



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目



高等院校力学教材

Textbook in Mechanics for Higher Education

工程流体力学 (上册)

Engineering Fluid Mechanics

李玉柱 贺五洲 主编

Li Yuzhu He Wuzhou



清华大学出版社



Springer



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

工程流体力学 (上册)

Engineering Fluid Mechanics

李玉柱 贺五洲 主编
陈永灿 王虹 茅泽育 编著



清华大学出版社
北京



Springer

内 容 简 介

本书分上、下两册,上册共 11 章:绪论,流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,有旋流动和有势流动,流动阻力和能量损失,量纲分析和相似原理,边界层理论基础及绕流运动,孔口、管嘴出流和有压管流,可压缩气流在管道中的流动,紊动射流和紊流扩散。下册共 7 章:明槽恒定均匀流,明槽恒定非均匀渐变流,明槽恒定急变流,堰流及闸下出流,水工建筑物泄流衔接与消能,明槽非恒定流,渗流。书后附有习题答案和名词索引。

本书主要作为高等院校水利类、土建类各专业以及环境工程、交通工程、核工程与核技术等专业的大学本科教学用书,也可供从事工程流体力学工作的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学. 上册/李玉柱,贺五洲主编. —北京:清华大学出版社,2006. 10
(高等院校力学教材)

ISBN 7-302-13578-9

I. 工… II. ①李… ②贺… III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 090993 号

出版者:清华大学出版社

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

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:杨倩

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:26.25 字数:542千字

版 次:2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13578-9/O·562

印 数:1~3000

定 价:36.00元

前 言

《水力学》教材的第1版是在1959年出版发行的,主编是夏震寰、李丕济教授,1965年进行了第一次修订,是国内比较经典的一本《水力学》教材。1980年在余常昭教授主持下进行了第二次修订。1995年在董曾南、余常昭教授主持下进行了第三次修订。该教材的主要特色是理论联系实际,精选教学内容并使之符合学生的认识规律,重视物理概念的分析和水流现象的阐述。教材出版以来,一直受到全国各大专院校广泛关注。很多学校的教师把它作为教学参考书。该教材的第3版1988年曾获教育部优秀教材一等奖。

这次修订除保持原教材的特色外,力求有所改进和提高。主要包括以下几个方面:

1. 内容上作出了较大调整,以拓宽专业适用面,适应多种专业的教学要求,使之不仅适用于水利、土建类各专业,而且也可用于环境工程、交通工程、核工程与核技术等各专业,并将书名由《水力学》改为《工程流体力学》。

2. 对经典内容的阐述进行了反复推敲,使之更加简洁明了。删除部分偏深、偏难以及列表试算和查表计算的内容,使之更加符合教学基本要求,并适当引进学科新内容。

3. 精选复习思考题、自测题和习题,利于学生自学,同时对每章的习题均附有答案。

本书分上、下册,上册共11章,下册共7章。参加本书修订的有:陈永灿(第1、8章(合编))、王虹(第2章)、贺五洲(第3、4、5章)、李玉柱(第6、7、8(合编)、10、11、15章)、茅泽育(第9章)、江春波(第12、13、14、16、17、18章),上册主编李玉柱、贺五洲,下册主编李玉柱、江春波。

由于水平所限,时间较紧,书中不妥之处敬请批评、指正。

作 者

2006年5月于清华园

目 录

前言	I
第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学的研究任务及其发展简史	1
1.2 流体的基本特征及连续介质假设	3
1.3 流体的主要物理性质	4
1.4 作用在流体上的力	12
1.5 流体力学研究方法	13
复习思考题	14
自测题	14
习题	16
第 2 章 流体静力学	18
2.1 流体静压强及其特性	18
2.2 流体平衡微分方程	20
2.3 重力场中液体静压强的分布	24
2.4 作用在平面上的液体总压力	31
2.5 作用在曲面上的液体总压力	37
2.6 液体的相对平衡	42
复习思考题	44
自测题	45

