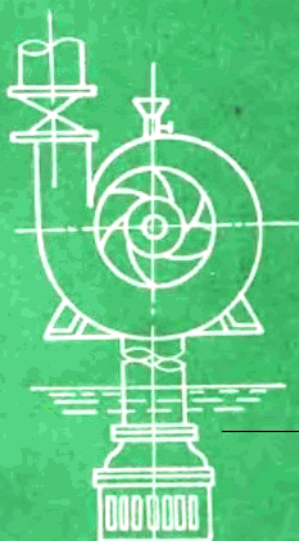




煤矿技工学校试用教材

矿山流体机械



煤炭工业出版社

638841

煤矿技工学校试用教材

矿 山 流 体 机 械

齐 允 平 编



煤炭工业出版社

D 638841

内 容 提 要

本书是根据全国煤矿技工学校教材编写委员会制定的教学大纲的要求而编写的。全书共分四篇，第一篇扼要介绍了流体力学的基础知识，第二、三、四篇详细地介绍了矿山排水、通风及压气设备的结构、工作原理、性能特点、技术参数测定及维修方法等。本书论述详细，具有通俗易懂，便于自学的特点。

本书可作为煤矿技工学校的教学用书，也可作为煤矿机电工人的培训教材。

责任编辑：姜庆乐

煤矿技工学校试用教材

矿 山 流 体 机 械

齐 允 平 编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外东黄城根21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 787×1092mm^{1/16} 印张 11^{1/4}

字数263千字 印数 1—23,080

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

ISBN 7-5020-0382-7/TD·349

书号 3172

定价 3.40元

前 言

为了适应煤矿技工学校教学和技工培训工作改革的需要，加速煤矿工人智力开发和培养，促进煤炭工业现代化生产建设的发展和技术进步。原煤炭工业部劳资司于1985年成立了全国煤矿技工教材编审委员会，对全国煤矿技工教材建设工作进行了全面的规划，并确定“七·五”期间编写一套具有煤矿特点的中级技工教材。这套教材包括：《机械制图》、《综采工作面采煤机》、《煤矿开采方法》、《机械化掘进工艺》、《煤矿地质》、《煤矿测量》等共60余种。

这套教材主要适用于煤矿中级技工（在职和后备技工）正规化培训的需要，也适合具有初中水平的工人自学和工程技术人员参考。

《矿山流体机械》是这套教材中的一种，是根据全国煤矿技工培训统一教学计划和大纲进行编写的，并由全国煤矿技工教材编审委员会组织审定认可，是全国煤矿技工学校和在职培训必备的统一教材。

该教材由大同煤矿技工学校齐允平同志编写，通化煤矿技工学校姚长贵同志任主审，平顶山、阜新和义马煤矿技工学校的有关教师参加了审定工作。另外原煤炭工业部劳资司的有关同志具体组织并参加了审定和修改工作。

由于时间仓促，经验不足，书中难免有不足之处，请读者和用书单位提出批评指正。

全国煤矿技工教材编委会

1989. 6. 30

目 录

第一篇 流体力学基础

| | |
|-----------------------------|----|
| 第一章 概述 | 1 |
| 第一节 流体力学研究对象和任务 | 1 |
| 第二节 液体的主要物理性质 | 1 |
| 第二章 流体静力学 | 9 |
| 第一节 流体静压力及特性 | 9 |
| 第二节 流体静力学基本方程式 | 10 |
| 第三节 压力的测量 | 11 |
| 第四节 帕斯卡定理 | 15 |
| 复习思考题 | 20 |
| 第三章 流体动力学基础 | 21 |
| 第一节 流体动力学的基本概念 | 21 |
| 第二节 流体的连续性方程 | 24 |
| 第三节 微小流束的伯努利方程 | 26 |
| 第四节 实际液体总流的伯努利方程 | 30 |
| 第五节 伯努利方程的应用 | 31 |
| 复习思考题 | 33 |
| 第四章 液体的流动和水头损失 | 35 |
| 第一节 流体运动的两种状态 | 35 |
| 第二节 液流在管路中的水头损失 | 37 |
| 第三节 管路的水力计算 | 45 |
| 第四节 液体的孔口出流 | 49 |
| 复习思考题 | 51 |

