



职业技术教育国家规划教材

# 热工基础

*Regong Jichu*

主 编 左明扬

*Regong Jichu*

武汉理工大学出版社

职业技术教育国家规划教材

# 热工基础

主 编 左明扬  
副主编 孟庆红 杨 健

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 【内容简介】

本教材以高职高专“培养高技能人才”为宗旨,以硅酸盐工业生产过程所涉及的热工基础知识为主体内容,在孙晋涛 1991 年主编的《硅酸盐工业热工基础》(本科教材)和刘述祖 1994 年主编的《硅酸盐工业热工基础》(中专教材)的基础上,结合目前硅酸盐工业的发展和高等职业技术教育的特点编写而成。全书共分流体力学基础、流体力学在硅酸盐工业中的应用、燃料及燃烧技术、传热学和干燥技术等五章。在教学中应根据学生专业方向(水泥工艺、玻璃工艺、陶瓷工艺等)的需要进行内容取舍。

### 图书在版编目(CIP)数据

热工基础/左明扬主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2006.12

ISBN 7-5629-2481-3

- I. 热…
- II. 左…
- III. 热工学
- IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 027532 号

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn>

印刷者:安陆鼎鑫印务有限责任公司

经销者:各地新华书店

开本:787×1092 1/16

印张:20.25

插页:2 张

字数:525 千字

版次:2006 年 12 月第 1 版

印次:2006 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~3000 册

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

# 出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》的精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部“要加强学生实践能力、技术运用能力的培养,充分反映新兴技术、新兴产业对技能培养的要求,满足经济结构战略性调整、技术结构优化升级和高科技产业迅猛发展对人才培养的要求”的职业技术教育培养目标,建材行业职业教育教学指导委员会组织有关院校的专家、教师就《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》的课程开发进行了认真的行业调研、深入细致的改革方案论证及课程大纲审定工作。武汉理工大学出版社根据教育部对职业技术教育教材“要逐步建立以能力培养为基础的、特色鲜明的专业教材和实训指导教材”的教材建设要求,组织全国近 30 所院校和企业单位的专家、教师编写了职业技术教育《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》国家规划教材。

职业技术教育《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》国家规划教材开发的理念是,突破传统职业教育的课程体系,突破传统行业以产品定位专业的界限,立足以材料生产工艺的共性、以相关学科和产业的衔接为教材开发目标;注重推广行业产品的国家标准,注重现代教育技术的开发和使用;突出职业技术教育能力本位的教育观念,以知识和能力单元为基本模块组织教材开发,使教材内容可以根据高等职业技术教育和中等职业技术教育的教学目标进行教学基本模块的组合;部分教材的开发,结合行业岗位培训、职业(岗位)资格的鉴定规范组织编写,可以作为企业岗位培训、职业资格鉴定的培训教材。

建材行业职业技术教育国家规划教材的出版,对于行业人力资源开发与提高行业从业人员的素质,必将起到积极的促进作用。但是,随着我国加入 WTO 和现代企业制度的逐步建立与完善,产业技术进步和技术岗位重组力度的加大,职业技术教育国家规划教材的不断更新与完善将是我们今后的一个长期工作。因此,我们殷切地希望广大读者在使用本教材的过程中,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

武汉理工大学出版社

## 前 言

随着硅酸盐工业技术的发展,行业对人才技能提出了更高、更新的要求。本教材是根据现代硅酸盐工业对职业人才热工技术方面的要求及高等职业技术教育的特点编写的。

本教材注重读者实用技术和技能的培养,加强了流体力学在硅酸盐工业中的应用、固体燃料燃烧技术、节能燃烧及环境污染和干燥技术等章节内容。适合于高等职业技术学院材料工程专业学生、从事硅酸盐工业生产和工厂设计的技术人员学习和参考;中等职业技术学校硅酸盐工艺及工业控制专业师生也可选用(带“\*”的内容作为选学)。

本教材由绵阳职业技术学院左明扬主编,河北建材职业技术学院孟庆红任副主编。左明扬编写 3.1 节、3.2 节及附录等内容;北京建材工业学校杨健编写第 1 章;孟庆红编写 2.1 节和 2.2 节;绵阳职业技术学院王伟编写 2.3 节和 2.4 节;天津城市建设学院赵海英编写 3.3 节、3.4 节、3.5 节、3.6 节和 3.7 节;安徽职业技术学院叶鸽编写第 4 章;湖北教育学院王超编写第 5 章。绵阳职业技术学院况金华、牟思蓉、王伟对全文进行了图片处理、文字校对,并提出修改意见,在此深表感谢!

