

高等学校教材

# 冶金传输原理

(Principles of Transfer in Metallurgy)

华建社 朱 军 李小明 马幼平 编

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书共分三篇,从介绍传输过程的机理出发,全面系统地讲述了动量传输、热量传输和质量传输过程的基本物理现象、规律、概念以及处理问题的基本方法,并对传输原理在冶金工程、材料加工及制备方面的应用做了重点介绍。书中各章均附有例题及习题。

本书可供高等学校冶金工程、材料成型及控制工程、材料加工工程、热能工程和化学工程与工艺等专业作为教材使用,也可作为相关专业的研究生及工程技术人员参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

冶金传输原理/华建社等编. —西安:西北工业大学出版社,2005.5

ISBN 7-5612-1904-0

I. 冶… II. 华… III. 冶金—过程—传输—高等学校—教材 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 014844 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号,邮编:710072 电话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西兴平印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.5

字 数:412 千字

版 次:2005 年 5 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

# 前 言

本书是根据高等学校冶金工程专业本科生培养计划中冶金传输原理课程教学大纲编写的,作为冶金工程、材料成型及控制工程、材料加工工程、化学工程与工艺等专业的本科生的教学用书,各专业可根据自身特点及需要,在内容上加以取舍。

随着科学技术的发展,各类工程专业基础学科不断扩大,传输原理已在原有流体力学、传热学、传质学以及冶金炉热工基础上形成了较系统的基础理论,成为一门独立的学科,是冶金类专业必修的技术基础课程之一。

本书在编排上分三篇,内容力求体现加强基础、便于自学、联系实际的原则。第一篇为动量传输,包括第1章至第7章,介绍了动量传输的基本概念和定律,为了易于理解理论知识,加强了基本概念的叙述,注重内容的系统性,保留了流体力学中流体静力学的一些内容。第二篇为热量传输,包括第8章至第13章,介绍了热量传输基本概念和定律,同时增加了冶金炉中热量传输和材料加工中的热量传输部分,以增强读者对热量传输基本理论的理解,提高实际应用能力。第三篇为质量传输,包括第14章至第17章,介绍了质量传输基本概念和定律。本书虽是按动量、热量、质量的纵向方法编写,但又从传输理论系统的整体性出发,各章内容前后联系、循序渐进,力图从物理上和数学上阐明动量、热量和质量传输之间的相似性,用对照的方法研究三种传递过程,加强读者对三种传递过程的理解。

冶金传输原理是一门数理解析较重的课程,在本书内容的阐述和解析方法上,着眼于物理概念和数学表达的统一,并突出物理性课程的特点,而且力图提炼出简化的物理模型和数学模型。借助于计算机模拟及计算,利用有限差分及有限元等数值计算方法,已成为解析传输过程偏微分方程的主要手段。限于篇幅,对计算机模拟及计算请参阅有关参考书。

本书由西安建筑科技大学冶金工程学院的教师合作分工编写,其中第1至7章由李小明编写,第8至13章及绪论和附录由华建社编写,第14,16,17章由朱军编写,第15章由马幼平编写,全书由华建社主编,并由赵俊学教授审阅。

本书在编写过程中,得到了徐德龙院士、马杰教授的帮助和支持,在此表示衷心的感谢!并向本书引用参考文献的原著者和编撰者表示诚挚的感谢!对所有为本书提供资料及建议的同行也表示衷心的感谢!

