

目 录

前 言

主要符号表

第一章 流体的主要物理性质	1
第一节 流体的特征及连续介质模型	1
第二节 流体的密度	2
第三节 流体的压缩性和膨胀性	3
第四节 流体的粘性	6
第五节 作用在流体上的力	11
第六节 表面张力和毛细现象	12
习题	14
第二章 流体静力学	16
第一节 静止流体的压强特点	16
第二节 静止流体平衡方程	17
第三节 重力场中静止流体内部的压强	18
第四节 非惯性坐标系中的静止液体	20
第五节 静止液体对平板的作用力	23
第六节 静止液体对曲面的作用力	24
第七节 流体静压强的测量	26
习题	27
第三章 流体流动的基本方程	31
第一节 描述流体运动的两种方法	31
第二节 描述流体运动的一些基本概念	33
第三节 系统与控制体	36
第四节 连续方程	38
第五节 动量方程	42
第六节 伯努利方程	46
第七节 动量矩方程	52
第八节 能量方程	56

第九节	管流能量方程	59
习题		61
第四章	旋涡理论和势流理论	65
第一节	流体微团的运动分析	65
第二节	有旋运动和无旋运动	68
第三节	理想流体运动微分方程	71
第四节	欧拉积分和伯努利积分	73
第五节	旋涡的基本概念	76
第六节	速度环量和斯托克斯定理	77
第七节	旋涡运动的基本定理	80
第八节	旋涡的诱导速度场	83
第九节	二元旋涡的速度分布和压强分布	85
第十节	速度势和流函数	86
第十一节	几种简单的平面势流及其叠加	90
第十二节	直均流绕圆柱体无环流流动	94
第十三节	直均流绕圆柱体有环流流动	99
习题		100
第五章	相似理论与量纲分析	103
第一节	相似概念	103
第二节	动力相似准则	104
第三节	量纲分析法	108
第四节	近似的模型实验	111
习题		114
第六章	粘性流体管内流动	115
第一节	粘性流体中的应力分析	115
第二节	不可压缩粘性流体的运动微分方程(纳维——斯托克斯方程)	120
第三节	粘性流体的两种流动状态	123
第四节	管内流动的两种损失	125
第五节	流体在圆管中的层流流动	127
第六节	流体在圆管中的湍流流动	131
第七节	沿程损失系数的实验研究	138
第八节	局部损失系数	143
第九节	管道的水力计算	146
第十节	管道中的水击	157
习题		160
第七章	粘性流体绕物体的流动	165
第一节	边界层概念	165
第二节	层流边界层的微分方程	167

第三节	边界层的动量积分方程	168
第四节	平板层流边界层的计算	169
第五节	平板湍流边界层的计算	172
第六节	平板混合边界层	174
第七节	边界层分离	177
第八节	物体在流体中运动的阻力	178
第九节	圆柱绕流边界层与阻力	180
	习题	182
第八章	气体动力学基础	184
第一节	微弱扰动的一维传播	184
第二节	微弱扰动在空间流场中的传播特征	187
第三节	气体一维定常流动的基本方程	189
第四节	气流的参考状态	190
第五节	变截面等熵管流的流动特性	195
第六节	正激波	198
第七节	收缩喷管中的流动	210
第八节	缩放喷管中的流动	214
	习题	218
	习题参考答案	211
	参考文献	225

第一章 流体的主要物理性质

第一节 流体的特征及连续介质模型

一、流体的特征

在自然界中,物质一般是以固态、液态和气态三种状态之一存在的。呈现固态、液态和气体的物质分别为固体、液体和气体。固体具有特定的形状和一定的刚度,是一种不能流动的物质。液体和气体没有特定的形状,如果把一种液体装入一个容器中,那么除了上表面以外,它将呈现容器的形状;如果把一种气体装入一个密闭容器中,那么它将充满整个容器。因此,液体和气体都是极易流动的物质,通常我们把液体和气体通称为流体。

流体和固体对剪切应力的反应不同。当一个弹性体受到剪切应力的作用时,它的变形如图1-1(a)所示。其角变形量 $\Delta\theta$,与剪切应力的大小 F_1 成正比,只要剪切应力保持不变且材料没有达到屈服点,弹性体的角变形就保持不变。为了说明流体对剪切应力的反应,我们可以在流体上滑动一个固体平板而对流体施加剪切应力,如图1-1(b)所示。通过实验观察到,在这种情况下流体将产生连续变形,也正是这一特点被用作流体的基本定义。

