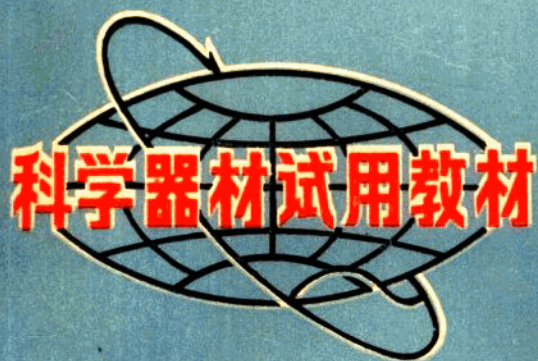




仪器仪表部分

第十二分册

真空设备及检测仪器

中国科学院技术条件及进出口局
中国科学院干部进修学院



前 言

中共中央[1981]10号文件指出，科学院要抓好科研工作的基本建设。抓好器材工作，改善实验手段，是科研工作基本性建设的一个重要组成部分。

为建设一支具有高度文化知识和管理技术的科学器材队伍，适应科技现代化的需要，我院委托浙江大学、成都科技大学，西安光机所等单位编写了这套器材干部学习材料。定名为《科学器材试用教材》。全套书分为：仪器仪表、机械电工、材料、电子测量仪器、科学器材供应与管理五部分。其中：

仪器仪表：包括科学仪器与工业自动仪表，十五个分册，由黄邦达同志主编，

机械电工：包括机械设备和电工器材，两个分册，由赵沔、李全铭二同志主编，

材料：包括金属材料和非金属材料，九个分册，由佟锦川、胡仲培二同志主编，

电子测量仪器：由吴景渊、孙焕根二同志主编，

科学器材供应与管理：由陈东还同志主编。

此教材是根据器材工作的特点和我院常用的科学器材编写的。着重介绍科学器材的基本结构、原理、性能、参数、用途、使用维护技术及国内外发展动态。内容力求深入浅出，通俗易懂。

本教材适合具有一定工作经验的在职器材干部学习，也可作为培训具有高中文化程度的年青的器材干部的试用教材，还可供从事科研、生产、教学等部门实验、计划、管理干部学习参考。

在当今科学发展的情况下，科学器材日新月异，更新的速度也随之加速。此教材仅选择当今科学研究常用的仪器、设备和材料，今后将随着科学技术的发展不断地充实提高。

在教材编写过程中，得到了浙江大学，成都科技大学，厦门大学等单位的大力支持，谨致以衷心的感谢。向所有参加教材编写、修改及讨论工作的教师，科研和器材人员表示衷心的感谢。

这套教材是按照科学器材工作的要求和特点组织编写的，由于缺乏经验，不足之处在所难免，希望读者提出宝贵意见。

中国科学院技术条件及进出口局

中国科学院干部进修学院

一九八二年六月廿六日

编者的话

《真空设备及检测仪器》系根据第二次科学器材试用教材讨论会上确定的大纲进行编写，着重介绍各类真空泵、真空检测分析仪器及真空元件与材料等的性能、用途及其基本原理。在原理推论中，没有列入繁复的数学推导，以物理概念的阐述为主，并有61个插图以帮助读者更直观地理解原理。最后附列21个具有实用价值的表，可供读者参考。由于编写时间较短促和限于编者的水平，如有不妥或错误之处，望读者谅解并指正。

季敬川

1983.12.

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 真空的基本概念	(1)
第二节 气体分子运动基本概念	(6)
第三节 气体与固体的相互作用	(11)
第四节 真空设备的分类	(13)
第二章 真空获得设备	(15)
第一节 机械泵	(15)
第二节 蒸气流泵	(19)
第三节 分子泵	(21)
第四节 吸附泵	(23)
第五节 钛泵	(24)
第六节 冷凝泵	(28)
第三章 真空测量设备	(30)
第一节 绝对真空计与相对真空计	(30)
第二节 热传导真空计	(31)
第三节 热阴极电离真空计	(32)
第四节 超高真空电离计	(33)
第五节 冷磁控超高真空计	(34)
第六节 其他真空计	(35)
第四章 检漏仪器及检测方法	(38)
第一节 常用检漏方法	(38)
第二节 氦质谱检漏仪	(39)
第五章 残气分析仪器	(42)
第一节 回旋质谱计	(42)
第二节 四极滤质器	(44)
第三节 其他质谱计	(46)
第六章 真空系统及其配套设备	(49)
第一节 真空系统	(49)
第二节 真空设备	(50)
第七章 真空元件与材料	(58)
第一节 真空密封法兰	(58)
第二节 真空阀门	(61)
第三节 冷阱	(62)
第四节 波纹管	(64)
第五节 真空材料	(66)
附表一——二十一	(69)

