



化工设备设计全书

真空设备设计

化工设备设计全书编辑委员会

上海科学技术出版社

化工设备设计全书

真空设备设计

主 编

沈阳化工学院 樊丽秋

编 写

沈阳化工学院 赵纯善 宋明晨 刘维义

沈阳真空机械研究所 董 镛

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本分册共八章,重点介绍了真空获得的设备、真空密封、真空容器、真空化工设备及真空系统设计等有关内容,提供了有关设计的图表、公式和计算实例。

本分册可供化工、石油、轻工、医药、食品等部门从事高、中、低真空设备设计人员参考。

化工设备设计全书

真空设备设计

沈阳化工学院 樊丽秋 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏如东印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22.5 字数 532,000

1990 年 1 月第 1 版 1990 年 1 月第 1 次印刷

印数 1—5,000

ISBN 7-5323-0785-9/TQ·12

定价 14.15 元

化工设备设计全书

分册名称	主要内容
化工设备用钢	钢的冶炼; 常温机械性能和断裂韧性; 热处理和可焊性; 中、高温机械性能和组织稳定性; 腐蚀及耐蚀性; 碳钢和低合金高强度钢; 低温用钢; 低合金耐热钢; 不锈钢及耐热高合金钢。
化工容器设计	旋转薄壳与平板的基本理论及应用; 筒体和封头; 特殊形状容器; 局部应力; 开孔补强; 法兰、支座、防爆膜设计; 容器附件; 容器焊接、制造及检验; 容器保温结构。
高压容器设计	力学基础; 断裂力学在压力容器上的应用; 厚壁容器; 蠕变; 密封设计; 高压容器零部件设计; 高压容器的开孔与衬里; 高压容器的用材、破坏与检验。
超高压容器设计	超高压容器的筒体结构型式; 应力分析及强度计算; 自增强技术及其应用; 疲劳及其设计计算; 零部件设计; 超高压容器的用材、检验和安全技术。
真空设备设计	真空技术的理论基础; 真空获得设备; 真空测量与检漏; 真空容器及化工设备设计; 真空密封; 真空系统设计及附件。
换热器设计	流体流动及传热; 管壳式换热器的结构设计; 管壳式换热器元件强度和刚度计算; 螺旋板式、板式及其它换热器; 管壳式换热器的制造、检验、安装及维修。
塔设备设计	塔设备的化工设计; 塔盘形式及其化工计算; 塔壁结构设计; 填料塔、萃取塔设计; 受压元件的强度设计和稳定校核; 辅助装置及附件; 制造、安装及运输。
搅拌设备设计	搅拌过程与搅拌器; 搅拌设备的传热; 搅拌罐结构设计; 传动装置及搅拌轴; 轴封; 制造及检验。
球形容器设计	材料选用; 结构设计; 强度计算; 组装; 焊接; 检验。
大型贮罐设计	贮罐尺寸的选择; 化工贮罐的设计; 罐壁、罐底、罐顶设计; 低压贮罐设计; 贮罐附件及其选择; 消防及安全措施; 制造、焊接与检验; 贮罐对基础的要求; 贮罐搅拌器。
废热锅炉设计	结构设计; 热力计算; 阻力计算; 元件强度计算; 材料; 制造、安装与检验; 水处理; 运行。
干燥设备设计	干燥过程基础; 厢式、带式、流化床、气流、喷雾、滚筒、回转圆筒干燥器设计; 新型干燥器; 组合式干燥器及其设计; 主要辅助设备设计。
除尘设备设计	粉尘的特性与除尘器的性能; 重力沉降室和惯性除尘器; 旋风、过滤式除尘器; 电除尘器; 湿式除尘器; 除尘系统设计; 含尘气流的测定。
铝制化工设备设计	材料; 设计计算; 结构; 制造与检验。
钛制化工设备设计	钛材的机械性能、物理性能和耐蚀性; 钛制设备的设计计算; 设备结构设计; 制造和检验。
硬聚氯乙烯塑料制化工设备设计	硬聚氯乙烯原材料及其性能; 设备设计与结构; 接管设计; 施工、安装与验收。
石墨制化工设备设计	不透性石墨材料及制造工艺; 不透性石墨制品设备的设计计算; 设备制造; 原材料分析及物性测定。
钢架设计	钢架材料及荷载; 设计原理; 梁、柱的设计; 构件连接构造及计算; 设备支架; 操作平台; 塔平台; 动荷载作用下的钢架设计; 抗震设计; 防腐及防火。

