

790513

3326

1020

高等学校教学用书

流体力学

王维新 编

煤炭工业出版社

6
20

790513

3326

1020

3326

1020

高等学校教学用书

流体力学

王维新 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、采矿工程等专业《流体力学》课程编写的教材。书中介绍了流体静力学、流体运动学、流体动力学的基本理论,包括管路损失、旋涡理论以及相似理论与实验观察方法等。每章之后附有若干思考题及习题,以便于深入地学习。本书除可作为高等院校教材使用之外,也可供工厂、矿山和设计研究部门的有关工程技术人员参考。

责任编辑:王 树 范

高 等 学 校 教 学 用 书

流 体 力 学

王 维 新 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 $787 \times 1092^{1/16}$

印张 $13^{1/2}$

字数319千字

印数1—8,900

1986年10月第1版

1986年10月第1次印刷

书号15035·2820 定价2.25元

前 言

本教材是根据“1981~1985年煤炭高等工科院校专业教材编写规划”编写的，供矿业机械、采矿工程等专业流体力学课程教学使用，亦可作为厂矿和设计研究部门有关工程技术人员参考书。

随着科学技术和煤炭工业的迅速发展，对煤炭高等工科院校所培养人才的质量要求，越来越高，从而对教学内容的改革与提高势在必行。

流体力学是矿业机械、采矿工程等专业的主要技术基础课，在教材内容的选取上，编者力求在打好理论基础的前提下，适当考虑了后续课流体力学机械、液压传动以及专业的需要。本课程学时一般在45~60左右，在使用中根据专业需要和学时数，对部分章节可作一些取舍。

本教材编写过程中，从对编写提纲的审查、讨论，直到评审征求意见，都得到兄弟院校老师的大力帮助，有的还作为讲义试用，提出不少宝贵意见，在此一并致以深切的谢意。

本教材在编写中也得到胡南强、殷生财等同志的帮助，对此也表示谢意。

由于编者水平有限，书中一定会有不妥和错误之处，诚恳希望各院校师生和各业读者批评指正。

编 者

1984年9月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 流体力学及学习流体力学的目的	1
§ 1-2 流体的主要物理性质	1
§ 1-3 流体的连续介质模型	16
§ 1-4 作用在流体上的力	17
思考题及习题	18
第二章 流体静力学	19
§ 2-1 流体静压力及其特性	19
§ 2-2 流体的平衡微分方程式	21
§ 2-3 流体静力学基本方程式	22
§ 2-4 等压面	25
§ 2-5 液体柱高与液柱式测压计	27
§ 2-6 液体的相对平衡	32
§ 2-7 静止液体作用在壁面上的总压力	36
思考题及习题	42
第三章 流体运动学	47
§ 3-1 流体运动要素及研究流体运动的方法	47
§ 3-2 流体流动的几个基本概念	49
§ 3-3 流动的连续性方程式	53
§ 3-4 流体微团的变形与旋转	55
§ 3-5 势流及速度势函数	59
§ 3-6 流函数及流网	61
§ 3-7 复势及复速度	64
思考题及习题	67
第四章 流体动力学基础	69
§ 4-1 理想流体运动的微分方程式	69
§ 4-2 理想流体运动微分方程的伯诺里积分	70
§ 4-3 理想流体微小流束的伯诺里方程式	72
§ 4-4 伯诺里方程式的物理意义及几何意义	73
§ 4-5 实际流体的伯诺里方程式	75
§ 4-6 伯诺里方程的应用范围及使用条件	78
§ 4-7 伯诺里方程的应用例	79
§ 4-8 动量方程式	85
§ 4-9 动量矩方程	90
思考题及习题	91
第五章 粘性流体的流动阻力计算	95
§ 5-1 粘性流体的运动微分方程式	95
§ 5-2 流体流动的两种状态	99

