

高等学校教学用书

# 流体力学与流体机械

孙尚勇 主编

煤炭工业出版社

3  
R

高等学校教学用书

# 流体力学与流体机械

孙尚勇主编

煤炭工业出版社

## 内 容 提 要

本书是为煤炭高等工科院校矿业机械、矿山机电及采矿工程等专业的《流体力学与流体机械》课程编写的教材。书中介绍了流体静力学、流体动力学、能量损失及管流等专业基础理论知识。也阐述了矿用水泵、通风机及空压机的构造、工作原理、运转和选型设计等专业知识。为便于自学，在每章之后附有学习指导、思考题及习题。

本书不仅可作为高等院校专科学生的教材，也可作为本科学生及有关工程技术人员的参考书。

责任编辑：王 树 范

### 高等学校教学用书 流 体 力 学 与 流 体 机 械

孙 尚 勇 主 编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街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<sup>1/16</sup> 印张 19 插页 1

字数 447千字 印数 1—7,065

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0562-5/TD·517

书号 3337

定价 4.95元

## 前 言

本教材是根据“1986~1990年煤炭高等工科院校教材建设选题规划”的安排，参照教学大纲的要求编写的。它可供矿业机械、矿山机电及采矿工程等专业专科学生的《流体力学与流体机械》课程教学使用，亦可作为本科学生及有关工程技术人员的参考书。

流体力学是一门专业基础课，它不仅为流体机械、液压传动及通风工程等专业课奠定基础，而且是工科院校有关专业学生必备的基础理论知识。

流体机械，包括水泵、通风机及空气压缩机，它们是采矿工业的重要设备。流体机械的选型及运转状况的好坏，不仅涉及采矿工作能否正常进行，而且因其能耗大还直接影响经济效益。因此，流体机械是上述有关专业的重要专业课。

全书共分三篇，第一篇为流体力学，第二篇为矿山排水及通风设备，第三篇为矿山压设备。

本书第一、二及七章由孙尚勇教授编写；第三、四、五及六章由王峻岐副教授编写；第八及十一章由于永波高级工程师编写；第九章由孙尚勇同于永波合写；第十及十二至十六章由郑春祥副教授编写。全书由孙尚勇教授任主编。

书中带有“\*”号的章节，可根据具体情况取舍。

本教材在编写过程中，对编写提纲的审查和讨论，得到了兄弟院校同行们的大力帮助，并对教材内容提出不少宝贵意见，在此表示谢忱。

限于编者水平，书中不妥之处，甚至谬误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1990年12月

# 目 录

## 第一篇 流 体 力 学

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 流体的主要物理性质 .....	1
第二节 作用于流体上的力 .....	7
学习指导 .....	7
思考题及习题 .....	8
<b>第二章 流体静力学</b> .....	9
第一节 流体静压强及其特性 .....	9
第二节 流体平衡微分方程 .....	10
第三节 重力作用下的流体静力学基本方程式 .....	11
第四节 等压面及其特性 .....	13
第五节 压强的测量 .....	15
第六节 流体的相对平衡 .....	18
第七节 作用于壁面上的液体总压力 .....	23
学习指导 .....	29
思考题及习题 .....	30
<b>第三章 流体动力学</b> .....	32
第一节 流体运动中的几个基本概念 .....	32
第二节 连续性方程 .....	37
第三节 理想流体运动微分方程 .....	39
第四节 理想流体微小流束的伯诺里方程及其意义 .....	40
第五节 实际流体总流的伯诺里方程 .....	43
第六节 伯诺里方程的应用 .....	46
第七节 动量方程 .....	51
*第八节 粘性流体的运动微分方程 .....	54
学习指导 .....	57
思考题及习题 .....	58
<b>第四章 流动阻力和能量损失</b> .....	62
第一节 能量损失的两种形式 .....	62
第二节 流体的两种流动状态 .....	63
第三节 管内层流运动及其沿程损失 .....	66
第四节 管内紊流运动及其沿程损失 .....	70
第五节 沿程阻力系数的计算 .....	72
第六节 管中局部阻力损失计算 .....	76
学习指导 .....	83
思考题及习题 .....	86



