

高等|学校|教学|用书

有色冶金炉

梅 焱 主编

G *AODENG*

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

有色冶金炉

中南工业大学 梅 焯 主编

北 京

冶金工业出版社

1997

图书在版编目 (CIP) 数据

有色冶金炉 / 梅炽主编. - 北京 : 冶金工业出版社, 1994.6 (1997.6重印)

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1394-4

I. 有… I. 梅… III. 有色冶金炉-高等学校-教材 IV
TF806

中国版本图书馆CIP数据核字 (97) 第04789号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

三河市印刷厂印刷, 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1994年6月第1版, 1997年5月第2次印刷

787mm × 1092mm 1/16, 17.75印张, 417千字, 273页; 3901 ~ 6900册

22.30元

前 言

本书是根据冶金工业部、中国有色金属工业总公司“八五”教材出版规划及有色金属冶金专业《有色冶金炉》课程教学大纲编写的。本教材适于有色金属冶金专业和团矿专业使用，也可供有关工程技术人员参考。在内容编排上，考虑到本学科今后的发展和专业的不同需要，书中适当地增写了一些内容，讲授时可根据具体情况予以删减。

本书的内容包括两部分。基础理论部分主要叙述气体力学基础、传热学基础、燃料及燃烧、耐火材料等基本理论；炉子专论部分重点叙述回转窑、沸腾炉、反射炉、鼓风炉、电阻炉和矿热电炉等常用炉子的基本构造、工作原理、热工特性和热工计算。书中按章附有思考题与习题，利于培养学生运用概念和解决实际问题的能力。

本书的主要任务是使学生掌握有色冶金炉热工基础理论，进行热工分析与计算，了解冶金炉的基本构造、工作原理和热工特性，具有对冶金炉进行初步设计和技术改造的能力。

参加本书初稿编写工作的有中南工业大学梅炽（绪论、第一章、第五章第七节）、中南工业大学孟柏庭（第二章、第四章、第五章第二、三、五、六节）、东北大学兰为君（第三章、第五章第一、四节）。全书由梅炽主编。

昆明工学院王敦礼、南方冶金学院胡昌国、中南工业大学傅志华等同志对本书的初稿进行认真审查，提出了宝贵的修改意见，编者在此表示衷心地感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中一定会有缺点甚至错误，恳请读者批评指正。

编 者

1992年5月

目 录

绪论	1
1 气体力学基础	
1.1 气体力学基本概念	4
1.1.1 气体的主要物理性质	4
1.1.2 气体静压与静压头	6
1.1.3 静止气体平衡方程	8
1.2 气体运动若干基本概念	9
1.2.1 定常流与不定常流	9
1.2.2 迹线和流线	9
1.2.3 流管与有效截面	9
1.2.4 流量和平均流速	9
1.2.5 层流与紊流	10
1.2.6 边界层概念	11
1.2.7 圆管的速度分布	12
1.3 气体运动基本方程	16
1.3.1 连续性方程——流动质量守恒	16
1.3.2 理想流体运动微分方程——欧拉运动方程	18
1.3.3 流体机械能守恒——伯努利方程	19
1.3.4 伯努利方程的应用实例	24
1.3.5 动量方程	28
1.4 流动阻力及管道系统阻力计算	31
1.4.1 沿程阻力	31
1.4.2 局部阻力	35
1.4.3 几种特殊阻力	37
1.4.4 减少流动系统阻力的途径	38
1.4.5 管路与烟道计算	39
1.5 压缩性气体流动	44
1.5.1 压缩性气流的能量方程	44
1.5.2 压缩性气体流动的连续方程	46
1.5.3 压缩性气流中各参数的变化规律	47
1.5.4 压缩性气体经喷管的流动	50
1.5.5 压缩性气体的等温流动	53
1.6 气体喷射流	55
1.6.1 自由射流	55

