



物理实验丛书 WULISHIYAN CONGSHU

真空实验技术

华中一主编



上海科学技术出版社



科工委学院802 2 0036740 6

053586

物理实验丛书

真空实验技术

华中一 主编



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理实验中有关真空实验内容以及结合复旦大学电真空实验室的经验编写而成。全书共分七章。前三章主要介绍真空的基本概念、真空的获得和真空的测量。后四章分别介绍质谱分析与检漏、真空材料与工艺、真空系统的设计和使用以及真空表面分析。书末还附有与真空实验有关的一些附录。

本书可供大专院校理工科师生、中等专科学校物理教师以及从事有关物理实验的科技工作者参考。

物 理 实 验 丛 书

— * * * —
真 空 实 验 技 术

华中一 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 11.25 字数 249,000

1986 年 7 月第 1 版 1986 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—2,800

统一书号: 13119·1350 定价: 1.85 元

出版说明

物理学是一门以实验为基础的科学。每个物理概念的确立以及原理和定律的发现无不具有坚实的实验基础,而且只有经过实验的检验,才能得到公认。所以,物理实验在物理学中起着非常重要的作用。

为了实现我国四个现代化的要求,需要迅速培养大批科学技术专门人材。在整个物理学的教学过程中,物理实验是培养物理工作者和其他科学技术专门人材不可缺少的组成部分。可是在物理实验的教学中,深感这方面书籍的不足,以及实验仪器和实验设备的缺乏。鉴于上述情况,为了提高物理实验的水平,适合我国的实际情况,推广实验中的新技术、新仪器和新方法,我们请国内有关高等院校从事物理实验教学时间较长、经验丰富的教师编写这套《物理实验丛书》。

本丛书内容包括当前我国高等院校正在开设和准备开设的普通物理实验。每一分册集中介绍一个专题。本丛书采用章节式的实验参考书编写方式,注意到专题的系统性与完整性,中间插入有关的实验,并有备查的附录,内容简明扼要,重点突出。此外,为了适应科研部门和工矿企业实验工作者的需要,还适当增加了一些实际应用的内容。本丛书不但可供大专院校物理专业师生参考,亦可供中等专科学校和中学物理教师以及科研单位与工矿企业从事物理实验工作的技术人员参考。

本丛书已拟定的普通物理实验方面的分册有:《力学实验》、《静电实验》、《几何光学实验》、《物理光学实验》、《电磁学实验》、《热学实验》、《真空实验》、《气垫导轨实验》等,将陆续出版。

序 言

半个世纪以来,真空技术的飞跃发展给近代科学和工业生产带来了无可估量的贡献:粒子加速器、半导体和集成电路、电视、真空冶金、可控核聚变、真空喷镀、表面科学等等重大科技领域都离不开真空。从教学和科研的观点来看,目前真空技术已是实验物理学工作者所必须具备的一种基本知识和技能,这是毫无疑义的。另一方面,从工业生产来看,由于实际工作的需要,非真空专业的技术人员也迫切要求这方面的知识。本书就是企图满足上述两方面需要的一种尝试。

由于以上的考虑,本书从编写的体例方面作了一些改进:先叙述有关的原理和设备,然后将有关实验附在每章的后面。因此本书既可看作是一本指导实验的教学参考书;又可看作是一本附有实验例证的技术入门书。我们希望不论是从事物理教学或从事工程技术的人员都能从中得到有益的帮助。当然,由于上述编写目的的限制,本书内容只限于介绍常见和常用的方法和设备,而不能包罗万象,对真空科学与技术的领域作全面的介绍和讨论。这一方面的要求将由其他的专著来完成。

本书提供的实验方法主要是为满足高等学校的教学要求,并不完全符合暂行的国际或国内标准测试方法,而且由于各单位的设备条件有很大的差异,在作具体安排时可根据实际情况进行选择或加以局部的变动。

