

真空技术及设备

南京工学院印

一九八一年七月

前 言

本书为高等院校工科电子类“无线电专用机械设备”专业统编教材之一。

随着电子工业的发展，真空技术的应用愈来愈广泛，而且对真空度的要求也愈来愈高。真空系统也已从有油系统发展到半无油或全无油系统。为此，如何把真空技术更好地应用到电子工业生产中去，这是“无线电专用机械设备”专业的任务之一。本书目的为培养学生掌握真空技术的基本知识和理论，并能正确地应用到真空系统的设计中去。

全书共分九章，可划分为五个部分。第一部分简要地阐述了真空技术的物理基础；第二部分为真空获得设备、真空测量与检漏以及常用材料等，主要培养学生掌握其基本原理，以利于正确地选择与使用；第三部分对真空系统中的零、部件的设计计算方法及典型结构作了较详细的分析；第四部分为整个真空系统的设计计算方法，并介绍了一些典型的真空系统；最后一部分为两个实例。总学时数为 60~70。

本书第一、七章及第九的第一节由成都电讯工程学院田继廉同志编写；第二、五章及第九章的第二节由南京工学院刘作桐同志编写；第三、六、八章由成都电讯工程学院李学柏同志编写；第四章由南京工学院黄家贤同志编写。全书由田继廉同志主编，黄家贤同志主审。

在编写过程中，得到了有关学校和工厂的许多同志的热情支持，特别是南京工学院印刷厂，在时间紧、任务重的情况下，克服了种种困难，完成了任务，在此一并表示感谢。由于时间仓促、水平有限，书中缺点与错误在所难免，请读者批评指正。

编 者

一九八一年四月

目 录

绪 论	(1)
第一章 真空技术的物理基础	(3)
第一节 气体分子运动论的基本概念	(3)
第二节 气体分子速度的分布	(4)
第三节 气体分子之间的碰撞	(9)
第四节 气体分子与器壁之间的碰撞——余弦定理	(13)
第五节 气体沿导管的流动	(16)
第六节 真空系统抽气过程的理论基础	(25)
第二章 真空获得设备	(29)
第一节 概 述	(29)
第二节 油封机械真空泵	(31)
第三节 分子泵	(43)
第四书 扩散泵	(49)
第五节 吸附泵	(60)
第六节 热钛泵	(67)
第七节 溅射离子泵	(78)
第八节 冷凝泵	(89)
第九节 真空泵的性能测试	(93)
第三章 真空测量	(98)
第一节 概 述	(98)
第二节 利用气体放电粗略估计真空度	(98)
第三节 压缩式真空计	(101)
第四节 热偶真空计	(103)
第五节 普通热阴极电离真空计	(106)
第六节 热阴极超高真空电离计	(109)
第七节 冷阴极磁控电离计 (冷规)	(111)
第八节 真空计的校准	(112)
第四章 真空元件	(116)
第一节 真空阀门	(116)
第二节 捕集器 (阱)	(129)
第三节 干燥器 (干燥罐)	(139)

第五章	真空密封与连接	(141)
	第一节 概 述.....	(141)
	第二节 可拆连接.....	(141)
	第三节 可动连接.....	(153)
	第四节 不可拆连接.....	(161)
第六章	真空中常用的材料	(163)
	第一节 概 述.....	(163)
	第二节 金属材料.....	(163)
	第三节 非金属材料.....	(170)
	第四节 真空泵油.....	(175)
第七章	真空系统设计	(178)
	第一节 真空系统的基本形式.....	(178)
	第二节 真空系统的基本要求.....	(184)
	第三节 流导的计算.....	(186)
	第四节 真空容器的设计.....	(198)
	第五节 真空系统元件的参量计算及选择.....	(201)
	第六节 抽气时间的计算.....	(205)
	第七节 真空系统的安装与调试.....	(207)
	第八节 真空系统计算举例.....	(210)
第八章	真空检漏	(214)
	第一节 概 述.....	(214)
	第二节 检漏方法.....	(215)
	第三节 补漏剂.....	(226)
第九章	真空应用设备举例	(227)
	第一节 排气设备.....	(227)
	第二节 电子束蒸发镀膜设备.....	(231)

绪 论

一、真空及其特性和应用

真空是指在给定的空间内，低于标准大气压的气体状态。真空状态的主要特点是：与大气状态相比，单位体积中的气体分子数较少；气体中质点之间（气体分子之间或气体分子与其它质点之间）的相互碰撞减少了；打到某一表面（例如器壁）上的气体分子数也较少。真空是一个相对的概念，绝对没有气体分子的空间是不存在的；即不存在绝对真空。

