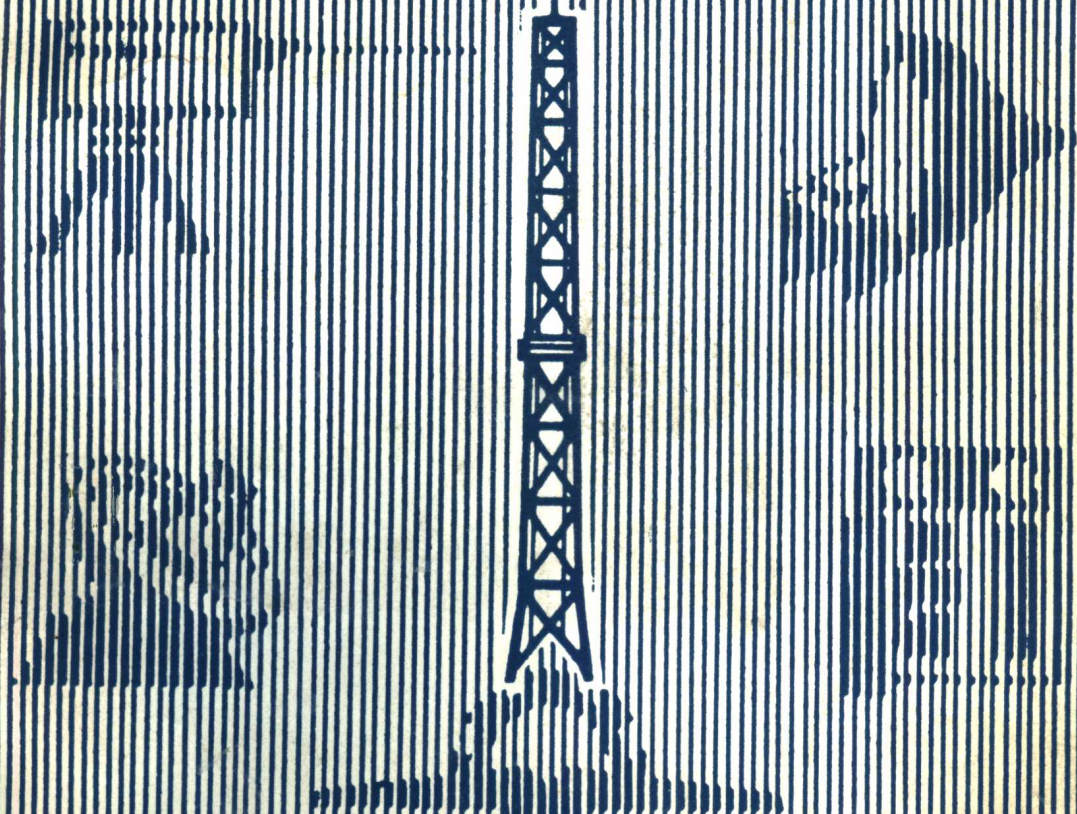


高等学校教材

真空技术及设备

刘作桐 主编



东南大学出版社

高等学校教材

真空技术及设备

刘作桐 主编

东南大学出版社

内 容 提 要

本教材为原电子工业部电子机械教材编审委员会审定推荐出版的统编教材。全书共分七章：第一章介绍真空技术的物理基础，第二章介绍各种真空获得设备；第三章介绍真空测量方法和各种真空计；第四章介绍组成真空系统的其它元件及各种真空连接；第五章介绍真空系统的设计与计算及真空中常用材料；第六章介绍真空检漏方法，第七章介绍典型真空设备的组成与结构。内容叙述简明扼要，通俗易懂，实用性强，并充分反映了当代科技成果。

本教材可作为电子机械类专业教学用书，也可供其他相近专业和有关工厂、研究单位工程技术人员参考。

责任编辑 洪焕兴

责任校对 刘娟娟

真空技术及设备

刘作桐，主编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 东南大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张12.313 字数299.44千字

1991年5月第1版 1991年5月 第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN7—81023—323—8

TH·18

定价：2.50元

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、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年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校使用。

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“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,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。广大编审者、各编审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、出版工作还会有缺点和不足之处,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

本教材是根据原电子工业部工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电专用机械设备教材编审小组征稿、审定并推荐出版。责任编委为东南大学叶琪根。

