

高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

# 真空技术

王晓冬 巴德纯 张世伟 张以忱 编著



冶金工业出版社

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



GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

ISBN 7-5024-3571-9



9 787502 435714 >

ISBN 7-5024-3571-9

TB · 93 定价 50.00 元

销售分类建议：机电设备

高等学校规划教材

# 真空技术

王晓冬 巴德纯 张世伟 张以忱 编著

北 京  
冶金工业出版社  
2006

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了真空技术的基础理论、真空获得设备、真空测量仪表、检漏技术、真空系统设计的原理和方法。主要内容包括：稀薄气体分子运动理论、吸附与脱附、真空中的电现象、真空中的气体流动、真空泵的分类与性能、容积式真空泵、动量传递式真空泵、气体捕集式真空泵、真空测量、真空检漏、真空系统的组成、真空系统元件及连接、真空系统中常用材料和真空卫生、真空系统的设计计算等。本书既注重真空技术中的知识体系，又反映真空技术中的最新发展，具有很强的针对性和实用性。

本书可作为高等院校真空技术与设备、过程设备与控制工程、材料科学与工程、物理等相关专业本科生、研究生的学习教材，也可供真空技术应用、真空设备制造与使用单位的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

真空技术/王晓冬等编著. —北京：冶金工业出版社，  
2006.9

高等学校规划教材

ISBN 7-5024-3571-9

I. 真… II. 王… III. 真空技术-高等学校-教材  
IV. TB7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 039972 号

出版人 曹胜利（北京沙滩嵩祝院北巷 39 号，邮编 100009）

责任编辑 杨 敏 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2006 年 9 月第 1 版，2006 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；27.5 印张；730 千字；422 页；1-3000 册

50.00 元

冶金工业出版社发行部 电话：(010) 64044283 传真：(010) 64027893

冶金书店 地址：北京东四西大街 46 号 (100711) 电话：(010) 65289081

（本社图书如有印装质量问题，本社发行部负责退换）

## 冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名                    | 作 者    | 定价(元)  |
|------------------------|--------|--------|
| 真空获得设备 (第2版)           | 杨乃恒 主编 | 29.80  |
| 真空材料                   | 张以忱 等编 | 29.00  |
| 电子枪与离子束技术              | 张以忱 编著 | 29.00  |
| 机电一体化技术基础与产品设计 (本科教材)  | 刘 杰 等编 | 38.00  |
| 现代建筑设备工程 (本科教材)        | 郑庆红 等编 | 45.00  |
| 机器人技术基础 (本科教材)         | 柳洪义 等编 | 23.00  |
| 机械优化设计方法 (第3版) (本科教材)  | 陈立周 主编 | 29.00  |
| 机械制造装备设计 (本科教材)        | 王启义 主编 | 35.00  |
| 机械故障诊断基础 (本科教材)        | 廖伯瑜 主编 | 25.80  |
| 液压传动 (本科教材)            | 刘春荣 等编 | 20.00  |
| 机械故障诊断的分形方法            | 石博强 等著 | 25.00  |
| 设备故障诊断工程               | 虞和济 等编 | 165.00 |
| 故障智能诊断系统的理论与方法         | 王道平 等著 | 16.00  |
| 液压润滑系统的清洁度控制           | 胡邦喜 编著 | 16.00  |
| 矫直原理与矫直机械 (第2版)        | 崔 甫 著  | 42.00  |
| 冶金通用机械与冶炼设备 (职业技术学院教材) | 王庆春 主编 | 45.00  |
| 机械安装与维护 (职业技术学院教材)     | 张树海 主编 | 22.00  |
| 冶金过程检测与控制 (职业技术学院教材)   | 郭爱民 主编 | 20.00  |
| 工厂电气控制设备 (职业技术学院教材)    | 赵秉衡 主编 | 20.00  |
| 电气设备故障检测与维护 (工人培训教材)   | 王国贞 主编 | 28.00  |
| 冶金液压设备及其维护 (工人培训教材)    | 任占海 主编 | 35.00  |
| 冶炼设备维护与检修 (工人培训教材)     | 时彦林 主编 | 49.00  |
| 机械基础知识 (工人培训教材)        | 马保振 主编 | 26.00  |

