



现代远程教育系列教材

水力学

杨景芳 编

大连理工大学出版社

水力学

杨景芳 编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水力学/杨景芳编. —大连:大连理工大学出版社,
2009. 2

(现代远程教育系列教材)

ISBN 978-7-5611-3877-9

I. 水… II. 杨… III. 水力学—远距离教育—教材
IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 013031 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84703636

E-mail: dulp@dulp. cn URL: <http://www.dulp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm	印张:14.75	字数:336 千字
2009 年 2 月第 1 版	2009 年 2 月第 1 次印刷	

责任编辑:王晓玲

责任校对:郭彦青

封面设计:戴筱冬

ISBN 978-7-5611-3877-9

定 价:29.00 元

出版说明

基于计算机网络条件下的远程教育,即网络教育,亦称现代远程教育,已经成为当今推进我国高等教育大众化的新途径。经批准,大连理工大学于2002年2月成为全国68所现代远程教育试点高校之一,并已在网络高等学历教育方面取得了显著成绩。为贯彻教育部关于网络教育要“积极发展,规范管理,强化服务,提高质量,改革创新”的指导思想,在教学方面要继续做好网络教育平台建设、网络教育资源及视听教材建设、开展好网上学习的支持服务的同时,积极组织编好具有远程教育特色的高水平纸介教材十分重要。为此,大连理工大学决定将网络教育系列纸介教材的编辑出版工作列入《现代远程教育类教学改革基金项目》加以实施。

按照教改立项的要求,要配合网络课件、视听教材的建设,制订相应的网络教育纸介教材建设计划,有组织、有步骤地开展好这项工作。

按照教改立项的要求,网络教育纸介教材必须以网络课件的教学大纲为基础进行编写,并努力凸现远程教育的特色,为培养应用型人才服务。

按照教改立项的要求,网络教育纸介教材的内容取舍、理论深度、文字处理,既要力求适合大多数网络教育学生的实际接受能力,适应网络教育学生自主学习的需要,又要确保达到网络高等教育的基本要求,为高等教育大众化服务。

按照教改立项的要求,网络教育纸介教材的编著者应有丰富的教学经验,在本学科有较厚的基础,了解本门课程发展动态,有较高的学术水平,有较好的文字功底,并且优先选聘本课程网络课件的主讲教师担任编写工作。

现在,经过不断的努力,现代远程教育系列教材将陆续出版问世,特向各位编著者及审稿专家表示感谢,同时敬请社会各界同行对不足之处给予批评指正。

大连理工大学网络教育学院

2008年12月

前言

本水力学教材,是遵照大连理工大学网络教育学院2007年9月28日《关于加强现代远程教育文字教材建设的意见》而编写的。其中的基本要求是:

1. 网络教育文字教材必须以网络课件的教学大纲为基础编写,并努力凸现出远程教育的特色,为培养应用型人才服务。

2. 网络教育文字教材的内容取舍、理论深度、文字处理,既要力求适合大多数网络教育学生的接受能力,适应网络教育学生自主学习的需要,又要确保达到网络高等教育的基本要求,为高等教育大众化服务。

根据上述基本要求和本人对本科生、研究生、成人教育和远程教育的教学实践和 Experience 体会,在教材编写中力求做到:

(1) 精选内容,去掉繁枝末节。

(2) 深入浅出地讲清基本概念和基本理论,公式推导尽量直接、简化。

(3) 理论联系实际、突出实用,通过大量例题巩固概念和理论,并培养学生分析问题和解决问题的能力。

(4) 循序渐进,反复巩固,每章后有小结、思考题和计算题,计算题附答案。

全书共分10章。第1章液体的主要物理性质及作用力;第2章水静力学;第3章水动力学基础;第4章液体的流动形态及水头损失;第5章有压管道恒定流;第6章明渠均匀流;第7章明渠恒定非均匀流;第8章堰流与闸孔出流;第9章泄水建筑物下游水流的衔接与消能;第10章渗流基础。

