采用电子束焊,效果良好。在制造海绵阴极时,钼管与多孔钨圆片的连接同样也可采用电子束焊。

3. 电子束焊的设备和工艺

图 15-7 为电子束焊机示意图。

电子束焊机由电子光学系统(包括电子枪和磁聚焦、偏转系统)、真空系统(包括真空室、扩散泵、机械泵)、工作台及传动机构、电源及控制系统四部分组成。

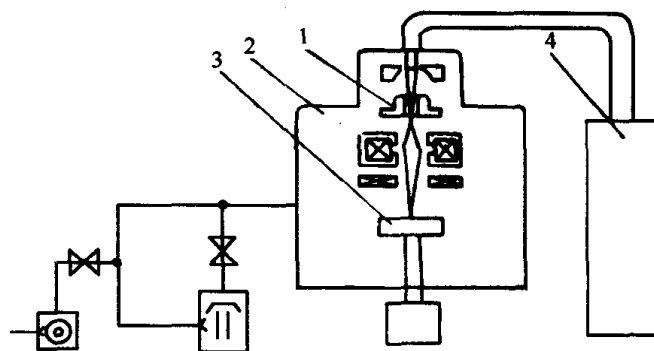


图 15-7 电子束焊机示意图

1—电子光学系统; 2—真空系统; 3—工作台及传动机构; 4—电源及控制系统。

电子束焊机按使用真空度的不同可分为高真空电子束焊机($10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$)、低真空电子束焊机($10\text{Pa} \sim 1\text{Pa}$)和非真空电子束焊机(将电子束引出真空室)。按工作电压的不同则可分为高(电)压型电子束焊机($100\text{kV} \sim 300\text{kV}$)、中(电)压型电子束焊机($30\text{kV} \sim 60\text{kV}$)和低(电)压型电子束焊机(低于 30kV)。目前国内较多使用的是中(电)压型真空电子束焊机。

电子束焊机的主要部件是电子光学系统,它是获得高能量密度电子束的关键。在配以稳定、调节方便的电源系统后,可保证电子束焊工艺的稳定性。

电子束焊接工艺的主要内容是选择合理的接头形式,根据不同材料和工件选择不同的焊接规范。

电子束焊接头形式如图 15-8 所示。

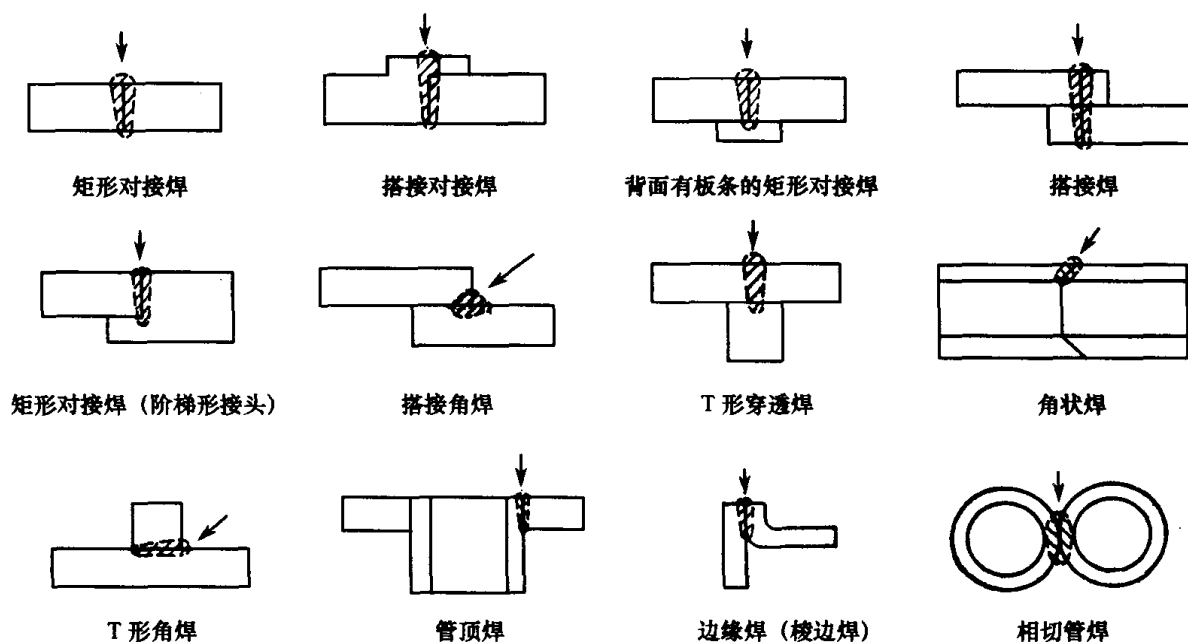


图 15-8 电子束焊的接头形式

焊接规范的主要内容是:加速电压、电子束电流、工作距离(被焊工件至聚焦筒底的距离)、聚焦电流和焊接速度的确定。选择合适的规范可使焊缝形状、强度、气密性等达到设计要求。由于焊机的性能不同,焊接规范很难做到统一,但是选取规范的基本原则是一致的,这些原则是:

①熔深随单位长度输入能量的增大而增大。单位长度输入能量值与加速电压、电子束流、焊速之间的关系由下式表示

$$P = \frac{UI}{v} \quad (15-1)$$

式中 P ——单位长度的输入能量[J/cm];

U ——加速电压[V];

I ——电子束电流[A];

v ——焊接速度[cm/s]。

根据材料的性质和厚度选择 P 值。

②在 P 值一定的情况下,从所确定的焊接速度(根据工艺要求选定),可求得焊接功率 UI ,从而选定加速电压 U 和电子束流 I 。

③聚焦电流的数值视加速电压和工作距离而定。电压的增加或工作距离的减少都要求聚焦电流增加,才能得到小的电子束斑点。聚焦电流选择对焊缝成形有较大的影响,图 15-9 给出不同规范对焊缝成形的影响。

此外,焊缝配合公差和焊件的表面处理方法对焊缝质量也有重要的影响。

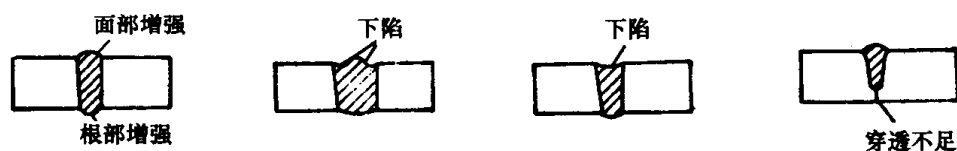


图 15-9 典型电子束焊截面的某些特征

(四) 其它焊接方法

1. 原子氢焊

这种焊接方法的原理是利用两个钨电极间产生交流电弧,在氢气通过电极尖头上的孔喷入电弧区时,氢分子在电弧的高温下会分解成氢原子,这些氢原子与金属焊件表面相碰时,在金属表面催化作用下,氢原子重新结合成氢分子,同时放出大量的热量(约 $4.2 \times 10^5 \text{J/mol}$),造成焊接的条件。这种方法所能达到的温度要比单纯的电弧加热或氢气燃烧所能达到的温度还要高(可达到 4000°C),并且具有氢气保护的优点。例如氢原子焊常用于钨、钼材料的电极和支杆的焊接。

2. 扩散焊

这种焊接方法的工艺过程是:把两个待焊工件焊接端面磨光后放在一起,在保护气体(氢、氩等)或真空气氛中加热到金属熔化温度(热力学温度)的 0.7 倍~0.9 倍,在加压条件下使接触面产生局部塑性变形,发生金属原子间的连接和原子间的相互扩散从而实现两个工件的连接。

扩散焊的特点是:

- ①焊接面是固相结合,能保持原有金属的物理、化学和机械性质。
- ②可以焊接同种金属和性质差别很大的异种金属,也可以进行金属和非金属之间的封接。
- ③加热均匀、焊接件不变形、不产生残余应力,使工件保持较高精度的几何尺寸和形状。

扩散焊的焊接实例有:铝合金和不锈钢的焊接、钛合金与 95% 氧化铝瓷的封接、无氧铜、镀镍可伐及蒙乃尔合金与 95% 氧化铝瓷和 99.5% 氧化铝的封接。实验证明该方法可得到气密的封接件。

几种主要焊接方法的特性和应用及不同牌号材料的可焊性见表 15-24、表 15-25。

表 15-24 几种主要焊接方法的特性和应用

焊接方法		原 理	应 用 范 围						
			常焊材料	厚度 /mm	接头主要 型 式	焊缝空 间位置	被焊件特点及 工作条件	生产率	备 注
熔 化 焊	气焊	利用气体燃料发热来熔化焊件与焊条进行焊接	钢	≤2	对焊、卷边对焊	任意	钢、在不大的静载荷下工作。要求耐热性和致密性	中等	当 厚 度 = 0.5mm~1.5mm 时,生产率可超过电 弧 焊;厚度 = 8mm~10mm 时,气焊不经济,当 厚 度 = 30mm~40mm 时,技术上仍可焊接
			铸铁		对焊、堆焊	俯焊			
			铝及其合金、铜、青铜、黄铜	≤14	对焊、卷边对焊	俯焊	用于不重要结构(铝及其合金)		
			硬质合金		堆焊	俯焊			

(续)

焊接方法			原理	应用范围						
				常焊材料	厚度 /mm	接头主要 型 式	焊缝空 间位置	被焊件特点及 工作条件	生产率	备 注
电 熔 化 焊	手工 电弧 焊		借电弧产生的高温 (约 3600℃) 来熔化金属 电极进行焊接	钢	1.2~150	对焊、搭 接焊、T 字 焊、卷边对 焊、堆焊	任意	在静止、冲击和 振动载荷下工作; 要求坚固, 紧密焊 缝	高	不锈钢虽然可以 采用手工电弧 焊与自动、半自 动电弧焊, 但目 前采用氩弧焊的 日益增多
				铝及其合金	≥1	对焊	俯焊			
				铜	≥1	对焊、卷 边对焊	俯焊			
				青铜		对焊、堆焊	俯焊			
				铸铁		同上	俯焊			
				硬质合金		堆焊	俯焊			
	焊剂层 下自动 和半自 动电弧 焊		借电弧产生的高温 (约 3600℃) 来熔化金属 电极进行焊接	钢	3~150	对焊、搭 接焊、电 铆 焊、堆焊	俯焊	可在各种类型载 荷下工作; 要求紧 固、紧密焊缝	自动焊 很高; 半 自动焊 较高	焊接成批低碳 钢、低合金钢、高 碳钢结构、生产 率很高
				铝及其合金	≥6	对焊	俯焊			
				铜	≥4	对焊	俯焊			
	气体 保护 焊	不熔 电极 氩弧 焊	借电弧产生的高温熔 化金属, 并以氩气保护 电弧区的电 弧焊	铝、铝 合金、钛 合金、镁 合金、不 锈钢、耐 热钢	0.5~30	对焊、T 字焊、卷边 对焊、电 铆 焊	除仰焊 外任意	在不大的载荷下 工作; 要求致密性、 耐蚀性和耐热性	高	一般适用于焊 接厚度 = 0.5mm ~4mm
		熔化 电极 氩弧 焊					俯焊		很高	钢板厚度大的 结构宜用此法
		CO ₂ 气体 保护 焊					碳钢及 某些合金 钢		1~50	对焊、T 字焊
	电渣焊			借电流通 过熔渣而产 生的电阻热 来熔化金属 进行焊接	结构钢	≥40	对焊	立焊、 环形焊	一般用来制造水 压机液缸、高压容 器、大型水压机机 座、水轮机轴等零 件、大厚度铸件、锻 件	很高

三、真空设备制造中常用的几种永久性连接方法

(续)

焊接方法		原 理	应 用 范 围						
			常焊材料	厚度 /mm	接头主要 型 式	焊缝空 间位置	被焊件特点及 工作条件	生产率	备 注
压 焊	闪光接 触焊	以电流通 过接触的两 焊件, 在接 触处电阻最 大, 产生高 温, 使材料 成半融状 态, 再加压 焊接起来	钢、铝	≥ 0.2 (截面 $\leq 1000\text{mm}^2$)	对焊	俯焊	对接轴、管、型钢 及直线形或闭合形 的零件如链环等	很高	
	点焊		低碳钢	≤ 12	搭接焊	在用可 移式工 具(焊 枪等) 时, 可 任意	要求坚固焊缝	很高	焊接最小板厚 为 $0.1\text{mm} + 0.1$ mm , 同时焊接零 件的厚度比不超 过 1:3
			合金结构钢	≤ 10	搭接焊				
			不锈钢	≤ 6	搭接焊				
			铝合金	≤ 3	搭接焊				
	滚焊		耐热合金	≤ 3	搭接焊	俯焊	要求坚固紧密焊 缝	高	可以连接厚度 悬殊的板, 如 0.5mm 和 50mm 的板
			酸洗钢	≤ 3	搭接焊				
			热轧低碳钢	≤ 2.5	搭接焊				
			不锈钢	≤ 3	搭接焊				
	滚焊		铝合金	≤ 2	搭接焊	俯焊	要求坚固紧密焊 缝	高	可以连接厚度 悬殊的板, 如 0.5mm 和 50mm 的板
铜合金		≤ 2	搭接焊						
耐热合金		≤ 2.5	搭接焊						
耐热合金		≤ 2.5	搭接焊						
加压气焊	将金属局 部加热到熔 化(或半熔 化)状态, 并 加外力使其 接合的一种 半自动焊接 法	钢	截面 25000mm^2	对焊	俯焊	宜于接合圆形、 长方形截面的杆件 与管子	中等		
钎焊(硬 焊料焊接: 焊料熔点 高于 400°C , 强度大) 钎焊(软 焊料焊接: 焊料熔点 低于 400°C , 强度较低)	利用熔融 钎焊材料的 粘着力或熔 合力把焊件 表面粘合的 方法。焊料 熔点比焊件 低, 因此焊时 焊件本身不 熔化	各种金属		搭接焊		宜于连接用其它 焊接方法难于焊接 的工件, 对强度要 求不太高的场合; 焊接中变形小; 可 以制造复杂工件	高		
特种焊接	真空电子 束焊接	利用在真 空中电子猛 烈冲击金属 表面所产生 的热能来熔 化金属	难熔的 和活泼的 金属如钨、 钼、钛、钽、 钨、铝、不 锈钢等	≤ 30			宜焊接用一般焊 接方法无法焊接的 某些难熔的和活泼 的金属, 单焊道完 成厚板焊接		

表 15-25 不同牌号材料的可焊性

被焊材料牌号	焊 接 方 法			
	点 焊	滚 焊	手工电弧焊	氩弧焊
钢				
20 + 35	△	△	△	△
20 + 40	△	△	△	△
20 + 10Mn2A	△	△	△	△
20 + 12Mn2A	△	△	△	△
35 + 10Mn2A	△	△	△	△
35 + 12Mn2A	△	△	△	△
20 + 30CrMnSiA	△	△	△	—
20 + 1Cr18Ni9Ti*	△	△	△	△
30CrMnSiA + 1Cr18Ni9Ti*	△	△	—	—
轻合金				
LY12 + LF21*	△	△	—	×
LY12 + LC4*	△	—	—	—
LY12 + LF6*	△	△	—	×
LY12 + LY16*	△	—	—	△
LC4 + LF6*	△	—	—	—
LF3 + LF6	△	△	—	△
LF11 + LF6	△	△	—	△
LF3 + LY12	—	—	—	×
MB2 + MB8*	△	—	—	—
注:○—良好的可焊性,焊接接头强度不低于基本金属的 90%; △—满意的可焊性,焊接接头强度不低于基本金属的 75%; ×—不满意的可焊性; ——缺乏资料; 带 * 号者均选自《飞机构造工艺性指南》				

四、玻璃、陶瓷工艺

(一) 金属-陶瓷封接

1. 概述

某些真空室、真空炉体、泵体、真空规的各种加热电极、引线通常需满足以下要求:

- ①真空密封;
- ②耐高温(真空系统烘烤、电极加热引线发热等);
- ③电绝缘性能。

金属—陶瓷封接件能够满足以上要求。陶瓷件工作温度可达 700℃ ~ 1000℃ 以上,并在高温下有良好的气密性和电绝缘性能。

2. 金属—陶瓷封接材料

封接材料选用原则:

- ①所选用的金属、陶瓷、焊料在室温到略高于使用焊料熔点范围内,应具有相同或接近的

热膨胀系数；

②在不匹配封接中,要选择屈服极限低、塑性好、弹性模量低的金属材料作为封接用金属和焊料；

③根据封接件的要求,选择一定强度、软化温度、电阻率和导热系数的陶瓷材料。

金属—陶瓷封接配偶及金属、陶瓷材料性能分别见表 15-26、表 15-27、表 15-28、表 15-29。一些金属材料的相对伸长与温度关系如图 15-10 所示。

表 15-26 常用金属-陶瓷封接的配偶

平均线膨胀系数 $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	金属材料	配偶关系	陶瓷材料	平均线膨胀系数 $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
136 (20℃~700℃)	铜		75% Al ₂ O ₃ 瓷	69(25℃~700℃)
70.5 (30℃~500℃)	可伐(4J34)		氧化铝 95% Al ₂ O ₃ 瓷	79(25℃~700℃)
			99% Al ₂ O ₃ 瓷	92(20℃~1000℃)
76.4 (20℃~700℃)	铌		氧化铌瓷	84(20℃~800℃)
85 (20℃~700℃)	钛		镁橄榄石瓷	110(25℃~700℃)
55 (25℃~500℃)	钼		滑石瓷	85(40℃~900℃)
53 (20℃~400℃)	铁镍定膨胀合金(4J42)		锆基瓷料	46(25℃~700℃)
80 (25℃~425℃)	铁镍定膨胀合金(4J45)			
147 (20℃~600℃)	铁、低碳钢			

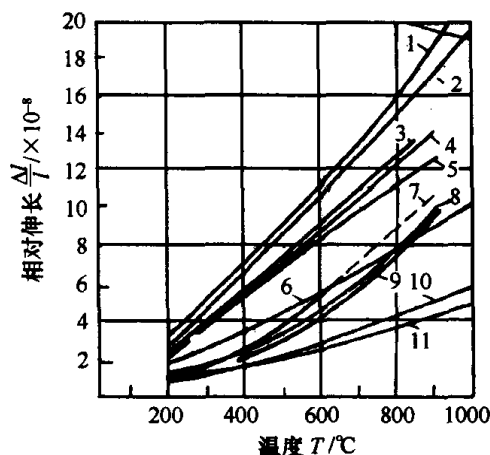


图 15-10 有关材料的相对伸长 $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)$ 与温度 (T) 关系

1—铜；2—无磁不锈钢；3—镍铜合金(蒙乃尔)；4—镍；5—铁；6—钛；7—Ni42-Fe(4J42)；
8—Ni33Co14Fe(4J33)；9—Ni29Co18Fe(4J29)；10—钼；11—钨。

表 15-27 几种封接用定膨胀合金的成分及性能

材 料	主 要 成 分/%						线膨胀系数/ $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$				导热系数 (20℃) $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 (20℃) $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$
	Zr	Mn	Si	Ni	Co	Fe	20℃ ~ 300℃	20℃ ~ 400℃	20℃ ~ 500℃	20℃ ~ 600℃		
4J34	—	≤ 0.4	≤ 0.3	28.5 ~29.5	19.5 ~20.5	余	6.3 ~7.5	6.2 ~7.6	6.5 ~7.6	7.8 ~8.4	—	—
4J31	—	≤ 0.4	≤ 0.3	31.5 ~32.5	15.2 ~16.2	余	6.2 ~7.2	6.0 ~7.2	6.4 ~7.8	7.8 ~8.5	—	—
4J33	—	≤ 0.4	≤ 0.3	32.5 ~34.5	13.6 ~14.8	余	6~7	6 ~6.8	6.5 ~7.5	7.5 ~8.5	—	—
4J46 低钴瓷封可伐	0.1 ~0.35	≤ 0.1 Cu3.5 ~4.5	≤ 0.1	35.5 ~36.5	5~6	余	5.5 ~6.5	5.5 ~6.6	7.2 ~8.2	9.3	—	—
4J29 硬玻璃可伐	—	≤ 0.4	≤ 0.3	28.5 ~29.5	16.8 ~17.8	余	4.7 ~5.5	4.6 ~5.2	5.9 ~6.4	—	19.26	0.49
4J8 低钴瓷封可伐	—	≤ 0.2	≤ 0.3	35.6 ~36.6	7.5 ~8.5	余	4.2 ~5.0	4.6 ~5.8	6.4 ~7.0	—	—	—
4J42 铁镍定膨胀合金	—	≤ 0.4	≤ 0.3	41.5 ~42.5	—	余	4.4 ~5.6	5.4 ~6.6	7.8	9.3	12.56	0.57~0.7
4J50 铁镍定膨胀合金	—	≤ 0.4	≤ 0.3	49.5 ~50.5	—	余	8.8 ~10.0	8.8 ~10.0	9.7	—	16.75	0.43

表 15-28 一些能与陶瓷封接的金属性能

材 料	熔点 /℃	线膨胀系数 $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数 $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$	延伸率 /%	弹性模量 /MPa
镍	1455	130(25℃~100℃) 145(0℃~300℃) 151(0℃~500℃) 161(0℃~800℃) 168(0℃~1000℃)	90.02(18℃) 59.45(350℃) 64.90(600℃)	加工的 0.095(20℃) 退火的 0.087(20℃)	加工的 2 退火的 40~45	202000~ 227000(20℃) 119000(465℃)
铌	2415	72(20℃~100℃) 74(20℃~200℃) 75(20℃~300℃) 100(20℃~1500℃)	52.34	加工的 0.141	30	87200
钼	2622	53~57(20℃~400℃) 58~62(20℃~700℃) 72(20℃~2127℃)	159.10(20℃) 108.86(1473℃) 71.18(2173℃)	加工的 0.056(25℃) 退火的 0.018(25℃)	冷拉的 2~5 退火的 10~25	冷拉的 285000~300000 退火的 320000
铜	1083	165(20℃~100℃) 189(300℃~400℃) 205(500℃~600℃)	389.32(20℃) 371.79(265℃) 352.53(625℃)	0.0172~0.0178 (20℃)	冷拉的 2~1 退火的 38~50	退火的 126000(20℃) 71000(100℃)
钛	1690	80(20℃~100℃) 91(200℃~300℃) 94(400℃~500℃) 102(600℃~700℃)	16.33(25℃) 16.75(300℃) 18.00(500℃)	0.47 (20℃)	25	105000~ 110000(20℃) 76000~ 91000(350℃)
不锈钢 (1Cr18Ni9Ti)	1410	161(0~100℃) 173.2(200℃~300℃) 202.4(400℃~500℃) 255.9(700℃~800℃)	16.33(100℃) 18.84(300℃) 21.77(500℃)	0.75 (20℃)	31 (300℃)	162000 (300℃)
蒙乃尔 (NiCu40-2-1) (NiCu28-2.5-1.5)	1300~1450	137 (常温)	25.96	0.48	退火的 50	184000

表 15-29 真空工艺中常用陶瓷的主要性能

材 料	线膨胀系数 / $\times 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$	安全工作温度 / $^\circ\text{C}$	导热系数(25 $^\circ\text{C}$) / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	抗张强度 / MPa	抗压强度 / MPa	相对介电常数 (25 $^\circ\text{C}$)	介质损耗 $\tan\delta$ / $\times 10^{-4}(25^\circ\text{C})$	电阻率 / $\Omega\cdot\text{cm}$	介电强度 / $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$
228 滑石瓷 ($\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$)	64(20 $^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$) 89(20 $^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$)	1100	2.51	70	630	6.1	13(MHz)	$>10^{14}(20^\circ\text{C})$ $8\times 10^{10}(300^\circ\text{C})$ $3\times 10^8(500^\circ\text{C})$	
243 镁橄 榄石瓷	100(25 $^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$) 112(25 $^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$)	1000	3.35	70	600	6.2(MHz) 6.1(100MHz)	4(MHz) 3(100MHz)	$>10^{14}(20^\circ\text{C})$ $5\times 10^{12}(100^\circ\text{C})$ $1.2\times 10^{10}(500^\circ\text{C})$	9.6
75 Al_2O_3 瓷	50(20 $^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$) 76(20 $^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$)					8.5(MHz) $<8.5(300\text{MHz})$	3~8(MHz)	$10^{13}(100^\circ\text{C})$	20~40
95 Al_2O_3 瓷	58(20 $^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$) 65(20 $^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$) 71(20 $^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$) 74(20 $^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$) 76(20 $^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$)	1550	20.10	280~340	1336	9.5(MHz) 8.5~9.3 ($9.5\times 10^3\text{MHz}$)	1.3~5(MHz) 4.5~5(300MHz) 4~6($3\times 10^3\text{MHz}$)	$>10^{13}(100^\circ\text{C})$ $10^{11}(300^\circ\text{C})$	20~40
99 Al_2O_3 瓷	67(25 $^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$) 70(25 $^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$) 74(25 $^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$) 92(25 $^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$)	1725	29.31	230~248	2953	9.35(MHz) 9.31(100MHz) 9.31(10^4MHz)	1.5(MHz) 0.6(100MHz) 1.4(10^4MHz)	$>10^{14}(20^\circ\text{C})$ $10^{14}(100^\circ\text{C})$	>14
α - Al_2O_3 蓝宝石	平行光轴切片 78(20 $^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$) 87(20 $^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$) 垂直光轴切片 69(20 $^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$) 80(20 $^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$)	2040 (软化温度)	8.37(120 $^\circ\text{C}$) 4.19(300 $^\circ\text{C}$) 6.28(600 $^\circ\text{C}$)	457	2109	平行光轴 8.6(300MHz) 11.0(10^4MHz) 垂直光轴 10(300MHz)	$<1.0(300\text{MHz})$ 2.0(10^4MHz)	$10^{11}(500^\circ\text{C})$ $10^8(1000^\circ\text{C})$ $10^4(1500^\circ\text{C})$	48
氧化铍瓷 (BeO)	60(20 $^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$) 84(20 $^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$)	1900 (99%BeO)	217.71(100 $^\circ\text{C}$) 92.95(400 $^\circ\text{C}$)	100	800	6.57 ($8\times 10^3\text{MHz}$)	4.4 ($8.5\times 10^3\text{MHz}$)	$>10^{14}(20^\circ\text{C})$ $10^{14}(100^\circ\text{C})$ $10^{12}(400^\circ\text{C})$ $10^{11}(600^\circ\text{C})$	15~23 (95%BeO)
9066 微晶玻璃	57(25 $^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$)	1250 (软化温度)	3.64			5.58(MHz) 5.45(10^4MHz)	0.5(MHz) 0.33(10^4MHz)	$>10^{10}(250^\circ\text{C})$ $>10^8(350^\circ\text{C})$	

3. 金属-陶瓷的封接结构

(1) 封接基本形式及特点

封接基本形式及其特点见表 15-30。

表 15-30 封接基本形式及特点

基本形式	特 点	类 别	特 点	图 例
平 封	陶瓷环、片的端面与金属件的平面之间的封接	单面封接	具有较大的封接应力,热冲击性差,机械强度低,要求陶瓷与金属的线膨胀系数接近或用薄壁金属件	
		夹 封	可减少封接应力,可封接失配较大的陶瓷与金属件	
套 封	金属圆筒与陶瓷环或片相互套起来封接。强度高,耐热性好。金属和瓷件加工精度要求高,瓷件内(或外)圆面需研磨加工	外套封	瓷件承受压力状态,可靠性高,耐热冲击性能好,机械强度高,能封接失配较大的材料	
		内套封	封接应力大,多数情况下陶瓷受拉应力,耐热冲击性差,强度低。宜选用线膨胀系数比陶瓷小的或接近的金属材料封接	
针 封	实体金属针封于陶瓷孔中	直接针封	与内套封相似,封接应力大,耐热冲击性差。适于细丝(针的直径不大于1mm、线膨胀系数比陶瓷小或接近的金属材料封接)	
		过渡针封	封接可靠性强,与陶瓷失配较大的金属针也能封接	

(2) 各种常用封接结构设计的参考图表

①瓷圆筒单面平封结构,见图 15-11 和表 15-31。

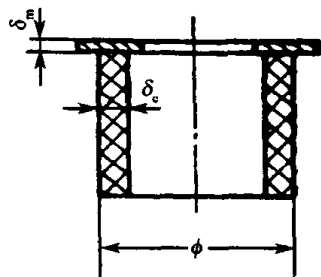


图 15-11 瓷圆筒单面平封结构

表 15-31 几种金属同高氧化铝瓷圆筒单面平封的结构尺寸

瓷筒直径 ϕ /mm		15~20	30~40	45~60
瓷筒壁厚 δ_c /mm		2.5~3.5	3.5~4.5	4~6
金属环壁厚 δ_m /mm	4J29 4J33 4J34	0.15~0.2	0.25~0.3	0.3~0.4
	4J46	0.15~0.2	0.2~0.3	0.2~0.3
	无氧铜	0.15~0.2	0.25~0.3	0.2~0.35
	4J50	0.15~0.2	0.2~0.25	0.2~0.3

②瓷圆片单面平封结构,见图 15-12 和表 15-32。

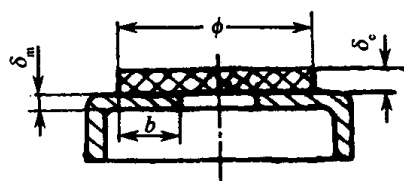


图 15-12 瓷圆片单面平封结构

表 15-32 几种金属与高氧化铝瓷圆片单面平封的结构尺寸

瓷片直径 ϕ /mm		12~20	25~40	45~80
瓷片厚度 δ_c /mm		1~2	1.5~3	2~4
金属筒壁厚 δ_m /mm	4J29 4J33 4J34	0.15~0.2	0.25~0.3	0.4~0.5
	4J46	0.15~0.2	0.2~0.3	0.4~0.5
	无氧铜	0.15~0.25	0.3~0.4	0.5~0.6
	4J50	0.15~0.2	0.15~0.2	0.2~0.3
	封口宽度 b	1.5~2.5	3~4	4~6

③夹封结构,见图 15-13 和表 15-33。

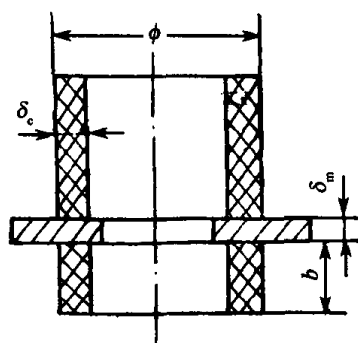


图 15-13 夹封结构

表 15-33 几种金属与高氧化铝瓷夹封的结构尺寸

瓷筒直径 ϕ /mm		10~20	25~40	45~60	65~80	85~120	125~185	200
瓷筒壁厚 δ_c /mm		1.5~2	2~2.5	2.5~3	3~4.5	4.5~5	5.5~6	6.5~8.5
封口处金属壁厚 δ_m /mm	29							
	4J33	0.15~0.2	0.15~0.3	0.2~0.4	0.3~0.5	0.3~0.6	0.8~1.5	
	34							
	无氧铜	0.2~0.4	0.2~0.4	0.4~0.7	0.4~0.7	0.5~0.8	0.7~1.5	0.8~2.0
	镍	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.3	0.2~0.3	0.4~0.6	0.4~0.6	0.6
	钛	0.15~0.2	0.15~0.2	0.2~0.3	0.2~0.4	0.5~0.7	0.6~0.8	0.6~0.8
	蒙乃尔	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.3	0.2~0.3	0.4~0.6	0.4~0.6	0.4~0.6
	钼	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.2	0.15~0.3	0.15~0.3	0.15~0.3
	铌	0.15~0.4	0.15~0.4	0.25~0.5	0.3~0.5	0.4~0.8	0.6~1.5	0.6~1.5
	4J42	0.15~0.2	0.15~0.2	0.2~0.4	0.2~0.4	0.5~0.8	0.6~1.0	0.6~1.0
	4J52	0.15~0.2	0.15~0.2	0.2~0.4	0.2~0.4	0.5~0.8	0.6~1.0	0.6~1.0
	4J46	0.15~0.3	0.15~0.3	0.2~0.4	0.2~0.4	0.4~0.8	0.6~1.5	0.6~1.5
衬瓷厚度 b /mm		$(0.4\sim0.6)\sqrt{\delta_c R} \quad R=\frac{1}{2}\phi$						

④外套封结构见图 15-14 和表 15-34。

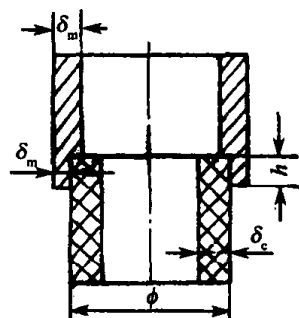


图 15-14 外套封结构

表 15-34 几种金属与高氧化铝瓷筒的外套封结构尺寸

瓷筒外径 ϕ /mm		6~10	12~24	30~45	50~65
瓷筒壁厚 δ_c /mm		1.5~2.0	2.0~3.0	2.5~3.5	3.5~4.5
套封宽度 h /mm		2.0~2.5	3.0~4.0	4.0~6.0	5.0~7.0
封口处金属壁厚 δ_m /mm	29				
	4J33	0.25~0.3	0.3~0.4	0.5~0.8	0.8~1.0
	34				
	4J46	0.2~0.25	0.2~0.3	0.4~0.6	0.6~0.8
	蒙乃尔	0.15~0.25	0.2~0.25	0.3~0.4	0.6
	无氧铜	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	—
	镍	0.2~0.25	0.2~0.3	—	—
	钛	0.2~0.5	0.3~0.7	—	—
	铌	0.3~0.5	0.5~1.0	—	—

(续)

瓷筒外径 ϕ /mm		6~10	12~24	30~45	50~65
瓷筒壁厚 δ_c /mm		1.5~2.0	2.0~3.0	2.5~3.5	3.5~4.5
套封宽度 h /mm		2.0~2.5	3.0~4.0	4.0~6.0	5.0~7.0
非 封 口 处 金 属 壁 厚 δ_m /mm	29				
	4J33	0.25~0.3	0.5	0.5~0.8	0.8~1.0
	34				
	4J46	0.2~0.25	0.4~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0
	蒙乃尔	0.3	0.3~0.4	0.5~0.6	0.7~0.8
	无氧铜	0.4~0.5	0.4~0.5	—	—
	镍	0.4	0.5	—	—
	钛	0.6~0.8	0.5~1.0	—	—
	铌	0.4~0.6	0.5~1.0	—	—
配合间隙/mm		0.1~0.13			

⑤平封过渡针封结构,见图 15-15 所示和表 15-35。

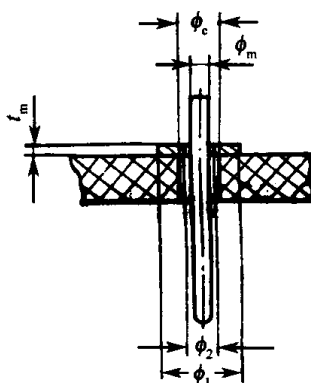


图 15-15 平封过渡针封结构

表 15-35 几种平封过渡针封的结构尺寸

陶瓷孔直径 ϕ_c/mm		0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00
金属针直径 ϕ_m/mm	可伐、钼、钽、	0.45	0.68	0.9	1.35	1.83	2.78
	无氧铜、蒙乃尔	0.40	0.63	0.85	1.3	1.78	2.70
过渡垫片外径 ϕ_1/mm	可伐、钼、钽	2.0	2.5	3	3.5	5	7
过渡垫片内径 $\phi_2^{①}/\text{mm}$		0.48~0.52	0.71~0.76	0.94~0.99	1.40~1.48	1.90~1.98	2.88~2.98
过渡垫片厚度 $t_m^{②}/\text{mm}$		0.1~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2	0.2~0.25	0.2~0.3	0.2~0.3

注:①适用于可伐、钼、钛等线膨胀系数较低的材料,对于线膨胀系数较高的无氧铜、蒙乃尔等,其内孔尺寸还应适当加大;

②用钼作过渡垫片时,其厚度可薄些,常取下限值

真空技术中常用的金属—陶瓷引线,可采用过渡封接结构,如图 15-16 所示。

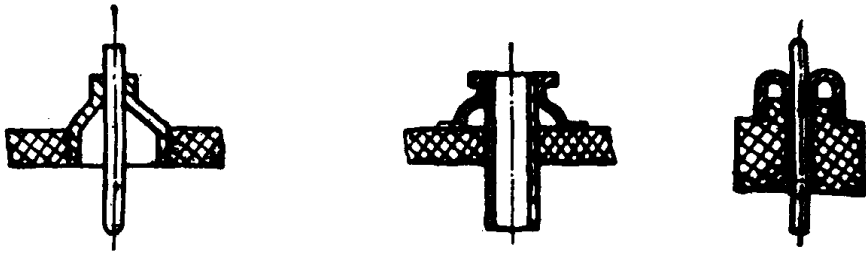
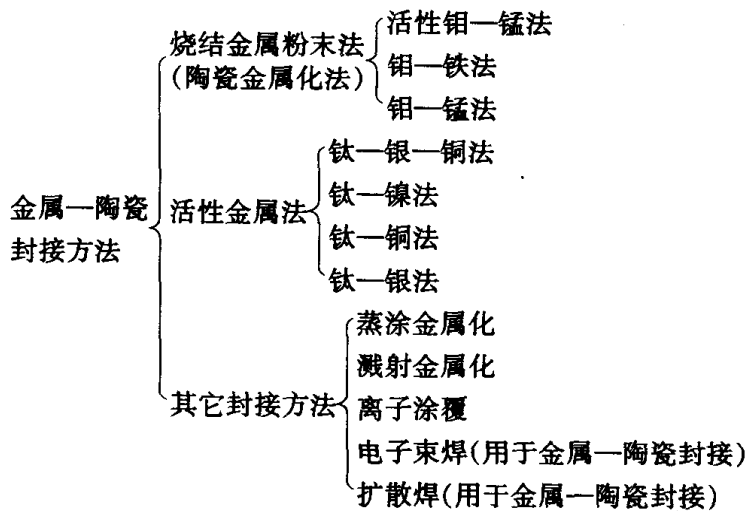


图 15-16 几种形式的金属—陶瓷引线

4. 封接工艺

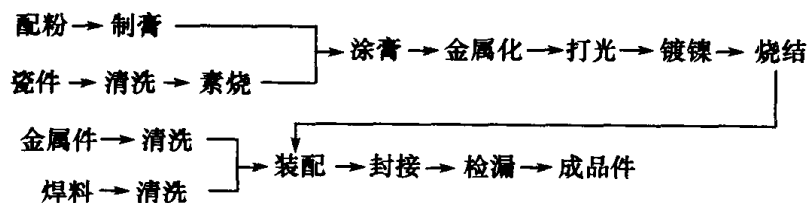
金属—陶瓷封接方法如下:



活性钼—锰法陶瓷金属化封接工艺和活性金属钛—银—铜法封接工艺是目前比较成熟的金属—陶瓷封接工艺。其它几种封接方法则各具特色,也越来越多地被人们所采用。现将各种封接方法分别叙述如下。

(1) 活性钼—锰法

活性钼—锰法的工艺流程为:



待封陶瓷件需经磨削加工、清洗和马弗炉素烧(800℃~1000℃)。金属化膏配方及配用陶瓷见表 15-36。

金属化膏的制备和涂覆工艺是:将各种料的粉末按比例秤好,加入硝棉溶液、醋酸丁酯、草酸二乙酯等之后经球磨稀释便可用毛刷涂覆(也可采用喷涂或浸渍)。

陶瓷涂膏后,立即放入钼舟在一定温度和一定露点的氢炉中烧结。烧结条件见表 15-37。

为了增加焊料对金属化层的浸润性,可用涂膏或电镀的方法在金属化层上覆以镍层,镍层厚度为 4μm~6μm 左右(若是涂膏则可用火棉胶和细镍料的混合膏)。经涂膏或镀镍的陶瓷还需在氢炉中在 1000℃ 的温度下焙烧 15min~25min,称为二次金属化。

表 15-36 金属化膏配方及配用陶瓷

配方号	配方组成/(质量)								适用瓷种	涂层厚度/ μm
	Mo	Mn	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃		
1	80	20	—	—	—	—	—	—	75% Al ₂ O ₃	30~40
2	45	—	18.2	20.9	12.1	2.2	1.1	0.5	95% Al ₂ O ₃	60~70
3 ^①	65	17.5	—	16.8	0.31	0.39	—	—	95% Al ₂ O ₃	35~45
4	59.5	—	17.9	12.9	7.9	CaCO ₃ 1.8	—	—	95% Al ₂ O ₃ (Mg-Al-Si 系)	60~80
5	50	—	17.5	19.5	11.5	1.5	—	—	透明刚玉	50~60
6	70	9	—	12	8	1	—	—	99% BeO 95% Al ₂ O ₃	40~50

注:①或用 95% Al₂O₃ 瓷粉 17.5 代替 Al₂O₃、SiO₂、CaO 三项

表 15-37 不同配方的金属化条件

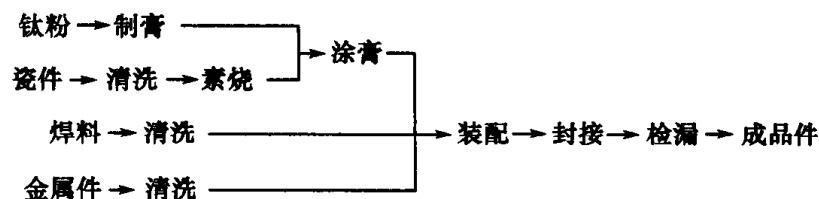
配方号 ^①	涂层厚度/ μm	金属化温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/min	氢炉露点/ $^{\circ}\text{C}$	瓷 种
1	30~40	1350 \pm 20	60	+10~+30H ₂	75% Al ₂ O ₃
2	60~70	1470	60	H ₂	95% Al ₂ O ₃
3	35~45	1550	60	+20~+30H ₂	95% Al ₂ O ₃
4	60~80	1510	50	—	95% Al ₂ O ₃
5	50~60	1400~1500	40	H ₂	99.8% Al ₂ O ₃
6	40~50	1400	30	+20~+30H ₂	99% BeO

注:①此配方号与表 15-36 同

经过金属化的陶瓷件就能与经过清洗、退火的金属件(有的还要镀覆)和焊料进行封接。封接可在氢炉或真空炉中进行,其规范可根据具体情况制定。

(2) 活性金属钛—银—铜法

活性金属法可分钛—银—铜、钛—镍、钛—铜等法。其中钛—银—铜法应用最多,其工艺流程如下:



所用钛粉的纯度应在 99.7% 以上,粒度在 270 目~360 目范围内。制膏时取质量为钛粉之半的硝棉溶液,加上少量草酸二乙酯稀释,调成膏状,涂覆在陶瓷封接面上(用毛笔涂膏,或用喷涂、滚涂等法涂敷)。涂层要均匀,厚度一般在 25 μm ~40 μm ,晾干后与金属件及 AgCu28 焊料装配在一起,在真空炉中进行封接。当真空度达到 $7\times 10^{-3}\text{Pa}$ 时,就可逐渐升温到 779 $^{\circ}\text{C}$ 使焊料熔化,再升温至 820 $^{\circ}\text{C}$ ~840 $^{\circ}\text{C}$,保温 3min~5min(温度过高或保温时间过长使得活性合金同陶瓷件反应强烈,引起合金组织疏松,形成漏气)后,即可降温、冷却,完成封接。

钛—银—铜活性金属法大多用于平封和夹封结构。由于套封结构在装配时易将钛粉刮掉,因此需采取合理的装配方法和装配结构(例如将封接面设计成锥形等)。

封接完成后,对封接件要进行耐烘烤性能检验和气密性检验。

(3)其它封接方法

20 世纪 60 年代以来,国外已开始将气体放电、电子束、加压扩散等技术应用到金属-陶瓷封接工艺中,产生了一些新的工艺方法。如蒸发金属化、溅射金属化、离子涂覆、电子束焊、扩散焊等。这些方法扩大了选用材料的范围,同时提高了封接件的气密性和机械强度,并能适应多方面的需要(例如宇航、原子能等技术对金属-陶瓷封接工艺的要求)。

①蒸发金属化。蒸发金属化是利用真空镀膜机在陶瓷件上蒸镀金属膜,从而实现金属化的一种方法。所镀金属膜的厚度是在蒸镀陶瓷件时利用“样板电阻”来控制的。“样板电阻”是一个长 20mm、宽 10mm、厚 2mm 的玻璃片,玻璃片的两端蒸镀上长 5mm 的银层,在银层面上包以铝箔,用导线引至镀膜机外,再用欧姆表测量在玻璃片上蒸镀金属层的电阻值,则可换算出镀层厚度。例如蒸镀钛时,钛层电阻值被控制在 $500\Omega \sim 20\Omega$ 范围内,而钼的电阻值则被控制在 $30\Omega \sim 10\Omega$ 范围内。在蒸镀瓷件时,先将经研磨清洗好的 95% Al_2O_3 瓷件包上铝箔,只露出需要金属化的部位,放入镀膜机真空室内,当真空度达到 $4 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时,将瓷件预热至 $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$,保温 10min,先开始蒸钛,再蒸钼形成金属膜,然后在钛、钼金属层上电镀一层厚度为 $2\mu\text{m}$ 的镍,最后在真空炉中用厚度为 0.5mm 无氧铜片与瓷件进行封接(采用 AgCu28 焊料)。这种封接件具有良好的气密性。蒸发金属化工艺还可用于 95% 氧化铝瓷与无氧铜、可伐件的平封、夹封与套封。

蒸发金属化的优点是金属化温度低($300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$),陶瓷没有变形、破裂的危险。能适应于各种不同的介质,如能对 99% Al_2O_3 瓷、99% BeO 瓷、石英等介质进行金属化,并获得良好的气密性。这种封接法较钼锰法、活性法有更高的封接强度。缺点是蒸镀难熔金属有困难。

②溅射金属化。金属化的步骤是,在真空容器中充以一定压强的氩气,在电极间加直流电压,形成辉光放电,利用气体放电的正离子轰击靶面,使靶面材料溅射到陶瓷(或其它衬底材料)上形成金属化膜,从而实现金属化。图 15-17 是三极溅射装置的示意图。

文献[316]对溅射金属化的工艺过程作了详细介绍。这种工艺的大致过程是先将系统抽到 $7 \times 10^{-4} \text{Pa}$,关闭扩散泵阀门,通入干燥纯氩真空度为 $(1 \sim 3) \times 10^{-1} \text{Pa}$,加热钨阴极,在 100V 的阳极电压下,使阳极和阴极之间产生放电,待放电后阳极电压自动降至 40V~50V 时,再控制阴极的发射电流,使阳极电流达到 3.4A~4A。安装在钟罩外的线圈是用来产生 $5 \times 10^{-3} \text{T}$ 的磁场,使等离子体压缩成直径为 8cm~10cm 的圆柱,用来“擦洗”陶瓷表面。然后用 1000V 的电压先对靶面溅射 5min,以获得“清洁”的陶瓷表面。再移开遮挡陶瓷的活动挡板,使陶瓷沉积所溅射的金属,直至达到所要求的金属膜厚度。靶面的支撑杆可旋转,使陶瓷对准不同的溅射金属,依次沉积所需的金属薄膜。沉积到瓷件上的第一层金属化材料为钼、钨、钛、钽或铬,第二层为铜、镍、金或银。在溅射过程中,陶瓷的温度为 $150^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$,故不存在炸裂和变形问题。陶瓷金属化以后可在氢炉或真空炉中进行封接。溅射金属化工艺操作简便,可适用于任何种类的陶瓷,特别是氧化铍陶瓷。这种封接方法能获得气密性良好的封接件。

与蒸涂法相比,溅射法能在较低的温度下沉积高熔点金属膜,并且能在大面积上制作厚度均匀、与基底结合牢固的沉积膜。溅射法还具有能沉积合金及氧化物等薄膜的优点,除此之外还可以获得“原子清洁”的金属表面,对真空技术来说是一种非常有用的方法。

③离子涂覆。离子涂覆的设备与溅射装置相似,但该设备的阴极为安放陶瓷的支架,阳极为蒸发源的热丝,热丝材料为待涂覆的金属材料。当阴、阳极之间加直流高压(2kV~5kV)后,在电极间形成氩的等离子体。用氩的正离子轰击工件表面净化基底,然后加热热丝,使金属蒸发,在电场加速下金属蒸气的正离子轰击工件表面形成牢固的涂覆层。图 15-18 是离子

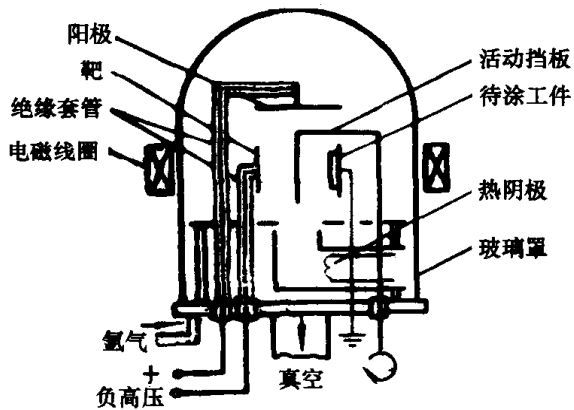


图 15-17 三极溅射装置示意图

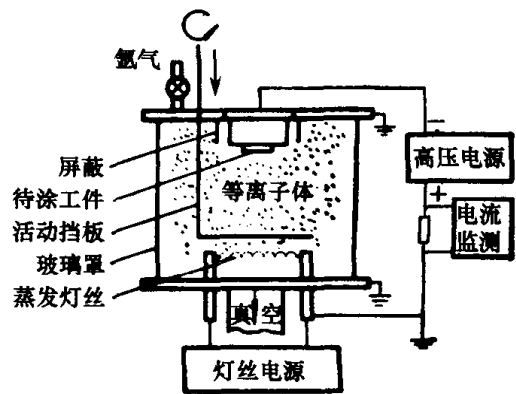


图 15-18 离子涂覆装置示意图

涂覆装置示意图。

文献[317]介绍了一种离子涂覆装置。离子涂覆的步骤为,先将系统抽至 $5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 的真空度,充氩气至压力 $1 \text{Pa} \sim 5 \text{Pa}$ 。当阴、阳极间施加 $2 \text{kV} \sim 5 \text{kV}$ 电压时,放电的电流密度为 $0.5 \text{mA}/\text{cm}^2$ 。借助于离子轰击来“清洗”陶瓷表面,轰击时间由材料和表面性质决定。串接在高压回路中的电流表用来指示放电电流,当电流下降至某个稳定值后,则“清洗”完成。然后移开活动挡板,使热丝蒸发金属,在电场的作用下金属蒸气被电离成正离子,在轰击陶瓷的过程中形成牢固的金属界面层。界面层形成以后可用离子涂覆(或真空蒸涂)使涂层达到所需厚度。最后将离子涂覆的金属化陶瓷件和金属件进行封接。

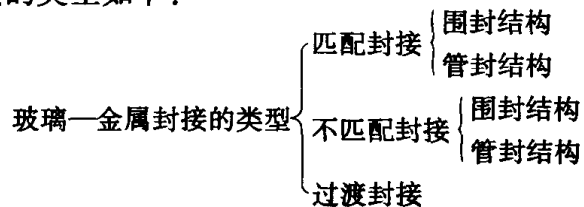
该工艺的优点是金属化温度低(工件温升小于 300°C),结合牢固,适用于不同的介质材料,金属化沉积速率高(与电镀速率相近)。缺点是只适宜沉积较易蒸发的金属材料,难熔金属的沉积则较困难。

(二) 玻璃—金属封接

1. 概述

真空系统中常用的玻璃—金属封接结构,要求封接件具有气密性、一定强度、耐烘烤和一定的电绝缘性能。

常用玻璃—金属封接的类型如下:



匹配封接是指玻璃与金属的线膨胀系数在一定温度范围内是相近的(差值小于 10%)。不匹配封接时,玻璃与金属线膨胀系数差值较大(差值大于 10%)。当玻璃与金属线膨胀系数相差甚大时可采用线膨胀系数介于玻璃与金属之间的一种或几种玻璃来进行过渡封接。

从结构上可分为围封结构、管封结构和盘封结构,如图 15-19 所示。围封结构是指封接金属杆的四周是用玻璃包围起来的结构,如超高真空电离计规管引线(图 15-19(a))、弯注规规管引线、真空振动薄膜规规管引线(图 15-19(b))等。

常用的管封结构为金属圆管和玻璃圆管的对接结构。如可伐法兰接头与玻璃管的封接(图 15-19(c)、(e))。

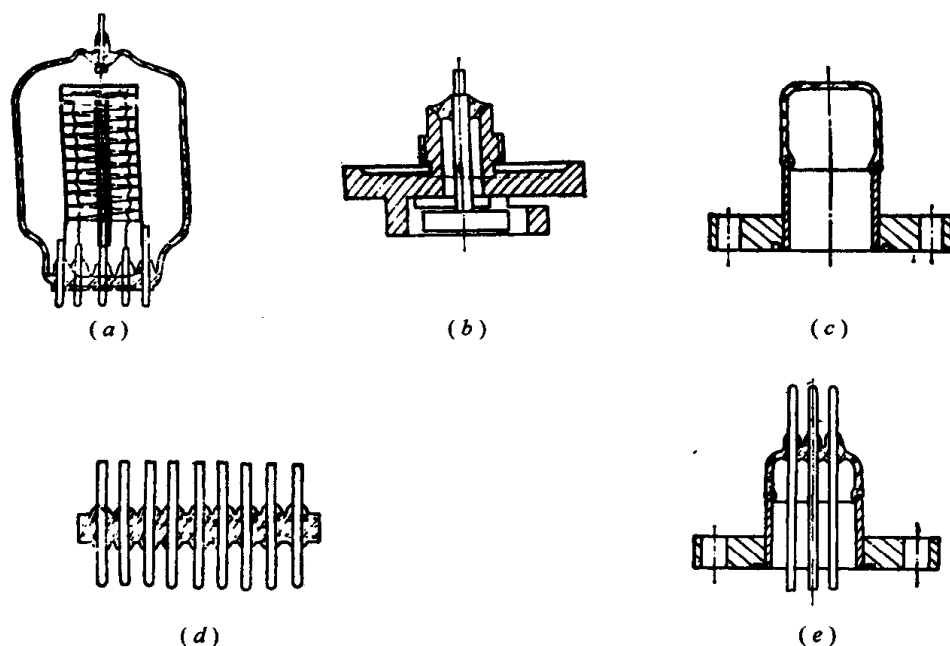


图 15-19 玻璃与金属封接结构示例

(a)超高真空电离计规管(即 B-A 规)引线的围封结构; (b)振动薄膜规的上盖围封结构;

(c)可伐法兰封接玻璃观察窗的管封结构; (d)多头引线围封结构;

(e)可伐法兰、钼杆与玻璃封接的围封和管封结构。

2. 封接方法

1) 围封封接

围封封接为钨杆、钼杆、可伐杆等与线膨胀系数相近的玻璃相封接的结构。封接前需将玻璃和金属杆进行清洗,最好经过烧氢退火,以去除应力和表面脱碳。

为了保证封接质量,封接时一般先在杆上烧玻璃珠,其过程是:将内径略大于金属杆的玻璃套管切成适当的长度,先用煤气加氧气的氧化焰均匀地烧金属杆,待金属杆上形成一层适当厚度的氧化层后,再将玻璃套管套在金属杆上,用氧化焰从玻璃管的一端向另外一端均匀地烧过去,使玻璃管贴在金属杆上。此时钨呈金黄色,钼呈浅褐色,可伐呈鼠灰色,无氧铜则呈砖红色。如果金属杆过氧化或氧化不足,封接后金属杆发白、发黑或呈金属本色,而不能保持气密性。

烧好玻璃珠的金属杆可再与玻璃封接成单头或多头引线。若引出线数目特别多则可采用烧结法,即将膨胀系数与金属杆相匹配的玻璃磨成粉末,用 120 目~150 目筛过筛,所得细粉填入预先插有引出线的石墨模子中,连同模子放进马弗炉中(也可采用高频炉等)加热,在 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 下维持 5min~10min 然后自然冷却即成。用烧结法制成的多引出线粉末芯柱同样具有良好的气密性。如图 15-19(d)所示。

2) 管状封接

(1) 管状封接件的结构设计

最常见的管状匹配封接是可伐管或可伐法兰接头与钼组玻璃管(DM-305、DM-308 等)的封接(如图 15-19 所示)。其结构形式如图 15-20 所示。

这类封接的玻璃管直径与金属管的壁厚、玻璃管壁厚和贴边长度之间都有一定的关系,详见表 15-38。

表 15-38 管状匹配封接的尺寸要求

玻璃管直径 d/mm	金属管壁厚度 h/mm	玻璃管壁厚度 t/mm	贴边长度 l/mm
5~8	0.4~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5
8~15	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5~2.5
15~30	1.0~1.5	1.5~2.2	2.5~3.0
30~70	1.5~2.0	2.2~3.0	3.0~4.0
70 以上	2.0~2.5	3.0~4.0	4.0~6.0

最常用的管状不匹配封接是无氧铜管(线膨胀系数为 $16.8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)与玻璃管(线膨胀系数为 $4 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \sim 11 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)的封接。为了减少由二者线膨胀系数的差别所引起的玻璃管的应力,无氧铜管的封接边缘应作成刃口形,其结构如图 15-21 所示。

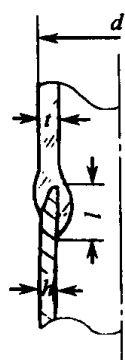


图 15-20 管状匹配封接结构形式

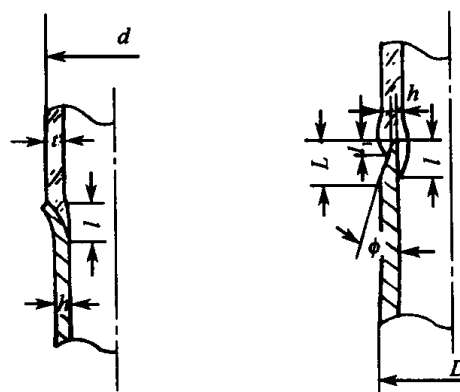


图 15-21 管状不匹配封接结构

玻璃与刃口内侧的贴边长度应大于外面贴边长度。金属管直径 D 与刃口长度 L 、外面贴边长度 l_1 之间的关系见表 15-39。

表 15-39 管状不匹配封接的尺寸要求

D/mm	<10	$10 \sim 15$	$15 \sim 25$	$25 \sim 60$	>60
L/mm	$(1.5 \sim 1.8)D$	$(1 \sim 1.5)D$	$(0.8 \sim 1.0)D$	$(0.5 \sim 0.8)D$	$(0.3 \sim 0.5)D$
l_1/mm	$1 \sim 1.5$	$2 \sim 2.5$	$2 \sim 3.0$	$2.5 \sim 4.0$	$3.5 \sim 5.0$

注:刃口厚度 $h=0.04\text{mm} \sim 0.06\text{mm}$, $\phi=2^{\circ} \sim 3^{\circ}30'$, 刃口的表面粗糙度为 $R_a 1.6 \sim R_a 0.8$

(2) 管状封接件的封接工艺

直径较小的金属管与玻璃管的封接可采用手工封接,对于直径较大的工件则需在玻璃车床上进行封接。

管状封接的工艺与围封类似:首先用氧-煤气火焰中的氧化焰将金属管适当氧化,然后套上玻璃管加热,使玻璃熔化贴到金属壁上,同时用石墨铲压、刮玻璃,得到一定形状的接头,再用火焰加热,适当吹气,使玻璃得到良好的成形,最后用软火焰(温度较低的火焰)退火。在封接无氧铜管时,先用氧化焰加热铜管的封接边缘使之氧化,氧化层正常时表面应为砖红色(氧化亚铜),然后再与玻璃管进行封接。

封接可伐时,若没有烧氢的条件,也可将工件固定在玻璃车床上,用氧化焰将工件烧到发白,达到去气和去除表面杂质的目的,冷却后再用细砂纸将表面打光,用丙酮或无水乙醇将表面擦拭干净,即可进行封接。

能与玻璃封接的金属和合金及其氧化物的性能见表 15-40,真空工艺中常用玻璃的牌号及其成分、性能见表 15-41。

表 15-40 能与玻璃封接的金属和合金的性能及其氧化物的性能

金属	熔点 /℃	平均线膨胀系数 / $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 / $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ (退火后的)	最高工作 温度/℃		相匹配的 玻璃牌号	封接前金属氧化物及其性能			封接中 氧化膜成分	封接后 封接后的颜色
					真空中	空气中		成分	熔点 /℃	线膨胀系数 / $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		
钨(W)	3410	44.4(30℃)	129.79(20℃)	0.0548(20℃)	2560	300	DW-211	WO ₃	1475	108	WO ₃ 、WO ₂ 或中间氧化物如 W ₄ O ₁₁ 在几种封接中形成所谓钨青铜	从金黄到浅褐色
		51.9(1030℃)	117.23(827℃)	0.33(1027℃)			DW-216	WO ₂	—	—		
		72.6(2030℃)	100.48(1727℃)	0.60(1070℃)			DW-270	W ₄ O ₁₁	—	—		
							DW-203 DW-217	钨酸钠	—	107		
钼(Mo)	2622	53~57(20℃~400℃)	159.10(20℃)	0.048(25℃)	1700	200	DM-305	MoO ₃	790	83	MoO ₂	浅褐色
		58~62(20℃~700℃)	108.86(1473℃)	0.27(1000℃)			DM-308	MoO ₂	—	—		
		72(20℃~2127℃)	71.176(2173℃)	0.43(1500℃) 0.60(2000℃)			DM-346					
4J29 可伐 (Ni29Co18Fe)	1450	45~55(20℃~300℃)	19.259(20℃)	0.49(20℃)	1000	600	DM-305	Fe ₃ O ₄	—	54	主要是 Fe ₃ O ₄ , 但在带金属光泽的封接中不出现	鼠灰色
		44~52(20℃~400℃)					DM-308					
		56~64(20℃~500℃)					DM-346					
4J8 低钴可伐 (Ni36Co8Fe)	—	4.2~5.6(20℃~300℃)	—	—	—	—	DM-305	—	—	—	主要是 Fe ₃ O ₄ , 但在带金属光泽的封接中不出现	鼠灰色
		4.6~5.8(20℃~400℃)					DM-308					
		6.4~7.0(20℃~500℃)					DM-346					
杜美丝 (Fe58Ni42 合金杆上镀铜)	—	径向 92 纵向 65	167.47(20℃)	0.04~0.06 (20℃)	400	150	DB-402 DB-404	CuO Cu ₂ O	1820 1235	100 25	Cu ₂ O	砖红色
		108(20℃~100℃)	20.934(20℃)	0.68(20℃)	1000	1000	DB-402 DB-404	Cr ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ 的混合物	—	从 82~100 或从 54~100 视成分而定	绿色封接件中间封接前, 灰色封接件 Fe ₂ O ₃ 成为 Fe ₃ O ₄	浅绿色或灰色

(续)

金属	熔点 /℃	平均线膨胀系数 / $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 / $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ (退火后的)	最高工作 温度/℃		相匹配的 玻璃牌号	封接前金属氧化物及其性能			封接中 氧化膜成分	封接后 封接后的颜色
					空气中	真空中		成分	熔点 /℃	线膨胀系数 / $\times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		
铁镍合金 (Ni50Fe50)	约 1456	92(20℃~100℃)	10.467(20℃)	0.49(20℃)	1000	600	DB-402 DB-404	主要是 Fe_2O_3 , 也有 $\text{FeO} \cdot$ Fe_2O_3 + $\text{NiO} \cdot$ Fe_2O_3	—	—	主要为 Fe_3O_4	灰色, 覆 铜后为 红色
铁镍铬合金 (Ni42Cr6Fe)	—	69(20℃~100℃) 72(20℃~200℃) 83(20℃~300℃) 101(20℃~400℃) 114(20℃~500℃)	13.82(20℃)	0.95(20℃)	700	—	DB-402 DB-404	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ + $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ + $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 的复合光 晶石	—	54~62 视成分而定	主要为 Fe_3O_4 + Cr_2O_3	灰色
铜(Cu)	1083	165(20℃~100℃) 177(20℃~300℃) 186(20℃~500℃) 193(20℃~800℃)	393.98(20℃) 376.81(100℃) 351.69(700℃)	0.017(20℃) 0.053(550℃)	400	150	不匹配 封接	Cu_2O CuO	1235 1820	25 100	Cu_2O	砖红色
铁(Fe)	1532	125(20℃~100℃) 131(20℃~300℃) 140(20℃~500℃) 145(20℃~700℃)	72.85(20℃) 29.73(800℃)	0.096(20℃) 1.06(800℃)	500	200	DG-502 或不匹 配封接	Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO	1565 — —	100 54 51	主要是 Fe_3O_4	灰色
钛(Ti)	1690	82(20℃~300℃)	17.04(20℃)	0.55(20℃)	—	—	DB-402 DB-404	—	—	—	—	—

表 15-41 真空工艺中常用玻璃牌号、

序号	新 牌 号	旧 牌 号	化学成分/%(按质量)									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	PbO	BaO	CaO	B ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O
1	DW-203	DW-3	70.8±1	1.2±0.2	—	—	—	25 ^{+0.5} ₋₁	—	0.9±0.1	0.9±0.1	1.2±0.2
2	DW-270	7070	69±1	1.6±0.5	—	—	—	27 ^{+0.5} ₋₁	—	0.4±0.1	0.8±0.1	1.2±0.3
3	DW-211	3C-11	74.8±1	1.4±0.5	—	—	—	18 ^{+0.5} ₋₁	—	4.2±0.3	1.6±0.3	—
4	DW-217	No-17N	73±1	—	6.0±1.5	—	—	16.5 ^{+0.5} ₋₁	—	4.5±0.3	—	—
5	DW-216	No-17K	73±1	—	6.0±1.5	—	—	16.5 ^{+0.5} ₋₁	—	3.0±0.3	1.5±0.3	—
6	DM-346	No-46	68.5±1	2.5±0.5	—	—	—	17.2 ^{+0.5} ₋₁	5±0.3	6.8±0.5	—	—
7	DM-308	3C-8	66.5±1	3.0±0.5	—	—	—	23 ^{+0.5} ₋₁	—	3.7±0.3	3.8±0.3	—
8	DM-305	3C-5K	67.5±1	3.5±0.5	—	—	—	20.3 ^{+0.5} ₋₁	—	3.8±0.3	4.9±0.3	—
9	DB-404	3C-4	55.5±1	1.5±0.5	30±1	—	—	—	—	3.8±0.3	9.2±0.5	—
10	DB-402		69.5±1	1.5±0.5	3.0±0.3	MgO 3.5±0.3	5.5±0.5	0.5±0.1	—	15.0±0.5	1.5±0.3	—
11	DG-502	DT-2	47±1	<1	30±1					6.0±0.5	12±0.5	CaF ₂ 5±0.3
12	焊料 玻璃	DT-3	—	—	85.6	—	—	14.4	—	—	—	—
13	DH-704	低熔 点玻璃	1.5±0.2	2.5±0.5	77.5±1	—	—	8.5±0.5	10±0.5	—	—	—
14		高铝 玻璃	52	11	—	MgO 7.1	0.1	7.9	—	—	—	—
15		石英 玻璃	98.8	0.1	—	—	0.1	—	—	—	—	—
16		上海 95 料	78.5	2.0	0.6	—	—	14.0	—	5	—	—

注:①TK-100 为电阻率等于 100MΩ·cm 时的温度,此值愈高则绝缘性能愈好;

②水解级别:将待测玻璃粉末放入沸的蒸馏水中,测定每 100mL 水中溶解的玻璃毫克数(即质损),以此分为五级:I—质

四、玻璃、陶瓷工艺

化学成分和物理性能

物 理 性 能										可封接金属
线膨胀系数 / $\times 10^{-7}$. $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (20 $^{\circ}\text{C} \sim$ 300 $^{\circ}\text{C}$)	软化温度/ $^{\circ}\text{C}$		热稳定性 $\geq/^{\circ}\text{C}$	退火上限 $^{\circ}\text{C}$	退火下限 $^{\circ}\text{C}$	最大损 耗因数 $\tan\delta/$ 10^{-4} , (20 $^{\circ}\text{C}$, 6MHz)	TK-100 ^① $\geq/^{\circ}\text{C}$	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	水解级 别 ^②	
	4.5×10^6 Pa·s	$10^{11.5}$ Pa·s								
36±1	—	590±10	240	430±10	380±10	23	370	2.16±0.05	V	钨
36.5±1	—	610±10	250	470±10	380±10	28	370	2.10±0.05	IV	钨
40.5±1	—	610±10	230	520±10	385±10	35	300	2.25±0.05	V	钨
38±1	750±10	600±10	250	520±10	380±10	28	290	2.35±0.05	IV	钨
38±1	—	620±10	230	520±10	400±10	22	350	2.30±0.05	IV	钨
47±1	—	590±10	210	555±10	420±10	57	250	2.30±0.05	I	钼、可伐
48±1	670±10	555±10	200	500±10	360±10	32	300	2.25±0.05	V	钼、可伐
49±1	—	575±10	190	535±10	410±10	40	290	2.29±0.05	V	钼、可伐
88±2	—	500±10	110	450±10	360±10	20	325	3.05±0.05	IV	杜美丝、高铬钢、 铁镍铬、钛
89±2	—	580±10	120	470±10	330±10	—	200	2.53±0.05	IV	杜美丝、高铬钢、 铁镍铬、钛
109±2	—	465±10	100	440±10	—	12	310	3.04±0.05	V	铁、钢
105.4	—	326	—	326	—	—	—	6.5	—	作云母封接焊料
89±2	—	360±10	烧结温度 390±10,熔封温度 400±10				300	—	—	焊料玻璃
49±1	—	844±10	—	740	—	15~17	400	2.74	I	钼
5.8±0.3	—	1500	—	—	—	3	600	2.2	I	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	钨

损 6mg~10mg; II—质损 10mg~15mg; III—质损 15mg~25mg; IV—质损 25mg~50mg; V—质损 >50mg

(三) 玻璃的熔接和切割工艺

在真空技术中经常用到玻璃与玻璃、石英与石英的熔接工艺,以及玻璃、石英的切割工艺等。现简要介绍如下。

1. 玻璃的熔接工艺

真空技术中经常需要设计和制造玻璃真空系统。系统的玻璃管道熔接、管道与真空零件的熔接,这些连接是借助于氧—煤气火焰进行烧熔连接的。真空系统的玻璃零件和管道一般均用 DW-211、DW-308、95 号等硬质玻璃料制作。连接时采用特制的氧-煤气火焰手灯进行操作,先用煤气火焰烘烤玻璃的加工部位,防止玻璃内部的局部应力剧增引起炸裂,然后加氧气,使手灯中喷出尖而细的高温火焰,烧熔欲连接部位,使接头熔烧在一起,待整个接头都连在一起时略微降温并吹气,使连接部位的玻璃熔烧均匀,得到良好的成形,并用略带氧气的煤气火焰退火,最后去掉氧气用煤气火焰烘烤退火。

真空系统的玻璃零件(真空油扩散泵、冷阱、活门、球形容器等)大多有定型产品,对于真空系统中所用非标准件则可自行制作。但这种工艺需要由熟练的操作工人来进行。

设计真空系统时,零件布局的安排除需保证密封性能外,还要考虑到工人操作方便和外形的整齐、美观。这些零件通常都是使用包有石棉绳的薄铁皮夹头夹紧的,但不能固定过松或过紧,以免应力过大引起玻璃炸裂,甚至拉断玻璃管道。

石英工件的熔接工艺除石英管的熔接加工外,还有石英与玻璃管的过渡熔接、杆状石英天平的制作等。石英的软化温度约为 1500°C ,通常采用温度约为 1600°C 氢—氧火焰进行加工。石英与玻璃管的熔接采用不同膨胀系数的玻璃逐级过渡的办法来进行。

2. 玻璃的切割

切割玻璃与石英的细管时可先用钢锉或薄砂轮在细管表面刻划一个痕迹,再用双手拉断。切割较粗的玻璃管时,可将旋转着的玻璃管用尖细的氧—煤气火焰局部加热,待玻璃熔化时拉开。也可将粗玻璃管夹在玻璃车床上,用淬火钢刀在玻璃的径向刻一道纹,然后用尖细的氧—煤气火焰或加热的镍铬丝与转动玻璃管刻痕相接触,使玻璃管沿刻纹裂开。

石英管切割采用转速为 1500r/min 的片状钢铝石或金刚石砂轮切割。在用金刚石砂轮进行切割时,需用水冷却砂轮与管接触部位。

五、真空排气工艺

获得真空,靠真空系统的抽气来完成。根据所要求的真空度和清洁度,采用不同的真空系统。一般真空系统按真空区域可分为:中、低真空系统,高真空系统,超高、极高真空系统。它们由不同的主泵、辅助泵及其它相应的真空零(部)件组成。中、低真空系统由机械泵或机械泵加罗茨泵组成,为防止油污染,还可加入分子筛阱,但在操作时要防止分子筛固体颗粒吸入机械泵中。高真空系统主要由扩散泵、障板、冷阱、插板阀和机械泵等组成,主泵也可用涡轮分子泵或低温泵。为进一步减少油污染,可用溅射离子泵与钛升华泵和低温障板一起构成一台无油高真空抽气机组,其前级用吸附泵粗抽。超高和极高真空系统最重要的标志是清洁度高,只要采用高性能的离子泵、低温泵、涡轮分子泵和冷阱等,就可实现超高和极高真空。

各种真空系统的启动、停机、操作过程及产生故障时对污染的防护都有严格要求,必须遵守操作规程。比如,机械泵只能抽 $15\text{Pa}\sim 20\text{Pa}$ 或更高的压力,否则反流污染严重;扩散泵在正

常工作前和停泵 20min 内油蒸气污染很大,故不得与真空室或冷阱相通;停机时冷阱要在与真空室隔离、排除液氮并回温后方可停止高真空泵;吸附泵应有防压力爆破装置,以防回温后产生事故;要防止分子筛吸附阱中的分子筛及其固体粉末吸入机械泵。

如果真空抽不上去或达不到要求,首先要检查抽气装置工作是否正常,其次检查是否存在不允许的放气源。真空零(部)件在装配之前,必须经严格的清洁处理、烘干并检漏,合格后方可使用。还应检查可拆卸部位密封圈是否清洁、良好,密封面是否有划伤,连接是否紧密等。

下面以多层绝热低温容器的抽气技术为例,介绍低温容器的真空排气工艺。

(一) 概述

高真空多层绝热又称超绝热。它在高真空容器中由多层的高反射率的箔(铝箔或镀铝涤纶薄膜)作反射屏与多层的导热系数低的材料(玻璃纤维制作的布或纸及尼龙网等)作隔热物相互叠扎而成。到目前为止,它仍然具有表观导热系数最低、绝热效果最好及质量轻、所占体积小等优点。这种绝热在各种低温恒温器、低温贮槽、低温输送管道、空间飞行器、致冷器以及超导电机和超导电缆等方面获得越来越广泛的应用。

多层绝热的最低表观导热系数,只有在绝热层中消除了气体分子传热的情况下才能达到。在绝热层内压力已小于 10^{-2}Pa 时,再进一步降低压力对表观导热系数没有明显影响,因此它要求的工作真空度是 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 。

在多层绝热的液氮、液氢、液氧、液氮等低温容器中,要在 5 年甚至 10 年的使用期间始终维持 $10^{-2}\text{Pa}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 的高真空,就必须进行彻底抽气和采用吸气性能良好的低温吸附剂(分子筛、活性炭)等一系列技术措施。

为了克服多层绝热存在的工艺复杂、成本高、制作周期长和工程表观导热系数较高等缺点,必须开展有关多层绝热排气工艺、层间压力分布、吸附剂活化工艺和吸附剂吸气性能测试等研究工作。

(二) 低温容器抽气时存在的主要问题

多层绝热的液氮容器和液氮生物容器的典型结构是由内胆、外壳、支撑部分、多层绝热层、低温吸附剂和抽气嘴组成,如图 15-22 所示。

容器的抽气是通过抽气嘴与抽气管道和机械泵、扩散泵组成的高真空抽气机组连接后进行的。

抽气的主要目的是:首先将容器夹层空间的气体抽出,然后将容器内的材料放气量降低到允许的范围,并促使吸附剂活化,以保证低温容器在 5 年~10 年寿命期间始终具有良好的真空绝热性能。

低温容器抽气困难是由于存在下面一些特殊问题造成的:

①气体负荷大。抽气时,容器内的气体负荷来源于容器壁、支撑、绝热材料和吸附剂的放气,以及容器的漏气。当漏气量被限制在允许范围时,气体负荷主要来源于绝热材料的放气,其次是吸附剂脱附的气体。绝热材料一般都要包扎数十层,每层又都是双面放气,实际放气面积比容器壁面积大数十倍,甚至上百倍,再加上有些绝热材料如玻璃纤维布和镀铝涤纶薄膜的放气率高,造成很大的放气量。而常用的吸附剂(分子筛、活性炭、硅胶等)又都是多孔性材料,具有巨大的比表面积($800\text{m}^2/\text{g}$ 左右),在常温常压下具有一定的吸气性能,装配过程中不可避免地要吸附大量的水蒸气等气体,而在抽气时重新脱附。因此低温容器内的气体负荷远远高

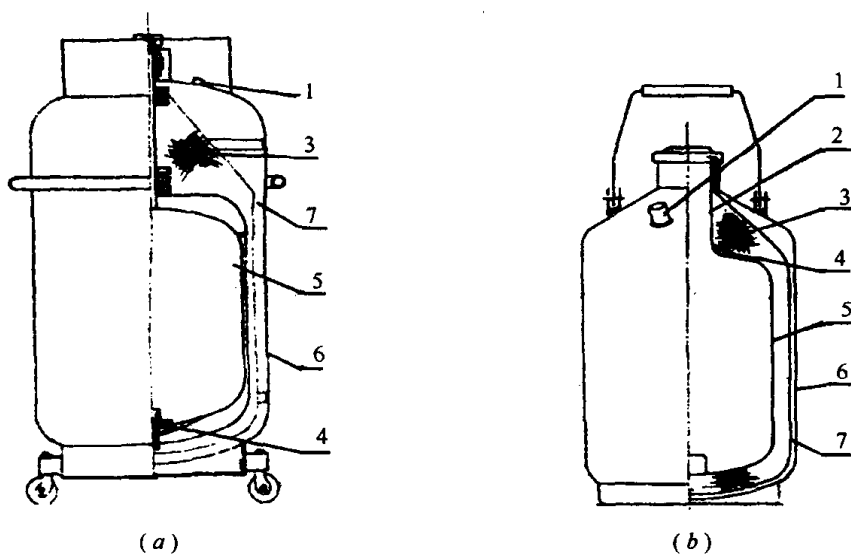


图 15-22 多层绝热低温容器结构图

(a)液氮容器; (b)液氮生物容器。

1—抽气嘴; 2—支撑颈管; 3—多层绝热层; 4—吸附剂; 5—内胆; 6—外壳; 7—空间。

于相同容积的一般动态高真空设备的气体负荷。

②流导小。低温容器的流导受限于绝热层间隙和抽气嘴的流导。在包扎几十层绝热材料的绝热层中,层与层间距离近,形成的环形窄缝又特别长,其流导极小。而容器抽气嘴在抽气后,需要进行封口。为了封口方便,密封可靠,其直径就不宜做得太大,因而流导也就较小。

③除气温度低。低温容器中,某些常用的绝热材料(如镀铝涤纶薄膜和尼龙网)、支撑用的隔热材料(如环氧玻璃钢和塑料)及密封材料(如真空橡皮),所允许的工作温度一般在 $80^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$,致使容器在抽气中的除气温度不可能再升高。

④允许放气量小。低温容器是一个需要长期维持静态真空的真空容器。允许的放气量是根据容器的大小和寿命的长短及使用吸附剂的吸气性能来确定的。在单独使用低温吸附剂的情况下,通常要求的允许放气率为 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{L/s} \sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。它相当于相同容积的动态超高真空系统的允许放气量。

⑤抽气时加热效率低。多层绝热在真空状态下具有良好的绝热性能。如果在抽气过程中对容器进行加热除气,会导致绝热材料和吸附剂升温困难,温度分布不均匀,而造成加热效率很低。

⑥水蒸气不易抽出。材料放气时,首先放出表面吸附的气体。这些气体和吸附剂脱附的气体主要成分都是水蒸气。水蒸气的吸附热高 ($>105\text{kJ/mol}$),碰撞在材料表面上的平均滞留时间长,不容易脱附。这部分水蒸气不仅数量大,而且又被包在流导极小的绝热层内,抽除这些气体要比一般真空设备抽气困难得多。这也是低温容器抽气时间过长的一个特殊问题。

⑦吸附剂再活化困难。吸附剂在装入低温容器前,一般要经过加热干燥处理或低真空加热干燥处理使之初步活化。在装入容器时,要经过多层绝热层的包扎、组装、组焊等工序,则不可避免地要暴露在空气中,又易吸附水蒸气。因此抽气时,必须使吸附剂重新活化。但再活化时因受除气温度低的限制而达不到所需要的活化温度(如分子筛活化温度为 400°C 左右、活性炭为 250°C 左右),以及脱附的水蒸气不易被抽出,致使再活化不充分。

