



普通高等学校机械基础课程规划教材

工程流体力学

● 主 编 刘起霞 杨小林

● 主 审 贾月梅



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育机械类教材

工程流体力学

主 编 刘起霞 杨小林
主 审 贾月梅

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书是普通高等学校土建类专业,以及建筑环境与能源应用工程专业基础课教材。其内容包括:流体力学的研究任务、方法及流体的主要力学性质,流体静力学,流体动力学基础,量纲分析与相似理论,流动阻力与其能量损失,孔口、管嘴出流与有压管流,明渠流动,堰流,渗流,气体动力学基础等内容。各章均有一定数量的例题和结合教材内容的习题,有助于读者的理解及自主学习。本书符合人才培养目标及课程的基本要求,强调学习基础理论、基本原理和基本方法,注重实践性环节,深度适宜。

本书可供土木类专业以及建筑环境与能源应用工程、热能与动力工程、水利水电工程、给排水科学与工程、环境工程、机械工程、工程力学、水文与水资源工程、给水排水工程、市政工程等多个专业的本科教学使用,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/刘起霞,杨小林主编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.8
普通高等学校机械基础课程规划教材
ISBN 978-7-5680-1836-4

I. ①工… II. ①刘… ②杨… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材
IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115859 号

工程流体力学

刘起霞 杨小林 主编

Gongcheng Liuti Lixue

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚同梅

封面设计:刘 卉

责任校对:李 琴

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:24

字 数:510 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:45.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

流体力学是力学的一个重要分支,是研究流体的力学运动规律及其应用的学科。它主要研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动物体之间的相互作用和流动的规律。随着生产的需要与科学的发展,流体力学的研究对象在不断地更新,研究内容在不断地深化,研究范围也在不断地扩大。它的基本任务是建立描述流体运动的基本方程,确定流体经各种通道及绕流过各种不同物体时速度、压强的分布规律,探索能量转换及各种损失的计算方法,并解决流体与限制其流动的固体壁面之间的相互作用问题。

20 世纪 50 年代以来,流体力学主要围绕航空、航天、大气、海洋、航运、水利和各种管路系统等方面,研究流体运动中的动量传递。50 年代以后,能源、环境保护、化工、油气开采、采矿和土木建筑等领域中的流体力学问题逐渐受到重视。近年来,流体的对流传热、传质问题研究受到高度重视,并取得了巨大进展。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同,主要分为经典流体力学(包括理论流体力学、实验流体力学、计算流体力学和应用流体力学等)和工程流体力学。理论流体力学主要研究流体力学中的理论知识,研究流体力学中的力学模型,研究如何用数学方法求出问题的定量解,对实际存在的流动现象进行系统观测,以便分析流动规律,预测流动现象的演变,如气象、水文、潮汐研究等。实验流体力学主要是用实验方法研究自然界或各类工程领域中的流体流动现象和规律,以及流体与固体之间的相互作用。工程流体力学(应用流体力学)侧重于研究流体力学在生产生活上的实际应用,它不追求数学上的严密性,而是趋向于解决工程中出现的实际问题。

工程流体力学是土建类专业一门重要的专业基础课。该门课程理论性强,相关理论知识逻辑严密,使得学生学习本课程有一定的难度,因而在编写本书的过程中,强调基础知识,注意遵循由浅入深、循序渐进的原则,力求结构严谨、重点突出、简明易学。书中编入了一定数量的例题和习题,供读者学习选用,以便巩固对基本内容的理解,加强基本方法的训练。在优化教学内容的同时,加强对学生能力,如力学和数学建模能力、数学模型的分析能力、逻辑思维能力等的培养。在具体写法方面,力求概念清晰、论证严谨、叙述简要。

本书由河南工业大学刘起霞、西华大学杨小林主编,具体编写分工如下:绪论、第 2 章由河南工业大学刘起霞编写,第 1 章和第 4 章由河南工业大学陈雁编写,第 3 章由河南工业大学陈森编写,第 5 章由郑州市轨道交通有限公司吕高乐编写,第 6 章由

