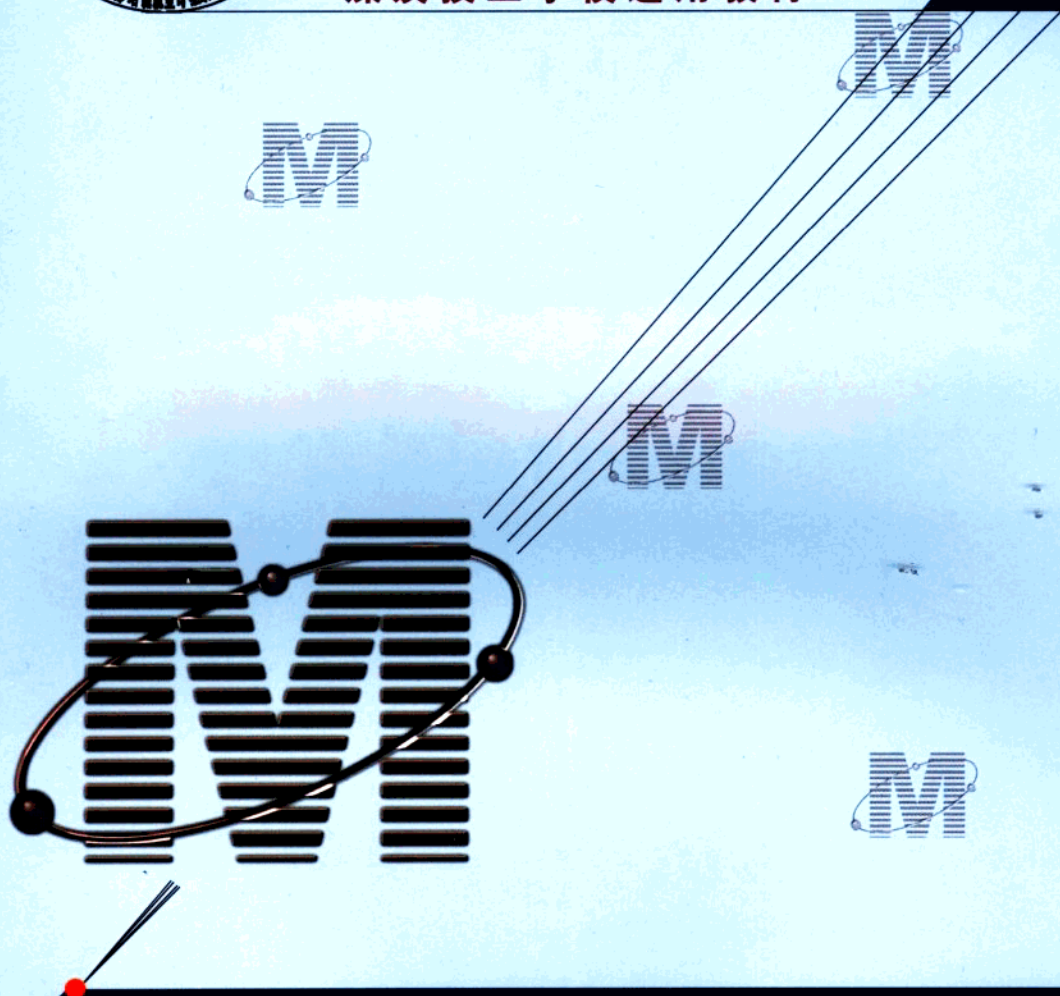




煤炭技工学校通用教材



矿山流体机械



煤炭工业出版社

PDG

全国职业培训教学工作指导委员会 煤炭专业委员会

主任委员	刘 富					
副主任委员	仵自连	刘同良	张贵金	韩文东	范洪春	刘荣林
委 员	雷家鹏	曾宪周	夏金平	张瑞清		
	(按姓氏笔画为序)					
	于锡昌	牛麦屯	牛宪民	王亚平	王自学	王朗辉
	甘志国	石丕应	仵自连	任秀志	刘同良	刘荣林
	刘振涛	刘 富	刘 鉴	刘鹤鸣	吕军昌	孙东翔
	孙兆鹏	邢树生	齐福全	严世杰	吴庆丰	张久援
	张 君	张祖文	张贵金	张瑞清	李 玉	李庆柱
	李祖益	李家新	杨 华	辛洪波	陈家林	周锡祥
	范洪春	赵国富	赵建平	赵新社	夏金平	高志华
	樊立谦	储可奎	曾宪周	程光玲	程建业	程彦涛
	韩文东	雷家鹏	樊玉亭			

