

建材技工学校系列教材

水泥工业热工基础

郑明继 主编

武汉工业大学出版社

建材技工学校系列教材

水泥工业热工基础

郑明继 主编

武汉工业大学出版社

鄂新登字 13 号

内 容 提 要

本书为建材技工学校水泥专业教材,主要包括:流体力学基础;燃料及其燃烧计算;干燥过程等。本书按照最新教学大纲编写,理论联系实际,采用法定计量单位。

本书还可用作水泥技工培训教材或供水泥厂技术工人参考。

图书在版编目(CIP)数据

水泥工业热工基础/郑明继著. —武汉:武汉工业大学出版社,1996.6 重印
ISBN 7-5629-0740-4

I. 水… II. 郑… III. 水泥-化学工业-热工学 IV. TQ172.6

武汉工业大学出版社出版发行

(武汉市武昌珞狮路 14 号)

各地新华书店经销

武汉工业大学出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:9.5 插页:1 字数:209 千字

1993 年 5 月第一版 1996 年 6 月第四次印刷

印数:26001—36000 定价:9.50 元

(如有印装质量问题,请向承印厂调换)

序

当前,我国国民经济正以高速度向前发展,建材工业在国民经济发展中占有举足轻重的地位。邓小平同志指出:“科学技术是第一生产力”。建材工业要大发展,科技教育工作必须走在前面,培养具有较高科学文化知识和生产技术的社会主义劳动者,乃是百年大计。

劳动部《关于深化技工学校教育改革的决定》中指出:“大力发展和办好技工学校是开发劳动者职业技能,提高劳动者素质,发展和完善劳动市场的有效途径”。近年来,国家建材局人才开发司根据劳动部对技工学校深化教育改革的有关精神,结合本行业的实际情况,深入开展了建材技工学校的教育改革,提出了《关于修改技工学校建材类专业教学计划的意见》;并组织了技工学校建材类各主要专业(工种)的教学计划和教学大纲的修订工作。

1991年,在福州召开的全国建材技工学校教育工作会议第一届年会上,与会代表们认为,原来使用的水泥技工学校内部油印讲义已经不适应建材工业新技术的发展和技工学校教学工作的实际需要,建议重新编写教材。国家建材局教材办公室在认真研究了代表们的建议后,决定组织人员按照新教学计划、教学大纲的要求,重新编写一套技工学校水泥专业系列教材,具体编审组织及出版工作委托武汉工业大学出版社负责实施。

经过各位编者和武汉工业大学出版社全体同志的共同努力,技工学校水泥专业系列教材(共8本)于1993年秋季正式出版发行了。新版教材正式出版后,受到了广大使用单位的欢迎,不到三个月时间,已大部分售完。为了满足广大使用单位的需求,进一步提高教材的质量,由武汉工业大学出版社组织有关编者、图书审读员、责任编辑对教材进行了审读,并收集了读者意见,对初版教材进行了勘误修订,预计1994年将修订重印后奉献给广大读者。

技工学校水泥专业系列教材(共8本)包括:《水泥生产基本知识》、《粉磨工艺与设备》、《水泥煅烧工艺与设备》(上、下册)、《水泥工业热工基础》、《热工仪表与热工测量》、《水泥生产辅助机械设备》、《化验室基本知识及操作》(上册),它以该专业(工种)新修订的教学计划和教学大纲为依据,按照培养目标的要求设置理论课课程;教学内容以应用知识为主,合理精减、合并、调整了理论课内容,删除了原讲义中冗繁和陈旧的部分章节,增加了反映新技术、新工艺的教学内容;有些课程(如化学分析课),还编写了实习操作教材。总之,该系列教材体现了理论课要适应操作技能培训需要的原则。

为了避免不必要的重复劳动,经研究决定,今后不再另编写水泥高级工培训教材,该系列教材基本上能满足高级工和技师培训的需要,请各使用单位根据高级工和技师培训的实际需要,选择相应的内容进行教学。

该教材的成功问世,得到了编者、审稿人、编辑等同志的大力支持,在此表示衷心的感谢!

各单位在使用该教材的过程中,若有何建议和要求,请及时反馈到国家建材局教材办公室和武汉工业大学出版社,以便再版时修改,使该教材日臻完善。

国家建材局教材办公室

1993年12月

前 言

建材技工学校水泥专业通用教材《水泥工业热工基础》，是根据 1990 年 12 月审定的“全国建材技工学校水泥专业教学计划和教学大纲”编写的。本教材是水泥专业的一门技术基础理论课教材，主要介绍了流体力学基础、燃料与燃烧计算、传热学和干燥过程，教学时数 96 学时。

