

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

流体力学

主编 李福宝 李勤

副主编 王德喜 雷旭霞 王会林

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\}$$



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

流体力学

主 编 李福宝 李 勤
副主编 王德喜 雷旭霞 王会林

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 提 要

本书以流体静力学、流体运动学和流体动力学为理论基础,以解决流体力学问题的典型方法和典型工程应用为主线,注重基础理论的学习和基本方法的掌握,强调与工程应用相结合,同时结合了编者多年来在此领域的教学成果和科研实践。

全书共分 11 章,内容包括:绪论;流体的基本物理性质;流体静力学;流体运动学;流体动力学;平面势流;管内流体流动;流体绕物流动;湍流与射流;撞击流;流体流动的相似性等。

本书可作为高等院校教材,也可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/李福宝,李勤主编. —北京:冶金工业出版社,2010. 2
高等学校规划教材
ISBN 978-7-5024-5160-8

I. ①流… II. ①李… ②李… III. ①流体力学 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021701 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5160-8

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

2010 年 2 月第 1 版,2010 年 2 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16;13 印张;345 千字;197 页;1-2500 册

27.00 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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

流体力学是研究流体受力及其宏观运动规律的一门学科,是过程装备与控制工程专业的核心课程之一,其目的是使学生掌握流体受力及运动的基本原理,了解解决流体问题的基本方法,结合工程实际分析流体现象,研究过程装备中流体流动规律和与传递有关的过程。

本书以流体静力学、流体运动学和流体动力学为理论基础,以解决流体力学问题的典型方法和典型工程应用为主线,注重基础理论的学习和基本方法的掌握,强调与工程应用相结合,同时结合了编者多年来在此领域的教学成果和科研实践。

全书共分11章,内容包括:绪论,流体的基本物理性质,流体静力学,流体运动学,流体动力学,平面势流,管内流体流动,流体绕物流动,湍流与射流,撞击流,流体流动的相似性。其中第1、10章由李勤编写,第4章由王德喜编写,第5、6、8、9章由李福宝编写,第2、3章由雷旭霞编写,第7、11章由王会林编写。全书由李福宝统稿。

本书可用作高等学校的教材,也可作为工程技术人员参考用书。在本书编写过程中得到了专家同行的大力支持,在此表示衷心的感谢!同时恳请专家、学者及同行对本书的缺点和不妥之处提出宝贵的意见。

编 者

2009年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 工程流体力学的定义	1
1.2 研究方法	1
1.2.1 理论分析方法	1
1.2.2 实验研究方法	1
1.2.3 数值计算方法	1
1.3 流体力学的作用	2
2 流体的基本物理性质	3
2.1 流体的概念	3
2.1.1 流体的定义	3
2.1.2 流体质点的概念	3
2.2 流体密度	3
2.2.1 流体的密度	3
2.2.2 比体积(比容)	4
2.2.3 密度(重度)	4
2.2.4 混合气体的密度	4
2.3 流体的连续介质模型	4
2.4 流体的物理性质	5
2.4.1 流动性	5
2.4.2 可压缩性和膨胀性	5
2.4.3 黏性	6
2.4.4 表面张力	9
3 流体静力学	13
3.1 作用在流体上的力	13
3.1.1 表面力	13
3.1.2 质量力	13
3.1.3 流体静压强及特性	14
3.2 流体平衡微分方程	15
3.2.1 平衡微分方程	15
3.2.2 压强差公式	16
3.2.3 等压面微分方程	16

3.2.4 力的势函数	16
3.2.5 流体静止的必要条件	17
3.3 流体静力学基本方程式	18
3.3.1 重力场中液体的平衡方程	18
3.3.2 不可压缩流体中压强的计算公式	19
3.3.3 典型实例	19
3.4 流体静力学中的典型实例	21
3.4.1 流体的相对平衡	21
3.4.2 等角速度旋转容器中液体的平衡	22
3.4.3 旋转圆筒螺栓受力问题	23
4 流体运动学	24
4.1 流体的运动	24
4.1.1 流体运动的特点	24
4.1.2 流场的概念	24
4.1.3 流动的分类	24
4.2 流体运动的描述	25
4.2.1 拉格朗日法	25
4.2.2 欧拉法	26
4.2.3 质点导数	27
4.3 流场的直观表示	29
4.3.1 迹线	29
4.3.2 流线	29
4.3.3 流线与迹线的关系	30
4.4 流体微团运动分析	31
4.4.1 平动	32
4.4.2 线变形	32
4.4.3 角变形	33
4.4.4 旋转	34
4.5 有旋流动与无旋流动	35
4.5.1 涡量	35
4.5.2 有旋流动与无旋流动分析	36
4.5.3 速度环量 斯托克斯公式 高斯公式 汤姆孙定理	37
5 流体动力学	40
5.1 输运公式	40
5.1.1 系统与控制体	40
5.1.2 输运公式	40
5.2 面向控制体的流体动力学积分方程	42