双峰检

# 前 言

现代科学技术的交叉渗透,极大地丰富了真空科学与技术的内涵。近几十年来,真空技术融入了许多尖端科学技术,并一起得到迅速发展,从超大规模集成电路的制作,到大型加速器的运转;从受控热核聚变到人造卫星、航天器,直至民用装饰品的生产,都与真空技术密切相关。

《真空技术》系统介绍了真空技术的基础理论、真空获得设备、真空测量仪表、检漏技术、真空系统设计的原理和方法,包括:稀薄气体分子运动理论,气体的吸附和脱附,真空中的电现象,真空中气体在管道中的流动,容积式真空泵、动量传递式真空泵、气体捕集式真空泵的工作原理、结构特点和设计方法,真空测量仪器仪表的原理和使用,真空检漏方法,真空系统的组成,真空系统元件,真空密封,真空材料和真空卫生等内容。

本书是东北大学真空与流体工程研究中心教师多年教学和科研成果总结,既注重真空技术中的知识体系,又反映真空技术中的最新发展,具有很强的针对性和实用性,可作为真空技术与设备、过程设备与控制工程、材料、物理等相关专业本科生、研究生的学习教材,也可供真空技术应用、真空设备制造、使用单位的工程技术人员参考。

本书第2章、第3章、第5章、第8章第2、3、4节由王晓冬编写,第1章、第6章、第7章、第8章第1节由巴德纯编写,第4章、第10章、第11章由张世伟编写,第9章、第12章、第13章、第14章、第15章由张以忱编写。全书由王晓冬统稿,杨乃恒教授主审。

本书的出版,得到了东北大学的资助。在编写过程中,始终得到杨乃恒教授的关心和帮助,在此表示衷心感谢。

由于水平和实践经验所限,书中的不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

2006年6月

于东北大学

# 目 录

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>1 绪论</b>                   | <b>1</b>  |
| 1.1 何为真空                      | 1         |
| 1.2 真空度的表征及真空区域的划分            | 1         |
| 1.3 真空技术的历史回顾                 | 2         |
| 1.4 不同真空状态下的真空工艺技术            | 3         |
| 1.5 真空技术的应用领域                 | 4         |
| 1.5.1 真空在输运、吸引、起吊及真空造型等设备中的应用 | 5         |
| 1.5.2 真空在电真空器件中的应用            | 5         |
| 1.5.3 真空在冶金工业中的应用             | 5         |
| 1.5.4 真空在镀膜工业中的应用             | 7         |
| 1.5.5 真空在食品包装及冷冻干燥工业中的应用      | 8         |
| 1.5.6 真空在航天工业中的应用             | 9         |
| 1.5.7 真空在加速器及受控核聚变中的应用        | 10        |
| 1.5.8 真空在表面科学研究中的应用           | 10        |
| <b>2 稀薄气体分子运动理论</b>           | <b>11</b> |
| 2.1 气体在平衡状态下的物理特性             | 11        |
| 2.1.1 理想气体定律                  | 11        |
| 2.1.2 气体分子的速率分布               | 13        |
| 2.1.3 气体分子平均碰撞频率和平均自由程        | 14        |
| 2.1.4 气体分子与壁面的碰撞及漫反射          | 16        |
| 2.2 气体的迁移过程                   | 17        |
| 2.2.1 气体中的迁移现象                | 17        |
| 2.2.2 低压下气体的迁移                | 20        |
| 2.3 蒸发和凝结                     | 26        |
| 2.3.1 蒸气及蒸气压                  | 26        |
| 2.3.2 蒸发率和凝结率                 | 26        |
| <b>3 吸附与脱附</b>                | <b>28</b> |
| 3.1 吸附现象及吸附机理                 | 28        |
| 3.1.1 吸附现象                    | 28        |
| 3.1.2 吸附机理                    | 29        |
| 3.2 吸附和脱附过程的描述                | 31        |
| 3.2.1 吸附速率                    | 31        |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 3.2.2 脱附速率 .....           | 32        |
| 3.2.3 吸附等温线 .....          | 33        |
| 3.3 溶解和渗透 .....            | 35        |
| 3.3.1 气体在固体中的溶解 .....      | 35        |
| 3.3.2 气体在固体中的扩散和渗透 .....   | 35        |
| <b>4 真空中的电现象 .....</b>     | <b>36</b> |
| 4.1 电子发射 .....             | 36        |
| 4.1.1 电子发射基础 .....         | 36        |
| 4.1.2 热电子发射 .....          | 37        |
| 4.1.3 场致发射 .....           | 38        |
| 4.1.4 光电子发射 .....          | 38        |
| 4.1.5 二次电子发射 .....         | 39        |
| 4.2 气体放电 .....             | 42        |
| 4.2.1 气体放电中的粒子碰撞 .....     | 42        |
| 4.2.2 气体放电实验与特性 .....      | 44        |
| 4.2.3 汤生放电 .....           | 45        |
| 4.2.4 破裂电压与帕邢定律 .....      | 47        |
| 4.2.5 辉光放电 .....           | 48        |
| 4.2.6 弧光放电 .....           | 52        |
| 4.2.7 高频放电 .....           | 53        |
| 4.2.8 潘宁放电 .....           | 54        |
| <b>5 真空中的气体流动 .....</b>    | <b>55</b> |
| 5.1 气体流动状态及其判别 .....       | 55        |
| 5.1.1 稀薄气体的流动状态 .....      | 55        |
| 5.1.2 流动状态的判别 .....        | 55        |
| 5.2 气体的流量和管道流导 .....       | 56        |
| 5.2.1 气体的流量 .....          | 56        |
| 5.2.2 管道的流导 .....          | 57        |
| 5.2.3 管路元件串联、并联的流导计算 ..... | 58        |
| 5.3 简单管道的流导计算 .....        | 58        |
| 5.3.1 黏滞流时管道的流导计算 .....    | 58        |
| 5.3.2 分子流时管道的流导计算 .....    | 66        |
| 5.3.3 黏滞-分子流时管道的流导计算 ..... | 80        |
| <b>6 真空泵的分类和性能 .....</b>   | <b>82</b> |
| 6.1 真空泵的分类 .....           | 82        |
| 6.1.1 气体传输泵 .....          | 82        |
| 6.1.2 气体捕集泵 .....          | 83        |
| 6.2 真空泵性能表示法 .....         | 83        |



