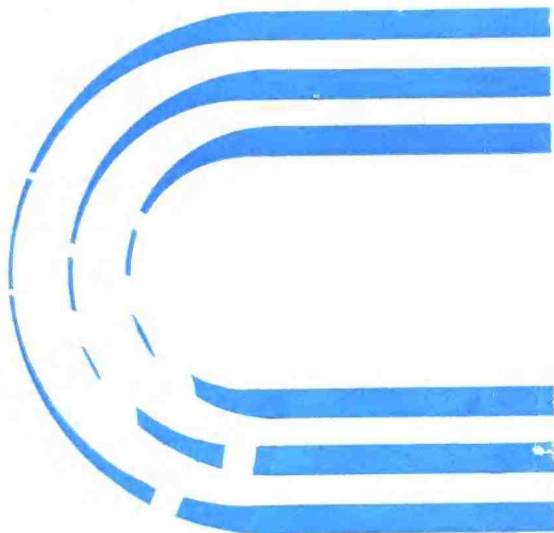


真空系统工程

— 基础与应用 —

〔日〕谷田和雄 著



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书主要内容包括第一章介绍真空的基本概念外,由三部分组成。第二至第六章讨论了真空中气体的流动(涡流、层流和分子流),引入了流体力学分析方法来处理层流,尤其是喷嘴内的物理过程。关于分子流流导的计算引入了奥特莱传输几率法和蒙特卡罗法。第七章、第八章详细讨论了排气实验和材料放气,最后两章探讨了气固界面问题。

本书可供从事真空技术研究、生产、应用和真空系统设计的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

本书第一章至第五章由陈昌存同志翻译,第六章至第十章由翁国屏同志翻译,全书由清华大学无线电系陈丕瑾同志校订。

真空システム工学

——基礎と応用——

谷田和雄 著

東京株式会社養賢堂発行, 1977

* * *

真空系统工程

——基礎と応用——

[日] 谷田和雄 著

陈昌存 翁国屏 译

陈 丕 瑾 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 10¹/₂·字数 250千字

1985年6月重庆第一版·1985年6月重庆第一次印刷

印数 0,001—4,700·定价 2.60元

*

统一书号: 15033·5717



前 言

谷田所著“真空系统工程”分Ⅰ、Ⅱ两册出版。Ⅰ册是基础和应用，主要阐述真空技术的理论问题。正如著者所说，他尝试使现代真空技术系统化。之所以取名“真空系统工程”，其理由是适应近代工业领域的要求，使真空技术作为科学技术之一的基础科学系统化。本书是完全按照这个要求编写的。

Ⅰ册第一章是入门，叙述了真空技术的某些基本概念。第二章气体分子运动论是为以后各章准备的，著者从全书系统性考虑只作了扼要的探讨，因为这方面的专著已经很多了。第三章讨论了气体的流动，主要是讨论分子流和粘滞流。第四章介绍了流导的计算，值得一提的是比较系统地介绍了奥特莱传输几率的计算及其与流导的关系。本书写得有点特色的是第五、第六章关于气体分子的处理。第五章介绍了蒙特卡罗法在真空技术中的应用，全面介绍了戴维对直角肘管的传输几率的计算。第六章采用流体力学方法处理低真空中的气流，可以认为这种尝试在真空理论专著中并不多见。第七章、第八章是关于材料的放气和排气，写得极其生动和深刻，著者除了广泛引用实验数据之外，还作了十分确切和详细的描述。如果著者没有丰富的实践经验和很好的理论基础是不容易做到的。第九、第十两章是有关物理吸附、化学吸附、扩散、渗透等命题，对进一步了解第七、八两章的内容和设计、分析真空系统都是有幫助的，可以说是理论基础。

这本书不仅对于真空技术专家，而且对于使用真空的工程技术人员都有参考价值。本书第一到第五章由陈昌存同志翻译，第六章到第十二章由翁国屏同志翻译，全书经陈丕瑾同志审校，由于水平所限，错误之处在所难免，望读者指正。

Ⅱ册是工艺篇，尚待翻译出版。

陈丕瑾 1983年9月
于清华园

主要符号

α	气体的声速 $\alpha = \sqrt{\gamma P / \rho}$		的粘滞力
α_a	吸附几率	g	重力
A	面积, 横截面积 [$A \times B$: 矩形管道的断面的一边], 常数, (管道的横截面积)	G	气体的质量流量 (rate of mass flow) [g/s]
A_i, A_j	序号为 i, j 的横截面积	G^*	$M_a=1$ 时的质量流量
dA	假想的面积元	h	高度
B	断面的周长, [$A \times B$: 矩形管道的断面的一边], 常数	H	焓
c	真空中的光速, $c=2.997925 \times 10^{10}$ cm/s	H_0	在真空室条件下的焓 ($U=0$)
c_p	气体的定压比热	I	单位面积的质量流量 G/A [g·s ⁻¹ ·cm ⁻²]
c_v	气体的定容比热	I_0	流过小孔的单位面积的质量流量
G	流导 [l/s]	I_p	流过圆形管道的单位面积的质量流量
$C_{\text{空气}}$	对 20℃ 的空气的流导	J	热功当量, $J=4.1855$ J (15℃)
C_h	小孔的流导	J_p	渗透的气体流量
C_{gas}	(各种) 气体的流导	k	玻尔兹曼常数, $k=1.3805 \times 10^{-16}$ erg/K
C_m	分子流区域的流导	K	热传导系数 [cal/cm·s·deg]
C_M	阀门的流导	K_A	以小孔的流导为基准, 求有厚度的孔的流导的修正系数
C_p	管道的流导	K_c	克劳辛系数
C_T	温度为 T 时的流导	K_e	蒸发系数
C_v	粘滞流区域的流导	K_i, K_j	单位时间内从孔 i (j) 进入管道的分子数
d	厚度, (距离) [cm]	K_n	克努曾数, $K_n=\lambda/D$
D	管道的直径	K_p	渗透系数
D_d	气体的扩散系数	K_r	环形管道的流导修正系数; 确定矩形管道在分子流区域的流导的常数
e	电子的电荷, $e=4.80298 \times 10^{16}$ 静电单位	K	修正系数
f	流体的摩擦系数, Fanning 系数 (常数)	l	长度、距离
$f_{(s)}$	Fanning 系数 (函数型)	L	管道的长度, 假想圆筒的长度, 二点之间的距离
F	粘滞力	L_{axial}	直角管、弯管等在中心轴线上的实
F_i	作用在假想圆筒 (检查面) 内表面的粘滞力		
F_o	作用在假想圆筒 (检查面) 外表面的粘滞力		