本教材是为水利水电专业的网络教育、成人教育的高中起点专科学学生编写的。适于学生自学,也可用于授课,同时也可作为水利水电专业的设计、施工人员的参考书。

本书在编写过程中曾得到大连理工大学网络教育学院杨长贺副院长、资源建设中心主任吕盈,以及大连理工大学水电研究所刘亚坤所长、金生教授及研究生孙韵的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

同时在编写过程中,参考了书后所列书目,从中吸取了许多有益的内容,在此向各位编著者一并致谢。

使我更应感谢的是原全国水力学课程领导小组组长我的老师李鉴初。他以78岁的高龄,眼带老花镜,对送审稿逐字逐句审阅,不仅指出了要修改之处,并写出了具体的修改方法。最终本书定稿时充分地认真地吸纳了李老师的意见。再次谢谢李老师,祝李老师健康长寿。

由于作者水平所限,书中不当之处在所难免,敬请各位同行和读者指正。

作者

于大连理工大学

2008年11月

目 录

第 1 章 液体的主要物理性质及作用力	1
§ 1.1 水力学的任务与研究的对象	1
§ 1.2 量纲和单位	2
§ 1.3 液体的主要物理性质	3
§ 1.4 连续介质和理想液体的概念	9
§ 1.5 作用在液体上的力	10
§ 1.6 水力学的研究方法	11
本章小结	11
习题 1	12
第 2 章 水静力学	13
§ 2.1 静水压强及其特性	13
§ 2.2 水静力学的基本方程	14
§ 2.3 压强的表示方法及其量测	16
§ 2.4 作用在平面上的静水总压力	20
§ 2.5 作用在曲面上的静水总压力	22
本章小结	27
习题 2	28
第 3 章 水动力学基础	33
§ 3.1 水流运动的若干基本概念	33
§ 3.2 恒定总流的连续方程	36
§ 3.3 实际液体恒定总流的能量方程	37
§ 3.4 恒定总流能量方程的应用	40
§ 3.5 恒定总流的动量方程	44
§ 3.6 恒定总流动量方程的应用	46
本章小结	50
习题 3	51
第 4 章 液体的流动形态及水头损失	57
§ 4.1 水头损失的分类及其产生的原因	57
§ 4.2 液体运动的两种形态	58
§ 4.3 均匀流基本方程及沿程水头损失的计算公式	62
§ 4.4 层流运动	64
§ 4.5 紊流运动	66
§ 4.6 沿程水头损失计算	71

§ 4.7 局部水头损失计算	76
本章小结	80
习题 4	81
第 5 章 有压管道恒定流	84
§ 5.1 短管的水力计算	84
§ 5.2 短管水力计算举例	85
§ 5.3 长管的水力计算	90
§ 5.4 长管水力计算举例	94
§ 5.5 有压管路中的水击现象	97
本章小结	100
习题 5	102
第 6 章 明渠均匀流	106
§ 6.1 明渠均匀流的特征及产生条件	106
§ 6.2 明渠均匀流的基本公式	108
§ 6.3 渠道设计中的若干问题	110
§ 6.4 明渠均匀流的水力计算	114
§ 6.5 圆管内的无压均匀流	116
本章小结	118
习题 6	119
第 7 章 明渠恒定非均匀流	122
§ 7.1 明渠水流中的三种流动形态和相对波速	122
§ 7.2 明渠中三种流动形态的判别	124
§ 7.3 水跃与水跌	129
§ 7.4 棱柱形渠道恒定非均匀渐变流微分方程	134
§ 7.5 棱柱形渠道恒定非均匀渐变流水面曲线定性分析	135
§ 7.6 明渠非均匀渐变流水面曲线定量计算	140
本章小结	144
习题 7	146
第 8 章 堰流与闸孔出流	149
§ 8.1 概述	149
§ 8.2 堰流的类型和堰流的基本公式	150
§ 8.3 薄壁堰	152
§ 8.4 实用堰	154
§ 8.5 宽顶堰	160
§ 8.6 闸孔出流	164
本章小结	171
习题 8	172