编 者

2006 年 1 月

# 目 录

<b>1 流体力学基础</b> .....	(1)
1.1 流体的物理性质 .....	(1)
1.1.1 流体的密度 .....	(1)
1.1.2 流体的连续性 .....	(3)
1.1.3 流体的压缩性和膨胀性 .....	(3)
1.1.4 流体的粘性 .....	(4)
1.2 流体静力学基础 .....	(7)
1.2.1 流体静压强及其特性 .....	(7)
1.2.2 流体静力学基本方程式 .....	(9)
1.3 流体动力学基础 .....	(12)
1.3.1 基本概念 .....	(12)
1.3.2 流体动力学基本方程式 .....	(18)
1.4 流动阻力及管路计算 .....	(26)
1.4.1 摩擦阻力 .....	(26)
1.4.2 局部阻力 .....	(27)
1.4.3 流动的总阻力 .....	(28)
* 1.4.4 管路计算 .....	(28)
练习与思考题 .....	(31)
参考答案 .....	(33)
<b>2 流体力学在硅酸盐工业中的应用</b> .....	(34)
2.1 窑炉系统内的气体流动 .....	(34)
2.1.1 不可压缩气体的流动 .....	(34)
* 2.1.2 可压缩气体的流动 .....	(39)
2.2 烟囱和喷射器 .....	(45)
2.2.1 烟囱 .....	(45)
2.2.2 喷射器 .....	(49)
2.3 风机和泵 .....	(54)
2.3.1 离心式通风机 .....	(55)
2.3.2 回转式鼓风机 .....	(86)
2.3.3 泵 .....	(91)
* 2.4 固体颗粒流态化技术 .....	(101)
2.4.1 固体流态化的过程 .....	(102)
2.4.2 气体流化床的性质 .....	(103)
2.4.3 流化床 .....	(104)

2.4.4	流化床内的传热和传质 .....	(108)
2.4.5	流化床装置的设计 .....	(110)
2.4.6	流化床技术在硅酸盐工业中的应用 .....	(113)
	练习和思考题 .....	(115)
	参考答案 .....	(115)
<b>3</b>	<b>燃料及燃烧技术 .....</b>	<b>(116)</b>
3.1	燃料的性质 .....	(116)
3.1.1	燃料的分类和组成 .....	(116)
3.1.2	燃料的热工性质 .....	(119)
3.1.3	硅酸盐工业常用燃料 .....	(129)
3.2	燃料燃烧计算 .....	(130)
3.2.1	燃烧计算的内容及基本概念 .....	(130)
3.2.2	空气需要量、烟气生成量及烟气成分的计算 .....	(131)
3.2.3	燃烧温度的计算 .....	(142)
3.3	燃烧过程的基本理论 .....	(146)
3.3.1	着火温度 .....	(146)
3.3.2	着火浓度范围 .....	(147)
3.3.3	固态碳的燃烧 .....	(148)
3.3.4	可燃气体的燃烧 .....	(149)
3.3.5	火焰传播速度 .....	(150)
3.4	气体燃料燃烧技术 .....	(152)
3.4.1	气体燃料的燃烧过程 .....	(152)
3.4.2	长焰燃烧 .....	(153)
3.4.3	短焰燃烧 .....	(155)
3.4.4	无焰燃烧 .....	(157)
3.4.5	其他燃烧设备 .....	(157)
3.5	液体燃料燃烧技术 .....	(159)
3.5.1	重油的燃烧过程 .....	(159)
3.5.2	重油的雾化 .....	(160)
3.5.3	燃油烧嘴 .....	(162)
3.5.4	重油的供油系统 .....	(166)
3.6	固体燃料燃烧技术 .....	(170)
3.6.1	固体燃料的燃烧过程 .....	(170)
3.6.2	层燃燃烧 .....	(171)
3.6.3	喷燃燃烧 .....	(178)
3.6.4	沸腾燃烧 .....	(183)
3.7	节能燃烧及环境污染 .....	(186)
3.7.1	燃料燃烧的节能措施 .....	(186)
3.7.2	燃烧产物对环境的污染 .....	(188)
	练习与思考题 .....	(192)