|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 6.3 真空泵的用途及使用范围 .....       | 85         |
| 6.3.1 真空泵的用途 .....          | 85         |
| 6.3.2 各种真空泵的使用范围 .....      | 85         |
| 6.4 真空泵的型号及规格表示法 .....      | 86         |
| <b>7 容积式真空泵 .....</b>       | <b>89</b>  |
| 7.1 液环真空泵 .....             | 89         |
| 7.1.1 液环泵的工作原理及特点 .....     | 89         |
| 7.1.2 液环泵的基本类型与结构 .....     | 90         |
| 7.1.3 液环泵的使用与注意事项 .....     | 91         |
| 7.2 往复式真空泵 .....            | 93         |
| 7.2.1 概述 .....              | 93         |
| 7.2.2 往复泵的结构和工作原理 .....     | 93         |
| 7.2.3 往复泵的主要性能参数 .....      | 94         |
| 7.2.4 往复泵设计中的几个问题 .....     | 98         |
| 7.3 油封机械泵 .....             | 101        |
| 7.3.1 旋片式油封真空泵 .....        | 101        |
| 7.3.2 滑阀式油封机械泵 .....        | 113        |
| 7.4 罗茨真空泵 .....             | 117        |
| 7.4.1 概述 .....              | 117        |
| 7.4.2 罗茨泵的工作原理及其结构特点 .....  | 118        |
| 7.4.3 罗茨泵主要参数的确定 .....      | 121        |
| 7.4.4 罗茨泵的转子型线 .....        | 128        |
| 7.4.5 罗茨泵主要尺寸的确定 .....      | 129        |
| 7.4.6 多级罗茨真空泵 .....         | 130        |
| 7.5 干式真空泵 .....             | 131        |
| 7.5.1 爪式真空泵 .....           | 131        |
| 7.5.2 涡旋式真空泵 .....          | 140        |
| <b>8 动量传递式真空泵 .....</b>     | <b>143</b> |
| 8.1 分子真空泵 .....             | 143        |
| 8.1.1 概述 .....              | 143        |
| 8.1.2 牵引分子泵的抽气原理与结构特点 ..... | 144        |
| 8.1.3 多槽螺旋式牵引分子泵的设计原理 ..... | 147        |
| 8.1.4 涡轮分子泵的抽气原理及结构特点 ..... | 154        |
| 8.1.5 涡轮分子泵抽气性能的计算 .....    | 157        |
| 8.2 喷射真空泵 .....             | 164        |
| 8.2.1 概述 .....              | 164        |
| 8.2.2 水喷射泵 .....            | 164        |
| 8.2.3 水蒸气喷射泵 .....          | 167        |
| 8.3 油扩散泵 .....              | 177        |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 8.3.1 | 工作原理 .....              | 178 |
| 8.3.2 | 扩散泵的结构 .....            | 178 |
| 8.3.3 | 扩散泵的性能 .....            | 180 |
| 8.3.4 | 扩散泵返油及减少返油的措施 .....     | 182 |
| 8.3.5 | 超高真空扩散泵 .....           | 183 |
| 8.4   | 油扩散喷射真空泵 .....          | 183 |
| 8.4.1 | 工作原理和结构特点 .....         | 183 |
| 8.4.2 | 抽气特性 .....              | 185 |
| 8.4.3 | 泵油及减少返油的措施 .....        | 187 |
| 9     | 气体捕集式真空泵 .....          | 189 |
| 9.1   | 低温泵 .....               | 189 |
| 9.1.1 | 概述 .....                | 189 |
| 9.1.2 | 低温抽气原理 .....            | 189 |
| 9.1.3 | 低温冷凝抽气的基本方程 .....       | 190 |
| 9.1.4 | 低温吸附抽气 .....            | 191 |
| 9.1.5 | 低温捕集抽气过程 .....          | 191 |
| 9.1.6 | 低温泵分类及基本结构 .....        | 192 |
| 9.1.7 | 低温泵的极限压力 .....          | 195 |
| 9.1.8 | 低温泵的抽速 .....            | 198 |
| 9.1.9 | 低温泵的其他参数 .....          | 200 |
| 9.2   | 溅射离子泵 .....             | 203 |
| 9.2.1 | 概述 .....                | 203 |
| 9.2.2 | 溅射离子泵基本结构和工作原理 .....    | 203 |