第 9 章 泄水建筑物下游水流的衔接与消能·····	176
§ 9.1 概 述 ·····	176
§ 9.2 底流衔接形式的判别 ·····	178
§ 9.3 消能池的水力计算 ·····	181
§ 9.4 挑流消能 ·····	188
§ 9.5 相似原理与水力模型实验 ·····	193
本章小结·····	198
习题 9 ·····	200
第 10 章 渗流基础 ·····	203
§ 10.1 渗流的基本概念·····	203
§ 10.2 渗流的基本定律——达西定律·····	205
§ 10.3 地下水的无压渐变渗流·····	207
§ 10.4 普通完全井·····	209
§ 10.5 均质土坝的渗流计算·····	212
§ 10.6 平面渗流的流网解法·····	216
本章小结·····	219
习题 10 ·····	220
附录 I 梯形、矩形断面明渠的正常水深 h_0 求解图·····	223
附录 II 梯形、矩形、圆形断面明渠的临界水深 h_k 求解图 ·····	224
附录 III 矩形断面渠道的收缩断面水深 h_c 及其共轭水深 h_c'' 求解图 ·····	225
附录 IV 矩形断面渠道的收缩断面水深 h_c 、共轭水深 h_k'' 和消能池求解图 ·····	226
参考书目·····	227

第 1 章 液体的主要物理性质及作用力

本章将讲述液体的主要物理性质及其作用力,以便为以后各章打下基础理论的铺垫。

§ 1.1 水力学的任务与研究的对象

水力学主要研究水或其他液体在外力作用下的平衡与运动的规律,以及这些规律在工程实际中的应用。它是力学的一个分支,是一门技术基础课。

水力学在水电工程、港口工程、土建工程、道桥工程、环境工程等的勘测、设计、施工和管理等方面均有广泛的应用。

图 1.1-1 为一渠道上的闸孔泄流示意图。通过此例我们将提出工程中的主要水力学问题,水力学就是要解决这些问题。这些问题可以归纳为如下五个方面:

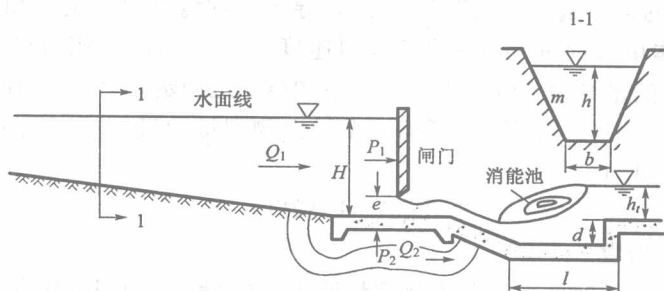


图 1.1-1

1. 管、渠、闸、堰的过水能力

如图 1.1-1 中闸孔的泄流量 Q_1 与闸孔开度 e 、闸的上游水头 H 和下游水深 h_1 有关系,这个具体的关系可通过水力学分析来确定。

2. 水流作用在水工建筑物上的水力荷载

如闸门在关闭时受静水压力作用,在开启时受动水压力作用,在这两种情况下闸底板都要受到由渗流而引起的扬压力作用。而这些力都是设计闸门和闸底板的重要依据。

3. 建筑物的主要尺寸

如当闸孔的泄流量 Q_1 、上游水头 H 和下游水深 h_1 一定时,要求确定闸孔开度 e 、上游渠道的断面尺寸 (b, h, m) 以及下游消能池的尺寸 (l, d) 等。