⑧存在油蒸气返流的影响。凡是采用机械泵和扩散泵抽气的真空系统,都存在着油蒸气的返流污染。一般无挡油装置的扩散泵其返流率约 $10^{-2}\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{min}) \sim 10^{-3}\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot$

min)。增加水冷帽、水冷挡板等挡油措施后,返油率可降低 100 倍~1000 倍。低温容器的空间容积大,材料表面积多,从抽空到 15Pa 开始直到抽气结束,始终存在着从抽气机组流向容器的定向油蒸气流。这时容器犹如一种选择性的捕集油蒸气的泵。容器内的返流量与机组的返油率、抽气管道的流导及抽气时间而成正比。因国产抽气机组返油率高,对低温容器的抽气时间越长返流量越大。返流的油蒸气与吸附剂的亲合力较强(容易被吸附),而且在吸附较多的油蒸气分子后,影响对氢、氮等气体的吸附,使其吸气性能下降,容器的真空寿命缩短。另外,油蒸气会污染反射屏,严重时影响屏的发射率,而使容器的绝热性能降低。因此,低温容器抽气时必须考虑油蒸气返流的影响。

显然,上述问题造成低温容器抽气非常困难,成为真空获得领域中当抽气时间很长时的特殊排气问题。

还应指出,在低温容器抽气时,存在一种特殊的渗透抽气现象。绝热层内的材料放气量大,而流导极小,造成绝热层内与夹层空间有大的压差。在这个压差作用下,气体分子在反射层之间产生扩散渗透现象。由于屏厚度很薄($6\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$),表面积又大,在升高温度时,可增强渗透作用,使绝热层内的部分气体能够扩散渗透到达夹层空间而被泵抽走。这种渗透抽气现象有利于低温容器的抽气。另外,绝热层材料厚度薄,所含的容积及气体数量相对较少,也有利于低温容器的抽气。

(三) 通常采用的排气工艺

低温容器通常采用下面几种排气方法:单纯排气工艺、抽空加热排气工艺、空气预加热排气工艺。

1. 单纯排气工艺

它的方法是,容器从大气压、常温开始用机械泵抽空到 15Pa 后,再加高真空扩散泵进行抽气,一直到放气量降低到允许范围。

这是一种最简单、最普通的获得高真空的排气方法。用于低温容器抽气效果极差,不仅抽气时间需要特别长,而且吸附剂无法得到再活化。它仅仅适用于不能加热的多层绝热量热器的排气。

2. 抽空加热排气工艺

这是一种普遍用于扩散泵系统获得超高真空的排气方法。它与单纯排气工艺不同的是,在抽气到低真空或高真空时,容器进行加热除气。低温容器的加热方法可分为内加热和外加热及内外全面加热。其中低真空时的全面加热抽气效果较好。

低温容器采用该工艺排气时,要比单纯排气工艺所需要的抽气时间有数量级的缩短,而且吸附剂活化要好一些。因此它是从多层绝热问世以来,一直到 20 世纪 70 年代初被普遍采用的排气方法。

该工艺效果较好的原因是温度作用:①提高材料温度后,可缩短分子在表面的吸附时间,增加材料内部气体的扩散系数,大大加速绝热材料和吸附剂的放气过程。②提高温度,除了使扩散系数增加之外,还因绝热层内的材料放气加快,层与层和空间的压差也增大,从而使绝热层的渗透量增加,提高了“渗透抽气”能力。③当空间气体分子的温度升高时,分子运动速度加快,穿过绝热层窄缝抽气通道和抽气嘴的能力增大,使绝热层和抽气口的流导稍有增加。

该工艺存在的问题是:①加热是在抽气过程中进行的。由于容器的超绝热性能,加热非常困难,使得绝热材料和吸附剂升温到允许最高温度的时间长,而且温度分布不均匀,限制了上

述温度作用的影响。②未能解决前述的水蒸气抽出困难的问题。③抽气时间长。④吸附剂再活化困难。⑤存在油蒸气返流的影响。

3. 空气预加热排气工艺

1971年J.W.Snowman指出,容器的加热应该在抽气开始前就进行,同年,C.Geyari等人在一种测试多层绝热的量热器上进一步实验了在空气中先加热后抽气的排气方法。1976年在一批液氮生物容器和液氮容器的制作中,对这种工艺又进行了研究,证明这种工艺比抽空加热排气工艺所需的抽气时间可以大大缩短,同时有利于吸附剂的再活化。

空气预加热排气的方法是,在抽气之前,将容器在大气中预加热到80℃,然后再开始抽气,抽气过程中根据容器允许的除气温度情况,进行保温或继续升温。

该工艺的主要特点是:①在常压的空气中加热时,利用空气分子的传热作用,使绝热材料和吸附剂能够很快地升温到80℃,并且温度分布均匀,使抽气时加热效率有所提高。②抽气前材料温度提高后,绝热材料表面和吸附剂吸附的水蒸气量稍有降低。③从抽气一开始就能充分发挥加热的作用,即提高温度加速了绝热材料和吸附剂的放气过程,流导增加10%，“渗透抽气”能力也增大了。

该工艺比抽空加热排气工艺所需的抽气时间要短,吸附剂的再活化要好,返流的影响也减少了。因此,它已逐渐取代抽空加热排气工艺,成为低温容器的主要排气方法。

该工艺的主要不足之处是,因空气中含有21%的氧以及水蒸气和少量的有害气体及杂质,在空气中加热如温度过高会使反射屏(铝)污染和氧化,影响屏的发射率,绝热效果降低。因此,加热温度在80℃左右,最高不超过100℃。如果容器允许的除气温度超过100℃,则在抽气的情况下需继续升温,此时加热效率低的问题仍旧存在。尽管加速了水蒸气的脱附和抽出,但并没能从根本上解决水蒸气不易抽出的问题,而且吸附剂仍不能很快再活化,返流的影响也依然存在。

(四) 气体热冲洗和间断排气新工艺

为了解决上述工艺存在的问题,研究了气体热冲洗和间断排气新工艺。新工艺的特点是,抽气前先采用气体热冲洗工艺进行预处理。抽气过程中再采用间断的排气方法。

气体热冲洗的主要目的是,利用易脱附的无害干燥气体多次充入容器内,去置换出不易脱附的水蒸气和空间内有害气体氧等,使容器在抽空前,空间的和材料表面吸附的及吸附剂吸附的气体成分变为充入气体成分。

气体热冲洗的另一个目的是,在空气预热的的基础上,进一步利用充入高压力的无害气体的分子传热作用,使绝热材料和吸附剂在抽气前迅速均匀地升高到允许的最高除气温度。

实验证明,氢、氦、氮、氩作为充入气体都有一定的效果,其中氢、氦的效果比氮好,氩比氮差。考虑到氮气来源方便,使用安全可靠,最适宜作充入气体。

气体热冲洗的工艺步骤是,容器先在空气中预加热到80℃,然后用机械泵预抽,在真空度达到 $10^{-1}\text{Pa}\sim 20\text{Pa}$ 时,缓慢地将选择好的气体充入。在上述预抽过程和充入气体的情况下,继续加热升温达到允许的温度,并根据具体情况重复上述步骤进行2~4次气体热冲洗。在达到充气目的后进行正式抽气。

1. 气体热冲洗排气的作用原理

(1) 气体的置换和脱附作用

容器预抽真空时,将夹层空间内的空气和材料表面及吸附剂解吸的部分水蒸气抽出,这时

再充进气体以使空间和材料表面及吸附剂吸附的气体成分发生变化,随着充气次数的增加,空间的空气成分和材料表面及吸附剂吸附的水蒸气量越来越少,逐步变为充入气体的成分,而选择的充入气体是在材料表面吸附热小,平均滞留时间短的易脱附气体,在正式抽气时很容易被泵抽出。

(2) 气体的席卷(裹胁)作用

充气的容器预抽真空时,处在湍流、粘滞流和过渡流状态下运动的分子,因平均自由程短,相互碰撞频繁,能够将绝热层内不易抽出的水蒸气席卷出来,一起被机械泵排出。温度越高,气体分子热运动速度越快,碰撞越频繁,席卷作用越强。

(3) 气体分子的传热作用

容器在空气中预热,然后在多次充入气体中继续加热,利用高压下气体分子的传热作用,使绝热材料和吸附剂在正式抽空前迅速均匀地升温到允许的最高除气温度。当除气的绝对温度比空气预加热排气时至少高出 10% 以上时,放气量可增大近 10 倍。这样从抽气一开始就加速了材料的放气过程,使绝热层窄通道的流导稍有增加,渗透抽气能力增大,席卷作用增强。

经过气体热冲洗工艺预先处理的多层绝热低温容器,在正式抽气时的起始条件有了根本的变化,见表 15-42。其它工艺在抽气时,容器空间是大气压,材料表面和吸附剂的气体主要成分是水蒸气,温度是室温或 80℃ 左右。但是,新工艺在抽气前,容器空间的压力是充入气体的压力,各部分吸附的气体主要是充入气体的成分,而温度也已达到允许的最高除气温度。再加上所充入的气体易脱附,促使放气量很快降低到允许范围,抽气时间大大缩短。例如在 200L 多层绝热液氮容器的生产中采用新工艺排气,连续抽气 3d,放气量就降低到允许的 $2 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,而其它工艺排气则需要 10d~20d。

表 15-42 各种排气工艺的比较

项目 排气方法	容器抽气的起始条件				抽气过程中		所需抽气时间 ^②	吸附剂活化程度	返流的影响
	压力	温度	空间气体成分	吸附气体成分 ^①	温度情况	抽气情况			
单纯排气	大气压	室温	空气	水蒸气	不加热	连续抽气	100d 以上	没有活化	严重
抽空加热排气	大气压	室温	空气	水蒸气	开始加热	连续抽气	20d	活化差	有
空气预热排气	大气压	80℃	空气	水蒸气	继续升温	连续抽气	10d	活化稍差	小
新排气工艺	充气压力	允许最高温度	充入气体	充入气体	保温	间断抽气	24h ^③	活化好	可忽略
注:①系指吸附剂和材料表面吸附的气体成分; ②指 100L~200L 低温容器达到放气量 $2 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 所需的抽气时间; ③指在 3d 中间断抽气时,实际抽气 24h									

2. 间断排气的作用原理

低温容器的真空获得中,抽气通常都是连续进行的。研究发现,长时间连续抽气对加速材料放气过程没有什么明显作用。因此,采用了间断抽气方法。

间断排气的主要方法是,在容器内获得高真空的情况下,尤其是在绝热层内气体分子处于分子流状态时,暂停抽气。待容器压力回升到一定值后,重新用机组将材料放出的气体抽走,然后再停止抽气,反复进行直到材料放气量降低到允许的范围。

间断抽气的主要目的是,抽气机组间断工作,用很少的实际抽气时间达到连续抽气的相同效果,同时使油蒸气返流的影响降低。与连续抽气方法相比,间断抽气最经济最合理。

①停止抽气不影响材料放气过程。材料放气的特点是,一旦材料、结构和温度确定之后,在一定压力范围内,材料放气率的降低主要取决于放气时间,与抽速大小和真空度高低无关。因此连续抽空并不能促使放气率更快降低。间断抽空时,由于在停抽期间维持住不影响绝热层内材料放气的“一定压力范围”,不影响放气过程,放气率能继续随时间的延长而降低。

②停抽期间,气体的扩散渗透抽气作用依然存在。抽气时因流导的影响,造成绝热层内材料放气率的降低是不均匀的。停抽期间绝热层内材料放气率最高,层与层之间的容积小,压力回升最快。而夹层空间的容积大,周围材料放气率低,压力回升最慢。结果造成绝热层内与夹层空间始终存在着压差。根据测试,这个压差抽气时可高达几十甚至上百倍,停抽时为几倍,至十几倍。停抽时,在压差的作用下,绝热层内的气体可以不断通过扩散、渗透作用到达夹层空间。这时空间对于绝热层内的气体来说始终存在着一定的抽气作用。

③夹层空间储气作用大。夹层空间容积大,周围材料放气率最低,因此能够将绝热层内的材料放出的气体大量地储存起来。

④储存的气体抽除快。重新抽气时,储存在空间的这些气体,能够很快被泵抽走。

200L 液氮容器先用气体热冲洗工艺,然后在正式排气中又采用间断排气工艺,结果在达到与连续抽空 72h 相同放气量的情况下,实际抽气时间可进一步缩短到 24h。

新工艺的主要优点是:①吸附剂再活化彻底,油蒸气返流的影响得到消除,可改善容器的绝热性能,延长容器真空寿命。②抽气时间短,节约大量的水、电和人力,提高设备利用率,降低产品成本。另外防止了水蒸气对机械泵油的污染,节约更换泵油和避免使用液氮冷阱的开支,经济效益大。③工艺简单,操作方便,不需要增加复杂的设备和材料,需要使用的氮气来源方便,价格便宜,用量少,推广应用极为方便。

(五) 低温容器的抽气时间

低温容器抽气所需要的时间取决于:①容器大小和结构。②绝热材料的性能、厚度、预干燥程度和包扎的层数及包扎方法。③抽气嘴的有效抽速。④吸附剂的数量和活化程度。⑤允许放气量的大小。⑥采用的排气工艺。

一旦前 5 项确定之后,抽气时间主要取决于排气工艺。在各种排气工艺中气体热冲洗和间断排气新工艺所需要的抽气时间最少。抽气时间是根据抽气结束时容器内的放气量是否达到允许值来确定的。因此,在采用新工艺抽气的同时,如果能够增大允许放气量是进一步缩短抽气时间的关键。

在保证容器真空寿命的条件下,增加吸气手段,提高吸气能力是使允许放气量增大的主要技术措施。目前已采用的吸气方法是:①固体的低温吸附剂(如分子筛、活性炭、硅胶等)。②金属的室温吸附剂,如钯。③利用低温下可凝性气体的吸附,如充 CO_2 气。④填炭纸。

这四种吸气方法的吸气原理、作用效果不同,在应用中如果能正确使用,合理搭配,就能取得最好的效果。例如,在 200L 液氮容器中,除了使用有效的活性炭和活化工艺并结合采用新抽气工艺之外,还在抽气结束时采用充入 CO_2 气体的新工艺,结果一台容器只用扩散泵抽气 12h,使用 10 个月后,容器真空度仍为 $9 \times 10^{-3} \text{Pa}$,日蒸发率没有增加。另一台仅仅采用机械泵抽气 12h,使用 10 个月后,真空度仍为 $1.2 \times 10^{-2} \text{Pa}$,容器日蒸发量变化也不大。因此多层绝热的中小型低温容器在使用低温吸附剂的同时,采用新工艺抽气并增加使用室温吸附剂、填炭纸或抽气后充入 CO_2 气体等方法之后,抽气时间完全可以缩短在 24h 之内,而且能够实现只用机械泵不用扩散泵抽气就能满足容器长寿命的要求。

(六)吸附剂活化处理

大型静态真空装置中,为了更好地维持真空,通常加入分子筛、活性炭等吸附剂。吸附剂的激活处理至关重要。下面介绍一种吸附剂再生活化装置(如图 15-23 所示),利用该装置对吸附剂进行处理的方法如下:

- ①将吸附剂装入吸附剂室;
- ②吸附室套上加热炉加热。分子筛加热温度为 $350^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$,活性炭为 $200^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$,高温保持时间不少于 8h(在此保持时间内完成步骤 3~7 的操作);
- ③开隔离阀,用机械泵对吸附室抽气(开始要慢抽);
- ④抽至 5Pa 后关隔离阀,用充气阀慢慢充入干燥高纯氮气至大气压;
- ⑤1h 后重复第③、④步骤 2 次~3 次;
- ⑥继续抽气到 10^{-2}Pa ;
- ⑦关隔离阀,停机械泵,停止加热,取下加热炉;
- ⑧待吸附室温度接近室温时套上低温液体容器;
- ⑨容器内注入低温液体;
- ⑩用充气阀慢慢充入干燥高纯氮,直至长时间静态平衡在大气压;
- ⑪去掉低温液体容器,回温时脱附的气体由充气阀“溢出”,直至近室温,隔绝大气保存待用。

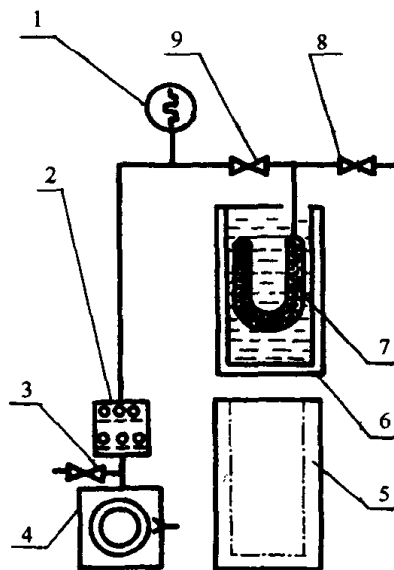


图 15-23 吸附剂再生活化装置

- 1—真空规; 2—吸附阱; 3—放气阀;
4—机械泵; 5—加热炉; 6—低温液体容器;
7—吸附剂室; 8—充气阀; 9—隔离阀。

第十六章 极高真空技术及其应用

一、概 述

极高真空是指压力低于 10^{-9} Pa 的真空状态。众所周知,真空中的物理现象是与气体分子数密度、气体分子热运动的平均自由程密切相关的。在极高真空中,气体分子数密度非常小(常温下小于 2×10^{12} 个/ m^3),气体分子的平均自由程特别长(大于 6.7×10^6 m,受容器尺寸的影响,气体分子的实际自由程就等于容器的特征尺寸)。因此,极高真空环境中气体分子的物理特征完全不同于大气压、低真空和高真空环境。在极高真空中,气体分子之间的碰撞概率非常小,气体分子的运动规律偏离麦克斯韦速度分布律。虽然气体分子与器壁的碰撞是主要的,但碰撞次数也非常少。因此,气体分子在与真空接触的物体表面上形成单分子吸附层的时间也就非常长。

宇宙空间存在广阔无限的极高真空环境。当航天器处于 3K、4K 背景温度的空间极高真空环境(轨道高度 2100km 以上)中时,从航天器上逃逸出来的气体分子一旦离开航天器,就将其初始发射状态的方向飞向无限远的空间不再返回航天器。因此宇宙空间是一个对各种气体分子捕获概率(或吸收概率)为 1 的绝对吸收体。对气体分子的吸收是无限的,不可能达到饱和,我们把吸收气体分子的作用称为“分子沉”效应。把空间的具有吸收分子作用的环境称为“分子沉”环境。在分子沉环境中,分子运动完全不同于地面真空容器中的运动规律。在真空容器中,由于体积的有限性,气体分子和器壁不断发生碰撞,不断改变方向,交换能量,从而使容器内的气体分子基本处于平衡状态下,它们的运动规律服从平衡态下分子运动理论。在空间分子沉环境中,宇宙空间是无边界(器壁)的,气体分子运动保持其初始状态(速度大小与方向),远离航天器。因此分子运动具有非常强的方向性,即各向异性,不同于平衡态理论中的分子混浊性,形成了远离平衡态的非平衡分子流。而且由于分子间不交换能量,因而分子速度仍然保持原始状态,分子运动不服从麦克斯韦速度分布律,所以在这种空间分子沉环境中,真空理论和技术将要发生实质性的变化。

在超高真空容器中,如果器壁是低温表面,也会产生分子沉效应。

极高真空技术是四十余年来发展起来的新技术。最早是在冷阴极真空规校准时,把真空室完全浸泡在液态氮中,达到 10^{-12} Pa 的真空度。随后在 1963 年建立了一个高 914mm(3 英尺)、直径 152mm(1/2 英尺)的空间模拟容器。它装有太阳模拟系统,用 300W 的氮致冷机,使用的是循环流动的氮,把模拟空间冷到 20K,达到了 5×10^{-11} Pa 的真空度。以后,美国国家研究公司建立了一台 10^{-12} Pa 的极高真空系统,极高真空室的有效尺寸为直径 457mm(18 英寸)、长 609mm(24 英寸),用液氮冷到 4.2K,中间夹层壁用液氮冷却。此种系统已有商品出售。1965 年哥达德空间飞行中心利用在液氮板上粘分子筛的深冷吸附泵建造了一台空间模拟室,有效尺寸为直径 508mm(20 英寸)、高 508mm(20 英寸),据估计能达到 10^{-12} Pa 的真空

度。1966年哥伦比亚大学建立了一台直径254mm(10英寸)的有分子沉结构的极高真空设备。该设备由于利用了分子沉设计,可以在 10^{-10} Pa的真空度下进行模拟试验。以上五台极高真空系统,除第一台是玻璃系统外,其余全是金属系统,且都使用了4.2K或20K的低温条件。这种低温条件不是一般实验室能够达到的。即使具备这样的条件,系统的运转费用也是很大的。这也许是极高真空技术发展和应用受到限制的一个原因。为了解决这个矛盾,人们一直寻求新的更易行的获得极高真空的方法。1968年国外用液氮冷冻钛升华阱获得了低于 10^{-11} Pa的压力。从而把获得极高真空所使用的温度从4.2K或20K提高到了77.4K,这就为极高真空技术的推广提供了有利条件。1970年后,苏联的科学工作者分别通过上述两种主要途径进行了极高真空的获得技术研究,并达到了 10^{-10} Pa~ 10^{-11} Pa的水平。1985年我国航天兰州物理所用液氮冷冻钛升华阱与分子沉技术在 $\phi 400\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的真空室中获得了 4×10^{-11} Pa的极高真空。

从应用角度来看,用极低温冷凝泵获得极高真空的设备已达到或接近于实用的水平。哥达德飞行中心用极高真空环境模拟设备进行过一些星船零部件的模拟试验。用美国国家研究公司的极高真空系统在 10^{-8} Pa下进行了材料疲劳试验。尽管这些设备放入试验部件以后。由于部件放气,设备的真空度要变差几个数量级,但还是能在较好的真空度环境下进行试验。用冷冻钛升华阱获得极高真空的方法目前仅在实验室进行,还未见实用方面的报导。法国报导了一台用蒸钛的方法能达到 10^{-11} Pa的镀膜设备,但在镀膜时,也只能工作在高真空状态下。比较上述两种获得极高真空的方法,可以说各有千秋。极低温(4.2K或20K)冷凝泵的方法稳妥可靠,抽气能力大,达到了实用阶段,但设备复杂,运转费用高。冷冻钛升华阱的方法,经济简便,但抽气能力受到限制,要实际应用这种方法,尚需进一步研究。在条件许可的情况下,继续发展极低温的方法,改进和提高蒸钛的方法,使之达到实用阶段是极高真空获得技术研究两个方向。改进和提高的方面很多,如用深冷吸附的方法,即把吸附剂和低温技术结合起来,提高抽气面的粘着概率,造成一个接近分子沉的环境是一个重要的技术途径。

从极高真空技术的发展历史来看,除最早用玻璃校准系统外,以后的几台极高真空系统都是为了空间的环境模拟试验而建立起来的。因此可以说,极高真空获得也是空间技术发展的需要。自从人造地球卫星发射成功以来,空间技术有了很大发展,人们从近地球轨道(几百公里高度,真空度为 10^{-4} Pa~ 10^{-5} Pa)到远地球轨道(例如地球同步轨道,大约距地球36000km高度,真空度为 10^{-10} Pa~ 10^{-11} Pa),甚至飞离地球到月球、金星、火星等。在远地球轨道,空间的残存气体分子非常稀薄(10^{12} 个/cm³或更小),就出现了一些和近地球轨道不同的物理现象,如冷焊等。为了避免这些新的物理现象而导致星船技术上的失败,人们必须在地面进行充分的深远空间的环境模拟试验,以便发现问题进而解决这些问题,保证星船安全可靠的工作。需要模拟的环境因素很多,而极高真空环境就是一个重要的环境因素。

二、限制极限压力的因素

极高真空系统达到极限压力的稳态平衡方程式

$$p = p_a + \sum_e \frac{Q_e}{S_e} + \sum_i \frac{Q_i}{S_i} + \sum_j P_j \frac{U_j}{S_j} \quad [\text{Pa}] \quad (16-1)$$

式中 p ——系统的极限压力[Pa];

p_a ——系统内原有的气体被泵抽除后达到的平衡压力[Pa];

Q_e ——系统中 e 种气体的漏率[Pa·L/s];

Q_i ——系统中 i 种气体的放气率[Pa·L/s];

S_e ——系统对 e 种气体的抽速[L/s];

S_i ——系统对 i 种气体的抽速[L/s];

P_j ——泵对 j 种气体的极限压力[Pa];

U_j ——泵与真空室的连接管道对 j 种气体的流导[L/s];

S_j ——泵对 j 种气体的抽速[L/s]。

式(16-1) 等号右边第二项表示漏气对极限压力的贡献,第三项表示各种放气源对极限压力的贡献,第四项表示和极高真空室相连的泵(极限压力为 P_j) 所产生的返流气体对极限压力的贡献。

由式(16-1) 可见:欲使 p 达到极高真空,其中每一项的值至少都要达到极高真空的量级。而每一项又是由许多项分压力之和而来。极高真空的抽气泵对气体具有选择性,总压力必须用分压力的和来表示。因此,对气源必须进行个别的分析,即不仅要知道气体量,而且要知道放气成分。这是和一般真空系统不同的一点。泵的选择也要根据放气量及放气成分来考虑,二者不可偏废。

(一) 容器内原有的气体

系统开始抽气以前,容器及管道、冷阱等部件内预先存有一定量的气体。这些气体的存在,使系统的极限压力究竟能达到什么程度呢?

我们假定原有气体体积为 V ,其中对第 i 种气体的抽速为 S_i 。从 $t = 0$ 开始抽气,系统内原有的气体假定为非吸附性的,其极限压力为 p_a ,初始压强为 p_{i0} ,则

$$p_a = \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n p_{i0} \exp\left(-\frac{S_i}{V}t\right) \quad [\text{Pa}] \quad (16-2)$$

由式(16-2) 可见:若用一定抽速的泵来排除容器内原有的气体,其压力随抽气时间呈指数规律递减。令 $V = 100\text{L}$, $S_i = 100\text{L/s}$, $p_{i0} = 10^{-1}\text{Pa}$, $p-t$ 的关系由图 16-1 给出。图 16-1 说明系统如果没有其它气源,仅有原存的气体,一定的抽速可以很快地抽走空间的气体分子。随着抽气时间的增加,容器内压力不断降低,可以达到很低的压力,因而它不是限制系统极限压力的因素。重要的是在选配真空机组时要注意到对每一种原有气体的成分都保持有一定的抽速。一般地说,选择单一抽气手段是不行的,必须综合考虑,全面地搭配,才能达到目的。为了解决这个问题,也可以使用冲洗系统中原有气体的方法,即用一种容易被机组排除的气体反复地冲洗系统以置换掉机组难以排除的气体,也有助于降低极限压力。但由于系统本身的泄漏、渗透、放气以及化学反应等,还有可能继续产生这种气体,冲洗系统的方法只能在系统开始启动时使用,如果机组对这种气

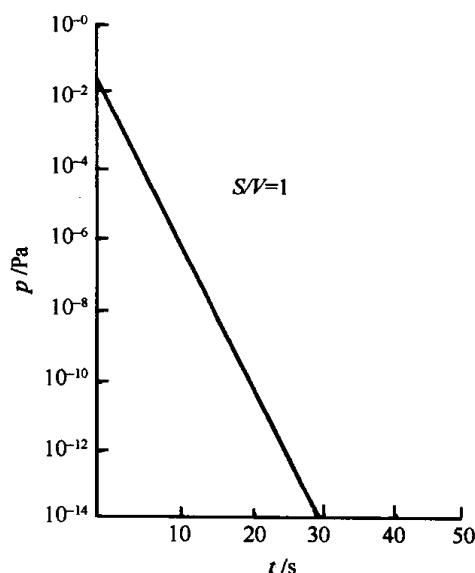


图 16-1 非吸附性气体的压力和时间的关系曲线

(容积 100L, 内表面积 10^4cm^2 的真空系统用 100L/s 泵抽气)

体没有一定的抽速,也会因这种气体分压力的升高而影响系统的极限压力。

(二) 漏气

漏气是限制极限压力的重要因素,真空系统内的平衡压力

$$p = \frac{Q}{S_e} \quad [\text{Pa}] \quad (16-3)$$

式中 Q ——系统漏率 $[\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$;

S_e ——泵对系统的有效抽速 $[\text{L/s}]$ 。

由式(16-3)可知, Q 越大, S_e 越小,系统的平衡压力就越高,因此在系统抽速一定时,降低漏率才能降低系统的压力。

漏孔主要来自原材料的气孔及缺陷、焊缝焊接不良或由于焊缝设计不当使焊缝受力过大而被拉裂、密封不良及“冷漏”。在材料选择上,真空冶炼的材料含气量少,冷轧材料比热轧材料气孔少,缺陷也少。在工艺上应一律采用氩弧焊,避免使用银焊、铜焊等工艺。氩弧焊是一种熔化焊。银焊、铜焊是属于钎焊的,即母体金属不熔化,用焊剂将两种金属粘在一起,在受到冷热冲击和应力后,容易在粘结强度小的地方脱开产生漏孔。目前极高真空系统多选用不锈钢材料,因为它具有优良的高低温性能、真空性能、焊接性能、抗腐蚀性能以及机械加工性能等。不锈钢在氩弧焊中应特别注意以下几点:① 在氩弧焊过程中,尽量减少灭弧次数,第二次起弧时一定要把灭弧处烧熔后再向前移动。实践证明,漏孔经常发生在灭弧 - 起弧处,往往是起弧后和前次灭弧处搭接不够或没有烧熔即向前移动造成的。② 尽量避免用大电流长时间地烧熔,否则在焊接过程中合金元素烧损过大。例如镍在焊后由于挥发而减少,金相结构不再为稳定的奥氏体结构,而转变为马氏体。同时,焊接电流过大,持续时间过长也会使熔池区晶粒粗大,造成热影响区大,应力大,机械强度差,抗腐蚀能力差。在使用过程中受力以后,这些焊缝容易被拉裂。对不得不采用大电流规范焊接的零部件,焊后最好进行 $900^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的真空退火处理,熔池区晶粒细化,消除焊缝内应力。采用小电流规范焊接,熔池区小,热影响区小,合金元素挥发少,焊后焊缝仍处于稳定的奥氏体结构,经过室温到低温(约 4K) 的反复冲击,不容易漏气。因此,不锈钢在焊接过程中,不宜反复地多次焊。焊缝漏了以后的补焊也要注意。焊的次数越多,金相结构、合金元素的成分变化越大,反而有害。

极高真空密封连接一般采用金属圈密封结构,金属接触面的表面粗糙度小于 $0.2\mu\text{m}$,凹凸法兰的配合间隙 $\delta \leq 0.05\text{mm}$,只要仔细装配,密封后不至于漏气。检漏时要用高灵敏度的检漏仪对零部件进行认真仔细的检漏。为了稳妥可靠,在结构上采用双层保护真空的办法比较有效。

(三) 放气

真空装置的放气源有:表面吸附气体的脱附,溶解在材料内部的气体通过扩散而放出,材料的蒸发、分解、解离,气体和固体表面进行化学反应而生成的气体。在极高真空系统中,材料的选择是十分重要的。一般用不锈钢、铜、无氧铜、钨、钼、钽、金、银、硼硅氧玻璃等,它们有一定的强度,化学性稳定,蒸气压和分解压低。而橡胶、油脂、普通塑料、黄铜(含有蒸气压高的锌)、低温合金(含锡、铅合金)等都不宜采用。

下面分别讨论上述各种放气源和材料的关系,影响材料放气的因素,材料放气影响极限压力的程度以及如何减少它。

1. 表面吸附气体的脱附

在极高真空系统中,表面脱附的气体量、气体成分以及减少脱附的实验方法是非常重要的。已有不少文章给出了一些数据。为了定量地说明问题,这里仍然假定系统 $V = 100\text{L}$, $S = 100\text{L/s}$, 表面积 $A = 10^4\text{cm}^2$, 粘着概率 $\sigma = 0.5$ 。用 J.P.Hobson 的方法,认为气体分子完全没有相互作用,由脱附气体所产生的压力

$$p = p_{i0}\exp(-Kt) \quad [\text{Pa}] \quad (16-4)$$

式中 K ——系数,与温度有关, $K = f(T)S'/S$;

其中 S ——是对某一种气体的抽速, $[\text{L/s}]$;

S' ——是吸附表面的抽气速率,此时为 $5\text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$;

$$f(T) = 10^{13}\exp(-E/RT)$$

R ——气体常数, $8.314[\text{J/mol} \cdot \text{K}]$;

T ——热力学温度 $[\text{K}]$;

E ——脱附活化能 $[\text{J/mol}]$ 。

把各种脱附活化能 E 代入式(16-4)中,就可以得到 20°C 下的压力—时间曲线,图 16-2 为在吸附一个分子层的器壁上具有不同脱附活化能的气体,在 20°C 下出气时容器内压力变化曲线。 $E \leq 63\text{kJ/mol}$ 的吸附气体,在室温下很快被抽走。 $E > 126\text{kJ/mol}$ 的吸附气体分子被束缚得很紧,其脱附量对压力的影响很小。只有 $75\text{kJ/mol} < E < 105\text{kJ/mol}$ 的吸附气体,在室温下可以在较长时间内引起较高的分压力。例如在上述假定系统中,在室温下 11d 内均能产生 $7 \times 10^{-10}\text{Pa}$ 的分压力。如果在短时间内可以产生更高的分压力,如 $E = 92\text{kJ/mol}$ 的气体,在室温下几百小时仍保持 10^{-7}Pa 的分压力,这对获得极高真空来说是一个困难。为了克服这个困难,系统必须烘烤。烘烤对表面脱附的影响可用图 16-3 直观地表示出来。假定装置容积为 1L , 表面积为 100cm^2 , 抽速为 1L/s , 仅考虑单分子层吸附并假定脱附的分子不再被吸附,容器在 22°C 下,压力达到 10^{-8}Pa 、 10^{-13}Pa 所需要的时间和 E 的关系用图 16-3(a) 表示, $E \leq 84\text{kJ/mol}$ 的气体容易脱附, $E \geq 167\text{kJ/mol}$ 的气体脱附速度很慢。为了获得低于 10^{-13}Pa 以下的压力,只要

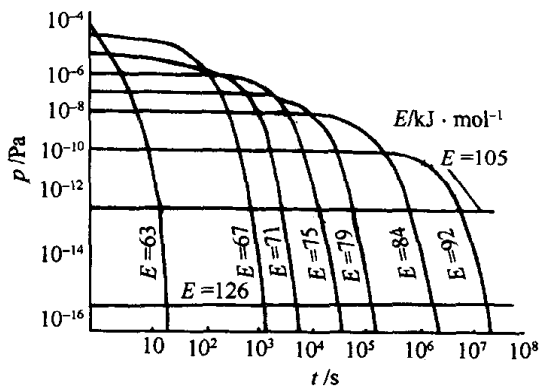


图 16-2 吸附性气体的压力时间曲线
(容积 100L, 内表面面积的粘着概率为 0.5)

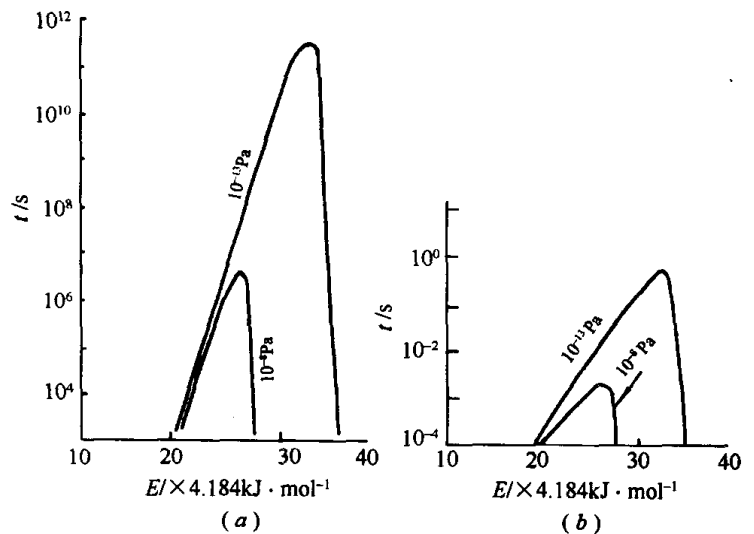


图 16-3 抽气时间和脱附活化能的关系
(a) 22°C 时; (b) 300°C 时。

把容器加热到 300℃ 短时间烘烤,然后冷却到室温,即可得到图 16-3(b)的结果。由此可以看出,去除表面吸附气体,适当地烘烤是最有效的办法。由于烘烤会使气体脱附的量降几个数量级,因此,烘烤的均匀性是非常重要的。在物理吸附的情况下,脱附活化能是最低能级和势能零点的差,如图 16-4 所示,它等于吸附热。表 16-1 给出了几种常用吸附剂吸附某些气体的吸附热。

化学吸附的情形属于另外一种,它们有以下关系

$$E_d = H_c + E_a \quad [\text{J/mol}] \quad (16-5)$$

式中 H_c ——化学吸附热, [J/mol];

E_a ——化学吸附所需的活化能, [J/mol];

E_d ——分子的解离能, [J/mol]。

固体表面吸附的气体还可以用在 10Pa~1Pa 下惰性气体的辉光放电来清除,也可以用电子、离子轰击材料而使吸附气体放出。也有用光辐照、超声波振动使固体表面吸附的气体脱附。

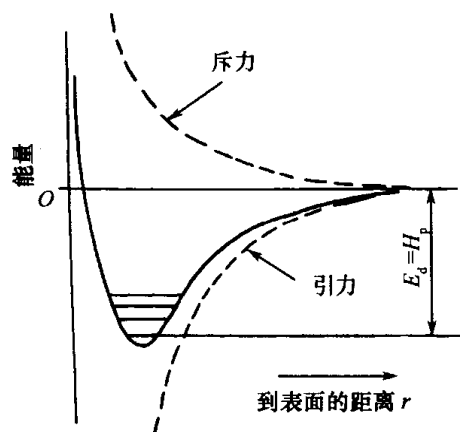


图 16-4 表面吸附分子的势能曲线

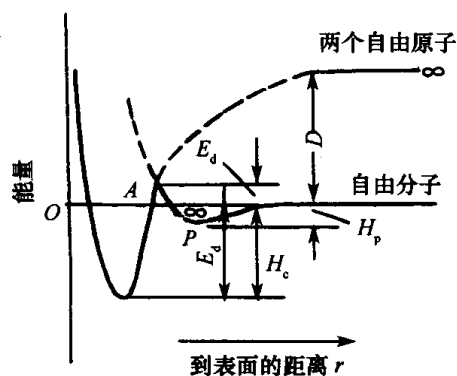


图 16-5 双原子分子解吸的势能曲线

表 16-1 物理吸附的吸附热

(单位: kJ/mol)

吸附的气体 汽化热	He	H ₂	Ne	N ₂	Ar	Kr	Xe
吸附剂	0.084	0.900	1.803	5.607	6.519	9.029	12.64
多孔玻璃	2.85	8.24	6.44	17.82	15.82		
天然活性炭	2.64	7.82	5.36	15.48	15.31		
炭黑	2.51		5.69		18.16		
氧化铝					11.72	14.48	
石墨化炭黑					10.29	13.81	17.70
钨					约 7.9	约 18.8	33.5~37.7
钼							约 33.5
钽							约 22.2

经过烘烤、放电或轰击以后,表面放出的水蒸气显著减少。不锈钢系统,烘烤前放出的气体中水蒸气占 90%。而烘烤去气彻底以后,氢气是放气的主要成分,剩余的气体尚有 N₂、O₂、CO、CO₂、CH₄ 等。氢气是金属在冶炼过程中溶解的氢向壁的真空侧扩散而放出的。CO、

CO_2 、 CH_4 是固体表面和气体间复杂的化学反应生成的。在高温下,金属中溶解的碳扩散到固体表面与金属表面的氧氢以及水蒸气发生反应可以生成 CO 、 CO_2 、 CH_4 。

实验中发现,在切断真空规的灯丝电源以后, C^{12} 峰显著减少,此时系统压力低于 $6.7 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 。尤其是水,在高温下能分解为 H_2 和 O_2 ,因而要尽量减少系统中残存的水蒸气。除了烘烤,冷冻也是减小水蒸气的主要手段。它不仅可以把表面要解吸的水蒸气冻住,也可以对水蒸气产生一定的抽速,减少空间的水蒸气。同时在较低温度下的固体表面,碳与氢、氧的化学吸附概率也将变小。因为化学吸附概率是与 $e^{-E/RT}$ 成正比的。如果系统长期暴露于大气中,为了避免水蒸气的吸附,在打开容器前,引入干燥氮气比较好。这样做了以后,在室温排气装置中,排气时间可缩短到几十分之一。系统打开前,充入氮气至数百帕压力,维持数分钟,使表面充分吸附氮气至饱和状态之后,即可充入大气。此时,由于容器壁已经充分吸附了氮气,空气中的水蒸气就很少被吸附到器壁表面上。即使吸附,结合也是很弱的。

2. 溶解气体的解吸

材料在冶炼和浇铸过程中,往往要溶解一些气体。同时放置在大气中的固体材料由于扩散,也会再溶解一部分气体。这些气体作为固体中的杂质原子在固体中进行扩散,其扩散方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (16-6)$$

式中 C ——材料中气体原子的浓度 [$\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{cm}^3$];

D ——气体分子的扩散系数 [cm^2/s].

假设初始浓度 C_0 是均匀的,式(16-6)的解为

$$C = \frac{4C_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \cos \frac{(2m+1)\pi x}{\delta} \exp \left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{\delta^2} \right] \quad (16-7)$$

δ 为固体的厚度。由表面(面积为 A)放出的浓度为 C 的气体原子(叫 C 型气体)的瞬时流量

$$Q_c = AD \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (16-8)$$

因此,由解吸 C 型气体而产生的分压力 p_c 是

$$p_c = \frac{Q_c}{S} = \frac{4AC_0D}{\delta S} \times \sum_{m=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{\delta^2} \right] \quad [\text{Pa}] \quad (16-9)$$

我们考虑一个壁厚 L 为 0.5cm 的不锈钢真空室的氢的扩散解吸。300 系不锈钢中,氢在 $200^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 范围的扩散系数已经测出。外推这个数值到 20°C , D 值约为 $2 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$; 450°C 为 $1 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$; 1000°C 为 $2 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 。1 摩尔放出的氢为 $4 \text{Pa} \cdot \text{L}$, 这相当于 $C_0 = 30.6 \text{Pa} \cdot \text{L}/\text{cm}^3$ 。常用的金属中气体的扩散系数如图 16-6 所示。

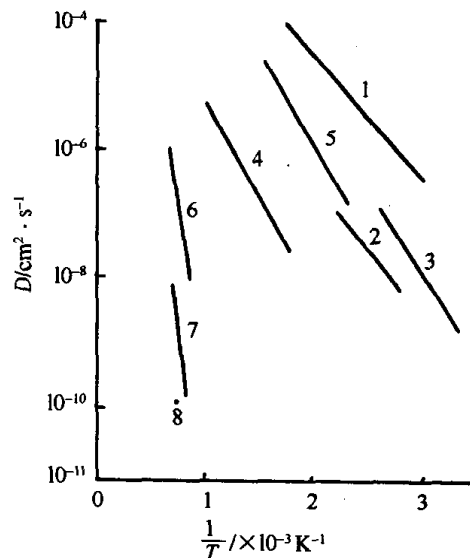


图 16-6 金属中气体的扩散系数

- 1— H_2 -Pd; 2— H_2 -Ni; 3— H_2 -Fe;
4— H_2 -300 系不锈钢; 5— H_2 -400 系不锈钢;
6— N_2 -Fe; 7— O_2 -Ni; 8— O_2 -Fe。

在上述假设条件下由式(16-9)计算的结果表示在图 16-7 和图 16-8。

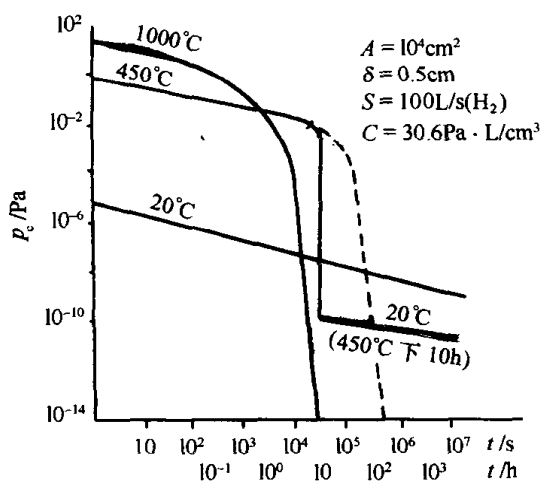


图 16-7 计算的 300 系不锈钢系统扩散放出的氢的分压力

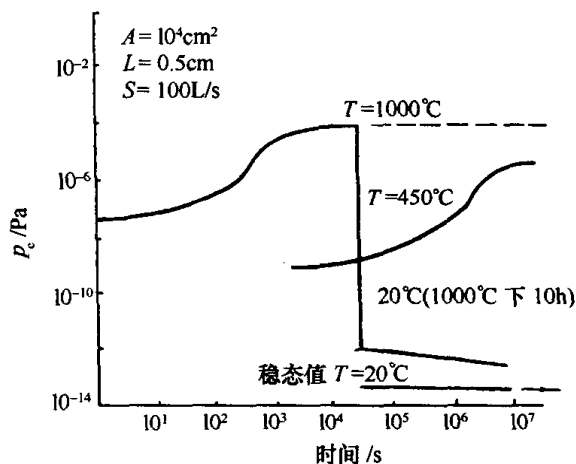


图 16-8 计算的大气中氢透过 300 系不锈钢系统的分压力

真空室的分压力 p_c , 在室温下由于从未烘烤的不锈钢中扩散放出的氢, 在几千小时内可以维持比较高的压力。若温度升到 450°C, 压力在大约 10h 内维持高的水平, 然后很快降到一个非常低的水平。在压力为 p_1 的时候停止加热并降到室温以后, 在室温下达到的压力 p_2 为

$$p_2 = \frac{D_2}{D_1} p_1 \quad [\text{Pa}] \quad (16-10)$$

D_1 、 D_2 是高温和低温时固体内气体的扩散系数。式(16-10)是假定温度急速下降时, 固体内气体的浓度梯度保持不变, 由式(16-9)推出来的。由式(16-10)可以计算出, 如果系统在 450°C 下烘烤 10h 后再降到室温时, 系统内氢的分压变为 1×10^{-10} Pa。根据这个理论, 为使室温下氢的分压 p_c 为 1×10^{-8} Pa, 必须要求在 450°C 下一直烘烤到氢的分压为 1×10^{-7} Pa 才行, 这需要 64h。在 1000°C 下仅需要烘烤 4h。由于解吸要放出气体, 特别是氢, 所以要想在不锈钢装置内得到非常低的压力, 是比较困难的。为解决氢分压的问题, 冷冻是一个可取的办法, 因为在低温下氢的扩散系统比室温大大地减小了。另外, 材料的选择也是非常重要的。有人建议用铝制造真空容器。但是用不锈钢作真空系统的材料是很普遍的。这是由于不锈钢表面覆盖了一层很结实稳定的氧化铬薄层, 表面放气比较少。设计不锈钢系统时, 未烘烤时出气率数据取 10^{-6} Pa · L/(cm² · s) ~ 10^{-7} Pa · L/(cm² · s), 烘烤后可达 10^{-10} Pa · L/(cm² · s) ~ 10^{-11} Pa · L/(cm² · s)。不锈钢的加工性能及焊接性能也很好, 具有做为真空材料的优良的性能。图 16-9 给出了脱脂后的不锈钢的放气特性。烘烤后放气的主要成分是氢。加工前, 不锈钢原材料要放在真空退火炉中, 在 700°C 下进行 10h 的真空脱气处理, 可大大减低氢的放气率, 这对极高真空容器的制造来说, 是非常必要的。

由上面讨论可知, 烘烤前后材料的放气量差几个数量级。烘烤温度的均匀性是很重要的。为使系统的总放气量为原来的 10^{-3} , 整个系统未烘烤的表面积不应超过系统总面积的 1/1000。烘烤的温度不需要太高, 低温烘烤完全可以去掉表面吸附的气体, 如图 16-10 所示。

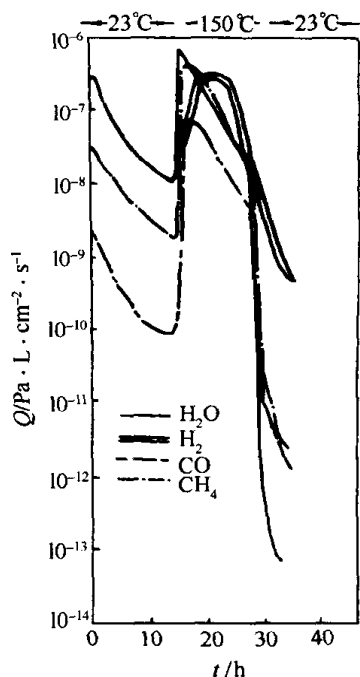


图 16-9 脱脂不锈钢中
水、氢、一氧化碳、甲烷的放气速率

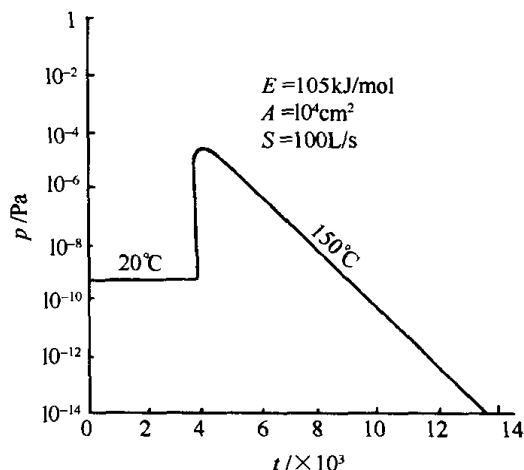


图 16-10 低温烘烤时,
压力与时间的关系曲线

3. 材料的蒸发和分解

极高真空系统对材料的选择很重要。首先要考虑选材的蒸气压低,否则会造成大的气载。如黄铜含有蒸气压高的锌,低熔合金含有锡铅等,油脂、塑料、橡胶等更不宜采用。其次要考虑材料的热稳定性。

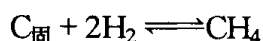
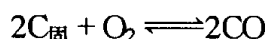
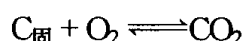
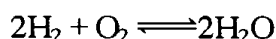
高分子化合物热稳定性差,易氧化。如油脂在高温下热解,放出氢及碳氢化合物。极高真空系统用的金属材料最好选不锈钢,尽量不用铜及铜合金,因为暴露在大气中的铜和铜合金,在高温下氧化得很快。真空系统内必须使用铜时,最好用真空冶炼的铜,避免用电解铜。用铜管作水冷管或作传输低温液体管时,因反复烘烤而发生氧化,容易引起故障。钨、钼、钽最好也用真空冶炼的,放气量小。其它材料使用前也应进行真空预出气处理。由于同一理由,焊接时最好不采用铜焊、银焊,因这些焊接工艺中要使用一些蒸气压较高的焊药。

有没有比不锈钢更适宜的极高真空系统的材料呢?铝已被用来制造加速器等大型真空装置。但铝材由于多孔性含有较多的气体、高温强度较低、比较难以焊接等缺点,所以用作真空容器的局限性很大。然而,铝在室温下对氢的渗透率约为 300 系不锈钢的 10^{-7} ,因而在不锈钢上蒸镀 $10\mu\text{m}$ 厚的铝膜,使氢渗透的放气量减小 10^5 倍。铝复合在不锈钢上可用做电子管电极材料。只要充分注意冶炼和锻造,铝有希望成为极高真空系统用的材料。

4. 气体和固体表面进行化学反应而生成的气体

在极高真空领域,气体和固体表面相互作用,以及固体内部溶解的气体 and 固体表面相互作用而发生化学反应产生的气体是一个重要的气源。不锈钢中的碳扩散到金属表面,与氧发生化学反应而生成一氧化碳。在真空系统中,加热金属灯丝后,水蒸气、一氧化碳及甲烷的分压增加了。这些气体的增加与氢的存在有关。降低氢的分压以后,这些气体的分压随着也降低。由于氢是分解成原子态扩散到金属内部的,化学性又活泼,在金属内部和表面容易起化学反应。真空系统内,在金属壁和玻璃壁上能同时进行多种化学反应。各种材料的历史和使用条件不同,化学反应生成的气体也不同。在极高真空情况下, H_2 以外的气体和 H_2 的存在有一定关系,因此,减小 H_2 的分压仍然是主要的。

有人用热化学平衡理论处理真空系统的残余气体的相互作用,建立了由它们引起的平衡压力方程式。假定发生下列化学反应



然后用热力学的方法求出这些反应产生的气体的平衡分压力,这是处理真空系统残余气体的一个新的尝试。

利用系统内或表面上发生化学反应的事实,可以用来减少难以排除的气体,即通过化学反应将难以排除的气体转变为易于排除的气体。村上义夫提出把残余的 H_2 氧化成水蒸气,然后用液氮冷阱把水蒸气抽除掉,就是这方面的一个努力。

(四) 渗漏

当固体材料放在气体中时,周围的气体分子就会溶解在固体表面层。它和固体内原来溶解的气体不同。真空容器器壁两侧气体压力不同,其溶解的气体分子浓度也不同。浓度和压力有以下关系

$$C = kp^n \quad (16-11)$$

式中 C ——器壁表面溶解的气体分子浓度;

k ——气体的溶解度;

p ——环境气体的压力;

n ——离解度,分子不离解时 $n = 1$,离解为原

子态时, $n = \frac{1}{2}$ 。

当器壁两侧的浓度不同时,气体分子就由浓度大的一侧向浓度小的一侧扩散,最后到容器内壁放出,这个过程,我们称之为气体的渗透。该过程示于图 16-11。

假定器壁两侧的压力分别为 p_1 和 p_2 ,器壁渗透面积为 A 。在平衡状态下,器壁两侧溶解气体的浓度分别为 $C_1 = kp_1^n$, $C_2 = kp_2^n$ 。按扩散方程,在稳态下由浓度差引起的质量流量

$$Q = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (16-12)$$

$$\int_0^d Q dx = -AD \int_{C_1}^{C_2} dC \quad (16-13)$$

$$Q = ADk \frac{p_1^n - p_2^n}{d} = KA \frac{p_1^n - p_2^n}{d} = KA \frac{p_1^n}{d} \quad (16-14)$$

式中 $K = Dk$ 称为渗透率,即在压差 10^5Pa 下,单位时间通过单位壁厚在单位面积上渗透的气体量,单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。假定容器壁的面积 1000cm^2 ,厚 0.1cm ,抽速为 1L/s 。欲获得 10^{-8}Pa 和 10^{-13}Pa 的真空度所允许的渗透率的上限值示于表 16-2。

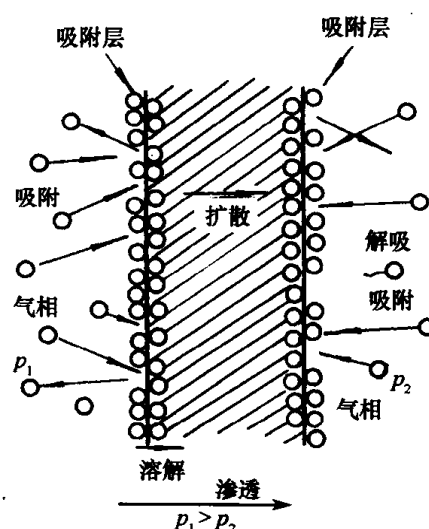


图 16-11 气体通过固体的渗透

表 16-2 保持 $1 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 和 $1 \times 10^{-13} \text{Pa}$ 允许的渗透率
(壁面积 1000cm^2 , 厚 0.1cm , 抽速 1L/s)

气 体	大气中的 分压/Pa	渗透率(压差为 10^5Pa)/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
		保持 $1 \times 10^{-8} \text{Pa}$	保持 $1 \times 10^{-13} \text{Pa}$
He	5.3×10^{-1}	2.5×10^{-9}	2.5×10^{-14}
Ne	1.9	7.1×10^{-10}	7.1×10^{-15}
H ₂	5.1×10^{-2}	2.6×10^{-8}	2.6×10^{-13}
H ₂ (离子渗透)		1.9×10^{-11}	1.9×10^{-16}
N ₂	7.9×10^4	1.7×10^{-14}	1.7×10^{-19}
N ₂ (离子渗透)		1.5×10^{-14}	1.5×10^{-19}
O ₂	2.1×10^4	6.3×10^{-14}	6.3×10^{-19}
O ₂ (离子渗透)		2.6×10^{-14}	2.6×10^{-19}
H ₂ O	1.6×10^3	8.4×10^{-13}	8.5×10^{-18}

真空系统用的非金属材料如玻璃和有机材料,其 $n=1$,溶解气体分子的渗透率和压差成正比。图 16-12 表示了玻璃和有机材料的渗透率。氦气通过玻璃渗透有较大的渗透率,它直接影响极高真空的获得,因而极高真空系统不宜用玻璃或有机材料做器壁。

金属材料中不溶解稀有气体,如氦、氖等,这对获得极高真空是有利的。双原子分子是在解离成原子后才溶解的, $n = \frac{1}{2}$, 即单位时间单位面积渗透的气体量和压差的平方根成比例。

渗透率 K 的量纲为用 $\text{cm}^2 \cdot \text{Pa}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ 表示,渗透量 Q 的量纲为 $\text{Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 表示。金属材料中气体的扩散系数、渗透率如图 16-6 及图 16-13 所示。不锈钢中氢的扩散系数和渗透率由表 16-3 给出。这些数字说明,由不锈钢中放出的气体中,主要成分是氢。特别是经很好地去气以后,99% 的残余气体为氢。因此,氢的渗透是获得极高真空的困难之一。表 16-4 和表 16-5 给出了大气中的氢通过不锈钢渗透及不锈钢放气速率的一些数据。实用上认为,氢的放气速率下限为 $1.3 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。为了减小氢的放出,把钨带加热到 1220K 以上,观察到了其中溶解的氢以原子态放出。这个现象可以认为是在极高真空中用质谱计经常测到的大量的 $\text{H}^+ \left(\frac{M}{e} = 1 \right)$ 峰发生的原因。

表 16-3 不锈钢中氢的扩散系数和渗透率

温 度	扩散系数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	渗透率/ $\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
室 温	5.0×10^{-14}	1.4×10^{-15}
300℃	3.5×10^{-8}	2.6×10^{-9}
420℃	3.8×10^{-7}	3.7×10^{-8}
570℃	3.0×10^{-6}	
635℃	9.0×10^{-6}	

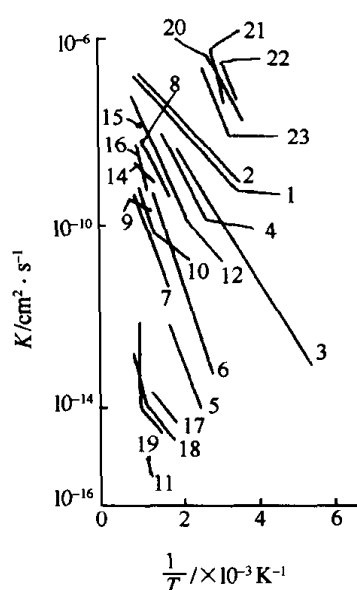


图 16-12 玻璃和有机材料渗透率

1—He-SiO₂; 2—He-VyCor7900; 3—He-派热克斯玻璃 7740;
 4—He-派热克斯玻璃 7052; 5—He-铅玻璃 G; 6—He-1720 玻璃;
 7—He-97% 铝陶瓷; 8—He-高温陶瓷 9606; 9—Ne-SiO₂;
 10—Ne-VyCor; 11—Ar, O₂, N₂-SiO₂; 12—H₂-SiO₂;
 13—H₂-SiO₂; 14—D₂-SiO₂; 15—H₂-派热克斯玻璃;
 16—N₂-SiO₂; 17—Air-派热克斯玻璃; 18—Air-97% 铝陶瓷;
 19—Air-高温陶瓷; 20—He-尼纶; 21—Ar-尼纶;
 22—H₂-尼纶; 23—N₂-尼纶。

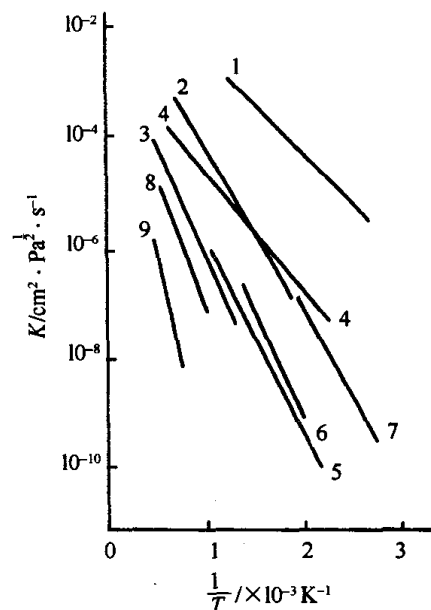


图 16-13 金属材料的渗透率和温度倒数的关系

1—H₂-Pd; 2—H₂-Ni; 3—H₂-O; 4—H₂-Fe;
 5—H₂-Cu; 6—H₂-300 系不锈钢; 7—H₂-400 系不锈钢;
 8—N₂-Fe; 9—N₂-Mo。

表 16-4 大气中的氢通过不锈钢的渗透^①(计算值)

条 件	单位时间通过单位面积进入真空中的氢/L·cm ⁻² ·s ⁻¹
室温, 正常状态	1×10^{-17}
室温, 从一个表面暴露大气开始约 100a 以内 ^②	1×10^{-21} 以下
加热到 300℃, 冷到室温渗透达到稳态	3.3×10^{-17}
氢的渗透, 300℃, 稳态	2.3×10^{-11}
加热至 420℃, 冷到室温达到稳态	4.2×10^{-17}

注: ① 不锈钢中氢初始浓度为 0, 板厚 2mm, 大气中的氢分压 5.3×10^{-2} Pa;
 ② 非稳定状态

表 16-5 不锈钢的放气速率^① (单位: Pa·L·cm⁻²·s⁻¹)

试件处理条件	测定温度 /℃	H ₂	H ₂ O	CO-N ₂	O ₂	CO ₂
360℃ 加热抽气, 总计 45h	24	3.5×10^{-10} 3.1×10^{-10}	— ^②	—	—	—
同上	100	2.8×10^{-9}	—	$[6.3 \times 10^{-13}]^{\text{③}}$	—	—

(续)

试件处理条件	测定温度 /℃	H ₂	H ₂ O	CO-N ₂	O ₂	CO ₂
同上	0	1.7×10^{-10}	—	—	—	—
大气中放置 3h 后, 40h 抽气	19	3.6×10^{-10}	8.5×10^{-10}	2.5×10^{-10}	2.9×10^{-10}	1.6×10^{-10}
同上,再在室温抽气 4d	19	3.5×10^{-10}	1.3×10^{-10}	8.5×10^{-11}	1.1×10^{-11}	1.1×10^{-10}
360℃ 加热抽气 24h	19	1.3×10^{-10}	—	3.5×10^{-13}	—	—
注:① $\phi 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的容器,壁厚 2mm,内表面积 $1.1 \times 10^3 \text{cm}^2$; ② —表示放气速率 $< 10^{-14} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; ③ []表示可以测定,但精度差一些						

(五) 返流

泵体内的气体或蒸气流返回到真空室里的现象叫做返流。在极高真空系统中,由于系统的极限压力低,返流对极限压力的影响尤为显著。对极高真空系统来说,所有的泵都是气源。为了减少泵对真空室的返流,在泵和真空室之间常常连接一个阱以阻挡气体的返流。假定阱的捕获效率为 α_r ,放气量为 Q_p ,泵的抽速为 S 。那么泵经过阱返流的气体所产生的压力为 $p_{\text{泵}}$

$$p_{\text{泵}} = \sum_i Q p_i \frac{(1 - \alpha_{ri})}{S_i} \quad (16-15)$$

对真空室的返流量为

$$Q_{\text{返}} = p_{\text{泵}} U_{\text{泵} \rightarrow \text{室}} = \sum_i \frac{Q p_i (1 - \alpha_{ri})}{S_i} U_{\text{泵} \rightarrow \text{室}} \quad (16-16)$$

$U_{\text{泵} \rightarrow \text{室}}$ 为泵到真空室间的流导。要减小返流量 $Q_{\text{返}}$,降低 $P_{\text{泵}}$,就要增加阱的捕获系数 α_r 。冷冻钛升华阱就是一种捕获效率较高的阱。

由于目前泵的极限压力都不是太低。因此,极高真空系统中,阱的设计是极为重要的,设计的重点在提高阱的捕获效率 α_r 。捕获效率为 α_r 的阱,分子穿过阱面跑到真空室的概率为

$$1 - \alpha_r = G(1 - \alpha) \quad (16-17)$$

式中 G 是阱的几何因子; α 为粘着系数; G 决定于气体分子通过阱时发生的那一次弹性碰壁的概率。若阱的设计能保证所有气体分子都在和阱发生至少一次碰撞后才允许通过,那么就有

$$1 - \alpha_r = G(1 - \alpha)^2 \quad (16-18)$$

依次类推。 G 一般是 0.01 的数量级。由式(16-18)可以看出,要提高阱的捕获效率必须从两个方面着手:① 增加气体分子和阱壁的碰撞次数,减小几何因子 G 值。但这使得阱的流导变小。只能在兼顾阱的流导的情况下减小 G ;② 增大粘着系数 α 。由于它是 $(1 - \alpha)^2$ 的关系,效果显著。主要途径是降低阱的温度和涂以吸气材料。冷冻钛升华阱就是一种深冷吸附阱。如果 $\alpha = 0.99$,由式(16-18)得阱的穿过率为 $1 - \alpha_r = 10^{-6}$ 。当 $\alpha = 0.999$ 时, $1 - \alpha_r = 10^{-8}$ 。如果阱只允许两次碰撞后才能通过,则扩散泵抽气系统工作期间油的穿过引起的分压力将低于

10^{-13}Pa 。

在使用扩散泵的真空系统中,还有一个反扩散的问题。在扩散泵中气流不仅发生在抽气方向上,而且有少量的气体分子沿蒸气流的反方向流动,发生由低真空端向高真空端的扩散,这种现象叫做反扩散。反扩散的程度与扩散泵的压缩比有关,压缩比越大,反扩散越小,而压缩比又与气体质量有关。轻的气体,压缩比 $P_{\text{出}}/P_{\text{入}}$ 要比重的的气体小得多。对四级扩散泵, $P_{\text{出}}/P_{\text{入}}$ 约为 $10^7 \sim 10^6$ 。对高真空系统来说,反扩散的影响并不重要,但对超高真空系统就必须考虑反扩散对极限真空的限制。如果采用扩散泵获得极高真空,就要将两个扩散泵串联起来,这样前级扩散泵降低了主扩散泵的出口压力,因而降低了主泵的反扩散。实验证明,用这种方法可以改善极限真空。

三、获得极高真空的方法

极高真空的获得是建立在超高真空技术之上的。在非常低的压力下,维持泵的抽气作用是个重要问题。由于多数真空泵在超高真空范围内抽速就开始降低,因此许多真空泵在极高真空范围其抽气作用已经停止或者大大地减小了。选用一些在非常低的压力下仍然有实际抽速的泵是能否获得极高真空的关键。有些泵(如油扩散泵)的抽速并不减小,但由于工作介质、材料放气等因素,使得要获得低于泵的极限压力的工作压力非常困难。为此使用这类泵时,在利用它抽气的同时,也要用阱阻挡泵的返流。

① 扩散泵的优点在于对惰性气体有较好的抽气作用。有人测定扩散泵在非常低的压力下(至少到 10^{-13}Pa),对氦的抽速仍保持不变,扩散泵对付惰性气体是有效的。因此,尽管扩散泵是有油的泵,仍有许多极高真空系统用它作为主泵。从文献报导来看, 10^{-12}Pa 以下的系统几乎都采用了扩散泵。但是扩散泵返流引起的油的污染限制了它的应用。影响扩散泵系统极限压力的另一个因素是氢的压缩比。图 16-14 给出了扩散泵的入口压力和出口压力的关系曲线。如果泵液采用无油液体,使用扩散泵是获得极高真空的很理想的抽气手段之一。

② 涡轮分子泵对所有气体都能抽气,且对分子量大的气体其压缩比也大,它是一种理想的清洁泵。影响分子泵极限压力的因素主要是入口端泵体内表面和转子零件表面的材料放气。它对轻的气体压缩比小,又不容易把抽速做得很大,这就限制了它的更广泛的应用。目前的极高真空系统尚没有用分子泵做主泵的。

③ 溅射离子泵在 10^{-8}Pa 以下时抽速降低,甚至“灭火”,停止抽气。这是由于在极低压力下自由电子密度减小,在潘宁区内不产生放电。有人提出利用 β -射线源放出的电子射线来增加电子密度,实验证明在低于 10^{-8}Pa 的压力下仍有抽气作用。但泵本身允许的烘烤温度低,阳极格子放气面积大,泵工作时极限压力低于 10^{-10}Pa 是困难的。

④ 冷冻升华钛是指将钛膜蒸发在 77K 以下的冷面上。它具有大的抽速及低的极限压力。它在极高真空中工作时,由于加热放出大量气体,钛膜的饱和时间很长,泵主要工作在加热蒸发以后的冷态,故极限压力低。最近有人测定了钛膜的解吸压力,证明解吸压力在室温下低于 10^{-10}Pa ,如图 16-15 所示。该泵的优点是结构简单,抽速大,尤其是容积泵,在容器的周围镀上钛膜,周围都是吸气膜,接近一个分子沉的环境。它的作用不仅是抽气,而且还有减小放气和防止返流的作用,既有泵的作用又有阱的作用,是空间模拟器和极高真空获得中不可少的泵。低温下钛膜对氢有较大的抽速,而不锈钢系统烘烤后的残余气体主要是氢。缺点是对惰性气体抽速很小,因此必须和其它泵配合。

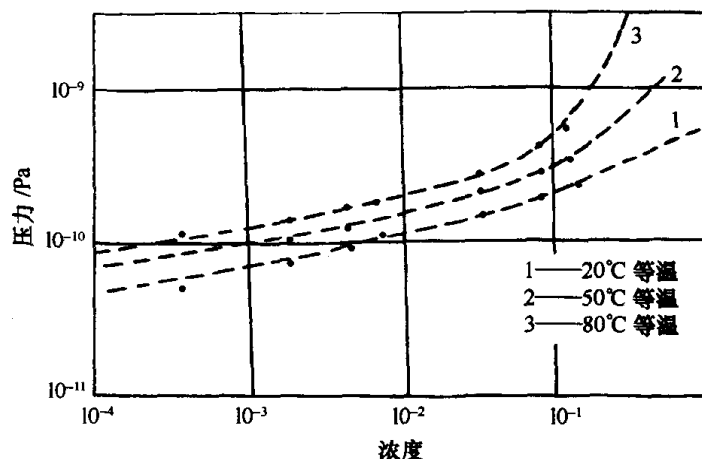
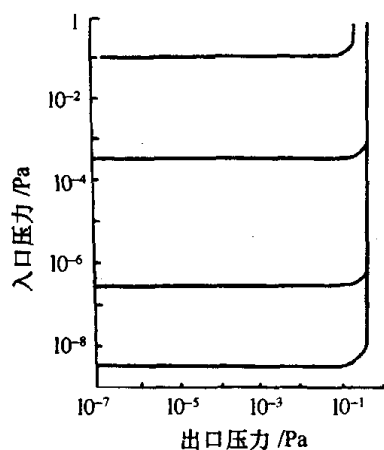


图 16-14 入口压力和出口压力的关系 图 16-15 在三种温度下, 钛吸附氢的浓度和解吸压力的关系

使用升华钛泵时, 一个重要问题是钛吸附氢以后的解吸压力。对极高真空系统来说尤为重要。B. Aobry 对此进行了研究, 他的实验中放气率为 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 预真空是 $5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, 钛升华后变为 $3 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 。钛是在室温下一次沉积的, 每次蒸发量为 $6 \times 10^{-5} \text{ g}$ 。大约相当于两个单分子层。

根据热力学第二定律, 克劳修斯—克拉伯隆积分方程完全由固体中的氢和气态的氢处于平衡而建立, 这个关系式是

$$\lg p = -\frac{\Delta H}{RT} + C \quad (16-19)$$

式中 p 是温度为 T 的分解压力, R 是摩尔气体常数, C 是常数, 依赖于浓度, 它变化一个量级时, 压力 p 的变化很大。钛吸附氢的极限由这个关系式给出, 不同浓度的曲线由图 16-16 给出。图中没有出现极限情况。实验中发现, 在三个温度下 (20°C , 50°C , 80°C) 都发现有这个极限。斜率的值决定于氢的分解热 $\Delta H (\text{kJ/mol})$, 计算给出了室温下氢的值是 16.7 kJ/mol 。 ΔH 随浓度的绝对值很慢地增加, 把此结果和 Gibb, Mcsharry 的结果进行比较, 能给出钛化氢的分解压力。把结果表示为等温的, 如图 16-15 所示。

根据这个实验, 能够得出以下结论: 在氢的浓度低于 10^{-2} 时, 利用钛化学吸附氢可获得 $(5 \sim 9) \times 10^{-11} \text{ Pa}$ 的极高真空, 相当于 20°C 和 80°C 的温度, 浓度提高到 0.5 时, 分解压力大约从 $3 \times 10^{-10} \text{ Pa} (20^\circ\text{C}) \sim 3 \times 10^{-8} \text{ Pa} (80^\circ\text{C})$ 。如果能够外推, 在液氮温度下, 认为钛化学吸附氢的分解压力是可以忽略的。

⑤ 弹道钛泵对惰性气体有一定抽速, 但由于有热丝存在, 极限压力为 10^{-9} Pa 范围, 且抽速不易做得很大, 经常被升华泵和溅射离子泵代替。

⑥ 低温冷冻泵通过加大冷冻吸附面可以获得很大的抽速, 对于极高真空的获得几乎是不可少的抽气手段。由于它在真空系统中不使用含油工作液体, 是清洁的。冷冻泵抽气饱和和以后通过周期性的再生手段便可以恢复抽气能力。目前低温泵在极高真空系统应用方面有以下几种:

a. 冷凝泵。当一个中性气体分子粘附到一个低温表面并失去运动动能, 被束缚于表面之后, 即认为它被冷凝。系统的平衡压力取决于液体(或固体)的蒸气压。一般气体的蒸气压见表 16-6。蒸气压原则上与所冷凝的气体量无关, 因此, 在选择一个适当温度之后, 冷凝泵的能力是不受限制的。只是当冷凝层增厚致使暴露的表面温度升高以后才限制了它的吸气。该类泵的优点是抽速大, 在极高真空系统中不易饱和。若整个容器壁是冷冻壁的话也降低了壁的

表 16-6 气体的蒸气压、蒸发热和熔点

气体的 种类	处于各蒸气压下的平衡温度/K											蒸发热 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	熔点 $^{\circ}\text{C}$
	10^{-11}Pa	10^{-10}Pa	10^{-9}Pa	10^{-8}Pa	10^{-7}Pa	10^{-6}Pa	10^{-4}Pa	10^{-2}Pa	1Pa	10^2Pa	10^4Pa	10^5Pa	
H_2	2.67	2.88	3.01	3.21	3.45	3.71	4.40	5.38	6.90	9.55	11.70	20.36	-259.1
He										1.268	1.738	4.2	-269.65
Ne	5.50	5.70	6.11	6.47	6.88	7.34	8.48	10.05	12.30	15.80	18.45	27.2	-248.7
A	20.3	21.3	22.5	23.7	25.2	26.8	30.6	35.9	43.2	54.4	62.5	87.2	-189.4
Kr	27.9	29.4	30.9	32.7	34.6	36.8	42.2	49.4	59.4	74.8	85.9	120.2	-156.7
Xe	38.5	40.5	42.7	45.1	47.7	50.8	58.2	68.1	82.1	103.5	118.5	164.0	-111.6
N_2	18.1	19.0	20.0	21.1	22.3	23.7	27.0	31.4	37.5	47.0	54.0	77.3	-210.0
O_2	21.8	22.8	24.0	25.2	26.6	28.2	31.9	36.7	43.3	54.1	62.2	90.15	-218.7
OO	20.5	21.5	22.66	23.8	25.2	26.7	30.3	35.0	41.5	51.1	57.9	81.0	-205.0
CO_2	59.5	62.2	65.2	68.4	72.1	76.1	85.7	98.1	114.5	137.5	153.5	194.7	-57.5
NH_3	70.9	74.1	77.6	81.5	85.8	90.6	102.0	116.5	136.0	163.0	181.0	240.0	-77.7
CH_4	24.0	25.3	26.7	28.2	30.0	32.0	36.9	43.5	52.9	67.3	77.7	111.6	182.5
H_2O	113.0	118.5	124.0	130.0	137.0	144.5	162.0	185.0	215.0	256.0	284.0	373.0	0

出气。缺点是对 He、Ne、H₂ 等三相点低的气体来说,饱和蒸气压高,粘着系数小。克服这些缺点的办法之一就是降低冷面温度,因此便出现了绝对冷凝泵。

b. 冷冻吸附泵。把吸气剂冷冻到低温下,发现其吸气量增大,吸附气体的粘着系数也增大。它比单独光滑金属面冷冻到同样低温下的吸气效果要好得多。通常把这种泵叫做冷冻吸附泵。众所周知,把分子筛冷冻到液氮温度下可以做清洁无油的前级真空泵。同样,假定把分子筛冷却到 20K 以下,在平板的冷冻面上能有效地抽除 He、Ne、H₂。在 20K 下对氢的吸附概率为 1,在 5K 下对氮也是 1。把 5A 分子筛冷却到 4.2K,用它抽氮是有效的。在 $10^{-5}\text{Pa} \sim 10^{-6}\text{Pa}$ 范围给出的吸附概率为 0.7~0.91,其吸附概率随分子筛温度变化曲线,如图 16-17 所示。

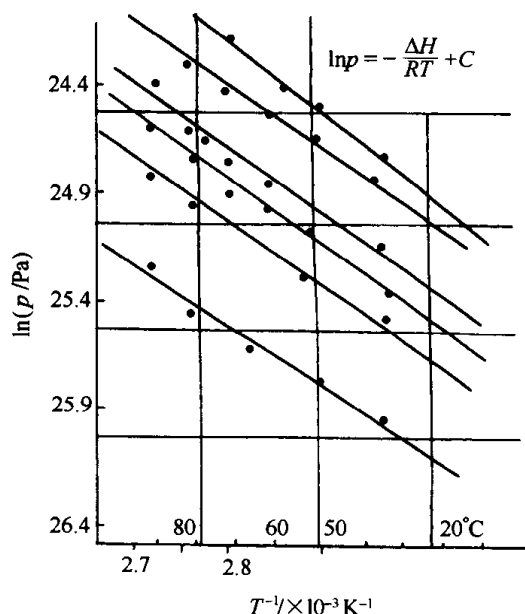


图 16-16 不同浓度下钛吸附氢的解吸压力

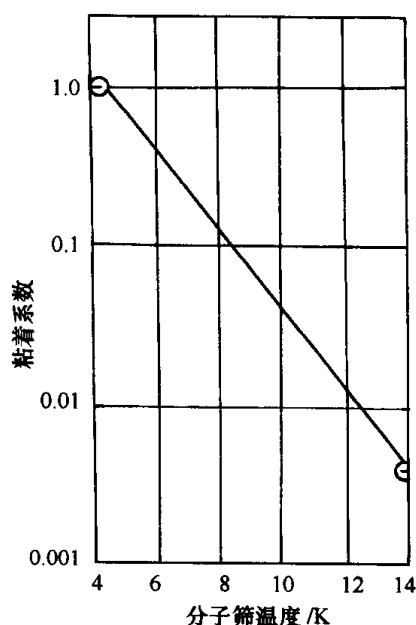


图 16-17 氮在分子筛吸附面上的冷冻吸附抽气

一般地,在同一温度下,冷冻吸附泵比冷凝泵有更大的粘着概率。同一吸气剂在低温下比常温的粘着系数也大得多。钛膜在室温和低温下的吸附特性见表 16-7。在极高真空获得和应用中,冷冻吸附泵几乎是不可缺少的抽气手段。如果将整个容器内壁做成冷冻吸附泵,就可以近似空间分子沉环境,极高真空的应用之一也就是获得一个分子沉的环境,减少器壁放出的气体返回到实验物的概率。

c. 深冷霜吸附泵。利用比较容易凝固的气体冷冻成霜层,在低温下把冷冻的气体抽去的泵叫深冷霜吸附泵。若固化层很慢地生长,可以得到一个微孔表面,Yuferor 和 Kobzegv 已经在 2K~4.2K 下用 H₂、Ne、CH₄、N₂、O₂、Xe、Kr、Ar、CO₂ 的冷凝霜抽氮。

d. 催化吸气泵。村上利用催化反应的原理,提出把残余气体中的氢、氧化成水蒸气再予以排除。排除氢的泵是由一个冷到液氮温度下的阱和反应器组成。在反应容器中高温的钨丝和钨丝上的 H₂ 解离成原子态氢,和氧化亚铜表面作用生成水蒸气。水蒸气由液氮阱捕获,使 H₂ 的分压变得很低。对 H₂ 的抽速是和丝的面积、H₂ 的解离概率以及原子态氢和氧化亚铜的反应概率的乘积成比例。当然这种泵必须和其它泵(如扩散泵、溅射离子泵、冷冻泵等)组合使用。用化学催化机理制做吸气泵是应该注意的方向,特别是在极高真空范围更有现实意义。村上提出的催化泵结构如图 16-18 所示。有人提出了一个 5000L/s 的催化泵的设计方案。它的缺点是高温灯丝的存在限制了极限压力的降低。抽速也不易做得很大。