真空的这种特点，在科学研究、工业生产和国防等各个领域内，为达到各种特定的目的而得到了广泛地应用。

在电子器件中，为了能够精确地控制电子流，不希望有残余气体分子与电子的碰撞。因此，一般的电子器件总是要抽到较高的真空度；同时，只有在较高真空度的状态下，才能保证器件中只有极少的气体分子打到灵敏的活性表面（如光电阴极表面、热阴极表面等），使这些表面能长期有效地工作。

电子工业和光学仪器制造中的真空镀膜；化学工业中的真空蒸馏；冶金工业中的真空冶炼；制药工业中的真空脱水、电机工业中的真空浸渍等，都是真空在工业中的应用的具体例子。

随着宇航科学的发展，需要模拟宇宙真空环境。根据人造卫星的实测数据，距地面 335 公里的高空处，气体压强为 5×10^{-9} 托；而距地面 2000 公里高空处，气体压强仅为 10^{-11} 托。月球表面的气体压强为 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ 托；行星际空间的压强，约为 $10^{-11} \sim 10^{-14}$ 托。而恒星空间（银河系）的压强估算计为 $10^{-5} \sim 10^{-20}$ 托。因而必须在地面上仿造空间环境来作实验。这就构成了所谓“空间模拟”的一个新的真空研究领域。

二、真空测量的单位

真空度是指在给定的空间内，气体稀薄的程度。它是以气体压强的高低来表示的。压强高，真空度低；压强低，则真空度高。常用压强单位有以下几种：

1. 毫米汞柱 (mmHg)

毫米汞柱是指在 0°C 时，1 毫米高的水银柱作用在单位面积上的力。纯水银在 0°C 时的比重是 13.5951 克/厘米³，故 $1\text{mmHg} = 1.35951$ 克/厘米²。

2. 物理大气压 (ATM)

$$\begin{aligned} 1\text{ATM} &= 76 \times 13.5951 \times 980.665 = 1.01325 \times 10^6 \text{达因/厘米}^2 \\ &= 1.01325 \times 10^5 \text{巴} \end{aligned}$$

3. 托

$$1 \text{托} = \frac{1}{760} \text{ATM}$$

1 托和 1 mmHg 两者之间约有七百万分之一的微小差别。由于差别极小，故习惯上把它们之间等同看待，即认为 $1 \text{托} = 1\text{mmHg}$ 。

4. 帕斯卡

它是米—公斤—秒制单位。是目前国际上推荐使用的标准单位制。简称帕。

1 帕 = 1 牛顿/米² = 1 公斤/米 · 秒² .

5. 工程大气压

1 工程大气压 = 1 公斤/厘米² = 735.56托 .

6. 英制单位

英制单位有时汞柱，普西。

上述各压强单位的换算关系见下表

三、真空区域的划分

世界各国对真空区域的划分不完全一致，我国一般划分为五个区域：

- 粗真空——压强低于 760~10 托；
- 低真空——压强为 10~10⁻³ 托；
- 高真空——压强为 10⁻³~10⁻⁸ 托；
- 超高真空——压强为 10⁻⁸~10⁻¹² 托；
- 极高真空——压强低于 10⁻¹² 托。

压强单位的换算关系

	帕 (Pa)	托 (Torr)	微巴 (μBa)	物理大气压 (ATM)	工程大气压 (公斤/厘米 ²)	吋汞柱 (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 ²	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 物理大气压	1.0133 × 10 ⁵	760.00	1.0133 × 10 ⁶	1	1.0332	29.921	14.695
1 工程大气压	9.8067 × 10 ⁴	735.56	9.8067 × 10 ⁵	9.6784 × 10 ⁻¹	1	28.959	14.223
1 吋汞柱	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

第一章 真空技术的物理基础

第一节 气体分子运动的基本概念

一、理想气体模型

气体的基本特性是，一定质量的气体，既无一定形状，又无一定体积；它在空间位置上是均匀分布的；可以无限制地膨胀而完全充满于任意容积的容器内，气体的体积即由所盛容器的容积决定；种类不同、比例不同的几种气体，可以混合成均匀状态。

