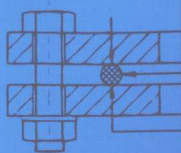




真空科学技术丛书

真空技术常用数据表

崔遂先 谈治信 刘玉魁 编



NLIC2970800998



化学工业出版社



真空科学技术丛书

真空技术常用数据表

崔遂先 谈治信 刘玉魁 编



NLIC2970800998



化学工业出版社

· 北京 ·

真空技术是建立低于大气压力的物理环境,以及在此环境中进行工艺制作、物理测量和科学试验等所需的技术,广泛应用于光学、电气、电子、石油、化工、冶金、食品、环境保护、医药、土木建筑工程、机械、运输、可控热核反应及航空、航天等领域。本书全面收录了当代真空技术常用数据,主要包括大气及理想气体定律,真空管道、挡板流导,真空元件性能参数,真空测量、真空检漏,真空容器设计,真空技术常用材料,常用数据,真空装置热计算基础。

本书可供真空相关专业广大科技工作者及工艺人员使用,也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空技术常用数据表/崔遂先,谈治信,刘玉魁编. —北京:化学工业出版社,2012.4

真空科学技术丛书

ISBN 978-7-122-11124-1

I. 真… II. ①崔…②谈…③刘… III. 真空技术-数据
IV. TB7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 073302 号

责任编辑:戴燕红

责任校对:陶燕华

文字编辑:薛 维 丁建华

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 556 千字 2012 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:80.00 元

版权所有 违者必究

《真空科学技术丛书》编写人员名单

主 编 达道安

副 主 编 张伟文 邱家稳 杨乃恒

参编人员 (按姓氏笔画排序) 王荣宗、王欲知、王得喜、王敬宜、达道安、
刘玉魁、刘喜海、杨乃恒、杨亚天、李云奇、
李得天、邱家稳、邹惠芬、张伟文、张涤新、
张景钦、陆 峰、范垂祯、郑显峰、查良镇、
徐成海、谈治信、崔遂先、薛大同、薛增泉、

技术编辑 谈治信

编辑助理 权素君 曹艳秋

丛书序

真空科学技术是现代科学技术中应用最为广泛的高技术之一。制备超纯材料需要超高真空技术，太阳能薄膜电池及芯片制作需要清洁真空技术，航天器空间环境地面模拟设备需要大型真空容器技术。真空科学技术已渗透到人们的教学、科研、生产过程、经济活动以及日常生活中的方方面面，人们普遍认识到了真空科学技术的重要性。

真空科学技术是一门涉及多学科、多专业的综合性应用技术，它吸收了众多科学技术领域的基础理论和最新成果，使自己不断地进步和发展。真空科学技术的应用标志着国家科学和工业现代化的水平，大力发展真空科学技术是振兴民族工业，实现国家现代化的基本出发点。

多年来，党和国家政府非常重视发展真空科学技术。大学设立了真空科学技术专业，培养高层次真空专业人才；兴办真空企业，设计、制造真空产品；成立真空科学技术研究所开发新技术，提高真空应用水平；建立了相当规模和水平的真空教学、科研和生产体系；独立自主地生产出各种真空产品，满足了各行业的需求，推动了社会主义经济的发展。

在取得丰硕的物质成果和经济效益的同时，真空科技人员积累了宝贵的理论认知和实践经验。在和真空科学技术摸、爬、滚、打的漫长岁月中，一大批人以毕生的精力，辛勤的劳动亲身经历了多少次失败的痛苦和成功的喜悦。通过深刻的思考与精心的整理换得了大量的实践经验，这些付出了昂贵代价得来的知识是书本上难以学到的。经历了半个世纪沧桑岁月，当年风华正茂的真空科技工作者均年事已高，霜染鬓须，退居二线。唯一的希望是将自己积累的知识、技能、经验、教训通过文字载体传承给新一代的后来人，使他们能够在前人搭建的较高平台上工作。基于这一考虑，在兰州物理研究所支持下，我们聚集在一起，成立了《真空科学技术丛书》编写委员会，由全国高等院校、科研院所及企业中长期从事真空科学技术研制工作的工程技术人员组成。编写一套《真空科学技术丛书》，系统的、完整的从真空科学技术的基本理论出发，重点叙述应用技术及应用的典型例证。这套丛书分专业、分学科门类编写，强调系统性、理论性和实用性，避免重复性。这套丛书的出版是我国真空科学技术工作者大力合作的成果，汇集了我国真空科学技术发展的经验，希望这套丛书对 21 世纪我国真空科学技术的进步和

