

电子科学与技术

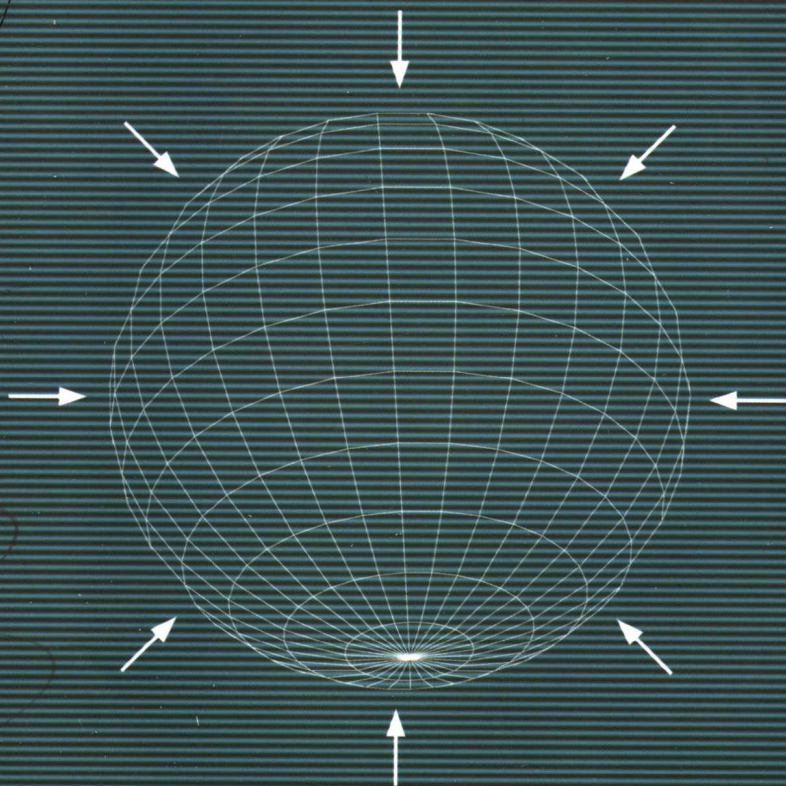


国防科工委「十五」规划
教材

真空技术

(第2版)

●王欲知 陈旭 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

TB7/7

2007



国防科工委“十五”规划教材·电子科学与技术

真空技术

(第2版)

王欲知 陈 旭 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书包括真空技术的物理基础及实际技术两大部分。物理基础部分由稀薄气体理论及固体-气体间的现象两章组成;实际技术部分包括真空获得、总压强测量、分压强测量、真空检漏技术及真空系统等5章。本书注重理论联系实际,科学系统性较完整,对问题的阐述力求做到理论严谨、概念准确。

本书可作为电子物理与技术、半导体、微电子、冶金、真空设备和实验物理等有关专业的研究生及本科生教材使用,也可供有关真空技术应用方面的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空技术/王欲知等编著. —2版. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.6

ISBN 978-7-81077-954-8

I. 真… II. 王… III. 真空技术 IV. TB7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070571 号

真空技术(第2版)

王欲知 陈旭 编著

责任编辑 蔡喆

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

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

E-mail: bhpresse@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:37.25 字数:834千字

2007年6月第2版 2007年6月第1次印刷

印数:4 000册

ISBN 978-7-81077-954-8 定价:55.00元



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,



锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现



志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



第2版前言

1981年、1985年,本书第一作者王欲知教授曾先后编著两本《真空技术》教材,分别由四川人民出版社、四川科技出版社出版发行,一直沿用至今。20余年来,真空技术已获得了迅速发展,原书内容有些陈旧,深感有必要修订再版。

2002年,适逢国防科工委组织申报“十五”规划教材,编者拟将原书进行修订,并承蒙批准,纳入国防科工委重点教材建设计划“十五”规划教材。

本书修订时,严格遵从国防科工委下达的有关精神,并参考立项评审会议有关专家意见,特在以下两方面作出修订、提高。

(1) 为适应使用对象为本科生与研究生兼顾的要求,在基础理论方面,尽可能加以充实及系统化,对一些经典的理论及实验方法也详尽阐述,还对国内的一些成果,适当做了介绍。目的是让学生做研究工作时能更好地理论联系实际。

(2) 原书是作为电子物理与技术专业的教材来编写的。鉴于目前专业的调整、变动,尤其是强调了宽口径,故在修订时不再局限于这个专业,而是希望既适用于电子物理与技术、半导体、微电子、冶金、真空设备、实验物理等有关专业,更期望本书能为在空间科研、核聚变、激光、医药、生物、化工、电机、食品工业等涉及真空技术的科技人员,提供这方面的基础理论及实际知识。

在修订本书时,下列两本书对编者帮助很大:J. M. Lafferty 所著 Foundations of Vacuum Science and Technology; J. F. O'Hanlon 所著 A User's Guide to Vacuum Technology, Second Edition。特此向 Lafferty 博士、O' Hanlon 博士致谢!