L_{eff}	际长度	q	热通量
n	直角管、弯管等的有效长度	q_{sf}	吸附热
n	分子密度	Q	流速, Q 值 [Torr·l/s]
n_0	1cm ³ 中的气体分子数, 在0℃和标准压强下, $n_0=2.6870 \times 10^{19}$ 个/cm ³	Q_b	从非气系统返流而来或者反扩散的气体流量
n_{mol}	1克分子中的分子数	Q_c	真空室出口处的流量
N	(容积 V 中的、气体分子团的) 2i 体分子数	Q_E	从系统流出的气体的流量
N'	单位时间内通过断面的气体分子数	Q_h	从小孔流出的气体的流量
N_A	阿佛加德罗常数 $N_A=6.02252 \times 10^{23}$	Q_k	放气所形成的流量
N_d	气体分子的总数	Q_i	漏气所形成的流量
n_L	洛希密脱数 ($=n_0$)	Q_0	初期放气量
m	一个分子的质量	Q_0'	在极限压强附近存在的放气量
m_e	电子的静止质量 $m_e=9.109 \times 10^{-31}$ g	Q_P	渗透的气体流量
M	分子量 [g/mol]	Q_P	用升压法求出的放气量 (流量)
M_a	马赫数	Q_r	由化学反应、离解作用等所产生的气体的流量
P	分压强	Q_R	残余气体的流量
P	压强、蒸汽压、(静压) [dyn/cm ² , bar][Torr][N/m ² , Pa]	Q_v	由蒸汽压产生的流量
P_0	在真空室条件下的压强, 初始设定的压强	Q_V	容积为 V 的真空容器, 由于压强变化所产生的流量
P_0'	真空系统的极限压强	Q_w	从固体表面脱附而来的气体的流量
P_P	从真空装置器壁渗透的气体所显示的压强	Q_x	流过长度为 δx 的假想圆筒的流量
P_s	饱和蒸汽压	r	半径方向的距离 [cm]
P_s	系统排气的极限压强	r_0	临界压强比 $r_0=P^*/P$
P_T	全压强, 总压强	r_{in}	环形圆管的内半径
P_s	最终的极限压强	r_0	圆形管道的半径
P^*	临界压强 ($M_a=1$)	r_{out}	环形圆管的外半径
$P_{i \rightarrow j}$	气体分子从孔 i 进入从孔 j 出去的几率	r	压缩比 P_2/P_1 ($P_1 > P_2$)
P_{si}	气体分子的传输几率 (测量值)	R	气体常数 $R=N_A \cdot k$
P_M	气体分子的传输几率 (用蒙特卡罗法求得的值)	Re	雷诺数 $Re=Du\rho/\eta$
		s	粘附几率
		S	抽速 [l/s]
		S_g	排气系统的抽速
		S_r	泵的抽速
		S_i	粒子在1个射程中所移动的距离 (在蒙特卡罗法中使用)
		t	时间 [s]
		T	温度, (气体的温度) [K]
		ΔT	温度差 [°]

T_m	熔点	σ	分子直径
T_s	在真空室条件下的气体温度	σ_s	斯忒藩—玻尔兹曼常数
T_v	沸点	$\sigma_s = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$	
u	流速, (流动速度) [cm/s]	σ_a	吸附量 (吸附的分子数)
$\bar{u}$	平均速度	σ_m	形成单分子层所需要的吸附量
u^*	$M_0=1$ 时的气体的流速	σ_s	饱和吸附量
u_{max}	(断面内的) 最大流速	σ_{m0}	单位表面面积的分子数
U	均匀分布的随机数	τ	被吸附分子的滞留时间
$\mathbf{u}$	流体的流动速度 (向量表示)	τ_s	剪切应力
v	气体分子的 (热运动) 速度	τ_v	真空系统排气时的时间常数
$\bar{v}$	气体分子的平均速度	τ_0	吸附常数
v_m	最可几速度	ψ	对面积元 dA 所张的立体角
$\overline{v^2}$	速度平方的平均值	ϕ_{1-2}	从面积元 dA_1 出发、到达面积元 dA_2 的分子数
$\sqrt{\overline{v^2}}$	均方根速度	ϕ_1	由面积元 dA 发射的分子的通量密度
V	容积, (体积) [cm ³]	η	粘滞系数, 粘滞率
V'	体积流量	η_M	自由分子粘滞系数
V_0	真空室的容积	λ	平均自由程
W	蒸发量 [g/s]	λ_e	电子的平均自由程
x	距离, 自由程 [cm]	λ_i	离子的平均自由程
Y	在粘滞流下, 决定矩形管道的流导的常数	$\lambda_{\text{空气}}$	20℃空气的平均自由程
Z	平均碰撞频率 $Z = \bar{v}/\lambda$	λ_s	管道摩擦系数
z_n	入射频率	Λ	自由分子热传导系数
z_m	蒸发速度	ω	立体角
α	适应系数	γ	克分子数
α, β	决定排气系统的排气特性的常数	γ_k	动粘滞系数, 动粘滞率
α_t	传输几率	ξ	碰撞截面
α_T	总传输几率	Π	压强损失系数 $\Pi = \Delta P / \rho U^2$
γ	比热比 $\gamma = C_p / C_v$	ζ	压强损失系数
ε	修正系数	θ	球坐标系或极坐标系中的一个坐标
κ	热传导系数	Θ	1个气体分子的热能
ρ	密度 $\rho = m n$		
ρ_0	在真空室条件下的密度		

