

高等教育冶金工程专业规划教材

YEJIN
CHUANSHU YUANLI

冶金

● 周俐 主编

● 王建军 主审

传输原理



化学工业出版社

本书分动量传输、热量传输和质量传输 3 篇,共 14 章,系统地介绍了三传的基本理论及三者的类似机理、相互关系;同时介绍了利用相似原理来处理试验数据和进行模型试验的方法。并运用传输的基本知识分析复杂的冶金过程中各因素的影响机理,通过大量的例题说明三传的基本方程在实践问题中的应用。每章均有小结及相关内容的习题及参考答案。

本书可作为高等院校冶金专业本、专科生的学习教材,也可作为有关人员学习传输知识的参考资料。

冶金传输原理

主编 周俐
副主编 李俊

图书在版编目 (CIP) 数据

冶金传输原理/周俐主编. —北京:化学工业出版社, 2009.1
高等教育冶金工程专业规划教材
ISBN 978-7-122-04580-5

I. 冶… II. 周… 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 (2009) 第 006341 号

责任编辑:陶艳玲
责任校对:徐贞珍

装帧设计:韩飞

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)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 341 千字 2009 年 3 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: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

冶金传输原理作为冶金工程专业的基础课程,在冶金工程专业本科生教学中具有非常重要的地位,但是长期以来很多学生对该课程的评价是听不懂、看不懂,不懂学它有什么用。造成这样的结果自然不是教学者所愿意看到的,究其原因编者认为以下三点可能是不可忽略的:首先是教师的授课方法和角度,作为实践性很强的专业基础课,如果只是纯粹讲解数学理论和数学推导,那么学生难免感到疲倦无趣;其次是教材问题,由于传输原理课程的数理要求较高,使得教材的通读性变差,学生很难有信心将教材自学并融会贯通;再次是一些学生的冶金专业知识薄弱,对冶金过程尚存疑惑,更何况将冶金现象模型化并且求解。教师在授课的过程中如果多结合工程实际讲解,引导学生利用所学理论解决实际问题,哪怕是简单的模型化的问题,给学生带来的信心提升将是完全不同的。

针对当前本科生的实际情况,编者在本书内容上做了较多简化,力求叙述简洁明了,增强了实例求解环节的内容,结合精品课程网站、多媒体教学以及实验动手环节多方位地给学生提供传输教学环境,帮助学生尽快建立初步的将实际问题模型化并予以解决的思维框架。

所谓传输现象是指流体的动力过程、传热过程和物质输送过程的统称。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。所以,冶金传输原理是对冶金过程中的传输现象的原理及机理的解释或定量求解。我们知道,冶金过程分为物理和化学两大过程。冶金传输原理解决的是物理过程,它不涉及化学反应的问题,那是冶金物理化学要解决的问题。

冶金传输原理是定量求解冶金过程的,由于冶金问题的复杂性,造成了复杂的数学模型表述,因此往往很多求解过程是有一定难度的,而且很多结果是经验值,读者对此需要有清晰认识,借鉴其中的好的思路而不囿于细节。编者力图在本书中对传输原理做简单阐述,旨在使初学者建立基本传输体系的基础知识,但部分章节的内容仍显偏难偏深,读者可根据自身基础或兴趣阅读,而不必拘泥于细枝末节。值得注意的是三传的类比是本书的关键主线,通过一些基本的特征数使三种传递方式紧密联系起来。遵循物理现象的数学描述的思路,初学者需仔细体会怎样将基本的物理现象模型化,用数学语言表达出来,再寻求求解之道的思维方式,尤其是前两阶段对初学者更为重要,至于如何求解反而不是这个层次读者的主要任务。

本书未提供物性参数等相关内容的附录,读者请自行查阅相关工具书籍获得翔实的资料。本书提供了较多的实例,并给出了计算过程供参考,每章提供了习题和答案。

本书第一篇、第二篇、第三篇的第13章由周俐教授编写,第三篇的第12章、第14章由李强博士编写。全书由周俐教授主编、王建军教授主审。另外,在本书的编写过程中还得到芮其宣、陈永峰、林银河、帅勇、程志洪、李兆丰、李青云等人的大力帮助,在此表示诚挚谢意。

限于编者的水平,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编者
2008年12月

目 录

第一篇 动量传输

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 动量传输的基本概念 | 1 |
| 1.1 动量传输的研究对象和研究方法 | 1 |
| 1.2 流体的主要物理性质 | 3 |
| 1.3 牛顿黏性定律 | 5 |
| 1.4 作用在流体上的力 | 8 |
| 本章小结 | 9 |
| 习题 | 9 |
| 第 2 章 流场运动的描述 | 11 |
| 2.1 描述流场运动的方法 | 11 |
| 2.2 描述流场的基本物理量及梯度、散度和旋度 | 13 |
| 2.3 流场的描述 | 16 |
| 2.4 流体微团运动分析 | 21 |
| 本章小结 | 23 |
| 习题 | 23 |
| 第 3 章 动量传输的基本方程 | 25 |
| 3.1 质量守恒定律与流体流动的连续性方程 | 25 |
| 3.2 黏性流体动量平衡方程(纳维-斯托克斯方程) | 27 |
| 3.3 理想流体动量平衡方程——欧拉方程 | 31 |
| 3.4 伯努利方程 | 31 |
| 本章小结 | 36 |
| 习题 | 36 |
| 第 4 章 管道中的流动和孔口流出 | 37 |
| 4.1 流体运动的两种状态 | 37 |
| 4.2 不可压缩流体的管流摩擦阻力 | 38 |
| 4.3 不可压缩流体的管流局部压力损失 | 46 |