1.6.2	限制射流	59
1.6.3	冲击射流	59
1.7	供风排烟装置	62
1.7.1	离心式风机	62
1.7.2	烟囱	68
	思考题与习题	72

2 传热学基础

2.1	稳态导热	77
2.1.1	温度场	77
2.1.2	温度梯度	77
2.1.3	傅立叶导热定律	78
2.1.4	单层平壁导热	79
2.1.5	多层平壁导热	79
2.1.6	中间温度	80
2.1.7	单层圆筒壁导热	82
2.1.8	多层圆筒壁导热	82
2.1.9	数值解法中的有限差分法	83
2.2	对流换热	80
2.2.1	对流换热概述	86
2.2.2	相似原理在对流换热中的应用	88
2.2.3	流体在管内强制对流换热的经验公式	94
2.2.4	流体横向绕流圆管的换热	98
2.2.5	流体绕过管束时的换热	98
2.2.6	自然对流换热	100
2.2.7	液体沸腾时的换热	101
2.2.8	蒸汽凝结时的放热	104
2.3	辐射换热	106
2.3.1	辐射换热的基本概念	106
2.3.2	辐射能的吸收、反射和透射	106
2.3.3	热辐射的基本定律	107
2.3.4	角度系数	110
2.3.5	物体表面间的辐射换热计算	112
2.3.6	气体辐射	118
2.4	稳态综合换热	123
2.4.1	气体与壁面间的换热	123
2.4.2	火焰炉内的综合换热	123
2.4.3	通过间壁的换热	128
2.4.4	换热器的传热计算	130

3 燃料及燃烧

3.1 燃料的特性	139
3.1.1 燃料的化学组成	139
3.1.2 燃料发热量	141
3.2 燃烧计算	142
3.2.1 空气需要量、燃烧产物量及其成分的计算	143
3.2.2 燃烧产物密度的计算	145
3.2.3 空气消耗系数	146
3.2.4 燃烧温度的计算	147
3.2.5 燃烧温度的讨论	151
3.3 燃料燃烧及燃烧装置	152
3.3.1 煤气燃烧及煤气烧嘴	152
3.3.2 重油燃烧及重油喷嘴	160
3.3.3 重油掺水乳化燃烧法简介	166
3.3.4 原煤燃烧及层状燃烧室	167
3.3.5 粉煤燃烧及粉煤燃烧器	171
3.3.6 水煤浆燃烧及沸腾燃烧技术简介	174
3.4 燃烧污染及防治	175
3.4.1 烟尘的污染与防治	175
3.4.2 硫的氧化物 (SO_2) 的污染与防治	176
3.4.3 氮的氧化物 (NO_x) 的污染与防治	176
3.4.4 碳氧化物 (CO 、 CO_2) 的污染与防治	176
思考题与习题	177

4 耐火材料

4.1 概述	178
4.1.1 耐火材料在冶金工业中的地位和作用	178
4.1.2 冶金炉对耐火材料的要求	178
4.1.3 耐火材料的分类	179
4.2 耐火材料的一般性质	180
4.2.1 耐火材料的一般化学矿物组成	180
4.2.2 耐火材料的物理性质	181
4.2.3 耐火材料的工作性能	183
4.3 常用块状耐火制品	186
4.3.1 硅酸铝质耐火制品	186
4.3.2 氧化硅质耐火制品 (硅砖)	188
4.3.3 镁石质耐火制品	189

4.3.4	含碳耐火材料	191
4.4	不定形耐火材料	192
4.4.1	耐火混凝土	193
4.4.2	耐火泥	193
4.5	特种耐火材料	193
4.5.1	高温陶瓷材料	193
4.5.2	金属陶瓷	194
4.6	绝热材料	195
4.6.1	中低温绝热材料	195
4.6.2	高温绝热材料	195
4.6.3	耐火纤维	198
	思考题与习题	201

5 几种常用冶金炉

5.1	竖炉	203
5.1.1	概述	203
5.1.2	炉内物料运动和气体运动	203
5.1.3	料层内热交换	204
5.1.4	炉例——鼓风炉	204
5.2	火焰炉	210
5.2.1	回转窑	210
5.2.2	反射炉	219
5.3	沸腾炉	226
5.3.1	概述	226
5.3.2	沸腾床	227
5.3.3	沸腾床内热交换	229
5.3.4	沸腾炉单位生产率计算	231
5.3.5	沸腾炉主要尺寸的确定	231
5.3.6	炉体及主要部件	233
5.4	电炉	236
5.4.1	概述	236
5.4.2	电阻炉	237
5.4.3	矿热电炉	238
5.5	炉子热平衡计算	244
5.5.1	热收入计算	245
5.5.2	热支出计算	245
5.5.3	热平衡方程与热平衡表	249
5.6	冶金炉(窑)节能	250
5.6.1	高温烟气余热的合理利用	250

