

真空工程技术

徐成海 主编

巴德纯 于溥 达道安 张世伟 副主编



化学工业出版社

真空工程技术

徐成海 主 编

巴德纯 于 溥 达道安 张世伟 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

真空工程技术/徐成海主编. —北京: 化学工业出版社, 2006.5

ISBN 7-5025-8649-0

I. 真… II. 徐… III. 真空技术 IV. TB7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 043701 号

真空工程技术

徐成海 主编

巴德纯 于 溥 达道安 张世伟 副主编

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 余纪军

责任校对: 李 林

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 66 字数 2433 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8649-0

定 价: 180.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京化广临字 2006 24 号

主 编 徐成海

副主编 巴德纯 于 溥 达道安 张世伟

编委会委员

徐成海	巴德纯	于 溥	达道安
张世伟	张以忱	王晓冬	张 斌
胡焕林	朱 武	干曙毅	谈治信
刘玉魁	赵克中	陆 峰	喻春阳
张建伟	王志坚		

顾问委员会

主 任	杨乃恒			
副主任	李云奇	姜燮昌	范垂楨	张树林
委 员	孙殿君	孙广生	杨常青	姚民生
	刘玉岱	关奎之	王宝霞	王继常
	王先路	陆国柱	马玉阁	王树礼

《真空工程技术》各章编者与审稿人

	编 者	审稿人
第 1 篇 真空工程的技术基础		王宝霞
第 1 章 稀薄气体动力论	喻春阳	
第 2 章 真空中的相变与气固界面现象	喻春阳	
第 3 章 真空中的电现象	喻春明	
第 2 篇 真空工程的基础元件		
第 4 章 机械真空泵		
4.1 液环式真空泵	杨乃恒	陆国柱
4.2 往复式真空泵	徐成海	杨乃恒
4.3 旋片式真空泵	王晓东	杨乃恒
4.4 滑阀式油封机械泵	王晓东	杨乃恒
4.5 罗茨式真空泵	杨乃恒	陆国柱
4.6 爪型干式真空泵	巴德纯	杨乃恒
4.7 涡旋干式真空泵	巴德纯	杨乃恒
4.8 螺杆式真空泵	刘春姐	陆国柱
4.9 分子真空泵	杨乃恒	陆国柱
第 5 章 喷射流真空泵		杨乃恒
5.1 水喷射泵	徐成海	
5.2 蒸汽喷射泵	王晓东	
5.3 油扩散泵	徐成海	
5.4 油扩散喷射真空泵	徐成海	
第 6 章 气体捕集真空泵	胡焕林	徐成海
第 7 章 真空阀门	谈治信	崔遂先 达道安
第 8 章 真空密封	赵克中	李云奇
第 9 章 除尘器和挡油器	王 艳	徐成海
第 10 章 观察窗和电极导入部件	徐成海	张世伟
第 11 章 真空测量仪器	张世伟	关奎之
第 3 篇 真空工程中常用的真空系统		徐成海
第 12 章 常用真空系统的组成与安装	干曙毅	
第 13 章 真空容器的设计与计算	张 斌	
第 14 章 真空系统的设计与计算	朱 武	
第 15 章 真空系统的检漏	张世伟	
第 4 篇 真空工程技术的主要应用		
第 16 章 真空冶炼设备		
16.1 真空感应炉	巴德纯	李云奇
16.2 真空电弧炉	巴德纯	李云奇
16.3 真空电子束炉	巴德纯	李云奇
16.4 钢液真空炉外精炼	赵浩轩	李云奇
第 17 章 真空热处理设备	王晓东	徐成海
第 18 章 真空钎焊与烧结	于 溥	李云奇
第 19 章 真空镀膜		李云奇

	编 者	审稿人
19.1 真空蒸发镀膜	张以忱	
19.2 真空溅射镀膜	陆 峰	
19.3 真空离子镀膜	张以忱	
19.4 离子注入与离子辅助沉积技术	张以忱	
19.5 化学气相沉积技术	徐成海	
第 20 章 真空干燥	徐成海	张世伟
第 21 章 真空压力浸渍	徐成海	张世伟
第 22 章 真空蒸馏	陆 峰	徐成海
第 23 章 真空包装	刘玉魁	达道安
第 24 章 真空输送	刘玉魁	达道安
第 25 章 真空过滤	张建伟	徐成海
第 26 章 空间真空技术	达道安	谈治信
第 27 章 真空在核物理装置中的应用	刘玉魁	达道安
第 28 章 离子束刻蚀技术	谈治信	达道安
第 29 章 真空绝热与低温容器和真空玻璃	王志坚	徐成海
第 5 篇 真空工程材料与工艺	张以忱	于 溥
第 30 章 真空材料的性能		
第 31 章 真空工程常用材料		
第 32 章 真空工程中的常用工艺		

序 言

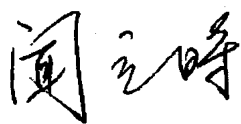
《真空工程技术》是国内第一部全面反映当前我国真空科学与技术领域近代水平的专著。它的内容涉及到真空获得技术与设备、真空度测量技术与仪器、真空系统设计与计算、真空检漏技术与设备、真空技术在国民经济各个领域中的应用等。该书既有理论与计算，又有设计和使用，更偏重于工程实际应用。在全国各高校不再设立真空技术专业的情况下，这本书对过程装备与控制、机械设计及自动化、工程热物理、热能工程等专业大学本科毕业生，扩大知识面、自学成才都有着积极的作用。它将成为从事真空工程技术的科技工作者的良师益友。

真空科学是一门现代基础科学，它研究的是真空（低压）环境中的物质结构、特性、热质传递现象及理论；研究如何人工制造和保持低压空间环境；研究如何应用真空环境的特性，专为人服务。真空工程技术应用非常广泛：冶金工业、电力工业、医药、食品、卫生、环保、电子、运输、半导体、集成电路、激光、镀膜、刻蚀、金属热处理、焊接、铸造、军事科学、宇航事业、可控热核反应等国民经济各个领域中都发挥着应有的作用。因此，真空工程技术是从事上述领域工作的学者、设计工程师、工艺人员、工人等必备的科学知识。学习真空工程技术是提高自身学术水平、提高产品质量、提高企业经济效益的重要途径。