化工设备设计全书编辑委员会

主任委员

洪国宝 燕山石油化学总公司设计院

副主任委员

黄力行 南京化学工业公司
李肇璠 化学工业部第六设计院
姚北权 化学工业部第四设计院
琚定一 华东化工学院
寿振纲 国家医药管理局上海医药设计院
金国森 化学工业部设备设计技术中心站

委员

张冠亚 兰州化学工业公司设计院
杨慧莹 化学工业部第八设计院
汪子云 化学工业部化工设计公司
卓克涛 化学工业部第一设计院
苏树明 广东省石油化工设计院

前 言

鉴于广大化工设备设计人员的要求,在化学工业部的领导下,由化学工业部设备设计技术中心站组织全国近百所高校、工厂、科研和设计单位,共同编写了这部《化工设备设计全书》,供从事化工设备专业的设计人员使用。

《化工设备设计全书》以结构、强度的设计计算为主,从基础理论、设计方法、结构分析、标准规定、计算实例等方面进行系统的阐述,并对化工原理的设计计算作了简介。在实用的前提下,尽量反映国内及国外引进的先进技术,并努力吸取当前国外新技术动向,总之,本书旨在继续搞好设备结构、强度设计的同时,结合化工过程的要求去研究改进设备的设计,提高设备的生产效率,降低设备的制造成本,与化工工艺专业人员一起实现化工单元操作的最佳化。

本书计量单位采用我国法定计量单位。

本分册——《真空设备设计》,主要介绍了真空获得的设备、真空密封、真空容器、真空化工设备及真空系统设计等有关内容。真空技术是一门新兴的边缘科学,它在化工、石油、医药、轻工、食品等工业中的应用日渐增多,而国内外有关这一方面的论著却很少见,本分册尽量收录有关资料,以供参考。

本分册经洪国宝、寿振纲审阅,樊丽秋统一全稿。

本分册各章由下列同志参加编写:第一、三章董镛,第二章赵纯善,第四章樊丽秋、丁克洵、王维一,第五章宋明晨、王玉瑞,第六、七章刘维义,第八章樊丽秋。

由于化工生产发展迅速,我们掌握情况有限,本分册的内容还会有不足和错误之处,热忱希望广大读者提出宝贵意见,以便再版时补充改正。

在本分册编写和审稿过程中,得到了很多单位和同志的大力协助和指导,在此致以深切的谢意。

《化工设备设计全书》编辑委员会

1987年

目 录

第一章 真空技术的理论基础	1
第一节 真空的测量单位与区域划分	1
第二节 气体的基本性质	2
一、理想气体的状态方程	2
二、麦克斯韦速度分布定律	4
三、气体分子的碰撞次数	5
四、气体分子的平均自由程	5
第三节 低压下的气体流动	6
一、气体沿导管的流动状态	6
二、流导的计算	8
三、流导计算的应用举例	14
第四节 低压下的传热	15
一、热传导	15
二、温度骤增现象	16
三、气体温度不同两表面间的热量传递	17
四、热流逸现象	19
五、蒸发和冷凝	19
第五节 扩散过程	19
一、自扩散现象	19
二、互扩散现象	25
主要参考文献	25
第二章 真空获得设备	27
第一节 真空泵的参量	27
一、极限压强	27
二、抽速	27
三、流量	27
四、真空生产率	28
五、起始压强	28
六、最大排气压强	28
第二节 真空泵的分类、选择及型号	28
一、真空泵的分类	28
二、真空泵的选择	29
第三节 往复式真空泵	33
一、概述	33
二、往复真空泵的结构及工作原理	33
三、往复式真空泵的均压装置	34
四、往复式真空泵的抽速及功率计算	35
五、国产往复式真空泵系列及性能	37

