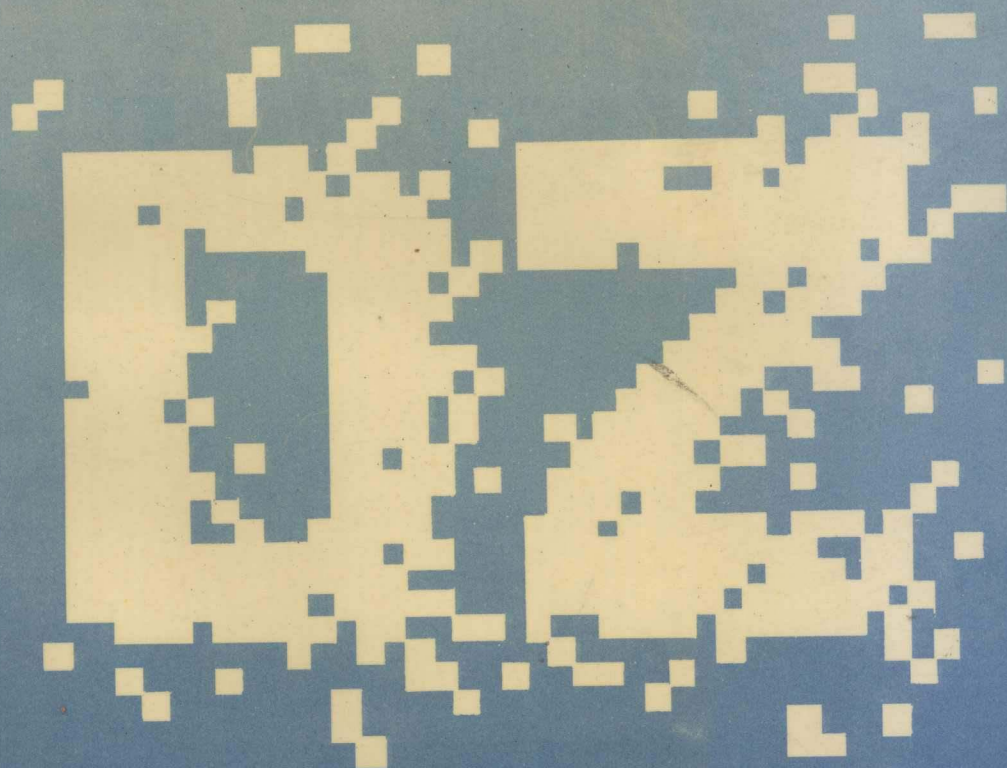




高等学校 规划教材
工科电子类

真空技术

金懋昌



东南大学出版社

要 點 著 內

真空技术

金懋昌 编著

东南大学出版社

(南京 飞机场东南大学, 张何圣泰等编)

(苏)新登字第 012 号

内 容 提 要

本书共分六章。主要内容是气体分子在空间的行为、材料的真空特性、真空获得、真空测量、真空检漏与真空系统、真空应用。书中着重介绍物理概念与各类真空泵、真空计以及真空系统的使用与选择,其中真空应用方面的内容约占 1/4 的篇幅。同时引用了大量的图表,充分体现了真空技术是一门实践性很强学科的特点。

本书为电子工业部八五规划教材,是一种口径较宽的专业基础课教材。除适用于电子物理与器件专业的本科生课程的教材外,也可作为电子材料与元器件、电光源技术、半导体物理与器件、激光器件、医用电子学等专业的教材或教学参考书,对从事真空技术生产、科研、应用的工程技术人员也有一定的参考价值。

责任编辑 张世杰

责任校对 陈阿明
刘娟娟



真 空 技 术

金懋昌 编著

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销 南航飞达印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 14.375 字数 360 千

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7—81050—007—4/TN·3

定价: 19.50 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由工科电子类教材编审委员会“电子物理与器件”教材编审组征稿并推荐出版。责任编委为华南理工大学黄光周教授。

本教材由电子科技大学金懋昌编著,西安交通大学郑德修教授担任主审。

本课程的参考教学时数为 60 学时。全书共分六章,其内容为气体分子在空间的行为、材料的真空特性、真空获得、真空测量、真空检漏与真空系统、真空应用。书中着重介绍物理概念与各类真空泵、真空计和真空系统的使用(约占 1/4 篇幅)与选择。书中还引用了大量的图表,充分体现了真空技术是一门实践性很强学科的特点。

