

电子技术培训教材

真空技术基础

真空电子器件专业工人教材编写组



电子工业出版社

内 容 简 介

本书共分六章, 主要介绍真空获得、真空测量、真空检漏、真空系统组成等真空技术, 并适当介绍真空的基础理论知识。本书取材联系国内实际情况, 内容阐述力求简单易懂, 概念准确, 具有一定的系统性。

本书是真空电子器件专业初级工人教材, 也可供电光源专业、真空设备制造专业工人及应用真空技术的工人和实验员等参考使用。

真空技术基础

真空电子器件专业工人教材编写组

责任编辑: 焦桐顺

*

电子工业出版社出版发行 (北京市万寿路)

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 6.68 字数: 150.2千字

1985年2月第1版 1985年2月第1次印刷

印数: 11200册 定价: 1.15元

统一书号: 15290·49

出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，提高电子工业真空器件专业工人技术水平，受电子工业部委托，在中国电子器件工业总公司组织领导下，按部颁电子工业真空器件专业工人技术培训教学计划、教学大纲要求，编写了《真空电子器件》、《真空电子器件制造工艺》、《真空电子器件材料》、《真空技术基础》四本教材。

这套教材是电子工业工人技术培训统编教材，作为初级或中级培训教材时，在内容上可适当增减。本教材也可作为具有一定电真空生产知识的工人、干部的自学丛书。

本教材在编书过程中得到了上海电真空器件工业公司，1412所，七七四厂，七四一厂，七七六厂等单位的大力支持和密切配合，在此一并表示感谢。

《真空技术基础》由陈建中、李元元、田树英同志编写，戴荣道审定。高级工程师陈遥乌、袁磊、徐承浩等同志对本教材作了审阅。

由于真空电子器件的品种繁多，技术复杂，而编写时间紧迫以及编写水平有限，缺点和错误难免，恳切希望广大读者给予批评指正。

电子工业真空电子器件专业工人教材编写组

目 录

第一章 绪论

- § 1. 1 “真空”的概念及真空技术的基本内容..... 1
- § 1. 2 真空度量的单位和真空区域的划分..... 2
- § 1. 3 真空技术在国民经济中的作用..... 5

第二章 真空的基础理论知识

- § 2. 1 理想气体定律..... 8
- § 2. 2 气体分子运动的简述..... 13
- § 2. 3 空气的成分和分压强定律..... 18
- § 2. 4 气体放电与电离现象..... 23
- § 2. 5 气体的吸附与脱附..... 27
- § 2. 6 分子流状态下的流导..... 30

第三章 真空获得

- § 3. 1 油封旋转真空泵..... 37
- § 3. 2 油扩散泵..... 50
- § 3. 3 真空泵工作液..... 64
- § 3. 4 无油真空泵..... 66

第四章 真空测量

- § 4. 1 放电真空计..... 85
 - § 4. 2 U型压力计和压缩真空计..... 89
 - § 4. 3 热传导真空计..... 91
 - § 4. 4 电离真空计..... 98
 - § 4. 5 真空计的校准与选用..... 108
 - § 4. 6 真空电子器件内真空度的测量方法..... 113
-

第五章 真空检漏

§ 5. 1 漏孔的形成和特性·····	117
§ 5. 2 常用的检漏方法·····	123
§ 5. 3 氦质谱检漏仪·····	136
§ 5. 4 氦质谱检漏技术·····	146

第六章 真空系统

§ 6. 1 真空系统的基本结构·····	151
§ 6. 2 真空系统的材料·····	159
§ 6. 3 真空阀门·····	168
§ 6. 4 真空阱·····	174
§ 6. 5 常用的真空系统·····	179
§ 6. 6 无油真空系统·····	187
§ 6. 7 真空系统的安装和调整·····	192

附录一·····	202
----------	-----

附录二·····	204
----------	-----

附录三·····	206
----------	-----

第一章 绪 论

§ 1.1 “真空”的概念及真空技术 的基本内容

在真空技术中，“真空”是指在给定空间内，气体压强低于一个大气压的气体状态；换言之，同正常的大气相比，是较为稀薄的一种气体状态。任何人造容器，即使用现代最佳的抽气方法所能达到的最低压强下，每立方厘米体积中仍含有几百个气体分子。因此，我们所说的真空是相对的，绝对真空是不存在的。

