



21世纪高等院校
土木与建筑专业“十二五”规划教材

工程流体力学 (水力学)

主编 冯 燕

中国建材工业出版社



21 世纪高等院校

土木与建筑专业“十二五”规划教材

工程流体力学

(水力学)

主 编 冯 燕

副主编 张 璇 朱永英 肖 湘

参 编 康 旭 陈涛郁 徐冰峰

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学. 水力学 / 冯燕主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2013. 8

21 世纪高等院校土木与建筑专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5160-0491-3

I. ①工… II. ①冯… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 ②水力学-高等学校-教材 IV.

①TB126 ②TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 149959 号

内 容 提 要

本书根据高等院校土建类各专业水力学课程基本要求, 以及国家注册工程师流体力学考试大纲编写。全书系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。全书共 10 章, 内容包括绪论, 流体静力学, 流体运动学及动力学基础, 流动阻力与水头损失, 孔口、管嘴出流和有压管流, 明渠恒定流动, 堰流和闸孔出流, 渗流, 模型试验基础, 可压缩气体一元恒定流动。各章均选编有一定数量的例题、思考题和练习题; 书后附有练习题参考答案。

本书可以作为土建类的土木工程、给水排水科学与工程、交通土建工程、建筑工程、地下建筑工程、市政工程、水利水电工程、建筑环境与设备工程、地质与环境工程等专业的本科教材或教学参考书以及全国注册工程师考试的参考书, 也可供其他非流体力学专业的本科生、研究生和工程技术人员参考。

工程流体力学(水力学)

冯 燕 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 18

字 数: 449 千字

版 次: 2013 年 8 月第 1 版

印 次: 2013 年 8 月第 1 次

定 价: 39.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。电话: (010)88386906

对本书内容有任何疑问及建议, 请与本书责编联系。邮箱: jiaocaidayi51@sina.com

前言

Foreword

工程流体力学是普通高等院校土建类各专业的一门重要技术基础课,也是土木工程专业技术人员必须掌握的基础理论知识。

本书根据高等院校土建类各专业水力学课程基本要求、国家注册工程师流体力学考试大纲编写而成,是作者多年教学实践的结晶,目的在于加强学生理论基础,拓宽其知识面,培养适应土建学科的应用型人才。

(1)本书在介绍基础知识的同时,注重工程意识的培养,注意理论联系实际,注意本课程与相关课程之间的纵向和横向联系,增加教材的实用性。

(2)本书按照应用性本科人才培养目标的要求,紧密围绕专业指导委员会编制的指导性专业规范及对课程内容的要求和国家注册工程师流体力学考试大纲的要求来编写。本书根据土建类专业的特点,以一元流理论为理论基础,简化教学过程,强调知识点的物理意义、工程背景、分析研究的思路与方法及如何运用,在保证理论基础的前提下,精选内容,使基本原理和概念的阐述准确、清晰,重点突出;力求做到所述内容通俗易懂,富有启发性,以利于教学与自学。

(3)本书力求由浅入深,注重基本概念、原理和工程应用要点的讲解。为了巩固和加深对基本理论的理解,提高计算技能以及培养分析问题、解决问题的能力,各章均配有系统性的例题、思考题和练习题。

(4)本书内容安排灵活,适应各学校、各专业不同学时、不同特点的要求。全书主要内容包括基本理论和工程应用两大部分。基本理论部分对基本概念和基本原理的阐述,注

重系统、简洁和深入浅出,这一方面反映出较少学时课程的特点,另一方面也有利于学生打好基础,以便今后有能力深入发展;在结合专业阐述实际应用时,本书考虑到土建类专业的特点(包括岩土、桥梁、道路、水利水电、给排水、建筑环境与设备、地下建筑等专业),涉及的面比较广;部分带※号的章节,作为选学内容,以便教师根据专业方向组织教学。本书编写时还兼顾流体力学应用广泛的特点,使之可以作为其他非力学专业有关工程技术人员的参考书。

本书共 10 章,由昆明理工大学冯燕担任主编。具体编写分工如下:第 1 章、第 3 章、第 5 章由冯燕编写;第 2 章、第 4 章由广西科技大学鹿山学院张璇编写;第 6 章、第 7 章由大连海洋大学朱永英编写;第 8 章由南宁学院肖湘编写;第 9 章由西南林业大学康旭编写;第 10 章由昆明理工大学陈涛郁编写;昆明理工大学徐冰峰参与了第 1 章的编写。全书由冯燕统稿。昆明理工大学研究生罗雄兵、吴雪承担部分绘图工作。