5.6.2	炉墙最佳厚度	254
5.7	工业炉窑设计基本知识	254
5.7.1	炉窑设计基本要求	254
5.7.2	炉窑设计内容与一般步骤	255
5.7.3	投资费用概算与经济评价	257
5.7.4	计算机辅助设计 (CAD) 与优化设计	258
附录		
I-1	气体的基本常数	261
I-2	干空气的物性参数	261
I-3	水的物性参数	262
I-4	烟气的物理参数	263
I-5	空气及煤气的饱和水蒸汽含量	263
II	局部阻力系数	264
III	离心式风机特性表 (示例)	268
N	各种不同材料在表面法线方向上的辐射照度	269
V	习题参考答案	270
	主要参考文献	273

绪 论

冶金炉(窑)是冶金与金属材料及加工工业的主要设备之一。它造价高、耗能多,工作时还伴随产生有害气体与烟尘,因此研究炉(窑)热工过程的原理与热工计算、开发最新炉(窑)结构及现代设计方法,对冶金与材料工业的发展与进步具有十分重要的意义,同时,它也是全面解决“节能”与“环保”这两个当代重大社会问题的重要科技领域。因此学习和掌握这方面的基本知识、理论和计算设计方法,对每一个冶金科技工作者都是十分重要的。

有色冶金炉(窑)种类繁多,通常可按用途、热源、加热方式、工作原理及结构特点等分类(见表1)。

表 1 常用有色金属工业炉窑

分类依据	炉 窑 名 称 举 例
按用途分	干燥炉(窑)、煅烧炉(窑)、焙烧炉(窑)、加热炉、氯化炉、熔炼炉、熔化炉、吹炼炉、精炼炉、热处理炉、熔析炉、还原炉、烟化炉、烧结炉(窑)、挥发炉(窑)、蒸馏炉、扩散炉
按热源分	自热炉、燃料炉、电炉
按加热方式分	火焰炉、倒焰窑(炉)、隔焰炉、盐浴炉、感应炉、电阻炉、电弧炉、电子轰击炉、等离子体炉、矿热电炉
按工作原理分	沸腾炉、旋风炉、鼓风炉、闪速炉、顶吹转炉、侧吹转炉、底吹转炉、热空气循环炉、气窑炉、熔池熔炼炉、悬浮焙烧炉
按结构特点分	回转窑(炉)、反射炉、多膛炉、竖井式炉、坩埚炉、室状炉、竖罐蒸馏炉、横罐蒸馏炉、井式炉、碳管炉、钨棒炉、钨丝炉、罩式(热处理)炉、步进式(加热)炉

炉(窑)是一个大系统,它包括炉(窑)本体与炉(窑)热工辅助系统两大部分。炉(窑)本体包括炉基、耐火砌体(炉顶、炉墙、炉底等)、保温砌体、支撑加固结构、运转机构等。炉(窑)热工辅助系统通常包括供风排烟装置、加排料装置、供配电装置、炉体强制冷却与余热利用装置、自动检测与过程控制装置等。

炉(窑)热工过程是本课程的主要研究对象,通常包括如下几方面内容:

- (1) 燃料燃烧或电热转换过程;
- (2) 炉内气体流动过程;
- (3) 炉内物料的机械运动;
- (4) 炉内传热与传质过程。

此外从炉(窑)整体性能研究的角度,还应考虑炉料在高温下的物理-化学反应过程。研究炉内热工过程的目的是合理组织上述四种过程,以达到强化炉内的物理-化学反应,最终实现高产、优质、低耗、长寿和低污染。

从炉(窑)种类、组成部分与炉(窑)热工过程所包含的内容可以看出,炉(窑)科技是一个内容非常广泛的多种学科知识的综合体。为便于学习,本课程将由相关的五部分组成,即工程气体力学、传热原理、燃烧技术、筑炉材料以及有色冶金炉的结构原理与设计一般方法。