习题	46
第 3 章 流体运动学	53
3.1 流体运动的描述方法	53
3.2 有关流场的几个基本概念	58
3.3 流体微团运动的分析	64
3.4 连续性方程	69
复习思考题	72
自测题	73
习题	73
第 4 章 流体动力学基础	76
4.1 运动流体的应力状态	77
4.2 流体运动微分方程	79
4.3 理想流体恒定元流的能量方程	83
4.4 恒定总流的能量方程	88
4.5 恒定总流的动量方程	100
复习思考题	105
自测题	105
习题	107
第 5 章 有旋流动和有势流动	113
5.1 有旋流动	114
5.2 旋涡的诱导速度	122
5.3 卡门涡街	128
5.4 有势流动	129
5.5 理想不可压缩流体恒定平面势流的基本方程	133
5.6 流网的特征及其近似绘制法	135
5.7 几个基本的平面势流	137
5.8 势流叠加原理及其举例	140
复习思考题	148
自测题	149
习题	150

第 6 章 流动阻力和能量损失	154
6.1 流动阻力和能量损失的两种形式	154
6.2 粘性流体的两种流态	156
6.3 沿程损失与切应力之间的关系	160
6.4 圆管中的层流运动	162
6.5 紊流运动简介	165
6.6 紊流沿程损失的分析与计算	172
6.7 管流和明流的局部损失	187
复习思考题.....	196
自测题.....	197
习题.....	198
第 7 章 量纲分析和相似原理	202
7.1 量纲和谐原理	202
7.2 量纲分析法	206
7.3 流动相似原理	211
7.4 模型试验	218
复习思考题.....	223
自测题.....	223
习题.....	224
设计题.....	226
第 8 章 边界层理论基础及绕流运动	227
8.1 边界层的基本概念	227
8.2 边界层微分方程	231
8.3 边界层的动量积分方程	235
8.4 平板边界层的近似计算	237
8.5 边界层的分离现象	246
8.6 绕流阻力	249
复习思考题.....	255
自测题.....	256
习题.....	257
第 9 章 孔口、管嘴出流和有压管流	259
9.1 孔口出流	259
9.2 管嘴出流	264

9.3	简单短管的恒定有压流	270
9.4	简单长管的恒定有压流	278
9.5	复杂长管的恒定有压流	280
9.6	管网中的恒定有压流计算基础	286
9.7	非恒定有压管流	295
	复习思考题	305
	自测题	308
	习题	309
第 10 章	可压缩气流在管道中的流动	315
10.1	可压缩气流的一些基本概念	315
10.2	理想气体一维恒定流动基本方程	320
10.3	一维恒定等熵气流的基本特性	327
10.4	喷管的等熵出流	333
10.5	等截面气体管路的计算	340
	复习思考题	349
	自测题	350
	习题	351
第 11 章	紊动射流和紊流扩散	353
11.1	紊动射流的基本特征	353
11.2	圆断面射流	359
11.3	平面射流	366
11.4	温差射流和浓差射流	367
11.5	有限空间射流简介	374
11.6	流体扩散的基本方程	376
	复习思考题	385
	自测题	386
	习题	387
	部分习题答案	390
	名词索引	399
	参考文献	410

第 1 章

绪 论

流体力学是研究流体平衡与运动规律及其实际应用的一门学科。在流动分析中,一般情况下可将流体作为连续介质处理。本章重点讲述流体粘性等主要物理性质及作用在流体上的力,并简要介绍流体力学的研究方法。

1.1 流体力学的研究任务及其发展简史

流体力学是人类认识和利用自然过程中所形成的科学,主要研究流体平衡与运动的规律以及流体与周围物体的相互作用。顾名思义,流体力学的研究对象为流体,包括液体和气体。易流动性是流体区别于固体的根本标志,也是流体力学成为宏观力学一个重要分支的根本原因。