本书同时被列为云南省普通高校“十二五”规划教材。本书编写过程中得到了重庆大学张智教授,昆明理工大学程赫明教授、郭荣鑫教授、施永生教授的宝贵意见和建议,在此谨表诚挚的谢意。

本书在编写过程中参考了有关书籍,从主要参考书籍文献中引用了部分例题和习题,在此谨向有关作者和出版社表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目录 Contents

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 概述 / 1
- 1.2 流体的连续介质模型 / 3
- 1.3 流体的主要物理性质 / 4
- 1.4 作用在流体上的力 / 12

第 2 章 流体静力学 / 15

- 2.1 静止流体的应力特征 / 15
- 2.2 流体平衡微分方程及其积分 / 17
- 2.3 重力场中流体静压强的分布规律 / 20
- 2.4 流体静压强的量测 / 23
- ※2.5 液体的相对平衡 / 26
- 2.6 液体作用在平面上的总压力 / 28
- 2.7 液体作用在曲面上的总压力 / 32
- ※2.8 液体作用在潜体与浮体上的总压力——阿基米德原理 / 35

第 3 章 流体运动学及动力学基础 / 44

- 3.1 描述流体运动的两种方法 / 45
- 3.2 流体运动的若干基本概念 / 47
- 3.3 流体运动的连续性方程 / 52
- 3.4 流体的运动微分方程 / 55
- 3.5 伯努利方程 / 57
- 3.6 恒定总流的动量方程 / 69
- 3.7 流场理论基础 / 74

第4章 流动阻力与水头损失 / 89

- 4.1 流动阻力与水头损失的类型 / 89
- 4.2 实际流体流动的流态 / 90
- 4.3 均匀流动的沿程水头损失和基本方程式 / 93
- 4.4 圆管中的层流运动 / 95
- 4.5 紊流运动 / 97
- 4.6 沿程阻力系数 λ 的变化规律 / 104
- 4.7 边界层理论简介 / 110
- 4.8 局部水头损失 / 113

第5章 孔口、管嘴出流和有压管流 / 122

- 5.1 孔口出流 / 122
- 5.2 管嘴出流 / 127
- 5.3 有压管道中的恒定流 / 130
- ※5.4 有压管道中的水击简介 / 148

第6章 明渠恒定流动 / 162

- 6.1 概述 / 162
- 6.2 明渠均匀流 / 165
- 6.3 明渠恒定非均匀流基本概念 / 173
- 6.4 明渠水流的两种急变流现象——水跃和水跌 / 181
- 6.5 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析及计算 / 185

第7章 堰流和闸孔出流 / 194

- 7.1 概述 / 194
- 7.2 薄壁堰 / 198
- 7.3 实用堰 / 201
- 7.4 宽顶堰 / 203
- *7.5 小桥孔过流的水力计算 / 207
- *7.6 无压涵洞的水力计算 / 210
- *7.7 闸孔出流 / 213

*7.8 泄水建筑物下游的消能与衔接 / 216

第 8 章 渗流 / 222

8.1 概述 / 222

8.2 渗流基本定律 / 225

8.3 恒定非均匀渐变渗流 / 228

8.4 水平集水构筑物的渗流 / 232

8.5 井的渗流 / 233

8.6 渗流对建筑物安全稳定的影响 / 240

第 9 章 模型试验基础 / 245

9.1 量纲分析 / 245

9.2 相似理论基础 / 251

9.3 模型试验 / 253

*第 10 章 可压缩气体一元恒定流动 / 258

10.1 可压缩气流运动的基本概念 / 258

10.2 理想气体一元恒定流动的基本方程 / 262

10.3 可压缩气体在等截面管道中的恒定流动 / 265

练习题参考答案 / 271

附录 / 275

参考文献 / 280

第1章 绪论

●学习重点

1. 工程流体力学的研究方法。
2. 流体的连续介质模型。
3. 流体的主要物理性质。
4. 作用在流体上的两种力。

●学习目标

了解工程流体力学的研究对象、研究内容、研究方法及土建工程中的工程流体力学问题；正确理解连续介质的概念；熟悉流体的基本特征及主要物理性质；重点掌握流体的密度和黏滞性、牛顿内摩擦定律及其应用；了解在何种情况下需考虑流体的可压缩性和液体的表面张力特性；理解理想流体的连续介质模型、不可压缩流体模型的概念及工程应用；掌握质量力、表面力的定义及物理意义。