该教材由东南大学刘作桐主编,扬州工学院刘炳坤主审。

本教材主要叙述:真空技术的物理基础,真空的获得与测量技术,真空系统的组成及设计,真空系统的安装、调试、检漏及典型真空应用设备等。参考学时数为36~42学时。

本书第四章由东南大学黄家贤编写,其余各章均由刘作桐编写。南京电子管厂蔡海金对本书初稿进行了仔细的审阅,提供了许多宝贵意见。在编写中还得到有关工厂和研究单位的大力支持,在此致以真挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,恳请广大读者指正。

编 者

1990年8月

目 录

绪 言	(1)
第一章 真空技术的物理基础	(4)
§1-1 气体分子运动论概要	(4)
§1-2 低压下气体沿导管的流动及流导计算	(10)
§1-3 气体分子与固体表面的相互作用	(20)
§1-4 抽气过程的理论基础	(24)
第二章 真空获得设备	(27)
§2-1 概述	(27)
§2-2 油封机械真空泵	(29)
§2-3 油扩散泵	(41)
§2-4 涡轮分子泵	(52)
§2-5 分子筛吸附泵	(58)
§2-6 热钛泵	(63)
§2-7 溅射离子泵	(68)
§2-8 低温泵	(73)
第三章 真空测量	(81)
§3-1 概述	(81)
§3-2 压缩式真空计	(83)
§3-3 热偶真空计	(85)
§3-4 普通热阴极电离真空计	(87)
§3-5 中量程真空计	(92)
§3-6 超高真空电离计	(93)
§3-7 冷阴极磁控电离计	(96)
§3-8 分压强测量	(98)
第四章 真空系统的组成	(102)
§4-1 真空阀门	(102)
§4-2 捕集器 (阱)	(112)
§4-3 真空密封与连接	(119)
第五章 真空系统的设计与计算	(144)
§5-1 真空系统的基本要求及其形式	(144)
§5-2 真空系统的设计与计算	(151)
§5-3 真空中常用材料及选择	(157)
§5-4 真空系统的安装与调试	(163)

第六章 真空检漏	(166)
§6-1 真空检漏方法.....	(167)
§6-2 氦质谱检漏.....	(168)
第七章 典型真空应用设备	(174)
§7-1 圆排设备.....	(174)
§7-2 离子镀膜设备.....	(186)
复习题	(186)
附录 致冷机致冷原理简述	(187)
参考资料	(191)

绪 言

真空是指气体分子数密度低于地球表面大气的气体分子数密度的气体状态，或者说是气体压强低于地球表面气体压强的气体状态。可见，宇宙是一个大的天然真空。实际上，人们获得的真空是一个特定的空间。因此可给真空以这样的定义：真空是指气体分子数密度或压强低于标准状态下气体分子数密度或压强的空间。

一、真空的特点与应用

真空具有下列特点：

1. 由于气体分子数密度小，与空间表面碰撞的分子数减少，因此可获得清洁新鲜的表面。这在许多场合是极为有用的。

2. 分子数的减少，使空间气体分子间的碰撞及分子与器壁的碰撞大大减少，导致气体分子沿导管的流动完全不同于大气压状态或压强稍低于大气压状态下的气体流动。

真空的这两个特点使真空科学与技术在全国经济的各个部门，尤其是电子工业、冶金工业、机械工业、原子能、宇宙航空工程、材料科学等领域获得广泛的应用。

二、描述真空状态的物理量

通常用来描述真空状态的物理量有：气体压强、气体分子数密度、真空度和平均自由程。

真空度和平均自由程的概念如下：

平均自由程是指气体分子在相邻两次碰撞之间所走过的直线距离的平均值。它与空间的气体分子数密度、温度、气体种类等参量有关。压强低时平均自由程大，或者真空度高时平均自由程大，因而常用它与容器的线性尺寸之间关系来表征真空状态。

真空度是说明真空条件下，空间气体分子稀薄的程度，它与气体压强 P 有关，常用下式表示：

$$\delta = \frac{1.0133 \times 10^5 - P}{1.0133 \times 10^5} \times 100\%$$

真空度仅是一个术语，它不能确切地说明真空状态，尤其是压强很低时，无法用量来说明真空状态。

描述真空状态的四个物理量之间的相互关系如图 1-1 所示。

三、压强的单位

气体压强是指：单位时间内，气体分子从某一假想的单位平面通过时，沿该平面法线方向的动量改变率；或者是指气体分子作用于容器壁的单位面积上的垂直作用力。气体压强是常用于描述真空状态的物理量。它的单位有：