5.2.1 质量连续方程	42
5.2.2 动量方程	44
5.2.3 动量矩方程	47
5.2.4 能量方程	48
5.2.5 伯努利方程及其应用	50
5.3 流体动力学微分方程	57
5.3.1 连续方程	57
5.3.2 运动方程	60
5.4 不可压缩流体流动微分方程	76
5.4.1 建立流动微分方程的基本方法	76
5.4.2 初始条件和边界条件	77
5.4.3 典型应用	78
6 平面势流	81
6.1 势函数	81
6.1.1 势函数的概念	81
6.1.2 速度势函数的定义	81
6.1.3 引入速度势函数的意义	82
6.1.4 速度势函数的求解	83
6.1.5 速度势函数与环量的关系	83
6.1.6 无旋流动的基本性质	83
6.1.7 拉普拉斯方程(势函数方程)	84
6.1.8 泊松方程	85
6.2 流函数	85
6.2.1 流函数的概念	85
6.2.2 流函数的定义	86
6.2.3 流函数的意义	86
6.2.4 流函数的求法	87
6.2.5 流函数的基本性质	87
6.2.6 流函数方程	87
6.3 流函数与势函数的关系	88
6.3.1 流函数与势函数的边界条件	88
6.3.2 柯西-黎曼条件	88
6.3.3 等势线	89
6.3.4 流线	89
6.3.5 流网	89
6.4 简单势流流动	90
6.4.1 解决势流问题的思路	90
6.4.2 势流叠加原理	90

6.4.3 简单流动	91
6.4.4 复合流动	94
7 管内流体流动	98
7.1 流体在直圆管内的流动	98
7.1.1 圆管内充分发展的层流流动	98
7.1.2 圆管内充分发展的湍流流动	99
7.2 圆管进口段流动分析	101
7.3 管路中的局部损失	102
7.3.1 管道局部损失	102
7.3.2 减小局部损失的措施	104
7.4 管路水力计算	106
7.4.1 管路计算的基本公式	106
7.4.2 管路计算	106
8 流体绕物流动	110
8.1 边界层	110
8.1.1 边界层基本概念	110
8.1.2 边界层厚度	111
8.1.3 边界层方程组及边界条件	114
8.1.4 边界层分离	122
8.2 流体绕物流动	125
8.2.1 复势与复速度	125
8.2.2 绕圆柱的无环量流动	126
8.2.3 绕圆柱的有环量流动	129
8.2.4 保角映射方法的基本思想	130
8.2.5 卡门涡街	132
8.2.6 库塔条件	134
8.2.7 圆柱绕流	136
8.3 风轮的空气动力学特性	137
8.3.1 风轮几何定义	137
8.3.2 贝茨理论	138
8.3.3 空气总动力	140
8.3.4 风力机主要尺寸设计	144
9 湍流与射流	147
9.1 湍流	147
9.1.1 层流与湍流	147
9.1.2 湍流的描述	148
9.1.3 湍流流动切应力	149

