

第1章 基础知识

1.1 流体力学

流体是液体和气体的总称。流体力学是力学的基本原理在液体和气体中的应用,研究的对象主要是流体的内部及其与相邻固体和其他流体之间的动量、热量及质量的传递和交换规律。

1.1.1 流体主要的物理性质

实际工程中给排水系统和采暖通风空调系统的介质都是运动的流体。从微观角度讲,流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成,并处于随机运动状态。在工程上,从宏观角度出发,将流体视为由无数流体质点(或微团)组成的连续介质。所谓质点,是指由大量分子构成的微团,其尺寸远小于设备尺寸,但却远大于分子自由程,这些质点在流体内部紧紧相连,彼此间没有间隙,即流体充满所占空间,称为连续介质。实际工程中的流体都被认为是连续介质。流体与运动有关的主要物理性质包括惯性、重力特性、黏性、压缩性和膨胀性等。

1. 惯性

惯性是流体保持原有运动状态的性质。质量是用来度量物体惯性大小的物理量,质量越大,惯性也就越大。通常用密度来表示其特征。

单位体积流体的质量称为流体的密度,以符号 ρ 表示,单位是 kg/m^3 。在连续介质假设的前提下,对于均质流体,其密度的表达式为

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

式中: m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

2. 重力特性

流体处于地球引力场中,所受的重力是地球对流体的引力。单位体积流体的质量称为流体的容重,以符号 γ 表示,单位是 N/m^3 ,对于均质流体,其容重的表达式为

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

式中: G ——流体的质量, N ;

V ——流体的体积, m^3 。

质量容重度与质量密度的关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

不同流体的密度和容重各不相同,同一种流体的密度和容重随温度和压强变化。一个标准大气压下,常用流体的密度和容重见表 1-1。

表 1-1 常用流体的密度和容重(标准大气压下)

项 目	水	水银	纯乙醇	煤油	空气	氧	氮
密度/(kg/m ³)	1 000	13 590	790	800~850	1.2	1.43	1.25
容重/(N/m ³)	9 807	133 318	7 745	7 848~8 338	11.77	14.02	12.27
测定温度/℃	4	0	15	15	20	0	0

3. 黏性

黏性是流体固有特性。当流体相对于物体运动时,流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力(切向力或剪切力)以反抗相对运动,从而产生摩擦阻力。这种在流体内部产生内摩擦力以阻抗流体运动的性质称为流体的黏滞性,简称黏性。黏性是流动性的反面,流体的黏性越大,其流动性越小。流体的黏性是流体产生的根源。

实验证明,对于一定的流体,内摩擦力 F 与两流体层的速度差 $d\dot{u}$ 成正比,与两层之间的垂直距离 dy 成反比,与两层间的接触面积 A 成正比,即

$$F = \mu A \frac{d\dot{u}}{dy} \quad (1-4)$$

式中: F ——内摩擦力, N;

μ ——比例系数,称为流体的黏度或动力黏度, Pa·s;

$\frac{d\dot{u}}{dy}$ ——法向速度梯度,即在与流体流动方向相垂直的 y 方向流体速度的变化率, 1/s。

通常单位面积上的内摩擦力称为剪应力,以 τ 表示,单位为 Pa,则式(1-4)变为

$$\tau = \mu \frac{d\dot{u}}{dy} \quad (1-5)$$

式(1-4)、式(1-5)称为牛顿黏性定律,表明流体层间的内摩擦力或剪应力与法向速度梯度成正比。

流体的黏性一般随温度和压强的变化而变化,但实验表明,在低压情况下(通常指低于 100 个大气压),压强的变化对流体的黏性影响很小,一般可以忽略。温度则是影响流体黏性的主要因素,而且液体和气体的黏度随温度的变化规律是不同的,液体的黏性随温度的升高而减小,而气体的黏性则随温度的升高而增大。原因是黏性取决于分子间的引力和分子间的动量交换。因此,随着温度升高,分子间的引力减小而动量交换加剧。液体的黏滞力主要取决于分子间的引力,而气体的黏滞力则取决于分子间的动量交换。所以,液体与气体产生黏滞力的主要原因不同,造成截然相反的变化规律。流体黏性随温度的变化趋势如图 1-1 所示。实际流体在管内的速度分布如图 1-2 所示。