目 录

前言

主要符号

第1章 真空的基本概念	1
1.1 真空、压强、分子速度、蒸汽压	1
1.2 流量	5
1.3 流导、气流	10
参考文献	15
第2章 气体分子运动论	17
2.1 分子速度与速度分布	17
2.2 平均自由程与碰撞频率	20
2.3 碰撞于表面(壁面)的分子数	21
2.4 气体的粘滞性	23
2.5 气体的热传导、适应系数	27
2.6 热流逸、泻流	30
2.7 扩散与热扩散	30
参考文献	32
第3章 真空中的气流(I)	33
3.1 分子流(1)——小孔的分子流	33
3.2 分子流区域的条件	34
3.3 分子流(2)——流过圆形管道的分子流	35
3.4 粘滞流——流过圆形管道的粘滞流	38
3.5 克努曾的实验公式	40
3.6 喷流、湍流	41
参考文献	43
第4章 真空中的气流(II)	44
4.1 各种形状管道的流导	44
4.2 连接管道、旁管、合成流导	46
4.3 奥特莱传输几率的计算	46
第5章 蒙特卡罗法的应用	52
5.1 Davis的方法	53
5.2 传输几率的计算与实测	59

5.3 应用举例	63
参考文献	68
第6章 真空中的气流(III)	69
6.1 低真空区域的气流——低压气流	70
6.2 压缩性——喷雾及其气流	73
6.3 在有摩擦的导管内的压缩性流动	75
6.4 圆截面导管内稀薄气流——纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程	76
参考文献	79
第7章 有关排气的二、三实验	80
7.1 各真空区域的不同排气方法	80
7.2 阿尔波特的实验——I	83
7.3 超高真空——极高真空的排气	86
参考文献	89
第8章 材料的放气	90
8.1 真空装置的放气和材料放气	90
8.2 放气量测量法(I)——流量测量法	92
8.3 放气量测量法(II)——流导法	97
8.4 放气量测量法(III)——压强上升法	104
8.5 各种材料及其放气	107
参考文献	119
第9章 气体分子和固体之间的有关现象(I)	120
9.1 物理吸附、吸附平衡、吸附式	121
9.2 凝结核数、平均吸附时间、脱附	127
9.3 物理吸附吸附量的测量	131
参考文献	138
第10章 气体分子和固体之间的有关现象(II)	139
10.1 化学吸附、粘附几率	139
10.2 扩散	143
10.3 渗透	144
名词术语(日、英、中)对照表	157

第1章 真空的基本概念

称为真空的空间,是指压强低的空间,例如用真空泵抽气后的真空容器;而不是我们所生存的大气空间。

对于真空中的现象,我们还有凭直觉难以理解的问题,所以经常听到“真空难懂”这种说法。我认为有必要先摒弃“真空”与“大气空间”相同这一潜在意识,建立起两者之间是完全不同的压强空间的观念,以此作为我们理解真空现象的出发点。

就是真空也还有种种不同的状态。在抽气到比大气压稍低的低真空,是产生压力差的以力的形式表现出来的真空;而在达到 10^{-3} Torr以下的被称为高真空的压强区域,则是真空容器内的气体分子行为表现为粒子间的相互碰撞或粒子与固体表面(器壁)之间的碰撞的真空,也就是以空间飞行粒子的运动为中心、以气体流动问题作为讨论对象的真空。因此,必须首先了解在整个真空区域内是如何来处理压强这一概念的。

1.1 真空、压强、分子密度、蒸汽压

压强比大气压低的气体所充满的特定空间,其“空间状态”称为“真空”。

这个定义是被广泛采用的一般性定义,在很多场合下,往往像图1.1那样,把真空区域分得更细、更具体^①。

尽管都叫真空,但是,在 10^{-3} Torr以上(接近大气压的一边)的中-低真空区域和高真空区域或超高真空区域,别的不说,首先在其中所发生的各种真空现象就不相同,因而其应用领域也不一样。

也就是我们要根据对象——“压强范围”(各真空区域)和“应用领域”来运用和发展不同的真空技术。

过去,一直不加区别地泛称为真空技术,所以有含混不清和误用之嫌,即仅仅把真空技术当作各种技术知识的堆积加以评论,而没有作为系统化的“工程学”加以整理。但是,可以认为:近几年来进步所达到的发展高度,很适合于“真空工程”的内容的系统化和形式的完美性。