4. 水流的流动形态

研究和改善水流通过河渠、水工建筑物及其附近的水流形态,为合理布置水工建筑物,保证其正常运行和充分发挥效益提供依据。

5. 水能利用和水能消耗

分析水流在能量转换中的能量损失规律,以便充分地利用水流的有效能量和高效率地消除高速水流中多余的有害动能。

此外在工程中还会遇到许多特殊的水力学问题。如水工建筑物下面透水地基中的渗流运动,河渠中的泥沙运动,海洋中的波浪运动,高速水流中的气蚀与掺气问题等。

水力学研究的对象是液体,以水为主,但是,它的某些规律也可以应用到低粘性的油和不可压缩的气体运动中去。

§ 1.2 量纲和单位

一、量纲

从物理学中知道,描述物理现象的物理量有两种:基本物理量和导出物理量。基本物理量是独立的,不能由其他物理量导出,而导出物理量可以由其他物理量导出。一般用量纲表示物理量的性质和类别。在国际单位制(SI)中,水力学中用到的基本物理量有长度、质量、时间。它们的相应量纲分别为 L 、 M 、 T 。导出物理量可以由定义和物理公式导出,如速度定义为物体单位时间所走的距离,即速度=长度/时间,相应的量纲为 $\dim v = LT^{-1}$,类推加速度的量纲为 $\dim a = LT^{-2}$;由牛顿第二运动定律得,力=质量×加速度,相应的量纲为 $\dim F = MLT^{-2}$ 。因此,任何一个导出物理量的量纲可以表示为基本物理量量纲的指数乘积形式,即

$$\dim A = L^l M^m T^t \quad (1.2-1)$$

式中 l, m, t 为量纲指数。

以上用长度、质量、时间作为基本物理量所表示的量纲称为 LMT 量纲系统,也称为理论量纲系统。然而,在以往的水力学中,也有用以力(F)代替质量(M)的 LFT 量纲系统,称为实用量纲系统。

二、单位

单位是量度物理量的基准。某物理量与该物理量的单位量的比值称为该物理量的大小。在 LMT 量纲系统中的单位制称为绝对单位制,它又包括两种单位制,即,(1)国际单位制(SI),其长度、质量、时间的单位分别为 m (米)、 kg (千克)、 s (秒),而力的单位为 N (牛顿), $1 N = 1 kg \cdot m/s^2$;(2)CGS 单位制,其长度、质量、时间的单位分别为 cm (厘米)、 g (克)、 s (秒),而力的单位为 dyn (达因), $1 dyn = 1 g \cdot cm/s^2$ 。

水力学中也曾采用过工程单位制,其长度、力、时间的单位分别为 m 、 kgf (千克力)、 s 。

如今在水力学中主要采用国际单位制,国际单位制和工程单位制中力的换算关系为

$$1 kgf = 1 kg \times 9.8 m/s^2 = 9.8 N$$

或者

$$1 N = 0.102 kgf \quad (1.2-2)$$

§ 1.3 液体的主要物理性质

液体的主要物理性质有以下几方面:

一、惯性与万有引力特性

物体所具有的保持运动状态不变的性质称为惯性。惯性的大小用物体的质量来量度。质量愈大惯性也愈大。惯性力则是物体抵抗改变其静止或匀速直线运动状态的一种反作用力。当质量为 m 的物体以加速度 a 运动时,它所具有的惯性力为

$$F_i = -ma \quad (1.3-1)$$

上式中的负号说明惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

质量为 m 的物体在地球上受到的万有引力称为重力或重量,用 G 表示。设液体的体积为 V ,质量为 m ,则液体有下面三种密度。

1. 质量密度

单位体积液体的质量称为质量密度,简称为密度,用 ρ 表示,单位为 kg/m^3 ,对均质液体,则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3-2)$$

2. 重量密度

单位体积液体具有的重量称为重量密度,简称为重度或容重,用 γ 表示,单位为 N/m^3 ,对均质液体,则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1.3-3)$$

或者

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1.3-4)$$

3. 相对密度

液体的重量与和它同体积的 4°C 水的重量之比称为相对密度,也称为比重,用 s 表示,无单位,即

$$s = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.3-5)$$

式中 γ_w 、 ρ_w 为 4°C 时水的重度、密度。在国际单位制中

$$\rho_w = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\gamma_w = 9.8 \text{ kN}/\text{m}^3$$

$$s_w = 1$$

不同温度下纯水的密度和重度见表 1.3-1。

表 1.3-1

水的物理性质

温度 (°C)	重度 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	动力粘度 $\mu \times 10^{-3}$ (N · s/m ²)	运动粘度 $\nu \times 10^{-3}$ (m ² /s)	弹性系数 $E \times 10^3$ (N/m ²)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.23	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