河南工业大学冯永编写,第7章由黄河勘测规划设计有限公司杜建伟编写,第8章和第10章由西华大学杨小林编写,第9章和附录由河南工业大学王瑞编写。全书由刘起霞统稿审阅,由太原理工大学现代科技学院贾月梅教授主审。在本书编写过程中,得到河南工业大学土木建筑学院和西华大学能源与环境学院的大力支持和鼓励,特别是许多有经验的老教师为本书的编写提出了许多宝贵意见,在此谨表示衷心感谢。

为了配合本教材使用,我们开设了流体力学网络辅助教学平台(网址为 <http://jpkc.haut.edu.cn/jpkc/Index/Catlog71-8.aspx>),广大读者可以通过该平台浏览电子讲义和作业解答,开展网上讨论,提交反馈意见。

在编写过程中,参考了一些其他院校编写的优秀教材,在此一并表示感谢。对于书中可能存在的缺点和不足之处,诚望读者批评指正。

编 者

2015年11月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 工程流体力学的研究对象、任务及研究方法	(1)
1.2 流体的主要物理性质	(5)
1.3 作用在流体上的力	(17)
1.4 流体的力学模型	(20)
思考题	(22)
习题	(22)
第 2 章 流体静力学	(27)
2.1 流体静水压强及其特性	(27)
2.2 流体平衡微分方程	(29)
2.3 重力场中流体静水压强的分布规律	(32)
2.4 压强的表示方法和量度单位	(38)
2.5 测压计	(41)
2.6 作用于平面壁上的静水总压力	(49)
2.7 作用于曲面上的静水总压力	(54)
2.8 流体的相对平衡	(61)
思考题	(64)
习题	(65)
第 3 章 流体动力学基础	(71)
3.1 描述流体运动的方法	(71)
3.2 欧拉法的基本概念	(72)
3.3 恒定总流连续性方程	(81)
3.4 元流能量方程	(83)
3.5 恒定总流能量方程	(90)
3.6 恒定总流能量方程的应用	(92)
3.7 恒定气流伯努利方程	(101)
3.8 恒定总流动量方程	(106)
思考题	(109)
习题	(109)
第 4 章 量纲分析与相似理论	(114)
4.1 量纲分析的概念和原理	(114)

4.2	量纲分析法	(116)
4.3	流动相似原理	(120)
4.4	模型实验设计	(126)
	思考题	(130)
	习题	(131)
第5章	流动阻力与其能量损失	(133)
5.1	流动阻力与能量损失的分类	(133)
5.2	层流与紊流、雷诺数	(135)
5.3	均匀流基本方程及沿程水头损失通用公式	(139)
5.4	圆管中的层流流动	(142)
5.5	紊流流动	(145)
5.6	紊流的沿程损失	(153)
5.7	流动的局部水头损失	(164)
5.8	减小阻力的措施	(171)
	思考题	(172)
	习题	(172)
第6章	孔口、管嘴出流和有压管流	(175)
6.1	孔口及管嘴的恒定出流	(175)
6.2	孔口及管嘴的非恒定出流	(183)
6.3	短管的水力计算	(184)
6.4	长管的水力计算	(194)
6.5	管网水力计算基础	(205)
6.6	水击	(210)
6.7	离心泵及其水力计算	(215)
	思考题	(222)
	习题	(222)
第7章	明渠流	(226)
7.1	明渠的分类	(226)
7.2	明渠均匀流	(228)
7.3	明渠恒定非均匀流的若干基本概念	(243)
7.4	水跃和跌水	(253)
7.5*	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	(257)
7.6	明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	(258)
7.7*	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(265)
	思考题	(267)
	习题	(267)
第8章	堰流	(269)
8.1	堰流的定义及分类	(269)