本书第一章由国家建材局江油水泥技工学校刘继文编写，第二章、第三章、第四章由国家建材局江油水泥技工学校郑明继编写。全书由郑明继主编。

本书由武汉工业大学李应开教授主审，并提出了许多宝贵的意见。在编写、审稿和定稿过程中得到了武汉工业大学出版社王忠林副编审的帮助和指教。国家建材局江油水泥技校郭汉祥同志在教材编写理论方面给予了指导帮助，卓衍勋同志对教材的图表印制给予了大力支持。本书的完成还得到国家建材局人才司职教处杨彩霞副处长、合肥水泥研究设计院宋德昌高级工程师以及国家建材局江油水泥技校各级领导和水泥工艺教研组全体同仁们的热情支持和帮助。在此，一并表示衷心地感谢。

由于我们水平有限，加之时间短促，书中缺点和错误在所难免，望读者不吝批评指正。

编 者

1993 年 1 月

目 录

第一章 流体力学基础	(1)	四、燃烧的估计法	(57)
第一节 流体的物理性质	(1)	五、空气过剩系数(α)的计算	(57)
一、流体的基本特性	(1)	六、燃烧温度的计算	(60)
二、流体的密度	(1)	七、提高实际燃烧温度的措施	(63)
三、流体的压缩性和膨胀性	(2)	思考题与习题	(64)
四、流体的粘滞性	(3)	第三章 传热学	(65)
第二节 流体静力学基础	(6)	第一节 概述	(65)
一、流体静压力及其特征	(6)	第二节 传热的基本方式	(65)
二、流体静力学基本方程式	(7)	第三节 传导传热	(66)
第三节 流体动力学基础	(8)	一、导热的基本概念和基本定律	(66)
一、流体动力学的基本概念	(8)	二、导热系数	(68)
二、流体动力学基本方程式	(14)	三、平壁稳定导热	(70)
第四节 流动阻力及管路计算	(18)	四、圆筒壁稳定导热	(74)
一、摩擦阻力损失	(18)	第四节 对流传热	(77)
二、局部阻力损失	(19)	一、对流传热的物理过程	(77)
三、管路计算	(21)	二、影响对流传热的因素	(78)
第五节 颗粒流体力学	(23)	三、对流传热的基本定律(牛顿冷却定律)	(79)
一、颗粒在流体中运动时的阻力	(23)	四、对流传热系数	(79)
二、颗粒在流体中的垂直沉降速度	(23)	五、对流传热计算	(82)
三、固体颗粒流态化	(24)	第五节 辐射传热	(87)
第六节 流体输送设备	(27)	一、辐射传热的基本概念	(87)
一、烟囱	(27)	二、辐射传热的基本定律	(89)
二、风机	(30)	三、固体间的辐射传热计算	(93)
思考题与习题	(40)	四、气体辐射	(100)
第二章 燃料及燃料燃烧计算	(43)	五、火焰辐射	(105)
第一节 概述	(43)	第六节 综合传热	(106)
一、燃料的分类	(43)	一、一种气体通过平壁向另一种气体的传热	(106)
二、水泥工业对燃料的要求	(43)	二、一种气体通过圆筒壁向另一种气体的传热	(107)
第二节 燃料的主要性质	(44)	三、窑体表面散热计算	(109)
一、燃料的组成及其性质	(44)	思考题与习题	(111)
二、燃料的发热量	(47)	第四章 干燥过程	(113)
三、燃料的其它热工特性	(50)	第一节 概述	(113)
第三节 燃烧计算	(53)	第二节 湿空气的性质	(113)
一、燃烧计算的目的、内容和基本概念	(53)		
二、燃烧的分析计算法	(54)		
三、燃烧的近似计算法	(56)		

一、湿度	(113)	思考题与习题	(132)
二、湿空气的密度	(116)	各章习题参考答案	(133)
三、湿空气的热含量	(116)	主要参考文献	(134)
四、干球温度、湿球温度和绝热饱和温度	(116)	附录	(135)
五、露点	(117)	一、工程单位制和国际单位制的换算	(135)
第三节 湿空气的 I - x 图	(118)	二、烟气的物理参数	(136)
一、湿空气 I - x 图的构成	(118)	三、干空气的物理参数($p=1.01\times 10^5\text{Pa}$)	(136)
二、湿空气 I - x 图的应用举例	(120)	四、在饱和线上水蒸气的物理参数	(137)
第四节 干燥过程的物料平衡和热量平衡	(124)	五、在饱和线上水的物理参数	(138)
一、湿物料水分的表示方法	(124)	六、空气的相对湿度表	(139)
二、物料平衡	(125)	七、湿空气 I - x 图(低温,总压 99.321kPa)	(145)
三、热量平衡	(125)		
四、干燥过程的图解计算	(127)		
第五节 干燥过程与干燥速率	(129)		
一、物料中水分的结合形式	(129)		
二、对流干燥过程	(130)		
三、干燥过程的阶段	(130)		
四、影响干燥速率的因素	(131)		

第一章 流体力学基础

液体和气体统称为流体。流体力学是研究流体的平衡及运动规律的科学。

流体力学知识广泛应用于水泥生产的各个方面,如水泥窑炉中气体的流动、废气的排放、粉磨物料的分级、粉体的气力输送、收尘器内气体的运动等都和流体力学密切相关。因此,了解和掌握流体力学的基本原理,对分析和控制水泥生产过程具有非常重要的意义。