9.1.4	湍流的基本方程	151
9.1.5	普朗特经验混合长度理论	154
9.1.6	湍流模式	156
9.2	射流	158
9.2.1	自由湍流射流的基本概念	158
9.2.2	湍动射流的微分方程组	161
9.2.3	射流动量积分方法	163
9.2.4	湍流自由射流的流速分布求解	165
10	撞击流	172
10.1	撞击流技术的概述	172
10.1.1	撞击流的基本原理	172
10.1.2	撞击流的特点	172
10.1.3	撞击流的特性	173
10.1.4	撞击流应用	173
10.2	层流撞击流技术	174
10.2.1	层流撞击流数学模型	174
10.2.2	平面二维撞击流	174
10.2.3	一般三维撞击流	176
10.3	水平同轴撞击流中的单颗粒运动	176
10.3.1	水平同轴撞击流中的单颗粒运动规律	176
10.3.2	单颗粒运动的数学模型	177
10.3.3	单个颗粒运动的解析	178
11	流体流动的相似性	182
11.1	相似理论	182
11.1.1	几何相似	182
11.1.2	运动相似	182
11.1.3	动力相似	183
11.2	相似原理	184
11.2.1	相似准则	184
11.2.2	相似准数	185
11.2.3	相似准数的物理意义	185
11.2.4	相似定理	187
11.2.5	量纲分析	187
11.3	模型实验解决的问题	194
	参考文献	197

1 绪 论

1.1 工程流体力学的定义

工程流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法来研究流体处于平衡、运动和流体与固体相互作用的力学规律,以及这些规律在实际工程中的应用,其研究对象为物质的流态、气态。

1.2 研究方法

1.2.1 理论分析方法

理论分析方法包括:

- (1) 对实际的流体力学问题进行科学的抽象,即对诸多影响因素分清主次、抓住主要因素、建立理论模型。
- (2) 对该模型建立描写流体运动规律的积分方程或微分方程,并确定初始条件和边界条件。
- (3) 解析方程组。
- (4) 解析解与实际流动相比较,以确定解的精确度。

理论分析方法是借助数学工具和计算机,其特点是推导严谨、答案精确,但由于在建立流体力学模型时忽略了次要因素的影响,因此它只局限于比较简单的理论模型,并且与实际流体相比,往往有一定误差,需要依靠实验进行修正,对于复杂的流体力学问题,只能用理论指导下的实验研究或数值计算方法进行研究。

1.2.2 实验研究方法

实验研究方法包括:

- (1) 对实际流体力学问题的影响因素分清主次,抓住主要因素,根据相似原理建立实验模型,选择流动介质。
- (2) 通过实验测定有关相似准则数中的物理量。实验设备可以是水槽、水洞、水池、风洞、激波管、测试管系,水电比拟及有关测试仪器等。
- (3) 将实验数据整理成相似准则数,并通过对实验数据的拟合,找出准则方程式,便可推广应用于相似的流动。

实验研究方法接近于实际,只要实验模型设计合理(即模型流场与实际流场相似)、测量无误、准则方程拟合精度高,其实验结果就是可靠的。如果由于模型尺寸、流动介质等的限制,设计模型时只能使主要相似准则数相等,则实验结果就只能是近似的。

1.2.3 数值计算方法

数值计算方法的步骤是:

- (1) 抓住主要影响因素,建立流体力学模型。
- (2) 确定初始条件和边界条件。

(3) 合理选用计算方法,它们可以是有限差分方法、特征线方法、有限元方法、边界元方法、谱方法等。

(4) 编制计算程序。

(5) 上机计算,得到近似解,分析答案,以确定是否符合精度要求。

数值计算方法的特点是:

(1) 过去许多用解析方法不能求解的流体力学问题,用计算机数值计算便可解决。

(2) 在计算机上用数值计算方法可以很好地模拟流体力学实验,并可对多个实验研究方案进行比较和优选,从而可大大地节省实验时间和费用。

(3) 在某些无法进行实验或实验耗资巨大的工程领域中,数值计算方法更能显现突出的优越性。

(4) 具有局限性,因为数学模型建立必须以理论分析和实验研究为基础,而此时,往往很难包括实际流动的所有物理特性。

理论分析、实验研究和数值计算三种方法各有利弊,相辅相成。理论分析方法指导实验研究和数值计算,实验研究方法用来检验理论分析和数值计算结果的正确性,数值计算方法用来弥补理论分析和实验研究的不足。