附表目录

一	常用压强单位换算表.....	(69)
二	常用物理常数表.....	(70)
三	简单几何形状管道自由分子流的流导计算公式.....	(71)
四	旋片式真空泵.....	(72)
五	直联旋片泵.....	(73)
六	其他机械真空泵.....	(74)
七	高真空油扩散泵.....	(75)
八	高真空油扩散凸腔泵.....	(76)
九	我国K系列高真空油扩散泵主要技术性能.....	(77)
十	国外部分油扩散泵型号及技术性能.....	(78)
十一	国内外立式涡轮分子泵技术指标.....	(79)
十二	部分国产热钛泵的型号及性能.....	(80)
十三	国内溅射离子钛泵型号及性能.....	(80)
十四	部分国产真空计型号及主要性能.....	(81)
十五	部分国产真空规管型号及性能.....	(82)
十六	国内外氦质谱检漏仪的主要性能.....	(83)
十七	电真空技术中常用质谱计的主要参数.....	(84)
十八	国产高真空机组的主要技术性能.....	(85)
十九	国产超高真空机组.....	(86)
二十	国产各类镀膜机.....	(86)
二十一	我国现有与真空技术有关的标准.....	(89)

第一章 概 论

第一节 真空的基本概念

“真空”这个概念，系指低于大气压的气体状态。换言之，真空也是一种气体状态，它与大气相比，单位体积中气体的分子数较少；其次是气体种类成分的比例有所变化；第三是气体质点间的碰撞不那么频繁了；第四是气体质点打在某一面表（例如容器内壁）上的数目大大减少。以上四点就是“真空”与大气相比所具有的主要特征。

三百多年前，人们已发现真空现象。1643年托里拆利（Torricelli）发现大气压力的同时，就形成了小于大气压力的气态概念，并称之为“真空”。再经过二百余年，直到1879年白炽灯泡和阴极射线管的诞生，对“真空”的应用和研究工作才被人们所重视，逐渐形成了“真空技术”这门基础科学，吸引了大批学者从事真空物理与真空技术方面的研究工作，并且迅速被应用到很多科学与工业部门。目前，真空技术已成为一种必不可少的技术手段。随着科学技术的发展，对真空技术提出了更高的要求，使它在发展国民经济和尖端科学方面发挥更大的作用。

在真空技术中，必须涉及几个最常见的物理量，它们是压强；抽气速率；极限真空度；饱和蒸汽压和形成一个单分子层的时间常数。这些物理量都具有其严格的定义和确切的物理概念，是本节需阐述的重点。此外，还有几个表征气体分子运动特点的物理量，诸如气体分子密度和平均自由程等，将在阐述气体分子运动时详述。

一 气体的压强

人们生活着的地球表面，复盖着厚厚的一层空气，这层空气具有一定的重量，它作用于地球上的任何物体，这就是客观存在的所谓大气压力，从简单的实验结果表明，单位面积所承受的大气压力，大约为760毫米水银柱高度所产生的重力。

在高空中，离开地球表面越高，空气越稀薄，该处的压强越低。根据现代人造卫星观察的结果表明，空间高度与大气压强之间的关系是：

空间高度（公里）	气压（毫米汞柱）
0	760
50	<1
100	10^{-3}
200	2×10^{-7}
300	3×10^{-8}
400	10^{-8}
500	10^{-10}
大气最上层	10^{-12}
星际空间	10^{-16}

从这一组数据看出，宇宙空间就是客观存在的自然真空，离地球表面越远，气体的压强越低，即真空度越高。

在地球表面，人们可以把某个密封容器内的气体抽去若干，使容器内的气体较之大气稀薄，因而该容器内的气压要比大气压强低得多，这就是人为地造成了真空容器。在容器中的气体，对器壁施有压力，因此，气体压强的定义是：单位面积器壁上所受到的气体压力。这时我们把容器内的气体看作是恒定的，其压力亦是平衡的，它是一种宏观的概念，这一个气体压强的定义可称为宏观的压强定义。

其实，气体分子总是作热运动状态的，只是在不同的温度下，有其不同的平均速度，同时，气体分子的容器不同，分子与分子间或分子与器壁间的碰撞次数和每次碰撞间的平均路程亦不同。因此，从微观的概念，可以更本质地来定义气体的压强是：大量气体分子碰撞于单位面积器壁而产生的动量变化的总和。这个定义是具有统计的概念，是大量气体分子的平均结果。