发展起到推动作用，为实施科教兴国战略做出贡献。

这套丛书像流水一样持续不断，是不封闭的系列丛书，只要有相关著作就可以陆续纳入这套丛书出版。《丛书》可供大专院校师生，科学研究人员，工业、企业技术人员参考。

这套丛书成立了编写委员会，设主编、副主编及参编人员、技术编辑等，由化学工业出版社出版发行。部分真空界企业提供了资助，作者、审稿者、编辑等付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心感谢。

达道安

2012 年 03 月 22 日

前言

《真空技术常用数据表》系《真空科学技术丛书》里的一本书。它是作者根据兰州物理研究所编写的《真空设计手册》(1~3版)及其他参考书提供的有关数据,经过筛选编辑而成。目的是为广大真空科学技术和工程科技人员提供必要的一些常用真空数据,亦可作为大专院校师生的教学参考书。

真空科学是一门基础科学和应用科学紧密结合的现代基础学科,因涉及真空技术诸多应用领域,故《真空技术常用数据表》首先给出了真空理论概念、气体基本定律所需要的公式、数据;进而到真空获得、真空测量、真空材料、真空检漏以及真空制造工艺所需要的公式、数据。这些数据涵盖了低真空、高真空、超高真空领域的的数据,是一部系统性、完整性、实用性较强的工具书。

本书共分8章,其中第1、2、4、5、6、7章由崔遂先编写,第3章由谈治信编写,第8章由刘玉魁编写,全书由崔遂先负责统稿。

在本书的编写过程中,得到全国高校、真空科研单位、真空厂(企业)很多专家、教授、工程技术人员的大力支持,在此作者谨向他们致以诚挚的感谢!由于书中内容较多,公式、数据中难免有错误,恳请读者批评指正。

本书在四年的编辑整理过程中,得到了丛书编辑部曹艳秋、权素君同志的大力支持,对他们为书稿的打印、校对工作付出的辛勤劳动,作者表示真诚感谢!

崔遂先、谈治信、刘玉魁

2012年3月12日

目录

CONTENTS

第 1 章 大气及理想气体定律

1

1.1 大气	1
1.1.1 标准状态、标准大气压	1
1.1.2 大气的性质	1
1.2 理想气体的物理特性	3
1.2.1 理想气体压力、质量和密度	3
1.2.2 气体分子热运动速度	3
1.2.3 气体分子平均自由程	4
1.2.4 气体分子之间的碰撞	5
1.2.5 气体分子单位时间单位面积上的碰撞数（入射频率）	5
1.2.6 气体常数 R 、 k 的单位换算	6
1.3 气体的性能参数	6
1.3.1 气体的热导率	6
1.3.2 气体的热适应系数	7
1.3.3 气体的黏滞性	8
1.3.4 气体的扩散	8
1.4 真空中气固界面现象	9
1.4.1 气体的吸附与解吸	9
1.4.2 气体在固体中的扩散、渗透	13
1.5 低压下气体的电现象	15
1.5.1 气体的电离	15
1.5.2 荷能粒子的溅射	15
1.5.3 热电子发射	17
1.5.4 气体放电的伏-安特性	18
1.5.5 巴耶定律	19
1.5.6 辉光放电	20

第 2 章 真空管道、挡板流导

23

2.1 气体流动状态的判别	23
2.2 气体流量、管道流导	23

2.2.1	气体流量、管道流导及流导的串并联·····	23
2.2.2	不同气体之间管道流导换算关系·····	24
2.2.3	黏滞流、分子流态,各种气体的流导和空气流导的关系·····	24
2.3	孔和管道流导·····	24
2.3.1	黏滞流、分子流圆孔的流导·····	24
2.3.2	黏滞流、分子流圆截面管道流导·····	25
2.3.3	传输概率——克劳辛系数·····	25
2.3.4	弯管的流导·····	26
2.3.5	其他各种截面形状长管道的流导·····	26
2.4	挡板流导·····	28
2.4.1	分子流挡板的传输概率·····	28
2.4.2	各种挡板的传输概率和比流导·····	29

