



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

有色冶金炉

主编 周子民

YOUSE YEJINLU



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

有色冶金炉

主 编 周子民
副主编 周 萍 张家元

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

本书详细阐述了有色冶金炉的基础理论和各类冶金炉窑。基础理论部分主要讲述流体力学、传热学、燃料及燃烧、耐火材料等基础理论知识；炉窑专论部分重点介绍了回转窑、沸腾炉、鼓风炉、电阻炉、矿热电炉和铝电解槽等有色冶金中常用炉窑的基本结构、工作原理、热工特性和热工计算。除第5章外，各章均附有思考题和习题，便于读者掌握所学内容。

本书可作为高等学校有色冶金和团矿专业本科生教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

有色冶金炉/周子民主编. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-4790-8

I. 有… II. 周… III. 有色冶金炉 IV. TF806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 014237 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 张 霞

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4790-8

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 2 月第 1 版, 2009 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.75 印张; 471 千字; 272 页; 1-3000 册

35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

本书是根据国家“十一五”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，在原《有色冶金炉》（梅炽主编）教材的基础上重新编写的。本书的内容主要包括两部分：基础理论和炉窑专论。基础理论部分主要讲述流体力学（第1章）、传热学（第2章）、燃料及燃烧（第3章）、耐火材料（第4章）等基础理论知识；炉窑专论部分（第5章）重点介绍了回转窑、沸腾炉、鼓风炉、电阻炉、矿热电炉和铝电解槽等有色金属中常用炉窑的基本结构、工作原理、热工特性和热工计算。本书可以作为高等学校有色冶金和团矿专业本科生教材，也可供有关工程技术人员参考。

为适应科技的进步和社会的发展，对原教材《有色冶金炉》（梅炽主编）进行了改编，结合有色冶金炉窑工艺特点，更加强调相关基础知识的链接，突出“节能减排”新工艺、新技术。本书对原有的一些概念、单位和标准进行了修订，对部分章节作了调整。第1章将“气体力学”改为“流体力学”，并增加了“动量及动量矩”一节；第2章增加了多维非稳态传热内容，对综合传热部分调整了次序；第3章对原稿中原煤燃烧及层状燃烧室的部分内容作了删减，增加了燃烧新技术介绍、燃烧污染与防治部分内容；第5章增加了铝电解槽的相关内容。

本书的编写得到了梅炽教授系统的指导。参加本次编写工作的有：周子民（绪论），周萍（第5章第6、7、8节），张家元（第1章），闫红杰（第2章），涂福炳（第3章），马爱纯（第4章），邓胜祥（第5章第1、4节），艾元方（第5章第2、3节）。全书由周子民、周萍、张家元定稿。

本书由梅炽教授审阅。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008年8月

目 录

绪论	1
1 流体力学基础	4
1.1 流体力学基本概念	4
1.1.1 流体的主要物理性质	4
1.1.2 流体静压与静压头	7
1.1.3 静止流体平衡方程	8
1.2 流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	10
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 流体运动基本方程	15
1.3.1 连续性方程—流动质量守恒	15
1.3.2 理想流体运动微分方程—欧拉运动方程	17
1.3.3 流体机械能守恒—伯努利方程	18
1.3.4 伯努利方程的应用实例	22
1.3.5 动量及动量矩方程	26
1.4 流动阻力及管道系统阻力计算	30
1.4.1 沿程阻力	30
1.4.2 局部阻力	34
1.4.3 几种特殊阻力	36
1.4.4 减少流动系统阻力的途径	37
1.4.5 管路与烟道计算	37
1.5 压缩性气体流动	43
1.5.1 压缩性气流的能量方程	43
1.5.2 压缩性气体流动的连续方程	44
1.5.3 压缩性气流中各参数的变化规律	45
1.5.4 压缩性气体经喷管的流动	47
1.5.5 压缩性气体的等温流动	50