第二篇 矿井排水设备

| | |
|-----------------------------|----|
| 第五章 离心式水泵的工作原理 | 52 |
| 第一节 矿井排水设备的主要组成部分及分类 | 52 |
| 第二节 离心式水泵的工作原理 | 53 |
| 第三节 离心式水泵的工作参数 | 55 |
| 第四节 离心式水泵的特性曲线 | 56 |
| 第五节 比例定律和比转速 | 61 |
| 第六节 离心式水泵在管路中的工作 | 64 |
| 复习思考题 | 67 |
| 第六章 离心式水泵的构造 | 68 |
| 第一节 D型离心式水泵的构造 | 68 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|-----------|
| 第二节 | BA型离心式水泵的构造 | 72 |
| 第三节 | 离心式水泵的轴向推力及平衡方法 | 72 |
| 第七章 | 离心式水泵的运行、检修及性能测定 | 75 |
| 第一节 | 离心式水泵的启动、运转和停止 | 75 |
| 第二节 | 离心式水泵的无底阀排水原理 | 75 |
| 第三节 | 离心式水泵的常见故障及处理方法 | 77 |
| 第四节 | 排水设备完好标准和《煤矿安全规程》对井下排水设备的规定 | 78 |
| 第五节 | 离心式水泵的检修 | 82 |
| 第六节 | 离心式水泵的性能测定 | 84 |
| 第八章 | 排水设备的选型设计 | 90 |
| 第一节 | 矿井排水系统 | 90 |
| 第二节 | 水泵房和水仓 | 90 |
| 第三节 | 选型设计的步骤和方法 | 93 |
| | 复习思考题 | 96 |

第三篇 矿井通风设备

| | | |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 第九章 | 矿井通风机的工作原理 | 97 |
| 第一节 | 概述 | 97 |
| 第二节 | 矿井通风机的工作原理和参数 | 97 |
| 第三节 | 通风机的个体特性曲线和典型特性曲线 | 99 |
| 第四节 | 通风机在网路中的工作 | 102 |
| 第五节 | 通风机工况点的调整 | 104 |
| 第六节 | 通风机的联合工作 | 105 |
| | 复习思考题 | 106 |
| 第十章 | 矿用通风机 | 108 |
| 第一节 | 离心式通风机的结构 | 108 |
| 第二节 | 轴流式通风机的结构 | 109 |
| 第三节 | 通风机的布置和反风装置 | 113 |
| 第十一章 | 矿井通风机的运转与维修 | 116 |
| 第一节 | 《煤矿安全规程》关于通风机的规定和通风机的完好标准 | 116 |
| 第二节 | 通风机运转、维护检修和故障处理 | 118 |
| 第三节 | 通风机性能测定 | 119 |

第四篇 矿山压缩空气设备

| | | |
|-------------|--------------------------|------------|
| 第十二章 | 活塞式压缩机的工作原理 | 127 |
| 第一节 | 压缩空气设备的概述 | 127 |
| 第二节 | 热力学基础知识 | 129 |
| 第三节 | 一级活塞式空压机理论工作循环 | 132 |
| 第四节 | 一级活塞式空压机实际工作循环 | 134 |
| 第五节 | 一级活塞式空压机的排气量、功率和效率 | 134 |
| 第六节 | 活塞式空压机两级压缩 | 138 |

| | |
|--|-----|
| 第十三章 空压机及其附属装置 | 141 |
| 第一节 5L-40/8型空压机的性能、特点及其构造 | 141 |
| 第二节 5L-40/8型空压机附属装置的作用、组成及工作原理 | 150 |
| 第三节 空压机压力及排气量的调节 | 156 |
| 第四节 对称平衡式空压机 | 159 |
| 第十四章 活塞式空压机的运转与维修 | 163 |
| 第一节 《煤矿安全规程》关于矿山压气设备的规定和空压机的完好标准 | 163 |
| 第二节 空压机的启动、运转和停车 | 165 |
| 第三节 空压机常见故障及处理 | 166 |
| 第四节 空压机的维护检修 | 167 |
| 第五节 空压机排气量的测定原理和方法 | 168 |