参考答案	(193)
4 传热学	(194)
4.1 传热的基本概念	(194)
4.1.1 传热的基本条件	(194)
4.1.2 传热的基本方式	(194)
4.1.3 传热的基本概念	(195)
4.2 传导传热	(196)
4.2.1 导热的基本定律(傅立叶定律)	(196)
4.2.2 导热系数	(197)
4.2.3 稳定导热传热量的计算	(200)
4.3 对流换热	(208)
4.3.1 对流换热的基本概念	(208)
4.3.2 影响对流换热的因素	(209)
4.3.3 对流换热的基本定律(牛顿冷却定律)	(210)
4.3.4 对流换热准数方程	(210)
4.3.5 对流换热量的计算	(212)
4.4 辐射传热	(218)
4.4.1 辐射传热的基本概念	(218)
4.4.2 辐射传热的基本定律	(219)
4.4.3 固体间的辐射传热	(223)
4.4.4 气体辐射	(228)
4.5 综合传热	(234)
4.5.1 传热的统一公式	(234)
4.5.2 一种流体通过平壁传热给另一种流体	(235)
4.5.3 一种流体通过圆筒壁传热给另一种流体	(237)
4.5.4 窑炉火焰空间内的传热	(238)
4.5.5 窑体表面散热计算	(239)
4.5.6 换热器	(240)
练习与思考题	(241)
参考答案	(242)
5 干燥技术	(243)
5.1 概述	(243)
5.1.1 干燥的定义	(243)
5.1.2 干燥技术在硅酸盐工业中的应用	(244)
5.2 湿空气的基本性质	(244)
5.2.1 湿空气中干空气与水蒸气的分压	(244)
5.2.2 空气的湿度	(245)
5.2.3 湿空气的密度和比容	(246)
5.2.4 湿空气的热含量	(246)
5.2.5 湿空气的温度参数	(247)



5.3 湿空气的 $I-x$ 图 .....	(248)
5.3.1 $I-x$ 图的构成和作法 .....	(248)
5.3.2 $I-x$ 图的应用 .....	(251)
5.4 干燥过程中的物料平衡及热平衡 .....	(256)
5.4.1 物料平衡 .....	(256)
5.4.2 热平衡 .....	(258)
5.4.3 干燥过程的图解法 .....	(261)
5.5 物料干燥的物理过程 .....	(266)
5.5.1 物料中水分的结合形式 .....	(266)
5.5.2 物料(制品)的干燥过程 .....	(267)
5.5.3 影响干燥速度的因素 .....	(268)
5.5.4 干燥缺陷分析 .....	(269)
5.6 干燥方法与干燥设备 .....	(270)
5.6.1 干燥器的分类 .....	(270)
5.6.2 回转烘干机 .....	(270)
5.6.3 隧道干燥器 .....	(277)
5.6.4 传送带式干燥器 .....	(280)
5.6.5 流态干燥器 .....	(281)
5.6.6 喷雾干燥器 .....	(282)
5.6.7 其他干燥方法 .....	(285)
练习与思考题 .....	(286)
参考答案 .....	(287)
<b>附录</b> .....	(288)
附录一 国际制、工程制和英制单位换算表 .....	(288)
附录二 常用局部阻力系数及综合阻力系数 .....	(289)
附录三 常用材料的物理参数 .....	(295)
附录四 烟气的物理参数 .....	(298)
附录五 干空气的物理参数( $p=1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) .....	(298)
附录六 在饱和线上水蒸气的物理参数 .....	(299)
附录七 在饱和线上水的物理参数 .....	(300)
附录八 某些材料在法线方向上的黑度 .....	(301)
附录九 计算辐射角系数和核算面积的公式和图 .....	(302)
附录十 湿空气的相对湿度表(%) .....	(310)
附录十一 湿空气 $I-x$ 图( $p=99.3 \text{ kPa}, t=-10 \sim 200^\circ \text{C}$ ) .....	(311)
附录十二 湿空气 $I-x$ 图( $p=99.3 \text{ kPa}, t=0 \sim 1450^\circ \text{C}$ ) .....	(311)
附录十三 中国煤分类(以炼焦用煤为主)方案 .....	(311)
附录十四 气体通过孔嘴时的系数 .....	(312)
<b>参考文献</b> .....	(313)