参加本教材审阅工作的还有“电子物理与器件”教材编审组的许多老师,他们都提出了许多宝贵意见,这里谨向他们表示诚挚的感谢,也向本书所引用的参考文献和图表的有关作者以及帮助本书得以出版的许多同仁、朋友表示谢意。由于编著者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

金懋昌

1994 年 3 月

目 录

1	气体分子在空间的行为	(1)
1.1	压力单位与真空区域的划分	(1)
1.2	气体分子的基本特性	(2)
1.3	碰撞率与余弦定律	(5)
1.4	气体输运现象与扩散系数	(6)
1.5	气体沿管道的流动和管道的流导	(10)
1.6	气体的非稳定扩散和均方根位移	(17)
1.7	气体分子间的引力和碰撞的有效截面	(18)
2	材料的真空特性	(21)
2.1	固体材料表面的吸附作用	(21)
2.1.1	物理吸附	(22)
2.1.2	化学吸附	(23)
2.2	吸附过程动力学	(27)
2.2.1	吸附几率和吸附速率	(27)
2.2.2	平均吸附时间	(29)
2.3	表面脱附	(30)
2.3.1	热脱附	(30)
2.3.2	表面扩散与脱附温度	(33)
2.3.3	电子诱导脱附	(34)
2.3.4	荷能离子的轰击脱附	(36)
2.4	平衡吸附量	(37)
2.4.1	平衡吸附方程	(38)
2.4.2	物理吸附等温线	(38)
2.4.3	化学吸附等温线	(38)
2.4.4	混合气体的吸附量	(40)
2.5	气体在固体中的溶解和渗透及扩散	(42)
2.5.1	渗透扩散流	(42)
2.5.2	材料的扩散放气	(45)
2.6	材料的放气率	(47)
2.7	材料的蒸气压与蒸发率及分解压力	(49)
2.7.1	材料的蒸气压	(49)
2.7.2	蒸发率	(51)
2.7.3	化合物的分解压力	(52)

3 真空获得	(53)
3.1 概述	(53)
3.2 旋转机械真空泵	(55)
3.2.1 旋片式机械真空泵的工作原理	(55)
3.2.2 旋片式机械真空泵的特性和运用	(57)
3.2.3 掺气式机械泵	(58)
3.2.4 水环式真空泵	(59)
3.2.5 滑阀泵	(61)
3.2.6 罗茨泵	(62)
3.3 蒸气流扩散泵	(64)
3.3.1 扩散泵的工作原理	(64)
3.3.2 扩散泵的实际特性与运用	(67)
3.3.3 蒸气流喷射泵	(70)
3.3.4 油增压泵	(71)
3.4 涡轮分子泵	(71)
3.4.1 涡轮分子泵的工作原理	(71)
3.4.2 涡轮分子泵的特性	(74)
3.4.3 涡轮分子泵的结构与运用	(76)
3.5 低温吸附泵、钛升华泵和容积吸气剂泵	(76)
3.5.1 低温吸附泵	(76)
3.5.2 钛升华泵	(81)
3.5.3 容积吸气剂泵	(83)
3.6 溅射离子泵	(84)
3.6.1 溅射离子泵的工作原理	(84)
3.6.2 溅射离子泵的工作特性	(85)
3.6.3 溅射离子泵的运用	(87)
3.7 低温冷凝泵	(88)
3.7.1 低温冷凝泵的一般特性	(88)
3.7.2 闭环低温冷凝泵	(90)
3.8 真空获得的辅助元件及泵的选择	(93)
3.8.1 液氮冷凝阱	(93)
3.8.2 前级吸附阱	(94)
3.8.3 节流阀	(95)
3.8.4 其它附件	(95)
3.8.5 真空泵的选择	(96)
4 真空测量	(100)
4.1 绝对压力计	(100)
4.1.1 机械式真空计	(100)
4.1.2 薄膜电容真空计	(101)
4.1.3 U型真空计与压缩真空计	(103)
4.1.4 应变式真空计	(104)