| 9.2.3 | 离子泵抽气过程中的 Ar 不稳定性 ..... | 205 |
| 9.2.4 | 泵的工作特性 .....            | 207 |
| 9.2.5 | 溅射离子泵的使用维护 .....        | 208 |
| 9.3   | 分子筛吸附泵 .....            | 208 |
| 9.3.1 | 分子筛的结构 .....            | 208 |
| 9.3.2 | 分子筛的抽气原理 .....          | 209 |
| 9.3.3 | 分子筛吸附泵的结构形式 .....       | 210 |
| 9.3.4 | 低温吸附泵的特性 .....          | 211 |
| 9.4   | 钛升华泵 .....              | 212 |
| 9.4.1 | 概述 .....                | 212 |
| 9.4.2 | 泵的工作原理与抽气性能 .....       | 212 |
| 9.4.3 | 钛升华器的结构 .....           | 214 |
| 9.5   | 电离升华泵 .....             | 215 |
| 9.5.1 | 电离升华泵的工作原理 .....        | 215 |
| 9.5.2 | 电离器的结构 .....            | 216 |
| 9.6   | 锆铝合金吸气泵 .....           | 216 |
| 9.6.1 | 锆铝吸气泵的结构及其抽气原理 .....    | 217 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 9.6.2 铅铝吸气泵的工作条件 .....            | 219        |
| 9.6.3 铅铝吸气泵的主要结构尺寸 .....          | 219        |
| <b>10 真空测量 .....</b>              | <b>221</b> |
| 10.1 概述 .....                     | 221        |
| 10.1.1 真空测量的研究对象 .....            | 221        |
| 10.1.2 真空度量值的单位 .....             | 221        |
| 10.1.3 真空计的分类及测量范围 .....          | 222        |
| 10.1.4 真空测量的特点及真空计的选用原则 .....     | 223        |
| 10.2 液位式真空计 .....                 | 224        |
| 10.2.1 开式 U 形管真空计的测量原理 .....      | 224        |
| 10.2.2 闭式 U 形管真空计的测量原理 .....      | 225        |
| 10.3 压缩式真空计 .....                 | 225        |
| 10.3.1 压缩式真空计的结构与原理 .....         | 225        |
| 10.3.2 压缩式真空计的测量刻度方法及灵敏度 .....    | 226        |
| 10.3.3 压缩式真空计的常用形式 .....          | 228        |
| 10.4 弹性变形真空计 .....                | 229        |
| 10.4.1 机械传动式弹性变形真空计 .....         | 229        |
| 10.4.2 电容式薄膜真空计 .....             | 230        |
| 10.5 热传导真空计 .....                 | 232        |
| 10.5.1 热传导真空计的工作原理、测量范围及特点 .....  | 232        |
| 10.5.2 电阻真空计 .....                | 233        |
| 10.5.3 热偶真空计 .....                | 234        |
| 10.6 电离真空计 .....                  | 236        |
| 10.6.1 热阴极电离真空计 .....             | 237        |
| 10.6.2 冷阴极电离真空计 .....             | 245        |
| 10.6.3 放射性电离真空计 .....             | 249        |
| 10.7 分压力真空计 .....                 | 249        |
| 10.7.1 分压力测量或残余气体分析的过程及主要性能 ..... | 249        |
| 10.7.2 四极滤质器 .....                | 251        |
| 10.7.3 射频质谱计 .....                | 252        |
| 10.7.4 飞行时间质谱仪 .....              | 253        |
| 10.7.5 识谱技术 .....                 | 253        |
| 10.8 真空计校准 .....                  | 255        |
| 10.8.1 绝对真空计校准法 .....             | 255        |
| 10.8.2 静态膨胀法 .....                | 256        |
| 10.8.3 动态流导法 .....                | 256        |
| 10.8.4 副标准真空计校准 .....             | 257        |
| 10.9 真空测量技术 .....                 | 257        |
| 10.9.1 气体种类对真空测量的影响 .....         | 257        |
| 10.9.2 温度对真空测量的影响 .....           | 258        |