前 言

为了加快煤炭技工学校的教学改革步伐，不断适应社会主义市场经济发展和劳动者就业的需要，加速煤炭工业技能型人才的培养，促进煤炭工业现代化建设和科学技术的进步，在全国职业培训教学工作指导委员会的指导下，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会，以全国煤炭技工学校“八五”教材建设规划为基础，研究制定了全国煤炭技工学校新时期教材建设规划，并列入了国家劳动和社会保障部制定的全国技工学校教材建设规划，劳动和社会保障部以《关于印发1999年度全国职业培训教材修订开发计划的通知》（劳社培就司函（1999）第15号）下发全国。这套教材59种，其中技术基础课教材43种，实习课教材16种。目前正在陆续出版发行当中。

这套教材主要适用于煤矿技工学校教学，工人在职培训、就业前培训，也适合具有初中文化程度的工人自学和工程技术人员参考。

《矿山流体机械》是这套教材中的一种，是根据经劳动和社会保障部批准的全国煤矿技工学校统一教学计划、教学大纲的规定编写的，经全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会审定，并被劳动和社会保障部认定为合格教材，是全国煤炭技工学校教学，工人在职培训、就业前培训的必备的统一教材。

本教材由大同煤炭高级技工学校郭丽颖同志主编。另外，在本教材的编写过程中，得到了有关煤炭技工学校的广大教师和煤矿企业有关工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

全国职业培训教学工作指导委员会
煤 炭 专 业 委 员 会

2006年5月16日

目 录

第一篇 流体力学基础

第一章 概述.....	1
复习思考题.....	6
第二章 流体静力学.....	8
第一节 流体静压强及其特性.....	8
第二节 流体静力学基本方程式.....	9
第三节 液体静压强的传递.....	12
第四节 压强的测量.....	13
第五节 静止液体作用在平面上的总压力.....	19
复习思考题.....	22
第三章 流体动力学基础.....	24
第一节 流体动力学的基本概念.....	24
第二节 流体的连续性方程.....	28
第三节 流体的伯努利方程.....	29
第四节 伯努利方程的意义.....	34
第五节 伯努利方程的应用.....	37
复习思考题.....	40
第四章 流体的流动和水头损失.....	41
第一节 流体运动的两种状态.....	41
第二节 流体在管路中的水头损失.....	43
第三节 管路的水力计算.....	46
复习思考题.....	49

第二篇 矿山排水设备

第五章 离心式水泵的工作理论.....	51
第一节 概述.....	51
第二节 离心式水泵的工作原理和工作参数.....	58
第三节 离心式水泵的特性曲线.....	60
第四节 比例定律和比转数.....	66
第五节 离心式水泵在管路中的工作.....	68
第六节 离心式水泵的联合工作.....	72
复习思考题.....	73

第六章 离心式水泵的构造	75
第一节 单吸多级离心式水泵	75
第二节 单吸单级悬臂式水泵	80
第三节 离心式水泵的轴向推力及平衡方法	83
复习思考题	84
第七章 离心式水泵的使用	85
第一节 离心式水泵的操作	85
第二节 离心式水泵常见故障的分析与处理	87
第三节 离心式水泵的检修	92
第四节 离心式水泵的完好标准	94
第五节 排水设备的经济运行	96
第六节 离心式水泵的性能测定	98
复习思考题	103

第三篇 矿井通风设备

第八章 矿用通风机的工作理论	104
第一节 概述	104
第二节 矿井通风机的工作原理和工作参数	107
第三节 通风机的特性曲线	109
第四节 通风机在网路中的工作	112
第五节 通风机工况点的调节	114
第六节 通风机的联合工作	115
复习思考题	117
第九章 矿用通风机的结构	118
第一节 离心式通风机的结构	118
第二节 轴流式通风机的结构	124
第三节 主要通风机的附属装置	128
复习思考题	132
第十章 通风机的使用	133
第一节 通风机的运转、维护和故障处理	133
第二节 通风机的完好标准	135
第三节 通风机的经济运行	136
第四节 通风机的性能测定	138
复习思考题	145

第四篇 矿山压缩空气设备

第十一章 活塞式空压机的工作理论	146
第一节 概述	146
第二节 热力学基础知识	148

第三节	一级活塞式空压机的理论工作循环·····	155
第四节	一级活塞式空压机实际工作循环·····	158
第五节	活塞式空压机的两级压缩·····	158
第六节	空压机的排气量、功率和效率·····	160
	复习思考题·····	164
第十二章	矿用空压机的构造·····	165
第一节	L型空压机·····	165
第二节	空压机排气量的调节·····	179
第三节	对称平衡式空气压缩机·····	181
第四节	螺杆式空气压缩机·····	183
	复习思考题·····	187
第十三章	矿山压缩空气设备的使用·····	188
第一节	活塞式空气压缩机的启动、运转和停车·····	188
第二节	空压机的维护检修·····	189
第三节	空压机常见故障分析与处理·····	190
第四节	空压机的完好标准·····	192
第五节	空压机的经济运行·····	194
第六节	空压机排气量的测定·····	196
	复习思考题·····	202