《真空工程技术》一书的主编、副主编、编委们都是长期从事真空科学的学者、教授、高级工程师，他（她）们有多年从事真空工程技术方面的教学、科研、设计、生产经验，掌握着真空行业先进的技术、信息与动态。顾问委员会主任、副主任、委员们都是多年勤勤恳恳工作在真空工程技术战线上的前辈们，虽然都已退休，但是，他们的工作成果、业绩，对真空行业的贡献是没有退休的，仍然是知识宝库中的珍品，后辈们学习的典范。因此，这本书可以称得上是国内众多有丰富知识和经验的真空工程技术人员辛勤劳动的结晶，供有关人员学习的教材，作为今后真空工程技术发展的基石，必将推动真空事业的发展。

作为真空界的老朋友，我向《真空工程技术》的问世表示祝贺，祝贺你们对推动我国科学技术发展作出的贡献。

中国工程院院士



前 言

真空工程在国民经济各个领域中的应用越来越广泛。从人们日常生活用的热水瓶，到航天工程的宇宙模拟；从人们常吃的方便面到保障人类健康的菌种、疫苗；从普通材料的表面改性，到各种特有功能的纳米材料，到处都有真空工程的业绩。

我国真空工程技术的发展是很快的，虽然只有几十年的历史，但是在好多项目中都达到了世界先进水平。其中有大量真空科技工作者的艰苦努力，有大批从事真空工程的工人和人员的辛勤劳动，也有全国各行各业的大力支持。

《真空工程技术》这本书是全国真空行业的科技工作者、教育工作者、工人和服务人员多年来辛勤劳动的结晶。《真空工程技术》的内容力争反映出我国真空科学与技术的最新水平；介绍国内外的最新动向、产品和工艺等。它是一本综合性的专著，没有真空设计手册中所载的产品、厂家和标准；不像教材那样具有详细的理论和公式推导，它的编写特点是重视工程实际应用。各种真空元件和设备的选型方法，使用与维护的注意事项，在其他类属真空书籍中很难找到这些内容。因此，写本书的目的是推动真空事业的发展，加快真空工程产品的更新换代，工艺革新，设计计算方法的现代化。读者对象除相关专业的本科生、硕士生之外，重点是设计、制造真空工程设备的工厂，研究真空材料科学与技术的科研院所和应用真空工程技术与设备的科技人员；帮助具有大专以上学历，各专业毕业的工程技术人员，自学真空科学技术，达到可以设计，会选型，能应用的水平。

全书共分 5 篇含 32 章。其中第 1 篇包括 3 章，主要内容是真空工程技术的理论基础；第 2 篇包括 8 章，主要内容是真空工程中常用到的基础元件；第 3 篇包括 4 章，主要内容是真空系统设计；第 4 篇包括 14 章，主要内容是真空工程技术的主要应用；第 5 篇包括 3 章主要内容是真空工程材料与工艺。第 1 篇内的 3 章，由喻春阳和喻春明编写，王宝霞审核；第 2 篇内的 8 章，分别由杨乃恒、徐成海、巴德纯、张世伟、王晓东、胡焕林、谈治信、崔遂先、赵克中、刘春姐、王艳编写，杨乃恒、陆国柱、徐成海、达道安、李云奇、张世伟、关奎之审核；第 3 篇内的 4 章，分别由干曙毅、朱武、张斌、张世伟编写，徐成海审核；第 4 篇内的 14 章，分别由巴德纯、王晓东、于溥、张以忱、陆峰、徐成海、刘玉魁、张建伟、达道安、谈治信、王志坚、赵浩轩编写，李云奇、徐成海、达道安、张世伟、谈治信审核；第 5 篇内的 3 章，由张以忱编写，于溥审核。

本书是组织全国十几位从事真空工程的专家、教授和工程技术人员编写的，人员较多、难度较大，希望本书能成为反映我国真空行业当前水平的里程碑，立足于世界真空之林。本书编写过程中得到了很多单位的支持，并得到很多大半生都战斗在真空工程技术领域的前辈们的关怀和指导以及不少博士生和硕士生的帮助，引用了不少他（她）们的文章和结果，在此一并感谢。特别要感谢闻立时院士对本书编写和出版的关心与支持。尽管大家尽到了努力，但缺点肯定存在，欢迎指正。