1.6 气流喷射流	52
1.6.1 自由射流	52
1.6.2 限制射流	56
1.6.3 冲击射流	57
1.7 供风排烟装置	58
1.7.1 离心式风机	59
1.7.2 烟囱	65
思考题与习题	69
2 传热学基础	73
2.1 稳态导热	73
2.1.1 温度场	73
2.1.2 温度梯度	73
2.1.3 傅里叶导热定律	74
2.1.4 单层平壁传热	75
2.1.5 多层平壁导热	75
2.1.6 中间温度	76
2.1.7 单层圆筒壁导热	77
2.1.8 多层圆筒壁导热	78
2.1.9 多维导热	79
2.1.10 数值解法中的有限差分法	79
2.2 对流换热	82
2.2.1 对流换热概述	82
2.2.2 相似原理在对流换热中的应用	83
2.2.3 流体在管内强制对流换热的经验公式	89
2.2.4 流体横向绕流圆管的换热	92
2.2.5 流体绕过管束时的换热	93
2.2.6 自然对流换热	94
2.2.7 液体沸腾时的换热	96
2.2.8 蒸气凝结时的放热	98
2.3 辐射换热	100
2.3.1 辐射换热的基本概念	100
2.3.2 辐射能的吸收、反射和透射	100
2.3.3 热辐射的基本定律	101
2.3.4 角系数	103
2.3.5 物体表面间的辐射换热计算	105
2.3.6 气体辐射	111
2.4 稳态综合换热	115
2.4.1 气体与壁面间的换热	115
2.4.2 通过间壁的换热	116

2.4.3 换热器的传热计算	119
2.4.4 火焰炉内的综合换热	122
思考题与习题	126
3 燃料及燃烧	131
3.1 燃料的特性	131
3.1.1 燃料的化学组成	131
3.1.2 燃料发热量	133
3.2 燃烧计算	134
3.2.1 空气需要量、燃烧产物量及其成分的计算	135
3.2.2 燃烧产物密度的计算	137
3.2.3 空气消耗系数	138
3.2.4 燃烧温度的计算	138
3.2.5 理论燃烧温度的讨论	142
3.3 燃料燃烧及燃烧装置	143
3.3.1 煤气燃烧及煤气烧嘴	143
3.3.2 重油燃烧及重油喷嘴	151
3.3.3 重油掺水乳化燃烧法	156
3.3.4 原煤燃烧及层状燃烧室	157
3.3.5 粉煤燃烧及粉煤燃烧器	158
3.3.6 水煤浆燃烧及沸腾燃烧技术	160
3.3.7 蓄热式高温空气燃烧技术	161
3.4 燃烧污染与防治	161
3.4.1 烟尘的污染与防治	162
3.4.2 硫氧化物 (SO_x) 的污染与防治	162
3.4.3 氮氧化物 (NO_x) 的污染与防治	163
3.4.4 碳氧化物 (CO 、 CO_2) 的污染与防治	163
思考题与习题	164
4 耐火材料	166
4.1 概述	166
4.1.1 耐火材料在冶金工业中的地位和作用	166
4.1.2 冶金炉对耐火材料的要求	167
4.1.3 耐火材料的分类	167
4.1.4 耐火材料的一般生产过程	168
4.2 耐火材料的组成和性质	168
4.2.1 耐火材料的化学矿物组成	169
4.2.2 耐火材料的物理性质	170
4.2.3 耐火材料的工作性质	173
4.3 常用块状耐火制品	176

4.3.1 硅酸铝质耐火制品	176
4.3.2 氧化硅质耐火制品	178
4.3.3 碱性耐火制品	179
4.3.4 含碳耐火材料	181
4.4 不定形耐火材料	183
4.4.1 耐火混凝土	183
4.4.2 耐火泥	183
4.5 特种耐火材料	184
4.5.1 高温陶瓷材料	184
4.5.2 金属陶瓷	185
4.6 隔热耐火材料	185
4.6.1 中低温隔热材料	186
4.6.2 高温隔热材料	187
4.6.3 耐火纤维	189
思考题与习题	192
5 常用冶金炉	193
5.1 竖炉	193
5.1.1 概述	193
5.1.2 炉内物料运动和气体运动	193
5.1.3 料层内热交换	194
5.1.4 炉例——鼓风炉	194
5.2 火焰炉	200
5.2.1 回转窑	200
5.2.2 反射炉	208
5.3 沸腾炉	216
5.3.1 概述	216
5.3.2 沸腾床	216
5.3.3 沸腾床内热交换	218
5.3.4 沸腾炉单位生产率计算	220
5.3.5 沸腾炉主要尺寸的确定	221
5.3.6 炉体及主要部件	223
5.4 电炉	226
5.4.1 概述	226
5.4.2 电阻炉	227
5.4.3 矿热电炉	228
5.5 铝电解槽	235
5.5.1 铝电解槽的构造	235
5.5.2 铝电解槽的施工	238
5.5.3 铝电解槽的演变	238