| | |
|------------------------|----|
| 4.4 管路计算 | 47 |
| 4.5 经过孔口的流出 | 49 |
| 本章小结 | 53 |
| 习题 | 53 |
| 第 5 章 边界层流动 | 55 |
| 5.1 边界层的概念 | 55 |
| 5.2 平面层流边界层微分方程 | 57 |
| 5.3 边界层内积分方程 | 62 |
| 5.4 绕流阻力和颗粒沉降速度 | 65 |
| 本章小结 | 67 |
| 习题 | 68 |
| 第 6 章 可压缩气体的流动 | 69 |
| 6.1 可压缩气体的概念 | 69 |
| 6.2 可压缩气体一元稳定等熵流动的基本方程 | 71 |
| 6.3 一元稳定等熵流动的基本特性 | 72 |
| 6.4 气流参数与流通截面的关系 | 75 |
| 6.5 渐缩喷管与拉瓦尔喷管 | 77 |
| 本章小结 | 81 |
| 习题 | 81 |
| 第 7 章 相似原理与模型研究方法 | 83 |
| 7.1 相似的概念 | 83 |
| 7.2 对现象的一般数学描述及单值条件 | 84 |
| 7.3 相似定理——相似三定理 | 85 |
| 7.4 相似特征数 | 88 |
| 7.5 相似模型研究方法 | 91 |
| 本章小结 | 96 |
| 习题 | 97 |

第二篇 热量传输

| | |
|-----------------|-----|
| 第 8 章 传热基本概念与方程 | 98 |
| 8.1 热量传输的基本概念 | 98 |
| 8.2 传热的基本方式 | 100 |
| 8.3 热量传输微分方程 | 103 |
| 本章小结 | 108 |
| 习题 | 108 |

| | |
|-------------|-----|
| 第 9 章 导热 | 110 |
| 9.1 稳态导热 | 110 |
| 9.2 不稳态导热 | 118 |
| 9.3 导热的数值解法 | 123 |
| 本章小结 | 134 |
| 习题 | 134 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 10 章 对流 | 136 |
| 10.1 对流换热的一般分析 | 136 |
| 10.2 对流换热过程的数学描述 | 137 |
| 10.3 平板层流换热微分方程组及其 分析解 | 139 |
| 10.4 平板层流换热的近似积分解 | 141 |
| 10.5 动量传输和热量传输的类比 方法 | 144 |
| 10.6 相似理论指导下的实验方法 | 148 |
| 本章小结 | 154 |
| 习题 | 154 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 第 11 章 辐射换热 | 155 |
| 11.1 热辐射的基本概念 | 155 |
| 11.2 黑体辐射的基本定律 | 158 |
| 11.3 实际物体表面的辐射 | 160 |
| 11.4 角系数 | 163 |
| 11.5 两个黑体表面间的辐射换热 | 168 |
| 11.6 灰体表面间的辐射换热 | 169 |
| 11.7 气体的辐射 | 175 |
| 11.8 气体与围壁表面间的辐射 | 177 |
| 本章小结 | 178 |
| 习题 | 178 |

第三篇 质量传输

| | |
|--|-----|
| 第 12 章 质量传输的基本定律 | 180 |
| 12.1 质量传输的基本概念 | 180 |
| 12.2 扩散传质基本定律 | 183 |
| 12.3 微元体质量平衡方程式 (带扩散的 连续性方程式) | 187 |
| 本章小结 | 189 |
| 习题 | 189 |
| 第 13 章 扩散传质与对流传质 | 190 |
| 13.1 扩散传质 | 190 |
| 13.2 对流传质 | 193 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 13.3 双膜理论与相间稳态传质 | 198 |
| 本章小结 | 202 |
| 习题 | 202 |
| 第 14 章 动量、热量、质量的传输类比 | 204 |
| 14.1 三传的基本定律和基本方程 | 204 |
| 14.2 三传的类比 | 205 |
| 14.3 类似关系的特征数 | 206 |
| 本章小结 | 207 |
| 习题 | 207 |
| 参考文献 | 208 |

附录

| | |
|-----------|-----|
| A1 | 211 |
| A2 | 212 |
| A3 | 213 |
| A4 | 214 |
| A5 | 215 |
| A6 | 216 |
| A7 | 217 |
| A8 | 218 |
| A9 | 219 |
| A10 | 220 |

| | |
|-----------|-----|
| B1 | 221 |
| B2 | 222 |
| B3 | 223 |
| B4 | 224 |
| B5 | 225 |
| B6 | 226 |
| B7 | 227 |
| B8 | 228 |
| B9 | 229 |
| B10 | 230 |