第四节 油封式旋转机械泵	38
一、定片式真空泵	38
二、旋片式真空泵	39
三、滑阀式真空泵	54
第五节 水环式真空泵	58
一、水环泵的典型结构及工作原理	58
二、排气量的计算	59
三、功率和效率	60
四、水环式真空泵型式性能及安装尺寸	61
第六节 喷射式真空泵	62
一、喷射式真空泵的应用及工作原理	62
二、水蒸汽喷射泵的主要操作参数	63
三、水蒸汽喷射泵的设计计算	65
第七节 扩散泵	79
一、扩散泵的结构及工作原理	79
二、扩散泵的主要性能参数	80
三、油扩散泵的特点及性能	83
四、金属油扩散泵结构原理	85
五、金属油扩散泵的设计	86
六、油扩散泵的发展趋向特点	90
第八节 真空抽气机组	90
一、常用真空机组的组成	90
二、真空机组的计算	92
第三章 真空测量与检漏	95
第一节 真空测量	95
一、U形管和压缩式真空计	95
二、热传导真空计	96
三、电离真空计	98
第二节 真空检漏	101
一、真空系统漏气的判定	101
二、真空装置所容许的最大漏率	101
三、检漏方法	102
第四章 真空化工设备	109
第一节 真空蒸馏装置	109
一、概述	109
二、真空蒸馏装置的型式	115
三、分子蒸馏装置	118
第二节 真空薄膜蒸发器	126
一、分类及特点	126
二、降膜式蒸发器的结构与设计	127
三、刮板式薄膜蒸发器的结构与计算	132
第三节 真空过滤	135

一、真空过滤概述	135
二、连续式真空过滤机的结构和特点	136
三、提高过滤机能力的方法	139
四、连续式真空过滤机的选择问题	140
第四节 真空绝热技术	144
一、真空绝热在低温技术中的应用	145
二、高真空绝热	145
三、真空粉末绝热	149
四、高真空多层绝热	151
第五节 真空绝热设备设计	156
一、真空绝热设备的总体设计	153
二、结构材料	157
三、绝热型式的选择	157
四、机械构件	158
第六节 真空绝热典型设备	159
一、液氧、液氮、液氩贮运设备	159
二、液氢、液氦贮运设备	161
第七节 真空绝热液化气体输送管道及阀门	165
一、真空绝热液化气体输送管道	165
二、真空绝热阀门	166
第五章 真空容器设计	167
第一节 概述	167
第二节 筒体壁厚解析法计算	167
一、长圆筒的壁厚计算	167
二、短圆筒的壁厚计算	168
三、临界长度	170
四、最小厚度	170
五、压力试验	171
六、气密性试验	172
七、材料的许用应力	173
八、筒体的加工允许偏差	174
第三节 筒体壁厚图算法设计	175
一、图算法的理论依据	175
二、筒体壁厚图算法	181
第四节 真空容器封头设计	186
一、半球形封头和球壳壁厚计算	186
二、椭圆形封头壁厚设计计算	189
三、碟形封头壁厚设计计算	190
四、无折边球形封头壁厚计算	191
五、锥形封头及锥形筒体的壁厚设计计算	192
六、平板盖	193
第五节 真空圆筒形容器加强圈的设计	198

一、加强圈结构	198
二、加强圈的计算	200
第六节 真空设备常用材料及清洗技术	207
一、对结构材料的基本要求	207
二、金属材料	208
三、非金属材料	210
四、辅助密封材料	216
五、真空材料的清洗技术	219
第六章 真空密封	221
第一节 不可拆密封	221
一、金属与金属的连接	221
二、玻璃对玻璃的封接	229
三、玻璃与金属的封接	230
四、陶瓷与金属的封接	230
第二节 静密封	230
一、垫圈密封机理	230
二、橡胶密封	238
三、金属密封	265
第三节 动密封	279
一、概述	279
二、接触密封	280
三、非接触密封	290
四、软性变形动密封	291
第七章 真空系统元件	293
第一节 真空阀门	293
一、真空阀门的分类、一般结构原理和功用	293
二、真空阀门型号	295
三、真空阀门结构型式举例	296
四、真空阀门使用特点	299
五、真空阀门的设计计算	300
第二节 挡油帽、障板和阱	314
一、挡油帽	314
二、障板	315
三、阱	320
第八章 真空系统设计	328
第一节 概述	328
一、真空系统的定义及分类	328
二、真空系统的工作状态	328
三、对真空系统的基本要求	329
四、真空系统的设计任务	330
第二节 真空系统设计中的主要参数	331
一、真空室内放气量的计算	331