二、粘性

液体具有流动性,流动着的液体各流层间可产生内摩擦力以抵抗剪切变形,致使各层流动速度不同,这种特性就是粘性。

现在考察如图 1.3-1 所示的一平面固体边壁处液体的流动。由实验发现,在固体壁面上液体流动的速度为零,随着离开固体壁面距离的增加,速度也增大。取 x 轴正向沿流动方向,取 y 轴垂直于 x 轴。考虑流动中相距为 dy 的两个液体层,下层的流动速度为 u ,上层的流动速度为 $u+du$ 。由于上下两层间存在着速度差,因此开始在同一条铅垂线上的两个液体质点 1、2 经过 dt 时间后移动的距离分别为 $d_1=u dt, d_2=(u+du) dt$ 。由图中可知:液体微团产生的角变形为

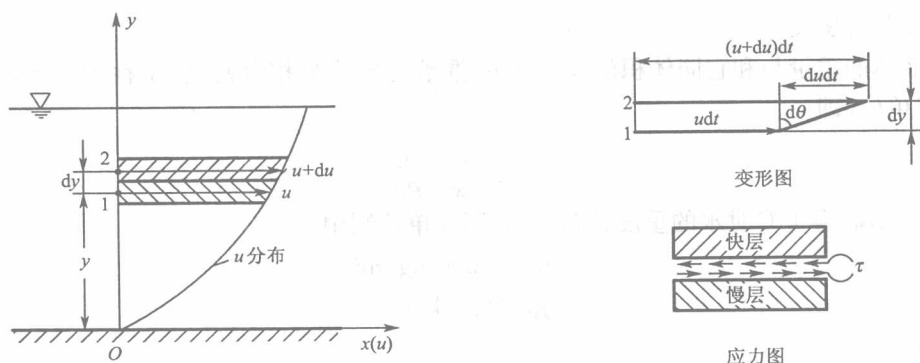


图 1.3-1

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{d_2 - d_1}{dy} = \frac{du}{dy} dt$$

单位时间产生的角变形称为剪切变形速度,记为 $\dot{\theta}$,则

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.3-6)$$

由此可见,上述液流中的剪切变形速度等于速度梯度。又由于变形是与应力相关的,所以液层间存在着与剪切变形相应的剪切应力,这是因为运动快的上层带动运动慢的下层向前运动,运动慢的下层阻滞运动快的上层运动所引起的。

牛顿(Newton)首先提出计算相邻液层间切应力 τ 的公式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3-7)$$

式(1.3-7)也称为牛顿内摩擦定律。

作用在相邻液层接触面积 A 上的总切力 T 为

$$T = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.3-8)$$

式中 μ 为液体的动力粘度,简称粘度,也称为动力粘滞系数,其大小与液体的种类和温度有关,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 Pa 是压强单位符号,称为帕斯卡,简称帕, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 简称“帕秒”。对于 20°C 的水, $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

在水力学中,还常用运动粘度 ν 或运动粘滞系数来表示液体的粘性,定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3-9)$$

式中 ν 的单位为 m^2/s 。因为 ν 具有运动学的量纲,因此称为运动粘度。

水的运动粘度 ν 可以按下式计算

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \text{ m}^2/\text{s} \quad (1.3-10)$$

式中 t ——摄氏温度,单位符号为 $^\circ\text{C}$ 。

温度对于流体的粘性有较大的影响。液体的粘性随温度的增加而减小,而气体的粘性则随温度的增加而增加。这是因为液体的粘性力取决于分子间的内聚力,当温度升高时液体分子间的内聚力减小,因此液体的粘性随温度的增加而减小。但是,气体分子的间距很大,内聚力极小,而分子运动非常剧烈,气体的粘性力主要来自分子间的动量交换。当气体的温度升高时,分子运动加剧,分子间的动量交换加大,所以粘性增大。在图1.3-2中给出了水和空气的运动粘度与温度之间的关系曲线。