为便于研究气体分子的运动，给出以下的理想气体模型：

(一) 气体由大量微小的分子组成，同类气体的分子质量相同；气体分子本身的体积与整个气体体积相比可忽略，而视作几何质点。

(二) 每个气体分子均处于不停的运动状态，其运动方向无任何规律。分子在两次碰撞之间的运动路径为一直线。

(三) 气体分子之间的作用仅限于弹性碰撞；相互间无吸力与斥力。

实际气体在压强愈低时，愈接近于上述理想模型。

二、理想气体的基本定律

(一) 气体状态方程

一定量的气体，从 P_1 、 V_1 、 T_1 状态变化到 P_2 、 V_2 、 T_2 状态时， PV/T 值保持不变，即

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1-1)$$

对于克分子量为 μ 克，质量为 M 克的理想气体，则有

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-2)$$

式中 P —气体压强；

V —气体体积；

T —绝对温度；

R —气体的普适常数。

1. 当 T 保持不变（等温过程），则

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1-3)$$

即一定量的气体，在温度保持不变时，其体积与压强成反比。此关系即波义耳—马略特定律。

2. 当 P 保持不变（等压过程）时，则

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1-4)$$

即一定量的气体,在压强保持不变时,其体积与绝对温度成正比。此关系即盖·吕萨克定律。

3. 当 V 保持不变 (等容过程) 时, 则

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (1-5)$$

即一定量的气体,在体积保持不变时,其压强与绝对温度成正比。此关系即查理定律。

(二) 亚佛加德罗定律

不同种类的气体,在体积、温度和压强分别相等时,具有相同的分子数。

(三) 道尔顿分压定律

混合气体的总压强,等于各组成气体的分压强之和。分压强是指各组成气体单独存在,且占有混合气体的体积时所具有的压强。如以 P_1 、 P_2 、 P_3 …… P_n 代表 1、2、3…… n 种组成气体的分压强,则混合气体的总压强为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \quad (1-6)$$

三、蒸 汽

当气态物质的温度高于某个临界温度,依靠压缩而不能使其液化,此时称为气体;如低于临界温度,当压缩后,能使其液化,则称为蒸汽。通常以室温为标准来确定气态物质属于气体或蒸汽。如氮、氖、氦、氧、氩、氙等,它们的临界温度均比室温低,故称为“永久”气体;而水蒸汽、汞蒸汽等,其临界度比室温高 (水蒸汽为 365°C , 汞蒸汽为 1450°C), 故称为蒸汽。

液体中动能较大的分子克服液体分子的吸引力而逸出液面的气化过程,即所谓蒸发。在蒸发的同时,蒸汽分子又不断地返回液体中。在温度一定时,一定时间内逸出液面的分子数是一定的,而在相同时间内返回液体的分子数则随蒸汽密度的增大而增大。在密闭容器中,开始时,逸出的分子数多于返回的分子数,随着蒸汽密度的增大,返回的分子数逐渐增多,直至两者的分子数相等时,汽、液之间达到动态平衡。与液体保持动态平衡的蒸汽,即所谓饱和蒸汽。它的压强即为饱和蒸汽压。

饱和蒸汽压仅与温度有关,而与体积无关。故不能用波义耳等定律。只有蒸汽处于非饱和状态,特别是其密度 (或压强) 很小时,才能应用理想气体的定律。

第二节 气体分子速度的分布

一、麦克斯韦速度分配定律

在平衡状态下,气体分子以不同大小的速度沿各个方向运动着,并且由于相互的碰撞,每一分子的速度都在不断地改变。麦克斯韦在 1859 年用几率的理论证明了气体分子的速度之间是按一定的规律存在的。这种规律以分配函数的形式表达,即麦克斯韦速度分配定律。

速度分配定律的一般形式可表示为

$$d\bar{N}_c = F(C)dc \quad (1-7)$$

式中 dN_c —速度在 $C \sim C+dC$ 之间的分子数;

$F(C)$ —速度 C 的连续函数, 称为速度分配函数, 其意义为单位速度间隔中的分子数。
分子数也可按别的物理量来分配, 相应地有动量、速度和能量分配函数等。

(一) 动量分配函数

$$F(p_x, p_y, p_z) = N \left(\frac{1}{2\pi mKT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{1}{2mKT}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)} \quad (1-8)$$

式中 p_x, p_y, p_z —分子动量在直角坐标中的三个分量;

N —分子总数;

m —分子的质量;

T —绝对温度;