# 1 流体力学基础

**【内容简介】** 本章介绍了流体的物理性质、流体静力学基本方程和伯努利方程及其应用,并介绍了流体流动阻力和管路计算等基本知识。

**【学习要求】** 掌握流体力学的基本概念及其反映流体静止和运动规律的基本方程式,理解基本方程各项的物理含义,明确流体各种性质的定义及其 SI 制的形式,重点掌握伯努利方程的不同表达形式及其应用。掌握雷诺准数( $Re$ )的定义并能根据( $Re$ )数值的大小判定流体流动的形态;具备一定的分析计算能力;了解流体流动阻力计算方法以及层流和紊流的特点。

**【引言】** 气体和液体统称为流体,流体只能承受压力作用,在任何微小切应力作用下流体都会发生变形或流动,因此具有易流动性。流体力学是力学的一个独立分支,是一门研究流体平衡和运动规律及其实际应用的学科。流体力学所研究的流体的基本规律,包括流体在静止状态下的力学规律即流体静力学,运动状态下力与运动要素之间的关系、运动特征与能量转换的规律即流体动力学。

流体力学知识广泛应用于硅酸盐工业生产,如硅酸盐工业窑炉工作过程中燃料的气化、雾化和燃烧,高温烟气与物料的热量交换、余热的回收和排放都离不开气体的流动,粉末物料的分级、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,对分析和控制硅酸盐工业生产过程具有非常重要的意义。

## 1.1 流体的物理性质

### 1.1.1 流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度,用  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中  $\rho$ ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

在标准状态下,气体的密度可写为:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1.2)$$

式中  $V_0$ ——在标准状态下气体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$m$ ——气体的质量,  $\text{kg}$ ;

$\rho_0$ ——气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

流体的密度通常由实验测得。常见液体及标准状态下常见气体的密度见表 1.1。实际生产中的流体经常是含有多种成分,如在水泥生产过程中,水泥窑内的烟气就含有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  和水蒸气等。对于气体混合物的密度,应按下式计算:

$$\rho_m = \frac{1}{100}(\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \cdots + \rho_n x_n) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \rho_i x_i \quad (1.3)$$

式中  $\rho_m$ ——混合气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\rho_i$ ——混合气体中各组分气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $x_i$ ——混合气体中各组分气体的体积百分数, %。

表 1.1 几种常见流体的密度值

流体名称		密度( $\text{kg/m}^3$ )	测定条件( $^{\circ}\text{C}$ )	流体名称		密度( $\text{kg/m}^3$ )	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 $\text{O}_2$	1.429	
	汞	13600	15		氮气 $\text{N}_2$	1.251	
	松节油	873	15		氢气 $\text{H}_2$	0.090	
	汽油	680~790	15		一氧化碳 $\text{CO}$	1.250	
	煤油	790~820	15		二氧化碳 $\text{CO}_2$	1.977	
	重油	900~950	15		二氧化硫 $\text{SO}_2$	2.927	
	苯 $\text{C}_6\text{H}_6$	900	0		甲烷 $\text{CH}_4$	0.717	
	无水乙醇	790	15		烟气	1.30~1.34	

液体混合物的密度,按下式计算:

$$\frac{1}{\rho_{mi}} = \frac{1}{100} \left( \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \right) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i} \quad (1.4)$$

式中  $\rho_{mi}$ ——混合液体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\rho_i$ ——混合液体中各组分液体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $a_i$ ——混合液体中各组分液体的质量百分数, %。

【例 1.1】 某水泥回转窑烟气组成如下:  $\text{CO}_2$  17.6%,  $\text{O}_2$  2.6%,  $\text{CO}$  0.2%,  $\text{N}_2$  79.6%。  
 求此废气标准状态时的密度。