第3章 真空元件性能参数

31

3.1	真空泵·····	31
3.1.1	各种真空泵工作压力范围·····	31
3.1.2	真空泵型号编制方法·····	31
3.1.3	往复式真空泵型号及其基本参数·····	33
3.1.4	爪型干式真空泵基本参数·····	34
3.1.5	水环式真空泵基本参数·····	34
3.1.6	油封旋转机械真空泵型式与基本参数·····	35
3.1.7	水蒸气喷射泵型式与基本参数·····	36
3.1.8	罗茨真空泵型号与基本参数·····	39
3.1.9	油扩散泵、油扩散喷射泵基本参数·····	39
3.1.10	立式涡轮分子泵基本参数·····	41
3.1.11	溅射离子泵型号与基本参数·····	42
3.2	真空阀门·····	43
3.2.1	真空阀门编制、型式与基本参数·····	43
3.2.2	高真空插板阀型式与基本参数·····	44
3.2.3	高真空挡板阀型式与基本参数·····	44
3.2.4	高真空蝶阀型式与基本参数·····	46
3.2.5	高真空电磁阀型式与基本参数·····	47
3.2.6	低真空电磁带充气阀型式与基本参数·····	48
3.2.7	低真空电磁压差充气阀型式与基本参数·····	49
3.3	真空法兰·····	50
3.3.1	橡胶密封真空法兰·····	50
3.3.2	金属密封法兰·····	70
3.3.3	国产超高真空 CF 法兰型式及尺寸·····	77
3.4	真空管路、真空规管接头·····	79
3.4.1	真空管路配件装配尺寸·····	79
3.4.2	真空管道密封接头·····	80

3.4.3 真空规管接头	82
--------------	----

第4章 真空测量、真空检漏	86
----------------------	-----------

4.1 真空测量	86
4.1.1 真空计性能一览表	86
4.1.2 静态变形真空计	87
4.1.3 热传导真空计	87
4.1.4 电离真空计	90
4.1.5 其他种类真空计	92
4.2 分压力测量(四极质谱计)	93
4.2.1 四极质谱计性能参数	93
4.2.2 质谱计常用数据	94
4.3 真空检漏	101
4.3.1 各种检漏方法一览表	101
4.3.2 常用检漏方法及仪器参数	102

第5章 真空容器设计	106
-------------------	------------

5.1 真空容器壳体设计	106
5.1.1 圆筒、锥壳、球形壳体容器壁厚设计	106
5.1.2 钢制压力容器用封头标准	112
5.1.3 封头内表面积、容积及质量计算公式	116
5.1.4 封头内表面积、容积、质量数据	118
5.2 真空抽气系统设计	131
5.2.1 真空抽气系统设计的主要参数	131
5.2.2 选泵及配泵	133
5.3 真空抽气机组	136
5.3.1 扩散泵抽气机组	136
5.3.2 罗茨真空泵机组	139

第6章 真空技术常用材料	147
---------------------	------------

6.1 真空常用材料出气速率	147
6.1.1 金属材料的出气速率	147
6.1.2 有机材料的出气速率	153
6.1.3 无机材料的出气速率	155
6.2 材料的气体渗透、吸附性能	156
6.2.1 材料的渗透系数	156
6.2.2 物理吸附剂材料	160
6.2.3 化学吸气剂材料	167
6.3 材料的蒸气压	168

6.3.1	单质物质的蒸气压	168
6.3.2	氟利昂的饱和蒸气压	170
6.3.3	气体的饱和蒸气压	170
6.3.4	无机化合物的蒸气压	171
6.3.5	有机溶剂的蒸气压	172
6.3.6	高温材料的蒸气压	173
6.3.7	塑料、橡胶的蒸气压	173
6.3.8	冰、水的蒸气压	174
6.4	真空用橡胶材料	174
6.4.1	橡胶的物理力学性能	174
6.4.2	橡胶永久变形与硬度、温度的关系	175
6.4.3	橡胶的渗透系数	175
6.4.4	橡胶的真空质损率	176
6.4.5	氟橡胶性能	176
6.4.6	真空橡胶管、胶棒尺寸规格	178
6.5	真空油、脂及封蜡	178
6.5.1	机械真空泵油质量标准	178
6.5.2	高真空泵油的性能	181
6.5.3	真空脂的性能	182
6.5.4	真空油、脂的饱和蒸气压	183
6.6	真空工程常用材料性能	185
6.6.1	常用材料的物理性能	185
6.6.2	黑色金属材料性能	186
6.6.3	有色金属材料性能	191
6.6.4	玻璃、石英和陶瓷材料性能	199
6.6.5	石墨、云母材料性能	202
6.6.6	塑料材料性能	204
6.6.7	高温真空装置材料性能	209
6.7	低温工程材料	213
6.7.1	低温工质的热物理性质	213
6.7.2	液态空气的物理性质	215
6.7.3	液态氮的物理性质	216
6.7.4	液态氧的物理性质	218
6.7.5	液态氢的低温性能	220
6.7.6	液态氦的物理性能	222
6.7.7	液化气体在低压下的饱和温度	224
6.7.8	低温用绝热材料性能	224
6.7.9	材料的低温物理性能	227
6.7.10	低温容器预冷参数	230
6.7.11	低温容器	231

