

邱爱叶 邵健中 编著
浙江大学出版社

超高真空技术



751

前 言

真空技术是现代科学技术的重要组成部分，广泛应用于国民经济的各个领域，推动并促进了科学研究和生产技术的发展。超高真空技术是真空技术的尖端技术。现代尖端科学，例如表面物理化学研究、粒子加速器和贮存环、等离子体物理和热核聚变、半导体集成电路制造、超纯度材料冶炼、宇宙空间模拟研究、低温能源技术和宇宙观察红外望远镜等都需要超高真空技术。超高真空技术是在真空技术基础上发展起来的，但它又带动并促进了真空技术自身的发展。超高真空科学技术不仅对超高真空技术来说非常重要，而且对提高真空技术水平来说也具有十分重要的意义。

超高真空技术在目前已出版的真空技术书中所占篇幅都很少，而且叙述得很不够系统和全面。近年来，由于超高真空状态固有的物理特性，使超高真空技术在国内外国特别受到重视，技术水平不断提高和发展，应用领域不断深入和扩大，技术资料猛增，因此迫切需要把超高真空技术与传统的真空技术分开来专门加以介绍。本书就是介绍超高真空技术的专著。

本书是作者根据几年来使用过的讲义，综合大量新资料和自己已在超高真空实践中的经验编写而成，适合于教学。使用本教材，约需40学时。本书编写特点是：第一，内容新颖。系统全面地介绍了当前国内外在超高真空技术领域内的最新研究成果和技术发展。第二，理论联系实际。把气体在真空容器中、在零件和器壁表面上及其内部的真空物理过程，电子和离子在电场和磁场内的物理和化学过程与超高真空技术紧密地联系了起来。第三，章节

安排恰当，概念确切，分析透彻。文句简练易懂，使读者容易理解和接受，并且在叙述书中内容时作者有意引导和启发读者在技术和应用上去作创新和开拓。本书也适合于从事和接触真空和超高真空的工程技术人员自学。

本书由邱爱叶、邵健中合作编写，邱爱叶执笔编写第一、三、四、五、八各章，邵健中执笔编写第二、六、七各章，全书由邵健中按统一格式整理和润色。由于作者的水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

邱 爱 叶

1991年2月

目 录

前 言

第1章 真空科学技术基础	1
1.1 真空性质	1
1.2 真空的气体动力学模型	2
1.2.1 压强	3
1.2.2 分子的动能和速度	3
1.2.3 入射到表面的分子数	4
1.2.4 平均自由程	4
1.2.5 热流逸	5
1.3 气体经真空系统流动	5
1.3.1 质量流	5
1.3.2 流导	6
1.3.3 小孔的流导	7
1.3.4 管道的流导	7
1.4 真空系统抽气	9
1.4.1 抽速	9
1.4.2 抽气率	10
1.4.3 抽速、气体流入量和真空度	11
1.5 真空系统内的气体源	12
1.5.1 经容器壁的泄漏	12
1.5.2 虚漏	13
1.5.3 蒸发	13
1.5.4 表面出气	16
1.5.5 体出气	20
1.5.6 渗透	23

1.5.7 分解.....	23
1.5.8 高能粒子轰击出气.....	26
1.6 文献.....	26
第2章 超高真空材料	28
2.1 超高真空材料选择准则	28
2.2 玻璃.....	29
2.2.1 物理性能.....	39
2.2.2 气体经玻璃渗透.....	41
2.2.3 玻璃出气.....	45
2.3 金属.....	47
2.3.1 金属的蒸汽压.....	47
2.3.2 金属出气.....	47
2.3.3 气体经金属渗透.....	55
2.3.4 对壳体材料的物理和化学要求.....	57
2.4 陶瓷.....	59
2.4.1 真空陶瓷类型.....	60
2.4.2 物理性能.....	62
2.4.3 气体经陶瓷渗透.....	63
2.4.4 陶瓷出气.....	64
2.5 其它材料.....	64
2.6 封接技术.....	69
2.6.1 玻璃—玻璃封接.....	69
2.6.2 玻璃—金属封接.....	70
2.6.3 金属焊接.....	74
2.6.4 陶瓷封接.....	77
2.6.5 其它材料封接.....	78
2.7 文献.....	80
第3章 抽气泵	81
3.1 背景.....	81