4.2	相对真空计	(104)
4.2.1	热传导真空计	(105)
4.2.2	电离真空计	(108)
4.2.3	冷阴极放电真空计	(114)
4.2.4	等效氮压力概念	(115)
4.2.5	真空计的校正	(116)
4.3	质谱计	(118)
4.3.1	质谱计的基本参数	(118)
4.3.2	磁质谱计	(120)
4.3.3	四极场质谱计	(122)
4.3.4	质谱计的应用	(130)
4.3.5	智能型真空测量仪器	(141)
5	真空检漏与真空系统	(145)
5.1	真空检漏	(145)
5.1.1	高压法检漏	(146)
5.1.2	真空计法和高频火花检漏法检漏	(146)
5.1.3	氦质谱检漏仪及检漏技术	(150)
5.2	真空系统	(155)
5.2.1	油扩散泵抽气系统	(156)
5.2.2	超高真空抽气系统	(157)
5.2.3	能抽除有毒、易爆或有腐蚀性气体的真空系统	(160)
5.2.4	大流量抽气系统	(161)
5.2.5	真空系统的设计概要	(162)
6	真空应用	(166)
6.1	真空镀膜的制备工艺	(166)
6.1.1	真空蒸发镀膜	(166)
6.1.2	真空溅射镀膜	(177)
6.1.3	离子镀	(187)
6.2	真空干燥	(190)
6.2.1	干燥技术的基本概念	(190)
6.2.2	真空干燥	(191)
6.2.3	冷冻干燥	(193)
6.3	真空浸渍	(195)
6.3.1	真空浸渍的基本原理	(195)
6.3.2	真空浸渍的应用	(196)
6.4	真空蒸馏	(197)
6.4.1	蒸馏的基本概念和原理	(197)
6.4.2	真空蒸馏	(199)
6.5	真空包装与保鲜	(201)

6.5.1	真空包装的基本概念	(201)
6.5.2	真空包装机的基本结构	(203)
6.5.3	纺织品的真空包装	(204)
6.6	真空冶金	(204)
6.6.1	真空冶金的特点	(205)
6.6.2	真空冶金的主要设备	(207)
6.6.3	应注意的真空技术问题	(209)
参考文献		(211)
附录		(213)
附录 1	压力单位换算表	(213)
附录 2	质谱分析中常见的碎片图形	(214)
附录 3	常用气体的同位素丰度表	(219)
附录 4	南光机器厂生产的各种真空泵的主要特性	(220)
参考文献		(221)

1 气体分子在空间的行为

1.1 压力单位与真空区域的划分

压力是用来表示气体宏观状态的物理量之一。在国际单位制中,压力的单位是帕斯卡(Pascal),简称为帕[Pa],这也是我国现行的法定压力计量单位。

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$$

在真空技术中,以往曾用毫米汞柱(mmHg)作为压力的单位,其后又采用了与毫米汞柱单位在数值上相差极小的单位托(Torr, $1\text{mmHg}=1.00000014\text{ Torr}$)来表示,而在西欧则常用毫巴[mbar]来表示。这些单位现均属被废除的单位。为了供读者参考,将压力的法定计量单位与非法定计量单位间的换算关系列于附录1中。

真空是泛指在某特定的容器内,气体的压力低于 101325Pa 的稀薄气体状态。由于整个真空的范围很宽,为了运用的方便,通常按照压力的大小划分为几个区域:

粗真空	$10^5\sim 10^2\text{Pa}$
低真空	$10^2\sim 10^{-1}\text{Pa}$
高真空	$10^{-1}\sim 10^{-5}\text{Pa}$
超高真空	$10^{-5}\sim 10^{-10}\text{Pa}$
极高真空	$<10^{-10}\text{Pa}$

在真空技术术语中,经常谈论的是容器内的真空度而不是压力,显然压力愈低其真空度愈高。

大气的组成如表1-1所示。

表1-1 大气的组成

成分	化学符号	Wt%	Vol%	p_i/Pa
氮	N_2	75.51	78.1	79200
氧	O_2	23.01	20.93	21200
氩	Ar	1.29	0.93	947
二氧化碳	CO_2	0.04	0.03	31
氖	Ne	1.2×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.9
氦	He	7×10^{-5}	7×10^{-5}	5.3×10^{-1}
甲烷	CH_4	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-1}
氙	Kr	3×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-1}
氧化氮	N_2O	6×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-2}
氢	H_2	5×10^{-6}	5×10^{-5}	5×10^{-2}
氪	Xe	4×10^{-5}	8.7×10^{-6}	9×10^{-3}
臭氧	O_3	9×10^{-6}	7×10^{-6}	7×10^{-3}
合计		100%	100%	101300