编者

2005 年 12 月

目 录

第1篇 真空工程的技术基础

第1章 稀薄气体动力论 1

1.1 稀薄气体在平衡态下的物理特性 1

1.1.1 气体定律 1

1.1.2 气体分子的速率 1

1.1.3 气体分子之间的碰撞 2

1.1.4 气体分子自由程及其分布律 2

1.1.5 气体分子对表面的入射 3

1.1.6 气体分子从表面的反射 4

1.2 稀薄气体在非平衡态下的迁移 4

1.2.1 气体的动量迁移 4

1.2.2 气体的能量迁移 6

1.2.3 气体的质量迁移 7

1.2.4 热流逸现象 8

1.2.5 分子辐射力现象 9

1.3 稀薄气体的流动 10

1.3.1 流动状态及其判别 10

1.3.2 流动参量 11

1.3.3 黏滞流态的流量-泊谟叶公式 11

1.3.4 分子流态的流量——克努曾公式 11

1.3.5 过渡流态的流量 12

第2章 真空中的相变与气固界面现象 13

2.1 蒸发和凝结 13

2.1.1 蒸汽 13

2.1.2 蒸气压 13

2.1.3 蒸发率和凝结率 14

2.2 吸附 15

2.2.1 吸附机理 15

2.2.2 吸附参量 17

2.2.3 物理吸附与化学吸附 19

2.2.4 吸附动力学 20

2.2.5 吸附等温线 21

2.3 溶解、扩散和渗透 22

2.3.1 气体在固体中的溶解 22

2.3.2 气体在固体中的扩散与渗透 23

第3章 真空中的电现象 25

3.1 荷能粒子与表面 25

3.1.1 荷能原子、离子与表面 25

3.1.2 荷能电子与表面 27

3.2 电子发射 27

3.2.1 电子发射基础 27

3.2.2 热电子发射 28

3.2.3 场致发射 29

3.2.4 二次电子发射 29

3.2.5 光电子发射 30

3.3 气体放电 30

3.3.1 气体放电中的粒子碰撞 31

3.3.2 带电粒子在气体中的运动 34

3.3.3 气体放电特性 34

3.3.4 气体放电实验及伏安特性曲线 35

3.3.5 汤生放电 36

3.3.6 破裂电压与巴邢定律 38

3.3.7 辉光放电 39

3.3.8 弧光放电 42

3.3.9 其他类型放电 44

3.4 带电粒子在电磁场中的运动 46

3.4.1 电磁加速 46

3.4.2 电磁偏转 46

3.4.3 磁聚焦 48

3.4.4 带电粒子在恒定电场中的运动 49

3.4.5 带电粒子在正交均匀电磁场中的运动 50

3.4.6 带电粒子在径向电场及轴向磁场中的运动 52

第2篇 真空工程的基础元件

第4章 机械真空泵 53

4.1 液环式真空泵 53

4.1.1 液环泵的工作原理及特点 53

4.1.2 液环泵的基本类型与结构 54

4.1.3 液环泵的设计计算 55

4.1.4 液环泵的常见故障及消除方法 60

4.1.5 液环泵的使用与注意事项 60

4.2 往复式真空泵 61

4.2.1 往复泵的结构和工作原理 61

4.2.2 往复泵的主要性能参数 62

4.2.3 往复泵的气阀设计 65

4.2.4 往复泵设计中的几个问题 67

4.2.5 往复泵的使用与维护 69

4.3 旋片式真空泵 70

4.3.1 概述 70

4.3.2 工作原理和结构特点 70

4.3.3 性能参数及主要几何尺寸的确定 73

4.3.4 气镇量的计算 76

4.3.5 旋片泵的运行和维护 77

4.4 滑阀式油封机械泵 79

4.4.1 概述 79

4.4.2 滑阀泵的工作原理和结构特点 80

4.4.3 滑阀泵性能参数和主要几何尺寸的确定 81

4.4.4 滑阀泵的质量平衡与减振 83

4.4.5 机械泵油 84

4.4.6 滑阀式真空泵常见故障及其消除方法	85	5.2.6 水蒸气喷射泵的常见故障及消除方法	153
4.5 罗茨式真空泵	86	5.3 油扩散泵	154
4.5.1 概述	86	5.3.1 油扩散泵的结构	154
4.5.2 罗茨泵的工作原理及其结构特点	87	5.3.2 扩散泵的工作过程	155
4.5.3 罗茨泵的主要参数确定	89	5.3.3 油扩散泵的抽气特性	155
4.5.4 罗茨泵的转子型线	94	5.3.4 油扩散泵的加热功率	158
4.5.5 抽气速率的计算方法	97	5.3.5 扩散泵工作液	159
4.5.6 罗茨泵的主要尺寸的确定	99	5.3.6 油扩散泵的使用与维护	159
4.5.7 罗茨泵的使用与维护	100	5.4 油扩散喷射真空泵	161
4.6 爪型干式真空泵	102	5.4.1 油增压泵的工作原理	161
4.6.1 概述	102	5.4.2 油增压泵的结构	161
4.6.2 工作原理	103	5.4.3 油增压泵的抽气特性	162
4.6.3 爪型转子的理论型线	103	5.4.4 油增压泵的使用与维护	164
4.6.4 爪型干式真空泵的几何性能	110	第6章 气体捕集真空泵	165
4.6.5 爪型干泵的结构特点	111	6.1 低温泵	165
4.7 涡旋干式真空泵	113	6.1.1 抽气机理和性能特点	165
4.7.1 概述	113	6.1.2 分类与结构	165
4.7.2 涡旋泵工作原理与结构	113	6.1.3 主要性能参数	165
4.7.3 涡旋泵几何参数与啮合条件	114	6.1.4 设计原则和程序	167
4.7.4 涡旋泵的设计计算	115	6.2 溅射离子泵	167
4.7.5 密封部位的泄漏量	117	6.2.1 特点及应用范围	167
4.7.6 涡旋泵的主要性能参数	119	6.2.2 原理与结构	167
4.8 螺杆式真空泵	119	6.2.3 设计与计算要点	168
4.8.1 螺杆式真空泵的工作原理	120	6.3 钛升华泵	169
4.8.2 螺杆式真空泵的结构	120	6.4 电离升华泵	171
4.8.3 螺杆式真空泵转子的型线	122	6.4.1 电离升华泵的工作原理	171
4.8.4 螺杆式真空泵的几何特性	125	6.4.2 电离器的结构	171
4.9 分子真空泵	128	6.5 分子筛吸附泵	172
4.9.1 概述	128	6.5.1 分子筛的结构及其抽气原理	172
4.9.2 牵引分子泵的抽气原理与结构特点	129	6.5.2 分子筛吸附泵的结构	173
4.9.3 多槽螺旋式牵引分子泵的设计原理	131	6.5.3 设计与计算要点	174
4.9.4 涡轮分子泵的抽气原理及结构特点	135	6.6 非蒸散型吸气泵	175
4.9.5 涡轮分子泵抽气性能的计算	138	6.6.1 工作原理与结构	175
第5章 喷射真空泵	143	6.6.2 设计与计算要点	176
5.1 水喷射泵	143	第7章 真空阀门	178
5.1.1 水喷射泵的主要用途	143	7.1 概述	178
5.1.2 水喷射泵的工作原理	143	7.1.1 真空阀门的定义、作用	178
5.1.3 水喷射泵的主要结构形式	144	7.1.2 真空阀门的特点、种类	178
5.1.4 水喷射泵的设计与计算方法	144	7.1.3 真空阀门发展概况	178
5.1.5 水喷射泵的安装形式	145	7.1.4 发展前景	179
5.1.6 水喷射泵常见故障及排除方法	146	7.2 真空阀门的设计与计算	179
5.2 蒸汽喷射泵	147	7.2.1 真空阀门的基本要求	179
5.2.1 概述	147	7.2.2 真空阀门设计步骤	180
5.2.2 水蒸气喷射泵的工作原理	147	7.2.3 真空阀门的密封	180
5.2.3 水蒸气喷射泵的抽气特性	147	7.2.4 真空阀门压紧装置及设计计算	182
5.2.4 多级喷射泵系统的组成和结构	148	7.2.5 阀盖的传动机构及其设计计算	185
5.2.5 水蒸气喷射泵的设计计算	151	7.3 真空阀门原理、形式、性能参数	188
		7.3.1 隔膜式真空阀门	188
		7.3.2 电磁真空阀	190
		7.3.3 真空挡板阀	193