第一篇 流体力学基础

第一章 概述

一、流体力学的研究对象和学习任务

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学,是工程应用力学的组成部分之一。它采用理论分析与实践相结合的方法研究并建立起流体中的作用力、运动速度和压力之间的关系,并用所得的规律解决工程实际中的问题。

在理论研究方面,流体力学广泛采用物理学和理论力学的基本定律,但是流体在平衡和运动状态的许多问题相当复杂,难以得到严密的理论验证。因此,它还广泛地借助于实验方法,建立起自己的科学体系。所以,流体力学是理论、实践性都较强的一门科学。

流体力学是许多工程的理论基础。例如引水灌溉,水运,水能利用,输油管道,城市给排水,煤矿生产中的矿井通风、排水、水力采煤、液压传动等都以流体力学作为理论基础。

本教材采用国际单位制(简称SI制),考虑到我国以前的技术资料和使用习惯是工程单位制和物理单位制,为便于相互换算,将本教材涉及到的一些常用量的各单位制换算关系列入表1-1中。

表1-1 不同单位制的单位换算关系

物理量名称	国际单位制		工程单位制		绝对单位制		换算关系
	名称	符号	名称	符号	名称	符号	
长度(L)	米	m	米	m	厘米	cm	1米=100厘米
质量(m)	千克	kg	质量工程单位	kgf·s ² /m	克	g	1千克=10 ³ 克 1千克=0.102千克力·秒 ² /米
时间(t)	秒	s	秒	s	秒	s	1秒=1秒
力(F)	牛(顿)	N=kg·m/s ²	千克力	kgf	达因	dyn	1牛=10 ⁵ 达因 1牛=0.102千克力
压强(p)	帕斯卡	Pa=N/m ²	千克力/厘米 ²	kgf/cm ²	达因/厘米 ²	dyn/cm ²	1帕=10达因/厘米 ² 1帕=0.102千克力/厘米 ²
密度(ρ)	千克/米 ³	kg/m ³	密度工程单位	kg·s ² /m ⁴	克/厘米 ³	g/cm ³	1千克/米 ³ =10 ⁻³ 克/厘米 ³ 1千克/米 ³ =0.102千克力·秒 ² /米 ⁴
重度(γ)	牛/米 ³	N/m ³	千克力/米 ³	kgf/m ³	达因/厘米 ³	dyn/cm ³	1牛/米 ³ =10 ⁻¹ 达因/厘米 ³ 1牛/米 ³ =0.102千克力/米 ³

续表

物理量名称	国际单位制		工程单位制		绝对单位制		换算关系
	名称	符号	名称	符号	名称	符号	
动力粘度系数 (μ)	帕·秒= 牛·秒/米 ²	Pa·s= N·s/m ²	千克力· 秒/米 ²	kgf·s/m ²	泊=达因· 秒/厘米 ²	P=dyn· s/cm ²	1 帕·秒=10 泊 1 帕·秒=0.102 千克力·秒/米 ²
运动粘度系数 (ν)	米 ² /秒	m ² /s	米 ² /秒	m ² /s	施=厘米 ² / 秒	St=cm ² /s	1 米 ² /秒=10 ⁴ 施
能功 (W)	焦耳	J=N·m	千克力·米	kgf·m	尔格=达 因·厘米	Erg=dyn· cm	1 牛·米=1 焦=10 ⁷ 达因·厘米 1 牛·米=0.102 千克力·米
功率 (P)	瓦	W=J/s	千克力· 米/秒	kgf·m/s	尔格/秒= 达因· 厘米/秒	Erg/s= dyn·cm/s	1 焦/秒=1 瓦=10 ⁷ 达因·厘米/秒 1 焦/秒=0.102 千克力·米/秒

二、流体的主要物理性质

(一) 流动性

液体和气体统称为流体。流体与固体不同之处在于流体内各质点内聚力极小（即流体特别是液体能承受较大的压应力，却几乎不能承受拉应力，对剪切应力的抵抗极弱），易于流动，不能自由地保持固定的形状，只能随着容器的形状而变化，这个特性叫做流动性。

液体和气体的流动性是有差别的。当装有流体的容积形状和大小改变时，对于液体虽然形状随着容器而改变，但是体积不变；对于气体则不然，它在流动中改变自身形状的同时，体积也随着容器的改变而变化，扩散到整个容器中。

(二) 密度与重度

流体在单位体积内所具有的质量，叫做流体的密度。其代表符号用 ρ 表示。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 ρ ——流体的密度，kg/m³；