第一节 流体的物理性质

一、流体的基本特性

液体和气体都是内部分子之间的内聚力极微小的物体,它们对于拉力和缓慢变形没有抵抗能力,所以都具有流动性。这是液体和气体都具有的共同特征。

液体和气体的主要差别在于受压后的表现。液体受压后体积变化很小,在一般情况下可以忽略不计,因此液体常被称为不可压缩流体。而气体受压后体积变化较大,所以通常称气体为可压缩流体。但在工程上,若压力不太大,气体体积变化较小时,也可近似看作不可压缩流体。如水泥工业窑炉内的烟气可以作为不可压缩流体来研究,这样可使问题大为简化。

需要指出的是,因为流体具有流动性,所以流体没有固定的形状。液体和气体都随着容器形状的不同而改变自身的形状。不过,液体和气体流动性存在差别。当装有液体的容器形状和大小改变时,液体形状可随容器形状而改变,但其体积不变;对于气体则不同,它在流动中改变自身形状的同时,它的体积也随着容器的容积的变化而改变,扩散到整个容器中。

二、流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度,用 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。

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

式中 m —— 流体的质量(kg);

V —— 流体的体积(m^3)。

在标准状态下,气体的密度可写为:

$$\rho_0 = \frac{M}{V_0} \quad (\text{kg/Bm}^3) \quad (1-2)$$

式中 V_0 —— 在标准状态下气体的体积(Bm^3);

M —— 气体的质量(kg)。

流体的密度通常由实验测得。常见液体的密度及标准状态下常见气体的密度见表 1-1。

在水泥生产过程中,会经常遇到流体的混合物,例如水泥窑内的烟气(含 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 CO 及水蒸气等)。对于气体混合物的密度,可按下式计算:

$$\rho_m = \frac{1}{100}(\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \cdots + \rho_n x_n) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \rho_i x_i \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-3)$$

式中 ρ_m —— 混合气体的密度(kg/m^3);

ρ_i —— 混合气体中各相应气体的密度(kg/m^3);

x_i —— 混合气体中各种气体的体积百分数(%)。

液体混合物的密度,按下式计算:

$$\frac{1}{\rho_{ml}} = \frac{1}{100} \left(\frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \right) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-4)$$

式中 ρ_{ml} —— 混合液体的密度(kg/m^3);

ρ_i —— 混合液体中各相应液体的密度(kg/m^3);

a_i —— 混合液体中各种液体的质量百分数(%)。

几种常见流体的密度值

表 1-1

流 体 名 称		密度 (kg/m^3)	测定条件 ($^{\circ}\text{C}$)	流 体 名 称		密度 (kg/Bm^3)	测定条件
液 体	水	1000	4	气 体	空气	1.293	101325Pa, 0 $^{\circ}\text{C}$
	海水	1020	15		氧气 O_2	1.429	
	汞	13600	15		氮气 N_2	1.251	
	松节油	873	15		氢气 H_2	0.090	
	汽油	680~790	15		一氧化碳 CO	1.250	
	煤油	790~820	15		二氧化碳 CO_2	1.977	
	重油	900~950	15		二氧化硫 SO_2	2.927	
	苯 C_6H_6	900	0		甲烷 CH_4	0.717	
	无水乙醇 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	790	15		烟气	1.30~1.34	

[例 1-1] 某水泥回转窑窑尾废气的体积百分比如下: CO_2 28.8%, O_2 1.0%, CO 0.2%, N_2 70.0%。求此废气标态时的密度。

[解] 上述几种气体的标态密度可由表 1-1 中查得,废气的标态密度按(1-3)式:

$$\begin{aligned} \rho_{m,0} &= \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \rho_{i,0} x_i \\ &= \frac{1}{100} (1.977 \times 28.8 + 1.429 \times 1.0 + 1.250 \times 0.2 + 1.251 \times 70.0) \\ &= 1.462 (\text{kg}/\text{Bm}^3) \end{aligned}$$

三、流体的压缩性和膨胀性

(一)流体的压缩性

流体在外力作用下改变自身体积的特性,称为流体的压缩性。通常用压缩系数 β_p 表示流体的压缩性。它表示在温度一定时,压力每增加 1Pa 时,流体体积的相对变化。用式子表示为:

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1/\text{Pa}) \quad (1-5)$$

式中 V —— 流体的体积(m^3);

$\frac{dV}{dp}$ —— 流体体积相对于压力的变化(m^3/Pa);

式中负号表示压力增加时,流体体积减小。

液体的压缩性都较小,例如水在 0 $^{\circ}\text{C}$ 5 个大气压时的压缩系数为 $5.41 \times 10^{-10} 1/\text{Pa}$ 。所以除压力变化极大的情况外,一般都可以将液体看作不可压缩流体。

