

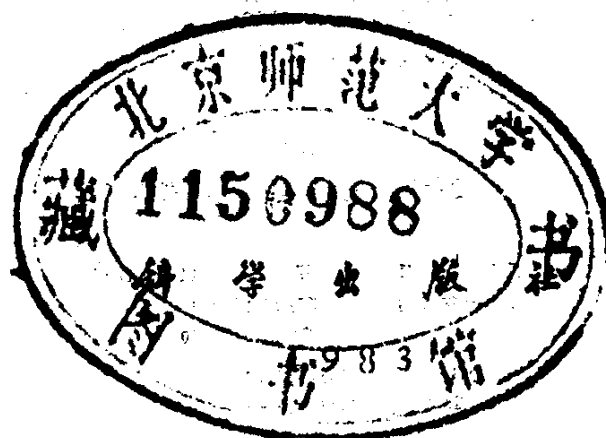
真空物理

高本輝 崔素言 著

科学出版社

真空物理

高本辉 崔素言 著



内 容 简 介

本书全面系统地阐述真空技术的理论原理,包括气体分子在空间中的运动过程和气体分子在器壁上的运动过程两大部分。全书共分八章,即真空技术和真空物理概述,稀薄气体分子的空间过程,复杂的分子运动论在真空技术中的应用和发展,真空状态下的气体流动,真空中的相变和化学变化,固体对气体的吸附作用,荷能粒子与表面的相互作用,气体在固体中的溶解和扩散。为了说明理论与技术之间的联系,书中还从理论角度归纳、分析了一些技术实例。

本书可供从事真空技术以及有关学科的科技人员、大专院校师生阅读,也可作为真空专业研究生的教材。

真 空 物 理

高本辉 崔素言 著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年12月第一版

开本: 850×1168, 1/32

1983年12月第一次印刷

印张: 19 3/4

印数: 0001—6,150

字数: 518,000

统一书号: 13031·2370

本社书号: 3246·13—3

定价: 3.65 元

JY11/168/11

前 言

“真空”原是一门应用新技术。随着现代科学技术的发展，特别是原子能、电真空器件和微电子学、宇航、薄膜物理和镀膜技术、表面科学对它的促进，以及超高真空技术的发展，使真空技术已形成了一门独立学科，建立了自己的理论体系，并在许多科学技术领域获得了广泛应用。这门学科最初称为真空技术，现在通称为真空科学与工艺学。鉴于目前有关真空物理学的书籍比较少，作者从1975年开始编写本书。在撰写中力求能够作到内容较为全面新颖，叙述尽量深入浅出，数学不要过于艰深，并注意原理和技术之间的有机联系，历时六年，数易手稿，才完成此书的写作。

本书系统地阐述了真空技术的理论原理。第一章概述真空科学的基本面貌和发展现状。第二、三、四章论述气体分子在空间中的运动过程：首先扼要介绍气体分子运动论的基本知识，然后讨论稀薄气体的输运过程、偏离理想气体模型和麦克斯韦分布的情况、真空状态下的气体流动理论。第五、六、七、八章分别论述气体分子在器壁上的运动过程：在气-固界面上的相变和化学变化、热运动气体粒子的吸附和脱附、荷能粒子与固体表面的相互作用、以及气体在固体深部的溶解和扩散转移。

本书假定读者已初步具备真空技术、微积分、分子运动论和热力学的基本知识。但是，为了使有实践经验而理论基础不足的同志也能阅读此书，我们还结合某些技术示例作了理论上的分析和引伸。

在本书撰写过程中，承蒙钱学森、金建中，以及王欲知、范垂祯、胡跃志等同志的支持，刘炳坤、肖祥正、王耀军等同志的帮助，作者在此一并致谢！

本书所用符号

A	面积、振幅、原子量
a, b	范德瓦尔斯方程的常数、椭圆半轴、矩形边长、其它常数
C	肖节伦特常数、流导、热容量、浓度、溶解度
C_0	初始浓度
c	音速、凝聚系数、光速
c'	凝聚几率
c_v	定容比热
c_p	定压比热
D	扩散系数、大容器线性尺寸
D_T	热扩散系数
d	直径、线性尺寸、原子 d 轨道
E	能量、电场强度
E_D	离解能、扩散激活能
E_s	吸附激活能
E_d	脱附激活能
E_F	费米能级
E_t	迁移激活能
E_I	电离能
E_K	渗透激活能
e	电子电荷
F	力、等容位、电场、渗透速率、出气速率
f	反射系数、固体摩擦系数、频率、活度系数、原子 f 轨道
G	力矩
g	重力加速度
H	焓、周长
h	高度、普朗克常数、晶面密勒指数
I	转动惯量、电流
i	自由度