目前部分工业部门及一些研究工作所要求的真空度如表 1-2 所示。

表 1-2 部分工业和研究工作中所需的真空度范围

应 用	真空度范围				
	极高真空	超高真空	高真空	低真空	粗真空
真空输送					
真空过滤					
石油工业					
金属熔炼和热处理					
电子注焊接					
真空镀膜					
区域熔炼及晶体生长					
真空蒸馏					
升华					
有机材料的制备					
绝缘纸的干燥					
食品的冷冻干燥					
药剂的干燥					
白炽灯的生产					
电子管的生产					
气体放电管及激光器生产					
质谱研究					
离子源					
质点加速器					
电子显微镜					
低温研究					
表面物理					
聚核装置					
新材料研究					
空间模拟					
p/Pa	10^{-13}	10^{-10}	10^{-5}	10^{-1}	10^2

1.2 气体分子的基本特性

1.2.1 理想气体

根据气体的种类和气体状态参数,如 p 、 T 的不同,可将气体区分为理想气体和非理想气体两大类。理想气体的条件是:① 可不必考虑分子间的相互作用力,除了弹性碰撞外,每个分子的运动是完全独立的,不受其它分子的影响;② 气体分子本身的体积,与它活动的空间即整个容器的体积相比是微不足道的,在考虑分子运动时,可将分子看成一几何点。根据这一理想气体的模型,可将气体分子视为进行着频繁碰撞的弹性刚球。

真空技术中涉及的气体,大都是常温下的低压气体,与理想气体很接近,可直接应用

想气体模型而不必加以任何修正。

气体压力的宏观表示式为

$$p = mRT/(MV) \quad (1-1)$$

式中 m —— 气体的质量；

M —— 该种气体的摩尔质量；

p, V, T —— 分别代表气体的压力、体积和温度；

R —— 气体普适常数，其具体数值 $R = 8.326 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 。

气体压力的微观表示式为

$$p = nm_s \bar{v}^2/3 \quad (1-2)$$

式中 n —— 单位体积内的气体分子数[个/ cm^3]；

m_s —— 气体分子的质量；

$\bar{v}^2$ —— 气体分子的平方速率平均值。

1 摩尔气体中含有的分子数(阿佛加德罗常数)为

$$L = 6.023 \times 10^{23} \text{ 个/mol} \quad (1-3)$$

标准状态下 1cm^3 中的气体分子数为 2.69×10^{19} 个

一些物质的相对分子质量 M_r 、分子质量(m_s)及分子直径(d_∞)列于表 1-3。

表 1-3 一些物质的相对分子质量(M_r)、分子质量(m_s)及分子直径(d_∞)

物质名称	化学符号	M_r	$m_s/10^{-24}\text{g}$	d_∞/nm
氢	H_2	2.02	3.35	0.275
氦	He	4.00	6.64	0.218
甲烷	CH_4	16.00	26.6	0.419
氨	NH_3	17.00	28.2	0.443
水	H_2O	18.0	29.9	0.468
氖	Ne	20.2	33.5	0.260
氮	N_2	28.0	46.5	0.375
氧	O_2	32.0	53.1	0.364
氯化氢	HCl	36.5	60.6	0.446
氩	Ar	39.9	66.2	0.367
二氧化碳	CO_2	44.0	73.0	0.465
氪	Kr	83.7	139	0.415
氙	Xe	131.3	218	0.491
汞	Hg	201	334	0.626