|           |                          |            |
|-----------|--------------------------|------------|
| 10.9.3    | 规管安装位置和方法对真空测量的影响 .....  | 258        |
| 10.9.4    | 规管吸放气作用对真空测量的影响 .....    | 259        |
| 10.9.5    | 热表面与气体相互作用对真空测量的影响 ..... | 260        |
| 10.9.6    | 管规和裸规的差异 .....           | 260        |
| <b>11</b> | <b>真空检漏 .....</b>        | <b>262</b> |
| 11.1      | 概述 .....                 | 262        |
| 11.1.1    | 真空检漏的目的及一些基本概念 .....     | 262        |
| 11.1.2    | 漏孔的判断方法 .....            | 262        |
| 11.1.3    | 漏孔、漏率、最大允许漏率 .....       | 263        |
| 11.1.4    | 漏孔的气流特性 .....            | 265        |
| 11.2      | 检漏方法分类及对检漏方法的要求与选择 ..... | 266        |
| 11.2.1    | 压力检漏法 .....              | 266        |
| 11.2.2    | 真空检漏法 .....              | 267        |
| 11.2.3    | 背压检漏法 .....              | 267        |
| 11.2.4    | 对检漏方法的要求与选择 .....        | 268        |
| 11.3      | 各种检漏方法 .....             | 268        |
| 11.3.1    | 静态升压法 .....              | 268        |
| 11.3.2    | 气泡检漏法 .....              | 269        |
| 11.3.3    | 氨气检漏法 .....              | 271        |
| 11.3.4    | 真空计检漏法 .....             | 272        |
| 11.3.5    | 离子泵检漏法 .....             | 273        |
| 11.3.6    | 氢-钨检漏法 .....             | 274        |
| 11.3.7    | 荧光检漏法 .....              | 275        |
| 11.3.8    | 放射性同位素检漏法 .....          | 275        |
| 11.3.9    | 慢性漏气的加速检测法 .....         | 276        |
| 11.4      | 真空检漏仪器 .....             | 276        |
| 11.4.1    | 高频火花检漏仪 .....            | 276        |
| 11.4.2    | 卤素检漏仪 .....              | 278        |
| 11.4.3    | 气敏半导体检漏仪 .....           | 280        |
| 11.5      | 氨质谱检漏仪 .....             | 281        |
| 11.5.1    | 氨质谱检漏仪的工作原理 .....        | 281        |
| 11.5.2    | 氨质谱检漏仪的整体结构 .....        | 283        |
| 11.5.3    | 氨质谱检漏仪的灵敏度 .....         | 287        |
| 11.5.4    | 氨质谱检漏仪的检漏方法 .....        | 290        |
| 11.6      | 标准漏孔 .....               | 294        |
| 11.7      | 真空检漏工作的注意事项 .....        | 297        |
| <b>12</b> | <b>真空系统的组成 .....</b>     | <b>300</b> |
| 12.1      | 真空系统的形式 .....            | 300        |
| 12.2      | 真空机组 .....               | 301        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 12.2.1 低真空抽气机组 .....           | 301        |
| 12.2.2 中真空抽气机组 .....           | 302        |
| 12.2.3 高真空抽气机组 .....           | 303        |
| 12.2.4 超高真空抽气机组 .....          | 304        |
| 12.3 典型真空系统 .....              | 304        |
| 12.3.1 粗真空系统 .....             | 304        |
| 12.3.2 低真空系统 .....             | 304        |
| 12.3.3 中真空系统 .....             | 305        |
| 12.3.4 高真空系统 .....             | 305        |
| 12.3.5 超高真空系统 .....            | 305        |
| 12.4 真空系统的基本操作规则 .....         | 307        |
| <b>13 真空系统元件及连接 .....</b>      | <b>308</b> |
| 13.1 真空阀门 .....                | 308        |
| 13.1.1 真空阀的分类与型号 .....         | 308        |