1. 帕(Pa)

帕是目前国际上采用的压强的标准单位，其值为

$$1 \text{ 帕} = 1 \text{ 牛顿/米}^2$$

2. 毫米汞柱(mmHg)

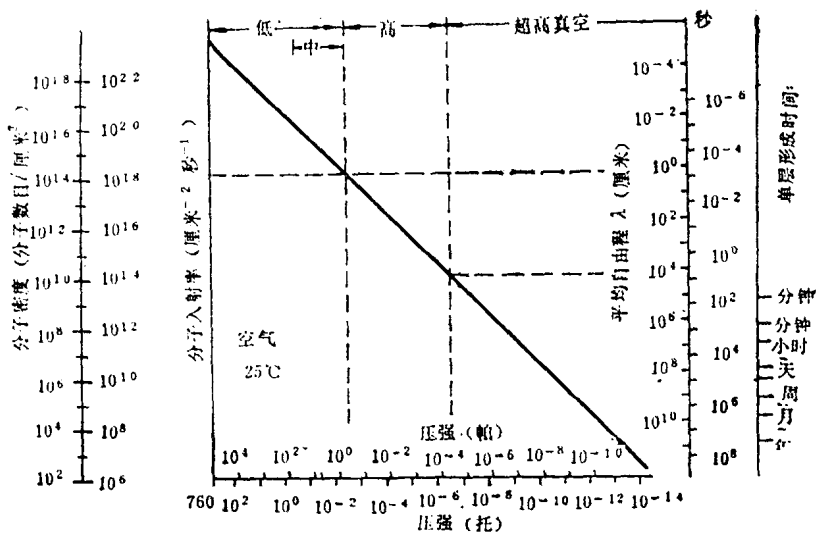


图1-1 几个物理量的相互关系

毫米汞柱是指0℃时，1毫米高的水银柱作用在单位面积上的力。此时，水银的密度为13.5951克/厘米³，重力加速度为980.665厘米/秒²。即

$$1 \text{ 毫米汞柱} = 1.3332 \times 10^2 \text{ 帕}$$

3. 标准大气压(atm)

在标准状态下，气体的压强相当于760毫米高水银柱产生的压强

$$1 \text{ 标准大气压} = 760 \text{ 毫米汞柱} = 101.325 \times 10^3 \text{ 帕}$$

4. 托(Torr)

托是常用的非标准单位，它的值是1个物理大气压的 $\frac{1}{760}$ ，即

$$1 \text{ 托} = \frac{1}{760} \text{ 标准大气压} = 1 \text{ 毫米汞柱} = 1.3332 \times 10^2 \text{ 帕}$$

实际上，1托与1毫米汞柱之间相差七百万分之一，微小而不计，因此，习惯上将它们等同起来看待。

压强的单位还有：微巴、工程大气压、吋汞柱及毫米水柱等。

各压强单位之间的换算关系见表1-1。

四、真空范围划分

为方便实际应用，通常根据真空物理的特点及真空泵和真空计的使用范围等，将整个真空范围划分为几个区域：

粗真空 $1.0133 \times 10^5 \sim 1.3332 \times 10^3 \text{ 帕}$

低真空 $1.3332 \times 10^3 \sim 10^{-1} \text{ 帕}$

高真空 $10^{-1} \sim 10^{-6} \text{ 帕}$

超高真空 $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{ 帕}$

极高真空 $< 10^{-10} \text{ 帕}$

国际上对真空区域的划分情况不完全相同，表1-2列出国际上对真空区域划分的一般情况。

表 1-1 压 强 单 位 的 换 算 关 系

	帕 (Pa)	托 (Torr)	微巴 (μ bar)	标准大气压 (atm)	工程大气压 (at)	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	1.3332×10^3	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 标准大气压	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	9.8781×10^{-1}	1	28.959	14.223
1 吋汞柱	3.3864×10^3	25.400	3.3864×10^4	3.3421×10^{-3}	3.4532×10^{-2}	1	0.49115
1 普西	6.8948×10^2	51.715	6.8948×10^4	6.8046×10^{-2}	7.0307×10^{-2}	2.0360	1