J	反应物与生成物的分压比、电子流密度
j	离解度
K	热传导系数、渗透系数、克劳辛系数及各种流导修正系数、背散射运动因子、再释常数
K_0	自由分子热传导系数
K_1	外热传导系数
K_T	热扩散比
K_P	质量作用定律的平衡常数(压强)
K_C	质量作用定律的平衡常数(浓度)
k	玻尔兹曼常数、晶面密勒指数
l	长度、厚度、角量子数、晶面密勒指数
M	质量、扭力矩
m	单个分子、原子、电子质量,磁量子数
Ma	马赫数
N	粒子数、单位时间碰在单位面积上的分子数
N_0	阿佛加德罗数
n	分子密度、波恩指数、吸附层数、主量子数
P	压强、动量
p	原子 p 轨道
Q	热量、流量、各种碰撞截面
q	汽化热、吸附热、电荷
q_p	物理吸附热
q_c	化学吸附热
q_l	积分吸附热
q_d	微分吸附热
q_s	溶解热
R	气体普适常数、半径、流阻
Re	雷诺数
r	径向距离、分子间距、灵敏度
S	体积流速、抽速、分离度、熵
s	粘附几率、一大气压下的溶解度、原子 s 轨道
T	温度
t	时间

U	电压、蒸汽流速、其它速度
u	内能、线流速
V	体积
V_0	克分子体积
v	速度
v_m	最可几速度
$\bar{v}$	平均速度
$\bar{v}^2$	均方速度
W	功率、功、流导几率
w	几率
Y	各种产额
x, y, z	座标
Z	分子间碰撞数、等压位、原子序数
α	适应系数、凝结系数、活度、极化率、吸附几率、电离度
β	温度跃变系数
Γ	迁移量、角动量、电离规灵敏度
γ	比例分数、阻尼系数、比热比、热迁移比、表面张力
δ	小间距、小变位、温度系数、相对涨落、边界层厚度
ϵ	介电常数、波拉尼吸附位势
η	内摩擦系数
η_i	外摩擦系数
η_0	自由分子粘滞系数
θ	角度、覆盖度
λ	自由程、波长
μ	分子量、化学位、电偶极矩
ν	克分子数、脱附速率常数、光频率
ξ	阻尼比、滑动系数
ρ	密度
σ	分子有效直径、热辐射系数、吸附量
σ_m	单分子层吸附量
τ	平均滞留时间、时间常数、转折时间、扭转常数
τ_f	飞行时间
ϕ	功函数

χ	电四极矩
ψ	波函数
Ω	立体角
ω	角速度、角频率

目 录

本书所用符号.....	ix
第一章 真空技术和真空物理概述.....	1
§ 1.1 真空的基本概念.....	1
1.1.1 度量单位	2
1.1.2 区域划分	2
§ 1.2 超高真空技术的近代发展.....	8
1.2.1 超高真空泵	8
1.2.2 超高真空容器	15
1.2.3 超高真空规	18
1.2.4 水平和方向	20
§ 1.3 真空物理的范畴.....	29
第二章 稀薄气体分子的空间过程.....	35
§ 2.1 气体分子运动论的理论要点.....	35
2.1.1 平衡态的基本结论	35
2.1.2 非平衡态的基本概念	39
§ 2.2 粘滞性.....	42
2.2.1 较高压强的情况——内摩擦	42
2.2.2 较低压强的情况——外摩擦和自由分子粘滞性	48
2.2.3 中压强的情况——滑动现象	51
2.2.4 粘滞性在真空技术中的应用	52
§ 2.3 气体热传导.....	61
2.3.1 较高压强的情况——气体热传导	62
2.3.2 较低压强的情况——自由分子热传导	69
2.3.3 中压强的情况——温度跃变	83
2.3.4 热传导在真空技术中的应用	89
§ 2.4 扩散.....	95