<b>第五章 孔口管嘴及堰的水力计算</b> .....	87
第一节 孔口出流 .....	87
第二节 管嘴出流 .....	89
第三节 堰流计算 .....	92
学习指导 .....	94
思考题及习题 .....	95
<b>第六章 管路计算</b> .....	96
第一节 简单管路 .....	96
第二节 并联管路 .....	100
第三节 分叉管路 .....	101
学习指导 .....	103
思考题及习题 .....	103
<b>*第七章 相似理论及因次分析</b> .....	105
第一节 相似条件及相似准数 .....	105
第二节 因次分析及 $\pi$ 定理 .....	108
学习指导 .....	111
思考题及习题 .....	112

## 第二篇 矿山排水及通风设备

<b>第八章 概述</b> .....	113
第一节 涡轮机的分类 .....	113
第二节 涡轮机的工作原理 .....	114
第三节 涡轮机的工作参数 .....	115
学习指导 .....	116
思考题及习题 .....	116
<b>第九章 涡轮机的工作理论</b> .....	117
第一节 离心式涡轮机的工作理论 .....	117
第二节 轴流式涡轮机的工作理论 .....	126
第三节 涡轮机的类型特性曲线 .....	128
第四节 比例定律 .....	130
第五节 比转数 .....	132
学习指导 .....	133
思考题及习题 .....	134
<b>第十章 排水设备</b> .....	135
第一节 矿井排水 .....	135
第二节 矿用水泵的分类及其构造 .....	136
第三节 离心式水泵的启动、运转和停泵 .....	143
第四节 排水管路特性 .....	144
第五节 水泵的汽蚀现象与吸水高度 .....	146
第六节 水泵的工况及工业利用区 .....	150
第七节 离心水泵的调节 .....	155
第八节 离心水泵的联合工作 .....	158

第九节 水泵的性能测试 .....	160
第十节 排水设备 .....	163
第十一节 排水设备选型设计 .....	169
学习指导 .....	183
思考题及习题 .....	183
<b>第十一章 通风设备</b> .....	<b>185</b>
第一节 矿井通风 .....	185
第二节 通风机的分类及构造 .....	186
第三节 通风机在网路上的工作 .....	199
第四节 通风机的调节 .....	203
第五节 通风机的联合工作 .....	206
第六节 通风机的性能测试 .....	207
第七节 通风机的附属装置 .....	212
第八节 通风设备选型设计 .....	217
学习指导 .....	226
思考题及习题 .....	227
<b>第三篇 矿山压气设备</b>	
<b>第十二章 概述</b> .....	<b>228</b>
学习指导 .....	230
思考题 .....	230
<b>第十三章 活塞式空压机的工作理论</b> .....	<b>231</b>
第一节 热力学基础 .....	231
第二节 活塞式空压机的理论工作循环 .....	234
第三节 活塞式空压机的实际工作循环 .....	237
第四节 空压机的排气量及供气效率 .....	238
第五节 两级压缩 .....	240
第六节 空压机的功率及效率 .....	243
学习指导 .....	246
思考题及习题 .....	247
<b>第十四章 矿用活塞式空压机的构造</b> .....	<b>249</b>
第一节 L型空压机的型式及其结构特点 .....	249
第二节 L型空压机的构造 .....	249
第三节 其它型式空压机简介 .....	267
学习指导 .....	269
思考题 .....	269
<b>第十五章 空压机的性能测试</b> .....	<b>270</b>
第一节 空压机排气量及输气管路漏气量的测定 .....	270
第二节 空压机功率及效率的测定 .....	272
第三节 空压机示功图的测定 .....	272
学习指导 .....	274
思考题 .....	274

<b>第十六章 压气设备选型设计</b> .....	275
<b>第一节 空压机站址的选择及机房内设备的布置</b> .....	275
<b>第二节 压气设备选型设计</b> .....	277
<b>学习指导</b> .....	292
<b>思考题及习题</b> .....	293



# 第一篇 流体力学

## 第一章 绪论

流体包括液体和气体，流体力学是力学的一个分支。它是研究流体处于平衡和运动状态时的力学规律，以及这些规律在工程上的实际应用。

流体力学可分为两大类，液体力学和气体力学。在研究液体时，通常是以水作为对象，故液体力学有时又称之为水力学。虽然水力学的主要研究对象是液体，但是，当气体的流速和压力不大，比容变化不多，压缩性的影响可以忽略不计时，液体的各种规律对于气体也是适用的。