§ 5-3	管内层流运动及其沿程损失	102
§ 5-4	管内紊流运动及其沿程损失	106
§ 5-5	沿程阻力系数	109
§ 5-6	边界层理论基础	115
§ 5-7	管中局部阻力损失计算	118
	思考题及习题	128
第六章	管路计算	130
§ 6-1	简单管路	130
§ 6-2	复杂管路	135
§ 6-3	水击现象及其基本方程	137
§ 6-4	阀门急速关闭时的水击	140
§ 6-5	阀门缓慢关闭时的水击及阿利也维近似式	141
§ 6-6	流体压力脉动及其它	142
	思考题及习题	143
第七章	旋涡运动和机翼	145
§ 7-1	旋涡运动	145
§ 7-2	环量	148
§ 7-3	机翼	150
§ 7-4	翼型周围的环量与升力	151
§ 7-5	作用在机翼上的力	152
§ 7-6	几种翼型简介	153
§ 7-7	有限翼展的机翼	155
§ 7-8	翼栅	157
	思考题及习题	161
第八章	缝隙流	162
§ 8-1	流经平行平面缝隙的流动	162
§ 8-2	流经倾斜平面缝隙的流动	165
§ 8-3	流经环形缝隙的流动	167
§ 8-4	层流起始段的影响	169
§ 8-5	流经平行圆盘间的径向流动	171
	思考题及习题	175
第九章	相似理论及实验观察方法	177
§ 9-1	相似条件及相似准则	177
§ 9-2	因次分析及 π 定理	181
§ 9-3	流场可视化技术	185
§ 9-4	水电比拟实验的基本方法	188
	思考题及习题	193
第十章	可压缩流体在管道中的流动	195
§ 10-1	气体热力学基础	195
§ 10-2	气体一维定常流的有关方程	197
§ 10-3	气体一维等熵流动	198
§ 10-4	微扰动波及冲激波	203
	思考题及习题	205
附录 I	国际单位制 (SI) 一览表	205

附录 II 国际单位制词冠	206
附录 III 工程单位与国际单位对照表	207
附录 IV 用Fortran语言编写的几个例题的计算机程序	207
参考文献	210

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学及学习流体力学的目的

流体力学 (hydromechanics) 是力学的一个分支。在研究物体平衡和运动的力学中, 根据研究的对象不同, 一般可分为: 以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的**理论力学**; 以受力后产生微小变形的固体为研究对象的**固体力学**; 以受力而产生较大变形的流体为研究对象的**流体力学**。

流体力学主要是研究流体自身的平衡、运动以及它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代表, 故通称为水力学 (hydraulics)。内容主要是论述液体, 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), 液体的各种规律对气体也是适用的。

随着科学技术的发展, 流体力学的分支也越来越多, 如有水动力学、空气动力学、附面层理论、紊流理论、渗流理论、多相流体力学以及非牛顿流体力学等等。这样也促进了应用数学、天体物理、地球物理和生物力学的发展。

流体力学是一门应用较广的科学, 航运、航空、宇航、流体机械、城市给水与排水、水利工程、化学工程、气象预报以及环境保护等学科, 无不以流体力学理论为其重要基础。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, 都是流体力学。特别是近年来采掘机械化和综采机械化的发展, 液压技术在采煤机、支护以及装载机械上的大量应用, 作为流体力学的一个新分支——**液压流体力学**, 在煤矿机械化领域中更加重要。

矿业机械等专业, 学习流体力学的目的主要是: 掌握理论基础, 为今后生产和科研服务; 为学好后续课——流体机械、液压传动作理论准备。

本书采用我国的法定单位制, 它是以国际单位 (International System of Unit, 简称 SI 制) 为基础制定的。国际单位制产生于1960年第11届**国际度量会议** (CGPM), 1971年第14次国际度量会议又加以修改和补充, 形成了现在的以七个基本单位 (长度、质量、时间、温度、电流、物质的量及光度)、两个辅助单位 (平面角度和立体角度)、若干组合单位以及以10的正负整数次表示的十六个词冠所组成的 SI 单位制 (详见附录 I 和 II)。我国在此基础上, 根据自己的国情又加入了少数单位, 制定了法定单位制。

书中常用的法定单位与工程单位的换算关系列于附录 III。

§ 1-2 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 (Inertia) 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。质量愈大, 惯性愈大, 运动状态愈难改变。对于各种不同流体, 同体积内的质量是不同的, 如 $1(\text{m}^3)$ 的水、 $1(\text{m}^3)$ 的油和 $1(\text{m}^3)$ 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(density), 以 ρ 表示, 则:

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

式中 m ——体积为 V 的均质流体的质量(kg);

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力。由于重力易于称量, 在流体力学中又多引用单位体积流体的重力, 即比重 (或容重, specific weight) 来表示上述特征。设以 γ 表示比重, 则:

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

式中 G ——体积为 V 的均质流体的重力(N);

V ——该均质流体的体积(m^3)。

如将式 (1-1) 取倒数, 则变成单位质量流体所占有的容积, 称为比容 (specific volume), 以 v 表示, 则:

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

从式 (1-1)、(1-2) 和 (1-3), 并考虑运动定律 $G = mg$, 得密度与比重, 比容与比重的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\gamma}{g} \\ v &= \frac{1}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

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

水在标准大气压力 (101.3kPa), 4°C 的情况下, 其密度和比重为,

$$\rho = 1000 \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$\gamma = 9800 \quad (\text{N}/\text{m}^3)$$

表1-1示出在标准大气压力下, 水在各种温度时的密度和比重等实测值。

干空气的密度可由下式求出:

$$\rho = \frac{1.293}{1 + 0.00367t} - \frac{h}{101300} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-5)$$

式中 t ——空气的温度($^\circ\text{C}$);

h —— $0(^\circ\text{C})$ 时空气的压力 (Pa)。

湿空气的密度可由下式求得:

$$\rho_w = \rho \left(1 + 0.623 \varphi \frac{p_s}{p} \right) \quad (1-6)$$

表 1-1 不同温度下水的物理性质

温度 (°C)	密 度 ρ (kg/m ³)	比 重 γ (N/m ³)	动力粘度 μ (N·S/m ²)	运动粘度 ν (m ² /s)	体积弹性系数 E (N/m ²)	饱和蒸气压力 p_s (kPa)
0	9.9989×10^2	9.805×10^3	1.781×10^{-3}	1.792×10^{-6}	2.02×10^9	0.61
5	9.9998	9.807	1.518	1.520	2.06	0.87
10	9.9969	9.804	1.307	1.307	2.10	1.23
15	9.9910	9.798	1.139	1.139	2.15	1.71
20	9.9822	9.789	1.002	1.004	2.18	2.33
25	9.9704	9.777	0.899	0.893	2.22	3.17
30	9.9567	9.764	0.798	0.801	2.25	4.24
40	9.9224	9.730	0.653	0.658	2.28	7.38
50	9.8802	9.689	0.547	0.554	2.29	12.33
60	9.8321	9.642	0.466	0.475	2.28	19.92
70	9.7782	9.589	0.404	0.413	2.25	31.16
80	9.7184	9.530	0.354	0.365	2.20	47.36
90	9.6537	9.466	0.315	0.326	2.14	70.11
100	9.5831	9.399	0.282	0.295	2.07	101.32

式中 ρ ——同温同压的干空气的密度；

p_s —— $t(^{\circ}\text{C})$ 时的饱和蒸气压力 (kPa)；

φ ——相对湿度；

p ——湿空气的压力 (kPa)。

干空气的密度值列于表1-2中。

表 1-2 干空气的密度和运动粘度

项 目		密 度 ρ (kg/m ³)				运 动 粘 度 ν (m ² /s)			
压力 (kPa)		95.99 (720)	98.66 (740)	101.3 (760)	104.0 (780)	95.99 (720)	98.66 (740)	101.3 (760)	104.0 (780)
温 度 $t(^{\circ}\text{C})$	-10	1.271	1.307	1.342	1.377	$\times 10^{-5}$ 1.317	$\times 10^{-5}$ 1.281	$\times 10^{-5}$ 1.247	$\times 10^{-5}$ 1.215
	0	1.225	1.259	1.293	1.329	1.407	1.369	1.333	1.299
	10	1.182	1.214	1.247	1.280	1.500	1.460	1.421	1.385
	20	1.141	1.173	1.205	1.237	1.595	1.552	1.512	1.473
	30	1.104	1.135	1.165	1.195	1.693	1.647	1.604	1.563
	40	1.069	1.098	1.128	1.157	1.792	1.744	1.698	1.654