5.5.4 大型铝电解槽的优点	239
5.6 炉子热平衡计算	240
5.6.1 热收入计算	241
5.6.2 热支出计算	241
5.6.3 热平衡方程与热平衡表	245
5.7 冶金炉(窑)节能	246
5.7.1 冶金炉(窑)节能途径	246
5.7.2 冶金炉窑节能实例——高温烟气余热的合理利用	247
5.8 工业炉窑设计基本知识	250
5.8.1 炉窑设计基本要求	250
5.8.2 炉窑设计内容与一般步骤	251
5.8.3 投资费用概算与经济评价	253
5.8.4 计算机辅助设计(CAD)与优化设计	254
习题参考答案	257
附录	260
附表1 气体的基本常数	260
附表2 干空气的物理参数(101325Pa)	260
附表3 水的物性参数(饱和线的水)	262
附表4 烟气($\varphi(\text{CO}_2) = 13\%$, $\varphi(\text{H}_2\text{O}) = 11\%$, $\varphi(\text{N}_2) = 76\%$) 的物理参数(101235Pa)	264
附表5 空气及煤气的饱和水蒸气含量(101325Pa)	264
附表6 局部阻力系数	265
附表7 4-72型高效率中低压离心通风机性能规格(4-72-11-No.8C)	269
附表8 C4-73-11型离心通风机性能规格(C4-73-11 No.306C)	269
附表9 各种不同材料在表面法线方向上的辐射黑度	270
参考文献	272

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。我国经济的快速发展和对能源需求的急剧增加，使能源问题成为制约社会持续发展的瓶颈，因此国家把工业炉（窑）的节能改造确定为“十一五”期间国家十大重点节能工程的首项工程。所以，研究炉（窑）热工过程的原理与热工计算、开发新型炉（窑）结构及现代设计方法，不仅对冶金与材料工业的发展与进步具有十分重要的意义，同时也是研究和解决“节能”与“环保”这两个当代重大社会问题、建设资源节约和环境友好型社会的重要科技领域。因此学习和掌握这方面的基本知识、理论和计算设计方法，对每一个冶金和热能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进行分类（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
用 途	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
热 源	自热炉、燃料炉、电炉
加热方式	火焰炉、倒焰窑（炉）、隔焰炉、盐浴炉、电阻炉、电弧炉、电子轰击炉、等离子体炉、矿热电炉、感应电炉
工作原理	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、气垫炉、熔池熔炼炉、悬浮熔烧炉
结构特点	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、碳管炉、钨棒炉、钼丝炉、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、运转结构等。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）热工过程是本书的主要研究对象，通常包括如下几个方面的内容：

- （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应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）能源有效利用研究的角度，则应是合