表 1-2 国 外 真 空 区 域 划 分 情 况

美 国	英 国	法 国	日 本	苏 联	德 国
低真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕	粗真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕	粗真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕	低真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕	低真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕	粗真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕
粗真空 $10^5 \sim 1.3 \times 10^3$ 帕					中真空 $1.3 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ 帕
中真空 $1.3 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$ 帕	中真空 $1.3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 帕	粗真空 $1.3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 帕	中真空 $1.3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 帕	中真空 $1.3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 帕	精真空 $1.3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 帕
精真空 $1.3 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$ 帕					
高真空 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 帕	高真空 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 帕	高真空 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ (或 10^{-6}) 帕	高真空 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ (或 10^{-7}) 帕	高真空 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 帕	高真空 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 帕
超高真空 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 帕	超高真空 $< 10^{-5}$ 帕	超高真空 $< 10^{-6}$ (或 10^{-7}) 帕	超高真空 $< 10^{-5}$ (或 10^{-7}) 帕	超高真空 $< 10^{-5}$ 帕	超高或最高真空 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 帕
超高真空 $< 10^{-7}$ 帕					超高或最高真空 $< 10^{-7}$ 帕

第一章 真空技术的物理基础

§ 1-1 气体分子运动论概要

一、理想气体模型

气体是既无一定形状又无一定体积的物质存在形式，可充满任何形状的容器，并能均匀分布于整个空间，因此 气体的体积取决于容器的体积。

气体分子运动论研究的气体是理想气体，它满足下列假定条件：

1. 气体是由大量的微小分子组成，同类气体的分子质量相同。分子的体积与整个气体体积相比甚小而可忽略，将其看作几何质点。
2. 气体分子处于不停的运动状态，沿各个方向运动的几率相等。
3. 气体分子在运动过程中相互发生频繁的碰撞，这种碰撞为弹性碰撞，因此，分子间除碰撞的瞬间外不存在任何吸力和斥力，这样，分子在两次碰撞之间走过的路程为直线。

这就是理想气体模型，真空状态下的气体几乎都符合理想气体模型，不必作任何修正。对于其它情况下的气体，往往须要按理想气体讨论，然后再作适当的修正。

二、理想气体基本定律

1. 理想气体的状态方程

一定量的气体在某时刻的热力学状态参量为 P_1 、 V_1 、 T_1 ，当变化到另一时刻的状态参量为 P_2 、 V_2 、 T_2 时，它们间存在下列关系：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{M}{\mu} R$$

式中 P 、 V 、 T ——分别为气体的压强、体积和温度；

M ——气体的质量，克；

μ ——气体的分子量；

R ——普适气体常数，在厘米·克·秒制中 $R=8.31 \times 10^7$ 尔格/度·摩尔。

(1) 玻义尔-马略特定律

当气体温度 $T = \text{常数}$ ，即温度维持不变时，气体的压强和体积的乘积为常数：

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{常数}$$

这就是玻义尔-马略特定律，在真空领域中常用 气体压强和体积的 乘积来表示气体量。

(2) 盖·吕萨克定律

对一定质量的气体，当维持它的压强不变时，其体积与绝对温度成正比关系，即

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

式中 V_1 、 V_2 ——分别为温度 T_1 、 T_2 时的体积。

(3) 查理定律

查理定律是表达一定质量的气体，维持其体积不变时，压强与温度成正比关系：

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

2. 道尔顿分压强定律

道尔顿分压强定律是指：相互不起化学作用的混合气体的总压强等于各成分气体的分压强的总和。即：

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$$

分压强是指组成混合气体的各成分气体单独存在而占有混合气体的体积时所具有的压强。

3. 阿佛伽德罗定律

阿佛伽德罗定律表示：相同体积的任何种类的气体，在温度和压强相同时具有相同的分子数。一摩尔的任何气体的分子数为：

$$N_0 = 6.02252 \times 10^{23} \text{ 个}$$

在标准状态下，每立方厘米体积的任何气体的分子数为：

$$n_0 = 2.6870 \times 10^{19} \text{ 个}$$

三、气体分子运动速度及其分布

在平衡状态下，气体分子以一定的速度运动着，并且由于分子间的频繁碰撞，分子速度不断地变化。1859年麦克斯韦用统计方法计算得到：在 N 个总的分子数中具有速度为 c 到 $c+dc$ 值的分子数为：