真空状态的主要特点是：与一个大气压相比，单位体积中气体分子的数目较少；气体分子之间相互碰撞的次数较少；在单位时间内碰到某一表面（如容器壁）上的气体分子数也比较少。正因为真空状态下气体分子数较少，因此，“真空”容器在地球上所承受的大气压大于内压。真空的这些特点被广泛地利用到科学研究，工业生产等各个领域，发挥着它独特的作用。

真空技术就是根据真空的特点，研究真空的获得、真空的测量、检漏、真空系统的设计计算以及真空在各个领域中的应用的一门学科。本书下面几章将对真空技术的基本内容一一加以介绍。

§ 1.2 真空度量的单位和真空 区域的划分

度量真空的参量有多种，如压强、气体分子密度、气体分子的平均自由程、形成一个单分子层所需的时间或真空度等。在真空技术中使用最普遍的参量是压强。气体的压强是指在某一温度下作热运动的气体分子对器壁单位面积上的作用力。压强这个参量比较直观，有助于我们比较不同的气体状态，区别容器中气体量的多少等。

一、真空度量的单位

压强这个参量使用的单位较多，最常用的是“毫米汞柱”或“托”。1托就是指在标准状态下1毫米汞柱对单位面积的压力。因此，1托 = 1毫米汞柱。

近年来，由于国际单位制的推行，为了计算和换算的方便，真空度量的单位也必须与新的国际单位制统一。1971年国际计量会议正式确定“帕斯卡”（简称“帕”，记作Pa）作为气体压强的国际单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 帕} &= 1 \text{ 牛顿/米}^2 = 7.5006 \times 10^{-3} \text{ 托} \\ &\approx 7.5 \times 10^{-3} \text{ 托} \end{aligned}$$

另外，在工业上还常用“工程大气压”作为压强的单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 735.56 \text{ 托} = 9.807 \times 10^4 \text{ 帕} \end{aligned}$$

根据力和面积所采用的单位不同，压强的单位还有不少

种。例如，在 CGS 制中，压强的单位为毫巴、微巴。在英美制单位中，压强单位有英寸汞柱或普西等，在米、千克、秒 (MKS) 单位制中，压强的单位为牛顿/米²。常见的几个压强单位之间的换算如表1.1所示。

表 1.1 常用压强单位换算表

相当单位 每一单位	1帕(1牛顿 /米 ²)	1微巴(1达 因/厘米 ²)	1工程大气 压(1公斤/ 厘米 ²)	1标准大 气 压	1托(1毫米 汞 柱)
帕(Pa)	1	10	1.02×10^{-5}	9.869×10^{-6}	7.501×10^{-3}
微巴(μba)	10^{-1}	1	1.02×10^{-6}	9.869×10^{-7}	7.501×10^{-4}
工程大气压 (AM)	9.807×10^4	9.807×10^5	1	0.9678	735.56
标准大气压 (ATM)	1.013×10^5	1.013×10^6	1.0333	1	760
托(Torr)	1.333×10^2	1.333×10	1.36×10^{-3}	1.316×10^{-3}	1

考虑到目前国内的实际情况，本书所用的压强单位为“托”。

诚然，用压强来表示真空度的高低比较方便，但必须说明压强和真空度是两个完全不同的概念。真空度高就意味着压强低；反之，真空度低，压强就高。因此，在使用过程中，必须严格区别它们不同的物理意义。