2.4.1 自扩散	95
2.4.2 互扩散	97
2.4.3 气体扩散在真空技术中的应用	99
§ 2.5 热扩散和热流逸	104
2.5.1 热扩散	104
2.5.2 热流逸(热迁移、热分子流)	108
2.5.3 辐射计效应和应用	110
第三章 复杂的分子运动论在真空技术中的应用和发展	118
§ 3.1 理想气体模型的失效	118
3.1.1 实际气体和蒸汽	118
3.1.2 自由程与温度的关系	120
3.1.3 实际气体状态方程	124
§ 3.2 余弦定律的偏离	136
3.2.1 漫反射和镜反射	136
3.2.2 热流逸现象的实验与理论的偏差	138
3.2.3 反常热迁移比在真空技术中的应用——适应泵	140
§ 3.3 真空技术中的涨落	142
3.3.1 极高真空下密度的涨落	142
3.3.2 布朗运动及其在真空技术中的初步应用	145
§ 3.4 关于统计规律	153
3.4.1 真空中的定向压强	154
3.4.2 深冷泵和吸气剂泵的抽速	159
3.4.3 玻尔兹曼积分微分方程	163
3.4.4 近代统计理论大意	169
第四章 真空状态下的气体流动	172
§ 4.1 流动的基本概念	172
4.1.1 典型的真空系统	173
4.1.2 流动过程的基本物理量及其相互关系的电气模拟	174
4.1.3 流动的基本状态和判据	178
§ 4.2 通过管和孔的粘滞流流导	183
4.2.1 各种截面长管和径向辐射流的流导	183
4.2.2 孔的流导	198

4.2.3 短管、弯管的流导	201
§ 4.3 通过管和孔的分子流导	205
4.3.1 长管的流导	205
4.3.2 各种截头锥形管道	214
4.3.3 径向辐射流	219
4.3.4 孔的流导	219
4.3.5 短管的流导(一)——管孔串联的近似解	223
4.3.6 短管的流导(二)——圆截面的精确解	226
4.3.7 短管的流导(三)——其它截面	235
4.3.8 弯管的流导	240
4.3.9 各种气体之间的流导换算	241
4.3.10 组合系统的分子流	242
§ 4.4 通过管和孔的粘滞-分子流导	248
4.4.1 粘滞流修正式	249
4.4.2 分子流修正式	251
4.4.3 非圆形截面	257
§ 4.5 用蒙特卡罗法求分子流导	261
4.5.1 自由分子流的蒙特卡罗模拟	261
4.5.2 演算示例	263
4.5.3 各种计算结果	268
4.5.4 气体的壁面效应	274
4.5.5 在粘滞-分子流中的应用	278
§ 4.6 非稳态流动	279
4.6.1 粘滞流	279
4.6.2 分子流	280
第五章 真空中的相变和化学变化	288
§ 5.1 相变和化学变化的基本概念	288
5.1.1 相平衡和化学平衡——静力学问题	289
5.1.2 相变和化学变化的速率——动力学问题	292
5.1.3 相变和化学变化过程的热效应	292
§ 5.2 蒸发	293
5.2.1 饱和蒸汽压	293

• • •

5.2.2	混合物的蒸汽压	297
5.2.3	分馏	310
5.2.4	蒸发和升华速率	314
5.2.5	扩散泵油的蒸汽压、热分解和分馏	322
§ 5.3	分解	334
5.3.1	化学平衡的质量作用定律	334
5.3.2	化学反应的等温方程式	337
5.3.3	化学反应的等压方程式	338
5.3.4	金属化合物的分解和还原	342
§ 5.4	残余气体的化学反应	345
5.4.1	在热表面上气体的反应	345
5.4.2	在电真空器件中残气之间的热化学平衡 (一)——理论	350
5.4.3	在电真空器件中残气之间的热化学平衡 (二)——应用	357
第六章	固体对气体的吸附作用	366
§ 6.1	基本概念	366
6.1.1	吸附参量	367
6.1.2	物理吸附和化学吸附的区别	373
§ 6.2	吸附力	376
6.2.1	物理吸附力	376
6.2.2	化学吸附力	381
6.2.3	位能曲线	384
§ 6.3	吸附热	386
6.3.1	各种吸附热	386
6.3.2	吸附热与覆盖度的关系	388
§ 6.4	吸附等温线	390
6.4.1	单分子层吸附的理论——亨利定律、朗缪尔等温式	390
6.4.2	可用于化学吸附的等温式——弗罗因德利胥等温式、焦姆金等温式	394
6.4.3	多分子层吸附的理论——BET 等温式、二维凝聚、毛细孔凝结	399