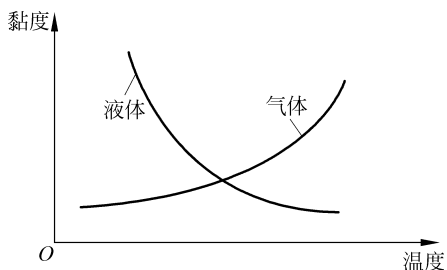


图 1-1 流体黏性随温度的变化趋势

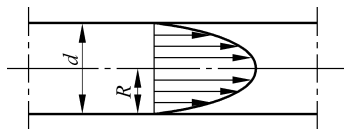


图 1-2 实际流体在管内的速度分布

4. 压缩性和膨胀性

流体体积随着压力的增大而缩小的性质称为流体的压缩性；流体体积随着温度的增大而增大的性质称为流体的膨胀性。对于液体和气体，压缩性和膨胀性是有所区别的。

1) 液体的压缩性和膨胀性

水的压力增加一个标准大气压时，其体积仅仅缩小 $1/2\,000$ ，因此实际工程中认为液体是不可压缩流体。液体随着温度的升高体积膨胀的现象较为明显，因此认为液体具有膨胀性，流体的膨胀性通常用膨胀系数 α 表示。它是指在一定的压力下温度升高 1°C 时，流体体积的相对增加量。水在温度升高 1°C 时，密度降低仅为万分之几。因此，一般工程中不考虑液体的膨胀性。但在热网系统中，当温度变化较大时，需考虑水的膨胀性，并应注意在系统中设置补偿器、膨胀水箱等设施。

2) 气体的压缩性和膨胀性

气体和液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性。在温度不太低、压强不太高时，可以将这些气体近似地看作理想气体，气体压强、温度、比容之间的关系服从理想气体状态方程，即

$$PV = RT \quad (1-6)$$

气体虽然是可以压缩和膨胀的，但是，对于气体速度较低的情况，在流动过程中压强和温度的变化较小，密度仍可以看作常数，这种气体称为不可压缩气体。在通风空调工程中，所遇到的大多数气体是流动的，都可看作不可压缩流体；而膨胀性要考虑，同样也是在空调管道中通常设置补偿器。

1.1.2 流体静力学基础

流体静力学研究流体在静止或相对静止状态下的力学规律及其实际应用。处于相对静止状态下的流体，由于本身的重力或其他外力的作用，在流体内部及流体与容器壁面之间存在着垂直于接触面的作用力，这种作用力称为静压力。单位面积上流体的静压力称为流体的静压强。在静止流体中，作用于任意点不同方向上的压力在数值上均相同，常用 p 表示，单位为 N/m^2 。此外，压力的大小也可以间接地以流体的柱高度表示，如用米水柱或毫米汞柱表示等。若流体的密度为 ρ ，则液柱高度 h 与压力 p 的关系为

$$p = \rho gh \quad (1-7)$$

**注意**

用液柱高度表示压力时,必须指明流体的种类。标准大气压和压强、米水柱或毫米汞柱之间有如下换算关系:

$$1\text{atm}=1.013\times 10^5\text{Pa}=760\text{mmHg}=10.33\text{mH}_2\text{O}$$

1. 绝对压强、表压强和大气压强

压力的大小常以两种不同的基准表示:一个是绝对真空;另一个是大气压力。基准不同,表示的方法也不同。以绝对真空为基准测得的压力称为绝对压力,是流体的真实压力;以大气压为基准测得的压力称为表压或真空度、相对压力,是把大气压强视为零压强的基础上得出来的。

