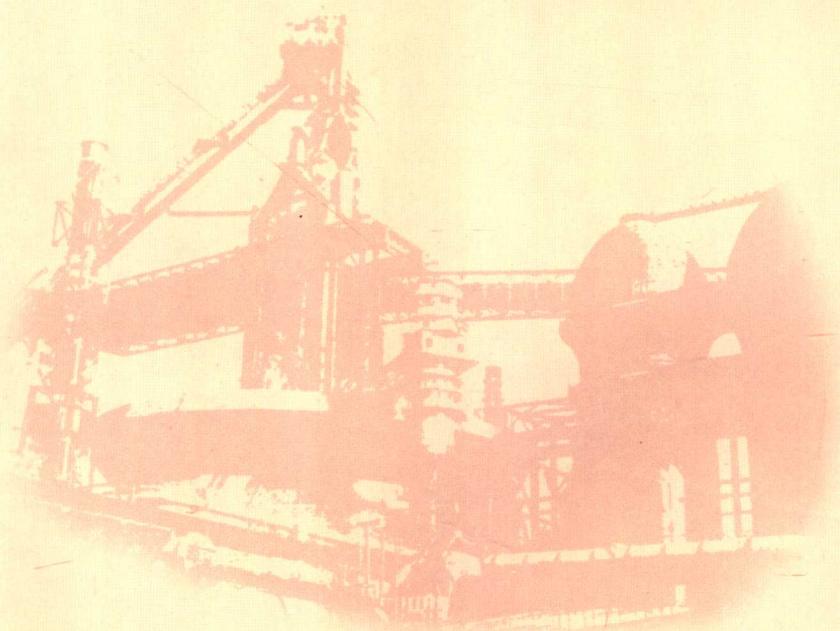


高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

冶金热工基础

朱光俊 曾红 阮开军 殷利 编著

蒋光羲 主审



冶金工业出版社

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

高等学校规划教材

冶金热工基础

朱光俊 曾 红 阮开军 殷 利 编著
蒋光羲 主审

北 京
冶金工业出版社
2007

内 容 提 要

本书由传输原理、热工计算、节能三部分组成。第一部分重点介绍了动量传输、热量传输、质量传输基本概念、基本定律及基本计算方法;第二部分重点介绍了燃料及燃烧计算、炉内气体流动计算、炉内传热计算公式及应用;第三部分介绍了节能方面的基础知识。书中各章均有小结、思考题与习题。书末附有习题参考答案、计算机参考程序和常用数据资料。

本书可作为冶金专业的教材,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金热工基础/朱光俊等编著. —北京:冶金工业出版社,2007.3

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4225-5

I. 冶… II. 朱… III. 冶金炉操作—高等学校—教材
IV. TF068

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 025141 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 杨 敏 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007 年 3 月第 1 版,2007 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20.75 印张; 548 千字; 318 页; 1—4000 册

36.00 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

随着科学技术的不断发展,特别是冶金新技术的不断涌现,对冶金过程及其热工过程理论的研究,提出了更高的要求。为满足现代冶金技术专业人才培养和工程技术人员培训的需要,按照冶金行业“十一五”教材出版规划的要求,我们编写了本书。书中内容由传输原理、热工计算和节能三篇组成。大多数冶金过程都是在高温、多相条件下进行的复杂物理化学过程,同时伴有动量传输、热量传输和质量传输现象。动量传输、热量传输和质量传输统称传输原理,亦称“三传”。它们构成了冶金过程中三个不可分割的物理过程。书中第1篇以质量守恒定律、牛顿第二定律和热力学第一定律为依据,从宏观上介绍“三传”问题,重点介绍冶金过程中常常遇到的动量传输、热量传输、质量传输的基本概念、基本定律及基本计算方法。结合培养应用型技术人才的要求,第2篇对冶金热工过程的一般现象,如燃料燃烧、炉内气体流动、炉内传热等也作了介绍,重点介绍燃料的燃烧计算、炉内气体流动的计算、炉内传热计算公式及应用。冶金企业是能源消耗大户,第3篇介绍了能源利用及节能必不可少的基础知识及冶金企业典型节能技术。为便于学生自主学习,书中各章均有小结、思考题与习题,书末附有习题参考答案和复杂计算的计算机参考程序。

本书由重庆科技学院的教师编写,第1篇中的动量传输由朱光俊编写,热量传输和质量传输由曾红编写;第2篇由阮开军编写;第3篇由殷利编写。全书由朱光俊统稿,蒋光羲主审。

本书的编写,得到了蒋光羲老师的大力帮助与支持,在此深表敬意!并对在编写过程中给予支持的邓能运及其他同事表示衷心的感谢!