二、真空室的极限真空.....	334
三、真空室的工作压强.....	335
四、真空室抽气口附近的有效抽速.....	335
五、中低真空系统($1 \times 10^5 \sim 0.133 \text{ Pa}$)抽气时间的计算	335
第三节 选泵和配泵	339
一、选泵.....	339
二、配泵.....	340
三、储气罐和维持泵.....	343
第四节 化工用真空系统的典型结构	344
一、以油扩散泵为主泵的高真空系统($0.133 \sim 1.33 \times 10^{-5} \text{ Pa}$).....	344
二、以增压泵为主泵的中真空系统($13.3 \sim 0.133 \text{ Pa}$).....	346
三、多级蒸汽喷射泵组成的中真空系统.....	346
四、低真空系统.....	348

第一章

真空技术的理论基础

第一节 真空的测量单位与区域划分

“真空”是指在给定空间内, 气体压强低于环境大气压的稀薄气体状态, 亦即气体分子密度低于环境大气压下气体分子密度的状态。

在技术科学中通常以压强作为真空的测量单位。

Pascal, 即 1 m^2 的面积上作用 N 的力, 它是国际单位制中压强的基本单位, 符号记作“Pa”。

$$1\text{ Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = 7.5006 \times 10^{-3} \text{ torr}$$

在压强高于 $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的粗真空领域, 也有用真空度的百分数作测量单位的。

$$\delta\% = \frac{0.1 - P}{0.1} \times 100\%$$

式中: P 的单位为 MPa 。

已知真空度的百分数 δ , 求气体的压强 P 时可用下式:

$$P = 1 \times 10^5 \left(1 - \frac{\delta}{100} \right)$$

真空度的百分数与压强对照如表 1-1

表 1-1 真空度的百分数与压强对照

真空度的百分数 $\delta(\%)$	压 强 $P(\text{Pa})$	真空压力表读数 $1 \times 10^5 P(\text{Pa})$	真空度的百分数 $\delta(\%)$	压 强 $P(\text{Pa})$	真空压力表读数 $1 \times 10^5 P(\text{Pa})$
0	1×10^5	0	85	1.5×10^4	8.6×10^4
10	9×10^4	1×10^4	90	1×10^4	9.1×10^4
20	8×10^4	2×10^4	95	5×10^3	9.6×10^4
30	7×10^4	3×10^4	96	3.9×10^3	9.7×10^4
40	6×10^4	4×10^4	97	3.1×10^3	9.8×10^4
50	5×10^4	5×10^4	98	2×10^3	9.9×10^4
60	4×10^4	6×10^4	99	1×10^3	1.002×10^5
70	3×10^4	7×10^4	99.5	5×10^2	1.007×10^5
80	2×10^4	8×10^4	100	0	1.01×10^5

注: 本表只给出相对于海平面附近点的值, 其他地区要按高度查出当地大气压值, 另外给出换算对照表。

常用压强单位换算见表 1-2。

为便于应用, 通常将真空区域划分为五个范围, 国际上多数人采用的划分是:

粗真空 $101324.72 \sim 133.322 \text{ Pa}$

中真空 $133.322 \sim 0.133322 \text{ Pa}$

表 1-2 压强单位换算表

	Pa	torr	μmHg	μba	mba	atm	am	inHg	lb/in ²
1Pa	1	7.50062×10^{-3}	7.50062	10	10^{-2}	9.86923×10^{-6}	1.0197×10^{-5}	2.953×10^{-4}	1.450×10^{-4}
1torr	133.322	1	10^3	1333.22	1.33322	1.31579×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	3.937×10^{-2}	1.934×10^{-2}
1 μHg	0.133322	10^{-3}	1	1.33322	1.33322×10^{-3}	1.31579×10^{-6}	1.3595×10^{-6}	3.937×10^{-5}	1.934×10^{-5}
1 μba	10^{-1}	7.50062×10^{-4}	7.50062×10^{-1}	1	10^{-3}	9.86923×10^{-7}	1.0197×10^{-6}	2.953×10^{-5}	1.450×10^{-5}
1mba	10^3	7.50062×10^{-1}	7.50062×10^2	10^3	1	9.86923×10^{-4}	1.0197×10^{-3}	2.953×10^{-2}	1.450×10^{-2}
1atm	101325	760	760×10^3	1013.25×10^3	1013.25	1	1.0333	29.921	14.696
1am	98066.3	735.56	735.56×10^3	980663	980663×10^{-3}	0.967839	1	28.959	14.223
1inHg	3886	25.40	25.40×10^3	3.386×10^4	33.86	3.342×10^{-2}	3.453×10^{-2}	1	4.912×10^{-1}
1lb/in ²	6895	51.715	51.715×10^3	6.895×10^4	68.95	6.805×10^{-2}	7.031×10^{-2}	2.086	1