绝对压强是以绝对真空状态下的压强(绝对零压强)为基准计量的压强;表压强简称表压,是指以当时当地大气压为起点计算的压强。两者的关系为

$$\text{绝对压强}=\text{大气压强}+\text{表压强}$$

工程技术中按表压强不同,可能会出现以下三种情况。

- (1) 表压强大于环境大气压,设备中的压强称为“正压”。
- (2) 表压强等于环境大气压,设备中的压强称为“零压”。

- (3) 表压强小于环境大气压,设备中的压强称为“负压”或“真空度”。

绝对压力与表压、真空度的关系如图 1-3 所示。一般为避免混淆,通常对表压、真空度等加以标注,如 2 000Pa(表压)、10mmHg(真空度)等,并且还应该指明当地的大气压力。

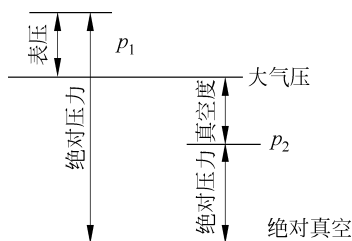


图 1-3 绝对压力与表压、真空度的关系

2. 流体静力学平衡方程

如图 1-3 所示,容器内装有密度为 ρ 的液体,液体可认为是不可压缩流体,其密度不随压力变化。在静止的液体中取一段液柱,其截面积为 A ,以容器底面为基准水平面,液柱的上、下端与基准水平面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 。那么作用在上、下端面的压力分别为 p_1 和 p_2 。

重力场中在垂直方向上对液柱进行受力分析。

- (1) 上端面所受总压力 $P_1=p_1A$,方向向下。
- (2) 下端面所受总压力 $P_2=p_2A$,方向向上。
- (3) 液柱的重力 $G=\rho gA(z_1-z_2)$,方向向下。

液柱处于静止时,上述三项力的合力应为零,即

$$p_2A - p_1A - \rho gA(z_1 - z_2) = 0$$

整理并消去 A ,得

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (\text{压力形式}) \quad (1-8)$$

变形得

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g \quad (\text{能量形式}) \quad (1-9)$$

若将液柱的上端面取在容器内的液面上,设液面上方的压力为 p_a ,液柱高度为 h ,则式(1-8)可改写为

$$p_2 = p_a + \rho g h \quad (1-10)$$

式(1-8)~式(1-10)均称为静力学基本方程。流体静力学基本方程的物理意义在于:在静止流体中任何一点的单位位能与单位压能之和(单位势能)为常数。

3. 静压强的特性

(1) 静压强的方向性。流体具有各个方向上的静压强。流体的静压强处处垂直于固体壁面,而固体壁面对流体的反作用力必然垂直于并指向流体的表面。也就是说,凡作用于静止流体的外力必然垂直并指向流体表面,即内法线方向。这是因为静止流体内的应力只能是压应力,而没有切应力。

(2) 流体内部任意一点的静压强的大小与其作用的方向无关。也就是说,流体内部某一点的静压强在各个方向上大小相同,主要是因为静止流体中某一点受四面八方的压应力而达到平衡。

(3) 流体的静压强仅与其高度或深度有关,而与容器的形状及放置位置、方式无关。气体的静压强沿高度变化小,密闭容器可以认为静压强处处相等。

这里所说的作用面也称为界面,界面可以是两部分流体之间的分界面,也可以指流体与固体之间的接触面。通常情况下液体与气体之间的接触面称为自由液面。

流体中压强相等的各点所组成的面称为等压面。常见的等压面有自由液面和平衡流体中互不混合的两种流体的界面。只有重力作用的等压面应该是静止、连续的,而且连续的介质为同一均质流体的同一水平面。