需要说明的是,本书第一作者在1961年曾以戴浩笔名编写了《真空技术》一书,由人民教育出版社出版。该书也曾广泛使用了20年,不少读



者反映,在基础理论方面,该书还有一些可取之处。这次修订时,特意从中精选一些内容,充实到本书中。

本书的出版除了得到国防科工委的全成本资助外,还得到西南交通大学出版基金的资助,特此致谢。

编 者

2006 年 9 月

本书主要符号表

A	面积	n	气体分子数密度
B	磁感应强度	P	几率
C	流导;常数	p	气体压强
c	固体中气体的定容比热	p_s	饱和蒸气压
c_v	每克气体的定容比热	p_u	极限压强
D	扩散系数	Q	热量;总截面;气体量;漏率
D_a	表面扩散系数	q	吸附热
d	分子直径;管道直径;厚度;特征尺寸	R	气体常数;流阻;电阻;相对灵敏度
E	能量;电场强度	Re	雷诺数
E_a	化学吸附活化能	r	分子半径;管道半径;比值
E_d	脱附能	S	抽速;肃节伦德常数
E_D	扩散激活能	s	溶解度
E_h	离解能	T	热力学温度
E_P	物理吸附能	t	摄氏温度;时间
ϵ	电动势;帕兰尼位	t_0	延迟时间
F	力	t_L	滞后时间
G	增益	U	内能
H	何氏系数	u	集体速度;吸附速率
h	普朗克常数	V	体积;电位
I	电流	v	速率
J_e	电子流密度	v_f	一级脱附速率常数
K	热传导系数;电离计灵敏度; 分子泵压缩比;常数	v_s	二级脱附速率常数
K_f	自由分子热传导系数;	W	传输几率;质量;比蒸着率;峰宽
K_n	克努曾系数	w	蒸气流速率
k	玻尔兹曼常数	z	离子带电荷数
L	阿伏加德罗常数;动量	α	适应系数;体积膨胀系数; 气体压强的温度系数;比例系数
l	长度	α_p	凝聚几率
M	气体质量	α_c	黏附几率
m	分子质量	β	入射粒子浓度比
N	总分子数;输运分子数	γ	定压比热容与定容比热容的比值;吸

	附比	σ	分子截面积;单位面积吸附分子数; 斯忒藩-玻耳兹曼常数
η	内摩擦系数	σ_0	形成单分子层的分子数(单位面积计)
θ	覆盖度;分子平均碰撞管壁次数	τ	平均吸附时间;时间常数
λ	气体分子平均自由程	τ_0	吸附分子垂直表面方向振动周期
λ_e	电子平均自由程	τ'	平均滞留时间
λ_i	离子平均自由程	Φ	置换灵敏度系数
μ	相对分子质量	Γ_A	单位面积净输运量
ν	碰撞频度		
ρ	气体密度		

目 录

绪 论

0.1 真空状态的特点及真空技术的基本内容	1
0.2 真空度的单位及真空区域的划分	2
0.3 真空技术在科学研究及工业生产中的重要作用	6

第1章 真空技术的物理基础(一)——稀薄气体理论

1.1 气体分子运动论的基本原理	9
1.1.1 气体基本定律	9
1.1.2 气体分子运动论基本假设	11
1.1.3 理想气体	12
1.1.4 数据举例	12
1.1.5 蒸 汽	13
1.2 气体的压强	17
1.3 气体分子的速率分布——麦克斯韦速率分布律	20
1.3.1 三种代表性速率	23
1.3.2 分布函数	27
1.4 碰撞次数	30
1.5 平均自由程与碰撞截面	34
1.5.1 气体分子平均自由程	34
1.5.2 离子或电子在气体中的自由程	36
1.5.3 有效直径与有效截面	37
1.6 自由程长度分布律	41
1.7 电子在稀薄气体(真空)中的碰撞	43
1.7.1 漂移场与加速场下电子的碰撞	44
1.7.2 加速场下电子在电极间的碰撞次数分布律	45
1.8 电子碰撞分子(原子)电离和裂解	48
1.8.1 电子碰撞原子/分子电离	48
1.8.2 电子碰撞分子碎裂	51
1.9 稀薄气体(真空)中的电子繁流现象	57
1.9.1 最简模型的繁流公式	58
1.9.2 模型二的繁流公式	59
1.9.3 模型三的繁流公式	59
1.10 单位时间碰壁数	60