书中表示压强的国际单位(SI)应为帕(Pa)。但为照顾使用习惯及现有的仪器面板起见,采取帕和托(Torr)并用的做法(1托=133.3帕)。

本书由复旦大学物理系真空物理研究室华中一、邱绍雄、沈国华、吴迪惠、陈华仙、杨锡良、姜祥祺、章壮健等联合编写,并由华中一教授担任主编和统审全稿。在工作中得到杨之昌、周仿元、严银福等同志协助,谨致谢意。

编 者

一九八五年八月

目 录

序 言

第一章 真空的基本概念	1
§ 1 压强单位与真空区域的划分	1
§ 2 稀薄气体的基本性质	4
§ 3 输运现象	10
§ 4 蒸气	17
§ 5 真空的应用	20
第二章 真空的获得	29
§ 1 真空系统的构成	29
§ 2 抽气速率和气体流量	31
§ 3 气导	35
§ 4 机械泵	42
§ 5 汽流泵	63
§ 6 离子蒸发泵	77
§ 7 吸附泵和低温泵	88
§ 8 放气和渗气	93
第三章 真空的测量	114
§ 1 绝对真空规	115
§ 2 相对真空规	121
§ 3 真空规的校准	152

第四章	质谱分析与检漏	171
§ 1	离子源和接收器	173
§ 2	180° 质谱计	175
§ 3	四极场质谱计	177
§ 4	飞行时间质谱计	182
§ 5	一般检漏技术	183
§ 6	补漏	202
第五章	真空材料与工艺	215
§ 1	真空材料的选择	215
§ 2	真空封接	224
§ 3	清洁处理	230
§ 4	除气	233
第六章	真空系统的设计和使用	246
§ 1	真空系统	246
§ 2	封闭式电真空器件的排气	256
§ 3	真空镀膜	259
第七章	真空表面分析	293
§ 1	真空与表面科学	293
§ 2	电子与表面的相互作用	294
§ 3	表面成份分析	299
§ 4	表面结构分析	307
附 录		
一、	几种气体的性质	328
二、	常用元素的蒸气压	331
三、	各种形状管道的气导值	334

四、部分国产双级旋片式转动泵的主要技术性能	337
五、部分国产油扩散泵的主要技术性能	338
六、安全操作注意事项	339
七、真空材料的清洁处理方法	341
实验索引	351

第一章 真空的基本概念

§1 压强单位与真空区域的划分

气体的宏观状态通常用压强 p 、体积 V 和温度 T 来表示。压强低于 1 标准大气压的气态空间称为真空。

标准大气压（或称常压）的定义为：在标准重力加速度 g 为 980.665 厘米/秒²、温度 T 为 273 K 时，760 毫米高的汞所施加的压强。如果把 273 K 时汞的密度定为 13.59509 克/厘米³，则这个数值相当于 101325 牛顿/米²，或 1.03323 千克/厘米²。

在真空技术中，曾被长期广泛使用的压强单位为毫米汞高 (mmHg)：

$$1 \text{ 毫米汞高} = \frac{1}{760} \text{ 标准大气压。}$$

其后又制定了一个不随汞密度、温度和重力加速度而变化的单位托 (Torr)，它与毫米汞高的区别主要是定义上的，而在数值上的差别 ($<1.4 \times 10^{-7}$) 实际上可以忽略：

$$1 \text{ 托} \doteq 1 \text{ 毫米汞高。}$$

目前按照国际单位制 (SI)，压强单位已定为帕斯卡 (Pascal)，简称为帕 (Pa)：

$$1 \text{ 帕} = 1 \text{ 牛顿/米}^2。$$

此外还有用“毫巴 (mb)”来表示的：

1 毫巴=100 牛顿/米²。

表 1-1 是一张简化的压强单位换算表。

表 1-1 压强单位的换算

	标准大气压	托	帕	毫巴
1 标准大气压(atm) =	1	760	1.013×10^5	1.013×10^3
1 托(Torr) = 1 毫米汞高(mmHg) =	1.316×10^{-3}	1	133.3	1.333
1 帕(Pa) = 1 牛顿/米²(N/m²) =	9.87×10^{-6}	7.5×10^{-3}	1	1×10^{-2}
1 毫巴(mb) =	9.87×10^{-4}	0.75	100	1