3.2	扩散泵.....	82
3.3	涡轮分子泵.....	87
3.4	吸附泵.....	93
3.5	低温冷凝泵	100
3.6	升华泵和吸气剂泵	104
3.7	离子泵.....	109
3.8	选择抽气泵.....	119
3.9	文献.....	121
第4章	总压强测量	122
4.1	引言.....	122
4.2	电离规.....	123
4.2.1	B—A规.....	125
4.2.2	调制B—A规.....	128
4.2.3	分离规.....	130
4.2.4	磁控管型规.....	134
4.3	动量传递规	137
4.4	校规.....	142
4.5	电离真空计.....	146
4.6	文献.....	147
第5章	分压强测量	148
5.1	分压强测量的意义	148
5.2	规参量	150
5.3	离子源.....	152
5.4	静态质谱计	154
5.4.1	磁扇形分析器.....	154
5.4.2	静电扇形分析器.....	157
5.4.3	摆线质谱计.....	159
5.5	动态质谱计	162

5.5.1	飞时质谱计	162
5.5.2	回旋质谱计	164
5.5.3	射频质谱计	166
5.5.4	四极质谱计	167
5.6	离子探测	174
5.7	校准和性能	178
5.8	文献	184
第6章	超高真空管路元件	185
6.1	范围	185
6.2	可拆密封	185
6.3	机械运动传递和动密封	189
6.4	阀	192
6.5	其它管路元件	196
6.6	液氮补液器	198
6.7	文献	200
第7章	系统与应用	201
7.1	引言	201
7.2	系统的要求	201
7.3	抽气要考虑的基本因素	202
7.4	系统设计	207
7.4.1	扩散泵—机械泵系统	208
7.4.2	涡轮分子泵系统	210
7.4.3	离子泵系统	210
7.4.4	低温泵系统	213
7.4.5	自动控制	214
7.5	应用	216
7.5.1	粒子加速器和空间模拟室	216
7.5.2	表面科学	219
7.5.3	薄膜技术	223

7.5.4	半导体加工	224
7.5.5	其它应用	225
7.6	文献	226
第8章	检 漏	227
8.1	基本技术	227
8.2	性能要求	228
8.3	电离规检漏	231
8.4	离子泵检漏	234
8.5	卤素检漏	235
8.6	质谱检漏	236
8.7	文献	239
附录1	真空计量单位换算表	240
	压强	240
	气体流量	240
	出气率	240
附录2	标准大气的成分	241

第1章

真空科学技术基础

1.1 真空性质

真空是指给定空间内的气体密度小于该地区标准大气压所对应气体密度的状态。气体密度越小，真空度越高。气体密度减小了会出现许多很有用的性质。例如：(1) 降低了气体的化学活泼性，有利于贮存活性金属和利用金属的特性；(2) 延长了固体表面沉积气体单分子层的时间，有利于分析研究清洁表面和测定气体层的作用；(3) 减少了带电粒子在电场、磁场或电磁场作用下运动的碰撞损失；(4) 改变了大气压下靠分子间相互作用发生的物理过程，例如热、声和气体密度本身等的传播过程，当气体密度减小到分子间相互作用不再是输运的主要原因后，物理过程就会发生极大的变化。

上述各种性质都与真空度有关。空间内残余气体的密度可以用来直接衡量真空度。但因气体密度正比于气体压强，故实用上都以气体压强来衡量真空度。

现代真空技术能获得气体压强为大气压强 10^{-15} 的真空。这是一个很大的真空范围，一般细分成几个区域，如图1.1所示，图中还包括了应用真空性质的一些实例。要利用真空性质，必须创造恰当的真空环境，必须采用合适的真空设备建成良好的真空系统。为此，工程技术人员不仅需要熟悉设备的性能，而且还要知道各种影响真空的因素。本章介绍真空的基本原理。