【解】 上述几种气体的标准状态密度可由表 1.1 中查得,根据式(1.3)

$$\rho_m = \frac{1}{100} (\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \rho_i x_i$$

得废气的标准状态密度:

$$\begin{aligned} \rho_m &= \frac{1}{100} \times (1.977 \times 17.6 + 1.429 \times 2.6 + 1.250 \times 0.2 + 1.251 \times 79.6) \\ &= 1.387 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

【例 1.2】 已知  $20^{\circ}\text{C}$  时水、甘油的密度分别为  $998\text{kg/m}^3$ 、 $1260\text{kg/m}^3$ ,求 50%甘油水溶液的密度。

【解】 根据式(1.4)

$$\frac{1}{\rho_{mi}} = \frac{1}{100} \times \left( \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \right) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_i}$$

得:

$$\frac{1}{\rho_{mi}} = \frac{0.5}{998} + \frac{0.5}{1260}$$

甘油水溶液的密度  $\rho_{mi} = 1114 (\text{kg/m}^3)$ 。

### 1.1.2 流体的连续性

流体是由大量做无规则运动的分子组成的,分子间存在空隙,但在标准状况下,1cm<sup>3</sup>液体中大约含有  $3.3 \times 10^{22}$  个分子,相邻分子间的距离约为  $3.1 \times 10^{-8}$  cm; 1cm<sup>3</sup> 气体中大约含有  $2.7 \times 10^{19}$  个分子,相邻分子间的距离约为  $3.2 \times 10^{-7}$  cm。分子间的距离很小,在工程上可以忽略。而以流体质点作为研究对象(所谓质点是含有大量分子的流体微团),其尺寸比实际流体流动过程中设备尺寸小得多。因此,可以假设流体是由大量质点所组成、彼此之间没有空隙、充满它所占据的整个空间的一种连续介质,在流动过程中不间断、不滑脱而连续地流动,且其所有的物理量都是空间和时间的连续函数  $u = u(t, x, y, z)$ 。这就是在研究流体流动规律中流体连续性的假定。实践证明,这样的假定在大多数情况下是适合的。然而,对高空下的稀薄气体,此假定则不适合。

流体连续性的假定排除了分子运动的复杂性,描述流体性质和状态的物理量可以作为时空连续函数,利用连续函数这一数学工具来研究问题,使问题简化。

### 1.1.3 流体的压缩性和膨胀性

#### 1.1.3.1 流体的压缩性

作用在流体上的压力变化可引起流体的体积变化或密度变化,这一现象称为流体的压缩性。通常用体积压缩率  $\beta$  来量度。即:

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1.5)$$

式中  $\beta$ ——体积压缩率, 1/Pa;

$dV/V$ ——流体体积的相对变化;

$d\rho/\rho$ ——流体密度的相对变化;

$dp$ ——流体压强的变化量, Pa。

式(1.5)表示流体体积的相对缩小值与压强增值之比,即当压强增大一个单位值时,流体体积的相对减小值。负号表示压力增加时,流体体积减小。

流体的压缩性在工程上往往用体积模量来表示。体积模量是体积压缩率的倒数。即:

$$E = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (\text{Pa}) \quad (1.6)$$

同一种流体的  $\beta$  和  $E$  值随温度、压强的变化而变化,但变化甚微。流体的种类不同,其  $\beta$  和  $E$  值不同。 $E$  越大,越不易被压缩,当  $E \rightarrow \infty$  时,表示该流体绝对不可压缩。

根据流体受压体积缩小的性质,流体可分为可压缩流体和不可压缩流体。流体密度随压强变化不能忽略的流体称为可压缩流体;相反,流体密度随压强变化很小,可视为常数的流体称为不可压缩流体。严格地说,不存在完全不可压缩流体。

液体和气体的压缩性有很大的区别。液体的压缩性较小。例如水在 0°C、5 个大气压时的体积压缩率为  $5.41 \times 10^{-10}$  (1/Pa), 体积模量为  $1.85 \times 10^9$  Pa, 所以除压力变化极大的情况外,水的压缩性可忽略,相应水的密度可视为常数。因此一般都将液体看做不可压缩流体。气体的压缩性很大,如空气在标准状态下的体积压缩率是水的 2 万倍,且压缩性随压力升高而增大。当气体的流速在 100m/s 以上或温度变化较大时,表现出很明显的压缩性,属可压缩流