7.1 基本物理常数	235
7.2 常用计量单位换算	237
7.2.1 SI 基本单位及 SI 词头	237
7.2.2 常用长度、面积、体积、质量单位的换算	238
7.2.3 力、能单位换算	240
7.2.4 热力学单位换算	242
7.2.5 黏度单位换算	244
7.2.6 气体抽速、流量单位换算	244
7.2.7 气体常数、玻耳兹曼常数换算	245
7.2.8 电磁单位换算	245
7.3 物质的吸附热、活化能	246
7.4 气体的物理性质	247
7.5 低温气体性能	254
7.6 物质的蒸气压	257
7.7 液化气体的性质	258
7.8 常用电阻材料性能	259
7.9 无机物、有机物特性	259
7.10 高熔点陶瓷性能	262
7.11 高熔点材料的性能	264
7.12 熔点以上金属的性能	264
7.13 电真空材料性能	269
7.13.1 钨钼阴极材料的性质	269
7.13.2 电子器件常用材料退火温度	269
7.13.3 电子器件常用材料烧氢温度	270
7.13.4 几种金属材料电子发射参数	270
7.13.5 热阴极饱和电流密度	270
7.13.6 金属材料的逸出功	271
7.13.7 真空中加热电流、电压与钨丝直径关系	271
7.13.8 热阴极材料的热阴极电子发射密度	271
7.14 可伐合金的物理性能	274
7.15 贵金属电阻材料的性能	274
7.16 常用材料的介电常数	274
7.17 常用材料摩擦系数	275
7.17.1 固体润滑材料摩擦系数和磨损率	275
7.17.2 材料的滑动摩擦系数	275
7.17.3 材料的滚动摩擦系数	276
7.18 固体润滑材料特性	277
7.19 金属基复合材料性质	277
7.20 黏结固体润滑材料特性	277

7.21	表面分析仪	278
7.22	真空镀膜	279
7.23	液态合金配制	288
7.24	真空零部件的电化学抛光	288
7.25	常用清洗溶剂的性质	288
7.26	真空技术中的有害物质	288
7.27	各种气体(蒸气)在空气中最大允许浓度、爆炸范围和自燃点	289
7.28	元素周期表	290

第 8 章 真空装置热计算基础

292

8.1	固体的热传导	292
8.1.1	各种类型热传导简图及热量计算公式	292
8.1.2	金属材料热导率	294
8.1.3	非金属材料热导率	296
8.1.4	保温材料的热导率	297
8.2	气体分子热传导	299
8.3	辐射换热	301
8.3.1	一个表面被另一个表面全包围辐射换热	301
8.3.2	两平行表面之间辐射换热	301
8.3.3	两个表面之间置入 n 块辐射屏	302
8.3.4	各种材料的辐射率	302
8.4	辐射换热角系数及其基本特性	308
8.4.1	辐射换热角系数概念	308
8.4.2	辐射换热角系数基本特性	309
8.4.3	微元面对有限面的角系数	310
8.4.4	有限面对有限面的角系数	313
8.5	对流换热	318
8.5.1	计算传热系数所用无量纲数	318
8.5.2	传热系数计算基本公式	319
8.5.3	管内受迫流动换热关联式	321
8.5.4	外掠单管换热关联式	322
8.5.5	外掠管束	322
8.5.6	热计算用的气体及液体物理性质	323
8.5.7	流体沿平板及圆板自然对流与强迫对流时传热系数计算	326
8.5.8	空气中自然对流传热系数	326
8.6	真空绝热	327
8.6.1	高真空绝热	327
8.6.2	真空多孔绝热	327
8.6.3	高真空多层绝热	329