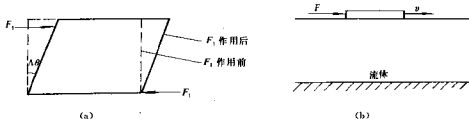


图 1-1

流体是一种受到任何微小剪切应力作用时,都能连续变形的物质。

虽然液体和气体都是流体,但它们的特性却不完全相同。液体和气体的主要区别之一就是流动性的大小。由于气体分子间间距大,作用力小,所以气体分子间彼此的牵制力很小,不足以造成相互间的约束,因而气体分子可以自由运动。而液体分子间的间距小作用力大,液体分子只能在一定小范围内作无规则运动,而不能像气体那样作足以充满整个空间的自由运动。所以气体的流动性比液体的大。当液体和气体接触时便会出现液体和气体的交界面,这种交界面称为液体的自由表面。

液体和气体的另一个区别是可压缩性的大小。气体在外力的作用下,表现出很大的可压缩性,而液体则不然。例如,水的压强由 10^5Pa 增加到 $100 \times 10^5\text{Pa}$ 时,其体积仅减少原体积的0.5%;而完全气体(热力学中的理想气体在流体力学中称为完全气体,以免与本章第四节将介绍的理想流体概念相混)在等温过程中的体积同绝对压强成反比关系变化。可见

两者的压缩性相差甚远。

二、连续介质模型

流体像其它物质一样都是由分子组成的,分子与分子之间有间隙存在,这就是从微观角度来看流体并不是连续的,而是离散的。如果把流体看成是离散的,研究流体运动的规律将是十分困难的,因为我们不能把微分方程等数学工具直接用于离散介质中。但是流体力学并不研究微观的分子运动,而只研究流体的宏观机械运动,它是大量分子的平均统计行为。另外流体力学所研究的特征尺寸要远远大于分子间的间距(通常情况下,1立方毫米的空气约有 2.7×10^{16} 个分子)。因此,在流体力学的研究中,将实际由分子组成的结构用一种假想的流体模型——流体微团来代替。

流体微团(也称为流体质点)由足够数量的分子组成,连续充满它所占据的空间,彼此间无任何间隙。这就是1753年由欧拉首先建立连续介质模型。

既然在流体力学中把流体当做连续介质来处理,那么描述流体特性的一系列参数,如压强、温度、密度、速度等就都可以看作是连续分布的。从而可以把它们看作是空间坐标和时间的连续可微函数,这就使得在流体力学的研究中使用微分方程等强有力的数学工具。整个流体力学的发展与引入连续介质模型是密切相关的,而从所建立的流体力学基本理论和实际工程应用结果来看,引入连续介质模型是完全合理的,也是完全必要的。

但是必须指出,连续介质模型也有一定的适用范围,在某些流动中它并不适用。例如当所研究的最小特征尺寸和分子的自由行程处于相同或相近的数量级时(例如火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及在高空真空技术中等),就不能用连续介质作为其研究模型,而只能从微观着手进行研究。

第二节 流体的密度

一、流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,它表征流体在空间的密集程度,以符号 ρ 表示。

取包围空间某点的微小体积 ΔV ,其中所含流体的质量为 Δm ,比值 $\Delta m/\Delta V$ 即为 ΔV 内的平均密度。若令 $\Delta V \rightarrow 0$,即当 ΔV 向该点趋近于零时而取该比值的极限,便可得到该点处流体的密度,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

必须指出,正如在流体的连续介质模型中所讨论的那样,这里数学上的 $\Delta V \rightarrow 0$,从物理上应理解为体积缩小为无穷小的流体微团,它的体积同被考察的流体的体积相比是完全忽略不计的,但是它必须包含足够多的分子,这样才能把流体当做连续介质来处理。以后遇到类似的情况都应该这样去理解。

对于空间各点处密度相同的均质流体,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg。

表1-1列出了水、空气和水银在标准大气压下不同温度时的密度。

表1-1 不同温度下水、空气和水银的密度(kg/m³)

流体	温 度(℃)						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空 气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
水 银	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

二、流体的相对密度

某均质流体的密度与4℃时水的密度的比值称为该流体的相对密度,用符号 d 表示,

$$\text{即} \quad d = \rho_f / \rho_w \quad (1-3)$$

式中 ρ_f ——流体的密度, kg/m³;