真空工程所包括的应用领域非常广泛,甚至可以说涉及全部科学技术领域。尽管真空技术已经在许多方面作为实用技术在使用,然而,由于我们所面临的真空区域过于宽广,迄今还存在着不少尚未开拓的研究领域。

无论问题大小如何,把这一矛盾带到真空工程的许多对象中去的例子是不胜枚举的。有人说:“如果将真空技术整理成系统化的真空工程,确实能够得到好的结果,但是,真空中的现象太复杂了”。一般认为:产生这种说法的根本原因,在于过去的真空技术是在脱离许

① 这种分类是一种权宜的分类,但也逐渐被各国采用作为真空用语。

② 低压这一名称意味着接近于大气压的减压状态,在流体、气动力和化工各领域中常被使用。从真空技术角度,低压主要涉及低真空范围到中真空范围。

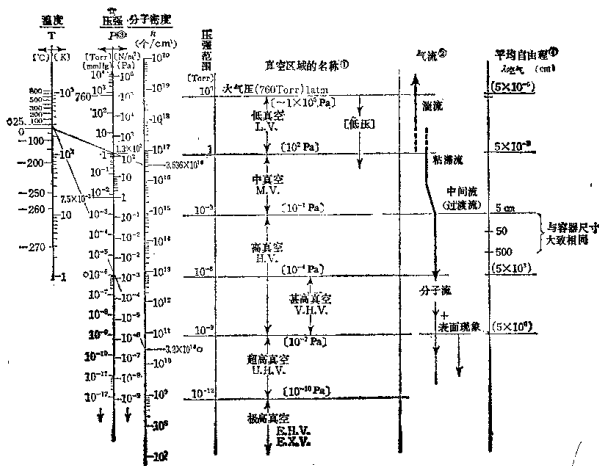


图 1.1 压强、分子密度、真空区域和气流 (参考“中川洋: 真空技术常用诸表”(日刊工业, 昭和 40 年), P. 36, 制成)。

- ① 该压强区域的命名方法, 是把每三个数量级的压强范围划分为一真空区域。
- ② 关于气流的表示极为笼统, 状态也颇为复杂。
- ③ 使用国际(工业规格)标准化组织所规定的压强单位 Pa (1N/m^2) 时, 高于大气压的压强范围也可以统一用 Pa 处理。
- ④ 20°C 、空气的 λ 值, 由 (2.12) 式确定。

多应用领域的情况下发展起来的, 并一直依赖于需要技能的技术。因此, 致力于用物理方法分析、处理真空中的各种现象, 以此作为真空工程的食粮是很必要的。

为了定量表达真空状态, 通常用“压强为 1×10^{-6} Torr 的高真空”这种表示方法。

在定义真空时, 以“比大气压低的……”为基础, 其中假定了“1 大气压不等于 1 标准大气压”。因为大气空间的低压状态 (例如同温层) 是大气压, 故不是我们所说的真空。此外, 既没有也不必设想真空就是什么也没有的绝对真空, 我们希望把真空理解成多少存在一些空气的特定空间的状态, 例如抽气后的真空容器内的状态。

根据气体分子运动论, 压强 P 可以用分子密度 n (个/ cm^3) 和温度 T (K) 表示为

$$P = nkT \quad (\text{c.g.s}) \quad (1.1)$$

k 是玻尔兹曼常数 [$k = 1.3806 \times 10^{-16} \text{erg/K}$]。

从 [力/面积] 这一量纲来看, 在压强的概念里隐含着“力”的意义。事实上, 在低真空的应用方面, 有利用这种力的例子, 如真空卡盘就是利用真空与大气的压力差所产生的吸引力的。

但是, 在中、高真空区域或更低的压强下, 却很难感到力的存在。因此, 将 (1.1) 式

的内容利用别种形式表现出来。

“压强正比于分子密度和温度”这一关系表明，如果温度恒定，就可以利用压强和分子密度的关系来处理压强（参照图 1.1）。

我们利用 (2.8 式)，将 (1.1) 式改写成

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2$$

$$= p \bar{v}^2 / 3 \quad (1.2)$$

显然，压强由气体分子的动能和分子密度所决定。在气体分子运动论里，气体的温度系根据频繁而又无规则地飞行的气体分子的热运动来定义的，温度的高低与分子运动的能量大小有关。因而可以从用力描述压强开始，进而用气体分子的动能（与气体的温度有关）和分子密度（单位体积中的分子数）来描述压强。如果这样开拓，那么即便在超高真空区域，也会感到稳妥可靠了。因为一般装置处于室温，所以可以认为，分子密度的大小和数量级的变化相应于压强的大小和数量级的变化。在图 1.1 中，示出了温度—压强—分子密度的计算图表。

(1.1) 式不包含质量 m ，亦即意味着“不管气体的种类如何，如果温度和压强一定，则分子密度即单位体积所含的分子数也一定”。这一阿佛加德罗假说对于把压强和分子密度联系起来是很有用的。此外，它还暗示出：气体的性质取决于气体分子本身的质量而不取决于分子的数量。

在定义气体的压强时，可考虑位于真空中的一个假想的任意面。由于此假想面和气体分子的碰撞，会进行动量传递使气体分子的动量发生改变（每个分子的动量改变为 $2mv$ ），据此可以将压强这一概念作为单位时间的动量流来描述。也就是凭感觉可以简单地认为：设定一个任意的假想面，飞向这个假想面的分子流的强弱（与分子密度有关）对应于压强的值。

