

高等学校教学用书

流体力学及流体机械

白铭声 王维新 陈祖苏 编

煤炭工业出版社

高等学校教学用书

流体力学及流体机械

白铭声 王维新 陈祖苏 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

全书共分三篇，第一篇为流体力学，其中包括流体静力学、流体动力学基础、相似理论及因次分析方法、流体的流动阻力及水头损失、孔口和管咀出流、薄壁堰的流量计算、缝隙流等内容；第二篇为通风和排水机械，第三篇为空气压缩机，在这两篇中包括工作理论、调节、构造、附属设备、选型计算以及在运转中保持这些机械性能的途径和措施。此外，除个别章节外都附有思考题和习题，以供参考。

本书可作为煤炭高等院校煤矿机械专业教材，也可供其它专业师生和工程技术人员参考。

高等学校教学用书
流体力学及流体机械
白铭声 王维新 陈祖苏 编

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16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 $787 \times 1092^{1/4}$ 印张 $20^{1/4}$
字数481千字 印数1—11,900
1980年5月第1版 1980年5月第1次印刷
书号15035·2267 定价2.10元

单位与符号对照表

秒	s	摄氏温度	℃
分	min	绝对温度	K
时	h	千 卡	kcal
年	y	水银柱	Hg
达 因	dn	水 柱	WG
克	g	绝对气压	ata
毫 克	mg	相对气压	atg
公 斤	kg	泡	st
吨	t	泊	P
米	m	千 瓦	kW
厘 米	cm	马 力	HP
毫 米	mm	转/分	r.p.m.
升	l	分 贝	dB
弧 度	rad		

目 录

第一篇 流体力学

第一章 绪论	1
§ 1 流体力学及学习流体力学的目的	1
§ 2 流体力学的理论基础	1
§ 3 流体的主要物理性质	1
§ 4 作用在流体上的力	8
思考题及习题	9
第二章 流体静力学	10
§ 1 流体静压力及其特性	10
§ 2 流体平衡微分方程式	12
§ 3 水静力学基本方程式	13
§ 4 巴斯加定律及其应用	15
§ 5 等压面	17
§ 6 连通器中液体的平衡	17
§ 7 绝对压力、相对压力及真空度	19
§ 8 液柱高度与静水压力、测压管水头	21
§ 9 测量压力的仪表	23
§ 10 运动容器中液体的平衡	26
§ 11 静止液体对壁面上的总压力	30
思考题及习题	34
第三章 流体动力学基础	37
§ 1 流体运动要素及研究流体运动的方法	37
§ 2 流体流动的几个基本概念	37
§ 3 流动的连续性方程式	40
§ 4 理想流体运动的微分方程式	41
§ 5 理想流体运动微分方程的伯诺里积分	42
§ 6 理想流体微小流束的伯诺里方程式	43
§ 7 伯诺里方程式的物理意义及几何意义	45
§ 8 实际流体微小流束的伯诺里方程式	47
§ 9 实际流体总流的伯诺里方程式	48
§ 10 伯诺里方程式的应用例	49
§ 11 稳定流的动量方程式	53
思考题及习题	56
第四章 相似理论及因次分析方法	59
§ 1 相似条件	59
§ 2 相似准则	60

§ 3	因次和谐的意义	64
§ 4	布金汉定理(π 定理)	65
第五章	流体的流动阻力及水头损失	67
§ 1	流体流动的两种状态	67
§ 2	管内层流运动及其沿程损失	71
§ 3	管内紊流运动及其沿程损失	74
§ 4	沿程阻力系数的计算	76
§ 5	管内局部阻力损失计算	81
	思考题及习题	89
第六章	孔口和管咀出流	90
§ 1	薄壁孔口的稳定出流	90
§ 2	管咀的稳定出流	93
§ 3	自由射流和淹没射流	94
	习 题	97
第七章	有压管路的水力计算	98
§ 1	简单管路	98
§ 2	复杂管路	102
	习 题	105
第八章	薄壁堰的流量计算	106
§ 1	矩形薄壁堰	106
§ 2	三角形薄壁堰	107
第九章	缝隙流	109
§ 1	流经平行平面缝隙的流量计算	109
§ 2	流经环形缝隙的流量计算	111
§ 3	层流起始段的影响	113
§ 4	流经环形平面缝隙的流量计算	115
	第二篇 通风和排水机械	
第一章	概述	117
§ 1	通风和排水机械在煤矿生产中的作用	117
§ 2	涡轮机动作原理	118
§ 3	管网压头特性及等积孔	120
	思考题	122
第二章	涡轮机工作理论	123
§ 1	涡轮机理论压头特性	123
§ 2	涡轮机个别特性曲线及工况	129
§ 3	涡轮机相似原理	131
	思考题及习题	139
第三章	排水设备	140
§ 1	矿井排水	140
§ 2	离心泵在管路上工作	141
§ 3	离心泵联合工作	145
§ 4	离心泵调节	147