ρ_w ——4℃时水的密度, kg/m³。

三、流体的比容

单位质量流体所占有的空间体积称为比容,用符号 v 表示。显然流体的密度与比容互为倒数,即

$$v = 1/\rho \quad (1-4)$$

它的单位为 m³/kg。

四、混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算,计算式如下:

$$\rho = \rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 + \cdots + \rho_n a_n = \sum_{i=1}^n \rho_i a_i \quad (1-5)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合气体各组分气体的密度;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——混合气体中各组分气体所占的体积百分数。

第三节 流体的压缩性和膨胀性

因为流体的密度是温度和压强的函数,所以流体所占据的体积将随压强、温度的变化而变化。变化的规律通常是:压强增加,体积缩小;温度升高,体积膨胀。流体的这种属性就是流体的压缩性和膨胀性。

一、流体的压缩性

流体体积随压强变化的属性通常以压缩系数或体积模量来表示,分别用符号 κ 、 K 来标记。

压缩系数的定义:当流体的温度保持不变时,单位压强所引起的体积变化率就称为压缩系数,压缩系数由下式确定:

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} \quad (1-6)$$

式中 κ —— 压缩系数, $1/\text{Pa}$;

V —— 压强为 p 时流体的体积, m^3 。

由于压强增加, 体积缩小, 反之亦然, 因而 $\frac{dV}{dp}$ 总是负值, 为此我们在公式的右侧引入一个负号, 以使 κ 总为正。

式(1-6)表明, 对于同样的压强增量, κ 值大的流体, 其体积变化率大, 较易压缩; κ 值小的流体, 其体积变化率小, 较难压缩。由此可见 κ 标志流体压缩性的大小。

压缩系数的倒数称为体积模量(或弹性模量), 用 K 来表示, 即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-7)$$

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小。 K 值大的流体的压缩性小, K 值小的流体的压缩性大。 K 单位与压强相同为 Pa 。

流体的体积模量也随压强和温度的变化而变化, 表(1-2)给出了不同状态下水的体积模量。

表1-2 水的体积模量 K (10^3Pa)

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	压 强 (MPa)				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

二、流体的膨胀性

流体的体积随温度变化的属性通常用体膨胀系数来表示。

当压强保持不变时, 单位温升所引起的体积变化率就称为体膨胀系数, 以 α_v 表示, 其

大小为
$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-8)$$

式中 α_v —— 流体的体膨胀系数, $1/\text{K}$;

V —— 温度为 T 时流体的体积, m^3 。

由于温度升高, 体积膨胀, 故 dT 与 dV 同号。

水的体膨胀系数如表1-3所表示。

三、可压缩流体和不可压缩流体

由表1-2可以看出, 水的压缩性是很小的, 压强每增加 10^3Pa , 其体积变化率不到万分之一。工程上常用的其它工作液体的压缩性也是比较小的, 因此在工程上常常可以忽略液体的压缩性。

表1-3

水的体膨胀系数 α_v ($1/^\circ\text{C}$)

压强 (MPa)	温度 ($^\circ\text{C}$)				
	1~10	11~20	40~50	60~70	90~100
0.0981	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
9.807	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
19.61	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
49.03	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
88.26	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

气体的压缩性与液体相比则大得多。因此在研究气体的时候,需要同时考虑压强和温度对气体体积和密度的影响,对于完全气体,其间的关系可以用状态方程表示,即

$$pv = RT \quad (1-9a)$$

或

$$p/\rho = RT \quad (1-9b)$$

式中 p —— 气体的绝对压强, Pa;

v —— 气体的比容, m^3/kg ;

R —— 气体状态常数, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$;

T —— 热力学温度, K;

ρ —— 气体的密度, kg/m^3 。

状态方程说明,气体的比容对压强成反比,而同热力学温度成正比。在等温过程中,当压强增大一倍时,体积便要缩小一倍,足见气体的压缩性之大。

由上述分析可以看出,尽管任何流体都具有压缩性,但它们的可压缩程度,即压缩系数的大小相差十分悬殊。因此在工程实际问题中是否考虑流体的压缩性要视具体情况而定。

通常我们把液体视为不可压缩流体,即把液体的密度视为常数。这样处理问题,可使理论分析和工程计算大大简化,而且对绝大多数问题来说具有足够的精确度。但在某些特殊场合,如水击现象的研究中,则必须考虑水的压缩性才能得出合理的结论。