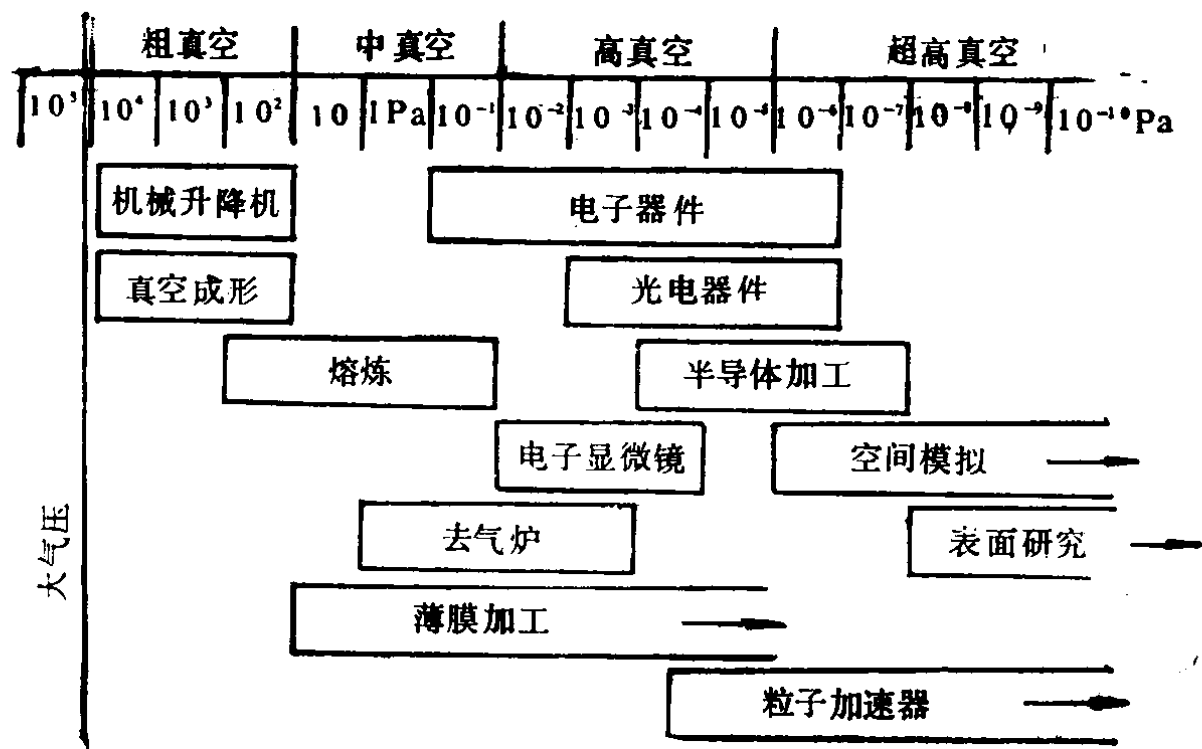


图1.1 真空区域和应用

1.2 真空的气体动力学模型

真空环境是一种低气压状态，因而任何真空理论都必须服从气体实验定律。从实验定律推导得出的状态方程为

$$PV = NkT \quad (1.1)$$

式中 P 是气体压强； V 是气体容积； T 是气体绝对温度； N 是气体分子总数； k 是 Boltzman 恒量， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ 。

气体动力学理论能解释真空性质与气压间的关系。理论假定气体分子可以用不停地杂乱无章运动的硬球表示；分子间以及分子与真空容器壁之间只发生弹性碰撞。从这些假定出发演绎出的许多关系和准则表明，动力学理论完全能够解释气体的性质。而且，动力学理论能够预言气体的物理性质例如粘性和热传导与气压间的关系。

下面概述对高真空和超高真空技术特别有意义的关系式。

1.2.1 压 强

大量杂乱运动分子碰撞容器表面所引起的动量改变率就是气体对表面的压强，即

$$p = \frac{1}{3}mn v_{rms}^2 \quad (1.2)$$

式中 m 是分子质量； n 是单位容积内的分子数； v_{rms} 是所有分子速度的方均根。

1.2.2 分子的动能和速度

式(1.1)除于 V ，得

$$P = nkT \quad (1.3)$$

比较式(1.2)和(1.3)，为使动力学理论与实验结果相一致，必有

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (1.4)$$

因为质量为 m ，速度为 v_{rms} 的粒子的动能是 $\frac{1}{2} m v_{rms}^2$ ，由式(1.4)得分子的平均动能是 $\frac{3}{2}kT$ 。这样，动力学理论把气体分子的平均动能与气体的绝对温度联系了起来。

分子间不断地相互碰撞，使处于稳态的气体形成确定的速度分布。在平衡状态下的单位容积内，在球坐标系所确定的速度空间中，速度体积元是 $v^2 \sin\theta dv d\theta d\varphi$ 。按统计物理学的Maxwell速度分布定律，处在速度体积元内的分子数为

$$dn_{v\theta\varphi} = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \sin\theta dv d\theta d\varphi \quad (1.5)$$