通过上述基本内容的学习,以及做习题、实验和炉(窑)课程设计等环节,要求达到:

(1) 掌握现代炉(窑)热工基础理论,学会分析与诊断炉(窑)热工一般问题的方法;

(2) 学会一般炉(窑)热工计算方法,初步掌握炉(窑)设计一般知识与方法;

(3) 了解有关炉(窑)节能与炉(窑)环保的基本知识,初步学会对现有炉(窑)进行以节能和环保为目的的技术改造。

最后必须指出,在炉(窑)热工计算中应该特别重视单位制的应用,否则将引起计算的混乱和重大错误。本书一律采用国家标准局制订的有关量和单位的国家标准^①。全套标准均用国际单位制(SI)。SI制由7个基本单位和2个辅助单位所组成(见表2)。与本课程有关的具有专门名称的导出单位见表3。我国法定计量单位中还包括了15个非国际单位制单位,如时间单位中的分(min)、时(h)、天(day)、质量单位中的吨(t)、体积单

表2 SI单位制

物 理 量	单 位 名 称	单 位 代 号	
基本单位	长 度	米	m
	质 量	公斤、千克	kg
	时 间	秒	s
	电 流(强度)	安 培	A
	温 度	开(尔文)	K
	光 强	烛 光	Cd
辅助单位	物 质 的 量	摩 尔	mol
	平 面 角	弧 度	rad
	立 体 角	球 面 度	Sr

表3 具有专门名称的导出单位

物 理 量	单 位 名 称	单 位 代 号	定 义 式
力	牛 顿	N	$1\text{N}=1\text{kg}\times 1\text{m}/\text{s}^2$
压强、压力	帕(斯卡)	Pa	$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$
能、功、热量	焦 尔	J	$1\text{J}=1\text{N}\times 1\text{m}$
功 率	瓦[特]	W	$1\text{W}=1\text{J}/\text{s}$
单 位	伏[特]	V	$1\text{V}=1\text{J}/\text{A}\cdot\text{s}$
电 阻	欧[姆]	Ω	$1\Omega=1\text{V}/\text{A}$

① 1986年国家标准局规定的有关量和单位的基本标准有15项,包括国际单位制及应用,一般原则、空间和时、周期及其有关现象、力学量、热学量、电学和磁学量、光及电磁辐射学量、声学量、物理化学和分子物理学量、原子物理和核物理学量、核反应和电离辐射量、物理科学和技术中使用的数学符号、无量纲数、固体物理学量等(见GB 3106—86~GB 3102.0—86),并规定从1987年3月1日起在全国实施。

位中的升(L)、声级单位中的分贝(dB)等。工程计算中必须先将同一算式中所有物理量换算成同一种单位制, 然后进行运算。常用单位换算关系见表4。

表 4 常用单位换算关系

物理量	制外单位	对应的国际单位	物理量	制外单位	对应的国际单位
压力 (压强、应力)	1Bar(巴)	10^5Pa	功能、热量	1kg·m	9.80665J
	1Dyn/cm ²	0.1Pa		1Hp·h(马力·小时)	$2.648 \cdot 10^3 \text{J}$
	1at(=1kgf/cm ²)	98066.5Pa		1kW·h	$3.6 \cdot 10^3 \text{J}$
	1atm(标准大气压)	101325Pa		1W·h	$3.6 \cdot 10^3 \text{J}$
	1mmHg(=1托)	133.322Pa		1erg(尔格)	10^{-7}J
			1Btu(=0.252kcal)	1055.06J	
动力 粘度	1P(泊)(=1Dyn·s/cm ²)	0.1Pa·S	功率、热流	1kcal/h	1.163W
	1kgf·s/m ²	9.80665Pa·S		1cal/s	4.1868W
			1HP(马力)	$735.499 \text{W} \approx 0.7355 \text{kW}$	
运动 粘度	1st(斯托克斯)	$10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$	导热系数	1kcal/(m·h·°C)	$1.163 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	1m ² /h	$277.8 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$		1cal/(cm·s·°C)	$41.868 \cdot 10^3 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
温差	1°C	1K	1Btu(ft·h·°F)	$1.73074 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	
	1°F(华氏度)	5/9K	1Btu/(in·h·°F)	$20.7689 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	
比热			传热系数 (放热系数)	1kcal/(m ² ·h·°C)	$1.163 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
				1cal/(cm ² ·s·°C)	$41868 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	1kcal/(kg·K)	4186.8J/kg·K		1Btu/(ft ² ·h·°F)	$5.67827 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
			1cal/(cm ² ·s·°C)	$41868.0 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	