§ 5 水泵构造	150
§ 6 保持设备运转性能的途径和措施	160
§ 7 水泵性能测定	170
§ 8 排水设备	177
§ 9 排水设备选择计算	181
思考题及习题	189
附 I 平衡盘计算	190
第四章 通风设备	194
§ 1 矿井通风	194
§ 2 通风机在网路上工作	195
§ 3 通风机联合工作	197
§ 4 通风机调节	199
§ 5 通风机构造	203
§ 6 通风机设备	209
§ 7 风机性能测定	218
§ 8 通风机选择计算	223
思考题及习题	227
附 II 轴流式通风机理论	228

第三篇 空气压缩机

第一章 概述	243
§ 1 矿山压缩空气设备的组成部分	243
§ 2 往复式空压机的动作原理	244
第二章 往复式空压机的工作理论	245
§ 1 空压机的工作参数	245
§ 2 往复式空压机的理论工作循环	245
§ 3 往复式空压机的实际工作循环	249
§ 4 保持空压机工作性能的途径	250
§ 5 空压机的指示功率、轴功率和工作效率	257
§ 6 两级压缩	260
思考题及习题	264
第三章 矿用主要空压机的型式、构造及附属装置	266
§ 1 L型空压机	266
§ 2 其它型式空压机	289
思考题	298
第四章 空压机工作测定	299
§ 1 空压机排气量的测定	299
§ 2 输气管网漏气量的测定	305
§ 3 空压机示功图的测定	305
第五章 空压机设备选型计算	309
§ 1 原则与要求	309
§ 2 选择空压机型式和台数	309
§ 3 选择输气管道	310

§ 4 空压机站及其布置	311
§ 5 空压机选型设计例题	312
思考题及习题	313
参考文献	316

第一篇 流体力学

第一章 绪论

§1 流体力学及学习流体力学的目的

流体力学是力学的一个分支。流体力学主要是研究流体的平衡、运动以及与固体相互作用的科学。流体包括液体和气体，因此，流体力学又可分为液体力学和气体力学。液体力学通常以水作为液体的代表，故通称水力学。水力学的內容主要是论述液体，而不研究气体，但是，当气体的流速、压力不大，比容变化不多，压缩性的影响可略去不计时（如通风机中的气流），液体的各种规律对于气体也是适用的。

水力学是一门应用较广的学科，如水力机械、城市给水与排水、排水灌溉、海港水运以及输油等方面都离不开水力学。在煤矿生产中的矿井通风、排水、水力采煤、水力运输、水力充填、风力充填以及重力选煤的理论基础都是水力学。特别近年来采掘机械化和综合机械化的大力发展，液压技术在采煤机、支护以及装载运输机械上的大量应用，水力学作为基础理论在煤矿机械化专业领域的作用更显得突出。

本专业学习流体力学的目的主要是为后续课程——流体机械、液压传动打下理论基础。为此，这里所提的流体力学在内容上实际就是水力学。

§2 流体力学的理论基础

流体力学属于力学范畴，它与力学的其它分支一样，是以物理学和理论力学的一些定律为依据，也就是在万有引力定律、牛顿三定律、质量和能量守恒定律等的基础上，广泛应用数学分析和实验资料来研究流体平衡和运动的规律，并运用这些规律解决实际问题。

流体力学所研究的运动，仅限于由外部原因而引起的机械运动，对于流体内部的分子运动不予以考虑。即把流体看作是由无穷多个连续分布的微小流体团组成的连续介质，这种微小流体团称为流体质点。连续介质中质点与质点间没有空隙，质点本身的几何尺寸相对于流体空间或流体中的固体而言可以忽略不计，并设质点是均质地分布在连续介质之中。