| 13.1.2 真空阀门的工作形式 .....         | 309        |
| 13.1.3 阀门密封结构 .....            | 315        |
| 13.2 捕集器(阱)与除尘器 .....          | 320        |
| 13.2.1 捕集器(阱) .....            | 320        |
| 13.2.2 除尘器 .....               | 326        |
| 13.3 真空继电器 .....               | 332        |
| 13.3.1 无触点式真空继电器 .....         | 332        |
| 13.3.2 触点式真空继电器 .....          | 333        |
| 13.4 可拆卸密封连接 .....             | 334        |
| 13.4.1 密封材料与密封结构 .....         | 334        |
| 13.4.2 密封圈密封力的计算 .....         | 341        |
| 13.4.3 真空法兰连接 .....            | 344        |
| 13.5 运动导入与动密封连接 .....          | 349        |
| 13.5.1 运动导入概述 .....            | 349        |
| 13.5.2 接触式动密封连接 .....          | 349        |
| 13.5.3 非接触式动密封连接 .....         | 357        |
| 13.5.4 柔性连接密封 .....            | 362        |
| 13.6 引入接口 .....                | 364        |
| 13.6.1 电的引入 .....              | 364        |
| 13.6.2 观察窗 .....               | 370        |
| <b>14 真空系统中常用材料和真空卫生 .....</b> | <b>372</b> |
| 14.1 真空材料的要求与分类 .....          | 372        |
| 14.1.1 材料的真空性能要求 .....         | 372        |
| 14.1.2 真空材料的其他性能要求 .....       | 374        |
| 14.1.3 真空材料的分类 .....           | 374        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 14.1.4 真空材料的选材原则 .....           | 375 |
| 14.2 金属及其合金材料 .....              | 376 |
| 14.2.1 铸件 .....                  | 376 |
| 14.2.2 碳钢及不锈钢 .....              | 376 |
| 14.2.3 有色金属 .....                | 377 |
| 14.2.4 贵金属 .....                 | 379 |
| 14.2.5 软金属 .....                 | 380 |
| 14.2.6 难熔金属 .....                | 380 |
| 14.2.7 汞 (Hg) .....              | 381 |
| 14.2.8 合金材料 .....                | 382 |
| 14.3 非金属材料 .....                 | 382 |
| 14.3.1 玻璃 .....                  | 382 |
| 14.3.2 陶瓷 .....                  | 384 |
| 14.3.3 塑料 .....                  | 386 |
| 14.3.4 炭 (石墨) 及碳纤维制品 .....       | 387 |
| 14.3.5 橡胶材料 .....                | 387 |
| 14.3.6 辅助密封材料 .....              | 389 |
| 14.3.7 吸气剂与吸附剂 .....             | 390 |
| 14.4 真空卫生 .....                  | 392 |
| 14.4.1 材料表面常见的污染形式 .....         | 392 |
| 14.4.2 材料表面净化 .....              | 393 |
| 14.4.3 表面净化处理的基本方法 .....         | 393 |
| 14.4.4 放电清洗 .....                | 395 |
| 14.4.5 气体 (氮气) 冲洗 .....          | 396 |
| 14.4.6 非金属材料的清洗 .....            | 396 |
| 14.4.7 清洗的基本程序 .....             | 396 |
| 14.4.8 清洗程序及注意事项 .....           | 397 |
| 14.4.9 清洁零件的存放 .....             | 397 |
| 15 真空系统的设计计算 .....               | 399 |
| 15.1 气体负荷的计算 .....               | 399 |
| 15.1.1 真空室内的总气体负荷 .....          | 399 |
| 15.1.2 漏气流量的计算 .....             | 399 |
| 15.1.3 放气流量的计算 .....             | 400 |
| 15.1.4 渗透气体流量的计算 .....           | 400 |
| 15.1.5 工艺过程中真空室内产生的气体流量的计算 ..... | 401 |
| 15.1.6 大气压下的气体量 .....            | 402 |
| 15.2 抽气时间和压力的计算 .....            | 402 |
| 15.2.1 真空系统的抽气方程与有效抽速 .....      | 402 |
| 15.2.2 抽气时间的计算 .....             | 404 |
| 15.2.3 真空室压力计算 .....             | 408 |