通常我们把气体当作可压缩流体来处理,特别是在流速较高,压强变化较大的场合,它们的体积变化率是不容忽略的,必须把它们的密度视为变量。但是在流速不高,压强变化较小的场合,便可忽略压缩性的影响,把气体视为不可压缩流体。例如在标准状态下,当空气流速等于 102m/s ($Ma = 0.3$) 时,不考虑压缩性所引起的计算相对误差约为 2.3% 。这在工程计算中一般是允许的。这样,对不可压缩流体得出的各种运动规律便可直接应用到这类气体的流动研究中。通风机内空气的流速较小,压强变化不大,因此可以把通风机内流动的气体当做不可压缩流体来处理。

例 1-1 水在厚壁圆筒中受压缩,当压强为 1MPa 时,其体积为 $1 \times 10^{-3}\text{m}^3$,当压强增至 5MPa 时,其体积变为 $0.998 \times 10^{-3}\text{m}^3$,求水的体积模量 K 。

解 将上述实测数据代入式(1-7)中,可得

$$K = -V \frac{dP}{dV} \approx -\frac{V \Delta P}{\Delta V} = -\frac{1 \times 10^{-3} \times (5 - 1)}{(0.998 - 1) \times 10^{-3} / (1 \times 10^{-3})} = 2000 \text{ MPa}$$

第四节 流体的粘性

①

粘性是流体所具有的重要属性。凡是实际流体——无论是气体还是液体都具有粘性。在流体力学问题的研究中,对流体的这一属性必须给予足够的重视。

一、粘性的概念及粘性内摩擦力产生的原因

我们首先观察一个简单的实验。如图1-2所示的装置,在固定的扭丝下悬挂一个圆筒体,其外面放置一个能绕铅直轴旋转的圆筒形容器。在内、外圆筒体的缝隙中充以某种液体,水或油均可。当外筒开始旋转时,可以发现内筒随之产生同方向的扭转。当外筒转速达定值 ω 时,内筒将平衡在一定的扭转角度上,一旦外筒停止转动,内圆筒也将随之恢复到原来的位置上。

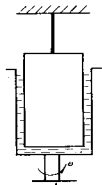


图1-2

这个实验清楚地说明了在附着于内筒和旋转外筒上的流体之间存在着一种彼此阻碍对方运动的趋势。更多的实验和现象告诉我们,当流体在外力作用下,流体层间出现相对运动时,随之产生抵抗流体层间相对运动的内摩擦力,流体产生内摩擦力的这种性质称为粘性。

必须注意,只有在流体流动时才会表现出粘性,静止的流体不呈现粘性。粘性的作用表现为阻碍流体内部的相对滑动,从而阻碍流体的流动,这种阻碍作用只能延缓相对滑动的过程,而不能消除这种现象。这是粘性的重要特征。

粘性内摩擦力产生的原因,需要从分子微观运动来加以说明。它是由分子间的相互吸引力和分子不规则运动的动量交换两方面原因造成的。

(a)由于分子间的吸引力 当相邻的两流体层产生相对运动时,必然要破坏原来分子间的平衡状态,引起相邻分子间距加大。这种间距加大使分子间的吸引力明显地表现出来,即快速运动的分子层拖动慢速运动的分子层使其加快运动,而慢速运动的分子层反过来阻碍快速层的运动。这种相互作用的结果,宏观表现为内摩擦力或称为粘性力。

(b)由于分子不规则运动的动量交换 当流体流动时,由于分子总是在作不规则运动,总会有分子作层与层间的跳跃运动,这种跳跃运动的结果必然导致分子间进行动量交换。设某流体的相邻两层的速度差为 dv ,分子的质量为 m ,当快速层的分子跃入慢速层时,将动量增量 mdv 带入慢速层。由于分子运动,必然会撞击慢速运动的分子,结果将本身的部分动量传给慢速层分子,使慢速层的分子加速。同理,当慢速层分子跃入快速层时,动量交换的结果将使快速层分子减速。这样,由于分子不规则运动所形成的动量交换也会形成彼此牵制的作用力,宏观表现也是粘性力。

由上述分析进一步得出,对于液体,由于分子间距小,在低速流动时,不规则运动较弱,因此粘性力的产生将主要取决于分子间的引力。而对于气体,由于分子间距较大,吸引力很小,不规则运动强烈,所以其粘性力产生的原因主要取决于分子不规则运动的动量交换。