与上述情况相反,气体的情况比液体复杂得多。它的压缩性是很大的,其压缩性随压力升

高而增大。空气在标态下的压缩系数是水的 2 万倍。

(二) 流体的膨胀性

流体受热(或冷却)时,会改变自身体积的特性称为流体的膨胀性。通常用体积膨胀系数 β_T 来表示。它表示温度升高 1K 时,流体体积的相对变化。用式子表示为:

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1/K) \quad (1-6)$$

式中 $\frac{dV}{dT}$ —— 流体体积相对于温度的变化(m^3/K)。

液体的膨胀性也很小。例如水在 15°C 左右时的膨胀系数为 $1.5 \times 10^{-4} 1/K$,也就是说水温升高 1K,其体积只改变 0.015%,在工程上对这种较小的体积变化是可以不考虑的。

气体的膨胀性比液体大得多。在压力和温度发生变化时,气体体积的变化比较显著。如果气体压力不太高而温度又不太低时,则气体近似遵守理想气体定律:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1-7)$$

或者

$$p = \frac{m}{V} \frac{R}{M}T = \rho \frac{R}{M}T \quad (\text{Pa}) \quad (1-8)$$

式中 m —— 气体的质量(kg);

M —— 气体的千摩尔质量(kg/kmol);

p —— 气体的压力(Pa);

V —— 气体的体积(m^3);

ρ —— 气体的密度(kg/m^3);

T —— 气体的温度(K);

R —— 通用气体常数,其值为 $8314.3(\text{J}/\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

根据上式可以求得密度随压力、温度的变化关系:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (\text{kg}/m^3) \quad (1-9)$$

[例 1-2] 利用例 1-1 所列废气组成计算该废气温度为 527°C , 负压为 300Pa 时的密度(设当地大气压为 99321Pa)。

[解] 废气标态密度由例 1-1 可知,为:

$$\rho_0 = 1.462 \text{kg}/\text{Bm}^3$$

废气温度为 527°C , 负压为 300Pa 时的密度:

$$\begin{aligned} \rho_t &= \rho_0 \frac{p_0 + p_t}{p_0} \frac{T_0}{T_0 + t} \\ &= 1.462 \frac{99321 - 300}{99321} \frac{273}{273 + 527} \\ &= 0.497 (\text{kg}/m^3) \end{aligned}$$

四、流体的粘滞性

凡流体都具有流动性,但各种流体的流动性可以有很大的差别。流动性差的流体,也就是比较粘滞的流体,流动进行的较缓慢。所以流体的粘滞性是影响流体流动的一个重要因素。

处于管道中流动的流体,其速度分布如图 1-1 所示。管道中心的流体流速最大,愈靠近管

壁流体流速愈小,紧贴管壁的一层流体,其流速为零。下面分析这种现象出现的原因。

通过对物质的分子理论研究表明,一切物质均由分子组成,分子之间有引力存在,固体中分子间引力最大,液体次之,气体间分子引力最小。当流体从固体壁面流过时,由于固体表面不平整以及固体壁面的分子引力作用,固体壁面对流体质点产生约束,使这部分流体质点停滞不前。离开固体壁面越远,这种约束越小,到一定距离时,固体表面的这种约束力就为零。但流体质点之间的分子引力及分子热运动产生的动量交换依然存在,即流体质点之间的约束力依然存在。于是紧贴固体壁面的一层静止的流体质点约束着与其相邻的运动流体的质点,速度慢的一层流体质点约束相邻速度较快的一层流体。这样层层影响,相互制约。在流体内部存在速度差,必然产生摩擦力,这种内摩擦力也称剪应力。

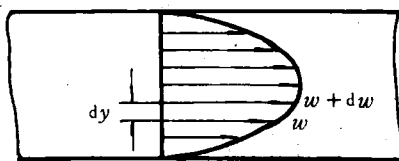


图 1-1 管道中流体流速分布图

牛顿根据实验证实,运动着的流体的内摩擦力的大小与相邻两层流体的接触面积成正比,与流体的速度梯度成正比,如图 1-2 所示。写出数学式:

$$f_v = - \mu F \frac{dw}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1-10)$$

或
$$\tau = \frac{f_v}{F} = - \mu \frac{dw}{dy} \quad (\text{Pa}) \quad (1-11)$$

式中 f_v —— 相邻两层流体之间的内摩擦力或称剪力(N);

F —— 相邻两层流体之间的接触面积(m^2);

$\frac{dw}{dy}$ —— 相邻两层流体之间的速度梯度($1/\text{s}$);

μ —— 比例系数,称为绝对动力粘度系数,简称粘度系数或粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

τ —— 单位面积上的剪力,也称剪应力(Pa)。

式中的负号表示内摩擦力与流体运动方向相反。

由上式可知,粘度

$$\mu = - \frac{\tau}{\frac{dw}{dy}} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-12)$$