表 16-7 钛膜对氮、氢、氘的吸附特性

蒸气温度 /测定温度	20℃ / 20℃		20℃ / -190℃		-190℃ / 190℃		-190℃ / 20℃		膜厚 /nm
参 数 气 体	吸附量 / 1×10^{14} 个 分子·cm ⁻²	起始吸 附速率 ^① /L·cm ⁻² ·s ⁻¹	吸附量 / 1×10^{14} 个 分子·cm ⁻²	起始吸 附速率 ^① /L·cm ⁻² ·s ⁻¹	吸附量 / 1×10^{14} 个 分子·cm ⁻²	起始吸 附速率 ^① /L·cm ⁻² ·s ⁻¹	吸附量 / 1×10^{14} 个 分子·cm ⁻²	起始吸 附速率 ^① /L·cm ⁻² ·s ⁻¹	
N ₂	9.2	1.3	17	2.6	68	2.7	—	—	17.0
N ₂	17.5	1.4	18	2.3	27	2.4	27	2.0	6.0
H ₂	78	0.47	8.4	0.5	575	10	—	—	35.0
H ₂	22	0.23	3.5	0.1	57	10	—	—	4.4
H ₂	76	0.3	—	—	72	7.5	—	—	4.4
H ₂	—	—	6.8, 7.0	0.3, 0.23	—	—	—	—	16.0
D ₂	58	0.19	—	—	20	4.2	—	—	1.0
D ₂	88	0.35	—	—	34	7	—	—	6.2
D ₂	—	—	—	—	18	4.2	—	—	6.2
D ₂	110	5.3	18, 20	1.0, 1.0	—	—	—	—	16.0

注: ① 20℃ 的理论抽速: N₂: 11.8; H₂: 44.0; D₂: 31.1

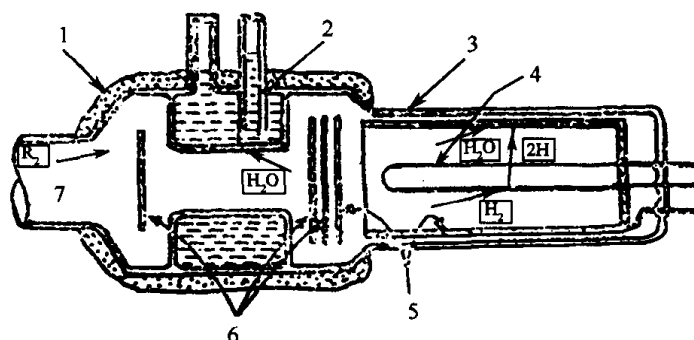


图 16-18 一种催化泵的结构图

1—绝热层; 2—液氮阱; 3—玻璃容器; 4—金属灯丝; 5—铜板上的 Cu₂O; 6—反射屏; 7—泵入口。

四、获得极高真空的技术

(一) 油扩散泵系统获得极高真空的质谱分析

兰州物理研究所在深入研究扩散泵与机械泵返流机制的基础上, 为降低泵液返流做了大量工作。例如, 扩散泵采用“挡油帽—障板—阱”的常规方法, 已使泵本身的极限压力由 10^{-5} Pa 提高到 10^{-8} Pa, 返流率由 1×10^{-6} g/cm²·min ~ 1×10^{-7} g/cm²·min 降低到 $< 1 \times 10^{-10}$ g/cm²·min。高效率的液氮冷冻钛升华阱的使用, 进一步降低了泵液返流, 获得了 $\leq 6 \times 10^{-11}$ Pa 的超清洁极高真空环境。

利用机械泵、扩散泵、障板和液氮阱组成的典型的油扩散泵系统, 借助四极质谱计, 分析在不同运转条件下系统的剩余气体, 估算障板、阱降低泵液返流的效果和烘烤对去除泵液污染的

作用,同时研究了真空浸泡、充氮保护这一简单有效的降低放气和污染的运转方法,从而,加深了对污染成分、来源和降低污染方法的认识,有助于了解和控制系统中的剩余气体。

1. 实验系统

油扩散泵系统获得极高真空时,气体质谱分析的实验系统如图 16-19 所示。液氮阱以上的部件由不锈钢制成,金丝密封。冷阱下法兰以下用丁腈橡胶密封。扩散泵泵体为碳钢,使用 275 硅油,机械泵使用泵油。四极质谱计为 Balzers 产 QMG-101 型。总压力由 B-A 规管读取。

2. 典型油扩散泵系统的剩余气体组分

图 16-20 是系统不烘烤、障板和冷阱均不冷冻时、全压力为 2.5×10^{-4} Pa 时的质谱图。本系统剩余气体主要由四部分组成。

① 系统表面放气。主要是水、氢、氮和一氧化碳等,其主峰分别为 $m/e = 18, 2, 28$ 。

② 机械泵的返流。机械泵返流成分的质谱分析表明,机械泵油(化学结构式: $\text{CH}_3 - n\text{CH}_2 - \text{CH}_3$)的裂解峰族为 $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$, 返流主峰为 $m/e = 43$ 。图 16-20 中从质量数 15 开始,质量数相差 14 的烃基(CH_2)峰族(27、29; 41、43; 55、57; 69、71; 83…)的存在,表明是机械泵的返流。

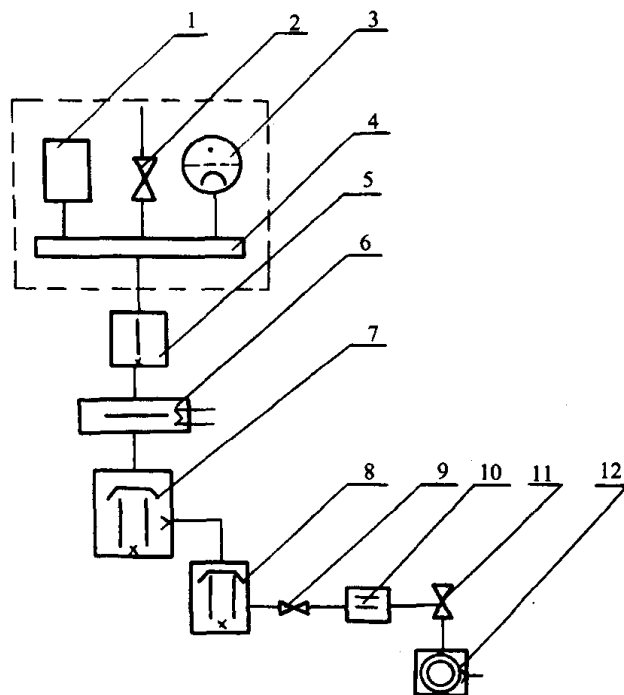


图 16-19 实验系统

- 1—四极质谱计;2—可供烤针阀;3—B-A 规;4—测量盖阀;
5—液氮冷阱;6—氟里昂人字形障板;7—主扩散泵(KY-11);
8—辅助扩散泵(KY-9);9—蝶阀;10—干燥罐;
11—电磁放气阀;12—机械泵(2X-4)。

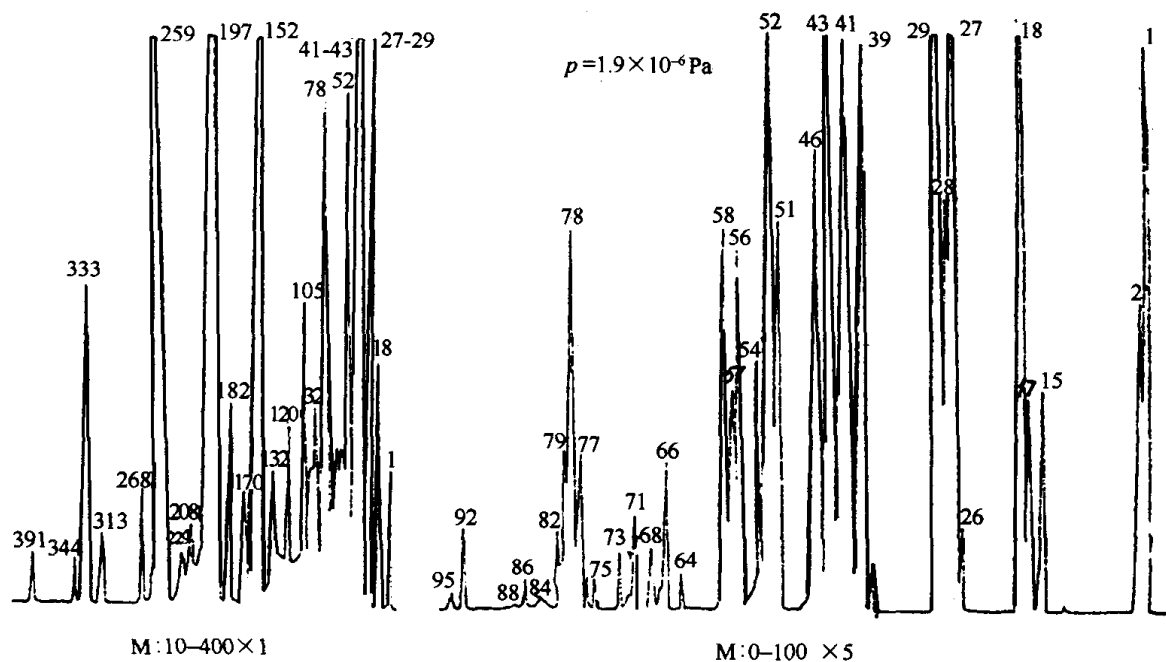
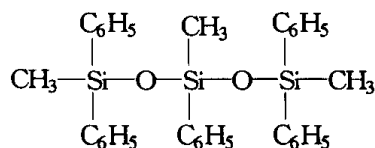


图 16-20 典型油扩散泵系统质谱图

③ 扩散泵的返流。现用扩散泵液为三甲基五苯基三硅氧烷(简称 275 硅油),化学结构式为:



在图 16-21 中为主峰 197,特有苯峰族 51、52、77、78、甲基峰 15 和大质量数碎片峰 92、105、120、152、182、197、259、333 等。

④ 其它。包括密封“O”圈、灰尘等脏物的放气和清洗用的有机溶剂。如乙醇和丙酮峰(主峰分别为 46 和 43)亦明显可见。

表 16-8 为典型油扩散泵系统阱、障板不冷冻不烘烤时剩余气体组分和分压。由于实际质谱图所包括的各种成分,其主峰和碎片峰互相重叠,而且同一质荷比的峰包含了多种成分。同时,一种成分的离子谱与系统条件、分析手段也有关,为此表 16-8 的数据仅反映了大致的比例。

表 16-8 典型油扩散泵系统剩余气体分压

剩余气体分压	表面放气	机械泵返流	扩散泵返流	其 它
百分比/%	44.8	22.6	20.9	11.7
分压/Pa	11.3×10^{-4}	5.73×10^{-4}	5.27×10^{-4}	2.95×10^{-4}

在动平衡状态下,泵液全部返流组分的压力 p 服从抽气方程 $p = Q/S$ 。 Q 为泵对容器的返流量, S 为系统对返流物的抽速(简化计算时用主峰抽速),已知系统对氮抽速约 300L/s,机械泵和扩散泵在冷阱面($\phi 200$)上的返流率分别为 $6.3 \times 10^{-7} \text{g/min} \cdot \text{cm}^2$ 和 $2.72 \times 10^{-7} \text{g/min} \cdot \text{cm}^2$ 。

3. 障板和液氮冷阱的效果

① 障板的效果。表 16-9 是在相同起始条件和运转时间下,由氟里昂障板制冷时的剩余离子峰值计算的障板对不同剩余峰的降低效果。障板制冷时进出口温度分别为 -9.5°C 和 -4.5°C 。制冷和不制冷时总压力分别为 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 和 $8 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。结果表明:氟里昂障板阻挡水蒸气和泵液返流的效果大于 90%,对重质量数的返流峰的降低效果较好。

表 16-9 氟里昂板对主要剩余气体峰的降低效果

m/e	1	2	14	16	17	18	27	28	29	43	51	52	77	78	92	120	152	197	213	259	268	333
降低的百分比/%	98.4	76.4	55.6	87	87.9	90.6	95.3	64.7	96.7	96.3	95.5	97.6	89.4	95.5	91.9	96.5	95	97.4	98	98	98.8	97.5

② 液氮冷阱的效果。图 16-21 为系统经 160°C 烘烤 6h 后,真空浸泡 14h,氟里昂障板和扩散泵同时启动,冷阱注入液氮 2h,总压为 $1 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 下的质谱图。简单质谱分析计算主要剩余气体除氢($4.6 \times 10^{-8} \text{Pa}$)、水($1.66 \times 10^{-8} \text{Pa}$)、甲烷($3.09 \times 10^{-9} \text{Pa}$)、氮和一氧化碳($2.22 \times 10^{-9} \text{Pa}$)外,泵液返流仍较严重($1.34 \times 10^{-8} \text{Pa}$)。图 16-22 是阱冷冻后 $m/e = 197$ 峰值随时间的变化(10^{-7}Pa 时阱注入液氮)。由阱注入液氮前后的质谱峰值比较表明:液氮阱降低返流的效果达 99% 以上。

4. 烘烤对去除表面污染的效果

图 16-23 是系统经 250°C , 8h 烘烤,阱加液氮 4h 后的质谱图。全压力为 $3.06 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 。在烘烤过程中氟里昂障板一直冷冻以降低返流。除 H_2 ($2.4 \times 10^{-8} \text{Pa}$)、 C ($5.06 \times 10^{-9} \text{Pa}$)、 CO 和 N_2 ($1.6 \times 10^{-9} \text{Pa}$) 外,泵液返流检测不到, H_2 约占剩余气体的 78.3%。可见烘烤对去除表面的返流污染效果是很好的。

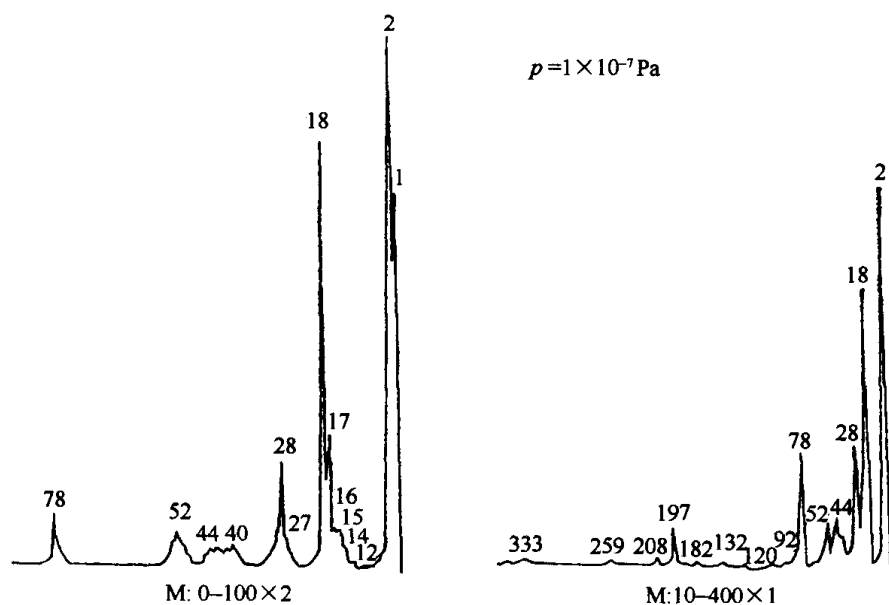


图 16-21 系统不烘烤阱注入液氮 2h 后的质谱图

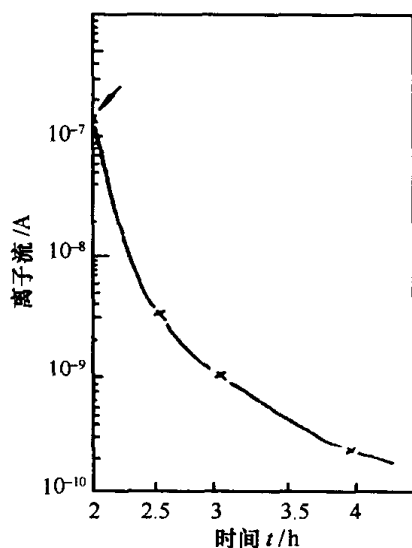
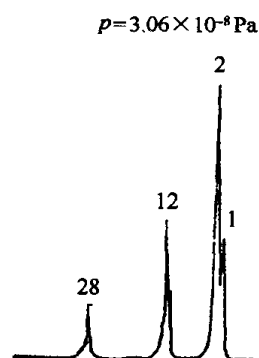
图 16-22 阱注入液氮后 $m/e = 197$ 峰随时间的变化

图 16-23 250°C, 8h 烘烤后的质谱图

实验表明:在剩余气体中, $C(m/e = 12)$ 主要来自规管和质谱计的钨灯丝。表 16-10 是全压力约为 2.5×10^{-7} Pa 下, BA 规灯丝关闭和打开情况下剩余气体谱峰离子流的变化。可见影响最大的是 C。

表 16-10 规管灯丝工作对剩余气体的影响

m/e		1	2	12	14	15	16	18	28	78
离子流 $\times 10^{-10}$ / A	灯丝开	3.5	25	0.5	0.7	2.2	2.2	2.3	7	0.6
	灯丝关	3	16	0.1	0.5	0.8	1	2.0	6	0.5
关掉灯丝后降低的百分数/%		14	36	80	28.6	63.5	55	13	14.3	17

5. 真空浸泡对降低表面放气的作用

真空浸泡是指系统在静置期间保持真空, 让表面所吸附的气体解吸而放出, 以降低放气率的方法。在没有大的漏气情况下, 主要气体负荷是表面放气, 减小表面放气的方法除烘烤外,

最简便的方法就是真空浸泡。系统分别在暴露大气和真空浸泡 24h 后,相同运转条件下(障板、冷阱不冷冻),系统真空度分别为 $8 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 和 $1.86 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。静态升压法测定系统总放气率分别为 $4.26 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 和 $1.35 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。质谱分析表明,暴露大气后系统主要剩余气体是水。它不仅影响系统的极限真空,而且严重影响机械泵粗抽时间的真空度。真空浸泡后系统水峰大大降低,但油峰有所增加。

6. 充氮保护对降低系统污染的作用

充氮保护是指扩散泵停止工作后,在冷阱中液氮去除前,即通过针阀向容器充入氮气,保持约 13.3Pa 的氮压力下吹除液氮和停氟里昂机,然后停机械泵,系统在约 0.1Pa 氮压力下浸泡。图 16-24 和图 16-25 分别为系统经充氮和不充氮处理,静置 12h 后,运转条件和时间完全相同时冷阱注入液氮前后的剩余气体质谱图。可见采用充氮保护运转后,除氮、水峰外,重质量数油峰显著降低,极限真空也相应提高。

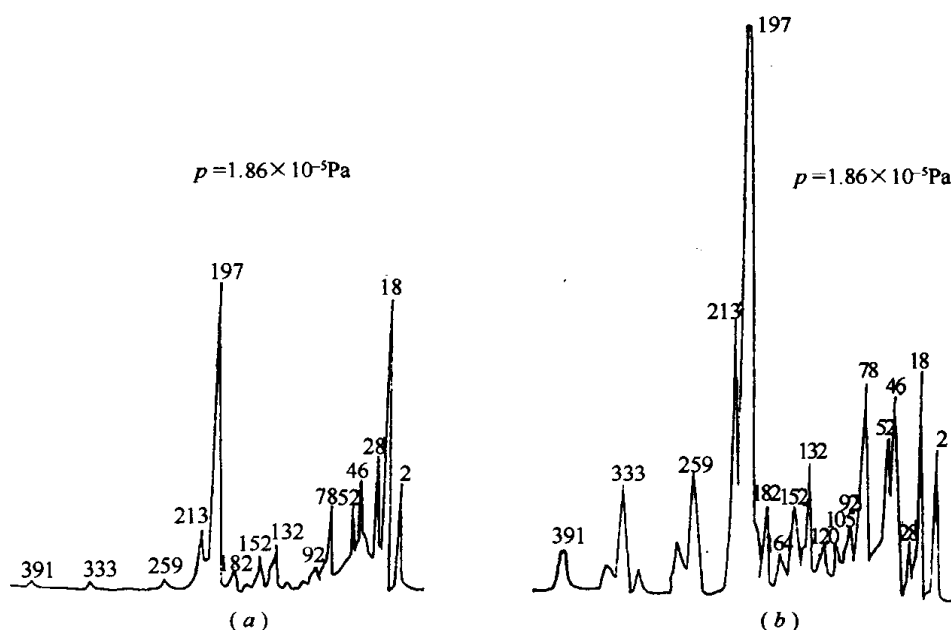


图 16-24 冷阱注入液氮前的质谱图
(a)充氮保护;(b)不充氮保护。

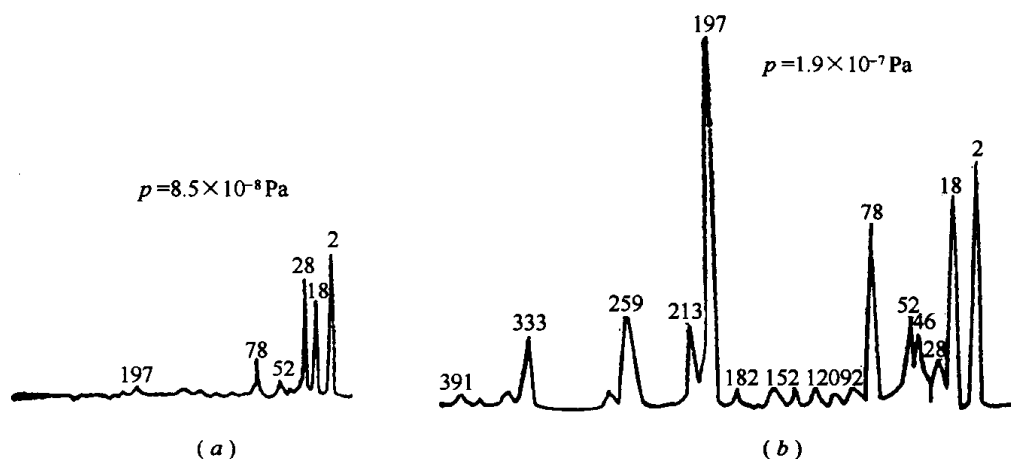


图 16-25 冷阱注入液氮后的质谱图
(a)充氮保护;(b)不充氮保护。

真空浸泡后油峰有所增加的事实表明,从油蒸气对容器所造成的污染来说,除泵正常运转中的返流外,在系统没有隔离阀的情况下,主要是系统在真空浸泡期间发生的。因为这时泵已停止工作,失去了抽气作用,而系统仍处于真空,原先吸附障板冷面上的大量返流物会因升温而解吸,几乎是毫无阻碍地返进容器重又吸附于器壁上。这样,在下次运转中,由于污染物的解吸很缓慢,使系统的清洁程度变坏,也大大延长了抽气时间。此外,真空静置期间,泵液也可能通过蒸发、爬移等途径对容器壁造成污染。克服这一问题的方法除在系统中设置隔离阀外,简便可行的方法是采用充氮保护。

7. 结论

通过上述实验研究,得到如下几点结论:

① 由机械泵和扩散泵组成的抽气系统中,若不采取阱、障板等降低泵液返流措施,扩散泵和机械泵工作液的返流是限制系统极限压力的主要因素之一。

② 氟里昂单层人字形障板和设计良好的液氮冷阱能有效地降低泵液返流,其捕获效率分别大于 0.9 和 0.99

③ 烘烤是去除表面污染和降低表面放气的有效方法。250℃,8h 烘烤,结合障板和阱的效果,能获得好于 $3.06 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 的真空,剩余气体中泵液污染物检测不到。估计泵液返流率 $< 7 \times 10^{-12} \text{g/min} \cdot \text{cm}^2$ 。剩余气体主要组分是 H_2 (约占 78.3%),其次是 C、CO 和 N_2 。C 主要来自钨灯丝。

④ 泵液对容器的污染除泵正常运转外,主要是系统停止运转期间原来冷凝于阱中的大量冷凝物的解吸,以及真空静置期间油的蒸发爬移。在容器与阱间设有隔离阀的情况下,采用充氮保护运转方法能有效地降低上述污染过程。

⑤ 真空浸泡是降低表面放气的简便方法,既缩短了抽气时间,又提高了极限真空度。

值得提出的是:用油扩散泵抽气系统完全能够获得既清洁、无污染又小的真空环境。它依赖于合理的系统结构和正确的运转程序两个方面。

(二) 贮槽式液氮冷凝泵的设计及性能测试

1. 液氮冷凝泵性能特性

所谓液氮冷凝泵,是指一种靠低温介质(液氮)将固体表面冷却到极低温($\leq 4\text{K}$),使沸点高于这一温度的碰撞气体被冷凝在该低温表面上,从而产生很大抽气作用的泵。其抽气机制是物理吸附过程。

从理论上讲,这种泵具有一系列显著的特色:① 在 $10^{-1} \text{Pa} \sim 10^{-10} \text{Pa}$ 这样一个宽的压力范围内都具有较大的抽速,而且其比抽速可接近于理论值;② 极限压力低,可达 10^{-10}Pa 范围;③ 抽气基本无选择性(只有氦气除外,来自金属真空系统的氦气通常也是极其稀少的);④ 实际抽气能力大,且在理论上没有限制;⑤ 极清洁,真空系统不会受到泵的任何污染;⑥ 易于并能够完全再生;⑦ 无振动、无噪声、无电磁场等。

在实际中要做成这样一种比较完美的实用泵则要解决一系列的难题。主要考虑的问题是如何克服氢气的“反常特性”和如何减小液氮耗量,从而提高泵的工作寿命。

2. 关于氢气的“反常特性”

在由冷凝泵抽气的真空系统中,极限压力 p 由两部分构成

$$p = p_s + q/S \quad [\text{Pa}] \quad (16-20)$$

式中 p_s ——被冷凝气体在冷面温度下的饱和蒸气压[Pa];

q ——给定的气体负荷[Pa·L/s];

S ——泵的有效抽速[L/s]。

被冷凝气体的饱和蒸气压通常可由克劳修斯—克拉柏龙方程描述:

$$\log p_s = A - B/T \quad (16-21)$$

式中 A 和 B ——与气体种类有关的常数;

T ——冷凝表面的温度[K]。

对冷凝氢气的饱和蒸气压的实验研究表明:当冷凝温度低于 3K 时,氢气的饱和蒸气压偏离于克劳修斯—克拉柏龙方程。而这种偏离是朝向较高的压力方向($10^{-7}\text{Pa} \sim 10^{-9}\text{Pa}$ 范围),且与冷凝面的温度无关。这就是所谓氢气的“反常特性”。由于烘烤后不锈钢真空容器的主要放气成分是氢气,氢气的这种反常行为严重限制用冷凝泵来获得 $10^{-10}\text{Pa} \sim 10^{-11}\text{Pa}$ 的极高真空,因而必须予以克服。

3. 关于泵的工作寿命

要使液氮冷凝泵具有实际价值,还必须提高泵的工作寿命,即延长一次充入液氮后的存贮时间。由于液氮的焓值极低,加之泵结构较为复杂,若不采取有效的屏蔽和保护措施,液氮的耗量将是十分可观的,其工作寿命甚至只有几小时(视泵的液氮容量大小而定)。这会带来诸如使用、操作等一系列麻烦,特别当要求系统长时间连续运转时,由于泵工作寿命的限制,将产生致命的弱点,因而必须予以充分重视。

4. 泵的设计

如上所述,设计一台实际应用的液氮冷凝泵,首先应该考虑的问题是如何克服冷凝氢气的“反常特性”和如何提高泵的工作寿命。

国外也对冷凝氢气的这一反常行为进行了实验研究。氢气蒸气压偏离克劳修斯—克拉柏龙方程而变得异常高是因为氢气发生解吸的缘故。氢气的解吸是由于真空系统中较温暖部分的红外热辐射而引起的。冷凝氢气的解吸还与低温面衬底性质有密切关系。基于这些因素,液氮冷凝泵应设计为:① 用 $\leq 77\text{K}$ 的冷障板(须具有最佳分子/辐射传输比)最大限度减小室温辐射传输;② 用一种理想衬底材料的低温表面,以保证在给定的辐射负荷下冷凝氢气的解吸压最低。

从提高泵工作寿命的角度来看,主要是千方百计地减小泵的热负荷、降低液氮的消耗。根据热力学原理,应采取如下措施:① 低温抽气表面用涂黑的液氮冷障板加以屏蔽。② 整个液氮冷凝器的四周由表面镀银的液氮容器包围。③ 在液氮冷凝器内外圆筒壁之间的空间里充入一定量的氦气,并加以密封。当温度高于 20K 时,氦气起到一种良好的气体热传导作用,从而能充分利用冷却泵时离散冷氮气的潜热使外筒壁很快冷却;当温度低于 20K 时,氦气发生凝结并造成夹层空间的真空状态,从而能提供所希望的热绝缘以减小冷凝面上气体的热解吸。④ 在液氮冷凝器和液氮容器之间装设一防辐射屏(外侧镀银,内侧涂黑),并由自然蒸发而离散的冷氮气加以冷却(屏的温度可达 30K 左右),从而大大减小周围环境的辐射热负荷。⑤ 冷凝泵颈管材料应具备热传导率低而机械强度高优良特性。同时,在设计过程中应尽量减少颈管壁厚而增加其长度,以最大限度地减小热传导损失。⑥ 颈管内壁必须涂黑,以减小室温热辐射。计算表明,涂黑颈管与完全镜面反射颈管的室温辐射传输量约相差 3 个数量级之多。

液氮冷凝泵的设计可按下面的计算步骤进行:

① 确定泵的使用工作压力范围;② 根据已知的工作压力界限,确定障板的几何形状及其数目;③ 根据给定的气体负荷及障板的流导概率,确定单位冷凝抽气面上的抽速(即比抽速);

④ 根据所要求的抽速,确定抽气表面的直径;⑤ 根据泵的大致结构进行低温面的热负荷计算,确定液氮的耗量;⑥ 根据使用所要求的工作寿命及液氮耗量,确定液氮冷凝器的高度。

5. 液氮冷凝泵的结构特征

图 16-26 为贮槽式液氮冷凝泵的结构示意图。该泵主体由镀银的不锈钢液氮冷凝器(其底面为低温抽气表面)及带有液氮冷障板的液氮容器构成。表 16-11 列出了该泵的主要特征尺寸。

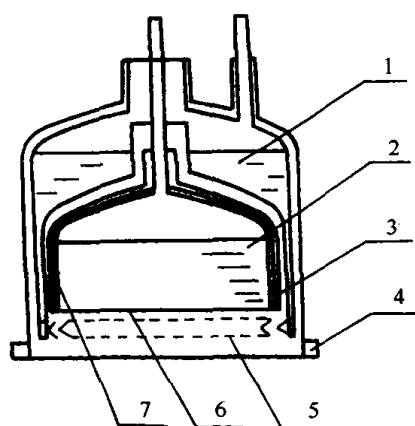


图 16-26 贮槽式液氮冷凝泵结构示意图

1—液氮容器;2—液氮冷凝器;3—中间屏;
4—法兰;5—障板;6—抽气表面;7—氦气夹层。

表 16-11 液氮冷凝泵特征尺寸

外径/mm	330
总高/mm	740
氮冷凝器直径/mm	260
氮冷凝器高度/mm	210
人字形障板角度	90°、120°
液氮贮量/L	10
液氮贮量/L	17

(1) 液氮冷凝器

液氮冷凝器由底(抽气面)和内外圆筒构成,材料为不锈钢。底表面是镀银的,因为银是迄今所使用的材料中能产生最低氢气饱和蒸气压的材料,又因为银又是最好的红外反射材料,为了进一步减小辐射热负荷,所以液氮冷凝器的外壁也是镀银的。

在液氮冷凝器内外筒之间的空间里充入大约 50540Pa 的氦气,可起到一种“热开关”的作用。如前所述,随着温变过程的进行,既能使冷凝器外壁很快冷却下来,又能提供最终所希望的真空绝热。

(2) 冷障板

采用液氮温度下的人字形障板。因为这种障板的分子和热辐射传输的综合性能非常适合于液氮冷凝泵的特点。其主要作用是能大大减小到达冷凝抽气面的室温辐射量。这不但有助于克服冷凝氢气的反常行为,亦能大大降低液氮的损耗。另一方面,增加障板必然降低泵的抽速。因此,二者必须适当兼顾。为使前者效果明显,后者影响较小,整个障板表面作了阳极化发黑处理(经测其发射率 ≥ 0.9),而障板角度选为 120°和 90°两种形式。当采用 90°人字形障板时,测得抽气表面对氢气的比抽速为 $8.4\text{L/s}\cdot\text{cm}^2$ 。

(3) 中间屏

根据液氮冷凝泵的热负荷计算,如果颈管设计合理(壁薄而管长),则由此引起的传导热只占总热负荷的较小部分,而绝大部分热负荷是由液氮壁面的热辐射引起的。另一方面,在正常消耗过程中不断蒸发而成的离散氮气的冷量,绝大部分不能被充分有效地利用而白白流失掉。为此,在液氮冷凝器与液氮容器之间增设一中间防辐射屏,由离散的冷氮气予以冷却,其平衡温度可达 30K,远低于液氮温度。这样既能充分利用氮气的冷量,又能大大减小辐射引起的液

氮损耗。

该屏组件由不锈钢制成,屏筒壁厚为 0.8mm。屏的外表面是镀银的,以使整个屏筒具有良好的热传导性;同时,能减小所吸收的辐射热负荷。屏的内表面作了发黑处理,以保证由冷障板发出而进入冷凝器和中间屏之间环形间隙的辐射热仅有一小部分被吸收在氮冷凝器壁上。无疑,在这种情况下,可大大减小冷凝的液氮损耗,因而能提高泵的使用寿命。然而,却增加了泵的制作难度。

(4) 液氮容器

液氮容器由双层不锈钢筒制成,夹层内充入液氮以使其冷却到大约 77K。该夹层液氮贮量为 17L。该容器内外壁经镀银处理,以减小表面的发射率。在结构上,冷障板通过螺钉联接同该容器底部固定在一起,并且通过热传导使之冷却到所要求的温度。为了进一步减小液氮损耗及抑制氢气的解吸效应,可通过液氮减压,以降低壁表面和障板温度的方法来实现。

(5) 外容器

外容器亦即泵的最外层筒(由不锈钢制成)。由于其内壁(处于室温状态)是该泵的主要放气源,因此,在很大程度上决定着泵所能达到的最好真空度。

为了尽可能减小壁表面的放气速率,采取高真空炉退火去气的处理工艺。去气规范是温度为 1000℃,工作压力范围为 $10^{-3}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$,保温时间约 8h。泵整体组装后,还要在 300℃~350℃ 和 10^{-4}Pa 下原位烘烤数十小时,再冷却到室温,此时泵壁面的放气速率可大大减小,因此能获得极好的真空度。

6. 实验系统组成

实验系统由冷凝泵、测试罩、前级抽气系统、烘烤系统、冷却系统、减压系统、充气系统和四极质谱计分析系统以及真空度测试系统等部分组成,图 16-27 给出了该实验系统的示意图。

① 测试罩。本体由不锈钢制成,它与冷凝泵直接相连(通过螺栓)。其上装有调制 BA 规和弯注规,用以测量真空度。在测试罩的侧面还装有供充气用的连接法兰以允许各种试验气体进入冷凝泵。需要指出的是,尽管测试罩内壁作了抛光处理,但它在室温下的放气最终将成为泵的很大一部分附加气源,将影响冷凝泵最佳真空度。

② 前级抽气系统。由溅射离子泵、分子筛吸附泵、机械泵和一些超高真空阀门等构成。分子筛吸附泵或机械泵为溅射离子泵提供必要的启动压力,并作为冷凝泵初始烘烤阶段的排气泵。启动溅射离子泵后,系统真空度可达 10^{-7}Pa 。

③ 烘烤系统。由可拆式烘箱(内部装有管状加热器)和缠绕式加热带组成。温度测量采用镍铬-镍铝热电偶。烘烤温度一般控制在 300℃ 左右。

④ 冷却系统。由液氮杜瓦车、输液管道、氮气稳压装置等部分组成,用以供给补充冷凝泵液氮容器内的液氮。此外,液氮冷凝器预冷时亦是用该冷却系统供给液氮的。

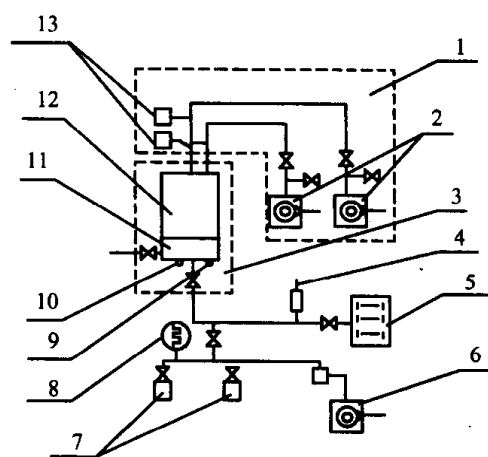


图 16-27 实验系统示意图

- 1—减压系统;2—机械泵;3—烘烤系统;
4—四极杆探头;5—溅射离子泵;6—机械泵;
7—吸附泵;8—热偶规;9—调制 BA 规;
10—弯注规;11—测试罩;
12—冷凝泵;13—精密真空表。

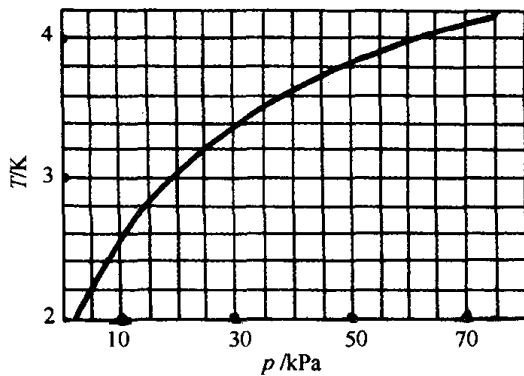


图 16-28 氮蒸气压与温度关系曲线

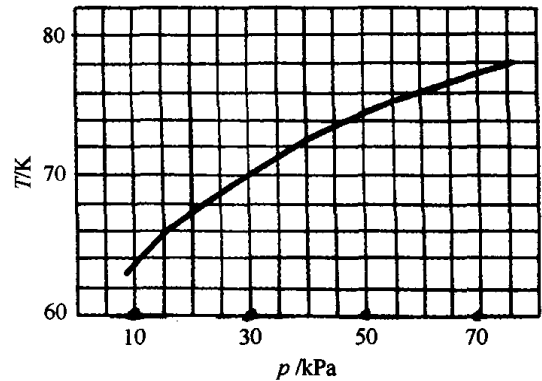


图 16-29 氮蒸气压与温度关系曲线

⑤ 减压系统。是通过适当抽空低温介质(液氮或液氦)所在空间的气体而达到进一步降低介质温度目的的装置。它由机械泵、排气管道、节流阀及真空压力表等部分构成。节流阀能调节机械泵抽速的大小,从而控制贮液槽上方介质蒸气的压力。经验表明,节流阀初期,开启程度对液氮减压能否顺利进行具有至关重要的作用。贮液槽上方介质的蒸气压力是用精密真空表测量的。根据测得的这一压力可确定介质经减压后的最终温度。图 16-28 和图 16-29 分别给出了氮和氮蒸气压与温度关系的曲线。

充气系统示意图如图 16-30 所示。该系统的抽气机组由机械泵、五氧化二磷干燥瓶及两级串联的扩散泵等组成。系统真空度一般可达 10^{-4} Pa。为了精确地确定进气量的大小,使用两只经严格校准(原位进行)的不同流导的标准漏孔。为了保证充入气体的质量,除使用高纯度气体外,在每次进气前还用该系统抽气机组反复将充气系统抽至高真空进行气体置换。

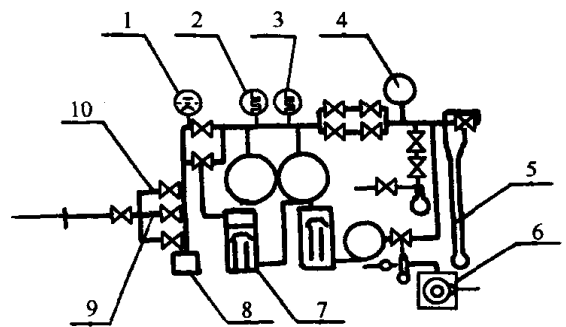


图 16-30 充气系统

1—电离规;2—中真空规;3—热偶规;4—稳压瓶;
5—U形压力计;6—机械泵;7—扩散泵;
8—精密真空表;9~10—漏孔 I、II。

四极质谱计分析系统由四极杆探头和 QMG101 型四极质谱计等部分组成。该仪器最小可检分压力为 10^{-11} Pa。该系统用于整个实验过程中的残余气体分析及微小漏孔的检测。

真空度测试系统包括测量规管和测试线路两大部分。测试规管采用 Balzers 制造的 IMR103 型调制 BA 规和兰州物理研究所研制的弯注规(敷氧化钨钨灯丝)。所用测试线路分别为 IMG040 型数字显示的自动控制电离计和日本制造的 TR84 型振簧式静电计。上述规管和线路都经真空一级计量站校验过。

7. 实验结果

该系统主要运转程序按以下步骤进行:

- ① 启动机械泵对系统进行粗抽。
- ② 启动分子筛吸附泵,将系统抽至 10^{-1} Pa 范围。
- ③ 系统加热烘烤。烘烤温度为 $250^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$,烘烤时间约 24h,烘烤时系统真空度为 $10^{-3}\text{Pa} \sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。
- ④ 停止烘烤,待系统冷却至室温后用四极质谱计进行残气分析和微漏检测,以确知烘烤

的效果并保证消除漏孔对极限真空度指标的影响。

⑤ 将液氮注入液氮容器内,使之降温至 77K。

⑥ 为了减少液氮损耗,在注入液氮前必须预先用液氮冷却氮冷凝器,而且这一过程应尽可能充分,以使泵内各层温度基本趋于平衡。

⑦ 调制 BA 规和弯注规反复去气。

⑧ 关闭冷凝泵与前级抽气系统之间的超高真空阀门,使冷凝泵从整个系统中单独分离出来,并将其送至氮液化器房。

⑨ 将氮冷凝器中的液氮全部导出,再用特制的输液杜瓦管将冷凝泵与氮液化器连接起来。

⑩ 用液氮获得系统中的真空机组抽空液氮冷凝器,并开始输送液氮。

⑪ 采用称重法或观察氮气回收气柜浮标上升法,判断输送液氮的量,用金-铁热电偶测温法确定氮冷凝器中液氮面的高度,当确知足数输入液氮后即停止输液。

⑫ 在输送液氮的过程中,记录系统真空度随注入时间和冷却温度的变化。

⑬ 分别进行液氮和液氮减压试验,测量极限压力。

⑭ 测量液氮冷凝泵对氢气、氮气、氩气等的抽气速率。

⑮ 测量该泵的液氮耗量。

该泵主要实验结果:

① 初调实验。在完成冷凝泵的组装后,首先进行了液氮温度下的调试实验。该泵在 300℃ 下以 48h 的真空烘烤之后,用液氮反复对该泵进行“冷”热冲击,未发现有“冷漏”现象发生。当液氮容器和氮冷凝器中均注入液氮后,测得泵的真空度约为 $2.6 \times 10^{-8} \text{Pa}$;同时用静态升压法测得该泵在液氮状态下总漏放气速率约为 $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。由此可以预期该泵经彻底烘烤去气后,在液氮条件下能获得 $10^{-10} \text{Pa} \sim 10^{-11} \text{Pa}$ 的极限压力。

② 液氮注入期间系统真空度的变化。本次液氮实验是在系统未经彻底烘烤的情况下进行的。在冷凝泵加注液氮前,系统真空度 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。氮冷凝器中注入液氮后,随着温度的降低,系统真空度迅速提高。当氮冷凝器中注满液氮时,系统真空度趋于平衡,为 $4.7 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 。液氮灌注时间为 69min。其冷却过程中的压力变化曲线如图 16-31 所示。

③ 系统减压及泵的极限真空度。如前所述,冷凝泵液氮系统和液氮系统减压是为了进一步降低氮容器面、障板及氮冷凝器抽气面的温度,从而能减小液氮的损耗并能更好地抑制冷凝氢气的“反常特性”和提高泵的极限真空度。

图 16-32 表示液氮系统减压后,真空度与氮蒸气压的关系曲线。从图中可以看出,减压后真空度提高了约半个数量级,说明减压的效果是明显的。

液氮系统减压后,还对液氮系统进行了减压实验。减压后,真空度有所提高,但效果不显著。经过分析,这主要是由于系统在烘烤过程中受外界干扰,曾多次停电致使测量规管未能彻底去气而泵本身又受到严重污染所造成的。因为冷凝泵所能达到的极限压力受总放气量(包括规管放气和壁表面放气等)和氢气蒸气压二者的综合影响。在这种情况下,该冷凝泵的极限压力为 $1.2 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 。

④ 冷凝泵抽速。严格来讲,冷凝泵抽速与冷凝抽气面温度、面积、被抽气体温度、种类以及障板温度、障板面积和流导概率等诸多因素有关。

在实际使用中,多采用气体流量法确定泵抽速的大小。采用小孔法(孔流导经过标定)测定该泵的抽速。在 $10^{-7} \text{Pa} \sim 10^{-8} \text{Pa}$ 范围内测得该泵对氢气的有效抽速基本不变,取其平均

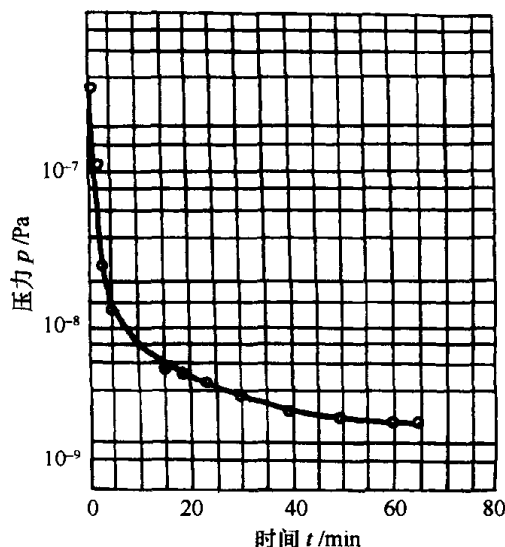


图 16-31 液氮注入时系统冷却过程中压力变化曲线

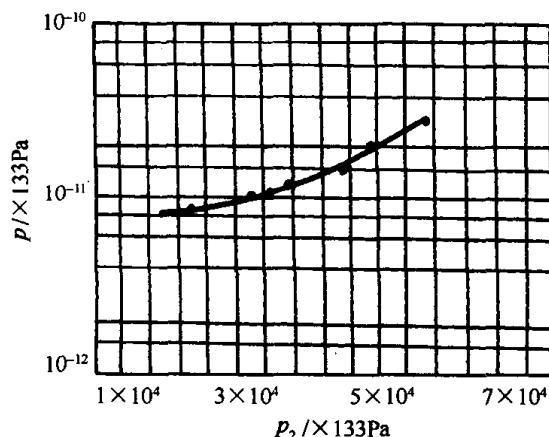


图 16-32 真空度与氮蒸气压的关系曲线

值为 4540L/s, 泵的比抽速为 8.4L/s·cm²。

这与计算结果基本相符, 图 16-33 是该泵对氢气的抽速曲线。

此外, 还在 10^{-5} Pa ~ 10^{-6} Pa 范围内测量了该泵对氮气和氩气的抽速。

⑤ 液氮耗量。液氮容器作为液氮冷凝器的保护容器, 它直接对着室温壁面。一般说来, 液氮的损耗是相当可观的。为了降低液氮的损耗, 在液氮容器的外壁上镀了一层银(使其表面辐射率大大减小)。测得该泵液氮耗量为 0.8L/h。

必须指出, 在液氮减压的情况下, 尽管可以减小液氮的耗量, 但液氮耗量却会大大增加, 而且需要一套减压装置。

⑥ 液氮耗量。液氮的汽化热很小(20.36 卡/摩尔), 任何热负荷的增加都可能引起液氮的大量蒸发。因此, 在实验方案和操作程序上都要谨慎、仔细。

在注入液氮前, 冷凝器必须用液氮充分冷却。这样, 可大大节省液氮的消耗。该泵从注入液氮开始到冷凝器内注满液氮为止, 总共需要 69min; 冷凝器预冷到液氮温度 4.2K 时消耗的液氮量约为 5L~6L。

当氮冷凝器和部分温度达到平衡时, 测得该泵的液氮耗量约为 2L/d, 相应的工作寿命为 5d。

如果通过液氮减压把氮容器和障板的温度从 77K 降低到 64K(氮的三相点), 则根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律可以求出, 由于热辐射引起的液氮损耗将降低 2 倍左右。

研制的液氮冷凝泵在对氢气的抽速指标上已达到了相应的水平。这是冷凝泵(包括测量规管)在未得到彻底烘烤的情况下, 泵的极限压力低于 10^{-11} Pa。据对该泵总漏放气速率的测定, 若该泵经彻底烘烤, 达到 10^{-11} Pa 的极限压力是可能的。

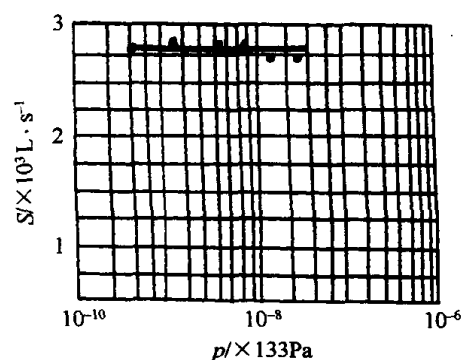


图 16-33 氢气的抽速曲线

(三) 钛钼和钛钨丝蒸发参数和吸气性能的测定

1. 概述

为建立清洁的真空系统,吸气剂真空泵有了很大发展。在各种具有吸气性能的材料中性能优良的吸气剂应具有:① 低的蒸气压,易蒸发成膜;② 对多种气体有合适的抽速,且生成物稳定,蒸气压低;③ 吸气材料的含气量小,纯度高,易制得且便宜;④ 可加工性能好。

钛是吸气材料中最好的一种。因此,各种结构的钛升华泵常应用于清洁真空的获得上。但在结构简单的电阻加热升华器使用中发现,用钛合金作升华灯丝,比缠绕式纯钛升华灯丝具有重复性好、寿命长的优点,且在蒸发后仍有良好的电气、机械性能。近十几年来,对钛钼和钛钨合金丝蒸发参数和吸气性能作了广泛研究与测定:一氧化钛在低温下吸气性能比纯钛好,对氩有较大的抽速。金属系统中低压力下主要出气成分是氢。在溅射离子泵中,用多元吸气剂优于单一成分的吸气剂。

对国产钛钼合金(85%钛,15%钼)丝和钛钨合金(85%钛,15%钨)丝(均由上海钢铁研究所提供)的蒸发参数和吸气性能作了仔细测定。这些数据经实验设备中多年使用,证明是比较可靠的,并运用所给出公式计算泵的电气参数,也符合工程实际。

2. 蒸发参数的测定

直热式钛升华灯丝的蒸发参数一般包括:蒸发温度 $T(K)$ 、蒸发电流 $I(A)$ 、比蒸发率 B (原子/ $cm^2 \cdot s$)、电阻率 $\rho(\Omega \cdot cm)$ 、发射率 ϵ ,以及灯丝寿命、工作方式等。这些参数与所选用的灯丝材料有关。对给定的灯丝材料,蒸发电流与灯丝直径和蒸发温度有关[见式(16-24)和(16-25)]。其它参数也与蒸发温度有关。近年将钛升华沉于冷面(77K 甚至 20K),以求得更高粘着系数和更低解吸压力,也测定了灯丝工作温度范围内的发射率,这对计算冷面制冷功率是不可缺少的。

(1) 测量设备(图 16-34)

钛钼丝($\phi 1mm$)或钛钨丝($\phi 1.2mm$)垂直夹持在圆柱形液氮贮筒的测量罩中心。灯丝长度为 365mm。贮筒内表面即为钛升华的冷面(可灌注液氮或通水冷却),有效冷面积为 $1758cm^2$ 。测量罩上方和盖板法兰上装有可供连接规管、观察窗、电源引线及质谱计管等的法兰。升华灯丝由两台自动调压器(分别为 2kW 和 5kW)串联供电,测量罩抽气系统是 $\phi 200mm$ 隔离阀、液氮冷阱、人字形氟里昂障板、KY-11 扩散泵、K-9 扩散泵等组成。测量是在不加液氮、真空度为 $10^{-4}Pa \sim 10^{-5}Pa$ 情况下进行的。

(2) 测量方法

① 温度的测量。

a. 铂-铂铑热电偶作为辅助测温法。把热偶丝($\phi 0.5mm$)直接点焊在灯丝中部。为了减少热传导的影响,把焊点附近的热偶丝磨细为 $\phi 0.25 \pm 0.05mm$ 。但实测与光学高温计相比,温度偏低(如图 16-35 所示)。分析其原因为:热偶丝接点处附加热传导而引起钛丝表面温度降低,又长时间在 $1400^\circ C$ 高温下使用,热偶丝可能发生化学反应而改变了热偶成分,以致所测温度较光学高温计偏低。

b. 光学高温计作为主要测温法。在第一量程内($800^\circ C \sim 1500^\circ C$)误差为 $\pm 13^\circ C$ 。所测亮度对辐射系数和窗玻璃吸收进行了修正。

根据光学高温计的测量原理,因实际物体不是黑体,其辐射系数 $\Delta \neq 1$,真实温度 T_s 可由测得的亮度温度 T_2 求得

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\Delta} \quad (16-22)$$

式中 Δ ——波长为 λ 时灯丝的辐射系数,它与温度有关,这里引用了 Lawson 的结果;
 λ ——高温计的辐射波长,其值为 0.65μ , $C_2 = 1.4380\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$ 。

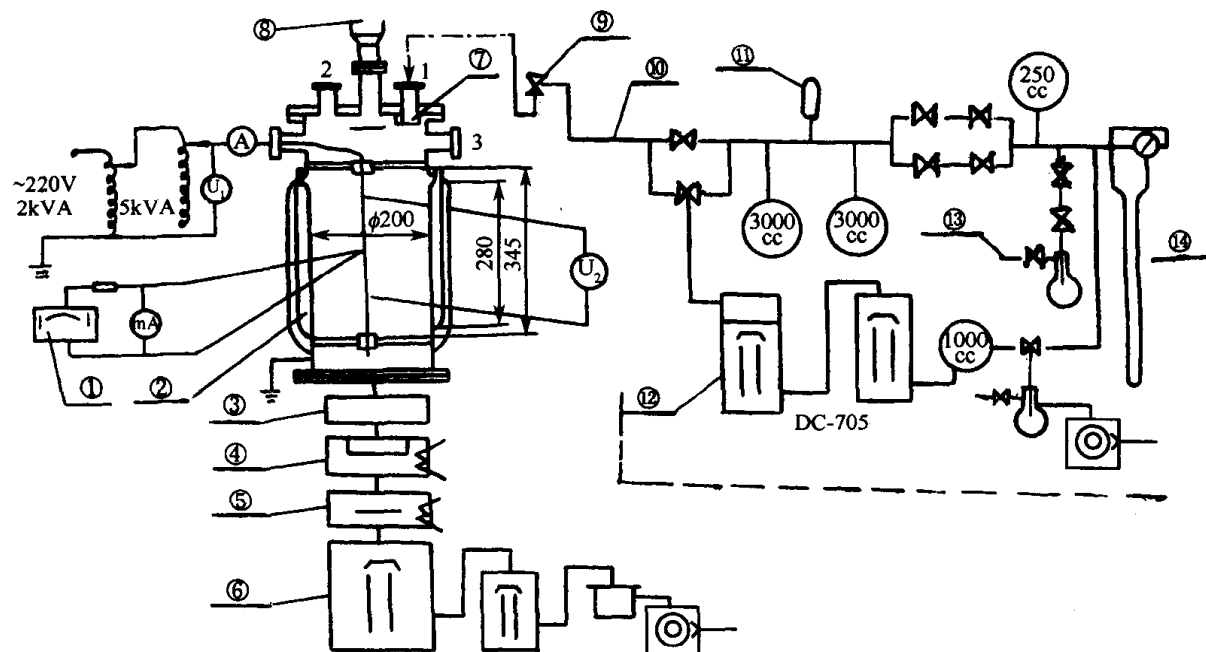


图 16-34 蒸发参数和吸气性能测量设备

- 1—EFT-110 型铂铑测温毫伏计; 2—液氮贮筒; 3—可烘烤的 $\phi 200$ 隔离阀; 4—防爬液氮冷阱; 5—人字形氟里昂障板;
 6—KY-11 扩散泵(主泵); 7—散流器; 8—QMG-101 型四极质谱计; 9—金属隔离阀($\phi 16$); 10—毛细管;
 11—热偶规; 12—立式三级玻璃扩散泵; 13—被充气体; 14—U 形油压计;
 A—0~30A 表头; U_1 —0~30V; U_2 —0~30V; mV—303 型电位差计。

观察窗玻璃对光的吸收所引起的误差,
 原理上可由下式估算

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda \alpha \delta}{C_2} \quad (16-23)$$

式中 α ——玻璃吸收系数 [cm^{-1}];
 δ ——玻璃厚度 [cm]。

所用玻璃虽按光学要求磨平,但为与柯伐封接而用 95# 玻璃(厚 1.5mm~2.0mm)。因其吸收系数未查到,且考虑表面散射等因素,通过实验确定窗玻璃所造成的测温误差。把一只 100W 灯泡置于圆筒形容器中,在不同灯泡电压下用同一高温计测量有观察窗和无观察窗时灯泡钨丝亮度温度,见表 16-12。在升华灯丝工作温度范围内,测温误差约 2%。

② 蒸发量的测量。使用 WT2A 型精密天平(感量 10^{-5}g)称量蒸发前后的质量,求钛钨丝的失重。

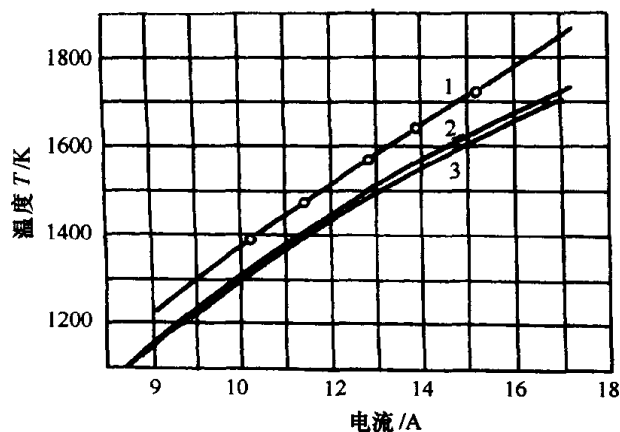


图 16-35 不同测温方法实验值比较(钛钨丝, $\phi 1\text{mm}$)
 1—DGJ4-601 光学高温计; 2—铂-铂铑热偶, 308 型毫伏计;
 3—铂-铂铑热偶; EFT-110 毫伏计。

表 16-12 观察窗玻璃引起测温误差的实验结果

实验点	温度/℃		温差/℃ ($\Delta t = t_1 - t_2$)	误差/%	
	有窗 t_1	无窗 t_2		$\frac{\Delta t}{t_1} \times 100\%$	平均值
1	1036	1014	22	2.12	2.06
2	1238	1223	15	1.21	
3	1366	1327	39	2.286	

③ 蒸发功率的测量。为减少冷端效应,在灯丝上离两端各约 65mm 处点焊两根 $\phi 0.4\text{mm}$ 钼丝,直接引出真空容器接电压表 U_2 测加热电压 U_2 ,用串接在灯丝回路中的电流表 A 测加热电流 I ,由下式计算电阻率 $\rho[\Omega \cdot \text{cm}]$ 和比功率 $W(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$

$$\rho = \frac{\pi U_2 d^2}{4 Il} \quad (16-24)$$

$$W = \frac{U_2 I}{\pi l d} \quad (16-25)$$

式中 d ——灯丝的平均直径[cm];

l ——并联电压表引线在灯丝上两焊点间的灯丝长度[cm];

k ——玻耳兹曼常数。

(3) 测量结果

图 16-36~图 16-39 是所测参数值的曲线,同时部分地也给出了 Lawson 和 Morrison 的相应结果。

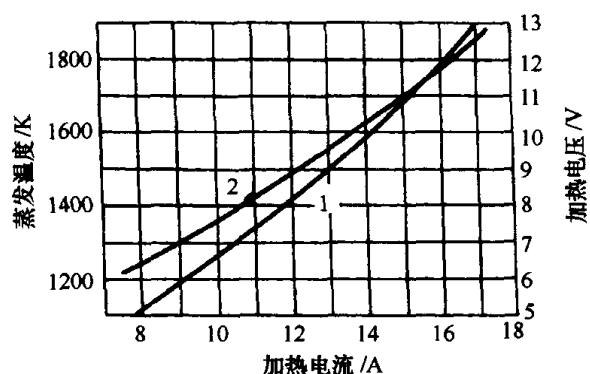


图 16-36 加热电流与蒸发温度、
加热电压的关系($\phi 0.4\text{mm}$ 钼钨丝, $l = 335\text{mm}$)
1—加热电压与电流;2—蒸发温度与电流。

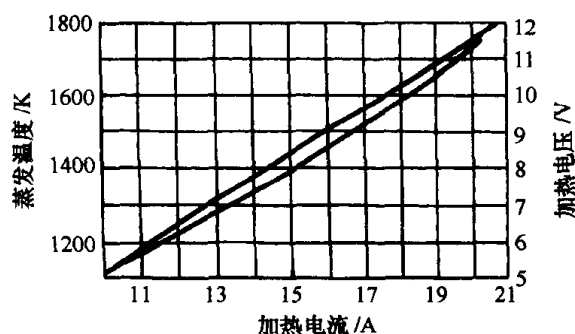


图 16-37 加热电流与蒸发温度、
加热电压的关系($\phi 1.2\text{mm}$ 钼钨丝, $l = 335\text{mm}$)
1—加热电压与电流;2—蒸发温度与电流。

比蒸发率是在恒电压下测定的。新灯丝在 900°C 去气 25min 后再加到指定电压值,蒸发 15min~20min,称量失重,计算比蒸发率。每改变一蒸发电压值,就换用一根新灯丝,以保证测量值为起始比蒸发率。由图 16-40 和图 16-41 看到,钨钨丝电阻率比钨钨丝略大,可见,在相同蒸发温度下其加热电流可稍小。但是,钨钨丝比功率稍大于钨钨丝,可能是由于表面处理关系,钨钨丝表面较粗糙且发黑,故发射率大些,在蒸发温度范围内钨钨丝发射率 ϵ 在 0.30~0.32,随温度上升略有增加。钨钨丝的发射率比钨钨丝略大。

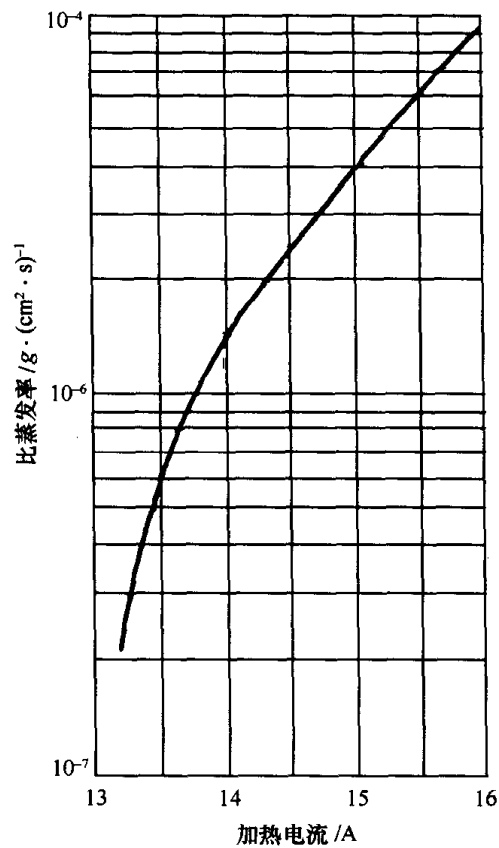


图 16-38 钛钼丝的加热电流与比蒸发率的关系

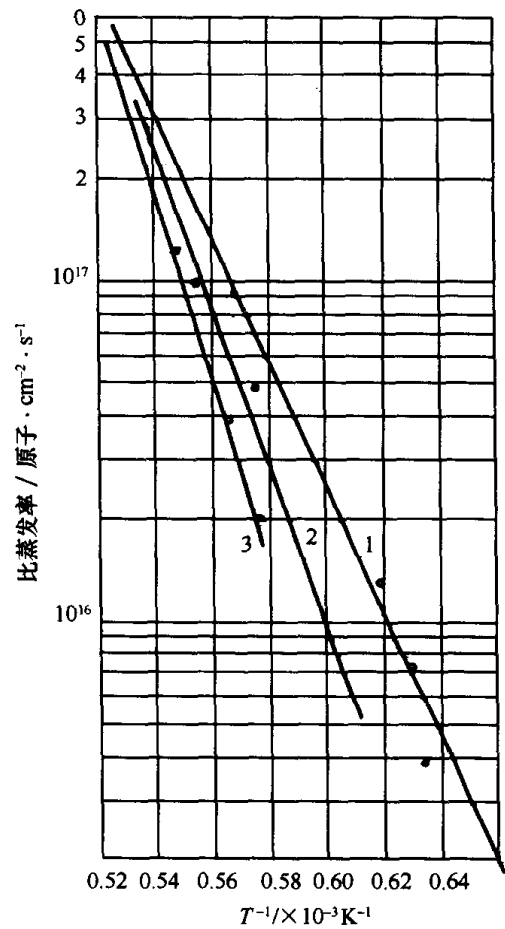


图 16-39 钛钼丝的比蒸发率和温度的关系
1—本次实测值($\phi 1$ 丝); 2—Morrison 测量值;
3—Lawson 测量值。

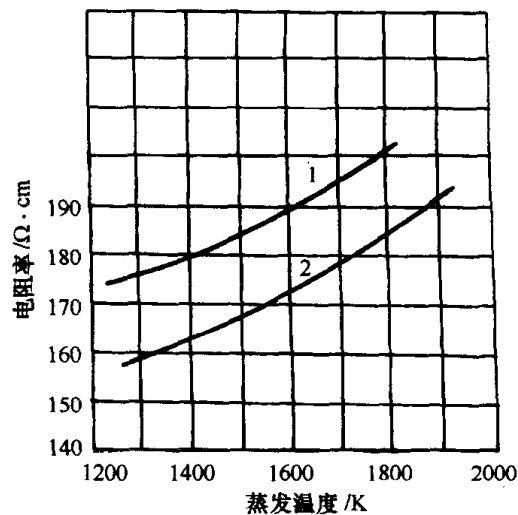


图 16-40 电阻率与蒸发温度的关系
1—钛钼丝; 2—钛钨丝。

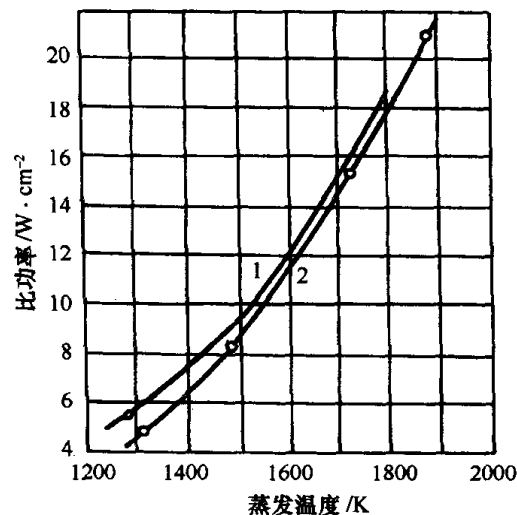


图 16-41 比功率与蒸发温度的关系
1—钛钼丝; 2—钛钨丝。

(4) 测量结果的应用

应用上述测量结果,可预测任意直径 d 长度 L 的钛钼、钛钨丝的工作参数。如以钛钨丝为例,首先由图16-39根据合适的比蒸发率确定蒸发温度,然后由下式分别计算所需加热电

流、电压值

$$I = Kd^{\frac{3}{2}} \quad (16-26)$$

$$U = 2L\sqrt{\frac{\rho w}{d}} \quad (16-27)$$

式中, $K = \sqrt{\frac{\pi^2 w}{4\rho}}$ 与温度有关(图 16-42)。表 16-13 和图 16-43、图 16-44 分别给出恒压工作、恒流工作时灯丝电压、电流值之变化。表明恒压工作优于恒流工作。它具有寿命长、蒸发温度稳定、蒸发率也相对稳定、钛的可利用率高等优点。因此,推荐恒压工作方式。

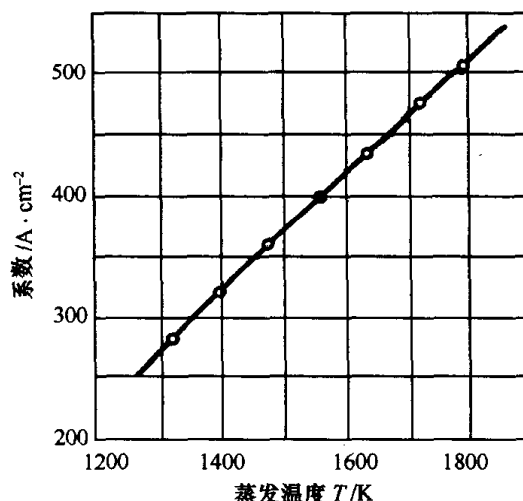


图 16-42 钛钨丝蒸发温度与系数 K 值之关系

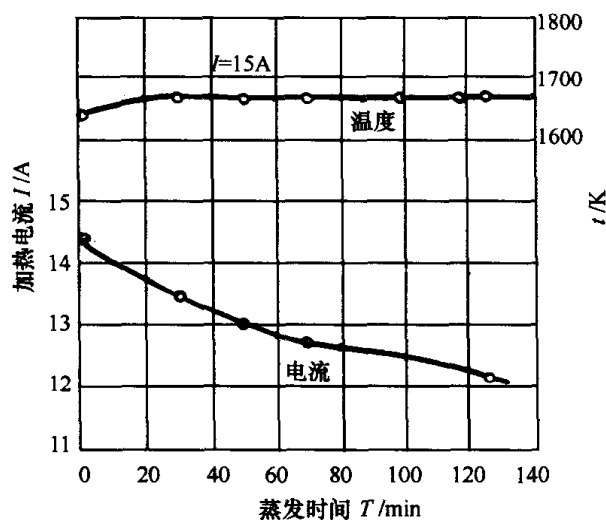


图 16-43 $\phi 1$ 钛钨丝恒压工作时($U=10.6V$)
电流和温度的变化

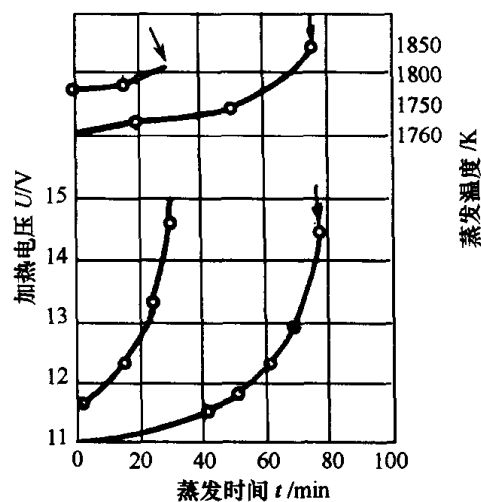


图 16-44 $\phi 1$ 钛钨丝恒流电流 $I=16A$
工作时电压和温度的变化

表 16-13 恒压工作与恒流工作的比较

工作方式	寿命/min	晶粒长大	钛利用率 ^② /%	蒸发温度变化/℃
恒电压 11.2V(15A) ^①	>120	明显	29.4	1720±5
恒电流 15A(11.2V) ^①	>20	明显	25.1	1690~1863

注:① 指开始数值;② 指寿命终了时

实验中注意到,灯丝寿命主要受晶粒长大的限制。晶粒长大又主要与蒸发温度和钛的已蒸发量有关。随着钛的蒸发,钼的成分增多。高温下钼晶粒长大并发生移动。晶粒长大到近于丝直径而导致灯丝断裂。温度愈高,晶粒长大愈快。由寿命终了时的灯丝最细处直径(约 $\phi 0.75\text{mm}$)计算钛的可利用率约 50%。但实际上由于蒸发不均匀,其利用率一般不超过 30%。这也是此类升华泵的缺点之一。提高钛利用率的办法有二:一是蒸发温度降低到低于 1740K 较为合适;二是尽量减缓晶粒长大,如国外在钛钼合金中加入适量钽,有一定的效果。

3. 吸气性能的测定

吸气剂对各种气体的粘着系数和吸附容量是评定吸气剂性能的主要参数。粘着系数表明单位吸气面积上所能产生的抽速。吸附容量表明在给定分压下吸气膜所具有的有效抽气时间。因此这两个参数对确定系统中某一时间内各气体的分压起重要作用。

粘着系数是指和吸气表面相碰撞的气体分子(或原子)被吸附的概率。吸附容量反映钛单位质量能吸附的气体量。它们是气体种类、压力、膜温等多变量的函数。从国外所测结果来看,即使材料、气体、膜面温度相同,其所测值变化仍很大。这说明,测量结果还和膜沉积条件、基底性质、表面状况等有很大关系。Harra 在评述以前工作结果的基础上给出了他认为合理的粘着系数与吸附能力的数据。Hagward 等人也曾对金属膜测定吸附概率的设备作了严密评定。但是这些条件在一般工程上难于实现。尽可能减小测量误差又接近于工程应用情况而建立的粘着系数测量设备,也可同时测吸附容量和出气成分。

(1) 测量方法

粘着系数的测定,是在钛蒸发期间或蒸发后引入恒定气流 Q (为减小本底的影响,要求 Q 的引入使本底压力升高 1~1.5 数量级),同时测定吸气膜附近的压强 p ,计算膜面的比抽速 S 与该条件下的理想比抽速 S_0 之比,即为粘着系数 α

$$\alpha = S/S_0 \quad (16-28)$$

式中 $S_0 = 3.64 \sqrt{\frac{T_g}{M}}$;

T_g ——气体温度[K];

M ——气体相对分子量。

吸附容量 q ($\text{Pa} \cdot \text{L/g}$) 的测定,是在恒电压下蒸发一定钛量 m [g] 后,引入恒定气流 Q ,测定抽速与时间的关系,由下式求得

$$q = Qt/m \quad (16-29)$$

吸附饱和时间 t 定义为从抽速下降到起始抽速的 50% 时的时间。

所用测量设备如图 16-34 所示,测量罩中压力 p_2 由 BA 裸规(装在膜面附近)指示。被测气体由玻璃膨胀系统经毛细管充入,经散流器减小定向流。气流流量 Q 的恒定由充气前级压力 p_1 (热偶计指示)恒定来实现。热偶计对 H_2 、 N_2 、 O_2 、 He 分别校准,流量 Q 也预先校准。BA 裸规对氢气的相对灵敏度取 0.491。

(2) 实验结果

实验中系统未烘烤,吸气面水冷(12°C)或液氮冷却,水冷时冷阱不加液氮。升华钛后,系统压力小于 $5.33 \times 10^{-6} \text{Pa}$,如液氮冷却吸气面时,压力进入 10^{-7}Pa 。

① 出气成分是新灯丝 900°C 去气时用四极质谱计分析的。从表 16-14 中(已扣除本底成分)可见,主要是 H_2 、甲烷、 CO 等。钛钨丝的氢出气量要比钛钼丝大(这可能与生产工艺有关)。 900°C 下去气 40min 基本彻底。

表 16-14 钛钼和钛锆丝的主要出气成分

百分数 材 料	e/m	2	14	16	17	18	28	32	40	41	44	其它
钛钼丝		36.6	2.44	3.00	10.70	29.6	11.10	1.480	0.250	1.600	1.200	2.03
钛锆丝		86.5	0.58	0.52	1.15	5.5	3.18	0.376	0.069	0.353	0.242	1.53

② 吸附容量是在灯丝彻底去气后关扩散泵阀,然后恒电压蒸发 5min(膜厚 28nm 左右),恒流充入被测气体,记录测量罩中的压力随时间的变化,由抽气曲线(图 16-45)计算吸附容量(表 16-15)。实验时起始压力 $1\text{Pa} \sim 6.6 \times 10^{-5}\text{Pa}$ (液氮冷却),水冷时为 $1\text{Pa} \sim 6.6 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

表 16-15 钛钼丝和钛锆丝对 N_2 、 H_2 的粘着系数和吸附容量

吸 气 材 料	吸气面 温度/℃	被 吸 气 体	粘 着 系 数	吸附容量/ $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1}$
			实验值	实验值
钛钼丝	12	N_2	0.238	7.46
		H_2	0.042	21.9
	-110	N_2	0.865	75.3
		H_2	0.141	36.0
钛锆丝	12	N_2	0.191	15.7
		H_2	0.04	57.6
	-190	N_2	0.570	18.6
		H_2	0.124	77.6

③ 粘着系数是在扩散泵隔离打开和关闭,灯丝连续蒸发和间断蒸发等四种情况下,分别测定膜面为 12°C 和 78K 下对 N_2 和 H_2 的粘着系数。在钛丝充分去气并扣除开阀时扩散泵抽速后,四种情况下起始粘着系数相差不大。故取其平均值与国外的数据相近。测量中出现 N_2 、 H_2 的抽速比泵口的流导还大,这可能是束流效应的影响。

(3) 结果讨论

在常温下钛对 N_2 、 H_2 的吸附一般是化学吸附。但在液氮温度下钛膜对不同气体的吸附过程和吸附性质尚在探讨。目前较多的看法是包括三个过程的吸附:首先是气体分子被物理吸附于表面;然后很快转化为分子态的化学吸附,并在表面形成一个可游动的吸附致密层;最后,扩散进入膜中转为原子态的稳定化学吸附。按这样的吸附过程,起始粘着系数实际是物理吸附概率。据 Feukel 理论,在物理吸附阶段,吸附于表面的分子数与碰撞在表面上的分子数 n 及其停留时间 τ 有关

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{Q}{RT_s}\right) \quad (16-30)$$

式中 Q ——物理吸附热,它和气体性质、膜的材料有关;

τ_0 ——被束缚于表面的分子在垂直表面的法线方向上的振动周期。它与构成膜面的原子(或分子)的振动时间有直接关系。

在一般情况下, $\tau_0 = 10^{-12} \sim 10^{-14}\text{s}$ 。由式(16-30)可见, τ 主要取决于膜面温度 T_s , 随 T_s 的降低,显然增加了气体分子碰在膜面上的停留时间 τ , 粘着系数也就增大了。

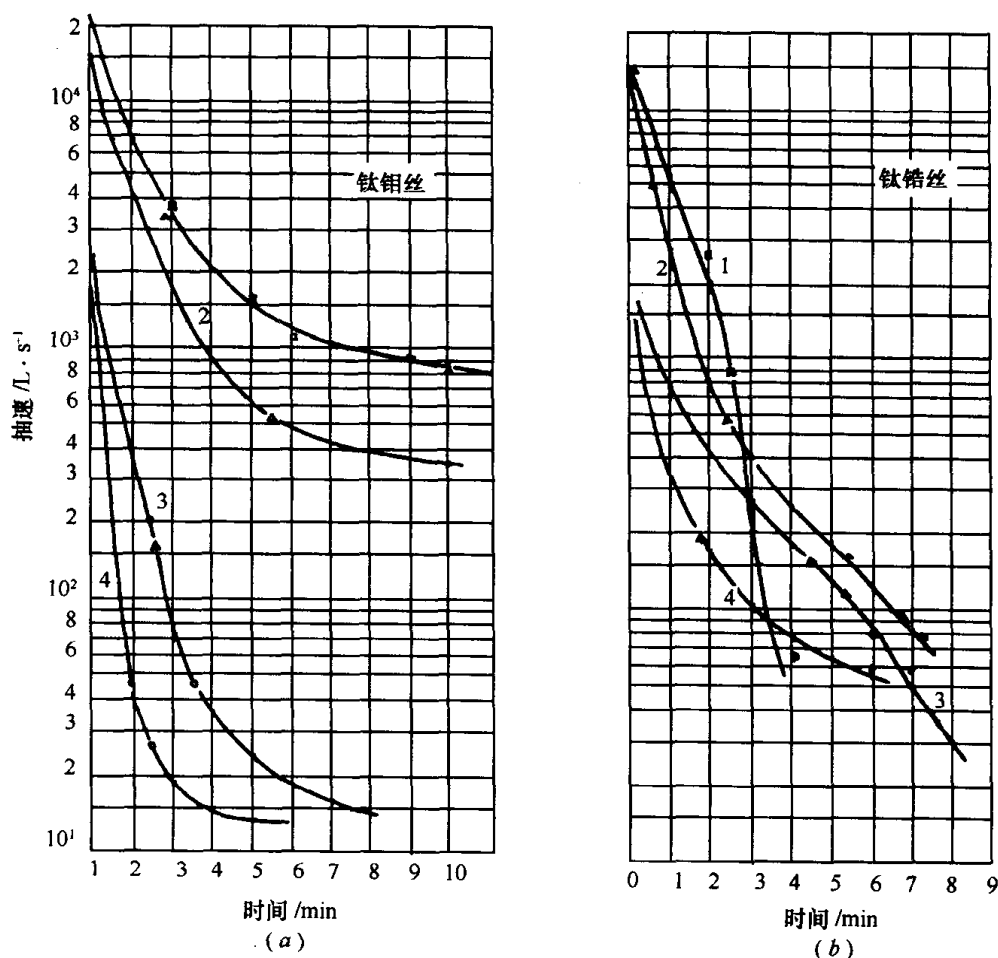


图 16-45 钛钼丝 (a) 和钛锆丝 (b) 的抽气曲线

(蒸钛 5min, 关阀, 比蒸发率 $2.9 \times 10^{-8} \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$, 钛膜面积 1758cm^2)1—78K, N_2 , $Q = 2.33 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$; 2—78K, H_2 , $Q = 3.67 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$;3—12°C, H_2 , $Q = 4.27 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$; 4—12°C, H_2 , $Q = 3.0 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