7.3.4 真空插板阀	201	11.1.3 真空计的分类及测量范围	277
7.3.5 真空翻板阀	208	11.1.4 真空测量的特点及真空计的选用原则	278
7.3.6 真空蝶阀	209	11.2 液位式真空计	279
7.3.7 真空球阀	211	11.2.1 开式U形管真空计的压力测量原理	279
7.4 真空微调阀、真空放气阀	216	11.2.2 闭式U形管真空计的压力测量原理	279
7.4.1 真空微调阀	216	11.2.3 U形管真空计结构形式的改进	280
7.4.2 真空放气阀	218	11.3 压缩式真空计	281
7.5 玻璃真空活塞	222	11.3.1 压缩式真空计的结构与原理	281
7.5.1 原理、使用范围	222	11.3.2 压缩式真空计的测量刻度方法及灵敏度	281
7.5.2 形式、性能参数	222	11.3.3 压缩式真空计的测量范围	282
7.5.3 安装、使用、维护	226	11.3.4 压缩式真空计的测量误差与标准压缩式真空计	283
7.6 真空阀门性能测试		11.3.5 压缩式真空计的形式及使用注意事项	284
(选自JB/T 6446—92)	226	11.4 弹性变形真空计	285
7.6.1 真空阀门漏气速率(简称漏率)的测试	226	11.4.1 机械传动式弹性变形真空计	285
7.6.2 真空阀门流导的测试	228	11.4.2 电容式薄膜真空计	285
7.6.3 真空阀门寿命的测试	228	11.4.3 振膜式真空计	286
第8章 真空密封	229	11.5 热传导真空计	287
8.1 概述	229	11.5.1 热传导真空计的工作原理、测量范围及特点	287
8.2 永久密封连接	229	11.5.2 电阻真空计	288
8.2.1 封接	229	11.5.3 热偶真空计	290
8.2.2 焊接	229	11.6 电离真空计	291
8.3 可拆密封连接	232	11.6.1 热阴极电离真空计	291
8.3.1 柔性密封连接	232	11.6.2 冷阴极电离真空计	298
8.3.2 螺纹密封连接	233	11.6.3 放射性电离真空计	300
8.3.3 法兰与垫圈相结合的密封连接	233	11.7 磁悬浮转子真空计	301
8.4 真空动密封连接	245	11.7.1 非对称型磁悬浮转子真空计的结构及工作原理	301
8.4.1 真空动密封连接的分类	245	11.7.2 磁悬浮转子真空计的特点	302
8.4.2 接触式真空动密封连接	246	11.8 分压力真空计	302
8.4.3 非接触式真空动密封连接	252	11.8.1 分压力测量或残余气体分析的过程及主要性能	302
第9章 除尘器和挡油器	260	11.8.2 四极滤质器	302
9.1 除尘器	260	11.8.3 射频质谱计	303
9.1.1 几种除尘器的工作原理	260	11.8.4 飞行时间质谱仪	304
9.1.2 除尘过滤器的种类	262	11.8.5 识谱技术	304
9.2 挡油器	263	11.9 真空计校准	305
9.2.1 挡油帽	263	11.9.1 绝对真空计校准法	305
9.2.2 挡油板	264	11.9.2 静态膨胀法	305
9.2.3 冷阱	266	11.9.3 动态流导法	306
第10章 观察窗和电极导入部件	268	11.9.4 副标准真空计校准法	307
10.1 观察窗	268	11.10 真空测量技术	308
10.1.1 观察窗的结构类型	268	11.10.1 气体种类对真空测量的影响	308
10.1.2 真空设备常用的观察窗标准(SJ 1774—81)	270	11.10.2 温度对真空测量的影响	308
10.1.3 观察窗的设计要点	270	11.10.3 规管安装位置和方法对真空测量的	
10.2 真空室电极导入部件	271		
10.2.1 电极导入部件密封的设计要求	271		
10.2.2 电极导入部件的结构	271		
第11章 真空测量仪器	277		
11.1 概述	277		
11.1.1 真空测量的研究对象	277		
11.1.2 真空度量值的单位	277		

影响	308
11.10.4 规管吸放气作用对真空测量的影响	309
11.10.5 热表面与气体相互作用对真空测量的影响	309
11.10.6 管规和裸规的差异	309

第3篇 真空工程中常用的真空系统

第12章 常用真空系统的组成与安装

12.1 真空系统的种类及工作状态	311
12.2 真空室(被抽容器)	312
12.2.1 真空室的门	312
12.2.2 真空室的冷却	313
12.2.3 真空室的特殊结构	314
12.3 常用真空系统的安装、调试与维护	314
12.3.1 真空系统的安装	314
12.3.2 真空系统的调试及日常维护	314

第13章 真空容器的设计与计算

13.1 真空容器设计的一般知识	315
13.1.1 薄壳壁厚与设计压力	315
13.1.2 容器的壁厚附加量与最小壁厚	315
13.1.3 材料的许用应力与焊缝系数	315
13.1.4 容器开孔与开孔补强	316
13.1.5 压力试验	319
13.2 真空容器壳体的设计	320
13.2.1 圆筒形壳体的设计	320
13.2.2 球形壳体的设计	323
13.2.3 圆锥形壳体的设计	323
13.2.4 盒形壳体设计	323
13.2.5 椭圆球形壳体的设计	324
13.2.6 圆环形壳体	325
13.3 圆筒体加强圈的设计	326
13.3.1 概述	326
13.3.2 图表法计算加强圈	327
13.4 封头设计	327
13.4.1 外压球形封头	327
13.4.2 外压凸形封头	327
13.4.3 锥形封头	332
13.4.4 平盖	333
13.4.5 同圆筒体连接的加强球盖	335
13.4.6 井字加强圆形球盖	336
13.5 开孔加强设计	336
13.5.1 概述	336
13.5.2 封头开孔补强	336
13.5.3 外压容器的开孔补强	337
13.5.4 内压圆筒体开孔补强	337
13.5.5 开孔补强计算	337
13.5.6 并联开孔的补强	338
13.5.7 加强方法	338
13.6 法兰及管道设计	338
13.6.1 螺栓计算	338