所以将粘度 μ 可以看作是速度梯度为 1 时,单位接触面积上的内摩擦力,它表示出流体的粘滞性,其大小随流体性质而异。

粘度 μ 的法定计量单位为帕秒($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

流体的粘度与温度有关。由于液体和气

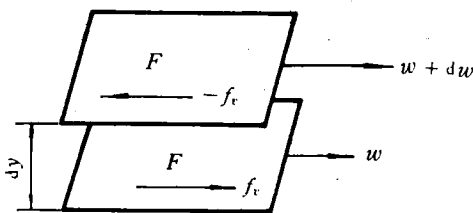


图 1-2 内摩擦力的推导

体产生内摩擦力的主要原因不同,所以它们对温度的反映也不同。液体分子之间的距离较近,对液体内摩擦力起决定性作用的是分子间引力。温度升高时分子之间的距离变大,引力减小,粘度下降。气体内摩擦力产生的主要原因是分子的热运动引起的动量交换。温度升高时,气体分子热运动加强,动量交换增加,因而粘度增大。

在工程上有时以运动粘度来表示流体粘度的大小,运动粘度为流体的绝对动力粘度系数与流体密度之比,用符号 ν 表示:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-13)$$

流体的粘度通常由实验测定得出。

水的动力粘度与温度的关系可近似用下式表示:

$$\mu = \frac{1.775 \times 10^{-3}}{1 + 0.0387t + 0.000221t^2} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-14)$$

式中 μ —— 温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

t —— 水的温度($^\circ\text{C}$)。

气体的动力粘度和温度的关系可近似用下式表示:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{273 + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-15)$$

式中 μ —— 温度为 $t^\circ\text{C}$ 时气体的粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

μ_0 —— 0°C 时气体的粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

对于空气: $\mu_0 = 1.72 \times 10^{-5}$;对于烟气: $\mu_0 = 1.578 \times 10^{-5}$;

T —— 气体的温度(K);

C —— 与气体性质有关的常数:

对于空气: $C = 122$;对于烟气: $C = 173$ 。

在 101325 Pa 下水和空气的密度 ρ 、粘度 μ 及运动粘度 ν 与温度的关系

表 1-2

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	水			空 气		
	密 度 ρ (kg/m^3)	粘度 $\mu \times 10^6$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动粘度 $\nu \times 10^6$ (m^2/s)	密 度 ρ (kg/m^3)	粘度 $\mu \times 10^6$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动粘度 $\nu \times 10^6$ (m^2/s)
-20	—	—	—	1.39	15.6	11.3
-10	—	—	—	1.34	16.2	12.1
0	999.3	1795	1.80	1.29	16.8	13.0
10	999.3	1304	1.30	1.25	17.4	13.9
20	997.3	1005	1.01	1.21	18.2	14.9
40	991.5	655	0.661	1.12	19.1	17.0
60	982.6	474	0.482	1.06	20.3	19.2
80	971.8	357	0.368	0.99	21.5	21.7
100	959.1	283	0.296	0.94	22.9	24.5

石油产品(如重油)的粘度,一般用恩氏粘度来表示,符号 $^{\circ}\text{E}$ 。它是 200mL 试液,在测定温度下,从恩氏粘度计流出所需要的时间 $\tau(\text{s})$ 与同体积的蒸馏水在 20°C 时,从恩氏粘度计流出所需要的时间 $\tau_0(\text{s})$ 的比值,即:

$$^{\circ}\text{E} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (1-16)$$

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

$$\nu = (0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}}) \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-17)$$

当 $^{\circ}\text{E} > 10$ 时, 可用下列简式计算:

$$\nu = 0.0741^{\circ}\text{E} \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-18)$$