由于习惯上的原因，目前在实际工作中使用得最多的单位还是“托”。

为了方便起见(实际上还特别为了便于确定所需真空设备的型式),通常把压强小于 1 大气压的整个真空区间按照压强的大小划分为几个区域。到目前为止,世界各国对划分方法尚无一致的见解。按照我们的建议①,采用下列方法可能比较合适:

- 760~10 托 粗真空 (或 1 标准大气压~ 10^3 帕);
- $10 \sim 10^{-3}$ 托 低真空 (或 $10^3 \sim 10^{-1}$ 帕);
- $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 托 高真空 (或 $10^{-1} \sim 10^{-6}$ 帕);
- $10^{-8} \sim 10^{-14}$ 托 超高真空(或 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ 帕);
- $<10^{-14}$ 托② 极高真空(或 $<10^{-12}$ 帕);

这些真空区域的分界根据下面的理由:

① 《真空技术基础》, 华中一编著, 上海科学技术出版社, 1958年。
② 有些作者建议把 10^{-12} 托作为极高真空的界线。

压强值(托)	物 理 现 象	获得设备的特性*
10	气体放电开始出现	水抽气机的极限
10^{-3}	分子平均自由程(λ)为厘米级	转动泵的极限
10^{-8}	布满清洁表面一单分子层的时间(τ)为分级	扩散泵的极限
10^{-14}	每立方厘米气体分子数(n)为100级	必须使用低温泵