---

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 15.3 真空泵的选择与匹配计算 .....          | 411        |
| 15.3.1 主泵的选择与计算 .....           | 411        |
| 15.3.2 前级真空泵（或预抽泵）的选择与计算 .....  | 413        |
| 15.3.3 预抽泵的选配 .....             | 415        |
| 15.3.4 维持泵和储气罐的设计计算 .....       | 415        |
| 15.4 真空系统的结构设计 .....            | 418        |
| 15.5 真空系统的安装调试与操作维护 .....       | 419        |
| 15.5.1 常用真空系统的安装调试 .....        | 419        |
| 15.5.2 常用真空系统的基本操作规则与日常维护 ..... | 420        |
| <b>参考文献</b> .....               | <b>422</b> |

# 1 绪 论

## 1.1 何为真空

物理学上的“真空”是指没有或者不计气体分子和原子存在的物理空间，仅存在各种能量粒子的场空间；另一种是应用物理与技术所讨论的“真空”——低于一个大气压力的稀薄气体的空间状态。“真空”一词来自拉丁语“Vacuum”，意为“空虚”。真空分为自然真空和人造真空。

地球上存在着自然状态的真空。包围地球的大气层，受地心引力（空气分子重力）的作用，离地面越高，空气越稀薄。衡量气体稀密程度的物理量为压力，气体分子处于无规则热运动之中，与物体碰撞时会产生压力。气体分子密度越大，气体压力也越大，在海平面上，大气产生的压力为 101325Pa，约 100kPa，工程中称为一个标准大气压。而珠峰顶处的气压为 32kPa，仅为海平面压力的三分之一左右。

大气压力随着离地面高度的递增而降低，基本按指数规律下降。18km 高空，大气压力降到标准大气压的十分之一，96km 高空，只有百万分之一。地球大气层以外的宇宙真空，称为“空间真空”，它是典型的“自然真空”。

人通过胸腔和腹腔之间的隔膜收缩和放松使肺呼吸，吸气时胸腔压力接近大气压力，呼气时降到半个大气压力以下，即人为的真空状态。进一步，人们运用科技手段，发明了各种真空泵去抽掉密闭容器中的气体，以获得“人为真空”，逐渐形成了“真空科学与技术”这个学科。但是，即使使用现代排气方法获得的最低压力，也只能达到  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  Pa。还远未达到绝对真空。

## 1.2 真空度的表征及真空区域的划分

真空度指气体的稀薄程度，历史上沿用压力来表示。也可以用粒子数密度、分子平均自由程、碰撞频率、单分子层覆盖时间等来描述真空度。真空度的单位为压力单位帕斯卡 Pa。低真空时，有时用“真空度百分数”表示，即

$$(p_0 - p)/p_0 \times 100\%$$

式中  $p_0$  ——大气压力。

真空区域划分主要依据真空状态下气体分子的物理特性、真空获得设备和真空测量仪表的工作范围等。

国家标准（GB 3163—82）的划分是：

低真空： $10^5 \sim 10^2$  Pa；

中真空： $10^2 \sim 10^{-1}$  Pa；

高真空： $10^{-1} \sim 10^{-5}$  Pa；

超高真空： $< 10^{-5}$  Pa。

真空理论工作者推荐的划分：

粗真空： $10^3 \sim 10^5$  Pa；



低真空:  $10^{-1} \sim 10^3$  Pa;