第1章

大气及理想气体定律

1.1 大气

1.1.1 标准状态、标准大气压

标准状态：标准状态（STP）是指温度 0°C 、压力为 101325Pa 的气体状态。

标准大气压：标准大气压为 $1\text{atm}=101325\text{Pa}$ 。

1.1.2 大气的性质

（1）大气的主要成分及温度与海拔高度的关系（表 1-1、表 1-2）

表 1-1 大气成分^[4]

气体	相对分子质量	体积分数/%	质量分数/%	分压/Pa
N ₂	28.0134	78.084	75.520	7.91×10^4
O ₂	31.9988	20.948	23.142	2.12×10^4
Ar	39.948	0.934	1.288	9.46×10^2
CO ₂	44.00995	3.14×10^{-2}	4.8×10^{-2}	32
Ne	20.183	1.82×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.87
He	4.0026	2.54×10^{-4}	6.9×10^{-4}	5.3×10^{-1}
Kr	83.80	1.14×10^{-4}	3.3×10^{-4}	1.16×10^{-1}
Xe	131.30	8.7×10^{-6}	3.9×10^{-5}	8.8×10^{-3}
H ₂	2.01594	5×10^{-5}	3.5×10^{-6}	5.33×10^{-2}
CH ₄	16.04303	2×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-1}
N ₂ O	44.0128	5×10^{-5}	8×10^{-4}	5.3×10^{-1}
O ₃	47.9982	夏: $0\sim 7\times 10^{-6}$ 冬: $0\sim 2\times 10^{-6}$	$0\sim 1\times 10^{-5}$ $0\sim 3\times 10^{-6}$	$0\sim 6.7\times 10^{-3*}$ $0\sim 2\times 10^{-3*}$
SO ₂	64.0628	$0\sim 1\times 10^{-4}$	$0\sim 2\times 10^{-4}$	$0\sim 1.1\times 10^{-1*}$
NO ₂	46.0055	$0\sim 2\times 10^{-6}$	$0\sim 3\times 10^{-6}$	$0\sim 2\times 10^{-3*}$
NH ₃	17.03061	0~微量	0~微量	0~微量
CO	28.01055	0~微量	0~微量	0~微量
I ₂	253.8088	$0\sim 1\times 10^{-6}$	$0\sim 9\times 10^{-6}$	$0\sim 1.1\times 10^{-3}$

注：带※号分压力随时间地点而变动。

表 1-2 大气温度与海拔高度关系^[1,2]