在水力学中,将不考虑粘性作用的液体称为理想液体,否则称为实际液体。在图1.3-3中水平线 OE 表示理想液体。

符合牛顿内摩擦定律,即 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 成正比,且温度不变时 μ 为常数的液体称为牛顿液体,如水、酒精、汽油及水银等。这时切应力与速度梯度之间呈线性关系,如图中 OA 线所示。非牛顿液体有下面三种:

(1)理想宾汉液体,如泥浆、油漆、牙膏等,切应力与速度梯度之间的关系如图1.3-3中 OB 线所示,这种液体只有当切应力达到初始屈服应力 τ_y 以后才产生变形,之后 $\tau \propto$

$\frac{du}{dy}$, $\mu = \text{常数}$ 。

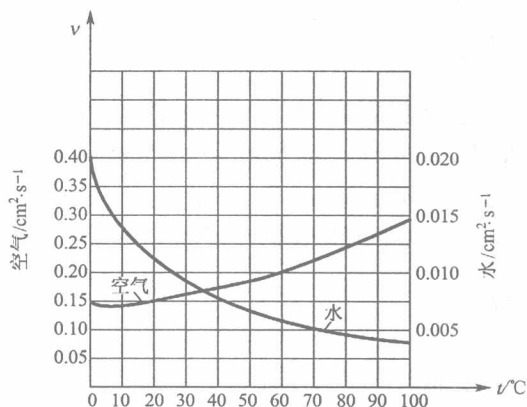


图 1.3-2

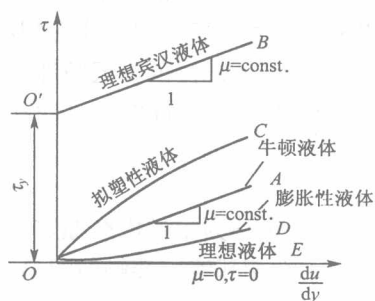


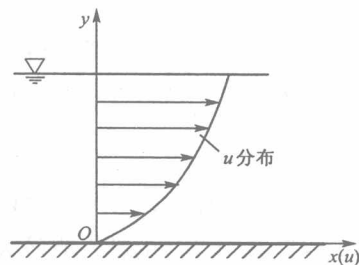
图 1.3-3

(2) 拟塑性液体, 如粘土和石灰的悬浊液、血液及高分子化合物溶液等。随 $\frac{du}{dy}$ 的增加 μ 值减小, 如图 1.3-3 中 OC 线所示。

(3) 膨胀性液体, 如淀粉浆糊及浓糖溶液等。随 $\frac{du}{dy}$ 的增加, μ 值亦增加, 如图 1.3-3 中 OD 线所示。

水力学中只研究理想液体和牛顿液体。非牛顿液体在化学工程、生物工程中较常遇到。

【例 1-1】 液体在平板上流动, 如图所示, 速度 u 与距平板的垂直距离 y 的关系为 $u = 2y^{\frac{2}{3}}$ 。假设液体的动力粘度 $\mu = 1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 试求: 距平板 1 cm 和 10 cm 处的速度梯度 $\left(\frac{du}{dy}\right)$ 及切应力 τ 。



例 1-1 图

解 由 $u = 2y^{\frac{2}{3}}$, 得

$$\frac{du}{dy} = \frac{4}{3} \times \frac{1}{y^{\frac{1}{3}}}$$

代入已知数据 $y_1 = 0.01 \text{ m}$, $y_2 = 0.1 \text{ m}$, 得

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y_1} = \frac{4}{3} \times \frac{1}{\sqrt[3]{0.01}} = 6.18 \text{ s}^{-1}$$

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y_2} = \frac{4}{3} \times \frac{1}{\sqrt[3]{0.1}} = 2.87 \text{ s}^{-1}$$