理组织上述四种过程,从图1所示的各个方面,降低工艺能耗。

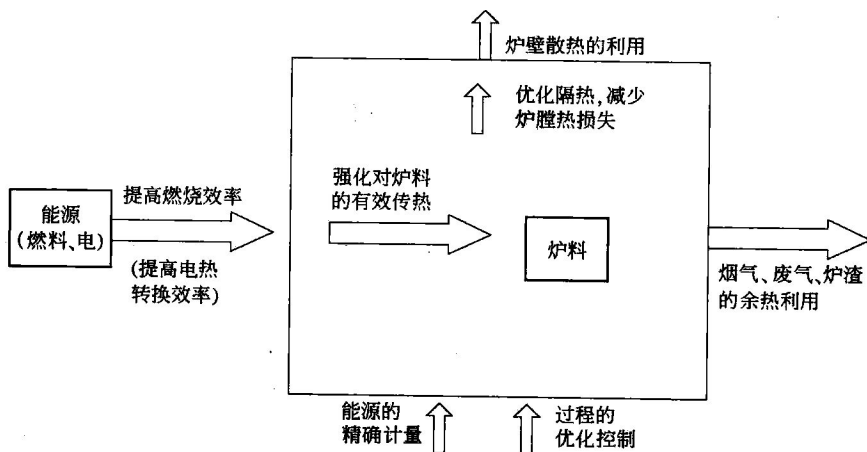


图1 工业炉（窑）节能的主要措施

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，本课程将相关的内容分为五部分，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。

本书的热工计算是基于普通计算方法的。随着计算机技术的发展和计算流体力学、计算传热学、计算燃烧学的兴起，炉窑的计算机仿真和优化得到了迅速发展。作者所在的以梅炽教授为带头人的学科梯队，从20世纪80年代初开始，先后对铝电解槽、矿热电炉、闪速炉等近20种典型的有色冶金炉（窑）进行了计算机仿真的研究，并通过对其中的流场、温度场、燃烧释热场、浓度场及电场、磁场的耦合模拟，优化了炉窑的设计和的操作。本书阐述的有关炉（窑）热工的基本知识，为炉窑的计算机仿真和优化研究奠定了一定的基础。

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定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（d）、质量单位中的吨（t）、体积单位中的升（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。

① 1993年国家标准局规定的有关量和单位的基本标准有15项，包括国际单位制及其应用，有关量、单位和符号的一般原则，空间和时间的量和单位，周期及其有关现象的量和单位，力学的量和单位，热学的量和单位，电学和磁学的量和单位，光及光电磁辐射的量和单位，声学的量和单位，物理化学和分子物理学的量和单位，原子物理学和核物理学的量和单位，核反应和电离辐射的量和单位，物理科学和技术中使用的数学符号，特征数，固体物理学的量和单位（见GB 3100~GB 3102.13），规定从1994年7月1日起在全国实施。

表 2 SI 单位制

物 理 量	单 位 名 称	单 位 代 号
基本单位	长 度	米
	质 量	千克 (公斤)
	时 间	秒
	电 流	安 [培]
	热力学温度	开 [尔文]
	发光强度	坎 (德拉)
	物质的量	摩 [尔]
辅助单位	[平面] 角	弧度
	立体角	球面度

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	$1\text{N} = 1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2$
压强、压力	帕 [斯卡]	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$
能、功、热量	焦 [耳]	J	$1\text{J} = 1\text{N} \times 1\text{m}$
功 率	瓦 [特]	W	$1\text{W} = 1\text{J/s}$
电 压	伏 [特]	V	$1\text{V} = 1\text{J}/(\text{A} \cdot \text{s})$
电 阻	欧 [姆]	Ω	$1\Omega = 1\text{V/A}$

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)	$2.648\times10^6\text{J}$
	1at (=1kgf/cm ²)	98066.5Pa		1kW·h	$3.6\times10^6\text{J}$
	1atm (标准大气压)	101325Pa		1W·h	$3.6\times10^3\text{J}$
	1mmH ₂ O (=1kgf/m ²)	9.80665Pa		1erg (尔格)	10^{-7}J
	1mmHg (=1托)	133.322Pa		1Btu (=0.252kcal)	1055.06J
动力 黏度	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
运动 黏度	1st (斯托克斯)	$10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$	热导率	1kcal/(m·h·℃)	1.163W/(m·K)
	1m ² /h	$277.8\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$		1cal/(cm·s·℃)	$41.868\times10^3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
温差	1℃ 1℉ (华氏度)	1K 5/9K		1Btu/(ft·h·℉)	1.73074W/(m·K)
				1Btu/(In·h·℉)	20.7689W/(m·K)
			1kcal/(m ² ·h·℃)	1.163W/(m ² ·K)	
			1cal/(cm ² ·s·℃)	41868W/(m ² ·K)	
比热容	1kcal/(kg·K)	4186.8J/(kg·K)	(放热 系数)	1Btu/(ft ² ·h·℉)	5.67827W/(m ² ·K)
				1cal/(cm ² ·s·℃)	41868.0W/(m ² ·K)