* 指一般设备的性能,不包括特殊处理的泵。

从图 1-1 可以更直观地看到这些界限。由此还可以知道,在真空术语中,压强愈低意味着真空度愈高。

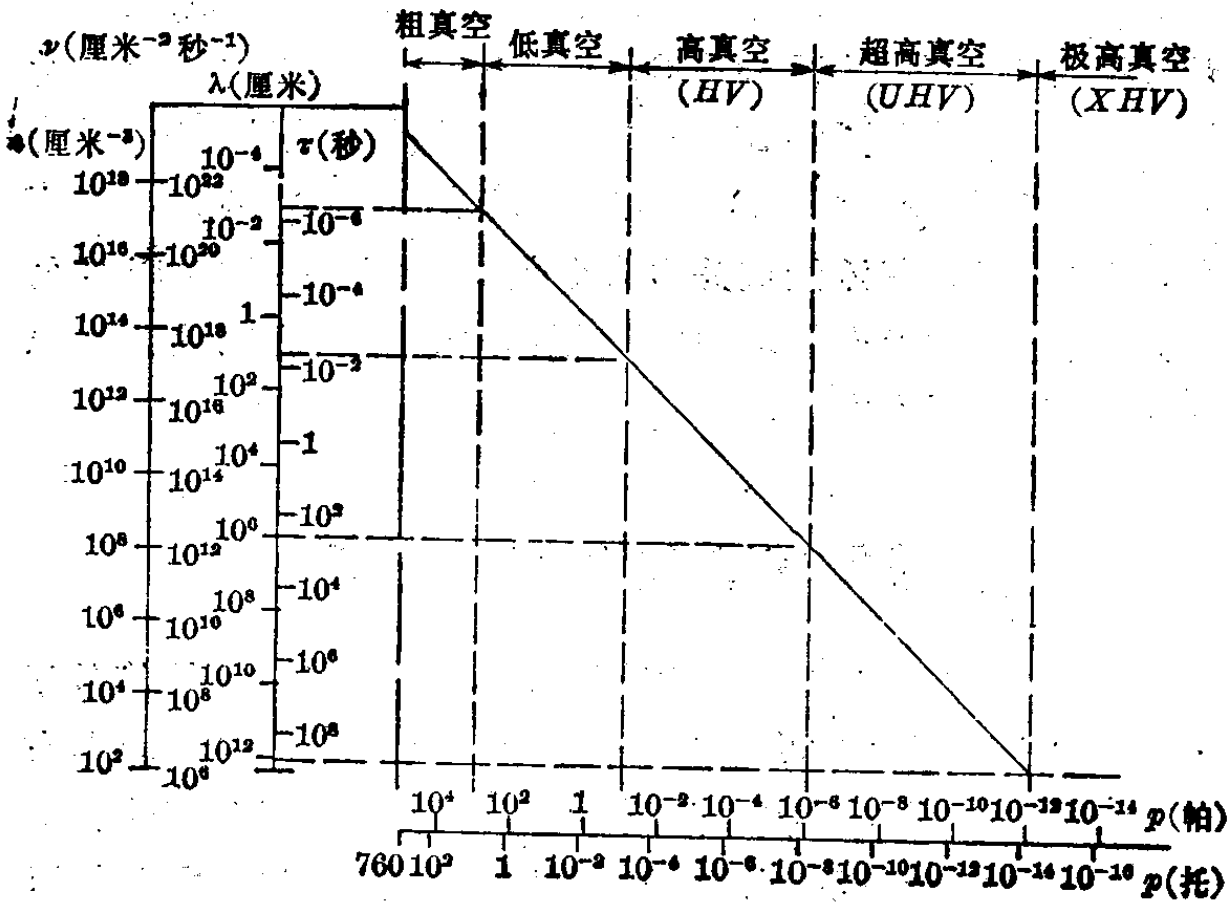


图 1-1 真空区域的划分

在地面上,大气的成分如表 1-2 所示。

以上所说的是用人工得到的真空。事实上自然界也有真空存在。举例来说,人在呼吸时产生的真空约为 98000 帕。

表 1-2 地面上的大气成分

成 分	体积百分比(%)	成 分	体积百分比(%)
N ₂	78.08	He	5.24×10^{-4}
O ₂	20.95	Kr	1.1×10^{-4}
Ar	0.93	H ₂	5.0×10^{-6}
CO ₂	0.033	Xe	8.7×10^{-6}
Ne	1.8×10^{-3}	H ₂ O	1.57

(约 740 托); 而在吮吸时可得到 40000 帕(约 300 托)。章鱼的吸盘甚至可产生低达 13000 帕(100 托)的真空。从海平面开始, 高度每增加 15 公里, 大气压强递减约 1 个数量级, 直到高度为 90 公里处压强为 1.3×10^{-1} 帕(10^{-3} 托)。在高度为 400 公里处, 气压为 1.3×10^{-6} 帕(10^{-8} 托), 1000 公里处为 1.3×10^{-8} 帕 (10^{-10} 托), 而 10000 公里处为 1.3×10^{-12} 帕(10^{-13} 托)。气体的成分也有变化, 在高度为 200~1000 公里处, 主要为原子态的氮和氧; 而在 1500 公里以上, 主要为原子态的氢、质子和电子。

§ 2 稀薄气体的基本性质

大家知道, 物质通常以固体、液体、气体或其他的状态存在。采取何种状态取决于分子间力的大小和每一分子的平均动能(温度)。分子间相互关系最为微弱的状态就是气体。特别在稀薄气体的情况下, 分子之间距离很远, 它们的相互作用完全可以忽略, 因而在真空条件下可以应用各种理想气体的定律。这些定律最早是用热力学方法近似地得到的, p 、 V 、 T 就是其物理量的宏观描述。但是, 这些宏观性质也可以从分子运动方面去探讨, 即把 p 、 V 、 T 看作分子的集体性质。当

然, 我们无法测出个别分子的行为, 而且对每个分子来说, 作用是不一样的, 但是我们可以用统计平均的方法来得到微观量与宏观量之间的联系, 这就是统计物理所解决的问题。

根据气体分子运动论, 气体乃是许多自由运动的分子的聚集体。在 0°C 和 1 个大气压下, 不论何种气体的 1 个摩尔, 都占有 22.4 升的体积, 是由 6.023×10^{23} 个分子组成的。后面这个数目称为阿伏伽德罗数:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ 个/摩尔。}$$