二、牛顿内摩擦定律

牛顿(I. Newton)经过大量实验研究,于1686年提出了确定流体内摩擦力大小的“牛顿内摩擦定律”。现在以图1-3所示的简图说明牛顿实验的内容及其结果。

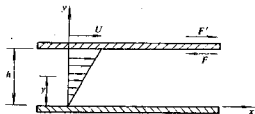


图 1-3

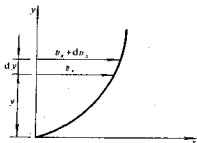


图 1-4

两块水平放置的平行平板,间距为 h ,两平板间充以某种流体,假定上板以速度 U 向右运动,下板保持静止不动。由于粘性流体将附着在它所接触的固体表面,所以与上板接触的流体将以速度 U 沿 x 方向运动,而与下板接触的流体静止不动。二平板间的流体作平行于平板的流动,其速度均匀地由下板的零变化到上板的 U 。可见各流层间都有相对运动,因而必定产生内摩擦力。若要保持这种运动,必须在上板上施加与内摩擦力 F 大小相等而方向相反的力 F' 。大量的实验证明,流体内摩擦力的大小与上板的运动速度 U 成正比,与上板和流体的接触面积 A 成正比,而与两板间的距离成反比,其式为

$$F = \mu \frac{U}{h} A \quad (1-10)$$

式中, μ 是与流体性质有关的比例系数,称为动力粘度(或简称粘度),其单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

式中的 U/h 表示在垂直于流速的方向上单位长度的速度增量,即流速在其法线方向上的变化率,称为速度梯度。

一般情况下流体流动的速度并不按直线变化。设流体流动的速度分布为曲线分布,如图(1-4)所示。现在取一无限薄的流体层进行研究。坐标 y 处的流速为 v_x ,坐标为 $y + dy$ 处的流速为 $v_x + dv_x$,显然在厚度为 dy 的薄层中速度梯度为 dv_x/dy 。将式(1-10)推广应用于流体的各个薄层,得

$$F = \mu \frac{dv_x}{dy} A \quad (1-11)$$

上式就是牛顿内摩擦定律的表达式,其物理意义为:流体内摩擦力的大小与流体的速度梯度和接触面积的大小成正比,并且与流体的性质有关,即与粘性有关。

单位面积上的内摩擦力,称为切向应力,用 τ 表示

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1-12)$$

由式(1-12)可以看出,当 $\frac{dv_x}{dy} = 0$ 时, $\tau = 0$ 。即当两层流体处于相对静止时,流体中不存在内摩擦力。

由牛顿内摩擦定律可以看出,流体与固体在摩擦规律上是截然不同的,流体的内摩擦力取决于流体间的相对运动,即其大小与速度梯度成正比;固体间的摩擦力与速度无关,

而与两固体间所承受的正压力成正比。

在流体力学中,还常用动力粘度和流体密度的比值来度量流体的粘度,称为运动粘度,以符号 ν 表示,即

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-13)$$

ν 的单位是 m^2/s 。

在工程中还常用另一种衡量液体粘性的单位“恩氏度”或“恩格勒(Engler)粘度” E 。它是 200cm^3 的液体流出恩格勒粘度计所需的时间 t 与 $200\text{cm}^3 20^\circ\text{C}$ 的蒸馏水流出同一仪器所需的时间 t_0 的比值,即

$$E = \frac{t}{t_0}$$

这是粘性的一种相对表示方法,其中 t_0 的平均值一般为51秒。

在实际应用中需将恩氏度换算为运动粘度,其经验公式为

$$\nu = 0.0731'E - \frac{0.0631}{E} \quad \text{cm}^2/\text{s} \quad (1-14)$$

三、流体的粘度与温度 and 压强的关系

1. 温度对流体粘度的影响

温度对流体粘度的影响很大。当温度升高时,液体的分子间距增大,由前面的分析可知,液体的粘度将显著减小。对于气体,当温度升高时,分子的不规则运动加剧,使动量交换更加频繁,因此气体的粘度将随之增大。可见,当温度变化时,气体和液体的粘度变化规律是不同的。

人们通过大量的实验得出了许多表达流体粘度随温度变化的经验公式。

水的动力粘度与温度关系的经验公式为

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-15)$$

式中 μ_0 ——水在 0°C 时的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

t ——水的摄氏温度, $^\circ\text{C}$ 。

当气体的压强小于 1MPa 时,气体粘度与温度关系可以近似地用苏士兰(Sutherland)关系式计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + S}{T + S} \left(\frac{T}{273} \right)^{1/2} \quad (1-16)$$

式中 μ_0 ——气体在 0°C 时的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

T ——气体的热力学温度, K ;