本书可作为冶金专业的教学用书和冶金技术人员的培训教材,教材适用学时80~100。

由于水平有限,书中不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年12月

目 录

第1篇 传输原理

1 动量传输	2
1.1 流体的主要特性	2
1.1.1 流体的压缩性及膨胀性	2
1.1.2 流体的黏性及牛顿黏性定律	4
1.1.3 流体上的作用力、能量及动量	8
1.2 流体运动的基本特性	9
1.2.1 流体流动的分类	9
1.2.2 流体流动的两种状态	10
1.2.3 连续介质、质点、微团及控制体	12
1.2.4 流体运动的研究方法	13
1.2.5 流体的流量及流速	16
1.2.6 动量附面层概念	16
1.3 动量传输的基本定律	18
1.3.1 流体质量平衡方程式——连续性方程	18
1.3.2 黏性流体动量平衡方程式——纳维-斯托克斯方程	21
1.3.3 理想流体动量平衡方程式——欧拉(Euler)方程	25
1.3.4 流体机械能平衡方程式——伯努利(Bernoulli)方程	25
1.3.5 流体静力平衡方程式——静力学方程	34
1.4 流体动量传输中的阻力	37
1.4.1 不可压缩流体的管流摩阻	37
1.4.2 管流局部阻力损失	41
1.4.3 管流系统阻力损失	43
1.4.4 流体绕流摩阻	45
1.5 流体的流出	46
1.5.1 不可压缩流体自孔口的流出	46
1.5.2 液体自容器底部孔口的流出	48
1.5.3 可压缩流体自孔口的流出	49

1.6 射流	57
1.6.1 自由射流	57
1.6.2 两自由射流相互作用	59
1.6.3 半限制射流	61
1.6.4 限制射流	62
1.6.5 旋转射流	64
1.7 两相动量传输简介	68
1.7.1 气液两相流动	68
1.7.2 气固两相流动	70
1.8 相似原理及因次分析	79
1.8.1 相似的概念	79
1.8.2 相似定理	82
1.8.3 相似转换及特征数方程	83
1.8.4 因次分析及 π 定理	86
1.8.5 模型实验基础	88
小结	91
思考题与习题	92
2 热量传输	97
2.1 基本概念及基本定律	97
2.1.1 基本概念	97
2.1.2 基本定律	99
2.2 稳定导热	105
2.2.1 一维平壁稳定导热	106
2.2.2 一维圆筒壁稳定导热	110
2.3 对流换热	117
2.3.1 概述	117
2.3.2 流体流过平板时的对流换热	119
2.3.3 流体在管内流动时的对流换热	122
2.3.4 流体流过其他物体时的对流换热	129
2.3.5 自然对流换热	134
2.3.6 强制对流与自然对流共同存在时的对流换热	137
2.4 辐射换热	138
2.4.1 热辐射的基本概念	138
2.4.2 热辐射的基本定律	141
2.4.3 固体表面间的辐射换热	146

2.4.4 气体与固体间的辐射换热	156
2.4.5 对流与辐射共同存在时的热量传输	164
2.5 不稳定导热	164
2.5.1 不稳定导热中的基本概念	165
2.5.2 第三类边界条件下的薄材加热	167
2.5.3 第三类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	169
2.5.4 第一类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	172
2.6 导热的有限差分解法	174
2.6.1 有限差分法的基本概念	174
2.6.2 一维不稳定导热的差分解法	176
小结	178
思考题与习题	179
3 质量传输	182
3.1 质量传输的基本概念及基本定律	182
3.1.1 质量传输的基本概念	182
3.1.2 质量传输基本定律	185
3.2 扩散传质	189
3.2.1 稳定扩散传质	189
3.2.2 不稳定扩散传质	191
3.3 对流传质	192
3.3.1 对流传质的基本概念	192
3.3.2 流体绕流对流传质	194
3.4 动量、热量、质量传输的类比	196
3.4.1 雷诺类似律	196
3.4.2 柯尔本类似律	197
3.4.3 热量、质量传输共同存在时的类比关系	197
小结	198
思考题与习题	198