13.6.2 内压法兰计算	340
13.6.3 外压法兰计算	342
13.6.4 快开法兰计算	342
13.6.5 管道壁厚计算	343

第14章 真空系统的设计与计算

14.1 概述	345
14.1.1 气体流动状态的判别	345
14.1.2 真空系统的有效抽速	345
14.2 管道的流导计算	345
14.2.1 流导和流导几率	345
14.2.2 流导的计算	346
14.3 抽气时间的计算	348
14.3.1 真空系统的抽气方程	348
14.3.2 低真空下抽气时间的计算	349
14.3.3 高真空下抽气时间的计算	351
14.3.4 几个典型真空度的抽气时间	351
14.3.5 有关超高真空抽气的一些问题	351
14.4 真空系统设计	353
14.4.1 选主泵	353
14.4.2 配泵	354
14.4.3 贮气罐和维持泵	355
14.4.4 真空系统的典型形式	355
14.5 真空系统设计实例	358
14.5.1 镀膜设备真空系统的设计	358
14.5.2 新型电子束熔炼炉的真空系统设计	359
14.5.3 大型准无油真空除气炉的设计	360
14.5.4 真空汽相干燥设备的真空系统设计	361
14.5.5 76km 高空环境模拟试验舱的真空系统设计	363
14.5.6 SSRF 增强器真空系统设计	364

第15章 真空系统的检漏

15.1 概述	365
15.1.1 真空检漏的目的及一些基本概念	365
15.1.2 漏气的判断方法	365
15.1.3 漏孔、漏率、最大允许漏率	365
15.1.4 漏孔的气流特性	366
15.2 检漏方法分类及对检漏方法的要求与选择	367
15.2.1 压力检漏法	367
15.2.2 真空检漏法	367
15.2.3 背压检漏法	368
15.2.4 各种检漏方法小结	368
15.2.5 对检漏方法的要求与选择	368
15.3 各种检漏方法	369
15.3.1 静态升压法	369
15.3.2 气泡检漏法	370
15.3.3 氦气检漏法	371
15.3.4 真空计检漏法	372
15.3.5 离子泵检漏法	373

15.3.6	氢-钯检漏法	373	第 17 章 真空热处理设备	495
15.3.7	荧光检漏法	374	17.1 真空热处理的理论基础	495
15.3.8	放射性同位素检漏法	374	17.1.1 真空热处理的作用	495
15.3.9	慢性漏气的加速检测法	374	17.1.2 真空热处理的特点	496
15.4	真空检漏仪器	375	17.1.3 真空热处理的工艺过程	496
15.4.1	高频火花检漏仪	375	17.1.4 影响真空热处理的工艺参数	497
15.4.2	卤素检漏仪	376	17.2 真空热处理炉的结构设计	499
15.4.3	气敏半导体检漏仪	378	17.2.1 真空热处理炉的分类	500
15.5	氦质谱检漏仪	379	17.2.2 真空热处理炉的结构	501
15.5.1	氦质谱检漏仪的工作原理	379	17.3 真空热处理设备的设计计算	507
15.5.2	氦质谱检漏仪的整体结构	380	17.3.1 设计参数和总体方案的确定	507
15.5.3	氦质谱检漏仪的灵敏度及其校准	383	17.3.2 加热功率计算	507
15.5.4	检漏方法	385	17.3.3 加热体几何尺寸的设计计算	510
15.6	标准漏孔	389	17.3.4 加热体寿命计算	511
15.6.1	标准漏孔及其常用的结构形式	389	17.3.5 水冷却系统的计算	511
15.6.2	标准漏孔的校准	390	17.3.6 气冷风机的设计计算	512
15.6.3	标准漏孔使用中应注意的几个 问题	390	17.3.7 淬火油槽的设计	512
15.7	真空检漏工作的注意事项	390	17.3.8 淬火料筐的传动机构的设计	513
第 4 篇 真空工程技术的主要应用			17.4 真空热处理炉的典型结构及应用	515
第 16 章 真空冶炼设备	393	17.4.1 真空正压气淬和油淬炉的典型 结构	515	
16.1 真空感应炉	393	17.4.2 真空正压气淬的典型应用	517	
16.1.1 真空感应炉概述	393	17.4.3 真空油淬的典型工艺	519	
16.1.2 真空感应加热与熔炼的物理基础	396	17.4.4 真空回火炉的典型结构及应用	519	
16.1.3 真空感应炉的结构设计计算	401	17.4.5 真空渗碳炉及其应用	520	
16.1.4 真空感应炉的参数计算	407	17.4.6 真空热处理设备的选型	520	
16.1.5 真空感应炉的电源	412	第 18 章 真空钎焊与烧结	523	
16.2 真空电弧炉	415	18.1 真空钎焊	523	
16.2.1 真空电弧熔炼概述	415	18.1.1 真空钎焊及其获得优质钎焊接头 的机理	523	
16.2.2 真空中的电弧	416	18.1.2 真空钎焊技术的特点及其应用 领域	525	
16.2.3 真空自耗炉的结构及其设计计算	417	18.1.3 钎焊材料与钎焊辅助材料	526	
16.2.4 真空电弧炉的电源和自耗电极的 控制	433	18.1.4 真空钎焊工艺	532	
16.3 真空电子束炉	443	18.1.5 真空钎焊技术的应用实例	539	
16.3.1 概述	443	18.1.6 真空钎焊设备	548	
16.3.2 电子束加热原理	444	18.2 真空烧结	553	
16.3.3 电子束炉的结构	445	18.2.1 真空烧结技术的应用及特点	553	
16.3.4 熔炼功率、熔化速度和送料速度	450	18.2.2 真空烧结工艺	554	
16.3.5 轴向电子束发生器	453	18.2.3 真空烧结设备	554	
16.3.6 电子束熔炼炉的主回路	462	第 19 章 真空镀膜	561	
16.4 钢液真空炉外精炼	464	19.1 真空蒸发镀膜	561	
16.4.1 概述	464	19.1.1 概述	561	
16.4.2 钢液真空脱气及排除夹杂原理	465	19.1.2 真空蒸发镀膜原理	561	
16.4.3 钢液真空处理方法及炉外精炼手段 的分类	466	19.1.3 蒸发源	566	
16.4.4 钢液炉外精炼的钢种及精炼的冶金 效果	466	19.1.4 蒸发源的蒸发特性及膜厚分布	576	
16.4.5 钢液真空炉外精炼设备	470	19.1.5 真空蒸发镀膜设备	581	
16.4.6 钢液真空炉外精炼设备设计中的 若干问题	486	19.1.6 特殊蒸镀技术	584	
		19.2 真空溅射镀膜	585	
		19.2.1 溅射成膜理论	586	
		19.2.2 真空溅射镀膜方法	594	