1 气体力学基础

1.1 气体力学基本概念

气体力学是流体力学中的一部分，专门研究气体运动原理，压力与流速的关系和气体的混合规律等等。炉窑热工技术中的气体输送、烟气排放、燃烧装置及换热器设计、炉膛内气流合理组织等都直接用到气体力学的原理和计算。冶金中的喷射冶金、多相反应过程中传热与传质的强化等等也都与气体力学密切相关。

1.1.1 气体的主要物理性质

1.1.1.1 分散性与连续介质模型

气体分子间距离较大，引力较小，自由运动较强烈。例如空气分子的有效直径约为 10^{-8} cm（数量级），而在常温常压下，分子间的距离约为 3×10^{-7} cm，比前者大很多。可见气体分子非常分散。

假如气体力学一般地着眼于个别分子的微观行为，则不仅很难找出共同规律，而且用途很小。对工程有实际意义的是大量分子行为和作用的宏观效果与统计规律。因此，1753年欧拉首先提出了“宏观流体模型”——即将气体与液体看作内部并不存在空隙的“连续介质”。

实际上按气体分子运动论的基本数据可计算出对 1cm^3 气体容器的每一个侧壁而言，在标准状态下气体分子的撞击频率约为 2.2×10^{28} 次/秒。由于分子碰撞频率如此之大，从力的传递或动量传递的宏观效果来看，完全可以将其视为内部不存在空隙的连续体。当然，在真空，特别是高真空系统中，连续体的概念是不真实的，这种情况下的气体运动已属于“分子流”的特殊范畴。

1.1.1.2 可压缩性与不可压流体模型

众所周知，气体体积是随压力和温度而变化的，并且有

$$PV = R_0 T \quad (1-1)$$

的关系。式中 P 、 V 是气体的绝对压力与体积， T 是热力学温度。当式(1-1)中的体积是指 1kmol 气体时，式右边的气体常数则对应的为通用气体常数 R_0 ，即 1kmol 气体温度升高 1k 时对外所作的膨胀功。此值对所有气体皆为常数

$$R_0 = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \text{ 或 } R_0 = 848 \text{ (kgf} \cdot \text{m)} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

当公式(1-1)两边同除以该气体的分子量

$$\frac{PV}{M} = \frac{R_0}{M} T$$

即

$$Pv = RT \quad (1-2)$$

式中 v ——每公斤气体的体积（气体的比容）；

R ——具体气体常数， $R = \frac{R_0}{M} \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于空气 $M=28.964$, 则 $R=0.287\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 或 $287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

从式 (1-1) 可见, 在定温下, 气体体积或密度 (ρ) 与压力 (绝对压力) 的关系为

$$PV = \text{const} \text{ 或 } P/\rho = \text{const} \quad (1-3)$$

也可写成

$$V = V_0 \cdot P_0 / P \quad (1-3a)$$

或

$$\rho = \rho_0 \cdot P / P_0 \quad (1-3b)$$

当压力恒定时, 式 (1-1) 变成

$$V/T = \text{const} \text{ 或 } \rho T = \text{const}$$

上式还可以写成

$$V_t = V_0 \cdot T/T_0 \text{ 即 } V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (1-4)$$

$$\rho_t = \rho_0 \cdot T/T_0 \text{ 即 } \rho_t = \rho_0/(1 + \beta t) \quad (1-5)$$