6.4.4	物理吸附的位势理论——波拉尼位势理论、杜平宁等 温式、霍布森理论	409
6.4.5	在真空技术中的物理吸附	423
§ 6.5	化学吸附	426
6.5.1	概况	426
6.5.2	化学吸附的理论方法(一)——量子化学法	431
6.5.3	化学吸附的理论方法(二)——态密度法	438
6.5.4	化学吸附的理论方法(三)——二维结晶学	442
6.5.5	影响化学吸附的因素	446
§ 6.6	吸附的几何结构	454
6.6.1	表面	454
6.6.2	吸附层	458
§ 6.7	吸附态	463
§ 6.8	吸附动力学	468
6.8.1	吸附速率	468
6.8.2	脱附速率	475
6.8.3	净速率	485
第七章	荷能粒子与表面的相互作用	490
§ 7.1	荷能粒子在真空技术中的实际意义	490
§ 7.2	荷能原子、离子与表面	496
7.2.1	概况	496
7.2.2	背散射	501
7.2.3	溅射	505
7.2.4	俘获、再释与溅射脱附	512
7.2.5	激发	516
§ 7.3	电子与表面	519
7.3.1	散射的概况	519
7.3.2	弹性反射	521
7.3.3	特征能量损失	522
7.3.4	芯能级激发和俄歇电子	524
7.3.5	二次电子发射	528
7.3.6	电子碰撞脱附	530

§ 7.4 光子与表面.....	539
7.4.1 光电发射	539
7.4.2 光致脱附	545
§ 7.5 强电场与表面.....	546
§ 7.6 热表面的离子发射.....	549
第八章 气体在固体中的溶解和扩散.....	554
§ 8.1 理论要点和实际意义.....	554
§ 8.2 气体在固体中的溶解.....	556
8.2.1 影响溶解度的因素	556
8.2.2 溶解度的数据	562
§ 8.3 扩散和渗透.....	567
8.3.1 扩散	569
8.3.2 平板壁的渗透	570
8.3.3 圆管壁的渗透	575
8.3.4 球形壁的渗透	576
8.3.5 各类材料的情况	577
§ 8.4 出气.....	585
8.4.1 解溶	585
8.4.2 脱附	596
8.4.3 常温出气速率	597
8.4.4 高温出气	599

第一章 真空技术和真空物理概述

§ 1.1 真空的基本概念

1.1.1 度量单位

本书所讲的“真空”是指气体分子密度低于一个标准大气压的气体状态。由于气体分子密度这个物理量不容易量度，所以一般以压强(每平方厘米平面上的压力)为单位来描述真空状态。压强高则表示真空度低，压强低则表示真空度高。

在不同的科学技术领域内，因为传统习惯不同，采用的压强单位也不同，主要有以下几种：

(1) 毫米汞柱：真空技术中常用的单位，是指 0°C 时 1 毫米高水银柱作用在单位面积上的力。因为纯水银 0°C 时的比重是 13.5951 克/厘米^3 ，所以 $1 \text{ 毫米汞柱 (mmHg)} = 13.5951 \text{ 克/厘米}^2$ 。

历史上曾经把北纬 45° 度海平面的大气压定为 1 个物理标准大气压，它是 760 毫米汞柱。由于自然界每时每刻都在变化，该地区的气压也不可能一点没有变化，所以这样的标准是不够严格的。现在把 1 个国际物理标准大气压定为如下数值：