V ——流体的体积，m³；

m ——体积 V 内具有的流体质量，kg。

液体的密度几乎不随压强变化而变化，但温度对液体密度有一定影响。液体的密度可由实验测定或查找手册获取。

气体的密度随温度和压强变化而变化，而且比液体显著得多，因此要根据温度及压强条件来确定气体的密度。

流体在单位体积内所具有的重力叫做流体的重度，其符号用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

式中 γ ——流体的重度，N/m³；

G ——流体的重力，N。

流体重度与密度有下列关系

$$\gamma = \rho g$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2 。

在工程技术中, $4^\circ C$ 的蒸馏水的密度为 $1000.62 kg/m^3$, 重度为 $98100 N/m^3$ 。矿水的重度一般为 $9957 \sim 10056 N/m^3$, 有时可达 $10300.5 N/m^3$ 。

在标准状态下 (温度为 $0^\circ C$ 、大气压为 $101325 Pa$), 空气的密度为 $1.295 kg/m^3$, 重度为 $11.77 N/m^3$ 。

几种流体的重度和密度见表 1-2。

表 1-2 几种流体的重度和密度

流体名称	温度/ $^\circ C$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	重度/ $(N \cdot m^{-3})$
清水	4	1001	9810
矿井水	15	1051	10300
汽油	15	700~750	6867~7358
柴油	15	876	8584
润滑油	15	890~920	8731~9025
液压油	15	863~903	8437~8829
酒精	15	890~801	7750~7848
水银	15	13597	133416

(三) 压缩性和膨胀性

在温度不变的情况下, 流体体积随压强增加而缩小的性质, 叫做流体的压缩性。在压强不变的情况下, 流体体积随着温度升高而增大的性质, 叫做流体的膨胀性。

液体的压缩性和膨胀性很小。例如, 当温度为 $0^\circ C$ 时, 水从压强为 1 个大气压增加到 100 个大气压时, 每增加 1 个大气压, 水的密度增加约为 $\frac{1}{20000}$ 。当压强为 1 个大气压时, 在温度较低 ($10 \sim 20^\circ C$) 时, 温度每增加 $1^\circ C$, 水的密度减小约为 $\frac{15}{100000}$; 在温度较高 ($90 \sim 100^\circ C$) 时, 水的密度减小也只有 $\frac{7}{10000}$ 。因此, 在一般给水、排水工程中, 可以不考虑液体的压缩性和膨胀性。但在做管路水锤的计算或水暖系统中, 则要分别考虑液体的压缩性和膨胀性问题。

由于液体的易流动性和不可压缩性或少压缩性, 它才可以作为液压传动的介质, 迅速和正确地传递力和运动。但是, 液体有了易流动性, 也就不可避免地带来了渗漏和泄漏问题, 在液压系统工程中必须采用各种密封装置, 以防漏油。密封装置又带来了摩擦阻力, 造成能量损失。由于液体的少压缩性, 在运动状态变换时, 往往产生较大的液压冲击, 影响元件的使用寿命和系统的可靠性。这就促使我们采取适当的措施, 减少冲击以便使液压元件和液压系统有较高的效能和良好的工作条件。

易流动性是液体和气体区别于固体的基本宏观表现, 而不可压缩性 (严格地讲应为少

压缩性)则是液体区别于气体的基本宏观表现。

对于气体来说,其压缩性和膨胀性都是很大的。但是,在压强和温度变化很小的情况下,这种性质有时也可以被忽略。例如通风系统中的空气压强较小,在计算时可以看作和液体一样是不压缩流体,这样液体的平衡和运动规律性就同样适用于通风系统中。

(四) 粘性

流体的重要特点在于它的流动性,即其内部质点之间极易产生相对位移。

真实流体质点的相对运动,必然表现出切向力,又称之为内摩擦力。流体的粘性是指在流体运动时,流体内部各流层之间由于具有相对运动而产生内摩擦力以阻止流体做相对运动的性质。流体的粘性是其流动时产生阻力的内在原因。

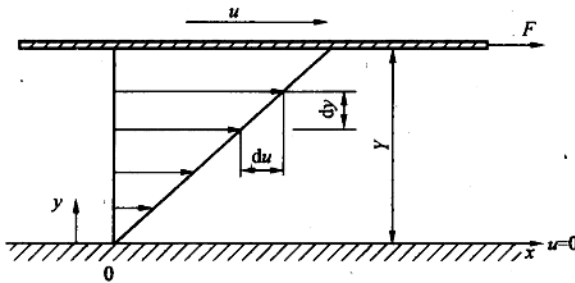


图1-1 平板间的流体切应力与速度梯度

考虑一种流体,它介于面积皆为A的两块大的平板之间,这两块平板处处以很小的距离Y分隔开,该系统原先处于静止状态,如图1-1所示。

时间 $t=0$ 时,让上面一块平板以恒定速度 u 在 x 方向上运动。紧贴于运动平板下方的薄层流体也以同一速度运动。

当 u 不太大时,板间流体将保持成薄层流动。靠近运动平板的液体比远离平板的液体具有较大的速度,且

离平板越远的薄层,速度越小,至固定平板处,速度降为零。速度变化是线性的。这种速度沿距离Y的变化称为速度分布。

各物理量关系构成牛顿粘性定律

$$\tau = \frac{F}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy}$$

式中 τ ——内摩擦应力(切应力), N/m^2 ;