大量的气体分子在空间频繁碰撞的结果，必将存在着气体的某种速率分布和平均自由程分布。

在温度 T 时，总分子数 N 中，具有速率为 v ，并在 dv 区间内的分子数 dN 为

$$\begin{aligned} dN &= 4\pi N \left(\frac{m_s}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp(-m_s v^2/2kT) dv \\ &= N f(v) dv \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 k —— 玻尔兹曼常数；

v ——气体分子的运动速率。

这里 $f(v)$ 称麦氏速率分布函数,它表示了气体分子在速率 v 附近、单位速率间隔内出现的几率。

气体分子的平均速率为

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v dN = \left(\frac{8kT}{\pi m_s} \right)^{1/2} \quad (1-5)$$

$$\bar{v} = 1.6 \left(\frac{kT}{m_s} \right)^{1/2} = 1.6 \left(\frac{RT}{M} \right)^{1/2} \propto \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \quad (1-6)$$

对室温下的氮气,其

$$\bar{v} \approx 5 \times 10^4 \text{ cm/s} \quad (1-7)$$

气体分子的均方根速率

$$(\bar{v}^2)^{1/2} = \left(\frac{1}{N} \int_0^{\infty} v^2 dN \right)^{1/2} = 1.73 \left(\frac{kT}{m_s} \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

1.2.2 平均自由程和自由程分布

由表 1-3 可见,普通气体分子的刚体直径在 $4 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 左右。

一个气体分子在单位时间内,遭到其它分子碰撞的平均数为

$$\varphi = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n \quad (1-9)$$

这里的系数 $\sqrt{2}$ 是考虑到其它分子也在运动和分子速率分布后的修正因子。气体分子的平均自由程 λ 为

$$\begin{aligned} \lambda &= \bar{v} / \varphi = 1 / (\sqrt{2} \pi d^2 n) \\ &= kT / (\sqrt{2} \pi d^2 p) \end{aligned} \quad (1-10)$$

对 20°C 的 N_2 ,有

$$\lambda p \approx 6.10 \times 10^{-1} \text{ cm} \cdot \text{Pa} \quad (1-11)$$

可见,在 $p \approx 1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 时,其 $\lambda = 6.1 \text{ cm}$,这数值与一般容器的线度相当。

分子自由程 λ 与容器主要尺寸 d 的比值 (λ/d) 称克努曾系数,并用 K 表示。在 $K \ll 1$ 时,容器内气体分子的碰撞主要发生在气体分子之间,则属粗真空和低真空区域,其流动的形式属粘滞流;如 $K \simeq 1$ 或 $K > 1$,容器内气体分子碰撞主要发生在器壁上,则属高真空区域,其流动形式属分子流。

在电场作用下,电子或离子与气体分子碰撞的平均自由程分别为

$$\lambda_e = 4 \sqrt{2} \lambda \quad (1-12)$$

$$\lambda_i = \sqrt{2} \lambda \quad (1-13)$$

多成分气体,则成分 1 的分子在混合气体中的平均自由程为

$$\lambda_1 = 1 / \left(\pi \sum_{i=1}^k \sqrt{1 + \frac{m_{s1}}{m_{si}}} \left(\frac{d_1 + d_i}{2} \right)^2 n_i \right) \quad (1-14)$$

式中 m_{s1} —— 第 1 种成分的气体分子质量;

m_{si} —— 第 i 种成分的气体分子质量;

d_1 —— 第 1 种成分的气体分子直径;

d_i —— 第 i 种成分的气体分子直径;

n_i —— 第 i 种气体的单位体积内的分子数。

在双元混合气体中,如两种气体分子的质量和直径差别较小,又设 $n_2 \ll n_1$ 时,则近似有

$$\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 1/(\sqrt{2} \pi d_1^2 n_1) \quad (1-15)$$

一个气体分子在某平均自由程下,飞行路程 x 未遭碰撞的几率为

$$P(x) = \exp(-x/\lambda) \quad (1-16)$$

它随 x 值的增大而呈指数衰减,如图 1-1。

由式(1-16)可见,如 $x = \lambda$, 则 $P(x) = e^{-1} \approx 0.37$, 这表明实际上并不是所有的分子都是这样的自由程。飞行在这段路程中,约有 37% 的分子尚未遭到碰撞;而约有 63% 的分子的自由程小于 λ 值,即在飞行中已遭到碰撞;另外在 $x/\lambda \ll 1$ 时,仍可有极少量的分子会遭到碰撞,这是借以进行高真空乃至超高真空测量的基础。