注：() 内的数字表示水银柱 (mm)。

对于20(°C)以上的油，在标准大气压力下，其密度可由下式求得：

$$\rho = \rho_{20}[1 - 0.00065(t - 20)] \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-7)$$

式中 ρ_{20} ——油在20°C时的密度；

t ——油温 ($>20^{\circ}\text{C}$) (°C)。

在大气压力下几种流体的密度和比重列于表1-3。

〔例题1-1〕 测得某流体的体积为4.5(m³)，质量为4613 (kg)，问其密度和比重各为若干？

表 1-3 几种流体的密度和比重

流 体 名 称	温 度 (°C)	密 度 (kg/m³)	比 重 (N/m³)
海水	15	1019.63~1029.63	$(10.006 \sim 10.104) \times 10^3$
煤矿井下水	15	1050.61 (平均)	10.300×10^3 (平均)
普通汽油	15	699.76~749.67	$(6.867 \sim 7.358) \times 10^3$
柴油	15	875.68	8.584×10^3
润滑油	15	889.40~919.80	$(8.731 \sim 9.025) \times 10^3$
液压油	15	862.93~902.15	$(8.437 \sim 8.829) \times 10^3$
酒精	15	789.38~800.17	$(7.750 \sim 7.848) \times 10^3$
水银	0	13591.12	1.334×10^5
空气	20	1.18	11.605

〔解〕：根据式 (1-1)，流体的密度为：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4613}{4.5} = 1025.1 (\text{kg/m}^3)$$

根据式 (1-4) 求比重：

$$\gamma = 1024.39 \times 9.81 = 10049.27 (\text{N/m}^3)$$

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，因而流体的体积减小，密度增加，这种性质称为流体的 **压缩性** (Compressibility)，这种流体称为 **压缩性流体** (Compressible fluid)，否则称为非压缩性流体 (incompressible fluid)。流体可压缩性的大小一般可用 **压缩率** (Compressibility) 表示，即作用在体积为 V 的流体上的压力，如果增加 Δp ，其体积随之减小 ΔV 时，压缩率 β 可表示为：

$$\beta = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(- \frac{\Delta V}{V \Delta p} \right) = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (\text{Pa}^{-1}) \quad (1-8)$$

其平均值：

$$\beta = - \frac{1}{V} \left(\frac{V' - V}{p' - p} \right) \quad (1-9)$$

式中 p, p' ——压力 (Pa)；

V, V' ——压力为 p 和 p' 时的流体体积 (m^3)；

dp ——压力增量 (Pa)；

dV ——压力增加到 $p + dp$ 时的流体体积减少量 (m^3)。

压缩率亦可用比容或者密度来表示，即：

$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-10)$$

处于压缩状态下的流体，产生一种向外膨胀的力，这种力可以被看成是一种弹性力。流体弹性力的大小，用体积弹性系数 (bulk modulus of elasticity) 表示，弹性系数恰是压缩率的倒数，以 K 表示，则：

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} \quad (\text{Pa}) \quad (1-11)$$

在研究液压系统的动态性能时,不但要考虑油液的可压缩性,而且对管壁、容器壁的变形亦需考虑。两者同时考虑的体积弹性系数,称为**表观体积弹性系数**(apparent bulk modulus of elasticity)。

设容器的容积为 V_c ,内装有流体体积为 V_0 ,在初始状态时压力为 p ,并且 $V_c = V_0$ [图1-1(a)]。

当压力增加到 $p + \Delta p$ 时(图1-1b),流体体积减小 ΔV_0 ,而容器容积胀出 ΔV_c 。于是容器总容积(也就是流体体积)的变化量 ΔV_t 当为:

$$\Delta V_t = -\Delta V_0 + \Delta V_c$$

按照体积弹性系数的定义,表观体积弹性系数 K_e 应为:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{V_c} \frac{\Delta V_t}{\Delta p}$$

将前式代入,则有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_e} &= -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V_0}{\Delta p} + \frac{1}{V_c} \frac{\Delta V_c}{\Delta p} \\ &= \frac{1}{K_0} + \frac{1}{K_c} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 K_0 ——流体的体积弹性系数;