S ——依气体种类而定的苏士兰常数, K 。

常用气体在标准状态下的粘度,分子量和苏士兰常数 S 列于表1-4中。在 101325Pa 压强下水和空气的粘度与温度的关系分别列于表1-5和表1-6中。某些气体和液体的动力粘度 μ 和运动粘度 ν 随温度的关系曲线见图1-5和图1-6。

2. 压强对流体粘度的影响

由于压强变化对分子动量交换影响甚微,所以气体的粘度随压强变化很小。而压强的加大将使分子间距减小,故压强对液体粘性影响较大。但在低压时(通常低于 10MPa)压强的变化对液体粘度的影响很小,通常予以忽略。在高压时,液体的粘度将随压强的增加而

增大,例如,水在10⁶MPa 压强的作用下的粘度为水在0.1MPa 压强下粘度的二倍。

液体粘度随压强的变化规律可用下面的经验公式表示:

$$\mu_p = \mu_0 e^{ap} \quad (1-17)$$

式中 μ_p ——压强为 p 时的粘度;

μ_0 ——压强为0.1MPa(1个大气压)时的粘度;

a ——系数,取决于液体的物理性质和温度,通常可近似取为 $(2 \sim 3) \times 10^{-8}, 1/P_0$ 。

表1-4 常用气体的粘度,分子量 M 和苏士兰常数 S (标准状态下)

流体名称	$\mu_0 \times 10^6$ (Pa·s)	$\nu_0 \times 10^6$ (m ² /s)	M	S (K)
空气	17.09	13.20	28.96	111
氧	19.20	13.40	32.00	125
氮	16.50	13.30	28.02	104
氢	8.40	93.50	2.016	71
一氧化碳	16.80	13.50	28.01	100
二氧化碳	13.80	6.98	44.01	254
二氧化硫	11.50	3.97	64.06	306
水蒸汽	8.53	11.12	18.01	961

表1-5 水的粘度与温度的关系(101325 Pa 压强下)

温度 (°C)	$\mu \times 10^4$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	温度 (°C)	$\mu \times 10^4$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表1-6 空气的粘度与温度的关系(101325 Pa 压强下)

温度 (°C)	$\mu \times 10^4$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	温度 (°C)	$\mu \times 10^4$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
0	17.09	13.20	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50

(续表)

温 度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	温 度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
120	22.60	25.20	380	32.12	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

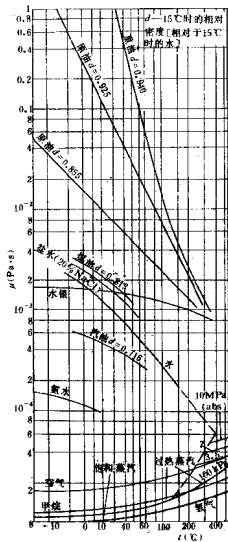


图 1-5

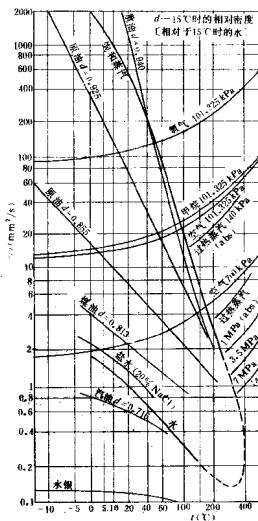


图 1-6

四、牛顿流体与非牛顿流体

在流体力学的研究中,凡是切向应力与速度梯度的关系服从牛顿内摩擦定律的流体,称为牛顿流体。图1-7中所示的通过原点直线A所表示的流体即为牛顿流体。自然界中的水、空气、其它气体和许多常见的油类都属于牛顿流体。

凡是切向应力和速度梯度的关系不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。非牛顿流体的种类很多,通常有塑性流体(曲线B)、拟塑性流体(曲线C)和胀流型流体(曲线D)等多种。前者有牙膏等,这种流体只有在克服某个不发生剪切变形的初始应力 τ_0 之后,其切向应力才与速度梯度成正比;高分子溶液,纸浆、泥浆等流体属于拟塑性流体,这种流体的粘度随速度梯度的增加而减小;油漆、乳化液等属于胀流型流体,这种流体的粘度随速度梯度的增大而增大。