由于编写水平及掌握资料所限,不当之处在所难免,敬请批评指正。

编 者

2004年10月

# 主要符号



$A$	面积, $\text{m}^2$	$g$	重力加速度, $\text{m}^2/\text{s}$
$E$	辐射能, $\text{W}/\text{m}^2$	$h$	对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
$G$	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	$h_1$	局部阻力, $\text{J}/\text{kg}$
$L$	长度, $\text{m}$	$h_f$	摩擦阻力, $\text{J}/\text{kg}$
$M$	分子量	$m$	质量, $\text{kg}$
	质量流量, $\text{kg}/\text{s}$	$p$	压力, $\text{Pa}$
	马赫数	$q$	热通量, $\text{W}/\text{m}^2$
$P$	压强, $\text{Pa}$	$r$	半径, $\text{m}$
$Q$	体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$	$t$	时间, $\text{s}$
	热流量, $\text{W}$	$u$	速度, $\text{m}/\text{s}$
$R$	气体常数, $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$	$\nu$	比容, $\text{m}^3/\text{kg}$
	热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$\lambda$	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
$T$	摄氏温度, $^\circ\text{C}$		辐射波长, $\text{m}$
	热力学温度, $\text{K}$	$\delta$	厚度, $\text{m}$
$V$	体积, $\text{m}^3$	$\mu$	动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
$a$	热量传输系数, $\text{m}^2/\text{s}$	$\nu$	运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$
$b$	宽度, $\text{m}$	$\xi$	局部阻力系数
	蓄热系数, $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$	$\rho$	密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$c$	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\tau$	黏性力, $\text{N}/\text{m}^2$
	辐射系数, $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$		时间, $\text{s}$
$c_V$	气体的定容比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\varepsilon$	黑度
$c_p$	气体的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\varphi$	角度, 角度系数
$d_e$	当量直径, $\text{m}$	$\theta$	角度
$f$	摩擦阻力系数	$D$	扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 动量传输

第 1 章 动量传输的基本概念	4
1.1 连续介质	4
1.2 流体的性质	4
习题与思考题	10
第 2 章 流体静力学	11
2.1 作用于流体上的力	11
2.2 流体静力学平衡微分方程	11
2.3 流体静力学基本方程	13
2.4 双流体静力学基本方程	14
习题与思考题	15
第 3 章 流体动力学	16
3.1 流体流动的基本特征	16
3.2 流体流动的连续性方程	23
3.3 实际流体的动量平衡微分方程(奈维-斯托克斯方程)	25
3.4 理想流体动量平衡微分方程(欧拉方程)	29
3.5 流体机械能平衡方程(伯努利方程)	29
3.6 伯努利方程的应用——烟囱	33
习题与思考题	36
第 4 章 相似理论及因次分析	38
4.1 相似理论基础	39
4.2 因次分析及 $\pi$ 定理	43

4.3 相似模型法	45
习题与思考题	48
<b>第5章 流体动量传输中的阻力损失</b>	<b>49</b>
5.1 不可压缩流体的摩擦阻力	49
5.2 局部阻力	53
5.3 管路系统的阻力	56
5.4 绕流阻力	56
5.5 减少流体阻力的途径	57
习题与思考题	58
<b>第6章 流体的流出</b>	<b>60</b>
6.1 不可压缩流体自小孔的流出	60
6.2 可压缩流体的流出	62
习题与思考题	67
<b>第7章 射流</b>	<b>68</b>
7.1 自由射流	68
7.2 半限制射流——射流与平面相遇	71
7.3 限制射流	72
7.4 喷射器	72
习题与思考题	75

## 第二篇 热量传输

<b>第8章 热量传输的基本概念</b>	<b>78</b>
8.1 热量传输方式	78
8.2 温度场、等温面和温度梯度	79
8.3 傅里叶导热定律	80
8.4 导热系数与热量传输系数	81
习题与思考题	83
<b>第9章 传导传热</b>	<b>85</b>
9.1 傅里叶-克希荷夫导热微分方程	85
9.2 一维稳态导热	88
9.3 二维稳态导热	93
9.4 非稳态导热的基本概念	95
9.5 第一类边界条件——表面温度为常数时半无限厚大平板的非稳态导热	97