1.3 流体力学的作用

人类最早对流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的:四千多年前的禹治水、秦代修建的都江堰、郑国渠、灵渠。随着人们对流体力学的认知,流体力学在各个领域都得到了广泛的应用。水利工程的建设、造船工业的发展是同水静力学的建立和水动力学的发展密切相关的。航空工业中各种飞机和飞行器的设计都要依据空气动力学和气体动力学的基本原理。在电力工业中不论是水电站、火电站,还是核电站、地热电站,它们的工作介质都是流体,所以动力设备的设计都必须符合流体流动的规律。机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气流输送以及液压和气动控制问题的解决,都必须应用流体力学的理论。在冶金工业中,则会遇到像气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动,以及冷却、通风等流体力学问题。在采矿工业中,像矿井通风、矿产品的水力输送、洗选以及风动、液动工具等。在石油化工工业中,油气、水的渗流、抽吸和输送问题以及化学反应、传质、传热中的流动过程。在土木建筑工程中的给水排水、供热通风、空气调节、燃气供应等。在海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、环流和季风等都是流体力学问题,人体的循环系统中,如人工心脏、心肺机、助呼吸器等的设计都是依据流体力学的基本原理。

2 流体的基本物理性质

2.1 流体的概念

2.1.1 流体的定义

物质一般存在五态,即固态、液态、气态,还有离子态和凝聚态。其中固、液、气三态是自然界中常见的。液体和气体因具有易流动性,故而称为流体。从力学方面看,固体具有抵抗压力、拉力和剪切力的能力,因此,在外力作用下,通常发生较小的变形。流体由于不能保持一定的形状,所以它仅能抵抗压力,而不能抵抗拉力和剪切力。当它受到任何微小剪切力的作用时都会发生连续变形(即流动),并且只要这种力存在,变形就不会停止。

固体、液体和气体都是由分子组成的,只是分子间的距离不同而已。固体分子间的距离很小,分子间的作用力很大,不容易产生变形。而气体分子间的距离较大,分子间的作用力很小。气体分子可以自由运动,并总是充满它所能到达的整个空间,所以气体不能保持一定的形状和体积,极易发生变形和流动。液体介于两者之间,虽然和气体一样容易发生变形和流动,但在一般情况下,可以保持一定的体积,而不像气体那样,总是充满整个容器。

流体的基本特征是具有流动性,其通常用密度、压强、温度和速度等物理量来进行描述。

2.1.2 流体质点的概念

从物质微观结构角度看,流体是由分子组成的,分子间有比其自身尺度大得多的间隙,同时,由于分子的随机运动,致使流体分子不连续地分布于其所占有的空间,并随时间不断地变化。

从物质的宏观角度看,按照分子统计平均方法,完全可以将流体视为由连续分布的质点构成。其流体质点的物理性质及其运动参量也是连续的,是所在空间及时间的连续函数。

关于流体质点的定义,用于描述物理量平均统计特性的微元 ΔV 应该是使物理量统计平均值与分子随机运动无关的最小微元,该微元定义为流体质点。流体质点的尺度较微观粒子结构尺度大得多,而较宏观特征尺度小得多,可以忽略不计。

2.2 流体密度

2.2.1 流体的密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度。它表征流体在空间某点质量的密集程度。

2.2.1.1 均质流体

对于均质流体,其密度为:

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

2.2.1.2 非均质流体

对于非均质流体,在流体中任意取一体积为 ΔV 的微元,其质量为 Δm ,则其平均密度为:

$$\rho_m = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-2)$$

当 $\Delta V \rightarrow \varepsilon^3$ 时,其中 ε 为流体质点的特征尺寸,以满足流体作为连续介质的要求,则该点的密度为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \varepsilon^3} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-3)$$

一般来说,流体的密度随压强和温度的变化而变化,对于液体而言,液体密度随温度和压强的变化很小,通常视为常数,对于气体来讲,气体密度随压强和温度的变化较大,对于理想气体,可用气体状态方程来描述。

$$p = \rho RT \quad (2-4)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa;

ρ ——气体密度, kg/m^3 ;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——气体的热力学温度, K。

2.2.2 比体积(比容)

比体积(比容) v 为流体密度的倒数,即单位质量流体所占有的体积

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2-5)$$

式中 v ——比体积(比容), m^3/kg ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 。

2.2.3 密度(重度)

密度是用单位体积流体所具有的重量,即:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-6)$$

式中 γ ——流体的密度, kg/m^3 ;

G ——流体的质量, kg;

V ——流体的体积, m^3 。

2.2.4 混合气体的密度

混合气体的密度可以按各种气体所占有的体积百分数来计算

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (2-7)$$

式中 ρ_i ——混合气体中各种气体的密度;