非牛顿流体多数在化工、食品等工业中出现,而本书所研究的对象仅限于牛顿流体。

五、粘性流体和理想流体

如前所述,实际流体都是具有粘性的,都是粘性流体。不具有粘性的流体称为理想流体,这是客观世界上并不存在的一种假想流体。在流体力学中引入这一概念是因为:(1)在静止流体和速度均匀直线运动的流体中,流体的粘性表现不出来,所以在这种情况下完全可以把粘性流体当做理想流体来处理;(2)在许多场合下,想求得粘性流体的精确解是很困难的。对于某些粘性不起主要作用的问题,可以先不计粘性的影响,使问题的分析大为简化,从而有利于掌握流体流动的基本规律。至于粘性的影响则可通过试验加以修正。

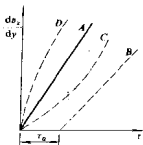


图 1-7

第五节 作用在流体上的力

任何物体的平衡和运动都是受力作用的结果,因此在研究流体力学的规律之前,必须首先分析作用在流体上的力的种类和性质。作用在流体上的力通常分为两大类:质量力和表面力。

一、质量力

某种力场作用在流体所有质点上的力称为质量力。质量力是非接触力,其大小与流体的质是成正比。如重力就是力学中常见的质量力,它是由重力场所施加的,当所研究的流体作加速运动时,根据达朗伯原理虚加于流体质点上的惯性力也属于质量力。

单位质量流体所受到的质量力称为单位质量力。如果作用在体积为 V , 质量为 m 的流体的质量力为 F , 则 F_x, F_y, F_z 分别表示质量力在 x, y, z 三个坐标方向上的分力。若用 f_x, f_y, f_z 分别表示单位质量力在三个坐标上的分量,则

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{F_x}{\rho V} = \frac{F_{fx}}{m} \\ f_y &= \frac{F_y}{\rho V} = \frac{F_{fy}}{m} \\ f_z &= \frac{F_z}{\rho V} = \frac{F_{fz}}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

根据牛顿第二定律,由式(1-18)可以看出,单位质量力的三个分量分别为质量力所产生的加速度在三个坐标上加速度。

若用 f 表示单位质量力,则

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-19)$$

二、表面力

表面力是指作用在所研究流体表面上的力。表面力是接触力,其大小与表面积成正比。

在流体力学的研究中,常常自流体内取出一个分离体作为研究对象。这时,表面力是指周围流体作用于分离体表面上的力。作用在流体上的表面力一般可分解为与流体表面垂直的法向力和与流体表面相切的切向力。流体粘性所引起的内摩擦力就是切向力。单位面积上的表面力称为应力。

如果在流动的实际流体中任取一体积为 V , 表面积为 A 的流体作为分离体。则分离体以外的流体通过接触面必定对分离体内的流体有作用力。如图(1-8)所示,

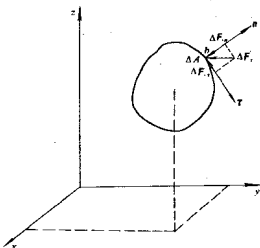


图 1-8

在分离体表面的 b 点取一微小面积 ΔA , 作用在它上面的表面力为 ΔF 。把 ΔF 分解为沿法线 n 上的分为 ΔF_n 和沿切向方向 τ 上的分力 ΔF_τ 。以微小面积 ΔA 分别除上述表面力并取极限,便可求得作用在 b 点应力以及法向应力和切向应力:

$$\left. \begin{aligned} f_n &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \\ \sigma &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_\tau}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

对于静止流体或没有粘性的理想流体,切向应力是不存在的,只有法向应力,称为压强。

表面张力也是表面力的一种。

第六节 表面张力和毛细现象

在日常生活中我们常常看到水滴悬挂在墙上或水龙头出口上,水银在平滑表面上呈球形滚动等现象,这些现象表明液体自由表面有明显的欲成球形的收缩趋势,引起这种收缩趋势的力称为表面张力。

表面张力是由分子的内聚力引起的,其作用的结果使液体表面好像是一张均匀受力的绷紧的弹性膜。

若假想在液体自由表面上取一条线将其分开,则表面张力的作用将使线两边的自由表面彼此互相吸引,作用方向将与该线相垂直,可见表面张力实际上是一种拉力。我们将单位长度上所受到的这种拉力定义为表面张力,以 σ 表示,它的单位是N/m。

实际上表面张力的数值是很小的,在一般计算中可以不予考虑。只有一些特殊的情况下表面张力才需要考虑。例如,当流体自由表面的边界尺寸非常小,如很细的玻璃管,很窄的缝隙等时,表面张力的影响明显,必须计及。