9.6	第三类边界条件——薄材在恒温介质中的加热	99
9.7	第三类边界条件——周围介质温度为常数时有限厚物体的加热与冷却	101
9.8	简单多维非稳态导热	105
	习题与思考题	107
<b>第10章</b>	<b>对流传热</b>	<b>109</b>
10.1	对流传热的基本概念	109
10.2	流体流过平板时的强制对流传热	111
10.3	流体在管内流动的强制对流传热	116
10.4	自然对流传热	128
	习题与思考题	131
<b>第11章</b>	<b>辐射传热</b>	<b>132</b>
11.1	辐射传热的基本概念	132
11.2	辐射传热的基本定律	133
11.3	灰体及实际物体的辐射与吸收	134
11.4	固体表面间的辐射传热	137
11.5	气体辐射	143
	习题与思考题	148
<b>第12章</b>	<b>冶金炉中热量传输</b>	<b>150</b>
12.1	火焰炉炉膛内的热交换	150
12.2	散料层内的热交换	154
12.3	换热器热交换	158
12.4	冶金炉热平衡	164
	习题与思考题	168
<b>第13章</b>	<b>金属材料加工中的热量传输</b>	<b>169</b>
13.1	凝固过程传热	169
13.2	热处理过程传热	172
13.3	焊接过程传热	174
13.4	粉末制备中液滴的冷却	176
	习题与思考题	177

## 第三篇 质量传输

<b>第14章</b>	<b>质量传输概论</b>	<b>180</b>
14.1	质量传输的基本概念	180

14.2	分子扩散的速度与通量	182
14.3	传质微分方程	186
	习题与思考题	190
<b>第 15 章</b>	<b>扩散传质</b>	<b>192</b>
15.1	费克第一定律与扩散系数	192
15.2	稳态扩散传质	199
15.3	费克第二定律与非稳态扩散传质	210
	习题与思考题	214
<b>第 16 章</b>	<b>对流传质</b>	<b>216</b>
16.1	对流传质的基本概况	216
16.2	对流传质简化模型	218
16.3	流体流过物体表面时的对流传质	219
16.4	量纲分析在对流传质中的应用	225
16.5	动量、热量与质量传递之间的类比	228
	习题与思考题	231
<b>第 17 章</b>	<b>相际间的质量传递</b>	<b>233</b>
17.1	不同相间的传质	233
17.2	相际传质理论	235
17.3	相际传质理论的应用	239
	习题与思考题	245
	附录	246
	参考文献	256

# 绪 论



传输过程是动量传输、热量传输与质量传输的总称,简称“三传”(Momentum, Heat and Mass Transfer)或传递现象(Transport phenomena),是工程技术领域中普遍存在的物理现象,在冶金、材料、机械、能源及化工等领域,经常会有传输现象发生。随着科学技术的发展,传输理论已成为一门独立学科,并应用于许多工程领域之中。

传输过程可以看成是在某物质体系内描述其物理量(如温度、速度、组分浓度等)从不平衡状态向平衡状态转移的过程。所谓平衡状态,是指在体系内物理量不存在梯度,如热平衡是指物系内的温度各处均匀一致,反之则物系处于不平衡状态。在不平衡状态,由于物系内物理量不均匀将发生物理量的传输,如冷、热两物体互相接触,热量会由热物体传向冷物体,直到两物体的温度趋于均匀,此时冷、热两物体温度差就是热量传输的动力。

传输原理主要是研究传输过程的传递速率大小与传递推动力及阻力之间的关系。在传输过程中所传输的物理量为动量、热量和质量。动量传输是指在流体流动中垂直于流体流动方向上,动量由高速度区向低速度区的转移;热量传输是指热量由高温区向低温区的转移;质量传输则是指物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移。当物系中存在着速度、温度与浓度梯度时,则分别发生动量、热量和质量的传输过程。动量、热量和质量的传递,既可由分子的微观运动引起的分子扩散传递,也可由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。

在实际工业生产过程中,许多过程最终都可以归结为动量、热量和质量的传输或传递。从20世纪中叶以来,人们开始用统一的观点来研究上述三种传输过程,可以说传输理论对过程工业的发展,尤其是化工、冶金等学科起着重要的作用,传输原理实际上是一门探讨传递速率的理论。

动量、热量和质量三种传输过程有其内在的联系,三者之间具有许多相似之处。在连续介质中发生的“三传”现象有着共同的传递机理,因而对其主要参数描述完全相同(如牛顿黏性定律、傅里叶定律、费克定律的相似性),这就是“三传”现象之间的类似性。由于“三传”过程的类似性,它们不但可以用类似的数学模型描述,而且描述三者的一些物理量之间还存在着某些定量关系。可以用这些类似关系和定量关系研究各种传输过程。另外,在工程实际中,三种传输过程常常是同时发生。