F ——流体薄层间内摩擦力, N ;

A ——相邻两薄层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——流体运动速度沿距离Y的变化率(即速度梯度), $1/s$;

dy ——两相邻层间的间隔距离, m ;

du ——两相邻层间的速度差(即相对速度), m/s ;

μ ——表示流体物理性质的一个比例系数,叫动力粘度或绝对粘度, $N \cdot s/m^2$ 。

牛顿粘性定律说明流体在流动过程中流体层间所产生的切应力与法向速度梯度成正比,与流体的性质有关,与压力无关。

流体的这一规律与固体表面的摩擦力规律不同。

粘性的大小用粘度表示;在液压系统中所用的油液,主要是根据粘度来选择的。

粘度愈小,同样的切应力将造成较大的速度梯度。切应力只能是有限的值,故速度梯度也只能是有限值。

据此可得流体在圆管内流动时，速度沿半径方向的变化规律：

在紧靠壁处，由于流体质点粘附于管壁上，其速度等于零；随着离壁距离的增加，流体速度连续地增大，将出现如图1-2所示的速度分布；理想流体流动没有阻力 $\tau=0$ ， $\mu=0$ ， $\frac{du}{dy}=0$ ，出现如图1-3所示的速度图形。

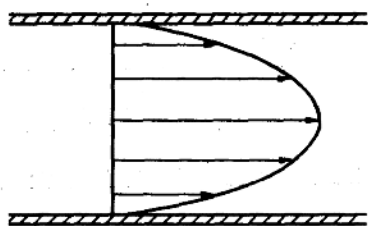


图1-2 实际流体的速度分布

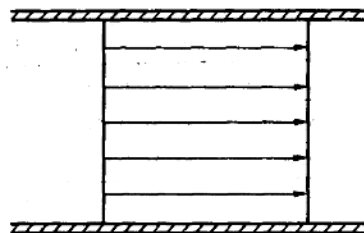


图1-3 理想流体的速度分布

粘度因流体不同而异。粘度主要有以下几种度量方法。

1. 动力粘度

当 $\frac{du}{dy}=1$ 时， $\tau=\mu$ ，即表征流体运动速度沿距离 Y 的变化率为1时的切应力，因为它反映了粘性的动力性质，所以把 μ 称之为动力粘度。

在SI制中动力粘度的单位为帕·秒（Pa·s）。

在物理单位制中，动力粘度的单位为泊（P）。

通常使用厘泊作为动力粘度的单位，并以符号cP表示之。1cP= 10^{-3} Pa·s。

2. 运动粘度

流体的动力粘度 μ 与密度 ρ 在一个标准大气压下且温度相同时的比值称为运动粘度，用 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

式中 ν ——运动粘度， m^2/s 。

ν 的常用单位为 cm^2/s ，简称“St（沱）”。“St”的百分之一为“cSt（厘沱）”。

它们的换算关系为：1St=100cSt= $10^{-4}m^2/s$ 。

运动粘度 ν 没有什么特殊的物理意义，只是因为流体力学中动力粘度和密度的比值常常在计算中出现，所以才采用 ν 这一符号代替 $\frac{\mu}{\rho}$ ，因为 ν 的单位中只有运动学的量，所以把 ν 称为运动粘度。

严格说来， μ 与 ν 都与压强和温度有关，但在一般情况下，压强的影响很小，可忽略不计，通常只考虑温度对粘性的影响。在液压系统计算及液压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，就是指这种油在50℃时的运动粘度的平均值为20cSt。

当压强为98100N/m²时，水的粘度与温度的关系见表1-3，空气的粘度与温度的关系见表1-4。表1-5列出了几种常见的润滑油的运动粘度。

表1-3 水的粘度与温度的关系

$t/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\mu \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	1.792	1.308	1.005	0.801	0.656	0.549	0.469	0.406	0.357	0.317
$\nu \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$	1.792	1.308	1.007	0.804	0.661	0.556	0.477	0.415	0.367	0.328

表1-4 空气的粘度与温度的关系

$t/^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
$\mu \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	17.25	17.47	17.7	17.95	18.2	18.42	18.65	19.12	19.6	19.97
$\nu \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$	13.34	13.76	14.19	14.64	15.1	15.54	16.01	16.95	17.95	18.8