流体既被看作是连续介质，因而反映流体质点运动特性的各种物理量（如速度、密度、压力等）也应该是空间座标的连续函数。这样就可以用数学解析方法来分析流体平衡和运动的规律。这种研究流体力学的方法称为无限微量法。除此之外，研究流体力学的方法还有：有限容积法、相似法、因次分析法和实验法。在学习流体力学基础理论的同时，也要注意学习它的研究方法。

§3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流体平衡和运动规律的内在原因。因此，首先对它必须有一个

清晰的了解。这里仅就与流体平衡和运动规律有关的物理性质加以说明。

一、惯 性

惯性是物体所具有的反抗改变原有运动状态的物理性质，它主要取决于质量。对于各种不同流体，即使其体积相同，质量也是不同的，如 1m^3 的水、 1m^3 的油和 1m^3 的水银，其质量显然不同。为了表明某种流体的惯性，一般均采用单位体积的质量来表示，称它为密度，以 ρ 表示，则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \quad (1-1)$$

式中 m —— 均质流体的质量， $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ；

V —— 该均质流体的体积， m^3 。

地球表面上的一切流体都是处在地心引力的作用之下，因此，具有质量的流体也必具有重量。由于重量易于称量，在流体力学中又多引用单位体积流体的重量，即比重来表示上述特征。设以 γ 表示比重，则

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

式中 G —— 均质流体的重量， kg ；

V —— 该均质流体的体积， m^3 。

从(1-1)、(1-2)式，并考虑运动定律 $G = mg$ ，得密度与比重的关系式如下：

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \quad (1-3)$$

式中 g —— 重力加速度，一般取 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

在一个大气压力下测定的几种流体的密度和比重列于表1-1。

几 种 流 体 的 密 度 和 比 重

表 1-1

流 体 名 称	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	密 度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)	比 重 (kg/m^3)
清 水	4	101.97	1000
海 水	15	103.98~105.00	1020~1030
煤矿井下水	15	107.14 (平均)	1050 (平均)
普通汽油	15	71.36~76.45	700~750
柴 油	15	89.3	875
润 滑 油	15	90.7~93.8	890~920
液 压 油	15	88~92	860~900
酒 精	15	80.5~81.6	790~800
水 银	0	1386	13600
空 气	20	0.12	1.183

液体（水、液压油）的密度和比重都随压力和温度的变化而变化：若压力加大则体积缩小，而密度和比重却增大；若温度升高则体积膨胀，而密度和比重却减小。但由于这些变化值很小，一般可以忽略不计。如果必须考虑时，可用下列公式计算：

1. 在不同压力下（温度一定）的密度和比重为：

$$\rho_p = \frac{\rho_0}{1 - \beta(p - p_0)} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4 \quad (1-4)$$

$$\gamma_p = \frac{\gamma_0}{1 - \beta(p - p_0)} \quad \text{kg} / \text{m}^3 \quad (1-5)$$

式中 ρ_0 、 γ_0 ——液体在压力为 p_0 (初始压力) 时的密度和比重, 一般均取 $p_0 = 1$ 大气压力 (kg/cm^2);

ρ_p 、 γ_p ——液体在压力为 p 时的密度和比重;

β ——该液体的压缩率 (详见 § 3. 二、1.)。

2. 在不同温度下 (压力一定) 的密度和比重为:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t(t - t_0)} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4 \quad (1-6)$$

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_t(t - t_0)} \quad \text{kg} / \text{m}^3 \quad (1-7)$$

式中 ρ_0 、 γ_0 ——液体在温度为 t_0 (初始温度) 时的密度和比重, 一般取 $t_0 = 15^\circ\text{C}$;

ρ_t 、 γ_t ——液体在温度为 t 时的密度和比重;

β_t ——该液体的热膨胀系数 (详见 § 3. 二、2.)。

〔例题 1〕已知水在 4°C 时的比重为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 求水在该温度时的密度。

解: 根据 (1-3) 式,

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000}{9.8} = 102 \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$$

二、压缩性和膨胀性

1. 压缩性 流体分子间有一定的间隙, 作用在流体上的压力增加时, 其分子间的距离缩短, 因而流体体积减小, 密度增加, 这种性质称为流体的可压缩性。液体可压缩性的大小一般可用压缩率表示, 即当温度不变时, 压力增加一个单位 ($1 \text{ kg}/\text{cm}^2$), 其体积的相对变化。如以 β 表示压缩率, 则