第2篇 热工计算

4 燃料及燃烧计算	200
4.1 燃料的特性	200
4.1.1 燃料的化学组成	200

4.1.2 燃料的发热量	203
4.1.3 冶金企业常用燃料	205
4.2 燃料的燃烧	207
4.2.1 气体燃料的燃烧	207
4.2.2 液体燃料的燃烧	209
4.2.3 固体燃料的燃烧	210
4.3 燃烧计算	210
4.3.1 气体燃料的燃烧计算	211
4.3.2 固、液体燃料的燃烧计算	214
4.3.3 空气消耗系数的计算	217
4.3.4 燃烧温度的计算	221
小结	225
思考题与习题	226
5 气体力学计算	227
5.1 热气体相对于大气的力学规律	227
5.1.1 热气体的压头	227
5.1.2 热气体平衡方程式	230
5.1.3 热气体管流伯努利方程式	230
5.1.4 热气体管流阻力损失计算	231
5.2 排烟系统及计算	232
5.2.1 烟囱	232
5.2.2 烟道	235
5.3 供气系统及计算	237
5.3.1 供气管道	238
5.3.2 常用风机简介	238
5.3.3 喷射器	241
小结	245
思考题与习题	245
6 两相热交换及计算	248
6.1 固定料层内热交换	248
6.1.1 料块内部热阻很小($Bi \leq 0.25$)时的热交换	248
6.1.2 炉气与料块间的换热系数	251
6.1.3 考虑料块内部热阻时的热交换	251
6.2 凝固传热	252

6.2.1 连铸凝固传热的分析解法	252
6.2.2 连铸凝固传热的差分解法	255
小结	256
思考题与习题	257

第3篇 节 能

7 节能基础知识	259
7.1 热平衡及烟平衡	259
7.1.1 热平衡	259
7.1.2 烟平衡	264
7.2 余热利用设备	268
7.2.1 换热器	269
7.2.2 蓄热室	276
7.2.3 热管简介	280
小结	281
思考题与习题	282
8 冶金企业节能技术举例	283
8.1 铁前系统干熄焦节能技术	283
8.2 炼铁系统高炉煤气余压发电	283
8.3 炼钢系统转炉煤气回收利用	284
8.4 新能源简介	285
8.5 能源利用对环境的影响	287
小结	287
思考题与习题	287
习题参考答案	288
附 录	291
附表	292
附图	307
计算机参考程序	312
参考文献	318

第 1 篇

传 输 原 理

冶金过程一般可分为化学及物理两大过程。冶金热工所研究的问题是物理过程的范畴,它不涉及化学反应等方面的问题。传输理论又称传输原理,构成物理系统方面的理论基础,传输理论是近代科学技术发展过程中出现的一门独立学科。传输与传递、转移同义,都是指自然界不同条件下的物质或能量随空间及时间的变化。所谓传输现象(Transport Phenomena)是指流体的动力过程、传热过程和物质传送过程等的统称。在这些过程中进行着动量、热量、质量的传递。三种过程具有类似的运动规律,能以类似的微分方程加以描述,因此可以通过某类现象去研究另一类现象,特别有利于存在两种以上现象的综合分析与解析。20世纪60年代初期,传输理论作为一门独立学科而出现,应用于许多科学技术领域之中,发展迅速,国外称之为关键工程学(Key Engineering Science),成为各类工程专业必修的基础学科。