还看到, 钛钼丝对 N_2 、 H_2 吸附容量随膜生成温度的降低而增大。这与低温下成膜的结构及吸气过程相联系。研究表明: 低温下生成膜与较高温度下生成膜相比有两个特点: ① 尽管表面吸附位置数目基本相同, 但其中高能吸附位置数的比例增多; ② 由于晶格较杂乱, 增大了吸附可利用的内表面积, 膜中也同时存在较多的晶格缺陷。

在低温吸附过程中, 吸附容量主要取决于表面致密层中被吸附气体分子向膜中的扩散速率。它除与膜面温度有关外, 还与膜的晶体结构有关。 N_2 和 H_2 在钛膜中扩散主要是通过晶界间隙和晶格缺陷进行的。因此, 在低温下生成的膜, 由于可利用吸附表面积的增大和大量晶格缺陷的存在, 使吸附量必然增加。

此外, 吸气容量特性与吸气材料的性质有关。在常温下钛锆丝的吸附容量反而比液氮温度下要大。锆作为一种高温吸气材料在电子管中广泛应用, 正是利用了锆在高温下有更大吸气能力的这一特点。

化学吸附是单分子层的。要不断吸气必须更新表面的吸附位置(继续蒸发新鲜钛膜, 或者已吸附分子向膜内扩散), 因此粘着系数 α 又与表面覆盖度 θ 有关

$$\theta = \frac{N}{N_s} \quad (16-31)$$

式中 N_s ——单位钛膜表面上化学吸附一单分子层时气体分子的数目(对不同气体其值不同, N_2 为 6×10^{14} 个/cm², H_2 为 1.6×10^{15} 个/cm²);

N ——单钛膜表面上已吸附的气体分子数。

根据化学吸附理论,单位钛膜表面上的抽速

$$S = \frac{\nu}{4} f(\theta) \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \approx S_0 \alpha f(\theta) \quad (16-32)$$

式中 $f(\theta) = \frac{4}{4-\theta}(1-\theta)^2$ ——打到钛膜上气分子中满足化学吸附条件的概率;

E ——化学吸附活化能;

$S_0 = 3.64 \sqrt{\frac{T}{M}}$ ——理想比抽速,在 20℃ 下对 H_2 为 $S_0 = 44.4$ L/s,对 N_2 为 $S_0 = 11.9$ L/s。

当表面覆盖度 $\theta = 0$ (即 $f(\theta) = 1$) 时,表面粘着系数称为本征粘着系数 α_0 。它的物理意义是指蒸发率足够高或工作压力足够低时,钛膜表面几乎没有吸附上任何气体分子的新鲜情况下,对气体分子的粘着系数。在一般情况下,上述条件是不能满足的。因此,实际所测粘着系数是表面覆盖度 $\theta \neq 0$ 时的值,故 $\alpha < \alpha_0$ 。就本实验条件,由于蒸发率较小 ($W = 2.9 \times 10^{-8}$ g/cm²·s),本底压力又较高,所以表面覆盖度的影响不能忽略,所测粘着系数并不是本征值 α_0 。

(四) 极高真空设备中的冷漏现象及其消除方法

1. 概述

“冷漏”现象是在真空获得设备冷却时,漏孔才显现出来的现象。经常会有这样的情况,即在常温下漏孔确实是存在的,但由于漏率很小,即使采用高灵敏度检漏仪也检测不出来。然而,当系统长时期承受冷热冲击后,特别是在使用低温液体(液氮、液氦等)冷却后,由于材料的胀缩率不同,加之较高的气体密度和较低的粘滞性配合起来,将会使漏率增大。“冷漏”现象与常温下漏孔接触的介质有很大关系。当常温下的漏孔与 4.2K 的液氮相接触时,其漏率会有较大的增加。在 2.19K 以下由于“超流”现象的出现还会引起“超漏”现象。根据实践经验,就其材料结构而言,有如下几种情况:① 材质本身有缺陷、裂纹等;② 焊接材料不匹配;③ 焊缝质量不高,有夹杂等现象;④ 焊缝强度不牢;⑤ 焊后清洗不彻底,晶间腐蚀严重;⑥ 结构无挠性等。就其密封问题而言,尚有如下几种情况:① 密封材料不佳;② 密封结构不合理;③ 法兰压紧力不够或不均匀;④ 无防止热胀冷缩的措施等。

“冷漏”现象在真空获得中,特别是在超高真空和极高真空获得中是一个不可忽视的重要环节,必须采用有效措施加以防止或消除。

2. 实验系统

图 16-46 是液氮低温泵结构示意图。图 16-47 是该系统构成示意图。实验对象是液氮低温泵本身及其测试罩。该测试罩以法兰直接与低温泵相连,其上法兰有调制 BA 规,用来测量系统真空度。残余气体分析和系统检漏采用带倍增器的四极质谱分析仪(QMG-101 型)。低温冷却使用液氮。

3. 实验内容与方法

液氮低温泵在使用过程中的温变特性十分突出,尽管在泵的制作和初调过程中曾反复进行过冷热冲击实验,但由于种种原因(例如多次温变、振动、承载等),往往还会在焊缝或密封连接处出现“冷漏”现象。因此,在低温泵正式注入液氮前还必须反复对该泵进行冷热冲击考验。

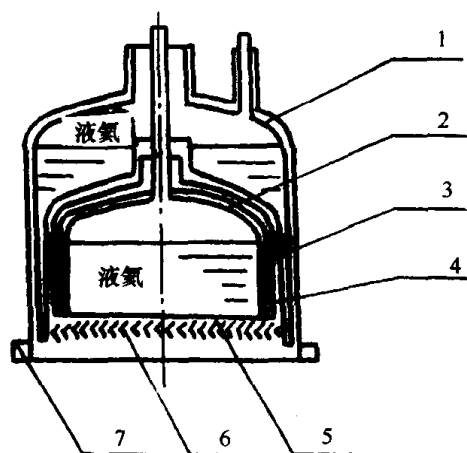


图 16-46 液氮低温泵结构示意图

1—液氮容器;2—液氮容器;3—侧屏;4—光气容积;
5—抽气面;6—冷障板;7—法兰。

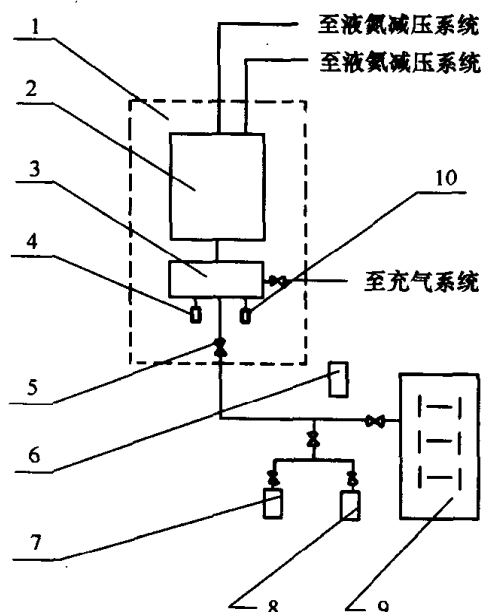


图 16-47 液氮低温泵系统构成示意图

1—烘烤系统;2—低温泵;3—测试罩;4—BA 规;
5—超高真空阀;6—四极质谱探头;7—吸附泵(1);
8—吸附泵(2);9—溅射离子泵;10—弯注规。

(1) 重复性冷热冲击试验

- ① 烘烤前对系统进行残气质谱分析和氮质谱检漏;
- ② 系统烘烤升温(约 300°C , 100h);
- ③ 系统自然冷却(到室温);
- ④ 系统强迫冷却:在液氮胆内注入液氮,在液氮胆内注入液氮;
- ⑤ 观察系统真空度变化及残气成分变化(质谱图)。

(2) 漏孔位置的确定及消除孔的方法

通过残气质谱分析,当确知系统因反复冷热冲击而产生“冷漏”时,应首先确定漏孔的位置,然后再设法消除漏孔。

- ① 用四极质谱计检漏法确定漏孔位置;
- ② 用超高真空补漏胶喷涂堵漏法消除金属焊缝处的漏孔;
- ③ 用法兰压紧法消除可拆密封连接处的漏孔;
- ④ 用液氮浸泡法检验喷涂堵漏法的密封效果;
- ⑤ 用氮质谱检漏法检验法兰压紧法的密封效果。

(3) 稳定性冷热冲击实验

- ① 长时间连续烘烤保温(约 200°C , 110h);
- ② 系统自然冷却后逐一对每个焊缝和密封法兰进行检漏;
- ③ 系统强迫冷却,在液氮胆内注入液氮,在液氮胆内注入液氮;
- ④ 对系统进行残气分析和氮质谱检漏。

4. 实验结果与分析

在重复性冷热冲击实验前,首先对系统进行残气分析。图 16-48 是系统残气质谱图。从该图中可以看出, H_2 (2) 和 H_2O (18) 是主峰,说明系统中可能不存在较大的可检漏隙。接着用氮峰定标法对液氮胆,液氮胆及所有密封法兰进行检漏,亦未发现可检漏隙。这与上述分析是

一致的。

系统经多次反复烘烤和冷却后,由于材料的胀缩率不同,一般说来,在强迫冷却过程中(注入液氮或液氮),焊缝处容易产生拉裂型的“冷漏”现象;而在自然冷却过程中,法兰密封连接处容易出现分离型漏隙,当然,也有可能产生拉裂型的“冷漏”现象。图 16-49 是系统经烘烤自然冷却到室温时的残气质谱图。图中,主峰是 $N_2(28)$, $H_2(2)$, $N^+(14)$ 和 $O_2(32)$ 等,这与正常烘烤后的通用残气质谱图(H_2 是主峰)不相符合。说明该系统可能存在着较大的可检漏隙。我们进一步用如下的实验来确定漏孔的性质和部位。

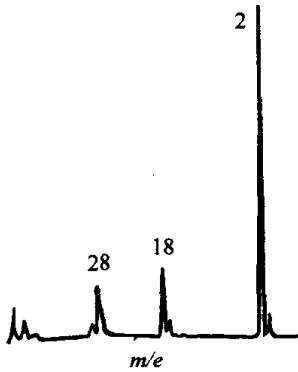


图 16-48 系统残气质谱图

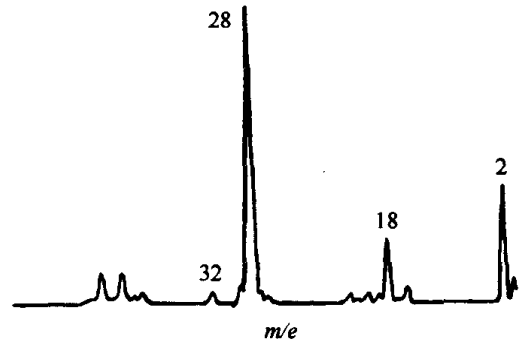


图 16-49 系统经烘烤冷却到室温时的残气质谱图

在低温泵液氮胆内注入液氮,系统真空度由 $2.6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 提高到 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,可初步判断液氮胆工作正常。在液氮胆内注入液氮,系统真空度骤然降低到 $2.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。图 16-50 是对应的残气质谱图。从图中可以看出,主峰 $N_2(28)$ 、 $N^+(14)$ 、 $O_2(32)$ 、 $Ar(40)$ 等,这是典型的空气质谱图。这说明液氮胆的某一焊缝产生了“冷漏”现象。接着用喷吹法向液氮胆内吹入氮气,确定出漏孔位置在颈管焊缝接头处。图 16-51 是相应的氮峰质谱检漏图。

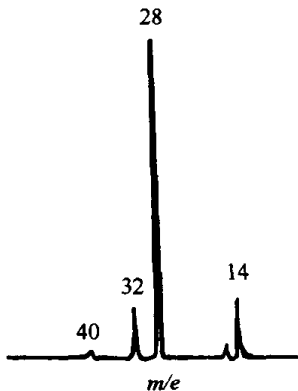


图 16-50 液氮注入对应残气质谱图



图 16-51 液氮胆内注入氮气时,相应的氮峰质谱图

如何消除这一漏隙?通常采用重新补焊的方式较为稳妥可靠。然而,在这种情况下,焊缝漏隙是在颈管内部,无法进行原位补焊。若层层割开后逐一补焊,这无异于重新做泵,且担着新的风险。为此,尝试了一种新的方法——超高真空补漏胶喷涂堵漏法。其具体做法是:① 用专用工具将该补漏胶均匀喷涂到漏隙处;② 升温固化,使补漏胶与孔隙粘结牢固并具有一定的强度;③ 反复上述步骤数次,直到认为满意为止。

采用这种方法堵漏后,先在室温下对原漏隙进行氮峰法检漏,再用液氮浸泡法进一步检

漏,并分别画出相应的残气质谱图和氦质谱检漏图,均未发现有“冷漏”,说明用此法来消除“冷漏”现象基本成功。

在消除焊缝处的“冷漏”之后,进一步对所有的法兰密封连接处进行氦峰法检漏。结果发现大法兰密封连接处有漏隙存在,其残气质谱图如图 16-52 所示。

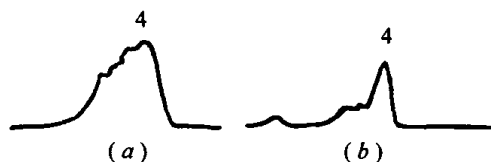


图 16-52 大法兰密封连接处有漏隙时残气质谱图

(a)“冷漏”的质谱图;(b)消除“冷漏”的质谱图。

这主要是由于法兰、螺钉等连接处因胀缩率不同而引起密封垫圈分离变形的缘故。采用多次压紧法兰的方法,并通过测量系统真空度变化和监测喷吹法检漏时氦峰变化谱图(直到氦峰谱图无变化反应时为止)来消除漏隙。在这一过程中,法兰共压紧五次,系统真空度从 $4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 提高到 $6 \times 10^{-6} \text{Pa}$,相应的氦峰变化从较大一直变到与本底氦峰一致。至此,认为已消除了该漏隙。

最后,进行了稳定性冷热冲击实验,以进一步考验焊缝及法兰连接处的密封性能。系统经过大约 190°C , 110h 的烘烤保温后,自然冷却到室温,系统真空度为 $2 \times 10^{-6} \text{Pa}$,图 16-53 是相应的残气质谱图。从图中可以看出, $\text{H}_2(2)$ 是主峰,大致可以分析出烘烤过程是正常的。进一步对所有密封处(液氮胆、液氮胆、连接法兰、规管密封法兰、充气密封法兰及超高真空阀门等)进行喷吹法氦质谱检漏,均未发现可检漏孔。图 16-54 是这一检漏过程中的连续扫谱图。接着,在液氮胆内注入液氮,系统真空度提高到 $4 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 。图 16-55 是相应的残气质谱图。最后在液氮胆内注入液氮,并再次仔细对所有密封处进行氦峰定标检漏,均未发现有可检漏孔。图 16-56 为液氮胆内注入液氮后,氦谱定标检漏时的残气质谱图。

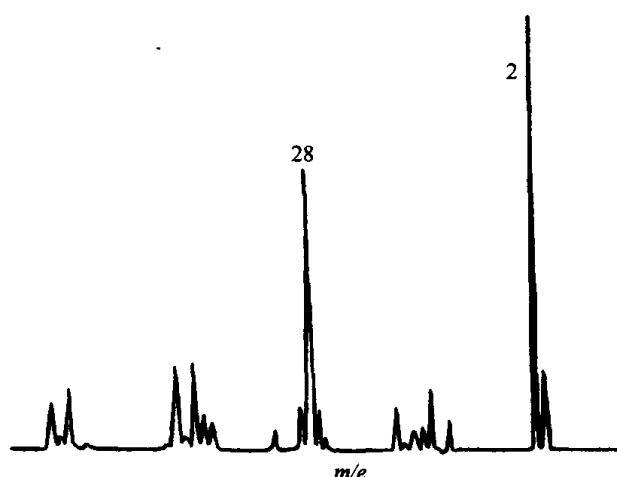


图 16-53 系统经 190°C , 110h 烘烤保温后相应的残气质谱图

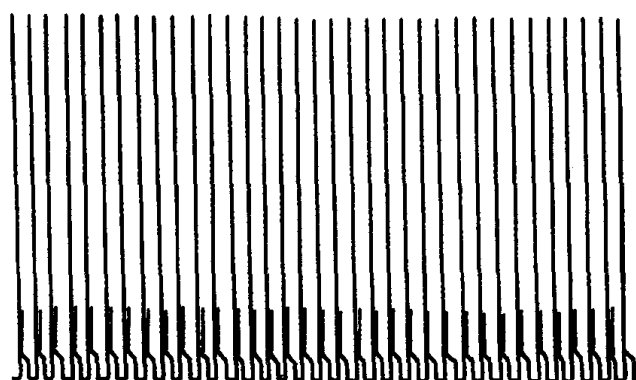


图 16-54 喷吹法氦质谱检漏过程中的连续扫谱图

5. 结论

- ① 在满足系统总放气率要求的前提下,尽可能降低烘烤温度,将会减小“冷漏”的概率;
- ② 对于分离型漏隙,可采用压紧法兰法加以消除;
- ③ 对于拉裂型焊缝漏隙的消除,除可采用直接补焊法外,在特殊情况下采用超高真空补

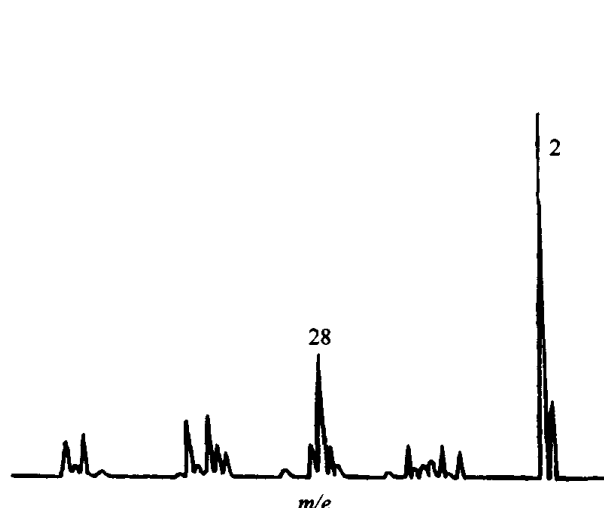


图 16-55 液氮胆内注满液氮,工作压力为 4×10^{-7} Pa 时,相应的残气质谱图
漏胶喷涂堵漏法,在一定条件下(液氮冷却)也是行之有效的。

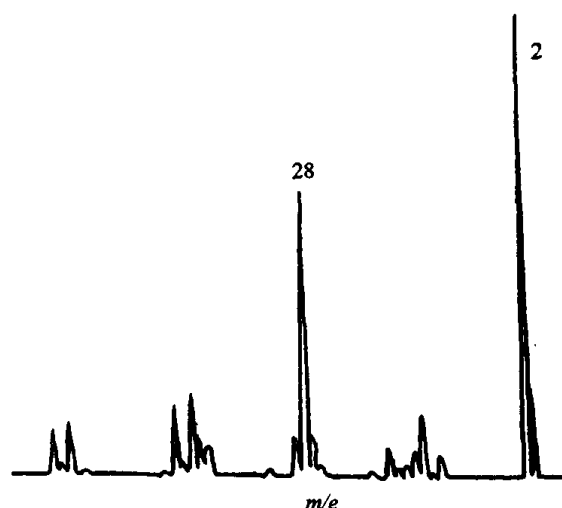


图 16-56 液氮胆内注入液氮后,氮谱定标检漏时,残气质谱图

五、用分子沉技术获得 10^{-11} Pa 极高真空

(一) 极高真空装置真空系统的结构及特点

用液氮冷冻钛升华阱的方法可获得 10^{-11} Pa 的压力,这种极高真空装置的系统结构示意图,如图 16-57 所示。该系统由主容器、极高真空室、加热装置、冷冻装置及抽气设备等组成。主容器包括内壳和外壳两部分,均由不锈钢制成。外壳尺寸为 $\phi 900\text{mm} \times 1600\text{mm}$,内壳尺寸为 $\phi 600\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。内外壳之间的空间称为“夹层”,内装管状加热器和液氮冷却的紫铜盘管。极高真空室由不锈钢制成,尺寸为 $\phi 400\text{mm} \times 500\text{mm}$,其结构为双壁式的,用以贮存液氮。在极高真空室的内部和外部,各装有一个钛钼合金丝做的钛升华阱和泵。出口处装有一个百叶窗式的挡板。测量用裸调制 BA 规和裸弯注规。加热装置包括管状加热器和空气加热器两部分。前者用来加热外壳、内壳和极高真空室;后者用来烘烤主扩散泵上面的液氮冷阱。冷冻装置由氟里昂制冷系统和开式液氮供给系统组成。用以冷冻主扩散泵上面的挡板及端法兰的橡胶密封圈和供给冷阱、内壳和极高

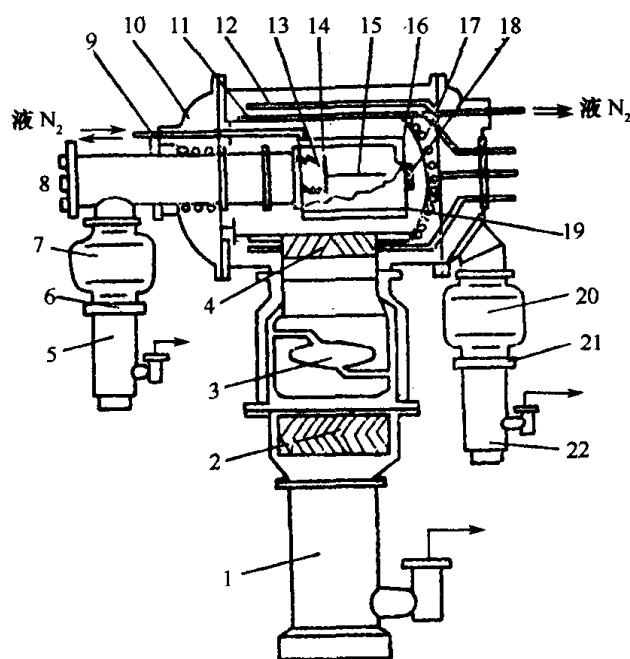


图 16-57 极高真空装置结构示意图
1—KY-13 扩散泵;2—氟里昂冷冻挡板;3—液氮冷阱;
4—挡板;5—扩散泵;6—挡板;7—冷阱;
8—测量法兰;9—极高真空室进出液口;10—容器外壳;
11—中壳液氮盘管;12—管加热器;13—规管;
14—紫铜百叶窗障板;15—小钛泵;16—极高真空室;
17—容器中壳;18—百叶窗挡板;19—大钛泵;
20—冷阱;21—挡板;22—KY-9 扩散泵。

真空室液氮。

抽气设备由三个相互独立的分系统组成,即“夹层”抽气系统、“隧道”抽气系统和“主”抽气系统。“夹层”抽气系统是真空保护系统,工作压力为 $10^{-3}\text{Pa}\sim 10^{-5}\text{Pa}$,其作用是减小漏气和漏热。“隧道”系统是测量引线的保护真空通道,该系统内的压力为 $10^{-4}\text{Pa}\sim 10^{-5}\text{Pa}$ 。主抽气系统同主容器和极高真空室相连,由机械泵、KY-11 和 KY-13 两级扩散泵、人字形氟里昂挡板、液氮冷阱、两级百叶窗挡板、冷冻钛升华阱及钛升华泵等构成。

(二) 压力的测量

选用了两种真空规来测量极高真空室的压力。一种是调制 BA 规,型号为 IMR-103,规管常数为 0.188Pa^{-1} ,配有巴尔蔡司公司生产的全自动数字显示超高真空电离计。另一种是兰州物理研究所研制的陶瓷裸式弯注规,规管常数为 0.105Pa^{-1} 。离子流测量采用 TR-84M 振荡式静电计。

在测量技术方面,着重作了以下改进:

① 将规管的钨灯丝改为敷氧化钽钨灯丝,降低了灯丝的工作温度,使灯丝工作时的蒸气压由 10^{-10}Pa 降低到 10^{-12}Pa 以下。结果见表 16-16。

表 16-16 钨灯丝和敷氧化钽钨灯丝工作参数比较

发射电流 / mA		0.5	1.0	2.0	4.0	10
灯 丝	参 数					
钨	$U_f \times I_f / \text{V} \cdot \text{A}$	4.1×1.85	4.45×1.95	4.8×2.05	5.2×2.1	5.8×2.25
	P / W	7.6	8.7	9.01	10.9	13
	T / K	2183	2263	2298	2348	2433
敷氧化钽钨	$U_f \times I_f / \text{V} \cdot \text{A}$	2.6×1.0	2.7×1.0	2.8×1.0	3×1.05	3.3×1.2
	P / W	2.6	2.7	2.8	3.15	3.96
	T / K	1517	1532	1550	1602	1692

注: U_f —灯丝电压; I_f —灯丝电流; P —灯丝发射功率; T —灯丝温度

②解决了弱小电流测量中的绝缘、屏蔽及接地等一系列技术问题,可靠、稳定地测量了 10^{-15}A 的弱小电流。

(三) 系统运转程序

在实验工作中得到了一套运转该系统的最佳程序。首先,系统要进行预处理,即先用干燥氮气“冲洗”系统,然后进行低真空“浸泡”。系统烘烤温度约为 250°C ,时间约 36h。在系统整体烘烤时,启动主扩散泵上的氟里昂障板,并对升华钛泵和测量规管进行彻底去气。在烘烤过程中,当系统的压力降低到 10^{-4}Pa 时,开始间断地对钛泵及规管去气,直到系统完全冷却下来时为止。当系统的压力降低到 10^{-9}Pa 时,停止去气。系统的冷冻过程必须按照从高压到低压力这样一个程序进行,最后冷冻极高真空室。在冷冻过程中应注意防止“冷漏”现象的出现。应先启动冷冻钛升华阱,再启动冷冻钛升华泵,以形成分子沉环境。两者加热功率分别为 1400W 和 600W。每次的工作时间为 10min。大约工作 3~4 次就足够了。要注意消除蒸钛

过程中钛膜解吸放出的甲烷气体,否则不易得到更低的压力。

(四) 实验结果

实验共进行了12次,均稳定地获得了 10^{-11} Pa的压力。其中三次实验结果见表16-17。运转过程中压力的变化由图16-58曲线给出。实验测得冷冻钛升华阱的效率分别为812(对氢气)和5000(对氮气)。分子沉效率为0.63。

表 16-17 极限压力实验结果

实验序号	1	2	3
灯丝发射电流/mA	2	2	2
静电计高阻/ Ω	10^{12}	10^{12}	10^{12}
极限压力测量值/Pa	6.0×10^{-11}	4.2×10^{-11}	2.1×10^{-11}
备 注	正常运转	正常运转	系统经 LN_2 减压

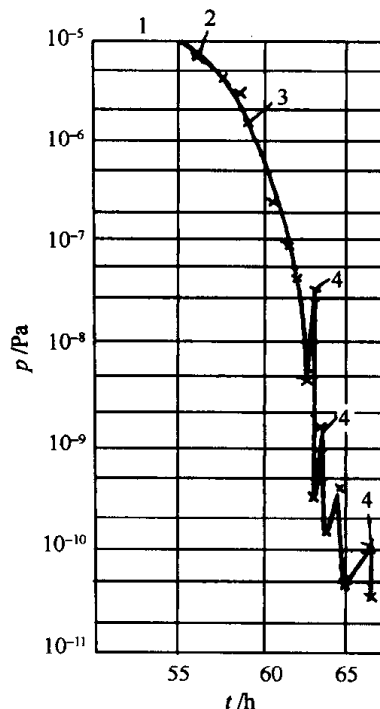


图 16-58 压力变化曲线

六、极高真空技术的应用

运用极高真空技术,可能获得 10^{-10} Pa以下的压力,在此环境中,气体分子非常稀薄,分子密度小于 10^4 个/ cm^3 ,分子平均自由程大于 10^8m ,气体分子的碰壁数减小到 $10^8/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。由于极高真空环境具有极低压力和极清洁的特性,它被应用到许多科学技术领域中去。然而极高真空度不但很难获得和测量,而且制造成本和运行成本非常昂贵,使得该项技术的应用受到很大限制,目前仅应用在高尖端技术领域中。

①高能粒子加速器。高能粒子加速器一般采用分段同步加速的方法。为了把粒子加速到很高能量,需要粒子在真空管道中不断做加速运动,粒子在真空管道中运动的路程愈长,被加速粒子所得到的能量愈高。在正、负质子,正、负电子对撞加速器中,不同电荷的正、负质子及电子沿相反方向在加速束流管道中做循环运动。为了增加正、负粒子对撞的反应概率,要求粒子束长时间的贮存积累,达到对撞时所需要的束流强度。粒子长时间或长路程的在加速束流管道中作被加速运动时,如果和加速束流管道中的粒子和空间残余的气体分子发生碰撞,会减小束流强度。一般正、负电子对撞机要求压力 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ Pa,正、负质子对撞机加速器要求压力 10^{-10} Pa以下。我国北京高能物理所的正、负电子对撞加速器及兰州近代物理所的重离子加速器(冷却环)的束流管道的真空度到 10^{-9} Pa。欧洲联合核子研究中心(CERN)建造的正、负质子定义贮存环加速器真空度优于 10^{-10} Pa。

②分子束外延技术用来生长极纯半导体单晶材料。半导体晶体材料的光电性能对外来杂质分子极为敏感。在单晶生长过程中,除材料本身要求纯度高外,在制造过程中,不要引入环境的杂质分子,因而要在极高真空环境下生长晶体。分子束外延设备中晶体生长室的压力在

10^{-9}Pa 。当然压力更低些最好。这样低的压力条件在地面很难实现。科学家又提出了利用太空清洁环境生长极纯材料的思想。利用近地球轨道分子屏技术,可以实现 10^{-11}Pa 的极高真空环境。我们提出的可变翼轨道分子屏的设计,可以在近地球轨道获得 10^{-12}Pa 的轨道分子屏空间实验室。美国科学家利用航天飞机进行了 5 次空间 GaAs 晶体外延生长实验,就是应用轨道分子屏技术,取得了满意的结果。

③在航天技术领域也开始应用极高真空技术。远离地球的深远宇宙太空处于极高真空状态。该环境不断和航天器发生相互作用,产生一些地面环境不能发生的效应和问题。使航天器出现故障,降低航天器的可靠性。在极高真空中气体分子的碰壁数很小。航天器表面的气体不断放出,表面愈来愈清洁。几乎成为没有吸附气体分子的超清洁表面。两个超清洁表面接触在一起,经过加压,在不加热的情况下可以发生粘着,焊接现象,叫做“冷焊”。对于活动部件来说,摩擦系数变大,甚至粘着、焊死。为消除此类机械故障,人们需要预先在地面进行模拟试验,采取防范措施。但由于极高真空度仅为 10^{-9}Pa ,尚不能真实地模拟宇宙深空环境。随着极高真空技术的发展,应用极高真空技术的领域将会不断地扩展。

附录

一、真空设计常用数据

(一) 基本物理常数

量	符 号	值
圆周率	π	3.1415927
自然对数的底	e	2.7182818
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} = 12.5663706144 \times 10^{-7} \text{H/m}$
真空中光速	C	$(2.99792458 \pm 0.00000012) \times 10^8 \text{m/s}$
真空电容率	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$	$(8.85418782 \pm 0.00000005) \times 10^{-12} \text{F/m}$
精细结构常数	$\alpha = \mu_0 e^2 / 2h$	$(7.2973506 \pm 0.0000060) \times 10^{-3}$
基本电荷(元电荷)	e	$(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}$
普朗克常数	h	$(6.626176 \pm 0.000036) \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$
阿伏加德罗常数	$N_A \cdot L$	$(6.022045 \pm 0.000031) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
(统一的)原子质量单位	$u = 10^{-3} \text{kgmol}^{-1} / N_A$	$(1.6605655 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg}$
电子静止质量	m_e	$(9.109534 \pm 0.000047) \times 10^{-31} \text{kg}$
质子静止质量	m_p	$(1.6726485 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg}$
中子静止质量	m_n	$(1.6749543 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg}$
μ 介子静止质量	m_μ	$1.883566 \times 10^{-28} \text{kg}$
法拉第常数	$F = N_A \cdot e$	$(9.648456 \pm 0.000027) \times 10^4 \text{C/mol}$
里德伯常数	$R_\infty = \mu_0 m_e e^4 c^3 / 8h^3$	$(1.097373177 \pm 0.000000083) \times 10^7 \text{m}^{-1}$
哈特里能量	$E_a = 2hcR_\infty$	$(4.359814 \pm 0.000024) \times 10^{-18} \text{J}$
玻尔半径	$a_0 = a / 4\pi R_\infty$	$(5.2917706 \pm 0.0000044) \times 10^{-11} \text{m}$
玻尔磁子	$\mu_B = eh / 2m_e$	$(9.274078 \pm 0.000036) \times 10^{-24} \text{A}\cdot\text{m}^2$
核磁子	$\mu_N = eh / 2m_p$	$(5.050824 \pm 0.000020) \times 10^{-27} \text{A}\cdot\text{m}^2$
电子磁矩	μ_e	$(9.284832 \pm 0.000036) \times 10^{-24} \text{A}\cdot\text{m}^2$
质子磁矩	μ_p	$1.4106171 \times 10^{-26} \text{A}\cdot\text{m}^2$
自由电子朗德因子	$g_0 = 2\mu_e / \mu_B$	$2.0023193134 \pm 0.000000070$
质子旋磁比	γ_p	$(2.6751987 \pm 0.0000075) \times 10^8 \text{s}^{-1} \text{T}^{-1}$
摩尔气体常数	R	$8.31441 \pm 0.00026 \text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
标准温标零度	T_0	273.15K
标准大气压	p_0	$1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$
理想气体标准摩尔体积	$V_0 = RT_0 / p_0$	$(2.241383 \pm 0.000070) \times 10^{-2} \text{m}^3 / \text{mol}$
理想气体标准数密度(洛喜密脱常数)	n_0	$(2.6870 \pm 0.0003) \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
玻耳兹曼常数	$k = R / N_A$	$(1.380662 \pm 0.000044) \times 10^{-23} \text{J/K}$
引力常数	G	$(6.6720 \pm 0.0027) \times 10^{-11} \text{m}^3 / \text{kg}\cdot\text{s}^2$
标准自由落体加速度	g_n	9.80665m/s^2
天文单位	A	$149600 \times 10^6 \text{m} (1984 \text{年起为 } 149597870 \times 10^3 \text{m})$
移差距	pc	$30857 \times 10^{12} \text{m} (1984 \text{年起为 } 308567756 \times 10^8 \text{m})$
电子伏特	eV	$(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{J}$
第一辐射常数	$c_1 = 2\pi hc^2$	$(3.741382 \pm 0.000020) \times 10^{-16} \text{W}\cdot\text{m}^2$
第二辐射常数	$c_2 = hc / k$	$(1.438786 \pm 0.000045) \times 10^{-2} \text{m}\cdot\text{K}$
斯忒藩—玻耳兹曼常数	σ	$(5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-8} \text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K}^4)$
电子半径	γ_e	$(2.8179380 \pm 0.0000070) \times 10^{-15} \text{m}$
磁通量子	ϕ_0	$2.06785 \times 10^{-15} \text{Wb}$

注:引自 1973 年 9 月 11 日国际科学联合会理事会科技数据委员会(CODATA)推荐的数据

(二) 数表($N = 0.01 \sim 100$)

N	N^2	$N^{\frac{1}{2}}$	$(10N)^{\frac{1}{2}}$	N^3	$N^{\frac{1}{3}}$	N^4	N^{-1}	$N^{-\frac{1}{2}}$	πN	$\frac{\pi N^2}{4}$	$\log N$	$\ln N$	N
0	0	0	0	0	0	0	∞	∞	0	0	2.0000	$-\alpha$	0
0.01	0.0001	0.1000	0.3162	1.000×10^{-6}	0.2154	1.000×10^{-8}	100.0	10.00	0.0314	7.854×10^{-5}	2.0000	-4.605	0.01
0.02	0.0004	0.1414	0.4472	8.000×10^{-6}	0.2714	1.600×10^{-7}	50.00	7.071	0.0628	3.142×10^{-4}	2.3010	-3.912	0.02
0.03	0.0009	0.1732	0.5477	2.700×10^{-5}	0.3107	8.100×10^{-7}	33.33	5.773	0.0942	7.069×10^{-4}	2.4771	-3.507	0.03
0.04	0.0016	0.2000	0.6325	6.400×10^{-5}	0.3420	2.560×10^{-6}	25.00	5.000	0.1257	1.257×10^{-3}	2.6021	-3.219	0.04
0.05	0.0025	0.2236	0.7071	1.250×10^{-4}	0.3684	6.250×10^{-6}	20.00	4.472	0.1571	1.963×10^{-3}	2.6990	-2.996	0.05
0.06	0.0036	0.2449	0.7746	2.160×10^{-4}	0.3915	1.296×10^{-5}	16.67	4.082	0.1885	2.827×10^{-3}	2.7782	-2.813	0.06
0.07	0.0049	0.2646	0.8367	3.430×10^{-4}	0.4121	2.401×10^{-5}	14.29	3.780	0.2199	3.848×10^{-3}	2.8451	-2.659	0.07
0.08	0.0064	0.2828	0.8944	5.120×10^{-4}	0.4309	4.096×10^{-5}	12.50	3.536	0.2513	5.027×10^{-3}	2.9031	-2.526	0.08
0.09	0.0081	0.3000	0.9487	7.290×10^{-4}	0.4481	6.561×10^{-5}	11.11	3.333	0.2827	6.362×10^{-3}	2.9542	-2.408	0.09
0.10	0.0100	0.3162	0.000	1.000×10^{-3}	0.4642	1.000×10^{-4}	10.00	3.162	0.3142	7.854×10^{-3}	3.000	-2.303	0.10
0.11	0.0121	0.3317	1.049	1.331×10^{-3}	0.4791	1.464×10^{-4}	9.091	3.015	0.3456	9.503×10^{-3}	3.0414	-2.207	0.11
0.12	0.0144	0.3464	1.095	1.728×10^{-3}	0.4932	2.074×10^{-4}	8.333	2.887	0.3770	1.131×10^{-2}	3.0792	-2.120	0.12
0.13	0.0169	0.3606	1.140	2.197×10^{-3}	0.5066	2.856×10^{-4}	7.692	2.773	0.4084	1.327×10^{-2}	3.1139	-2.040	0.13
0.14	0.0196	0.3742	1.183	2.744×10^{-3}	0.5192	3.842×10^{-4}	7.143	2.673	0.4398	1.539×10^{-2}	3.1461	-1.966	0.14
0.15	0.0225	0.3873	1.225	3.375×10^{-3}	0.5313	5.063×10^{-4}	6.667	2.582	0.4712	1.767×10^{-2}	3.1761	-1.897	0.15
0.16	0.0256	0.4000	1.265	4.096×10^{-3}	0.5429	6.554×10^{-4}	6.250	2.500	0.5027	2.011×10^{-2}	3.2041	-1.833	0.16
0.17	0.0289	0.4123	1.304	4.913×10^{-3}	0.5540	8.352×10^{-4}	5.882	2.425	0.5341	2.270×10^{-2}	3.2304	-1.772	0.17
0.18	0.0324	0.4243	1.342	5.832×10^{-3}	0.5646	1.050×10^{-3}	5.556	2.357	0.5655	2.545×10^{-2}	3.2553	-1.715	0.18
0.19	0.0361	0.4359	1.378	6.859×10^{-3}	0.5749	1.303×10^{-3}	5.263	2.294	0.5969	2.835×10^{-2}	3.2788	-1.661	0.19
0.20	0.0400	0.4472	1.414	8.000×10^{-3}	0.5848	1.600×10^{-3}	5.000	2.236	0.6283	3.142×10^{-2}	3.3010	-1.609	0.20
0.21	0.0441	0.4583	1.449	9.261×10^{-3}	0.5944	1.945×10^{-3}	4.762	2.182	0.6597	3.464×10^{-2}	3.3222	-1.561	0.21
0.22	0.0484	0.4690	1.483	1.065×10^{-2}	0.6037	2.343×10^{-3}	4.545	2.132	0.6912	3.801×10^{-2}	3.3424	-1.514	0.22
0.23	0.0529	0.4796	1.517	1.217×10^{-2}	0.6127	2.798×10^{-3}	4.348	2.085	0.7226	4.155×10^{-2}	3.3617	-1.470	0.23
0.24	0.0576	0.4899	1.549	1.382×10^{-2}	0.6214	3.318×10^{-3}	4.167	2.041	0.7540	4.524×10^{-2}	3.3802	-1.427	0.24
0.25	0.0625	0.5000	1.581	1.563×10^{-2}	0.6300	3.906×10^{-3}	4.000	2.000	0.7854	4.909×10^{-2}	3.3979	-1.386	0.25
0.26	0.0676	0.5099	1.612	1.758×10^{-2}	0.6383	4.570×10^{-3}	3.846	1.961	0.8168	5.309×10^{-2}	3.4150	-1.347	0.26
0.27	0.0729	0.5196	1.643	1.968×10^{-2}	0.6463	5.314×10^{-3}	3.704	1.924	0.8482	5.726×10^{-2}	3.4314	-1.309	0.27
0.28	0.0784	0.5292	1.673	2.195×10^{-2}	0.6542	6.147×10^{-3}	3.571	1.890	0.8796	6.158×10^{-2}	3.4472	-1.273	0.28
0.29	0.0841	0.5385	1.703	2.439×10^{-2}	0.6619	7.073×10^{-3}	3.448	1.857	0.9111	6.605×10^{-2}	3.4624	-1.238	0.29
0.30	0.0900	0.5477	1.732	2.700×10^{-2}	0.6694	8.100×10^{-3}	3.333	1.826	0.9425	7.069×10^{-2}	3.4771	-1.204	0.30
0.31	0.0961	0.5568	1.761	2.979×10^{-2}	0.6768	9.235×10^{-3}	3.226	1.796	0.9739	7.548×10^{-2}	3.4914	-1.171	0.31
0.32	0.1024	0.5657	1.789	3.277×10^{-2}	0.6840	1.049×10^{-2}	3.125	1.768	1.005	8.042×10^{-2}	3.5052	-1.139	0.32
0.33	0.1089	0.5745	1.817	3.594×10^{-2}	0.6910	1.186×10^{-2}	3.030	1.741	1.037	8.553×10^{-2}	3.5185	-1.109	0.33
0.34	0.1156	0.5831	1.844	3.930×10^{-2}	0.6980	1.336×10^{-2}	2.941	1.715	1.068	9.079×10^{-2}	3.5315	-1.079	0.34

(续)

N	N^2	$N^{\frac{1}{2}}$	$(10N)^{\frac{1}{2}}$	N^3	$N^{\frac{1}{3}}$	N^4	N^{-1}	$N^{-\frac{1}{2}}$	πN	$\frac{\pi N^2}{4}$	$\log N$	$\ln N$	N
0.35	0.1225	0.5916	1.871	4.288×10^{-2}	0.7047	1.501×10^{-2}	2.857	1.690	1.100	9.621×10^{-2}	1.5441	-1.050	0.35
0.36	0.1296	0.6000	1.897	4.666×10^{-2}	0.7114	1.680×10^{-2}	2.778	1.667	1.131	1.018×10^{-1}	1.5563	-1.002	0.36
0.37	0.1369	0.6083	1.924	5.065×10^{-2}	0.7179	1.874×10^{-2}	2.703	1.644	1.162	1.075×10^{-1}	1.5682	-0.9943	0.37
0.38	0.1444	0.6164	1.949	5.487×10^{-2}	0.7243	2.085×10^{-2}	2.632	1.622	1.194	1.134×10^{-1}	1.5798	-0.9676	0.38
0.39	0.1521	0.6245	1.975	5.932×10^{-2}	0.7306	2.313×10^{-2}	2.564	1.601	1.225	1.195×10^{-1}	1.5911	-0.9416	0.39
0.40	0.1600	0.6325	2.000	6.400×10^{-2}	0.7368	2.560×10^{-2}	2.500	1.581	1.257	1.257×10^{-1}	1.6021	-0.9163	0.40
0.41	0.1681	0.6403	2.025	6.892×10^{-2}	0.7429	2.826×10^{-2}	2.439	1.562	1.288	1.320×10^{-1}	1.6128	-0.8916	0.41
0.42	0.1764	0.6481	2.049	7.409×10^{-2}	0.7489	3.112×10^{-2}	2.381	1.543	1.319	1.385×10^{-1}	1.6232	-0.8675	0.42
0.43	0.1849	0.6557	2.074	7.951×10^{-2}	0.7548	3.419×10^{-2}	2.326	1.525	1.351	1.452×10^{-1}	1.6335	-0.8440	0.43
0.44	0.1936	0.6633	2.098	8.518×10^{-2}	0.7606	3.748×10^{-2}	2.273	1.508	1.382	1.521×10^{-1}	1.6435	-0.8210	0.44
0.45	0.2025	0.6708	2.121	9.113×10^{-2}	0.7663	4.101×10^{-2}	2.222	1.491	1.414	1.590×10^{-1}	1.6532	-0.7986	0.45
0.46	0.2116	0.6782	2.145	9.743×10^{-2}	0.7719	4.477×10^{-2}	2.174	1.474	1.445	1.662×10^{-1}	1.6628	-0.7765	0.46
0.47	0.2209	0.6856	2.168	1.038×10^{-1}	0.7775	4.880×10^{-2}	2.128	1.469	1.477	1.735×10^{-1}	1.6721	-0.7550	0.47
0.48	0.2304	0.6928	2.191	1.106×10^{-1}	0.7830	5.308×10^{-2}	2.083	1.443	1.508	1.810×10^{-1}	1.6812	-0.7340	0.48
0.49	0.2401	0.7000	2.214	1.176×10^{-1}	0.7884	5.765×10^{-2}	2.041	1.429	1.539	1.886×10^{-1}	1.6902	-0.7133	0.49
0.50	0.2500	0.7071	2.236	1.250×10^{-1}	0.7937	6.250×10^{-2}	2.000	1.414	1.571	1.963×10^{-1}	1.6990	-0.6931	0.50
0.51	0.2601	0.7141	2.258	1.327×10^{-1}	0.7990	6.765×10^{-2}	1.961	1.400	1.602	2.043×10^{-1}	1.7076	-0.6733	0.51
0.52	0.2701	0.7211	2.280	1.406×10^{-1}	0.8041	7.312×10^{-2}	1.923	1.387	1.634	2.124×10^{-1}	1.7160	-0.6535	0.52
0.53	0.2809	0.7280	2.302	1.489×10^{-1}	0.8093	7.890×10^{-2}	1.887	1.374	1.665	2.206×10^{-1}	1.7243	-0.6349	0.53
0.54	0.2916	0.7348	2.324	1.575×10^{-1}	0.8143	8.503×10^{-2}	1.852	1.361	1.696	2.290×10^{-1}	1.7324	-0.6162	0.54
0.55	0.3025	0.7416	2.345	1.664×10^{-1}	0.8193	9.151×10^{-2}	1.818	1.348	1.728	2.376×10^{-1}	1.7404	-0.5978	0.55
0.56	0.3136	0.7483	2.366	1.756×10^{-1}	0.8243	9.834×10^{-2}	1.786	1.336	1.759	2.463×10^{-1}	1.7482	-0.5798	0.56
0.57	0.3249	0.7550	2.387	1.852×10^{-1}	0.8291	1.056×10^{-1}	1.754	1.325	1.791	2.552×10^{-1}	1.7559	-0.5621	0.57
0.58	0.3364	0.7616	2.408	1.951×10^{-1}	0.8340	1.132×10^{-1}	1.724	1.313	1.822	2.642×10^{-1}	1.7634	-0.5447	0.58
0.59	0.3481	0.7681	2.429	2.054×10^{-1}	0.8387	1.212×10^{-1}	1.695	1.302	1.854	2.734×10^{-1}	1.7709	-0.5276	0.59
0.60	0.3600	0.7746	2.449	2.160×10^{-1}	0.8434	1.296×10^{-1}	1.667	1.291	1.885	2.827×10^{-1}	1.7782	-0.5108	0.60
0.61	0.3721	0.7810	2.470	2.270×10^{-1}	0.8481	1.385×10^{-1}	1.639	1.280	1.916	2.922×10^{-1}	1.7853	-0.4943	0.61
0.62	0.3844	0.7874	2.490	2.383×10^{-1}	0.8527	1.478×10^{-1}	1.613	1.270	1.948	3.019×10^{-1}	1.7924	-0.4780	0.62
0.63	0.3969	0.7937	2.510	2.500×10^{-1}	0.8573	1.575×10^{-1}	1.587	1.260	1.979	3.117×10^{-1}	1.7993	-0.4620	0.63
0.64	0.4096	0.8000	2.530	2.621×10^{-1}	0.8618	1.678×10^{-1}	1.563	1.250	2.011	3.217×10^{-1}	1.8062	-0.4463	0.64
0.65	0.4225	0.8062	2.550	2.746×10^{-1}	0.8662	1.785×10^{-1}	1.538	1.240	2.042	3.318×10^{-1}	1.8129	-0.4308	0.65
0.66	0.4356	0.8124	2.569	2.875×10^{-1}	0.8707	1.897×10^{-1}	1.515	1.231	2.073	3.421×10^{-1}	1.8195	-0.4155	0.66
0.67	0.4489	0.8185	2.588	3.008×10^{-1}	0.8750	2.015×10^{-1}	1.493	1.222	2.105	3.526×10^{-1}	1.8261	-0.4005	0.67
0.68	0.4624	0.8246	2.608	3.144×10^{-1}	0.8794	2.138×10^{-1}	1.471	1.213	2.136	3.632×10^{-1}	1.8325	-0.3857	0.68
0.69	0.4761	0.8307	2.627	3.285×10^{-1}	0.8837	2.267×10^{-1}	1.449	1.204	2.168	3.739×10^{-1}	1.8388	-0.3711	0.69

(续)

N	N^2	$N^{\frac{1}{2}}$	$(10N)^{\frac{1}{2}}$	N^3	$N^{1/3}$	N^4	N^{-1}	$N^{-\frac{1}{2}}$	πN	$\frac{\pi N^2}{4}$	$\log N$	$\ln N$	N
0.70	0.4900	0.8367	2.646	3.430×10^{-1}	0.8879	2.401×10^{-1}	1.429	1.195	2.199	3.848×10^{-1}	1.8451	-0.3567	0.70
0.71	0.5041	0.8426	2.665	3.579×10^{-1}	0.8921	2.541×10^{-1}	1.408	1.187	2.231	3.959×10^{-1}	1.8513	-0.3425	0.71
0.72	0.5184	0.8485	2.683	3.732×10^{-1}	0.8963	2.687×10^{-1}	1.389	1.179	2.262	4.072×10^{-1}	1.8573	-0.3285	0.72
0.73	0.5329	0.8544	2.701	3.890×10^{-1}	0.9004	2.840×10^{-1}	1.370	1.170	2.293	4.185×10^{-1}	1.8633	-0.3147	0.73
0.74	0.5476	0.8602	2.720	4.052×10^{-1}	0.9045	2.999×10^{-1}	1.351	1.162	2.325	4.301×10^{-1}	1.8692	-0.3011	0.74
0.75	0.5625	0.8660	2.739	4.219×10^{-1}	0.9086	3.164×10^{-1}	1.333	1.155	2.356	4.418×10^{-1}	1.8751	-0.2877	0.75
0.76	0.5776	0.8718	2.757	4.390×10^{-1}	0.9126	3.336×10^{-1}	1.316	1.147	2.388	4.536×10^{-1}	1.8808	-0.2744	0.76
0.77	0.5929	0.8775	2.775	4.565×10^{-1}	0.9166	3.515×10^{-1}	1.299	1.140	2.419	4.657×10^{-1}	1.8865	-0.2614	0.77
0.78	0.6084	0.8832	2.793	4.746×10^{-1}	0.9205	3.702×10^{-1}	1.282	1.132	2.450	4.778×10^{-1}	1.8921	-0.2485	0.78
0.79	0.6241	0.8888	2.811	4.930×10^{-1}	0.9244	3.895×10^{-1}	1.266	1.125	2.482	4.902×10^{-1}	1.8976	-0.2357	0.79
0.80	0.6400	0.8944	2.828	5.120×10^{-1}	0.9283	4.096×10^{-1}	1.250	1.118	2.513	5.027×10^{-1}	1.9031	-0.2231	0.80
0.81	0.6561	0.9000	2.846	5.314×10^{-1}	0.9322	4.305×10^{-1}	1.235	1.111	2.545	5.153×10^{-1}	1.9085	-0.2107	0.81
0.82	0.6724	0.9055	2.864	5.514×10^{-1}	0.9360	4.521×10^{-1}	1.220	1.104	2.576	5.281×10^{-1}	1.9191	-0.1985	0.82
0.83	0.6889	0.9110	2.881	5.718×10^{-1}	0.9398	4.746×10^{-1}	1.205	1.098	2.608	5.411×10^{-1}	1.9243	-0.1863	0.83
0.84	0.7056	0.9165	2.898	5.927×10^{-1}	0.9435	4.989×10^{-1}	1.190	1.091	2.639	5.542×10^{-1}	1.9294	-0.1744	0.84
0.85	0.7225	0.9220	2.915	6.141×10^{-1}	0.9473	5.220×10^{-1}	1.176	1.085	2.670	5.675×10^{-1}	1.9345	-0.1625	0.85
0.86	0.7396	0.9274	2.933	6.361×10^{-1}	0.9510	5.470×10^{-1}	1.163	1.078	2.702	5.809×10^{-1}	1.9395	-0.1508	0.86
0.87	0.7569	0.9327	2.950	6.585×10^{-1}	0.9546	5.729×10^{-1}	1.149	1.072	2.733	5.945×10^{-1}	1.9445	-0.1393	0.87
0.88	0.7744	0.9381	2.966	6.815×10^{-1}	0.9583	5.997×10^{-1}	1.136	1.066	2.765	6.082×10^{-1}	1.9445	-0.1278	0.88
0.89	0.7921	0.9434	2.983	7.050×10^{-1}	0.9619	6.274×10^{-1}	1.124	1.060	2.796	6.221×10^{-1}	1.9494	-0.1165	0.89
0.90	0.8100	0.9487	3.000	7.290×10^{-1}	0.9655	6.561×10^{-1}	1.111	1.054	2.827	6.362×10^{-1}	1.9542	-0.1054	0.90
0.91	0.8281	0.9539	3.017	7.536×10^{-1}	0.9691	6.857×10^{-1}	1.099	1.048	2.859	6.504×10^{-1}	1.9590	-0.09431	0.91
0.92	0.8464	0.9592	3.033	7.787×10^{-1}	0.9726	7.164×10^{-1}	1.087	1.043	2.890	6.648×10^{-1}	1.9638	-0.08338	0.92
0.93	0.8649	0.9644	3.050	8.044×10^{-1}	0.9761	7.481×10^{-1}	1.075	1.037	2.922	6.793×10^{-1}	1.9685	-0.07257	0.93
0.94	0.8836	0.9695	3.066	8.306×10^{-1}	0.9796	7.807×10^{-1}	1.064	1.031	2.953	6.940×10^{-1}	1.9731	-0.06188	0.94
0.95	0.9025	0.9747	3.082	8.574×10^{-1}	0.9830	8.145×10^{-1}	1.053	1.026	2.985	7.088×10^{-1}	1.9777	-0.05129	0.95
0.96	0.9216	0.9798	3.098	8.847×10^{-1}	0.9865	8.493×10^{-1}	1.042	1.021	3.016	7.238×10^{-1}	1.9823	-0.04082	0.96
0.97	0.9409	0.9849	3.114	9.127×10^{-1}	0.9899	8.853×10^{-1}	1.031	1.015	3.047	7.390×10^{-1}	1.9868	-0.03046	0.97
0.98	0.9604	0.9899	3.130	9.412×10^{-1}	0.9933	9.224×10^{-1}	1.020	1.010	3.079	7.543×10^{-1}	1.9912	-0.02020	0.98
0.99	0.9801	0.9950	3.146	9.703×10^{-1}	0.9967	9.606×10^{-1}	1.010	1.005	3.110	7.698×10^{-1}	1.9956	-0.01901	0.99
1.00	1.0000	1.000	3.162	1.000×10^0	1.000	1.000×10^0	1.000	1.000	3.142	7.854×10^{-1}	0.0000	0.000	1.00
1.1	1.21	1.049	3.317	1.331	1.032	1.464	9.091×10^{-1}	0.9535	3.456	9.503×10^{-1}	0.0414	0.09531	1.1
1.2	1.44	1.095	3.464	1.728	1.063	2.074	8.333×10^{-1}	0.9129	3.770	1.131	0.0792	0.1823	1.2
1.3	1.69	1.140	3.606	2.197	1.091	2.856	7.692×10^{-1}	0.8770	4.084	1.327	0.1139	0.2624	1.3
1.4	1.96	1.183	3.742	2.744	1.119	3.842	7.143×10^{-1}	0.8452	4.398	1.539	0.1461	0.3365	1.4
1.5	2.25	1.225	3.873	3.375	1.125	5.063	6.667×10^{-1}	0.8165	4.712	1.767	0.1761	0.4055	1.5
1.6	2.56	1.265	4.000	4.096	1.170	6.554	6.250×10^{-1}	0.7906	5.027	2.011	0.2041	0.4700	1.6
1.7	2.89	1.304	4.121	4.913	1.193	8.352	5.882×10^{-1}	0.7670	5.341	2.270	0.2304	0.5306	1.7
1.8	3.24	1.342	4.243	5.832	1.216	10.50	5.556×10^{-1}	0.7454	5.655	2.545	0.2553	0.5878	1.8
1.9	3.61	1.378	4.359	6.859	1.239	13.03	5.263×10^{-1}	0.7255	5.969	2.835	0.2788	0.6419	1.9

(续)

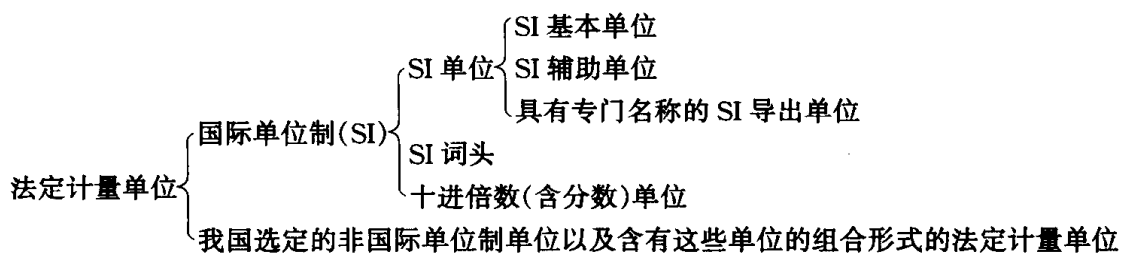
N	N^2	$N^{\frac{1}{2}}$	$(10N)^{\frac{1}{2}}$	N^3	$N^{1/3}$	N^4	N^{-1}	$N^{-\frac{1}{2}}$	πN	$\frac{\pi N^2}{4}$	$\log N$	$\ln N$	N
2.0	4.00	1.414	4.472	8.000	1.260	16.00	5.000×10^{-1}	0.7071	6.283	3.142	0.3010	0.6931	2.0
2.1	4.41	1.449	4.583	9.261	1.281	19.45	4.762×10^{-1}	0.6900	6.597	3.464	0.3222	0.7419	2.1
2.2	4.84	1.483	4.690	10.65	1.301	23.43	4.545×10^{-1}	0.6742	6.912	3.801	0.3424	0.7885	2.2
2.3	5.29	1.517	4.796	12.17	1.320	27.98	4.348×10^{-1}	0.6594	7.226	4.155	0.3617	0.8329	2.3
2.4	5.76	1.549	4.899	13.82	1.339	33.18	4.167×10^{-1}	0.6455	7.540	4.524	0.3802	0.8755	2.4
2.5	6.25	1.581	5.000	15.63	1.357	39.06	4.000×10^{-1}	0.6325	7.854	4.909	0.3979	0.9163	2.5
2.6	6.76	1.612	5.099	17.58	1.375	45.70	3.846×10^{-1}	0.6201	8.168	5.309	0.4150	0.9555	2.6
2.7	7.29	1.643	5.196	19.68	1.392	53.14	3.704×10^{-1}	0.6086	8.482	5.726	0.4314	0.9933	2.7
2.8	7.84	1.673	5.292	21.95	1.409	61.47	3.571×10^{-1}	0.5976	8.796	6.158	0.4472	1.030	2.8
2.9	8.41	1.703	5.385	24.39	1.426	70.73	3.448×10^{-1}	0.5872	9.111	6.605	0.4624	1.065	2.9
3.0	9.00	1.732	5.477	27.00	1.442	81.00	3.333×10^{-1}	0.5774	9.425	7.069	0.4771	1.099	3.0
3.1	9.61	1.761	5.568	29.79	1.458	92.35	3.226×10^{-1}	0.5680	9.739	7.548	0.4914	1.131	3.1
3.2	10.24	1.789	5.657	32.77	1.474	104.9	3.125×10^{-1}	0.5590	10.05	8.042	0.5052	1.163	3.2
3.3	10.89	1.817	5.745	35.94	1.489	118.6	3.030×10^{-1}	0.5505	10.37	8.553	0.5185	1.194	3.3
3.4	11.56	1.844	5.831	39.30	1.504	133.6	2.941×10^{-1}	0.5423	10.68	9.079	0.5315	1.224	3.4
3.5	12.25	1.871	5.916	42.88	1.518	150.1	2.857×10^{-1}	0.5345	11.00	9.621	0.5441	1.253	3.5
3.6	12.96	1.897	6.000	46.66	1.533	168.0	2.778×10^{-1}	0.5270	11.31	10.18	0.5563	1.281	3.6
3.7	13.69	1.924	6.083	50.65	1.547	187.4	2.703×10^{-1}	0.5199	11.62	10.75	0.5682	1.308	3.7
3.8	14.44	1.949	6.164	54.87	1.560	208.5	2.632×10^{-1}	0.5130	11.94	11.34	0.5798	1.335	3.8
3.9	15.21	1.975	6.245	59.32	1.574	231.3	2.564×10^{-1}	0.5064	12.25	11.95	0.5911	1.361	3.9
4.0	16.00	2.000	6.325	64.00	1.587	256.0	2.500×10^{-1}	0.5000	12.56	12.57	0.6021	1.386	4.0
4.1	16.81	2.025	6.403	68.92	1.601	282.6	2.439×10^{-1}	0.4939	12.88	13.20	0.6128	1.411	4.1
4.2	17.64	2.049	6.481	74.09	1.613	311.2	2.381×10^{-1}	0.4880	13.19	13.85	0.6232	1.435	4.2
4.3	18.49	2.074	6.557	79.51	1.626	341.9	2.326×10^{-1}	0.4823	13.51	14.52	0.6335	1.459	4.3
4.4	19.36	2.098	6.633	85.18	1.639	374.8	2.273×10^{-1}	0.4767	13.82	15.21	0.6435	1.482	4.4
4.5	20.25	2.121	6.708	91.13	1.651	410.1	2.222×10^{-1}	0.4714	14.14	15.90	0.6532	1.504	4.5
4.6	21.16	2.145	6.782	97.34	1.663	447.7	2.174×10^{-1}	0.4664	14.45	16.62	0.6628	1.526	4.6
4.7	22.09	2.168	6.856	103.8	1.675	488.0	2.128×10^{-1}	0.4613	14.77	17.35	0.6721	1.548	4.7
4.8	23.04	2.191	6.928	110.6	1.687	530.8	2.083×10^{-1}	0.4564	15.08	18.10	0.6812	1.569	4.8
4.9	24.01	2.214	7.000	117.6	1.698	576.5	2.041×10^{-1}	0.4517	15.39	18.86	0.6902	1.589	4.9
5.0	25.00	2.236	7.071	125	1.710	625.0	2.000×10^{-1}	0.4472	15.71	19.63	0.6990	1.609	5.0
6.0	36.00	2.449	7.746	216	1.817	1.296×10^3	1.667×10^{-1}	0.4083	18.85	28.27	0.7782	1.792	6.0
7.0	49.00	2.646	8.367	343	1.913	2.401×10^3	1.429×10^{-1}	0.3779	21.99	38.48	0.8451	1.946	7.0
8.0	64.00	2.828	9.844	512	2.000	4.096×10^3	1.250×10^{-1}	0.3536	25.13	50.27	0.9031	2.079	8.0
9.0	81.00	3.000	9.487	729	2.080	6.561×10^3	1.111×10^{-1}	0.3333	28.27	63.62	0.9542	2.197	9.0

(续)

N	N^2	$N^{\frac{1}{2}}$	$(10N)^{\frac{1}{2}}$	N^3	$N^{1/3}$	N^4	N^{-1}	$N^{-\frac{1}{2}}$	πN	$\frac{\pi N^2}{4}$	$\log N$	$\ln N$	N
10.0	100	3.162	10.00	1000	2.154	1.000×10^4	1.000×10^{-1}	0.3163	31.42	78.54	1.0000	2.303	10
11	121	3.317	10.49	1331	2.224	1.464×10^4	9.091×10^{-2}	0.3015	34.56	95.03	1.0414	2.398	11
12	144	3.464	10.95	1728	2.289	2.074×10^4	8.333×10^{-2}	0.2887	37.70	113.1	1.0792	2.485	12
13	169	3.606	11.40	2197	2.351	2.856×10^4	7.692×10^{-2}	0.2773	40.84	132.7	1.1139	2.565	13
14	196	3.742	11.83	2744	2.410	3.842×10^4	7.143×10^{-2}	0.2672	43.98	153.9	1.1461	2.639	14
15	225	3.873	12.25	3375	2.466	5.063×10^4	6.667×10^{-2}	0.2582	47.12	176.7	1.1770	2.708	15
16	256	4.000	12.65	4096	2.520	6.554×10^4	6.250×10^{-2}	0.2500	50.27	201.1	1.2041	2.773	16
17	289	4.123	13.04	4913	2.571	8.352×10^4	5.882×10^{-2}	0.2425	53.41	227.0	1.2304	2.833	17
18	324	4.243	13.42	5832	2.621	1.050×10^5	5.556×10^{-2}	0.2357	56.55	254.5	1.2553	2.890	18
19	361	4.359	13.78	6859	2.668	1.303×10^5	5.263×10^{-2}	0.2294	59.69	283.5	1.2788	2.944	19
20	400	4.472	14.14	8000	2.714	1.600×10^5	5.000×10^{-2}	0.2236	62.83	314.2	1.3010	2.996	20
21	441	4.583	14.49	9261	2.759	1.945×10^5	4.762×10^{-2}	0.2182	65.97	346.4	1.3222	3.045	21
22	484	4.690	14.83	1.065×10^4	2.802	2.343×10^5	4.545×10^{-2}	0.2132	69.12	380.1	1.3424	3.091	22
23	529	4.796	15.17	1.217×10^4	2.844	2.798×10^5	4.348×10^{-2}	0.2085	72.26	415.5	1.3617	3.135	23
24	576	4.899	15.49	1.382×10^4	2.884	3.318×10^5	4.167×10^{-2}	0.2041	75.40	452.4	1.3802	3.178	24
25	625	5.000	15.81	1.563×10^4	2.924	3.906×10^5	4.000×10^{-2}	0.2000	78.54	490.9	1.3979	3.219	25
26	676	5.099	16.12	1.758×10^4	2.962	4.570×10^5	3.846×10^{-2}	0.1961	81.68	530.9	1.4150	3.258	26
27	729	5.196	16.43	1.968×10^4	3.000	5.314×10^5	3.704×10^{-2}	0.1924	84.82	572.6	1.4314	3.296	27
28	784	5.292	16.73	2.195×10^4	3.037	6.147×10^5	3.571×10^{-2}	0.1890	89.96	615.8	1.4472	3.332	28
29	841	5.385	17.03	2.439×10^4	3.072	7.073×10^5	3.448×10^{-2}	0.1857	91.11	660.5	1.4624	3.367	29
30	900	5.477	17.32	2.700×10^4	3.107	8.100×10^5	3.333×10^{-2}	0.1826	94.25	706.9	1.4771	3.401	30
35	1225	5.916	18.71	4.288×10^4	3.271	1.501×10^6	2.857×10^{-2}	0.1690	110.0	962.1	1.5441	3.555	35
40	1600	6.325	20.00	6.400×10^4	3.420	2.560×10^6	2.500×10^{-2}	0.1581	125.7	1257	1.6021	3.689	40
45	2025	6.708	21.21	9.113×10^4	3.557	4.101×10^6	2.222×10^{-2}	0.1491	141.4	1590	1.6532	3.807	45
50	2500	7.071	22.36	1.250×10^5	3.684	6.250×10^6	2.000×10^{-2}	0.1414	157.1	1963	1.6990	3.912	50
55	3025	7.416	23.45	1.664×10^5	3.803	9.151×10^6	1.818×10^{-2}	0.1348	172.8	2376	1.7404	4.007	55
60	3600	7.746	24.49	2.160×10^5	3.915	1.296×10^7	1.667×10^{-2}	0.1291	188.5	3827	1.7782	4.094	60
65	4225	8.062	25.50	2.746×10^5	4.021	1.785×10^7	1.538×10^{-2}	0.1240	204.2	3318	1.8129	4.174	65
70	4900	8.367	26.46	3.430×10^5	4.121	2.401×10^7	1.429×10^{-2}	0.1195	219.9	3848	1.8451	4.249	70
75	5625	8.660	27.39	4.219×10^5	4.217	3.164×10^7	1.333×10^{-2}	0.1155	235.6	4418	1.8751	4.317	75
80	6400	8.944	28.28	5.120×10^5	4.309	4.096×10^7	1.250×10^{-2}	0.1118	251.3	5027	1.9031	4.382	80
85	7225	9.220	29.15	6.141×10^5	4.397	5.220×10^7	1.176×10^{-2}	0.1085	267.0	5675	1.9294	4.443	85
90	8100	9.487	30.00	7.290×10^5	4.481	6.561×10^7	1.111×10^{-2}	0.1054	282.7	6362	1.9542	4.500	90
95	9025	9.747	30.82	8.574×10^5	4.563	8.145×10^7	1.053×10^{-2}	0.1026	298.5	7088	1.9777	4.554	95
100	10000	10.00	31.62	1.000×10^6	4.642	1.000×10^8	1.000×10^{-2}	0.1000	314.2	7854	2.0000	4.605	100

(三) 常用量和单位

1. 法定计量单位体系



2. 量的名称和单位

量的名称	量的符号	单 位 名 称			单位符号	备 注
		法定计量单位	暂可使用单位	禁止使用单位		
长度 宽度 高度 半径 波长	$l; L$	米			m	SI 基本单位
	b	海里			n mile	1 n mile = 1852m
	h		埃		Å	1 Å = 10^{-10} m = 0.1 nm
	$r; R$			[市]尺		1 市尺 = (1/3)m
	λ			费米	fm	1 费米 = 10^{-15} m = 1 fm
时间 周期 时间常数 半衰期 混响时间	t	秒			s	SI 基本单位
	T	分			min	1 min = 60s
	τ	[小]时			h	1 h = 3600s
	$T_{1/2}$	天(日)			d	1 d = 86400s
	$T(T_{60})$	年			a	恒星年 $a_{\text{sid}} = 365.256641$ d
质量 核素质量 原子质量 原子质量 常量	m	千克(公斤)			kg	SI 基本单位
	$m(Z, A)$	吨			t	1 t = 10^3 kg
	m_a	原子质量单位			u	1 u $\approx 1.660540 \times 10^{-27}$ kg
	m_u			[市]斤		1 市斤 = 500g
				[米制]克拉		1 克拉 = 200mg
热力学温度 温差	$T, (\theta)$	开[尔文]			K	SI 基本单位
	ΔT			开氏度	°K	°K = K = °C
摄氏温度	$t; \theta$	摄氏度			°C	SI 导出单位。也用于温差
电流 磁位差	I	安[培]			A	SI 基本单位
	U_m		安匝		A·t	A·t = A(IEC)
发光强度	$I, (I_v)$	坎[德拉]			cd	SI 基本单位
				国际烛光	IC	1 IC ≈ 1.02 cd
物质的量 反应进度	$n, (\nu)$	摩[尔]			mol	SI 基本单位
	ξ			克分子, 克当量		按当量粒子, 相当于 mol
[平面]角 相位差 旋光角 损耗角	$\alpha; \beta; \gamma; \theta$	弧度			rad	1 rad = m/m = 1
	φ	度			(°)	1° = ($\pi/180$) rad
	α	[角]分			(')	1' = ($\pi/10800$) rad
	θ	[角]秒			(")	1" = ($\pi/648000$) rad
			冈		gon	1 gon = ($\pi/200$) rad(ISO)

附 录

(续)

量的名称	量的符号	单 位 名 称			单位符号	备 注
		法定计量单位	暂可使用单位	禁止使用单位		
立体角	Ω	球面度			sr	$1\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2 = 1$
面积	$A, (S)$	平方米			m^2	SI 导出单位
吸声量	A	公顷			$\text{hm}^2; \text{ha}$	$1\text{hm}^2 = 10^4\text{m}^2$
截面	σ	平方公里			km^2	$1\text{km}^2 = 10^6\text{m}^2$ (平方千米)
房间常量	$R; R_r$		靶恩		b	$1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2 = 10^2\text{fm}^2$
体积	V	立方米			m^3	
		升			L; l	$1\text{L} = 1\text{dm}^3$
速度	$v; c; u; w$	米每秒			m/s	SI 导出单位
相速度	$c_\varphi; v_\varphi$	节			kn	$1\text{kn} = 1\text{n mile/h}$
群速度	$c_g; v_g$	公里每[小]时			km/h	$1\text{km/h} \approx 0.277778\text{m/s}$
加速度	a	米每二次方秒			m/s^2	SI 导出单位
重力加速度	g		伽		Gal	$1\text{Gal} = 1\text{cm/s}^2$
标准重力			毫伽		mGal	$1\text{mGal} = 10^{-5}\text{m/s}^2$
加速度	g_n	(可做单位)			g_n	$g_n = 9.80665\text{m/s}^2$ (常量)
频率	$f; \nu$	赫[兹]			Hz	SI 导出单位
旋转频率	n	每秒			s^{-1}	SI 导出单位
(转速)		每分			min^{-1}	$1\text{min}^{-1} = (1/60)\text{s}^{-1}$
		转每分			r/min	$1\text{r/min} = (1/60)\text{r/s}$
场[量]级	L_F	分贝			dB	$1\text{dB} = 0.1\text{B}$
功率[量]级	L_P		奈培		Np	$1\text{Np} = \frac{20}{\ln 10}\text{dB(ISO)}$
线密度	ρ_l	千克每米			kg/m	SI 导出单位
		特[克斯]			tex	$1\text{tex} = 1\text{mg/m}$
				旦尼尔	den	$1\text{den} = 1\text{g/9km}$
力	F	牛[顿]			N	SI 导出单位
重力	$W, (P; G)$			达因	dyn	$1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$
				千克力	kgf; kp	$1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$
				吨力	tf	$1\text{tf} = 9.80665\text{kN}$
压力; 压强	p	帕[斯卡]			Pa	SI 导出单位
表压	p_e		巴		bar	$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$
环境压力	p_{amb}			标准大气压	atm	$1\text{atm} = 101325\text{Pa}$
渗透压	π			工程大气压	at	$1\text{at} = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$
正应力	σ			千克力每平方米	kgf/cm ²	$1\text{kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$
切应力	τ			毫米水柱	mmH ₂ O	$1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$
逸度	$\bar{p}, (f)$			毫米汞柱	mmHg	$1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$
弹性模量	E			托	Torr	$1\text{Torr} = 133.322\text{Pa}$

(续)

量的名称	量的符号	单 位 名 称			单位符号	备 注
		法定计量单位	暂可使用单位	禁止使用单位		
[动力]粘度	$\eta, (\mu)$	帕[斯卡]秒			Pa·s	SI 导出单位
			厘泊		cP	1cP = 1mPa·s(ISO)
运动粘度	ν	二次方米每秒			m ² /s	SI 导出单位
			厘斯托克斯		cSt	1cSt = 1mm ² /s(ISO)
能[量] 功 势能 动能 热[量] 辐[射]能	E $W, (A)$ $E_p, (V)$ $E_k, (T)$ Q $Q; W$	焦[耳]			J	SI 导出单位
		电子伏			eV	1eV \approx 1.602177 $\times 10^{-19}$ J
		千瓦[特小]时			kW·h	1kW·h = 3.6MJ
				千克力米	kgf·m	1kgf·m = 9.80665J
				尔格	erg	1erg = 10 ⁻⁷ J
				国际蒸气表卡	cal	1cal = 4.1868J
功率 视在功率 无功功率 辐[射]功率 声功率	P $S; P_s$ $Q; P_Q$ $P; \phi, (\phi_e)$ $W; P$	瓦[特]			W	SI 导出单位
			乏		var	1var = 1W(ISO)
				千克力米每秒	kgf·m/s	1kgf·m/s = 9.80665W
				[米制]马力		1 马力 \approx 0.7354988kW
				千卡每[小]时	kcal/h	1kcal/h = 1.163W
线[膨]胀系数 体[膨]胀系数 相对压力系数	α_l $\alpha_v, (\alpha; \nu)$ α_p	每开[尔文]			K ⁻¹	SI 导出单位
		每摄氏度			℃ ⁻¹	SI 导出单位。等于 K ⁻¹
				每度	deg ⁻¹	1deg ⁻¹ = 1K ⁻¹
等温压缩率 等熵压缩率	K_T K_S	每帕[斯卡]			Pa ⁻¹	SI 导出单位
		平方米每牛[顿]			m ² /N	SI 导出单位。与 Pa ⁻¹ 等效
质量能;比能 质量热力学能	e u	焦[耳]每千克			J/kg	SI 导出单位
				千卡每千克	kcal/kg	1kcal/kg = 4.1868kJ/kg
热容 熵	C S	焦[耳]每开[尔文]			J/K	SI 导出单位
		焦[耳]每摄氏度			J/℃	SI 导出单位。只用于 C
电荷[量]	Q	库[仑]			C	SI 导出单位
电位;电势 电位差;电压 电动势	$V; \varphi$ $U, (V)$ E	伏[特]			V	SI 导出单位
		瓦[特]每安培			W/A	SI 导出单位。与 V 等效
		安[培]欧[姆]			A·Ω	SI 导出单位。与 V 等效
电容	C	法[拉]			F	SI 导出单位
磁场强度 线电流	H $A(\alpha)$	安[培]每米			A/m	SI 导出单位
				奥斯特	Oe	1Oe \triangleq 79.5775A/m, 用于 H
磁通密度 磁极化强度	B $J(B_i)$	特[斯拉]			T	SI 导出单位
				高斯	Gs; G	1Gs \triangleq 10 ⁻⁴ T, 用于 B
磁通量	ϕ	韦[伯]			Wb	SI 导出单位
				麦克斯韦	Mx	1Mx \triangleq 10 ⁻⁸ Wb

附 录

(续)