流体力学在工农业生产和国民经济各部门有着广泛的应用。水利、机械、动力、石油、化工、造船、气象、海运、航空、直至航天等各部门，都要涉及到水、油、气等流体的运动以及流体与物体相互作用力的问题。煤矿生产中，矿井通风、排水、水力采煤及运输、水砂充填及重力选矿等都是以流体力学作为理论基础的。

学习流体力学，要在掌握基本理论的基础上，学会理论联系实际地分析和解决工程中的各种有关问题。

### 第一节 流体的主要物理性质

为了研究流体的力学规律，首先应掌握流体的主要物理性质。流体与固体不同，它的特性是易于流动，任何微小的剪切力都能使静止流体发生很大的变形，因此流体不能有一定的形状，而只能随时被限定为其所在容器的形状。

从流体的分子结构来看，液体分子之间的间隙小，分子间的引力相对于气体而言要大得多，在极大的外压力作用下，其体积只有极微小的变形。通常称这种液体为不可压缩流体。气体分子之间的间隙大，分子之间的引力很小，在较小的外压力作用下，其体积可以发生很大的变形，通常称这种气体为可压缩流体。

#### 一、流体的密度和重度

流体的第一个物理性质就是它具有质量和重量。

单位体积的流体所具有的质量称为密度，用 $\rho$ 表示，均质流体各点的密度相同，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1)$$

式中  $m$ ——均质流体的质量，kg；

$V$ ——质量为 $m$ 的均质流体的体积， $\text{m}^3$ 。

流体的重量通常用重度这个物理量来表示。单位体积的流体所具有的重量称为重度，用 $\gamma$ 表示，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{N/m}^3 \quad (1-2)$$

式中  $G$ ——均质流体的重量, N;

$V$ ——重量为  $G$  的均质流体的体积,  $m^3$ 。

考虑到  $G = mg$ , 则流体的重度和密度有如下的关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

或

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

式中  $g$  为重量加速度, 通常取  $g$  为  $9.807m/s^2$ , 或取为  $9.81m/s^2$ 。

应当指出, 重度与比重的概念是不相同的, 比重是指流体的重量与温度为  $4^\circ C$  时同体积蒸馏水的重力之比。比重是没有单位的。

流体的密度  $\rho$  只取决于流体质量的分布情况, 而与所处的地理位置无关。流体的重度  $\gamma$  则随各处重力加速度不同而稍有差异, 所以它与地理位置有关。几种常见流体的密度和重度列于表1-1中。

表 1-1 几种常见流体的密度和重度

流体名称	温度, $^\circ C$	密度, $kg/m^3$	重度, $N/m^3$	流体名称	温度, $^\circ C$	密度, $kg/m^3$	重度, $N/m^3$
水	4	1000	9807	酒精	15	790~800	7748~7846
矿井地下水	15	1050	10297	水银	0	13600	133375
普通汽油	15	700~750	6865~7355	空气	20	1.205	11.8

例 1-1 体积为  $5.2m^3$  的流体重量为  $32.9kN$ , 试求其重度和密度。

解 流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{32.9 \times 10^3}{5.2} = 6.32 \times 10^3 \text{ N/m}^3$$

流体的密度为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{6.32 \times 10^3}{9.81} = 644 \text{ kg/m}^3$$

## 二、流体的压缩性和膨胀性

当流体所受的压力增大时, 其体积将缩小, 密度将增大, 这种性质称为压缩性或体积弹性。

流体压缩性的大小, 一般用压缩系数  $\beta$  来表示。压缩系数是指单位压强所引起的体积相对变化量, 即

$$\beta = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp} \text{ Pa}^{-1} \quad (1-4)$$

式中  $V_0$ ——受压缩前的流体体积,  $m^3$ ;

$dp$ ——压强变化值, Pa;

$dV$ ——压强增大  $dp$  时流体体积的变化值,  $m^3$ 。

公式中等号右边的负号, 表示  $dV$  与  $dp$  的变化相反。水的压缩系数  $\beta$  值列于表1-2中。

假定压强由  $p_0$  变化到  $p$ , 体积由  $V_0$  变化到  $V$ , 则由 (1-4) 式可得:

TD44  
S-767

$$V = V_0[1 - \beta(p - p_0)] \quad (1-4a)$$

也可以写出流体密度随压强的变化关系:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta(p - p_0)} \quad (1-5)$$

式中  $\rho_0$ ——压强为  $p_0$  时的流体密度;  
 $\rho$ ——压强为  $p$  时的流体密度。

流体力学中还常用压缩系数的倒数, 即体积弹性系数  $E$  来表示其压缩性:

$$E = \frac{1}{\beta} = -V_0 \frac{dp}{dV} \text{ Pa} \quad (1-6)$$

由上式可知, 体积弹性系数  $E$  越大, 则流体的压缩性越小, 即越不容易被压缩。

表 1-2 水的压缩系数(0℃时) $\text{m}^2/\text{N}$

压强(大气压)	5	10	20	40	80
$\beta$	$0.538 \times 10^{-9}$	$0.536 \times 10^{-9}$	$0.531 \times 10^{-9}$	$0.528 \times 10^{-9}$	$0.515 \times 10^{-9}$

一般, 水的体积弹性系数  $E = 2.1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ , 液压油的体积弹性系数  $E = (1.4 \sim 2.0) \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 。由于液体的压缩系数很小, 即弹性系数很大, 所以只有在研究诸如水锤等现象时不得不考虑其压缩性之外, 通常均把液体看成是不可压缩流体。

气体的体积随压强和温度的变化是非常明显的, 故称为可压缩流体。若在一定容器内气体的质量不变, 则两个稳定状态之间的参数关系, 可由理想气体状态方程确定

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-7)$$

或写成

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-8)$$

式中  $p_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$  及  $\rho_1$  分别为气体状态变化前的压强、体积、绝对温度和密度;  $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$  及  $\rho_2$  分别为其变化后的相应值。但气体在流动过程中, 若流速不大 (不超过  $70 \sim 100 \text{m/s}$ ), 压强不超过  $9.8 \times 10^5 \text{Pa}$ , 例如矿井通风中的空气流, 其密度变化极小, 也可看做是不可压缩流体。

流体因温度升高会使原有的体积增大, 这种性质称为流体的热膨胀性。热膨胀性的大小用热膨胀系数  $\alpha$  来表示, 热膨胀系数是指单位温度所引起的体积相对变化量, 即

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} \quad 1/\text{K} \text{ 或 } 1/^\circ\text{C} \quad (1-9)$$

式中  $V_0$ ——初温度  $T^\circ\text{K}$  时的流体体积,  $\text{m}^3$ ;

$dT$ ——温度变化值,  $\text{K}$  或  $^\circ\text{C}$ ;

$dV$ ——温度变化  $dT$  时流体体积的变化值,  $\text{m}^3$ 。

若假定流体温度由  $t_0$  升高到  $t$ , 其体积由  $V_0$  膨胀到  $V$ , 则由 (1-9) 式可得:

$$V = V_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (1-9a)$$

由上式同样也可以写出流体密度随温度的变化关系:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha(t - t_0)} \quad (1-10)$$

式中  $\rho_0$ ——温度为  $t_0$  时的流体密度；

$\rho$ ——温度为  $t$  时的流体密度。

水的热膨胀系数也很小，其它液体也有类似的特性。因而，除非温度变化很大时，才予以考虑，一般工程计算中可忽略不计，对于常用的油液，其随比重而变的热膨胀系数列于表1-3中。

表 1-3 随油液比重而变的热膨胀系数

15℃的比重	0.70	0.80	0.85	0.90	0.92
$\alpha$	$8.2 \times 10^{-4}$	$7.7 \times 10^{-4}$	$7.2 \times 10^{-4}$	$6.4 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$

例1-2 某柱塞液压缸，其直径为100mm，长为400mm，现在的工作状况是柱塞位于距行程终点50mm处，若温度由20℃上升至80℃时，问其体积增大若干？已知油液的热膨胀系数  $\alpha = 7.2 \times 10^{-4} / \text{℃}$ 。

解 现在工况下油液的体积为：

$$V_0 = \frac{\pi}{4} D^2 l = \frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \times (0.4 - 0.05) = 0.00274 \text{ m}^3$$