8.2 堰流基本公式	(271)
8.3 薄壁堰	(273)
8.4 实用堰	(275)
8.5 宽顶堰	(281)
8.6* 小桥孔径水力计算	(285)
8.7 消力池水力计算	(289)
思考题	(297)
习题	(297)
第9章 渗流	(300)
9.1 渗流基本定律	(300)
9.2 地下水的均匀渗流与非均匀渗流	(311)
9.3 集水廊道和井	(319)
9.4 井群	(324)
9.5 流网及其在渗流计算中的应用	(325)
思考题	(330)
习题	(330)
第10章 气体动力学基础	(333)
10.1 声速与马赫数	(333)
10.2 气体一维恒定流的基本方程	(337)
10.3 气体一维恒定流的参考状态	(340)
10.4 气流参数与通道断面面积的关系	(342)
10.5 喷管	(344)
10.6 扩压管	(349)
10.7 等断面有摩擦的绝热管流	(350)
思考题	(355)
习题	(355)
附录A 矢量及其运算	(357)
A.1 矢量概念	(357)
A.2 矢量计算	(357)
A.3 矢量微分算符及其运算	(359)
附录B 流体力学中常见的物理量	(361)
附录C 流体的黏度	(362)
附录D 误差函数	(363)
附录E 气体动力函数	(365)
附录F 部分习题参考答案	(367)
参考文献	(376)

第 1 章 绪 论

教学基本要求

- (1) 熟练掌握流体力学研究对象的特点,掌握连续性介质模型;
- (2) 理解和掌握流体力学的研究内容和研究方法;
- (3) 熟练掌握流体力学主要物理性质及指标;
- (4) 掌握流体力学中力的表示方法;
- (5) 了解流体力学的发展方向。

1.1 工程流体力学的研究对象、任务及研究方法

1.1.1 工程流体力学的研究对象

工程流体力学是力学的一个重要分支,主要研究流体(液体、气体)的特性、状态,在各种力的作用下发生的对流、扩散、旋转、波动现象和质量、动量、能量传输。它既是一门经典学科,又是一门现代学科,对自然科学和工程技术的发展具有先导作用。

工程流体力学的研究对象是流体,流体是液体和气体的统称。液体和气体都有很复杂的内部结构。它们都由大量分子组成,这些分子不断地做不规则的热运动。每个分子又包含一个或一个以上的原子。分子与分子之间,以及分子内部的原子与原子之间可以保留相应的空隙。所以,流体的内部结构是不连续的,中间存在着许多空隙。工程流体力学不研究个别分子的运动,也不关心个别原子的运动,只研究大量分子的集体运动。将整个流体分成许许多多的分子集团,将每个分子集团视为质点,工程流体力学研究这些质点的平衡和运动规律,以及它们相互之间或者与周围物体之间的作用力。这样的质点在流体内部一个紧靠着另一个,它们之间没有任何的空隙。之所以称这样的分子集团为质点,是因为工程流体力学所研究的运动是宏观运动,与流体之间有力相互作用着的固体也是较大的物体,因此,每个质点可以足够精确地被认为是一个点而不必考虑它的大小。质点不同于几何意义上的点,质点具有质量。从流体的运动范围和周围物体的大小来看,这些分子团——质点,它们显得非常小。但是另一方面,从分子之间的平均间隔来看,它们却是很大的。每一个分子团中的各个分子虽然在不断地做不规则的热运动,但是它们不会越出这个分子团——质点的范围。将流体看成质点组之后,便可不必去考虑分子的热运动和分子间复杂的相互作用力,可以将质点作为一个

最小单位来研究它的运动。也就是说,工程流体力学所研究的不是具有不连续的内部结构的实际流体,而是由质点组成的、具有连续结构的实际流体的模型,从而将流体作为连续介质来看待。

当然,采用这样的模型来代替真实的流体是有条件的,即所研究的物理现象与分子运动没有直接关系。对于那些与分子运动直接相关联的物理现象,如传热、扩散等,单纯用质点的运动来解释还不能完全说明问题。