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad \text{cm}^2 / \text{kg} \quad (1-8)$$

其平均值

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{V - V_0}{p - p_0} \right) \quad \text{cm}^2 / \text{kg} \quad (1-9)$$

式中 p 、 p_0 ——压力, kg/cm^2 ;

V 、 V_0 ——压力为 p 和 p_0 时的液体体积, cm^3 ;

dV ——压力增到 $p + dp$ 时的液体体积减少量, cm^3 ;

dp ——压力增量, kg/cm^2 。

由于希望 β 为正值, 而当压力增加 dp 时, 体积总是减少 dV 为负值, 所以在式的右边加一负号。

处于压缩状态下的液体产生一种向外膨胀的力, 这种力可以被看成是一种弹性力。液体弹性力的大小用弹性系数表示, 弹性系数是压缩率的倒数, 以 “ E_0 ” 表示, 则:

$$E_0 = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (1-10)$$

在液压支架的计算中, 往往需要将钢管的变形一并考虑, 即引用表现体积弹性系数 E_e 的概念:

$$\frac{1}{E_e} = \frac{1}{E_0} + \frac{d}{E\delta} \quad \text{cm}^2/\text{kg} \quad (1-11)$$

式中 d —— 钢管内径, cm;

δ —— 钢管壁厚, cm;

E —— 管材的弹性系数, kg/cm², 一般钢管 $E \approx 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。

由于常用钢管的 $d/\delta = 6.1 \sim 13.2$, 代入 (1-11) 式, 得:

$$\frac{1}{E_e} = \frac{1}{E_0} + \frac{13.2}{2.1 \times 10^6}$$

或

$$E_e \approx 0.909 E_0$$

液体的压缩率是非常小的, 例如水的压缩率. 当压力由 1~500 大气压力时, 其平均值 $\beta = 4.75 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$; 压力由 1000~1500 大气压力时, 其平均值 $\beta = 3.58 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 。常用液压油的压缩率 $\beta = (5 \sim 7) 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 。为此在工程的许多问题中可以把液体当作不可压缩的, 但是在某些特殊问题, 如研究液体的振动、冲击时就不能不考虑。

如果把钢管的变形同液压油一并考虑, $E_e \approx 0.909 E_0$, 钢管变形对液压油体积弹性系数的影响也是不大的。

在工程计算中, 水的弹性系数一般取 $E_0 = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$; 液压油的弹性系数取 $E_0 = (1.43 \sim 2) 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 。

由于气体压缩性很大, 故称为可压缩流体。但对于流速低于 50~70 m/s 或者压力低于 0.1 kg/cm² 的气体, 如矿井通风一类问题, 也可以当作不可压缩流体对待, 以便于分析研究。

2. 膨胀性 当液体的温度发生变化时, 其体积发生相应变化的性质称为热膨胀性 (简称膨胀性)。膨胀性的大小可用膨胀系数度量。它是液体的温度每增高 1°C 时, 其体积的相对变化值, 以 β_t 表示, 则

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad 1/^\circ\text{C} \quad (1-12)$$

式中 dt —— 温度的增量; 其它符号意义同前。

当压力一定时, 温度变化后的液体体积 V 可用下列计算式求得:

$$V = V_0 \{1 + \beta_t(t - t_0)\} \quad \text{cm}^3 \quad (1-13)$$

式中 V_0 —— 温度为 t_0 (初始温度) 时的液体体积, cm³;

t —— 变化后的温度, °C。

液体的膨胀系数很小, 在一般工程计算中可以忽略不计。对于常用的液压油, 膨胀系数的大小也只认为取决于油液密度, 其值见表 1-2。

液 压 油 的 膨 胀 系 数

表 1-2

ρ_{15°	0.70	0.80	0.85	0.90	0.92
β_t	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

三、粘 性

液体对切力的抗阻很小，例如水从高处往低处流，这是由于高处的水在重力作用下，沿着水的表面有分力，这个分力对静止的水来说是切力。在水表面受切力的部位，静止状态就遭到破坏，水立即开始滑动，产生无限制的变形，这就是流动。不仅液体具有对切力抗阻很小的特性，气体同样具有这种特性，即流动性。液体的这种很小的切应力表示液体的另外一种物理性质，即液体的粘性。