K —玻耳兹曼常数。

按分配函数的定义, 在 N 个分子中, 动量的三个分量在 $p_x \sim p_x + dp_x, p_y \sim p_y + dp_y, p_z \sim p_z + dp_z$ 之间的分子数为

$$\begin{aligned} dN_{p_x, p_y, p_z} &= F(p_x, p_y, p_z) dp_x dp_y dp_z \\ &= N \left(\frac{1}{2\pi mKT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{1}{2mKT}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)} dp_x dp_y dp_z \end{aligned} \quad (1-9)$$

(二) 速度分配函数

$$F(C) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mC^2}{2KT}} \quad (1-10)$$

式中 C —分子速度。

N 个分子中, 速度在 $C \sim C+dC$ 之间的分子数目为

$$dN_c = F(C) dC = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mC^2}{2KT}} C^2 dC \quad (1-11)$$

将公式 (1-10) 转换到直角坐标中, 则有

$$F(C_x, C_y, C_z) = N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{2KT}(C_x^2 + C_y^2 + C_z^2)} \quad (1-12)$$

式中, C_x, C_y, C_z —在 x, y, z 三个方向的速度分量。

N 个分子中, 各速度分量在 $C_x \sim C_x + dC_x, C_y \sim C_y + dC_y, C_z \sim C_z + dC_z$ 之间的分子数目为

$$\begin{aligned} dN_{C_x, C_y, C_z} &= F(C_x, C_y, C_z) dC_x dC_y dC_z \\ &= N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{2KT}(C_x^2 + C_y^2 + C_z^2)} dC_x dC_y dC_z \end{aligned} \quad (1-13)$$

(三) 能量分配函数

$$F(E) = \frac{2\pi N}{(\pi KT)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{E}{KT}} E^{\frac{1}{2}} \quad (1-14)$$

式中 E —分子的动能。

N 个分子中, 动能在 $E \sim E+dE$ 之间的分子数目为

$$dN_E = F(E) dE = \frac{2\pi N}{(\pi KT)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{E}{KT}} E^{\frac{1}{2}} dE \quad (1-15)$$

实际上, 以上各种分配函数间均存在一定关系。知道其中某一分配函数, 就可求出其它

任一分配函数。一般讲，速度分配函数是最基本和最重要的。

根据公式 (1-10)，以 $F(C) = dN_c/dC$ 作纵坐标， C 作横坐标，可得图 1-1 的曲线。

从图上可知，当 $C=0$ 时， $F(C)=0$ ，当 C 增大时， $F(C)$ 中的 C^2 项增大，但 $e^{-mc^2/2KT}$ 项减小；在 C 比较小时， C^2 项增大的程度比 $e^{-mc^2/2KT}$ 项减小的程度要大，故曲线在开始阶段上升，达到某一最大值后下降。

温度不同时，分布曲线有所改变。温度升高时，气体分子能量增大，其速度也相应加大。因此，曲线就朝速度较大的方向偏移，但其分布规律仍然没有改变。

如果以 dC 为底，以 $F(C) = dN_c/dC$ 为高作一长方形 (见图 1-2)，则长方形面积为 $dN_c = F(C)dC$ ，它的物理意义表示速度在 $C \sim C+dC$ 之间的分子数。图中划有斜线的小长方形的面积近似地反映了这个数目。不同的速度间隔，分子数均不相同。

二、最可几速度、平均速度和均方根速度

从微观上看，虽然每个气体分子的速度不等，然而各种速度所占的比例却按前述的规律分布。为研究方便，可采用具有一定代表意义的速度来表示这一群气体分子的速度。

(一) 最可几速度 C_b

把速度分布中任一瞬间内最大多数气体分子所具有的速度叫作最可几速度，即在气体分子的各种速度中，最常出现的速度。

从图 1-1 的速度分配曲线中可知，最可几速度是对应于纵坐标最大值的横坐标值。因此，为求得最可几速度，只需求出对应于 $F(C)$ 最大值时的 C 值即可。令 $dF(C)/dC=0$ ，得

$$4\pi N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mc^2}{2KT}} 2C \left(1 - \frac{m}{2KT} C^2 \right) = 0$$