流体的特性是流动性。流体与固体的根本差别在于流体具有流动性,而固体没有流动性。所谓流动性并不是就物体能否变形而言的,因为所有固体在外力作用下都能发生变形。不过,在变形时,流体与固体所表现出的性质是截然不同的。固体受力作用发生变形时,会产生一种与变形大小成正比的弹性力来阻碍变形。当这个阻力增大到足以与外力相抵消时,变形量便不再增大。所以,固体变形的大小与所加外力有关,外力愈大,变形愈大。反过来说,要得到较大的变形,就要用较大的力。对于固体,所需力的大小完全取决于对变形的要求,而与发生变形的快慢无关。对于流体,情况却不是这样。流体变形(剪切变形)也产生阻力,但这种阻力与变形的快慢有关。要使流体很迅速地变形,需要用很大的力,而在用力的时间充分长,或者说,变形的过程相当慢时,任何细小的力(切向力)也能够使流体产生非常大的变形,进而流动。流体的这种性质便称为流动性。流动性是所有流体都具有的特性。

正因为流体具有流动性,所以流体没有固定的形状。液体和气体都会随着容器形状的不同而改变自身的形状。不过,液体和气体的流动性也还是有差别的。当装有流体的容器形状和大小改变时,液体形状会随着容器形状的改变而改变,但是体积不变,气体在形状改变的同时,体积也会随着容器容积的改变而变化。

1.1.2 工程流体力学的研究内容

1. 基本假设——连续性假设

物质都由分子构成,尽管分子都是离散分布的,而且在不停地做无规则的热运动,但理论和实验都表明,在很小的范围内,做热运动的流体分子微团的统计平均值是稳定的。因此,可以近似地认为流体是由连续物质构成的,其温度、密度、压力等物理量所构成的都是连续分布的标量场。

2. 质量守恒定理

在工程流体力学中通常利用质量守恒定理来建立描述流体运动的方程组。在欧拉(Euler)法下应用质量守恒定理,可知:流进绝对坐标系中任何闭合曲面内的质量均等于从这个曲面流出的质量。由此可得到一个积分方程组。将其化为微分方程组,可描述为:密度和速度的乘积的散度是零(无散场)。用欧拉法则描述为:流体微团质量的随体导数随时间的变化率为零。

3. 动量定理

流体力学的研究对象在微观上是无限大的,并且做低速运动,因此流体力学属于

经典力学的范畴,动量定理和动量矩定理均适用于流体微团。

4. 应力张量

对流体微团的作用力,主要有表面力和体积力。表面力和体积力分别是力在单位面积和单位体积上的量度,因此它们有界。由于在建立流体力学基本方程组的时候考虑的是尺寸很小的流体微团,流体微团所受的表面力是尺寸的二阶小量,体积力是尺寸的三阶小量,故当体积很小时,可以忽略体积力的作用,认为流体微团只是受到表面力(表面应力)的作用。在非各向同性的流体中,流体微团位置不同,表面法向不同,所受的应力是不同的,应力是由一个二阶张量和曲面法向量的内积来描述的,二阶应力张量只有三个量是独立的,因此,只要知道某点三个不同面上的应力,就可确定这个点的应力分布情况。

5. 能量守恒定律

能量守恒定律表述为:单位时间内体积力对流体微团做的功加上表面力和流体微团变形速度的乘积,等于单位时间内流体微团的内能增量加上流体微团的动能增量。

1.1.3 工程流体力学的应用

1. 在土建工程与环境工程中的应用

在给排水、供热、通风、燃气供应等工程中,要对流体进行净化或加热处理,以及将流体通过管道或渠道输送给用户或车间,在相关设备和系统的设计、运行管理及施工中需要解决一系列的工程流体力学问题。在研究废水、废气对环境的影响,设计铁路和公路的桥梁、路基的排水、隧道通风等设施时,也要用到工程流体力学知识。

2. 在机械制造业中的应用

在机械制造业中:水轮机、燃气轮机、蒸汽轮机、喷气发动机、液体燃料火箭、内燃机等都是以流体能量作为源动力的动力机械;机床、汽车、飞机、船舶、工程机械等都要用到以流体作为工程介质的传动机械;水压机、油压机、水泵、油泵、通风机、压气机等都是以流体为对象的工作机械。在设计这些机械时,需要用到工程流体力学知识。