从冶金热工理论的提出和发展来看,实际上也是从传输角度开始形成及逐步发展起来的。比如本世纪初提出的“炉子水力学原理”,被认为是炉子热工的最早理论,就是首先将流体动量传输的某些原则应用于炉子热工过程的分析。尔后出现的诸如“炉子能量理论”、“炉子一般原理”、“炉子现代理论”等,进一步把流体动量传输及热量传输的个别理论应用于炉子热工过程的研究和解析。随着冶金工业的发展及科学技术水平的不断提高,这些热工理论从深度及广度上已不能适应现代化生产的要求了。20世纪70年代初,传输理论直接引入冶金学科,与同时也极大地发展了热工过程理论及其研究方法。传输理论已成为现代冶金热工理论的基础。本书第1章至第3章将对动量、热量、质量传输的基本理论予以系统的、重点的介绍。

1 动量传输

物质及能量的传输过程,按其存在及产生的条件可分为物性传输和对流传输两大类。物性传输主要取决于物体本身的物性,而对流传输则是由于物体的宏观运动而引起,它不仅与物体的物性有关,还取决于物体的运动特性。由于物质及能量的传输过程本身就包含着时间概念,因此传输过程又有速率过程之称。

动量传输主要研究流体的性质及流动特性。它涉及的范围包括流体的静力学及动力学等。流体在流动过程中存在着各种力、能、动量之间的平衡与传递。力、能、动量的含义不同,但它们之间存在着内在联系,是不同条件下的不同表现形式。所以动量传输可理解为流体流动过程中力或能量的平衡及传递。

冶金过程中,流体的流动与传热及传质常常同时存在。例如,换热器中的高温气体把热量传给较低温度的器壁时,器壁受热升温,热量传输的速率与流体的性质及流动形式有关。又如,石墨溶于铁液的过程,其溶解速率与靠近石墨的铁液流动状况有关。所以动量传输可以被认为是传输现象中的最基本传输过程。

1.1 流体的主要特性

在自然界中能够流动的物质如液体及气体统称为流体。从物体的受力特点看,固体在受剪切力的作用下仅能表现为一定的变形,而且当作用力不变时,该变形就会停止。由于流体内部的内聚力极其微小,相对于拉力及剪切力来讲,它们都可以被认为是没有抵抗力的。当流体受到任何剪切力时就能连续变形(流动)。流体的流动性就是与固体不同的这种容易变形即流动的特性。由于气体分子的平均间距远大于液体,分子间的引力较小而更易自由流动,因此气体分子的自由运动使之能充满容器的空间。液体虽然也具有受容器限制的一定体积,但在其与气体共存于一定空间时,则存在着一定的自由表面。流体除流动性外还具有压缩性及黏性。

1.1.1 流体的压缩性及膨胀性

流体的体积随所受的压力增加而减小,或随温度的升高而增大称为流体的压缩性或膨胀性。流体的体积变化将引起密度的变化,密度是流体的一个重要特性参数。

1.1.1.1 流体的密度、重度及比体积

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度(ρ);单位体积流体所具有的重量称为流体的重度(γ)。

对质量分布不均匀的流体,某点密度的定义式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中 ΔV ——流体微元体积, m^3 ;

Δm ——微元体积的质量, kg 。

对质量分布均匀的流体(均质流体)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad kg/m^3 \quad (1-2)$$

式中 V ——流体的体积, m^3 ;

m ——流体的质量, kg。

均质流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \text{N/m}^3 \quad (1-3)$$

式中 G ——流体的重量, N;

g ——重力加速度, m/s^2 。

单位质量流体所具有的体积称为比体积, 用 v 表示, 显然, 比体积与密度互为倒数, 即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

重度的概念一般只在工程单位制中应用, 在国际单位制中常用 ρg 来代表, 但要注意其单位是 N/m^3 。常用流体的密度值, 可参考附表 1、附表 2、附表 3。

【例 1-1】 已知水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 空气的密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$, 试计算水及空气的重度与比体积。

解 按式(1-3), $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\gamma_{\text{水}} = 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3 \quad \gamma_{\text{空}} = 1.293 \times 9.81 = 12.68 \text{ N/m}^3$$

$$\text{按式(1-4)} \quad v_{\text{水}} = \frac{1}{\rho_{\text{水}}} = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{\text{空}} = \frac{1}{\rho_{\text{空}}} = \frac{1}{1.293} = 0.773 \text{ m}^3/\text{kg}$$