这些分子无休止地进行频繁的相互碰撞, 结果就作杂乱的运动。各个分子的速度(大小和方向)是不一致的, 但在稳定的状态下, 往往可满足一定的统计分布规律, 通常就称为麦克斯韦-玻尔兹曼分布。根据这种规律可以从理论上推得分子速率在 v_m 处有极大值, 于是 v_m 被称为最可几速率, 其值为

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (1-1)$$

此处 m 为分子质量, k 为玻尔兹曼常数 ($= 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/K), T 为绝对温度(K)。气体分子的平均速率为

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}。 \quad (1-2)$$

气体分子的方均根速率为

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}。 \quad (1-3)$$

三种速率的数值比较可参看图 1-2。

设气体分子的浓度(单位体积内分子数目)为 n , 则可以推得单位时间内轰击单位面积的气体分子数(各种速率和入射方向), 或所谓碰撞频率, 为

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a, \quad (1-4)$$

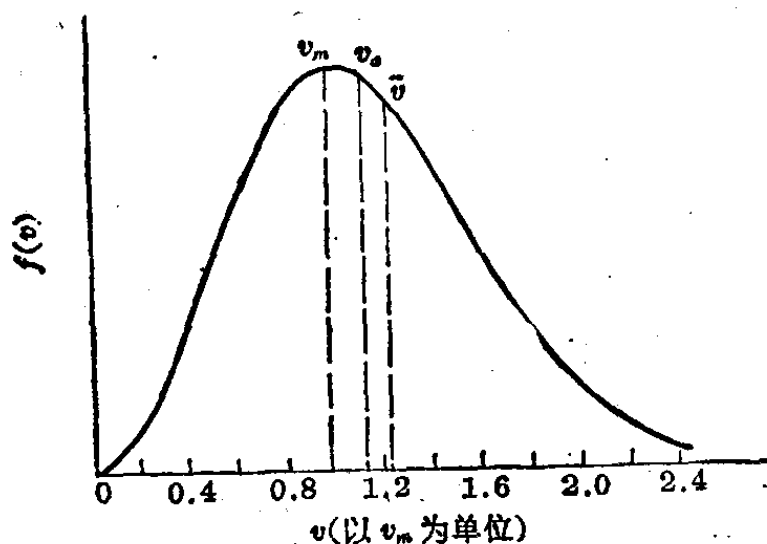


图 1-2 麦克斯韦-玻尔兹曼速度分布函数 $f(v)$

而压强为

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2 = nkT, \quad (1-5)$$

此处 ρ 为气体密度 ($=mn$)。上述关系还可以改写为

$$\frac{p}{\rho} = \frac{k}{m} T, \quad (1-6)$$

这就是理想气体的状态方程。由此可以推得

在 $T = \text{常数}$ 时, $\frac{p}{\rho} = \text{常数}$ (波义耳-马略特定律);

在 $\rho = \text{常数}$ 时, $p \propto T$ (查理定律);

在 $p = \text{常数}$ 时, $\frac{1}{\rho} \propto T$ (给吕萨克定律);

每一气体分子的平均动能为

$$\bar{E} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT. \quad (1-7)$$

从式 (1-4) 还可以推算气体分子在清洁表面上构成一单分子层所需的时间 τ 。设分子在表面上的排列花样如图 1-3 所示, 则每一分子所占面积为 $\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma^2$, 因此布满一面积为 A 的表面所需的时间为

$$\tau = \frac{A}{\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma^2 \cdot \nu_A \cdot \zeta} = \sqrt{\frac{8\pi m}{3kT}} \cdot \frac{1}{n\sigma^2 \zeta}, \quad (1-8)$$