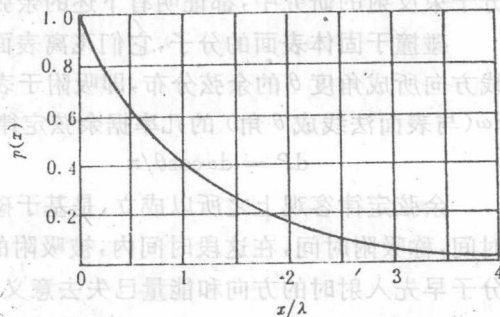


图 1-1 未遭碰撞的几率与飞行路程的关系

1.3 碰撞率与余弦定律

设一容器中装有的数密度为 n 并已达到热平衡的气体,现求解单位时间内容器中的气体打上单位表面面积的分子数,即碰撞率 $[\nu/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ 。

为便于分析,设在图 1-2 所示的坐标空间中,取一与 z 轴成 θ 角的面积元 dA ,坐标原点对 dA 所张的立体角为 $d\omega$ 。气体分子将不断地从 dA 面的两侧互相穿过,现只考虑自 dA 面下方撞至 dA 面的分子数。事实上能穿过 dA 面的分子数必是处于以分子速率为 $v \rightarrow v + dv$ 间隔内,并以 $dA \cos \theta$ 为底,以 $v dt$ 为高的圆筒内分子的一部分,即筒内分子中朝向 dA 运动的部分,这部分所占比例为 $d\omega/4\pi$ 。所以单位时间内, dA 面积上遭受碰撞的分子数为

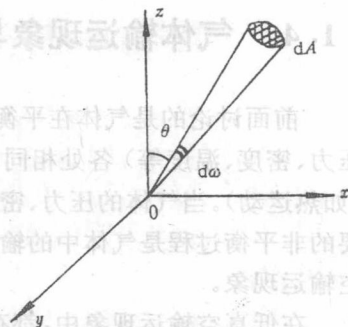


图 1-2 假想表面与立体角

$$N_{d\omega} = \frac{d\omega}{4\pi} \int_0^\infty n f(v) dv \cdot v dA \cos \theta$$

$$= \frac{d\omega}{4\pi} \bar{v} \cos \theta dA \quad (1-17)$$

已知在极坐标中, $d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, φ 是在 $x-y$ 平面上投影的夹角,其积分限为 $0 \sim 2\pi$, 据定义碰撞率 ν 值应是上式在下述积分限内的积分

$$\nu = \frac{\bar{v}}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi$$

$$= \frac{\bar{v}}{4\pi} 2\pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\sin \theta = \frac{\bar{v}}{4} \quad (1-18)$$

式中 θ 角的积分限取 $0 \sim \pi/2$, 表示分子只是由下方打至 dA 面。此式也可改写为

$$\nu = p / (2\pi m_e kT)^{1/2} = 4.7 \times 10^{20} p / (MT)^{1/2} \text{ [个 / (cm}^2 \cdot \text{s)]} \quad (1-19)$$

式中 p 的单位为 Pa。这是个基本公式,可用来研究真空中气体分子的迁移和蒸发率,同时对吸气剂的吸气和阴极中毒等研究也有重要的意义。

从式(1-17)可见,碰撞于表面的分子数按方向角 θ 呈余弦分布,那么由表面发射(逸出)的分子在空间呈何种分布规律呢?克努曾最初在低压气体流动的研究以至后来又在分子束反射的研究中,都证明有下述的余弦定律成立。

碰撞于固体表面的分子,它们飞离表面的方向与原来入射的方向无关,并按与表面法线方向所成角度 θ 的余弦分布,即吸附于表面上的一个分子,飞离表面时朝向位于立体角 $d\omega$ (与表面法线成 θ 角) 的几率据余弦定律为

$$dP = d\omega \cos \theta / \pi \quad (1-20)$$

余弦定律客观上之所以成立,是基于碰撞到表面的分子,在表面上总是要被吸附一段时间,称吸附时间,在这段时间内,被吸附的分子与表面进行充分的能量交换。因此,吸附分子早先入射时的方向和能量已失去意义。既然入射表面的分子呈余弦分布,那么由表面发射出来的分子也一定呈余弦分布是可以理解的,否则就不能保证气体的各向均匀同性了。