1.1.1.2 液体的压缩性及膨胀性

液体的分子本来靠得比较近, 当压缩液体时, 分子被挤压, 排斥力增大, 分子越靠近, 排斥力越大, 故液体很难压缩。例如, 水在 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 、 $0.1 \sim 50 \text{ MPa}$ 范围内, 每增加 0.1 MPa 水的体积只被压缩 $1/20000$, 其他液体的情况也与此相类似。所以在工程压力范围内, 可以认为液体是不可压缩的。液体温度升高时, 体积略有膨胀, 在 0.1 MPa 、 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内, 温度每升高 1°C , 液体体积仅增加 $1.5/10000$ 。温度较高时体积膨胀系数也不超过 $1/1000$ 。故在实际工程计算中, 一般不考虑液体的体积变化。

1.1.1.3 气体的压缩性及膨胀性

气体分子间距较大, 彼此间的吸引力小, 当压力或温度发生变化时, 其体积(或比体积)、密度(或重度)等将发生很大变化。对理想气体而言, 这种变化的数量关系可用气体状态方程式表示, 即

$$pV_m = R_0 T \quad (\text{对 } 1 \text{ kmol 气体}) \quad (1-5)$$

$$pv = RT \quad (\text{对 } 1 \text{ kg 气体}) \quad (1-6)$$

$$pV = GRT \quad (\text{对 } G \text{ kg 气体}) \quad (1-7)$$

式中 R_0 ——通用气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

R ——气体常数, 随气体种类而异, 且 $R = R_0/M, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; M 为气体的分子量;

p ——气体的绝对压力;

v ——气体的比体积;

V_m ——千摩尔气体的体积;

V —— G 千克气体的体积。

气体在等温压缩时, 根据式(1-6)得

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-8)$$

式中 p_1, p_2 ——两种状态下气体的压力, Pa(N/m²);

v_1, v_2 ——两种状态下气体的比体积, m³/kg。

由式(1-4)及式(1-8)可得

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 &= \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \\ \gamma_2 &= \gamma_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 ρ_1, ρ_2 ——两种状态下气体的密度, kg/m³;

γ_1, γ_2 ——两种状态下气体的重度, N/m³。

气体在恒压膨胀时, 根据状态方程式, 下式成立

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad \text{或} \quad v_2 = v_1 \frac{T_2}{T_1} \quad (1-10)$$

式中 T_1, T_2 ——气体在两种状态下的温度, K。

若设气体在 $t^\circ\text{C}$ 下的比体积为 v_t , 标准状态下的比体积为 v_0 , 则对式(1-10)可转换为

$$v_t = v_0(1 + \beta t) \quad (1-11)$$

式中 β ——气体的膨胀系数, 1/273。

因此可以得到

$$\left. \begin{aligned} \rho_t &= \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \\ \gamma_t &= \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式(1-11)中的比体积可以用气体的体积或体积流量 q_v (单位时间通过一定截面气体的体积, m³/s)来表示, 则体积流量、流速与温度之间的关系为

$$q_{v_t} = q_{v_0}(1 + \beta t) \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-13)$$

$$v_t = v_0(1 + \beta t) \quad \text{m/s} \quad (1-14)$$

气体在绝热状态下压缩时, 由热力学决定的压力及比体积关系为

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \quad \text{或} \quad v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1-15a)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1-15b)$$

式中 k ——气体的绝热指数, $k = c_p/c_v$;

c_p ——气体的比定压热容, kJ/(kg·K);

c_v ——气体的比定容热容, kJ/(kg·K)。

各种常见气体的气体常数 R , 比热容(包括比定压热容及比定容热容) c_p, c_v , 以及绝热指数 k 的数值可查附表3。

1.1.2 流体的黏性及牛顿黏性定律

1.1.2.1 流体的黏性及黏性力

在自然界中, 实际流体流动时, 其本身所表现出的一种阻滞流体流动的性质称为黏性。流体的黏性是由流体分子之间的内聚力和分子的扩散而造成的。流体与另一流体表面或固体表面接