粘性是液体运动时产生阻力的根源，当相邻质点（或层）有相对移动时，质点（或层）间所产生的摩擦力，就是由于液体有粘性的结果。这种摩擦力产生于液体内部，故称为内摩擦力。粘性存在于液体内部，即使在相对速度等于零的相对平衡情况下，粘性也存在，但是由于此时不存在相对运动，因而它不显示出来；液体发生相对运动时，粘性就使液体产生抵抗运动的应力，但是只要液体变形一停止，液体对于变形的抵抗也就同时消失。

不同种性质的液体，具有不同的粘性。譬如用木棍在几种不同流体中搅动，会感到不同阻力，这表明它们的粘性不同。搅动液压油很费劲，而搅动水则差一些，这说明液压油的粘性比水大。

为了进一步掌握液体粘性的本质，可就图1-1加以研究。图中I和II为平行着的两块平板，其间充满液体。若II板固定，而I板以某一等速 v 向右移动，这时由于液体附着力的作用，直接与I板相接触的液体层将有同I板相同的速度 v 而移动，紧靠II板的液体层则不动。但中间各层液体由于其质点间内摩擦力（切力）的作用，层层之间互相影响，相沿的滑动着。流速较快的液体层对相邻流速较慢的液体层有一个加速作用。也就是说在两层流速不同的液体层之间，粘性引起的内摩擦力是成对出现的，一使快的减速，另一是使慢的加速。

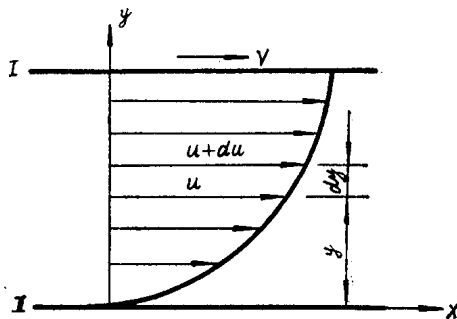


图 1-1 液体层流流速分布图

经过实验得知，两板间各层液体速度的变化如图1-1所示，各层间产生的内摩擦力 T 与接触面积 A ，相对速度差 du 成正比，而与垂直距离 dy 成反比，即 $T \propto A \frac{du}{dy}$ 。如乘以比例系数 μ ，则

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad \text{kg} \quad (1-14)$$

令 τ 为单位面积上的内摩擦力，即内摩擦应力，

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad \text{kg/m}^2 \quad (1-15)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ ——速度在垂直该速度方向的变量，称为速度梯度，

“ $\pm$ ” ——为了使 T 或 τ 永远为正，当 $\frac{du}{dy}$ 为正时用“+”号，当 $\frac{du}{dy}$ 为负时则用“-”

号，

μ ——代表液体的一种性质，称为绝对粘度或动力粘度，即表示两层相距1m具有相对速度1m/s的相对滑动的液体，在其1m²的接触面上所发生的内摩擦力的大小。

由(1-15)式可得动力粘度的因次为

$$|\mu| = \left| \frac{T}{A} \frac{dy}{du} \right| = \left| \frac{\text{公斤(K)}}{\text{米}^2(\text{L}^2)} \cdot \frac{\text{米(L)}}{\text{米(L)/秒(T)}} \right| = \text{KTL}^{-2},$$

因此， μ 的工程单位为 $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，而物理单位为 $\text{dn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ ，简称“泊”(p)。因 $1\text{kg}=1000\text{g}=1000\times 980\text{dn}$ ，所以 $1\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 等于98p，或 $1\text{p}=0.01019\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ； $\frac{1}{100}\text{p}$ 称为厘泊(cp)。

在实际应用中还常出现 $\frac{\mu}{\rho}$ ，称为运动粘度，以 ν 表示，则

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

运动粘度的因次

$$|\nu| = \left| \frac{\mu}{\rho} \right| = \frac{\text{KTL}^{-2}}{\text{KT}^2\text{L}^{-4}} = \text{L}^2\text{T}^{-1},$$