由于流体粘度计算比较复杂, 因此将水和空气及常见气体的粘度分别列在表 1-2 及图 1-3 中, 以便使用时查找。

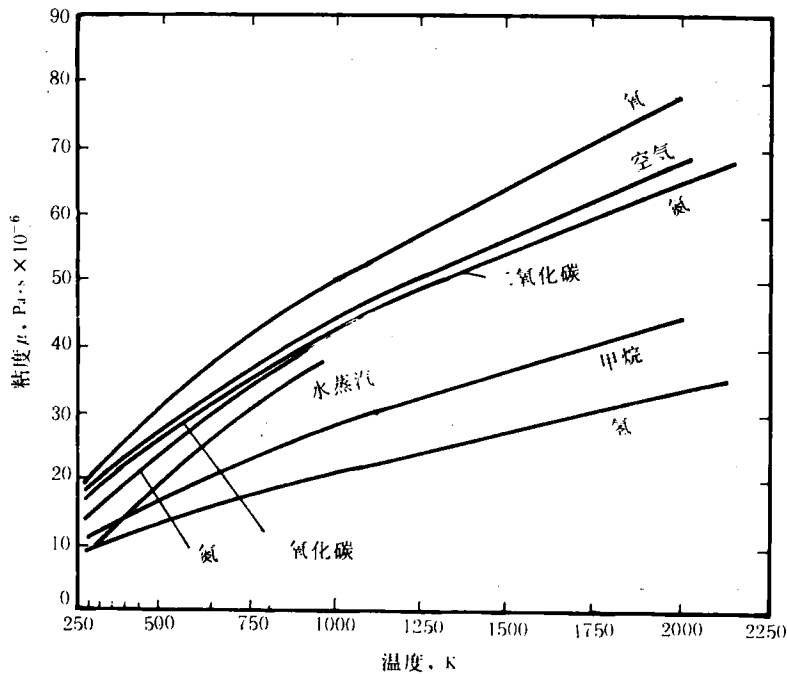


图 1-3 几种常见气体的粘度与温度的关系

最后指出, 剪应力符合式(1-11)的流体称为牛顿型流体, 通常遇到的流体, 如水、各种低粘度油类、各种气体均属于这一类。不符合式(1-11)的流体, 如泥浆、高粘度油类等则属于非牛顿型流体, 对这一类流体流动的研究, 属于流变学的范畴, 这里不进行探讨。

第二节 流体静力学基础

一、流体静压力及其特征

(一) 流体的静压力

流体的重力及分子热运动使处于相对静止状态的流体内部以及流体与固体壁面之间存在着垂直于接触面的作用力, 其大小与接触面积成正比。单位面积上的流体作用力称为流体静压力, 用 p 表示, 单位为 N/m^2 或 Pa 。确切地讲, 流体静压力应该是作用在一点的压力。在相对静止的流体内部任取一团任何形状的流体如图 1-4 所示。假设用截面 CD 将其分割为两部分, 然后将其上面的那部分移去。这时在截面 CD 上以作用力 P 来代替取去的那一部分流体对剩下的另一部分流体的作用。在截面 CD 上某点 A 的周围取一面积 ΔF , 作用在该面积上的作用力为 ΔP , 则:

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (\text{Pa}) \quad (1-19)$$

称为流体的平均静压力。

当 ΔF 无限缩小, 平均静压力 p_m 就趋向于点 A 的点压力, 称为 A 点的静压力:

$$p_A = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (\text{Pa}) \quad (1-20)$$

(二) 流体静压力的特征

流体静压力的重要特征是:

1. 流体静压力必然垂直于其所作用的面积。如果静压力与作用面不垂直, 则可以将作用力分解成作用面的法线方向和切线方向两个力, 切向力必然破坏流体平衡引起流体流动。因此, 当流体相对静止时, 只有法线方向的

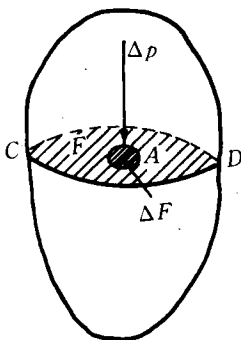


图 1-4 流体静压力

的力存在, 而且是沿着内法线方向。

2. 某一点的流体静压力的大小与其作用面积的方向无关。如果流体内某一点的静压力在各个方向上不相等, 势必破坏流体平衡引起流体流动。

(三) 流体静压力的单位

流体静压力的法定计量单位为帕斯卡, 简称帕(Pa)。

二、流体静力学基本方程式

(一) 流体静力学基本方程式

在密度为 ρ 的静止流体内部任取一截面积为 F 、高为 h 的圆柱体, 如图 1-5 所示。由于流体是静止的, 所以相邻流体作用于流体柱侧面的压力, 其合力为零。

作用于流体柱顶面的压力为表面压力 p_0 , 总作用力为 $p_0 F$; 作用在流体柱底面的压力为 p , 总作用力为 $p F$; 流体柱所受的重力 $G = mg = h F \rho g$ 。由于流体柱处于静止状态, 所以存在下列关系:

$$p_0 F + h F \rho g - p F = 0$$

$$\text{即} \quad p = p_0 + \rho g h \quad (\text{Pa}) \quad (1-21)$$

上式即为流体静力学基本方程式, 说明在静止的流体内任一点的静压力等于流体的表面压力与该点上的流体柱重力所造成的压力之和。

由公式可以看出, 处于流体内同一水平面上各点的压力是相等的, 这些压力相等的点所组成的面称为等压面。

在静止的流体内部, 不同深度 h_1 和 h_2 的两点, 其静压力分别为 p_1 和 p_2 , 根据流体静力学基本方程式, 可以写出:

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1$$

$$p_2 = p_0 + \rho g h_2$$

两式相减, 得:

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_2 - h_1) \quad (\text{Pa}) \quad (1-22)$$

式(1-22)说明, 在静止流体内部, 任意两点的压力差, 等于它的深度(或高度)差和流体密

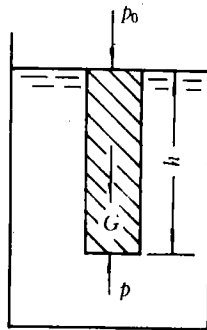


图 1-5 流体静力学
基本方程式推导

度、重力加速度的乘积。

(二) 流体静力学基本方程式的应用

在水泥工业中,常采用液柱压力计来测量流体的压力,其基本原理就是流体静力学基本方程。

图 1-6 为一 U 形测压计,它是流体压力测量仪表中最简单的一种,在 U 形玻璃管中装有与被测流体既不相溶又不相混的测量液,通常测量液的密度大于被测流体的密度。