式中 $\beta = 1/T_0 = 1/273, \text{K}^{-1}$ 。

在对气体运动过程进行数学分析时, 为了使问题简化, 往往先将密度 (或比容) 视为定值, 即假设为不可压缩流体, 以便得出解析结果, 这对液体来说不会引入大的误差; 在压力变化不大 (压差小于 10kPa) 或流速不太高 ($v < 70\text{m/s}$) 的条件下, 气体的密度 (或比容) 变化幅度也较小, 同样可以当作不可压缩流体对待。这就是常说的“不可压流体模型”。在气体力学的很多工程计算中, 为了更接近实际, 往往用始末两态密度的平均值来修正膨胀的实际影响。当然, 随着流速与压降的增大, 气体的压缩性开始影响运动的诸多状态参数和能量转换关系, 此时就应按压缩性流体流动的规律处理 (见 1.5)。

1.1.1.3 粘滞性与理想流体模型

一切真实气体由于分子的扩散、频繁碰撞或分子间的相互吸引, 不同流速流体之间必有动量交换发生, 因而在流体内部会产生内摩擦力。这种力与作用面平行, 故又称流动剪应力, 通称粘性力。粘性力的大小可由牛顿内摩擦定律确定^①

$$F = -\mu \frac{du}{dy} A \quad \text{N} \quad (1-6)$$

或表示成剪切应力

$$\tau = F/A = -\mu \frac{du}{dy} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-7)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ 为流层间的速度梯度; A 为流层间的接触面积; 比例系数 μ 称为该流体的粘度

系数, 简称粘度。从式 (1-7) 可见, μ 即当速度梯度为一单位时, 所产生的剪切应力。若切应力的单位取 N/m^2 , 速度梯度单位取 s^{-1} , 则粘度 μ 的单位为 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。绝对单位制中 μ 的单位为 $\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 或 P (泊)。因 μ 具有动力学量纲, 又称动力粘度。还用到另一种粘度, 是流体动力粘度与密度之比, 以 ν 表示, 即

$$\nu = \mu/\rho \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-8)$$

ν 具有运动学量纲, 故又称运动粘度。

各种气体的粘度除与本身种类有关外, 还受温度影响。温度升高时, 气体分子热运动

^① 实践证明, 绝大多数气体和液体都能很好地遵循牛顿内摩擦定律。另有一些流体, 如泥浆、有机胶体、油漆、纸浆、浆糊等不遵守牛顿内摩擦定律, 称之为非牛顿型流体, 前者称为牛顿型流体。

加剧, 扩散、碰撞都增强, 故粘度增大^①。压力变化对气体分子热运动影响不大, 因而除了极高极低压以外, 通常可以不考虑压力的影响。必须注意气体的运动粘度中包含密度的因素, 故气体的运动粘度将受压力的影响。

各种气体粘度及其与温度关系, 只能通过实测的方法才能得到。有关数据列于附表1-2。压力不太高时气体混合物的粘度可用下式估算

$$\mu_m = \frac{\sum(X_B \mu_B M_B^{0.5})}{\sum(X_B M_B^{0.5})} \quad (1-9)$$

式中 X_B , M_B 分别为任一组分的摩尔分数和分子量。

气体粘度的存在, 对气体运动规律的理论分析带来很多困难。为了简化, 可假设一种不存在粘度的理想流体, 正如气体分子运动论中引入不存在分子本身体积和引力的理想气体模型, 理论力学中引入绝对刚体模型等假定一样, 在处理实际问题时, 首先运用理想流体模型求出理论解答, 然后再通过实验进行修正。这样既简便, 又实用。

1.1.2 气体静压与静压头

1.1.2.1 气体静压力 压强

气体在机械压力、摩擦力(统称表面力)或重力、离心力、惯性力(统称体积力)的作用下, 内部各部分之间也将产生相应的相互作用的力, 称为内力。单位截面上的内力大小称应力。

当气体静止时, 所有切应力均为零, 只受到与作用面垂直的法向应力。也就是指向表面的压力, 称为静压力。单位表面所受静压力称为压强。这里重复一下物理学中已建立的概念:

(1) 静压力总是垂直作用于容器壁、不论壁的形状与方向怎样;