量的名称	量的符号	单 位 名 称			单位符号	备 注
		法定计量单位	暂可使用单位	禁止使用单位		
自感 互感	L	亨[利]			H	SI 导出单位
	$M; L_{12}$	韦[伯]每安[培]			Wb/A	SI 导出单位, 与 H 等效
电阻	R	欧[姆]			Ω	SI 导出单位: V/A
电导	G	西[门子]			S	SI 导出单位: Ω^{-1}
光通量	$\phi, (\phi_v)$	流[明]			lm	SI 导出单位: $\text{cd} \cdot \text{Sr}$
[光]亮度	$L, (L_v)$	坎[德拉]每平方米			cd/m^2	SI 导出单位
				尼特	nt	$1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{m}^2$
[光]照度	$E, (E_v)$	勒[克斯]			lx	SI 导出单位: lm/m^2
				辐透	ph	$1\text{ph} = 10^4\text{lx}$
摩尔质量	M	千克每摩尔			kg/mol	SI 导出单位: Mrg/mol
相对分子质量	M_r	—			1	无量纲量, 又称分子量
B 的分子浓度 分子数密度	C_B n	每立方米; 负三次方米			m^{-3}	SI 导出单位
体积质量 [质量]密度 B 的质量浓度	ρ	千克每立方米			kg/m^3	SI 导出单位
		克每升			g/L	$1\text{g}/\text{L} = 1\text{kg}/\text{m}^3$
	ρ_B	克每立方厘米			g/cm^3	$1\text{g}/\text{cm}^3 = 10^3\text{g}/\text{L}$
B 的质量分数 B 的体积分数	w_B	—			1	分数单位一般只用 % 或 10 负数幂
	φ_B			ppm, ppb		$\text{ppm} = 10^{-6}$, $\text{ppb} = 10^{-9}$ 或 10^{-12}
B 的[物质 的量]浓度, (B 的 量浓度)	$C_B, [B]$	摩[尔]每立方米			mol/m^3	SI 导出单位
		摩[尔]每升			mol/L	$1\text{mol}/\text{L} = 10^3\text{mol}/\text{m}^3$
				克分子浓度	M	当用分子、当量粒子作基本单元时, M、N 等于 mol/L
				当量浓度	N	
B 的质量 摩尔浓度	$b_B; m_B$	摩[尔]每千克			mol/kg	SI 导出单位
				m 溶液	m	$1\text{m} = 1\text{mol}/\text{kg}$
[放射性] 活度	A	贝可[勒尔]			Bq	SI 导出单位
			居里		Ci	$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq} = 37\text{GBq}$
吸收剂量 比授予能	D	戈[瑞]			Gy	SI 导出单位
	Z		拉德		rad; rd	$1\text{rad} = 10^{-2}\text{Gy}$
剂量当量 个人剂量当量	H	希[沃特]			Sv	SI 导出单位
	$H_p, (d)$		雷姆		rem	$1\text{rem} = 10^{-2}\text{Sv}$
照射量	X	库[仑]每千克			C/kg	SI 导出单位
			伦琴		R	$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C}/\text{kg}$

注: 方括号中的字表示不致混淆的情况下可以省略的字, 对于单位, 为其简称。圆括弧中的词为其前面名称的同义语

3. SI 词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

4. 量和单位使用规则

(1)量的符号:通常是单个拉丁或希腊字母,必须用斜体。有时带下标。符号后不附加圆点。

(2)单位的符号:只能用正体字母。复数时符号不变。中文符号由单位简称代替原符号构成。

(3)单位的名称及符号不得附加表示测量过程或量特性的信息。例如:不得用标准立方米($\text{Nm}^3, \text{m}_n^3$),但可用恒星年(a_{sid})。

(4)单位符号除名称来自人名者第一个字母大写外,均为小写。

(5)词头不得重叠使用。例如:只能用 nm,不用 $\text{m}\mu\text{m}$;只能用 pF,不用 $\mu\mu\text{F}$ 。

(6)词头与单位为一个整体。例如: $1\mu\text{s}^{-1} = (10^{-6}\text{s})^{-1} = 10^6\text{s}^{-1}$; $1\text{cm}^3 = (10^{-2}\text{m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3$ 。

(7)采用不同倍数单位表达同一量值时,不得改变其数值的有效位数。

例如: $1.2 \times 10^4\text{N}$ 可写为 12kN,二位有效;

0.00394m 可写为 3.94mm,三位有效;

1401Pa 可写为 1.401kPa,四位有效。

(8)组合形式单位的倍数单位:一般只用一个词头;一般词头处于第一个单位前;一般词头处于分子前。但是,根据习惯或方便,有关专业标准中可作另外的规定。例如:体积电荷单位可用 $\text{C}/\text{cm}^3, \text{C}/\text{mm}^3$;电阻率单位可用 $\Omega \cdot \text{cm}$;浓度单位可用 mmol/dm^3 ;压力单位可用 dN/mm^2 。

(9)非十进制单位,在一个量值中可出现几种单位。例如: $30^\circ 30' 25''$, 1h25min。

(10)关于单位名称:组合形式的单位名称与其符号顺序一致。乘号没有对应名称,除号对应为“每”字,无论分母中有几个单位,“每”只出现一次。

长度的二次幂为面积、体积时,相应的指数名称为“平方”和“立方”,否则称“二次方”和“三次方”,指数名称在单位名称前。

书写组合单位名称时,不加乘、除、幂次、连字符、方括号、圆括号等类符号。

(11)汉字的单位符号不应与单位的国际符号混用。例如:不应使用公里/h,km/时。但℃可作为汉字符号使用,如:焦/℃。

(12)数、数词可与单位构成倍数单位,但不应成为词头。例如:可把500g(1市斤),25.4mm(1英寸)作为单位使用;也可用万t,万km。但为避免汉字与字母的不协调,可用 10^4t , 10^4km 。

(13)平面角的单位度、分、秒的符号,在组合单位中以及不处于数字之后时,应采用($^\circ$)、($'$)、($''$)的形式。例如:不用 $^\circ/\text{s}$ 而用($^\circ$)/s。但是,若同时采用了多于一个单位时,它们不再出现在组合单位中,而附加在数值上。例如: $48^\circ 50' \text{s}^{-1}$ 。

(14)升的两个单位符号L,l等同,可任意选用。一般,为了避免与数字“1”混淆,可优先用L。

(15)具有负指数的单位,有两个名称。

例如: K^{-1} 称:每开尔文,负一次方开尔文;

s^{-1} 称:每秒,负一次方秒;

m^{-3} 称:每立方秒,负三次方米。

分子为负指数的组合单位,将其按分母处理。

例如: m^{-3}/s 的名称,按 $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 处理,读为每立方米秒。

5. 常见英制单位与换算式

英寸 in; ..."	1in = 25.4mm
英尺 ft	1ft = 0.3048m
码 yd	1yd = 0.9144m
英里 mile	1mile = 1.609344km
英亩 acre	1acre = 4840yd ² \approx 4046.87m ²
英加仑 gal(UK)	1gal(UK) = 4.546092dm ³
美加仑 gal(US)	1gal(US) \approx 3.7854dm ³
桶(bbl)(美,石油等用)	1bbl \approx 159dm ³
磅 lb	1lb \approx 0.453592kg
金衡盎司 oz tr	1oz tr \approx 31.103477g
英吨 ton	1ton \approx 1.016047t
兰氏度 $^\circ\text{R}$	1 $^\circ\text{R}$ = 1 $^\circ\text{F}$ = (5/9)K
华氏度 $^\circ\text{F}$	$\frac{t_{\text{F}}}{^\circ\text{F}} = \frac{9}{5} \frac{t}{^\circ\text{C}} + 32 = \frac{9}{5} \frac{T}{\text{K}} - 459.67$
英热单位 Btu	1Btu \approx 1.055056kJ
英尺烛光 fc	1fc \approx 10.764lx
英尺朗伯 ft·la	1ft·la \approx 3.426cd/m ²
马力(英)hp	1hp \approx 0.7457kW

一、真空设计常用数据

磅力 lbf	1lbf \approx 4.44822N
磅达 pdl	1pdl \approx 0.138255N
英寸水银柱 inHg(32°F)	1inHg \approx 3.38639kPa
英寸水柱 inH ₂ O(39.2°F)	1inH ₂ O \approx 0.249089kPa
磅力每平方英寸 lbf/in ²	1lbf/in ² \approx 6.89476kPa

(四) 单位的换算

1. 压力单位换算

	帕 Pa	托 Torr	微米汞柱 μ mHg	微巴 μ bar	毫巴 mbar	大气压 atm	工程大气压 am	英寸汞柱 inHg	磅/英寸 ² lb/in ²
1Pa	1	7.50062 $\times 10^{-3}$	7.50062	10	10^{-2}	9.86923 $\times 10^{-6}$	1.0197 $\times 10^5$	2.953 $\times 10^{-4}$	1.450 $\times 10^{-4}$
1Torr	133.322	1	10^3	1.33322 $\times 10^3$	1.33322	1.31579 $\times 10^{-3}$	1.3595 $\times 10^{-3}$	3.937 $\times 10^{-2}$	1.934 $\times 10^{-2}$
1 μ mHg	0.133322	10^{-3}	1	1.33322 $\times 10^{-3}$	1.33322 $\times 10^{-3}$	1.31579 $\times 10^{-6}$	1.3595 $\times 10^{-6}$	3.937 $\times 10^{-5}$	1.934 $\times 10^{-5}$
1 μ bar	10^{-1}	7.50062 $\times 10^{-4}$	7.50062 $\times 10^{-1}$	1	10^{-3}	9.86923 $\times 10^{-7}$	1.0197 $\times 10^{-6}$	2.953 $\times 10^{-5}$	1.450 $\times 10^{-5}$
1mbar	10^2	7.50062 $\times 10^{-1}$	7.50062 $\times 10^2$	10^3	1	9.86923 $\times 10^{-4}$	1.0197 $\times 10^{-3}$	2.953 $\times 10^{-2}$	1.450 $\times 10^{-2}$
1atm	101325	760	760 $\times 10^3$	1013.25 $\times 10^3$	1013.25	1	1.0333	29.921	14.696
1am	98066.3	735.56	735.56 $\times 10^3$	980663	980663 $\times 10^{-3}$	0.967839	1	28.959	14.223
1inHg	3386	25.40	25.40 $\times 10^3$	3.386 $\times 10^4$	33.86	3.342 $\times 10^{-2}$	3.453 $\times 10^{-2}$	1	4.912 $\times 10^{-1}$
1lb/in ²	6895	51.715	51.715 $\times 10^3$	6.895 $\times 10^4$	68.95	6.805 $\times 10^{-2}$	7.031 $\times 10^{-2}$	2.086	1

2. 粘滞系数单位换算

	Pa·s	kg/(m·h)	CP	P	kg/(m·s)
1Pa·s	1	3.6 $\times 10^3$	1 $\times 10^3$	10	1
1kg/(m·h)	2.7778 $\times 10^{-4}$	1	2.778 $\times 10^{-1}$	2.778 $\times 10^{-3}$	2.778 $\times 10^{-4}$
1CP	1 $\times 10^{-3}$	3.600	1	0.01	0.001
1P	0.1	360	100	1	0.1
1kg/(m·s)	1	3600	1000	10	1
1lb/(ft·s)	1.4881	5357	1488.1	14.881	1.4881
1kgf·s/m ²	9.8067	35304	9806.65	98.0665	9.80665
1lbf·s/ft ²	47.880	172368	47880	478.80	47.880
1gf·s/cm ²	98.0665	353039	98066.5	980.665	98.0665
	lb/(ft·s)	kgf·s/m ²	lbf·s/ft ²	gf·s/cm ²	
1Pa·s	6.72 $\times 10^{-1}$	1.0197 $\times 10^{-1}$	2.0886 $\times 10^{-2}$	1.0197 $\times 10^{-2}$	
1kg/(m·h)	1.8667 $\times 10^{-4}$	2.8325 $\times 10^{-5}$	5.8015 $\times 10^{-6}$	2.8325 $\times 10^{-6}$	
1CP	6.72 $\times 10^{-4}$	1.0197 $\times 10^{-4}$	2.0886 $\times 10^{-5}$	1.0197 $\times 10^{-5}$	
1P	6.72 $\times 10^{-2}$	1.0197 $\times 10^{-2}$	2.0886 $\times 10^{-3}$	1.0197 $\times 10^{-3}$	
1kg/(m·s)	0.672	0.10197	2.0886 $\times 10^{-2}$	1.0197 $\times 10^{-2}$	
1lb/(ft·s)	1	0.15175	3.1081 $\times 10^{-2}$	1.5175 $\times 10^{-2}$	
1kgf·s/m ²	6.5898	1	0.20482	0.1	
1lbf·s/ft ²	32.174	4.8824	1	0.48824	
1gf·s/cm ²	65.898	10	2.0482	1	

3. 流量单位换算

	Pa·m ³ /s	Torr·L/s	μHg·L/s	atm·cc/s	μmHg·ft ³ /h	g/a(空气) ^①	g/a(F12) ^②	g/a(F22) ^②	Molecule/s ^③	mbar·L/s
1Pa·m ³ /s	1	7.5	7.5×10 ³	9.87	9.55×10 ⁵	3.75×10 ⁵	1.56×10 ⁶	1.12×10 ⁶	2.66×10 ²⁰	10
1Torr·L/s	1.33×10 ⁻¹	1	1×10 ³	1.32	1.27×10 ⁵	5×10 ⁴	2.08×10 ⁵	1.49×10 ⁵	3.54×10 ¹⁹	1.33
1μHg·L/s	1.33×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³	1	1.32×10 ⁻³	1.27×10 ²	5×10	2.07×10 ²	1.49×10 ²	3.54×10 ¹⁶	1.33×10 ⁻³
1atm·cc/s	1.01×10 ⁻¹	7.6×10 ⁻¹	7.6×10 ²	1	9.65×10 ⁴	3.8×10 ⁴	1.58×10 ⁵	1.13×10 ⁵	2.69×10 ¹⁹	1.01
1μmHg·ft ³ /s	1.05×10 ⁻⁶	7.87×10 ⁻⁶	7.87×10 ⁻³	1.04×10 ⁻⁵	1	3.93×10 ⁻¹	1.63	1.18	2.8×10 ¹⁴	1.05×10 ⁻⁵
1g/a(空气)	2.66×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁵	2×10 ⁻²	2.62×10 ⁻⁵	2.54	1	4.15	2.98×10 ⁻¹	7.08×10 ¹⁴	2.66×10 ⁻⁶
1g/a(F12)	6.41×10 ⁻⁷	4.80×10 ⁻⁶	4.80×10 ⁻³	6.33×10 ⁻⁶	6.12×10 ³	2.4×10 ⁻¹	1	7.19×10 ⁻¹	1.71×10 ¹⁴	6.39×10 ⁻⁵
1g/a(F22)	8.91×10 ⁻⁷	6.7×10 ⁻⁶	6.7×10 ⁻³	8.84×10 ⁻⁶	8.51×10 ⁻¹	3.35	1.39	1	2.37×10 ¹⁴	8.91×10 ⁻⁶
1Molecule/s	3.76×10 ⁻²¹	2.82×10 ⁻²⁰	2.82×10 ⁻¹⁷	3.72×10 ⁻²⁰	3.58×10 ⁻¹⁵	1.41×10 ⁻⁹	5.87×10 ⁻¹⁵	4.22×10 ⁻¹⁵	1	3.76×10 ⁻²⁰
1mbar·L/s	0.1	0.75	7.5×10 ²	9.86×10 ⁻⁷	9.52×10 ⁴	3.75×10 ⁴	1.56×10 ⁵	1.12×10 ⁵	2.66×10 ¹⁹	1

注:①指 20℃干燥空气;②温度为 20℃;③指 0℃干燥空气

4. 抽速单位换算

	m ³ /s	L/s	cc/s	ft ³ /s	cfm
1m ³ /s	1	10 ³	10 ⁶	35.31	2.119×10 ³
1L/s	10 ⁻³	1	10 ³	3.531×10 ⁻²	2.119
1cc/s	10 ⁻⁶	10 ⁻³	1	3.531×10 ⁻⁵	2.119×10 ⁻³
1ft ³ /s	2.832×10 ⁻²	28.32	2.832×10 ⁴	1	60
1cfm	4.719×10 ⁻⁴	4.719×10 ⁻¹	4.719×10 ²	1.667×10 ⁻²	1

注:1cfm=1ft³/min

5. 分子的能量单位换算

J/mol	erg/Molecule	cal/mol	eV/Molecule	cm ⁻¹
1	1.660566×10 ⁻¹⁷	0.239006	1.036435×10 ⁻⁵	8.359348×10 ⁻²
6.022045×10 ¹⁶	1	1.439303×10 ¹⁶	6.241461×10 ¹¹	5.034037×10 ¹⁵
4.184	6.947806×10 ⁻¹⁷	1	4.336444×10 ⁻⁵	0.3497550
9.648455×10 ⁴	1.602189×10 ⁻¹²	2.306036×10 ⁴	1	8.065479×10 ³
11.962655	1.986477×10 ⁻¹⁶	2859143	1.239852×10 ⁻⁴	1

气体常数的换算:

$$R = 8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 1.9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8.31441 \times 10^7 \text{ erg}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \\ = 62.36 \text{ Torr} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8.31441 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

6. 热单位换算表

热 量	J	cal	传热系数	W/(m ² ·K)	cal/(s·cm ² ·K)
	1	0.2389		1	0.2389 × 10 ⁻⁸
热 流 量	W	cal/s	热 容	J/K	cal/K
	1	0.2389		1	0.2389
热 导 率	W/(m·K)	cal/(s·cm·K)	比 热 容	J/(kg·K)	cal/(K·g)
	1	0.2389 × 10 ⁻²		1	0.2389 × 10 ⁻³
热 阻	K/W	K·s/cal			
	1	4.186 × 10 ²			

7. 电磁单位的换算

力	1N	10 ⁵ dyne	10 ⁵ dyne
功、能	1J	10 ⁷ erg	10 ⁷ erg
电功率	1W	10 ⁷ erg/s	10 ⁷ erg/s
电动势、电压	1V	10 ⁸ e·m·u	1/300e·s·u
电场强度	1V/m	10 ⁶ e·m·u	(1/3) × 10 ⁻⁴ e·s·u
电流	1A	10 ⁻¹ e·m·u	3 × 10 ⁹ e·s·u
磁通势	1A	4π × 10 ⁻¹ Gb	12π × 10 ⁹ e·s·u
磁场强度	1A/m	4π × 10 ⁻³ Oe	12π × 10 ⁷ e·s·u
磁通[量]	1Wb	10 ⁸ Mx	1/300e·s·u
磁通[量]密度	1T	10 ⁴ Gs	1/(3 × 10 ⁶)e·s·u
磁极化强度	1T	10 ⁴ /(4π)e·m·u	1/(12π × 10 ⁶)e·s·u
电通[量]	1c	4π/10e·m·u	12π × 10 ⁹ e·s·u
电通[量]密度	1c/m ²	4π × 10 ⁻⁵ e·m·u	12π × 10 ⁵ e·s·u
电荷[量]	1c	10 ⁻¹ e·m·u	3 × 10 ⁹ e·s·u
电极化强度	1c/m ²	10 ⁻⁵ e·m·u	3 × 10 ⁵ e·s·u
电阻	1Ω	10 ⁹ e·m·u	1/(9 × 10 ¹¹)e·s·u
磁阻	1H ⁻¹	4π × 10 ⁻⁹ e·m·u	36π × 10 ¹¹ e·s·u
电感	1H	10 ⁹ e·m·u	1/(9 × 10 ¹¹)e·s·u
电容	1F	10 ⁻⁹ e·m·u	9 × 10 ¹¹ e·s·u
真空磁导率	1.257 × 10 ⁻⁶ H/m		
真空介电常数	8.854 × 10 ⁻¹² F/m		

注:表中名称去掉方括号时为全称,去掉方括号中的字时为简称

8. 温度单位的换算

各种温度单位的换算公式如下:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) = \frac{5}{4} ^{\circ}\text{R} = \text{K} - 273.2$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32 = \frac{9}{4} ^{\circ}\text{R} + 32 = \frac{9}{5} (\text{K} - 273.2) + 32$$

$$^{\circ}\text{R} = \frac{4}{5} ^{\circ}\text{C} = \frac{4}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) = \frac{4}{5} (\text{K} - 273.2)$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.2 = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) + 273.2 = \frac{5}{4} ^{\circ}\text{R} + 273.2$$

式中 $^{\circ}\text{C}$ ——摄氏温度:冰点 0°C , 沸点 100°C ;

$^{\circ}\text{F}$ ——华氏温度:冰点 32°F , 沸点 212°F ;

$^{\circ}\text{R}$ ——兰氏温度:冰点 0°R , 沸点 80°R ;

K——热力学温度:冰点 273.2K , 沸点 373.2K 。

(五) 常用气体的物理性质

表 1

名 称	化 学 式	相对 原子量 或 相对 分子量	密度 (STP) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	摩尔 体积 (STP) $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	临 界 点			熔 点			沸 点(在 $1.01\times 10^5\text{Pa}$ 下)			
					温度 /K	压力 /Pa	密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度 /K	熔化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	温度 /K	气化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	液体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	密 度	气 体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
空气	—	28.96	1.2928	22.40	132.42 ~ 132.52	37.62×10^5 ~ 37.54×10^5	328 ~ 320	—	—	78.8(沸 点)81.8 (露点)	2.14×10^5	873 (78.8K)	—	4.485
氮	N_2	28.0134	1.2506	22.40	126.1	3.38×10^6	312	63.29	2.57×10^4	77.35	1.992×10^5	810	—	4.69
氧	O_2	31.9988	1.4289	22.39	154.78	5.064×10^6	426.5	54.75	1.392×10^4	90.17	2.137×10^5	1140	—	4.5
氩	Ar	39.948	1.7840	22.39	150.7	4.848×10^6	535	84	2.653×10^4	87.291	1.6409×10^5	1410	—	6.95
氖	Ne	20.179	0.8713	23.16	44.4	2.645×10^6	483	24.57	1.6×10^4	27.09	8.612×10^4	1206	—	9.552
氦	^3He	3.016	0.1345	22.42	3.35	1.179×10^6	41	$0.33(2.92$ $\times 10^6\text{Pa})$	8.088×10^3 (0.2K, 1.6 $\times 10^{-3}\text{Pa})$	3.2	7.531×10^3	58.6	—	24
	^4He	4.003	0.1769	22.63	5.199	2.28×10^5	69	$1.15(2.55$ $\times 10^6\text{Pa})$	5.71×10 (3.5K)	4.215	2.03×10^4	124.8	—	16.38
氪	Kr	83.80	3.6431	23.00	209.4	54.8×10^5	909	116.2	1.96×10^4	119.79	1.078×10^5	2413	—	8.7(120K)
氙	Xe	131.30	5.89	22.29	289.75	5.858×10^6	1105	161.65	1.76×10^4	165.02	9.613×10^4	3060	—	—
氢	H_2	2.016	0.08988	22.43	32.976	1.29×10^6	31.45	13.947	5.84×10^4	20.38	4.47×10^5	71.021	—	1.333
氘	D_2	4.0282	0.18	22.38	38.34	1.66×10^6	69.80	18.7	4.92×10^4	23.66	3.043×10^5	162.9	—	2.28
氟	T_2	6.034	0.269	22.43	40.44	1.84×10^6	106	20.61	2.73×10^5 (升华)	25.04	2.311×10^5	257.1	—	—

(续)

名称	化学式	相对原子量 或 相对分子质量	密度 (STP) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	摩尔 体积 (STP) $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	临界点			熔点			沸点(在 $1.01\times 10^5\text{Pa}$ 下)			
					温度 /K	压力 /Pa	密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度 /K	熔化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	温度 /K	气化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	密度		
												液体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	气体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
甲烷	CH_4	16.034	0.7167	22.38	190.7	4.63×10^6	162	90.65	5.82×10^4	111.7	5.1×10^5	426	1.8	
乙烷	C_2H_6	30.07	1.3567	22.16	305.45	4.88×10^6	203	89.85	9.52×10^4	184.52	4.89×10^5	546.87	2.06	
丙烷	C_3H_8	44.097	2.005	21.99	369.95	4.24×10^6	220	85.45	8.0×10^4	231.05	4.26×10^5	582	$2.715(1\times 10^5\text{Pa})$	
正丁烷	C_4H_{10}	58.124	2.703	21.50	425.15	3.78×10^6	228	134.85	8.02×10^4	272.65	3.86×10^5	601	$2.786(1\times 10^5\text{Pa})$	
异丁烷	C_4H_{10}	58.124	2.675	21.73	408.15	3.64×10^6	222	113.55	7.82×10^4	261.45	3.67×10^5	596	—	
正戊烷	C_5H_{12}	72.151	3.215	22.44	469.75	3.36×10^6	244	143.45	1.17×10^5	309.25	3.57×10^5	—	—	
乙烯	C_2H_4	28.054	1.2610	22.25	283.05	5.10×10^6	210	104.05	1.20×10^5	169.45	4.83×10^5	567.4	$2.130(1\times 10^5\text{Pa})$	
丙烯	C_3H_6	42.081	1.914	21.99	365.05	4.58×10^6	233	87.95	7.14×10^4	225.45	4.38×10^5	364.5	—	
丁烯-1	C_4H_8	56.108	2.500	22.44	419.15	4.01×10^6	233	87.80	6.86×10^4	266.85	3.91×10^5	625	—	
顺丁烯-2	C_4H_8	56.108	2.500	22.44	433.15	4.19×10^6	238	134.25	1.30×10^5	276.85	4.16×10^5	$632(0.3^\circ\text{C})$	—	
反丁烯-2	C_4H_8	56.108	2.500	22.44	428.15	4.09×10^6	238	167.75	1.74×10^5	274.05	4.06×10^5	—	—	
异丁烯	C_4H_8	56.108	2.500	22.44	417.85	3.98×10^6	234	132.85	1.06×10^5	266.25	3.94×10^5	—	—	
乙炔	C_2H_2	26.038	1.1747	22.17	309.15	6.22×10^6	231	192.15	9.65×10^4	189.13 (升华)	8.0×10^5 (升华)	—	—	
苯	C_6H_6	78.114	3.3	23.67	562.15	4.91×10^6	304	278.65	1.26×10^5	353.25	3.94×10^5	814.5	2.732	
一氧化碳	CO	28.0106	1.2504	22.40	132.92	3.49×10^6	301	68.15	2.99×10^4	81.65	2.16×10^5	790	4.5	
二氧化碳	CO_2	44.00995	1.977	22.26	304.19	7.36×10^6	468	215.55	1.81×10^5	194.75 (升华)	5.74×10^5 (升华)	1564 (固体)	2.74	
一氧化氮	NO	30.0061	1.3401	22.391	179.15	6.60×10^6	520	109.55	7.67×10^4	121.45	4.61×10^5	1269	—	
二氧化氮	NO_2	46.0055	2.055	22.39	431.35	1.01×10^7	570	263.85	1.39×10^5	294.35	7.12×10^5	1484 (3.2℃)	—	
一氧化二氮	N_2O	44.0128	1.9781	22.25	309.71	7.25×10^6	457	182.35	1.49×10^5	184.69	3.76×10^5	1226	2.913	
硫化氢	H_2S	34.07994	1.539	22.14	373.55	8.98×10^6	373	190.25	7.62×10^4	212.85	5.48×10^5	960	—	

(续)

名称	化学式	相对原子量 或 相对分子质量	密度 (STP) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	摩尔 体积 (STP) $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	临界点			熔点		沸点(在 $1.01\times 10^5\text{Pa}$ 下)				
					温度 /K	压力 /Pa	密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度 /K	熔化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	温度 /K	气化热 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	液体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	气体 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	密度
氢氰酸	HCN	27.0258	—	—	456.65	5.04×10^6	200	259.85	3.11×10^5	298.85	9.33×10^5	715(0℃)	—	—
氧硫化碳	OCS	60.0746	2.721	22.08	378.15	6.16×10^6	—	134.35	7.9×10^4	222.95	3.08×10^5	1169 (-50℃)	—	—
臭氧	O ₃	47.9982	2.144	22.39	261.05	5.51×10^6	437	80.45	—	161.25	3.17×10^5	1630	—	—
二氧化硫	SO ₂	64.0628	2.927	21.89	430.65	7.86×10^6	524	197.65	1.16×10^5	263.15	3.89×10^5	1458	3.182	3.182
氟	F ₂	37.9968	1.695	22.42	143.95	5.56×10^6	473	50.15	1.35×10^4	85.03	1.67×10^5	1504	5.64	5.64
氯	Cl ₂	70.906	3.214	22.06	417.15	7.69×10^6	573	171.15	9.04×10^4	238.55	2.89×10^5	1557	—	—
氯甲烷	CH ₃ Cl	50.488	2.3044	21.91	416.15	6.66×10^6	353	175.55	—	249.39	4.29×10^5	1002	2.594	2.594
氯乙烷	C ₂ H ₅ Cl	64.515	2.870	22.48	455.95	5.25×10^6	330	136.75	6.90×10^4	285.45	3.83×10^5	919(0℃)	—	—
氨	NH ₃	17.0306	0.771	22.09	405.65	1.12×10^7	235	195.45	3.32×10^5	239.75	1.372×10^6	682	0.901	0.901
氟里昂-11	CCl ₃ F	137.3686	6.20	22.16	471.15	4.36×10^6	554	162.15	—	296.95	1.82×10^5	1480	5.91	5.91
氟里昂-12	CCl ₂ F ₂	120.914	5.39	22.43	385.15	4.10×10^6	558	115.15	—	243.35	1.67×10^5	1488	6.25	6.25
氟里昂-13	CClF ₃	104.4594	4.654	22.45	302.05	3.86×10^6	578	92.15	—	191.75	1.47×10^5	1505	7.9	7.9
氟里昂-21	CHCl ₂ F	102.9235	4.6	22.37	451.65	5.15×10^6	522	138.15	—	282.05	2.42×10^5	1402(10℃)	$4.755(1.06\times 10^5\text{Pa})$	$4.755(1.06\times 10^5\text{Pa})$
氟里昂-22	CHClF ₂	86.4689	3.8607	22.40	369.15	4.96×10^6	525	113.15	4.77×10^4	232.35	2.34×10^5	1414	4.65	4.65
氟里昂-113	CCl ₂ FOClF ₂	187.3765	8.274	22.65	487.25	3.40×10^6	576	238.15	—	320.75	1.47×10^5	1508(50℃)	$7.981(1.1\times 10^5\text{Pa})$	$7.981(1.1\times 10^5\text{Pa})$
氟里昂-114	CClF ₂ CClF ₂	170.9219	7.615	22.45	418.85	3.25×10^6	582	179.15	—	276.95	1.37×10^5	1515(5℃)	$8.264(1.07\times 10^5\text{Pa})$	$8.264(1.07\times 10^5\text{Pa})$

表 2

名 称	三 相 点				比热容(在 20℃ 及 1.01×10 ⁵ Pa 下)			热导率 (STP) /J·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·K ⁻¹	动力粘度系数 (STP) /Pa·s	1L 液体气 化为 STP 下的气体 体积/L	1m ³ 气体 (15℃ 及 1.01 × 10 ⁵ Pa 下) 生成液体 的体积/L	低燃烧热值 /J·m ⁻³
	温度 /K	压力 /Pa	密 度		比定压热容 c _p /J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	比定容热容 c _v /J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	绝热指数 k = c _p /c _v					
			固 体 /kg·m ⁻³	液 体 /kg·m ⁻³								
空气	60.15	—	—	—	1003.61(15.6℃)	716.36(15.6℃)	1.4(15.6℃)	87.923	1.73×10 ⁻⁵	675	1.379	—
氮	63.15	1.25×10 ⁴	947	873	1039.67(15.6℃)	741.9(15.6℃)	1.4(15.6℃)	85.829	1.59×10 ⁻⁵	643	1.421	—
氧	54.36	1.515×10 ²	1370	1310	916.91(15.6℃)	655.23(15.6℃)	1.397(15.6℃)	87.504	1.95×10 ⁻⁵	800	1.15	—
氩	83.80	6.853×10 ⁴	1623	1416	523.35	312.34(15.6℃)	1.68	62.384	2.091×10 ⁻⁵	780	1.166	—
氖	24.54	4.316×10 ⁴	1442	1427	1031	619.65	1.68	159.936	2.97×10 ⁻⁵	1340	0.683	—
氦	0.5	3.03×10 ⁶	132.3(2K)	137.6(2K)	—	—	1.64(19℃)	—	—	—	—	—
	高 2.172	5.151×10 ³	159.7(1.35K)	173.8(1.35K)	5275	3181.96	1.66	510.79	1.86×10 ⁻⁵	700	1.311	—
	低 1.788	3.026×10 ⁶										
氦	115.76	7.282×10 ⁴	2900	2440(116K)	247.02	150.72	1.67	33.494	2.327×10 ⁻⁵	570	1.451	—
氙	161.37	8.131×10 ⁴	3540	3084	159.09	96.296	1.666	16.747	2.101×10 ⁻⁵	5.23	1.75	—
氢	13.947	7.02×10 ³	86.79	77.09	14302.11 (15.6℃)	10228.35 (15.6℃)	1.412(15.6℃)	598.71	1.354×10 ⁻⁵	788	1.166	1.0785×10 ⁷
氘	18.71	1.708×10 ⁴	196.7	174.1	7243.16	—	—	439.61	1.18×10 ⁻⁵	950	—	—
氚	20.62	2.151×10 ⁴	—	273.64	—	—	—	—	—	955	—	—
甲烷	90.6	1.162×10 ⁴	—	—	2202.3(15.6℃)	1674.72 (15.6℃)	1.315(15.6℃)	108.86	1.03×10 ⁻⁵	591	1.55	3.5877×10 ⁷
乙烷	89.89	9.191×10 ⁻¹	698	658.56	1712.4(15.6℃)	1452.8(15.6℃)	1.18(15.6℃)	66.15	8.5×10 ⁻⁶	403	2.25	6.4472×10 ⁷
丙烷	85.47	5.404×10 ⁻⁴	—	—	1624.48(15.6℃)	1436.1(15.6℃)	1.13(15.6℃)	54.0	7.5×10 ⁻⁶	290	3.13	9.3018×10 ⁷

(续)

名 称	三 相 点				比热容(在 20℃ 及 1.01×10 ⁵ Pa 下)			热导率 (STP) J·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·K ⁻¹	动力粘度系数 (STP) /Pa·s	1L 液体气 化为 STP 下的气体 体积/L	lm ³ 气体 (15℃ 及 1.01 × 10 ⁵ Pa 下) 生成液体 的体积/L	低燃烧热值 J·m ⁻³
	温度 /K	压力 /Pa	密 度		比定压热容 c _p J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	比定容热容 c _v J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	绝热指数 k = c _p /c _v					
			固 体 /kg·m ⁻³	液 体 /kg·m ⁻³								
正丁烷	134.81	5.383×10 ⁻⁴	—	—	1662.16(15.6℃)	1511.4(15.6℃)	1.10(15.6℃)	48.57	8.0×10 ⁻⁶	222	4.07	1.1896×10 ⁸
异丁烷	113.56	2.02×10 ⁻²	—	—	1620.29(15.6℃)	1457.0(15.6℃)	1.11(15.6℃)	49.82	7.47×10 ⁻⁶	223	—	1.2214×10 ⁷
正戊烷	143.44	6.19×10 ⁻²	—	—	1663.83(15.6℃)	1548.7(15.6℃)	1.07(15.6℃)	46.05	6.7×10 ⁻⁶	—	—	1.3398×10 ⁸
乙 烯	104.01	1.192×10 ²	—	—	1519.8(15.6℃)	1239.3(15.6℃)	1.22(15.6℃)	62.802	9.07×10 ⁻⁶	450	1.882	5.836×10 ⁷
丙 烯	87.91	1.515×10 ⁻³	—	—	1519.8(15.6℃)	1323.0(15.6℃)	1.15(15.6℃)	—	8.4×10 ⁻⁶	190	2.82	8.1224×10 ⁷
丁 烯-1	87.81	1.323×10 ⁻⁶	—	—	1553.30(15.6℃)	1398.39 (15.6℃)	1.11(15.6℃)	—	7.61×10 ⁻⁶	—	—	1.0760×10 ⁸
顺丁烯-2	134.25	—	—	—	1368.7(15.6℃)	1220.5(15.6℃)	1.1214(15.6℃)	—	—	—	—	1.0701×10 ⁸
反丁烯-2	167.6	—	—	—	1529.9(15.6℃)	1381.6(15.6℃)	1.1073(15.6℃)	—	—	—	—	1.0681×10 ⁸
异丁烯	—	—	—	—	1549.53(15.6℃)	1401.3(15.6℃)	1.1058(15.6℃)	—	—	—	—	1.0668×10 ³
乙 炔	191.66	1.196×10 ⁵	730(188.16K)	610	1678.907	1352.34	1.24	67.41	9.35×10 ⁻⁶	520	2.055	5.2963×10 ⁷
苯	278.48	4.80×10 ³	—	900(10℃)	1256.04	1138.81	1.101	32.238	73.8×10 ⁻⁷ (14.2℃)	—	3.552	1.3381×10 ⁸
一氧化碳	68.14	1.5302×10 ⁴	929(65K)	846	1040.0	744.83	1.395	84.1547	1.66×10 ⁻⁵	632	1.411	1.2644×10 ⁷
二氧化碳	216.55	5.1631×10 ⁵	1512.4	1178	832.75	642.67	1.295	52.754	1.38×10 ⁻⁵	—	1.56	—
一氧化氮	109.46	—	1554(78.16K)	—	975.52	695.01	1.4	79.549	1.78×10 ⁻⁵	945	1.00	—
二氧化氮	—	—	1896(-79℃)	—	803.87	615.46	1.31	144.026	—	—	—	—
一氧化二氮	182.35	8.757×10 ⁴	320(78.16K)	—	912.72	715.94	1.274	54.428	1.35×10 ⁻⁵	620	—	—

(续)

名 称	三 相 点				比热容(在 20℃ 及 1.01×10 ⁵ Pa 下)			热导率 (STP) J·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·K ⁻¹	动力粘度系数 (STP) /Pa·s	1L 液体气 化为 STP 下的气体 体积/L	1m ³ 气体 (15℃ 及 1.01 × 10 ⁵ Pa 下) 生成液体 的体积/L	低燃烧热值 /J·m ⁻³
	温度 /K	压力 /Pa	密 度		比定压热容 c _p J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	比定容热容 c _v J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	绝热指数 k = c _p /c _v					
			固 体 /kg·m ⁻³	液 体 /kg·m ⁻³								
硫化氢	187.5	2.737×10 ⁴	—	—	1059.26	803.87	1.32	47.3108	1.25×10 ⁻⁵	621	1.45	2.4032×10 ⁷
氢氰酸	—	—	—	—	1335.59(27℃)	—	1.31(65℃)	404.86 (4.4℃)	7.4×10 ⁻⁶	—	—	—
氧硫化碳	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
臭 氧	80.65	—	—	1572.7(90K)	907.28	—	—	—	—	735	—	—
二氧化硫	197.63	2.121×10 ³	—	—	632.21	502.42	1.25	27.6329	1.17×10 ⁻⁵	498	1.797	—
氟	53.54	—	1907	1875	828.149	610.02	1.358	89.5975	2.25×10 ⁻⁵	—	—	—
氯	172.15	—	—	—	489.86	360.06	1.35	25.9582	1.30×10 ⁻⁵	484	2.006	—
氯甲烷	181.65	—	—	—	741.06	581.97	1.28	30.5636	9.676×10 ⁻⁶ (0℃)	—	2.216	—
氯乙烷	134.45	—	—	—	1339.78	—	1.19[16℃, (3~5)×10 ⁴ Pa]	34.3318	9.37×10 ⁻⁶	—	—	—
氨	195.42	5.979×10 ³	—	—	2160.39	1637.04	1.32	79.1305	9.2×10 ⁻⁶	884	1.024	—
氟里昂-11	—	—	—	—	615.46	542.61	1.135	28.0516	1.01×10 ⁻⁵	—	3.83	—
氟里昂-12	—	—	—	—	617.97	543.03	1.138	29.3076	1.18×10 ⁻⁵	—	3.33	—
氟里昂-13	—	—	—	—	623.83(10℃)	544.28(10℃)	1.150(10℃)	—	—	—	3.095	—
氟里昂-21	—	—	—	—	753.62	642.82	1.12	34.3318 (4.4℃)	1.08×10 ⁻⁵	—	—	—
氟里昂-22	—	—	—	—	615.46(10℃)	514.98(10℃)	1.194(10℃)	37.6812	1.20×10 ⁻⁵	—	1.92	—
氟里昂-113	—	—	—	—	628.02(27℃)	—	—	28.0516 (30℃)	9.8×10 ⁻⁶	—	—	—
氟里昂-114	—	—	—	—	648.95(10℃)	594.53(10℃)	1.092(10℃)	40.1933 (30℃)	1.09×10 ⁻⁵	—	—	—

(六) 物质的蒸气压

1. 物质的蒸气压在 1 大气压以下时对应的温度

化学 符号	蒸汽压/Pa		10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
	温度/K	物质名																	
³ He		氦 3												0.276	0.345	0.632	0.966	1.66	3.18
⁴ He		氦 4													0.95	1.23	1.67 ^①	2.48	4.20
H ₂		氢	2.65	2.81	2.99	3.14	3.38	3.63	3.92	4.35	1.78	5.3	6.0	6.8	7.9	9.4	11.4 ^②	14.5	20.3
D ₂		氘	3.57	3.79	4.02	4.29													
T ₂		氚	4.01	4.24															
Ne		氖	5.46	5.75	6.07	6.42	6.83	7.28	7.80	8.40	9.09	9.95	10.9	12.1	13.6	15.5	18.1	21.6 ^②	26.7
CH ₄		甲烷	23.8	25.1	26.5	28.0	29.8	31.8	33.9	36.5	39.6	43.1	47.1	52.2	58.4	66.2	76.0	89.9 ^②	112
F ₂		氟														54.9	58.6	68.7	84.8
N ₂		氮	18.1	18.9	19.9	20.9	22.2	23.5	25.0	26.8	28.7	31.1	33.7 ^①	37.0	40.9	46.1	53.0	62.0 ^②	77.4
CO		一氧化碳	20.4	21.4	22.4	23.6	25.0	26.5	28.1	30.0	32.2	34.7	37.6	41.1	45.2	50.4	56.9 ^①	66.0 ^②	81.2
O ₂		氧气	21.7	22.7 ^①	23.9	25.1	26.4	28.0	29.7	31.7	33.8	36.4	39.4	42.8 ^①	47.4	53.2 ^②	61.3	72.8	90.0
Kr		氪	27.7	29.2	30.7	32.5	34.3	36.5	39.0	41.9	45.1	48.8	53.3	58.6	65.4	73.7	84.3	98.9 ^②	120.5
NO		一氧化氮	37.5	39.2	41.0	43.1	45.3	47.8	50.5	53.6	57.1	61.0	65.7	71.0	77.3	84.8	93.7	104.9 ^②	121.0
Ar		氩	20.2	21.2	22.3	23.5	25.0	26.6	28.4	30.3	32.8	35.6	38.7	42.6	47.5	53.6	61.4	71.8 ^②	87.4
N ₂ O		一氧化二氮	55.2	58.0	60.7	63.8	67.2	70.9	75.0	79.7	85.0	91.1	98.0	106	116	127	142	160 ^②	185
CO ₂		二氧化碳	59.2	61.9	64.8	68.0	71.6	75.6	80.0	85.0	90.7	97.2	105	114	124	136	152	170	194
Xe		氙	38.3	40.2	42.4	44.8	47.4	50.4	53.8	57.7	62.1	67.4	73.5	81.0	90.3	102	116	136 ^②	164
HBr		溴化氢	51.5	54.0	56.7	59.8	63.2	67.1	71.5	76.4	82.1	88.7 ^①	96.4	106 ^①	117	131	148	171 ^②	203
HCl		盐酸	49.4	51.8	54.3	57.1	60.2	63.6	67.6	71.9	76.9	82.6	89.2	97.1 ^①	107	119	135	155 ^②	187
NH ₃		氨气	70.5	73.7	77.1	81.0	85.2	90.0	95.2	102	108	115	124	135	147	160	178 ^②	204	240
H ₂ S		硫化氢	56.9	59.5	62.3	65.5	69.0	73.0	77.5	82.4	88.2	94.8	102 ^①	112	123 ^①	137	154	181 ^②	213
Cl ₂		氯气	65.7	68.7	72.0	75.6	79.5	83.8	88.8	94.3	100.5	108	116	126	138	153	170 ^②	197	238
H ₂ O		水	112	118	123	129	136	144	152	161	172	183	197	213	231	253 ^②	280	319	373
SO ₂		二氧化硫	78.5	82.0	85.8	89.9	94.5	99.3	105	112	119	127	136	147	160	175	193 ^②	220	263
CS ₂		二硫化碳												158 ^②	175	196	224	263	320
HF		氟化氢														176 ^②	203	239	293
Br ₂		溴	101	106	110	116	121	128	135	142	151	162	173	187	202	222	245 ^②	277	330
I ₂		碘	141	147	153	161	168	177	187	198	210	224	241	259	282	308	341	383 ^②	456

注:①转移点;②熔点

注: ①转移点; ②熔点

2. 物质的蒸气压在 1 大气压以上时对应的温度

物 质 (分子式)	蒸 气 压 $/\times 10^5 \text{Pa}$ 及对应的温度 $^{\circ}\text{C}$							临界温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	临界压力 $p_c/\times 10^5 \text{Pa}$
	1	2	5	10	20	30	50		
He	-268.6	-268.0						-267.9	2.26
Ar	-185.6	-179.0	-166.7	-154.9	-141.3	-132.0		-122.0	48.0
Ne	-246.0	-243.8	-239.9	-236.0	-230.8			-228.3	+26.9
Kr	-152.0	-143.5	-130.0	-118.0	-101.7	-88.8	-66.5	-63	+54
H ₂	-252.5	-250.2	-246.0	-241.8				-240.0	12.80
N ₂	-195.8	-189.2	-179.1	-169.8	-157.6	-148.3		-147.2	+33.5
O ₂	-183.1	-176.0	-164.5	-153.2	-140.0	-130.7		-118.9	+49.7
Cl ₂	-33.8	-16.9	+10.3	35.6	65.0	84.8	115.2	144.0	76.1
Br ₂	+58.2	78.8	110.3	139.8	174.0	197.0	230.0	302.2	121
H ₂ O	100.0	120.1	152.4	180.5	213.1	234.6	264.7	374.2	218.0
CO	-191.3	-183.5	-170.7	-161.0	-149.7	-141.9		138.7	-34.6
CO ₂	-78.2	-69.1	-56.7	-39.5	-18.9	-5.3	+14.9		
SO ₂	-10.0	+6.3	32.1	55.5	83.8	102.6	130.2	157.2	77.7
HCl	-84.8	-71.4	-50.5	-31.7	-8.8	+5.9	27.9	51.4	81.6
H ₂ S	-60.4	-45.9	-22.3	-0.4	+25.5	41.9	66.7	100.3	88.9
NH ₃	-33.6	-18.7	+4.7	25.7	50.1	66.1	89.3	132.4	111.5
CHCl ₃ F	8.9	28.4	59.0	87.0	121.2	144.0	177.5	178.5	51.0
CHClF ₂	-40.8	-24.7	+0.3	24.0	52.0	70.3		96.0	48.7
CCl ₃ F	23.7	44.1	77.3	108.2	146.7	172.0		198.0	43.2
CCl ₂ F ₂	-29.8	-12.2	+16.1	42.2	74.0	95.6		111.5	39.6
CClF ₃	-81.2	-66.7	-42.7	-18.5	+12.0	34.8		53	40.3

3. 二氧化碳的饱和蒸气压

状 态	温度 $^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
固体的饱和 和蒸气压 $/\times 10^{-1} \text{Pa}$	-180	0.017	0.011	0.008	0.005	0.004	0.002	0.0015	0.0009	0.0007	0.0004
	-170	0.481	0.3591	0.266	0.1862	0.133	0.0984	0.0692	0.0492	0.0346	0.0239
	-160	7.847	6.118	4.788	3.591	2.793	2.1014	1.5827	1.197	0.8911	0.665
	-150	80.465	64.904	52.136	41.762	33.383	26.467	21.014	16.492	13.034	10.108
	-140	573.23	477.47	396.34	328.51	271.32	223.44	183.54	150.29	122.36	99.75
	-130	3.072	2.620	2.234	1.902	1.623	1.34	1.157	0.971	0.8113	0.6783
	-120	13.047	11.398	9.9218	8.6317	7.4879	6.4904	5.6126	4.8412	4.1629	3.5777
	-110	46.058	40.911	36.269	32.106	28.382	25.043	22.051	19.391	17.024	14.923
	-100	139.40	125.55	112.93	101.44	91.012	81.529	72.937	65.157	58.134	51.790
	-90	371.74	338.75	308.29	280.36	254.56	230.89	209.21	189.39	171.17	154.55
	-80	894.03	822.34	755.71	693.86	636.41	583.34	534.13	488.64	446.48	407.65
	-70	1976.5	1831.8	1696.5	1570.1	1452.0	1341.8	1238.9	1143.4	1054.3	971.30
液体的饱和蒸气压 $/\times 10^5 \text{Pa}$	-60	4087.2	3810.6	3550.7	3306.8	3077.9	2863.2	2662.0	2473.4	2296.8	2131.3
	-50	—	—	—	—	—	—	—	5028.6	4695.2	4381.8
	-40	6.9397	6.5472	6.2828	6.0264	5.7779	5.5371	5.3039	5.0782	4.8597	4.6484
	-30	10.035	9.6704	9.3167	8.9722	8.6370	8.3125	7.9960	7.6887	7.3908	7.1009
	-20	14.255	13.783	13.323	12.873	12.436	12.009	11.592	11.1880	10.793	10.409
	-10	19.659	19.060	18.475	17.903	17.343	16.798	16.265	15.745	15.235	14.739
	-5	26.430	25.685	24.956	24.243	23.545	22.861	22.192	21.538	20.897	20.271
	0	34.769	33.858	32.965	32.089	31.231	30.389	29.565	28.757	27.965	27.189
	+5	34.769	35.697	36.644	37.608	38.592	39.595	40.167	41.660	42.721	43.802
	10	44.905	46.027	47.171	48.336	49.524	50.734	51.967	53.223	54.503	55.807
	20	57.135	58.489	59.869	61.276	62.710	64.173	65.662	67.184	68.734	70.318
	30	71.934	73.585	—	—	—	—	—	—	—	—

4. 氨的饱和蒸气压

(单位: $\times 10^5 \text{Pa}$)

温度/℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-70	0.1078	0.1001	0.0929	0.0861	0.0797	0.0738	0.0683	0.0631	0.0582	—
-60	0.2161	0.2022	0.1891	0.1767	0.1651	0.1541	0.1437	0.1339	0.1246	0.1159
-50	0.4034	0.3800	0.3578	0.3367	0.3167	0.2977	0.2796	0.2624	0.2461	0.2307
-40	0.7083	0.6712	0.6357	0.6017	0.5693	0.5383	0.5087	0.4805	0.4536	0.4279
-30	1.1799	1.1236	1.0695	1.0175	0.9676	0.9197	0.8738	0.8296	0.7875	0.7471
-20	1.8774	1.7956	1.7166	1.6405	1.5671	1.4963	1.4281	1.3624	1.2992	1.2384
-10	2.8703	2.7555	2.6443	2.5368	2.4328	2.3332	2.2349	2.1408	2.0499	1.9621
-0	4.2380	4.0818	3.9303	3.7832	3.6405	3.5020	3.3677	3.2375	3.1112	2.9888
+0	4.2380	4.3985	4.5640	4.7340	4.9090	5.0895	5.2750	5.4655	5.6610	5.8620
10	6.0685	6.2805	6.4885	6.7225	6.9520	7.1875	7.4290	7.6770	7.9310	8.1915
20	8.4585	8.7320	9.0125	9.3000	9.5940	9.8955	10.2040	10.5195	10.8430	11.1735
30	11.512	11.858	12.212	12.574	12.943	13.321	13.708	14.103	14.507	14.909
40	15.339	15.770	16.209	16.656	17.113	17.580	18.056	18.542	19.038	19.543
50	20.059	20.585	21.121	21.667	22.224	22.793	23.372	23.962	24.562	25.174
60	25.797	26.432	27.079	27.737	28.407	28.089	29.784	30.491	31.211	31.942
70	32.687	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(七) 液化气体的种类和性质

			氦 3 ³ He	氦 4 ⁴ He	氢 H ₂	重氢 (氘) D ₂	超重氢 氚 T ₂	氖 Ne	氮 N ₂	空气	氩 Ar	氧 O ₂	
相对分子量			3.016	4.0026	2.01594			20.183	28.0134	28.96	39.948	31.9988	
状态	沸点 (1×10 ⁵ Pa)	温度/K	3.1905	4.214	20.383	23.52	25.0	27.092	77.364	78.8 ^③ 81.8 ^④	87.29	90.180	
		密度 /kg·m ⁻³	液体	59	124.8	70.96	160		12.05	808.4	873.9	1399.8	1141
			气体	24	16.7	1.331			9.552	4.604	4.488	5.8	4.467
		潜热 /×10 ³ J·kg ⁻¹	7.529 ^①	20.90	45.09	300		86.10	199.26	205.2	163.25	213.31	
	临界点	温度/K	3.324	5.25	33.18			44.4	126.2	132.52	150.7	154.77	
		压力/×10 ⁵ Pa	1.148	2.26	12.98			26.19	33.5	37.17	48.0	50.14	
	三态点	温度/K		2.186 ^②	13.947	18.73	20.62	24.544	63.15	60.3 ^③ 57.0 ^④	83.78	54.353	
		压力/10 ⁻² Pa		51.1 ^②	72.0	171.4	216.0	43.29	125		689.0	1.52	
	熔点	温度/K		0.9		19		24.46	63.4		83.96	54.26	
		压力/×10 ⁵ Pa		26									
	STP	比定压热容 c _p /×10 ³ J· kg ⁻¹ ·K ⁻¹		5.233	14.207			1.030	1.042	1.005	0.523	0.917	
		比热比 γ		1.660	1.410			1.668	1.402	1.402	1.667	1.40	
		密度 ρ/kg·m ⁻³	0.1345	0.17857	0.08988			0.9002	1.25057	1.2928	1.78403	1.4299	
	爆炸界限/%				无	4.65 ~93.9				无			与其 可燃物 一起爆 炸
	注:①3.2K,102.3kPa;②在 λ 点的值;③干;④湿												

(八) 气体在低温下的性质

温度 /K	氢					氦					氮					氧				
	k	η	ρ	c_p	k	η	ρ	c_p	k	η	k	η	ρ	c_p	k	η	ρ	c_p	k	η
	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\times 10^3$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\times 10^3$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\times 10^3$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\times 10^3$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-6}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$
10	0.017	2.3	5.0	5.86 ^①	0.0074	0.510														
20	0.026	3.7	2.5		0.0155	1.092														
30	0.034	4.7	1.6		0.0229	1.606		10.84												
40	0.041	5.6	1.2		0.0298	2.067	0.6238	10.57												
60	0.053	7.2	0.80		0.0422	2.876	0.4113	10.49												
80	0.064	8.8	0.60		0.0542	3.579	0.3075	10.74												
100	0.074	10.1	0.48	5.233 ^②	0.0664	4.210	0.2457	11.23	0.00990	6.975	0.00990	6.975	3.480		0.00903	7.715	3.98		0.910	
150	0.097	13.2	0.32		0.0981	5.598	0.1535 ^②	12.62	0.01388	10.08	0.01388	10.08		1.05	0.01367	11.44	2.61		0.918	
200	0.117	15.8	0.24		0.1282	6.813	0.1227	13.54	0.01815	12.95	0.01815	12.95	1.711	1.04	0.01824	14.78	1.94		0.914	
250	0.135	18.3	0.19		0.1561	7.923	0.0944	14.04	0.02227	15.55	0.02227	15.55		1.04	0.02259	17.79	1.56		0.915	
300	0.16	21	0.16	5.233 ^③	0.1816	8.959	0.0818	14.31	0.02605	17.86	0.02605	17.86	1.138	1.04	0.0268	20.65	1.31		0.920	

注:①在 93K 的值;②在 260K 的值;③在 273K 的值;④303kPa 压力下的值;

其余表中数值为气体在 101kPa 气压下的数值,其中:

k ——气体的热导率;

η ——气体的粘滞系数;

ρ ——气体的密度;

c_p ——气体的比定压热容

(九) 活性炭、沸石、氧化硅、氧化铝对气体的吸附

吸 附 剂		吸 附 物 质	温 度 /K	吸 附 量 / Pa·m ³ ·g ⁻¹											备 注	
				平 衡 压 力 /Pa												
				10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵		
活 性 炭	椰 壳	20.2	(15)	18	22	25	28	31	32	35	37	(39)		200	41	6~14 目
		20.4								(38)	45	52	(58)			
	椰 壳	30.0		(4.3)	6.4	10	14	19	23	(27)	(31)			200	41	6~14 目
		40.4			(0.95)	2.1	4.4	7.5	13	16	23	(28)		200	41	6~14 目
	椰 壳	55.0									(16)	23	(32)			
		90									(2.2)	5.5	(14)			
	酚 醛 树 脂	N ₂	77				3	7	13	15	16	17	17			
		Ar	77		(0.015)	0.15	(1.5)									
		Xe	77	(0.015)	0.15	1.4	9.3	15								
	原 料	H ₂ O	308								120				比表面积 2064m ² /g	
沸 石		5A ^①	4	11	16	20	23	23	6×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁶	(5×10 ³ Pa)			380	23	粉 末
沸 石	分 子 筛	13X ^①	20.2			2.1×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻³		6×10 ⁻⁵							
		5A	78				6×10 ⁻⁷									
	5A	20.2	(4.1)	7.2	13	17	14	15	16				420	67	颗 粒	
	5A	20.4		6.2	9.8	13										
	13X	20.2	2.5	4.0	6.5	11	(13)						380	23	粉 末	
13X	23	1.6	3.5	5.6	8.0											

(续)

吸附剂	吸附物质	温度 /K	吸 附 量 /Pa·m ³ ·g ⁻¹											备 注		
			平 衡 压 力 /Pa											活 化		粒度
			10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	温度 /℃	时间 /h	
沸 石	5	20.4			3.1	8.1	15	19	21	24	26	(27)				
	5A	78				1.2×10 ⁻⁶	1.1×10 ⁻⁵	9.3×10 ⁻⁵	5.3×10 ⁻⁴	6.7×10 ⁻³						
	5A	78		1.5×10 ⁻¹	1.3×10 ⁻³	0.011	0.12	11	14	15	15	15	15			
	13X	77				(5.1×10 ⁻³)	0.024	0.12								
	5A	78					1.9	13	14	15	16					
5A	O ₂	77						4.3	11	15	17	18				
NaA	H ₂ O	298							17	24						
氧 化 硅	R [®]	20.2				2.3×10 ⁻¹	1.6×10 ⁻³	0.016	0.10	0.52				175	17	14目~20目
	R [·]	20.2	2.5	4.0	6.5	11								175	17	14目~20目
	1D [®]	20.2	0.42	0.81	1.5	2.7	(5.1)							175	19	10目
	H ₂ O	298							1.4	6.4						
氧 化 铝	H ₂	20.2	1.4	1.9	2.6	3.7	(5.1)							350	21	3.2mm 球形
	H ₂ O	298							4	5						

注:①5A,13X 为 Linde 社的商品;
②R,1D 是 Davison 社的商品;
括号内的数据为参考数据

注:①5A, 13X 为 Linde 社的商品;

②R, 1D 是 Davison 社的商品;

括号内的数据为参考数据

(十) 某些材料的吸附热

1. 金属的化学吸附热

(单位: $\times 10^3$ J/mol)

类	金属	N ₂	H ₂	CO	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	NH ₃	Ar	Kr	Xe
A	Zr			335($\theta=0.5$) 83.7($\theta=1$)									
	Ta	586	188		578								约 22.2
	Cr		188		427								
	Mo		约 167				720						约 33.5
	W	356 398	167 188 193	约 419			812 649	427		293	约 7.95	约 18.8	33.5~37.7
	Fe	还原 13.1 未还原 13.7 167		14.2							13.4 13.7		
B ₁	Ni	41.9	126 130 167 100	147	243	281	544 481 628	6.87 ($\theta=0.5$)	19.3 ($\theta=0.5$)	151		14.9 ($\theta=0.5$)	
	Co		约 100 105($\theta=0$) 54.4($\theta=0.3$)				490 385						
B ₂	Rn		109 117		209		318						
	Pb		113										
	Pt	14.2	113 126	15.1			281				13.7		
	Ir			109									
C	Cu		41.9 33.5 41.9 117	37.7	75.4	79.5			18.6 ($\theta=0.5$)				
	Au			37.7	87.9	87.9							
E	Ag	15.1		13.3							14.7		
	Si						96.3						
	Ge	12.6		12.6			553 1047				13.8	16.3	17.2

注: θ 表示覆盖度; 温度: 室温

2. 覆盖度和吸附热

(单位: $\times 10^3$ J/mol)

覆盖度	N ₁ -金刚石	Ar-金刚石	N ₂ -石墨	Ar-石墨
0.02	6.15	5.02	9.21	7.12
0.1	5.23	3.01	4.10	5.02
1.0	0.376	0.356	2.72	2.93

(十一) 各种气体的附着系数

气 体	表面温度 /K	气 体 的 温 度 /K			
		77	195	300	400
N ₂ O	10			0.62	0.43
	15			0.62	0.43
	20			0.62	0.43
	25			0.62	
	77			0.61	
CO ₂	10		1.00	0.74	
	15		0.96	0.63	0.52
	20		0.90	0.68	0.44
	25		0.83	0.61	0.47
	30		0.83	0.63	
	77		0.80	0.62	0.49
N ₂	10	1.00		0.65	0.47
	15	0.92		0.63	0.47
	20	0.80		0.62	0.47
	25	0.77			
CO	10	1.00		0.88	
	15	1.00		0.84	0.72
	20	1.00		0.84	
Ar	10	1.00		0.68	0.50
	15	0.96		0.66	0.49
	20	0.88		0.65	0.49
	25	0.77			
O ₂	20	1.00		0.83	0.73

(十二) 气体的脱附活化能

1. 由金属上脱附的活化能

(单位: J/mol)

	N ₂	H ₂	CO	O ₂	F ₂	CH ₄	Ar	H ₂ O
Mo		9.2×10^3	1.26×10^4		6.1×10^5	1.8×10^4	1.47×10^4	
W	3.39×10^5	1.3×10^5	2.18×10^5	$4.44 \times 10^5 (\theta=0 \sim 1)$				
			2.22×10^5	$2.22 \times 10^5 (\theta=1 \sim 2)$				
			3.14×10^5					
			4.19×10^5					
Fe	1.3×10^4		1.42×10^4				1.34×10^4	
Pt	1.4×10^4		1.5×10^4				1.38×10^4	
Cu							2.9×10^4	
Ag	1.5×10^4		1.34×10^4				1.47×10^4	
Ge								p-Ge 1.25×10^4
								n-Ge 5.79×10^3

注: θ 为覆盖度

2. 由金属氧化物上脱附的活化能

(单位: J/mol)

气体	金属氧化物	脱附活化能	气体	金属氧化物	脱附活化能
H ₂	ZnO-Cr ₂ O ₃	$4.19 \times 10^4 \sim 1.47 \times 10^5$	CO ₂	ZnO	$6.7 \times 10^4 \sim 1.67 \times 10^5$
H ₂	Cr ₂ O ₃	$6.28 \times 10^4 \sim 1.88 \times 10^5$	C ₂ H ₄	Al ₂ O ₃	1.12×10^5
H ₂	ZnO·MoO	1.72×10^5	C ₂ H ₄	Al ₂ O ₃	1.52×10^5
O ₂	Cr ₂ O ₃	4.02×10^4	反丁烯-(2)	Al ₂ O ₃	5.07×10^4
CO	NiO	$2.1 \times 10^4 \sim 7.54 \times 10^4$	反丁烯-(2)	Al ₂ O ₃	6.78×10^4
CO ₂	NiO	$2.93 \times 10^4 \sim 1.26 \times 10^5$			

3. 由玻璃上脱附的活化能

(单位: J/mol)

玻璃的种类	H ₂ O	CO ₂
钠钙石灰硅酸盐	1.2×10^5	5.02×10^4
硼硅酸盐	8.79×10^4	4.4×10^4
铝硅酸盐	2.05×10^5	6.7×10^4

4. 由某些材料上脱附的活化能

(单位: J/mol)

材 料	He	H ₂	Ne	N ₂	Ar	O ₂	CH ₄	Kr
多孔玻璃	2.85×10^3	8.25×10^3	6.45×10^3	1.78×10^4	1.58×10^4	1.71×10^4		
萨然树脂, 木炭	2.64×10^3	7.83×10^3	5.36×10^3	1.55×10^4	1.53×10^4		1.94×10^4	
炭黑	2.51×10^3		5.69×10^3		1.82×10^4			
矾土					1.17×10^4			1.45×10^4
石墨化炭黑					1.03×10^4			1.38×10^4

(十三) 真空绝热材料的热导率

1. 各种多层材料组合后的热导率

反射物 δ/mm	间隔物 δ/mm	总厚度/mm	总层数	压力/Pa	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
铝箔 0.02	玻璃纤维布 0.15	30.00	50	2.27×10^{-3}	2.512×10^{-4}
铝箔 0.004	玻璃纤维布 0.025	20.50	129	1.87×10^{-2}	9.71×10^{-5}
喷铝涤纶薄膜 0.01	玻璃纤维布 0.060	25.40	66	1.33×10^{-2}	1.65×10^{-4}
喷铝涤纶薄膜 0.01	石棉纤维纸 0.05~0.125	25.20	47	4.53×10^{-3}	4.09×10^{-4}
喷铝涤纶薄膜 0.01	植物纤维纸 0.05	25.50	95	2.27×10^{-2}	1.85×10^{-4}
喷铝涤纶薄膜 0.01	聚酰亚胺薄膜 0.01	27.60	135	2.53×10^{-3}	1.78×10^{-4}
喷铝涤纶薄膜 0.01	尼龙网(1200支)	25.50	87	4.0×10^{-3}	1.31×10^{-4}
喷铝涤纶薄膜 0.01	电容器纸 0.0045	28.00	160	1.33×10^{-2}	1.16×10^{-4}
无	无			4.0×10^{-3}	5.97×10^{-3}

注: 测试温度 77K~300K

2. 各种粉末材料的热导率

粉末材料	密度 $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粒度 $/(\text{网目})$	温度 $/\text{K}$	热 导 率 $/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$						
				1.01×10^5 Pa	1.33×10^4 Pa	1.33×10^3 Pa	1.33×10^2 Pa	1.33×10^1 Pa	1.33 Pa	1.33×10^{-1} Pa
高压气	104	40~80	77~310	0.0151	0.00856	0.00309	0.00234	0.00154	0.00149	0.00143
凝胶	124			0.0154	0.00989	0.00363	0.00209	0.00133	0.00131	0.00128
常压气	120	粉状	77~310	0.0267	0.00677	0.00258	0.00171	0.00160	0.00143	—
凝胶	170			0.0267	0.0126	0.00167	0.00150	0.00123	0.00121	—

(续)

粉末材料	密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	粒度 /(网目)	温度 /K	热 导 率 $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$						
				1.01×10^5 Pa	1.33×10^4 Pa	1.33×10^3 Pa	1.33×10^2 Pa	1.33×10^1 Pa	1.33 Pa	1.33×10^{-1} Pa
蛭石	290	40~80	77~310	0.0544	0.0415	0.00426	0.00159	0.00158	0.00151	—
	300	80~120		0.0534	0.0316	0.00916	0.00131	0.00126	0.00108	—
国产 珠光砂	73~77	20~40	77~310	0.0279	0.0270	0.0222	0.0171	0.00178	0.00172	0.00167
	130	40~80		0.0295	0.0265	0.00412	0.00160	0.00121	0.00103	—
日本 珠光砂	60~70	粒状	77~310	0.0250	0.0227	0.00728	0.00202	0.00173	0.00160	—
气相胶	290	80~120	77~310	0.0300	0.00654	0.00126	0.00116	0.00114	0.00111	—
硅胶	600~700	20	77~298	0.0618	0.0326	0.0156	0.00585	0.00492	—	—
		100		0.00923	0.00280	0.00260	0.00256	0.00224	0.00219	—

(十四) 各种气体与蒸气的爆炸范围和自燃点

气体或蒸气	爆炸范围(容积/%)		自燃点 /℃	气体或蒸气	爆炸范围(容积/%)		自燃点 /℃
	下限	上限			下限	上限	
氨	14	33	780	氯乙烯	4	22	633
乙炔	2	82	335~440	氯甲烷	8	19.7	
苯	1.8	7.2	490	氯乙烷	3.6	14.8	415
汽油	1.6	5	530~580	乙二醇	3.2		
丙酮	2.2	9.5	500	丁醇	1.7	18	397
氢	4.1	80	350~590	乙烷	2.5	15	520~630
水煤气	12.3	66.9		乙烯	2.5	34	540~550
丁烷	1.5	8.5	475~550	丙烷	2.1	9.5	510~580
丁烯	1.7	9	445	丙烯	2.5	15.7	455
甲烷	5.3	15.2	650~750	戊烷	1.1	8	475~550
乙醛	4	57		酒精	2.8	13.6	426
二硫化碳	1	50	150	乙醚	1.8	8	180
甲苯	1.3	7	550	一氧化碳	12.5	74	610~658
醋酐	4		385	硫化氢	4.5	45.5	346~379
萘	0.9		500	醋酸	1.8	10	379

(十五) 主要溶剂的某些性质

1. 主要溶剂的物理性质

溶剂名称	分子式	相对 分子量	蒸气压/ $\times 10^5\text{Pa}$			熔点 /℃	沸点 /℃
			0℃	25℃	100℃		
甲醇	CH_3OH	32.04	0.03986	0.16277	3.5524	-97.0	64.72
乙醇	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46.07	0.01693	0.07847	2.2504	-114.0	78.3
丁醇	$(\text{CH}_3)_3\text{COH}$	74.12	0.00160	0.00924	0.49210	-79.9	117.7
	CHCl_3	119.39	0.07980	0.24404	3.2798	-63.5	61.2
四氯化碳	CCl_4	153.84	0.04495	0.15229	1.9532	-22.85	76.71
二氯乙烯	CH_2Cl_2	96.95	0.13300	0.41230	4.6497	-35.9	83.5
三氯乙烯	C_2HCl_3	131.40	0.07581	0.27930	1.5295	-73	86.7
甲基	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}_3$	74.08	0.07980	0.30001	3.6708	-98.05	57.8
乙基	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{C}_2\text{H}_5$	88.10	0.3059	0.11111	2.1280	-83.6	77.15
丙酮	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	58.08	0.08778	0.30457	3.7005	-94.3	56.24
	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	74.12	0.24592	0.71222	6.4572	-116.2	34.6
苯	C_6H_6	78.11	0.03525	0.12598	1.7875	5.5	80.1
甲苯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	92.13	0.00692	0.02961	0.63188	-95.15	115.6
	$\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_3)_2$	106.16	0.00217	0.01069	0.30271	-47.89	139.15
二硫化碳	CS_2	76.14	0.17024	0.48292	4.4223	-112.0	46.5

2. 氧化物上的化学吸附热

(单位: $\times 10^3$ J/mol)

氧 化 物	N ₂			O ₂			CO			CO ₂	
	还原 ^①	氧化 ^②		还原 ^①	氧化 ^②		还原 ^①	氧化 ^②		还原 ^①	氧化 ^②
ZnO	不吸附			—	—	4.61	83.7	75.4	44.4	—	54.4
Cr ₂ O ₃	151	385		410	155	40.2	121	117	87.9	130	75.4
Mn ₂ O ₃	184	126		92.1	100	100	281	260	270	71.2	96.3
ZnO·Cr ₂ O ₃	54.4	201	105	180	—	180	62.8	184	62.4	75.4	62.8
Mn ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃	不吸附			218	92.1		138	197		58.6	83.7
Cu ₂ O	113	176		230	—		117	113		—	—
NiO						230					
氯化物	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₆	C ₆ H ₁₄	H ₂ O	SO ₂	Kr
Al ₂ O ₃	10.6	25.7	19.7		29.9		33.1~38.9	35.6~40.6	44.4		
SiO ₂	11.7	28.1	23.0		33.7		33.1~38.9	10.9~15.5	41.4		
SiO ₂ ·Al ₂ O ₃		23.0±0.84		26.4±0.84		22.2	23.9	21.8~25.1			
MoO ₃ ·Al ₂ O ₃							33.1~38.9				
MgO							40.2				
NiO	10.9		18.6				40.2	37.7			15.9
	($\theta=0.2$) ^③		($\theta=0.5$)								($\theta=0.2$)
Cu ₂ O		83.7								155	
ZnO·Cr ₂ O ₃		83.3									
ZnO		106									
Anatase(TiO ₂)									67.0~71.2		

注: ①测定前用氢或一氧化碳处理过; ②测定前用氧处理过; ③ θ 表示覆盖度

3. 各种固体上的吸附热

(单位: $\times 10^3$ J/mol)

固 体	气 体	吸 附 热	固 体	气 体	吸 附 热
分子筛 5A	Ar	6.32	氮化硼	Ar	1.67($\theta=1$)
	O ₂	8.54		N ₂	0.837($\theta=2$)
	N ₂	17.5		氟里昂-11	27.8
	Kr	13.2	铅硼硅酸玻璃	H ₂ O	46.1
	CH ₄	16.7	硼硅酸玻璃	H ₂ O	29.3~41.9
	n-C ₅ Hn	58.6	多孔质玻璃	H ₂ O	61.1($\theta=0.033$)
	乙醚	113		H ₂ O	48.6($\theta=0.333$)
天然沸石	Ar	15.9		He	2.85
Na 型分子筛 X	C ₆ H ₆	64.9	氩	He	1.17
	nC ₆ H ₁₄	45.2		Kr	10.5
分子筛 13X	SF ₆	20.9	NaBr(100)	Ar	9.17
聚乙烯	H ₂	1.88~3.35	KCl(100)	Ar	8.71
聚丙烯	Ar	6.70($\theta=0.5$)		Ar	8.79
	N ₂	7.22($\theta=0.5$)		Ar	10.2
	CCl ₄	14.2($\theta=0.5$)	KCl(111)	Ar	10.3
	C ₂ H ₆	16.8($\theta=0.5$)		Ar	10.9
聚四氟乙烯	Ar	7.12($\theta=0.2$)			
	N ₂	6.28($\theta=0.2$)			
	CF ₄	12.4($\theta=0.2$)			

注: θ 表示覆盖度

(十六) 真空技术中使用的有害物质

物质名	容 许 浓 度	中 毒 症 状	使用领域 ^①	泄 漏 处 理
乙炔	5×10^{-3}	中枢神经异常, 头晕, 窒息	焊接	换气, 防爆
丙酮	1×10^{-3}	支气管炎, 头痛, 头晕, 麻痹	清洗	用布吸, 通风
三氯化砷	5×10^{-8}	头痛, 头晕, 局部感觉麻痹, 恶心	离子注入 MOCVD	换气
铋	$0.2\text{mg}/\text{m}^3$	皮肤炎, 头痛, 头晕, 失眠	MBE, PVD	换气
氮	5×10^{-5}	高浓度呼吸器官浮肿, 声门痉挛	CVD	中和, 用大量的水冲洗
异丙醇	4×10^{-4}	头痛, 头晕, 麻痹, 肝、肾脏损害	清洗	用布吸, 通风
一氧化碳	5×10^{-5}	头痛, 头晕, 呕吐, 发汗, 全身痛	碳离子源	隔断火源, 换气
乙醚	4×10^{-4}	结膜炎, 皮肤炎, 神志不清	清洗, 溶剂	防火, 防爆, 换气
乙烯	5×10^{-5}	灼伤, 结膜炎, 呼吸困难	医药物质杀菌	断火, 通风
氯化氢	5×10^{-6}	鼻炎, 呕吐, 结膜炎, 皮肤炎	RIE(清洗)	与氟化物相同
氯	1×10^{-6}	皮肤炎, 呼吸困难, 支气管炎	RIE	用 Na_2SO_3 + 过剩的 NaHCO_3 水溶液处理
黄磷	$0.1\text{mg}/\text{m}^3$	发绀(青紫), 呕气和呕吐, 呼吸困难	MBE	不要与空气接触, 用湿砂子盖上
双氧水	1×10^{-6}	结膜炎, 气管受刺激, 皮炎	清洗(预处理)	用水稀释, 流水洗
钾	$1\text{mg}/\text{m}^3$	皮疹, 骨髓异常	MBE	用布擦, 放入密闭容器中
三氯乙烷	3.5×10^{-4}	结膜炎, 皮肤炎, 精神错乱	清洗, 脱脂	用布吸, 通风
三氯甲烷	5×10^{-5}	急性: 精神错乱, 头晕 慢性: 肝、肾损害	RIE	用布吸后通风
三氯化磷	5×10^{-7}	刺激眼睛, 皮肤炎, 头晕, 头痛	离子注入	(与三氟化硼相同)
三氯化砷	$0.5\text{mg}/\text{m}^3$	不快, 衰弱, 发热, 鳞片状湿疹	MBE, MOCVD	溶于少量浓盐酸后回收
三氟化氮	1×10^{-5}	长期: 齿和骨异常	RIE	通还原剂和过剩的重酸溶液, 室内换气
三氟化硼	1×10^{-6}	皮肤炎, 刺激气管	离子注入	隔断火源, 在 $\text{NaOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液中吸收
四氯化硅	$2.5\text{mg}/\text{m}^3$	皮肤、粘膜受刺激	CVD, RIE	因为它和水反应生成氢氟酸所以和氢氟酸同样处理
四氯化碳	1×10^{-5}	头痛, 头昏, 呕气, 神经过敏, 肝大	RIE	纸巾吸, 通风
乙硼烷	1×10^{-7}	头痛, 嗅觉丧失, 倾眠, 肌肉弛缓	离子注入	隔断火源液态由大量的水分解

(续)

物质名	容 许 浓 度	中 毒 症 状	使用领域 ^①	泄 漏 处 理
溴	1×10^{-7}	皮肤,角膜炎,舌与粘膜褐变	RIE	用硫代硫酸钠、亚硫酸盐处理
硝酸	2×10^{-6} 5mg/m ³	结膜炎,角膜炎,皮肤变质	腐蚀液	用苏打灰 + 熟石灰处理
硅烷	5×10^{-7}	气管道组织显著受刺激	CVD,RIE	通 KOH 液,室内换气
水银	0.05mg/m ³	口腔炎,流涎,呼吸困难,腹痛	泵,压力计	用吸泵 + 细管收集
氢氧化钾	—	强烈地侵害皮肤	腐蚀液,中和剂	用盐酸中和,大量水冲洗
氢	—	(窒息)	RIE,MOCVD	防火,换气
氯化铈	1×10^{-7}	与三氯化砷的毒性相似	CVD,离子注入	室内换气
硒	0.2mg/m ³	头晕,头痛,倦怠,贫血症	PVD	用纸收集回收,现场用水冲洗
硒化氢	5×10^{-8} 15mg/m ³	呼吸道粘膜受刺激,呼吸有大蒜臭味	MOCVD,离子注入	用纸收集回收
砷	0.1mg/m ³	运动失调,抽搐,呕吐,下肢痛	PVD	蒸气的场合:换气
铋	0.1mg/m ³	头晕,头痛,呕吐	MBE,PVD	收集在容器中保管
三氯乙烯	1×10^{-4} 535mg/m ³	皮肤炎,长期:神经性疾病	清洗,冷媒	布吸收后,通风
甲苯	2×10^{-4} 750mg/m ³	皮肤炎,呕吐,肝肥大,疲劳和衰弱	油漆溶剂	用布吸,通风
铅	0.2mg/m ³	颜色变白,体重减轻,唾液过多	(MBE)	换气
铋	2mg/m ³	口内炎,口臭,下痢,发热,风湿痛	PVD	用浓硫酸溶解过滤后稀释(沉淀保存)
氢氟酸	3×10^{-6} 2mg/m ³	结膜炎,角膜炎,皮肤炎,呼吸困难	清洗(预处理)	用苏打和熟石灰的混合物成泥浆状回收
氟	1×10^{-7}	皮肤、呼吸器官的灼伤	RIE	通过固体碳酸盐、生石灰处理
铍	0.002mg/m ³	皮肤炎,溃疡,结膜炎,呼吸困难	MBE	用布擦净,现场用肥皂水洗净
苯	2.5×10^{-5}	损害造血机能,出血性症状	溶剂,分析样品	隔断火源,通风
磷化氢	3×10^{-7} 0.4mg/m ³	头痛,头晕,胸骨下痛,发汗,鼻血	离子注入	换气
锰	5mg/m ³	皮肤炎,发热,长期:中枢神经异常	PVD	不要与水接触
甲醇	2×10^{-4} 260mg/m ³	结膜炎,发绀,视力不全,失明	清洗	用布吸,通风
硫酸	—	皮肤炎,支气管炎,火伤	腐蚀液	用碳酸氢钠或苏打和熟石灰处理

注:①该栏内的符号意义如下:

MOCVD—金属有机化学气相沉积;CVD—化学气相沉积;PVD—物理气相沉积;RIE—反应离子刻蚀;MBE—分子束外延

(十七) 无机物和有机物的特性

物 质 名 ^②	电介质功率因素 / $\times 10^{-4}$ 50Hz~60Hz (10^6 Hz~ 10^7 Hz)	电阻率 \log_{10} ($\rho/\Omega \cdot m$)	绝缘强度 ^③ /MV $\cdot m^{-1}$	拉伸强度 /MPa	使用温度上限 /K
白云母(硬质云母)	10~25 (1~6)	12~15	70~250	300~500	750~850
金云母(软质云母)	150~500(1kHz) (20~70)	11~13	50~200	90~130	1050~1150
合成云母	— (8)	13	—	—	1350
云母石	45~170 (8~20)	11~13	18~42	44~69	580~800
石棉	1500~1800 (250~700)	8~11	10.4(板)	4.1(板长) 1.8(板宽)	650
水晶	7~22 (0.9~3)	12~15	20~25	113(11) 83(⊥)	750~850
大理石	200~2000 (60~500)	8~11	3~10	2.9~12	370~450
长石磁器(硬质磁器)	530~600 (60~100)	10~12	10~16 高压用 1.6~4 低压用	25~44 无感 29~69 施感	1300~1500
陶器	10~200(1kHz) (3~50) 低频~650	11~12	16~32	9.8~30	
滑石	(15~20) 高频 120~150 (3~5)	12 13	20~30 30~40	54~83 54~93	1250~1350
加硫天然橡胶	10~50 (50~240)	13~15	25~45	20~59	330~355 (软化点)
硬橡胶(S:30%~70%)	— (40~85)	14	25~40	29~78	325~360
丁基橡胶	50~300 ^① (—)	13~14	20~30 ^①	0.98~3.9	—
聚丁乙烯	— (—)	—	—	1.5~2.5	340
	30~40 ^① (—)	10	30	1.5~2.5	340
	— (—)	8	20	2.9	—
聚异戊二烯	300~1000 ^① (—)	13 ^①	20~30 ^①	4.9~25	330
丁烯·丙烯橡胶	20~80 (—)	13~14 ^①	30~60 ^①	2.0~5.9 ^①	360
丙烯橡胶	— (—)	9(343K)	16~28 ^①	2.0	360~400
氯丁二烯橡胶	300 (—)	8~10 ^①	10~20 ^①	15	370
氯磺化聚乙烯	300~500 ^① (—)	12 ^①	24~32 ^①	2.9	390

(续)

物 质 名 ^②	电介质功率因素 / $\times 10^{-4}$ 50Hz~60Hz (10^6 Hz~ 10^7 Hz)	电阻率 \log_{10} ($\rho/\Omega \cdot m$)	绝缘强度 ^③ /MV $\cdot m^{-1}$	拉伸强度 /MPa	使用温度上限 /K
硫化橡胶	1000~5500 (3200~18000)	4~7	17~23	7.8~13	340~370
氨基甲酸酯橡胶	150~170 (—)	9	17.7~19.7	35~55	361
硅橡胶	30~80 ^① (—)	12~13 ^①	20~30 ^①	2.0~9.8	450~525
氟橡胶	300~500 ^① (—)	12 ^①	10~20 ^①	6.9~20	425
虫胶树脂	17~80 (70~350)	13~14	14~28	—	340~355
玷吧树脂	50~100 (—)	14~15	16~35	—	350~365
松香	15~40 (100~200)	12~14	15~32	—	325~350
酪阮	600 (520)	6~10	20~35	49~74	375~415
酚醛树脂	500~1500 (150~500)	9~12	23~32	41~78	350~415
聚乙烯对苯二酸酯	20~30 (47~160)	17	120~160 (0.1mm)	120~190	395~425
聚酯树脂	30~280 (60~600)	12	9.8~19.7	5.5~90	394
醇酸树脂	30~40 (250~350)	11~13	11.8~13.8	59~72	355~395
环氧树脂	80~100 (300~500)	10~15	15.7~19.7	28~90	385~561
多硫化环氧树脂	100~400 (180~900)	10~11	12~25	22~73	395~425
苯氧基树脂	12 (300)	12	20.5	66	350
聚碳酸脂	9 (100)	14	15.7	55~66	394
硅树脂	10~70 (10~100)	13	7.0	—	477
尿素树脂(α -纤维素充填)	350~400 (280~320)	10~11	120~160 (3.17mm)	41~89	350
密胺树脂(α -纤维素充填)	300~800 (270~450)	10~12	120~160 (3.17mm)	49~92	375
尼龙 6	100~600 (110~600)	10~13	17.3~20.0	70~83	352~394
尼龙 66	140~400 (300~400)	11~12	15.1~18.5	48~83	405~422
聚酰亚胺	80 (115[10^5 Hz])	15~16	120~170	180	535

(续)

物 质 名 ^②	电介质功率因素 / $\times 10^{-4}$ 50Hz~60Hz (10^6 Hz~ 10^7 Hz)	电阻率 \log_{10} ($\rho/\Omega \cdot m$)	绝缘强度 ^③ /MV·m ⁻¹	拉伸强度 /MPa	使用温度上限 /K
聚异丁烯酸甲基	500~600 (200~300)	12~13	17.7~21.6	48~76	333~366
异丁烯酸甲基·苯乙烯共聚物	— (190)	>14	15.7~19.7	62	356~366
丙烯酸乙基·乙基共聚物	100~200 (100~200)	>	17.7~21.6	5.5~14	361~366
聚苯乙烯	1~3 (1~4)	>14	11.8~27.5	35~62	339~350
聚二氯苯乙烯	1~5 (2~10)	15~16	24~35	31~59	363~408
二乙基·丙烯腈共聚物	70~100 (70~100)	14	15.7~19.7	66~83	333~369
丙烯腈·丁烯·丙乙烯共聚物	40~340 (70~260)	10~15	122~161	17~62	333~394
聚乙烯(高密度)	<2 (<3)	13~14	17.7~19.7	21~38	394
聚乙烯(低密度)	<5 (<5)	>14	18.1~27.5	6.9~16	355~373
聚丙烯	5 (1~5)	14	19.7~26.0	33~41	394~433
聚氯乙稀	120~200 (60~150)	14~15	28~45	36~78	335~350
聚氯亚乙稀	300~4500 (500~800)	12~14	15.7~23.6	21~35	344~366
聚四氟代乙稀	<2 (<20)	>16	18.9	14~80	561
聚三氟氯乙稀	12 (36~170)	16	20.8	31~40	450~472
氟化乙稀·丙烯共聚物	<30 (<30)	>16	19.7~23.6	19~21	477
聚氟化乙稀	490 (1700)	12	10.2	48	422
聚乙烯醇缩甲醛	130 (230)	—	19.3	69~83	322~339
聚乙烯醇缩丁醛	70 (50~80)	>12	15.7	28~58	319
乙稀唑树脂	4~10 (7~15)	13~14	32~60	39~49	370~430
缩醛树脂	— (40)	11~12	18.3	61~69	358~394
氯化聚醚	100 (100)	13	15.5	41	416
聚磺	8 (56)	14~15	—	70	425
纤维素(赛璐玢)	100~1500 (600~2000)	7~11	15~52	49~110	—
乙酰纤维素	200~300 (400~600)	9~12	20~34	34~75	333~377
硝化纤维素(硝棉)	900~1200 (600~900)	13	11.8~23.6	34~64	335
赛璐珞	500~1500 (300~1000)	8~10	23~40	34~69	325~355
石蜡	0.5~2 (2~5)	8~17	8~12	—	315~340 (熔解点)
人造蜡	3~28 (40~900)	11~14	30~50	—	355~405

注:①掺合物;

②橡胶类和树脂类大多含有增塑剂,通常这些物质蒸汽压高,用于真空设备时需要注意;

③电源:使用 50Hz 或 60Hz 市电;试件厚度:对薄料按原料厚度;对板状绝缘材料取 1mm 或 2mm

(十八) 高熔点氧化物陶瓷的性能

序号	物 质	分子式	组 成 /%	熔点 /K	氧化性 气氛中 最高使用 温度 /K	电 性 能 电阻率/ $\Omega \cdot m$			化学性质—稳定性 ^①				
						373K 1273K	773K 2273K	1273K	还原 介质 气体	碳	酸性 溶剂	碱性 溶剂	熔融 金属
1	氧化铝	Al_2O_3	100 Al_2O_3	2323	2223	2×10^{13} 30	7×10^9 —	7×10^4	○	△	○	○	○
2	氧化铍	BeO	100 BeO	2823	2673	— 800	7×10^6 20	10^5	◎	◎	○	△	○
3	氧化钙	CaO	100 CaO	2873	2673	— 10	$7 \times 10^8(973K)$ 7×10^8	—	×	×	×	△	△
4	氧化镁	MgO	100 MgO	3073	2673	— 500	— 7	10^5	×	○	○	×	—
5	二氧化硅	SiO_2	100 SiO_2	1883	1473	8×10^{11} —	9×10^5 —	10	△	○	○	×	—
6	氧化钍	ThO_2	100 ThO_2	3573	2973	— 10	8×10^5 —	10^3	○	△	×	○	◎
7	二氧化钛	TiO_2	100 TiO_2	2113	—	— 0.8(1473K)	3×10^5 —	100(1073K)	—	—	—	—	—
8	二氧化铀	UO_2	100 UO_2	3151	—	100(293K) —	5 —	—	○	△	○	×	○
9	富铝红棕石	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	72 Al_2O_3 28 SiO_2	2103 分解 熔融	2123	— 5	3×10^3 —	70	△	△	○	△	△
10	尖晶石	$MgO \cdot Al_2O_3$	71.8 Al_2O_3 28.2 MgO	2408	2173	— 600	3×10^5 —	2×10^3	—	△	△	○	—
11	镁橄榄石	$2MgO \cdot SiO_2$	57.3 MgO 42.7 SiO_2	2158	2023	— 1	4×10^5 —	10^3	○	△	×	○	○
12	氧化锆	ZrO_2	93 ZrO_2 5 CaO 2 HfO_2	2950	2773	10^4 0.3	200 0.1	1	○	△	○	×	○
13	锆石	$ZrO_2 \cdot SiO_2$	67.1 ZrO_2 32.9 SiO_2	2693 分解 熔融	2143	4×10^7 10	2×10^5 —	10^3	△	△	○	×	○

注:①◎—很好;○—良好;△—较好;×—不好

一、真空设计常用数据

热 性 能				机 械 性 能						
比热容 / $\times 10^3\text{J}$ · $(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	热导率		线膨胀系数	莫 氏 硬 度	抗压强度		抗拉强度		弹性模量	
	/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$		/ $\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$		/GPa		/GPa		/TPa	
	373K	773K	773K		293K	773K	293K	773K	293K	773K
	1273K	1773K	1273K 1773K		1273K	1573K	1273K	1573K	1273K	1573K
0.774	30.3	11.0	7.6	9	2.9	1.8	0.26	0.25	0.37	0.35
	6.2	5.8	8.6		0.73	0.34	0.25	0.22	0.32	0.24
			9.6							
1.02	220.5	65.7	7.7	9	0.8	0.5	0.008	0.076	0.31	0.30
	20.4	16.8	9.1		0.25	0.18	0.047	0.001	0.23	—
			10.2							
0.766	15.3	8.1	11.2	4.5	—	—	—	—	—	—
	7.8	—	13.0							
			14.7							
0.938	36.2	14.0	12.8	6	—	—	0.096	0.10	0.21	0.21
	7.0	6.3	14.2		0.079	0.041	0.15	0.03		
			16.0							
0.737	0.9	1.6	—	6~7	—	—	—	—	—	—
	2.1	—	—							
			0.54							
0.23	10.3	5.1	8.4	6.5	1.5	0.83	—	—	0.15	0.34
	3.0	2.5	9.4		0.35	0.7	—	—	0.12	0.07
			9.8							
0.690	6.5	3.9	7.3	5.5~6	—	—	—	—	—	—
	3.3	—	8.0							
			9.1							
0.23	9.8	5.1	9.3	—	—	—	—	—	—	—
	3.4	—	—							
			—							
0.632	6.2	4.4	4.0	6~7	—	—	—	—	—	—
	4.0	—	4.5							
			5.3							
0.804	15.1	9.1	7.2	8	1.9	1.4	0.13	0.094	0.24	0.24
	5.8	—	8.2		0.9	0.1	0.069	0.008	0.21	0.24
			9.0							
0.841	5.4	3.2	8.3	6~7	—	—	—	—	—	—
	2.5	—	9.5							
			11.0							
0.452	2.0	2.1	—	6.5	2.1	1.6	0.14	0.12	0.19	0.14
	2.3	2.6	—		1.2	0.6	0.10	0.069	0.13	0.09
			9.4							
0.535	5.8	4.3	3.0	7.5	—	—	—	—	—	—
	4.1	—	4.0				0.062	0.021		
			4.2							

(十九) 高氧化铝陶瓷的性质

纯度形态		85% 熔 化	95% 熔 化	99% 纯	99.5% 熔 化	99.5% 多孔性
拉伸强度/GPa		0.117~0.158	0.172~0.240	0.240~0.257	0.261	—
耐压强度/GPa		0.96~2.7	1.72~2.7	2.1	2.93	0.7~0.866
弯曲强度/GPa		0.21~0.31	0.31~0.34	0.34	0.293~0.322	0.07~0.151
弹性模量/TPa		0.213~0.240	0.268~0.295	—	0.357	—
莫氏硬度		8.5~9	9	9	9	—
吸水率/%		0.00~0.02	0	0	0	7~1.8
孔隙率/%		<1	<1	—	<1	7.5
最高安全使用温度/K		1570~1670	1870~1970	2170	2220	1670~2070
比热容/ $\times 10^3 \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$		0.75	0.786~0.795	—	0.92	—
线膨胀 系数 $/\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	298K~473K	5.47~5.68	5.7 6.67	—	—	5.1
	298K~873K	6.55~6.96	6.7 7.65	—	—	—
	298K~1073K	7.33	7.6	7.8(298K~973K)	—	—
	298K~1273K	7.67~7.89	8.45~9.15	—	8.4	—
热冲击电阻 击穿电压(AC) $/\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$	—	相当好	好	—	好	好
	298K	8.1~13.8	9.8~15.7	—	15.0	2.0
	773K	—	3.9~4.7	—	—	—
	1273K	—	0.8~1.2	—	—	—
电阻率 $/\Omega \cdot \text{m}$	298K	$1 \sim 3.6 \times 10^{12}$	1×10^{14}	1×10^{13}	—	1×10^{12}
	373K	$2 \sim 7.5 \times 10^{11}$	9.0×10^{12}	—	—	$0.9 \sim 1 \times 10^{12}$
	473K	—	1×10^{12}	—	—	—
	573K	$1 \sim 5.0 \times 10^8$	5.3×10^{10}	—	1.2×10^{11}	$0.1 \sim 1.5 \times 10^9$
	673K	—	1×10^9	$1 \times 10^9(723\text{K})$	—	—
	773K	$0.1 \sim 7.5 \times 10^5$	$1.2 \sim 4.5 \times 10$	—	1.3×10^9	$0.8 \sim 1.0 \times 10^8$
	873K	—	1×10^6	—	—	—
	973K	$3 \sim 7.0 \times 10^4$	6.0×10^6	1×10^6	—	$0.4 \sim 3.0 \times 10^5$
	1073K	—	—	—	3.5×10^6	—
	1173K	$4 \sim 5.0 \times 10^3$	—	—	—	5.6×10^3
相对介电常 数(298K)	60Hz	8.4	9.2	—	—	—
	1kHz	7.65~8.75	8.84~10.51	—	10	—
	1MHz	7.4~8.95	8.81~9.6	9.0	—	5.5
	100MHz	8.1~8.95	8.8~9.6	—	—	5.3
	1000MHz	—	8.6	—	—	—
	3000MHz	8.14	8.6	—	—	—
	10000MHz	8.08~8.77	8.4~9.36	—	—	7.07
	—	—	—	—	—	—
功率因数 (298K)	60Hz	0.0013~0.0015	0.0005	—	—	—
	1kHz	0.002~0.0014	0.00007~0.0006	—	—	—
	1MHz	0.0007~0.0012	0.00035~0.0035	0.0002	—	0.0005
	100MHz	0.0009	0.00035~0.004	—	—	0.0005
	1000MHz	—	0.0006	—	—	—
	3000MHz	0.0014	0.001	—	—	—
	10000MHz	0.0027	0.0008~0.0015	—	—	—
	—	—	—	—	—	—
损失率 (298K)	60Hz	0.011~0.013	—	—	—	—
	1kHz	0.00175~0.0115	0.0008~0.0053	—	—	—
	1MHz	0.0018~0.0078	0.0014~0.0053	—	—	0.003
	100MHz	0.006~0.0074	0.0031~0.004	—	—	0.003
	1000MHz	0.0076	0.0038	—	—	—
	3000MHz	0.0114	0.0038	—	—	—
	10000MHz	0.013~0.0218	0.0067~0.0110	—	—	0.0075
	—	—	—	—	—	—

(二十) 高熔点材料在 2000K 时的性质

材料	熔点 /K	密度 (293K) / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	热导率 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	比热容 $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	线膨胀 $\Delta l / \%$	10^{-5} Pa 蒸汽压的 温度 /K	电阻率 $\mu\Omega \cdot \text{m}$	硬度 HV /GPa	拉伸强度 /MPa	弹性模量 (1500K) /GPa
硼化物										
HfB ₂	3520	11.2	约 85	443	(1.07)	—	约 73	约 5	—	—
LaB ₆	2800	4.72	—	2190	(0.82)	(1650)	(约 143)	约 3	—	—
NbB ₂	3270	7.00	—	896	(1.7)	—	(约 108)	约 0.9	—	—
TaB ₂	3370	4.53	40	482	(0.98)	1700	(约 132)	—	—	—
ThB ₄	>2775	8.44	约 41	—	—	—	—	—	—	—
TiB ₂	3190	12.62	约 38	1344	(1.03)	1800	(约 110)	约 0.8	120	500
UB ₂	2700	12.69	—	472	(2.3)	—	—	(约 0.3)	—	—
W ₂ B	3040	17.13	(约 40)	(369)	(1.15)	—	—	—	—	—
ZrB ₂	3310	6.09	约 23	897	(1.30)	1950	66	约 3	—	—
碳化物										
HfC	4220	12.67	约 18	2974	1.2	2270	约 154	—	—	670
NbC	3870	7.82	约 19	565	1.24	(2050)	约 126	0.28	—	470
SiC	3100	3.21	—	约 1412	0.8	(1830)	—	约 0.9	—	350
Ta ₂ C	3770	15.04	—	251	—	—	—	—	—	—
TaC	4270	14.4	约 22	341	1.19	(2140)	120	—	—	—
ThC	2900	10.6	—	276	—	—	—	—	—	—
ThC ₂	2930	9.74	—	270	2.0	(2160)	—	—	—	—
TiC	3340	4.92	约 44	931	1.47	1890	157	约 0.3	90	400
UC	2670	13.63	约 19	258	2.19	1730	约 255	约 0.16	—	—
UC ₂	2770	11.79	约 21	328	3.00	1830	—	—	—	—
VC	2970	5.48	约 36	1040	1.15	(1730)	约 330	约 0.1	—	—
W ₂ C	3068	15.77	—	279	(约 0.96)	—	约 35	—	—	370
WC	3058	7.48	约 52	349	(约 0.95)	—	约 190	0.45	—	600
ZrC	3690	6.66	约 25	635	1.20	2170	—	1.3	—	500
氮化物										
BN	3240	2.29	约 20	2107	—	1400	5×10^6	—	0.9	—
HfN	3580	13.39	约 21	333	(1.27)	—	—	—	—	—
TaN	3360	14.36	约 26	334	0.85	—	(约 134)	—	—	—
ThN	3060	11.55	—	—	—	—	—	—	—	—
TiN	3220	5.44	21	901	(约 1.7)	(1500)	约 134	—	—	—
UN	3120	14.40	—	259	(约 1.7)	1600	(约 260)	—	—	—
ZrN	3250	7.35	约 15	573	(约 1.35)	—	127	—	—	—
注: () 内的数值为外推值										

(二十一) 液体金属的一些性质

	温度 /K	密 度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	热 导 率 / $\times 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	比热容 / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	电阻率 / $\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	粘滞系数 / $\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	表面张力 / $\times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$
Ag	1233.8 ^①	9.30	72.2	—		—	930
	1300	9.26	73.9	—		3.89	923
	1400	9.18	77.3	—	0.0677	3.39	—
	1500	9.09	81.1	—		2.99	—
	1600	9.01	85.3	—		(2.73)	—
Al	933.1	2.37	0.92		20.0	4.5	915
	1000	2.36	1.04		20.4	2.9	900
	1100	2.35	1.22	1088	21.3	2.5	365
	1200	2.31	—		22.2	—	—
Bi	544 ^①	10.06	0.11		123.1	1.68	390
	600	10.03	0.17		131.9	1.63	376
	700	9.91	0.16		137.6	1.39	370
	900	9.66	0.16	151	149.0	1.00	356
	1100	9.40	—		160.4	—	—
Cd	593.9 ^①	8.02	0.44		33.7	(2.4)	(550)
	650	7.99	0.46		33.7	2.37	586
	700	7.93	0.46	265	33.7	2.17	605
	800	7.82	0.46		34.1	1.86	600
	900	7.72	0.50		34.8	1.63	—
Cs	302.7 ^①	1.84	0.25		36.6	0.684	—
	350	1.82	—		37.0	0.607	—
	400	—	—	253	38.5	0.474	—
	500	—	0.21		—	0.344	—
Cu	1356 ^①	—	—		21.1	—	135
	1400	8.24	—		21.2	4.5	135
	1450	—	1.32	496	21.6	4.2	—
	1500	8.25	1.39		22.1	3.9	—
Ga	302.8 ^①	(6.10)	0.29~0.38		25.8	2.04	735
	350	6.08	—	410	26.2	1.92	735
	400	6.04	—		27.2	1.64	—
	500	5.97	—	—	29.2	1.24	—
	900	5.72	—	—	31.1	0.756	—
	1300	5.50	—	—	33.1	0.592	—
Hg	293	13.55	0.08		98.4	1.554	465
	400	13.55	0.11		103.2	1.240	456
	500	13.12	0.13		114.2	1.052	436
	600	12.88	—	165	127.5	0.950	405
	650	(12.76)	—		135.5	0.914	395
In	430 ^①	7.03	(0.42)		33.1	—	559
	500	7.00	—	275	—	1.69	572
	600	6.92	—	—	36.7	1.32	545
	1100	—	—	—	49.6	—	—
K	336.7 ^①	—	—	—	13.2	0.534	—
	400	0.819	—	823	15.4	0.450	86
	500	0.795	0.45	785	21.8	0.327	—
	600	0.771	0.42	777	28.2	0.259	—
	800	0.723	0.38	764	—	0.184	—

一、真空设计常用数据

(续)

	温度 /K	密 度 $/\times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	热 导 率 $/\times 10^2 \text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热容 $/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率 $/\times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$	粘滞系数 $/\times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$	表面张力 $/\times 10^{-3} \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
Li	1000	0.676	0.36	777	—	0.140	—
	453 ^①	0.508	0.46	—	24.0	0.60	398
	500	0.507	—	—	45.2	0.566	400
	600	0.408	—	4242	—	(0.444)	400
Mg	800	0.482	0.31	—	—	—	400
	923 ^①	1.572	—	—	27.4	1.24	556
	1000	1.536	—	1399	—	1.04	542
	1050	1.47	—	—	—	—	526
	1100	—	—	—	28.2	—	—
Na	370.8 ^①	0.929	40.3	861	—	0.726	191
	400	0.928	40.7	861	0.330	0.714	190
	500	0.903	57.1	819	0.320	0.452	180
	600	0.879	73.5	760	0.312	0.337	171
	800	0.829	115	672	0.301	0.226	161
	1000	0.780	163	—	0.300	0.182	—
Pb	600.3 ^①	10.60	0.16	—	95.0	2.634	480
	700	10.51	0.16	—	98.2	2.32	463
	800	10.39	0.16	153	102.9	1.85	438
	900	10.27	0.15	—	107.6	1.54	423
	1100	10.04	—	—	116.9	—	409
	1300	9.81	—	—	126.3	—	—
Rb	311.8 ^①	1.475	(0.42)	—	—	0.673	430
	350	—	—	386	23.2	0.625	—
	400	—	—	—	27.5	0.484	—
	500	—	—	—	—	0.342	—
Sb	903.5 ^①	6.50	0.22	—	113.5	—	383
	1000	6.45	0.22	244	115.4	1.30	383
	1100	6.38	0.22	—	118.1	1.12	380
	1200	6.32	—	—	120.8	1.00	—
	1300	6.28	—	—	123.5	0.91	—
Sn	504.9 ^①	6.957	202	—	—	1.97	566
	600	6.92	209	—	—	1.66	560
	700	6.85	219	336	—	1.37	555
	800	6.78	230	—	0.115	1.18	550
	900	6.71	240	—	—	1.05	540
	1100	(6.58)	261	—	—	0.870	—
	1300	6.8	281	—	—	—	—
	576 ^①	11.29	307	—	—	—	490
Ti	650	11.22	—	248	0.0348	—	401
	700	—	320	—	—	—	—
	692.5 ^①	6.66	157	605	—	3.93	824
Zn	800	6.59	155	596	—	3.67	798
	900	6.50	152	584	0.115	3.29	774
	1100	6.40	154	—	—	—	756

注：①熔融温度

(二十二) 高温下金属的机械性能

材 料	温 度 /K	拉伸强度 /GPa	屈服强度 /GPa	延 伸 率 /%
Cu	500	0.18	—	47
	700	0.14	—	33
Mo	500	0.37	—	44
	700	0.26	—	45
	900	0.25	—	45
	1100	0.20	—	45
Nb	500	0.30	—	13
	700	0.27	—	12
	900	0.17	—	12
	1100	0.12	—	11
Ni	500	0.53	0.16	49
	700	0.54	0.15	50
	900	0.25	0.13	54
	1100	0.18	—	64
Ta	500	0.33	—	35
	700	0.36	—	27
	900	—	—	—
	1100	—	—	—
Ti	500	0.54	—	—
	700	0.37	—	—
V	500	0.46	—	25
	700	0.46	—	30
	900	0.25	—	38
	1100	0.14	—	47
W	500	0.83	—	50
	700	0.60	—	68
	900	0.47	—	72
	1100	0.36	—	72
Zr	500	0.22	0.10	45
	700	0.12	0.07	80

注: Mo、W 为加工后再结晶状态, Nb 为加工后退火状态, Ti 为压下量 50% 的冷轧状态, 其它的材料不详

(二十三) 高温下纯金属的物理性质

金 属	温 度 /K	线膨胀系数 $/\times 10^{-6}K^{-1}$	电 阻 率 $/\times 10^{-8}\Omega\cdot m$	热 导 率 $/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	比 热 容 $/J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$
Ag	400	19.6	2.1	419	223
	800	20.6	4.7	(378)	231
	1200	22.4	7.6		245
Al	400	23.9	3.64	239	941
	500	24.3	4.78	239	987
	600	25.3	5.99	239	1033
	700	—	7.30	239	1079
Au	400	14.2	3.0	294	130
	800	15.2	6.8	—	143
	1200	16.7	11.8	—	151
Be	400	13	7.0	152	2087
	500	—	10.5	131	2222
	600	—	14.1	118	2360
	800	—	21.8	103	2629
	1000	—	32.6	86.1	2898
Bi	400	13.4	152	7.6	130
	550		2.60	7.6	147
Cr	400	6.6	—	—	491
	700	8.4	—	—	584
	1000	9.4	—	—	651
Cu	400	17.1	—	395	391
	500	17.2	2.93	395	403
	800	18.3	—	—	428
	1300	20.3	—	—	475
Fe	400	12.2	15.0	68.5	479
	500	12.9	22.6	61.7	525
	700	13.8	43.1	48.7	613
	900	14.5	69.8	39.1	701
	1200	14.6	105.5	29.8	794
Ir	400	6.8	6.8	56.7	134
	800	7.2	15.1	—	143
	1300	7.8	—	—	160
Mg	400	26.1	5.6	168	1067
	500	27.0	7.2	164	1113
	700	28.9	12.1	130	1201

附 录

(续)

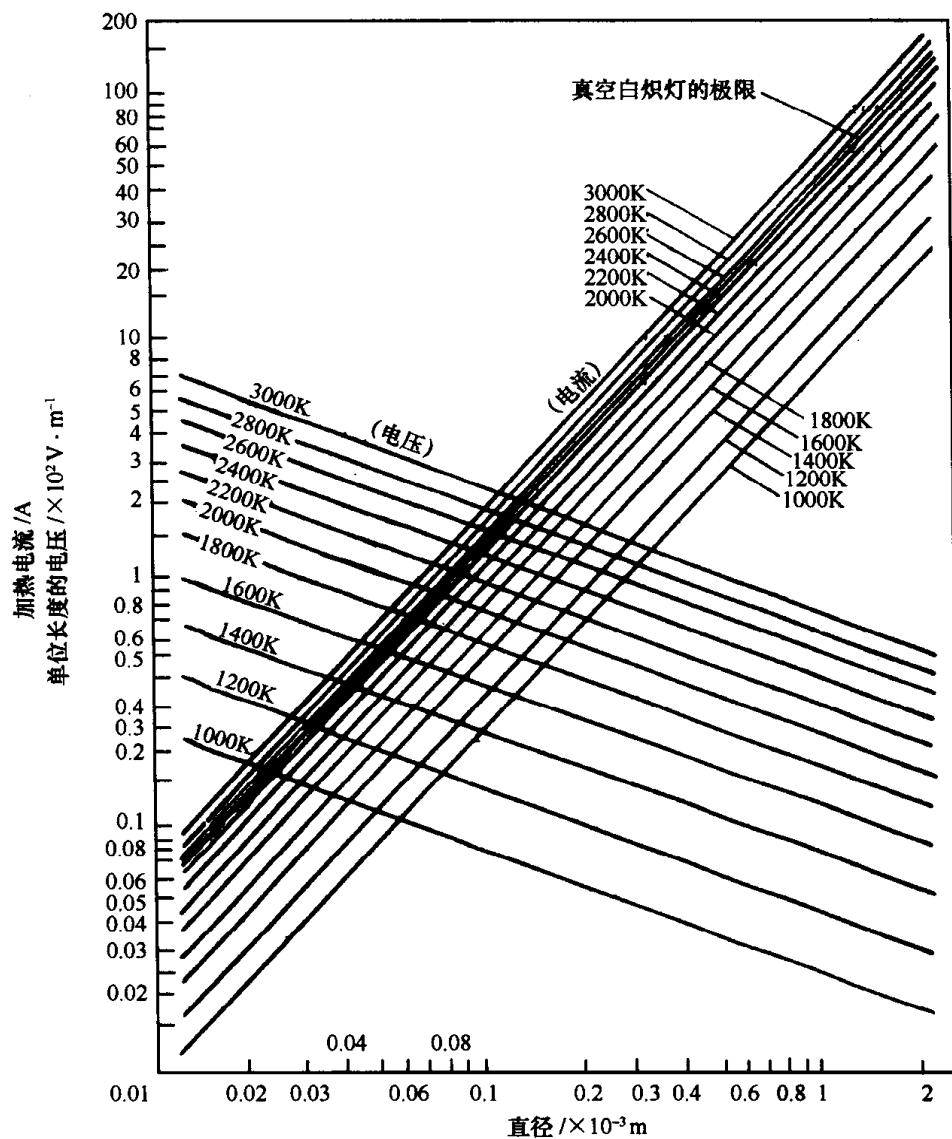
金 属	温 度 /K	线膨胀系数 $/\times 10^{-6}K^{-1}$	电 阻 率 $/\times 10^{-8}\Omega\cdot m$	热 导 率 $/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	比 热 容 $/J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$
Mo	400	5.2	7.6	139	260
	800	5.7	17.6	122	286
	1300	—	31	105	311
	1800	—	46	84	340
	2800	—	77	—	—
Ni	400	13.3	10.3	83.2	479
	500	13.9	15.8	73.5	529
	600	14.4	23.0	63.8	580
	700	14.8	30.6	59.6	521
	800	15.2	34.2	62.2	538
	1200	16.3	45.5	—	596
Pb	400	29.1	27.0	33.3	134
	500	30.0	36.0	31.6	134
	600	31.3	50.0	29.8	139
Pd	400	11.1	14.3	74.3	248
	800	12.4	27.5	—	269
	1300	13.6	40	—	298
Pt	400	9.1	13.6	72.2	134
	800	9.6	27.9	—	147
	1300	10.2	43.1	—	160
	1800	—	55.4	—	176
Re	400	124 \perp 轴	25	71.4	139
	2800	47 \parallel 轴	132	—	—
Rh	400	8.5	6.2	80.1	257
	800	9.8	14.6	—	296
	1300	10.8	—	—	331
Sb	400	8.4~11.0	61	16.8	214
	800	9.7~11.6	154	19.7	239
Sn	400	23.8	16.8	63.4	239
	500	24.2	23.0	60.5	260
Ta	400	6.5	17.2	54.2	143
	800	6.6	35	—	151
	1800	—	71	—	168
	2800	—	102	—	—
Ti	400	8.8	70	15.1	542
	500	9.1	88	14.7	571
	700	9.4	119	13.9	622
	900	9.7	152	13.4	—
	1100	9.9	165	(12.6)	—

(续)

金 属	温 度 /K	线膨胀系数 / $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	电 阻 率 / $\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	热 导 率 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	比 热 容 / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Tl	400	30	—	40.7	134
	500	—	—	42.0	143
W	400	4.5	7.2	160	139
	800	4.6	18	(122)	143
	1300	4.6	33	(105)	151
	2300	5.4	65	(122)	—
	3300	6.6	100	(151)	—
Zn	400	31	8.2	(110)	403
	500	33	11.0	(105)	416
	600	34	13.7	(101)	433
	700	—	16.5	(95.8)	445

注:括号中数据供参考

(二十四) 真空中加热电流、电压与钨丝直径的关系



(二十五) 热阴极材料的热电子发射电流密度

材 料	熔点 /K	Richardson 常数 A /A·cm ⁻² ·K ⁻²	功函 数 φ /V	热 电 子 发					
				温 度					
				900K	1000K	1100K	1200K	1300K	1400K
Ba	1002	60	2.11	7.4E-5 ^①	1.4E-3				
Ca	1112	60	2.24	1.4E-5	3.1E-4	4.0E-3			
Co	1768	41	4.41						
Cr	2130	48	4.6						
Cs	301.8	160	1.81	9.5E-3	0.12	0.99			
C		15	4.5						
Mo	2890	55	4.15						1.2E-7
Ni	1726	30	4.16						
Nb	2740	37	4.01						2.7E-7
Pd	1825	60	4.99						
Pt	2043	32	5.32						
Re	3453	200	5.1						
Si	1685	8	3.6					1.5E-7	1.7E-6
Ta	3250	60	4.12						1.7E-7
Th	2026	70	3.38				6.4E-7	9.3E-6	9.3E-5
W	3653	60	4.54						
Zr	2125	330	4.12						9.5E-7
BaO	2196								
CeO ₂		1	2.3	1.1E-7	2.6E-6	3.5E-5	3.2E-4	2.0E-3	1.0E-2
Cs ₂ O		0.1-0.01	0.75	0.5-5	2-20	4-40			
La ₂ O ₃		0.9	2.5		2.3E-7	3.8E-6	4.1E-5	3.1E-4	1.8E-3
ThO ₂	3323	3.0	2.54		4.7E-7	8.4E-6	9.3E-5	7.2E-4	4.2E-3
Y ₂ O ₃		1	2.4		8.0E-7	1.2E-5	1.2E-4	8.4E-4	4.5E-3
SiC	2973	64	3.5				1.8E-7	2.9E-6	3.2E-5
TaC		0.3	3.14					3.4E-7	2.9E-6
ThC ₂		550	3.5				1.6E-6	2.5E-5	2.7E-4
TiC		25	3.35				3.1E-7	4.3E-6	4.3E-5
ZrC		0.3	2.18	1.5E-7	3.1E-6	3.7E-5	3.0E-4	1.8E-3	8.3E-3
BaB ₆		16	3.5					7.3E-7	7.9E-6
CaB ₆		2.6	2.9			1.6E-7	2.5E-6	2.5E-5	1.9E-4
CeB ₆		3.6	2.6		2.8E-7	5.3E-6	6.2E-5	5.1E-4	3.1E-3
LaB ₆		29	2.7		7.1E-7	1.5E-5	1.9E-4	1.7E-3	1.1E-2
SrB ₆		0.14	2.7				9.2E-7	8.1E-6	5.2E-5
ThB ₆		0.5	2.9				4.8E-7	4.8E-6	3.6E-5
W/Ba		1.5	1.56	2.2E-3	2.1E-2	0.13	0.61	2.3	7.1
W/Cs		3.2	1.36	6.2E-2	0.45	2.3	8.9	29	8.0
W/Th		3.0	2.63		1.7E-7	3.2E-6	3.9E-5	3.2E-4	2.0E-3
W/Y		7.0	2.70		1.7E-7	3.6E-6	4.6E-5	4.0E-4	2.6E-3
W/Zr		5.0	3.14				4.7E-7	5.7E-6	4.9E-5
Mo/Th		1.5	2.59		1.3E-7	2.5E-5	2.9E-5	2.3E-4	1.4E-3
Ta/Th		1.5	2.52		3.0E-7	5.2E-6	5.6E-5	4.3E-4	2.5E-3
Ba/SrO		0.1-0.01	0.95	0.04-0.4	0.2-2	0.5-5	1-10	4-40	7-70
ThO ₂ -Zr-W								1.1E-3	5.2E-3
L-阴极						2.0E-2	0.95	4.8	17
BN-阴极				1.1E-3	4.6E-2				
(Ba·Sr·Ca)O				0.81	5.0				
浸渍阴极 BaO-W					0.33	1.7	5.1		

注:①7.4E-5 代表 7.4×10^{-5} , 余同

一、真空设计常用数据

材 料	射 电 流 密 度 $/A \cdot cm^{-2}$										
	1500K	1600K	1700K	1800K	1900K	2000K	2100K	2200K	2300K	2500K	2700K
Ba											
Ca											
Co	1.4E-7	1.3E-6	1.0E-5								
Cr		4.0E-7	3.2E-6	2.1E-5	1.1E-4	4.9E-4	1.9E-3				
Cs											
C		2.6E-7	2.0E-6	1.2E-5	6.3E-5	2.7E-4	1.0E-3	3.6E-3	1.1E-2	7.9E-2	0.44
Mo	1.4E-6	1.2E-5	7.9E-5	4.3E-4	1.9E-3	7.7E-3	2.7E-2	8.3E-2	0.23	1.5	7.2
Ni	7.1E-7	6.0E-6	4.0E-5								
Nb	2.8E-6	2.2E-5	1.4E-4	7.1E-4	3.1E-3	1.2E-2	3.9E-2	0.12	0.32	1.9	8.8
Pd		2.9E-8	2.8E-7	2.1E-6	1.3E-5						
Pt				1.3E-7	8.9E-7	5.0E-6	2.4E-5				
Re			4.4E-7	3.4E-6	2.1E-5	1.1E-4	5.1E-4	2.0E-3	7.1E-3	6.5E-2	0.44
Si	1.4E-5	9.4E-5	4.9E-4								
Ta	1.9E-6	1.6E-5	1.1E-4	5.7E-4	2.6E-3	9.9E-3	3.4E-2	0.11	0.30	1.9	8.9
Th	6.9E-4	4.0E-3	1.9E-2	7.8E-2	0.27	0.85					
W		7.7E-7	6.0E-6	3.8E-5	2.0E-4	8.7E-4	3.4E-3	1.2E-2	3.6E-2	0.26	1.5
Zr	1.1E-5	8.9E-5	5.8E-4	3.1E-3	1.4E-2	5.5E-2	0.19				
BaO											
CeO ₂	4.2E-2	0.15	0.44	1.2	2.9	6.4	13				
Cs ₂ O											
La ₂ O ₃	8.1E-3	3.0E-2	0.10	0.29	0.76	1.8	4.0	8.2			
ThO ₂	2.0E-2	7.7E-2	0.26	0.75	2.0	4.8	1.1	22	43	140	400
Y ₂ O ₃	1.9E-2	7.1E-2	0.22	0.62	1.6	3.6	7.7	15	29		
SiC	2.5E-4	1.5E-3	7.8E-3	3.2E-2	0.12	0.39	1.1	3.0	7.2	35	140
TaC	1.9E-5	9.9E-5	4.3E-4	1.6E-3	5.1E-3	1.5E-2	3.9E-2	9.3E-2	0.21	0.88	3.0
ThC ₂	2.2E-3	1.3E-2	6.7E-2	0.28	1.0	3.3	9.7	26	62	300	
TiC	3.1E-4	1.8E-3	8.5E-3	3.4E-2	0.12	0.36	1.0	2.6	6.0	28	100
ZrC	3.2E-2	0.10	0.30	0.77	1.8	3.9	7.8	15	27	76	190
BaB ₆	6.3E-5	3.9E-4	1.9E-3	8.2E-3	3.0E-2	9.7E-2	0.28	0.74	1.8	8.8	34
CaB ₆	1.1E-3	4.9E-3	1.9E-2	6.4E-2	0.19	0.51	1.3	2.9	6.1	23	73
CeB ₆	1.5E-2	6.0E-2	0.20	0.61	1.6	4.0	9.1	19	38	130	
LaB ₆	5.5E-2	0.23	0.83	2.6	7.2	18	42	92	190		
SrB ₆	2.7E-4	1.1E-3	4.0E-3	1.2E-2	3.4E-2	8.8E-2	0.20	0.44	0.90	3.2	9.3
ThB ₆	2.0E-4	9.4E-4	3.6E-3	1.2E-2	3.7E-2	9.8E-2	0.24	0.55	1.2	4.5	14
W/Ba	19	47									
W/Cs											
W/Th	9.8E-3	4.0E-2	0.14	0.42	1.1	2.8	6.5	14			
W/Y	1.3E-2	5.6E-2	0.20	0.62	1.7	4.4	10	22			
W/Zr	3.2E-4	1.6E-3	7.1E-3	2.6E-2	8.5E-2	0.24	0.64	1.6	3.5	15	50
Mo/Th	6.7E-3	2.7E-2	9.1E-2	0.27	0.73	1.8	4.0	8.5	17	56	160
Ta/Th	1.2E-2	4.4E-2	0.15	0.43	1.1	2.7	5.9	12	24	78	220
Ba/SrO											
ThO ₂ -Zr-W	3.2E-2	0.16	0.88	3.2	6.8	17					
L-阴极											
BN-阴极											
(Ba·Sr·Ca)O											
漫渍阴极 BaO-W											

(二十六) 可伐的物理特性

标称组成: Ni:29; Co:17; Fe:余量

次要成分(最大质量百分数):

Mn:0.5; Si:0.20; C:0.06; Al:0.10; Mg:0.10

Zr:0.10; Ti:0.10; (Al+Mg+Zr+Ti):0.20

熔点: 1450℃(近似值)

密度: 8.36g/cm³

电阻率:

温 度/℃	25	100	200	400	600
电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	49	62.7	80.4	107.3	116.6

热导率: 16.53W/(m·K)(30℃); 20.30W/(m·K)(300℃)

比热容: 439.5J/(kg·K)(0℃); 648.8J/(kg·K)(430℃)

熔解热: $2.679 \times 10^5 \text{J/kg}$ 蒸气压: 10^{-3}Pa (1000℃)相转换点: $< -80^\circ\text{C}$ 热膨胀系数: $45.4 \times 10^{-7} \text{cm}/(\text{cm}\cdot\text{K}) \sim 50.8 \times 10^{-7} \text{cm}/(\text{cm}\cdot\text{K})$ (30℃~400℃)

磁特性:

磁通密度/T	0.05	0.2	0.7	1.2	1.7
磁导率/ $\times 10^{-3} \text{H}\cdot\text{m}^{-1}$	1.257	2.514	4.651	2.866	0.2677

居里点: 435℃(近似屈折点)

退过火的硬度(洛氏硬度): HR 82(最大)

冷加工后的硬度(洛氏硬度): HR 100(最大)

机械性能:

温度/℃	0.5%屈服强度/MPa	极限强度/MPa	抗断强度/MPa	均匀延伸率/%	总延伸率/%	面缩率/%
21	410.3	534.4	303.4	16.78	35.4	69.0
213	268.9	403.4	258.6	18.59	32.08	73.2
308	224.1	375.8	258.6	22.12	34.79	65.2
400	206.9	344.8	213.7	20.90	36.33	74.0
500	182.7	289.6	200.0	21.69	33.96	71.0
600	162.0	248.2	224.1	19.45	28.4	35.0
738	148.2	172.4	151.7	6.87	18.23	25.0
790	117.9	131.0	103.4	5.21	14.65	21.6

(二十七) 主要的薄膜制造方法

•		工作压力 /Pa	膜的生长速度 / $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	附着性	膜厚分布	绕射性能	形成膜举例	优点	缺点
真空蒸发	电阻加热	$<1 \times 10^{-2}$	约 10	差	良好	对着蒸发源的面	Al, Cu, Ag, Au, Cr	设备费便宜	高熔点金属难蒸发, 有杂质混入膜中
	高频	$<1 \times 10^{-2}$	1~5	同上	同上	同上	Al, Cu, Pb, Al-Si, Al-Cu	沉积速率高, 可大量装料	对基板的热辐射大, 有杂质混入膜中
	电子束	$<1 \times 10^{-2}$	0.2~0.5	同上	差	同上	Al, Mo, Si, SiO ₂ , SiO ₂ , Ge	可以蒸发高熔点材料	设备费用高, 电子, X射线损伤基板
	激光	$<1 \times 10^{-2}$	6×10^{10} ②	同上	差	同上	a-Si	沉积速率非常快, 杂质混入少	设备费用高, 设备操作困难
离子镀膜	直流	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$	0.01~0.2	很好	③	极好	Al	附着性好, 针孔少	
	空心阴极离子镀膜	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	约 1	同上	差	同上	TiN, CrN, TiC, CrC	可反应蒸发高熔点金属	操作有些困难
	常用的	约 1	0.01~0.2	良好	$\pm 5\%$ (阴极直径的 70%)	很好	Al, Cu, Cr, Au	设备简单	沉积速度低, 不能沉积绝缘物质, 放电不稳
溅射	直流	$1 \times 10^{-1} \sim 1$	0.01~0.2(金属) 0.002~0.2(绝缘物)	同上	$\pm 5\%$ (阴极直径的 70%)	好	金属 SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , TeO ₂ , BaTiO ₃ , 各种玻璃	可沉积绝缘体	沉积率低
	高频	$5 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	0.15~1.2(金属:DC) 0.02~0.15(绝缘物:RF)	同上	$\pm 5\%$ (阴极直径的 70%)	好	Al 合金膜, Mo, Ta, W, MoSi ₂ , W, WSi ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃	沉积速率高, 基板温升小	靶材使用效率低, 不适合磁性材料
	平面磁控	约 10^2	0.004	好	$\pm 5\%$ (7.62cm 圆片)	好	多晶 Si, Si ₃ N ₄	每批处理数量大	注意气系统的安全防护
化学气相沉积	减压	10~100	约 0.1	同上	$\pm 3\% \sim \pm 5\%$ (7.62cm 圆片)	同上	SiN _x , SiO _x , a-Si, SiC	可大面积均匀沉积	注意气系统的安全防护, 经常维修, 控制因素多
	等离子体	$10^4 \sim 10^5$	$8 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-1}$	很好	$\pm 2.5\% \sim \pm 5\%$ (5.08cm 圆片)	同上	GaAs, InP Ga _{1-x} Al _x As	沉积速率高	注意气系统的安全防护
	MOCVD①	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	$10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$	很好	$\pm 5\%$ (不转动) $\pm 0.5\%$ (转动) (5.08cm 圆片)	分子束触及的部分	同上	易控制膜厚和杂质	沉积率低, 需要超高真空

注: ①MOCVD—金属有机化学气相沉积; ②由 YAG 脉冲激光的结果[固体激光: 60ml/脉冲]; ③根据蒸发源形式(电阻加热、高频、电子束)而不同

(二十八) 常用蒸镀物质的性能

蒸发材料	熔点 /K	密度 $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	温 度 /K				蒸发源材料 坩埚
			蒸气压 10^{-6} Pa	蒸气压 10^{-4} Pa	蒸气压 10^{-2} Pa	蒸气压 1 Pa	
Ag	1234	10.5	820	890	957	1301	Al_2O_3
AgBr	705	6.2	—	—	约 653	—	石英
AgCl	728	5.6	—	—	约 793	—	石英
Al	933	2.7	950	1090	1283	1421	金属间化合物
AlF_3	—	2.9	683 升华 763		973	1032	—
AlN	—	3.3	—	升华	约 2023	—	—
Al_2O_3	2293	4.0	1318	1483	1648	2055	W
As	1087	5.7	380	423 升华 483		546	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}$
As_2Se_3	633	4.5	—	—	—	—	石英
Au	1335	19.3	1080	1220	1405	1676	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BN}$
B	2573	2.3	1551	1821 升华 2070		2409	C
B_4C	2623	2.5	2773	2853	2923	—	—
BN	2573	2.3	—	升华	约 1873	—	—
B_2O_3	733	2.5	—	—	873	—	—
Ba	998	3.5	818	900	1008	—	—
BaF_2	1553	4.9	—	—	约 973	—	—
BaO	2196	5.7	—	—	约 1473	—	—
Be	1551	1.9	983	1151	1273	1485	BeO, C
BeF_2	—	2.0	—	—	约 473	—	—
BeO	2803	3.0	—	—	约 2173	—	—
Bi	544	9.8	603	683	793	922	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}$
Bi_2O_3	1093	8.9	—	—	约 1673	—	—
Bi_2Se_3	983	6.8	—	—	—	—	石英
Bi_2Te_3	858	7.9	—	—	—	—	石英
Bi_2S_3	958	7.5	—	—	—	—	—
C	3923	1.8~2.3	1930 升华 2140		2410	2874	—
Ca	1115	1.5	545	630 升华 732		867	石英 Al_2O_3
CaF_2	1633	3.2	—	—	约 1273	—	石英
CaO	2853	3.3	—	—	约 1973	—	—
CaTiO_3	2248	4.1	1763	1873	1963	—	—
CaWO_4	—	6.1	—	—	—	—	—
Cd	594	8.6	337	393	453	538	石英 Al_2O_3
CdF_2	1373	6.6	—	—	773	—	—
CdO	1173	8.1	—	—	约 803	—	—
Cd_3As_2	994	6.2	—	—	—	—	石英
CdS	1678	4.8	—	—	升华 约 523	—	石英
CdSe	1537	5.8	—	—	813	—	石英
CdTe	1371	6.2	—	—	723	—	—
Ce	1068	6.8	1243	1423	1653	—	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BeO}$
CeF_3	1615	6.2	—	—	约 1173	—	—
CeO_2	2668	7.1	2163	2273	2583	—	—
Ce_2O_3	1965	6.9	—	—	—	—	—
Co	1768	8.9	1123	1263	1473	—	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BeO}$
CoO	2208	6.4	—	—	—	—	—
Cr	2163	7.2	1110 升华 1250		1430	1637	C

一、真空设计常用数据

蒸发源材料			电子束的 适用性	溅射方法 ^①	备 注	主要用途
线 圈	舟	篮				
W	Ta, Mo	W	优	DC RF	用所有蒸发源都易于蒸发	半导体接合、导电膜
—	Ta	—	—	RF		
—	Mo, Pt	Mo	—	—		半透明膜
W	Al ₂ O ₃ , BN	W	优	RF	与钨浸润、合金化容易	装饰膜, 反射膜
—	W, Ta	—	不适用	RF	很不稳定	集成电路、电容
—	—	—	可以	RF, RF-R	电子束场合、反应性蒸镀	
W	W	W	优	RF-R	适合电子束	电解质膜、绝缘膜
—	C	—	不适用	—	低温升华、有毒	
—	—	—	—	RF		
W	W, Mo	W	优	DC RF	膜软附着力差	半导体接合、元件电极
—	C	—	优	RF		扩散层
—	—	—	优	RF		
—	—	—	不适用	RF, RF-R	适合溅射	
—	—	—	良	—	和陶瓷反应	
W	W, Ta, Mo	W	可以	RF		
—	—	—	—	RF		
—	Pt	Pt	不适用	RF, RF-R		
W	W, Ta, Mo	W	优	—	氧化物有毒	半导体的触点
—	—	—	良	—	有毒	
—	—	W	良	RF, RF-R	粉有毒	
W	W, Ta, Mo	W	良	DC, RF	蒸气有毒	磁性膜、电阻膜
—	—	Pt	不适用	RF, RF-R	蒸气有毒	
—	—	—	良	RF		
—	W, Mo	—	—	RF		
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	—	用离子镀做较好	电阻膜、复制光栅用支持膜
W	W	W	不适用	—	在空气中腐蚀	
W, Mo, Ta	W, Mo, Ta	W, Mo, Ta	—	RF		光学膜
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	—	—	不适用	RF	适合溅射	
—	W	—	良	—		透明电导膜
—	W, Cb, Mc, Ta	W, Mo, Ta	不适用	DC, RF	有毒	电阻膜
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF-R	膜有导电性	导电膜
—	—	—	—	—		
—	Mo	W	可以	—	基板加热、膜附着好	红外线滤波器、光电膜
—	Mo, Ta	—	良	RF	蒸发容易	光学膜
W	W, Mo	Mo	—	RF	化学组成影响基板温度	光学膜
W	W	W	可	DC, RF		
—	W	Mo, Ta	良	RF	需要去气	
—	W	—	良	RF, RF-R	和耐火物蒸发源反应	防反射膜
—	W	—	可	—		
—	W, Cb	W	优	DC, RF	易与高熔点金属形成合金	磁性膜
—	—	—	—	—	适合化学蒸镀	
W(镀铬)	W(镀铬)	W(镀铬)	良	DC, RF	附着好、电子束时要扫描	装饰膜, 硬化膜

附 录

蒸发材料	熔点 /K	密度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	温 度 /K				蒸发源材料
			蒸气压 10^{-6} Pa	蒸气压 10^{-4} Pa	蒸气压 10^{-2} Pa	蒸气压 1Pa	坩 埚
CrB	3033	6.2	—	—	—	—	—
Cr ₃ C ₂	2163	6.7	—	—	约 2273	—	—
Cr ₂ O ₃	2708	5.2	—	—	约 2273	—	—
Cs	301	1.9	257	295	303	424	石英
CsBr	909	—	—	—	673	—	—
Cu	1356	8.9	1000	1130	1290	1537	Al ₂ O ₃ , BN
Cu ₂ O	1508	6.0	升华		约 873	—	Al ₂ O ₃
DY	1682	8.6	898 升华 1023		1173	—	—
DY ₂ O ₃	2523	7.8	—	—	—	—	—
Er	1770	9.1	923 升华 1048		1203	—	—
Er ₂ O ₃	2673	8.6	—	—	—	—	—
Eu	1095	5.2	553	633	753	881	Al ₂ O
EuF ₂	1653	6.5	—	—	约 1223	—	—
Fe	1808	7.9	1131	1271	1453	1698	Al ₂ O ₃ , BeO
FeO	1698	5.7	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	1838	5.2	—	—	—	—	—
FeS	1468	4.7	—	—	—	—	—
Ga	303	5.9	892	1020	1080	1315	Al ₂ O ₃ , BeO
GaAs	1511	5.3	—	—	—	—	C
GaN		6.1	—	—	约 473	—	Al ₂ O ₃
Ga ₂ O ₃	2173	5.9	—	—	—	—	—
GaP	1813	4.1	—	1043	1193	—	石英
GaSb	983	5.6	—	—	—	—	—
Gd	1585	7.3	1033	1173	1448	—	Al ₂ O ₃
Ge	1210	5.3	1085	1230	1440	1687	Al ₂ O ₃ 石英
Ge ₃ N ₄	—	5.2	—	—	—	—	—
GeO ₂	1359	6.2	—	—	约 898	—	Al ₂ O ₃ 石英
GeTe	—	—	—	—	—	—	Al ₂ O ₃
Hf	2503	13.3	2433	2523	3363	—	—
HfB ₂	3523	10.5	—	—	—	—	—
HfC	4163	12.2	升华		约 2873	—	—
HfN	3125	13.8	—	—	—	—	—
HfO ₂	3085	9.7	—	—	约 2773	—	—
HfSi ₂	2023	7.2	—	—	—	—	—
Ho	1743	8.8	923	1043	1223	—	—
HoF ₃	1416	—	—	—	约 1073	—	石英
Ho ₂ O ₃	2643	—	—	—	—	—	—
Hg	234	13.6	205	231	267	319	—
In	430	7.3	760	870	1015	1185	Al ₂ O ₃
InAs	1216	5.7	1053	1143	1243	—	—
In ₂ O ₃	1838	7.2	—	—	约 473	—	Al ₂ O ₃
InP	1331	4.8	—	903	1003	—	C
InSb	808	5.8	773	—	—	—	—

(续)

蒸发源材料			电子束的 适用性	溅射方法 ^①	备 注	主要用途
线 圈	舟	篮				
—	—	—	—	RF		
—	W	—	可以	DC-R	溅射电子束都要反应	硬化膜
—	W, Mo	W	良	RF-R		磁性膜
—	SuS	—	—	RF, RF-R		荧光屏
—	W	—	—	—		
W, Ta	W, Ta, Cb	W, Ta	优	DC, RF	用所有蒸发源都易于蒸发	装饰膜, 薄膜回路
—	Ta	—	良	—		
—	Ta	—	良	—		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	W	—	良	—		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	Ta	—	可以	—		
—	Mo	—	—	RF		
W	W	W	优	DC, RF	化学蒸镀 在 1530℃ 形成 Fe ₃ O ₄	磁性膜
—	—	—	不适用	RF, RF-R		红外线干涉膜
—	W	W	良	RF-R		
—	—	—	—	—		
—	—	—	良	—	适用电子束	
—	W, Ta	—	良	RF	瞬时蒸发、分解	太阳电池
—	—	—	—	RF, RF-R	在 10 ⁻¹ Pa 氮气中使之蒸发, 分解	
—	W	—	—	RF, RF-R		
—	W, Ta	W	优	RF	几乎不分解	发光二极管
—	W, Ta	—	可以	化学蒸镀		
—	Ta	—	优	RF		
—	W, C	—	优	DC, RF	应用于电子束	基板材料
—	—	—	—	RF-R	化学蒸镀	
—	Ta, Mo	W, Mo	良	RF-R		
—	W, Mo	W	—	RF		
—	—	—	良	DC, RF		
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	—	—	可以	RF, RF-R		
—	—	—	—	RF		
W	W	W	良	—		
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	—	—	—	—		
—	W, Mo	W	优	DC, RF	与 W, Cu 浸润	晶体三极管触点
—	W	—	—	RF	瞬时蒸镀	霍尔元件
—	W, Pt	W	不适用	RF, RF-R	电子束情况、用反应性蒸镀进行	电子管的透明电极
—	W, Ta	W, Ta	—	RF	瞬间蒸发	信号转换元件
—	W	—	—	RF		

附 录

蒸发材料	熔点 /K	密度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	温 度 /K				蒸发源材料
			蒸气压 10^{-6} Pa	蒸气压 10^{-4} Pa	蒸气压 10^{-2} Pa	蒸气压 1Pa	坩埚
In ₂ Se ₃	1163	5.7	—	—	—	—	—
Ir	2732	22.4	—	2353	2653	—	—
K	337	0.86	296	333	398	483	石英
KBr	1003	2.7	—	—	约 723	—	石英
KCl	1049	2.0	—	—	约 748	835	—
KF	1119	—	—	—	约 723	—	石英
La	1193	6.2	1263	1485	1661	1972	Al ₂ O ₃
La ₂ O ₃	2488	6.5	—	—	约 2273	—	—
Li	452	0.53	500	580	680	811	Al ₂ O ₃ , BeO
LiF	1143	2.6	1148	1293	1453	—	—
Lu	1925	9.8	升华		约 1573	—	Al ₂ O ₃
Mg	924	1.7	458	520	600	710	Al ₂ O ₃ , C
MgF ₂	1539	3.2	1363	1493	1813	—	Al ₂ O ₃ , C
MgO	3073	3.6	—	—	约 1873	—	Al ₂ O ₃ , C
Mn	1517	7.2~7.4	780	845	920	1247	Al ₂ O ₃ , BeO
MnO ₂	808	5.0	—	—	—	—	—
Mo	2883	10.2	1865	2095	2390	2797	—
MoB ₂	2373	7.1	—	—	—	—	—
Mo ₂ C	2960	8.9	—	—	—	—	—
MoO ₃	1068	4.7	—	—	约 953	—	Al ₂ O ₃
Na	370	0.97	347	397	465	562	石英
NaBr	1028	3.2	—	—	约 673	—	石英
NaCl	1074	2.2	948	1108	1287	—	石英
NaF	1261	2.6	1218	1353	1473	—	BeO
Nb	2741	8.6	2001	2250	2560	2980	—
NbB ₂	3323	7.0	—	—	—	—	—
NbC	4073	7.6	—	—	—	—	—
NbN	2846	8.4	—	—	—	—	—
Nb ₂ O ₅	1733	4.5	—	—	—	—	—
Nd	1297	7.0	1004	1144	1335	1618	Al ₂ O ₃
NdF ₃	1683	6.5	—	—	约 1173	—	Al ₂ O ₃
Nd ₂ O ₃	2173	7.2	—	—	—	—	—
Ni	1726	8.9	1200	1260	1535	—	Al ₂ O ₃ , BeO
NiO	2263	6.7	—	—	约 1743	—	—
Ni/Cr	1623	8.2	1120	1260	1490	—	Al ₂ O ₃ , BeO
Ni/Cr/Fe	1698	8.5	—	—	—	—	—
Ni/Fe	1668	8.7	1220	1320	1580	—	Al ₂ O ₃ , C
Ni/Fe/Mo	1683	8.9	—	—	—	—	—
Pb	601	11.3	615	700	770	995	Al ₂ O ₃
PbCl ₂	774	5.8	—	—	约 598	—	石英
PbF ₂	1128	8.2	—	—	约 673	—	Al ₂ O ₃
PbO	1163	9.5	—	—	约 823	—	Al ₂ O ₃
PbSnO ₃	1388	8.1	943	1053	1178	—	Al ₂ O ₃
PbSe	1338	8.1	—	—	—	—	Al ₂ O ₃

(续)

蒸发源材料			电子束的 适用性	溅射方法 ^①	备 注	主要用途
线 圈	舟	篮				
—	—	—	—	RF		
—	ThO ₂	—	可以	DC, RF		电阻膜
—	Mo	—	—	—		
—	Mo	—	—	—		
—	—	—	—	—		
—	—	—	—	RF		
—	Ta	—	优	RF		
—	—	—	良	—		
—	SUS, Ta	—	良	—	和空气强烈地反应	防反射膜
—	Ta, Mo, W	—	良	RF	要预先去气	
—	Ta	—	优	RF		
W	W, Mo, Ta, Nb	W	良	DC, RF	可以快速蒸发	
—	W, Mo, Ta	W	优	RF	和 W 反应、Mo 良好	防反射膜
—	W	W	良	RF, RF-R	在 10 ⁻¹ Pa 氧气中进行	保护膜
W	W, Ta, Mo	W	良	DC, RF	浸润高熔点金属	透明导电膜
—	W	W	不适用	RF-R		
—	—	—	优	DC, RF	用细线直接通电可能蒸发	多层集成电路
—	—	—	不适用	RF		
—	—	—	可以	RF		
—	Mo	Mo	—	—		电子计算机元件
—	SUS	—	—	—		
—	—	—	—	—		
—	Ta, W	—	不适用	—		
—	Mo, Ta, W	—	不适用	RF		半透明膜
—	W	—	优	DC, RF	易与 W 合金化	电介质膜
—	W	—	—	RF		
—	—	—	可以	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R	在 10 ⁻¹ Pa, 在 N ₂ 中蒸发	
—	W	W	—	RF, RF-R		
—	Ta	—	优	DC, RF		
—	Mo, W	Mo, Ta	良	—		
—	—	—	良	RF, RF-R		
W	W	W	—	DC, RF	与高熔点金属合金化	磁性膜 电阻膜
—	—	—	—	RF-R	化学蒸镀	信号变换元件
W	Al ₂ O ₃	W, Ta	优	DC, RF	用溅射、可附着上原样的金属	电阻膜
W	W	W	良	DC, RF		磁性膜
—	W	W	良	DC, RF		
—	—	—	良	DC, RF		
W	W, Ta, Mo	W, Ta	优	DC, RF	有毒、与高熔点金属不浸润	冷却元件基板
—	Pt	—	—	—		
—	W, Pt, Mo	—	—	RF		
—	—	—	—	反应性		电子管的光导电面
—	Pt	Pt	不适用	—		
—	W, Mo	W	—	RF	化学蒸镀	光导电膜

附 录

蒸发材料	熔点 /K	密度 $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	温 度 /K				蒸发源材料
			蒸气压 10^{-6} Pa	蒸气压 10^{-4} Pa	蒸气压 10^{-2} Pa	蒸气压 1 Pa	坩 埚
PbS	1387	7.5	— 升华		约 773	—	Al_2O_3
PbTe	1190	8.2	1053	1183	1323	—	Al_2O_3
Pd	1823	12.0	1115	1270	1465	1820	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BeO}$
PdO	1143	8.7	—	—	约 848	—	Al_2O_3
Po	527	9.4	390	443	517	616	石英
Pr	1204	6.8	1073	1223	1423	—	—
Pr_2O_3	2398	7.0	—	—	—	—	—
Pt	2042	21.5	1565	1765	2020	2322	C
PtO_2	723	10.2	—	—	—	—	—
Ra	973	5.0	519	593	689	832	—
Rb	312	1.5	270	310	384	443	石英
Re	3453	20.5	2201	2480	2844	3333	—
Rh	2239	12.4	1550	1745	1980	2303	C
S	388	2.0	286	292	330	377	石英
Sb	903	6.7	552	618	698	806	Al_2O_3
Sb_2O_3	929	5.2	—	—	约 573	—	Al_2O_3
Sc	1812	3.0	987 升华 1110		1275	1497	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BeO}$
Se	490	4.8	362	398	443	504	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}$
Si	1683	2.2	1265	1420	1610	—	BeO, C
SiC	2973	3.2	—	—	约 1273	—	—
Si_3N_4	—	3.4	—	—	约 1073	—	—
SiO	1975	2.1	升华		约 873	—	Ta
SiO_2	1883~1983	2.2~2.7	—	—	1123	—	Al_2O_3
Sm	1345	7.5	646	733	846	1001	Al_2O_3
Sm_2O_3	—	8.3	—	—	—	—	—
Sn	505	7.3	955	1080	1270	1521	Al_2O_3
SnO_2	1400	6.9	升华		约 873	—	Al_2O_3
SnS	1155	5.2	—	—	约 673	—	—
SnSe	1134	6.2	—	—	—	—	—
Sr	1042	2.6	512	582	676	806	C
SrF_2	1723	4.2	—	—	约 1273	—	Al_2O_3
Ta	3269	16.6	2233	2513	2863	3329	—
TaC	4153	13.9	—	—	约 2773	—	—
TaN	3633	16.3	—	—	—	—	—
Ta_2O_5	2073	8.2	1823	2053	2193	—	C
Tb	1630	8.3	1073	1223	1423	—	Al_2O_3
Tc	2473	11.5	1843	2073	2363	2760	—

(续)

蒸发源材料			电子束的 适用性	溅射方法 ^①	备 注	主要用途
线 圈	舟	篮				
—	W	W, Mo	—	RF	化学蒸镀	光导电膜 MOS 装置
—	Pt	—	—	RF	蒸气有毒	
W	W	W	优	DC, RF	和高熔点金属形成合金	
—	—	—	—	RF-R		
—	—	—	—	—		
—	—	—	—	—		
—	—	—	良	RF, RF-R		
W, Pt	W	—	优	DC, RF	用细线直接通电蒸发	二极管的阻挡层
—	—	—	—	RF-R		
—	—	—	—	—		
—	—	—	—	—		
—	—	—	—	DC, RF	用细线直接通电可能蒸发	
W	W	W	良	DC, RF		半透明膜
—	W	W	—	—		
Mo, Ta	Mo, Ta	Mo, Ta	不适用	RF	有毒、易蒸发	电阻膜
—	Pt, Al ₂ O ₃	Pt	良	RF-R	有毒	
—	Ta	—	优	RF		
W, Mo	W, Mo	W, Mo	良	RF	有毒, 污染真空系统	光电元件
—	W	—	优	DC, RF	和 W 形成合金	半导体用基板
—	—	—	—	RF	适合溅射	保护膜
—	—	—	—	RF, RF-R	化学蒸镀	钝化膜
W	Ta	W	优	RF, RF-R		保护膜 电介质膜
—	Ta	—	优	RF, RF-R	电子束时、用反应性蒸镀进行	绝缘膜 扩散掩膜
—	Ta	—	良	—		
—	—	—	—	RF, RF-R		
W	Mo, Ta	W	优	DC, RF	和 Mo 浸润	半导体低温管的栅极
W	W	W	优	RF, RF-R		透明电导膜
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF		半导体元件
W	W, Ta, Mo	W	良	—		
—	—	—	—	RF		
Ta	—	—	优	DC, RF	用细丝直接通电可以蒸发	钽电容器
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R	在 N ₂ 中反应蒸发	薄膜热敏电阻
W	Ta	W	良	RF, RF-R		混合集成电路
—	Ta	—	优	RF		
—	—	—	—	—		

附 录

蒸发材料	熔点 /K	密度 / $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	温 度 /K				蒸发源材料
			蒸气压 10^{-6} Pa	蒸气压 10^{-4} Pa	蒸气压 10^{-2} Pa	蒸气压 1Pa	坩埚
Te	725	6.3	—	480	550	649	Al_2O_3 石英
Th	1973	11.7	1703 升华 1933		2198	2469	—
ThO_2	3623	10.0	—	—	约 2373	—	—
Ti	1948	4.5	1340	1508	1726	2021	C, TiC
TiC	3413	4.9	—	—	约 2573	—	—
TiN	3203	5.2	—	—	—	—	—
TiO	2023	4.9	—	—	约 1573	—	C
TiO_2	2123	4.3	—	—	约 1273	—	—
Ti_2O_3	2403	4.6	—	—	—	—	—
Tl	575	11.9	553	633	743	881	Al_2O_3 石英
Tm	1818	9.3	734 升华 827		953	1121	Al_2O_3
U	1405	19.0	1405	1600	1855	2206	—
UO_2	2973	10.9	—	—	—	—	—
V	2163	5.9	1435	1605	1820	2133	—
VC	3083	5.8	—	—	约 2073	—	—
VN	2593	6.1	—	—	—	—	—
VO_2	2240	4.4	—	—	848	—	—
V_2O_5	963	3.4	—	升华	~773	—	石英
W	3683	19.3	2390	2680	3030	3502	—
W_2C	3133	15.7	1753	1993	2393	—	—
WO_3	1746	7.2	1393	1563	1733	—	—
Y	1768	4.3	1103	1246	1430	1678	Al_2O_3
Zn	692	7.1	400	450	523	618	Al_2O_3 石英
ZnF_2	1145	4.9	1063	1178	1308	—	石英
ZnO	2248	5.6	—	—	—	—	—
ZnSe	1799	5.4	—	933	—	—	石英
Zr	2125	6.5	1750	1975	2260	2662	—
ZrC	3813	6.7	—	—	约 2773	—	—
ZrN	3253	7.1	—	—	—	—	—
ZrO_2	2973	5.6	—	—	约 2473	—	—

注:①栏中符号意义如下:

RF—高频溅射;DC—直流溅射;(RF-R)—高频反应溅射

一、真空设计常用数据

(续)

蒸发源材料			电子束的 适用性	溅射方法 ^①	备 注	主要用途
线 圈	舟	篮				
W	W, Ta	W	不适用	RF	有毒、与高熔点金属浸润	光电膜
W	W, Ta, Mo	W		—	有毒	
—	—	—	良	RF, RF-R		
—	W, Ta	—	优	DC, RF	附着好	用多层半导体的电介质膜
—	—	—	可	RF, RF-R	和钛反应溅射蒸发成膜	保护膜
—	—	—	良	RF, RF-R	反应蒸镀	
—	Ta, W	—	良	RF	高介电常数	保护膜
—	W, Ta	W	可	RF, RF-R	易还原钽	光学膜
—	W	—	良	RF	不稳定	
—	W, Ta	W	不适用	—	有毒	
—	—	—	—	—		
W	W	W	良	—		
—	W	W	—	—		
W	W, Mo	W	优	DC, RF	和 Mo 浸润	
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	—	—	—	RF, RF-R		
—	—	—	—	—		电子计算机元件
W	—	—	良	RF, DC	易形成氧化物	二极管的阻挡层
—	C	—	优	RF		
—	W, Pt	—	良	RF		电子计算机元件
—	Ta	W	优	RF		
W	W, Ta	W	优	DC, RF	易蒸发	金属化纸、电容器电介质膜
—	Pt, Ta	—	—	RF-R		
—	—	—	—	RF, RF-R		半导体传感器
W, Mo	Ta, W, Mo	W	—	RF	为了去气, 缓慢地加热	光学用膜
—	W	—	优	RF, DC	浸润 W、稍微形成合金	电介质膜 干涉膜
—	—	—	—	RF		
—	—	—	—	RF, RF-R	在 N ₂ 气中反应蒸镀	
W	W	—	良	RF, RF-R		光学膜

(二十九) 薄膜制作技术在电子产品上的应用

领域	元 件	目 的	成 膜 材 料	成膜方法	应 用
电子管	摄像管	光电导面 透明电导膜 电极	SbS_3 , CdSe , Se-As-Te , ZnSe , PbO SnO_2 , In_2O_3 Cr , Cu(Au)	蒸镀 蒸镀, 溅射镀 蒸镀	电视摄像机
半导体和集成电路	个别半导体和半导体集成电路	电导体和电极 绝缘膜 晶片里面蒸镀 电极	Ni , Ag , Au-Ge , Ti-Ag-Au Al , Al-Si , Al-Si-Cu , Mo , MoSi_2 , WSi_2 Ti-Pt-Au , W-Au , Mo-Au , Cr-Cu-Au SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 Au , Ni , Ni-Au , Au-Si Cr-Ni , Cr-Ni-Au , Cr-Cu-Au , Ti-Au Pb-Sn , PbIn	蒸镀 蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀 溅射镀, CVD^{D} 干式电镀 蒸镀 蒸镀 蒸镀	计算机 收音机 电视 视频 音频 计算器 钟表
	混合集成电路	电导膜 电容 电阻	Cr-Cu , Cr-Au , Cr-Cu-Cr SiO , SiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , TiO_2 Ta , Ta_2N , Ta-Al-N , Ta-Si , Cr-SiO Ni-Cr , SnO_2 , Ti , Cr	蒸镀, 溅射镀 溅射镀, 蒸镀 蒸镀, 溅射镀	通信 海军通信机 钟表, 照相机 车用电子部件
显示	电发光	电极 透明电导膜 荧光体 绝缘膜	Al $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ ZnS , $\text{ZnS} + \text{ZnSe}$, $\text{ZnS} + \text{CdS}$ Y_2O_3 , SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3	蒸镀 蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀 溅射镀	各种显示盘
	等离子体显示管	电极 保护膜 绝缘膜	Cr-Cu-Cr MgO Al_2O_3 , SiO_2	蒸镀, 溅射镀 蒸镀 溅射镀	
	液晶	透明电导膜 被膜 电极 配向膜	$\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ SiO_2 Al SiO	蒸镀, 溅射镀 溅射镀 蒸镀 蒸镀	
	彩色显像管	传感器 电极 透明电导膜	WO_3 , MoO_3 , TiO_2 , V_2O_5 Au , Pt $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$	蒸镀, 溅射镀 蒸镀 蒸镀, 溅射镀	
	荧光显示管	电极 透明电导膜	Al $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$	蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀	
	发光二极管	电极	Au , AuGe , Al	蒸镀	
	约瑟夫逊器件	约瑟夫逊接合 绝缘膜 电极	$\text{PbO} + \text{In}_2\text{O}_3$, Pb , Nb , NbN , V_3Si SiO_2 , SiO $\text{Au} + \text{Pb} + \text{In}$ $\text{Pb} + \text{Au} + \text{Pb}$	蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀 蒸镀	超级计算机
传感器	磁泡	传感器(泡) 电极 绝缘膜	Fe-Ni Al-Cu SiO_2	蒸镀, 溅射镀 蒸镀 溅射镀	计算机存储器
	磁盘	传感器	Fe , CO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4	溅射镀, 蒸镀	计算机存储器

(续)

领域	元件	目的	成膜材料	成膜方法	应用
传感器	磁头	传感器 电导膜 绝缘膜	Ni-Fe Al, Mo-Au-Mo SiO ₂ , Al ₂ O ₃	蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀 溅射镀	计算机 视频
	磁带	传感器	CO, Ni, Fe	溅射镀, 蒸镀	盒式磁带、 录像带
	太阳电池	电池 透明电导膜 电极 防反射膜	a-Si In ₂ O ₃ + SnO ₂ Al, Ti-Ag SiO ₂ , SiO	等离子体-CVD 蒸镀, 溅射镀 蒸镀 蒸镀, 溅射镀	太阳能计算器
无源元件	光盘	反射膜	Al Bi	蒸镀, 溅射镀 蒸镀, 溅射镀	视频光盘 计算机存储器
	热磁头	发热电阻器 电极 耐磨损膜	Si-Ta, Ta ₂ N, NiCr, Ta-SiO ₂ Cr-Cu, NiCr-Au, Al SiC, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ -Ta ₂ O ₅	蒸镀, 溅射镀 蒸镀 溅射镀, 蒸镀	印像机
	电传	传感器 透明电导膜	Se, Te, CdS, ZnS a-Si In ₂ O ₃ + SnO ₂	蒸镀 等离子体, CVD 蒸镀, 溅射镀	硬拷贝
	金属膜电阻	电阻膜	NiCr, Sn, Sb, 金属陶瓷	蒸镀	电阻
	电容	电容	Al, Zn	蒸镀	电容
	表面弹性波 元件	电极	ZnO, CdS	蒸镀, 溅射镀	滤波器

注: ①CVD—化学气相沉积

(三十) 材料的摩擦因数

1. 滑动摩擦因数

材料	摩擦因数			
	静摩擦		动摩擦	
	无润滑剂	有润滑剂	无润滑剂	有润滑剂
钢—钢	0.15	0.1~0.12	0.15	0.05~0.10
钢—软钢			0.2	0.1~0.2
钢—铸铁	0.3		0.18	0.05~0.15
钢—青铜	0.15	0.1~0.15	0.15	0.1~0.15
软钢—铸铁	0.2		0.18	0.05~0.15
软钢—青铜	0.2		0.18	0.07~0.15

(续)

材 料	摩 擦 因 数			
	静 摩 擦		动 摩 擦	
	无润滑剂	有润滑剂	无润滑剂	有润滑剂
铸铁—铸铁		0.18	0.15	0.07~0.12
铸铁—青铜			0.15~0.2	0.07~0.15
青铜—青铜		0.1	0.2	0.07~0.1
软钢—榉木	0.6	0.12	0.4~0.6	0.1
软钢—榆木			0.25	
铸铁—榉木	0.65		0.3~0.5	0.2
铸铁—榆、杨木			0.4	0.1
青铜—榉木	0.6		0.3	
木材—木材	0.4~0.6	0.1	0.2~0.5	0.07~0.15
皮革(外)—榉木	0.6		0.3~0.5	
皮革(内)—榉木	0.4		0.3~0.4	
皮革—铸铁	0.3~0.5	0.15	0.6	0.15
橡皮—铸铁			0.8	0.5
麻绳—榉木	0.8		0.5	

2. 固体润滑材料的摩擦系数和磨损率

材 料 ^①	摩 擦 因 数			磨 损 率 ^②	
	大气中 (室温)	真空中 (室温)	真空中 (873K)	大气中(室温)	真空中
Cu(单晶)	1.5~6	20~110	—	—	—
Cu(多晶)	1~2	40	—	—	—
Au	1.0		—	—	—
Pb	0.7~1.0		—	—	—
Ni	0.9~1.25	6	—	—	—
Mo	0.6~1.0	9	—	—	—
W	0.25~0.5	4	—	—	—
石墨	0.12	0.30~0.35	0.22	—	—
MoS ₂	0.1	0.05	0.10	—	—
WS ₂	0.15	0.01~0.05	0.07	—	—
Cu + WS ₂ (22%)	0.18	0.01~ 0.025	0.28	7.8×10^{-7} mg/(N·m)	3×10^{-7} mg/(N·m) (室温, 873K)

(续)

材 料 ^①	摩 擦 因 数			磨 损 率 ^②	
	大气中 (室温)	真空中 (室温)	真空中 (873K)	大气中(室温)	真空中
Cu + WS ₂ (11%)石墨(10%)	0.08	0.005	0.16	2×10^{-7} mg/(N·m)	2×10^{-6} mg/(N·m) (室温, 873K)
Cu-Sn + WS ₂ (11%)石墨(10%)	0.06	0.005	0.04 (473K 以下)	3×10^{-8} mg/(N·m)	3×10^{-9} mg/(N·m) (473K 以下)
(MoS ₂ + WS ₂)40%-Cu-Ta	0.19	0.10	0.16 (1073K 以下)	1.6×10^{-12} m ³ /(N·m) ^③	
(MoS ₂ + WS ₂)80%-Cu-Ta	0.17	0.09	0.13 (1073K 以下)	1.5×10^{-11} m ³ /(N·m) ^③	
Cu + MoS ₂ (薄膜)	0.1~0.2	0.06~0.08	0.06~0.09	[60~120]	[400~6000] [60~600] (室温, 873K)
Au10μm(440℃不锈钢上)	—	0.10	—	—	—
Ag10μm(440℃不锈钢上)	—	0.07	—	—	—
Pb10μm(440℃不锈钢上)	—	0.09	—	—	—
在有机硅树脂上涂敷 MoS ₂ 薄膜 (5μm~7.5μm)	—	0.03	—	—	—
环氧树脂上涂敷 MoS ₂ 薄膜 (5μm~7.5μm)	—	0.025	—	—	—