1.1.3 流体动力学基础

流体动力学是研究流体运动规律的科学。在流体静力学中,压强只与所处空间位置有关。在流体动力学中,压强还与运动的情况有关。

1. 流体运动的基本概念

流体的运动是由无数流体质点的运动所组成的,且各质点之间都有力的相互作用,质点上的力和其本身的运动存在一定的规律性,找到其原因,就可以解决运动中的问题。下面介绍流体运动中的几个基本概念。

1) 流线和迹线

流线是指同一时刻不同质点所组成的运动的方向线。流体中同一瞬间有许多质点组成的曲线,该曲线上任一点的切线方向就是该点的流速方向,它形象地描绘了该瞬时整个液流的流动情况,图 1-4 所示为流场中的一条曲线,曲线上各点的速度矢量方向和曲线在该点的切线方向相同。恒定流的流动用一幅流线图就可以表示出流场的全貌;非恒定流中,通过空间点的流体质点的速度大小和方向随时间而变化,此时谈到的流线是指某一给定瞬时的各质点所组成的流线。流线的疏密可以反映出流速的大小,流线越

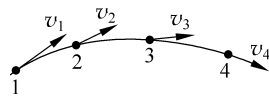


图 1-4 流场中的曲线

疏,流速越小;流线越密,流速越大。流线不能相交,也不能是折线,只能是一条光滑的曲线或直线。

迹线是指同一个流体质点在连续时间内在空间运动中所形成的轨迹线,它给出了同一质点在不同时间的速度的方向。

2) 流管、过流断面、元流、总流

在流场内做一非流线且不自闭相交的封闭曲线,在某一瞬时通过该曲线上各点的流线构成一个管状表面,称为流管。在流体中取一封闭垂直于流向的平面,在其中画出极微小面积,则其微小面积的周边上各点都和流线正交,这一横断面称为过流断面。若流管的横截面积无限小,则称为流管元,也称为元流。流管表面由流线组成,所以流体不能穿过流管侧面流出,只能从流管一端流入,而从另一端流出。过流断面内所有元流的总和称为总流。

3) 流量

流体流动时,单位时间内通过过流断面的流体体积称为流体的体积流量,一般用 Q 表示,单位为 L/s ; 单位时间内流经管道任意截面的流体质量称为质量流量,以 m_s 表示,单位为 kg/s 或 kg/h 。涉及不可压缩流体时,通常用体积流量表示;涉及可压缩流体时,则用质量流量表示。体积流量与质量流量的关系为

$$m_s = Q\rho \quad (1-11)$$

过流断面面积 dA 上各点的流速可认为均为 u 且方向与过流断面相垂直,单位时间内通过断面的流体的体积流量为

$$dQ = u dA \quad (1-12)$$

对于总流来说,通过过流断面面积 A 的流量 Q 等于无数元流流量的和,即

$$Q = \int dQ = \int_A u dA \quad (1-13)$$

由于过流断面上各点的流速不同,管轴处最大,靠近管壁处最小,所以假想一个平均流速,即总流通过过流断面各点流速均相等,大小均为过流断面的平均流速。以平均流速通过过流断面的流量应和过流断面各点流速不相等的情况下通过的流量相等。

体积流量 Q 、过流断面面积 A 与流速 V 之间的关系为

$$Q = AV \quad (1-14)$$

2. 流体运动的分类

流体的运动受其物性和边界条件的影响呈现复杂的运动情况。常根据运动的特点对流体运动进行分类。

1) 根据流动要素(流速与压强)与流行时间,可将流体的运动分为恒定流和非恒定流

(1) 恒定流。流场内任一点的流速与压强不随时间变化,而仅与所处位置有关的流体流动称为恒定流。在这种流动中流线与质点运动的轨迹相重合。以水龙头为例,打开之前处于静止状态,打开之后流速从零迅速增加到某一值且基本保持不变,这时可以认为流体各点的运动要素不再随时间而改变,因此处于恒定流状态。

(2) 非恒定流。运动流体各质点的流动要素随时间而改变的运动则称为非恒定流。水位随水的放出而不断改变的水流运动是非恒定流。非恒定流的情况较为复杂,在实际工程中,为便于分析和计算,都把接触到的流体看作恒定流。