(2) 静止流体中静压力与其作用面在空间的方位无关, 只是空间座标的函数, 即任意点处静压力在各方向上均相等。

从分子运动论的角度, 气体的静压可通过分子热运动强度与单位体积内分子数目表示如下

$$p = \frac{2}{3} n_0 \frac{m u^2}{2} \quad (1-10)$$

式中 m ——气体分子质量;

n_0 ——单位体积内分子数目;

u ——气体分子的均方根速度。

当 n_0 增大, 气体静压也相应地变大。

1.1.2.2 相对压力(表压) 压力的单位

式(1-10)所反映的压力是以绝对真空作零压而计算的。如海平面的大气压力为101325Pa(即1atm或760mmHg), 即指气体绝对压力而言。工程中气体的各种行为与运动均在大气压作用下的大环境中进行。所以对气体的机械运动和行起作用的不是绝对压

① 根据气体分子运动论, 在不太高的压力下可导出理想气体动力粘度

$$\mu = \frac{2}{3} \cdot \frac{(m \cdot k)^{0.5}}{\pi^{1.5} d^2} \cdot T^{0.5}$$

式中 m 为单个分子质量, k 为玻尔兹曼常数, d 为分子直径, T 为气体热力学温度。

力的大小。而是相对于大气压的差值或超出部分，即相对压力。一般测压仪表都是测定相对压力，故后者又称表压，即

$$p_{\text{表}} = p - p_{\text{大气}} \quad (1-11)$$

当气体绝对压力 p 小于当地大气压力时，表压为负值，称为负压。其绝对值称为真空度。例如某系统内气体绝对压力为 70kPa ，当地大气压为 100kPa ，其表压为

$$p_{\text{表}} = 70 - 100 = -30\text{kPa}$$

也可称其真空度为 30kPa ①。

压力的单位，即压应力单位，用 N/m^2 ，即 Pa 。工程制用 kgf/m^2 或 kgf/cm^2 (at)。工程流体力学中还使用液柱高表示压力或压强。按下述关系

$$P = H\gamma \quad \text{N/m}^2 \quad (1-12)$$

$$H = P/\gamma \quad \text{m} \quad (1-13)$$

所以当所用流体重度 (γ) 为常数时，则液柱高即可直接表示压强或压力大小。

此外，在高压气体范围往往用工程大气压作压力或压强单位 (at)②。

$$1\text{at} = 1\text{kgf/cm}^2 = 0.98784\text{atm} \quad (\text{标准大气压})。$$

〔例1-1〕 压力单位换算。将 1at 换算成相应的水柱高及帕斯卡 (N/m^2)。水与汞的重度分别为 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 9806.65\text{N/m}^3$ ， $\gamma_{\text{Hg}} = 133320\text{N/m}^3$ 。

〔解〕

$$1\text{at} = 0.98784\text{atm} = 0.98784 \times 760 = 735.56\text{mmHg}$$

$$P = h_{\text{汞柱}} \times \gamma_{\text{Hg}} = 735.56 \times 10^{-3} \times 133320 = 98064.9 \quad \text{N/m}^2$$

$$h_{\text{水柱}} = P/\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 98064.9/9806.65 = 9.9998\text{m} = 10\text{m}$$

$$P = h_{\text{水柱}} \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \times 9806.65 = 98066.5 \quad \text{N/m}^2$$

各种压力单位换算关系见表1-1。

表 1-1 压力单位换算

帕斯卡 (Pa)	巴 (Bar)	工程大气压 (at)	标准大气压 (atm)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	毫米汞柱 (mmHg)	公斤力/米 ² (kgf/m ²)
1.0	10 ⁻⁵	1.01972 × 10 ⁻⁵	0.9869 × 10 ⁻⁵	0.101972	7.50 × 10 ⁻³	0.101972
10 ⁵	1.0	1.01972	0.9869	10197.2	750.0	10197.2
98066.5	0.980665	1.0	0.9678	10000	735.56	10000
9.80665	9.80665 × 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	9.678 × 10 ⁻⁵	1.0	0.073556	1.0
133.32	1.3332 × 10 ⁻³	1.3595 × 10 ⁻³	1.3157 × 10 ⁻³	13.595	1.0	13.595
101325	1.01325	1.0333	1.0	10332.6	760	10332.6