表面张力随温度的变化而变化。当温度升高时,表面张力减小。在液体中添加某些有机溶液或盐类,可改变液体的表面张力。例如,把少量的肥皂或去污剂的溶液加入水中,可以显著地降低水的表面张力,而把食盐加入水中可以提高水的表面张力。表1-7中给出了在压强为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下,水和空气接触的表面张力 σ 随温度的变化值。表1-8给出了几种常见液体的表面张力。

表1-7

水的表面张力 σ

温度 $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	60	80	100
表面张力 10^{-3}N/m	75.6	74.2	72.8	71.2	69.6	64.2	62.6	58.9

表1-8

几种常见液体的表面张力(20 $^{\circ}\text{C}$ 与空气接触)

液体名称	表面张力 σ (N/m)	液体名称	表面张力 σ (N/m)
酒精	0.0223	润滑油	0.0350~0.0379
苯	0.0289	原油	0.0223~0.0379
四氯化碳	0.0267	水	0.0728
煤油	0.0223~0.0321	水银	0.5137

液面为平面时表面张力一般表现不出来。液面为曲面时表面张力造成曲面内外两侧的压强差。由图(1-9)可以推导出曲面内外的压强差为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1-21)$$

式中 σ —— 表面张力, N/m;

r_1, r_2 —— 液体曲面在互相垂直的二平面上的曲率半径。

对于球形液滴, $r_1 = r_2 = r$, 液滴内外的压差为

$$\Delta p = 2\sigma/r \quad (1-22)$$

当把直径很小两端开口的细管插入液体中时, 表面张力的作用将使管内液体出现升高或下降的现象, 我们称之为“毛细现象”。这足以形成毛细现象的细管称为“毛细管”。

液体在毛细管内是上升还是下降取决于液体分子和管壁分子之间的吸引力(附着力)与液体分子间的相互吸引力(内聚力)的相对大小。当液、固间的附着力大于液体的内聚力时, 液体将附着、湿润该固体壁面, 并沿固体壁面向外伸展, 使

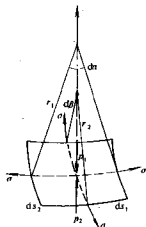


图 1-9

液面向上弯曲成为凹面(这种现象通常称为“浸润”)。由于表面张力的作用将使液面尽量减小,力图使中间液面上凸成为平面。二者作用的结果将使液体上升,直到上升液柱的重量和表面张力的垂直分量平衡为止。当玻璃管插入水中时就是这种情况,如图1-10(a)所示。当玻璃管插入水银中时,由于水银的内聚力远大于其与玻璃的附着力(这种情况称为“不浸润”),其结果与上述情况相反,水银表面向下弯曲成凸面,水银柱下降,如图1-10(b)所示。

毛细现象中液柱上升或下降高度可参看图1-10(a)求得。设液面与壁面的接触角为 θ ,管径为 r ,流体的密度为 ρ ,表面张力为 σ ,由液柱的重量与表面张力的垂直分量相平衡,即

$$2\pi r \sigma \cos\theta = \pi r^2 h \rho g$$

可得
$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r} \quad (1-23)$$

式中 θ 角取决于液、气的种类,管壁材料等因素。通常,对于水和洁净的玻璃 $\theta = 0^\circ$,水银和洁净的玻璃 $\theta = 139^\circ$ 。通常对于水,当玻璃管的内径大于20mm,对于水银,大于12mm时,毛细现象的影响可以忽略不计。

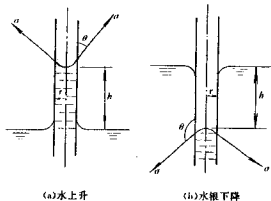


图 1-10

习 题

1-1 当压强增量为50 000Pa时,某种液体的密度增长0.02%。求该液体的体积模量。

1-2 充满石油的油槽内的压强为 4.9033×10^5 Pa,今由槽中排出石油40kg,使槽内压强降到 9.8067×10^4 Pa,设石油的体积模量 $K = 1.32 \times 10^9$ Pa,密度 $\rho = 880$ kg/m³。试求油槽体积。

1-3 采暖系统在顶部设置一个膨胀水箱(如图),系统内的水在温度升高时可以自由膨胀进入水箱,若系统内水的总体积为8m³,温度改变的最大值为50℃,水的膨胀系数

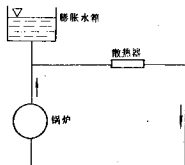


图 1-3 图

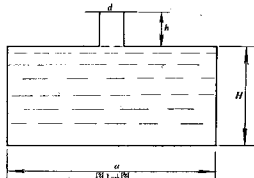


图 1-4 图