传输过程是一种物理过程,通常有理论研究、实验研究和数值计算三种方法。

(1) 理论研究方法。传输理论以质量守恒定律、牛顿第二定律和热力学第一定律为基础,从宏观上研究传输问题。采用的分析方法是微元平衡法,得到描述传输体系的微分方程或积分方程,其解是在一定条件下的速度分布、温度分布和浓度分布;或者是在一定条件下体系的

进出口各物理量之间的关系。具体研究步骤为：① 确定简化的物理模型。通常可以依靠观察、实验和分析，弄清影响体系的主要因素，提炼出简化的物理模型。② 建立数学模型。对物理模型，根据物理基本定律建立数学方程，由实际传输过程的具体特点列出相应的定解条件（即初始条件和边界条件），将物理问题变成数学问题。③ 数学求解。利用相关的数学方法解出问题的解，并与实验或观察结果比较，确定解的准确程度以及适用范围。

(2) 数值计算方法。传输方程常常是二阶非线性偏微分方程组，如果研究对象是三维空间或边界条件复杂时，特别是对复杂的传输过程，采用数学解析方法往往不能获得其解。数值计算是借助计算机采用近似计算方法（如有限差分法、有限元法等）求解传输方程而获得数值解的有效方法。数值计算方法的优点是能够解决理论研究无法解决的复杂问题，并且与实验相比所需的费用和时间都较少，精度较高。但是，数值计算法所得结果是散点，不容易看出各个物理参数对解的影响。另外，求解的前提必须有描述过程的精确的数学方程，这样才能获得满意的结果。

(3) 实验研究方法。实验研究方法在传输过程中有着非常广泛的应用，简化物理模型的提出，需要实验提供依据；计算结果的正确性、可靠性，需要实验来检验；当研究的问题复杂，数学模型不易建立，或虽有数学模型但因方程复杂或边界条件复杂难于求解时，实验研究或基于相似理论的模型实验研究就显得特别重要。实验研究方法的主要特点是能在与所研究的问题完全相同或基本相同的条件下进行观测，所以实验研究得出的结果一般是可靠的。但是，实验方法常受模型尺寸以及边界条件不能完全满足等问题所限制。

在传输问题的研究中，理论、计算和实验三种研究方法相互补充，取长补短。本书的内容主要介绍理论研究方法及一些实验研究方法。

现代工程技术人员无论从事新产品、新工艺的研究还是进行过程设计、机械设计和制造、自动控制，都需要应用传输理论的基本知识。传输理论对过程开发、设计、生产操作、优化控制及过程机理的研究都有重要的实用意义。

通过本书的学习，可以深入了解传输过程的机理，对于改进各类传递过程，进行新设备的设计、操作和控制提供理论基础。

对传输现象的研究，在化工、冶金、机械、航天、土木、电子工程、农业与食品工程、生物工程、环境工程等工程学科和技术领域具有重要的意义。21世纪对工程技术人员认识与掌握基本物理现象提出了更高的要求，使传输原理成为工程专业的一门技术基础课，只是各专业的侧重点略有不同而已。

# 第一篇 动量传输

动量传输是自然界和工业生产过程中普遍存在的现象,如烟气的流动、大气的流动、流体的输送、液态金属的流动等都与动量传输有关。

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,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。研究动量传输,掌握其内在的规律,对了解自然现象,改进生产设备和生产工艺过程有着重要的作用。因此,动量传输理论是传输原理的基本组成部分之一。

传输原理中,动量传输是较难掌握的一部分内容,一方面数理要求较多,另一方面,流体的非稳态流动、湍流的产生等问题都增加了学习动量传输的难度。冶金过程中,流体的流动与传热及传质常常同时存在,流体的流动状态直接影响着对流传热和对流传质等传输过程。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。所以动量传输被认为是传输现象中基本的传输过程。