1 流体力学基础

1.1 流体力学基本概念

流体力学是研究流体的运动规律以及流体和固体之间相互作用的一门科学，它是力学的一个分支。流体力学研究的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，探求流体流经各种通道及绕流不同物体时的速度、压强的分布规律，确定能量转换和损失的计算方法，研究流体与固体之间的相互作用，以解决科学研究和工农业生产中遇到的有关流体流动的问题。

流体力学是冶金、水利、航空、造船、化工等许多工业部门以及燃烧学、传热学等学科的重要理论基础之一。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流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流体力学密切相关。

1.1.1 流体的主要物理性质

1.1.1.1 分散性与连续介质模型

流体的分子总是处在不停顿的无规则的紊乱运动状态，分子之间存在较大间隙，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。可见流体分子非常分散。

流体力学所研究的是流体在外力作用下的宏观机械运动，并不是个别分子的微观行为。工程研究与计算的对象也只是宏观力学性质（如压力、密度、速度等），这些参数都是大量分子行为和作用的统计平均效果，并不是单分子的随机运动特征。因此，在流体力学中，一般情况下，可以忽略流体微观结构的分散性，而将流体看作由无穷多一个紧挨着一个的连续质点构成的内部并不存在空隙的连续介质。这就是1753年欧拉首先提出的“宏观流体模型”——连续介质模型。这样，反映流体介质特性及运动规律的参数如密度、压力、黏度、速度、加速度等都可以认为在空间和时间上是连续分布的，可用连续函数加以描述。有关连续函数的一些数学方法将成为解决流体力学实际问题的有力工具。

当然，在真空，特别是高真空系统中，连续介质的概念是不真实的，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、膨胀性与不可压流体模型

流体在外力作用下，其体积或密度可以改变的性质，称为流体的可压缩性；而流体在温度改变时其体积或密度可以改变的性质，则称为流体的热膨胀性。

液体一般很难压缩，例如当压力为0.1~50.0MPa（1~500atm）、温度为0~20℃的范围内，每增加0.1MPa（一大气压），水的体积只被压缩0.05‰。其他液体的情况与之相近。在工程常用压力范围内，实际上可以认为液体是不可压缩的。温度升高时液体的体积略有膨胀，但变化很小。实验测定，一大气压下，在10~20℃范围内，温度每升高1℃，液体的体积增加

约 0.15‰。温度较高时，体积膨胀系数也不超过 1‰。其他液体的膨胀系数也很小，实际工程计算中，除个别特殊场合外，一般不考虑液体体积变化。

气体分子间距较大，彼此间的引力很小，当压力或温度发生变化时，其体积（比体积）、密度等都相应地发生变化。对于理想气体，这种变化的数量关系可用气体状态方程进行全面的概括。若用 p 表示气体的绝对压力（Pa）， V_μ 表示每千摩尔气体的体积（m³）， v 表示气体的比体积（m³/kg）， V 表示 G kg 气体的体积（m³），则状态方程为

$$pV_\mu = R_0 T \quad (\text{对 } 1\text{kmol 气体}) \quad (1-1a)$$

$$pv = RT \quad (\text{对 } 1\text{kg 气体}) \quad (1-1b)$$

$$pV = GRT \quad (\text{对 } G\text{ kg 气体}) \quad (1-1c)$$

式中， R_0 为通用气体常数，即单位质量的气体、温度升高 1K 时对外所作的膨胀功； R_0 的值一般取 8.314kJ/(kmol·K) 或 848kg·m/(kmol·K)； R 为具体气体常数，J/(kg·K)， $R = \frac{R_0}{M}$ ； M 为相对分子质量。

运用比体积与密度间的关系，气体状态方程还可以表示成

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-1d)$$

从状态方程可以看出，在一定温度下（ T 为常数），气体体积与压力（绝对压强）的关系为

$$pv = \text{const 或 } \frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (1-2)$$