触时表现为流体分子对表面的附着力。

现以图 1-1 说明黏性力的建立过程及其特征。设有黏性的流体充满两平行平板之间,上板固定,下板以不变的速度 v_0 运动。当下板开始移动的瞬间($\tau=0$ 时刻),附着于下板的流体薄层亦随之以 v_0 的速度开始运动,如图 1-1a 所示。由于靠近平板流体薄层的运动,与之相邻的流体因黏性作用亦被带动并按同一方向流动,如图 1-1b 所示。经过一段时间以后,两平板之间的流体逐次被相邻流层所带动,形成如图 1-1c 所示的稳定状态。从图中看出流速沿 y 方向变化且为线性分布规律。若流速沿 y 方向不是线性分布规律,则如图 1-2 所示。无论速度分布规律如何,当这种速度分布规律不随时间变化时,即处于稳定状态时,流体内部流层及流体与平板之间会出现速度差。由于分子的热运动,一部分流体分子由较快的一层进入较慢的一层,也有一部分流体分子由较慢的一层进入较快的一层,这样在两流层之间就产生动量交换。较快的一层显示出一种拉力(拖力)带动较慢的一层,而较慢的一层则显示出一种与拉力大小相等、方向相反的阻力(滞力)阻止较快的一层前进,这一对力称为切应力。分子之间的内聚力对相邻两流层也起着带动或阻止流动的相互作用。所以,分子的热运动及内聚力是产生切应力的根源。流体流层间产生切应力的现象叫流体的黏性,而这种切应力称为黏性力。一般称流体内部流层之间的黏性力为内摩擦力,流体与表面之间的黏性力为摩擦力。

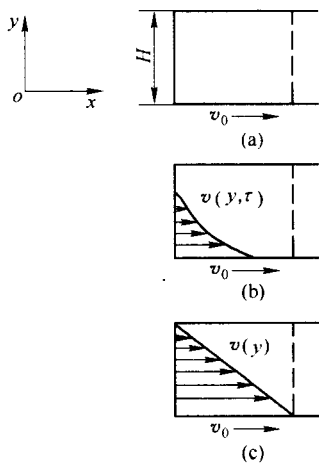


图 1-1 流体的黏性

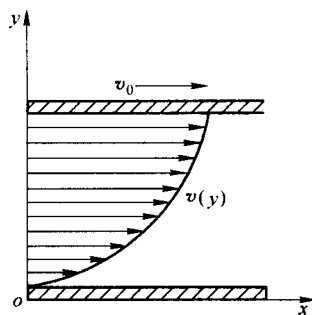


图 1-2 非线性流速分布

1.1.2.2 牛顿黏性定律

牛顿在 1686 年就提出了黏性定律的假说,直到 1841 年为普阿节尔通过实验所证实。牛顿定律指出,流体的黏性力(F)与速度(v_0)成正比,与接触面积(A)成正比,与两板距离(H)成反比。数学表达式为

$$F \propto \frac{v_0}{H} A \quad (1)$$

若求两流层之间的黏性力 F ,按图 1-1 的情况为

$$F \propto \frac{\Delta v}{\Delta y} A \quad (2)$$

按图 1-2 的情况为

$$F \propto \frac{dv}{dy} A \quad (3)$$

式(2)是式(3)的特殊情况,将式(3)写为等式,则

$$F = \mu \frac{dv}{dy} A \quad \text{N} \quad (1-16a)$$

单位面积上的黏性力,即切应力 τ_{yx} (表示在 y 方向有速度变化,流向为 x 方向)为

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \pm \mu \frac{dv}{dy} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-16b)$$

式中,正负号的出现是因为: τ_{yx} 为正值, μ 亦为正值,而 dv/dy 可为正也可为负,为了保证 τ_{yx} 为正值,所以在 dv/dy 为负时,公式前取负号。