假设气体分子为完全弹性刚体球，其热运动服从经典力学规律，就不难用统计的方法求出气体压强的公式为

$$P = \frac{1}{3}nm\overline{v^2} = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2} \quad (1.1)$$

式中：

P ——气体压强（微巴）；

n ——气体分子密度（个/厘米³）；

m ——分子质量（克）；

$\overline{v^2}$ ——分子热运动均方速度（厘米²/秒²）；

ρ ——气体分子比重（克/厘米³）。

利用能量均分定理，可以将上式换算成

$$P = nkT \quad (1.2)$$

式中：

k ——玻尔兹曼常数（ 1.38×10^{-16} 尔格/°K）；

T ——绝对温度（°K）。

从以上两式看到气体压强这一概念的本质，即压强只与容器中的气体分子密度大小有关，且与容器中气体分子总数无关，这是一个十分重要和具有实际应用的基本概念。

在工程技术上，气体压强的单位却是这样来定义的：在标准重力加速度（980.665厘米/秒²）下，0℃时，760毫米纯汞柱高度的压强为1个标准大气压（ATM）。因为汞的密度为13.59505克/厘米³，所以

$$\begin{aligned} 1(ATM) &= 76\text{厘米} \times 13.6\text{克/厘米}^3 = 1033.6\text{克/厘米}^2 \\ &= 1.0336\text{公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

在工业上为了计量方便,略去小数,将1个气体压定为1公斤/厘米²。

在真空技术中,其压强都是低于一个大气压,并用毫米汞柱作为压强的计量单位,为了口述和书写方便,也为了纪念真空技术奠基人托里拆利(Torr celli),将毫米汞柱(mmHg)命名为“托”。有的书刊文献中写成“毛”或“Torr”,都是同一个真空单位。为了沿用习惯和汉字化起见,本文均以“托”作为压强单位。

近年来,为了将真空测量单位与物理学中的米、公斤、秒(MKS)制统一起见,建议将压强的单位改为“帕”(牛顿/米²),用字母 P_0 表示,在国外有的书刊文献上已引用它。

“托”与“帕”之间是可以直接换算的,即

$$1\text{托} = 133.3\text{帕}$$

$$1\text{帕} = 7.5006 \times 10^{-3} \approx 7.5 \times 10^{-3} \text{托}$$

在真空技术发展的初期,曾用“真空度”来计量真空状态,其定义是:

$$\delta = \frac{760 - P}{760} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中 P 的单位用mmHg。实际上,真空技术领域内所遇到的压强都远远小于760mmHg,因此,这个真空度的定义就没有实用价值了。而“真空度”只以一个术语来应用,通常都采用压强来衡量真空状态,压强越高,表明单位体积内的气体分子数越多,真空度就越低。反之,压强越低,说明真空度越高。

按照不同的压强范围,我们可以把真空状态划分为五个区域:

低真空——压强低于760托至10托;

中真空——压强低于10托至 10^{-3} 托;

高真空——压强低于 10^{-3} 托至 10^{-8} 托;

超高真空——压强低于 10^{-8} 至 10^{-12} 托;

极高真空——压强低于 10^{-12} 托。

总之,压强的负指数越大,表示气体分子的密度越小,其真空度越高。

二 抽气速率

抽气速率是衡量真空设备性能的一些重要参数之一,它标志该设备的抽气能力。

抽气速率的定义是:在一定的压强和温度下,单位时间内从被抽容器内抽出的气体体积,称为该压强下设备的抽气速率。根据这一定义,可以写出抽气速率的数学表达式为:

$$S = - \left. \frac{dV}{dt} \right|_P \quad (1.4)$$

此式的物理意义就是由于设备的抽气作用,在某一压强 P 下,在瞬时 dt 的时间里,被抽容器内气体的体积减少了 dV ,故上式的右边取负号。

实际抽气过程中,被抽容器的体积是不变的,而容器内气体分子密度在不断变化,反

映出来的是压强有了变化。根据玻义耳定律，一定质量的气体，在恒定温度下，气体的压强与体积的乘积为常数，或者说它的压强与体积成反比。其数学表达式为：

$$PV = \text{常数} \quad (1.5)$$

$$\text{或} \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1.6)$$

因此，在抽气过程中为

$$PV = (P - dP)(V + dV) \quad (1.7)$$

或将此式改写成

$$P \frac{dV}{dt} - V \frac{dP}{dt} = 0 \quad (1.8)$$

所以抽气速率的表示式(1.4)引入玻义耳定律后就可写成

$$S = - \frac{dV}{dt} = \frac{V}{P} \frac{dP}{dt} \quad (1.9)$$

式中：

V ——被抽容器的体积（升或米³）

P ——被抽容器的压强（托）

S ——容器中压强为 P 时的瞬时抽率（升/秒、升/分或米³/小时）

当抽气时间从 t_1 到 t_2 ，被抽容器内的压强从 P_1 改变到 P_2 ，只需将上面 (1.9) 式积分，并将积分所得的自然对数 L_n 换算为常用对数 L_0 即得：