表1-5 几种常见润滑油的运动粘度 ν (cSt)

油温	机械油				压缩机油		液压油			汽轮机油				变压器油	合成 定子 油	齿轮油		高速 机械油	
	20号	30号	40号	50号	13号	19号	20号	30号	40号	22号	30号	46号	57号			20号	30号	5号	7号
50°C	17~ 23	27~ 33	37~ 43	47~ 53			17~ 23	27~ 33	37~ 43	20~ 23	28~ 32	44~ 48	55~ 59	17.8~ 22	28.4~ 32.4	4.0~ 5.1	6.0~ 8.0		
100°C					11~ 14	17~ 21								≤ 30	≤ 49				

3. 恩氏粘度

恩氏粘度是以恩氏粘度计测出的。它是在一定的温度下，使200ml的被测油液在自重作用下从恩氏粘度计圆筒中经过孔径2.8mm的小孔流出所需要的时间 t_1 ，与20°C时同体积蒸馏水流过上述仪器所需时间 t_2 的比值。恩氏粘度用符号 $^\circ E$ 表示，即

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2}$$

式中 t_1 ——200ml 的被测液体流过恩氏粘度计小孔所需要的时间，s；

t_2 ——200ml 的蒸馏水在20°C时流过恩氏粘度计小孔所需要的时间，一般 t_2 取值为50~53，s。

工业上常用20°C、50°C、100°C作为测定恩氏粘度的标准温度，其代表符号为 $^\circ E_{20}$ 、 $^\circ E_{50}$ 、 $^\circ E_{100}$ 。

恩氏粘度 $^\circ E$ 与运动粘度 ν 之间的换算关系如下

$$\nu = 0.0731^\circ E - \frac{0.0631}{^\circ E}$$

式中 ν ——运动粘度， cm^2/s 。

□ 复习思考题

1. 液体与气体在物理性质上有哪些相同和不同之处？
2. 什么叫流体的粘性？它对流体的流动有什么作用？

3. 什么叫流体的压缩性和膨胀性？它们对流体的密度和重度有何影响？
4. 圆管中充满流动的流体，是靠管壁的流速大？还是靠管中心的流速大？为什么？
5. 某种流体在桶内的体积为 0.06m^3 ，此流体的质量为 816kg ，求此流体的密度、重力和重度？
6. 润滑油的密度 $\rho=900\text{kg/m}^3$ ，用恩氏粘度计测其 200cm^3 ，在 20°C 时流完的时间 $t_1=22\text{min}$ ，试求其运动粘度和动力粘度？

第二章 流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系，实质上是讨论流体静止时其内部压强变化的规律。

第一节 流体静压强及其特性

一、流体静压强

在一个装满水的静止水箱中，由于水的重力而使箱底、箱壁以及水的内部点都受到压力的作用。观察从静止的流体中取出一块分离体发现，这块分离体在外力作用下处于平衡状态。如图2-1所示，为了得出流体内部的应力，用一平面 ab 将此分离体分隔为I和II两部分。现在假定拿走I部分，则必须在平面 ab 上加一个代替I部分对II部分的作用力，才能使II部分保持平衡。在 ab 平面上取一微小面积 ΔA ，其上流体的作用力为 ΔP ， $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 称为面积 ΔA 的平均流体静压强。当面积 ΔA 无限缩小到 m 点，这个极限值就代表 m 点的流体静压强，以 p 表示。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

由此看出：所谓流体静压强是指流体单位面积上所受的力，又称流体的静压力，其国际单位为 N/m^2 。

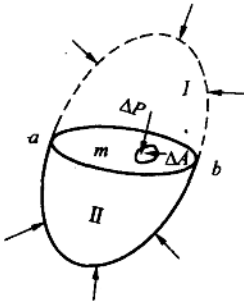


图2-1 静止流体中的分离体

二、流体静压强的特性

第一特性 流体静压强总是垂直于作用面，且指向作用面。

这个特性可以用反证法加以证明。如图2-2所示，在处于静止状态的流体中取 ab 面下面的流体为分离体。假设作用在 ab 面上某点 m 的静压强 p' 不是内向垂直于作用面，则 p' 分解为两个分量，一个是切向分量 p_r ，一个是法向分量 p_n ，若此种假设正确，则 p_r 必引起流体流动，这显然与流体处于静止状态的前提不符。因此， p_r 只能等于零，即力 p' 只能与 ab 面垂直。另外，根据流体不能承受拉力的特性，可以得出结论： p' 的方向只能是向着作用表面的内法线方向，即图2-2中 p 的方向。