二、真空度量的表示方法

真空度量的表示方法通常用数学上的指数形式来表示，如采用压强单位，那么凡小于1托的压强值均用负指数表示，如：

$$0.1\text{托} = 1 \times 10^{-1}\text{托}$$

$$0.003\text{托} = 3 \times 10^{-3}\text{托}$$

$$0.0000056\text{托} = 5.6 \times 10^{-6}\text{托}$$

根据负指数的大小可以清楚地区分真空度的高低。负指数越大，压强越低，真空度越高。负指数相等，表明真空度为同一数量级。负指数相差1，表明真空度相差1个数量级。

三、真空区域的划分

目前，真空技术所涉及的压强范围已有十几个数量级。为了实际应用的方便，根据各压强范围内不同的物理特点，可划分为以下几个区域。

低真空	$760 \sim 1\text{托}$
中真空	$1 \sim 10^{-3}\text{托}$
高真空	$10^{-3} \sim 10^{-7}\text{托}$
超高真空	$< 10^{-7}\text{托}$

真空各区域的气体分子运动性质各不相同。低真空时气体分子的流动属于湍流或粘滞流，在这一区域内，气体分子的运动以相互碰撞为主，此时气体的内摩擦力起主要作用。当真空度逐渐增高，气体分子的流动以粘滞流过渡到粘滞-分子流的过渡流，此时气体分子之间和分子与器壁之间的碰撞次数差不多；当到达高真空时，气体分子的流动已为分子流，气体分子与容器器壁之间碰撞为主，且碰撞次数大大减少，通过管道的气体流量仅与管道两端的压强差成正比；在超高真空时，气体分子的数目更少，几乎不存在分子间的碰撞，分子与器壁碰撞的机会也更少了。气体分子的不同运动状态，也就形成了气体的一系列重要现象和特性。

一九八二年国家标准“真空技术名词术语”规定了真空范围划分为上述四个区域，但在一些真空行业中仍习惯把低、中真空系统称为低真空。

§ 1.3 真空技术在国民经济中的作用

一、真空技术在国民经济的

各个领域中的应用

真空技术在我国的生产、科学研究的各个领域中都获得了广泛的应用。例如：食品工业中的真空封装、真空干燥、真空浓缩；石油化学工业中的真空分馏、真空脱水；冶金工业中的真空冶炼；机械工业中的真空铸造、真空焊接；原子能工业中的各种加速器，宇航工业用的各种宇宙模拟装置等都离不开真空。

电真空工业中的真空电子器件的排气，零件的真空除气、真空焊接、真空镀膜、真空储存、真空检漏等都是真空技术应用的实例。真空技术对改进生产工艺，提高产品数量和质量都起到积极的作用。

二、真空技术与真空电子器件的关系

真空电子器件一般都有一个电子源，如各种热阴极、光电阴极等，它们都是一些敏感的化学性质活泼的元件，遇到不宜的气氛极易“中毒”而失效。因此，这些阴极工作时，不仅要求保持一定的真空度，而且还要有一个良好的真空气氛才能正常工作。另外，器件的工作原理大多是利用电场、磁场控制电子在空间的运动，而达到放大、振荡、图象显示

等目的的。人们总不希望电子在正常运动中与残余气体分子碰撞而改变它的运动规律。基于以上原因，不难理解，一旦真空电子器件内部的真空状况不能满足要求，必然会导致真空电子器件性能变坏，甚至完全失效。

例如，真空度不高和真空气氛不佳，显象管内就会出现管内电极间的高压跳火，或者使用一段时间之后出现所谓离子斑，即其屏中心出现“十”字形暗斑。在示波管中，真空度不高，会出现所谓“十字形效应”，即示波管扫描光栅中显示出一十字形亮线。在微波器件中，真空度低也会引起高压跳火、噪声增大等毛病。即使一般的收讯放大管，真空环境不良，同样会造成电参量的改变，栅流增大，特性“蠕动”，噪声增大等毛病。至于电压很高的强功率发射管、X光管、高压整流管等，工作电极对真空环境的要求更严格，否则极易发生高压击穿等现象。

真空度和真空气氛不良除对各种电子真空器件性能的影响外，对其寿命的影响则更明显。因为通常情况下，器件的寿命取决于阴极的寿命，而气体对阴极的中毒作用是累积的，随着时间的增长，阴极越来越不能正常的工作，最后导致器件完全失效。

不同的真空电子器件要求的真空环境是不同的。例如用氧化物阴极的器件，主要有害的气氛是氧、氯、氟、硫等，而少量的氢则能激活阴极的作用。气体激光器件，离子器件，它们的性能在很大程度上取决于所充气体的成分，如气体成分的比例不适当地改变了，则激光器件会造成光谱分散、能量不集中；离子器件的性能亦将变坏。