α_i ——混合气体中各种气体所占有的体积分数。

2.3 流体的连续介质模型

流体的连续介质模型是 1755 年欧拉提出来的,按照连续介质模型,流体的密度、压强、速度、

温度等物理量一般在空间和时间上都是连续分布的,是空间坐标和时间的单值连续可微函数。基于流体质点的概念,流体的连续介质模型,有如下的基本假说:

(1) 质量分布连续。用密度作为表示流体质量的物理量,则密度是空间坐标和时间的单值连续可微函数,即

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2-8)$$

(2) 运动连续。在取定的区域和时间内,质量连续分布的流体处于运动状态时,其运动是连续的,亦即表征运动的特征量是空间坐标点和时间的单值连续可微函数,以速度为例,即

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t) \quad (2-9)$$

(3) 内应力连续。流体运动时,流体质点之间的相互作用力称为流体内应力,在流体中任意取一个微元面积 ΔA ,微元面上流体质点之间的相互作用力为 ΔF ,则流体内应力 p 可以定义为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (2-10)$$

流体内应力是连续的,即为空间坐标和时间的单值连续可微函数。

$$p = p(x, y, z, t) \quad (2-11)$$

流体连续介质模型的建立,使流体物性和运动参数物理量都被表示成连续的函数,可以引用大量的数学方法来求解流体力学的问题。因此它具有十分重要的意义。

2.4 流体的物理性质

刚体力学的基本假设是所研究的刚体各部分之间没有变形或相互位移,流体力学基本假设是所研究的流体具有变形和相互位移,并且没有固定的形状。

2.4.1 流动性

流体分子间的引力较小,分子的运动较强烈,分子排列松散,因而流体没有固定的形状,其形状取决于限制它的固体边界,流体各个部分之间很容易发生相对运动,这种流体的流动性质可以用力学语言来描述为:流体在受到很小的切应力时,就要发生连续的变形,直到切应力消失为止。受到切应力的作用发生连续变形的流体称为运动流体。反之,不受切应力作用的流体就不会发生变形,称之为静止流体。流体中存在切应力是流体处于运动状态的充分必要条件。

2.4.2 可压缩性和膨胀性

2.4.2.1 流体的可压缩性

流体不仅形状容易发生变化,而且其体积随压强的增大而减小,这一特性称为流体的可压缩性,通常用体积压缩系数 β_p 来表示,其定义为在一定温度下,增加单位压强所引起的流体体积的相对变化量,即

$$\beta_p = - \frac{dV/V}{dp} \quad (2-12)$$

式中 β_p ——体积压缩系数, $1/\text{Pa}$;

dV/V ——流体的体积相对变化量

dp ——压强的增量, Pa 。

β_p 恒为正值, β_p 值大,表示流体的可压缩性大,反之,则表示其可压缩性小。

流体体积压缩系数的倒数称为流体的体积弹性模量 E ,它指的是流体单位体积的相对变化量所需要的压强增量,即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{V dp}{dV} \quad (2-13)$$

E 的单位与压强的单位相同,工程上常用体积弹性模量来衡量流体压缩性的大小, E 值大的流体的可压缩性小, E 值小的流体其可压缩性大。流体的体积弹性模量 E 的值随温度和压强的变化而变化,但液体的 E 值变化较小。水的 E 值很大,它的可压缩性很小,通常近似取 E 值为 1.9613 GPa。

2.4.2.2 流体的膨胀性

流体的体积随温度的升高而增大的特性称为流体的膨胀性。通常用体积膨胀系数 β_T 来表示,即在压强不变的情况下,单位温升所引起流体体积的相对变化量,即:

$$\beta_T = \frac{dV/V}{dT} \beta_p \quad (2-14)$$

式中 β_T ——体积膨胀系数,1/K;

$\frac{dV}{V}$ ——流体的体积相对变化量;

dT ——温度的增量,K。

2.4.3 黏性

流体的黏性是指流体流动时产生内摩擦力的性质,这是流体的固有物理属性,但流体的黏性只有在运动状态下才能显示出来。

2.4.3.1 黏性实验

图 2-1 为两块相距 h 的水平放置的平行平板,其间充满液体,下板固定不动,上板在力 F' 作用下以 U 的速度沿 x 方向做定常运动。黏性使流体黏附于它所接触的固体表面,与上平板接触的