增大的油液体积由式 (1-9 a) 为

$$\begin{aligned} V - V_0 &= \alpha V_0 (t - t_0) \\ &= 7.2 \times 10^{-4} \times 0.00274 (80 - 20) \\ &= 1.18 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \\ &= 118 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

### 三、粘性

一切实际流体都是有粘性的，然而流体的粘性是在流动中呈现出来的。流体由静止开始流动，是在其内部产生剪切力，形成剪切变形，以使静止状态受到破坏的结果。

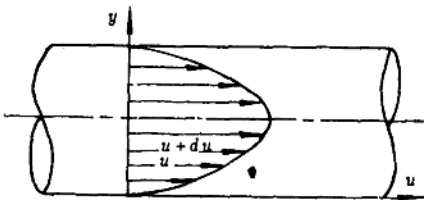


图 1-1 流体的粘性作用

粘性是流体阻止其发生剪切变形的一种特性。当相邻的流体层有相对移动时，各层之间因具有粘性而产生摩擦力（或剪切力）。剪切力使流体摩擦而生热，流体的机械能部分地转化为热能而损失掉。所以，运动流体的机械能总是沿程减少的。

为了说明流体的粘性，我们先观察流体在管中的流动，见图1-1。当流体在管中缓慢流动时，紧贴管壁的流体质点粘附在管壁上，因而流速为零。相反，位于管轴线上的流体质点流速最大。而介乎其间的流体质点（或流体层）各具有不同的流速，将它们的流速矢量顶点连接起来，即成为流速分布曲线，如图1-1所示。

内摩擦力  $T$  的大小，经实验证明与两层之间的速度差  $du$  及流层接触面积  $A$  的大小成正

比，而与流层间的距离  $dy$  成反比。并且与流体的种类和压力的大小无关。  
内摩擦力的数学表达式为

$$T \propto A \frac{du}{dy}$$

或 
$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad \text{N} \quad (1-11)$$

这就是牛顿内摩擦定律。若令  $\tau$  表示单位面积上的内摩擦力，或称切应力，则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 即为常用的粘性力计算式。式中  $\mu$  为比例系数，它决定于流体的种类和温度，通常称为动力粘性系数，或动力粘度。而  $\frac{du}{dy}$  表示沿法线方向的速度增量，称为速度梯度。由式 (1-12) 可见，动力粘度系指速度梯度为 1 时的流体层单位面积上的内摩擦力。动力粘度的单位为  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  即  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

在流体力学的运算中，经常出现比值  $\frac{\mu}{\rho}$ ，其因次为  $L^2T^{-1}$ ，它只有运动学要素，所以将此比值称为运动粘性系数或运动粘度，以  $\nu$  表示之

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-13)$$

运动粘度的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ ，运动粘度更能说明流体流动的难易程度。运动粘度愈大，反映流体质点相互牵制的作用愈显著，则流动性愈小，反之运动粘度愈小，则流动性愈大。现将水和空气的粘性系数列表如下。

表 1-4 水和空气的粘性系数

水			空 气			水			空 气		
$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu$ $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu$ $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu$ $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu$ $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$
0	1.792	1.792	0	0.0172	13.7	30	0.801	0.804	60	0.0201	19.6
5	1.519	1.519	10	0.0178	14.7	50	0.549	0.556	80	0.0210	21.7
10	1.308	1.308	20	0.0183	15.7	70	0.406	0.415	100	0.0218	23.6
15	1.140	1.140	30	0.0187	16.6	90	0.317	0.328	140	0.0236	28.5
20	1.005	1.007	40	0.0192	17.6	100	0.284	0.296	180	0.0251	33.2

粘度的测定可采用不同形式的仪器，其中最常用的是恩氏粘度计。利用这种仪器，可测出在指定温度时，使  $200\text{cm}^3$  的被试液体在自重作用下，从圆筒中通过直径  $2.8\text{mm}$  的小孔流出所需的时间  $t$  (s)。然后再用同样方法，测出同样体积  $20^\circ\text{C}$  蒸馏水通过小孔流出所需的时间  $t_w$  (平均值为  $51\text{s}$ )，则  $t$  与  $t_w$  的比值即称为恩氏粘度，用符号  $^\circ E$  表示

$$^\circ E = \frac{t}{t_w} \quad (1-14)$$

一般被测液体的指定温度取为  $50^\circ\text{C}$ ，并以  $^\circ E_{50}$  表示之。

739909

已知液体的恩氏粘度，即可用下列经验公式计算其运动粘度

$$\nu = \left( 0.0731^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} \right) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad (1-15)$$