因此， ν 的工程单位为 m^2/s ，而物理单位为 cm^2/s ，简称“沱”(st)。 $1\text{m}^2/\text{s}=10000\text{cm}^2/\text{s}$ （或st）， $\frac{1}{100}\text{st}$ 称为厘沱(cst)。

在液压系统计算及液压用油的牌号表示上多用运动粘度。一种机械油的号数就是以这种油在50℃时的运动粘度的平均值来标注的，例如20号机械油，指的就是这种油在50℃时的运动粘度平均值为20cst。

表1-3介绍几种常见流体的粘度。

几 种 常 见 流 体 的 粘 度

表 1-3

流 体 名 称	温 度 (℃)	动 力 粘 度 (cp)	运 动 粘 度 (cst)
水	20	1.005	1.007
20号机械油 (HJ-20)	50		17~23
30号机械油 (HJ-30)	50		27~33
22号汽轮机油 (Hu-22)	50		20~23
空 气	20	1.808×10^{-2}	15.01

流体的粘度随压力和温度的变化而变化,但在一般情况下,压力对液体粘度的影响很小,可以忽略不计。图1-2表示压力在760mmHg时,水和空气在不同温度下的运动粘度的变化情况。从图1-2中可以看出,水的运动粘度是随温度的升高而减小,而空气的运动粘度则随温度的升高而增大。这里因为引起液体粘性的主要原因是分子间的吸引力,当温度升高时,分子的吸引力减小,因而粘性亦减小;而引起气体粘性变化的主要原因是分子间的动量交换,当温度升高时,分子间的动量交换增加,因而粘性增大。

由于动力粘度和运动粘度难于直接测定,在工程上常采用另一种可以用仪器直接测量的粘度表示法,即相对粘度(或条件粘度)。各国采用的相对粘度单位有所不同,有的用赛氏粘度,有的用雷氏粘度,我国采用恩氏粘度。

恩氏粘度的测定法是利用恩氏粘度计,求出在一定温度下使 200cm^3 的试验液体在自重作用下从圆筒中经过直径2.8mm的小管流出所需的时间 t ,然后再求温度为 20°C 的 200cm^3 的水流经同一容器所需时间 t_B ,这两个时间的比值就是恩氏粘度,用符号 $^\circ\text{E}$ 表示,则

$$^\circ\text{E} = \frac{t}{t_B}$$

一般均以 50°C 为测量时的标准温度,记符号 $^\circ\text{E}_{50}$ 。从上式可以看出,恩氏粘度只是一个比值,没有因次。一般液压油用恩氏粘度表示在 $2.6 \sim 4.6^\circ\text{E}_{50}$ 范围内。

恩氏粘度 $^\circ\text{E}$ 与运动粘度 ν 之间的换算关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 0.0732\text{E} - \frac{0.0631}{\text{E}} \quad \text{st} \\ \text{E} &= 0.135\nu \times 10^2 \quad ^\circ\text{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

或

〔例题2〕 根据前面讲的知识和理论力学知识分别编写出动力粘度和运动粘度单位换算表。

换算结果列如下:

动力粘度单位换算表

表 1-4

泊 ($\text{dn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 = \text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$)	P ($\text{dn}\cdot\text{s}/100\text{cm}^2 = \text{g}/100\text{cm}\cdot\text{s}$)	厘泊 cP ($\text{dn}\cdot\text{s}/100\text{cm}^2 = \text{g}/100\text{cm}\cdot\text{s}$)	公斤(质)/米秒 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	公斤(力)秒/米 ² ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	磅(质)/英尺·秒 ($\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{s}$)
1	1×10^2	1×10^2	0.1	1.02×10^{-2}	6.72×10^{-2}
1×10^{-2}	1	1	1×10^{-3}	1.02×10^{-4}	6.72×10^{-4}
10	1×10^3	1×10^3	1	0.102	0.672
98	9800	9800	9.8	1	6.59

运 动 粘 度 单 位 换 算 表

表 1-5

施 (cm ² /s)	厘 施 (cm ² /100s)	米 ² /秒 (m ² /s)	英尺 ² /秒 (ft ² /s)
1	1 × 10 ²	1 × 10 ⁻⁴	1.076 × 10 ⁻³
1 × 10 ⁻²	1	1 × 10 ⁻⁶	1.076 × 10 ⁻⁵
1 × 10 ⁴	1 × 10 ⁶	1	10.76
0.26	25.81	2.58 × 10 ⁻⁵	1