高真空:  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  Pa;

超高真空:  $10^{-12} \sim 10^{-6}$  Pa。

### 1.3 真空技术的历史回顾

最早的真空获得和应用,可追溯到公元前6世纪,那时我国炼铁技术就已相当进步,为了熔化铁,在炼铁炉上配有鼓风设备。最初使用的叫“鞴”的皮囊鼓风、“风箱”鼓风。风箱的作用过程包括:负压吸气和增压排气。与现在的往复式活塞真空泵的作用原理基本相同。这种风箱在公元1367年时已成为炼铁的重要工具。这是最早真空获得和应用的实例。

另有更为典型的例子是中医的拔火罐。两千年前,它已在我国民间用作治病的工具。它很好地利用了空气热胀冷缩、蒸汽冷凝等物理现象来形成罐内真空。

历史上有确切记载获得“真空”的是欧洲人。1643年,意大利人托利拆里做了大气压实验。他用一根一端封闭的细长玻璃管和一个盛水银的小槽,先将水银从玻璃管开口端灌入,直到灌满全管。然后压住开口,将玻璃管倒立在水银槽内,再打开压着的开口。此时玻璃管中的水银高度逐渐下降,直到距离小槽液面以上760mm时,就不再下降了。托利拆里认为在玻璃管上端的空隙内就是“真空”。随后,他的学生帕斯卡等人将此实验搬到山上去做,结果水银柱高度低于760mm,证明大气压与高度有关。

1654年德国人葛利克发明了活塞真空泵。他为了证明大气压的巨大力量,曾做过一次公开实验,葛利克用两个直径119cm的半球合起来,用真空泵将球内空气抽除,因而球的表面上所受的大气压力是很大的,每个半球其横向分力,每个半球用8匹马,才能向相反方向拉开。因为该实验是在德国马德堡做的,故称马德堡半球实验而闻名于世。

1662年英国人玻义耳发现玻义耳定律。到1738年瑞士人伯努利提出气体分子运动论,他们奠定了真空技术最初的理论基础。

从1643年托里拆利获得真空,到1879年爱迪生发明碳丝电灯泡的200多年间,真空技术经历了一个漫长的发展过程。这个过程孕育着电子学的诞生和发展。所谓“电真空器件”就是内部空间为真空的电子器件。真空技术为电子技术的发展开辟了道路。在20世纪初,电子技术的发展,又推动了真空技术的飞速发展。

1905年德国盖得发明了机械泵,1906年皮拉尼发明热阻真空计;1913年和1915年盖得先后发明了分子泵、扩散泵;1916年贝克利发明了热阴极电离计。真空技术迅速从低真空发展到高真空,高真空技术的发展势头一直延续到第二次世界大战。尤其是希克曼1936年发明了分馏式油扩散泵,潘宁1937年发明了冷阴极电离计,使得高真空技术在获得和测量两方面基本上已完善。

1940年以后真空技术在原子能方面得到广泛应用,并在真空冶金、真空镀膜,真空冷冻干燥等方面得到扩展。到1950年,真空范围已提高到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Pa。在某些实验室里也曾达到更高的真空,但还不能测量出来。贝阿德-阿尔伯特1950年发明了B-A规,才为测量超高真空创造了条件。1953年吸气剂-离子泵的出现,使人们可以获得清洁超高真空。

从20世纪50年代到70年代的20多年里,真空技术融入了许多尖端科学技术并一起得到迅速发展。高能加速器、等离子体核聚变装置、微电子学中的超大规模集成电路,特别是航天技术,促使真空技术发生新的飞跃。真空进入了“超清洁”时代,压力范围从 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Pa下降到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$  Pa。一下子真空度提高了七八个数量级,真空系统容积大到数万立方米;低温泵的抽速可高达1000万L/s;甚至有的科学家认为,今天的真空技术,已能获得和测量从