1.1 概述

1.1.1 工程流体力学的研究对象和研究内容

1. 工程流体力学的研究对象

在常温常压下，自然界的物质一般有三种存在形态：固态、液态和气态。液体和气体统称为流体。工程流体力学的研究对象是流体。流体最基本的特征是具有流动性，即流体受切向力作用发生连续变形的性质。

流体与固体相比，其区别主要在于：固体的分子间距离很小，内聚力很大，所以它能保持固定的形状和体积，能承受一定的拉力、压力和剪切力；而流体则不同，由于其分子间距大于固体的分子间距，内聚力很小，它几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形；在微小剪切力作用下，极易发生变形或流动。所以流体不能保持固定的形状，具有易流动性。

液体与气体相比，其区别主要在于：

(1)在一定条件下，一定质量的液体有一定的体积，存在一个自由液面，而气体能充满任意形状的容器，没有一定的体积，不存在自由液面。

(2)液体的可压缩性很小，而气体的可压缩性较大。其原因在于与气体相比，液体分子间距离较小，密度较大，分子的内聚力较大。但是，当气流流速远小于声速时，气体的密度变化很小，气流的运动规律与水流基本相同。

2. 工程流体力学的研究内容

流体力学学科随着生产实践的发展和科学技术的进步而不断发展,研究领域和服务范围越来越广。流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。一般将侧重于研究理论体系、注重数学推理的流体力学称为理论流体力学;侧重于解决工程实际问题的流体力学,称为工程流体力学或应用流体力学。若研究对象主要是液流,且又侧重于应用的,则称为工程流体力学(水力学)。

工程流体力学是研究流体平衡、宏观机械运动规律及其在工程中应用的科学,是力学的一个分支学科。工程流体力学所研究的基本规律,包括两大部分:一是关于流体处于平衡状态时的力学规律;二是关于流体处于运动状态时,作用于流体上的力与表征运动状态的各种物理量之间的关系,以及流体的运动特性与能量守恒和转换的规律。

1.1.2 工程流体力学与土木工程

由于流体在自然界中的普遍存在,工程流体力学在包括航空、航天、建筑、水利、交通、机械、采矿、冶金、化工、纺织、石油、能源、环境等许多工程领域都有广泛的应用。例如,水利工程中,大型水利枢纽、水库、水力发电站的设计和建造,洪峰的预报,泥沙的沉积和运动等问题都离不开工程流体力学;机械工业中的润滑、冷却、气力输送以及液压和气动控制,化学工业中的化学反应、传热和传质分析,石油工业中油、气、水的渗流以及油气的自喷、抽吸和输送等都与工程流体力学紧密相关。

工程流体力学和土建类各专业有着密切的关系。在给水工程中,城市生活和工业用水,从取水口与管路布置、处理构筑物的设计计算,到水泵选择、水塔修建等都需要解决一系列工程流体力学问题;在铁路、公路与桥梁工程中,隧洞通风,路基的沉陷、坍塌、滑坡、排水,堤坝的作用力,桥梁、涵洞、倒虹吸管和透水路堤的修建等问题都与工程流体力学密切相关;在房屋建筑工程中,地下水的渗透、地下建筑物的受力分析,风载、风振、穿街强风等问题也都与工程流体力学密切相关;在建筑环境与设备工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输配等都以流体为工作介质。此外,土建工程施工中,围堰修建、基坑排水、污水排放都要用到工程流体力学的基本原理。由此可见,只有掌握好流体的各种性质和运动规律,才能有效、正确地解决工程实际中所遇到的各种工程流体力学问题。因此工程流体力学已成为高等工科院校土建类专业的一门重要的技术基础课。

可以预见,随着生产的发展,新的课题会不断提出,工程流体力学将会在其中发挥更大的作用,学科本身也将会得到更大的发展。

1.1.3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学的研究方法大体上分为试验研究方法、理论分析方法和数值模拟方法三种。