1.11	分子从表面的反射——余弦定律(克努曾定律)	63
1.12	气体中的输运现象·输运方程	64
1.13	常压下气体的热传导	66
1.14	常压下气体中的内摩擦	72
1.15	气体自扩散	76
1.16	气体互扩散	78
1.17	滑动现象	82
1.18	温度剧增现象	86
1.19	低压气体中的输运现象	90
1.19.1	低压气体外摩擦(自由分子黏滞性)	90
1.19.2	低压气体热传导(自由分子热传导)	91
1.20	热流逸现象	95
1.20.1	平衡情况	96
1.20.2	热流逸现象	97
1.21	分子辐射计力	98
1.22	气体在管道中的黏滞性流动——泊肃叶(poiseuille)公式	100
1.23	气体在管道中的分子性流动——克努曾(knudsen)公式	103
1.24	气体通过小孔的流动	104
1.25	流导与流阻、传输几率	105
1.25.1	管道的流导	105
1.25.2	孔眼的流导	106
1.25.3	并联与串联	106
1.25.4	传输几率	107
1.25.5	流量恒定关系	107
	参考文献	108
	习 题	109

第2章 真空技术的物理基础(二)——固体—气体间的现象

2.1	概 述	115
2.2	固体及其表面	116
2.3	固体表面对气体分子的作用力	117
2.3.1	两个分子间的相互作用力	118
2.3.2	固体表面对气体分子的作用力——物理吸附与化学吸附	118
2.4	物理吸附与化学吸附	119
2.4.1	物理吸附	120
2.4.2	化学吸附	122
2.4.3	吸附态	126
2.5	吸附速率	127



2.5.1 吸附速率方程	127
2.5.2 决定吸附几率大小的因素	128
2.6 脱附速率	129
2.7 吸附等温线	131
2.8 朗缪尔吸附等温线	135
2.9 吸附分子的表面迁移	137
2.10 多分子层吸附等温线(BET 等温线)	139
2.11 其他吸附等温式	143
2.11.1 其他的化学吸附等温式	144
2.11.2 其他的物理吸附等温式	146
2.12 多孔材料的吸附——毛细管效应	148
2.13 低温表面的吸附	151
2.14 表面吸附气体的置换	153
2.15 管道有吸附作用时的非稳定气体流	156
2.16 气体在固体中的溶解、渗透与扩散	159
2.16.1 吸收与溶解	159
2.16.2 亨利定律——溶解气体浓度与压强的关系	160
2.16.3 费克定律——溶解气体在固体中的扩散	161
2.16.4 非稳定过程	165
2.17 电子轰击气—固界面	168
2.17.1 电子从表面的散射	168
2.17.2 电子碰撞脱附	170
2.17.3 电子碰撞脱附理论	177
2.18 离子轰击气—固界面	178
2.18.1 背散射	179
2.18.2 溅射	181
2.18.3 气体溅射	186
2.18.4 俘获与再释	188
2.18.5 溅射理论简介	190
2.19 表面化学反应	196
2.19.1 中性气体与表面的反应	196
2.19.2 激励化学反应	202
2.20 真空蒸发与成膜	210
2.20.1 真空蒸发成膜	210
2.20.2 脉冲激光沉积	216
参考文献	223
习 题	225



第3章 真空获得

3.1 概 述	228
3.1.1 真空泵的基本参数	229
3.1.2 时间常数 τ 与排气时间	230
3.1.3 排气状态微分方程及求解	231
3.2 机械真空泵	233
3.2.1 旋片式机械真空泵工作原理	233
3.2.2 泵的特性和运用	236
3.2.3 其他类型机械泵	238
3.3 蒸汽流扩散泵	243
3.3.1 扩散泵的工作原理	243
3.3.2 主要型式及扩散泵油	247
3.3.3 扩散泵的实际特性与运用	249
3.4 低温吸附泵	253
3.4.1 分子筛的物理特性	253
3.4.2 分子筛吸附泵的工作原理	255
3.4.3 使用注意事项	258
3.5 吸气剂泵	258
3.5.1 升华泵的工作原理	258
3.5.2 升华泵抽速与压强的关系	260
3.5.3 升华泵的运用	261
3.5.4 非蒸散型吸气剂泵	261
3.6 热阴极吸气离子泵	264
3.6.1 电清除作用	264
3.6.2 热阴极吸气离子泵的构造原理	264
3.6.3 泵的特性和运用	265
3.7 溅射离子泵	266
3.7.1 溅射离子泵的工作原理	266
3.7.2 潘宁(Penning)放电	268
3.7.3 溅射离子泵的特性	270
3.7.4 溅射离子泵的运用	273
3.8 涡轮分子泵	274
3.8.1 涡轮分子泵的工作原理	274
3.8.2 基本结构	277
3.8.3 特 性	279
3.8.4 运 用	281
3.9 低温泵	282