由牛顿内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

所以

$$\tau|_{y_1} = 1.14 \times 10^{-3} \times 6.18 = 7.05 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$$

$$\tau|_{y_2} = 1.14 \times 10^{-3} \times 2.87 = 3.27 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$$

三、压缩性

液体在密闭的容器中受压后体积减小,撤销压力后又恢复原状的性质称为压缩性。液体的压缩性可用压缩系数 β 表示。参看图 1.3-5。

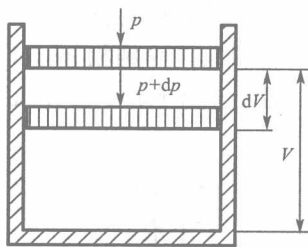


图 1.3-5

设活塞上的压强为 p 时液体的体积为 V ,当活塞上的压强增加 dp 后,液体的体积减小 dV 。我们将增加单位压强时液体体积的相对减小值定义为压缩系数,即

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1.3-11)$$

β 的单位为 m^2/N 。因为压强增加时液体的体积减小,即 dp 为正值时, dV 为负值,为使 β 恒为正值故在式(1.3-11)中加一负号。对于 20°C 的水, $\beta = 0.46 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

压缩系数的倒数定义为体积弹性模量 K

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (1.3-12)$$

K 的单位为 Pa 。对于 20°C 的水, $K = 2.18 \times 10^9 \text{ Pa}$,即每增加一个大气压强(一个大气压强为 98 kPa),水体积的相对压缩值约为两万分之一。本书中除水击问题外,一般都不考虑水的压缩性,认为水是均质不可压缩流体,其密度 $\rho = \text{常数}$ 。

【例 1-2】 为了将某液体的体积压缩 0.03% 需要加 $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的压强,试求此液体的体积弹性模量。

解 由(1.3-12)式计算液体的体积弹性模量,即

$$K = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}}$$

根据题意, $dp = 700\,000 \text{ Pa} = 700\,000 \text{ N/m}^2$, $\frac{dV}{V} = -\frac{0.03}{100}$,代入上式后得

$$K = -\frac{700\,000}{-\frac{0.03}{100}} = 2.33 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

四、表面张力

在两种不同流体介质的分界面(如液体与气体)以及液体同固体的接触面上,由于分界面两侧分子作用力的不平衡,常使分界面上的流体分子间存在一个微小拉力,从宏观上看就表现为表面张力,所以表面张力可以看做作用于液体表面边界线上的一个拉力。

现在来考察图 1.3-6(a)所示液体内部分子 1 和自由表面上分子 2 的受力情况。若忽略分子的重力,由于液体内部的分子 1 受到各方向相等的液体分子引力作用,因此自身处于平衡状态。而自由表面上的分子 2 则只受自由表面下面液体分子的引力作用,致使分子 2 有向下移动的趋势,并使得表层液体受到相邻分子一个微弱的拉力。这个微弱的拉力有使液面尽可能收缩的性质,且与上述自由表面下面液体分子的引力平衡。

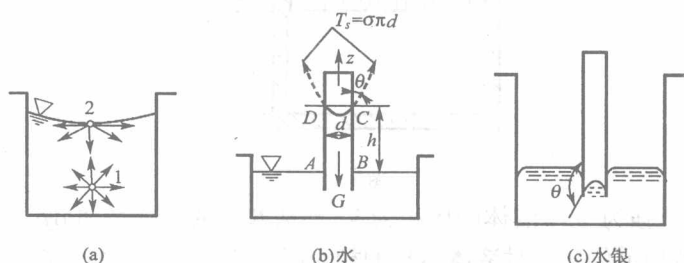


图 1.3-6

表面张力只发生在液面的周界处,其作用方向垂直于周界线且与液面相切,其大小可由下式计算

$$T_s = \sigma l \quad (1.3-13)$$

式中 l ——周界的长度;