$$S_{t_1 \rightarrow t_2} = 2.3 \frac{V}{t_2 - t_1} L_0 \frac{P_1}{P_2} \quad (1.10)$$

这是一个计算抽气速率的实用公式。例如将某一已知体积为 V 的被抽容器，自大气压开始，经 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 的连续抽气，并记录了每一时间相应的压强变化为 P_1 、 P_2 、 P_3 …… P_n ，则可用 (1.10) 式计算出每一时间间隔的瞬时抽气速率。实验证明，随着压强的改变，抽气速率也在不断变化，压强较高时，抽速较大，压强较低时，抽速较小。当被抽容器的压强降到最后极限压强 P_u 时，压强不再改变，即 $P_n = P_u$ ，因 $L_0 \frac{P_n}{P_u} = L_0 1 = 0$ ，则 $S = 0$ ，故这时的抽气速率为零。

三 极限真空

极限真空在计量上都以“极限压强”表示。当被抽容器的漏气量、内部器壁的放气量及由抽气设备返回到容器的部分气体之总和，同被抽走的抽气量相等时，尽管抽气设备在继续工作，容器的压强也不再继续下降，这时的压强称为“极限压强”，用字母 P_u 表示。

极限压强这个参数，通常可以表志真空技术的发展水平。例如在本世纪五十年代前，极限压强只在 10^{-7} 托量级。五十年代后，已进入超高真空区域。近年来，随着空间技术的发展，人为的极限压强已经可以达到极高真空区域。

极限压强对于被抽容器来说,主要取决于容器的密封技术和容器材料的放气特性。现有的真空密封技术,可以得到较完善的可靠密封结构,将漏气率限制在极微的数量级。容器内的极限压强往往取决于在各种温度影响下器壁的吸或放气性能。例如将一密封容器置于低温环境中,由于器壁的低温吸气作用,可以使容器内的压强,维持在较低的量级。反之,将该容器置于高温状态,器壁表面以及容器材料内部都会释放出大量气体,提高容器内的压强,降低了真空度,维持在较高的极限压强。由此可见,要获得较低的极限真空,容器的制作材料,必须选用在高温下放气量小的材料。

各类真空泵,都有其极限压强这一参数,这是由各类泵的结构、材料和工作原理所确定的。例如一般机械泵的极限状态只能使泵口抽到 10^{-3} 或 5×10^{-4} 托。油扩散泵的极限压强可达到 10^{-8} 托,有的结构改良后可达 10^{-10} 托。离子溅射钛泵的极限真空较高,其极限压强可以达到 10^{-12} 托以下。

各种真空计量设备,也具有一定的极限压强,这是由各种计量设备的结构原理所决定的。例如水银压缩型真空计,只能准确测量到 10^{-6} 托。普通电离式真空计,最低压强可测量到 10^{-7} 托。改型后的电离真空计,则可测到 10^{-12} 托。这些都标志该真空计所具有的极限压强特性。

综上所述,要获得优质的极限真空,必须是将被抽容器、抽气设备和测量装置各因素的综合考虑,决非单一因素所决定的。

四 饱和蒸气压

各种固体和液体在真空密封容器中,在任何温度下都会发生蒸发过程。蒸发出来的蒸气又可能凝聚到蒸发物上,形成逆过程。在某一温度时,当蒸发的分子数和凝聚的分子数相等时,达到了平衡状态,容器内的压强恒定不变了,这个压强就是容器的材料在该温度下的饱和蒸气压。可用字母 P_s 表示。

饱和蒸气压与温度之间有密切的关系,随着温度的提高,饱和蒸气压增大。同样也随着温度的下降而减小。饱和蒸气压与温度之间的关系可近似地表示为:

$$\ln P_s = C - \frac{\Delta H}{RT} \quad (1.11)$$

$$\text{或} \quad \lg P_s = A - \frac{B}{T} \quad (1.12)$$

式中:

P_s ——饱和蒸气压;

A 、 B 、 C ——常数;

R ——气体普适常数;

T ——绝对温度;

ΔH ——气化潜热。

上式表明,各种材料的 A 、 B 、 C 常数确定后,饱和蒸气压将取决于温度的高低。

在真空技术中,饱和蒸气压是一个需要十分重视的参数,它直接影响极限真空度,当压强很低时,往往是真空容器内某种材料的饱和蒸气成为气源,决定了在该容器内的极限压强和真空清洁程度。在低温下具有低的饱和蒸气压则是冷致泵的基本工作原理所在。

五 形成一个单分子层的时间常数

随着真空技术的发展,近年来,真空容器的极限压强已经达到极低的程度,空间的气体分子浓度已经十分稀薄,因而对真空空间气体分子运动规律的研究成为次要因素,应把注意力集中到气体分子与容器真空表面的关系上。尤其在超高真空和极高真空区域里,固体表面与气体的相互作用已成为真空技术中的新课题,进而发展成为一门新兴的边缘学科——表面科学。

在研究气体与固体表面的相互作用中,形成一个单分子层的时间常数(用字母 τ 表示),是用来表示真空状态的一个参数,其定义是:在新鲜表面上覆盖一个分子厚度的气体层所需要的时间。不难理解这样的事实,真空度越高,空间气体分子越少,分子与真空表面作用的几率越少,在新鲜表面形成单分子层所需的时间越长。在一般高真空状态,真空表面已不只是单分子层的吸附,通常都是多层分子吸附而且还有从固体表面向其内部渗透的体吸收,在这种状态下,无需考虑形成时间 τ 的问题,都是利用空间粒子的测量方法来确定真空度的。

单分子层形成时间常数 τ 值的确定是非常繁复的,它取决于固体表面的吸附和脱附等一系列物理现象,亦不是一般的数值运算就能确定的。主要目的在于使我们明确“ τ ”这个参数的物理概念,以期有助于在超高真空与极高真空领域内对各种物理现象的研究。

第二节 气体分子运动基本概念

研究气体分子的运动规律,是从低真空到高真空区域中最基本的因素。在超高真空区域里,不仅要研究气体分子的运动规律,还必须分析气体分子与固体表面的相互作用,直至极高真空区域,空间气体分子的运动规律已不再是主要因素,气——固界面的相互作用则成为主要研究对象。本节只涉及气体分子运动的基本概念,气——固界面的相互作用留待下一节中阐述。

涉及气体分子运动的种种现象,必须建立下列几个基本概念:

一 气体分子运动的特点

每一种气体分子都具有一定大小,质量和结构形状,并具有不停地作无规则的热运动。在真空技术中所要研究的气体分子对象,都是稀薄气体,其大小和质量等都可以近似地忽略不计,这样就是把气体分子理想化了。所谓“理想气体”,其特点是:

- (1) 这种气体分子可以想象为弹性质点,同类气体的分子质量都是相同的;
- (2) 这种气体的分子之间的作用仅限于弹性碰撞,分子间不存在引力和斥力的作用;

且其重力作用可以忽略,

(3) 这种气体分子本身的体积比其活动的空间小得多, 因此分子本身的大小尺寸可以忽略。

真空状态中的稀薄气体与上述理想气体的三个特点还是非常相似的, 因此, 可以把真空中的稀薄气体当作理想气体来研究, 这样既可以把问题大大简化, 又不致于产生大的误差。

二 压强与温度的关系

在第一节中列出压强的公式(1.1)与(1.2)分别为:

$$P = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2} \quad (1.1)$$

$$P = nkT \quad (1.2)$$

比较以上两式并换算后即得

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT \quad (1.13)$$

从以上三式可以看出:

(1) 在温度不变的情况下, 压强与气体分子密度成正比, 与气体的种类无关。

(2) 气体分子的平均动能只与气体的温度有关, 气体的温度越高, 其平均动能就越大。

(3) 气体分子密度保持不变情况下, 压强与气体分子的温度成正比。这是因为温度升高后, 气体分子的平均动能增加, 气体分子碰撞器壁时的冲量增大, 呈现出容器内压强的增高。

上述结论, 在真空技术中颇有实际指导意义。例如可以利用加热提高温度的方法, 增加气体分子的平均动能, 力求较彻底地排除容器内的气体分子。又如可以借助低温技术来提高真空度, 降低密封容器内的压强。