第一篇 流体力学基础

本篇重点介绍流体力学中最基本的概念及应用,如水静力学基本方程、水动力学连续性方程、伯努利方程以及液流在管路中的水头损失的计算公式等,为学习流体机械打下基础。

本教材采用国际单位制(简称SI制),考虑到我国以前的技术资料和使用习惯是工程单位制和绝对单位制,为便于相互换算,将本教材涉及到的一些常用量的各单位制换算关系列入表1-1中。

第一章 概 述

第一节 流体力学研究对象和任务

流体力学是研究液体的平衡和运动规律的科学,是工程应用力学的组成部分之一。它采用理论分析与实验相结合的方法研究并建立起流体中的作用力、运动速度和压力之间的关系,并用所得的规律解决工程实际中的问题。

在理论方面,流体力学广泛采用物理学和理论力学的基本定律,但是流体在平衡和运动状态的许多问题相当复杂,难以得到理想的理论验证,因此,它还广泛地借助于实验方法,才建立起自己的科学体系。所以,流体力学是理论、实践性都较强的一门科学。

流体力学是许多工程的理论基础,例如引水灌溉、水运、水能利用、输油管道、城市给排水、煤矿生产中的矿井通风、排水、水力采煤、液压传动等都以流体力学作为理论基础。因此从事上述工作的科技人员,都需掌握流体力学的理论知识。

第二节 液体的主要物理性质

一、流动性

液体和气体统称为流体。流体与固体不同之处在于流体内各质点内聚力极小,易于流动,不能自由地保持固定的形状,只能随着容器的形状而变化,这个特性叫做流动性。

液体与气体的区别在于液体分子间距离较气体小,在压力作用下体积改变很小,气体的分子间距离较大,在压力作用下体积改变较大。

二、密度与重度

流体在单位体积内所具有的质量,叫做流体的密度,其代表符号用 ρ 表示。

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

式中 ρ ——流体的密度,千克/米³;

V ——流体体积,米³;

表 1-1 不同单位制的单位换算关系

| 物理量名称 | 国际单位制 | | 工程单位制 | | 绝对单位制 | 换算关系 |
|-----------|---|--|----------------------|-----------------------------------|---|--|
| | 名称 | 符号 | 名称 | 符号 | | |
| 长度(L) | 米 | m | 米 | m | 厘米 | 1米=100厘米 |
| 质量(m) | 千克 | kg | 质量工程单位 | kgf·s ² /m | 克 | 1千克=10 ³ 克 1公斤= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒 ² /米 |
| 时间(t) | 秒 | s | 秒 | s | 秒 | 1秒=1秒 |
| 力(F) | 牛(顿) | N=kg·m/s ² | 公斤力 | kgf | 达因 | 1牛=10 ⁵ 达因 1牛= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力 |
| 压强(p) | 帕斯卡 | Pa=N/m ² | 公斤力/厘米 ² | kgf/cm ² | 达因/厘米 ² | 1帕=10达因/厘米 ² 1帕= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力/米 ² |
| 密度(ρ) | 千克/米 ³ | kg/m ³ | 密度工程单位 | kg·s ² /m ⁴ | 克/厘米 ³ | 1公斤/米 ³ =10 ⁻³ 克/厘米 ³ 1公斤/米 ³ = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒 ² /米 ³ |
| 重度(γ) | 牛/米 ³ | N/m ³ | 公斤力/米 ³ | kgf/m ³ | 达因/厘米 ³ | 1牛/米 ³ =10 ⁻¹ 达因/厘米 ³ 1牛/米 ³ = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力/米 ³ |
| 动力粘性系数(μ) | 帕·秒= $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2 \cdot \text{秒}}$ | Pa·s= $\frac{\text{N}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ | 公斤力·秒/米 ² | kgf·s/m ² | 泊= $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}}$ | 1帕·秒=10泊 1帕·秒= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒/米 ² |
| 运动粘性系数(ν) | 米 ² /秒 | m ² /s | 米 ² /秒 | m ² /s | 斯=厘米 ² /秒 | 1米 ² /秒=10 ⁴ 斯 |
| 能功(W) | 焦耳 | J=N·m | 公斤力·米 | kgf·m | 尔格=达因·厘米 | 1牛·米=1焦=10 ⁷ 达因·厘米 1牛·米= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·米 |
| 功率(P) | 瓦 | W=J/s | 公斤力·米/秒 | kgf·m/s | 尔格= $\frac{\text{达因} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}}$ | 1焦/秒=1瓦=10 ⁷ 达因·厘米/秒 1焦/秒= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·米/秒 |