第一篇 动量传输

动量传输现象是自然界及工程技术中普遍存在的现象，大多数金属的提取、精炼、浇铸等过程与动量传输即流体流动有着密切的联系。冶金中的化学反应，往往也同时伴随着热量的传输和质量的传输，而这些现象都是在物质的流动过程中发生的。也就是说，传热、传质与流体流动特性密切相关。比如高炉炼铁过程、转炉炼钢过程、炉外精炼及钢水的浇注等钢铁冶金高温生产过程中，均存在动量、热量和质量三者的传递过程，并且它们是相互关联、相互耦合的。

流体流动过程中的流速的变化即反映动量的变化，因此研究流体流动即动量的传输，掌握其有关的规律性，对冶金设备的设计与改进以及冶金过程的优化与控制具有重要意义。

动量传输是研究流体在外界作用下运动规律的科学，即流体力学。之所以称之为动量传输，是因为从传输的观点来看，它与热量传输、质量传输在传输的机理、过程、物理数学模型等方面具有类比性和统一性。用动量传输的观点讨论流体的流动问题，不仅有利于传输理论的和谐，而且可以揭示三传现象类似的本质与内涵。

什么是动量传输？从所学的物理概念中知道：当速度不同的两个小球相互碰撞时，有动量的传递发生，即小球的动量 (mv) 发生了变化。而当流体的速度发生变化时，是否它们的动量也发生变化，即发生了动量的传输呢？

第 1 章 动量传输的基本概念

1.1 动量传输的研究对象和研究方法

1.1.1 流体

动量传输就是研究流体（即气体与液体）在外界的作用下运动规律的一门科学，它的研究对象自然就是流体。流体不像固体，固体有自己固定的形状，流体则常常呈现出盛放它的容器的形状，而气体往往还要充满盛放它的容器的体积。流体日常表现出来的这种性质实质上是它的可流动性与可压缩性的体现。所谓可流动性就是指流体在任意小的切应力的作用下都会发生明显的变形，而一般的固体则不会。可压缩性是指在压力的作用下，流体的体积会发生明显的变化。

因为物质是由分子组成的，分子与分子之间有着一定的间隙，气态物质在标准状态 (0°C , 101325Pa) 分子间的平均距离大于分子的直径的 10 倍，分子间的相互作用微弱，不能保持一定的体积和形状，当外部压力增大时，其体积按一定的规律缩小，具有较大的可压缩性。液态物质分子间平均距离约为分子直径的 1 倍，分子间互相作用

较大，通常可以保持其固有体积，但不能保持其形状。流体在外界的压力作用下，分子之间的间隙会发生变化，从而导致体积随着外界压力的不同而不同。气体在这一方面表现得最为突出。液体虽然随压力的变化分子间的距离也会有变化，但总的体积的变化并不明显。

从物质受力和运动的特点来看，物质又可分为两大类：一类物质不能抵抗切向力，在切向力的作用下可以无限的变形，这种变形称为流动，这类物质称为流体，其变形的速度即流动速度与切应力的大小有关，气体和液体都属于流体；另一类是固体，它能承受一定的切应力，其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。

液体和气体的区别是：液体可以随其容器形状不同而改变其形状，且在相当大的压力下几乎不改变其原有的体积，故通常称为不可压缩流体。液体与其它流体形成的分界面称为自由表面。气体则具有很大的压缩性，如果对气体施加压力，则其体积很容易缩小，反之，如果压力无限减小，则气体可无限地膨胀，充满容纳它的空间，所以它没有自由表面，故通常称为可压缩流体。

1.1.2 连续介质模型

正像普通物理学研究问题有质点模型、刚体模型一样，研究流体的流动也应该有一种模型，这就是下面要介绍的连续介质模型。

流体力学中一般对流体都作连续介质的假定，即认为流体是由连续分布的流体质点所组成。这种流体质点尺度很小，数学上可以近似认为是一个点，但具有宏观的物理量如密度、压力、速度等。

从宏观上研究流体的运动规律，有理由把流体视为连续介质，即流体是在空间和时间上连续分布的物质。实践证明采用连续介质模型来解决工程实际问题，其结果是能满足要求的。这样流体的一切特性，例如压强、温度、密度、速度等都可以看成是时间和空间连续分布的函数，流体力学的问题可以用连续函数这个有力的数学工具来进行研究。

从流体的宏观特性出发，流体充满的空间里是有大量的没有间隙存在的流体质点组成的，即为连续介质模型。

流体质点：在连续介质内对某一点取得极小，但却包含有足够多的分子（即宏观上足够小，微观上足够大），使其不失去连续介质的特性而有确定的物理值。

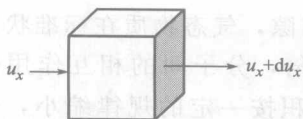
连续介质的特性：流体的一切属性（速度、压力、密度、温度、浓度等）都可看作坐标与时间的连续函数，利用数学中连续函数的性质解题。