人类的生活和生产实践离不开空气和水,它们是最常见的流体,可见流体力学的涉及面和应用面是非常广泛的。一般将内容侧重于理论的流体力学称为理论流体力学;侧重于应用的,主要为解决工程实际问题的,称为工程流体力学。工程流体力学中,以水或液体作为主要研究对象,以水利工程、环境工程和土木工程为主要应用领域的,又被称为水力学。它们的基本概念、基本原理和基本方法,在很多方面都是相同的。流体作为自然界中物质的一种形态,其宏观运动遵循物质运动的普遍规律,如质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等。流体力学中的基本定理实质上都是普遍规律在流体运动中的具体体现。

人类文明的进步离不开对流体运动规律的认识。实际上,公元前4000年左右古罗马建造的城市供水系统,我国历史上的大禹治水和公元前250年前左右修建的都江堰工程,近代各种动力机械的发明,飞机上天、人类登月等文明史上光辉灿烂的成就都凝结着人们对流体运动规律的深刻理解。早期,人们对于流体运动规律的认识主要是经验性的,随着近代科学技术的进步,这种认识不断理性化。牛顿力学体系的建立奠定了流体力学的理论基础。20世纪以后,随着人们对紊流现象的认识不断深入,现代流体力学的框架得以形成,流体力学的基本理论和分析方法日趋完善,并在航空航天、水利工程、土木工程、海洋工程、机械工程、生命科学、环境科学、地球科学等领域得到前所未有的广泛应用。基础科学和现代技术的快速发展又极大地促进了流体力学的研究与应用,而研究流体运动的方法与手段的不断创新发展又加深和提高了对流体运动规律的认识。

流体力学的发展经历了最初的古典流体力学与实验流体力学两个体系并存但互不联系的阶段,逐步发展到理论与实验相结合的阶段。目前已经是理论分析、实验模拟与数值计算相结合的新发展阶段。其发展过程可参考有关流体力学书籍的介绍,本书只对流体力学发展起重要作用的研究成果作一概要的叙述。

公元前250年左右,古希腊的阿基米德(Archimede, BC287—BC212)提出了著名的浮力定律,奠定了流体静力学的基础。此后,直到公元15世纪的文艺复兴时期以前,没有形成系统的流体力学理论。公元15世纪末以后,在城市建设、航海和机械工业发展需求的推动下,人们对流体运动规律的认识不断理性化。达·芬奇(Do Vinci, 1452—1519)、伽利略(Galileo, 1564—1642)、托里拆利(Torricelli, 1608—1647)、帕斯卡(Pascal, 1623—1662)、牛顿(Newton, 1642—1727)等人利用实验方法研究了静水压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水流切应力等,对水流特性的认识上升到一定的理论高度。公元18世纪以后,流体力学得到了较快的发展,逐步成为一门独立的学科。当时对流体运动规律的研究大致可分为两大类:一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导,建立流体运动的基本方程,主要的成果包括:伯努利(Bernoulli, 1700—1782)建立了一维恒定总流运动的伯努利方程,欧拉(Euler, 1707—1783)建立了描述理想流体运动的欧拉方程,纳维(Navier, 1785—1836)和斯托克斯(Stokes, 1819—1903)建立了描述粘性流体运动的纳维-斯托克斯方程,雷诺(Renolds, 1842—1912)建立了描述紊流运动的雷诺方程。这些方程奠定了流体力学的理论基础。但纯理论的推导结果或由于某些假定与实际流动不尽相符,或限于当时的数学工具难于求解,因此理论方法无法解决复杂的实际问题。与此同时,为了解决生产实际问题,实验流体力学逐步发展起来。在这方面做出代表性研究成果的学者主要有毕托(Pitot, 1695—1771)、文透里(Venturi, 1746—1822)、谢才(Chezy, 1718—1798)和曼宁(Manning, 1816—1879)等人。他们主要是从大量实验和实际观测数据中总结一些实用的经验关系式,并利用简化的基本方程进行数学分析,建立各