高真空 $0.133322 \sim 0.133322 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

超高真空 $0.133322 \times 10^{-5} \sim 0.133322 \times 10^{-9} \text{ Pa}$

极高真空 $< 0.133322 \times 10^{-9} \text{ Pa}$

第二节 气体的基本性质

一、理想气体的状态方程

与永久气体不同,蒸气在真空化工流程中,在一定的温度和压力下可呈现饱和状态而变为液体。但是非饱和蒸气仍然服从适用于永久气体的各项定律,因此本节所述各项均适用于非饱和蒸气。

气体状态由温度、容积、压力三项参数决定。理想气体状态方程则将气体质量进一步把这三个参量联系起来:

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

式中: P ——气体压强;

V ——气体容积;

T ——绝对温度;

G ——气体质量;

M ——摩尔气体的质量;

R ——普适气体常数。

真实气体与理想气体不同,但对真空技术处理的稀薄气体而言,二者之间差别不大,上

述状态方程无需任何修正即可应用。

由理想气体状态方程可导出所有气体定律:

波义耳-马略特定律

一定质量的气体, 如果其温度维持不变, 气体的压强和体积的乘积为常数。即:

$$P_1V_1 = P_2V_2 = \dots = P_iV_i = \text{常数} \quad (1-2)$$

如果只是温度不变而质量变化, 则式(1-1)可写成:

$$PV = C_1G \quad (1-3)$$

式中: C_1 ——常数。

式(1-3)表明, 当温度不变时, 气体压强与其体积的乘积正比于气体的质量。在真空技术的计算中可以很方便地以压强与体积的乘积表示气体的质量。例如, $1\text{Pa}\cdot\text{cm}^3$ 等, 称之为 PV 单位。根据式(1-1)可以容易地算出任何气体一个 PV 单位的质量。例如, 0°C 时 $1\text{Pa}\cdot\text{l}$ 空气的质量约为 12.8mg 。

因气体质量除以其体积为气体的密度 ρ , 所以由式(1-3)可得在温度不变时气体的压强正比于该气体的密度:

$$P = \frac{RT}{M} \cdot \frac{G}{V} \sim \rho \quad (1-4)$$

气体质量可以表示为:

$$G = Nm \quad (1-5)$$

式中: N ——气体分子数;

m ——分子量。

则压强为:

$$P \sim nm \quad (1-6)$$

式中: $n = \frac{N}{V}$ 单位体积内的气体分子数, 亦即温度不变时, 气体压强正比于单位体积内气体分子数。

盖-吕萨克定律

一定质量的气体, 如果维持其压强不变, 气体的体积与其绝对温度成正比。

$$V = C_2T \quad (1-7)$$

查理定律

一定质量的气体, 如果维持其体积不变, 气体的压强与其绝对温度成正比。

$$P = C_3T \quad (1-8)$$

道尔顿定律

相互不起化学作用的混合气体的总压强等于各气体分压强之总和。

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (1-9)$$

真空系统中各种单质气体单独存在于原混合气体所占有的体积时所产生的压强谓之分压强。

阿佛伽德罗定律

等体积的任何种类的气体, 在同温度同压强下均有相同的分子数。

1mol 的任何气体的分子数 N_0 为 6.02252×10^{23} 个

在标准状态下, 每 cm^3 中任何气体的分子数 $n_0 = 2.6870 \times 10^{19}$ 个。

上述: N_0 称为阿佛伽德罗常数;

n_0 称为劳喜密特常数。

二、麦克斯韦速度分布定律

处于不规则热运动的气体分子具有不同的速度, 从最大速度到最小速度可取其中的任何值。从所考查的某容积的 N 个分子中取 dN_0 个分子, 考查其在 v 至 $v+dv$ 区间内所具有的速度:

$$dN_0 = Nf(v)dv$$

如果外力对所考查的气体无影响, 它们同周围空间处于平衡状态, 则函数 $f(v)$ 由麦克斯韦速度分布定律决定:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi K T} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2KT}} \quad (1-10)$$