$$dN_c = F(c)dc \quad (1-1)$$

式(1-1)中 $F(c)$ 被称为速度分布函数，是速度 c 的连续函数，如图1-2所示。其函数表达式为：

$$F(c) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m c^2}{2kT}}$$

式中 k ——玻尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/摩尔·度

气体分子速度分布函数随温度升高而向速度增大的方向变化，其分布规律不变。由分布曲线可以看出：在所有气体分子速度中有一个速度值始终是最大多数分子所具有的，称为最可几速度；对于一个分子而言它具有该速度值的几率最大。显然，最可几速度为函数 $F(c)$ 的最大值所对应的速度：

$$\begin{aligned} C_b &= \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 1.41 \sqrt{\frac{kT}{m}} \\ &= 1.41 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \end{aligned} \quad (1-2)$$

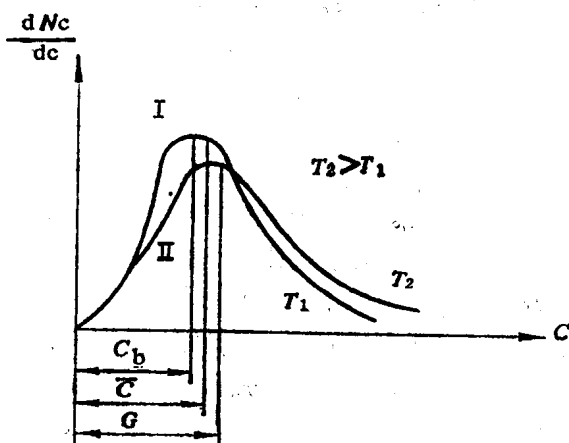


图1-2 气体分子的速度分布

在厘米·克·秒制中最可几速度为：

$$C_b = 1.29 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)}$$

通常采用的是气体分子的算术平均速度，它是给定的全部分子的速度值的总和与该分子数相除所得的速度值。

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \frac{1}{N} \int_0^{\infty} C dN_c \\ \bar{C} &= \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 1.6 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \end{aligned} \quad (1-3)$$

在厘米·克·秒制中

$$\bar{C} = 1.45 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)}$$

均方根速度是所有气体分子速度的平方平均值的平方根，是理论研究时常用的一个速度值，

$$C_s = \left[\frac{1}{N} \int_0^{\infty} C^2 dN_c \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 1.73 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (1-4)$$

在厘米·克·秒制中

$$C_s = 1.58 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ (厘米/秒)}$$

由此可见：

1. 气体分子的速度与温度的平方根成正比关系，而与质量的平方根成反比关系。
2. 在任何瞬间具有最可几速度的分子数最多，均方根速度的分子数最少，算术平均速度的分子数居中。

对于20℃的空气。分子量为29，其算术平均速度为：

$$\bar{C} = 1.6 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = 4.61 \times 10^4 \text{ (厘米/秒)}$$

速度值的大小相当于枪弹的速度。其它有关分子运动的数据列于表 1-3。

四、气体分子的碰撞、自由程及其分布

在通常温度下气体分子的运动速度为每秒数百米，但不是一次就走完的直线路程，而是在运动的过程中不断地与其它分子发生碰撞，改变了运动方向，这样对一个分子来说它的运动轨迹是迂回曲折的，如图 1-3 所示。

气体分子相邻两次碰撞之间走过的路程为直线，称为自由程。在同一时刻各个气体分子的自由程是不同的，并随着气体分子密度和温度等参量变化；同样，对一个分子来说，在不同时刻所具有的自由程也是不同的。但是它们的平均值则不随时间变化，即在某一压强和温度条件下，对某种气体分子而言，它的平均自由程是一个定值。