m ——体积 V 内所具有的流体质量，千克。

实验证明，流体的密度 ρ 与压力 p 和温度有关，但在通常状态下流体是处于大气压力之下，并且温度的变化不大，所以流体的密度可以看成是不变的。

流体在单位体积内所具有的重力叫做流体的重度，其符号用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度，牛/米³；

G ——流体的重力，牛[顿]。

流体的重度也和密度一样与压力和温度有关，但因其变化很小，所以也可以看成是不变的。重度与密度有下列关系：

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-3)$$

在工程技术中，4℃的蒸馏水的密度为1000.62 千克/米³，重度为 98100 牛/米³。矿水的重度一般为9957~100055 牛/米³，有时可达10300.5 牛/米³。

在标准状态下（温度为0℃、大气压为101325Pa），空气的密度为1.295 千克/米³，重度为11.77 牛/米³。

几种流体的重度和密度如表1-2所示。

表 1-2 几种流体的重度和密度

| 流 体 名 称 | 温 度 (℃) | 密 度 (千 克 / 米 ³) | 重 度 (牛 / 米 ³) |
|---------|---------|-----------------------------|---------------------------|
| 清 水 | 4 | 1001 | 9810 |
| 矿 井 水 | 15 | 1051 | 10300 |
| 汽 油 | 15 | 700~750 | 6867~7358 |
| 柴 油 | 15 | 876 | 8584 |
| 润 滑 油 | 15 | 890~920 | 8731~9025 |
| 液 压 油 | 15 | 863~903 | 8437~8829 |
| 酒 精 | 15 | 890~801 | 7750~7848 |
| 水 银 | 15 | 13597 | 133416 |

三、粘性

流体运动时，在其内部产生内摩擦力的性质称为粘性。当流体以某一速度流动时，其内部分子之间存在着吸引力，流体的分子和固体壁面之间有附着力作用。分子间的吸引力和流体分子与壁面的附着力都是抵抗流体运动的阻力，而且是以内摩擦力的形式表现出来，这就是流体粘性的实质。

液体和气体都有粘性，但程度不一样，在相同条件下，液体的粘性比气体大。

取两块平板进行实验，如图1-1所示。上平板的运动速度为 u_0 ，下平板固定不动，即 $u=0$ ，两平板的间距为 h 。因为液体分子与板面间有附着力作用，所以与上平板表面接触的一层液体要以 u_0 速度和上平板一同向前流动，而与下板面接触的液层的速度则为零。当 h 很小时，在两板间的液体将以接近于线性规律分布的速度向前流动，可表示为：

$$u = \frac{y}{h} u_0 \quad (1-4)$$

我们可以把两平板间的液体看作许多无限薄的液体层在运动（图1-2）。当快速液层在慢速液层上滑过时，在两层接触面上必然产生切向作用力，即粘性内摩擦力。这种内摩擦力以运动阻力的形式呈现出来。

根据牛顿研究的结果，流体层内摩擦力 T 与下列几个因素有关：

(1) 内摩擦力 T 与流体的粘性成正比关系。如用粘度 μ 表示粘性的大小，则内摩擦力 T 和粘度 μ 成正比关系。

(2) 内摩擦力 T 与流体两层之间的接触面积 A 成正比。

(3) 内摩擦力 T 与流体两层间的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比。 dy 表示无限薄液体层的厚度，其下表面的速度为 u ，上表面的速度为 $u + du$ ， du 是 dy 距离内的速度增量。