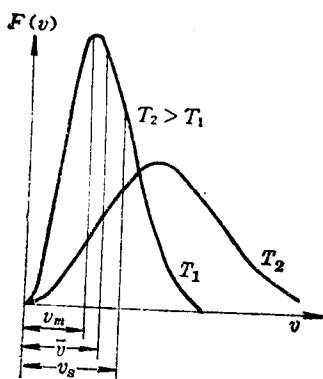


图 1-1 速度分布曲线

如以 v 为横坐标, $f(v)$ 为纵坐标, 便可绘出速度分布曲线。见图 1-1。曲线与横坐标所包围的面积表示分子总数。温度改变时, 可绘出不同温度下的分子速度分布曲线, 随着温度升高, 分布曲线也变得更加平缓。

速度 v_m 相应于速度分布函数的最大值, 称为最可几速度。

$$\begin{aligned} v_m &= \sqrt{\frac{2KT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (\text{cm/s}) \\ &= 1.29 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{cm/s}) \end{aligned} \quad (1-11)$$

最可几速度是在气体分子所具有的各种不同热运动速度中出现机会最多的速度, 也就是大多数气体分子所具有的速度。

算术平均速度 $\bar{v}$, 给定空间内所有气体分子的速度和除以分子总数即是算术平均速度。

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8KT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 1.45 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{cm/s}) \quad (1-12)$$

均方根速度, 所有气体分子速度的平方和除以气体分子总数再开方即为均方根速度。

$$v_s = \sqrt{\frac{3KT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1.58 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{cm/s}) \quad (1-13)$$

式中: K ——波耳兹曼常数;

R ——气体常数;

T ——绝对温度;

m_0 ——一个气体分子的质量;

M ——气体的摩尔量。

由上述可知:

(1) 在给定温度下, 均方根速度最大, 算术平均速度次之, 最可几速度最小。三者间的关系为:

$$v_m : \bar{v} : v_s = 1 : 1.128 : 1.224$$

(2) 某一瞬间, 具有算术平均速度的分子比具有最可几速度的分子少。而具有均方根

速度的分子更少。

(3) 速度与绝对温度的平方根成正比,与气体分子质量的平方根成反比。

三、气体分子的碰撞次数

对容器内处于平衡态的气体,每秒打到 1 cm^2 器壁上的气体分子个数 Γ_n ,可按式计算:

$$\begin{aligned}\Gamma_n &= \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (\text{分子个数}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \\ &= 3.513 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{MT}} \quad (\text{分子个数}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})\end{aligned}$$

考虑到式(1-11)则有:

$$\Gamma_n = 3.64 \cdot 10^3 n \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{分子个数}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-14)$$

为确定式(1-14)给出的 Γ_n 个气体分子的体积,可将上式两侧同除以气体的分子浓度 n ,即除以每 cm^3 内所含的气体分子个数:

$$\Gamma_v = \frac{1}{n} \Gamma_n = \frac{1}{4} \bar{v} = 3.64 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (1-15)$$

由上式可见,单位时间内打到单位面积上的气体体积与气体的压强无关。 Γ_v 值在真空技术中很重要,任何气体的 Γ_v 值均可按式(1-15)算出。对 20°C 的空气,此值为 $11.61/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

每秒内打到面积为 $F\text{ cm}^2$ 表面上的气体体积为:

$$V_F = 3.64 \cdot 10^4 F \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (1-16)$$