压强的单位有许多种。在 (1.1) 式采用 c.g.s. 绝对单位制，压强单位用 bar，在真空技术中用 μbar 。国际上采用国际（工业规格）标准化组织（ISO）所规定的 M.K.S 绝对单位制，基本单位是 $[\text{N}/\text{m}^2]$ ，称为“帕”，记为 Pa。1 Pa (N/m^2) 在 SI—单位制中是 7.5×10^{-3} Torr。欧美各国一般采用这种单位制^①。当然，用 Torr 也可以。

表 1.1 是压强单位的换算表。

现在，在真空技术中最常用的压强单位是 Torr。Torr 比 mmHg（毫米汞柱）易读易写，所以用得很多。国际上定义“1 Torr 是 1 标准大气压 ($1013250 \text{ dyn}/\text{cm}^2$) 的 760 分之 1”，所以 1 Torr 和 1 mmHg 相同。本书遵循惯例，用 Torr 作压强的单位。

既然提出了分子密度的概念，从它的必然的扩充就会发觉，仅仅用压强来定量地描述真空这一状态是不够的。这是因为完全不知道充满真空容器的是哪一类气体分子。

不同气体的种类，只着重压强时，用“总压强”表示；在表示各类气体的压强时，可以使用“分压强”。

混合气体的压强（总压强） P ，为构成该混合气体的各种组分气体的分压强 P_i 之和，即

$$P = \sum_i n_i k T = \sum P_i \quad (1.3)$$

① 在国际上已经有许多国家采用了它，在日本也有被正式采用的趋势。

表1.1 压强单位的换算表

	Torr	N/cm ² (Pa)	大气压 (atm)	dyn/cm ² (μbar)	kg/cm ²	lb/in ² (Psi)	inch汞柱
1 Torr (mm Hg)	1	1.333×10^{-2}	1.316×10^{-3}	1.333×10^5	1.3595×10^{-3}	1.9337×10^{-2}	3.937×10^{-2}
1 N/cm ² (Pa)	7.5006×10^{-3}	1	9.8692×10^{-6}	10	1.0197×10^{-5}	1.4503×10^{-4}	2.9528×10^{-5}
1 atm	760.00	1.0133×10^5	1	1.0133×10^6	1.0322	14.696	29.921
1 dyn/cm ² (μbar)	7.501×10^{-4}	10^{-1}	9.8692×10^{-7}	1	1.0197×10^{-6}	1.4503×10^{-5}	2.9530×10^{-5}
1 kg/cm ²	735.56	9.8067×10^4	9.6784×10^{-1}	9.8067×10^5	1	14.223	28.959
1 lb/in ²	51.715	6.8948×10^3	6.8048×10^{-2}	6.8948×10^4	7.0307×10^{-2}	1	2.0350
1 inch汞柱	25.40	3.376×10^4	3.3421×10^{-2}	3.3864×10^4	3.4532×10^{-2}	0.49115	1

注 1) Psig: 表压, 取大气压为零。

2) Psia: 表示以绝对真空为基准的绝对压强。

3) Pa在日本工业标准中还未被采用, 但正在逐渐作采用的准备。

(1.3) 式称为道尔顿定律, 它把总压强和分压强联系起来了。

为了描述真空这一状态, 用分压强来表示未必是最合适的, 但是, 至少在高真空区域必须用分压强加以考虑的问题显著地增多了。这时, 在原则上可以用分压强之和来表示总压强(道尔顿定律), 然而在概念上, 总压强和分压强的用法是稍许有些差异的。

物质的状态可以大致区分为气体、液体和固体三种, 而这几种状态又是随压强和温度而变化的。一些气体的特性列于表1.2。

对于固体和液体, 在某一温度下存在一个称之为蒸汽压的物理量。蒸汽和气体的区别不明显, 不过, 通常只把容易变成液体的气态物质叫蒸汽。任何物质都有一个临界温度(只要加上适当的压强就可以变成液体的最高温度)和临界压强(在临界温度下的饱和蒸汽压), 为方便起见, 把处于临界温度以上的气体称为永久气体; 把处于临界温度以下的气体称为蒸汽 Θ 。在图1.2中示出了一些物质的蒸汽压。

也就是说, 如果从蒸汽压的角度来看就会懂得, 考虑到压强时, 在压强极低的超高真空区域(10^{-9} Torr以下), 各种外壳材料的选用是不可疏忽的。

这样, 当压强的概念一旦超出了“单位面积上所受的力”的意义时, 关于真空的程度即真空度的表示, 就使人感到意味深长、妙趣横生了。

尽管都叫真空, 但状态却随抽气后装置内的压强而不同, 其真空中的现象也不相同。因而在操作方面, 即抽气方法和装置也不一样。由此可见, 这就是主张在各真空区域应该有各自不同的真空技术的理由之一。

此外, 就是在低真空区域, 也必须考虑以力的形式表现的压强差和以空间的粒子形式表现的气体分子的行为及其作用。这些问题的处理和气体流动课题一道, 构成了直到高真空区域的一个重要课题。

随着排气技术的进步, 蒸汽压愈益成为一个问题。首先是从低真空提出了一个关于水的蒸汽的问题, 现在, 在真空工程中, 关于这种蒸汽压的应用, 正在形成一个相当大的应用领域。