2) 根据流体流速的变化可将流体的运动分为均匀流和非均匀流

(1) 均匀流。在给定的某一时刻,各点速度都不随位置的变化而变化的流体运动称为均匀流。流体流速的大小和方向沿流线不变。均匀流的所有流线都是平行直线;过流断面是一平面,且大小和形状都沿程不变,各过流断面上各点的流速分布情况相同,断面的平均流速沿程不变。

(2) 非均匀流。流体中相应点流速不相等的流体运动称为非均匀流。非均匀流的所有流线不是一组平行直线;过流断面不是一平面,且大小或形状沿程会改变;各过流断面上点速度分布情况不完全相同,断面的平均流速沿程会变化。在管道上扩大或缩小处的水流运动即为非均匀流。在非均匀流中,若流线几乎是平行的且接近直线的流动状态称为渐变流,过流断面可认为是平面;不能满足渐变流条件的非均匀流即为急变流。

3) 按液流运动接触的壁面情况,可将流体运动分为有压流(压力流)、无压流和射流

(1) 有压流(压力流)。流体过流断面的周界被壁面包围,没有自由面为有压流或压力流,一般供水、供热管道均为有压流。有压流有三个特点:流体充满整个管道;不能形成自由液面;对管壁有一定的压力。

(2) 无压流。流体过流断面的壁和底均被壁面包围,但有自由液面者称为无压流或重力流,如河流、明渠排水管网系统等。无压流有两个特点:流体没有充满整个管道,所以在排水管网设计时引入了充满度的概念,即污水在管道中的深度 h 与管径 D 的比值称为管道的充满度,充满度的大小在排水系统的设计计算中是很重要的参数;流体在管道或管渠中能够形成自由液面。

(3) 射流。流体经由孔口或管嘴喷射到某一空间,由于运动的流体脱离了原来限制它的固体边界,在充满流体的空间继续流动的流体运动称为射流,如喷泉和消防栓的喷射水柱等。

4) 流体流动的因素

(1) 过流断面。流体流动时和流动方向垂直的断面面积称为过流断面,单位为 m^2 。在均匀流中,过流断面为一平面。

(2) 平均流速。在不能压缩及无黏滞性的理想均匀流中,流速是不变的。但在实际工程中,流体与流道壁面之间存在摩阻力,过流断面上各点的流速是不等的,靠近壁处阻力大、流速小,靠近中心处阻力小、流速大。为了方便计算,在计算过程中通常引入平均流速的概念(图 1-2)。

3. 定态流体系统的质量守恒——连续性方程

连续性方程是由质量守恒定律得出的。质量守恒定律说明,同一流体的质量在运动过程中既不能创生也不能消失,即流体运动到任何地方,其质量应该是保持不变的。

图 1-5 所示的定态流动系统,流体连续地从 1—1' 截面进入,2—2' 截面流出,且充满全部管道。以 1—1'、2—2' 截面以及管内壁为衡算范围,在管路中流体没有增加和漏失的情况下,单位时间进入截面 1—1' 的流体质量与单位时间流出截面 2—2' 的流体质量必然相等,即

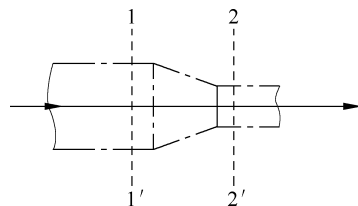


图 1-5 连续性方程的推导

$$m_{s1} = m_{s2} \quad (1-15)$$

或

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (1-16)$$

推广至任意截面为

$$m_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \cdots = \rho u A = \text{常数} \quad (1-17)$$