1.1.2.3 黏性系数

由式(1-16)可以看出, μ 为决定流体黏性的比例系数,称为流体的动力黏性系数或动力黏度。 μ 的单位为导出单位,可由式(1-16b)导出

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{dv/dy} \quad \text{N} \cdot \text{s/m}^2 (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-17a)$$

式中, μ 的物理意义为,在 y 方向的速度变化率 dv/dy (称速度梯度,即为垂直于流体流动方向的速度变化率)为一单位时,单位面积上的黏性力。

为了应用上的方便, μ 可以用运动黏度 ν 来表示,它被定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-17b)$$

一般来讲压力变化对流体的黏性没有多大影响,可以认为黏度仅与温度有关。

水的黏度 ν 与温度间的关系可用下面的经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0837t + 0.000221t^2} \quad \text{cm}^2/\text{s} \quad (1-18a)$$

液体分子的间距小,它的黏性以分子内聚力为主,所以液体黏度随温度升高而减小。

气体分子间距大,内聚力小,黏性主要由分子热运动产生,所以温度升高 μ 值增大,可用下式作近似计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1-18b)$$

式中 μ_0 ——气体在 0°C 时的黏度;

T ——气体的绝对温度, K;

C ——实验常数。

常见气体的 μ_0 、 C 值见附表 4。混合气体的黏度按下式近似计算

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \% \cdot M_i^{\frac{1}{2}} \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i \% \cdot M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-19)$$

式中 φ_i ——混合气体中 i 组分的体积分数;

M_i ——混合气体中 i 组分的分子量;

μ_i ——混合气体中 i 组分的黏度。

[例 1-2] 天然气燃烧的烟气成分(体积)为: CO_2 8.8%, H_2O 17.4%, N_2 72.1%, O_2 1.7%; 烟气的密度 $\rho = 1.24 \text{ kg/m}^3$ 。试计算烟气在 819°C 时的黏度。

解 按式(1-18b)计算各组份在 819°C 时的动力黏度

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (\mu_0, C \text{ 查附表 4})$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 13.80 \times 10^{-6} \times \frac{273+254}{819+273+254} \times \left(\frac{819+273}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 43 \times 10^{-6}$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 8.93 \times 10^{-6} \times \frac{273+961}{1092+961} \times \left(\frac{1092}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 42.9 \times 10^{-6}$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 16.60 \times 10^{-6} \times \frac{273+104}{1092+104} \times \left(\frac{1092}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 41.86 \times 10^{-6}$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 19.20 \times 10^{-6} \times \frac{273+125}{1092+125} \times \left(\frac{1092}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 50 \times 10^{-6}$$

按式(1-19)计算烟气的黏度

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \% \cdot M_i^{1/2} \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i \% \cdot M_i^{1/2}} \\ &= \frac{8.8 \times 44^{1/2} \times 43 + 17.4 \times 18^{1/2} \times 42.9 + 72.1 \times 28^{1/2} \times 41.86 + 1.7 \times 32^{1/2} \times 50}{8.8 \times 44^{1/2} + 17.4 \times 18^{1/2} + 72.1 \times 28^{1/2} + 1.7 \times 32^{1/2}} \times 10^{-6} \\ &= 42.28 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\text{烟气的运动黏度为 } \nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{42.28 \times 10^{-6}}{1.24} = 34.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

【例 1-3】 两平行平板相距 3.2 mm, 下平板不动, 上平板以 1.52 m/s 的速度运动。欲使上平板保持运动状态, 需施加 2.5 N/m² 的力。试求两平板间流体的动力黏度。

解 因两平行平板间距很小, 设速度呈线性分布, 则用式(1-17a)计算:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dy} &= \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{1.52}{3.2 \times 10^{-3}} = 4.75 \times 10^2 \text{ } \frac{1}{\text{s}} \\ \mu &= \frac{\tau_{yx}}{dv/dy} = \frac{2.5}{4.75 \times 10^2} = 5.26 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

1.1.2.4 黏性动量传输及动量通量

牛顿黏性定律说明了黏性力的起因和特点, 它也可以说明流体的黏性所构成的动量传输过程。黏性是流体的物性, 故黏性动量传输属于物性传输。

由于流体本身具有一定的质量, 速度不等的流层就意味着各流层的动量不等; 一个流层带动另一个流层运动, 这说明前者将动量传给后者。也就是说不同流层之间的这种黏性力作用就是流体进行着动量传输。