余弦定律的成立,是基于气体分子吸附在具有一定粗糙度的一般表面上,在其吸附时间内有充分的能量交换的结果。对在分子尺度的光滑表面上,如晶体的解理面,余弦定律将不再适用,这时自表面逸出的分子取决于入射的方向,有如镜面反射。在通常情况下,即使经过精密研磨过的表面,都可认为余弦定律总是成立的。

1.4 气体输运现象与扩散系数

前面讨论的是气体在平衡状态下的规律。所谓平衡状态,它是指气体的宏观参量(如压力、密度、温度等)各处相同,气体内没有宏观的运动(如集体流动)而仅有微观的运动(如热运动)。当气体的压力、密度和温度在空间分布不均匀时,将会发生非平衡过程。最重要的非平衡过程是气体中的输运现象。输运现象可分为两大类,即低真空输运现象和高真空输运现象。

在低真空输运现象中,都存在着某一个物理量梯度。如气体温度不均匀,则将发生从高温区到低温区的热传导;如气体分子的整体平均速率并非各处相同,则便有气体的某一部分施于其相邻部分的力,并力图消除这些速率差异,这过程也就是气体的粘滞现象;如果气体的组成不是处处相同,则将发生扩散过程。这些输运现象,都是在某种物理量梯度的条件下,气体分子间频繁碰撞的结果。鉴于普通物理学中均有这方面的内容,此处不再论述。下面仅对高真空下的气体输运现象作一介绍。

1.4.1 高真空输运现象

高真空输运现象有下述几种。

1) 自由分子粘滞性

假设容器中有二块平行的平板,如图 1-3。其中板 1 是静止的,而另一块板 2 则以速率 u 朝 x 方向运动。现求两板间的摩擦力。

已知在高真空中, 气体分子的碰撞发生在器壁之间。因此飞向板 1 的气体分子直接来自与板 2 碰撞之后飞出的气体分子, 反之亦然。根据余弦定律, 与静止板 1 碰撞的分子将失去原有的能量, 它们离开板 1 时的平均动量为零; 与此相应, 与动板 2 碰撞的分子将获得平均动量 $m_s u$, 这个平均动量是叠加在每个分子的热运动动量上的。每个与板 1 碰撞的分子给予板 1 的动量为 $m_s u$, 而碰撞板 2 的分子给予板 2 的动量则为 $-m_s u$, 两板间单位时间内单位面积上的摩擦力为

$$F = \frac{1}{4} \bar{n} m_s u = p u [M / (2\pi RT)]^{1/2} \quad (1-21)$$

或写成

$$F = \eta_0 p u$$

其 个二 参 考 文 献 $\eta_0 = [M / (2\pi RT)]^{1/2}$

式中, η_0 为自由分子粘滞系数。

2) 自由分子热传导

在研究自由分子热传导之前, 先介绍适应系数的物理意义。当温度为 T_i 的气体分子入射到温度为 T_A 的壁面后, 将在壁面上停留一吸附时间, 在这时间内与壁面进行能量交换, 一般情况下这种能量交换并不充分, 而只是交换了一部分。如令返回空间的分子具有温度 T_r , 则适应系数定义为

$$\alpha = (T_r - T_i) / (T_A - T_i) \quad (1-23)$$

它表示了入射分子与器壁之间热能交换的程度。当 $T_r = T_A$ 时, $\alpha \approx 1$, 表示能量交换完全充分, 一般 α 在 $0 \sim 1$ 间, 随气体种类和表面情况而异。

设有两块相距为 d 的平行平板, 其板 1、板 2 的温度分别维持在 T_1 、 T_2 , 如图 1-4。与自由分子粘滞性一样, 碰撞板 1 的分子直接来自板 2, 反之亦然。假定 $T_2 > T_1$ 。飞离板 1、2 的气体分子的温度分别为 T_1' 、 T_2' 。值得指出的是单个分子的温度是没有意义的, 这里实际上指的是分子的能量。参照式 (1-23) 在板 1 上有

$$T_1' - T_2' = \alpha_1 (T_1 - T_2')$$

在板 2 上有

$$T_2' - T_1' = \alpha_2 (T_2 - T_1')$$

整理后可得

$$T_2' - T_1' = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} (T_2 - T_1)$$