设 p_1 、 p_2 分别为容器中 1、2 两点的压力,被测流体密度为 ρ ,测量液密度为 ρ_A 。以水平线 $a-a'$ 为基准,U 形管左侧 a 点的压力:

$$p_a = p_1 + (m + h)\rho g$$

U 形管右侧 a' 点的压力:

$$p_{a'} = p_2 + m\rho g + h\rho_A g$$

依静力学基本方程式有 $p_a = p_{a'}$,则所测两点压差:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = hg(\rho_A - \rho) \quad (\text{Pa}) \quad (1-23)$$

式中 h —— 测量指示液的高差(m);

g —— 重力加速度(m/s^2)。

如果被测流体为气体,因 $\rho \ll \rho_A$,则上式可简写成:

$$\Delta p = h\rho_A g \quad (\text{Pa}) \quad (1-24)$$

如果 U 形管的一侧通大气,另一侧接被测流体容器,此时 U 形管上所读得的压力就相应的表示容器内流体绝对压力与大气压力之差,称之为表压。绝对压力是指容器内的实际压力,从表压换算为绝对压力要加上大气压力。当容器内为绝对真空时,其绝对压力为零。

在水泥工业中流体的压力都是指的表压。

若容器内流体的绝对压力小于大气压力时,测出的压力称为负压,负压的绝对值称为真空度。

综合以上两种情况,当绝对压力大于大气压力时有:

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

当绝对压力小于大气压力时有:

$$\text{绝对压力} = \text{大气压力} - \text{真空度(负压)}$$

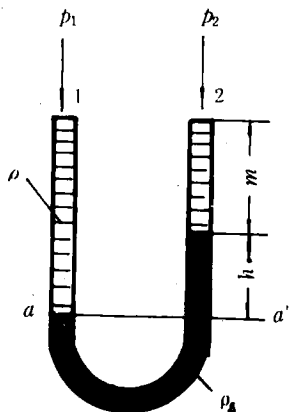


图 1-6 U 形测压计

第三节 流体动力学基础

一、流体动力学的基本概念

(一) 稳定流动与不稳定流动

运动流体全部质点所占的空间称为流体的流场。流场的范围视研究对象和要求而有所不同。如研究流体在管道中流动情况时,可将整个管道作为流场;研究流体在某一段管道中流动情况时,则所研究的这段管道即为流场;研究水泥窑炉内气体流动情况时,整个窑炉中气体所占空间就是流场。

流体在流场中流动,在流场中任一点的流体的物理参数(如流速、压力、温度、密度等)均不随时间变化的流动过程称为稳定流动,否则就称为不稳定流动。

图 1-7 表示水从水箱侧壁孔流出时速度的变化情况。当水箱中水位恒定时,即水面至孔口的垂直距离 $z = \text{常数}$,水从孔中流出的速度也恒定,为稳定流动(图 1-7a 所示)。如水箱的水位不断下降,水从孔中流出的速度逐渐减小,为不稳定流动(图 1-7b 所示)。

(二) 流线和流束

为了直观反映流场中流体质点运动情况,便于分析流体流动状态,常用形象化的方法,直接在流场中绘出反映流体流动方向的一系列线条,即所谓流线。流线上每一点的切线矢量就代表该点的流速方向。在稳定流动的情况下,流线就是流体质点运动的迹线。

图 1-8 表示了流体在突然扩大的管道中流动时的流线(图 1-8a)及流体绕过圆球形物体时的流线形状(图 1-8b)。

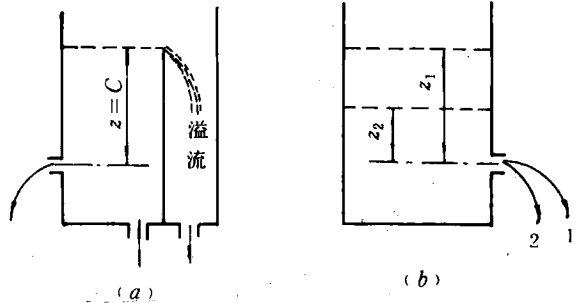


图 1-7 稳定流动与不稳定流动

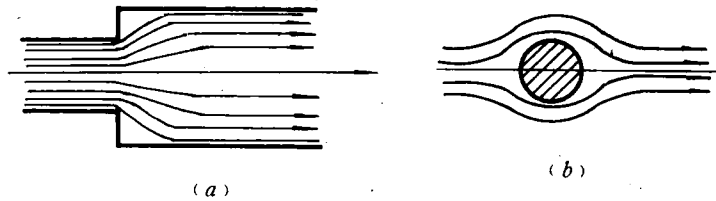


图 1-8 流线

假若在流动的流体中分离出一块基元面积 dF (图 1-9b),经过面积及其周界上的各个点作出某时刻的流线,得到的则是一细长的流线束(图 1-9a)。此部分流体叫微细流。基元面积周界各点上的流线就是微细流的界线。