当压力恒定时，状态方程变成

$$\frac{V}{T} = \text{const 或 } \rho T = \text{const} \quad (1-3)$$

式（1-3）还可以写成

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

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

式中， $\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273}$ ，1/K； t 为温度，℃； T 为绝对温度，K。

从上列各式看出，温度 T 和压强 p 的变化，都会引起密度的变化，即

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT$$

密度的相对变化率为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} dT = k dp - \alpha_T dT$$

式中， k 为流体的等温压缩系数，它表示在温度不变的情况下，增加单位压强所引起的密度变化率。当压强增加时，体积减小，密度增加，因此， k 也称为体积压缩系数。

$$k = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p}$$

α_T 称为温度膨胀系数，它表示在压强不变的情况下，增加单位温度所引起的密度变化率。

对于液体，体积压缩系数 k 很小，近似为常数。常使用它的倒数，称为体积弹性系数（弹

性模量), 记为 E , 单位与压强单位相同, N/m^2 。

$$E = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta \rho}$$

对流体进行力学分析时, 若密度或比体积为常数, 则可使分析计算过程大为简化。前已述及, 在工程常用压力、温度条件下几乎全部液体都可视为密度恒定的介质, 简称为不可压缩流体。对于气体, 也有很多工程问题是在压力变化不太大(压力变化小于 0.1 atm) 或流速不太高(u 小于 70 m/s) 的条件下进行, 这时气体的压缩程度很小, 为了简化, 也可忽略其密度变化而作为不可压缩流体处理, 只是用始末两状态的平均密度或平均比体积来考虑实际胀缩程度的影响。这种简化处理的概念称为流体的不可压缩模型。

当然, 随着流速的提高或压降增大, 气体压缩性的影响变得不可忽略, 这时不能再使用不可压缩模型, 而应按可压缩气体流动问题来处理(见 1.5 节)。

1.1.1.3 黏滞性与理想流体模型

在真实流体中, 当流体层以不同速度运动时, 由于分子的扩散或分子间相互吸引的影响, 在流体内部两流层的接触面上将产生摩擦力, 从而使不同流速的流层之间有动量交换发生。表征这一物理性质的特性参量称为黏性, 由此产生的力称为黏性力。

事实上, 黏性力是流体发生变形运动时, 贯穿于流体内部的作用力, 故也称为内摩擦力。这种力与作用面平行, 故又称为黏性切应力。黏性力的方向, 对流速大的流体层而言, 它与流速方向相反, 是阻碍流动的力; 相应的, 对流速小的流体层而言则是促使其加速的力。显然, 当流体处于静止时, 各部分之间的相对速度为零, 流体的黏性就表现不出来, 因此黏性力为零。

黏性力的大小可由牛顿内摩擦定律确定

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

或表示成剪切应力

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

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 η 称为该流体的黏度系数, 简称黏度。

从式 (1-7) 可见, η 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 N/m^2 , 速度梯度单位取 s^{-1} , 则黏度 η 的单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。因 η 具有动力学量纲, 又称动力黏度。还用到另一种黏度, 是流体动力黏度与密度之比, 用 ν 表示, 即

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

ν 具有运动学量纲, 故又称为运动黏度。

一般而言, 动力黏度随温度与压力而变化, 但压力的影响甚微, 只要压强不是特别高, 压强对动力黏度的影响就可以忽略。动力黏度与温度的变化关系比较复杂。研究表明, 由于液体的黏性主要通过分子间的引力(内聚力)体现出来的, 温度升高时, 分子间的内聚力减小, 因而黏度减小; 温度降低时, 分子间的内聚力增大, 因而黏度增大。而对于气体, 其黏性主要通过分子的热运动体现出来的, 温度升高时, 分子热运动加剧, 因而黏度增大; 反之则减小。必须注意气体的运动黏度中包含密度的因素, 故气体的运动黏度将受压力的影响。