式(1-15)~式(1-17)均称为连续性方程,表明在定态流动系统中,流体流经各截面时的质量流量恒定。

对不可压缩流体, $\rho = \text{常数}$,连续性方程可写为

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数} \quad (1-18)$$

式(1-18)表明不可压缩性流体流经各截面时的体积流量也不变,流速 u 与管截面积成反比,截面积越小,流速越大;反之,截面积越大,流速越小。

对于圆形管道,式(1-18)可变形为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (1-19)$$

其中,在不可压缩流体在圆形管道中,任意截面的流速与管内径的平方成反比。

【例 1-1】 如图 1-6 所示,管路由一段 $\phi 89 \times 4 \text{ mm}$ 的管 1、一段 $\phi 108 \times 4 \text{ mm}$ 的管 2 和两段 $\phi 57 \times 3.5 \text{ mm}$ 的分支管 3a 及 3b 连接而成。若水以 $9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 的体积流量流动,且在两段分支管内的流量相等,试求水在各段管内的速度。

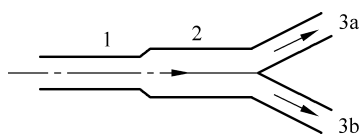


图 1-6 例 1-1 图

【解】 管 1 的内径为

$$d_1 = 89 - 2 \times 4 = 81 (\text{mm})$$

则水在管 1 中的流速为

$$u_1 = \frac{V_s}{\frac{\pi d_1^2}{4}} = \frac{9 \times 10^{-3}}{0.785 \times 0.081^2} = 1.75 (\text{m/s})$$

管 2 的内径为

$$d_2 = 108 - 2 \times 4 = 100 (\text{mm})$$

由式(1-19),则水在管 2 中的流速为

$$u_2 = u_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 1.75 \times \left(\frac{81}{100}\right)^2 = 1.15 (\text{m/s})$$

分支管 3a 及 3b 的内径为

$$d_3 = 57 - 2 \times 3.5 = 50 (\text{mm})$$

由水在分支管路 3a 及 3b 中的流量相等,则有

$$u_2 A_2 = 2 u_3 A_3$$

即水在分支管 3a 及 3b 中的流速为

$$u_3 = \frac{u_2}{2} \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2 = \frac{1.15}{2} \times \left(\frac{100}{50}\right)^2 = 2.30 (\text{m/s})$$

4. 能量守恒定律——伯努利方程

能量既不能消失也不能创生,只能由一种形式转换为另一种形式,或从一个物体转化到

另一个物体。而在转化和移动的过程中总和保持不变,流体的能量包括三种,即位能 Z 、压能 $\frac{P}{\gamma}$ 、动能 $\frac{V^2}{2g}$ 。理想流体是指没有黏性(流动中没有摩擦阻力)的不可压缩流体。这种流体实际上并不存在,是一种假想的流体,但这种假想对解决工程实际问题具有重要意义。在理想流动的管段上取两个断面 1—1、2—2,两个断面的能量之和相等,即

$$Z_1 + \frac{P}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1-20)$$

式(1-20)通常称为伯努利方程。

实际流体在流动过程中由于流体本身存在黏着力以及管道壁面有一定的粗糙程度,且流体在流动过程中由于流动阻力的存在会有能量损失,要消耗一部分能量来克服这种流动阻力,这部分损失的能量为 h 。假设从 1—1 断面到 2—2 断面流动过程中损失为 h ,则实际流体流动的伯努利方程为

$$Z_1 + \frac{P}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h \quad (1-21)$$

伯努利方程在实际工程中应用很广,下面举例说明。

【例 1-2】 如图 1-7 所示,要用水泵将水池中的水抽到用水设备,已知该用水设备的用水量为 $60\text{m}^3/\text{h}$,用水设备的出水管高出蓄水池液面 20m ,用水设备处的水压为 200kPa ,如果用直径 $d=100\text{mm}$ 的管道输送水到用水设备,试确定该水泵的扬程需要多大才可以达到要求?