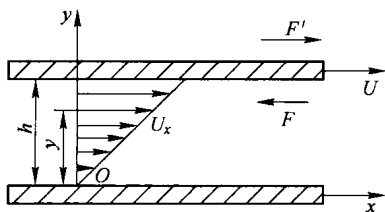


图 2-1 液体在平行平板间的流动

的流体以 U 的速度运动,而与下平板接触的液体静止不动,它们中间的流体速度则由下板处的零均匀地变化到上板处的 U ,各流层之间都有相对运动。若以上平板为研究对象,必定会产生与 F' 大小相等而方向相反的摩擦阻力 F 。

实验表明:该力的大小与平板的面积 A 、平板的运动速度 U 成正比,而与两板间的距离 h 成反比,即:

$$F \propto A \frac{U}{h} \quad (2-15)$$

U/h 表示在速度的垂直方向上单位长度的速度增量,称为速度梯度,单位为 s^{-1} 。显然,上述情况的速度分布为直线,速度梯度为常数。单位面积的摩擦阻力为切向应力,用 τ 表示:

$$\tau \propto \frac{U}{h} \quad (2-16)$$

2.4.3.2 牛顿内摩擦定律

A 牛顿切应力公式

如图 2-2 所示,流体表面在外部剪切力作用下发生流动,由于流体分子间的相互作用,表面流体将带动下面的流体流动。同时下面的流体要阻止上面部分流体的流动,从而在流体内部产生相对运动,假想在流体中有一个平面将流体分为上、下两部分,则上、下两部分流体接触面上必然存在阻碍相对运动的摩擦力,此称为流体内摩擦力。

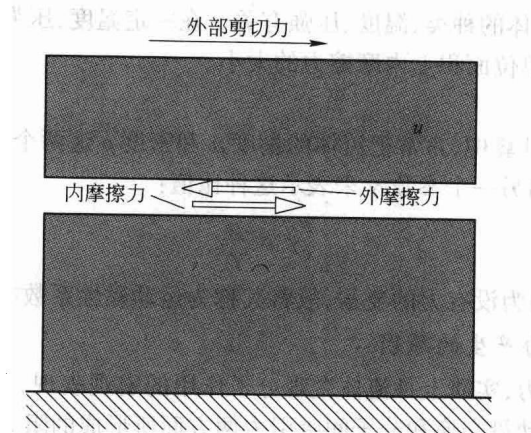


图 2-2 液体间的剪切力

图 2-3 为二维流动的一般速度分布。现取一厚度为 δy 的薄流层, 坐标 y 处的流速为 u , 坐标 $y + \delta y$ 处的流速为 $u_x + \delta u_x$, 该层的平均速度梯度为 $\delta u_x / \delta y$ 。而 $\lim_{\delta y \rightarrow 0} (\delta u_x / \delta y) = du_x / dy$ 为微元流层的速度梯度。

对流体微元流层得:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-17)$$

式(2-17)称为牛顿切应力公式, 其中比例系数 μ 就是代表流体黏滞性的物理量, 其单位为 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

B 流体流动的速度梯度与流体微团的角变形速度的关系

在流体中取一微小单元 $abcd$, 如图 2-4 所示, 经过 dt 时间后, 其形状变为 $a'b'c'd'$, 发生了角变形, 变形角为 $d\psi$, 角变形速度为 $d\psi/dt$ 。则:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{du_x \cdot dt/dy}{dt} = \frac{du_x}{dy} \quad (2-18)$$