单位时间通过单位面积所传递的动量称为动量传输通量, 相当于单位面积上的作用力。在速度不等的流层之间单位面积上的黏性力 τ_{yx} 已由式(1-20)所确定, τ_{yx} 也就是黏性动量通量。即

$$\tau_{yx} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho v_x)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho v_x)}{dy} \text{ Pa} \quad (1-20)$$

流体的密度 ρ 为单位体积流体的质量, 则 $d(\rho v_x)/dy$ 相应为单位体积流体在 y 方向的动量梯度, 其单位为 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^4}$ 。 τ_{yx} 的单位为 N/m^2 或改写为 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, 即单位面积单位时间的动量, 称为黏性动量通量。运动黏度称为黏性动量传输系数。

黏性动量与黏性力的不同之处在于传递方向的不同。黏性动量从高速流层向低速流层方向传递, 正如热量由高温向低温传递一样。黏性力的方向与流向平行, 对快速流层, 与流动方向相

反;对慢速流层,与流动方向相同。

1.1.2.5 理想流体模型

流体的黏性及其影响因素都比较复杂,这就给研究流体运动规律带来很多不便,因此流体动量传输中常采用理想流体(无黏性流体)模型。此模型假定流体不存在黏性,即无黏性力。在处理实际流体(黏性流体)时,首先运用理想流体模型求出理论分析解,再借助实验手段对实际流体所存在的黏性加以修正和补充,使理论与实际统一起来。需注意的是,这里的理想流体模型与气体状态方程式中的理想气体不是同一概念,后者忽略了气体分子间的吸引力,为了区别起见,有时将后者称为“完全气体”。

1.1.3 流体上的作用力、能量及动量

作用在流体上的力可分为表面力及体积力两大类。

表面力是指作用在流体表面上(包括流体与固体的界面,不同流体之间的界面及流体内部流层之间的界面)与表面积成比例的力。表面力的产生是由于分子运动的结果。最常遇到的表面力是压力(指压强)。压力是流体分子运动对器壁所施加的力,对流体而言则为器壁对流体表面的力。无论静止的流体或运动的流体都存在这种作用力。流体的压力有两个基本特征。其一是,流体的压力作用方向与作用面垂直并指向作用面,如图 1-3 所示。从流体中取出的任一体积,

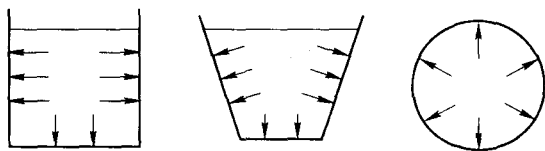


图 1-3 流体的静压力

其表面上的压力均具有此特性。其二是,流体中任一点上的压力在各个方向上均相同,而且任一点的压力可传向各方,所以压力是标量,但总压力是矢量。当压力在流体内部传递过程中如果不存在其他因素的影响(如其他作用力及能量)则其值不变。另一种表面力为

切应力即黏性力。黏性力的作用方向与表面平行,且出现在有相对运动的流层界面上,因此,若流体内部无相对运动就没有黏性力存在。

体积力是指作用在流体内部质点上的力,其大小与流体的质量成正比,故又称质量力。重力、惯性力、电磁力等都是质量力。质量力的作用点一般认为在物体的重心上。

下面再看流体在流动过程中的能量、动量以及与作用力的关系。

流体在流动过程中的三种基本能量为

$$\left. \begin{array}{lll} \text{位能} & mgh & \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} \\ \text{动能} & \frac{1}{2} mv^2 & \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{N} \cdot \text{m} \\ \text{静压能} & p \cdot V & \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} \end{array} \right\} \quad (1-21)$$

式中 m ——流体的质量, kg;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

h ——从基准起计算的高度, m;

v ——流体的流速, m/s ;

p ——流体的压力, N/m^2 ;

V ——流体的体积, m^3 。

流体在运动中具有的三种相应作用力为