K_c ——容器的弹性系数。

如果容器是内半径为 r 的管道,从材料力学知,单位长度管道受压 Δp 后,其容积的相对变化为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_c}{V_c} &= \frac{2\pi r(r^2 \Delta p / E\delta)}{\pi r^2} \\ &= \frac{2r \Delta p}{E\delta} = \frac{d \Delta p}{E\delta} \end{aligned}$$

代入式(1-12),则得:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_0} + \frac{d}{E\delta} \quad (1-13)$$

式中 d ——管道内径(m);

δ ——钢管壁厚(m);

E ——管材的弹性系数(N/m²)。一般钢管 $E \approx 2.06 \times 10^{10}$ (N/m²)。

液体的压缩率非常小,例如水的压缩率20(°C),压力在101.3~2500(kPa)范围,仅为 4.844×10^{-10} (m²/N)。常用液压油的压缩率为 $(5.1 \sim 7.1) \times 10^{-10}$ (m²/N)。因此在工程

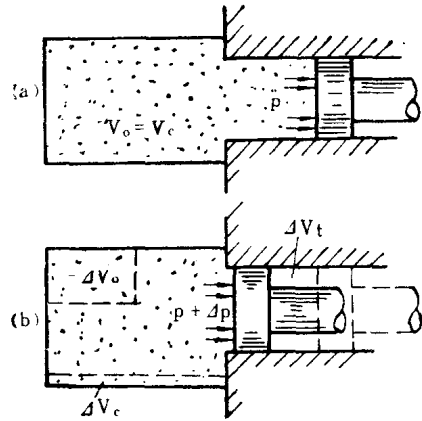


图 1-1 盛有流体的可变容器

的许多问题中, 可以把液体当作不可压缩的但在某些特殊问题, 例如研究液体的振动、冲击时, 就不能不加以考虑。

水在各种压力下的压缩率, 列于表1-4中。

表 1-4 水的压缩率 (m^2/N)

压 力 (kPa) \ 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	0	10	20	50
$101.3 \sim 2.50 \times 10^3$	5.180×10^{-10}	4.935×10^{-10}	4.844×10^{-10}	
$(2.50 \sim 5.10) \times 10^3$	5.088×10^{-10}	4.854×10^{-10}	4.701×10^{-10}	
$(5.10 \sim 7.60) \times 10^3$	5.027×10^{-10}	4.670×10^{-10}	4.497×10^{-10}	
$(7.60 \sim 10.1) \times 10^3$	4.956×10^{-10}	4.640×10^{-10}	4.466×10^{-10}	
$101.3 \sim 5.10 \times 10^4$	4.691×10^{-10}	4.415×10^{-10}	4.283×10^{-10}	4.109×10^{-10}
$(0.51 \sim 1.01) \times 10^5$	4.109×10^{-10}	3.895×10^{-10}	3.753×10^{-10}	3.610×10^{-10}
$(1.01 \sim 1.52) \times 10^5$	3.528×10^{-10}	3.436×10^{-10}	3.334×10^{-10}	3.212×10^{-10}

在工程计算中, 水的弹性系数一般取 $2.06 \times 10^9 (\text{N}/\text{m}^2)$; 液压油的弹性系数取 $(14.0 \sim 19.6) \times 10^8 (\text{N}/\text{m}^2)$ 。

由于气体的压缩性很大, 故称为可压缩流体。但对于流速低于 $50 \sim 70 (\text{m}/\text{s})$, 压力低于 $9.8 \times 10^3 (\text{Pa})$ 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

流体随温度的变化, 其体积发生相应变化的性质, 称为热膨胀性简称膨胀性 (expansibility)。液体膨胀性的大小用膨胀系数 (expansibility) 表示, 它是液体的温度每升高 $1 (^{\circ}\text{C})$, 其体积的相对变化值, 以 β_t 表示, 则:

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1/\text{K} \text{ 或 } 1/^{\circ}\text{C}) \quad (1-14)$$