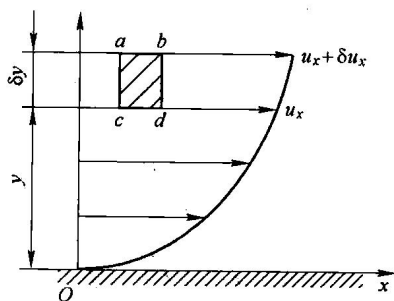


图 2-3 二维流动的一般速度分布

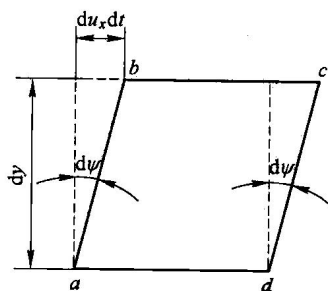


图 2-4 流体微团的角变形

可见, 流体流动的速度梯度等于流体微团的角变形速度, 因此, 牛顿黏性应力公式的物理意义也可表述为: 各流层间的切向应力与流体微团的角变形速度成正比。

C 黏性系数

a 动力黏性系数

动力黏性系数 μ 是代表流体黏滞性的物理量, 它反映了流体内部摩擦力的大小, 称为流体的动

力黏性系数或黏性,与流体的种类、温度、压强有关。在一定温度、压强下,它是一个常数,在数值上等于速度梯度为1时单位面积上内摩擦力的大小。

b 运动黏性系数

在流体力学的分析计算中,常常把流体的黏度 μ 和密度 ρ 这两个物理性质结合在一起以 μ/ρ 的形式出现。由此引出另一个参数 γ 来表示这种比值:

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

γ 的单位为 m^2/s ,因为没有力的要素,故将其称为运动黏性系数或运动黏度。

2.4.3.3 黏性阻力产生的原因

黏性阻力或内摩擦力,实质上是流体微观分子作用的宏观表现,黏性阻力产生的物理原因,就是分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力两方面所形成的阻力。

(1) 分子不规则运动的动量交换形成的阻力。由于分子做不规则运动,各流体层之间互有微观的分子迁移掺混,当流体层之间存在相对运动时,可以说快层中所有分子以宏观速度 du 对慢层做相对运动。同时也可以说慢层中所有分子以宏观速度 $-du$ 对快层做相对运动。这样,当快层分子迁移到慢层时,分子就带有动量 mdu 交换给慢层,这种动量交换给慢层以向前的碰撞,形成拖力而使慢层加速;当慢层分子迁移到快层时,分子就带有动量 $-mdu$ 交换给快层,这种动量交换给快层以向后的碰撞,形成阻力而使快层减速,这就是流体分子的热运动在不同流速层间的动量交换所形成的黏性。

(2) 分子间吸引力形成的阻力。当流体层之间没有相对运动时,相邻层中分子均处于平衡位置,各方向的吸引力平衡,当相邻层有相对运动时,便破坏了原来的分子排列,而使相邻层中分子距有所增加,则两层分子间的吸引力就表现出来了,这时快层的分子引力表现为拖动慢层,而慢层的分子引力表现为阻滞快层,这样流体分子间的引力在流体微团做相对运动时形成黏性。

对于液体,分子距较小,分子间的引力较大,而分子的热运动较弱,所以形成液体黏性的主要因素是分子间的引力。对于气体,分子距很大,分子间的引力非常微小,而分子的热运动强烈,所以形成气体黏性的主要因素是分子的热运动。

2.4.3.4 黏性系数的影响因素

(1) 温度对黏性系数的影响。当温度升高时,分子的热运动加强,分子距增大,分子间引力减小,气体的黏性增大,液体的黏性减小。

(2) 压力对黏性系数的影响。对气体而言,通常的压强变化,对气体的动力黏度基本上没有什么影响。对于液体,通常的压强变化对液体的动力黏度也没有多大影响。但是在高压作用下或压强变化很大时,液体的动力黏度将随压强的变化而变化。

2.4.3.5 牛顿流体和非牛顿流体

凡作用在液体上的切向应力与它所引起的角变形速度(速度梯度)之间的关系符合牛顿内摩擦定律的流体,称为牛顿流体。如图2-5中直线A所示,水和空气都是牛顿流体,否则称为非牛顿流体,典型的曲线如B、C、D所示。

2.4.3.6 黏性流体和理想流体

实际流体都具有黏性,都是黏性流体,没有黏性的流体称为理想流体,是一种假想流体模型。

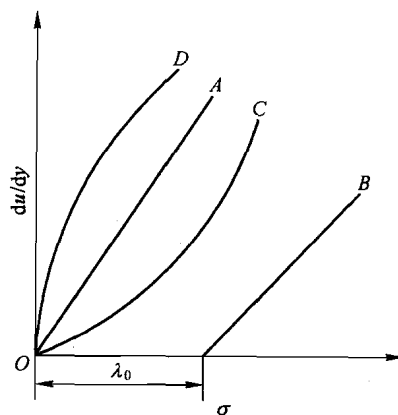


图 2-5 牛顿流体与非牛顿流体