注:①百分数为体积分数;
②载荷 20N,点接触;
③接触面压 0.0MPa;表中[]中的数据为寿命次数

(三十一) 镀铜、镍、金零件的烧氢温度

材 料	烧氢温度/℃	材 料	烧氢温度/℃
镀铜件:可伐	900~950	镀镍件:无氧铜	800~820
钼	850	可伐	850~900
不锈钢	800~850	钼	850
铁	900~950	钢	750~800
		镀金件:钼	600~650

(三十二) 表面分析装置的名称、代号及原理

代 号	名 称	
LEED	Low Energy Electron Diffraction	低能电子衍射
RHEED	Reflect High Energy Electron Diffraction	反射式高能电子衍射
EM	Electron Microscope	电子显微镜
TEM	Transmission Electron Microscope	透射电子显微镜
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描电子显微镜
STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	扫描透射电子显微镜
EPMA(XMA)	Electron Probe Micro Analysis(X-ray Micro Analysis)	电子探针(X射线)显微分析
AES	Auger Electron Spectroscopy	俄歇电子谱
SAM	Scanniny Auger Micro-probe	扫描俄歇微探针
ELS	Energy Loss Spectroscopy	能量损失谱
APS	Appearece Potential Spectroscopy	出现电势谱
ESD(EID)	Electron Stimulated(Impact)Desorption	电子诱导(激发)脱附
CL	Cathode ray Luminescence	阴极射线荧光
ISS	Ion Scattering Spectroscopy	离子散射谱
RBS	Rutherford Backscattering Spectroscopy	卢瑟福背散射谱
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy	二次离子质谱
IMMA	Ion Microprobe Mass Analysis	离子微探针质量分析
IEX(IXA)	Ion Excited X-ray Spectroscopy	离子激发 X 射线谱
SCANIIR	Surface Composition by Analysis of Neutral and Ion Impact Radiation	斯卡尼耳
INS	Ion Neutralization Spectroscopy	离子中和谱
XPS(ESCA)	X-ray Photoelectron Spectroscopy (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)	X 射线光电子谱
UPS	Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy	紫外光电子谱
LMA	Laser Micro Analysis	激光显微分析
FEM	Field Electron Microscope	场电子显微镜
FIM	Field Ion Microscope	场离子显微镜
XRFS	X-ray Fluorescence Spectroscopy	X 射线荧光谱
RAA	Radio Activation Analysis	活化分析
AEAPS	Auger Electron Appearance Potential Spectroscopy	俄歇电子出现电势谱
SXAPS	Scft X-ray Appearance Potential Spectroscopy	软 X 射线出现电势谱
EDXS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	能散 X 射线谱
EXAFS	Extended X-ray Absorption Fine Structure	广延 X 射线吸收精细结构
DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy	深能级发射谱
PAS	Photoacoustic Spectroscopy	光声谱

入 射 粒 子	检测粒子	原 理
电子(10eV~500eV)	散射电子	表面晶格二次散射
电子(数万电子伏特)	散射电子	薄层表面原子散射,斜照反射
电子(数十万电子伏特)	散射电子	薄层原子散射
电子(数吉电子伏特)	散射电子	薄层原子散射
电子(数万电子伏特)	二次电子 X 射线	用扫描进行表面观察
电子(数万电子伏特)	散射电子	用扫描透过散射
电子(数万电子伏特)	X 射线	用扫描观察表面
电子(数百电子伏特~数千电子伏特)	二次电子	由特征二次电子来确定未知元素
电子(1keV~10keV)	二次电子	扫描方式测量特征二次电子能量鉴别元素
电子(1eV~100eV)	散射电子	分析低能电子能量分布
电子(数百电子伏特~10keV)	X 射线→光电子	测定原子外层能级的激发临界电压值
电子(10eV~100eV)	离子,中性原子	电子轰击使吸附原子脱附,进行质量分析
电子(数万电子伏特)	光 谱	电子轰击激发荧光光谱
离子(100eV~数千电子伏特)	散射离子	测量一定散射角度下离子的能量
He ⁺ 、H ⁺ (数兆电子伏特)	背散射离子	背散射离子的强度、能量分布
离子(数百电子伏特~20keV)	溅射离子	溅射离子的质量分析
离子(数百电子伏特~20keV)	溅射离子	溅射离子的一~三维分布的测定
离子(数万电子伏特)	X 射线	离子激发 X 射线特性分析
离子、分子(数千电子伏特)	光 谱	溅射激发原子的发射光谱分析
离子(10eV)	电 子	二次电子的能量分析
特殊 X 射线	光 电 子	由光电子能量分布决定外层能级
紫外线	光 电 子	由光电子能量分布决定浅层能级
光子(激光)	光 谱	用激光照射加热测定发光光谱
	电 子	从针尖观察电子像
	离 子	从针尖观察离子像
X 射线	荧光 X 射线	由荧光 X 射线观察进行元素分析和状态分析
中子	γ 射线,质子	测量中子核反应,激发,化学分离、射线
电子(0.1keV~2keV)	俄歇电子	通过改变入射电子能量,测量发射俄歇电子阈电压值
电子(0.1keV~数千电子伏特)	特征 X 射线	通过改变入射电子能量,测量软 X 射线的阈电压值
X 射线(数千电子伏特~30keV)	电 子	用半导体检测器分析照射 X 射线能量
白色 X 射线(数十电子伏特~20keV)	散射 X 射线	特定元素吸收端近边吸收系数的变化
顺方向偏置脉冲电压	结 电 容	检测载流子使冷阱放出热量引起 P-N 结电容的变化量
光	声	测量由未发光再结合引起的声波强度

(三十三) 表面分析装置的性能和特点

名 称	分析面积	信 息 深 度	灵 敏 度 ^①	不能分析的元素
I.EED	约数百微米	约 1nm	10^{-2} ML	基本没有
RHEED	约 $0.5 \times 5\text{mm}^2$	1nm~数十纳米	10^{-2} ML	基本没有
SEM	$\phi 10^{-3}\text{mm} \sim \phi 0.3\text{mm}$	约 $1\mu\text{m}$	$10^{-4}\text{ML} \sim 10^{-2}\text{ML}$	—
EPMA(XMA)	$\phi 10^{-3}\text{mm} \sim \phi 0.3\text{mm}$	约 $1\mu\text{m}$	0.05%	H, He, Li, Be
AES	$\phi 0.1\text{mm} \sim \phi 1\text{mm}$	约 1nm	$10^{-3}\text{ML}, 0.01\% \sim 0.1\%$	H, He
SAM	$\phi 5 \times 10^{-4}\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$	约 1nm	0.1%~1%	H, He
APS	直径数毫米	1nm~5nm	10^{-1}ML	H, He
ESD(EID)	$\phi 1\text{mm}$	约 1nm	10^{-2}ML	—
ISS	约 0.1cm^2	0.3nm~数纳米	$10^{-1}\text{ML} \sim 10^{-4}\text{ML}$	H
RBS	直径约 1mm	约 $1\mu\text{m}$, 深度精度 约 15nm	$10^{17} \sim 10^{19}$ 原子数/ cm^3	H, He 重元素, 质量接近元素
IMMA·SIMS	$\phi 10^{-3}\text{mm} \sim \phi 1\text{mm}$	(几~几十) $\times 10^{-4}\mu\text{m}$	$10^{-5}\text{ML}, 10^{-9} \sim 10^{-6}$	基本没有(除入射原子)
IEX	直径约 1mm	约 $0.1\mu\text{m}$	10^{-15}kg	H, He, Li, Be
SCANIIR	$\phi 2\text{mm} \sim \phi 3\text{mm}$	ML 约 $1\mu\text{m}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	无(真空紫外辐射元素外)
XPS(ESCA)	$\phi 1\text{mm} \sim \phi 3\text{mm}$	0.5nm~2nm	$2 \times 10^{-3}\text{ML}$	H, He
UPS	约 10mm^2	约 3nm	$2 \times 10^{-3}\text{ML}$	所有元素
LMA	$\phi 10\mu\text{m} \sim \phi 200\mu\text{m}$	约 $100\mu\text{m}$	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$, 10^{-7}kg	卤素, 稀有气体, H, N, C, O, P, S
CL	$\phi 0.1\mu\text{m} \sim \phi 1\mu\text{m}$	约 $1\mu\text{m}$	约 10^{-6}	不发光元素
活化分析	—	—	约 $10^{-9}, 10^{-15}\text{kg}$	H, 稀有气体
XRFS	直径约 15mm	约 $10\mu\text{m}$	约 10^{-5}	基本在 Na 以下
EXAFS	直径约数毫米	数微米	—	—
EDX	直径约 $1\mu\text{m}$	$0.3\mu\text{m} \sim$ 数微米	0.1% 以上	H, He, Li, Be
DLTS	—	—	捕集浓度 $\geq 10^{13}\text{cm}^{-3}$	—
PAS	直径约数微米	约 $1\mu\text{m}$ 也可分析表面吸附层	—	—

注: ①ML——单原子层

深度分析	可 得 信 息	特 点
否	表面原子、吸附原子的对称性、原子振动	洁净结晶表面结构, 吸附原子的排列和动力学, 不能鉴别元素, 鉴别元素时可使用 LEED-AES 仪器
否	表面原子、吸附原子的对称性, 原子间距	表面原子排列, 表面元素化合物情况
可	表面形貌, 元素分布	
否	表面形貌, 元素分布	对轻元素, 定量分析灵敏度极低, 对微米以下的表层分析, 实际有较大困难
可	表面成分分析	轻元素的灵敏度很高, 对重元素, 灵敏度较低
可	表面元素分布, 三维元素分布	在小于微米的分辨率下可获得表面元素分布, 与离子枪结合可进行三维分析
可	成分分析(外层排列)	装置简单, 有化学位移, 灵敏度不太高
否	测定吸附物, 吸附势能, 吸附状态	目的是吸附物质, 可得到吸附键的几何结构、荷电状况等
可	表面吸附(ML), 元素测定	表面第一层上元素的排列结构, 质量分辨率不高
可	成分分析, 定量深度分析	元素的定性、定量、深度分析等的测定是破坏性的, 不能进行二维分析、装置大
可	成分分析, 表面元素分布, 表面像, H-U	容易进行元素的面分布、深度分布分析、能测全部元素, 灵敏度高
可	成分分析	没有连续 X 射线重叠, 信噪比高
可	成分分析	用少量试样较好
可	成分分析, 化学态	用测定化学位移的方法确定元素的化学态, 灵敏度不太高
可	价带结构, 振动状态	可得价带结构情况, 不能进行成分分析, 对表面态敏感
否	成分分析	可在大气中分析, 对轻元素灵敏度较高, 破坏性大
否	由外形, 光谱结构及其引起的波长变化	仅适用于发光物质
否	成分分析	灵敏度高, 但放射化合物杂质会影响灵敏度, 使灵敏度相差很大
否	成分分析, 结合状态	
否	特定元素周围原子间距、结合状态	单晶, α -Si, α -Ge 等的结构分析, SOR 光等的白色光不可分析
可	由 X 射线强度的能量分布进行成分分析	作为 EPMA 手段
否	捕获能级, 密度, 捕获面积	杂质, 晶体缺陷的同时确定
否	带隙、杂质能级、晶体缺陷	结晶态、离子注入损伤的评价, 发光元素的特性

(三十四) 蒸气流泵对不同种类气体的理论抽速

气 体	H ₂	He	H ₂ O	Ne	空气 N ₂ 、Co	O ₂	Ar	CO ₂	Kr	Xe
相对分子量	2	4	18	20.2	28	32	40	44	83.8	131.3
$\bar{v}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (300K 时)	1693	1208	565	534.5	454	425	380	362	262.4	209.6
\bar{v}/\bar{v}_{N_2}	3.73	2.67	1.24	1.18	1	0.94	0.84	0.80	0.58	0.46
S/A	201.1	170.14	104.4	100.3	95.86	83.95	76.77	73.82	53.36	45.83
$\frac{S}{S_{N_2}}$	2.1	1.78	1.1	105.1	1	0.88	0.80	0.77	0.56	0.48

注:①蒸气流泵或低温吸附泵、离子泵、涡轮分子泵等对不同种类的被抽气体具有不同的抽气速率。这是由于这些气体要被抽除时,必须先通过气体分子扩散运动到达上述泵的抽气面(口),不同气体分子的平均速率不同,造成了泵的抽速的差异,这个差异有时是很大的,在真空系统选取及配备主泵时,必须考虑这一因素。

②表中值是根据扩散泵抽速的理论公式得出的计算结果。

$$S = \frac{\bar{v}}{4} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}}{u} \right)} A$$

S——扩散泵名义抽速[m³/s]; \bar{v} ——被抽气体分子平均速率[m/s]; u——喷射蒸气分子的平均速率, u 通常取 400m/s; A——喷气流的截面积[m²]。

③计算指出:蒸气流泵对相对分子量小的气体抽速大,对相对分子量大的气体抽速小。通常产品给出的抽速是指对空气或 N₂ 的抽速。对低温泵、分子泵、离子泵、吸附泵等高真空、超高真空抽气泵而言,它们的抽速也与被抽气体分子的平均速率有关。对氮气的抽速 S_{N₂} 比应为

$$\frac{S}{S_{N_2}} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_{N_2}}$$

二、我国现有的真空标准

1. GB 913—66 泵分类及技术条件
2. GB 4844—84 氮气
3. GB 4845—84 氮气验收方法
4. GB 4982—85 夹紧型真空快卸法兰
5. GB 4983—85 拧紧型真空快卸法兰
6. GB 6071.1—85 超高真空法兰结构型式
7. GB 6071.2—85 超高真空法兰尺寸
8. GB 6071.3—85 超高真空法兰用铜密封垫
9. GB 6306.1—86 变容真空泵抽气速率(体积流率)测试方法
10. GB 6306.2—86 变容真空泵极限压力测试方法
11. GB 6306.3—86 变容真空泵消耗功率测试方法
12. GB 6306.4—86 变容真空泵工作温度测试方法
13. GB 6307.1—86 蒸气流真空泵抽气速率(体积流率)测试方法

- 14.GB 6307.2—86 蒸气流真空泵临界前级压力测试方法
- 15.GB 6308.1—86 橡胶密封真空规管接头
- 16.GB 6308.2—86 金属密封真空规管接头
- 17.GB 7772—87 变容真空泵噪声测量方法
- 18.GB 7773—87 变容真空泵振动测量方法
- 19.GB 7774—87 涡轮分子泵 性能测试方法
- 20.GB 7775—87 蒸气流真空泵 加热时间和加热功率测试方法
- 21.GB 7776—87 蒸气流真空泵 泵液返流率测试方法
- 22.GB 9445—88 无损检测人员资格鉴定通则
- 23.GB 14174—93 大口径液氮容器
- 24.GB 16774—97 自增压式液氮生物容器
- 25.GB 18442—2001 低温绝热压力容器
- 26.GB/T 3163—93 真空技术术语
- 27.GB/T 3164—93 真空技术系统图用图形符号
- 28.GB/T 5458—97 液氮生物容器
- 29.GB/T 6070—95 真空法兰
- 30.GB/T 11164—99 真空镀膜设备通用技术条件
- 31.GB/T 12604—95 无损检测术语 泄漏检测
- 32.GB/T 13979—92 氮质谱检漏仪
- 33.GB/T 14211—93 机械密封试验方法
- 34.GB/T 15823—95 氮泄漏检验
- 35.GB/T 16709—96 真空技术 管路配件 装配尺寸
- 36.GB/T 16775—97 低温容器漏气速率测定方法
- 37.GB/T 18193—2000 真空技术 质谱检漏仪校准
- 38.GB/T 18443.1—2001 低温绝热压力容器试验方法 容积测量
- 39.GB/T 18443.2—2001 低温绝热压力容器试验方法 真空度测量
- 40.GB/T 18443.3—2001 低温绝热压力容器试验方法 漏率测量
- 41.GB/T 18443.4—2001 低温绝热压力容器试验方法 漏放气速率测量
- 42.GB/T 18443.5—2001 低温绝热压力容器试验方法 静态蒸发率测量
- 43.GJB 128A—97 半导体分立器件试验方法
- 44.GJB 360A—96 电子及电气元件试验方法
- 45.GJB 548A—96 微电子器件试验方法和程序
- 46.GJB 1808—93 真空计的校准方法 动态流量法
- 47.GJB 2709—96 有机材料低温气体渗透系数试验方法
- 48.GJB 2715—96 国防计量通用术语
- 49.GJB/J 3416—98 真空计(电参数)检定规程
- 50.JB/T 1246—97 滑阀真空泵
- 51.JB/T 2965—92 溅射离子泵 性能测试方法
- 52.JB/T 4077—91 高真空插板阀 型式与基本参数
- 53.JB/T 4078—91 高真空挡板阀 型式与基本参数

54. JB/T 4079—91 高真空蝶阀 型式与基本参数
55. JB/T 4080—91 高真空电磁阀 型式与基本参数
56. JB/T 4081—91 溅射离子泵 型式与基本参数
57. JB/T 4082—91 溅射离子泵 技术条件
58. JB/T 4083—91 真空电磁带充气阀 型式与基本参数
59. JB/T 5410—91 低真空电磁压差充气阀 型式与基本参数
60. JB/T 5971—92 单级多旋片式真空泵
61. JB/T 6446—92 真空阀门 技术条件
62. JB/T 6533—97 旋片真空泵
63. JB/T 6921—93 罗茨真空泵机组
64. JB/T 6922—93 真空蒸发镀膜设备
65. JB/T 6923—93 真空-加压浸渍设备
66. JB/T 7265—94 蒸气流真空泵
67. JB/T 7266—94 容积真空泵性能测量方法
68. JB/T 7673—95 真空设备型号编制方法
69. JB/T 7674—95 罗茨真空泵
70. JB/T 7675—95 往复真空泵
71. JB/T 8105.1—99 橡胶密封真空规管接头
72. JB/T 8105.2—99 金属密封真空规管接头
73. JB/T 8106—99 容积真空泵 噪声测量方法
74. JB/T 8107—99 容积真空泵 振动测量方法
75. JB/T 8472.1—96 蒸气流真空泵性能测定 第一部分:
抽气速率(体积流率)的测定
76. JB/T 8472.2—96 蒸气流真空泵性能测定 第二部分:
临界前级压力的测定
77. JB/T 8540—97 水蒸气喷射真空泵
78. JB/T 8944—99 单级旋片真空泵
79. JB/T 8945—99 真空溅射镀膜设备
80. JB/T 8946—99 真空离子镀膜设备
81. JB/T 9125—99 立式涡轮分子泵
82. JB/TQ 563—87 2X 型旋片真空泵质量分等
83. JB/TQ 564—87 滑阀真空泵质量分等
84. JB/TQ 565—87 真空阀门质量分等
85. JB/TQ 566—87 往复真空泵质量分等
86. JB/TQ 567—87 2XZ 型旋片真空泵质量分等
87. JB/TQ 568—87 罗茨真空泵质量分等
88. JB/TQ 569—87 油扩散泵质量分等
89. JB/TQ 570—87 油扩散喷射泵质量分等
90. JB/TQ 571—87 真空镀膜设备质量分等
91. JB/TQ 634—88 真空振动流动干燥设备系列参数

- 92.JB/TQ 635—88 真空振动流动干燥设备技术条件
- 93.JB/TQ 636—88 真空振动流动干燥机质量分等
- 94.JB/TQ 638—88 振动流化床干燥机质量分等
- 95.JB 1090—91 J型真空用橡胶密封圈型式及尺寸
- 96.JB 1091—91 JO型骨架型真空用橡胶密封圈型式及尺寸
- 97.JB 1092—91 O型真空用橡胶密封圈型式及尺寸
- 98.JB 1246—85 滑阀真空泵型式与参数
- 99.JB 1247—85 滑阀真空泵技术条件
- 100.JB 2569—81 溅射离子泵性能测试方法
- 101.JB 5278.1—91 铜丝密封可烘烤真空法兰 连接型式
- 102.JB 5278.2—91 铜丝密封可烘烤真空法兰 法兰结构尺寸
- 103.JB 5278.3—91 铜丝密封可烘烤真空法兰铜丝密封圈结构尺寸
- 104.ZBJ 78001—87 2XZ型直联旋片真空泵系列参数
- 105.ZBJ 78002—87 2XZ型直联旋片真空泵技术条件
- 106.ZBJ 78003—87 2X型旋片真空泵系列参数
- 107.ZBJ 78010—87 直筒式水冷挡板参数、技术条件、验收规则
- 108.ZBJ 78011.1—89 余摆线真空泵系列参数
- 109.ZBJ 78011.2—89 余摆线真空泵技术条件
- 110.ZBY 117—83 热偶真空计技术条件
- 111.ZBY 153—83 电火花真空检漏器技术条件
- 112.ZBY 176—83 电离真空计型号命名方法
- 113.ZBY 227—84 热阴极电离真空计控制元件技术条件
- 114.ZBY 243—84 真空测量仪表通用技术条件
- 115.ZBY 248—84 电阻真空计技术条件
- 116.ZBY 285—84 冷阴极电离真空计技术条件
- 117.ZBY 286—84 冷阴极电离真空计规管技术条件
- 118.ZBY 287—84 真空蒸发镀膜设备技术条件、验收规则
- 119.ZBY 290—84 热阴极电离真空计规管技术条件
- 120.SY 1632—65 真空封蜡
- 121.SY 1633—75 真空封泥
- 122.SY 1634—70 真空机械泵油
- 123.SY 1635—66 真空增压泵油
- 124.SY 1636—66 真空扩散泵油
- 125.QJ 1322—87 真空中材料质量损失测试方法
- 126.QJ 1371—88 真空中材料可凝挥发物测试方法
- 127.QJ 1540—88 加压充氮一步快速检漏筛选法
- 128.QJ 1558—88 真空中材料挥发性能测试方法
- 129.QJ 1610—89 阀门气体泄漏率分级及其检测
- 130.QJ 1897—90 真空封口阀
- 131.QJ 1898—90 真空封口阀技术条件

- 132.QJ 1991—90 真空-紫外辐照材料质量损失测试方法
- 133.QJ 2040.1—91 标准漏孔的校准方法 绝对校准方法
- 134.QJ 2040.2—91 标准漏孔的校准方法 相对校准方法
- 135.QJ 2075—91 阀门液体压降试验方法
- 136.QJ 2194—91 有机材料气体渗透系数测试方法
- 137.QJ 2195—91 有机材料低温气体渗透系数测试方法
- 138.QJ 2196—91 高熔点氧化物气体渗透系数测试方法
- 139.QJ 2197—91 金属及其合金气体渗透系数测试方法
- 140.QJ 2213.1—92 继电器特种环境试验方法 超高真空冷焊试验
- 141.QJ 2475—93 低温容器通用技术条件
- 142.QJ 2651—94 真空封口接头
- 143.QJ 2667—94 真空用油脂饱和蒸气压测试方法
- 144.QJ 2675.1—94 低温容器性能试验方法 夹层真空度试验
- 145.QJ 2675.2—94 低温容器性能试验方法 放气速率试验
- 146.QJ 2675.3—94 低温容器性能试验方法 真空夹层漏率试验
- 147.QJ 2675.4—94 低温容器性能试验方法 日蒸发率试验
- 148.QJ 2676—94 吸附剂低温低压吸附性能试验方法
- 149.QJ 2693.1—94 空间材料出气速率测试方法 15℃~45℃出气速率
- 150.QJ 2693.2—94 空间材料出气速率测试方法 45℃~1000℃出气量和出气速率
- 151.QJ 2768—95 低温容器检修技术条件
- 152.QJ 2861—96 氮质谱检漏最小可检漏率的检验方法
- 153.QJ 2862—96 压力容器焊缝氮质谱吸枪罩盒检漏试验方法
- 154.QJ 2965—97 氟橡胶密封超高真空法兰规范
- 155.QJ 3088—99 正压标准漏孔校准方法
- 156.QJ 3089—99 氮质谱正压检漏方法
- 157.JJG(航天)33—99 气体活塞式压力计检定规程
- 158.JJG(航天)45—99 比对法校准真空计检定规程
- 159.JJG 793—92 标准漏孔检定规程

三、主要真空研究单位及生产厂家简介

1. 真空研究单位

(1) 兰州物理研究所

兰州物理研究所(五一〇研究所)建于1962年,位于甘肃省兰州市(邮编:730000)。该所原为中国科学院兰州物理研究所,主要从事真空科学技术专业研究,在真空获得、真空测量、真空检漏、质谱分析、表面分析、真空工艺、真空材料评价等领域的一些项目的研究成果达到或接近国际先进水平。该所曾作为中国真空测试基地和中国真空学会的挂靠单位,成为我国真空科学技术的学术带头单位。已故所长、中国科学院院士金建中教授是我国著名的真空技术专家,曾任中国真空学会第一任理事长,为创建中国真空学会及真空技术的发展做出了重要的贡献。

兰州物理研究所隶属于中国航天科技集团公司中国空间技术研究院,是一个应用技术与基础研究相结合的科研单位。该所技术力量雄厚,专业配置齐全,具有一批国际先进的现代化实验设备和生产设备,现有 700 多名职工,其中有研究员 38 人,副研究员及高级工程师 100 余人,工程师 200 余人。设有真空技术与物理、低温技术、空间电子学技术、电推进技术、表面工程技术、真空工程、星船电源技术、空间微重力技术、空间机械润滑技术、真空低温检测、真空计量学、航天产品环境试验等 12 个研究室和航天压力容器制造中心及低温站。建有两个国家级实验室和两个国家级检测中心。“真空低温技术与物理”国家实验室从事极高真空技术、空间环境与材料相互作用及防护技术、空间制冷技术的研究与开发工作;“表面工程技术”国家实验室从事表面改性技术、薄膜技术、涂镀层技术的研究与发展;国家低温容器质量监督检测中心开展低温容器、低温绝热材料、低温设备性能检测技术、检漏技术及危险气体监测技术等研究工作;国防科工委真空计量一级站负责国防系统的真空计量和量值传递工作,开展真空测量和真空计量标准设备的研制工作。该所已成为中国空间技术领域重要的科研试验基地之一。

兰州物理所设有真空物理理学硕士,低温工程工学硕士,电子、离子与真空物理理学博士学位授权点,电子、离子与真空物理博士后流动站。现已为国家培养硕士研究生 100 多名,博士生 10 多名,这些研究生已成为我国科技界的技术骨干。该所除了不断派出留学生、访问学者、客座科学家出国深造外,还与国外许多科研院所及大学建立了交流合作关系,经常邀请国外著名学者及该所出国留学和工作的人员进行学术交流。

兰州物理所 40 多年来为我国航天事业及国民经济建设解决了一批重大的科学技术难题,做出了重要的贡献。截至 2002 年 7 月,共取得各类成果 295 项,其中获国家自然科学奖 1 项,国家科技进步奖 15 项,国家发明奖 2 项,国防科工委科技进步奖 51 项,获部级科技进步奖 104 项,获全国科学大会奖 11 项,获省科学大会奖 28 项。研制的大型(KM4)卫星环境模拟试验设备获得国家科技进步一等奖;离子火箭发动机获国家科技进步一等奖;分子束外延设备获国家科技进步二等奖; 10^{-11}Pa 极高真空技术获国家科技进步二等奖;离子束加工机获国家科技进步二等奖;空间微重力材料加工试验及其卫星搭载重熔结晶获国家科技进步二等奖。

改革开放后的兰州物理研究所,继续坚持“预研立所”及“质量建所”的建所方针,“团结、勤奋、严谨、求实”的工作作风,正在向一流研究所的目标稳步前进,为我国的真空科学技术和航天事业的发展做出更大贡献!

(2) 沈阳真空技术研究所

沈阳真空技术研究所创建于 1958 年,位于辽宁省沈阳市沈河区万柳塘路 2 号(邮编:110042),是集科、工、贸一体的国家级专业真空技术行业所,是具有雄厚的科研开发和生产制造能力的现代化科技型企业。2000 年成功的通过了 ISO9001 国际质量体系认证。该所是我国真空行业的技术归口单位,目前是中国通用机械真空设备行业协会的理事长单位,中国真空学会副理事长单位,国家真空设备质量监督检验中心、全国真空技术委员会以及中国真空学会真空获得与测量专委会的挂靠单位。该所技术力量雄厚、设备齐全、工艺先进、科研成果丰富。现已开发出百余种、400 多个规格的各类真空设备,用于国防、航空航天、汽车、材料、建筑、液晶、电工、食品、医疗和国民经济诸多部门中。

该所的主要任务是:承担着国内外真空技术的科研、新产品的开发及真空工程成套项目的研制;协助有关部门编制真空设备专业技术发展规划;负责组织、制订和修订全国真空技术标准;负责归口真空设备情报统计工作;归口管理真空设备行业的产品质量检测、真空新产品定型试验与鉴定工作;负责中国真空学会真空获得专业委员会。

该所的主要产品有:

真空热处理设备:包括 VQG 系列高压气淬真空炉、VPG 系列加压气冷真空炉、VOG 系列真空油气淬火炉、真空多室连续淬火炉、VTF 系列真空加压回火真空炉、VAF 系列真空退火炉、正压真空对流退(回)火炉、正压真空对流淬火炉、下装料立式真空热处理炉、下装料退(回)火真空热处理炉、哈壳真空热处理炉、高尔夫球头专用热处理炉。

真空钎焊设备:包括 VQB 系列真空高温钎焊炉、VBF 系列真空铝钎焊炉。

真空烧结设备:包括 VPS 系列高真空正压烧结炉、VRSF 系列真空高温电阻烧结炉、VH-ISF 系列真空高温感应烧结炉、VHPS 系列真空热压烧结炉、连续真空烧结炉。

真空熔炼设备:包括 VIF 系列真空感应熔炼炉、VCF 系列真空自耗电极电弧炉、VSC 系列真空自耗电极电弧凝壳炉、VISF 系列冷坩埚真空感应凝壳炉。

电工产品用真空设备:包括 VPD 煤油气相干燥成套设备、VPI 真空压力浸渍成套设备、VRC 环氧树脂真空浇注成套设备、VHD 变压法真空干燥设备。

真空涂层设备:包括射频多靶磁控溅射镀膜设备、MAD 系列多弧离子镀膜机、ITO 透明导电玻璃真空镀膜生产线、多室连续磁控溅射镀膜生产线。

真空测量仪表:包括 VG1 绝对压力真空计、SO1 热偶真空计(数显)、电阻真空计、电离真空计。

专业真空元件及设备:三用球阀、挡板阀及其它各种真空阀门、真空脱泡、脱气装置,太阳能电池层压机,真空干燥设备。

2. 生产厂家

(1) 上海曙光机械制造厂

上海曙光机械制造厂建于 1957 年,位于上海陆家嘴金融开发区的浦东南路 2250 号(邮编:200127),经过 40 余年的艰苦创业,发展成为一家在国内外享有盛誉的真空应用设备专业工厂,技术力量雄厚,生产设备齐全,检测手段先进。

20 世纪 60—70 年代曾成功研制我国第一台高真空扩散泵、超高真空宇宙模拟试验装置和同步卫星试验装置、直径 2.2m 大型光学镀膜机、氢原子钟主体、大型深冷液氮储存容器、无油超高真空抽气机组和无油超高真空镀膜机等真空设备,为我国国防建设、尖端科学的发展和工业技术进步做出卓越的贡献。获国务院、中央军委、部委、市委办的嘉奖和表彰。

20 世纪 80 年代,经过产品结构改造,开发出光学镀膜机、装饰镀膜机、制镜镀膜机、卷绕镀膜机、磁控溅射镀膜机、离子镀膜机、真空扩散焊接炉、真空仪表等系列产品。

近几年企业以社会化、市场化、现代化的观念为指导,狠抓市场开拓、科技创新、全面质量管理、竞争机制建设等,加大了科技投入,建立了产品试验研究中心和产品计算机研究开发中心,产品开发全部采用 CAD 设计,加速了新产品技术发展。新研制的国内第一台 JCJ-D1200 大型磁控溅射卷绕镀膜机、CB-R 光盘镀膜机、大型全不锈钢卷绕镀膜机和 ZZ—1800K 新系列卷绕镀膜机,其功能、质量与自动化程度全面达到 20 世纪 90 年代水平。2001 年为适应市场需要,又推出新一代的 ZZ—2400 系列大型卷绕镀膜机和具有当代先进水平,全自动,能够远程控制的 ZZB—2500 卷绕镀膜机,以上 ZZ—2400 和 ZZB—2500 两项产品获得上海市高新技术成果转化项目证书,项目编号 20020168,项目等级:A 级。

目前产品已形成 28 个系列,100 余个品种,广泛应用于国民经济各个领域并大量出口到东南亚、中东、中美洲、非洲、澳大利亚、法国、韩国等 18 个国家和地区。

2. 兰州真空设备有限责任公司

兰州真空设备有限责任公司,创建于1956年,位于兰州市七里河区龚家坪北路29号(邮编:730050)。中国真空设备行业唯一拥有真空、压力、低温三位一体技术和大型真空设备设计制造的厂家。可为各行业提供质量优良的高真空蒸汽流泵、真空镀膜设备、真空炉、低温液体贮运设备及各类非标真空设备。高真空油扩散泵、油扩散喷射泵、卷绕系列镀膜与ITO磁控连续镀膜系列设备、真空炉系列设备、高真空多层超级绝热低温贮运设备等均居国内领先水平。已有39项产品荣获国家和部委、省级52种奖励,尤其是设计制造的真空炉系列设备曾先后荣获省、部委科技进步一等奖、国家科技进步二等奖。

真空获得设备:多种规格的K、KA、KT、KTD、KC系列高真空油扩散泵及其抽气机组、Z系列高真空油扩散喷射泵、ZK系列油增扩泵及其抽气机组、P系列水蒸气喷射泵,可设计制造各类专业真空抽气机组及真空抽气系统。油扩散泵及油扩散喷射泵的优良性能已成为国内公认的品牌产品。

真空镀膜系列设备:不同工作原理及用途的蒸发型、离子溅射型、磁控溅射型、多弧蒸发型的光学镀膜、表面装饰镀膜、包装材料镀膜、透明导电材料镀膜、耐磨材料镀膜等设备。

真空炉系列设备:ZR、GD、ZRL、ZRT、ZRC、RMJ系列真空热处理炉(真空淬火、退火、回火等)、高真空钎焊炉、真空烧结炉、真空提纯炉、真空脱气炉等。

真空非标专用设备:真空压力浸渍设备、真空冷冻干燥设备、真空预冷保鲜设备、真空气相烘干设备、真空扩散焊机及真空氩弧焊机、航空航天空间模拟装置等。

低温液体贮运容器:容积为 $0.05\text{m}^3 \sim 150\text{m}^3$,工作压力为 $0.2\text{MPa} \sim 3.5\text{MPa}$ 高真空多层超级绝热和粉末绝热的低温贮槽及低温液体运输车。

AR2、CR2级压力容器:多种非标一、二、三类压力容器及液化气体汽车罐车等。

兰州真空曾研制生产了我国第一台大型无油超高真空抽气机组,第一台超高真空电子束扩散焊机,第一台大型天文望远镜镀膜机,第一台低温液氢燃料称重计量容器,第一台计算机集群控制的中型和大型铝板翅式换热器真空钎焊设备,为航天、航空、航海等国防和科研领域提供各类空间模拟实验装置及低温液体贮运容器等军工产品。经过40多年的建设和发展,在真空设备制造领域已牢固树立起行业主导厂的地位。目前已形成6大类、40多个系列、300多个品种规格产品的设计制造能力。产品覆盖全国,并出口日本、韩国、德国、美国、意大利、印度、泰国、马来西亚等世界许多国家和地区。产品的设计水平、制造质量均属国内领先,相当部分已达国际先进水平。计算机CAD、CAPP、ERP的应用和完善,ISO9001、GJB9001A质量保证体系在公司的贯彻和实施,使兰州真空以其强大的技术实力,严格的质量保证,优良的售后服务,在国内外广大用户中建立了良好的信誉,积累了巨大的无形资产,赢得了广泛的市场信任度和知名度。

(3) 沈阳中科仪技术发展有限责任公司

沈阳中科仪技术发展有限责任公司创建于1958年,位于沈阳技术产业开发区,和平区三好街96号(邮编:110006)。公司前身是中国科学院沈阳科学仪器研制中心,公司现有员工300余人,其中科技人员120多人,研究员22人,高级工程师37人。资产7000万元,下设五个事业部,一个新产品开发部,一个生产部及职能管理部门。专业领域包括真空技术、微电子、材料科学、精密机械、电子光学、自动控制、计算机技术等,在真空仪器装置的研发方面培养了具有国内一流水平的技术开发、工程设计、安装调试和技术加工队伍,在机械加工、真空焊接、材料处理、真空装调等方面具有配套齐全的加工设备与工艺保证条件。

多年来,公司立足于跟踪国际先进水平,并致力于真空技术的发展和运用,先后研制成功了我国第一台多功能电子能谱仪、第一台分子束外延设备、第一台高能电子衍射仪等具有国内领先水平和我国自主知识产权的各类科学仪器和真空装置,有 30 多项填补了国内空白,其中分子束外延设备打破了“巴黎统筹委员会”对我国此类高科技仪器的禁运,显示了国产科学仪器的水平和我国的科技实力。1997 年研制成功的激光分子束外延设备,使我国成为世界上继美、日后第三个拥有这种新型设备与技术的国家。参加了北京正负电子对撞机、合肥同步辐射实验室、兰州重离子加速器等大型真空工程项目设备装置的研制任务,并完成了上海同步辐射装置前端区预研,先后完成了 9 个前端区、21 条光束线和 3 个实验台站项目。

公司在各种大型薄膜材料制备设备、表面分析仪器、纳米材料制备设备、各种真空应用设备、各种真空器件以及国家大型真空工程专用设备方面具有明显的技术、市场和质量优势,为国内外科研机构、大专院校和工业企业提供了大量的科学仪器与真空装置,并先后向日本、韩国、新加坡、朝鲜、香港、台湾等国家和地区出口。科研项目共获得国家、院、省部级科技进步奖 46 项,国家级新产品 34 项,专利 40 多项。

公司先后被国家计委、科委批准为分子束外延技术试验基地和多功能电子能谱仪生产基地,1996 年获得外贸部批准进出口自营权,1998 年被辽宁省批准为辽宁省精密仪器工程技术研究中心,1999 年通过 ISO9001 质量体系认证,2000 年被国家科技部批准组建国家真空仪器装置工程技术研究中心。

进入 21 世纪,公司将以用户至上的经营理念,创造一流产品,提供一流服务,借助于现代企业管理制度和新的运行机制,以执着追求、开拓创新的精神,把公司建成在真空领域具有持续创新能力与持续发展能力的高技术企业。

(4) 北京中科科仪技术发展有限责任公司

北京中科科仪技术发展有限责任公司是中国科学院开发型研究所转制改成现代公司制度的第一家单位,其前身是成立于 1958 年的中国科学院北京科学仪器厂。公司地处北京中关村海淀园腹地,紧邻北大、清华、中国科学院等单位。

公司产品涉及电子光学、离子光学、真空物理、真空设备、电子技术、计算机应用等专业技术领域。几十年雄厚的科研基础和创新实力,使公司在电子光学、离子光学和真空物理等工程技术领域的许多项目达到了国际先进水平。公司曾研制出我国第一台涡轮分子泵、第一台氦质谱检漏仪,并参与了北京正负电子对撞机和同步辐射加速器等大工程的设计和加工任务,多次获得国家和中国科学院科技进步成果奖。

真空获得类设备有 F 系列涡轮分子泵、FF 系列复合分子泵、溅射离子泵、CC 系列超高真空手动插板阀、CCD 系列超高真空电动插板阀、CCQ 系列超高真空气动插板阀、110 系列分子泵电源、K 系列分子泵电源、溅射离子泵电源等产品。近来又相继推出了通过省部级鉴定的新型分子泵、新型分子泵电源、插板阀等产品。

真空检漏类设备有 ZQJ 系列氦质谱检漏仪、充氮充氦氟油检漏平台、多工位高真空排气检漏台、KYKY-CH 系列氦充气回收检漏系统,其中氦质谱真空检漏仪处于国内领先地位,达到国际 20 世纪 90 年代初期水平。近几年来不断推陈出新,形成了两类共 16 个品种,适合各种工业应用,并且正在向小型化、高集成、智能化方向发展。

公司生产的真空产品广泛应用于国内科研院所、高校及航空、核能、信息、环保等行业。同时远销到欧亚等十多个国家和地区。

公司科技人员专业涉及物理、电子、机械、计算机应用、管理、经济、生物医学等,其中研究

员 3 人,副研究员、高级工程师 37 人,公司在 1998 年通过了 ISO9001 国际质量体系认证。2001 年中科科仪公司被授予中关村科技园区海淀园首批信誉免检企业。公司下设两个控股公司:北京中科科美真空技术公司和中科科仪计算机技术有限责任公司。

公司将本着:“为我中华,永远负责”的精神,坚持以科技进步推动经济发展,高度负责地从事经营活动,向用户提供高质量的产品和服务,将公司建设成在分析仪器、真空设备、医疗仪器和精密加工等领域具有持续创新和发展能力的高新技术企业。

(5) 北京北仪创新真空技术有限责任公司

北京北仪创新真空技术有限责任公司是北京仪器厂(集团)改制后成立的,创建于 1954 年,位于北京长安街的东端郎家园 11 号,中央商务区 CBD 中心位置,是我国最早从事真空技术与设备研制和生产的专业厂家。国内直联高速旋片泵、以铝代银制镜镀膜机、离子束刻蚀机等真空设备均由本公司率先研制完成。尤其是专用于毛泽东主席水晶棺镀膜的直径为 3800mm 的大型真空镀膜机就诞生在本公司,展现出较高的真空镀膜技术水平。

当今公司的三大类产品从低真空、高真空到超高真空共有 30 多个系列,160 多个品种。主要产品处于国际 20 世纪 90 年代水平,有多种产品填补了国内空白。拥有较强的技术实力。本公司独立研发并生产的直联式高速真空泵、罗茨泵、高真空油扩散泵,在北京地区是独此一家。与韩国的真空公司合资制造的具有国际水平的调整直联泵,特别是大抽速直联式真空泵填补了国内空白。在真空应用设备方面,光学多层全自动镀膜设备、通用磁控溅射实验室设备、多靶磁控 DC 和 RF 溅射系统等项目的技术水平处于国内领先水平。超高真空设备、多弧等离子镀膜设备、幕墙玻璃磁控溅射生产线、离子束辅助蒸发系统的技术水平均处于国内较高水平。在真空测量仪器仪表方面,实现了数字化、全自动测量控制,例如,智能型数字化真空复合计、智能型数字化真空压强控制仪等仪器得到了用户的广泛好评,产品出口到世界多个国家。

近年来,本公司与全国多所大专院校、科研院所进行了合作开发,例如,清华大学,北京理工大学,北京科技大学,北京地质大学,中科院的电子所、物理所、化学所等,掌握了国内真空行业的最新动态和技术。

本公司的产品广泛应用于航空航天、电子信息、光学、建筑装潢、纺织、电力能源、食品、冶金等行业。

(6) 北京七星华创电子股份有限公司

北京七星华创电子股份有限公司是由原北京建中机器厂等 6 家企业合并重组而成的高科技股份企业,坐落于北京中关村科技园电子城工业园内,现为中国电子工业专用设备协会理事长、中国真空学会副理事长单位,中国机械工程学会工业炉分会、中国热处理学会真空热处理技术专业委员会团体会员。在同行业中,首家通过具有美国 RAB、荷兰 RVA、日本 JAB、英国 UKAS 四国国际认证机构认可的 ISO9001:2000 质量体系认证。

该公司下设 6 家分公司和 4 家控股子公司,其中七星华创工业炉分公司、七星华创微电子设备分公司、七星华创质量流量计分公司在中国真空科技领域内享有良好的信誉和卓著的业绩,为中国真空科技的发展做出了突出的贡献。

北京七星华创工业炉分公司继承了原北京建中机器厂 40 多年研制真空工业加热设备的经验。自 1958 年制造出第一台冷壁式全金属真空钎焊炉以来,已为全国各电真空器件生产厂家及科研单位提供了近千台各种规格的真空钎焊炉、真空退火炉及真空排气设备。目前公司的产品有立式真空炉和卧式真空炉的系列产品,可对工件进行钎焊、退火、烧结、脱脂脱蜡脱

羟、高压气淬等工艺处理,应用领域已从电真空行业扩展到航空航天、船舶制造、冶金、磁性材料等各个方面。

北京七星华创微电子设备分公司由原北京建中机器厂微电子设备分公司改制组建而成。作为我国微电子专用设备的重点研制开发企业,原北京建中机器厂承担多项国家微电子重点工程及大型关键设备的攻关和研制工作,先后研制出我国第一台离子束注入机、第一台 CVD 和第一台干法刻蚀机等,公司已形成扩散炉、CVD、干法刻蚀、自动清洗 4 大系列产品,为国内 30 多条半导体生产线提供了成套设备。

北京七星华创质量流量计分公司是由原北京建中机器厂流量计分公司发展而成,自 1979 年开发出中国第一台气体质量流量控制器以来,又开发出 D07 系列质量流量控制器,在国内处于领先地位,在工业研究领域和真空领域(如真空离子镀膜、光学镀膜、ITO 镀膜等)得到广泛应用。质量流量控制器替代原用的浮子流量计与压电阀,大大提高了控制的精度和灵敏度,并可与计算机和 PLC 连接,易于实现系统控制的自动化,全面提升应用设备的性能和品质,得到用户的好评。

(7) 北京朗禾科技有限公司

北京朗禾科技有限公司,位于北京市丰台区(邮编:100073),是从事干式无油真空泵研制的专业企业。该公司聘请东北大学真空专业教授和核工业系统真空行业的专家做顾问,在无油真空技术的研制生产方面处于国内领先地位,并拥有多项自主知识产权。该公司生产的爪式转子无油真空泵和涡旋式无油真空泵,改变了我国对该类产品长期依靠进口的历史。生产的系列无油真空泵广泛应用于化工、石油、制药、电子、食品、航天航空、核工业等领域,解决了油封机械真空泵的油污染和抽可凝性气体、易燃易爆和含有放射性物质的难题。

该公司生产无油爪式真空泵和无油涡旋式真空泵共有 2 大类 6 个系列产品,产品性能稳定。为我国核燃料厂制造的气体传输泵,漏率达到 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,它是我国建国以来核工业系统第一台用于浓缩铀主机生产线上的国产设备。

无油爪式真空泵类主要有:PH 系列、H 系列、CC 传输系列。无油涡旋式真空泵类主要有:SH 系列、SP 系列、SPC 系列。

该公司真空产品主要用于获得负压环境,进行真空干燥、真空烧结、特气生产、刻蚀机、单晶炉、液晶生产、真空冶炼、化学气相沉积、物理气相沉积、减压蒸馏提纯、净化浓缩、真空分馏、真空回收等环境。

无油爪式真空泵可用于抽除可凝性气体、有毒气体、含有放射性物质气体。无油涡旋式真空泵主要部件采用复合高分子材料加工而成,可特别抽除腐蚀性气体。

该公司将以先进的技术和严格的管理,提高产品质量,并努力创新,为广大用户提供更好的产品。

(8) 上海真空泵厂

上海真空泵厂创建于 1934 年,位于上海外青松公路 3516 号(邮编:201709),是国内最早的真空设备制造厂。该厂主要从事设计制造各类真空获得和真空应用设备,拥有国外进口的加工中心和三维坐标测量仪以及各种先进加工设备,工艺装备完善,检测手段精良,1996 年率先在国内同行业中通过 ISO9001 国际质量体系认证。目前产品有 20 个系列,130 余种规格产品。真空泵的抽速范围从 0.5L/s 至 20000L/s ,能够满足低、中、高、超高真空等各类真空应用领域的需要。该厂生产的产品品种全,规格多,在同行业中处领先地位,其品牌获得国内外广大客户的认可。

在真空获得方面主要产品有:2XZ-B型、2XZ型、2X型、X-150型旋片真空泵;W型、WWY(无油)型往复真空泵;ZJ型、ZJB型、ZJB-A型罗茨真空泵;ZJL型气冷式罗茨真空泵;RP/RG型罗茨粗真空泵/罗茨鼓风机;4LG型干式真空泵;SZ型、2S型水环真空泵;L、2L、3L、LH型溅射离子泵;JZJX型罗茨旋片机组,JZJH型罗茨滑阀机组,JZJS型罗茨水环机组,JZJLS型气冷罗茨水环机组,JK型扩散泵机组,无油超高真空机组等。

在真空设备应用方面:主要产品有CP型、PL型超高真空排气台;ZS型光学镀膜机,ZZL蒸发镀膜机,ZZJ磁控溅射镀膜机,ZZW型幕墙、制镜镀膜机;ZL型高真空退火炉、高真空钎焊炉,CL型超高真空退火炉、超高真空钎焊炉,ZLW型无油超高真空退火炉、无油超高真空钎焊炉,以及各种专用的非标真空应用设备。

该厂的许多产品被广泛应用于高能加速器、航空航天工业、军工产品、环保型制冷工业、精细化工、制药工业、水利工程以及国家重点高科技建设项目,产品覆盖全国,并出口日本、韩国、美国、加拿大、澳大利亚、缅甸、泰国、马来西亚、香港等世界许多国家和地区。

(9) 上海阀门二厂

上海阀门二厂创建于1935年,已有60多年历史,位于上海市沪青平公路271弄90号(邮编:201105),是上海电气(集团)总公司所属真空阀门专业生产厂。

上海阀门二厂已于1999年通过ISO9001质量体系认证并取得了证书,是上海市先进企业、上海电气(集团)总公司文明单位,连续12年荣获上海市“重合同守信用单位”称号;是中国真空学会、中国通用机械真空设备行业协会的理事单位。

该厂技术力量雄厚,有专门从事阀门生产的技术工人,高级、中级技术人员,具有设计、试制、制造各种真空阀门的能力。产品注册商标中字母牌(ϕ),在市场和广大用户中深受好评。

该厂积几十年开发、生产真空阀门的经验,已经形成注册商标为字母牌(ϕ)的真空电磁阀、真空蝶阀、真空隔膜阀、真空挡板阀、真空球阀、真空微调阀、真空调节阀、超高真空插板阀、超高真空挡板阀等,驱动形式有手动、气动、电动及电磁动,阀门通径从0.8mm~1200mm共9大系列、42个品种、150多个规格的产品。阀门的漏气率从 $6.7 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \sim 1.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$,适用温度范围 $-30^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$,适用压力范围 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$,广泛应用于航天、电子、机械、医药、制冷、能源、环保、食品、科研等领域,在国内市场和广大用户中深受好评。同时,该厂设计生产通径为1200mm大型气动高真空蝶阀,通径为500mm的气动高真空插板阀,具有相当高的技术水平。该厂曾为国家重点工程提供了各类真空阀门产品,荣获李鹏总理签发的国务院重大科技项目一等奖证书,并多次获得国家经委优秀新产品奖和部、市、局级新产品和科技开发成果奖,在真空行业中享有较高的声誉。

(10) 上海万可姆高科技有限公司

上海万可姆高科技有限公司位于上海市浦东区居中家桥571号(邮编:200135),是专门从事真空阀门开发、生产的民营企业。在真空阀门行业内率先通过国际质量认证公司评审的ISO9001:2000版质量管理体系认证。

该公司的技术队伍由具有研制真空阀门丰富经验的高级工程师、教授组成。公司借鉴国内外真空阀门的优点,现已开发出手、气、电动的蝶阀、隔膜阀、挡板阀、电磁压差阀、电磁截止阀、球阀、翻板阀、针阀、真空安全阀等10多个系列几百个规格。其中电磁真空压差阀是防止机械泵返油而设计的一种省材、简单、轻巧、新颖的阀门;真空挡板阀驱动力小、高度低,能反顶大气,是最新颖产品;真空球阀是新开发的真空球阀,它改变了以往真空系统采用压力球阀的现状,该阀关闭扭矩小,可用较小的旋转气缸驱动,寿命长;当真空系统充气到规定压力时,真

空安全阀自动起跳、排气、卸压,用于加速器等系统充气保护。产品广泛地用于真空冶金、真空冷冻干燥机,照明电子排气系统,半导体行业、航天系统、中科院高科技领域的真空工程的设备中。除此之外,公司为溴化锂制冷机专门研制的低温阀门,由于技术性能良好,工作可靠,能够适应该机在恶劣的工况下运作,深受溴冷机制造厂商欢迎。

公司具有完善的检测手段,对出厂的阀门进行 100% 氮质谱检测;拥有十分先进的在线工况模拟测试系统,确保每件产品让顾客满意。

万可姆产品是吸收国外先进技术,经过全面改进采用新工艺、新材料,经验与创造性相结合的产物,荣获国家专利 6 项。产品日臻完美,声誉日隆。

(11) 上海惠丰石油化工公司

上海惠丰石油化工公司位于上海市番禺路 75 弄 1 号(邮编:200012),是专业研究、开发、生产各类高级特种润滑油、脂产品,以满足现代先进工业设备需要的民营企业。2001 年 8 月通过英国 SDS 国际质量认证公司评审的 ISO9001:2000 版质量论证体系。公司拥有一支从事研究、开发、生产的专业技术人员队伍,具有先进、齐全的检测仪器和一定规模的生产设施。

公司承担上海市 14 项重点工业科技会战项目——特种润滑油系列攻关项目,开发研制出 HFV-系列真空用油、HFM-金属加工油、HFA-压缩机油、HFR-冷冻机油、HFH-液压油、HFC-齿轮油等 8 个大类、100 多个品种。公司生产的真空设备油脂主要产品系列有:HFV-M 系列高真空油、HFV-A 系列高温高负荷真空油、HFV-系列真空泵油、HFV-Z 系列增压泵油、HFV-K 系列扩散泵油、HFV-FS 分子泵油、HFV-ZS 酯类真空泵油、HV-V-CZ 系列真空淬火油、HFV-MF 系列密封油、HFV-GS 真空脂系列。多种产品的质量达到和超过国外同类产品水平,被上海市科协推荐为“上海市优秀科技产品”。

惠丰油品品质优良、信誉可靠,销售网点布及全国,产品远销东南亚等国家,1999 年起被列入“上海市 500 家主导产品质量监控企业”,接受上海市技术监督局对产品的监控,并被上海市工商局评为“重合同,守信用”单位。

(12) 沈阳兰菱真空设备制造公司

沈阳兰菱真空设备制造公司位于沈阳市崇山东路鸭绿江街 51-3 号(邮编:110032)。公司是由沈阳兰菱真空设备厂改组成立的股份制企业,其前身是始建于 1958 年的沈阳真空机械三厂,是国内最早生产真空获得设备的厂家之一。公司拥有一支具有丰富经验的真空技术与设备技术骨干队伍。技术力量雄厚,各种配套设计手段齐全,产品全部采用计算机 CAD 辅助设计,公司拥有具备真空卫生条件的加工与总装车间,装配规范化,可排除各种污染源,可满足各种高精设备的装配调试要求,可承担各类真空设备的研制、开发和生产。

公司产品主要有真空获得设备:K、KT 系列高真空油扩散泵,Z 系列油增压泵,GFQ、GDQ 系列高真空阀门,SDB 系列水冷挡板及各种口径水冷挡板,DDCY 系列压差阀、充气阀。真空应用设备:ZZ 系列大型电阻蒸发式高真空镀膜机,多弧离子镀膜机,真空烧结炉,真空热处理炉等。

公司自主开发的高真空油扩散泵曾获得 1972 年全国真空行业评比第一名。具有油扩散泵铝合金喷嘴及蒸气导管旋压成型的先进工艺。公司生产的各种型号高真空油扩散泵及其机组是在原生产基础上改进的第二代新产品。新产品具有抽气速率大、能耗低的优点,比同类型老产品抽速提高 10%~15%,能耗降低 10%~15%。在真空应用设备方面,公司近年来生产的 ZZ 系列大型电阻蒸发式高真空镀膜机,获 1992 年度沈阳市工业新产品金星奖,1993 年度

辽宁省机械委科学技术进步一等奖。

为了适应我国加入 WTO 后迎来的挑战和机遇,公司将向超高真空技术领域发展。致力于真空设备的开发和应用,共创真空科学与技术发展的未来。

(13) 沈阳真空泵厂(有限公司)

沈阳真空泵厂(有限公司)位于辽宁省沈阳市皇姑区黄河南大街 68 号(邮编:110031),创建于 20 世纪 50 年代初,是目前国家专业生产真空泵及真空设备的骨干企业,并被指定为航空军品的配套单位。该厂技术力量雄厚、产品性能稳定、设备精良、检测手段齐全,产品销往全国 29 个省市、自治区及海外一些国家和地区,广泛地应用于工业、农业、国防、教学、科研、医疗等各行各业,在用户中具有良好的信誉。

企业主要生产 2X、2XZ 型旋片泵;W、WY 型往复泵;H、2H 型滑阀泵;ZJ、ZBK 型罗茨泵;SK 型水环泵;K、KT 型扩散泵;JK、JKT 型扩散泵真空机组;JLX 型罗茨旋片泵真空机组;JLS 型罗茨水环泵真空机组;HWZ-4 型无油真空泵;SDL-500 型多功能离子镀膜机;各种真空炉;GFQ 系列高真空气动翻板阀;DDCY 型电磁压差阀等 14 个规格 100 多个品种。

JLX 系列罗茨旋片泵真空机组是以罗茨泵为主泵,旋片泵为前级泵串联而成的。结构紧凑、操作方便。适用于抽出容器中含有少量可凝性气体的专用设备,它广泛应用于需要大抽速和高真空的各种真空系统中。

HWZ-4 型活塞式无油真空泵具有技术要求高,使用方便等特点,多用于半导体元件生产、食品保鲜与包装、医药生产工程以及化工石油等工业中,适用于抽除生产过程中产生的大量可凝性蒸气或有毒、易腐蚀气体。

SDL-500 型多功能离子镀膜机采用了电弧离子镀、磁控溅射离子镀以及磁控反应溅射离子镀等近年来得到迅速发展的先进的沉积技术。利用这种镀膜机实现薄膜沉积工艺,可以在各种不同的基材上制备出具有不同物理化学性能的性能膜层。

沈阳真空泵厂(有限公司)目前已研制出新型干式涡旋泵、干式螺杆泵、干式往复式活塞泵、真空冷冻干燥设备及干燥设备等新产品,以满足用户的大量需求。企业以市场为导向,用先进技术改造传统企业,围绕增加品种,改进工艺,提高效益和市场占有率,加速企业的技术改造,为确保企业产品优势的长盛不衰,依靠科学管理,先进技术,优质产品,全方位服务质量,发挥先导作用。

(14) 沈阳真龙真空设备技术有限公司

沈阳真龙真空设备技术有限公司创建于 1996 年,位于沈阳市沈河区十一纬路 119 号(邮编:110014),是研究、设计和制造真空设备的专业企业。R/D 资源雄厚,TQC 健全,已通过 ISO9001 质量体系认证,是中国真空学会、中国通用机械真空设备行业协会会员单位。

公司主导产品是真空获得设备。以扩散泵机组三大件(扩散泵、水冷挡板、主阀)为核心研制的真龙特色的扩散泵机组,具有极限压力低、抽速大、返油量低和高压力段工作稳定等特点。扩散泵增设油观察窗、注油和放油口。泵油控温过热保护装置和多个加热器并联组合,可不停机更换加热器。机组共有 JK、JKT、JKN、JKA、JKTN、JKN 6 个系列 52 个型号,主泵(扩散泵)最大口径 1200mm,抽速 53000L/s,配有 SDB 型水冷挡板(水或氟里昂两用);主阀采用 GDQ 型高真空气动挡板阀,便于自动控制。前级泵采用 2X 型旋片真空泵,H 型滑阀真空泵和 ZJP 罗茨真空泵组成的扩散泵、罗茨泵机组。

真龙真空的扩散泵机组,广泛用于电子、冶金、材料、生物、化工、空间技术等高科技领域、真空炉、真空镀膜机、真空冷冻干燥和空间模拟设备等。目前已有定点配套用户数十家。

(15) 甘肃腾飞真空泵制造有限公司

甘肃腾飞真空泵制造有限公司位于兰州市宁卧庄新技术开发区渭源路 15 号(邮编: 730000), 是油蒸气流真空泵及配套设备的专业化生产企业。公司由一批具有真空科技基础理论知识和实践经验的高级专业技术人员及熟练的技术工人组成。在充分调研国外同类典型真空泵的基础上, 总结国内相关产品的生产经验, 对油蒸气流真空泵的系列产品进行了全面的技术改造, 形成了具有特色的性能良好的真空泵系列产品。

公司主要的产品有 2 大类, 5 个系列产品。真空泵系列有低返油扩散泵(口径 $\phi 300\text{mm} \sim \phi 1200\text{mm}$)、油增扩泵(口径 $\phi 300\text{mm} \sim \phi 800\text{mm}$)、卧式油增压泵等(口径 $\phi 300\text{mm} \sim \phi 1000\text{mm}$), 其配套阀门为口径 $\phi 160\text{mm} \sim \phi 1200\text{mm}$ 高真空气动真空阀门。各种型号的油蒸气流泵的泵体上安装有油面显示装置、油温测量仪表、加油和放油口等, 可实现真空装置为抽气系统的自动控制。其中 WZ 型卧式油增压泵是国内用户替代进口进行技术改造的唯一产品; ZK 油增扩泵系列采用独特的内加热方式, 和同类产品相比, 其抽速范围宽、启动快、效率高。高真空气动阀门全部选用优质铝合金气缸, 配有接近开关上、下位显示, 性能好, 安全可靠。

(16) 山东淄博真空设备厂有限公司

淄博真空设备厂有限公司(原淄博真空设备厂)始建于 50 年代末, 是国家生产真空获得和真空应用设备的重点骨干企业; 国家大型二类企业; 中国通用机械协会常务理事、中国通用机械真空设备行业协会副理事长、干燥设备行业协会副理事长单位; 原机械部确定的首批科技进步示范试点企业; 全国 CAD 应用工程示范企业; 山东省高新技术企业。

公司生产“双山牌”真空获得、真空应用产品。主要有: SK、2SK、SKA、SKB、SZ、SZB、SY、2SY、LY、2LY 系列水环真空泵及压缩机, X、2X、XD、2XZ 系列旋片式真空泵, W、WL、WLW 系列往复式真空泵, ZJ、ZBK 系列罗茨真空泵, JZJ2S 系列罗茨水环真空机组, JZJ2X 系列罗茨旋片真空机组, GZP、GZS 系列真空干燥机及真空输送等各种类型的真空应用设备 50 多个系列, 近 600 个规格, 是山东省名牌产品。旋片式真空泵 1990 年获国优银奖。SK 系列水环真空泵被国家经贸委、国家计委、国家科工委列为第十三批节能推广产品。2SK 系列水环真空泵被国家经贸委评定为“八五”国家级重大优秀新产品。SKA 系列水环真空泵的各项性能指标已达到或超过 20 世纪 90 年代国际先进水平。WL 立式往复泵获国家级新产品奖。承担的“八五”国家重大装备技术攻关项目——氯乙烯回收水环压缩机研制项目 1997 年通过了由机械工业部重大装备司主持的技术鉴定, 各项技术指标达到了国际 20 世纪初先进水平, 被国家经贸委授予国家级新产品奖。GZP 系列耙式干燥机和 GZS 系列真空回转干燥机被中国通用机械干燥设备行业协会评定为全国真空干燥行业首批推荐产品。公司负责制订了耙式干燥机行业标准 JB/T10207-2000。1995 年以来设计开发生产了一大批综合技术性能指标居国内领先水平的新产品, 有 5 种产品获省、部科技进步奖, 使公司在行业中形成了产量高、技术进步快、企业发展后劲大 3 大优势。产品广泛应用于化工、轻工、建材、制药、冶金、石化、煤炭等行业。

公司积累了丰富的设计、制造经验, 具有完善的质量保证体系, 工艺装备、试验检测设备居国内同行业先进水平, 1990 年曾荣获机械电子部质量管理奖, 并于 1998 年通过了 ISO9001 质量体系认证; 采用计算机技术, 实施了 ERP(企业资源计划系统), CAD(计算机辅助设计), CAT(计算机辅助测试); 建立了集设计、制造、服务为一体的山东省真空技术应用产品开发中心; 为加快高新真空技术产品开发, 经山东省科技局批准成立了山东高科真空技术研究所。

(17) 浙江真空设备集团有限公司

浙江真空设备集团有限公司创建于1952年,位于浙江省台州市椒江区,是中国通用机械真空设备行业协会副理事长单位,浙江省政府认定的高新技术产品企业,公司依ISO9001国际标准建立内部质量管理体系并于1997年通过认证。公司生产的真空获得设备曾荣获浙江省“名牌产品”称号。

公司从事真空获得设备及真空应用设备研究生产历史悠久,技术力量雄厚,生产设施完备。公司技术研发中心已被认定为浙江省真空技术研究开发中心,设有真空产品试验室、计算机中心室和CAD室,被国家科技部认定为国家CAD示范企业。此外,公司设有长度、热工、化学和物理计量试验室,并有金工、装配、热处理、铸造、应用、电子仪器等6个制造分厂,拥有加工中心、数控龙门刨床等一批精密机床。

公司主要产品有滑阀式真空泵、罗茨真空泵、气冷式罗茨真空、液环真空泵、往复真空泵、旋片真空泵;各种真空抽气机组、真空阀门以及真空镀膜、真空冷冻干燥、真空吸尘、食品真空包装、真空浸渍等应用设备。其中,滑阀式真空泵在国内生产历史最早,品种规格最齐全,技术研究和产品质量处于国内领先地位。H-150型泵获得国家银质奖。近年研发成功H-150D、H-150E、H-70B、H-300A、2H-30A等代表目前国内水平的新产品并已推向市场。公司于20世纪80年代初开始研制罗茨真空泵,目前已形成抽速范围为30L/s~10000L/s系列产品,起点高、体积小,主要性能指标接近国外同类产品水平。气冷式直排大气罗茨真空泵是公司于20世纪80年代末在国内首先研制成功的又一新型罗茨泵,目前形成抽速从70L/s~3600L/s的产品系列,主要技术指标达到国外同类产品水平,在国内处于领先地位。在研究开发各类机电一体化真空系统领域中,公司具有丰富的经验,可根据用户的系统工艺要求进行开发设计,至今已成功开发出近200种成套机组,深受用户欢迎。

公司一直致力于技术开发工作,有22种产品填补国内空白,20余种产品和研究成果分别获得国家、部、省、市科技成果奖。公司围绕“立足真空获得,发展真空应用”的战略,力争在真空获得领域做得最好,并努力开发真空应用产品,满足广大顾客需要。

(18) 浙江台州星光真空设备制造有限公司

台州星光真空设备制造有限公司位于风景秀丽的东海之滨,椒江区东山工业区(邮编:318012)。公司全新的体制、全新的经营方法、一流的产品质量、一流的服务,令国内同行为之振奋。该公司拥有多名专门从事真空设备研制近20年的高级设计人员和高级工艺人员,技术力量雄厚,加工及检测设备齐全,生产的“椒星”牌系列真空泵及真空机组在国内较早推出外表无腻子、拆件油漆之真空泵。其优良的内在质量及漂亮的外观,可与进口产品相媲美,因而具有较高的性能价格比,受到用户的广泛好评。

公司开发的专利产品HGL-150、HG-150单级单缸滑阀真空泵,极限压力低、寿命长、噪声低、振动小、外型美观,受到用户的一致好评。该型泵属单缸结构,极大地方便检修,而振动却与双缸和三缸结构的泵相仿。2001年12月通过产品鉴定,并获得较高的评价,其综合性能指标处于国内领先水平,极限压力指标已处于国际领先水平。

公司生产的专利产品带溢流阀的ZJY型罗茨真空泵系列,具有极限压力低、零流量压缩比大、噪声低、不漏油、外形美观等特点,为广大用户所称道。公司生产的罗茨真空泵曾由兰州真空设备有限责任公司与进口的同类罗茨泵进行过详细的对比试验,其结果表明,各项技术指标均达到进口泵的水平,而噪声指标还优于进口泵水平。

作为真空设备基础件——真空泵及真空机组的生产企业,公司愿与真空界同仁共创真空

设备之世界一流产品。

(19) 杭州华达真空设备有限公司

杭州华达真空设备有限公司位于浙江省杭州市良渚安溪工业园区(邮编:310015),是从事研究、生产水蒸气喷射真空泵及各种射流喷射器的专业企业。

公司有雄厚的经济实力和强大的技术队伍,建有国内唯一的水蒸气喷射真空泵试验台,先后发明并拥有可调式喷嘴、强制膜喷淋式冷凝器、真空度智能化耦合控制等专利技术。

公司主要产品——PB型水蒸气喷射真空泵,有9个系列、200余种规格,其真空冶炼、真空除气、真空脱泡、真空浓缩、真空蒸馏等设备在金属冶炼、石油化工、医药农药、轻工食品等工业领域中得到广泛应用。

此外公司还生产真空烟叶回潮设备、真空芒硝结晶成套设备、真空食品冻干成套设备、真空除氧成套设备、高架位布置真空机组等。

公司经过20多年的技术开发和10多年的生产经营实践,以其“诚信”获得了全国用户的依赖和赞誉。

(20) 中山凯旋真空技术工程有限公司

中山凯旋真空技术工程有限公司位于广东省中山市横栏永丰工业区(邮编:528478),是广东省科委认定的高新技术企业,中矩高新实业股份有限公司(上市公司)的投股公司,广东省投资开发公司的参股企业,中国真空协会会员单位。

公司技术力量雄厚,设备齐全,拥有一批从事真空技术应用设备研制的中高级工程师技术人员和熟练技术工人,各种加工设备一应俱全。公司现已研制开发出多项国家级、省级重点新产品,并荣获多项科学技术进步奖。

公司主要的产品有:(1)电工行业专用真空成套设备:变压法真空干燥设备、真空热风循环干燥设备、干式变压器环氧树脂真空浇注设备、互感器环氧树脂真空浇注设备、干式变压器真空压力浸渍设备、高压电机专用真空浸渍设备、卷铁芯变压器真空退火炉、高压变压器线圈恒压装置、各种固化炉及烘箱、移动式真空抽气装置、电容器真空浸油设备、高压电容式套管真空干燥注油设备、其它电工工业用真空设备。(2)真空热处理炉:高真空钎焊炉、真空烧结炉、真空退火、真空加压气淬炉、真空高压气淬炉、双室真空气冷油淬炉、真空渗炭炉、离子氮化炉。(3)真空镀膜设备:真空蒸发镀膜机、真空磁控溅射镀膜机、木材真空干燥设备、真空包装机、真空油处理设备、真空冷冻保鲜设备。

(21) 广东佛山水泵厂有限公司

广东佛山水泵厂有限公司的前身是广东佛山水泵厂,始建于1954年,地处经济发达的华南珠江三角洲腹地——佛山市河滨路14号(邮编:528000),是全国水泵行业的重点骨干企业,自营进出口工贸企业。公司自1960年开始出口泵类产品,每年有大量的产品出口,产品远销欧美、澳洲、东南亚等地区。

公司设有真空泵研究所和产品开发中心,拥有大批高级、中级技术人员,具备近百个工作站的CAD设计网络,具有较强的产品开发研制能力,是国内最早生产大型液环真空泵的企业,目前可生产2BE1、CBF、SK、SKW、CBA、2BW、CDF等系列真空泵。公司主要生产液环真空泵、离心泵及变频供水等成套设备,产品质量达到国际先进水平,曾先后荣获国优、部优、省优产品称号。其中2BE1系列水环真空泵获国家优质产品金质奖;XA系列离心泵取得德国TUV质量认证;CBF系列水环真空泵被列入2000年国家级新产品。获广东省名牌产品称号。

公司具有金属切削、锻铆、铸造、热处理和模具制造等生产能力,拥有主要生产设备数百台

(套),具备符合国家二级计量标准的理化计量中心,建有符合 ISO 3555 标准的 B 级全自动闭式水泵试验台和全自动液环真空泵实验台等。从 20 世纪 90 年代开始筹建实施的企业资源管理系统(ERP),现已初见成效,使企业资源得到更合理配置,为企业的快捷决策提供动态、准确、及时的依据,增强了企业适应市场的快速反应能力。企业的综合经济效益指标多年名列全国水泵行业前茅。

(22) 航天集团西安向阳喷射技术有限责任公司

航天集团西安向阳喷射技术有限责任公司位于西安市东开发区(邮编:710043),隶属于中国航天机电集团公司天风科技转化研究中心,是从事水蒸气喷射真空泵及其应用技术与配套设备研制的企业。

公司技术力量较强,拥有低架式蒸气喷射真空泵、节能调节式蒸气喷射真空泵、多重变量蒸气喷射真空泵等 6 项国家专利技术。公司为用户提供科研设计、制造、成套与调试一体化服务。采用计算机优化计算与辅助设计,开发研制的产品种类有 330 个,生产近千台 1~6 级中小型水蒸气喷射真空泵,工作压力为 1Pa~50kPa,广泛应用于油脂、合成制药、化工、化肥、聚酯、食品、农药、天然色素、香脂香料、分子蒸馏、炼镁等工业生产。大中型真空泵及低架式真空泵已用于航天、冶金、食品冻干等领域。

公司可承担航天航空空间环境模拟装置,钢包真空精炼成套设备,蒸气喷射式脉动真空灭菌器,高、中、低架式蒸气喷射真空泵,蒸喷-水环真空泵机组,食品冷冻升华干燥装置,真空干燥及真空预冷设备,多功能真空制冷机等设备的研制。

公司研制的水蒸气真空泵产品能耗较国内同类产品低 20%~50%,真空泵与配套设备的综合性能在国内居领先地位,汽、水能耗指标与综合性能已达到国际先进水平。

(23) 株洲维格磁流体有限公司

株洲维格磁流体有限公司成立于 1998 年 3 月,位于湖南省株洲市高新技术开发区(天元区泰山路留学人员创业园内,邮编:412007),是目前国内较大的集研制、开发、生产、销售磁流体于一体的高新技术企业。中国磁流体专业委员会惟一企业会员单位;中国通用机械真空设备行业协会董事会员;全国真空标准化委员会委员单位。维格公司的磁流体技术已纳入国家科技部“863”计划项目,磁流体密封技术已于 2001 年列入湖南省“火炬计划”。该企业已通过国际 BS EN ISO9001:2000 质量体系认证和中国 GB9001:2000 质量管理体系认证。

公司现拥有磁流体真空传动密封装置、高压密封装置、磁流体密封圈高精度真空零部件、磁阻尼器、扬声器专用磁液等多项专利。公司磁流体技术指标目前已达到或超过国际先进水平,可设计生产轴径 4mm~200mm 的磁流体密封件,真空度达 10^{-6} Pa,泄漏率达 5×10^{-12} Pa·m³/s,最大耐压可达 0.2MPa 及不同转速的密封要求。

产品广泛用于罗茨真空泵、单晶炉、镀膜机、真空钎焊炉、离子注入机、真空扩散炉、真空烧结炉、真空过滤机组、真空泵等真空设备上,还应用于航天、电子、遥控、能源、冶金、机械、采矿、军事设备、仪表、环保、医疗、卫生、机动车船等装置的动、静密封,能有效地防止气、油、酸、碱、盐及有机熔剂等多种化工介质的跑、冒、滴、漏现象。公司可为所有在用设备的动密封进行技术升级已与国内外众多真空知名企业进行了成功合作,得到了广大客户的一致认可。

公司拥有德国先进的检测仪器和精密生产设备、完善的质保体系和服务队伍,有数十名高、中级专业设计人员和专业生产技师,技术力量较强,并有国内磁流体技术专家作技术指导。

(24) 南京真空泵厂

南京真空泵厂位于国家级南京高新技术开发区内星火南路(邮编:210032),系中国真空行

业协会常务理事单位,是我国真空获得和真空应用设备制造重点厂家。企业在真空行业近 40 年的实践中,已开发出 7 大系列 50 多个品种的真空产品。在全国真空行业中率先通过了 ISO9001:2000 质量管理体系认证,2003 年企业产品又被评为“南京市用户满意产品”。企业一贯严格遵循标准,将顾客的需求作为自己追寻的目标,不断地开拓新产品,适应新的市场需求,充分运用信息技术、网络技术,不断改进和更新产品设计、内部管理、工艺过程和生产实践,确保客户得到最大限度的满足,为顾客提供满意的“飞”牌真空设备。企业能应顾客要求设计、制造用于各种领域的真空应用设备和系统,提供完善的真空技术的咨询与服务。

企业主要产品有:

①真空获得设备:旋片式、滑阀式、往复式、水环式、罗茨式等五大类系列真空泵。

旋片式真空泵系列有:2X-0.5、-1、-2、-4、-8、-8(水冷)、-15、-15C(水冷)、-30A、-70C、-100; 2XT-300; XZ-1、-2; 2XZ-1、-2、-4 等。水环式真空泵系列有:SK-1.5、-3、-6 等。滑阀式真空泵系列有:H-1401B、-150 等。往复式真空泵系列有:W-50、-100; WY-200; WLW(WL)-50、-100、-200 等。罗茨式真空泵系列有:ZJ-30、-70、-150、-300、-600, ZJP-150、-300、-600 等。

②真空应用设备:罗茨—旋片真空机组、罗茨—水环真空机组等系列应用设备。

罗茨—旋片真空机组有:JZJX-30、-70、-150、-300、-600 等。罗茨—水环真空机组有:JZJS-30、-70、-150、-300、-600 等。

③人工环境试验设备:真空干燥设备、人工环境实验设备等系列应用设备,如真空干燥箱、恒温箱、培养箱等系列产品。

以上产品广泛应用于化工、机械、镀膜、电子、电力、工艺、食品、医药、生物遗传工程、畜牧水产、林业、环境科学等领域。

企业致力于在真空获得设备及真空应用领域产品的设计和开发,目前全部采用 AutoCAD 设计。企业以坚持不懈的努力和积极进取的精神,凭借多年积蓄的各方面的雄厚基础,真诚地希望加强与海内外顾客的广泛联系和合作,在广阔的市场中谋求共同的发展。

(25) 甘肃省科学院磁性器件研究所

甘肃省科学院磁性器件研究所建于 1988 年,位于甘肃省兰州市定西南路 177 号(邮编:730000),是中国首家应用稀土磁性材料,从事高科技磁性器件和磁力工程及真空装置研究、开发、生产、销售、咨询的科研、工、贸一体化的专业研究所。

该所科技力量较强,具有真空、磁学、机械专业特长的研究员、高级工程师等技术骨干。针对石油、化工、食品、军工系统生产流程中,介质输送和化工反应装置的泵、釜、阀轴由于采用传统的填料密封或机械密封组件,往往使易燃、易爆、有毒、腐蚀、有害工质造成严重的泄漏,污染环境,危及操作人员健康和生产安全,迫切需要解决零泄漏的这些技术难题,开展应用磁学、磁驱动技术、泵水力学、摩擦润滑学、防腐蚀、材料学、真空科学等交叉学科与机电一体化的机理研究和配套设计,在理论和应用方面及在大功率磁力驱动器、高温、高压、耐腐蚀磁驱动泵、磁驱动釜、磁力阀以及真空应用、真空工程等方面取得了重要成果并形成了自己的特色。该所的科研成果通过部、省级鉴定 5 项,其中 4 项获部级科技进步三等奖、1 项获部省级二等奖。1991 年—1998 年获国家专利 9 项。同时,培养了具有丰富实践经验和较高学术水平的科技队伍。是国内磁力机械技术开发的主要科研机构,并与美国、韩国、香港、台湾等国家与地区进行技术合作,在国际上有一定的影响。

该所致力于科研成果转化为生产力,产品实现产业化。其主导产品是居国内领先地位的磁驱动釜、磁力阀、磁力机械等。研制、生产的 FC 系列化工流程磁驱动泵、FFC、CBF 系列耐

腐蚀磁驱动泵、FSC 系列耐腐蚀驱动泵、DGC 系列高压输送磁驱动泵、磁驱动釜、GCB、DCB 型熔融树脂齿轮泵和磁化技术产品等共有 4 大系列,50 余种产品,为我国化工装备的无泄漏化做出了贡献,深受石化等企业的信赖。目前,产品正在大范围的推广应用中。

该所系统设计标准化、加工工艺经济合理、产品结构优化新颖、质量管理严格全面、产品质量合格可靠、售后服务及时周到,愿与国内外朋友竭诚合作,共同发展。

(26) 成都国投南光有限公司

国投南光有限公司(原国营南光机器厂),位于四川省成都市锦江河畔三官堂街 1 号(邮编:610062)。建于 1877 年,1956 年划归为电子部直属企业,是国家大型二级企业,四川省高新技术企业和四川省二级计量单位。公司通过了 ISO9001:2000 质量体系认证;1997 年经国家对外贸易经济合作部批准为进出口业务企业。