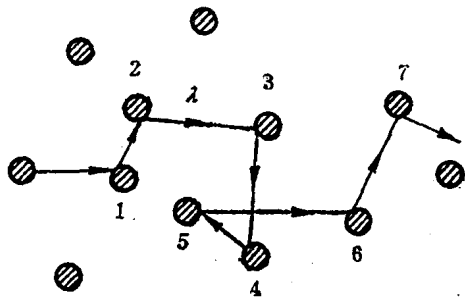


图1-3 气体分子的碰撞

表 1-3 气 体 分 子 运 动 的 有 关 数 据

气体	分子量 M (克/克分子)	分子直径 σ ($\times 10^{-8}$ 厘米)	一个分子质量 m ($\times 10^{-23}$ 克)	气体的密度 ρ ($\times 10^{-6}$ 克/厘米 ³) (20°C, 1.33×10^2 帕)	平均自由程 λ ($\times 10^{-3}$ 厘米) (20°C, 1.33×10^2 帕)	与器壁碰撞的分子数 N ($\times 10^{20}$ 个/厘米 ² ·秒) (20°C, 1.33×10^2 帕)	热传导系数 K (千卡/米·小时·度) (0°C)	粘滞系数 η ($\times 10^{-4}$ 克/厘米·秒) (20°C)	气态绝热 指数 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
氢	4.003	2.18	0.665	0.219	14.4	10.25	0.123	1.96	1.660
氮	20.18	2.60	3.35	1.104	10.1	4.57	0.0398	3.10	1.64
氧	39.95	3.67	6.63	2.19	5.1	3.25	0.0140	2.22	1.667
氩	2.016	2.75	0.335	0.110	9.0	14.46	0.150	0.88	1.408
氪	28.01	3.75	4.65	1.532	4.9	3.88	0.0206	1.75	1.405
氙	32.00	3.64	5.31	1.750	5.2	3.63	0.0210	2.03	1.396
空气	28.96	3.72	4.81	1.584	4.9	3.81	0.0208	1.81	1.4034
CO	28.01		4.65	1.532	4.5	3.88	0.0193	1.77	1.404
水	18.02	4.68	2.99	0.986	3.2	4.84	0.0208	8.80	1.32
CO ₂	44.01	4.65	7.31	2.41	3.2	3.09	0.0123	1.47	1.302
甲烷	16.04	4.19	2.66	0.877	3.9	5.12	0.0260	(1.14)	1.31
汞	200.59	6.26	33.31	10.97	1.7	1.45	—	2.28	1.667

气体分子的碰撞次数随时间而不断变化,但在足够长的时间内观察得到的碰撞次数的平均值保持定值。通常定义一个气体分子在一秒钟里的平均碰撞次数为碰撞率,以 $\bar{Z}$ 表示:

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

式中 λ ——气体分子的平均自由程,

$\bar{C}$ ——气体分子的平均速度。

1. 碰撞次数

如图1-4所示,研究分子A的碰撞情况,以分子A的运动方向为轴线,它的直径为半径作圆柱体,长度为 $\bar{C} \cdot dt$,即在 dt 时间内分子A走过的直线距离为 $(\bar{C} \cdot dt)$ 。如将与分子A相擦而过也认为发生碰撞,则碰撞次数为:

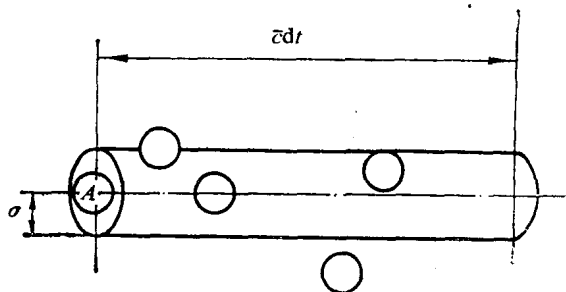


图1-4 碰撞次数计算图

圆柱体内的分子数为 $N = \pi \sigma^2 \bar{C} dt \cdot n$

圆柱体内发生的碰撞次数为 $\frac{1}{2} (\pi \sigma^2 \bar{C} dt n^2)$

实际上气体分子速度按麦克斯韦分布,而且处于不停的运动之中,圆柱体内的分子数是变化的,因而圆柱体内发生的碰撞次数应为:

$$\frac{1}{2} (\pi \sigma^2 \bar{C} dt n^2) \times \sqrt{2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi \sigma^2 \bar{C} dt n^2$$

单位时间内单位体积中发生的碰撞次数为:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi \sigma^2 \bar{C} n^2 \quad (1-5)$$

式中 σ ——气体分子的直径。

2. 平均自由程

一个分子的平均自由程与碰撞率的乘积应等于其速度,因此,气体分子的平均自由程应为:

单位时间内一个分子的碰撞次数为碰撞率 Z_1 , 使得

$$\lambda = \frac{\bar{C}}{Z_1} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} \quad (1-6)$$