式中 dT ——液体温度的增量 (K , $^{\circ}\text{C}$); 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:

$$V' = V[1 + \beta_t(T' - T)] \quad (1-15)$$

式中 V ——温度为 T (初始温度, K) 时的液体体积 (m^3);

T' ——变化后的温度 (K , $^{\circ}\text{C}$)。

水的膨胀系数列于表1-5中。

表 1-5 水的膨胀系数 ($1/\text{K}$)

压 力 (kPa) \ 温 度 (K)	274~283	283~293	313~323	333~343	363~373
0.981×10^2	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
9.81×10^2	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
1.96×10^3	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	—

由表 1-5 可以看出, 水的膨胀系数很小, 其它液体也有类似特性。所以, 在工程计算

中可以忽略不计。但是，温度变化较大时，就必须考虑。对于常用的液压油，膨胀系数的大小，也只认为取决于油液的比重，其值见表1-6。

表 1-6 液压油的膨胀系数

比 重 γ (N/m^3)	6867.0	7848.0	8338.5	8829.0	9025.2
膨胀系数 β_t ($1/\text{K}$)	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

对于气体，它与液体显著不同，不但具有明显的可压缩性，而且具有较大的膨胀性，压力和温度的变化，对气体密度或比重的影响很大。在温度不过低，压力不过高时，气体的压力、温度和比容（或密度）三者之间的关系，服从理想气体状态方程式（equation of state of a perfect gas）。即：

$$\left. \begin{array}{l} p v = R T \\ \text{或} \quad \frac{p}{\rho} = R T \end{array} \right\} \quad (1-16)$$

式中 p ——气体的绝对压力 (N/m^2)；

v ——气体的比容 (m^3/kg)；

ρ ——气体的密度 (kg/m^3)；

T ——气体的热力学温度 (K)；

R ——气体常数 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)，对于空气 $R = 287$ ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)；对其它气体，在标准状态下， $R = \frac{8314}{n}$ （式中 n 为气体的分子量）。

利用状态方程式解决状态变化的参数计算时，有：

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = R \quad (\text{常数}) \quad (1-17)$$

式中 p_1 、 v_1 、 T_1 ——状态①的绝对压力、比容和热力学温度；

p_2 、 v_2 、 T_2 ——状态②的绝对压力、比容和热力学温度。

1) 等温变化：式 (1-17) 中 $T_1 = T_2$ ，所以：

$$\left. \begin{array}{l} p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{常数} \\ \text{或} \quad \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = \text{常数} \end{array} \right\} \quad (1-18)$$

2) 等容变化：式 (1-17) 中 $v_1 = v_2$ ，所以：

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} \\ \text{或} \quad p = p_0 \left(\frac{273 + t}{273} \right) = p_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) = p_0 (1 + \beta_t \cdot t) \end{array} \right\} \quad (1-19)$$

式中 t ——气体温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

p ——气体温度为 t ($^{\circ}\text{C}$) 时的绝对压力 (Pa)；

p_0 ——气体温度为 0 ($^{\circ}\text{C}$) 时的绝对压力 (Pa)；

β_t —— 气体热膨胀系数 (1/K)。

3) 等压变化: 式 (1-17) 中 $p_1 = p_2$, 所以:

$$V_2 = \frac{V_1}{T_1} T_2$$

或

$$V = \frac{V_0(273 + t)}{273} = V_0(1 + \beta_t \cdot t) \quad (1-20)$$

式中 V —— 气体在 $t(^{\circ}\text{C})$ 时的体积;

V_0 —— 气体在 $0(^{\circ}\text{C})$ 时的体积。

4) 绝热变化: 是与外界无热量受授的状态变化, 其方程为:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k = \text{常数}$$

或

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = \text{常数} \quad (1-21)$$

式中 k —— 为绝热系数, $k = 1.40$ 。

[例题1-2] 密闭容器中盛有 $5(\text{m}^3)$ 的水, 温度不变, 当压力增加 $7.60 \times 10^2 (\text{kPa})$ 时, 水的体积缩小 $1000(\text{cm}^3)$, 求该水的体积压缩系数 β 和体积弹性系数 K 。