Θ 习惯上把临界温度比室温($15 \sim 25^\circ\text{C}$)低的气体叫永久气体, 比室温高的气体叫蒸汽。——译者注

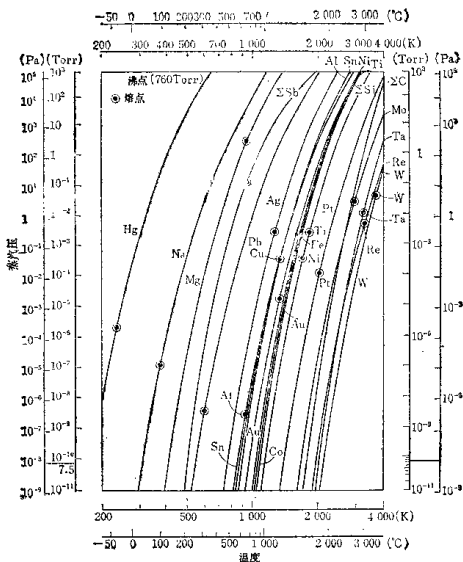


图 1.2 一些物质的蒸汽压——温度曲线

当达到高真空或超高真空时，若只着眼于在空间飞行的气体分子而去处理由这些分子所构成的真空，问题就会变得毫无意义，倘若把包含真空装置的器壁在内的空间作为真空，则固体表面的问题就成了一个中心课题。在这里，固体的表面现象与从空间飞来或脱附的气体分子的问题是重要的，因而不可避免地要讨论到被污染了的表面和洁净表面的问题。

在本章中，拟先从实用观点出发，叙述有关压强和排气的事项，然后讲些关于气流的笼统的概念。

在下一章，将讨论气体分子运动论和进一步学习真空技术的思想方法和处理技巧，然后再深入叙述气流问题。

1.2 流 量

对均质的、处于平衡状态的气体分子（等于理想气体）所建立起来的气体分子运动论，并非真实气体的理论。但可以认为：随着排气使气体压强下降，这个理论对于真实气体的近

表1.2 气体及气体

气 体	分 子 状							
	分子量 ^①	1个分子的	分子直径	气体密度	分子热运动的	平均自由程	入射频率	自由分子粘
	M [g/mol]	质量 ^② m [10 ⁻²³ g]	σ [10 ⁻⁸ cm]	ρ [10 ⁻³ g/cm ³] (20°C, 1Torr)	平均速度 $\bar{c}$ [10 ⁴ cm/s] (20°C)	λ [10 ⁻³ cm] (20°C, 1Torr)	Z_n [10 ²⁰ 个/s·cm ²] (20°C, 1Torr)	滞系数 $\eta_{1/2}$ [10 ⁻² dyn·s/ cm ² Torr] (20°C)
He	4.003	0.6646	2.18	0.219	12.45	14.4	10.25	0.662
Ne	20.18	3.361	2.80	1.104	5.56	10.1	4.57	1.53
Ar	39.95	6.831	3.67	2.19	3.94	5.1	3.25	2.16
Kr	83.80	13.91	4.16	4.58	2.72	3.4	2.24	3.12
Xe	131.30	21.80	4.85	7.18	2.18	2.8	1.79	3.91
H ₂	2.016	0.3347	2.74	0.110	17.56	9.0	14.46	0.484
N ₂	28.02	4.652	3.76	1.532	4.71	4.8	3.88	1.80
O ₂	32.00	5.313	3.64	1.750	4.41	5.2	3.63	1.93
空气	28.96	4.811	3.72	1.584	4.63	4.9	3.81	1.84
CO	28.01	4.651		1.532	4.71	4.5	3.88	1.80
H ₂ O	18.02	2.992	4.68	0.986	5.87	3.2	4.84	1.44
CO ₂	44.01	7.308	4.65	2.41	3.76	3.2	3.09	2.25
CH ₄	16.04	2.66	4.19	0.877	6.22	3.9	5.12	1.37
C ₂ H ₄	28.06	4.66	4.95	1.535	4.70	6.2	3.87	1.81
C ₃ H ₈	30.07	4.99	5.37	1.645	4.54	2.4	3.74	1.87
NH ₃	17.03	2.83	4.43	0.932	6.04	3.4	4.97	1.41
HCl	36.5	6.06	4.46		4.13 [△]	3.4	3.39 [△]	
HF								
CFCl ₃ ^④	137.37	22.81		7.51	2.13		1.75	4.00
CF ₂ Cl ₂ ^⑤	120.91	20.08		6.61	2.27		1.87	3.75
Hg	200.59	33.31	6.26	10.97	1.76	1.7	1.45	4.83
(电子)	(5.5×10 ⁻⁴)	(9.1×10 ⁻⁵)			(1050)			

① 文献: S. Dushman: Scientific Foundations of Vacuum Technique (John Wiley 1962), 真空技术常用

② 文献: A. Guthrie and R. K. Wakerling: Vacuum Equipment and Techniques (Mc Graw-Hill, 1949)

③ 比热比是气体定压比热与定容比热之比值, 又名气态绝热指数。——译者注

④ 氟里昂11.

⑤ 氟里昂12.