若将上述各因素与内摩擦力的关系以数学式表示，则可写成：

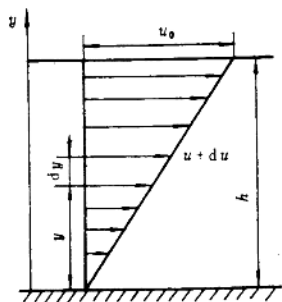


图 1-1 平板间粘性流体的运动

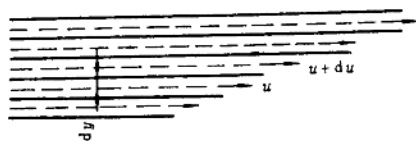


图 1-2 液体层间相对运动

$$T = \pm \mu \cdot A \cdot \frac{du}{dy} \quad (\text{牛}) \quad (1-5)$$

若以面积 A 除上式则得

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 τ ——单位面积上的内摩擦力，即切向应力，牛顿/米²。

因摩擦力为一矢量，速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 可能为正值也可能为负值，式中的正负号是为 T 或 τ 保持正值而记入的。当 $\frac{du}{dy}$ 为正值时取“+”号， $\frac{du}{dy}$ 为负值时用“-”号。

利用公式 (1-6) 只能求出内摩擦力的大小，至于 T 或 τ 的方向，则可按下述原则确定。

对于流动慢的一层流体， τ 的方向与速度一致，对于流动快的一层流体， τ 的方向与速度相反。

从 τ 的计算式可知，在静止流体中 $\frac{du}{dy} = 0$ ，故 $\tau = 0$ 。换言之，在静止流体中并不呈现粘性。粘性 μ 可从式 (1-6) 求出：

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

μ 的物理意义是当两层流体间的速度梯度 $\frac{du}{dy} = 1$ 时所产生的切应力的值，即

$$\mu = \tau \quad (1-8)$$

流体粘度的表示方法有以下几种：

(1) 动力粘度 动力粘度也叫绝对粘度或粘性动力系数。在国际单位制中，动力粘度用符号 μ 或 η 表示。其单位为帕·秒 (Pa·s) 或 $\frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right)$ 。1帕·秒是指某一种均质流体在层状流动时的动力粘度，即在该流体两个相距 1 米的层面以 1 米/秒的速度作相对运

动时产生的切应力为1帕（帕斯卡）。

动力粘度的工程单位、绝对单位及其换算关系见表1-1。

(2) 运动粘度 运动粘度亦称粘性运动系数，用符号 ν 表示。它是流体的动力粘度与密度在一个标准大气压下而且温度相同时的比值，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

在国际单位制中，运动粘度的单位是米²/秒。1米²/秒是指某一均质流体的运动粘度，而该流体的动力粘度是1帕·秒，密度是1千克/米³。

运动粘度的工程制单位与国际单位制相同，都是米²/秒，物理制单位是厘米²/秒，叫做“斯”（斯托克斯）。其单位换算关系如表1-1所示。

在表1-3、1-4中给出了水和空气在不同温度下的重度 and 运动粘度值。

表 1-3 水在不同温度时的重度和运动粘度

| 温 度 (°C) | 重 度 γ (牛/米 ³) | 运动粘度 ν (厘米 ² /秒) |
|----------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 9808.63 | 0.0179 |
| 10 | 9807.23 | 0.0130 |
| 15 | 9801.37 | 0.0114 |
| 20 | 9694.54 | 0.0100 |
| 30 | 9764.58 | 0.0080 |
| 40 | 9733.87 | 0.0066 |
| 60 | 9645.58 | 0.0047 |
| 80 | 9532.05 | 0.0030 |
| 100 | 9401.71 | 0.0029 |

表 1-4 空气在不同温度时的重度和运动粘度

| 温 度 (°C) | 重 度 γ (牛/米 ³) | 运动粘度 ν (厘米 ² /秒) |
|----------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 11.684 | 0.137 |
| 10 | 12.232 | 0.147 |
| 15 | 12.027 | 0.152 |
| 20 | 11.821 | 0.157 |
| 30 | 11.449 | 0.166 |
| 40 | 10.066 | 0.176 |
| 60 | 9.810 | 0.196 |

(3) 条件粘度 条件粘度也称作相对粘度。它是用特定的仪器在规定的条件下直接测出来的粘度。根据测量条件的不同，各国采用的条件粘度也不一样。美国常用赛氏粘度（SSU），英国常用雷氏粘度（°R）。当前我国通常采用恩氏粘度（°E）。