[解]: 根据式 (1-8), 求 β

$$\beta = \frac{dV}{V} \frac{1}{dp} = \frac{0.001}{5} \frac{1}{7.6 \times 10^5} = 2.632 \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{N})(\text{Pa}^{-1})$$

$$1000(\text{cm}^3) = 0.001(\text{m}^3), 7.6 \times 10^5 (\text{kPa})$$

$$K = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{2.632 \times 10^{-10}} = 3.799 \times 10^9 (\text{N}/\text{m}^2) = 3.799 (\text{GPa})$$

三、粘性

流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, 沿着水的表面方向有分力, 这个分力对静止的水来说是剪切力。在水表面受剪切力的部位, 静止状态就遭到破坏, 水立即开始滑动, 产生无限制的剪切变形, 这就是流动。不仅水具有对剪切力抗阻很小的特性, 其它流体同样具有这种特性, 即流动性。但是, 各种流体的流动性有大有小, 比较粘的流体如豆油与水相比, 尽管外在条件相同, 前者流动较缓, 也就是能承受较大的切应力。流体的这种能力表示流体的另外一种物理性质, 即流体的粘性 (Viscosity)。

粘性是流体阻止发生剪切变形的一种特性。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, 就是由于流体有粘性的结果。这种摩擦力, 产生于流体内部, 故称为内摩擦力 (或剪切力)。粘性存在于流体内部, 即使在相对速度等于零的相对平衡情况下, 粘性也存在, 只不过此时不存在相对运动, 粘性作用显示不出来而已。由于粘性的存在, 流体在运动过程中, 因克服内摩擦力必然要做功, 所以流体的粘性, 也是流体中产生机械能量损失的根源。

为了进一步掌握流体粘性的本质, 可就图1-2加以研究。图中 I 和 II 为互相平行的两块平板, 其间充满流体。若 II 板固定, 而 I 板以某一等速 U 向右平移, 这时由于流体附着力的作用, 直接与 I 板相接触的流体层, 将具有同 I 板相同的速度 U 而随之移动, 紧靠 II

板的流体层则不动,但中间各层流体由于其质点间的内摩擦力作用,层层之间互相影响,相沿的滑动着。流速较快的流体层,对相邻流速较慢的流体层,有一个加速作用。在两层流速不同的流体层之间,粘性引起的内摩擦力是成对出现的,一是使快的减速,另一个是使慢的加速。

经过实验得知,两板间各层流体速度的变化如图1-2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,则有:

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1-22)$$

令 τ 为单位面积上的内摩擦力,即内摩擦应力(或切应力),于是:

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-23)$$

式(1-22)、(1-23)表示的关系称为**牛顿内摩擦定律**(Newton's law of friction)。此定律对某些特殊流体如高分子溶液、胶质溶液等是不适用的。为了区别这类流体,将满足牛顿内摩擦定律的流体称为**牛顿流体**(Newtonian fluid),水、空气以及油类等均属于牛顿流体。而将前列特殊流体称为非牛顿流体(non-Newtonian fluid)。

式(1-22)、(1-23)中的 $\frac{du}{dy}$ 为速度在垂直于该速度方向的变化率、称为**速度梯度**,单位为 $(1/\text{s})$ 。如果在图1-2中垂直于速度方向的 y 轴上,任取一正方形的流体微元平面 $abcd$,并将它放大,则如图1-3所示。由于边 cd 上的速度 u ,小于边 ab 上的速度 $u + du$ 。经过 dt 时间后,边 cd 移动的距离 $u dt$ 小于边 ab 移动的距离 $(u + du) dt$ 。因而平面 $abcd$ 移动和变形为 $a'b'c'd'$,于是边 ab 与 cd 将错开一段距离 $du \cdot dt$,原来为直角的 $\angle acd$ 变为锐角 $\angle a'c'd'$,角度减小了 $d\theta$ 。由于 dt 很小,因而 $d\theta$ 也很小。由几何关系有:

$$d\theta \simeq \text{tg} d\theta = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