运动要素之间的定量关系。需要指出的是,在 19 世纪末到 20 世纪初,普朗特(Prandtl,1878—1953)将实验与理论流体力学很好地结合起来,创立了边界层理论。这一基本理论建立了理想流体研究和实际流体研究之间的内在联系。随后,相似理论和量纲分析方法沟通了理论分析与实验研究的渠道,而翼型及叶栅绕流分析成为空气动力学和机翼理论的基础。这个时期在紊流理论等方面的研究也得到不断的发展。主要代表性成果由雷诺、瑞利、儒可夫斯基、冯·卡门等人获得。在 20 世纪 60 年代以后,现代流体力学所研究的流体对象更加广泛,充分体现了它既是一门基础科学,同时又是一门应用科学。随着新的实验技术和设备的运用,如激光测速、数字图像处理等为流体力学的研究提供了更加精确的测量手段,谱分析及小波分析等方法为数据的处理提供了更加有效的数学工具,多媒体技术又为流动现象的记录和再现提供了形象生动的图画。随着计算机技术的不断更新换代,流体的数值模拟技术成为新的研究手段,对实际流动的数值仿真与理论分析和实验研究成为互相印证的研究方法。此外,通过与其他学科相互渗透,逐步形成了一些特色鲜明的专门学科,如生物流体力学、电磁流体力学、环境流体力学、波浪力学等。各学科领域的不断发展也为流体力学本身提供了新的研究任务。

1.2 流体的基本特征及连续介质假设

1.2.1 流体的易流动性

流体的基本特性是易流动性,从表观上看不像固体那样能保持一定的形状。流体在静止时不能承受剪切力以抵抗剪切变形,只有在运动状态下,当流体质点之间有相对运动时,才能抵抗剪切变形。只要有剪切力的作用,不论剪切力多么微小,流体就不会静止下来,将产生连续不断的变形,这就是流体易流动性的表现。

1.2.2 连续介质假设

流体的真实结构是由彼此之间有空隙并在进行复杂的微观运动的大量流体分子所组成的聚集态。从微观上看,流体是不连续体,其分子运动是不规则的。然而,流体力学并不关心个别流体分子的运动细节,而是研究流体的宏观运动,即大量分子行为的统计平均特性。从宏观上看,流体的运动特性可以呈现出空间上的连续性,这是因为宏观上足够小的微体积里可以包含足够多的流体分子。例如在标准状态下,体积为 10^{-9} cm^3 的空气,所含分子数为 2.7×10^{10} ,即微观上足够大,以至于这些流体分子行为的统计平均值是稳定的。我们把这种宏观上足够小,微观上足够大的微体积

内所有流体分子组成的流体团称为流体质点,它是宏观研究流体的最小单位。可见,由流体分子行为的统计平均值决定的流体物理特性和运动要素是可以定义在流体质点上的。

根据上述分析,在研究流体运动规律时,提出了连续介质假设,认为流体质点只占据一个空间几何点,流体区域由流体质点连续组成,占满空间而没有间隙,而且定义在流体质点上的物理性质和运动要素是空间连续变化的。工程上处理的流体力学问题尺度一般都是大尺度,远大于流体分子运动平均自由程为代表的微观尺度,所以连续介质假设是完全适用的。

连续介质假设还与时间尺度相关联。从微观上看,流体的分子运动特性还表现出时间上的不规则性。微观时间尺度可以用分子的碰撞频率来表征。如果时间尺度小于微观时间尺度,所表现出的分子的碰撞频率是不稳定的,这样流体的压强、速度等运动要素就不具备稳定的统计平均值。微观时间尺度是很小的,例如在标准状态下,体积为 10^{-9}cm^3 的空气,在 10^{-6}s 的时间里,空气分子碰撞约 10^{14} 次。而在工程实际中,研究问题的时间尺度远大于微观时间尺度。我们可以在宏观上足够短、微观上足够长的时间段里得到一个流体质点内分子行为的统计平均值。宏观上把这个足够短的微小的时间段看成是一个时刻,这样流体物理性质和运动要素即可视为在时间上也是连续变化的。