恩氏粘度是以恩氏粘度计测出来的。即在一定的温度下，使200毫升的被测液体，在自重作用下从圆筒中经直径2.8毫米的小孔流出所需的时间与20°C时同体积蒸馏水流过上述仪器所需的时间的比值就是恩氏粘度，用符号°E表示。即

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-10)$$

式中 t_1 ——200毫升的被测液体流过恩氏粘度计小孔所需的时间，秒；
 t_2 ——200毫升的蒸馏水在20℃时流过恩氏粘度计小孔所需的时间，一般 t_2 为50~53秒。

用恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 可按下面经验公式求出液体的运动粘度：

$$\nu = 7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \quad (\text{厘斯}) \quad (1-11)$$

上述公式适用于 $^{\circ}\text{E} > 2$ 的情况。如果 $^{\circ}\text{E} \leq 2$ 时则

$$\nu = 7.31^{\circ}\text{E} - \frac{C}{^{\circ}\text{E}} \quad (\text{厘斯}) \quad (1-12)$$

式中 C 值可从表1-5查得。

表 1-5 C 值

| | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $^{\circ}\text{E}$ | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.15 |
| C | 0.062 | 0.059 | 0.057 | 0.054 | 0.055 |

工业上常用20℃、50℃和100℃作为测定恩氏粘度的标准温度，其代表符号为 $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{50}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{100}$ 。

例1-1 用恩氏粘度计测得的石油粘度为 8.5°E ，该种油的重度 $\gamma = 8338.5$ 牛/米³，求用国际单位制表示的石油的绝对粘度。

解
$$\nu = 7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} = 7.31 \times 8.5 - \frac{6.31}{8.5} = 61.4 \text{厘斯}$$

换成国际单位制：

$$\nu = 61.4 \times 10^{-6} \text{米}^2/\text{秒}$$

石油密度
$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8338.5}{9.8} = 850 \text{千克/米}^3$$

绝对粘度

$$\mu = \nu \cdot \rho = 61.4 \times 10^{-6} \times 850 = 0.05219 \text{帕} \cdot \text{秒}$$

四、压缩性和膨胀性

如果液体温度不变而作用于液体上的压力增加时，则液体的体积就会减小，密度增大，这一性质叫作液体的可压缩性。液体的可压缩性大小用压缩系数 β_p 表示。其意义是在温度不变的情况下，液体增加1单位压力时，其体积的相对变化量。

如以 dP 表示压力变化值， $\frac{dV}{V}$ 表示体积相对改变值（ V 是原来的体积），则体积压缩系数为

$$\beta_p = -\frac{dV}{V \cdot dp} \quad (\text{米}^2/\text{牛}) \quad (1-13)$$

压力增加时，体积减小，为使 β_p 为正值故在式中加“-”号。体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数 E_0 ，即

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad (\text{牛}/\text{米}^2) \quad (1-14)$$

在国际单位制中，体积压缩系数 β_p 的单位是米²/牛。其换算关系为：

$$1 \text{米}^2/\text{牛顿} = 9.81 \text{米}^2/\text{公斤力}$$

$$1 \text{米}^2/\text{公斤力} = 0.102 \text{米}^2/\text{牛顿}$$

液体的体积压缩系数是非常小的。例如压力在1~500大气压之间，温度在0~20℃之间时，水的体积压缩系数不超过1/20000。因此，可以把液体看作是“不可压缩”的。但在特殊情况下（如水冲击），仍必须考虑。否则，压缩性的影响将会造成很大的偏差。

例1-2 设在某圆形油缸中装满油液，其体积弹性系数 $E_0 = 2 \times 10^9$ 牛/米²，若油缸内径 $d = 0.01$ 米，在一个大气压力下油液的体积 $V = 2 \times 10^{-4}$ 米³，当油缸内的油压为200个大气压力时，油缸中的活塞前进了多少距离？

解 $E_0 = 2 \times 10^9$ 牛/米² $d = 0.01$ 米

$$V = 2 \times 10^{-4} \text{米}^3$$

$$dp = (200 - 1) \text{大气压} = 1.99 \times 10^7 \text{牛}/\text{米}^2$$

$$\beta_p = \frac{1}{E_0} = \frac{1}{2 \times 10^9} = 5 \times 10^{-10} \text{米}^2/\text{牛}$$