例1-3 某液压油的密度为 $890 \text{ kg/m}^3$ ，用恩氏粘度计测得其在 $20^{\circ}\text{C}$ 时 $200 \text{ cm}^3$ 体积从小孔流尽的时间 $t = 450 \text{ s}$ ，试计算液压油 $20^{\circ}\text{C}$ 时的动力粘度。

$$\text{解 } ^{\circ}E_{20} = \frac{t}{t_w} = \frac{450}{51} = 8.82$$

由(1-15)式

$$\begin{aligned} \nu_{20} &= \left( 0.0731^{\circ}E_{20} - \frac{0.0631}{^{\circ}E_{20}} \right) \times 10^{-4} \\ &= \left( 0.0731 \times 8.82 - \frac{0.0631}{8.82} \right) \times 10^{-4} \\ &= 6.37 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

于是动力粘度

$$\begin{aligned} \mu_{20} &= \rho \nu_{20} = 890 \times 6.37 \times 10^{-5} \\ &= 566.9 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

流体的粘度与压强的大小几乎无关，仅在高压系统中，流体的粘度稍有增加。因此，一般可不考虑压强对粘度的影响。流体的粘度随温度的变化较大。但温度对气体和液体的粘度有不同的影响。气体分子内聚力较小，而分子运动较剧烈，粘性主要取决于流层间分子的动量交换。所以，当温度升高时，气体分子运动加剧，其粘度增大。液体的情况则与此相反，其粘性决定于分子的内聚力，而当温度升高时，液体分子的内聚力减小，所以其粘度降低。这一点可从表1-4中的数据看出。

在流体力学中，有牛顿流体与非牛顿流体之称。牛顿流体是指切应力与速度梯度的关系符合牛顿内摩擦定律的流体，如水、空气及机油类等低分子的流体。不符合牛顿内摩擦定律的流体，如塑性流体，称为非牛顿流体。本书将只限于讨论牛顿流体。

#### 四、表面张力

液体表面，包括液体与他种流体或固体的接触表面，存在着一种力图使液体表面积收缩为最小的力，称为表面张力。

在液体表面上，沿着力图使表面收缩为最小的方向，其单位长度上所受的张力，称为表面张力系数，以 $\sigma$ 表示。

表面张力是由液体分子的内聚力引起的，表面张力并不发生在处于平衡状态的平面上，而是发生在曲面上，因在曲面上表面张力才产生附加压力以维持其平衡。液体表面的曲率愈大，表面张力就愈大。

由于表面张力的作用，如将细玻璃管竖立在液体中，液体就会在细管中上升或下降，称此为毛细管现象。在工程实际中，有时需要消除测量仪器中因毛细管现象使液面升降所造成的误差。能湿润管壁的液体，如水等，其误差是正的，而不能湿润管壁的液体如水银，其误差是负的，如图1-2 a、b所示。