很显然，上述定义的连续介质模型是满足场的定义的，是完全可以由场论去研究它的运动状态的。所以常常人们把上述连续介质模型描述的流体叫流场。

描述流场运动的方法通常有两种：其一是拉格朗日法；其二是欧拉法。

描述流场的基本物理量有速度、压力、密度、温度等，流场在空间的变化行为有梯度、散度和旋度。

注意：稀薄气体的分子间距大，连续介质模型的概念不适用。



流体微团：可认为它是由质点组成的微小的流体单元，微团中的各质点的参量可能有所不同。例如，在研究流体运动时，经常取微元体来分析，列出微分方程，如图 1-1，流体流入的速度是 u_x 、流出的速度是 $u_x + du_x$ 。

图 1-1 六面体流体微团

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 质量与重力特性

(1) 密度

流体具有质量，每单位体积的质量称为密度，用符号 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

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

(2) 重度

流体受地心引力的作用具有重量，每单位体积的重量称为重度，用符号 γ 表示，单位为 N/m^3 。

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \rho g \quad (1-2)$$

式中， g 为重力加速度为 $9.81 \text{m}/\text{s}^2$ 。

(3) 比体积

单位质量流体所占有的体积称作比体积，用符号 ν 表示，其单位为 m^3/kg 。

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

(4) 相对密度

液体的重度与一个大气压下 4°C 时水的重度之比称为液体的相对密度，用符号 Δ 表示；气体的相对密度是指该气体的密度与一个大气压下 0°C 的空气或氢气的密度之比。它是一无量纲的量。

$$\Delta = \frac{\gamma_{\text{液}}}{\gamma_{\text{水}}} \quad (1-4)$$

一个标准大气压 4°C 下水的密度为 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ ；一个标准大气压 0°C 下空气的密度为 $\rho_{\text{空气}} = 1.293 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

1.2.2 压缩性与热胀性

(1) 压缩性

流体受压体积缩小的性质称为压缩性，通常用体积压缩系数 β_p 来表示。 β_p 指的是在温度不变时，压力每增加一个单位流体体积 V 的相对变化率。压缩系数的定义为

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

式中， β_p 的单位为 $1/\text{Pa}$ ，负号表示压力增加时体积缩小，故加上负号后 β_p 永远为正值。

对于 0°C 的水在压力为 506.5kPa (5atm) 时， β_p 为 $0.539 \times 10^{-9} \text{Pa}^{-1}$ ，可见水的压缩性是很小的。

体积压缩系数的倒数为体积弹性模数，以 E_V 表示，则

$$E_V = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V}{dV} dp \quad (1-6)$$

式中， E_V 的单位为 Pa ，液体的体积压缩系数一般很小，或体积弹性模数都非常大，因此液体的压缩性一般都可忽略不计。

(2) 热胀性

当温度变化时,流体的体积也随之变化。温度升高时,体积膨胀,这种特性称为流体的膨胀性,用体积膨胀系数 α_V 来表示。 α_V 是指当压力保持不变,温度升高1K时流体体积的相对增加量。其定义为

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

对气体来说,它的体积弹性模数是随气体状态变化的不同而不同的。例如在等温压缩过程中,有

$$pV = \text{常数} \quad (1-8)$$

微分后得

$$pdV + Vdp = 0 \quad (1-9)$$

或

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p} \quad (1-10)$$

将式(1-10)代入式(1-6)和式(1-5)中,得到

$$E_V = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V}{dV} dp = p \quad (1-11)$$

由此可见,当气体作等温压缩时,其体积弹性模数等于作用在气体上的压强。

当气体作绝热压缩时

$$pV^k = \text{常数} \quad (1-12)$$

微分后得到

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{k} \frac{dp}{p} \quad (1-13)$$

将式(1-13)代入式(1-6)中,得到

$$E_V = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V}{dV} dp = kp \quad (1-14)$$

由此可知,当气体作理想绝热压缩时,其体积弹性模数等于绝热指数 k 乘以压强 p 。

气体的体积变化遵循理想气体的状态方程式,即

$$p = \rho RT \quad (1-15)$$

对于等温过程

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-16)$$

对于等压过程

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \quad (1-17)$$

对于绝热过程

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1-18)$$

以上各式中的 p 为绝对压强, T 为绝对温度, R 为气体常数, k 为绝热指数。

例 1-1 有空气 1m^3 ,原处于 $T_1=40^\circ\text{C}$, $p_1=0.105 \times 10^6\text{Pa}$ 状态,已知气体常数为 $R=287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $k=1.4$ 。若等熵地压缩为 0.5m^3 ,求终态温度和压力;若等温地压缩为 0.5m^3 ,求终态温度和压力。

解:由状态方程知

$$\rho_1 = p_1/RT_1 = 0.105 \times 10^6 / (287 \times 313) = 1.17\text{kg}/\text{m}^3$$