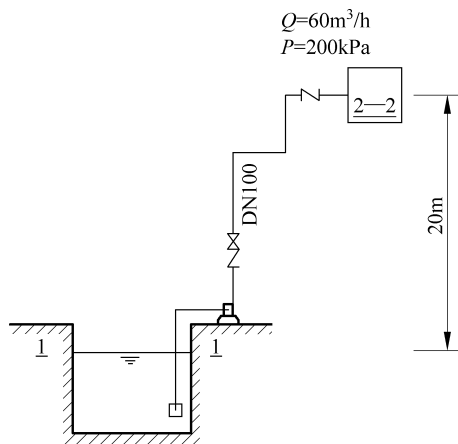


图 1-7 例 1-2 图

【解】 (1) 取 1—1 断面、2—2 断面,取蓄水池的自由液面为 1—1 断面,取用水设备出口处为 2—2 断面。

(2) 以 1—1 为基准液面,根据伯努利方程列出两个断面的能量方程

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_b = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h$$

式中: $Z_1=0$ (因为 1—1 断面为零势面); $P_1=0$ (液面暴露在大气中,所以相对压强为 0); $V_1=0$ (与 2—2 断面相比,1—1 断面的水流速度很小,可以忽略不计),则

$$Z_2 = 20\text{m}, \quad P_2 = 200\text{kPa}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D} = \frac{60 \times 4}{3.14 \times 0.01 \times 3600} = 2.12 (\text{m/s})$$

水泵的扬程为

$$h_b = 20 + \frac{150 \times 10^3}{9810} + \frac{2.12^2}{2 \times 9.81} + h = 40.92 + h$$

1.1.4 流动阻力与能量损失

流体在流动过程中会产生摩擦力,阻碍流体的流动,为了克服这种流动阻力,在流动过程中会损失一部分能量。流动阻力的大小与流体本身的物理性质、流动状况及壁面的形状等因素有关。管路系统主要由两部分组成:一部分是直管;另一部分是管件、阀门等。相应流体流动阻力分为两种:一种是与管道壁面所产生的摩擦力;另一种是由于局部断面发生改变而产生的摩擦力。

沿程阻力:流体流经一定直径的直管时由于管道壁面的内摩擦而产生的阻力。

局部阻力:流体流经管件、阀门等局部地方由于流速大小及方向的改变而引起的阻力。

1. 阻力的表现形式

图 1-8 所示为流体在水平等径直管中作定态流动。

在 1—1' 截面和 2—2' 截面间列伯努利方程:

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + W_f$$

因为是直径相同的水平管,则

$$u_1 = u_2, \quad z_1 = z_2$$

所以

$$W_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (1-22)$$

若管道为倾斜管,则

$$W_f = \left(\frac{p_1}{\rho} + z_1 g \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + z_2 g \right) \quad (1-23)$$

由此可见,无论是水平安装,还是倾斜安装,流体的流动阻力均表现为静压能的减少,仅当水平安装时,流动阻力恰好等于两截面的静压能之差。流体具有不同的黏滞性,在流动中为了克服阻力而消耗的能量称为阻力损失。阻力损失值视流体的流行形态而不同,因此在计算流体的阻力损失时,应了解水流的形态。

2. 沿程损失和局部损失

1) 沿程损失

流体在直管段中流动时,管道壁面对流体会产生一个阻碍流体运动的力,这个摩擦阻力称为沿程阻力。流体流动中为克服摩擦阻力而损耗的能量称为沿程损失。沿程阻力损失与长度、粗糙度及流速的平方成正比,而与管径成反比,通常采用达西—魏斯巴赫公式计算,即

$$h_l = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-24)$$

式中: λ ——沿程阻力系数;

L ——管长, m;

d ——管径, mm;

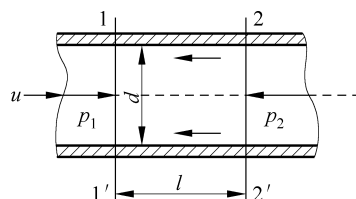


图 1-8 流体的流动阻力