四、表 面 张 力

液体分子间有内聚力（吸引力），而液体与气体交界的自由面上，各个方向上的内聚力不能达到平衡，从而产生了分子的内压力，液体在这种内压力作用下，有力图使自身体积缩为最小的趋势。同时液体表面内聚力作用的结果，自由表面似形成一层膜，其上受有张紧的力，即表面张力。单位长度上的表面张力以表面张力系数 α 表示，它的工程单位以 g/cm 或 mg/mm，物理单位以 dn/cm ($\approx 1/980$ g/cm) 量度之。液体表面张力系数随温度的上升而减小，几种液体在 20℃ 时的表面张力系数列于表 1-6 中，由表上可以看出，表面张力通常均很小。

表面张力系数 表 1-6

液 体 名 称	表面张力系数 (g/cm)
水	0.074
水 银	0.550
酒 精	0.022
液 压 油	0.02~0.04

液体与固体相接触时，其间有附着力存在。由于液体附着力大小的不同，有些液体就能“润湿”固体，如水、酒精能润湿玻璃，有些液体则不能，如水银。在液体内部的内聚力所引起的表面张力和液体与固体间的附着力作用下，使接触处的液体上升或下降，这种现象突出地表现在半径很小的管子中（通常称为毛细管），管内液面高于或低于管外液面的现象称为毛细管现象（图 1-3）。

水在 20℃ 时的上升高度可按下式计算，

$$h = \frac{29.8}{d} \text{ mm} \quad (1-18)$$

水银在 20℃ 时的下降高度为，

$$h = \frac{10.15}{d} \text{ mm} \quad (1-19)$$

式中 d —— 管子直径，mm。

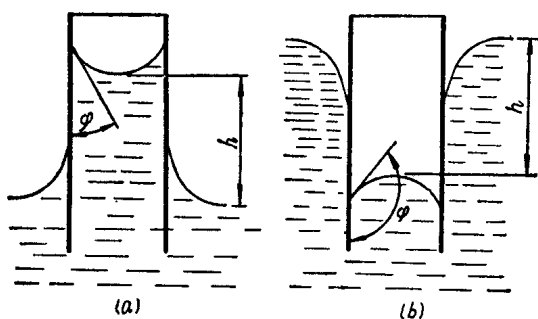


图 1-3 毛细管现象

(a) 润湿；(b) 不润湿

应该指出，气体无自由面，故表面张力是液体所特有的性质。

§ 4 作用在流体上的力

流体平衡或运动的规律除决定于其物理性质外，还与作用在流体上的力有密切关系。因此，要研究流体平衡和运动的规律，也必须先研究作用在流体上的力。作用在流体上的力有表面力和质量力两种。

表面力是作用在所考虑流体体积的表面上，它可以有表面切向力（摩擦力）和法向力（压力）。单位面积上的切向力称为剪切应力，单位面积上的法向力称为压应力。表面力可以是周围流体对被考虑的流体所作用的内摩擦力和内压力，也可以是固体壁面对流体的作用而产生的摩擦力和压力。

质量力是作用在被考虑流体的各质点上的力，它的大小与流体的质量成正比，故称为质量力。质量力主要有两种：一种是外界物质对流体的吸引力，如地心引力等；另一种是流体作加速运动时产生的惯性力，如作直线加速运动时的直线惯性力和作圆周运动时的向心加速度而产生的离心力等。在流体力学中为了表达方便起见常用单位质量的质量力来表示，因此它的单位与加速度相同。若以 m 代表流体的总质量， G 代表总质量力，则沿直角坐标的单位质量力分别以 X 、 Y 、 Z 表示，

$$X = \frac{G_x}{m}$$

$$Y = \frac{G_y}{m}$$

$$Z = \frac{G_z}{m}$$

若质量力只有重力时，则单位质量力即为重力加速度 g 在三个坐标轴上的投影。

思考题及习题

1.1 已知水在 4°C 时的比重为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，密度为 $101.97\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ （从表1-1查得）。那么，两者的数学关系如何？

1.2 油桶的容积为 0.6m^3 ， 510kg 的油可把油桶装满，求油的比重和密度。

1.3 从表1-3上我们发现水的运动粘度倒比空气的小了很多，为什么？这能说水的粘性比空气小吗？