由式 $\beta_p = \frac{dV}{V \cdot dp}$ ，得

$$dV = \beta_p \cdot V \cdot dp = 5 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^{-4} \times 1.99 \times 10^7 = 1.99 \times 10^{-6} \text{米}^3$$

所以，活塞前进的距离 L 为

$$L = \frac{4dV}{\pi d^2} = \frac{4 \times 1.99 \times 10^{-6}}{3.14 \times (0.01)^2} = 2.535 \times 10^{-4} \text{米}$$

液体的体积随温度的升高而膨胀的性质称为液体的膨胀性，用体积膨胀系数 β_t 表示。

$$\beta_t = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad (1-15)$$

式中 β_t ——液体体积膨胀系数，1/℃；

V ——液体膨胀前的体积，米³；

dV ——液体体积的增量，米³；

dt ——液体温度的增量，℃。

液体的 β_t 值也是很小的。以水为例，在一个标准大气压下，温度为40~50℃时， $\beta_t = 422 \times 10^{-6}$ 1/℃。但是， β_t 也与压力有关，只是其变化甚微。对于多数液体而言， β_t 随压力的升高而略减小，但是对于水而言，随压力升高 β_t 值略有增加。表1-6列出水在不同压力下的膨胀系数。

表 1-6 水在不同压力下的 β_t 值

| 压 力 (标准大气压) | 温 度 (°C) | | |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 1~10 | 10~20 | 40~50 |
| | $\beta_t(1/°C)$ | | |
| 1 | 14×10^{-6} | 150×10^{-6} | 422×10^{-6} |
| 100 | 43×10^{-6} | 165×10^{-6} | 422×10^{-6} |
| 200 | 72×10^{-6} | 183×10^{-6} | 426×10^{-6} |
| 500 | 149×10^{-6} | 236×10^{-6} | 429×10^{-6} |

液体的 β_t 值是很小的,当压力及温度变化不大时,可以认为液体的体积不发生变化,即为不可压缩又不膨胀的流体。因此,可以认为液体的重度 γ 及密度 ρ 是不随温度和压力而改变的。只有压力及温度变化很大时,才需考虑其压缩性及膨胀性,以免造成较大的误差。

例1-3 在一密闭的油筒中盛满液压油,若已知液压油体积 $V = 5000$ 厘米³,液压油体积膨胀系数 $\beta_t = 9 \times 10^{-4}$ 1/°C,试求温度从 -20 °C升到 $+20$ °C时液压油体积的增大量。

解 由公式(1-15)中求出 dV

$$dV = \beta_t \cdot V \cdot dt$$

已知

$$dt = 20 - (-20) = 40^\circ\text{C}$$

则

$$dV = 0.0009 \times 5000 \times 40 = 180 \text{厘米}^3$$

例1-4 当锅炉内水温 $t_1 = 70$ °C时注入 50 米³的水,问当锅炉内水温升到 $t_2 = 90$ °C时,能从锅炉排出多少水? ($\beta_t = 0.00064$ 1/°C)

解 由公式(1-15)求出 dV

$$dV = \beta_t V dt = 0.00064 \times 50 \times (90 - 70) = 0.64 \text{米}^3$$

故排出的水量

$$V_2 = V_1 + dV = 50 + 0.64 = 50.64 \text{米}^3$$

第二章 流体静力学

第一节 流体静压力及特性

在一个装满水的静止水箱中，由于水的重量而使箱底、箱壁以及水的内部点都将受到压力的作用。观察从静止状态中取出的一块分离体发现，这块分离体在外力的作用下处于平衡状态。如图2-1所示，为了得出流体内部的应力，用一平面 ab 把它分为I、II两部分，若拿走I部分，则必须在平面 ab 上加一个代替I部分对II部分的作用力，才能使II部分保持平衡。在 ab 平面上取一微小面积 ΔA ，其上液体的作用力为 ΔP ， $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 称为面积 ΔA 的平均静压力。当面积 ΔA 无限缩小到 m 点，这个极限就代表 m 点的静压力，以 P 表示。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