3. 在液压工程中的应用

在液压工程中,液压控制元件的流体噪声控制是当前面临的难题。液压控制元件的噪声主要是由液压控制元件内部流道中激振流场诱发的流体振动引起的。利用流体显示技术可以直接观察元件内部波动现象,研究流道结构对流量系数、液动力等噪声诱发因素。利用计算流体动力学可对发声气穴流场进行数值模拟,将气相体积比方程、汽化质量方程引入湍流模型,同时可采用流动显示、噪声测量等手段研究元件内部结构对噪声的影响。在选矿中,物料的分级、矿浆准备、选矿产品的浓缩脱水,选矿中的重选、浮选等均涉及工程流体力学。在水泵设计计算中需利用工程流体力学理论中流体平衡和运动的基本规律研究流体绕过某种物体或流过某种管道时的速度分布、压力分布、能量损失及其同体的相互作用,等等。

4. 在其他技术领域中的应用

工程流体力学在其他技术领域中的应用也很广泛。例如:研究大气与海洋的运动,分析厄尔尼诺现象产生的原因,做好天气和海情预报,为农业、渔业、航空航海、国防和人民生活服务;研究各种空间飞行器,如飞机、人造卫星,以及导弹和各种水上或水下运动机器,如鱼雷、潜艇、船舰等的运动,以便获得阻力小、稳定性高的最佳物体外形;研究各种流体运动的规律,找到减小阻力的方法,以获得耗能少、安全性高的工程设计方案;此外,各种运输工具的提速、油田气田的开发、地下水的利用等无不与工程流体力学密切相关。

1.1.4 工程流体力学的研究方法

目前,解决工程流体力学问题的方法有理论分析方法、实验方法和数值方法等三种。

1. 理论分析方法

理论分析方法主要是通过方程推导演算来分析流体的运动过程,但是其中 N-S 方程求解很困难。应用该方法的一般应用过程是:建立力学模型,用物理学基本定律推导流体力学数学方程,用数学方法求解方程,检验和解释求解结果。理论分析结果能揭示流动的内在规律,具有普遍适用性,但理论分析方法的应用范围有限。

2. 实验方法

顾名思义,实验方法就是通过具体实验来描述流体的运动状况,主要是根据相似理论,用具有代表性的流动情况来近似代表一般流动。实验研究的一般过程是:在相似理论的指导下建立模拟实验系统,用流体测量技术测量流动参数、处理和分析实验数据。

典型的工程流体力学实验有风洞实验、水洞实验、水池实验等,相关测量技术有热线、激光测速,粒子图像、迹线测速,高速摄影,全息照相,压力密度测量等。现代测量技术在计算机、光学和图像技术的配合下,在提高分辨率和实时测量方面已取得长足进步。

实验结果能反映工程中的实际流动规律,便于发现新现象、检验理论结果等,但结果的普适性较差。

实验方法包括现场观测及实验室模拟两大类。实验室模拟可控制实验条件,现象可以重演,产生的流动具有典型性,有利于揭示复杂流动的本质和规律,已成为主要的实验手段。

3. 数值方法

数值研究是近年来发展比较迅速也比较热门的领域,它是通过计算机来模拟流动状况的研究方法,采用的有代表性的软件有 Fluent、Phoenix 等。其一般过程是:首先对流体力学数学方程做简化和数值离散化处理,然后编制程序做数值计算,并将计算结果与实验结果进行比较。

常用的数值方法有有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等。计算的内容包括飞机、汽车、河道、桥梁、涡轮机等流场的计算,以及湍流、流动稳定性、非线性流动等数值模拟计算。数值方法的优点是能计算用理论分析方法无法求

解的数学方程,比实验方法省时省钱。但其毕竟是一种近似求解方法,适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制。