3.9.1 工作原理	282
3.9.2 典型结构	282
3.9.3 理论分析	284
3.9.4 实际性能及其他	286
3.10 超高真空获得技术	287
3.10.1 影响极限压强的因素	287
3.10.2 材料的选择及处理	288
3.10.3 泵的选用	289
3.10.4 获得超高真空的其他有关措施	289
参考文献	292
习 题	294
第4章 真空的总压强测量	
4.1 概 述	297
4.2 液体压强计和压缩真空计	299
4.2.1 U形真空计	299
4.2.2 压缩真空计(麦克劳真空计)	301
4.3 弹性变形真空计	305
4.4 电容薄膜真空计	306
4.4.1 原理及相关技术	306
4.4.2 规头(gauge head)和传感器(transducer)	310
4.4.3 安装、使用和维护	312
4.5 黏滞真空计	314
4.5.1 磁悬浮转子真空计	315
4.5.2 石英晶体振荡黏滞真空计	321
4.5.3 振膜真空计	322
4.6 压敏电阻真空计	323
4.6.1 工作原理	323
4.6.2 电路原理简介	324
4.6.3 性 能	324
4.6.4 使 用	324
4.6.5 新发展	324
4.7 热传导真空计	326
4.7.1 工作原理	326
4.7.2 理论分析	326
4.7.3 电阻真空计	328
4.7.4 热电偶真空计	332
4.7.5 热传导真空计的测量范围	334



4.7.6	热电偶真空计与电阻真空计的比较	336
4.7.7	热传导真空计的其他形式	337
4.7.8	热传导真空计应用中的一些实际问题	337
4.7.9	热传导真空计的优缺点	338
4.7.10	热对流真空计	339
4.8	热阴极电离真空计	340
4.8.1	基本原理	340
4.8.2	规管及其电性能	342
4.8.3	校准曲线及测量范围	344
4.8.4	电离真空计理论	346
4.8.5	高真空电离计电源	350
4.8.6	电离真空计的使用	350
4.8.7	电离真空计的优缺点	351
4.9	高压强电离真空计	352
4.9.1	史朱兹和菲尔普斯(Schulz and Phelps)规	352
4.9.2	畴莫夫(Choumoff)规	353
4.9.3	郭氏规	353
4.9.4	高压强电离真空计理论	354
4.10	热阴极超高真空电离计	358
4.10.1	原理及 B-A 规	358
4.10.2	超高真空热阴极电离规中的一些现象	362
4.10.3	裸规效应	364
4.10.4	超高真空电离计的电源	364
4.10.5	抑制规	365
4.10.6	分离规	367
4.10.7	弯注抑制规	368
4.10.8	欧米加质谱计型规	370
4.10.9	热阴极磁控管式电离规	371
4.10.10	弹道电离规	372
4.10.11	调制电离规	373
4.11	自持放电型真空计	374
4.11.1	放电管真空指示器	374
4.11.2	磁控放电真空计	375
4.11.3	倒置磁控管式真空计	377
4.11.4	磁控管式真空计	379
4.12	其他真空计及测量真空的方法	380
4.12.1	克努曾(Knudsen)真空计	380



4.12.2	放射能电离真空计	382
4.12.3	测量真空的其他方法	383
4.13	电真空器件内部真空度的测量	384
4.14	流量计	385
4.14.1	流量(throughput)、质量流(mass flow)、摩尔流(molar flow)	386
4.14.2	转子流量计	387
4.14.3	扼流方法	388
4.14.4	差分压强技术	389
4.14.5	热质量流技术	390
4.14.6	性能比较	394
4.15	相对真空计的校准	394
4.15.1	静态校计法	394
4.15.2	动态校计法	396
4.16	真空测量技术	398
4.16.1	真空计的选择	398
4.16.2	规管的安装位置	399
4.16.3	真空规管连接管开口的方向	400
4.16.4	测量时有关注意事项	400
	参考文献	401
	习 题	402
第5章 真空的分压强测量		
5.1	分压强测量的基本概念	407
5.1.1	质谱的基本概念	407
5.1.2	如何实现质谱	407
5.1.3	质谱计的主要性能指标	409
5.2	离子源和离子检测器	412
5.2.1	常用离子源结构及工作原理	412
5.2.2	离子检测器	413
5.3	磁偏转质谱计	417
5.3.1	180°磁偏转质谱计	417
5.3.2	扇形磁偏转质谱计	418
5.4	回旋质谱计	420
5.5	飞行时间质谱计	421
5.5.1	结构及工作原理	421
5.5.2	飞行时间质谱计的特点	423
5.5.3	小型飞行时间质谱计的发展	423
5.6	四极质谱计	425