各种流体黏度及其与温度的关系, 只能通过实测的方法才能得到。有关数据见附表 2。压力不太高时气体混合物的黏度可用下式估算

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

式中, X_B 、 M_B 分别为任一组分的摩尔分数和分子量。

自然界中的流体都具有黏性, 统称为黏性流体或实际流体。对于完全没有黏性的流体称为理想流体, 这是一种假想的实际并不存在的流体。但是, 引进理想流体的概念具有重要的实际意义。因为, 黏性流体的问题十分复杂, 这对研究实际流体的运动规律带来很大的困难。因此, 常常先将问题简化为不考虑黏性因素的理想流体, 找出规律后再考虑黏性的影响进行修正。

1.1.2 流体静压与静压头

1.1.2.1 流体静压力、压强

流体在机械压力、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。

当流体静止时, 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, 只是空间坐标的函数, 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, 流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

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

式中, m 为流体分子质量; n_0 为单位体积内分子数目; u 为流体分子的均方根速度。

当 n_0 增大, 流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) 中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 101325 Pa (即 1 atm 或 760 mmHg), 即指流体绝对压力而言。工程中流体的各种行为与运动均在大气压作用下的大环境中进行。所以对流体的机械运动和行作起作用的不是绝对压力的大小。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

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

当流体绝对压力 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。例如某系统内流体绝对压力为 70 kPa, 当地大气压为 100 kPa, 其表压即真空度为 30 kPa。

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

$$p = H\rho g \quad \text{N/m}^2 \quad (1-12)$$

$$H = p/\rho g \quad \text{m} \quad (1-13)$$

所以当所用流体密度 (ρ) 为常数时, 则液柱高即可直接表示压强或压力大小。

此外, 在高压流体范围往往用工程大气压作压力或压强单位 (at)。

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.96784 \text{ atm (标准大气压)}$$

[例 1-1] 压力单位换算。将 1 at 换算成相应的水柱高及帕斯卡 (N/m^2)。水与汞的密度

分别为 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{Hg}} = 13.6 \text{ kg/m}^3$ 。

[解]

$$1 \text{ at} = 0.96784 \text{ atm} = 0.96784 \times 760 = 735.56 \text{ mmHg}$$

$$p = H_{\text{汞柱}} \times \rho_{\text{Hg}} \times g = 735.56 \times 10^{-3} \times 13.6 \times 9.8 = 98064.9 \text{ N/m}^2$$

$$H_{\text{水柱}} = p / (\rho_{\text{H}_2\text{O}} g) = 98064.9 / (1000 \times 9.8) = 10 \text{ m}$$

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)	千克力/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^{-5}	10^{-4}	9.678×10^{-5}	1.0	0.073556	1.0
133.32	1.3332×10^{-5}	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

流体的相对静压（表压）是流体绝对压力超出环境气压的部分。显然，这是流体具有的一种势能。表压越高，该流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，该流体即不具备对外作功的能力。表压为负时，环境流体可对本系统作功，同样体现出具备一种势能。分析一下静压单位：

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

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

1.1.3 静止流体平衡方程

任何静止状态的流体只受到自身质量力（重力）与外界压力的作用。如图 1-1，静止的流体中，取一底面为 $A \text{ m}^2$ ，高度为 $H_3 \text{ m}$ 的流体柱。因为静止，此流体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）为 $p_1 A$ （垂直向上），3 面处总压为 $p_3 A$ （垂直向下），流体柱本身的质量力（体积力）为 $H_3 \rho g$ ，由于流体静止，则

$$p_1 A - p_3 A - H_3 \rho g A = 0$$

或

$$p_1 = p_3 + H_3 \rho g \quad (1-14)$$

同理可导出

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

对于流体柱中任何一面，设其距底面（1 面）高度为 H_i ，静压为 p_i ，密度为 ρ ，则可列出

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

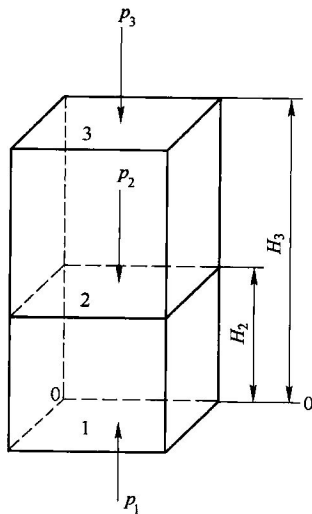


图 1-1 流体静压平衡