以上三种方法各有优、缺点,可相互补充。进行流体力学研究不仅需要深厚的理论基础,而且需要很强的动手能力。学习流体力学应注意理论与实践结合,理论分析、实验研究和数值计算并重。

1.1.5 工程流体力学的发展过程

历史上,流体力学曾经历基于直观实践经验的古代力学、基于严密数学理论的经典力学、基于物理洞察能力的近代力学三个阶段。在人类早期的生产活动过程中,力学即与数学、天文学一起得到了发展。17世纪,牛顿基于前人的天文观测和力学实验,发明了微积分,并总结出了机械运动三大定律和万有引力定律,出版了著名的《自然哲学的数学原理》一书,从而使力学成为自然科学的先导。从17世纪开始,人们逐步建立了流体力学的基本理论体系,从帕斯卡定律、牛顿黏性定律,到欧拉方程和伯努利方程等,这些新理论和技术出现,标志着流体动力学正式成为力学的一个分支学科。18世纪,人们着重发展无黏流体的位势理论。到了19世纪,为了解决工程实际问题,开始注重黏性的影响,纳维-斯托克斯方程的建立为流体力学的进一步发展奠定了完整的理论基础,但该方程解的存在性与光滑性的证明至今仍是一大难题。20世纪初,普朗特凭借出色的物理洞察能力,提出了边界层理论,从而开启了工程流体力学的近代发展阶段,使力学成为人类实现“飞天”梦想的重要理论基础。20世纪60年代以来,由于超级计算机、先进测试技术的发展和运用,力学进一步凸显宏、微观结合和学科交叉的特征,进入现代发展新阶段。

最近几年,人类频频遭遇极端天气事件:日本海底地震导致海啸和福岛核电站泄漏事故;澳大利亚遭强大飓风侵袭;我国暴发严重干旱、洪水灾害等。这些极端天气事件的预测预警都是工程流体力学研究的前沿问题。2011年,美国航天飞机历经30年130多次飞行之后宣布全面退役,其中一个重要原因是其存在防热系统不可靠的安全隐患,热风系统安全性问题也是亟待解决的一个重要课题。可见,现代工程流体力学不仅是一门重要的基础学科,而且在航空航天、海洋海岸、环境能源、生物医学、材料信息等诸多与国家经济、社会发展密切相关的工程技术领域里,具有不可或缺的先导作用。

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 惯性

凡物体都占有一定的空间,且具有一定的质量,流体也不例外。单位体积质量是

流体的重要性质之一,称为流体的密度,它反映了流体质量的密集程度。密度的表达式为

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

式中: V ——流体的体积, cm^3 ;

m ——流体的质量, g ;

ρ ——流体的密度,对于均质流体为定值, g/cm^3 。

密度的常用单位为 g/cm^3 (厘米克秒制,即 CGS 制),国际单位制 (SI) 单位为 kg/m^3 。换算关系如下:

$$1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

对液体密度的研究表明:对液体加热和加压只能引起其密度的极微小的变化。在一般情况下,这种微小的变化可以不予考虑。但气体则不然,它的密度随温度、压强的改变会发生较大的变化。将理想气体状态方程写成:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1-2)$$

式中: m ——气体的质量, kg ;

M ——气体的相对分子质量。

于是可以求得气体密度随压强、温度而变化的关系:

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (1-3)$$

常见液体的密度及标准状态下常见气体的密度见表 1-1。

表 1-1 常见流体的密度

流体名称		密度/ (kg/m^3)	测定 条件	流体名称		密度/ (kg/m^3)	测定 条件
液体	水	1000	4 °C	气体	空气	1.293	1.01 $\times 10^5 \text{ Pa}$, 0 °C
	海水	1020	15 °C		氧(O_2)	1.429	
	水银(Hg)	13600	15 °C		氮(N_2)	1.251	
	蓖麻油	970	15 °C		氢(H_2)	0.0898	
	松节油	873	15 °C		一氧化碳(CO)	1.250	
	汽油	680~790	15 °C		二氧化碳(CO_2)	1.977	
	煤油	790~820	15 °C		乙炔(C_2H_2)	1.171	
	重油	900~950	15 °C		甲烷(CH_4)	0.717	
	矿物类润滑油	900~930	15 °C		乙烯(C_2H_4)	1.260	
	苯(C_6H_6)	900	0 °C		氦(He)	0.1785	
	丙酮(CH_3COCH_3)	790	20 °C		氨(NH_3)	0.771	
	甲醇(CH_3OH)	800	0 °C		乙烷(C_2H_6)	1.341	
	无水酒精($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)	790	15 °C		烟气	1.30~1.34	
	无水甘油 ($(\text{CH}_2\text{OH})_2\text{CH}(\text{OH})$)	1260	0 °C				

除了单组分的流体外,人们还经常会遇到多组分的混合流体,例如空气、烟气(含 CO_2 、 N_2 、 O_2 及水蒸气等)。对于气体混合物,由于其体积是各组分的体积之和,故气体混合物在标准状态下的密度为

$$\rho_{0m} = \rho_{01}a_1 + \rho_{02}a_2 + \rho_{03}a_3 + \cdots + \rho_{0n}a_n \quad (1-4)$$

式中: $\rho_{01}, \rho_{02}, \rho_{03}, \cdots, \rho_{0n}$ ——气体混合物中每个组分在标准状态下的密度, kg/m^3 ;

液体混合物的密度 ρ_m 可用下式估算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \frac{x_3}{\rho_3} + \cdots + \frac{x_n}{\rho_n} \quad (1-5)$$

式中: $a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——液体混合物中每个组分的体积分数;

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \cdots, \rho_n$ ——液体混合物中每个组分的密度, kg/m^3 ;

$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ ——液体混合物中每个组分的质量分数;

$\frac{1}{\rho_m}$ ——混合液体的比体积。

在这里,还要介绍比体积这一物理量。所谓比体积就是指单位质量流体的体积,用符号 v 表示,即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

1.2.2 重力特性

此外,我们还经常用单位体积流体的重量来反映流体的轻重。这一物理量称为流体的重度。均质流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-7)$$

式中: V ——流体的体积, m^3 ;

G ——流体的重量, N 。

由于流体的重量 G 与质量 m 的关系为

$$G = mg$$

式中: g ——重力加速度, m/s^2 。

将这一关系式等号两端同时除以流体的体积 V , 即可得出重度与密度的换算关系:

$$\gamma = \rho g \quad (1-8)$$

另外,还经常遇到比重这一物理量。比重是流体的密度与 4°C 的纯水密度之比,用符号 s 表示,即

$$s = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-9)$$

由此可知,比重是没有量纲的,仅仅是一个比值。

【例 1-1】 已知焦炉煤气的组成(体积分数)为: $a(\text{CO}_2)$ 为 1.8% , $a(\text{O}_2)$ 为 0.7% ,

$a(\text{CH}_4)$ 为 24%, $a(\text{N}_2)$ 为 7%, $a(\text{C}_2\text{H}_4)$ 为 2%, $a(\text{CO})$ 为 6.5%, $a(\text{H}_2)$ 为 58%。试求压强为 780 mm 水银柱、温度为 25 °C 的焦炉煤气的密度 ρ_m 、比体积 v 及重度 γ 。

【解】查表 1-1, 得出标准状态下焦炉煤气各组分的密度分别为

$$\rho_{\text{CO}_2} = 1.977 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{\text{CH}_4} = 0.717 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{\text{C}_2\text{H}_4} = 1.260 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{CO}} = 1.250 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{\text{H}_2} = 0.0898 \text{ kg/m}^3$$

于是得

$$\begin{aligned} \rho_{0m} &= (1.977 \times 1.8\% + 1.429 \times 0.7\% + 0.717 \times 24\% \\ &\quad + 1.251 \times 7\% + 1.260 \times 2\% + 1.250 \times 6.5\% + 0.0898 \times 58\%) \text{ kg/m}^3 \\ &= 0.464 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