三 气体分子的运动速率分布

气体分子是不停地作无规则的热运动, 它们会不断地与器壁碰撞, 也不断地相互间发生碰撞。因此, 对每个分子来说, 其运动速度和方向都在不断地变化着。我们要研究某个气体分子的运动速度和方向是不可能的, 而且也是没有实际意义的。但是对大量的气体分子总体来说, 其运动速率是有一定规律可循的。按统计律的实验可得, 在某一温度时, 各种运动速度的分子数, 具有一定的分布状态。这一分布规律, 于1859年由麦克斯韦推导的结果如下:

有 N 个气体分子, 当它们处于热平衡时, 具有 T 度温度, 则速率在 $v \sim v + dv$ 间的分子数为

$$dN = N f(v) dv = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} \times 4\pi v^2 dv \quad (1.14)$$

式中:

- v —— 分子速率 (厘米/秒);
- m —— 分子质量 (克);
- k —— 玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-16} 尔格/K);
- T —— 绝对温度 (K)。

那么 $dN/N = f(v)dv$ 即为速率位于 $v \sim v + dv$ 间的分子相对数目, 也就是一个分子处于 $v \sim v + dv$ 间的几率。而 $f(v) = (1/N)(dN/dv)$ 则是在 v 附近单位速率间隔中的分子相对数目, 也是一个分子处于 v 附近单位速率间隔中的几率。

$f(v)$ 就称为麦克斯韦速率分布函数, 其图形如图 1.1 所示。

从图 1.1 可以看出, 温度越高, 分布函数就向高速率方向延伸, 但分布曲线的高度下降了, 这说明越向高速率的分子数相对地增多了, 但是总分子数是不变的, 即曲线 1 与曲线 2 其包络的总面积是相等的。

其次可以看出, 要确定某个速率的分子数是多少, 这是实现不了的, 只能知道某一速率间隔的分子相对数是多少而已。

在分布曲线极大值所对应速率称最可几速率 v_m , 分子速率的算术平均值称平均速率 $\bar{v}$, 分子速率平方值再取开方, 称为均方根速率 $\sqrt{v^2}$ 。由于麦克斯韦分布曲线不是对称的, 因此这三种速率的数值是不相等的。

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.15)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1.16)$$

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (1.17)$$

比较三种速率的大小是

$$\sqrt{v^2} > \bar{v} > v_m \quad (1.18)$$

气体分子的平均速率, 不但与气体的温度 T 有关, 还与气体分子的质量 m 有关。这就是说凡与热运动速率有关的现象, 其结果对各种气体是不相同的。这就导致一个重要的现象, 即“选择作用”。在扩散泵里对氢的抽速比对氮、二氧化碳等较重气体的抽速要大, 这就是选择作用的一个典型例子。

室温时 ($T = 300^\circ \text{K}$) 可算得空气的最可几速率和平均速率分别为 4.1×10^4 厘米/秒和 4.6×10^4 厘米/秒。这一速率大约接近枪弹的速率。

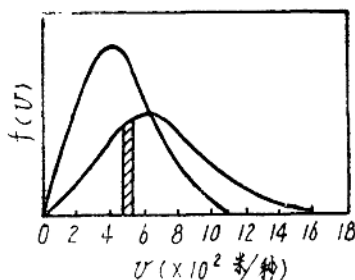


图 1.1 麦克斯韦速率分布

四 气体分子的碰撞和平均自由程

气体分子即使在常温下，其运动的速率也是相当大的，但是这种运动却是无规律的。另一方面，通常所说的真空空间，仍然包含大量的气体分子存在，压强低至 10^{-12} 托时，每立方厘米空间还有 33000 个气体分子数。（标准大气压时每立方厘米内具有 2.689×10^{19} 个气体分子）因此，分子与分子间或分子与器壁间的碰撞是非常可观的，其碰撞次数是很难估算的。

气体分子碰撞在表面上的目数，可以用单位时间内碰撞在单位面积上的分子数来表示：

$$\Gamma_n = \frac{n \bar{v}}{4} \quad (1.19)$$

将前面提到过的 $P = nkT$ 和 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{m\pi}}$ 两式与上式换算后得：

$$\Gamma_n = \frac{P}{(2\pi mkT)^{1/2}} \quad (1.20)$$

单位时间内碰撞于单位面积上的分子数正比于 n 与 $\bar{v}$ ，但与容器中总的分子数无关。由于平均速度 $\bar{v}$ 很大，故 Γ_n 值也很大。例如：300°K，1 个大气压下每秒钟碰撞在 1 个平方厘米面积上的分子数有 3×10^{23} 个。同样温度下，压强降至 10^{-8} 托，每秒钟碰撞在每平方厘米面积上的空气分子还有 3.7×10^{14} 个。