第一篇的内容分为7章,第1章介绍动量传输的基本概念,是后面各章的基础;第2章和第3章具体介绍流体静力学和动力学,建立理想流体的运动微分方程和机械能守恒方程;第4章为相似理论,介绍如何进行合理的实验设计和实验结果的推广;第5章至第7章均是前面章节的应用,重点是动量传输的阻力损失。

# 第 1 章 动量传输的基本概念

自然界中的物质状态一般分为气态、液态和固态三种,其中液体和气体物质统称为流体。流体的特性是具有流动性、压缩性和黏性。研究流体流动的学科称为流体力学。动量传输就是流体力学,之所以称为动量传输,是因为从传输观点出发,它与热量传输、质量传输有相当的类似性,用动量传输的观点讨论流体流动不仅有利于传输理论体系的一致,同时还可以了解三种传输现象类似的内涵。

动量传输主要是研究流体在外界作用下运动规律的科学,它的研究对象是流体。

## 1.1 连续介质

流体由大量的彼此之间有一定间隙的分子组成,各个分子都做无序的随机运动,因此流体的物理量在空间和时间上的分布是不连续的。

在工程计算时,主要考虑的是流体的宏观特性,即大量分子的统计平均特性,而不是单个分子的微观运动,为此引入流体的连续介质模型,即:将流体看做是由无数流体微团或质点组成的连续介质,流体质点的大小与流体运动空间相比微不足道,流体的宏观特性是分子统计的平均特性。故流体连续介质模型定义为:流体是由连续分布的流体质点组成的。

连续性假设意味着流体介质在宏观上是连续的,故其质点运动也是连续的。引入这一假定后可以简化流体平衡及运动的研究,利用连续函数进行数学处理。

一般的流体均可以视为连续介质,只有真空条件中的气体不能应用此假定。

## 1.2 流体的性质

描述流体性质及运动规律的物理量很多,如:密度、压力、组成、速度、黏度等。由于流体是连续的,而任意空间点上流体质点的物理量在任意时刻都有确定的数值,即流体的物理量是空间任意位置 $(x, y, z)$ 和时间 $\tau$ 的函数,如:

密度场:  $\rho = \rho(x, y, z, \tau)$

速度场:  $u = u(x, y, z, \tau)$

温度场:  $t = t(x, y, z, \tau)$

### 一、流体的密度与比容

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,以 $\rho$ 表示。对质量分布不均匀的流体,某点

密度的定义式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1.1)$$

式中,  $\Delta V$  为流体微元的体积( $\text{m}^3$ );  $\Delta m$  为微元体的质量( $\text{kg}$ )。

对质量分布均匀的流体(均质流体),密度的定义式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1.2)$$

式中,  $V$  为流体的体积( $\text{m}^3$ );  $m$  为流体的质量( $\text{kg}$ )。

各种流体的密度值可由物理、化学等手册中查得,液体的密度基本上不随压力变化(极高压除外),但随温度略有变化,查得液体密度值时,要注意所指温度。

比容是指单位质量流体所具有的体积,对于均质流体比容,其计算式为

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1.3)$$

显然,比容与密度互为倒数。

在冶金生产中所遇到的流体,往往是含有几种组分的混合物,通常手册中所列出的为纯物质的密度,所以混合物的平均密度  $\rho$  还应通过以下公式进行计算。

对于液体混合物,各组分的浓度常用质量分率表示,如以 1 kg 混合液体为基准,若各组分在混合前后其体积不变,则 1 kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{WA}}{\rho_A} + \frac{x_{WB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{Wn}}{\rho_n} \quad (1.4)$$

式中,  $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$  为液体混合物中各纯组分的密度( $\text{kg/m}^3$ );  $x_{WA}, x_{WB}, \dots, x_{Wn}$  为液体混合物中各组分的质量分率。

对于气体混合物,各组分的浓度常用体积分率表示,如以 1  $\text{m}^3$  混合气体为基准,若各组分在混合前后质量不变,则 1  $\text{m}^3$  混合气体的质量等于各组分的质量之和