19.2.3	直流溅射镀膜	595	20.2.7	圆筒搅拌式真空干燥设备	708
19.2.4	射频溅射镀膜	598	20.2.8	真空振动流动干燥设备	710
19.2.5	磁控溅射镀膜	600	20.2.9	真空带式干燥设备	715
19.2.6	其他溅射方法简介	609	20.2.10	木材真空干燥设备	717
19.3	真空离子镀膜	610	20.3	真空冷冻干燥技术与设备	721
19.3.1	离子镀的类型	610	20.3.1	真空冷冻干燥的基本原理	721
19.3.2	真空离子镀原理及成膜条件	611	20.3.2	真空冷冻干燥设备	726
19.3.3	等离子体在离子镀膜过程中的 作用	612	20.3.3	真空冷冻干燥工艺	741
19.3.4	离子镀中基片负偏压的影响	614	20.4	真空气相干燥	749
19.3.5	等离子镀的离化率与离子能量	615	20.4.1	真空气相干燥的原理	749
19.3.6	离子镀膜性能工艺及其参数选择	616	20.4.2	真空气相干燥设备	754
19.3.7	离子镀的特点及应用	619	第 21 章	真空压力浸渍	767
19.3.8	直流二极管离子镀装置	620	21.1	VPI 技术的基本原理和工艺过程	767
19.3.9	多阴极型离子镀装置	620	21.1.1	VPI 技术的基本原理	767
19.3.10	ARE 活性反应离子镀装置	621	21.1.2	电机 VPI 工艺过程	767
19.3.11	射频放电离子镀装置	623	21.1.3	真空压力浸渍的作用	768
19.3.12	空心阴极离子镀	624	21.2	VPI 工程与设备的总体设计	768
19.3.13	真空阴极电弧离子镀	627	21.2.1	VPI 工程的主要内容	768
19.3.14	热阴极强流电弧离子镀	638	21.2.2	VPI 设备的总体设计	768
19.3.15	磁控溅射离子镀	638	21.3	浸渍罐与贮漆罐的设计	770
19.4	离子注入与离子辅助沉积技术	640	21.3.1	浸渍罐的设计	770
19.4.1	离子注入的理论基础	640	21.3.2	贮漆罐的设计与计算	773
19.4.2	离子注入设备	644	21.4	真空压力浸渍设备的制冷系统	777
19.4.3	离子源	645	21.4.1	制冷系统的选择	777
19.4.4	离子注入表面改性机理	649	21.4.2	保温层厚度的确定	777
19.4.5	离子注入技术的特点	650	21.4.3	冷负荷的计算	777
19.4.6	离子束辅助沉积技术	651	21.5	真空压力浸渍设备的液压系统	778
19.5	化学气相沉积技术	654	21.6	真空压力浸渍设备的加热和输漆系统	779
19.5.1	CVD 技术的原理、特点及应用	654	21.7	浸渍漆	781
19.5.2	常压化学气相沉积 (NPCVD) 技术	656	21.7.1	有溶剂浸渍漆	781
19.5.3	低压化学气相沉积 (LPCVD) 技术	658	21.7.2	无溶剂浸渍漆	782
19.5.4	等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术	660	21.8	VPI 设备的使用与维护	782
19.5.5	其他化学气相沉积法	666	第 22 章	真空蒸馏	783
19.5.6	化学气相沉积技术的应用实例	668	22.1	概述	783
第 20 章	真空干燥	672	22.2	真空蒸馏原理	783
20.1	绪论	672	22.2.1	真空蒸馏的基础知识	783
20.1.1	真空干燥特性	672	22.2.2	真空蒸馏过程的描述	785
20.1.2	真空干燥设备的种类	672	22.3	真空蒸馏装置	787
20.1.3	真空干燥技术与设备的应用	673	22.3.1	间歇式蒸馏装置	787
20.1.4	真空干燥设备的选择	681	22.3.2	半连续蒸馏装置	789
20.2	普通真空干燥技术与设备	683	22.3.3	连续蒸馏装置	789
20.2.1	真空箱式干燥设备	683	22.3.4	连续精馏装置	790
20.2.2	真空耙式干燥设备	688	22.4	分子蒸馏	790
20.2.3	滚筒式真空干燥机	690	22.4.1	分子蒸馏的基本原理	791
20.2.4	双锥回转真空干燥设备	695	22.4.2	分子蒸馏的特点	791
20.2.5	真空转鼓干燥设备	700	22.4.3	分子蒸馏装置的结构	792
20.2.6	真空圆盘刮板干燥设备	703	22.4.4	分子蒸馏装置	793
			22.4.5	分子精馏设备	794
			22.4.6	各种分子蒸馏设备的主要特征	794
			22.4.7	分子蒸馏装置的设计原则	794
			22.4.8	分子蒸馏的控制系统	794