由此可见,气体分子的平均自由程与气体分子密度及其种类等因素有关。

3. 自由程分布

气体分子的自由程和速度、碰撞次数等参量一样,也是在同一时刻不同分子的自由程长度不同;而对同一个分子在不同时刻所具有的自由程长度也不同;但是它们是按照一定的规律变化的,这就是自由程分布规律。

假设单位体积中分子数为 n ,具有自由程长度等于或大于 x 的分子数为 n_x ,而自由程长度等于或大于 $(x+dx)$ 的分子数为 n_{x+dx} ,显然, $n_{x+dx} < n_x$,减少了的分子数为 dn_x :

$$dn_x = -K n_x dx$$

积分得 $n_x = -Kx + A$

求积分常数后可得:

$$K = -\frac{1}{\lambda}$$

$$n_x = ne^{-\frac{1}{\lambda}x} \quad (1-7)$$

这就是自由程分布规律。它表明: 在 n 个分子中所有分子的自由程大于零, 约 $\frac{1}{2}$ 的分子具有的自由程等于平均自由程, 而大于或等于 2λ 的分子数为 $\frac{1}{4}$; 经过 10λ 未发生碰撞的分子数约占 $\frac{1}{22027}$ 。

五、气体分子与器壁的碰撞数——余弦定律

单位时间内与单位面积相碰撞的分子数, 或者单位时间内通过空间某单位面积平面的分子数是真空技术中经常遇到的问题。为此下面讨论图 1-5 中碰撞到面积 ds 上的分子数。

在平衡状态下, 气体压强为 P , 分子密度为 n , 图中面积元 ds 的法线 A 与 ds 的交点作为球坐标的原点, 空间体积元 $d\tau$ 与原点的距离为 r , 将它看成向量并且与法线的夹角为 θ ; 体积元 $d\tau$ 的中心点 M , 面积元 ds 对它的展开角为 $d\psi$ 。

体积元 $d\tau$ 中具有速度 $c \rightarrow c+dc$ 的分子数:

$$dn_c \cdot d\tau$$

发生碰撞的次数:

$$dn_c \cdot d\tau \cdot \frac{Z_1}{2}$$

因碰撞而离开体积元 $d\tau$ 、飞向面积元 ds 的分子数为:

$$dn_c \cdot d\tau \cdot Z_1 \cdot \frac{d\psi}{4\pi}$$

其中能够到达 ds 的分子数应是自由程大于或等于 r 的一部分气体分子, 即

$$dN_c = dn_c \cdot d\tau \cdot Z_1 \cdot \frac{d\psi}{4\pi} e^{-\frac{r}{\lambda}} \quad (1-8)$$

式(1-8)表示的分子数就是 $d\tau$ 体积中沿立体角 $d\omega$ 而碰到 ds 面积元的分子数。

根据球坐标中变量的关系, 经过积分运算可得到: 在 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 的圆锥面之间碰撞到 ds 的分子数为:

$$dN_\theta = \frac{n\bar{C}}{4\pi} \cos\theta d\omega ds \quad (1-9)$$

式中 $d\omega$ —— $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 的圆锥面之间立体角。