这是综合考虑两板间能量交换情况的表示式。因此, 两平行板间的等效适应系数为

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (1-24)$$

式中, α_1 和 α_2 各为板 1、板 2 的适应系数。于是, 单位时间通过单位面积由板 2 传到板 1 的

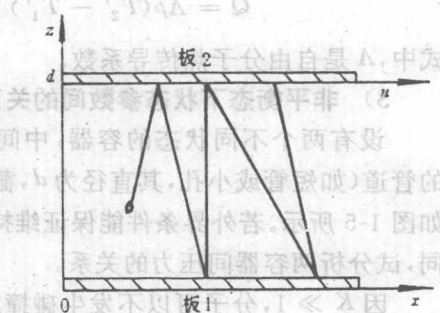


图 1-3 自由分子粘滞性的示意图

$$\eta_0 = \frac{1}{2} \bar{n} m_s u \quad (1-22)$$

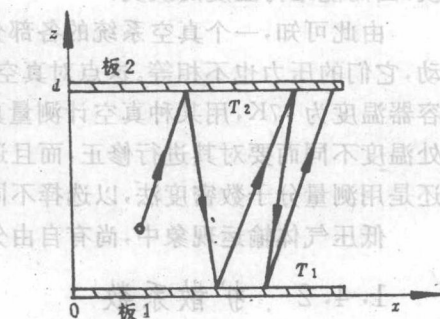


图 1-4 自由分子热传导的示意图

热量为

$$Q = \Delta p(T_2' - T_1') = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} \Delta p(T_2 - T_1) \quad (1-25)$$

式中, Δ 是自由分子热传导系数。

3) 非平衡态下状态参数间的关系

设有两个不同状态的容器, 中间用一根有限尺寸的管道(如短管或小孔, 其直径为 d , 截面积为 A) 相接, 如图 1-5 所示。若外界条件能保证维持两容器的温度不同, 试分析两容器间压力的关系。

因 $K \gg 1$, 分子可以不发生碰撞就飞过中间管道, 则单位时间内由容器 1 飞往容器 2 的分子数, 和由容器 2 飞往容器 1 的分子数分别为

$$\frac{1}{4} n_1 \bar{v}_1 A \quad \text{和} \quad \frac{1}{4} n_2 \bar{v}_2 A$$

稳定时, 两室交换的分子数必相等, 故有

$$n_1 \bar{v}_1 = n_2 \bar{v}_2$$

$$\therefore \frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1/2} \quad \text{或} \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/2} \quad (1-26)$$

可见此时两室的压力也不相同, 而是正比于温度的 $1/2$ 次方。

为什么当 $\lambda \gg d$ 时, 会在小孔两侧维持温度跃变这种特异现象呢? 原来当 $\lambda \ll d$ 时, 分子间碰撞频繁, 每一次碰撞都交换能量, 在小孔附近形成一个具有若干个自由程厚度的过渡层, 在过渡层内温度是缓慢变化的, 像高压气体热传导的情况一样, 任何分子都不能带着它原有速率直接飞到另一室去。当 $\lambda \gg d$ 时, 分子将如上所述, 无碰撞地在两室间交换, 因而能维持温度的跃变。

由此可知, 一个真空系统的各部分温度不同时, 只要达到平衡状态, 即使没有气体流动, 它们的压力也不相等。这点对真空测量很有指导意义。例如, 用一个液氮冷却的容器, 容器温度为 77K, 用某种真空计测量真空度, 真空计工作温度为室温, 这时需要考虑因两处温度不同而要对其进行修正, 而且还尚需考虑在测量真空原理上, 是用直接测量压力法还是用测量分子数密度法, 以选择不同的修正公式。

低压气体输运现象中, 尚有自由分子扩散现象, 将在气体通过管道的流动中介绍。

1.4.2 扩散系数

1) 自扩散系数

气体的自扩散, 以及一种气体在另一种气体中的互扩散, 在真空应用中占有重要地位, 为此我们将作较为详细的介绍。

在气体中存在浓度梯度时, 则单位时间内单位面积上净输运的分子数 Γ 为

$$\Gamma = -\frac{1}{3} \bar{v} \lambda \left(\frac{dn}{dx} \right) \quad (1-27)$$

式中负号表示输运的方向与浓度梯度的方向相反, 将此式与宏观的扩散系数比较, 可得自扩散系数为