由于 $V_2 = 0.5V_1$, 故 $\rho_2 = 2\rho_1 = 2 \times 1.17 = 2.34 \text{ kg/m}^3$

(1) 等熵过程

$$\frac{p_2}{\rho_2^k} = \frac{p_1}{\rho_1^k}$$

$$p_2 = \rho_2^k \frac{p_1}{\rho_1^k} = (2.34)^{1.4} \frac{0.105 \times 10^6}{(1.17)^{1.4}} = 0.27 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$T_2 = p_2 / R\rho_2 = (0.27 \times 10^6) / (287 \times 2.34) = 402.04$$

(2) 等温过程

$$T_2 = T_1 = 313 \text{ K}$$

$$p_2 = R\rho_2 T_2 = 287 \times 2.34 \times 313 = 0.21 \times 10^6 \text{ Pa}$$

1.2.3 流体黏性

除流动性与可压缩性之外, 流体还有一个非常重要的性质——黏性。流体在变形或流动时, 其本身所表现出的一种阻滞流动或变形的性质称为流体的黏性, 自然界中的流体均具有一定的黏性, 在流体动力学中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而构成的。流体与不同相的表面(如固体)接触时, 表现为流体对表面的附着作用。如图 1-2, 当两块互相平行的无限大平板间充满流体, 下板固定不动, 上板以匀速 v_0 平行下板运动时, 两板间的流体便发生不同速度的运动状态。表现为: 从附着在板下面的流体层具有与动板等速的 v_0 开始, 越往下速度越小, 直到附着在平板上的流体层的速度为 0 这样的速度分布规律。

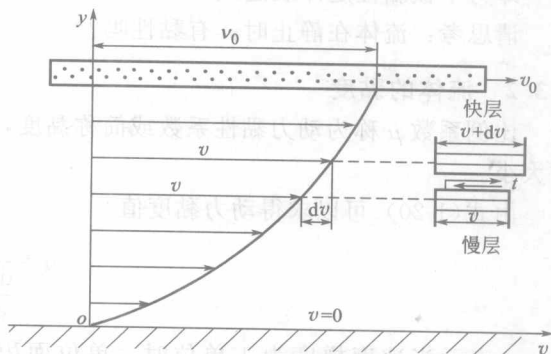


图 1-2 流体流过两平板时的速度分布

从图 1-2 可以看出: 每一运动较慢的流体层, 都是在运动较快的流体层带动下运动的, 同时, 每一运动较快的流体层(快层), 也受到运动较慢的流体层(慢层)的阻碍, 而不能运动得更快。也就是说, 在做相对运动的两流体层的接触面上, 存在一对等值而反向的作用力来阻碍两相邻流体层作相对运动, 流体的这种性质称作流体的黏性, 由黏性产生的作用力称作黏性力或内摩擦力。

黏性力产生的物理原因如下。

① 由于分子作不规则运动时, 各流体层之间互有分子迁移掺混, 快层分子进入慢层时给慢层以向前的碰撞、交换能量, 使慢层加速; 慢层分子迁移到快层时, 给快层以向后的碰撞, 形成阻力而使快层减速。这就是分子不规则运动的能量交换形成的黏性阻力。

② 当相邻流体层有相对运动时, 快层分子的引力拖动慢层, 而慢层分子的引力阻滞快层, 这就是两层流体之间吸引力所形成的阻力。

1.3 牛顿黏性定律

1.3.1 牛顿内摩擦(或黏性)定律

流体运动时的黏性阻力与哪些因素有关? 牛顿经过实验研究得到: 当流体的流层之间存在相对位移即存在速度梯度时, 由于流体的黏性作用, 在其速度不等的流层之间以及流体与

固体表面之间所产生的黏性力的大小与速度梯度和接触面积成正比，并与流体的黏性有关，这就是牛顿黏性定律。

在稳定状态下，当图 1-2 所示两平行平板间的流动是层流（流体质点作有规则的运动，在运动过程中质点之间互不混杂、互不干扰）时，对于面积为 A 的平板，两板之间的距离为 y ，为了使上板保持以速度 v_0 匀速运动，必须施加一个力 F 。该力的大小由实验得：

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{v_0}{y} \quad (1-19)$$

单位面积上所受的剪切力为切应力。在稳定状态下，任意两个薄流层之间速度分布假设是线形分布，如图 1-3。则 v_0/y 可用速度梯度 dv_x/dy 来代替，于是切应力 τ 是

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1-20)$$

图 1-3 两薄流层之间的速度分布

式中 μ ——比例系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

即为牛顿黏性定律表达式。

请思考：流体在静止时，有黏性吗？

1.3.2 流体的黏度

比例系数 μ 称为动力黏性系数或简称黏度，它表征了流体抵抗变形的能力，即流体黏性的大小。

由式(1-20)可以求得动力黏度值

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv_x}{dy}} \quad (1-21)$$

μ 表示当速度梯度为 1 单位时，单位面积上摩擦力的大小。它的单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，工程常采用泊，用 P 表示。

$$1\text{P} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}。$$

黏性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值，称为运动黏性系数，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-22)$$