公司的产品以真空技术为主流,主要的产品有:真空泵系列(直联泵、扩散泵、机械泵、分子泵、滑阀泵、增压泵及真空机组等);真空镀膜设备(箱式真空镀膜机、磁控溅射设备、包装膜卷绕真空镀膜机、电容器膜卷绕真空镀膜机);工业炉设备(无油中型真空炉、高温氢气炉、钽皮高温真空炉、真空加压浸渍设备、退火炉、预热炉、黑化炉等);电光源设备(异型荧光灯排气机、节能灯生产线工艺设备、十二轴喇叭机等);IC 生产线设备(光刻机、真空镀膜机、真空炉等);彩色显像管装配及玻壳生产线设备、磁性材料生产设备;发泡胶设备;电真空器件生产设备;半导体设备;微电子工业生产工业设备等。公司的这些产品在国内真空行业中产销量占有相当大的份额,不仅畅销国内 29 个省、市、自治区和中国香港特区,部分产品还出口到日本、美国、印度等许多国家。

公司拥有一批敬业、开拓、团结的员工队伍,生产技术、设计加工能力均在国内处于领先地位,先后为国内 400 余条生产线的建设装备了大量关键设备。公司先后完成科研试制新产品 392 项,其中多项为国内首先研制成功,产品中有 1 项获国家质量金奖,1 项获国家质量银奖,14 项获原机电部、四川省优质产品称号,50 项分别获国家、部、省和市科技大会奖、重大科技成果奖、优秀包装奖、金龙奖等。

公司在中国真空科技界中占有相当的地位。公司是中国真空学会常务理事单位、中国真空设备行业协会副理事长单位、四川真空学会理事长单位、国家级《真空》杂志的副董事长单位、《四川真空》杂志社主办单位。

当前,公司为加快企业发展,增强公司的综合竞争能力,进行了企业所有制的民营化改造,使公司经营机制和管理模式得以革新。在“解放个性、发展生产、全面服务、信用为先”经营理念的指导下,不仅继承原有传统产品的生产,而且致力于新产品的研制和新领域产品的开发,为公司真空产品的长远可持续发展奠定了坚实的基础。

(27) 成都正华电子仪器有限公司

四川成都正华电子仪器有限公司,位于成都市双林路 22 号(邮编:610066),是主要从事研究、开发各类真空测量仪的专业化市级科技企业,是我国真空测量仪器专业化的骨干企业之一。

真空测量仪全部采用全集成、微机控制、数字显示、光电隔离、数字滤波的一体化结构设计及完善的保护措施,具有操作简便,测量精度高,对电网“污染”及设备干扰等 EMI 有极强的抑制作用。复合真空计高真空规管的全自动量程切换,可实现连续测量,并自动修正测量误差。多路继电器控制功能输出接口的各控制点上、下限能任意设定,可用于真空系统、设备的自动控制及保护。接口扩展简单,可配接计算机、打印机、记录仪等,以实现真空测量及控制的全部

自动化。压力自动控制仪采用高可靠的电磁调节阀,可实现两路气体的比例调节。

真空测量仪器的主要产品有:电阻真空计:ZDR-I型电阻计、ZDR-II型双路电阻计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-1}\text{Pa}$)。ZDO-I型热偶计、ZDO-III型双路热偶计($400\text{Pa}\sim 10^{-1}\text{Pa}$)。ZDM-I型电容计($10^6\text{Pa}\sim 10^{-1}\text{Pa}$)。ZDY-I型压阻计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$)。ZDK-I型电离计($10\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)、ZDK-III型电离计($100\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$)、ZDH-1型超高电离计($10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-8}\text{Pa}$)。ZDV-I型冷磁控真空计($10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-I型热偶、电离复合计($400\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)、ZDF-II型热偶、电离复合计($40\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-III型电阻、电离复合计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-IV型电阻、B-A规复合计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-8}\text{Pa}$)、ZDF-V型电阻、冷规复合计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-X型双路电阻、电离复合计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-IB型双路热偶、电离复合计($400\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDF-VB型双路电阻、冷规复合计($10^5\text{Pa}\sim 10^{-6}\text{Pa}$)。ZDC-I型压力自动控制仪($100\text{Pa}\sim 10^{-4}\text{Pa}$)。

(28) 成都瑞普电子仪器公司

成都瑞普电子仪器公司位于四川省成都市二环路南三段3号(邮编610041),成立于1990年。是一家从事开发和生产真空测量仪器的专业制造厂家。是中国真空学会、中国仪器仪表学会、中国通用机械真空设备行业协会会员。

公司拥有雄厚的技术力量,先进的生产检测设备,完善的销售服务体系。公司致力于设计制造出一致性好、测量精度高、性能卓越的真空测量仪器。公司产品主要有电阻真空计、热偶真空计、电离真空计、冷磁控真空计、复合真空计等5大类30多种型号。高度智能化、标准化、工艺先进、功能齐备是公司产品的特点。从单机到复合及多路巡检与计算机通信联网的产品,深受国内外用户的欢迎。广泛应用于航天、航空、电子等领域真空镀膜、真空热处理等真空仪器。

公司生产的SVG系列真空计具备以下特点:

①采用智能化数字处理技术。在 $1\times 10^5\text{Pa}\sim 1\times 10^{-8}\text{Pa}$ 测量与控制范围内,提供用户所需要的各种规格型号及非标产品;②LED数码显示及CD液晶显示,自动转换量程与发射电流、取消了零点、满度、发射电流及除气电流的调节,具有机内硬件自动检测保护及其故障代码显示、规管工作点电流调节显示和超程保护及报警功能;③采用光电耦合、数字滤波、温度补偿、非线性参数及测量误差修正技术、高稳定性恒流源供电;④具有气体压力控制输出功能、点控或区域控制在测量范围内任意设置、预置参数长期保存;⑤可提供 $0\sim 5\text{V}$ ($4\text{mA}\sim 20\text{mA}$)模拟输出及与计算机通信的RS232(或RS485)接口,可通过计算机实施对仪器操作控制和实时数据显示;⑥可提供真空度数值及温度自动交替显示。

公司高度重视产品的技术创新,经常和真空行业单位进行技术交流与合作,并多次参加真空行业有关学术会议和产品展示会。

(29) 成都国光电气股份有限公司

成都国光电气股份有限公司(原国营国光电子管总厂、国营776厂、成都国光电气总公司)位于四川省成都建设路2号(邮编:610051),始建于1956年,是我国“一五”时期苏联援建的综合微波电子管厂,是信息产业部研制、生产真空器件的重点国家大型军工骨干企业。20世纪80年代开始军转民,2000年10月改制成为股份公司,公司下辖10个分厂(所),是集科、工、贸为一体的股份公司。

公司资产雄厚、技术力量强、设备精良、工艺先进、检测手段齐全,并具有完善的质保体系及科学的管理,为公司的产品提供了可靠的保证。公司主要承担各类微波电真空器件、特种漆

包线、真空接触器及断路器、微波能应用设备、彩色显像管排气设备、各类真空规管等的研制与生产,产品远销国外数十个国家,为国防、科研等领域做出了贡献。

真空技术应用研究所是公司主要从事“国光牌”系列真空规管的研制与生产基地。它依靠公司强大的军工技术和人才优势,生产的“国光牌”真空规管质量高、性能好,产品种类繁多。主要有热阴极电离规管、冷阴极电离规管、热偶规管、电阻规管等4大类多种型号的玻璃规、金属规,已大量应用于各种真空应用领域,其性能已覆盖了从 10^5Pa 低真空到 10^{-8}Pa 超高真空的各个压力测量范围。

(30) 成都睿宝电子科技有限公司

成都睿宝电子科技有限公司位于四川省成都市二环路三段5号人南大厦9F(邮编:610041),成立于1996年,是一家从事开发和生产真空测量仪器的专业制造厂家,是成都市科委认定的高科技型企业。公司拥有雄厚的技术力量、先进的生产检测设备、完善的销售服务体系。公司产品功能齐全、稳定性好、可靠性高、抗干扰能力强,现已广泛应用于航空、军工、电子、真空镀膜、真空热处理领域。产品主要销往北京、上海、沈阳、深圳、广州等国内大中城市并出口东南亚地区。

公司产品采用一体化设计,外形美观大方。数字滤波光电隔离技术的运用,提高了测量精度和抗干扰能力,具有超量程自动保护、全量程自动换挡、自动修正误差、操作简单、智能化程度高等特点。

公司主要产品有:电阻真空计(ZDZ-52、52T、ZDZ-52T-II、ZDZ-52-IV、ZDZ-52TY);热偶真空计(ZDO-53B、ZDO-53BY、ZDO-54D);压阻真空计(ZDY-1);热阴极电离真空计(ZDR-27B、ZDR-27Y、ZDR-2B、ZDR-10B、ZDR-10BY、ZDR-1A);冷阴极真空计(ZDL-14A、ZDL-14C、ZDL-14CY);复合真空计(ZDF-5327、5327A、5327B、ZDF-5202、5210、5210Y、5214、5201、5201B、5227、5227A、5227B、5227Y);压强控制仪(ZDK-10、52)。

公司生产的真空计测量范围从两个大气压到 10^{-8}Pa ,显示方式有:指针显示、数字显示和液晶显示。从工作方式上分为6大类30余个品种,可以提供多种控制功能和输出信号,并能实现与微机通信。公司还可以根据用户的具体要求承担各种规格的非标设计和制造。

公司非常注重产品的技术创新,经常和真空行业单位进行技术交流与合作,并多次参加真空行业有关的学术会议,技术研讨及产品展示。

(31) 沈阳市科友真空技术研究所

沈阳市科友真空技术研究所,位于市东陵区文萃路91号(邮编:110015),是从事真空技术与设备、真空装置的专业研究所。主要业务范围是为大专院校和科研院所设计、制造各种真空设备和仪器。

该所技术力量雄厚、加工工艺先进、检测手段齐全。研制的高技术水平的主导产品分为4大类:(1)各种真空镀膜设备。磁控溅射镀膜设备、激光镀膜设备、手套箱内有机发光薄膜制备设备、双离子束镀膜设备、热蒸发镀膜设备、热蒸发和离子束辅助沉积设备、PCVD和CVD设备等。(2)纳米和微粉实验装置、真空超微粒子制备装置、超高真空场发射研究装置、激光闪蒸纳米和热CVD炉、超声雾化制粉设备、纳米薄膜制备装置,光谱,质谱和分子动力学实验装置。(3)多种激光诱发荧光光谱装置、飞秒激光光电子飞行时间谱仪、零动能光电子与离子飞行时间谱仪、反射式飞行时间质谱仪、激发态分子反应装置;(4)真空部件:超高真空闸板阀、全金属角阀、高真空微调充气阀、高真空充气阀、磁力转轴和直接转轴、磁力耦合传递杆、机械手、拨叉和样品架、焊接波纹管、观察窗、超高真空挡板等。

(32) 杭州大和热磁电子有限公司

杭州大和热磁电子有限公司创建于1992年1月,是日本Fedrotec株式会社投资于杭州的控股子公司,总部设在杭州,在杭州半山与杭州之江高新科技园设有两家工厂。杭州之江工厂位于杭州高新之江科技园区南新路3号,是生产磁性流体技术产品和半导体技术产品的专业工厂。公司的主要产品有:磁流体密封圈、磁流体密封真空传动装置、磁流体阻尼器、真空法兰零部件、半导体制冷器、半导体设备洗净、石英制品、单晶硅及晶圆、硬质合金锯片、数控机床、木工机械以及软件开发。产品涉及计算机、半导体、光通信、数控机械等高科技领域,并全部通过ISO9002、ISO9001、ISO1404、EN46001体系认证。

杭州大和热磁电子有限公司机械事业部,拥有一批高素质的专业技术人员和先进的加工设备,采用日本先进模式,专业制造高真空、超高真空法兰、磁性流体密封真空传动装置。可为用户提供包括售前、售后及客户反馈的全方位技术服务。

机械部品加工车间,主要从事精密机械零部件产品加工,全车间进行恒温控制,控制温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,以确保产品制造精度的稳定性和检测的可靠性,真空零部件及磁性流体密封真空传动装置,全部采用进口不锈钢。真空密封传动装置、CF法兰系列、K法兰系列、半导体行业用机械手、精密仪器零部件等远销日本、欧美地区。

公司生产的真空法兰有适用于美国标准的NW-系列,日本规格JIS-系列和国际组织ISO-系列。其中ISO-系列可提供CF法兰通径16mm~200mm,四种规格26种型号。KF法兰通径10mm~50mm6种规格,29种型号。

公司生产的磁流体密封传动装置有多轴密封、实心轴密封、空心轴密封以及特殊用途(直线传动)4种类型,轴(孔)径4mm~75mm共11种规格,48种型号,产品具有长寿命、高可靠、无污染、低阻尼等特点。

公司生产的8种型号磁流体惯性阻尼器用于与步进电机等转轴固定,当电机加速或减速时能使转动的稳定时间大幅度缩短,也可用于抑制电机共振频域的振幅。

(33) 北京创威纳科技有限公司

北京创威纳科技有限公司是高科技型企业,主要从事真空设备领域特别是微细加工设备的产品研制、设计开发、生产销售、技术咨询,并开展微细加工及相关工艺的研究。公司总部坐落于北京市朝阳区慧忠北里315号D1—1201号(邮编:100012),生产基地设在紧邻中关村高科技园区的北京市海淀区清河龙岗路24号。

北京圣微纳新技术研究所是公司的研发机构,主要从事新产品的开发、工艺研究以及前沿性工作。研究所拥有多名国内知名的半导体器件、半导体工艺、半导体设备专家,一批从事物理、化学、微电子、机械、无线电、计算机专业的研究生、本科生是研究所的主要技术力量。公司是中国真空学会理事单位。公司雄厚的产品研发实力体现在新产品的层出不穷和产品水平的不断提高,公司最新研发成果ICP-5000A型全自动控制感应耦合等离子体刻蚀机、PECVD-8000A型全自动控制化学气相淀积台已投放市场,该产品与国外同类产品功能相近,在国内处于领先水平。公司最大的优势是:设备开发和工艺并重,生产和研究并重,经济效益和社会效益并重。公司在同行业中具有较高的知名度。

公司既可提供微细加工生产过程的全套设备,又可提供其中的单一设备,还可提供相关的各种工艺,这些产品广泛应用于微电子、微机械、光电子、通信等领域。公司主要产品有:

- 刻蚀机系列:主要产品有RIE-2、RIE-3型反应离子刻蚀机,ICP-2B型感应耦合等离子体刻蚀机及ICP-5000A型全自动控制感应耦合等离子体刻蚀机。上述产品均可刻蚀Poly-Si、

Si、SiO₂、Si₃N₄、Au、Al、GaN、GaAs 等多种材料。特别是 ICP-5000A 型全自动感应耦合等离子体刻蚀机对于深刻蚀硅更是无可比拟的,在国内已处于领先地位。

- 淀积台系列:主要产品有 PECVD-1B、PECVD-2B、PECVD-1D、PECVD-2D、PECVD-2E 型化学气相淀积台及 PECVD-8000A 型全自动控制化学气相淀积台。可淀积 SiO₂、Si₃N₄、磷硅玻璃、硼硅玻璃、非晶硅、碳化硅、类金刚石等各种材料。

- 溅射台系列:主要产品有 JS2X-100B、JS3X-100B、JS2S-80D、JS2S-150B 等多种型号。可分为单靶、多靶系统,上置靶、下置靶系统,单电源、双电源系统,直流电源、射频电源系统等。可溅射 Al、Au、Cr、Ti、Ni、Cu、W、SiO₂、各种介质膜、金属膜、合金膜等多种材料,可实现定靶溅射、旋转溅射、单一靶材溅射、复合靶材溅射、两种材料交替溅射等等。

- 曝光机系列:主要产品有 BGJ-2、BGJ-2B、BGJ-3、BGJ-3B、BGJ-5 型曝光机。曝光面积可分为 2 英寸、3 英寸、4 英寸、5 英寸等,曝光形式可分为单面对准、单面曝光及双面对准、单面曝光两种。

- 其它:匀胶机、烘胶台、去胶机、键合炉、划片机、光敏聚酰亚胺胶(PSPI)等产品,也是微细加工中不可缺少的设备。

参 考 文 献

- 1 GB/T 3163-93 真空技术术语
- 2 GB/T 3164-93 真空技术系统图用图形符号
- 3 真空技术常用诸表編集委员会編. 真空技術常用諸表. 日刊工業新聞社, 1965
- 4 Dushman S, Lafferty J M. Scientific Foundations of Vacuum Technique, 2nd. New York: 1962
- 5 Redhead P A, Hobson J P, Kornelsen E V. The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum. London: 1968
- 6 Tuzi Y and Saito T. Adsorption of Nitrogen on a Pyrex Glass Surface at Very Low Pressures. J. Vac. Sci. Tech., 1969, 6(1): 240
- 7 Hobson J P and Armstrong R A. A Study of Physical Adsorption at Very Low Pressures Using Ultrahigh Vacuum Techniques. J. Phys. Chem., 1963, 67(10): 2002
- 8 Troy M and Wightman J P. Physisorption of Ar, Kr, CH₄ and N₂ on 304 Stainless Steel at Very Low Pressures. J. Vac. Sci. Tech., 1971, 8(6): 748
- 9 富永五郎, 辻泰. 真空工学の基礎. 日刊工業新聞社, 1969
- 10 高本輝. 真空技術の近代理論問題. 真空技術, 1975(4): 49
- 11 Troy M and Wightman J P. Physisorption of Nitrogen on 304 Stainless Steel at Very Low Pressures. J Vac Sci Tech, 1970, 7(3): 431
- 12 Lewin G. Fundament of Vacuum Science and Technology. McGraw-hill Book Company, 1965
- 13 王欲知. 真空技术. 成都: 四川人民出版社, 1981
- 14 真空ハンドブック(改版). 日本真空技術株式会社, 1982.
- 15 Шумский К П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения, 1963
- 16 刘玉魁. 真空系统设计原理. 北京: 新时代出版社, 1988
- 17 中川洋, 小宫宗治. 真空装置. 日刊工業新聞社, 昭和 40
- 18 刘玉魁. 分析法计算挡板流导. 真空, 1979(6): 22
- 19 Сахсаганский Г Л 著, 复杂系统的分子流理论. 李旺奎, 兰增瑞, 薛大同, 刘玉魁合译. 真空与低温, 1985(4): 16
- 20 Дахлин Б С. Мивайчев В Е. Основы конструирования вакуумных систем. Москва: Издательство «Энергия» 1971
- 21 Holland L, Steckelmacher W. and Yarwood J., Vacuum manual. London: 1974
- 22 杨乃恒主编. 真空获得设备. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- 23 罗思 A. 真空技术. 北京: 机械工业出版社, 1979
- 24 Tran. of the ASME Journal of Engineering of Industry. 1964, January
- 25 Power B D. High Vacuum Pumping Equipment. Chapman and Hall, Ltd.
- 26 石井博. 真空泵, 日刊工新社, 昭和 40
- 27 黄克威, 胡耀志, 兰增瑞. 清洁的超高真空技术. 真空技术, 1975(3): 8
- 28 西田启一, 松井滋夫, 柳井正宜. クティオポンプの特性. 真空, 1967, 10(2): 67
- 29 Yoshitane Akiyama, Katsuya Nakayama and Mahito Saito. Calculation of Cryopumpinb Speed by the Monte Carlo Method. Vacuum, 1971, 21(5): 171
- 30 Forth H J. et al. Anwendung und Bemessung Von Kryipumpen. Vakuu-Technik, 1972, 21(4): 81
- 31 Pionson J D and Peck A W. Monte Carlo Analysis of High Speed Pumping Systems. Vacuum Symp. Trans. 9 th, 1962: 406
- 32 AFDC-TN-60-205
- 33 林主税, 小宫宗治. 超高真空. 日刊工業新聞社, 昭和 39
- 34 Read P L. Sorption Pumping at High and Ultra-high Vacuum. Vacuum, 1963, 13(7): 271
- 35 Stern S A. Hemstreet, R. A. et al. Development and Performance of Cryosorption Pannels. J. V ac. Sci. Technol., 1966(3): 99
- 36 Batzar T H. and Mcfarland R H. Zoolite Gettering for the Production of an Ultra-high Vacuum. Rev. Sci. Instr., 1965, 36(3): 328
- 37 特雷劳尔著. 橡胶弹性物理学. 向知人译. 北京: 轻工业出版社, 1957

- 38 李云奇,张世伟.磁流体在真空转轴密封中的应用.东工科技,第三期,1984:207
- 39 浅尾壮一郎等著.真空技术用构成材料.日刊工業新聞社,昭和39年
- 40 《橡胶工业手册》编写小组.橡胶工业手册,第一分册.北京:燃料化工工业出版社,1974
- 41 田民波,刘德令.薄膜科学与技术手册.北京:机械工业出版社,1991
- 42 夏正勋.蒸发卷绕镀膜机几个关键技术问题的研究.真空与低温,2001(3):130~135
- 43 曾宪森.维通型氟橡胶及其在密封中的应用.润滑与密封,第三期,1982:57
- 44 BELM Sessink and Verster N F. Design of Elastomer O-ring Vacuum Seals. Vacuum 1973,23(9):319
- 45 Ardenne M V. Tabellen Zur Angewandten Physik. Berlin: Veb Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1964
- 46 Wheeler W R. Theory and Application of Metal Gasket Seals. Vac. Symp. Trans., 10th, 1963:159
- 47 Danielson P M. Scaling Large Ultrahigh-Vacuum Flanges with Polytetrafluoroethylene Gaskets. J. Vac. Sci. Technol., 1969,6(3):425
- 48 Milleron N. Utilization of the Surface Tension of Liquid Metals in Making High-Vacuum Seals. Vac. Symp. Trans., 4th, 1957:38
- 49 陶业坚,黄润乾等.分子筛在获得中的应用.真空技术,1973,2(1-2):23
- 50 Clausing R E. A Large-scale Getter Pumping Experiment Using Vapor Deposited Titanium Films. Trans. 8th Nat. Vac. Symp. And Internal Cong., 1961,1:345
- 51 AEDE-TDR-64-253(1964).
- 52 徐烈等.低温容器设计、制造与使用.北京:机械工业出版社.
- 53 Pot A. 著,Хитнер, A. N. 译
- 54 刘军,徐成海.真空冷冻干燥法制备工业纳米微粉材料的研究现状与进展.第七届全国冷冻干燥学术交流会论文集,中国制冷学会第六专业委员会,2002
- 55 吴浩等. Ag 纳米颗粒与纳米结构薄膜的研究进展.真空与低温,2000(4):187~190
- 56 李强勇等.纳米颗粒铜膜的制备和光学性能观测.真空与低温,1995(1):5~7
- 57 日本长柱研究会,代表者林毅. Handbook of Structural Stability, 株式会社コロナ社,昭和46年
- 58 刘玉魁.真空工程计算所用基本公式的探讨.真空,1987(4):44
- 59 刘玉魁.盒形不锈钢真空室壳体设计与制造.真空与低温,1989(4):17
- 60 刘玉魁.真空卫生.真空,1986(1):28
- 61 刘玉魁.真空知识.北京:原子能出版社,1987
- 62 刘玉魁.真空清洗原理及清洁剂.真空与低温,1990(4):37
- 63 Nuvolone R. Technology of Low-pressure Systems-Establishment of Optimum Conditions to Obtain Low Degassing Rate on 316 L stainless steel by Heat Treatments. J. Vac. Sci. Technol., 1977,14(5):1210
- 64 奥汉隆 J E. 著.真空技术实用指南.胡炳森,钦菊美,周兆萍,李希宁译.北京:国防工业出版社,1988
- 65 顾庆倩.分子泵加锗铝吸气泵真空系统.真空,1982(1):8
- 66 李旺奎.章其中等.具有冷冻升华阱的金属超高真空系统.真空技术,1975(2):52
- 67 刘玉魁,韩晓文.用带冷阱的油封机械泵启动溅射离子泵.真空与低温,1987(1):23
- 68 达道安,姜万顺等.用分子沉技术获得 10^{-11} Pa 的极高真空研究.科学通报,1986(5):335
- 69 刘玉魁,韩晓文.亚暴环境材料试验设备真空系统研制.真空,1988(4-5):26
- 70 刘玉魁.亚暴环境的地面模拟.真空与低温,1986(2):29
- 71 崔广德,韩军等.空间辐射制冷器用的小型环境模拟器的研制.真空与低温,1988(1):21
- 72 杨恢东等.纳米半导体薄膜制备技术.真空与低温,1999(2):81~86
- 73 达道安,姜万顺.加速器中的真空技术问题.真空与低温,1984(2):19
- 74 潘惠宝,程渭伦等,北京质子同步加速器(BPS)的真空系统.真空科学与技术,1981(1):52
- 75 李云奇主编.真空镀膜与设备.沈阳:东北工学院出版社,1989
- 76 刘玉魁,穆永阁.真空镀膜设备.真空与低温,1982(1):61
- 77 刘玉魁.真空镀铝制镜.真空应用,1985(3):25
- 78 李希宁,刘正溥等.天文望远镜专用镀铝设备研制.真空技术,1975(4):11
- 79 韩耀文.高速连续真空蒸发镀铝.真空,1986(6):2
- 80 范玉殿,王怡德等.平面磁控溅射靶的磁场设计.真空,1982(5):1

- 81 朴元河,金永. HCD 法镀氮化钛的设备与工艺. 真空, 1983(5):29
- 82 姜昌,金永等. HCD 法工具离子镀设备的研究. 真空, 1988(3):56
- 83 张祥生. 离子镀膜—一种全新的镀膜技术. 真空技术, 1979(1):54
- 84 高汉三,张守忠等. 多弧刀具离子镀膜工艺设备. 真空, 1989(2):16
- 85 赵淮等. 包装机械选用手册(上). 北京:化学工业出版社, 2001
- 86 孙亦宁. 化学气相沉积金刚石薄膜. 真空与低温, 1988(4):17
- 87 罗崇泰. 类金刚石薄膜的获得和应用. 真空与低温, 1987(1):49
- 88 张继玉. 真空冶金装置(一). 真空科学与技术, 1984(2):125
- 89 高新民. 真空电阻炉的隔热层. 真空, 1981(5):1
- 90 蔡怀福. 石墨在真空电阻炉上的应用. 真空, 1980(2):14
- 91 张树林. 真空冶金装置(二). 真空科学与技术, 1984(3):217
- 92 郭鸿震. 真空冶金装置(三). 真空科学与技术, 1984(4):271
- 93 徐国兴,黄思明. 大型真空熔炼设备——五吨真空精炼炉. 真空技术, 1974(3):13
- 94 王玉民,金永. 真空自耗电极电弧凝壳炉. 真空, 1980(5):31
- 95 孙殿君. 真空冶金装置(四). 真空科学与技术, 1985(1):69
- 96 李云奇. 真空冶金装置(五). 真空科学与技术, 1985(2):67
- 97 李云奇. 钢液真空脱气精炼设备抽气系统的设计与计算. 真空, 1980(5):23
- 98 刘德权等. HL-2A 托卡马克真空系统的烘烤试验. 真空, 2003(2):31~34
- 99 李贻锦,郭耕三译. 真空热处理. 北京:机械工业出版社, 1975
- 100 龚肖南,刘群等. HPV200 型高压真空气淬炉设备与工艺. 真空, 1990(1):13
- 101 村上弘二(日). 真空渗碳. 真空, 1979(6):76
- 102 方应翠等. HT-7 超高托克马克第一壁 He 辉光硼化实验研究. 真空, 2001(1):11~14
- 103 栗枯主编. 真空钎焊. 北京:国防工业出版社, 1984
- 104 施加荣,孙力达. 真空铝钎焊工艺与设备. 真空, 1990(2):8
- 105 戴永年,赵忠. 真空冶金. 北京:冶金出版社, 1988
- 106 司鸿楠,许丽芳等. 低真空电子束焊接机真空系统. 真空科学与技术, 1982(3):17
- 107 刘玉魁. 食品冷冻升华干燥. 真空与低温, 1988(4):23
- 108 乔保振. 真空气相干燥设备及其应用. 真空, 1988(2):22
- 109 马一峰. 真空. 热风干燥技术和设备. 真空, 1989(2):21
- 110 梅津市郎(日). 真空浸渍. 真空, 1986(4):45
- 111 王子文. 纸介电缆的真空干燥和浸渍工艺设备的开发. 真空, 1989(4):10
- 112 化工设备设计全书编辑委员会. 化工设备设计(真空设备设计). 上海:上海科学技术出版社, 1990
- 113 刘玉魁. 食品真空保鲜及工艺. 真空与低温, 1990(2):20
- 114 王志康. 真空吊车. 真空技术报导, 1976(3):1
- 115 蒋观源. 物料的真空吸送及应用. 真空, 1988(2):31
- 116 邵玉森. 混凝土真空吸水软吸盘. 真空科学与技术, 1981(6):400
- 117 王泉清译. 核聚变反应堆概念及技术问题. 真空技术报导, 1974(5-6):111
- 118 陈庆林. 真空技术在核电站中的应用. 真空与低温, 1986(2):24
- 119 张景钦,周增圻等. 分子束外延技术的真空问题. 真空, 1983(2):34
- 120 Leck J H. Pressure Measurement in Vacuum System. London: The Institute of Physics & the Physical Society, 1964
- 121 Hayolment P L M. et al. Ultrasonic Manometers for Low and Medium Vacua under Development at the National Bureau of Standards. J. Vac. Sci. Tech. , 14, 1977:597
- 122 姜留宝. 真空包装技术. 真空科学与技术, 1982(5):329~332
- 123 Mcleod H G. Phil. Mag. , 48, 1874:110
- 124 Rosenberg P. A Compression Vacuum Gauge. Rev. Sci. Instr. , 1939, 10:131. 1938, 9:258
- 125 Ishu H. Nakayama K A. Serious Error Caused by Mercury Vapour Stream in the Measurement with a Mcleod Gauge in the Cold Trop System, Trans. AVS. Vac. Symp. , 1961, 8th:519

- 126 Meinkeetal C. Vergleich und Prufng Von Eichmethoden fur Ionisations Vakuum meter. *Vakuum Technik*, 1962, 11:86
- 127 李旺奎, 陈立仁等. 新式标准压缩式真空计的研究, 1964 年全国真空测试基地年会报告集, 第一分册. 第一页
- 128 Moser H. Poltz H. A New Compression Vacuum Gauge. *Z. Instrument Kunte.*, 1967, 65:43
- 129 Miller J R. Extension of the Range of the Moser and Poltz Mcleod Gauge from 10^{-10} to 10^{-2} Torr. *Vacuum*, 1967, 17:387
- 130 Miller J R. More Repeatable Moser and Poltz Mcleod Gauge. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1972, 9:201
- 131 Siu M C I. The Error Analysis of Moser and Poltz Mcleod Gauge. *J. Rev. NBS(us)*, 1967, A73:611
- 132 Cespiro Z. The Measurement Accuracy of the Moser and Poltz Mcleod Gauge. *Vacuum*. 1973, 23:277
- 133 Brelshi J. A Single Crystal Semiconductor Vacuum Gauge with Extended Gauge J. *Phys E. Sci. Instrum*, 1976, 9:261
- 134 Oguri T. Ultra Low Noise Pirani Gauge. *Proc. 7 th Inter. Vac. Congr. And Inter. Conf. Solid Surface*, 1977:149
- 135 Beams J. et al. Spinning Rotor Pressure Gauge, *Rev. Sci. Instr*, 1962, 33:151
- 136 Holmes F F. A Magnetic Suspension Drag Gauge. *Rev. Sci, Inetr.*, 1937, 8:844
- 137 Evard R et al. An Absolute Micromanometer Using Diamagnetic Levitation. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1969, 6:279
- 138 Paccy D J. Factors Affecting the Operation of the Quartz Oscillator Gauge, *Vacuum*, 1959, 9:261, 1959, 15:95
- 139 Dimeff J et al. New Wide-range Pressure Transducer, *Rev. Sci. Instr.*, 1962, 33:804; N ASA. SP-5020
- 140 胡伟, 王瑞生等. 振膜真空计的原理与特性. *真空技术*, 1978(4):327
- 141 崎山. 水銀ドラツゲ果と種種の気体に対あみィオンゲーズの感度について, *真空(日)*, 1973, 6:108
- 142 Schultz G G et al. A Medium Vacuum Ionization Gauge. *Rev. Sci. Instr.*, 1957, 28:1050
- 143 孔庆升等. 热阴极中真空电离计的研究. *真空技术*, 1975(3):36
- 144 北大物理系. 高压强电离真空计量程的扩展. *真空技术*, 1976(3):36
- 145 Bayard B T and Alpert D. UHV Ionization Gauge. *Rev. Sci. Instr.*, 1950, 21:571
- 146 Pemring, F. M. Cold Cathode Discharge Vacuum Gauge. *Physics*, 1973, 4:71
- 147 Redhead P A et al. Positive Magnetic Gauge. *Can. J. Phys.*, 1958, 36:271
- 148 Redhead P A et al. Negative Magnetic Gauge. *Can. J. Phys.*, 1959, 37:1260
- 149 Schuman W C. A Photo-current Suppressor Gauge for the Measurement of Very Low Pressures. *Trans. AVS Vac. Symp.*, 1962(9th):428
- 150 李旺奎等. 热阴极极高真空电离规. *真空技术*, 1973(1-2):1
- 151 Helmer J C et al. Ion Gauge Pressure Measurement Below 1×10^{-10} Torr. *Rev. Sci. Instr* 1966, 37:1652
- 152 Bleshshmidt D New Deflected-beam Gauge for Pressures Below 10^{-12} Torr. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1973, 10:316
- 153 Blechshmidt D. New Deflected-bean Gauge for Pressures Below 10^{-12} Rorr, *j. Vac. Sci. and Technol.*, 1975, 12:1072
- 154 Redhead P A. New Hot-filament Ionization with Low Residual Current, *J. Cac. Sci. and Teshnol*, 1966, 3:173
- 155 Clay F P. et al. Vapor Deposited Cold Thin Films as Lubricants in Vacuum(10^{-11} mmHg). *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1966, 3:107
- 156 Gnoszkowski J. Short Collector Vacuum Gauge. *Bull. Acad. Phlon. Sci. Ser. Tech.* 1966, 14:179
- 157 Cleaver J S. et al. A comparative Study of Modulated Bayard-Alpert Gauges and an Extractor Gauge, *Vacuum*, 1968, 18:73
- 158 Steikelmacher W. Some Recent Development in Low Pressure Measurements Using External Collector Ionization Gauges. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1972, 9:128
- 159 Feakes F et al. Pressure Measurement below 10^{-10} Torr with Bayard-Alpert and Magnetron Gauges *Rev. Sci. Instr.*, 1963, 34:1041
- 160 王瑞生, 胡伟等. 冷阴极磁控规的实验报告. *真空技术*, 1973(3-4):41
- 161 Bryant P J. et al. Cold-cathode Magnetron Gauge Characteristics, *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1966, 3:62
- 162 Pekz D. et al. Pressure Conversion Constants Magnetron Ionization Gauges. *J. Vac. Sci. and Technol.*, 1967, 4:239
- 163 Feakes F. et al. The Performance Characteristics of Three Types of Extreme High-vacuum Gauges, *Trans. AVS Vac. Symps.* II, 1968(4th):656
- 164 Mennerge H. et al. UHV-Kalkathoden-Ionisationsmanometer, *Inter. Vac. Symp. Trans. II*, 1968(4th):656
- 165 Young J R. Comparison of the Trigger Discharge Gauge with an Ionization Gauge and a Partial Pressure Analyze. *J. Vac. Sci. and Technol*, 1966, 3:345
- 166 Lesk J H. The Measurements of Total Pressure in the Range 10^{-8} to 10^{-12} Torr, *Vacuum*, 1970, 20:369
- 167 Kreisman W S. Radioactive Cold Magnetron Gauge, *GCA. Tech. Report. 61-18-N*, 1961

- 168 Kreisman W S. Radioactive Cold Magnetron Gauge, Report Twenty-Three Annual Conference on Physical Electronic, 1964: 27
- 169 Lafferty J M. A Hot-cathode Magnetron Ionization Gauge for the Measurement of Ultra-High Vacua. Trans. AVS Vac. Symp. ,1960(7th):97
- 170 Lafferty J M. The Hot-cathode Magnetron Ionization Gauge with an Electron Multiplier Detector, Trans. AVS Vac. Symp. , 1962(9th):438
- 171 陈建中. 热磁抑制规. 真空技术, 1976(1):21
- 172 Blechshmidt B. Hot Magnetron Gauge, Inter. Vac. Symp. , II ,1968(4th):108
- 173 Lafferty J M. Review of Pressure Measurement Techniques for Ultra-high Vacua, J. Vac. Sci. and Technol. ,1972,9:101
- 174 Klopter A. An Ionization Gauge for Measurement of Ultra-high Vacua, Trans. AVS Vac. Symp. ,1961(3th):439
- 175 Hill M P. A Combined 180° Total and Partial Pressure Gauge. . Vacuum, 1959,19:45
- 176 Schwarz H. Quadruple Ionization Gauge. Inter. Vac. Symp. , II ,1963(4th):685
- 177 Emons A J. et al. Use of a Field-electron Emitter as a Pressure Madicator Study of the Orbitron Ionization Ggauge. J. Vac. Sci. and technol. ,1972,9:112
- 178 Meyer E A. Herb R G. A Vacuum Manometer Using Ultraviolet, J. Vac. Sci. and Technol. ,1967,4:63
- 179 Aleseff I. A Vacuum Manometer Using Ultraviolet Light, Trans. AV S Vas. Symp. ,1961(8th):472
- 180 Marton L L. Use of Light Scattering for Vacuum Measurement, J. Vac. Sci. and Technol. ,1971,8:293
- 181 Atkiuson H H. A New Type of High Vacuum Gauge. Trans. AVS. Vac. Symp. ,1963(10th):213
- 182 Loyd D L. Hollow Cathode Vacuum Gauge. Bird. J. Appl. ,1966,17:357
- 183 Blauth E W. et al. Duol-chamber Ionization Gauge. Proc. 3rd Inter. Vac. Congr. II ,1965:523
- 184 Kageyama K. et al. A Pulsed Discharge Vacuum Gauge. Proc. 6th Inter. Vac. Congr. ,1974:109
- 185 Schwarz H. A Laser Ionization Gauge. Proc. 7th Inter. Vac. Congr. III ,1977:2712
- 186 沈阳玻璃试验厂,五一〇所. 毛细管型连续二次电子倍增器及真空应用. 真空技术,1976(3):71;1977(4):1
- 187 Kundsén M. An Expansion Calibration System. Ann. Phys. ,1910,31:633
- 188 李旺奎,陈立仁. 玻璃膨胀式高低真空计校准系统. 1963年全国真空测试基地年会报告集,1963. 39
- 189 Davis W D. Ultrahigh Vacuum Gauge Calibration. J. Vac. Sci. and Technol. ,1968,5:23
- 190 Choumoff P S. et al. Etalonnage Obsolu en Ultra-vide Par la Methode de la Conductance Reglable. Le Vide,1970,146:84
- 191 Morrison C F. Reference-Transfer Method of Vacuum-Gauge Calibration, J. Vac. Sci. and Technol. ,1967,4:246
- 192 Fowler P. Brock F. Accurate Wide Range Ultrahigh-vacuum Calibration System, J. Vac. Sci. and Technol. ,1970,7:507
- 193 李旺奎. 玻璃超高真空校准系统. 真空技术,1975(4):19
- 194 李旺奎. 极高真空测量和超高真空校准. 真空技术,1975(2):73
- 195 Blears J. Study of Blears Effect. London:Proc. Ray. Soc. ,A188,1947:62
- 196 Vacuum Gauge-Standard Methods for Calibration PartI:Pressure Range of 10^{-1} to 10^{-5} Pa, ISO/DIS 3570/真空(日),1975, 18:362
- 197 刘玉魁. 新型真空与气体置换保鲜包装材料. 真空与低温,1993(1):46~48
- 198 Oostrom A Van. Requirements for Partial Pressure Analyzers from the User's Point of View. Vacuum,1972,22:15
- 199 Nier A O C. A Mass Spectrometer for Routine Isotope Abundance Measurements. Rev. Sci. Instr. ,1940,11:212
- 200 Nier A O C. A Mass Spectrometer for Isotope and Gas Analysis. Rev. Sci. Instr. ,1947,18:398
- 201 Swinger D L. Mass Spectrometer Ion Source with High Yield. J. Appl. Phys. ,1970,40:1496
- 202 Dworetzky S. Novick, R. at al. Electron Bombardment Ion Source for Low Energy Beams. Rev. Sci. Instr. ,1963,39:1721
- 203 夏胜利. 蔬菜真空预冷保鲜. 真空应用,1985(3):21~23
- 204 Blum P. Torney F L. Cold Cathode Quadrupole Mass Spectrometer, Rev. Sci. Instr. ,1967,38:1404
- 205 Redhead P A. The Magnetron Gauge: A Cold-Cathode Vacuum Gauge. Can. J. Phys. ,1959,37:1260
- 206 Davis W D. A Magnetron-Type Ion Source for Low-Pressure Residual Gas Analysis. J. Vac. Sci. Technol. ,1969,6:85
- 207 Bohm H. Gunther K G. Eine Penning-Ionenquelle fur Massenspektro-meter, Z. Angew. Phys. ,1964,17:553
- 208 Bohm H. Gunther K. G. , Eine Penning-Ionenquelle fur Massenspektro-meter, Vakuum Techn. ,1965,14:192
- 209 刘玉魁.《食品真空存贮与保鲜工艺》讲座(七),真空包装材料. 真空与低温,1996(4):204~243

- 210 Theard L P. Energy Distribution of Positive Ions Extracted from a Hot Cathode Gas Discharge Ion Source. *Rev. Sci. Instr.* , 1968, 39:1639
- 211 Horning E C. Horning M G. et al. New Picogram Detection System Based on a Mass Spectrometer with an External Ionization Source at Atmospheric Pressure. *Anal. Chem.* , 1973, 45:936
- 212 Carroll D I. Dzidic et al. Subpicogram Detection System for Gas Phase Analysis Based upon Atmospheric Pressure Ionization (API) Mass Spectrometry. *Anal. Chem.* , 1974, 46:706
- 213 刘玉魁.《食品真空存贮与保鲜工艺》讲座(五),真空包装保鲜食品. *真空与低温*, 1996(2):116~118
- 214 刘玉魁.《食品真空存贮与保鲜工艺》讲座(六),真空气体置换保鲜. *真空与低温*, 1996(3):181~184
- 215 Wiely W C. Maclaren J H. Time-of-Flight Mass Spectrometer with Improved Resolution. *Rev. Sci. Instr.* , 1955, 26:1150
- 216 Strudier M H. Continual Ion Source for a Time-of-Flight Mass Spectrometer. *Rev. Sci. Instr.* , 1963, 34:1367
- 217 Bonner R F. Lawson G. et al. Mass Spectrom. Ion. Physics. , 1972, 10:197
- 218 杨乃恒. 干式真空泵的原理、特征及其应用. *真空* 2000(3):1~9
- 219 Bonner R F. Lawson G et al. The Quadrupole Ion Store(Quistor) as a New Source for a Mass Spectrometer. *J. Sci. Instr. (J. Phys. E.)* , 1973, 6:357
- 220 Ball G W. Lawson G. et al. *Dynamic Mass Spectrometry*. 3, (Ed. D. Price), London: Heyden & Son, 1972
- 221 Sommer H. Rhomas H A. et al. The Measurement of E/M by Cyclotron Resonance. *Phys. Rev.* , 1951, 82:697
- 222 Alpert D. Buritz R S. Ultra-High Vacuum II, Limiting Factors on the Attainment of Very Low Pressures. *J. Appl. Phys.* , 1954, 25:202
- 223 Reich G. Nodler H G. Partialdruckanalysen des Enddruckes von Oldiffusionspumpen mit dem Omegatron. *Z. Angew. Phys.* , 1957, 9:617
- 224 Edwards A E. Some Properties of a Simple Omegatron-type Mass Spectrometer. *Brit. J. Appl. Phys.* 1955, 6:44
- 225 Stark S. Measurements on the Properties of a Simple Omegatron. *Vacuum*, 1959, 9:288
- 226 Dummer S. Untersuchungen über die Verwendbarkeit des Omegatrons zur Quantitativen Partialdruckanalyse im Hochvakuum. *Vakuum Techn.* , 1961, 10:131
- 227 Kloper A. Schmidt W. An Omegatron Mass Spectrometer and its Characteristics, *Vacuum*. 1960, 10:363
- 228 胡炳森, 何慎诚等. 分析高真空系统剩余气体的回旋质谱计. *真空技术*, 1966(2):53
- 229 Suurmeyer E P. Th M. Francken J. C. Win Omegatron-Massenspektrometer mit Grobem Auflösungsvermögen. *Vakuum Techn.* , 1968, 17:1
- 230 蒋葆增等. 成都电信工程学院学报, 1961(1)
- 231 潘慈常等. 回旋质谱计的实验研究. 第四次全国真空测试会议报告集 1964(上册)
- 232 胡炳森, 李森, 钦菊美. 回旋质谱计的特性和应用. 第三次全国真空测试会议报告集, 1963
- 233 Baldeschwieler. Ion Cyclotron Resonance Spectroscopy. *Science*, 1968, 159(3812):263
- 234 Reymold J H. High Sensitivity Mass Spectrometer for Gas Analysis. *Rev. Sci. Instr.* , 1956, 27:928
- 235 Schaeffer O A. Cosmogenic Rare Gas Contents of Iron Meteorites. *Physics Today*. 1960, 13(2):18
- 236 Davis W D. Vanderlice T A. A Sensitive High-Speed Mass Spectrometer for Ultra-high Vacuum Work. *Trans. 7th Nat. Vac. Symp.* 1960:417
- 237 Coulson J A. Design and Performance of a Miniature Mass Spectrometer. *Proceedings of the Fourth International Vacuum Congress, Part Two*. 1968:699
- 238 Craig R D. Vacuum Problems Resolved by Mass Spectrometry. *Vacuum* 1970, 20:139
- 239 Hiroshi Miyake. Masami Michijima. An Improved Method for Measurements of Very Low Partial Pressure. *Proceedings of the Sixth International Vacuum Congress*. 1974:171
- 240 李克 P. 著. 质谱学. 北京: 科学出版社, 1957
- 241 徐成海. 真空预冷. *真空与低温*, 1997(2):104~107
- 242 Robinson Ch F. Hall L G. Small General Purpose Cycloidal-Focusing Mass Spectrometer. *Rev. Sci. Instr.* , 1956, 27:504
- 243 Perkins G D. Charpentier D E. A Simple Mass Spectrometer for the Identification of Residual Gases in High Vacuum System. *Trans. 4th Nat. Symp. On Vac. Techn.* , 1957:125
- 244 杜建通, 张荣玲. 果蔬真空预冷装置的技术发展前景. *真空与低温*, 1999(3):175~178

- 245 Huber W K. Trendlenburg E A. Mass-Spectrometer Investigations in Ultra-High Vacuum Systems. Trans. 8th Nat. Symp. On Vac. Techn. , 1961:592
- 246 Eberhardt P. Ein Trochoidenmassenspektrometer fur Koeine Edalgassmengdn. Helv. Phys. Acta, 1960, 33:588
- 247 Cameron A E. Egers D F. An Ion Velocitron. Rev. Sci. Instr. , 1948, 19:605
- 248 Wolff M M. Stephens W E. A Pulsed Mass Spectrometer with Time Dispersion. Rev. Sci. Instr. , 1953, 24:616
- 249 Katzenstein S S. Friedland S S. New Time-of-Flight Mass Spectrometer. Rev. Sci. Instr. , 1955, 26:324
- 250 George Sanzone. Energy Resolution of Con-Ventional Time-of-Flight Mass Spectrometer. Rev. Sci. Instr. , 1970, 41:741
- 251 Мамырин Б А, Каратаев В И. Масс-рефлекторон—НОВЫЙ Без магнитный времяпро-лётный Масс-спектрометр с Высокой разрешающей способностью, Ж. Э. Т. Ф. , 1973, 64(1-2):82
- 252 Damoth D C. Burgecs R G. Residual Vacuum Analysis with Nude Source Time-of-Flight Mass Spectrometer. Trans. 9th Nat. Symp. On Vac. Techn. , 1932:418
- 253 Боровик Е С, Гришин С Ф. Определение состава остаточных газов при Работе Конденсационных Насосов, Ж. Тех. Физ. , 1959, 29:1110
- 254 赵鹤皋, 郑贤德等. 食品冷冻干燥学术交流会议论文集, 中国制冷学会第六专业委员会, 2002
- 255 Damoth D C. Operation and Application of a Time-of-Flight Residual Gas Analyser. Le Vide, 1973, 28:27
- 256 Wilson D B. A Time-of-Flight Mass Spectrometer. Vacuum, 1969, 19:323
- 257 Carrico J P. Johnson M H. Simple Time-of-Flight Residual Gas Analyzer and Surface Monitor. Rev. Sci. Instr. , 1972, 43:550
- 258 Boyd R. A Mass-Spectrometer Probe Method for the Study of Gas Discharge. Nature, 1950, 165:142
- 259 Moody R E. Versatile R F. Leak Detector. Trans. 3th Nat. Symp. On Vac. Techn. , 1956:119
- 260 Bennett W H. Radiofrequency Mass Spectrometer. J. Appl. Phys. , 1950, 2:142
- 261 周春晖主编. 化工过程控制原理. 北京:化学工业出版社, 1998
- 262 刘光怡, 廖自泽等. 国产射频质谱计工作状态的研究. 第三次全国真空测试会议报告集, 1963
- 263 董景新, 赵长德. 控制工程基础. 北京:清华大学出版社, 1992
- 264 张承佐, 张兆祥等. 射频质谱计作为定量分析仪器可能性的探讨. 第三次全国真空测试会议报告集, 1963
- 265 徐鑫, 曹林娣. 射频质谱氢探漏器. 第三次全国测试会议报告集, 1953
- 266 李殿东. 76km 高空环境模拟试验舱的研制. 真空. 2002(5):41~44
- 267 Dekleva J. Paterlin A. Improved Resolving Power of the r. f. Mass Spectrometer by Changing the Signal Shape. Rev. Sci. Instr. , 1955, 26:399
- 268 Rsdhead P A. A Linear Radio-Frequency Mass Spectrometer. Can. J. Phys. . 1952:30
- 269 张兆祥, 晏继文, 徐成海等. 真空冷冻干燥与气调保鲜. 北京:中国民航出版社, 1996
- 270 Diels K. Moesta H. A New High Frequency Mass Spectrometer and its Use in High Vacuum Technology. Trans. 5th Nat. Symp on Vac. Techn. 1958:115
- 271 Ehlbeck H W. Loecherer K H. et al. The Operation of r. f. Mass Spectrometer at High r. f. Voltage Levels. Trans. 7th Nat. Symp. On Vac. Techn. , 1960:407
- 272 丁正斌, 周永安, 张勋. 冷冻干燥工艺简介. 真空与低温, 1996(1):52~57
- 273 电机工程手册编委会. 电机工程手册. 北京:机械工业出版社, 1984
- 274 Roecherer K H. Theorie einer Frequenzabhängigen Storestroner in Hochfrequenz-Massenspektrometer nach Redhead. Vahuum Techn. , 1962, 11:108
- 275 钟肇新, 彭侃. 可编程控制器原理及应用. 广州:华南理工大学出版社, 1991
- 276 周明德. 微型计算机硬件软件及其应用. 北京:清华大学出版社, 1998
- 277 Tretner W. Ein Massnspektroskop fur die Hachvakuumtechnik. Z. Angew. Phys. 1959. 11:395; An Electrostatic Mass Spectroscope, Vacuum, 1960, 10:31
- 278 Tretner W. Zur Theorie des Farvitrons. Z. Angew. Phys. , 1962, 14:23
- 279 工厂常用自控设计手册编辑组. 工厂常用自控设计手册. 西安:陕西人民出版社, 1972
- 280 Meyer E. Rin Linearperiodisches Massenspektroskop. Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys. , 1974, 13:123
- 281 Mclachan N W. Theory and Application of Mathien Functions. London and New York, Oxford Univ. Press, 1951:1947
- 282 Paul W. Reinhard H P. et al. Das Elektrische Massenfilter als Massenspektrometer and Isotopentrenner. Z. Physik, 1958, 152:

- 283 日本真空技术株式会社. 真空手册(中译本). 原子能出版社, 1986
- 284 Sarai T. Iono Y. 完全收束質量分析器の電子模型. 質量分析(日), 1971, 19(1):1
- 285 国家技术监督局. GB3100—93 国际单位制及其应用
- 286 国家技术监督局. GB3101—93 有关量、单位和符号的一般原则
- 287 Paul W. Raether M. Das Elektrische Massenfilter. Z. Physik, 1955, 140:262
- 288 Gunter K G. A Partial Pressure Vacuum Gauge Working According to the Principle of the Electrical Mass Filter. Vacuum, 1960, 10:293
- 289 Holme A E. Thatcher W J. et al. An Investigation of the Factors determining Maximum Resolution in a Quadrupole Mass Spectrometer. J. Phys. E. Sci. Instr., 1972, 5:429
- 290 Holme A E. Thatcher W J. et al. An Investigation of the Factors Affecting the Performance of the Quadrupole Mass Spectrometer with Particular Reference to Residual Gas Analysis. Vacuum, 1972, 22:327
- 291 Holme A E. Thatcher W J. et al. A Small Analytical Quadrupole Mass Spectrometer Designed for Operation in High and Ultra-High Vacuum. Vacuum, 1974, 24:7
- 292 Norton J. J. Smith R D. Dynamic Mass Spectrometry. 2, (Ed. D. Price) Heyden & Son, 1971:203
- 293 兰州物理研究所, 虹光电子管厂. 小型四极质谱计的设计和特性. 真空技术, 1978(4):359
- 294 傅文彦. 质谱仪器动态. 分析仪器, 1979(1):50
- 295 刘玉魁, 孟宪君等. ZM-800 热真空模拟设备的研制. 真空与低温, 1993(1):1~4
- 296 黄本诚等. 空间模拟器设计. 北京: 宇航出版社, 1993
- 297 Von Zahn. Monopole Spectrometer, a New Electric Field Mass Spectrometer. Rev. Sci., Instr. 1964, 34:1
- 298 王福云, 刘命辉等. 中型无油超高真空防冷焊评价试验设备的研制. 真空与低温, 1998(4):197~203
- 299 Dawson P H. Whetten N R. The Monopole Mass Spectrometer. Rev. Sci. Instr., 1968, 39:1417
- 300 Dawsin P H. Whetten N R. Some Properties of the Monopole Mass Spectrometer. J. Vac. Sci. Technol., 1969, 6:97
- 301 Hudson J B. Watters R L. E E E Transaction on Instrumentation and Measurements. IM~15, 1966:94
- 302 Mork J T. Vacuum Envelopes for Ultra High Vacuum Systems, Lubrication Engineering. 1966, 22:398
- 303 Dawson P H. Fringing Fields in Quadrupole-Type Mass Analyzers. J. Vac., Sci. Technol., 1972, 9:487
- 304 Dawson P H. Use of Fringing Fields in the Monopole. J. Vac. Sci. Technol., 8, 1971:263
- 305 Herzog K F. A Novel Sweep Method for Monopole Mass Spectrometers. J. Vac. Sci. Technol, 1969, 6:955
- 306 Granke R E. Watters R N. et al. Extended Mass Range Operation of the Monopole Mass Spectrometer. J. Vac. Sci. Technol., 1966, 3:329
- 307 Sullivan John J and Shuntz John B. Design Parameters for Welding and Brazing Vacuum Components, Research/Development. 1966, 17(9):64
- 308 American Welding Society. Welding Handbook, Sixth Edition. New York: AWS, 1970
- 309 Fischer E. Ein Messverfahren Zur Untersuchung Von Fluoreszenzabklingvorgangen. Z. Physik, 1959, 156:26
- 310 Bakish R, White S S. Handbook of electron Beam Welding. New York: Elley, 1964
- 311 Rettinghaus G. Nach Weis Niedriger Partialdrucke mit dem Ionenkafig. Z. Angew. Phys., 1967, 22:321
- 312 Dawson P H. Whetten N R. Ion Storage in Three-Dimensional, Rotationally Symmetric, Quadrupole Fields. II. A Sensitive Mass Spectrometer. J. Vac. Sci. Technol., 1968, 5:11
- 313 卡扎柯夫, H X. 真空扩散焊接. 北京: 国防工业出版社, 1976
- 314 忻崧义, 白金节. 真空蒸发金属化陶瓷与金属封接工艺. 真空技术, 1978(1):61
- 315 Rowcroft P. Ceramic to Metal Seals Metallized by Sputtering. Journal of Scientific Instruments, 1970, 3:21
- 316 Mattok D M. Fundamentals of Ion Plating. J. Vac. Sci. Technol, 1973, 10:47
- 317 Dawson P H. et al. A simple Mass Spectrometer. Rev. Sci. Instr. 1969, 40:1444
- 318 Beek Arnold Hugh William ed. Handbook of Vacuum Physics. Oxford, Pergamon, 1964
- 319 Awson P H. Whetten N R. The Three-Dimensional Quadrupole Ion Trap. Naturwise, 1969, 3:109
- 320 田志伟, 田志仁. 玻璃吹制技术. 北京: 科学出版社, 1961
- 321 Whetten N R. Dawson P H. Some Causes of Poor Peak Shapes in Quadrupole Field Mass Analyzers. J. Vac. Sci. Technol.,

- 322 Major F G. Dehmelt H G. Exchange-Collision Technique for the r. f. Spectroscopy of Stored Ions. Phys. Rev., 1968, 170:91
- 323 Huber W K. Technical and Industrial Developments. Vacuum, 1964, 13:399
- 324 Ball G W. Lawson G. Todd J F J. Dynamic Mass Spectrometry. 3, (Ed. D. Price), London: Heyden & Son, 1972
- 325 于垂武等, 氩弧焊在电子管上的应用. 北京: 科学出版社, 1976
- 326 铝及铝合金的焊接. 北京: 石油化学工业出版社, 1976
- 327 Barnett C F. Ray J A. Improvements in Detection Efficiency of the Johnston Multiplier Rev. Sci. Instr., 1970, 41:1673
- 328 沈阳玻璃试验厂, 兰州五一〇研究所. 毛细管型连续二次电子倍增器的试制工艺. 真空, 1977(4):10
- 329 Schram B L. Boer boom A J H. et al. Amplification Factors of a Particle Multi-Pillar for Multiply Charged Noble Gas Ions. Physical, 1966, 32:749
- 330 American Vacuum Society Standard(tentative). Procedure For Calibrating Gas Analyzers of the Mass Spectrometer Type, J. Vac. Sci. Technol., 1972, 9:1260
- 331 兰州物理所, 虹光电子管厂. 四极分压强计性能测试中的若干问题. 真空技术, 1979(1):26
- 332 Dennis N T M. Heppell T A. Vacuum System Design, CHAPMAN & HALL, 1968:97
- 333 Biguenet Ch. Spectrometrie de Masse Dans Tanalyse des Gaz Residuels, Le Vide, 1972(159/160):143
- 334 Souchet R. Sarrau J. Vaddener G. Analyse des Gaz Residuels en Ultra-Vide, Le Vide, 1972(159/160):125
- 335 Cleaver J S. Fiveash P H. A Study of Some Diffusion Pump Oils Using a Six-Inch Radius 60° Sector Field Mass Spectrometer. Vacuum, 1970, 20:49
- 336 Kiser Robert W. Introduction to Mass Spectrometry and Its Applications. Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, 1965
- 337 Сакаганского Г Л. Сверхвысокий Вакуум В Радиоационно-Физическом, Москва: Атомиздат, 1976
- 338 Holland L. Steckelmacher, Yarwood J. Vacuum Manual. London: E & F. H. Spon, 1974
- 339 张景钦. 国产真空油脂的饱和和蒸气压测试结果. 真空与低温, 1983(2):74
- 340 Greaves C. Vacuum Mass Spectroscopy. Vacuum, 1970, 20:72
- 341 毕龙生等. 大型液氧铁路槽车用低温吸附剂——活性炭的性能测试. 低温工程, 1989(1):37
- 342 施华. 电真空材料及工艺(上下册). 北京: 人民教育出版社, 1961
- 343 孙亦宁. 飞行时间质谱计. 真空技术, 1976(3):114
- 344 Слободенюк Г И. Квадрольные Массо-Спектрометры, Москва: Атомиздат, 1974
- 345 刘联宝, 戴昌鼎. 电真空器件的钎焊与陶瓷-金属封接. 北京: 国防工业出版社, 1965
- 346 王成智, 郑照明. 真空质谱计及其应用. 分析仪器, 1973(2):1
- 347 中山腾矢. 真空技術本. オーム社, 1967:78
- 348 中岛敏. 真空工学ハンドブック. 朝倉書店, 315~317
- 349 查良镇等. 薄膜渗氦型标准漏孔的研究. 1964年全国测试基地年会报告集, 1964:297~302
- 350 黄心源等. 石英膜标准漏孔试制与测定. 1964年全国测试基地年会报告集, 1964:286~296
- 351 范垂桢, 肖祥正等. 标准漏孔校准系统. 真空技术, 1966(1):35~38
- 352 曹辉玲, 袁风章等. 金属压扁型标准漏孔. 真空技术, 1966(1):11
- 353 查良镇. 标准的漏孔校准. 第三次全国真空测试会议报告集, 1963:219~225
- 354 Roberts J A. Precision Leak Of Standardizing Leak Detection Equipment. Vac. Symp. Trans. 1956:124
- 355 Gordon S. Construction of Small Fixed Leaks of Predictable Throughput. Rev. Sci. Instrum. 1958, 23:501
- 356 Ланис В А, Левина Л Е. Техника Вакуумных Испытаний, Москва: Атомиздат, 1963
- 357 高德, 王再生. 真空器件的钎接. 北京: 国防工业出版社, 1965
- 358 Sundheim B R. An Absolute Leak. Rev. Sci. Instrum., 1964, 35:228
- 359 Hopfield J. Glass Variable Microleaks for Gases, Rev. Sci. Instrum., 1950, 21:671
- 360 Nester R G. High Vacuum Gas Value, Rev. Sci. Instrum., 1956, 27:874
- 361 Moller T W. Factors Influencing the Calibration and Application of Standard Leaks Vac. Symp. Trans., 1954:121
- 362 Laufer M K. Standard Leaks and Their Calibration by Constant Pressure Charge in Volume technique, Vac. Symp. Trans., 1961:1086
- 363 查良镇. 铂丝玻璃型标准漏孔气流特性的研究. 第三次全国真空测试会议报告集, 1963:226~239

- 364 Bicknell C B. An Improved Helium-Only Sensitive Method for Calibrating Silica Membrane Helium Leaks. *Vac. Symp. Trans.*, 1959:97
- 365 范垂桢. 真空检漏目前的一些进展. *真空技术*, 1978(2):204
- 366 胡耀志. 发展中的真空检漏技术. *真空技术*, 1976(4):28
- 367 Marr J W. *Leakage Testing Handbook*. NASA CR106139, 1969:8-1~23-3
- 368 Biram J and Barnows G. Bubble Tests for Gas Tightness. *Vacuum*, 1964, 14:221
- 369 Bateliffa R T. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1964, 15:79~83
- 370 Bloomer R N. Leak Defection and Measurements by Vacuum Bubbles, *Vacuum*, 1973, 23:239
- 371 范益. 打气试漏应注意些什么. *真空技术*, 1976(3):129
- 372 Keller G E. and Kregel J M D. Visual Detection of Leaks in Vacuum Systems, *Vac. Sci. Technol.*, 1969, 6:871
- 373 华中一. 高真空技术与设备, 第二版. 上海:上海科学技术出版社, 1960:204
- 374 金懋昌. 1964 年全国测试年会报告集(真空测试), 303~309
- 375 Blears J. and Leck J H. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1951, 2:227~232
- 376 Kent T B. J. *Sci Instrum.*, 1955, 32:132~134
- 377 Hirosh Ishii. A Differential Piani Type Leak Detector With a Charcoal Trap. *Advan. Vac. Sci. Technol.* 1960:245~247
- 378 Beck A H. and Brishane A D. A Cylindrical Magnetron Voisation Gauges, *Vacuum*. 1952, 2:137~146
- 379 Beck, A. H. :A Sensitive Leak Perfector Wing Magnetron Voisation Gauges, *Vacuum*, 1954, 4:147~158
- 380 石井博. 真空技術, ユロナ社, 昭和 33:181
- 381 Blears J. and Leck J H. General Principles of Leak Detection. *J Sci. Instrum.*, Supplement 1951(11):20~28
- 382 Botden P J. The Silica Gel Leak Detector. *Advan. Vac. Sci. Technol.*, 1960:221~224
- 383 Wesley J C. Ensberg E S. and Jensen T H. Internal Vacuum Leak Detection System for Doublet III. *Bull. Am. Phys. Shys. Soc.*, 1976, 21:1088
- 384 Ensberg E S. Wesley J C. and Jensen T H. Leak Telescope. *Bev. Sci. Instrum.*, 1977, 48:357~359
- 385 Dushman S. *Scientific Foundation of Vacuum Technique*, Second Edition New York: Wiley, 1962:357~360
- 386 Young J R. Use of an Ion Pump as a Leak Detection. *Rev. Sci. Instrum.*, 1961, 32:85
- 387 Ackley J W. Barrington A E. Fran et al. *Trans. Ninth National Vac. Symp.* 1962:380~383
- 388 Barrington A E. Sensitivity of an Ion Pump Leak Detector. *Rev. Sci. Instrum.*, 1962, 33:1045
- 389 冯昭福. 真空脂的性能与选用. *真空技术*, 1973, 2(3-4):99
- 390 戴浩. *真空技术*, 北京:人民教育出版社, 1961:272~274
- 391 Mckinney H F. Practical Application of Leak Detection Methods. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1969, 6:958~964
- 392 李昌全. 无油真空系统及其初步应用. *电子管技术*, 1974(1):2
- 393 北京真空仪表厂. LX-2 型卤素探漏仪. *真空技术*, 1973(1-2):44
- 394 周雅珍. 真空封泥. *真空技术*, 1966, 1(4):192
- 395 孙士瑞等. *真空电阻炉设计*. 北京:工业出版社, 1989
- 396 Delafosse D. Noeet P. Troadec G. Detection des Fuites au Moyen du Gaz Ammoniac Le Vide, 1960, (90):442
- 397 蒙哥丁著. 真空密封与检漏, 李平译. 北京:中国工业出版社, 1966:35~39
- 398 张景钦编译. 新型的真空泵油-Fomblin Y-Vac, 真空与低温, 1983(4)
- 399 Varadi P U. and Sebestyen L G. A Simple Vacuum Leak Detector Using a Vadio-Frequency Mass Spectroscopy. *J. Sci. Instrum.*, 1956, 33:392
- 400 Nicollian H. A Laboratory Leak Detector Using an Omegatron. *Vac. Symp. Trans.*, 1960:80~81
- 401 Winkelman C R. and Davidson H G. Abstract Ultrasensitive Leak Detection *J. Vac. Sci. Technol.*, 1975, 12:435
- 402 金建中, 范垂桢等. 两极非均匀磁场氮质谱探漏仪. *真空技术*, 1966(1):1
- 403 Geller R. Calibration d'un Spectrometre Detecteur de Fuites, *Le Vide*, 1958(73):3~4
- 404 Choumoff S. De la Sensibilite de Detecteurs de Fuite Par Spectrometre de Massa a Helium. *Le Vide*, 1958(76):193~196
- 405 Farkass I. and Barry E J. Improved Elastomer Seal Designs for Large Metal Ultra-high Vacuum Systems Permitting Ultimate Pressures in the Low 10 Torr Range. *Vac. Symp. Trans.*, 1960:35
- 406 查良镇, 薛祖庆. 质谱探漏仪的灵敏度及其校准. 1964 年全国测试基地年会报告集, 1964:274~285

- 407 谭民望. ZrAl 消气指标的简易测试与网内数据的评述. 真空技术, 1978(7):216
- 408 Holland L. Steckmacher W. and Yawood J. Vacuum Manual. London, 1974:227
- 409 Peters J L. Mass Spectrometer Leak Detector with Improved Sensitivity. Rev. Sci. Instrum., 1959, 30:1093
- 410 Peters J L. An Ultra-sensitive Mass Spectroscopy Leak Detector and its Application to Vacuum Technology. Vac. Symp. Trans, 1959:94
- 411 Borosi A and Giorgi T A. A Non-Evaporable Getter for Low Temperatures. Vacuum, 1973, 23(1):15
- 412 Hobson J P. Pumping at Solid Surfaces. Brit. J. Appl. Phys., 1963, 14(9):544
- 413 Evans S. and Granger P. The Effect of Helium Memory on the Performance of a Mass Spectrometer Leak Detectors. Le Vide, 1966(122):132
- 414 Young J R. Helium Memory in Mass Spectrometer Leak Detector. J. Vac. Sci. Technol., 1969, 6:906
- 415 Wastgazard H. Practical Aspects of High Vacuum Leak Detection., Vacuum, 1970, 20:143~149
- 416 Briggs W E. and Blumle L J. Frontiers of Leak Detection. L. Vac. Sci. Technol 1977, 14:611
- 417 Hablani M H. and Briggs W E. New Technical Development in Helium Leak Detection. Proc. 7th Intern. Vac. Congr., 1977:199
- 418 Becker W. Huber W K. et al. A New Leak Detector with Turbomolecular Pump. Proc 7th Intern. Vac. Congr., 1977:203
- 419 成都仪器厂. ZLS-23 新型质谱检漏仪的设计总结. 真空技术, 1975, 4(3):28
- 420 中国科学院科学仪器厂二室. 120 升/秒串联两泵的抽速稳定性的测定. 真空技术, 1976(4):100
- 421 孙企达, 石新安. 电视显像管内真空度的测量. 真空技术, 1973, 2(3~4):22
- 422 曙光电子管厂. 电子管内真空度的测量. 真空技术, 1975(1):95
- 423 Moraw M. and Prasol. Leak Detection in Large Vessels. Vacuum, 1978, 28:63
- 424 Florescu N A. High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1962, 12:227
- 425 Steckelmscheer W. Comments on High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1963, 13:57
- 426 Florescu H A. High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1963, 13:101
- 427 Steckelmacher W. High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1963, 13:101
- 428 Steckelcher W. High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1963, 13:102
- 429 Santeler, D. J. High Vacuum Side Versus Forepressure Side Leak Detection. Vacuum, 1963, 13:102
- 430 刘明远. 半导体器件的氮质谱检漏. 真空技术, 1974(2):13
- 431 Weston G E. Materials for Ultrahigh Vacuum. Vacuum, 1975, 25(11/12):469
- 432 Davy J G. Mode Calculations for Maximum Allowable Leak Rates of Hermetic Package. Vac. Sci. Technol., 1975, 12:423
- 433 范垂祯, 李国坤等. 提高氮质谱检漏仪灵敏度的一个方法. 真空技术, 1976(2):53
- 434 Карпов В И. и Левина Л Е. Методы на аппаратура выкорувствительного течисканья, Л. Т. Э., 1967(4):168
- 435 Norton F J. Permeation in High Vacuum, Vac. Symp. Trans., 1954:47
- 436 真空技術講座: 真空技術常用諸表, 日刊工業新聞社, 1966
- 437 高本輝等. 超高真空玻璃渗氮的研究. 真空技术, 1966(1):20
- 438 Norton F J. Gas Permeation through the Vacuum Envelope. Vac. Symp. Trans., 1961:8
- 439 Dushman S. Lafferty J M. Scientific Foundation of Vacuum Technique. John Wiley & Sons, Inc., 1962
- 440 Altemose V O. Helium Diffusion Through Glass. J. Appl. Phys., 1961, 32(7):1309
- 441 Lewin G. Fundamentals of Vacuum Science and Technology. McGraw-Hill Book Company, 1965
- 442 Redhead P A. Hopson J P. Kornelsen E V. The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum. Chapman and Hall. Ltd., 1968
- 443 Huntress A R. A new Silicone Diffusion Pump Fluid. Vac. Symp. Trans., 1957, 104
- 444 Crawley D J, et al. Evaluation of a New Silicone Fluid for Diffusion Pumps. Vac. Symp. Trans., 1962:399
- 445 Lebovits A. Permeability of Polymers to Gases. Vapors and Liquids. Modern Plastics, 1966, 43(7):139
- 446 Norton F J. Rare Gas Permeate Through Polymers. J. Chem. Phys., 1954, 22:1145
- 447 Amerongen G J. The Permeability of Different Rubbers to Gases and Its Relation to Diffusivity. J. Appl. Phys., 1966, 17(11):972
- 448 Dayton B B. Relations between Size of Vacuum Chamber, Outgassing Rate, and Required Pumping Speed. Vac. Symp. Trans., 1959:101

- 449 高本輝,戴普述.真空材料常温出气速率的简捷测量.科学仪器,1964(2):93
- 450 高本輝.一些国产材料的出气速率及其在真空设计中的使用方法.真空技术,1973(2):47
- 451 机械工业材料手册,北京:机械工业出版社,1970
- 452 Schram A. La Desorption sous Vide. Le Vide, 1963(103):55
- 453 石森能夫.種種の前処理条件にすけるステンレス鋼 軟鋼の放出ガス量.(日)真空,1971,14:295
- 454 Power B D. Experiences with Demountable Ultrahigh Vacuum Systems. Vac. Symp. Trans. , 1961:1175
- 455 列别金斯基 M A. 电真空材料,北京:国防工业出版社,1960
- 456 Thibault J J. Etude du Degazage des Matériaux a Très Basse Pression. Le Vide, 1967, 22(132):309
- 457 范垂祯,张景钦,戴普述.蒸发速度法测定真空泵油蒸气压.科学仪器,1963(1):23
- 458 Young J R. Outgassing Characteristics of Stainless Steel and Aluminium with different Surface Treatments. J. V. S. T. , 1969, 6(3):398
- 459 Calder R. Reduction of Stainless-steel Outgassing in Ultra-high Vacuum. Brit. J. Appl. Phys. 1967, 18(10):1459
- 460 Rarton R S. The Effect of Cleaning Technique on the Outgassing Rate of 18/9/1 Stainless Steel Vacuum, 1970, 20(1):1
- 461 Грошквский Я. Технологии Высокого Вакуума, Москва: Атомиздат, 1957
- 462 Манов М. Г. Конденсационный Метод измерения упругости пара вакуумных Масел при Высоких Температурах. Л. Т. Э. , 1957(5):91
- 463 Басаласва, Н. Я. Газоотплевание металлов, применяемых в вакуумной технике, Ж. Т. Х. 1958, (28):1102
- 464 Calwell B H. Outgassing Rates of Refractory and Electrical Insulating Materials Used in High Vacuum Furnaces. Vacuum, 1970, 20(11):481
- 465 石井博,中山勝矢.真空ポンプ油の蒸気圧測定.(日)真空,1958,1(1):222
- 466 Beckman W. Gas Desorption of some Rubber-Type Materials. Vacuum, 1963, 13(9):349
- 467 Thieme G. Mass Spectrometer Investigation of Gas Emission from Plastics. Vacuum, 1963, 13(4):137
- 468 Markley F. Outgassing Data for Several Epoxy Resins and Rubbers for the Zero Gradient Synchrotron. Vac. Symp. Trans. , 1961:78
- 469 Grawley D J. Degassing Characteristics of Some "O" Ring Materials. Vacuum, 1964, 14(1):7
- 470 村上義夫.真空装置のガス放出と到達できる真空の限界(I),(II).(日)真空,1972,15:118;1972,15:174
- 471 Strasser Y. ガス放出にすり研究のレビュー.(日),真空,1969,12:389
- 472 Brown R D. Outgassing of Epoxy Resins in Vacuum. 1967, 17(9):267
- 473 高本輝,李林.金属片高温出气的研究.真空技术,1978(7):1
- 474 Kelk J E. et al. The Outgassing Properties of EN58B, EN58G and EN60 Stainless Steels. Vacuum, 1969, 19(10):451
- 475 Guthrie A. Vacuum Technology, John Wiley & Sons Inc. , 1963
- 476 Gunther C M. Neus und Bawahrt es aus der Hoch Vakuumtechnik. VEB Wilhelmknopp Verlag, 1959:298~301
- 477 Flecken F A. Gassgabe Verschiedner Metllischer Hochvakuum-Baustoffe. Vac. Symp. Trans. , 1961:58
- 478 Kirkadell T D. Some Effects of Surface Layers on the Degassing Properties of Copper. J. V. S. T. , 1966, 3(4):214
- 479 Reid R L. Outgassing of Multifoil Insulation Materials in Sealed Vacuum. J. V. S. T. , 1969, 6(1):217
- 480 Varadi P F. Thermal Degassing of Materials. Vac. Symp. Trans. , 1960:149
- 481 Varadi P F. Effect of Pretreatment on the Degassing of Materials. Vac. Symp. Yrans. , 1961:73
- 482 Lawson R W. The Outgassing Properties of Mica with Particular Reference to the Life Performance of Thermionic Valves. Vacuum, 1962, 12(3):145
- 483 Lang B. Analysis with a Fast Response Mass Spectrometer of Gases Released by Vacuum Cleavage of Muscovite. Vacuum, 1969, 19(6):281
- 484 Erents, K. The Evolution of Water Vapor from Glass after Atmospheric Exposure. Vacuum 1965, 15(12):573
- 485 真空技術講座.真空技術用構成材料(日).日刊工業新聞社,1965
- 486 Collins R H. Degassing and Permeation of Gases in Tube Materials. Vacuum, 1961, 11(2):114
- 487 染野檀.真空材料の表面処理とガス放出.(日)真空 1958, 1:244;1959, 2:326
- 488 Haskimoto K. Measurement of Gas Evolution and Absorption From Materials Used in Vacuum Tubes, Vacuum. 1960, 10(1/2):92

致 谢

在《真空设计手册》(第3版)修订过程中,承蒙全国真空界下列专家教授、工程技术人员和各真空企事业单位给予大力支持,在此表示衷心感谢。

为本书提供修改意见和技术资料者(以收到意见函先后为序):

姜燮昌	董 镛	尚心德	夏正勋	徐明达	徐玉江	王建国	马 强	温发兰	彭 平
杨乃恒	李云奇	孙殿君	徐成海	关奎之	王宝霞	张以忱	张世伟	张树林	于 溥
陆国柱	马玉阁	杜雪春	李孟春	李春影	方莉莉	周思平	张振厚	宁宪宁	宋祖芳
李世贵	栾胜泰	邢 军	黄怀玉	林 森	张书范	王学智	苏长庆	王敬国	渠洪波
杨希林	王宇志	徐 曦	蔡树铭	蔡洪志	姜美仓	王 飞	金鹤鸣	詹国荣	陶 萝
袁 圆	赵仲明	李云松	王荫桐	孙 凯	张树中	程品玉	费海鸿	陆守成	李 红
吴 斌	金荣良	金建华	王西龙	郭惠新	陈海垚	梁伯顺	林刚直	徐灵显	胡在定
李剑清	郭海军	张一真	王益良	黎宗稷	葛 明	陈 建	陈传新	辜国征	赖寿培
朱毓坤	任德高	王先路	卜忍安	燕洪顺	徐法俭	黄 毅	常智英	毕龙生	姜万顺
尤福祯	蒋 弼	聂京祥	孙 昱	潘和平	陈津河	马红芳	郭学军	高 峰	赵克中
于东泉	王 龙	王铭朴	张松华	关永卿	谷建伟	韩阶平	王长梗		

为本手册提供技术资料的单位(以收到技术资料先后为序):

兰州真空设备有限责任公司、上海曙光机器制造厂、沈阳中科仪技术发展有限责任公司、北京中科科仪技术发展有限责任公司、上海阀门二厂、浙江真空设备集团有限公司、辽宁铁岭橡胶工业研究院、航天集团西安向阳喷射技术有限责任公司、杭州华达真空设备有限公司、北京七星华创电子股份有限公司、成都正华电子仪器有限公司、浙江台州星光真空设备制造有限公司、山东淄博真空设备厂有限公司、沈阳兰菱真空设备制造公司、北京朗禾科技有限公司、上海惠丰石油化工公司、沈阳真空技术研究所、北京北仪创新真空技术有限责任公司、中山凯旋真空技术工程有限公司、沈阳恒星真空有限公司、广东佛山水泵厂有限公司、宁波明欣化工机械有限公司、成都金凤液氮容器有限公司、浙江四海科技集团公司、成都无极真空科技有限公司、台州拓展真空设备公司、甘肃腾飞真空泵制造有限公司、上海万可姆高科技有限公司、沧州市通用建材机械有限公司、甘肃省科学院磁性器件研究所、沈阳真空泵厂、成都瑞普电子仪器有限公司、成都国光电气股份有限公司、上海真空泵厂、南京真空泵厂、株洲维格磁流体有限公司、沈阳真龙真空设备技术有限公司、成都国投南光有限公司、杭州大和热磁电子有限公司、沈阳市科友真空技术研究所、北京创威纳科技有限公司、成都睿宝电子科技有限公司。

兰州物理研究所《真空设计手册》(第3版)编委会

2004年2月26日