连续介质假设是近似的、宏观的假设。它为建立流场的概念奠定了基础。设在 t 时刻,有某个流体质点占据了空间点 (x, y, z) ,将此流体质点所具有的物理量(数量或矢量)定义在该时刻和空间点上。根据连续介质假设,就可形成在时间和空间上连续分布的数量(或矢量)场。微积分、数理方程等常用的数学工具便可以得到充分的利用。

连续介质假设的运用是有条件的。对于一些特殊问题,如稀薄气体的流动问题,由于一个宏观上的小体积内所含分子数太少,已经不能用统计方法给出物理量的平均值,连续介质假设就不适用了。

1.3 流体的主要物理性质

流体具有物体共有的宏观物理性质,也有自身的一些特殊性质。研究流体的物理性质是研究流体宏观机械运动的基础。

1.3.1 惯性

惯性是物体所具有的反抗改变原有运动状况的物理性质。任何物体均具有惯性,流体也不例外。度量惯性的物理量就是物体的质量。质量越大,惯性越大。当物

体受其他物体的作用力而改变运动状态时,此物体反抗改变原有运动状态而作用于施力物体上的反作用力称为惯性力。设物体质量为 m , 加速度为 a , 则惯性力 F 为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

负号表示惯性力方向与物体的加速度方向相反。

流体单位体积内所具有的质量称为密度,以 ρ 表示,其单位为 kg/m^3 。对于均质流体,设其体积为 V 、质量为 m , 则密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

对于非均质流体,根据连续介质假设,若流体微团的体积为 ΔV , 质量为 Δm , 则密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-3)$$

其中 $\Delta V \rightarrow 0$ 的含义应理解为流体微团趋于流体质点。此时密度是定义在流体质点上的。

流体密度将随温度和压强变化。但液体的密度随温度和压强的变化很微小,在常温常压下,可将其视为常数。气体的密度随温度和压强的变化比较显著,将在下面流体的压缩性及膨胀性一节中讨论。在一个标准大气压下,不同温度下空气和水的密度如表 1-1 所示。

表 1-1 一个标准大气压下空气和水的密度

温度 /°C	空气的密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水的密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度 /°C	空气的密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水的密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0	1.293	999.9	40	1.128	992.2
5	1.270	1000.0	45	1.111	990.2
10	1.248	999.7	50	1.093	988.1
15	1.226	999.1	60	1.060	983.2
20	1.205	998.2	70	1.029	977.8
25	1.185	997.1	80	1.000	971.8
30	1.165	995.7	90	0.973	965.3
35	1.122	994.0	100	0.947	958.4

1.3.2 流体的粘滞性、粘性系数

(1) 粘滞性及牛顿内摩擦定律

流体具有易流动性,静止时不能承受剪切力以抵抗剪切变形,但在运动状态下,流体就具有抵抗剪切变形的能力,这就是粘滞性,简称粘性。在剪切变形的过程中,流体层之间发生相对运动,由于流体具有粘滞性,流体层之间会出现成对的切力(也

称内摩擦力),其作用是阻碍相对运动,从而影响流体的运动状况和变形的速度。流体的粘滞性导致流体在运动过程中为克服内摩擦力而做功,是流体运动中机械能量损失的根源。

流体的内摩擦力与运动速度梯度的关系首先由牛顿在 1686 年根据实验结果提出,并得到后来实验研究的进一步验证,因此该结果被称为**牛顿内摩擦定律**。可表述如下:流体沿某一固体表面作平行直线运动,如图 1-1(a)所示,流层间内摩擦力 T 的大小与流体性质有关,并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 和接触面积 A 成正比,而与接触面上的压力无关。用公式可写为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中, μ 为比例系数,表征流体的粘滞性,称为**动力粘滞系数**或**动力粘度**,可简称**粘度**,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; A 为流层间的接触面积; $\frac{du}{dy}$ 为流体运动横向速度梯度。