对 θ 和 φ 求积分， θ 由0到 π ， φ 由0到 2π ，得速度间隔内的分子数为

$$dn_v = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv \quad (1.6)$$

这是不考虑速度方向而处在相邻速度球壳之间的分子数。按概率密度的定义，式中的函数

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

称为Maxwell速度分布函数。利用概率密度求平均值的方法，可求得气体分子的平均速度为

$$v_m = 2 \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}} \quad (1.7)$$

1.2.3 入射到表面的分子数

通常需要知道单位时间内轰击到真空中单位面积上的分子数。从动力学理论得出这个分子数的表示式为

$$\nu = \frac{1}{4} n v_m \quad (1.8)$$

把 v_m 和 n 的表示式代入式(1.8)，得

$$\nu = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (1.9)$$

1.2.4 平均自由程

气体分子杂乱运动使它们彼此间发生相互碰撞。分子碰撞之间的平均飞行距离称为平均自由程。在稳态下，气体内同类分子间碰撞的平均自由程可写成

$$\lambda = \frac{1}{n\pi d^2 \sqrt{2}} \quad (1.10)$$

式中 d 是分子球的直径。

随着气体压强或密度的减小，平均自由程增大，在某些压强下平均自由程将大于真空容器的尺寸。这时，分子与器壁间的碰撞多于分子间的碰撞。于是，气体经过真空系统的流通便是自由分子流。表1.1列出了不同压强下氮气的平均自由程数值、入射到

单位面积上的分子数和单分子层形成时间。

表1.1 不同压强下参量 n , ν , λ 和 τ 的值

压强(Pa)	10^5	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}
n	2.7×10^{19}	2.7×10^{10}	2.7×10^8	2.7×10^6	2.7×10^4
ν	2.8×10^{23}	2.8×10^{14}	2.8×10^{12}	2.8×10^{10}	2.8×10^8
λ	6×10^{-6}	6×10^3	6×10^5	6×10^7	6×10^9
τ	3×10^{-19} 秒钟	3 秒钟	5 分钟	8.5小时	35天

n = 分子数/cm³, 在 0 ℃时。

ν = 入射分子数/cm², 在0℃、s⁻¹时。

λ = 自由程, cm为单位。

τ = 单分子层形成时间, 粘附几率为 1 。

1.2.5 热流逸

在自由分子流情况下, 在两个由直径小于平均自由程的小孔联通的大容器内, 气体平衡的准则是单位时间内从每个方向通过小孔的分子数相等。这个分子数就是式 (1.9) 的 ν 乘上小孔面积。因此, 当两个容器分别处于不同温度 T_1 和 T_2 时, 只有在

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

(1.11)

时, 才能建立平衡, 也就是说在温差下平衡时存在压差。

1.3 气体经真空系统流动

1.3.1 质量流

抽真空就是从容器内抽除气体质量。抽气率即质量流决定于压强下降率。

若容器内起初包含分子质量为 m 的分子数 N ，则抽气时的总质量变化率为

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(Nm)}{dt} \tag{1.12}$$

将式 (1.1) 代入上式，得

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d\left(\frac{mPV}{kT}\right)}{dt} \tag{1.13}$$

事实上，在抽气期间气体种类和温度可以视为恒定，于是

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m}{kT} \frac{d(PV)}{dt} \tag{1.14}$$

在真空容器内，压强和容积都是很容易测量的量，故可定义气流率

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} \tag{1.15}$$

Q 能够测量，它与质量流率的关系为

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m}{kT} Q \tag{1.16}$$

通常称 Q 为气流量，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.2 流 导

在恒温下，当存在压差时便会发生气体经小孔或管道的流动。在自由分子流情况下，经管道的气流量 Q 正比于压差，即

$$Q = C(P_1 - P_2) \tag{1.17}$$

式中 C 是比例常数，与管道的直径有关，称为流导。式 (1.17) 是流导的定义式。

按此定义，当两个流导分别为 C_1 和 C_2 的管道联接在一起时，总流导 C 为

$$C = C_1 + C_2 \qquad \text{并联} \tag{1.18}$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{串联} \quad (1.19)$$

1.3.3 小孔的流导

如在1.2.5节所述,两个大容器靠“没有”厚度的直径远小于分子平均自由程的小孔相联。若此两容器充分大,使通过小孔的气流对容器内分子的分布不产生严重影响,则在每个容器内各处的压强可以认为是均匀的。

假定两个容器内的温度相同,但一个内的压强高于另一个,则在稳流条件下,单位时间内从高压到低气压的净分子流数,按式(1.9)为

$$\frac{(P_1 - P_2)A}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

这里 A 是小孔面积。质量流率为

$$\frac{dM}{dt} = \frac{(P_1 - P_2)Am}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (1.20)$$

按式(1.16), 气流量为

$$Q = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} (P_1 - P_2)A \quad (1.21)$$

比较式(1.21)和(1.17), 小孔的流导为

$$C_0 = A \left(\frac{k}{2\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{m} \right)^{1/2} \quad (1.22)$$