总之，只有能保证真空电子器件内有良好的真空度和真空气氛，才可能保证此产品的高质量。

不同类型的真空电子器件，由于它们的性能和使用要求不同，它们对真空度的要求也各不相同，下面列出目前各种真空电子器件对真空度的不同要求。

各类真空电子器件的管内真空度

白炽灯泡	$10^{-3} \sim 10^{-4}$ 托
收讯放大管	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ 托
电子束管	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ 托
高压电子管	$10^{-7} \sim 10^{-9}$ 托
微波管	$10^{-7} \sim 10^{-10}$ 托

习 题

1. 什么是真空？真空与大气的区别是什么？
2. 真空技术包括哪些基本内容？
3. 真空度量的表示方法有哪几种？
4. 根据你厂的产品情况说明真空度和真空气氛的好坏将对器件产生什么影响？
5. 真空技术在真空电子器件生产的哪些工序中应用？试列举出你厂所生产的各类真空电子器件对真空度的要求各是多少？

第二章 真空的基础理论知识

§ 2.1 理想气体定律

2.1.1 理想气体模型

由物理学知道,气体是物质存在的一种状态。气体的主要特征是既无一定形状又无一定的体积,任何数量的气体都能无限制地膨胀而充满于任何形状、任意大小的容器。且不同种类的气体,不论其比例如何,都能混合成均匀的分布状态。

为了更好地研究气体中的许多现象及它们的内在联系,建立了气体分子运动理论,它的基本论点如下:

1. 任何气体都由大量微小的质点所组成,对于单一气体,这些质点是完全相同的,我们把这种微小的质点称为分子;

2. 分子运动及碰撞遵循牛顿定律;

3. 分子尽管很微小,但仍然有一定的体积。在运动时分子与分子间的碰撞,分子与容器器壁之间的碰撞都完全是弹性的,即无能量损失;

4. 分子的数目是巨大的,气体的宏观性质是大量分子微观性质的平均值。

在分子运动论中,为反映最本质的现象,可采用一些简单的理论模型,而理想气体就是其中最重要的一个模型。

从分子运动论的观点来看,理想气体是指符合下述假说

的一种理论模型。

1. 气体分子本身的体积与它的活动空间相比是微不足道的。在考虑分子运动时, 可以将分子看成几何点, 不考虑它的体积;

2. 分子间没有相互作用力, 除碰撞外, 每个分子的运动是完全独立的, 不受其它分子的影响。

由于研究的对象是低压强下的气体, 它与理想气体很接近, 因此完全可以应用理想气体的模型, 而不必加以任何修正。

2.1.2 理想气体状态方程

通过大量的气体实验, 得出了一些规律性的结果, 并建立了相应的几个定律。下面就几个主要的定律简述如下:

一、玻义耳-马略特定律(简称玻义耳定律)