第二特性 在静止流体中任意一点所受各方向的静压强的大小均相等。

如图2-3所示，在静止的流体中，任取一点 A ，假设 A 点左边压强 p_1 大于右边压强 p_2 ，则 a 点流体必向右移动，这就与静止流体的前提不符，因此 $p_1 = p_2$ 。用此方法可以证明 A 点处任意方向的静压强都相等。用测压计对任意一点测其各方向压强，可得其值为一定值。

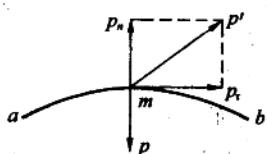


图2-2 流体静压强的方向

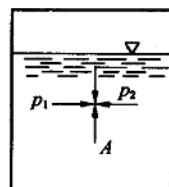


图2-3 流体内任一点的静压强

第二节 流体静力学基本方程式

一、流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式是研究静止流体中某点的流体静压强的大小，以及流体在平衡时静压强分布规律的数学表达式。

在盛有静止流体的容器中，流体的表面为自由面（即液体和外界气体之间或与真空之间的分界面）。设作用于流体自由面上的静压强为 p_0 （可等于标准大气压 p_a ，也可不等于标准大气压），现在来研究自由面以下深度 h 处 A 点的流体静压强 p 。

在自由面深度 h 处取一点 A ，假设绕 A 点作一小圆周，其圆周围成的水平面积为 ds ，然后过圆周上各点向上作垂线，所形成的圆柱面和自由面相交，如图2-4所示，结果得到一底面积为 ds ，高度为 h 的垂直圆柱体，把这个圆柱体作为一个分离体从周围流体中分离出来，并放大，来分析它的平衡条件。

作用在它上面的力有：

- (1) 垂直向上作用于底面的总压力 $P = pds$ ；
- (2) 垂直向下作用于上顶面上的总压力即自由面上的力 $P_0 = p_0ds$ ；
- (3) 圆柱体的自重 $dG = \gamma hds$ 此力为垂直向下；
- (4) 作用于圆柱体四周水平方向的侧向压力。

作空间直角坐标系（图2-4），并将作用于圆柱体上的各力均投影在坐标轴上。因为流体是静止的，作用于圆柱体侧面上的总压力在各坐标轴上的投影之和必然等于零。 p 、 p_0 和 dG 在 ox 轴和 oy 两坐标轴上的投影也必然等于零，因为它们是垂直于这两个坐标轴的。因此，欲使分离出来的圆柱体保持平衡，只要 p 、 p_0 和 dG 在 oz 轴上的投影之和等于零即可，其平衡方程式为

$$pds - p_0ds - \gamma hds = 0$$

$$\text{即} \quad p = p_0 + \gamma h \quad (2-2)$$

式中 p ——深度为 h 处的流体静压强， N/m^2 ；

p_0 ——作用于自由面上的静压强， N/m^2 ；

γ ——流体的重度， N/m^3 ；

h ——所研究的点与自由面之间垂直距离， m 。

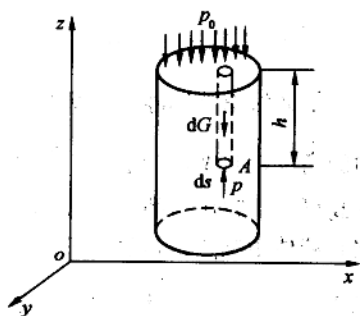


图2-4 静止流体中深度 h 处的压强

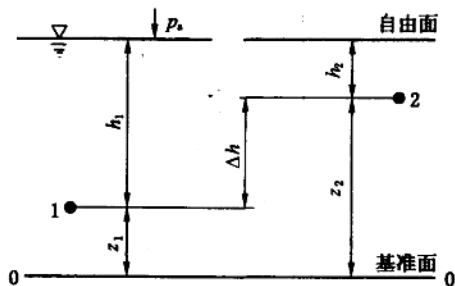


图2-5 静止流体中两点的压强

式(2-2)就是流体静力学基本方程式。它说明在静止的流体中,某点静压强 p 的大小,等于作用在自由面上的外压强 p_0 和由流体自重形成的余压强 γh 之和。

如果自由面上所受的外压强 p_0 为一定值时,则流体内部某一点的流体静压强 p 与其所在的深度 h 成正比。

流体静力学基本方程式,还可以表示为另一种形式。

如果在静止的流体中任意取两点如图2-5所示,1点至自由面的垂直高度为 h_1 ,2点至自由面的垂直高度为 h_2 ,1和2两点至选定的基准面0-0的垂直高度为 z_1 和 z_2 ,由式(2-2)知,1和2两点的流体静压强分别为

$$p_1 = p_0 + \gamma h_1$$

$$p_2 = p_0 + \gamma h_2$$

式中 p_1 ——1点的静压强, N/m^2 ;

p_2 ——2点的静压强, N/m^2 ;

p_0 ——流体自由面上的压强(此处 $p_0 = p_a$), N/m^2 。

由上述两式得1,2两点静压强差为:

$$p_1 - p_2 = \gamma(h_1 - h_2)$$

即

$$p_1 - p_2 = \gamma \Delta h$$

因为

$$\Delta h = z_2 - z_1$$

所以

$$p_1 - p_2 = \gamma(z_2 - z_1)$$

即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (2-3)$$

由于1,2两点是任意选取的,故可将上述关系推广到整个流体,得出具有普遍意义的规律,即

$$z + \frac{p}{\gamma} = C(\text{常数}) \quad (2-4)$$

这就是流体静力学基本方程式的另一种形式。表示在同一种静止流体中,不论哪一点的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 总是一个常数。