分子的常数表

态		三 态 平 衡 点			气 体			
自由分子热 传导系数 ^① [cal/s·cm ² · K·Torr] (20℃)	在空气中的扩 散速度比 ^② [以氢气作为1]	熔 点 [℃]	压 强 [Torr]	熔 解 热 [kcal/kg]	定压比热 C _p [kcal/kg·℃]	比热比 ^③ γ	热传导系数 [kcal/m·hr· ℃] (0℃)	粘滞系数 [10 ⁻⁴ g/cm·s] (20℃)
86.6	0.67	-269 [△]		0.835	1.2497	1.660	0.123	1.96
38.1	0.42	-248.6	325	3.98	0.2479	1.64	0.0398	3.10
27.1	0.25	-189.4	516.3	7.07	0.1252	1.667	0.0140	2.20
		-157.2	548	4.67	0.0606		0.00783	2.46
		-111.8	612.2	4.18	0.0387		0.00446	2.26
120	1.0	-259.2	54	13.9	3.4134	1.408	0.150	0.88
32.3	0.26	-210.0	94.0	8.1	0.2480	1.405	0.0206	1.75
30.3	0.28	-218.9	1.2	3.31	0.2195	1.396	0.0210	2.03
31.8	0.27				0.2409	1.402	0.0208	1.81
32.4		-205.1	115.38	7.18	0.2497	1.404	0.0193	1.77
	0.25	0.0	4.58	79.76	0.4479	1.32	0.0208	8.80
25.8	0.20	-56.6	5.28(大气压)	43.2	0.1996	1.302	0.0123	1.47
42.8	0.29	-182.5	88	13.97	0.5267	1.31	0.0260	(1.14)
32.3		-189.5	0.88	24.9	0.3611	1.25	0.0145	
31.2		-183.3	0.01	22.70	0.4062	1.23	0.0157	
41.5	0.27	-77.7	45.6	79.4	0.5185	1.32	0.0185	(1.03)
	0.21	-85 [△]						
		-111.1	602.4	12.0				
		-155.0		8.2	0.1340	1.667		2.28
12.1	0.18	-38.87	760	2.5				

诸表 (日利工业1966年版) (无记号)。

△: K. Diels and R. Jaecel; Leybold Vacuum Handbook.

似程度会越来越好。

根据上述原则，可以取(1.1)式作为压强的定义。

假如在容积 $V(\text{cm}^3)$ 内放入 N 个气体分子，则(1.1)式变为

$$PV = NkT \quad (1.4)$$

若用克分子计量， N 个分子合 ν 克分子，则由(1.4)式可以导出理想气体定律，

$$PV = \nu RT \quad (1.5)$$

$$R = N_A k \quad (1.6)$$

式中 R ——气体常数；

k ——玻尔兹曼常数；

N_A ——阿佛加德常数^①。

这些常数列于表1.3。

在真空技术中，一般并不原封不动地应用(1.4)式的形式。

在真空系统中，排气是中心课题，所面临的对象是流量（单位时间内流过泵或管道的给定截面的气体量），面临的问题是单位时间从排气系统内移走的气体的量。即假定(1.4)式在准平衡状态下成立。

现将准平衡状态这一假设作进一步引伸，假设(1.4)式两边对时间求导数后等式也成立。亦即在许多场合下，进行真空系统的计算时，整个真空系统的温度可以作为恒定处理，所以单位时间内，移动的气体分子数 N' 为

$$N' = dN/dt = QkT \quad (1.7)$$

$$Q = d(PV)/dt \quad (1.8)$$

(1.8)式是一定值，不同于(1.4)式，因此，流量 Q 在一个真空中系统中，在其流动的途径上，常作为定值处理。亦即可以认为，在气体流动过程中， Q 在整个真空系统内保持恒定。

由(1.8)式得

$$Q = P\partial V/\partial t + V\partial P/\partial t \quad (1.9)$$

下面就真空系统的各种要素来讨论(1.9)式。

(I) 在多数场合下，是把排气系统当作既不漏气又不放气的理想情况处理（假定被抽流量由真空室开始），所以，如果令 $V'[l/s]$ 表示单位时间流过真空系统内压强为 $P(\text{Torr})$ 处的假想截面的气体的量，则由(1.9)式得

$$Q = PV' = kN'T[\text{Torr} \cdot l/s] \quad (1.10)$$

通常把上述的 Q 称为 Q 值或流量。

或者，把气体流量 Q 看作是从排气系统流出的气体量，并当作恒流处理，即在排气过程中气体不会自行产生或消灭。这一假定未必对所有实例都正确，但是，如果流量的产生及变动可以用真空室内的被排气体流量加以调整的话，则此假定是合适的。

(II) 容积为 V 的真空室，其出口处的流量 Q_0 ，根据(1.9)式为，

① 处于标准状态（0℃，1标准大气压）下的22.412升的气体称为1克分子。¹²C（分子量为12的碳元素）的1克分子规定为与它的分子量相对应的值即12克。又例如2.016克H₂称为1克分子氢，1克分子中所含的气体分子数，无论哪一种气体都是一样的，此数称为阿佛加德罗常数。

② N_A 有时又称为洛喜密脱数，用 N_A （或 L ）表示。多数场合是把处于标准状态（0℃，1标准大气压）下的1cm³中的气体的分子数定义为洛喜密脱数，以区别于阿佛加德罗常数。这时， $N_A = 6.023 \times 10^{23}[\text{个/mol}]$ 叫阿佛加德罗常数； $N_L = 2.687 \times 10^{19}[\text{个/cm}^3]$ 叫洛喜密脱数。

表1.3 物理常数表

$$PV = \nu RT$$

 ν ——克分子数[mol]

$$P = nkT$$

 T ——气体的温度[K]

压 强 P	[Torr]	[N/m ²] (Pa)	[dyn/cm ²] (μ bar)	[atm]
容 积 V	[l]	[m ³]	[cm ³]	[cm ³]
气体常数 R	62.362 [Torr·l/deg·mol]	8.314 [N·m/deg·mol]	8.3145×10 ⁷ [erg/deg·mol] 1.9865① [cal/deg·mol] 1.9872② [cal/deg·mol]	82.054 [atm·cm ³ /deg·mol]
分子密度 n	[个/l]	[个/m ³]	[个/cm ³]	[个/cm ³]
玻尔兹曼常数 k	1.33490×10 ⁻²² [Torr·l/deg]	1.379×10 ⁻²³ [N·m/deg]	1.3806×10 ⁻¹⁶ [erg/deg]	1.36249×10 ⁻²² [atm·cm ³ /deg]