碰撞在表面上的气体分子，还会从表面反射飞向空间，这时其飞离表面的方向与碰撞时的方向是无关的，固体表面对碰撞分子起着漫射作用。不论分子与表面的碰撞还是反射，都服从克努曾定律（余弦定律）。

一个分子接连两次同其他分子碰撞之间的距离称为气体分子的自由路程。设想某个分子在繁多的碰撞过程中，其自由程是变化无穷的。但是可以存在一个稳定的平均值，这个平均值称为气体分子的平均自由程，用字母 λ 表示。克劳修斯计算出平均自由程的公式是：

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} \quad (1.21)$$

式中：

λ ——平均自由程（厘米）

n ——气体分子密度（个/厘米³）

σ ——气体分子直径（厘米）

也可以将 (1.2) 式 $P = nkT$ 与上式变换得

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 P} \quad (1.22)$$

对一定的气体种类在一定的温度时就有

$$P\lambda = \text{常数} \quad (1.23)$$

例如空气在25℃ (约300°K) 时

$$P\lambda \approx 5 \times 10^{-3} [\text{托} \cdot \text{厘米}]$$

$$\text{或} \quad \lambda \approx \frac{5 \times 10^{-3}}{P} [\text{厘米}] \quad (1.24)$$

从上式可见, 平均自由程与气体的压强成反比, 也就是同气体分子的密度成反比 (1.19式)。室温时的大气 (760托), 其平均自由程为 6.2×10^{-6} 厘米, 每秒钟就要碰撞70亿次左右。

以上都是以气体分子之间的相互碰撞所得的自由程和平均自由程的概念。在稀薄气体状态下, 气体分子还将同容器内壁进行频繁的碰撞, 这时的平均自由程概念不再由 (1.20) 式所决定了。例如在一个特征尺寸为10厘米的容器内, 其压强为 10^{-6} 托时, 相应的平均自由程可以达5000厘米, 已经大大地超过了容器允许的尺寸, 显然与 P 、 n 都已无关。这时气体分子的平均自由程只能理解为一个气体分子在该容器内来回与器壁碰撞达 $\lambda/d = 500$ 次才与另一个气体分子相碰撞。相当于将5000厘米的平均自由程长度摺折在10厘米的容器内。

平均自由程的概念很重要。平均自由程 λ 与容器尺寸 d 的比值 λ/d 称为克努曾 (Knudsen) 数, 它可以用来判别容器的真空状态。当 $\lambda/d \gg 1$ 时, 分子与器壁的碰撞是主要的, 气体分子与分子间的碰撞几率很小, 这就是高真空状态。反之, 当 $\lambda/d \ll 1$ 时, 气体分子与分子之间的碰撞则是主要的, 这就是低真空状态。

五 气体的迁移现象

当气体的局部温度不一致或局部的气体分子密度不相等时, 由气体分子本身的热运动结果, 使各局部的气体分子都逐渐趋向均匀一致, 它必然是气体分子间迁移的结果。这种迁移现象包括扩散、热传导和内摩擦三种形式。

(1) 扩散现象是在气体分子的密度不均匀时, 在单位时间内, 从密度较大的一边向密度较小一边迁移的分子数, 要比密度较小的一边向密度较大一边迁移的分子数要多。前者称为扩散过程, 后者称为反扩散过程。随着扩散与反扩散过程的进行, 使整个气体的密度较快地达到均匀。这种扩散现象, 可以发生在某种气体自身的不平衡状态, 也可以发生在某种均匀的气体中掺入另一种气体而破坏其平衡状态之后。联系前面所描述的气体运动速

率和平均自由程等概念，不难理解气体的扩散速度与压强有关的结论。压强愈低，扩散进行得愈快，达到平衡的时间愈短。

利用气体分子的扩散现象，可制成各种类型的蒸气扩散泵，已成为获得高真空的主要设备，在实践中已获得广泛的应用。由于反扩散现象的存在，油扩散泵在工作时，在抽除大量气体的同时，油分子也会反扩散到被抽容器或真空系统中造成污染。因此，在设计和使用油扩散泵时，应慎重考虑油蒸气的返流现象，可以采取加挡油板或冷凝阱等措施，使反扩散的油分子尽可能不进入被抽容器或高真空系统。