高度/km	压力/Pa	温度/℃	高度/km	压力/Pa	温度/℃	高度/km	压力/Pa	温度/℃
-0.30	105250	16.95	4.3	59254	-12.95	60	22	-17.4
-0.26	104490	16.69	4.4	58480	-13.60	65	11.5	-33.9
-0.20	103751	16.30	4.5	57714	-14.25	70	5.5	-53.5
-0.16	103262	16.04	4.6	56956	-14.90	75	2.5	-73.0
-0.10	101199	15.65	4.7	56206	-15.55	80	1.04	-92.5
-0.06	102049	15.39	4.8	55465	-16.20	85	4.12×10^{-1}	-92.5
0	101325	15	4.9	54730	-16.85	90	1.64×10^{-1}	-92.5
0.5	95459	11.75	5.0	54005	-17.50	95	6.8×10^{-2}	-77.6
0.6	94319	11.10	5.5	50490	-20.75	100	3.01×10^{-2}	-63.1
0.7	93191	10.45	6.0	47164	-24.00	110	7.36×10^{-3}	-16.2
0.8	92072	9.8	6.5	44018	-27.25	120	2.52×10^{-3}	76.3
0.9	90966	9.15	7.0	41043	-30.50	130	1.22×10^{-3}	260
1	89870	8.50	7.5	38234	-33.75	140	7.41×10^{-4}	441
1.1	88784	7.85	8.0	35584	-37.00	150	5.07×10^{-4}	620
1.2	87710	7.20	8.5	33081	-40.25	160	3.69×10^{-4}	749
1.3	86646	6.55	9.0	30725	-43.5	170	2.79×10^{-4}	832
1.4	85593	5.90	9.5	28506	-46.75	180	2.16×10^{-4}	883
1.5	84549	5.25	10.0	26419	-50.00	190	1.68×10^{-4}	932
1.6	83250	4.60	10.50	24457	-53.25	200	1.33×10^{-4}	963
1.7	82494	3.95	11	22705	-56.4	220	8.53×10^{-5}	1021
1.8	81482	3.30	12	19398	-56.5	240	5.73×10^{-5}	1067
1.9	80466	2.65	13	16585	-56.5	260	4.67×10^{-5}	1084
2.0	79487	2.00	14	14172	-56.5	280	2.67×10^{-5}	1131
2.1	78504	1.35	15	12106	-56.5	300	1.87×10^{-5}	1159
2.2	77532	-0.70	16	10359	-56.5	320	1.33×10^{-5}	1173
2.3	76570	-0.60	17	8853	-56.5	340	9.87×10^{-6}	1185
2.4	75616	-0.05	18	7559	-56.5	360	7.2×10^{-6}	1196
2.5	74672	-1.25	19	6466	-56.5	380	5.33×10^{-6}	1205
2.6	73739	-1.90	20	6466	-56.5	400	4×10^{-6}	1214
2.7	72815	-2.55	22	5520	-54.6	420	3.07×10^{-6}	1213
2.8	71899	-3.20	24	4040	-52.6	440	2.4×10^{-6}	1215
2.9	70994	-3.85	26	2986	-50.6	460	1.87×10^{-6}	1217
3.0	70097	-4.50	28	2146	-48.6	480	1.4×10^{-6}	1220
3.1	69210	-5.15	30	1197	-46.6	500	1.09×10^{-6}	1226
3.2	69665	-5.8	32	889	-44.7	520	8.67×10^{-7}	1223
3.3	67462	-6.45	34	664	-39.4	540	6.8×10^{-7}	1222
3.4	66602	-7.10	36	499	-33.9	560	5.4×10^{-7}	1224
3.5	65752	-7.75	38	377	-28.3	580	4.27×10^{-7}	1228
3.6	64909	-8.40	40	287	-22.8	600	3.47×10^{-7}	1233
3.7	61627	-9.05	42	220	-17.3	620	2.8×10^{-7}	1233
3.8	60827	-9.70	44	169	-11.7	640	2.27×10^{-7}	1233
3.9	62435	-10.35	46	131	-6.2	660	1.87×10^{-7}	1234
4.0	61637	-11.00	48	102	-2.5	680	1.47×10^{-7}	1235
4.1	60827	-11.65	50	80	-2.5	700	1.19×10^{-8}	1234
4.2	60036	-12.30	55	43	-7.6			

(2) 大气压力 p 与海拔高度 h 之间关系^[1]

$$p = 0.999^{\frac{h}{8}} \times 101325 \quad (1-1)$$

(3) 真空区域划分 (表 1-3)

表 1-3 真空区域划分^[1]

真空区域	压力范围/Pa	真空区域	压力范围/Pa
低真空	$<10^5 \sim 10^2$	超高真空	$<10^{-5} \sim 10^{-9}$
中真空	$<10^2 \sim 10^{-1}$	极高真空	$<10^{-9}$
高真空	$<10^{-1} \sim 10^{-5}$		

1.2 理想气体的物理特性

1.2.1 理想气体压力、质量和密度

理想气体压力、质量、密度见表 1-4。温度 20°C 、 $1\text{Pa} \cdot \text{m}^3$ 气体的质量和 1Pa 压力下气体密度见表 1-5。

表 1-4 理想气体压力、质量、密度^[1]

名称	公 式	符号意义
气体压力	$p = \frac{1}{3} n m_0 v_s^2 = \frac{1}{3} \rho v_s^2$ (1-2)	p ——气体压力, Pa;
	$p = nkT$ (1-3)	n ——气体分子数密度, m^{-3} ; m_0 ——气体质量, kg;
气体质量	$m = pV \frac{M}{RT} = 0.1203 pV \frac{M}{T}$ (1-4)	ρ ——气体的质量密度, kg/m^3 ; v_s ——气体分子均方根速度, m/s ; k ——玻耳兹曼常数, $1.380663 \times 10^{-23} \text{J}/\text{K}$; T ——气体温度, K;
气体密度	$\rho = \frac{Mp}{RT} = 0.1203 \frac{Mp}{T}$ (1-5)	M ——气体摩尔质量, kg/mol ; R ——气体常数, $8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; V ——气体体积, m^3

表 1-5 温度 20°C 、 $1\text{Pa} \cdot \text{m}^3$ 气体的质量和 1Pa 压力下气体密度

气体	空气	H_2	N_2	O_2	He	Ar	CO	CO_2	H_2O
质量/ $\times 10^{-7} \text{kg}$	116.2	8.09	112.4	128.4	16.06	106.3	112.4	176.9	72.31
密度/ $\times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.188	0.083	1.149	1.313	0.164	1.639	1.149	1.806	0.739