下面讨论液体静力学基本方程式 $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$ 的物理意义。 z 为某点的位置相对于基准面的高度,叫做位置水头。 $\frac{p}{\gamma}$ 是某点在压强 p 作用下沿测压管所能上升的高度(说明以液柱高可以反映压力的大小),这个高度叫做压强水头。所谓测压管是一端和大气相通,另一端和液体中某点相接的管子,如图2-6。图中两个测压管的连接点1和2处,位置水头与压强水头之和 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ 与 $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ 叫做测压管水头,它表示测压管液面相对基准面的高度,且 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ 。由于1和2两点是任意选取的,所以在同一容器的静止液体中,即使各点的

位置水头 z 和压强水头 $\frac{p}{\gamma}$ 互不相同, 但各点的测压管水头必然相等。这就是液体静力学基本方程式在水头概念上的解释。

液体静力学基本方程式, 还可以从能量上加以解释。重力为 G 的物体, 从基准面上移高度 z 后, 物体就有势能 Gz , 而单位重量物体的势能为 $\frac{Gz}{G} = z$ 。所以, 我们称 z 为单位重量的液体质点从基准面算起的位置势能, 又称比位能。

$\frac{p}{\gamma}$ 也是一种势能, 从图2-6中可以看出, 1点的相对

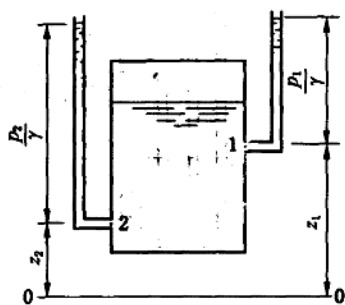


图2-6 测压管水头

压强 p_1 能使该处的液体在玻璃管中上升高度 $\frac{p_1}{\gamma}$, 2点的相对压强 p_2 能使该处的液体在玻璃管中上升高度 $\frac{p_2}{\gamma}$ 。这就是说, 由于压强的作用, 使液体质点有了势能, 所以称 $\frac{p}{\gamma}$ 为单位重量液体质点的压强势能, 又称比压能。

$z + \frac{p}{\gamma}$ 为单位重量液体质点的位置势能与压强势能之和, 称它为单位重量液体质点的总势能, 又称比势能。所以, 从能量上解释 $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$ 的意义, 就是静止液体单位重量的各个液体重点的总势能都相等。

此外, z 表示一个几何高度, $\frac{p}{\gamma}$ 表示一个液柱高度, 它们都可以用长度单位来度量。

二、等压面

在静止液体中, 压强相等的点所组成的面, 叫做等压面。

由流体静力学基本方程式 $p = p_0 + \gamma h$ 可知, 若 $p_0 = \text{常数}$, 同一种液体 γ 为常数, 则液体中其静压强的大小决定于深度 h 。因此, 在仅受重力作用的静止液体中, 对于同一深度 h 的液面静压强相等, 这个面就是等压面。

等压面的方程式为: $p = C$ (常数)

显然, 液体的自由面是等压面, 因为自由面上一切点都受到同一个表面压强。从这点出发, 同样利用流体静力学基本方程式 $p = p_0 + \gamma h$ 可以得到如下结论: 在均质的只受重力作用的静止液体中, 各水平面都是等压面。

这里必须注意: 上述讨论是在同种液体处于静止、连续的条件下进行的。因此, 如不能同时满足静止、同种、连续这3个条件的液体中的水平面就不是等压面。如图2-7a中的 b 和 c 两点, 虽属静止、同种, 但不连续, 中间被气体隔开了, 所以, 同在一个水平面上的 b 和 c 两点压强不相等。又如图中的 c 和 d 两点, 虽属静止、连续, 但不同种, 所以, 同在一个水平面的 c 和 d 两点压强也不相等。又如图中2-7b中的 e 和 f 两点, 虽属同种、连续, 但不静止, 管中是流动的液体, 所以, 同在一个水平面上 e 和 f 两点压强也不相等。而在图2-7a中的 a 、 c 两点同时满足静止、同种、连续3个条件, 所以 a 、 c 两点的压强是相等的。