此处 ζ 称为粘着几率，是决定于气体种类和表面条件的一个分数。

式(1-4)表示的是气体分子对某一表面(例如容器的内壁)的碰撞频率。实际上气体分子本身的杂乱运动还可以导致分子与分子之间的

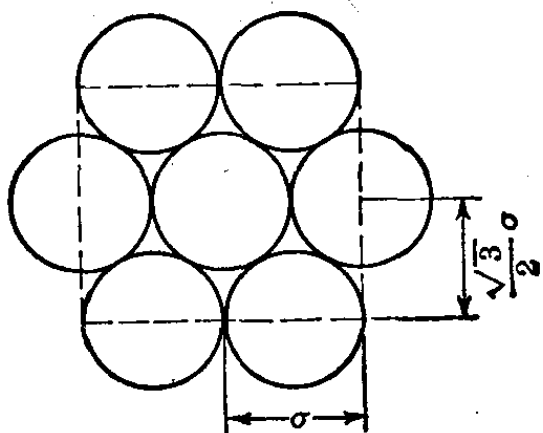


图 1-3 分子在表面上的密堆积排列

频繁碰撞。如有两种不同的气体分子 A 和 B ，其分子质量、直径、浓度和平均速率分别为 $m_1, \sigma_1, n_1, v_{a1}$ 和 $m_2, \sigma_2, n_2, v_{a2}$ ，则单位时间内一个 A 类分子对 B 类分子的平均碰撞次数为

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \pi \left(\frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_2}{2} \right)^2 \bar{v}_r n_2 \\ &= \frac{\pi}{4} (\sigma_1 + \sigma_2)^2 (v_{a1}^2 + v_{a2}^2)^{\frac{1}{2}} n_2, \end{aligned} \quad (1-9)$$

此处 $\bar{v}_r$ 表示一对分子作碰撞时其相对速度 v_r 的平均值。

每个分子在一次碰撞与另一次碰撞之间走过的路程长度(称为自由程)各不相同，但我们可以求它们的平均值，称为平均自由程 λ 。这只要把时间 t 内单位体积中所有分子走过的总路程长度除以同一时间内这些分子的总碰撞次数，即 A 类分子对 B 类分子的平均自由程为

$$\lambda_{AB} = \frac{n_1 v_{a1} t}{\frac{1}{2} n_1 Z_{AB} t} = \frac{2v_{a1}}{Z_{AB}}, \quad (1-10)$$

此处分母中的 $\frac{1}{2}$ 系考虑到总碰撞次数中 $A \rightarrow B$ 和 $B \rightarrow A$ 所

作的碰撞只能作为一次计算的关系。以式(1-2)和(1-9)代入式(1-10),可得

$$\lambda_{AB} = \frac{1}{\frac{\pi}{4} (\sigma_1 + \sigma_2)^2 n_2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}} \quad (1-11)$$

对于同一种分子, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, $m_1 = m_2$, $n_1 = n_2 = n$, 则

$$\lambda = \lambda_{AA} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} \quad (1-12)$$

式(1-11)和(1-12)所示的平均自由程并没有考虑温度的影响。

电子碰撞气体分子的平均自由程 λ_e 不能用 λ_{AB} 来计算, 因为电子速度不能单从热运动来考虑, 即不服从麦克斯韦分布。但是, 电子的速度一般比气体分子的热运动速度要大得多, 因此气体分子可认为是静止的, 而 $\bar{v}$ 就等于电子的运动速度; 再因为电子的半径(σ_1) $\ll$ 气体分子半径(σ_2), 所以

$$\lambda_e = \frac{4}{\pi \sigma^2 n}, \quad (1-13)$$

此处 σ 和 n 均为气体分子的直径和浓度。因此与式(1-12)相比,

$$\lambda_e = 4\sqrt{2}\lambda \quad (1-14)$$

以上所得到的是气体分子的平均自由程长。然而, 从个别的分子来说, 它们的自由程长是十分不同的, 只不过从统计的观点看来, 具有某种自由程长的分子将占有一定的比例。下面我们计算一下, 在总的分子数为 N 而平均自由程长为 λ 的气体中, 分子经过一段路程 x 而没有发生碰撞的几率。

设没有发生碰撞的几率为 $g(x)$ 。当分子再前进一段路程 Δx 时, 它的碰撞几率为 $\frac{\Delta x}{\lambda}$, 因而没有碰撞的几率为 $1 -$