1. 试验研究方法

试验研究方法通过对流体流动的观察和测量,来认识流体运动的规律。在工程流体力学中,试验研究的方法主要包括三个方面:一是原型观测,指对实际工程或天然的流动直接进行观测;二是系统试验,在试验室内对人工流动现象进行系统的研究,从中找出规律性;三是模型试验,在试验室内,以流动相似理论为指导,将实际工程缩小为模型,通过在模型上预演或重演

相应的流动现象,得出在模型中的流体运动规律;然后,再根据相似关系换算为原型的规律,以满足工程实践的需求。

2. 理论分析方法

理论分析方法是通过对流体物理性质及工程实际中流动特征的科学现象,提出合理的理论模型,建立流体运动的基本方程和定解条件,然后运用各种数学方法求出方程的解。由于流体运动具有复杂性,解决实际工程问题时,单纯依靠理论分析有时很难得到所需要的具体结果。所以常常采用理论分析与试验观测相结合的方法。

3. 数值模拟方法

数值模拟方法是在计算机应用的基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法等)将流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为各种数值模型,通过计算机进行数值计算和数值试验,最终获得定量描述流体运动规律的数值解。近几十年来,这一方法得到很大发展,已形成另外一门学科——计算流体力学。

上述三种方法互相结合,为发展流体力学理论,解决复杂的工程技术问题奠定了基础。对于一些重要的工程流体力学问题,通常采用理论分析、数值模拟和试验研究相结合的途径进行研究。本书主要介绍理论分析和试验研究方法。

1.2 流体的连续介质模型

流体由大量不断地做无规则运动的分子组成。从微观角度来看,由于分子之间存在空隙,因此,流体的物理量(如密度、压强、流速等)在空间上的分布是不连续的;同时,由于流体分子做随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。因此,以分子作为流动的基本单元来研究流体的运动是非常困难的。

根据物理学的研究,在标准状态下, 1cm^3 水中大约有 3.3×10^{22} 个水分子,水分子之间的平均间距约为 $3.1 \times 10^{-8}\text{cm}$; 1cm^3 气体中大约有 2.7×10^{19} 个气体分子,气体分子之间的平均间距约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。可见,在很小的流体体积中,包含了难以计数的流体分子,而且分子间的距离是非常微小的,这些分子各自进行着复杂的微观运动。在实际工程中,所研究流体的空间尺度远比分子尺寸大得多,分子间的空隙与工程中运动流体的几何尺寸相比微不足道,而且要解决的实际工程问题也不是流体微观运动的特性,而是整个流体的宏观特性及机械运动,即大量分子运动的统计平均特性,所以把流体看作不连续的分子结构是没有必要的。

基于上述原因,1753年,瑞士数学家和力学家欧拉(L. Euler)提出了一个基本假说,将流体看作连续介质,即流体是由无数质点组成且质点之间毫无空隙的连续体。所谓流体质点是指尺度大小同所流动空间相比微不足道,但又含有大量分子,具有一定质量的流体微元体。

根据连续介质模型,流体运动的物理量在流体中的分布是连续的,各物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就可以运用数学分析中的连续函数分析法来研究流体运动。

实践证明,连续介质模型的提出,为分析研究流体力学问题带来了极大的方便,使解决一般工程中的流体力学问题具有了足够的精度。但对于某些特殊问题,如研究在高空稀薄气体中的物体运动,平均自由程大到能够与物体特征长度尺度相比拟的分子,则连续介质模型不再适用。本书只讨论符合连续介质模型的流体。

1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素。因此,在研究流体的平衡与运动规律之前,应对流体的主要物理性质有所了解。在工程流体力学中,与流体运动有关的主要物理性质有以下几个方面。

1.3.1 惯性、密度和重度

1. 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质,其大小用质量度量,质量越大的物体,惯性也越大。

2. 密度

单位体积流体所具有的质量称为质量密度,简称密度,以符号 ρ 表示。

对于均质流体

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中 ρ ——流体的密度;
 m ——流体的质量;
 V ——流体的体积。