(三) 流量和流速

流体在管道内流过时,单位时间内流过任意截面的流体的体积或质量称为流体的流量。前者称体积流量,用 Q 或 V 表示,单位为 m^3/s ;后者称质量流量,用 M 表示,单位为 kg/s 。

流速是流体质点单位时间内沿管道流经的距离。由于流体粘性的影响,实际流体在管道中流动时,沿管道截面各点流速不同,管中心流速最快,离管中心愈远处流速愈慢,在紧贴管壁处流速为零。在工程上为研究问题方便,人为地引入平均流速,即管道内单位流通面积上的体积流量,用 w 表示,单位为 m/s 。

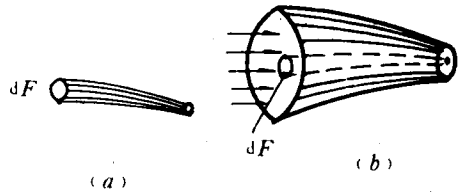


图 1-9 流束

$$w = \frac{Q}{F} \quad (\text{m}/\text{s}) \quad (1-25)$$

式中 F —— 管道内流体的流通截面积(m^2)。

流体的体积流量与质量流量:

$$Q = wF \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1-26)$$

$$M = Q\rho = wF\rho \quad (\text{kg/s}) \quad (1-27)$$

气体的流速与温度的关系可根据盖吕萨克定律得出：

$$w_t = w_0(1 + \beta t) \quad (1-28)$$

式中 w_t —— 气体在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的流动速度(m/s)；

w_0 —— 气体标态流速(Bm/s)；

t —— 气体的温度($^\circ\text{C}$)；

β —— 气体的体积膨胀系数,其值为 $1/273(1/^\circ\text{C})$ 。

由上式可知,气体在等截面的管道中流动,温度升高流速加快,温度降低流速减慢。在这种变温流动过程中,要确定气体在一段管路或某一设备中的平均流速时,可将管道或设备两端气体温度取算术平均值 t_m ,代入式(1-28),求得平均流速 w_m ：

$$w_m = w_0(1 + \beta t_m) \quad (\text{m/s}) \quad (1-29)$$

(四)流体流动状态

流体流动时,除了根据流动情况将流场中的流体分为稳定流动与不稳定流动之外,还可以根据流体流动状态,区分出两种不同的流态。下面根据图 1-10 所示实验来说明这个问题。图中 1 为稳压水箱,使玻璃管 2 中水的流动为稳定流动,水从管 6 送入水箱,高出水位的水从溢流管 7 流出,4 为颜色液储器,其下部有细管 5 通向玻璃管内。

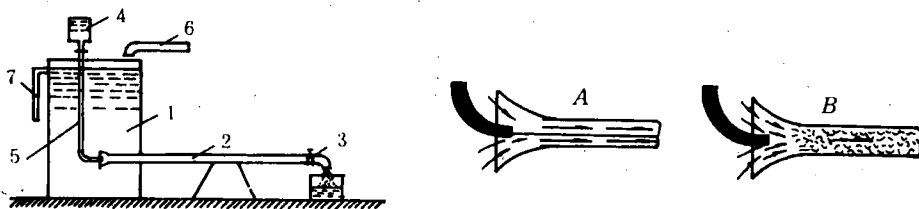


图 1-10 流体流态实验

调节玻璃管上阀门 3,当玻璃管内的流速较低时,从细管注入的颜色液能成为单独的一股细流前进,同玻璃管内的水不相混杂,如图 1-10 A 所示,当玻璃管内流速较高时,从细管注入的颜色液细流马上消失在水中,同水混杂起来,如图 1-10 B 所示。前一种情况说明流体流动时,流体质点成为互不干扰的细流前进,各股细流互相平行,层次分明。流体的这种流态是层流,或称滞流。后一种情况说明流体流动时,出现一种紊乱状态。流体各质点作不规则的运动。流体内各股细流互相交换位置,流体质点有轴向和横向运动,互相撞击,产生湍动和旋涡。这种流态是湍流,或称紊流。上述实验称为雷诺实验。

实验证明,影响流体流态的因素除了流体流速 w 外,管道直径 D 、流体密度 ρ 和粘度 μ 对流体流态也有影响。 D 、 ρ 愈大, μ 愈小,流体流态愈容易从层流转为紊流。

综合以上因素,用数群 $\frac{Dw\rho}{\mu}$ 的大小来决定流体的流态,此数群称为雷诺准数,用符号 Re 表示,即：

$$Re = \frac{Dw\rho}{\mu} \quad (1-30)$$