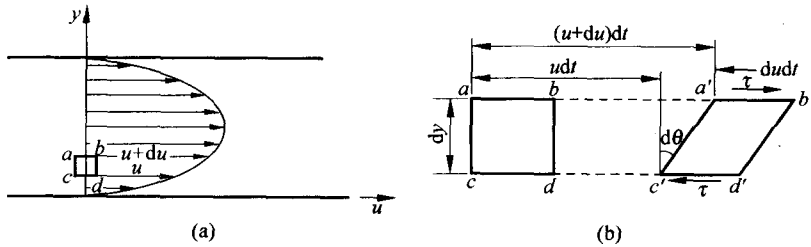


图 1-1 平行平板间粘性流动

如以 τ 代表单位面积上的内摩擦力,即切应力,则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

切应力的单位为 Pa 。

为说明上式中 $\frac{du}{dy}$ 的物理意义,在图 1-1(a)中垂直与流动方向的 y 轴上任取一边长为 dy 的矩形流体微团,并将它放大成图 1-1(b)。由于其下表面速度 u 小于上表面速度 $u + du$,经过 dt 时段以后,下表面移动的距离 udt 小于上表面移动的距离 $(u + du)dt$,因而矩形微团 $acdb$ 变形为 $a'c'd'b'$,原微团中的直角 acd 变成角 $a'c'd'$,直角减小了角度 $d\theta$ 。由于 dt 是一个微小时段,因此转角 $d\theta$ 很小,可认为

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{dudt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

可见,速度梯度就是流体微团中直角减小的速度,也称为剪切变形速度。所以牛顿内摩擦定律也可以理解为流体在运动中出现的切应力与剪切变形速度成正比。

流体的粘滞性还可以用运动粘滞系数 ν 表示,运动粘滞系数也可简称为运动粘度,它与动力粘性系数的关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

运动粘滞系数 ν 的单位为 m^2/s 。

流体种类不同,其粘性也各不相同,且随其温度和压力而变化。对于常见的液体如水,气体如空气等,由于粘性随压力的变化不大,一般可以忽略其变化。因此温度是影响流体粘性的主要因素。需要注意的是温度对气体和液体的粘性影响规律不同,从分子微观运动的角度可以解释其原因。粘性是流体分子间的吸引力和分子不规则热运动而产生动量交换的结果,温度升高,分子间的引力降低,分子间热运动增强,流体动量增大;而温度降低,分子间的引力增大,分子间热运动减弱,流体动量减小。对于气体来说,分子间距较大,吸引力对粘性影响很小,而热运动产生的动量交换率随温度升高而加剧,因此气体的粘性随温度升高而加大。对于液体来说,由于其分子间距较小,吸引力起主要作用,因此液体的粘性随温度升高而降低。一个大气压下不同温度时空气的粘滞系数和常压下不同温度时水的粘滞系数,分别如表 1-2 和表 1-3 所示。其他流体的粘滞系数可查阅有关手册。

表 1-2 一个大气压下空气的粘滞系数

t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

表 1-3 常压下水的粘滞系数

t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
0	1.792	1.792	15	1.140	1.140
5	1.519	1.519	20	1.005	1.007
10	1.308	1.308	25	0.894	0.897

续表

t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	t /°C	μ /($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν /($10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
30	0.801	0.804	60	0.469	0.477
35	0.723	0.727	70	0.406	0.415
40	0.656	0.661	80	0.357	0.367
45	0.599	0.605	90	0.317	0.328
50	0.549	0.556	100	0.284	0.296

(2) 理想流体

实际流体都有粘性,而粘性对流动的影响非常复杂,给流体运动规律的研究带来很大的困难。在实际工程和某些理论研究中,有些时候可以不考虑粘性的影响,即切应力很小以至于可以忽略。忽略了粘性影响后,流动分析的过程将会得到很大的简化,所以在流体力学的研究中,人们引入了理想流体的概念。**理想流体**是指没有粘滞性的流体。对理想流体运动的分析成果,可近似反映粘性作用不大的实际流动情况,也可以作为分析实际流动的台阶。理想流体是一种假想的流体,如远离固体边壁边界层的流动,其剪切变形速度很小,切应力予以忽略,就可将流体按理想流体处理。而在实际流动中,固体壁面边界层内的流体变形速度很大,一般不能忽略流体粘性作用。