ν 的单位为 m^2/s 。工程上采用沱为单位，用 St 表示。

$$1\text{St} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}。$$

黏度 μ 的大小与流体的种类有关，例如在同一温度的情况下，油的 μ 值比水大，而水又比空气大得多。所以 μ 是流体的一个物性参数。对于同一种流体，它的大小是流体温度和压强的函数。温度对流体的黏度影响很大，压强对黏性的影响不大。

当温度升高时，一般液体的黏度随之降低；但是，气体则与其相反，当温度升高黏度增大。原因是在液体中，分子间距小，分子相互作用力较强，当温度升高时，分子之间距离增大，引力减小，所以层与层之间的摩擦力减小，黏度降低。但是对气体而言，由于分子间距比液体大得多，分子之间的引力很弱，层与层之间的黏性表现为两层流体层间分子的动量交换，来阻止流体层间相对滑动，分子间的引力作用可忽略，当气体温度升高，内能增加，分子运动剧烈，动量交换激烈，所以黏性升高。

铁水黏性系数见表 1-1。

表 1-1 铁水在各种温度下的黏性系数值

| 温度/℃ | 黏性系数/(N·s/m ²) |
|------|----------------------------|
| 1550 | 6.7×10 ⁻³ |
| 1600 | 6.1×10 ⁻³ |
| 1700 | 5.8×10 ⁻³ |

研究表明, 气体、熔融金属和熔渣的黏性系数一般随组分的变化而显著变化。在某些熔渣中, 混合物的黏性系数可能显著低于混合物中任何组分的黏性系数。可以利用这个关系, 通过调整熔渣的组分就能得到所需要的低黏性渣, 控制炼铁、炼钢和其它冶金工艺过程。

对混合流体黏度 μ 与组分有关, 经验公式有

$$\lg \mu_m = \sum (x_i \lg \mu_i) \quad (1-23)$$

对压力不太高的气体混合物有

$$\mu_m = \frac{\sum (x_i \mu_i M_i^{0.5})}{\sum (x_i M_i^{0.5})} \quad (1-24)$$

式中 x_i 、 μ_i ——分别为混合物中某组分的摩尔分数与黏度;

M_i ——混合物中 i 组分的分子量;

μ_m ——混合物的黏度。

1.3.3 黏性动量通量

对动量而言, 单位时间通过单位面积的动量称为动量通量。注意, 只要有质量、有速度就存在动量。黏性动量通量是流体黏性所形成的单位时间通过单位面积的动量传输量。

由于流层的速度不等, 因此流层具有的动量不等, 快流层带动慢流层, 前者将动量传给后者, 实质是动量的传递过程。

从式(1-20)中可知 τ 的量纲是

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\text{质量} \times \text{加速度}}{\text{面积}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m} \times \text{m}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{动量}}{\text{面积} \times \text{时间}} = \text{动量通量}$$

因此, 黏性切应力 τ 可以理解为黏性动量通量。

所以, 速度不等的流层之间, 作用在单位接触面积上的黏性力 τ , 相应地就是接触面积上的黏性动量通量。

对不可压缩流体, 式(1-20)可改写成

$$\tau = -\nu \frac{d(\rho v_x)}{dy} \quad (1-25)$$

式中, ν 为运动黏性系数, 又称为动量扩散系数; $\frac{d(\rho v_x)}{dy}$ 为单位体积流体的动量在 y 方向上的动量梯度, 单位为 $(\text{kg} \cdot \text{m/s})/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$; “-”号表示, 动量通量的方向与速度梯度的方向相反, 即动量是从高速到低速的方向传输的。

1.3.4 黏性力与黏性动量通量的区别

黏性力与黏性动量通量的区别是: 大小相等, 方向垂直。黏性力的方向对快流层与速度的方向相反, 对慢流层与速度的方向相同; 黏性动量通量的方向与动量梯度(或速度梯度)的方向平行而相反, 即动量是由高速流层向低速流层方向传输。

注意: 牛顿黏性定律的适用范围是流体的层流流动。

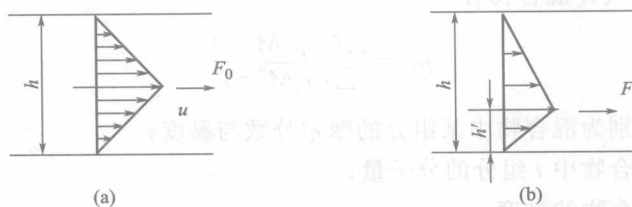
1.3.5 牛顿流体与非牛顿流体

并不是所有的流体都遵循牛顿内摩擦定律，即流动过程中黏性切应力和速度梯度成正比。据此，将流体分为两大类：牛顿流体与非牛顿流体。

凡是切应力与速度梯度的关系服从牛顿黏性定律的流体，均称为牛顿流体。常见的牛顿流体有水、空气等，非牛顿流体有泥浆、纸浆、油漆、沥青等。

对于不符合牛顿黏性定律的流体，称之为非牛顿流体。研究非牛顿流体受力和运动规律的学科称为流变学。

例 1-2 两平行平板之间充满黏度为 μ_0 的液体，在对称面上有一面积为 A 的薄板，薄板以等速度 u 作平移运动如图 1-4(a) 所示。现以另一种液体充满上述平板之间，但其黏度 μ 未知，若其中薄板置于底板以上 h' 处，也以等速 u 作平移运动，如图 1-4(b) 所示，且已知拖动力与上一种情况相同，试由 μ_0 、 h' 确定 μ 。