对于非均质流体,各点的密度不同,要确定空间某点流体的密度,可在该点周围取一微元体积 ΔV ,若它的质量为 Δm ,则该点的密度为

$$\rho=\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-2}$$

在国际单位制中,密度的单位是 kg/m^3 。

流体的密度随温度和压强的变化而变化。在一个标准大气压下,不同温度下水和空气的密度见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 在一个标准大气压时不同温度下水的密度						
温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	4	10	20	30	40
密度/ (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67	992.24
温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	60	70	80	90	100
密度/ (kg/m^3)	988.07	983.24	977.78	971.83	965.28	958.38

表 1-2 在一个标准大气压时不同温度下空气的密度						
温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	4	10	20	30	40
密度/ (kg/m^3)	1.29	1.27	1.25	1.21	1.17	1.13
温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	60	70	80	90	100
密度/ (kg/m^3)	1.09	1.06	1.03	1.00	0.97	0.95

试验表明,液体的密度随温度和压强的变化很小,一般情况下可视为常数。在工程计算中,通常取水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$,水银的密度为 $13600\text{kg}/\text{m}^3$,酒精的密度为 $799\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3. 重度

单位体积流体所受的重力称为流体的重度(或称为容重),以符号 γ 表示。

对于均质流体

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

式中 γ ——流体的重度;

G ——流体的重力;

V ——流体的体积。

对于非均质流体,任一点处的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

在国际单位制中,重度的单位是 N/m^3 。

因为 $G = mg$, 该式两边同除以体积 V , 则有 $\frac{G}{V} = \frac{m}{V}g = \rho g$, 即

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

由于重度与重力加速度 g 有关, 所以其值随流体在地球上位置的变化而变化。在工程流体力学计算中, 常取 $g = 9.8 \text{m}/\text{s}^2$ 。

1.3.2 黏滞性

前面已经提到, 与固体不同, 流体具有易流动性, 静止时不能承受任何微小的切应力及抵抗剪切变形, 但在运动状态下, 流体具有抵抗剪切变形的能力。

流体在运动状态下, 内部质点间或流层间因相对运动所产生的抵抗剪切变形的性质, 称为黏滞性(简称黏性)。相对运动的流层间成对出现的切向力称为黏滞力(又称为内摩擦力)。黏性是流体的固有属性, 是运动流体产生机械能损失的根源。

1. 黏滞性

现用牛顿平板试验来说明流体的黏性。

如图 1-1 所示, 设两个水平放置的平行平板相距为 h , 其间充满了流体, 平板面积为 A , 其面积足够大, 以至可忽略边缘对流体的影响。设下平板固定不动, 上平板受一拉力的作用, 以速度 u_0 匀速向右运动。由于流体黏附于固体壁上, 下平板上的流体质点的速度为零, 而黏附于上平板上的流体随上平板一起以速度 u_0 向右运动, 该层流体的运动会影响相邻的下一层流体, 并带动其运动, 这种影响会一层一层向下传递, 使各层都相继流动, 直至黏附于下平板上表面的一层流体, 其速度为零。当 h 和 u_0 较小时, 各流层的速度沿法线方向可视为呈直线分布。

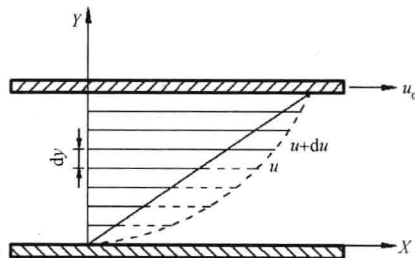


图 1-1 牛顿平板试验

可见, 各流层之间都有相对运动, 因而必定产生切向阻力, 又称内摩擦力。这种由于流体的相对运动产生内摩擦力而抵抗其相对运动的性质就是黏滞性, 或者说, 黏滞性是流体的内摩擦特性。通过内摩擦作用, 黏性切应力可在流体内一层一层地传递。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿在 1687 年所著的《自然哲学中的数学原理》一书中,提出了经后人验证的流体内摩擦定律(又称为牛顿内摩擦定律):处于相对运动的相邻两层流体之间的内摩擦力 T 的大小与流体的黏滞性有关,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。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

用切应力表示,则有

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ ——流速梯度,即流体沿流层法线方向的变化率;