(使用了理想气体的标准体积22.4136l/mol)

① 国际cal=4.1855J

(定义)

② 热力学cal=4.1840J

(定义)

1克分子的分子数(阿佛加德罗常数) $N_A = 6.02252 \times 10^{23}$ 1cm³中的气体分子数(0℃, 1标准大气压)(洛洛密脱数 N_L) $n_0 = 2.6870 \times 10^{19}$ 热功当量 $J = 4.1865$ J/cal(16℃)

法拉第常数 96487 C/mol

电子电荷 $e = 4.80298 \times 10^{-10}$ e. s. u. $u = 1.60210 \times 10^{-20}$ e. m. u. $u = 1.60210 \times 10^{-19}$ C电子的静止质量 $m_e = 9.1091 \times 10^{-28}$ g1ev的能量 1.60210×10^{-12} erg1ev所对应的波长 12398.1×10^{-10} cm斯忒藩-玻尔兹曼黑体辐射常数 $\sigma = 5.6897 \times 10^{-5}$ erg/cm² s·K电子的荷质比 $e/m = 1.7588 \times 10^{18}$ C/g光速(真空中) $c = 2.997925 \times 10^{10}$ cm/s[10⁷erg=1J]

$$Q_0 = P \partial V / \partial t + V_0 \partial P / \partial t \quad (1.11)$$

假如排气系统出口的抽速 S_s 和真空室出口处的体积流量相同时, 则(1.11)式为

$$Q_0 = PS_s + V_0 dP/dt \quad (1.12)$$

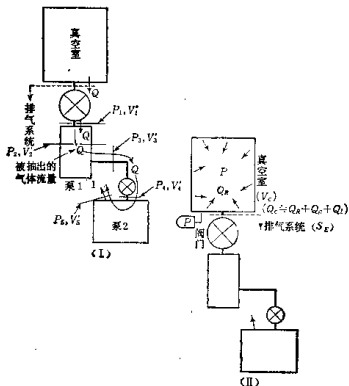
但(1.12)式只是在排气过程中压强逐渐减小的场合下成立。如果不能很好地把握 Q_0 的特性就不可能解决实例。(Ⅱ) 讨论真空系统的特性时, 如果一面改变流入的流量 (Torr·l/s), 一面测量压强 P (Torr), 则在 P 的测定点即排气系统的出口或泵的出口, 由(1.10)式得

$$Q = PS_p \quad (1.13)$$

据此可以求出抽速 S_p [l/s]。

也就是排气系统处于条件(I)和(Ⅱ)时, 被抽真空室作为(Ⅱ)进行计算, 计算结果通常与实例符合。如图1.3所示。

先把流量 Q_0 作为真空室内残余气体的流量 Q_R 、放气产生的流量 Q_F 以及漏气产生的流量



- (I) 排气系统的流量
(在排气系统内, Q 保持恒定, 其中不漏气, 不放气)
- (II) 真空室的抽气
(1) $Q_c = PS_g + V_c \cdot dP/dt$ (抽气过程)
(2) $Q_c = V_c \cdot dP/dt$ (阀门关闭, 压强上升过程)
- (III) 排气系统的特性 (泵的特性)
 $Q = PS_p$
(每泵泵有各自的特性)

图1.3 排气系统与流量

Q_L 之和考虑 (在超高真空区域, 不像这样简单^①), 可得:

$$Q_c = Q_a + Q_b + Q_d \quad (1.14)$$

因此, 要是关闭阀门, 让真空室和排气系统隔绝, 则真空室内的压强就会因 Q_c 的存在而上升, 根据 (1.9) 式得:

$$Q_c = V_c \cdot dP/dt \quad (1.15)$$

然而要注意的是用装在真空室内的真空计测量压强 P 时, Q_c 和 Q_p 未必一致。关于 Q_c 和 Q_p , 后面还要叙述^②。

根据上述的 Q 值 (即 (1.9)~(1.15) 式所定义的流量守恒原则, 就可以抓住与真空系统排气有关的特性和状态。即排气系统中压强不同的各级的信息, 可以通过流量 Q 来进行计算和分析。

Q 值是如此重要的量, 甚至可以说, 通过 Q 的媒介作用, 我们才能从大气空间进入真空。

说起来, Q 值以总压强为对象。但由定义可知, 即使对于分

压强也成立, 不过, 由于排气系统的分压特性等不甚清楚或很复杂, 故以总压强为主要对象的排气课题作为出发点的用例也不少。

1.3 流导、气流

对真空系统的管道, 用一个被称为流导的量来表征其导通气体的能力。可以认为, 流导是表示气体通过管道的难易程度的量。流导的倒数称为管道的流阻。

处理管道问题时, 必须研究管道中的“气流”。多数情况是只要对粘滞流、分子流和介于两者之间的中间流^③计算流导, 即气流通常必须满足稳定流动的条件。处理湍流一般是困难的。

为确定气流的状态, 要用雷诺数 Re , 即

$$\left. \begin{aligned} Re &= Du/\gamma \\ Re &= D\rho v/\eta \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

① 参考本书第7章。——译者注

② 参考本书第8章。——译者注

③ 中间流又称为过渡流或粘滞-分子流, 本书采用前两个术语。——译者注