22.4.9 分子蒸馏的应用	796	24.6.4 真吸质量的保证	833
22.4.10 分子蒸馏技术的前景	798	24.6.5 真吸在冬季施工的应用	833
第 23 章 真空包装	799	24.7 真空发生器在真空吸附中的应用	833
23.1 真空包装保鲜食品	799	24.7.1 真空发生器工作原理	833
23.1.1 环境对食品贮藏的影响	799	24.7.2 真空发生器与真空吸盘工作过程	833
23.1.2 真空保鲜原理	799	24.7.3 真空发生器的应用	834
23.1.3 真空包装真空度	800	第 25 章 真空过滤	837
23.1.4 食品氧化与变色的防止	800	25.1 真空过滤的原理及真空过滤机分类	837
23.1.5 真空包装的应用	801	25.1.1 真空过滤原理	837
23.2 真空气体置换保鲜	801	25.1.2 真空过滤机的工作原理	838
23.2.1 真空气体置换保鲜特点	801	25.1.3 真空过滤机的分类	838
23.2.2 气体置换保鲜原理	802	25.2 真空过滤机的设计计算	839
23.2.3 气体置换包装手段	802	25.2.1 真空过滤机参数的选择和计算	839
23.2.4 肉类气体置换保鲜	802	25.2.2 转鼓真空过滤机的功率计算	840
23.2.5 水果和蔬菜保鲜	803	25.2.3 带式真空过滤机的功率计算	841
23.2.6 预制食品保鲜	803	25.2.4 转盘真空过滤机的传动功率计算	842
23.2.7 面包制品保鲜	803	25.3 转鼓式真空过滤机	842
23.3 真空包装材料	803	25.3.1 刮刀卸料式转鼓真空过滤机	842
23.3.1 对包装材料的要求	803	25.3.2 单室型转鼓真空过滤机（无格式 转鼓真空过滤机）	843
23.3.2 复合膜的用途及构成	805	25.3.3 滤布行走式转鼓真空过滤机	843
23.3.3 保持食品风味的高阻隔薄膜材料	805	25.4 圆盘式真空过滤机	844
23.3.4 蔬菜水果保鲜薄膜材料	805	25.4.1 结构与原理	844
23.3.5 保持食品香味的薄膜材料	806	25.4.2 发展趋势	845
23.3.6 鲜蘑菇包装膜材	806	25.4.3 特征及用途	845
23.4 真空包装机	806	25.5 陶瓷圆盘真空过滤机	846
23.4.1 概述	806	25.5.1 结构特征与操作原理	846
23.4.2 台式真空包装机	807	25.5.2 应用	846
23.4.3 单室真空包装机	808	25.5.3 陶瓷圆盘真空过滤机的特点	846
23.4.4 双室真空包装机	809	25.6 带式真空过滤机	846
23.4.5 输送带式真空包装机	811	25.6.1 固定室型真空带式过滤机	847
23.4.6 热成型真空包装机	812	25.6.2 移动室型带式真空过滤机	847
23.4.7 吸管式真空充气包装机	814	25.6.3 滤带间歇运动型真空带式过滤机	848
23.4.8 膨松柔软物品的缩体包装机	814	25.6.4 连续移动盘带式真空过滤机	848
第 24 章 真空输送	816	25.7 真空过滤机的选型	849
24.1 真空输送原理及应用	816	25.8 真空过滤机的应用	851
24.2 真空吸送系统的构成及主要设计参数	817	25.8.1 过滤在选矿工业中的应用	851
24.3 氧化锌粉真空输送设备	819	25.8.2 过滤在冶金生产中的应用（以钴的 冶炼为例）	854
24.3.1 氧化锌粉真空吸送设备的构成	819	25.8.3 真空过滤在煤炭工业中的应用	856
24.3.2 主要设计参数计算	819	25.8.4 真空过滤在化学工业中的应用	857
24.3.3 输送设备主要部件结构	820	25.8.5 过滤在食品生产中的应用（以柠檬 酸的生产为例）	858
24.3.4 主要性能分析	821	第 26 章 空间真空技术	860
24.4 ZS-6 型移动式真空输粮机设计	823	26.1 概述	860
24.4.1 真空输粮机工作原理及特点	823	26.1.1 特性	860
24.4.2 气力系统的设计与计算	824	26.1.2 研究范畴	860
24.4.3 真空输送系统压力损失计算	828	26.1.3 中国空间真空技术发展	860
24.4.4 风机或真空泵的选择	829	26.2 宇宙空间环境	861
24.5 真空吊车	829	26.2.1 真空环境	861
24.6 混凝土真空吸水	830	26.2.2 分子沉环境	862
24.6.1 真空吸水吸盘结构	830		
24.6.2 参数选择	831		
24.6.3 确定施工方案	832		