μ ——动力黏滞系数(或动力黏度)。

为了进一步说明 $\frac{du}{dy}$ 的物理意义,在相距 dy 的上、下两流层之间取出一矩形流体微团来研究。如图 1-2 所示,在某瞬时 t ,矩形微元体位于 $ABCD$ 处,经过 dt 时段运动到 $A'B'C'D'$,由于微团上下层的速度相差 du ,微团除了平移外,还伴随着形状的改变,由原来的矩形变成了平行四边形,即产生了剪切变形(或角变形), AD 边及 BC 边都转动了 $d\theta$ 角,即剪切变形速度为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。在 dt 时段内, D 点较 A 点多移动了 $du dt$ 。因为 dt 为微分时段,角变位 $d\theta$ 也为微量,故

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

得

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-8)$$

可见,流速梯度的大小反映了流体微团的剪切变形速度(或剪切应变率)。于是牛顿内摩擦定律公式(1-7)又可写为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-9)$$

上式表明,流体做层流运动时,黏滞切应力的大小与剪切变形速度成正比。

3. 黏性系数

流体黏滞性可以用动力黏性系数 μ 和运动黏性系数 ν 来表示。

μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,因为 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$ 中含有力的因素 N ,属动力学的量,所以称 μ 为动力黏性系数(或绝对黏性系数); ν 的单位是 m^2/s ,因为它是不含力的量纲,属运动学的量,所以称为运动黏性系数(或相对黏性系数)。 ν 和 μ 的关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

流体的黏性一般是随温度和压强变化而变化的。但试验表明,在低压情况下(通常指低于

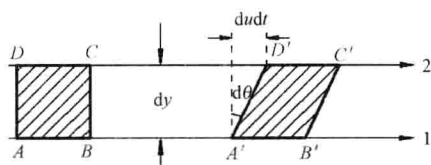


图 1-2 流体质点的剪切变形速率

100 个大气压), 压强的变化对流体的黏性影响很小, 一般可以忽略。温度则是影响流体黏性的主要因素, 而且液体和气体的黏性随温度的变化而变化, 液体的黏性随温度的升高而减小, 而气体的黏性则随温度的升高而增大。这主要因为黏性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果, 温度升高, 分子间的吸引力降低, 分子间热运动增强, 动量增大; 反之, 温度降低, 分子间吸引力增大, 分子间热运动减弱, 动量减小。对于液体来说, 分子间的吸引力是决定性的因素, 所以, 液体的黏性随温度的升高而减小; 而对于气体来说, 分子间的热运动产生的动量交换是决定因素, 所以, 气体的黏性随温度的升高而增大。

虽然液体和气体的黏性都受温度影响, 但受影响的程度不同, 一般温度对液体黏性的影响要大于对气体黏性的影响。

水的 ν 值可按下面经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (1-11)$$

式中 t ——水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

一个标准大气压下空气的黏性系数见表 1-3。

表 1-3 一个标准大气压下空气的黏性系数

$t/^{\circ}\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

其他流体的黏性系数可查阅有关流体计算手册。

4. 理想流体

黏性是实际流体所固有的物理属性, 它对流体运动有着不容忽视的重要影响。但由于黏性的存在, 给流体运动规律的研究带来了很大的困难。在工程流体力学中, 为简化分析工作, 提出了“理想流体”的概念。所谓理想流体是指无黏性的流体, 即 $\mu=0$ 的流体。

理想流体实际上是不存在的, 它只是一种对流体的物理性质进行简化的力学模型。由于理想流体不考虑流体的黏性, 对流动的分析得到大大的简化, 从而容易得出理论分析的结果。

理想流体可以近似地反映黏滞性作用不大的实际流体的情况; 对于黏性影响不能忽略的实际流体的流动, 可以先将其视为理想流体的运动, 得出主要结论, 然后对黏性的影响进行研究, 再对原有的结论进行修正。

5. 牛顿流体和非牛顿流体

牛顿内摩擦定律仅适用于一般流体的层流运动, 对于某些特殊流体则不适用。通常把符

合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、酒精等;不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,如泥浆、血浆、牛奶、水泥浆、油漆、泥石流、聚合物液体等。牛顿流体与非牛顿流体的区别,可用图 1-3 表示。

如图 1-3 所示,流体的切应力与剪切变形率的关系曲线,称为流变曲线。曲线上某点的斜率即为流体在该点工况下的动力黏度 μ 。从图中可知,在温度不变的条件下,牛顿流体的 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 为一斜率不变的直线,说明其