因为 $8\pi N(m/2\pi KT)^{\frac{3}{2}}$ 不会为零，故

$$C e^{-\frac{mc^2}{2KT}} \left(1 - \frac{m}{2KT} C^2 \right) = 0 \tag{1-16}$$

从而得

$$C_b = \sqrt{\frac{2KT}{m}} = 1.41 \sqrt{\frac{KT}{m}} \tag{1-17}$$

公式 (1-16) 的另外两个解， $C=0$ 和 $C=\infty$ ，显然都是不相宜的，故只有公式 (1-17) 才是所求的最可几速度。把公式 (1-17) 中根号内的分子分母同乘以亚佛加德罗常数 N_0 。(在标准状态下，一克分子气体的分子数为 $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$)，因 $KN_0 = R$ ，而 mN_0 等

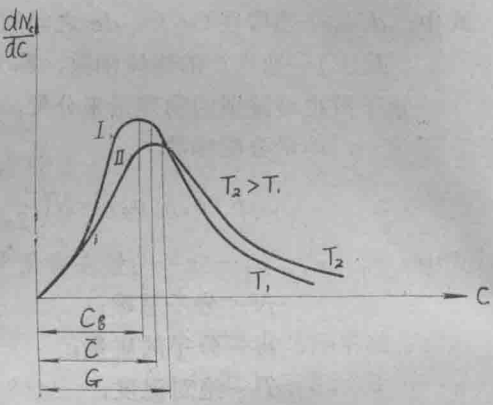


图1-1 气体分子的速度分布

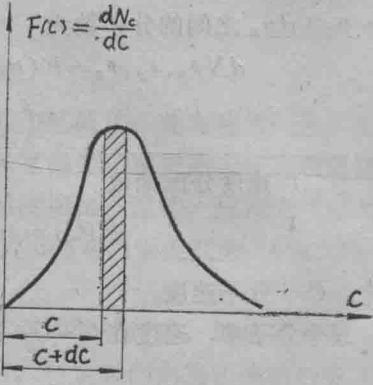


图1-2 给定速度间隔内的分子数

于气体的克分子量 μ ，故 C_b 可以另一种形式表示为

$$C_b = 1.41 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = 1.29 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)} \quad (1-18)$$

(二) 算术平均速度 $\bar{C}$

把给定体积内所有气体分子的速度相加的总和被分子总数相除，即得算术平均速度 $\bar{C}$ 。平均速度可由下式确定：

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} C dN_c \quad (1-19)$$

把公式 (1-11) 代入 (1-19)，得

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mc^2}{2KT}} C^3 dC$$

用 α 表示 $m/2KT$ ，则

$$\bar{C} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\alpha c^2} C^3 dC$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha c^2} C^3 dC = \frac{1}{2\alpha^2} = \frac{2K^2 T^2}{m^2}$$

$$\bar{C} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{2K^2 T^2}{m^2} = \sqrt{\frac{8KT}{\pi m}} \quad (1-20)$$

如把根号内的分子与分母同乘以 N_0 ，则

$$\bar{C} = 1.6 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = 1.45 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)} \quad (1-21)$$

(三) 均方根速度 G

把给定体积内所有气体分子的速度平方值相加的总和被分子总数相除，开方后即得均方根速度 G 。

$$G^2 = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} C^2 dN_c \quad (1-22)$$

把公式 (1-11) 代入 (1-22)，得

$$G^2 = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\alpha c^2} C^4 dC$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha c^2} C^4 dC = \frac{3\sqrt{\pi}}{8} \alpha^{-\frac{5}{2}} = \sqrt{\frac{9\pi K^5 T^5}{2m^5}}$$

$$G^2 = \frac{3KT}{m} \quad (1-23)$$

均方根速度为

$$G = 1.73 \sqrt{\frac{RT}{m}} = 1.58 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)} \quad (1-24)$$

从以上公式可知， $C_b : \bar{C} : G = 1 : 1.13 : 1.23$ 。即在同样温度下，均方根速度最大，算术平均速度次之，最可几速度为最小。图 1-1 上标出了这些速度的关系。从图上可知，在某一瞬间，具有算术平均速度的分子数目比具有最可几速度的分子数目少，而具有均方根速度的分子数目最少。

从公式 (1-18)、(1-21) 和 (1-24) 可知，分子量为 μ 的任何气体的分子速度完全

取决于温度。温度升高，速度也增加。速度与绝对温度的平方根成正比。在一定温度下，不同的气体，具有不同的速度。较重的气体，其分子所具有的速度较小。

以上三种定义的速度用于不同的场合。在真空技术中最常用的是算术平均速度 $\bar{C}$ 。在研究平均自由程、余弦定理等都要用到 $\bar{C}$ 。均方根速度 G 用于研究气体能量过程。最可几速度 C_b 除了在讨论速度分布时用到外，较少用到。