(3) 牛顿流体与非牛顿流体

实际流体运动的切应力与剪切变形速度的关系并不都符合牛顿内摩擦定律。对于不同的流体,两者的关系如图 1-2 所示。图中只有 a 线为一条过原点的直线,所代

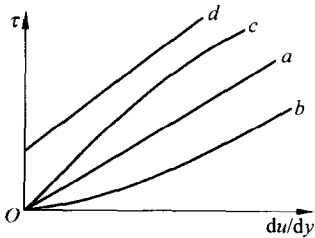


图 1-2 粘性流体切应力特性

表流体的粘滞系数 μ 值不变,流体运动的切应力与剪切变形速度的关系符合牛顿内摩擦定律。这类流体,称为**牛顿流体**。而其他流体其切应力与剪切变形速度的关系如 b 、 c 、 d 线所示,不符合牛顿内摩擦定律,这类流体,通称为**非牛顿流体**。切应力与剪切变形速度的关系如 b 线所示的流体为膨胀性流体,其粘性系数不是常数,将随剪切变形的增大而增大,如淀粉浆等便属于这类流体。切应力与剪切变形速度的关系如 c 线所示的流体为伪塑性流体,其粘性系数不是常

数,将随剪切变形的增大而减小,如橡胶液等便属于这类流体。如 d 线所示的流体为理想宾汉流体。它是当切应力达到某一数值时才开始发生剪切变形,而切应力与剪切变形速度也是线性关系,如泥浆等便属于这类流体。

1.3.3 流体的压缩性及膨胀性

流体在压力的作用下,会发生体积压缩变形,同时其内部将产生一种企图恢复原状的内力(弹性力)来抵抗体积压缩变形,在除去压力后能恢复原状,这种性质被称为流体的压缩性,或称为弹性。

流体的压缩性的大小一般用体积压缩系数来表示。压缩系数是在一定温度下,单位压强作用下流体体积的相对减小值。由于压缩过程中流体质量保持不变,压缩系数也等于单位压强作用下流体密度的相对增加值,即

$$\alpha_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{\rho}} = \frac{d\rho}{dp} \quad (1-7)$$

式中, α_p 为体积压缩系数; V 为流体体积; p 为压强; ρ 为流体密度。

工程上也经常采用流体的体积弹性模量 K 来表示流体的压缩性。体积弹性模量是体积压缩系数的倒数,即

$$K = \frac{1}{\alpha_p} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-8)$$

表 1-4 列出水在 0°C 时的体积压缩系数。从表中可以看出,水的压缩性很小,压强每升高一个大气压,水的密度约增加 1/20000。一般情况下,在流动分析中不考虑水的压缩性;但在特殊情况下,如水管阀门突然关闭发生水击现象时,压强变化非常迅速,就需要考虑水的压缩性。

表 1-4 水在 0°C 时的体积压缩系数及体积弹性模量

压强/at	5	10	20	40	80
α_p/Pa^{-1}	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}
K/Pa	1.859×10^9	1.866×10^9	1.883×10^9	1.894×10^9	1.941×10^9

在流体受热的情况下,体积膨胀,密度减小,温度下降则恢复原状,这种性质被称为流体的膨胀性。

液体膨胀性用体积膨胀系数 α_v 表示。体积膨胀系数的定义是:在一定压强作用下,单位温度升高引起的体积变化率,即

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-9)$$

α_v 即为体积膨胀系数,单位为 K^{-1} 。 α_v 值的大小反映了液体膨胀的强弱。由于液体膨胀过程中体积的变化也反映了其密度的变化, α_v 也可以表示为

$$\alpha_v = -\frac{d\rho/\rho}{dT} \quad (1-10)$$