对 20°C 空气:

$$V_F = 11.6F \quad (\text{l/s}) \quad (1-17)$$

四、气体分子的平均自由程

气体分子在运动中伴有相互间的碰撞和与器壁的碰撞。一个分子在连续两次碰撞间所通过的距离是它的自由程,由于此距离的大小是分子速度的函数,故采用平均自由程的概念。即一个气体分子在与其他气体分子相继两次碰撞间,通过距离的平均值谓之该气体的平均自由程,并以符号 $\bar{\lambda}$ 表示。

如将气体分子视为直径为 σ 的弹性球,则根据麦克斯韦速度分布,对单一气体分子的平均自由程可按式计算:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \frac{1}{\sqrt{2} \pi n \sigma^2} \quad (\text{cm}) \\ &= 3.107 \times 10^{-17} \frac{T}{P \sigma^2} \quad (\text{cm}) \\ &= 2.331 \times 10^{-20} \frac{T}{P \sigma^2} \quad (\text{cm})\end{aligned}$$

又因为

$$\sigma^2 = 2.714 \times 10^2 \frac{\sqrt{MT}}{\eta}$$

所以

$$\bar{\lambda} = 8.589 \frac{\eta_T}{P} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1-18)$$

式中: η_T ——温度 T 时气体的粘度。

由上式可见, 平均自由程 $\bar{\lambda}$ 与气体压强成反比, 压强越低, 自由程越长。当自由程超过容器的尺寸时, 气体分子即可无碰撞地从容器的这一部分飞到另一部分。例如: 空气在 $\times 10^{-4}$ Pa 时的 $\bar{\lambda} \approx 50$ m, 此值已大大超过了普通真空设备的尺寸。

当温度不变时, $\bar{\lambda}$ 与 P 的乘积为一常数, 即:

$$\bar{\lambda} \cdot P = \frac{KT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2} = \text{常数} \quad (1-19)$$

对 20°C 的任何气体

$$\bar{\lambda} = \frac{6.833 \times 10^{-13}}{P \sigma^2} \quad (\text{cm})$$

对 20°C 的空气

$$\bar{\lambda} = \frac{4.89 \times 10^{-3}}{P} \approx \frac{5}{P} \times 10^{-3} \quad (\text{cm}) \quad (1-20)$$

当有两种气体分子同时存在时, 其平均自由程可按下式计算:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_1 &= \frac{1}{4.28 \times 10^{19} \cdot \frac{P'_1 \sigma_1^2}{T} + 7.55 \times 10^{18} \sqrt{1 + \frac{M_1}{M_2} \cdot P'_2 \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{T}}} \\ \bar{\lambda}_2 &= \frac{1}{4.28 \times 10^{19} \cdot \frac{P'_2 \sigma_2^2}{T} + 7.55 \times 10^{18} \sqrt{1 + \frac{M_2}{M_1} \cdot P'_1 \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{T}}} \end{aligned} \quad (1-21)$$

式中: P'_1 及 P'_2 ——分别为组分 1 及组分 2 的分压强 (Pa)。

在气体中运动的电子 (质量和直径都很小) 的平均自由程为:

$$\bar{\lambda}_e = 4\sqrt{2} \bar{\lambda} = 5.7 \bar{\lambda} \quad (\text{cm}) \quad (1-22)$$

在气体中运动的离子的平均自由程为:

$$\bar{\lambda}_i = \sqrt{2} \bar{\lambda} = 1.4 \bar{\lambda} \quad (\text{cm}) \quad (1-23)$$

气体中产生的各种现象与气体分子 (或离子) 的碰撞类型有很密切的关系。当 $\bar{\lambda} \gg d$ 时 (d 为容器的特征尺寸, 如圆管的直径等) 以气体分子与器壁的碰撞为主; 当 $\bar{\lambda} \ll d$ 时以气体分子之间的碰撞为主。因此, 比值 $\bar{\lambda}/d$ 在真空技术中具有十分重要的作用。以 $\bar{\lambda}/d$ 为准:

$\frac{\bar{\lambda}}{d} \gg 1$ 的气体状态称为高真空;

$\frac{\bar{\lambda}}{d} \ll 1$ 的气体状态称为低真空或粗真空;

$\frac{\bar{\lambda}}{d} \approx 1$ 的气体状态称为中真空。

第三节 低压下的气体流动

一、气体沿管道的流动状态

气体沿管道的流动状态可分为四种: 湍流、粘滞流、过渡流及分子流。