当温度不变时, 一定质量气体的体积 V 与其压强 P 的乘积为一常数。其数学表达式为

$$PV = \text{常数} \quad (2.1)$$

或者说: 一定质量的气体, 当温度不变时, 气体的压强与气体的体积成反比, 即

$$P_1/P_2 = V_2/V_1; P_2/P_3 = V_3/V_2 \quad (2.2)$$

真空测量中的压缩真空计和真空规的膨胀法校准系统都是利用这一原理制成的。

二、盖·吕萨克定律

当压强 P 不变时, 一定质量的气体, 其体积 V 与绝对温

度 T 成正比，即：

$$V_1/V_2 = T_1/T_2 = \text{常数} \quad (2.3)$$

也可以说，在压强不变的情况下，气体所增加的体积(ΔV)和 0°C 时的体积 V_0 之比与温度 T 的增加量成正比。即

$$\Delta V/V_0 = \alpha_v \Delta T \quad (2.4)$$

式中， α_v ——气体的定压体膨胀系数，其值为 $1/273$ 。

若令气体在 $t^\circ\text{C}$ 时的体积为 V_t ，则

$\Delta V = V_t - V_0$ ，上式可改写成

$$V_t = V_0(1 + 1/273 \quad t) \quad (2.5)$$

可见当压强不变时，一定质量的气体，温度每升高(或降低) 1°C ，则它的体积比原来增加(或缩小) $1/273$ 。

三、查理定律

当气体的体积 V 保持不变时，一定质量的气体，压强 P 与其绝对温度 T 成正比，即：

$$P_1/P_2 = T_1/T_2 \quad (2.6)$$

换句话说，一定质量的气体，在体积不变时，气体压强的增量(ΔP)与原来 0°C 时的压强 P_0 之比同温度的增量成正比。即：

$$\Delta P/P_0 = \alpha_P \Delta T \quad (2.7)$$

式中， α_P ——气体的定容压强系数，其数值为 $1/273$ 。

若令 P_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时气体的压强， P_0 为 0°C 时气体的压强，则 $\Delta P = P_t - P_0$ ，式(2.7)可改写成

$$P_t = P_0(1 + 1/273 \quad t) \quad (2.8)$$

可见在一定体积下，一定质量的气体，温度每升高(或降低) 1°C ，它的压强比原来增加(或减少) $1/273$ 。

四、阿佛加德罗定律

阿佛加德罗定律指的是不同种类的气体，在相等体积、相同温度、相等压强下有相同的分子数。它是气体定律的又一个重要内容。

通过实际测定，在标准状态下，1摩尔任何气体所占有的体积是22.4升，分子数 $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$ 个，此数值也就是阿佛加德罗常数。

五、理想气体状态方程

从上述前三个定律可得出这样的结果：一定量的气体状态都可用体积、压强和温度三个参量来描述，且它们之间有如下的关系式，即：

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (2.9)$$

式中， M ——容器内气体的质量(克)； μ ——1摩尔的气体质量(克)； R ——气体的普适常数，通常又称为理想气体常数。

任何种类的气体 R 值均为一常量，它的数值随 P 、 V 所采用的单位制的不同而有所不同。如采用厘米·克·秒制，则 $R = 8.314 \times 10^7$ 尔格/摩尔·K。如压强单位采用托，体积单位采用升，则 $R = 62.364$ 托·升/摩尔·K。

当容器内气体为1摩尔时，(即 $M = \mu$)式(2.9)又可写成

$$PV = RT \quad (2.10)$$

这就是克拉泊龙方程。从上式可见，对于1摩尔的气体，不管其状态如何改变，它的压强和体积的乘积被绝对温度来

除，所得的商始终为一常数 R 。因此，此式中的三个参量(气体的压强 P 、体积 V 、温度 T)，只要知道其中的两个，第三个参量就可由方程求出。

理想气体状态方程是指理想气体状态下方可成立，然而低压强气体与理想气体很接近，因而理想气体状态方程同样适用低压强气体。但当压强太高或温度过低时，这个状态方程同实际情况将有较大偏差。

当容器内有 n 个摩尔时，则式(2.10)又可写成

$$PV = nRT \quad (2.11)$$

从阿佛加德罗定律可知，1摩尔的气体分子数为 $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$ 个，则 n 个摩尔的气体分子数为 N_A ，即

$$n = N_A / N_0$$

故式(2.11)又可写成

$$PV = \frac{N_A}{N_0} RT \quad (2.12)$$

若令 $k = R/N_0$ ，则

$$\begin{aligned} k &= 1.035 \times 10^{-22} \text{托升/K} \cdot \text{个} \\ &= 1.38 \times 10^{-16} \text{尔格/K} \cdot \text{个} \end{aligned}$$

k 通常称为波尔兹曼常数。

这样式(2.12)又可改写为

$$\begin{aligned} PV &= k \cdot N_A T \\ P &= \frac{N_A}{V} kT \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中 N_A/V 是单位体积中的气体分子数，即为气体分子的密度，可用 n_0 表示。在标准状态下，每立方厘米中气体分子数就叫苏喜密特常数，其值为 $n_0 = 2.7 \times 10^{19}$ 个/厘米³。因此，式(2.13)又可改写为