1.2.2 气体分子热运动速度

气体分子热运动速度公式见表 1-6。

表 1-6 气体分子热运动速度公式^[1]

名 称	公 式	符号意义
麦克斯韦速度分布定律	$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} = v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$ (1-6)	v ——气体分子速度, m/s ; v_s ——均方根速度, m/s ; k ——玻耳兹曼常数;
最可几速度	$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 4.078 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{m}/\text{s}]$ (1-7)	T ——气体绝对温度, K; M ——气体的摩尔质量, kg/mol ; R ——气体常数;
算术平均速度	$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 4.601 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{m}/\text{s}]$ (1-8)	m ——分子质量, kg; c ——气体中的声速; γ ——气体绝热指数, 单原子气体为 1.67, 双原子气体为 1.40

续表

名 称	公 式	符 号 意 义
均方根速度	$v_s = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 4.994 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{m/s}] \quad (1-9)$	v ——气体分子速度, m/s; v_s ——均方根速度, m/s; k ——玻耳兹曼常数; T ——气体绝对温度, K; M ——气体的摩尔质量, kg/mol; R ——气体常数;
气体中的声速	$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad [\text{m/s}] \quad (1-10)$ 单原子气体分子: $c = 3.715 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{m/s}]$ 双原子气体分子: $c = 3.412 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{m/s}]$	m ——分子质量, kg; c ——气体中的声速; γ ——气体绝热指数, 单原子气体为 1.67, 双原子气体为 1.40

1.2.3 气体分子平均自由程

气体分子的平均自由程见表 1-7。气体平均自由程与压力的函数关系如图 1-1 所示。常用气体分子、离子及电子平均自由程见表 1-8。

表 1-7 气体分子的平均自由程^[1]

名 称	公 式	符 号 意 义
同种气体分子平均自由程	$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n \sigma^2} = 3.107 \times 10^{-24} \frac{T}{p \sigma^2} \quad [\text{m}] \quad (1-11)$ 20℃空气的平均自由程: $\bar{\lambda}_{20^\circ\text{C}} = 6.667 \times 10^{-3} \frac{1}{p} \approx 6.7 \times 10^{-3} \frac{1}{p} \quad [\text{m}]$	$\bar{\lambda}$ ——气体分子平均自由程; m ——气体分子的质量;
混合气体分子平均自由程	$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{\pi \sum_{i=1}^k \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_i} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_i}{2} \right)^2} n} \quad (1-12)$	n ——气体分子数密度, m^{-3} ; σ ——气体分子直径, m; p ——气体压力, Pa;
电子在气体中平均自由程	$\bar{\lambda}_e = \frac{4}{\pi n \sigma^2} = 4\sqrt{2} \bar{\lambda} \approx 5.7 \bar{\lambda} \quad [\text{m}] \quad (1-13)$	T ——气体温度, K; 符号右下角的 1, 2, ..., i 分别为第 1, 2, ..., i 种气体
离子在气体中平均自由程	$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{\pi n \sigma^2} = \sqrt{2} \bar{\lambda} \approx 1.4 \bar{\lambda} \quad [\text{m}] \quad (1-14)$	
自由程长度分布率	$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{x}{\bar{\lambda}}\right) \quad (1-15)$	$N, N_i, N_e, N_0, N_{i0}, N_{e0}$ 分别表示飞行 x 路径没遭遇碰撞的分子、电子、离子和原始分子、电子、离子数

注: 式(1-15)也适用于电子和离子, 即 $N_i = N_{i0} \exp(-x/\bar{\lambda}_i)$ 或 $N_e = N_{e0} \exp(-x/\bar{\lambda}_i)$ 。

表 1-8 常用气体分子、离子及电子平均自由程^[45]

$\times 10^{-5} \text{ m}$

气体	H ₂	He	Ne	空气	O ₂	Ar	CO ₂	Kr	Xe	Hg
λ	9.31	14.72	10.45	5.09	5.40	5.3	3.34	4.06	2.98	3.8
λ_i	10.32	20.9	14.8	7.22	7.67	7.52	4.75	5.75	4.22	5.4
λ_e	53	84	59.2	28.8	30.2	30.2	18.9	23	16.8	21.6