σ ——表面张力系数,表示单位长度周界上的拉力,对于 20 °C 的水和水银,其值分别为 0.073 N/m 和 0.514 N/m。

一般情况下,表面张力很小,可以不计。但是,当小液滴、细小泥沙颗粒运动,水在孔隙介质中运动,水深很小的明渠水流和堰流,以及水力学实验室中的测压管插在液体中所产生的毛细管现象,管内液体会高出或低于管外的液面,这时均应考虑表面张力的作用。

我们知道,将细的玻璃管插入水中,水将沿细管上升一定的高度,此现象称为毛细现象。由于玻璃与水体之间的附着力大于水体的内聚力而使液面呈凹形面。这样液面周界处的表面张力将引起水体上升,如图 1.3-6(b)所示,高为 h 液柱的重力应与表面张力在铅直方向上的投影相平衡,即

$$\sigma \pi d \cos \theta = \gamma \frac{\pi d^2}{4} h$$

由此得毛细管上升的高度

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\gamma d} \quad (1.3-14)$$

式中 θ ——液体与固体的接触角,水与玻璃的接触角 $\theta_w = 0^\circ \sim 9^\circ$;

σ ——液体的表面张力系数;

γ ——液体的重度;

d ——玻璃管的直径。

对于水银,由于内聚力比附着力大,所以细玻璃管中的水银面呈现凸形面,表面张力将产生指向水银内部的附加压强,因而压下一个毛细管高度,如图 1.3-6(c)所示。

对 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水,取 $\gamma_w = 9\,789\text{ N/m}^3$, $\sigma_w = 0.073\text{ N/m}$, $\theta_w = 0^{\circ}$,代入式(1.3-14),得毛细管水柱上升高度为

$$h \approx \frac{30}{d} \quad (d, h \text{ 均以 mm 计}) \quad (1.3-15)$$

对于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水银,取 $\gamma_m = 132\,750\text{ N/m}^3$, $\sigma_m = 0.514\text{ N/m}$, $\theta_m = 135^{\circ}$,代入式(1.3-14),得毛细管水银柱下降高度为

$$h \approx \frac{11}{d} \quad (d, h \text{ 均以 mm 计}) \quad (1.3-16)$$

由上面二式可见,管径越细, h 值越大。因此,实验室用的测压管的内径不宜太小,一般要求大于 $10\sim 20\text{ mm}$ 。这样,毛细管作用引起的误差可以忽略不计。

五、液体的汽化压强

液体的分子逸出液面变为气体向空间扩散的过程称为汽化。当液面上空间有限时,随气体分子的增加,压强逐渐增大,这时部分气体分子返回液体,气体凝结为液体,这一过程称为凝结。在液体中,汽化与凝结过程同时存在,当这两个过程达到平衡时,宏观的汽化现象停止,此时液面的压强称为饱和蒸气压强或汽化压强,用 p_b 表示。液体的汽化压强随温度的升高而增大。水的汽化压强随温度的变化见表 1.3-2。

表 1.3-2 水的汽化压强随温度变化表

水温/ $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30
汽化压强/kPa	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温/ $^{\circ}\text{C}$	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强/kPa	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当液体中某处的压强低于当时温度下的汽化压强时,在此处将产生气泡,该现象称为空化。当空化形成的气泡随流移动到高压区时迅速地破灭,这时将产生巨大的瞬间冲击力,使相接触的固体壁面产生剥蚀,此现象称为空蚀。工程中一定要避免空化、空蚀现象的出现,这就要求控制液体中的最低压强大于当时温度下的汽化压强。

§ 1.4 连续介质和理想液体的概念

一、连续介质

所谓连续介质就是认为液体连续地无空隙地充满它所占据的空间。基于下面的原因我们将液体看做连续介质。

(1)水利工程中的水流运动,如管流、明渠流、闸孔出流及堰流等,均属于大尺度的水流宏观运动。

(2)由于 1 cm^3 的水中就有 3×10^{22} 个水分子,分子间的距离为 $3 \times 10^{-8}\text{ cm}$,所以采用