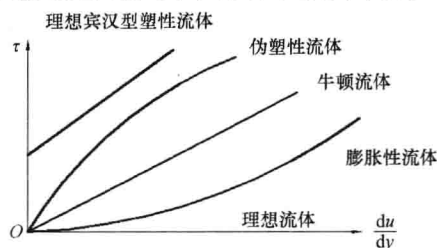


图 1-3 流变曲线

剪切应力与剪切变形速度成正比,而且当剪切变形速度为零时,内摩擦切应力也为零。其余的曲线均表示非牛顿流体,其中理想宾汉型塑性流体(如泥浆、血浆、牙膏、印刷油墨、某些石油制品等)只有当切应力达到某一值时才开始产生剪切变形, τ 与 $\frac{du}{dy}$ 的关系为线性关系;伪塑性流体(如尼龙、橡胶溶液、颜料、油漆等)及膨胀性流体(如生面团、浓淀粉糊、高浓度的挟砂水流、混凝土液等)的 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 的关系为非线性关系。

本书只讨论牛顿流体。

【例 1-1】 如图 1-1 所示,若两平板相距 10mm,两平板间流体为水。浮在水面上的平板运动速度 $u_0 = 1\text{m/s}$,水的黏性系数 $\mu = 1.009 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。求作用在平板单位面积上的阻力。

【解】 由题意可知,与上平板接触的水黏附在平板上,随平板一起运动,与下平板接触的水速度为零。由于两平板相距很近,其间流速可视为直线分布。

根据牛顿内摩擦定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

$$\text{得} \quad \tau = \mu \frac{u_0}{h} = 1.009 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.01} = 0.1009 (\text{N/m}^2)$$

1.3.3 压缩性与膨胀性

流体的压缩性是指流体受外界压力作用后,分子间距减小,体积缩小,密度增大,除去外力作用后能恢复原状的性质。

流体的膨胀性是指流体受热后,分子间距增大,体积膨胀,密度减小,当温度下降后能恢复原状的性质。

由于液体和气体的压缩性和膨胀性差别很大,下面分别讨论。

1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常用体积压缩系数 κ 来表示,它表示在一定的温度下,压强增加一个单位时,体积的相对缩小率。设液体原来的体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,则体积压缩系数为

$$\kappa = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-12)$$

式中 κ ——体积压缩系数, m^2/N ;

V ——液体原来的体积;

dV ——液体体积变化量;

dp ——作用在液体上的压强变化量。

由于液体受压体积减小, dp 和 dV 异号, 故上式中右侧加一负号, 以保证 κ 为正值。 κ 值越大, 表示液体压缩性越大, 液体越容易压缩。

体积 V 与质量 m 和密度 ρ 的关系为 $V = \frac{m}{\rho}$, 且 m 为常量, 故体积压缩系数 κ 又可写成

$$\kappa = \frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-13)$$

液体的压缩系数很小, 工程上常用其倒数, 即体积弹性模量 K 来衡量液体的压缩性。

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-14)$$

弹性模量 K 越大, 越不易被压缩。 K 的单位为 N/m^2 。

液体的压缩系数 κ 和弹性模量 K 随液体种类、温度和压强的变化而变化。

水的压缩系数 κ 见表 1-4, 表中压强单位为工程大气压(at)。

表 1-4 水的压缩系数 κ $\times 10^{-9}/\text{Pa}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	压强/at				
	5	10	20	40	80
0	0.540	0.537	0.531	0.523	0.515
10	0.523	0.518	0.507	0.497	0.492
20	0.515	0.505	0.495	0.480	0.460

液体的膨胀性用体积膨胀系数 α_v 来表示, 它表示在一定的压强下, 温度每增加 1°C 时, 体积的相对增加值或密度的相对缩小值。设在压强一定的条件下, 液体原来的体积为 V , 温度增加 dT 后, 体积增加 dV , 则体积膨胀系数为

$$\alpha_v = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-15)$$

体积膨胀系数 α_v 越大, 液体越容易膨胀。 α_v 的单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ (或 $1/\text{K}$)。

液体的体积膨胀系数是随液体种类、温度和压强的变化而变化。水的体积膨胀系数 α_v 见表 1-5。

表 1-5 水的体积膨胀系数 α_v $\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$

压强/at	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
100	0.43	1.65	4.22	5.48	7.04
200	0.72	1.83	4.26	5.39	—