表1—1 气体和蒸汽在 0℃时的 C_b 、 $\bar{C}$ 、 G 值

气 体 或 蒸 汽 名 称	化 学 式	分子量 μ	每个分子的 质量 m (10^{-24} 克)	均方根速度 G (10^4 厘米/秒)	平均速度 $\bar{C}$ (10^4 厘米/秒)	最可几速度 C_b (10^4 厘米/秒)
氢	H ₂	2.016	3.351	18.38	16.93	15.00
氦	He	4.003	6.653	13.11	12.08	10.70
甲 烷	CH ₄	16.043	26.6	6.54	6.01	5.32
水 蒸 汽	H ₂ O	18.015	29.94	6.15	5.65	5.00
氖	Ne	20.179	33.54	5.84	5.38	4.76
乙 炔	C ₂ H ₂	26.038	43.2	5.22	4.81	4.25
一氧化碳	CO	28.011	46.55	4.93	4.54	4.02
氮	N ₂	28.013	46.56	4.93	4.54	4.02
乙 烯	C ₂ H ₄	28.054	46.62	4.93	4.54	4.02
空 气		28.96	48.1	4.86	4.47	3.95
乙 烷	C ₂ H ₆	30.070	49.9	4.78	4.39	3.88
氧	O ₂	31.999	53.18	4.61	4.25	3.76
氩	Ar	39.948	66.38	4.13	3.80	3.36
二氧化碳	CO ₂	44.010	73.14	3.94	3.62	3.20
丙 烷	C ₃ H ₈	44.097	73.20	3.94	3.62	3.20
丁 烷	C ₄ H ₁₀	58.124	96.5	3.44	3.16	2.80
氪	Kr	83.80	139.3	2.86	2.63	2.33
氙	Xe	131.30	218.2	2.38	2.10	1.86
水银蒸汽	Hg	200.59	333.4	1.84	1.70	1.56
苯二甲酸 二 丁 酯	C ₆ H ₄ (COOC ₄ H ₉) ₂	278	462.0	1.57	1.45	1.28
增压泵油	石油烃	330	549	1.44	1.32	1.17
3号扩散泵	石油烃	459	768	1.22	1.12	0.993
274 扩散 泵 油	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \text{R} \\ \quad \\ \text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O} \\ \quad \\ \text{R} \quad \text{R} \end{array}$	484	804	1.19	1.09	0.967
275 扩散 泵 油	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \text{R} \\ \quad \\ \text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O} \\ \quad \\ \text{R} \quad \text{R} \end{array}$	650	1080	1.03	0.942	0.834

由多种气体混合组成的空气，其平均分子量约为 29，把空气的 R 、 μ 及 $T=293\text{ K}$ 代入公式 (1—21)，即可求得空气在室温时的平均速度为

$$\bar{C}=1.6\sqrt{\frac{RT}{\mu}}=1.6\sqrt{\frac{8.3\times 10^7\times 293}{29}}=461\text{米/秒}$$

在室温时，空气分子运动的速度近似于枪弹的速度。在碳极电弧的温度（约 3000K）下，空气分子的平均速度约为 1480 米/秒，在高压弧光的温度（约 6000K）下，其平均速度还要大 0.4 倍左右。

表 1—1 列出了一些气体和蒸汽在 0℃ 时的 C_b 、 $\bar{C}$ 及 G 值。

第三节 气体分子之间的碰撞

一、碰撞次数

气体分子在一般情况下以每秒几百米的速度运动，在运动的程路上不断与其它分子碰撞而改变其运动方向，使得运动的路程遇迴曲折。

如果认为分子之间除了在相互碰撞的瞬间外，相互没有作用力，则在两次碰撞之间，它们的运动路程将是直线，而在几次碰撞后所经过的路程将是折线，如图 1—3 所示。分子在两次碰撞之间所走过的路程称为自由程。自由程的长短不一，差异很大。然而在温度和压强一定时，自由程长度的平均值却是一定的。此平均值称为分子的平均自由程长度，或称平均自由程，以 λ 表示。

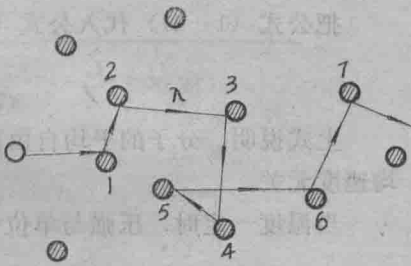


图1—3 气体分子的碰撞

分子的碰撞次数也随时间的改变而不同。然而在某一足够长的时间内，碰撞次数的平均值也是一定的。一个分子在每秒钟的平均碰撞次数称为碰撞率，以 $\bar{Z}$ 表示。