1 标准大气压 (ATM) $= 1013250 \text{ 达因/厘米}^2$ 。这是根据 0°C 时水银比重 13.5951 克/厘米^3 ，重力加速度 980.665 厘米/秒^2 ，对 760 毫米汞柱进行换算并省略尾数而制订的，因此它已不完全等于 760 毫米汞柱。

(2) 托：真空技术中最常用的单位，定义为

$$1 \text{ 托 (Torr)} = \frac{1}{760} \text{ 标准大气压。}$$

1 毫米汞柱与 1 托本来是一回事，但由于上述标准大气压的新定义，目前两单位之间有了大约七百万分之一的微小差别。不过，由

于差别极小,人们在习惯上仍然把它们等同看待.

(3) 微巴: 厘米克秒制单位,

$$1 \text{ 微巴}(\mu\text{bar}) = 1 \text{ 达因/厘米}^2 = 7.5006 \times 10^{-4} \text{ 托}.$$

(4) 帕斯卡: 米千克秒制单位, 是目前国际上推荐在真空技术中使用的国际单位制 (SI), 简称“帕”,

$$\begin{aligned} 1 \text{ 帕}(\text{Pa}) &= 1 \text{ 牛顿/米}^2 = 1 \text{ 千克/米} \cdot \text{秒}^2 = 10 \text{ 达因/厘米}^2 \\ &= 7.5006 \times 10^{-3} \text{ 托}. \end{aligned}$$

(5) 工程大气压(公斤/厘米²): 工程单位. 由于大气压强约为 1 公斤/厘米², 所以把 1 公斤/厘米²称为工程大气压, 即

$$1 \text{ 工程大气压 (AM)} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 735.56 \text{ 托}.$$

(6) 英制单位: 英制单位有英寸汞柱 (inchHg) 和普西 (Psi, 磅/英寸²) 两种.

(7) 用真空度的百分数来表示的工程热力学单位, 一般只有在压强高于 1 托时才采用这种单位, 即

$$\delta = \frac{760 - P}{760} \times 100\%.$$

例如, 当 760 托时, $\delta = 0$; 8 托时, $\delta = 99\%$.

各压强单位之间的换算列于表 1.1.

1.1.2 区域划分

有了量度真空的单位, 就可以对真空度的高低程度作出定量表述. 此外, 为实用上便利起见, 人们还把气体空间的物理特性、常用真空泵和真空规的有效使用范围、真空技术应用特点, 这三方面都比较相近的真空度, 定性地粗划为几个区段. 但是, 目前国内外对真空区域的划分不很一致, 国际上的划分如表 1.2 所示. 综观表 1.2, 大致有如下趋势:

粗真空(或低真空)	760—1(10)托
中真空(或精真空)	1(10)— 10^{-3} 托
高真空	10^{-3} — 10^{-7} (10^{-8})托
超高真空	$<10^{-7}$ — 10^{-8} 托

表 1.1 压强单位换算表

	帕 (Pa)	托 (Torr)	微巴 (μba)	物理大气压 (ATM)	工程大气压 (kg/cm ²)	英寸汞柱 (inchHg)	普西 (Psi)
1 帕	1	7.5006×10^{-3}	10	9.869×10^{-6}	1.0197×10^{-5}	2.9530×10^{-4}	1.4503×10^{-4}
1 托	1.3332×10^3	1	1.3332×10^3	1.3158×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	3.9370×10^{-2}	1.9337×10^{-2}
1 微巴	10^{-1}	7.5006×10^{-4}	1	9.8692×10^{-7}	1.0197×10^{-6}	2.9530×10^{-5}	1.4503×10^{-5}
1 物理气压	1.0133×10^5	760.00	1.0133×10^6	1	1.0332	29.921	14.695
1 工程气压	9.8067×10^4	735.56	9.8067×10^5	9.6784×10^{-1}	1	28.959	14.223
1 英寸汞柱	3.3864×10^3	25.400	3.3864×10^4	3.3421×10^{-2}	3.4532×10^{-2}	1	0.49115
1 普西	6.8948×10^3	51.715	6.8948×10^4	6.8046×10^{-2}	7.0307×10^{-2}	2.0360	1