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \quad (1.5)$$

式中,  $x_{VA}, x_{VB}, \dots, x_{Vn}$  为气体混合物中各组分的体积分率。

## 二、流体的压缩性和不可压缩流体

流体不像固体那样有固定的形状,流体呈现的是容器形状,气体往往充满容器的体积,这是流体可流动性和可压缩性的体现。可压缩性是指在压力作用下,流体的体积发生明显的变化。流体的体积一般随所受的压力增加而减少,或随温度的升高而减小。液体的压缩性不显著,如水在 0 ~ 20°C, 1 ~ 500 个大气压范围内,每增加一个大气压,水的体积只改变 1/20 000 左右,所以工程上一般将液体视为不可压缩流体。液体的体积虽然随温度升高略有增加,如水在温度 10 ~ 20°C 范围内,一个大气压下,温度每升高 1°C,其体积仅增加 1.5/10 000,所以,工程上一般不考虑液体的体积变化。

气体则与液体有很大的差别,当压力或温度发生变化时,其体积及密度等都相应地发生变化。但当气体的压强不太高而温度又不太低时,气体的性质与理想气体的偏差不大,在工程计算中,这种变化的数量关系可近似地用理想气体状态方程式进行计算,若用  $P_0, V_0, T_0$  分别表示气体在标准状态下的压强、体积和绝对温度,气体的质量为  $m$ , 分子量为  $M$ , 气体状态方程式为

$$P_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_0$$

式中,  $R$  为气体常数。当气体的压强为  $P$ 、体积为  $V$ 、绝对温度为  $T$  时, 气体状态方程式为

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

联解以上二式得

$$V = V_0 \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0} \quad (1.6)$$

将气体密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{及} \quad \rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

整理后代入式(1.6)中, 消去  $V$  和  $V_0$ , 得

$$\rho = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0 T} \quad (1.7)$$

当压力恒定时, 式(1.6)还可以写成

$$V = V_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = V_0 (1 + \beta t) \quad (1.8)$$

式中,  $t$  为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。同理, 式(1.7)还可以写成

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (1.9)$$

式中,  $\beta = \frac{1}{273}$ , 为气体的体积膨胀系数。

在许多工程问题中, 为计算方便, 当气体的压力变化不大 ( $P < 10\,000 \text{ Pa}$ ) 或流速不太高 ( $u < 70 \text{ m/s}$ ) 时, 一般可以忽略气体的压缩性, 而按不可压缩流体流动问题处理, 当然, 随着流速增高或压强增大, 气体压缩性的影响变得不可忽略, 应按可压缩性流体处理。

须要指出, 实际流体都是可压缩的, 不可压缩流体是为了便于处理当密度变化较小时的某些流体所作的假设。

### 三、流体的黏性和理想流体

#### 1. 牛顿黏性定律

当观察各种流体的流动时, 可以发现有很大的差异, 这是因为流体具有不同的黏性。流体的黏性是指流体在变形或流动时, 其本身所具有的阻滞流动或变形的性质。自然界中的流体均具有一定的黏性, 称为黏性流体或实际流体。流体的黏性是由流体分子间的内聚力和分子的扩散造成的。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。流体的黏性用黏度来度量。

由于流体具有黏性, 所以在流动过程中会产生分层现象, 层与层之间发生了相对运动, 快速层对慢速层产生了一个拖动力使它加速, 而慢速层对快速层则施加一个阻止它向前运动的阻力, 拖动力和阻力是大小相等、方向相反的一对力, 分别作用在两个紧挨着但速度不同的流层上, 流层的速度不相等, 就意味着前者将动量传给后者, 因此速度不相等的流层之间的这种黏性带动作用, 实际就是在进行着动量的传输。

如图 1.1 所示, 由运动的流体中取出相邻的两层流体, 设流层间的接触面积为  $A$ , 上层的

流速为  $u + du$ , 下层的流速为  $u$ , 即两层的相对速度为  $du$ , 层间垂直距离为  $dy$ , 实验证明, 两层流体间所产生的内摩擦力  $F$  与层间的接触面积  $A$ , 相对速度  $du$  成正比, 而与垂直距离  $dy$  成反比, 即