$\bar{Z}$ 与 λ 之间有极重要的关系。

设分子的平均速度为 $\bar{C}$ ，则在某一段时间 Δt 内，分子走过的路程总长度为 $\bar{C}\Delta t$ 。而在此时间内，这个分子与其它分子碰撞了 $\bar{Z}\Delta t$ 次，故总路程被“断开”为 $\bar{Z}\Delta t$ 个自由程，因而

$$\bar{C}\Delta t=\bar{Z}\Delta t\lambda$$

所以
$$\lambda=\frac{\bar{C}}{\bar{Z}} \quad (1-25)$$

假设以某个分子 A 的中心为运动方向为轴线，以分子的直径 σ 为半径作一圆筒（见图 1—4）。当分子 A 沿轴线运动时，凡中心在圆筒内的其它分子均将被碰撞。如分子 A 以平均相对速度 $\bar{C}$ 运动，在 dt 时间内，它走过的距离为 $\bar{C}dt$ 。以 $\bar{C}dt$ 作为圆筒长度，则圆筒的体积为 $\pi\sigma^2\bar{C}dt$ 。当

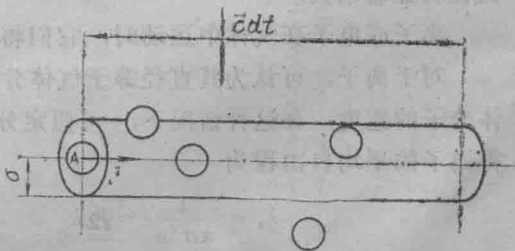


图1—4 $\bar{Z}$ 的计算图

单位体积中的分子数为 n 时, 则圆筒内的分子数为 $n\pi\sigma^2\bar{C}dt$ 个。故碰撞率为

$$\bar{Z} = \frac{n\pi\sigma^2\bar{C}dt}{dt} = n\pi\sigma^2\bar{C} \quad (1-26)$$

公式 (1-26) 的推导过程中, 只考虑了分子 A 以平均速度 $\bar{C}$ 运动, 而没有考虑其它分子的运动。实际上, 一切分子都在不停地运动, 且运动的速度遵守气体分子速度分布规律。为此, 必须对公式 (1-26) 加以修正。修正后的分子碰撞率为

$$\bar{Z} = \sqrt{2}\pi\sigma^2\bar{C}n \quad (1-27)$$

下式说明, 对于一定的气体, 碰撞率决定于单位体积中的分子数 n , 即决定于气体的压强; 同时也决定于分子的平均速度 $\bar{C}$ 。

在标准状态下, 各种气体的碰撞率 $\bar{Z}$ 的数量级在 5×10^9 秒⁻¹ 左右, 即一个分子在一秒钟内平均要与其它分子碰撞五十亿次。

随着真空度的提高, 分子间的碰撞将显著减少。在低真空时, 碰撞主要发生在分子之间, 而到高真空时, 碰撞就主要发生在分子与器壁之间了。

二、平均自由程

把公式 (1-27) 代入公式 (1-25), 得平均自由程为

$$\lambda = \frac{\bar{C}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} \quad (1-28)$$

上式说明, 分子的平均自由程与分子直径的平方及单位体积中的分子数成反比, 而与平均速度无关。

当温度一定时, 压强与单位体积中的分子数成正比, 即

$$p = nKT \quad (1-29)$$

式中 K —玻耳兹曼常数。

故公式 (1-28) 可写为

$$\lambda = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \quad (1-30)$$

或写为

$$\lambda p = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2} = \text{常数} \quad (1-31)$$

公式 (1-31) 说明, 当温度一定时, 平均自由程与压强成反比。压强减小时, 平均自由程将显著增大。

离子或电子在气体中运动时, 它们将与气体分子发生碰撞, 它们也有其自由程长度。

对于离子, 可认为其直径等于气体分子的直径。但在电场作用下, 其运动速度远大于气体分子的速度。在这种情况下, 可假定分子是静止的。故根据公式 (1-25) 和 (1-26), 得离子的平均自由程为

$$\lambda_i = \frac{1}{\pi\sigma^2 n} = \sqrt{2}\lambda \quad (1-32)$$

对于电子, 因其直径远小于气体分子, 故略而不计, 图 1-4 中的 σ 应以 $\sigma/2$ 代替。在一

秒钟内，一个电子与气体分子的碰撞数为

$$\bar{Z}_e = \pi n \left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 \bar{C}_e \tag{1-33}$$