当气温为 $20^{\circ}\text{C}$ 时，水在细玻璃管中上升的高度为

$$h = 29.8/d \text{ mm} \quad (1-16)$$



水银在细玻璃管中下降的高度为

$$h = 10.15/d \text{ mm} \quad (1-16')$$

式中  $d$  为细玻璃管的内径, mm。

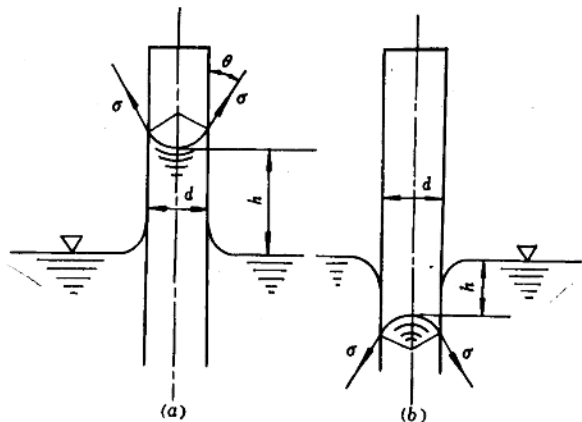


图 1-2 毛细管现象

## 第二节 作用于流体上的力

作用于流体上的力包括质量力和表面力两大类。

### 一、质量力

质量力是指作用在流体每个质点上的力,其大小与流体的质量成正比。常见的质量力有重力和各种惯性力(如直线加速运动时的直线惯性力和圆周运动时的离心力等)。

在流体力学中,常常使用单位质量的质量力的概念,若流体密度为 $\rho$ ,微元体积为 $dV$ ,则质量力在 $x, y, z$ 三个坐标轴上的分力为: $X\rho dV, Y\rho dV$ 及 $Z\rho dV$ 。其中 $X, Y$ 及 $Z$ 代表流体单位质量的质量力在 $x, y, z$ 轴上的分量。根据牛顿第二定律,这三个质量力分量就是加速度在三个坐标轴上的投影。所以流体单位质量的质量力也可称为质量力加速度。

### 二、表面力

表面力是指作用在流体表面上的力,其大小与受力表面的面积成正比。它包括有表面切向力(摩擦力)和法向力(压力)。它可以是周围流体对所考虑流体作用的摩擦力和压力,也可以是固体壁面对流体作用而产生的摩擦力和压力。对于理想流体,无论是静止或处于运动状态,都不存在粘性力引起的内摩擦力,所以切向力为零,这时,表面力只有法向的压力。

## 学 习 指 导

1. 本章作为学习本课程的基础知识,主要内容有:(1)流体力学的定义、流体力学的研究对象及其学习方法;(2)流体的主要物理性质,包括密度和重度、压缩性和膨胀性、粘性以及表面张力等;(3)作用于流体上的力的概念。
2. 流体的第一个物理性质就是它具有质量和重量,从而引出密度和重度的概念。读者要注意掌握

密度与重度的计算和所用单位以及其换算方法。

3. 流体的第二个物理性质就是压缩性和膨胀性, 注意表示压缩性和膨胀性大小的压缩系数  $\beta$  和膨胀系数  $\alpha$  的定义, 从而掌握当压力和温度改变时流体体积和密度的计算方法。

4. 流体的粘性是流体力学中很重要的一个物理性质。牛顿内摩擦定律揭示了流体的粘性以及内摩擦力和速度梯度之间的内在联系。学习当中, 要掌握粘度的测定和计算方法。

5. 表面张力是液体存在的一种力图使其表面收缩为最小的力。由于表面张力的作用, 出现有毛细管现象。为寻找毛细管现象造成的误差, 可用式 (1-16) 及 (1-16') 计算。

6. 作用于流体上的力分为质量力和表面力两大类, 单位质量的质量力有在三个坐标轴上的分力。表面力有切向力与法向力之分。

### 思考题及习题

1.1 流体与固体不同的特性是什么? 流体之中液体与气体又有何不同的特性?

1.2 流体的密度与重度有何联系? 它们各与流体所处的地理位置有何关系? 重度与比重有何本质不同?

1.3 什么是流体的压缩性和膨胀性? 压缩性和膨胀性对流体的密度有何影响?

1.4 什么是流体的粘性? 牛顿内摩擦定律的含义是什么? 动力粘度和运动粘度有何区别和联系? 它们当中哪一个更能说明流体的流动性?

1.5 何谓毛细管现象? 水和水银在细玻璃管中上升和下降的高度如何计算?

1.6 体积为  $80\text{ l}$  的容器装满了油, 油的重量为  $670\text{ N}$ , 试求油的重度  $\gamma$ 、密度  $\rho$  和比重  $s$ 。

1.7 某流体的密度  $\rho = 900\text{ kg/m}^3$ , 试求其重度和比重。

1.8 试计算对于  $10^\circ\text{C}$  的水加多大的压力, 其体积能减小  $0.2\%$ 。已知  $10^\circ\text{C}$  的水在  $4.05 \times 10^3\text{ kPa}$  压力下的体积压缩系数  $\beta = 4.854 \times 10^{-10}$ 。