解：对于第一种情况，拖力 F_0 为

$$F_0 = 2A\mu_0 \frac{\Delta u}{\Delta y} = 2A\mu_0 \frac{u}{h/2} = 4A\mu_0 \frac{u}{h}$$

对于第二种情况，拖力 F 为

$$F = A\mu \frac{u}{h'} + A\mu \frac{u}{h-h'} = A\mu u \left(\frac{1}{h'} + \frac{1}{h-h'} \right)$$

由于 $F_0 = F$ ，故可得 $\mu = 4\mu_0 \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{h'}{h} \right)$

1.4 作用在流体上的力

从流体中任意取出一流体块，作用在这一流体块上的力主要分为质量力和表面力。

质量力是作用在流体的每个质点上，其大小与流体的质量成正比。如：重力 mg 、直线惯性力 ma 、离心力 $m\omega^2 r$ 。

对于均质流体，质量力的大小与受作用的流体的体积成正比，所以又称为体积力。工程上经常遇到的质量力是重力和惯性力。对于某些冶金过程，当熔融金属和离子导电的熔渣在强大磁场作用下流动时，电磁力也是一个附加的质量力。单位质量的质量力称为单位质量力，它在 x 、 y 、 z 轴上的分量分别以 X 、 Y 、 Z 来表示。例如，重力的单位质量力就是重力加速度在三个坐标轴上的分量 g_x 、 g_y 、 g_z 。

表面力是作用在所取出的流体的表面上的力，并与其表面积成比例，它又分为法向力（通常称为压力）和切向力（如前面所表达的黏性力）两种。单位面积上的法向力称为法向力（如压强 p ），单位面积上的切向力称为切应力（如黏性切应力 τ ）。

现在考虑一个如图 1-4 所示的任意形状的流体微团。在该微团表面上取一个微小面积

ΔA , 用 ΔF 表示周围流体作用在 ΔA 上的力。由于 ΔF 是个矢量, 它可以分解成两个分量, ΔF_n 垂直于 ΔA , 而 ΔF_i 则与 ΔA 相切。 ΔF_n 即为法向力, ΔF_i 即为切向力。

因此, 在 ΔA 上有两种应力: 当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时

$$\text{法向应力 } \tau_n = \lim \frac{F_n}{\Delta A} \quad (1-26)$$

$$\text{切向应力 } \tau_i = \lim \frac{F_i}{\Delta A} \quad (1-27)$$

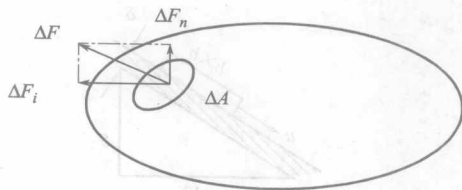


图 1-4 微元面积 ΔA 上的法向力和切向力

作用在流体的外表面的力称外力; 作用在流体内部任一表面称内力。在流体力学中, 常从流体内部取一部分 (分离体), 此时, 周围流体对分离体表面上的作用就是外力。

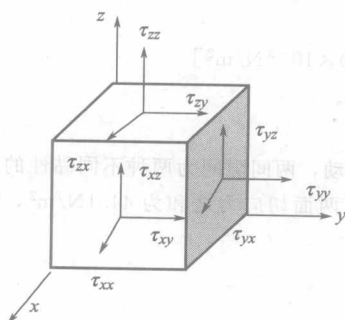


图 1-5 流体微团受力分析

图 1-5 所示为正方体的流体微团。图上表示出作用该流体微团表面上的九个应力分量。根据习惯, 双下标的涵义是: 第一个下标表示应力作用面的法线方向, 而第二个下标表示应力的方向。不难看出 τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 表示法应力, 而 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 表示切应力。

可记为

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

可以证明: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。即应力张量是对称张量。

本章小结

流体与固体的物理性质有许多不同之处: 流体具有易流动性、可压缩性和黏性。其中黏性是流体的一个重要物理性质。流体的上述性质都是它的大量运动着的分子微观特性的宏观表现。我们把流体作为连续介质来研究的。本章主要叙述流体及其物理性质、牛顿内摩擦 (或黏性) 定律、作用在流体上的质量力和表面力。

习 题

1-1 如图, 质量为 $1.18 \times 10^2 \text{ kg}$ 的平板尺寸为 $b \times b = 67 \times 67 \text{ cm}^2$, 在厚 $\delta = 1.3 \text{ mm}$ 的油膜支承下以 $u = 0.18 \text{ m/s}$ 匀速下滑, 问油的黏度系数为多少?