式中 $\bar{C}_e$ —电子的平均速度。

故
$$\lambda_e = \frac{\bar{C}_e}{\bar{Z}_e} = \frac{1}{\pi \left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 n} \tag{1-34}$$

或表示为

$$\lambda_e = 4\sqrt{2}\lambda \tag{1-35}$$

根据平均自由程和平均速度，即可计算平均自由程的延续时间为

表1—2 不同压强下空气的平均自由程

p (托)	760	10	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
λ (厘米)	6×10^{-6}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	5	5×10^3	5×10^5	5×10^7	5×10^9

表1—3 ρ 、 σ 、 λp 值

气体或蒸汽种类	密度 ρ (1托和20℃时) 10^{-6} 克/厘米 ³	分子有效直径 σ 10^{-8} 厘米	λp (20℃时) 10^{-3} 厘米·托
He	0.219	2.18	14.4
Ne	1.104	2.60	10.1
H ₂	0.110	2.75	9.0
C ₂ H ₄	1.535	4.95	6.2
O ₂	1.750	3.64	5.2
Ar	2.190	3.67	5.1
空气	1.584	3.72	4.9
N ₂	1.532	3.75	4.9
CO	1.532	3.80	4.5
CH ₄	0.877	4.19	3.9
Kr	4.580	4.16	3.4
CO ₂	2.410	4.65	3.2
Xe	0.986	4.68	3.2
H ₂ O	7.180	4.85	2.8
C ₂ H ₆	1.645	5.37	2.4
Hg	10.970	6.26	1.7
C ₃ H ₈	2.410	6.32	1.7
C ₄ H ₁₀	3.180	7.06	1.4

$$t = \frac{\lambda}{C} \quad (1-36)$$

表 1—2 列出了在 25℃ 时, 各种压强下的空气平均自由程 (粗略值); 表 1—3 列出了各种气体的 ρ 、 σ 、 λp 值; 表 1—4 列出了一些气体在标准状态下的平均自由程的延续时间 t 。

表 1—4 平均自由程延续时间

气体种类	H ₂	CO ₂	CO	N ₂	空气	He	O ₂
$t \cdot 10^{10}$ 秒	0.67	1.12	1.31	1.37	1.39	1.52	1.55

三、自由程长度的分配规律

公式 (1—30) 仅能计算分子自由程的平均长度。然而, 在一定温度和压强下, 同一分子在不同时间内的自由程长度不同; 同一时间内, 不同的分子的自由程长度也不相同。但它们是按一定的规律分配的。

设 n 为单位体积中的分子总数, 其中有 n_x 个分子的自由程长度为 x 或大于 x ; $n_{(x+dx)}$ 个分子的自由程为 $x+dx$ 或大于 $x+dx$ 。 $n_{(x+dx)}$ 比 n_x 小。 n_x 减去 $n_{(x+dx)}$ 得到在 dx 距离内 n_x 减少的值, 用 dn_x 表示此值。显然, dn_x 与所取 dx 的长度成正比, 因为 dx 如果取得稍大一些, 则分子碰撞的几率愈大; 同时, dn_x 也和 n_x 成正比, 引进比例常数 K , 则可得

$$dn_x = -K n_x dx$$

积分后, 得

$$\ln n_x = -Kx + A$$

积分常数 A 由边界条件决定: 当 $x=0$ 时, $n_x=n$,

故 $A = \ln n$

因此 $n_x = n e^{-Kx} \quad (1-37)$

经运算后, 得

$$K = \frac{Z}{C} = \frac{1}{\lambda}$$

式中 Z —分子在单位时间内的自由程数目;

C —分子速度。

将 K 值代入公式 (1—37) 中, 即到自由程长度分配公式

$$n_x = n e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1-38)$$

利用公式 (1—38), 可以计算出在总数为 n 的分子中, 有多少个分子的自由程长度等于或大于 x 。

例如, 当 $x=0$, 则 $n_x=n$, 这说明所有的分子其自由程长度都大于零。如果 $x=\lambda$, 则

$$n_\lambda = \frac{n}{e} = \frac{n}{2.718} = 0.368n$$