液体的静压力 p 表示静止液体在单位面积上所受到的作用力，即作用在 m 点上的压力，因而又称为液体的静压强。其国际单位为牛/米²，工程单位制为公斤力/厘米²。

液体静压力具有两个特性：

(1) 液体静压力的方向总是垂直于作用面，且指向作用面。这个特性可以用反证法加以证明。如图2-2所示，在处于静止状态的液体中取 ab 平面下面的液体为分离体，假设作用在 ab 面上某点 m 的静压力 p' 不是内向垂直于作用面，则 p' 分解为两个分量，一个是切向分量 p_r ，一个是法向分量 p_n 。按公式(1-6)得知，在静止流体中 $\frac{du}{dy} = 0$ ，所以 $p_r = 0$ 。

因此液体静压力只可能沿着内法向作用。

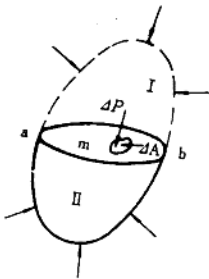


图 2-1 静止液体中的分离体

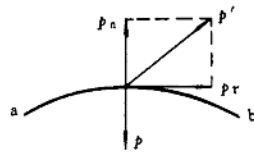


图 2-2 液体静压力分析 (一)

(2) 在静止液体中任一点所受各方向的静压力均相等。如图2-3所示，任取一点A，

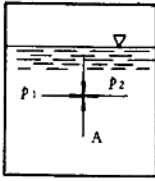


图 2-3 液体静压分析 (二)

假设A点左边压力 p_1 大于右边压力 p_2 则A点液体必向右移动,这就与静止液体的前提不相符合,因此 $p_1 = p_2$ 。用此方法可以证明A点处任意方向的静压力都相等。用测压计对任一点测其各向压强,可得其值为一定值。

第二节 流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式是研究相对静止液体中某点的流体静压力的大小,以及液体在平衡时静压力分布规律的数学表达式。

在装有液体的静止容器中,液体表面为自由液面(所谓自由液面是指液体和外界气体或真空之间的分界面),液面上外界压力为 p_0 。在液面下M点取底面积为 ΔA 至液面高为 h 的小液柱为分离体,如图2-4所示。

小液柱底面 ΔA 受力有:

作用在小液柱上表面的力 $p_0\Delta A$,方向向下;

受重力 $G = \gamma\Delta Ah$,方向向下;

下部液体对液柱的支撑力 $P = p\Delta A$,方向向上。

作用在液柱周围且垂直液柱表面的力,因为它们围绕液柱作对称分布而且大小相等,所以相互平衡。因此沿液柱垂直轴线力的平衡方程式为:

$$p_0\Delta A + \gamma\Delta Ah - p\Delta A = 0$$

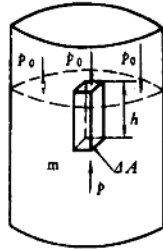
消去上式各项中的 ΔA 、并移项得

$$p = p_0 + \gamma h \quad (\text{牛/米}^2) \quad (2-2)$$

上式称为流体静力学基本方程式。它说明液体任一点的静压力,等于自由表面上的压力 p_0 与该点以上的液柱自重所产生的压力 γh 之和,即当液体重度及自由表面压力一定的情况下,液体中的静压力随着深度 h 线性地变化。

由流体静力学的基本方程式可知,在重力作用下的静止液体中,距任一基准面的高度 h 相等的各点,压力是相等的。这些压力相等的点所组成的面,叫做等压面。在重力作用下的静液中,任意一个水平面都是等压面。但必须注意,这个结论只对相互连通而又是相同液体的情况才适用。如果液体中间被气体或另一种液体隔开,以及互不连通的液体,同一水平并不是等压面。如图2-5a所示,玻璃管中的水与容器中的水是连通的,因此,任何一个水平面都是等压面。图2-5b中A-A平面虽是水平面,但由于此平面通过两种液体(容器中是油,玻璃管中是水),因而不是等压面,只有B-B平面及其以下的水平面才是等压面。

例2-1 有一个两端开口的连通器,如图2-6所示。其大直径端装有汞,小直径端上部

图 2-4 深度为 h 处 m 点的静压力