由此可见,小孔的流导是气体温度、气体种类和小孔面积的函数。

1.3.4 管道的流导

在自由分子流条件下,当气体经管道流动时,分子主要与管壁相碰撞,而分子间则几乎不碰撞。通常认为,相对于分子直径来说管壁很粗糙,因此虽然分子与管壁的碰撞是弹性的,但却不

简单是的是反射，而是漫散射。离开表面小面积飞行于与表面法线成 θ 角方向内的分子分布服从余弦定律（正比于 $\cos\theta$ ）。由此可以得出，穿过半径为 r 无限长管任何截面的气流量为^[1]

$$Q = \frac{4}{3} r^3 \left(\frac{3\pi kT}{m} \right)^{1/2} \frac{dP}{dx} \quad (1.23)$$

若管道不是无限长，但仍充分长，则出入口端的影响可以忽略，穿过任何截面的气流率仍然可以认为是常数，于是能够用 $(P_1 - P_2)/L$ 代替 dP/dx ，这里 L 是管道长度。这样，长管的流导为

$$C_{LT} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} (2\pi k)^{1/2} \left(\frac{T}{m} \right)^{1/2} \quad (1.24)$$

对于出入口端面积和管壁面积相比拟的短管，其流导是管道和小孔流导的合成。

利用串联流导的公式（1.19），式（1.22）和（1.24）合并便得短管的流导为^[1]

$$C_{ST} = \frac{C_0}{1 + \frac{3}{8} \frac{L}{r}} \quad (1.25)$$

图1.2是短管流导的计算结果^[2]，电子计算机技术证明，对于大多数实际使用来说是足够精确的^[3]。

当由许多流导合成获得总流导时，必须注意在计算各个流导时所作的管道出入口面积很大和沿管道压强梯度均匀的假定。实际上，这些假定条件并不适用，特别在管道直径改变时就更不适用，因而计算结果可能不很正确。

如果需要复杂形状导管的精确流导数据，则可采用 Monte Carlo 方法计算大量分子通过系统的轨迹并确定传输几率^[4]。

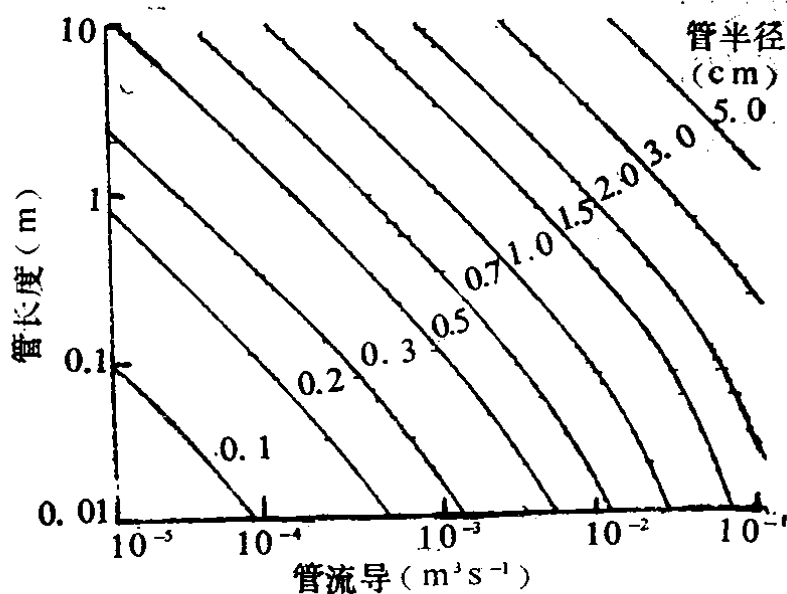


图1.2 圆管分子流情况下的流导

1.4 真空系统抽气

1.4.1 抽 速

抽气泵是抽除气体的工具。实际抽气泵都连续工作，若进入泵的气流量恒定，则在泵入口会建立起具有恒定压强 P 的稳态。

若定义

$$S_0 = \frac{Q}{P} \quad (1.26)$$

则 S_0 就是泵的抽气能力。 S_0 称为抽速，对于抽气泵来说，它在整个工作压强范围内为恒值，这是一个很有用的特性。比较式 (1.26) 和 (1.17)，抽速和流导有相同的量纲 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果要求泵经流导 C 联接到真空容器，则容器获得的抽速必定减小。

气体经管道流动产生一压强降落，按式 (1.17) 气流量为

$$Q = C(P_1 - P_2) \quad (1.27)$$

式中 P_1 是系统内压强； P_2 是泵入口处的压强。进入泵的气流量，按式 (1.26) 为

$$Q = S_0 P_2 \quad (1.28)$$