在气体分子密度不等，也就是存在压强差的情况下，某些气体还有渗透过固体进行扩散的能力。例如氢、氧等可以透过高温的石英而扩散。氢还可以渗透过灼热的铂、铁、钯等金属。利用这种渗透扩散的性能，可以作为提取高纯度氢的技术，同样可以用在其他气体的纯化技术中。

(2) 热传导现象是由于气体局部的温度不均匀而引起的。气体分子的热运动过程，可以进行热量的传递作用，使温度不同的局部气体最后趋向于均匀一致。气体分子密度较大，即气体压强较高时，分子与分子间的碰撞频繁，分子间的热传导作用也显著。在低压强情况下，气体分子的平均自由程大于容器的线性尺寸，这时气体的热传导与压强几乎无关，分子间的热传导作用也是极微的。利用高真空下分子热传导作用微弱的特点，可以制成各种真空保温装置。也可以利用气体分子的热传导特性，制成热传导式真空计，其压强测量范围可以从 10^{-1} 托至 10^{-8} 托。

(3) 内摩擦现象出现于不同流速的气层之间。当两层气流的流速不同时，在两气流层的界面上就会将生一对大小相等而方向相反的作用力，这个力阻碍着气流之间的相对运动，最后使各气流层的流速逐渐趋于一致，这是气体分子间的内摩擦现象。

上述三种气体分子的迁移形式中，只有扩散现象才是气体分子的质量迁移过程，热传导和内摩擦现象都是气体分子的动量迁移过程。

第三节 气体与固体的相互作用

在真空容器中，气体分子在空间作无规则的热运动的同时，也不断与器壁碰撞并产生相互作用，有的气体分子被器壁吸附或吸收，也有的气体分子可以从器壁上脱附或解释而进入空间。这种气体分子与固体表面（器壁）的相互作用，不但同气体的性质有关，也同固体表面的性质有关。

吸附现象指的是固体表面聚集一层或多层气体分子的现象。吸收现象指的是气体扩散渗入固体内部并被溶解的现象。吸附的逆过程称为脱附，而吸收的逆过程称为解吸。

事实上，即使在真空度很高（压强很低）的情况下，空间的气相分子数显然减少了，但是固体表面仍然吸附着大量气体分子，而且其数值可以远远超出空间的气相分子数。在固体表面上能吸附大量气体分子的这一事实，对于高真空技术，尤其是对超高真空和极高真空技术来说，却是一个十分突出的问题。在超高真空的空间，气体分子的平均自由程已达公里级，分子之间的碰撞已可忽略不计，这时后气体分子的行为主要表现在气相分子与吸附相分子间的相互转化。

例如在一个1立升的玻璃球泡内，其内表面是理想的光滑面，可算得该球的内表面积为485平方厘米。若该球在25℃时内部充有 10^{-9} 托的氮气，相当于有 3.24×10^{10} 个气相的氮分子。假定全部气相分子都吸附在内表面上，每个氮分子按16.2平方埃的面积计算，共占有 525×10^{-7} 平方厘米，因此，全部分子在该球内表面的覆盖度只有约 10^{-7} 。相反，如果在同样的玻璃球内，充有 10^{-9} 托氮的同时，整个内表面覆盖有一个单分子氮层，共有 3×10^{17} 个之多的氮分子。若将这些吸附的氮分子全部脱附出来变成空间的气相氮分子，则这时的球内气压可以从 10^{-9} 托升高到 10^{-3} 托，提高了六个数量级。

实际的超高真空系统中，常温下的气体分子表面覆盖度一般为 10^{-3} ，这样的表面吸附相气体分子也要比空间的气相分子多 10^4 倍。这就足以说明，为了获得尽量高的真空度，必须尽可能除去表面吸附着的分子或抑制已吸附在表面的分子逸回空间。

另一方面，在干净的固体表面上可以吸附大量气体分子这个事实，又可以被积极地利用作为一种抽气手段。在吸附泵和深冷致泵中都是利用这种吸附原理。

气体分子与表面之间的位能曲线如图1.2所示。

气体分子被固体表面吸附的原因是由于固体表面存在着力场，这种力场如上图所示，是由物理吸附与化学吸附两者组成。

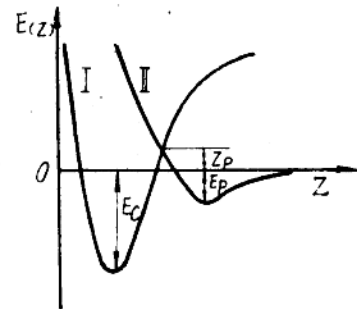


图1.2 体气分子与表面之间的位能曲线

I ——物理吸附

II ——化学吸附