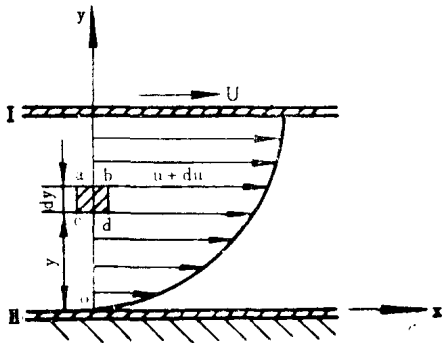


图 1-2 粘性作用分析图

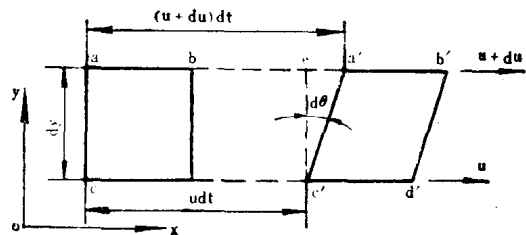


图 1-3 流体微元平面的变形

由此可见, 速度梯度就是直角变形速度(直角的时间变化率)。它是在切应力的作用下发生的, 所以也称剪切变形角速度。据此, 式(1-23)亦可改写为:

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-24)$$

式(1-22)、(1-23)中的“±”号, 是为使 T 和 τ 为正值而加的。

式中的比例系数 μ , 代表流体的一种物理性质, 即当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时, $\tau = \mu$, 它反映粘性的动力学特性, 故称为动力粘度(dynamic Viscosity)。从式(1-22)可以看出, μ 表示两层相距1(m), 具有相对速度1(m/s)的相对滑动的流体, 在其1(m²)的接触面上所发生的内摩擦力的大小。 μ 的因次为 KTL^{-2} (K ——力, T ——时间, L ——长度), 因而 μ 的法定单位为 $(Pa \cdot s)$ (即 $N \cdot s/m^2$)。几种动力粘度单位的换算关系列于表1-7中。

表 1-7 动力粘度单位换算表

帕 P [(dn·s)/cm ²]	厘帕 Pa·s [(dn·s)/100cm ²]	帕 秒 Pa·s [(N·s)/m ²]	公斤力·秒/米 ² [kgf·s)/m ²]	千克/米·秒 [kg/(m·s)]
1.0	1×10^2	0.1	1.02×10^{-2}	0.1
1×10^{-1}	1.0	1.0×10^{-3}	1.02×10^{-4}	1×10^{-3}
10	1×10^3	1.0	0.102	1.0
98	9800	9.8	1.0	9.8

在实际应用中, 还常出现动力粘度与密度的比值, 称为运动粘度(kinematic viscosity), 以 ν 表示, 则,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-25)$$

运动粘度的因次为 L^2T^{-1} 。因而 ν 的法定单位和工程单位均为 (m^2/s) 。

运动粘度的单位中, 不包括质量和力, 因而就不会遇到因单位制不同, 数值也不同的麻烦。另外从表1-1和表1-2可以看出, 在同样条件下, ν 值愈大, 反映流体质点相互牵制的影响愈显著, 则流动性愈低。反之, ν 值愈小, 反映流体质点相互牵制的影响愈微弱, 则流动性愈高。例如水的动力粘度虽比空气大得多, 可是, 运动粘度只是同温空气的十分之一至几十分之一。因此, 水比空气的流动性大些。所以, 运动粘度更能反映抵抗流动的特征, 在表示流体粘度时广为采用。在液压系统计算及液压用油的牌号上, 多用运动粘度。一种机械油的号数, 就是以这种油在50(°C)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(°C)时的运动粘度平均值为 $20 \times 10^{-6}(m^2/s)$ 。表1-8列出几种油的运动粘度。

流体的粘度随压力和温度的变化而变化, 在一般情况下, 压力对流体粘度的影响很小, 可以忽略不计。但是, 在高压的作用下, 气体和液体的粘度均将随压力的升高而增大, 这种现象可从图1-4中明显的看出。

随着压力的变化, 各种油的动力粘度亦可按下式求出:

$$\mu_p = \mu_{101.3} e^{a p} \quad (1-26)$$

式中 μ_p 、 $\mu_{101.3}$ ——压力在98.07p(kPa)和101.3(kPa)时的动力粘度;