1.9 当压强增量  $dp = 400000\text{ N/m}^2$  时, 某液压油的密度相对增大  $\frac{dp}{\rho} = 0.02\%$ , 试求该液压油的体积弹性系数。

1.10 由恩氏粘度计测得液压油的粘度  $^\circ E = 4.6$ , 已知该液压油的密度  $\rho = 890\text{ kg/m}^3$ , 试求其动力粘度。

1.11 两平行平板间距  $\delta = 0.6\text{ mm}$ , 两板间充满密度  $\rho = 850\text{ kg/m}^3$  的液体。下板固定不动, 上板以  $u = 0.27\text{ m/s}$  的速度平移而产生  $\tau = 2.2\text{ N/m}^2$  的切应力。试求该液体的动力粘度和运动粘度。

1.12 有一  $0.6 \times 0.4$  的平板在油面上作水平运动, 如图 1-3 所示, 平板与固定底面距离  $\delta = 1\text{ mm}$ , 油的动力粘度  $\mu = 1.2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 若板的运动速度  $u = 1.1\text{ m/s}$ , 由平板带油的油的速度成直线分布, 试求平板所受的阻力。

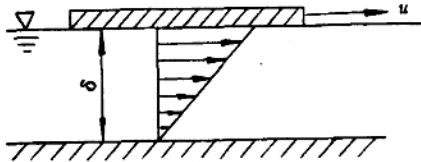


图 1-3 平板带油运动

1.13 将内径  $d = 8\text{ mm}$  的玻璃管分别垂直插入  $20^\circ\text{C}$  的水和水银中, 问由于毛细管作用水面上升和水银面下降各多少毫米?

1.14 采用细玻璃管测量水及水银的水位, 若规定允许误差  $h \leq 1\text{ mm}$ , 试确定细玻璃管内径  $d$  不得小于多少?

## 第二章 流体静力学

流体静力学是流体力学的一个部分，它是研究流体处于静止（平衡）或相对静止时的力学规律以及这些规律在工程上的应用。

由于流体静止时各质点间没有相对运动，因此流体的粘度表现不出来，即切应力等于零。所以流体静力学无论是理想流体还是对实际的粘性流体，其所得结论定会相同。

### 第一节 流体静压强及其特性

在静止或相对静止的流体中，单位面积上的内法向表面力称为静压强，它是流体力学中最常用的并且是最重要的物理量之一。

流体静压强具有两个重要特性：

特性一 流体静压强永远垂直于作用面，并指向该面的内法线方向。

如图2-1所示，从静止流体中取出某一体积的流体，假若作用面 $AB$ 上某处的应力 $p'$ 的方向不垂直于该面，则 $p'$ 必可分为法向应力 $p_n$ 与切向应力 $\tau$ 。既有了切向应力 $\tau$ ，则会使流体流动，显然这与静止流体的假设前提不符，所以只能是 $\tau$ 等于零，即 $p'$ 必定垂直于 $AB$ 面。此外，由于流体分子间的引力较小，不能承受拉力，因此 $p'$ 的方向只能是沿着作用面 $AB$ 的内法线方向（如图中 $p$ 所指）。

特性二 静止流体中任一点的静压强，与作用的方位无关，即任意点处各方向的静压强均相等。

为证明这一特性，在静止流体中取出一微小四面体 $OABC$ （图2-2），与坐标轴重合的边长各为 $dx$ ， $dy$ ， $dz$ 。根据特性一知，静止流体对微小四面体各面的压强 $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$ 及 $p_n$ 分别作用于各面的内法线方向。则相应地作用于各面上的表面力为

$$\begin{aligned} p_x \frac{1}{2} dy dz, & \quad p_y \frac{1}{2} dx dz, \\ p_z \frac{1}{2} dx dy, & \quad p_n dA \end{aligned}$$

式中 $dA$ 为斜面 $ABC$ 的面积。

设 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 分别为单位质量的质量力在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴向的分力， $\rho$ 代表四面体的密度，按着力的平衡条件，写出 $x$ 轴向的平衡方程为

$$p_x \frac{1}{2} dy dz - p_n dA \cos(n, x) + X \rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0$$

由于

$$dA \cos(n, x) = \frac{1}{2} dy dz$$

上式变为