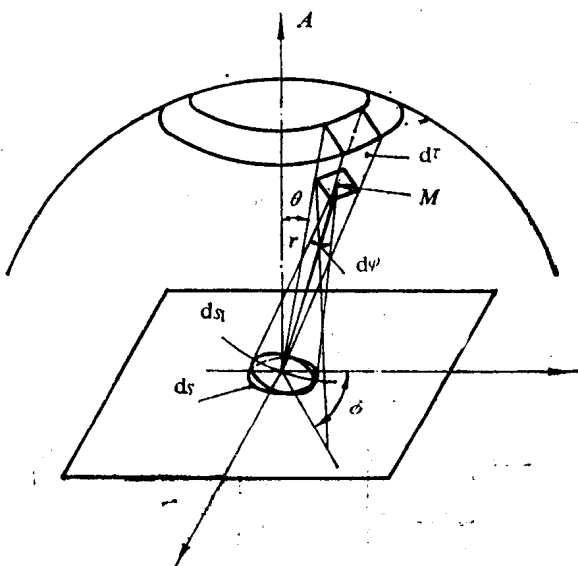


图1-5 气体分子与器壁的碰撞

式(1-9)表示的关系就是余弦定律，它表明：碰撞到 ds 面积元上的分子数与夹角 θ 的余弦成正比关系。

由此可得单位时间内单位面积上碰到的分子数为：

$$N = \frac{1}{4} n \bar{C} \quad (1-10)$$

这是余弦定律的最简单形式，碰到任何一个平面上的分子数与分子速度和分子数密度的乘积成正比关系。

根据式(1-10)可以求得大气压情况下，20℃的空气中与器壁表面发生碰撞的分子数为：

$$N = \frac{3 \times 10^{19}}{4} \sqrt{\frac{8 \times 8.31 \times 10^7 \times 293}{3.14 \times 29}} = 3.5 \times 10^{23} \text{ 个/厘米}^2 \cdot \text{秒}$$

这部分气体分子相当于标准状态下半个摩尔的气体，体积约12升。随着真空度的提高，碰撞器壁表面的分子数逐渐减少，欲获得清洁干净的表面必须达到超高真空状态。

§ 1-2 低压下气体沿导管的流动及流导计算

任何类型的真空设备都由真空工作室（被抽容器）、真空泵、连接导管及阀门等元件组成。图 1-6 为用一只油扩散泵获得高真空的镀膜机抽气系统图。由于油扩散泵及机械泵等的抽

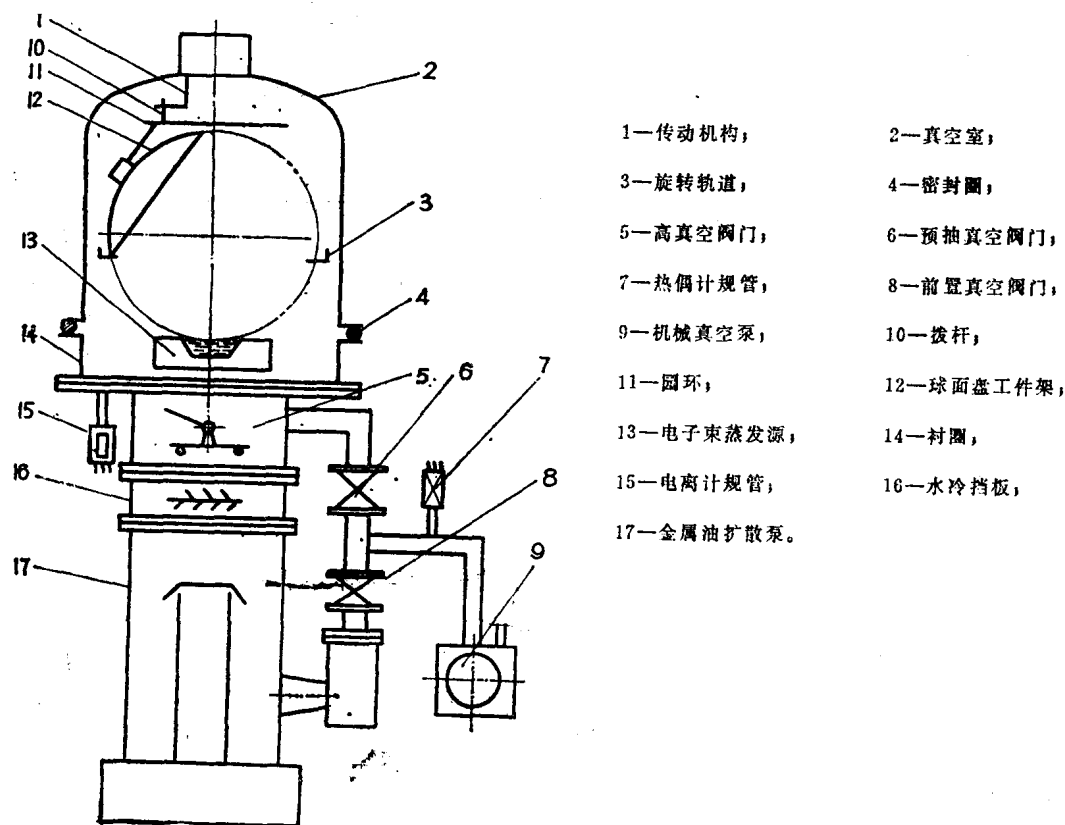


图1-6 电子束蒸发镀膜机示意图