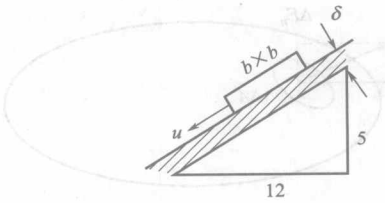
(答: $7.16 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$)

1-2 一平板在距另一平板 2 mm 处以 0.61 m/s 的速度平行移动, 板间流体黏度为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 稳定条件下黏性动量通量为多少? 黏性力又是多少? 两者方向如何? 以图示之。

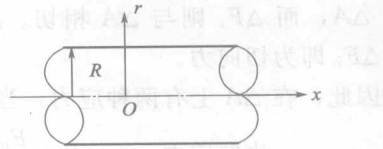
(答: $6.10 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$)

1-3 圆管中层流速分布式为 $u_x = u_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$ 求切应力在 r 方向上的分布, 并将流速和切应力以图示之。

(答: $\tau = 2\mu u_m \frac{r}{R^2}$)



题 1-1 图



题 1-3 图

1-4 $\rho=1000\text{kg/m}^3$, $\nu=0.007\text{cm}^2/\text{s}$ 的水在水平板上流动, 速度分布为 $u_x=3y-y^3$ (m/s) 求

- (1) 在 $x=x_1$ 处板面上的切应力;
- (2) 在 $x=x_1$, $y=1\text{mm}$ 处于 x 方向有动量通量存在吗? 若有, 试计算其值;
- (3) 在 $x=x_1$, $y=1\text{mm}$ 处的黏性动量通量。

[答: (1) $2.10 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$; (2) 有, $9.00 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$; (3) $2.10 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$]

1-5 如上题, 求 $x=x_1$, $y=1\text{m}$ 处两种动量通量, 并与上题相比较。

(答: 0, $4.0 \times 10^3 \text{N/m}^2$)

1-6 在间距为 3cm 的平行板正中有一极薄平板以 3.0m/s 的速度移动, 两间隙间为两种不同黏性的流体, 其中一流体的黏度为另一流体黏度的两倍, 已测知极薄平板上、下两面切应力之和为 44.1N/m^2 , 在层流及速度线性分布条件下, 求流体的动力黏度。

(答: $7.35 \times 10^{-2} \text{N} \cdot \text{s/m}^2$; $1.47 \times 10^{-1} \text{N} \cdot \text{s/m}^2$)

第2章 流场运动的描述

2.1 描述流场运动的方法

描述流场运动的方法通常有两种：其一是拉格朗日法；其二是欧拉法。

2.1.1 拉格朗日法

拉格朗日法实际上是力学中质点运动描述的方法在流体力学中的推广，它把流体看成是由大量的流体质点组成的，并着眼于对流体质点运动的描述，设法描述出每个质点自始至终的运动状态，即它们的位置随时间的变化规律。这样对所有的质点的运动规律知道后，整个流场的运动就自然地清楚了。从数学上可做如下的描述：首先为了描述每个质点的运动必须先区分不同的质点，通常的做法是用初始时刻质点的坐标作为区分不同质点的标志。设初始流体中某个质点的坐标为 (a, b, c) ，不同的 (a, b, c) 代表不同的质点，这时流体质点的运动规律就可以表示为：

$$r = r(a, b, c, \tau) \quad (2-1)$$

这里 r 为质点的位置矢量，在直角坐标系下式(2-1)可表达为

$$\begin{cases} x = x(a, b, c, \tau) \\ y = y(a, b, c, \tau) \\ z = z(a, b, c, \tau) \end{cases} \quad (2-2)$$

式中， a, b, c 常被称为拉格朗日变数。

对式(2-2)中如固定 a, b, c 可得到不同时刻某一固定质点的运动轨迹，如固定 τ 可得到同一时刻不同流体质点在空间的位置分布。如式(2-2)具有二阶连续偏导数，可给出由拉氏法描述的质点的速度 v 与加速度 a

$$\begin{cases} v = \frac{dr}{d\tau} = \frac{dr(a, b, c, \tau)}{d\tau} \\ a = \frac{d^2 r(a, b, c, \tau)}{d\tau^2} \end{cases} \quad (2-3)$$

它在直角坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx(a, b, c, \tau)}{d\tau} \\ v_y = \frac{dy(a, b, c, \tau)}{d\tau} \\ v_z = \frac{dz(a, b, c, \tau)}{d\tau} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} a_x = \frac{d^2 x(a, b, c, \tau)}{d\tau^2} \\ a_y = \frac{d^2 y(a, b, c, \tau)}{d\tau^2} \\ a_z = \frac{d^2 z(a, b, c, \tau)}{d\tau^2} \end{cases} \quad (2-5)$$