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

将其写成等式

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

单位面积上的内摩擦力为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.10)$$

式中,  $\tau = \frac{F}{A}$  为单位面积上的内摩擦力或称黏性力

( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $\frac{du}{dy}$  为垂直于流体运动方向的速度变化率

或称速度梯度 ( $\text{m}/\text{m} \cdot \text{s}$ );  $\mu$  为比例系数, 称为动力黏度, 简称黏度。

式(1.10)称为牛顿(Newton)黏性定律。将凡是单位面积上的黏性力与速度梯度的一次方成正比的流体, 即遵循牛顿黏性定律的流体, 统称为牛顿型流体, 全部气体和大多数低分子量流体(如水、空气等)均属于牛顿型流体。而将不遵循牛顿黏性定律的流体, 称为非牛顿型流体, 常见的非牛顿型流体如泥浆、污水、有机胶体、油漆、纸浆、高分子溶液、浆糊、云母悬浮液、流沙等。一般所研究的流体运动及动量传输过程, 均视为牛顿型流体, 但实际上, 很多流体未必严格遵守牛顿黏性定律, 只能近似作牛顿型流体处理, 本书涉及的流体多为牛顿型流体。

## 2. 流体的黏度

黏度是流体固有的重要的物性参数之一, 它是流体组成和状态(压力、温度)的函数, 其值可由实验测定。由式(1.10)可知, 如果流体的速度梯度  $\frac{du}{dy} = 1$  时, 流体的黏度  $\mu$  在数值上便等于单位面积上的黏性力。因此, 在相同的流速下, 黏度愈大的流体所产生的黏性力也愈大, 即流体因克服阻力而损耗的能量也越大, 所以对于黏度较大的流体所选用的流速应比黏度小的低些。流体的黏度越大, 表示该流体的流动性越差。流体黏度这个性质, 对于研究流体的流动或动量传输以及在流体中进行的热量传输及质量传输等过程具有重要的意义。

由式(1.10)可导出黏度的单位, 因为

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\text{N}/\text{m}^2}{\text{m}/\text{m} \cdot \text{s}} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

在工程计算中, 流体的黏性亦可用动力黏度  $\mu$  与其密度  $\rho$  的比值来表示, 称为运动黏度, 以  $\nu$  表示, 计算式为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

式中,  $\nu$  的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

$\nu$  也是流体动量传输中的基本物理参数, 它的数值越大, 随分子扩散而发生的动量传输越

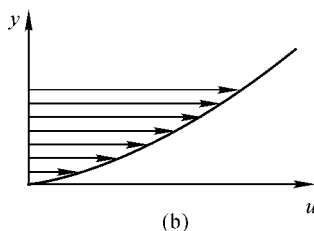
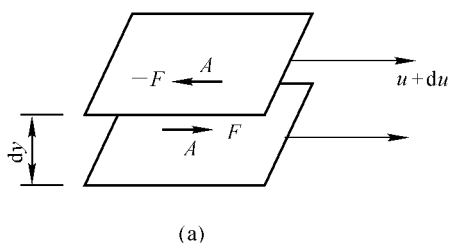


图 1.1 牛顿黏性定律推导示意图

强烈,故流体的流动性越差。例如水的动力黏度虽比空气大得多,但运动黏度却反而比空气的小,说明水比空气的流动性好。表 1.1 列出了水和空气的黏度,表 1.2 列出了常见液体的黏度。

表 1.1 水和空气的黏度(标准大气压)

温 度 °C	动力黏度, $\mu \times 10^6 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$		运动黏度 $\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 / \text{s})$	
	空 气	水	空 气	水
0	17.25	1 792	13.33	1.792
20	18.20	1 007	15.12	1.007
40	19.12	656	16.98	0.661
60	19.97	469	18.80	0.477
80	20.88	357	20.90	0.367
100	21.75	284	23.00	0.296