1.1.2.3 静压头

气体的相对静压 (表压) 是气体绝对压力超出环境气压的部分。显然，这是气体具有

① 真空度一词的含义未规范化，例如动力行业中习惯于用负压 p_v 与当地大气压 p_0 比值的百分数 B 表示真空度，即

$$B = \frac{p_v}{p_0} \times 100\%$$

在本例题中的真空度则为 $(30/100) \times 100\% = 30\%$ 。目前通用前者。

② 一般工程活动范围的地势比海平面高，故各地区的实际大气压都较标准大气压小，而且彼此不同。为了统一，规定1工程大气压 (at) 相当于1000mmH₂O或98066.5Pa或0.96784atm或735.56mmHg。

的一种势能。表压越高，该气体具有对外作功的机械能（如推动活塞、克服流动的各种阻力的本领）也越大。表压为零时，该气体即不具备对外作功的能力。表压为负时，环境气体可对本系统作功，同样体现出具备一种势能。分析一下静压单位：

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}} = 1\text{J}/\text{m}^3$$

可见，1Pa静压相当于该气体每立方米中具有1J的机械能。所以在流体力学中又将气体的表压称为静压头^①，即单位体积气体所具有的静压能。这是气体力学中常用到的一个名词和基本概念。

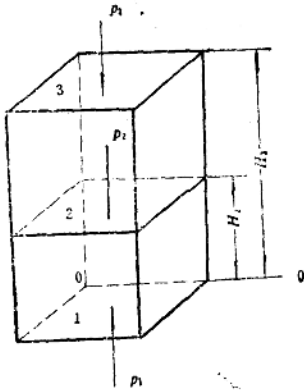


图 1-1 气体静压平衡

1.1.3 静止气体平衡方程

任何静止状态的气体只受自身质量力（重力）与外界压力的作用。如图 1-1，静止的气体中，取一底面为 $A\text{m}^2$ ，高度为 $H_3\text{m}$ 的气体柱。因为静止，此气柱在水平和垂直方向所受外力的合力必为零。

设 1 面总静压（不是表压 p_1 ）为 $p_1 A$ （垂直向上），3 面处总压为 $p_3 A$ （垂直向下），气柱本身的质量力（体积力）为 $H_3 \gamma$ ，由于气体静止，则

$$p_1 A - p_3 A - H_3 \gamma A = 0$$

$$\text{或} \quad p_1 = p_3 + H_3 \gamma \quad (1-14)$$

同理可导出

$$p_1 = p_2 + H_2 \gamma \quad (1-15)$$

对于气柱中任何一面，设其距底面（1 面）高度为 H_i ，静压为 p_i ，重度为 γ ，则可列出

$$p_1 = p_2 + H_2 \gamma = p_3 + H_3 \gamma = \dots = p_i + H_i \gamma \quad (1-16)$$

从式 (1-16) 可见，对于静止气体，任一高度上其 p_i 与 $H_i \gamma_i$ 之和为一常数。式 (1-16) 即气体平衡方程。

【例 1-2】 气体平衡方程应用。已知当地地面大气压为 101325Pa ，问在高出地面 400m 的水平面上大气压为多少（Pa）。设空气重度的平均值 $\gamma = 12.65\text{N}/\text{m}^3$ 。

【解】 根据式 (1-16)， $p_1 = p_{400} + H_{400} \gamma$

即

$$\begin{aligned} p_{400} &= p_1 - H_{400} \gamma \\ &= 101325 - 400 \times 12.65 = 96265\text{Pa} \end{aligned}$$

公式中的 $H\gamma$ 即为单位体积气体对基准面 0-0 面（即图 1-1 中 1 面）所具有的位能^②。前节中将单位体积气体所具有的静压能定义为静压头，相应地 $H\gamma$ 即可定义为该处气体的位压头，其单位

$$H\gamma \Rightarrow [\text{m} \cdot \text{N}/\text{m}^3] \Rightarrow [\text{J}/\text{m}^3]$$

① 压头的名词取自水力学中的“水头”，即指单位重量水的势能。水头的单位是米，每米水头相当于每牛顿重量的水具有 1 焦尔的势能，即 $\text{J}/\text{N} \Rightarrow \text{N} \cdot \text{m}/\text{N}$ 。

② $H\gamma$ 中的 γ 为单位体积气体所受的重力， H 为该气体体积重心至基准面的距离。 $H\gamma$ 即为该处单位体积气体对于基准面所具有的位能。