26.2.3	太阳辐射	862	27.4.1	加速管	901
26.2.4	微重力环境	862	27.4.2	高压加速器真空系统	901
26.2.5	原子氧环境	863	27.4.3	6MeV 串列加速器真空系统	901
26.2.6	诱发的气体环境	863	27.4.4	高能同步加速器	903
26.2.7	空间碎片环境	863	27.4.5	回旋加速器真空系统	906
26.2.8	空间真空环境和航天器的相互 作用	864	27.5	电子感应加速器	906
26.3	在轨航天器中的真空获得技术	864	27.5.1	真空室设计	906
26.3.1	真空获得问题分类	864	27.5.2	韧致辐射强度与真空度的关系	907
26.3.2	航天器周围的分子环境	865	27.5.3	电子感应加速器真空系统	908
26.3.3	航天器真空装置在轨排气技术	865	27.6	直线加速器	908
26.4	极高真空技术	869	27.6.1	真空室设计	908
26.4.1	定义及理论研究	869	27.6.2	行波直线加速器真空系统	909
26.4.2	现状与发展	870	27.6.3	驻波直线加速器真空系统	910
26.4.3	限制极高真空系统极限压力的 因素	870	27.6.4	电子直线加速器真空系统	911
26.4.4	获得极高真空技术的方法	877	第 28 章	离子束刻蚀技术	912
26.4.5	用分子技术获得 10^{-11} Pa 极高 真空	880	28.1	概述	912
26.4.6	极高真空技术的应用	882	28.1.1	离子束刻蚀的特点与应用	912
26.5	空间环境模拟试验与设备	882	28.1.2	国内外发展概况	912
26.5.1	空间环境模拟试验重要性	882	28.1.3	发展前景	913
26.5.2	空间环境模拟基本参数及物理 特性	882	28.2	工作原理和主要性能	913
26.5.3	空间环境模拟试验及设备分类	884	28.2.1	工作原理	913
26.5.4	中国典型空间环境模设备	885	28.2.2	离子束刻蚀机主要性能	914
26.6	发展与展望	891	28.3	真空系统设计	917
26.6.1	真空获得	891	28.3.1	真空系统的设计计算	917
26.6.2	真空测量	892	28.3.2	离子束刻蚀机结构设计要点	918
26.6.3	空间材料的真空效应	892	28.4	离子源的设计	918
26.6.4	质谱与检漏	892	28.4.1	离子源离子引出计算	918
26.6.5	空间真空新工艺	892	28.4.2	离子源结构设计	919
第 27 章	真空在核物理装置中的应用	893	28.5	离子源电源设计	919
27.1	真空在核电工程中的应用	893	28.5.1	电源的特殊要求	919
27.1.1	概述	893	28.5.2	LSK 型电源的特点	920
27.1.2	真空在核电燃料生产中的应用	893	28.6	离子源和真空系统性能测试方法	920
27.1.3	真空在核电设备制造中的应用	893	28.6.1	离子源特性测试方法	920
27.1.4	真空在核电站运行中的应用	894	28.6.2	真空系统性能测试方法	921
27.2	受控核聚变装置	895	28.7	离子束刻蚀设备简介	921
27.2.1	概述	895	28.7.1	LSK-6 型离子束刻蚀机	921
27.2.2	受控核聚变装置真空环境特点	895	28.7.2	LSK-2 (2A) 型离子束刻蚀机	922
27.2.3	真空室	895	28.7.3	DSJ-4 型离子束刻蚀机	922
27.2.4	粒子与器壁的相互作用	896	28.7.4	RIBE-200 型离子束刻蚀机	925
27.2.5	减少等离子体中杂质措施	896	28.7.5	国内外离子束刻蚀机性能指标	925
27.2.6	托卡马克装置	897	28.8	离子束刻蚀工艺	925
27.2.7	HL-2A 托卡马克真空系统及 烘烤	897	28.9	离子束刻蚀机的操作与维护	927
27.2.8	HT-7 超导托卡马克第一壁 He 辉光 硼化	899	28.9.1	LSK 型离子束刻蚀机的操作	927
27.3	加速器真空系统特点	900	28.9.2	维护	928
27.4	高压加速器	901	28.9.3	检修	929
			第 29 章	真空绝热与低温容器和真空 玻璃	931
			29.1	概述	931
			29.2	绝热材料	932
			29.2.1	绝热材料的种类及一般特性	932
			29.2.2	绝热材料的热物理性质	934

29.2.3 绝热材料的选择	935	31.3.1 玻璃	986
29.3 真空绝热机理	936	31.3.2 陶瓷	988
29.3.1 高真空绝热	936	31.3.3 塑料	990
29.3.2 真空粉末及真空纤维绝热	937	31.3.4 碳(石墨)及碳纤维制品	990
29.3.3 真空多层绝热	939	31.3.5 橡胶	992
29.3.4 真空绝热的选择	940	31.4 真空泵油	993
29.4 低温容器	941	31.4.1 机械泵油	993
29.4.1 概述	941	31.4.2 扩散泵油	994
29.4.2 低温容器的种类	944	31.4.3 扩散喷射泵油(增压泵油)	995
29.4.3 低温容器典型结构介绍	944	31.5 辅助密封材料	995
29.4.4 低温容器设计要点	951	31.5.1 真空封蜡	995
29.4.5 低温容器的特性及计算	952	31.5.2 真空封脂	995
29.5 真空绝热管道	956	31.5.3 真空封泥	995
29.6 真空多层绝热夹层抽真空技术	957	31.5.4 真空漆	995
29.6.1 真空多层绝热夹层中的气源	957	31.5.5 真空黏结剂	995
29.6.2 真空多层绝热夹层中的抽真空	958	31.6 吸气剂与吸附剂	996
29.6.3 在真空多层绝热夹层中装吸附剂	958	31.6.1 吸气剂	996
29.7 真空玻璃	958	31.6.2 吸附剂	997
29.7.1 真空玻璃概述	958	31.7 低温制冷系统工作介质	998
29.7.2 真空玻璃的结构和生产制造	959	31.7.1 制冷剂	998
29.7.3 真空玻璃的性能	959	31.7.2 载冷剂(冷媒)	1001
29.7.4 真空玻璃的隔热原理	961	第32章 真空工程中的常用工艺	1004
29.7.5 真空玻璃中的应力	962	32.1 真空材料的表面净化处理	1004
29.7.6 真空玻璃的除气与抽空	962	32.1.1 概述	1004
29.7.7 真空玻璃技术的产业化与市场	963	32.1.2 表面净化处理的基本方法	1004
第5篇 真空工程材料与工艺		32.1.3 清洗的基本程序	1009
第30章 真空材料的性能	965	32.1.4 非金属材料的清洗	1010
30.1 材料的真空性能	965	32.2 真空材料的除气	1010
30.1.1 真空系统平衡方程	965	32.2.1 材料除气的基本方法	1010
30.1.2 材料的扩散与渗透性	965	32.2.2 玻璃及陶瓷材料的除气	1013
30.1.3 材料的放气	969	32.2.3 金属材料的除气	1014
30.1.4 材料的蒸发、升华、蒸气压	972	32.2.4 电真空器件的除气	1016
30.2 真空材料的其他性能及选材原则	974	32.2.5 超高真空系统的烘烤除气	1016
30.2.1 真空材料的其他性能	974	32.2.6 烘烤除气装置	1018
30.2.2 真空材料的选材原则	974	32.3 真空工程用的焊接技术	1018
第31章 真空工程常用材料	976	32.3.1 真空技术对焊接工艺的要求	1018
31.1 真空材料的种类	976	32.3.2 真空焊接的分类	1018
31.2 金属材料	976	32.3.3 氩弧焊	1019
31.2.1 铸件	976	32.3.4 电子束焊	1024
31.2.2 碳钢及不锈钢	976	32.3.5 激光束焊接	1026
31.2.3 有色金属	978	32.3.6 超声波焊接	1026
31.2.4 贵重金属	981	32.4 真空工程封接技术	1027
31.2.5 软金属	982	32.4.1 玻璃-玻璃封接	1027
31.2.6 难熔金属	983	32.4.2 玻璃-金属封接	1028
31.2.7 汞(Hg)	985	32.4.3 陶瓷-金属材料的封接	1031
31.2.8 合金	986	32.4.4 其他材料的封接	1034
31.3 非金属材料	986	参考文献	1035