由式(1-3)得, 压强为 780 mm 水银柱、温度为 25 °C 时焦炉煤气的密度为

$$\rho_m = 0.464 \times \frac{780}{760} \times \frac{273.15}{298.15} \text{ kg/m}^3 = 0.436 \text{ kg/m}^3$$

此时煤气的比体积为

$$v = \frac{1}{\rho_m} = \frac{1}{0.436} \text{ m}^3/\text{kg} = 2.294 \text{ m}^3/\text{kg}$$

煤气的重度为

$$\gamma = \rho_m g = 0.436 \times 9.8 \text{ N/m}^3 = 4.27 \text{ N/m}^3$$

1.2.3 流体的黏性

凡流体都具有流动性, 但各种流体的流动性可以有很大的差别。流动性差的流体, 也就是比较黏滞的流体, 尽管在很小的外力(切向力)作用之下也能流动, 但流动进行得十分缓慢。所以流体的黏性是影响流动的一个重要因素, 必须深入研究, 并准确表达出来。

假设有两块足够大的平行配置的平板 A 及 B(见图 1-1), 两块板的距离比较近, 它们之间充满着液体。平板 A 是静止不动的, 平板 B 则以均匀的速度 u_1 平行于平板 A 运动。由于直接黏附在平板表面上的一层液体的运动速度必然同平板的运动速度一样, 所以, 黏附在平板 B 上的一层液体, 也以均匀的速度 u_1 随平板运动; 黏附在平板 A 上的一层液体是静止不动的。在这两块平板之间的液体, 由于受平板的间接拖动和牵连, 以不同的速度分层运动, 亦即如某层液体的速度为 u , 相距为 dy 的一层液体, 速度则为 $u + du$ 。各层液体的运动速度不同, 将产生滑动, 因此在液体内部必然出现摩擦力。这种内摩擦力通常以每单位接触面积上的力来计算, 称为切应力, 用 τ 表示。根据实验, 切应力 τ 的大小与速度梯度 $\frac{du}{dy}$ (也可理解为流体的角变形率) 成正比, 此即牛顿内摩擦定律(又称黏性定律)。则各物理量关系满足

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

或

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中: τ ——切应力, Pa;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 1/s;

μ ——比例系数, 称为黏度, 或称动力黏度, Pa·s;

F ——流体各层间的内摩擦力, N;

A ——流体间接触面积, m²。

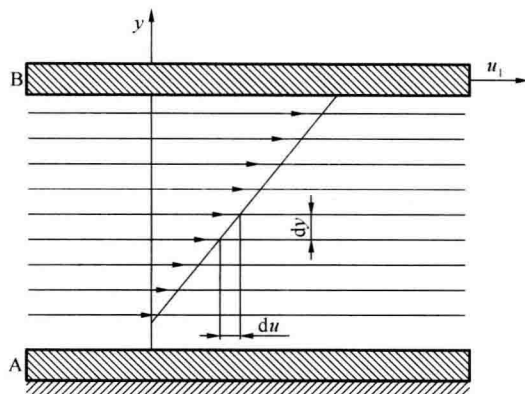


图 1-1 平板拖曳实验

由式(1-10)可知, 黏度可以表示成

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-11)$$

所以, 可以把黏度 μ 看成速度梯度为 1 时, 单位接触面积上的黏滞阻力, 它反映了流体的黏性, 其大小随流体性质而异。

根据式(1-11), 可以定出黏度的单位。在 SI 单位制中, 黏度的单位是 Pa·s。在 CGS 单位制中, 黏度的单位是 dyn·s/cm², 称为泊(P)。由于 P 这个单位比较大, 用起来不方便, 故通常都是用 P 的 1/100 作黏度的单位, 称为厘泊(cP), 亦即

$$1 \text{ P} = 100 \text{ cP} = 1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

现将这几种黏度单位的换算关系列在表 1-2 中。

表 1-2 黏度单位换算表

单 位	P	Pa·s
1 P	1	0.1
1 Pa·s	10	1
1 kgf·s/m ²	98.1	9.81