表 1.2 常见液体的黏度

液 体	温 度 °C	动力黏度, $\mu \times 10^6$ Pa · s	液 体	温 度 °C	动力黏度, $\mu \times 10^6$ Pa · s
原 油	20	7 200	铝	800	1 400
水	0	1 800	锡	300	1 680
水	50	550	锡	400	1 370
水	100	285	锡	500	1 180
水 银	0	1 670	锡	600	1 040
水 银	700	1 560	铁	1 550	6 850
铝	700	2 900	铁	1 650	5 900

温度对流体的黏度影响很大。温度升高时液体的黏度降低,流动性增强,气体则相反。

压力变化对动力黏度  $\mu$  的影响不大,因此一般只考虑温度的影响。而运动黏度  $\nu$  则不然,因为它和密度  $\rho$  有关,压力的变化会引起可压缩性流体密度变化,所以对可压缩性流体更多是用  $\mu$  而不用  $\nu$ 。

冶金生产中常遇到各种流体的混合物,计算混合物黏度时,不能简单地按组分叠加,只能用适当的经验公式估计。如液体混合物的黏度可计算为

$$\lg \mu = x_1 \lg \mu_1 + x_2 \lg \mu_2 + \dots + x_n \lg \mu_n$$

式中,  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  为液体各组分的黏度;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为液体各组分的摩尔分数。

低压气体混合物的黏度可用下式计算:

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{1/2}} \quad (1.11)$$

式中,  $\mu_m$  为气体混合物的黏度;  $y_i$  为气体混合物中  $i$  组分的摩尔分数;  $\mu_i$  为气体混合物中  $i$  组分的黏度;  $M_i$  为气体混合物中  $i$  组分的分子量。

### 3. 理想流体和黏性流体

具有黏性的流体统称为黏性流体或实际流体, 完全没有黏性即  $\mu = 0$  的流体称为理想流体。实际上并不存在真正的理想流体, 只是为方便处理某些流体流动问题所作的假定而已。

引入理想流体的概念, 在研究实际流体运动规律时很有作用, 这是由于黏性的存在给流体流动的数学描述和处理带来很大困难。

## 四、流体的压强

垂直作用于单位面积流体上的压力, 称为压强。设  $F$  为垂直作用于流体面积  $A$  上的压力, 则压强为

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.12)$$

压强的单位为 Pa。工程上经常用其它单位, 常用的压力单位换算关系为

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

压强的表示方法: 一个标准大气压的精确值为 101 325 Pa, 它是指一个标准大气压比绝对零压高 101 325 Pa。凡是用绝对零压作起点计算的压强, 称为绝对压强。气体状态方程中的压强也是指绝对压强, 在许多工程设备中, 流体各部分同时受到大气压的作用而相互抵消, 对流体运动不起作用, 所以工程中所关心的常是超出大气压的部分, 后者称为相对压强。一般测压仪表都是测定相对压强, 故相对压强又称表压强, 计算式为

$$P_M = P - P_{at} \quad (1.13)$$

式中,  $P_M$ ,  $P$  与  $P_{at}$  分别表示表压强、绝对压强及当地大气压。

当流体绝对压强小于当地大气压时, 相对压强 ( $P - P_{at}$ ) 为负值, 称为负压。其差值的绝对值称为真空度。例如某设备内流体绝对压强为 1 325 Pa, 则其相对压强为

$$P_M = 1\,325 - 101\,325 = -100\,000 \text{ Pa}$$

即负压为 100 000 Pa, 也可称真空度为 100 000 Pa。绝对压强、表压强、真空度及它们之间的相互关系, 可用图 1.2 表示。

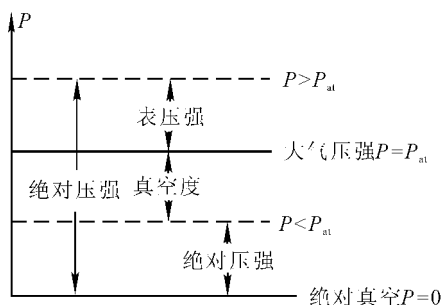


图 1.2 绝对压强、大气压强、表压强和真空度的相互关系