体。但当气体所受压强变化量相对较小时,可视为不可压缩流体。如窑炉系统中的低压空气和烟气,其压强近似等于外界大气压,且流速较低,在流动过程中的压强变化不超过 0.5%,虽然整个系统温度变化较大,但若分段处理,使每段的温度变化不太大,以至于气体的密度变化不超过 20%时,可以看做不可压缩气体。

### 1.1.3.2 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  $\alpha_v$  来表示。它表示温度升高 1K 时,流体体积的相对变化。即:

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \quad (1.7)$$

式中  $\alpha_v$ ——体积膨胀系数,1/K;

$dT$ ——流体温度的变化量,K。

液体的膨胀性很小。例如水在 15°C 左右的膨胀系数为  $1.5 \times 10^{-4}$  (1/K),也就是说水温升高 1K,其体积只改变 0.015%,在工程上可以忽略这种较小的体积变化。

气体具有明显的体积膨胀性。在压力和温度发生变化时,气体的体积会发生显著变化。如果压力不太高而温度又不太低时,气体的物理量遵守理想气体状态方程。即:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1.8)$$

或

$$p = \frac{m}{V} \frac{R}{M} T = \rho \frac{R}{M} T \quad (1.9)$$

式中  $p$ ——气体的压强,Pa;

$T$ ——气体的温度,K;

$M$ ——气体的千摩尔质量,kg/kmol;

$R$ ——通用气体常数,其值为 8314.3J/(kmol·K);

$\rho$ ——气体的密度,kg/m<sup>3</sup>。

根据式(1.9)求得气体密度随温度、压力的变化关系:

$$\rho_2 = \rho_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (1.10)$$

**【例 1.3】** 计算例 1.1 的废气在温度为 500°C,压强为 -300Pa 时的密度(设当地大气压为 99321Pa)。

**【解】** 由例 1.1 可知,该废气标准状态下的密度  $\rho_0 = 1.387 \text{ kg/m}^3$ ,根据式(1.10),废气在温度为 500°C,压强为 -300Pa 时的密度:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{p_0 + p_1}{p_0} \frac{T_0}{T_0 + t} = 1.387 \times \frac{99321 - 300}{99321} \times \frac{273}{273 + 500} = 0.4884 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

### 1.1.4 流体的粘性

#### 1.1.4.1 牛顿内摩擦定律

流体具有流动性,流动状态下的流体内部质点会发生相对滑移而产生摩擦力,阻止流体的运动。流体的这种特性称为粘性。粘性是流动性的反面,流体的粘性越大,其流动性就越小。粘性大小由粘度来量度。流体的粘度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。

当流体从管道中流过时,由于管道固体表面不平整和固体壁面分子引力的作用,固体壁面对流体质点产生约束,使近壁处流体质点粘附在壁面上,速度为零。由于流体内部分子间的吸引力和分子热运动产生的动量交换作用,壁面上静止的流体质点对相邻流体层质点的流动产生阻滞作用,使它的流速变慢,而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。这种相互作用随着离壁面距离的增加而逐渐减弱,使流体内部产生速度梯度。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越小,紧贴管壁的一层流体流速为零。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力,称为流体的内摩擦力,是流体粘性的表现,又称为剪切力。

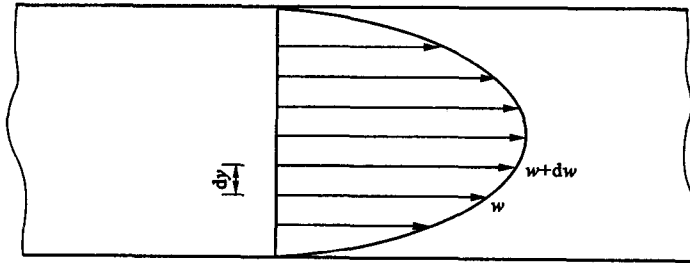


图 1.1 管道中流体流速分布图

牛顿根据实验证实,运动流体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。用数学式表示为:

$$f = -\mu F \frac{dw}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1.11)$$

单位面积上的内摩擦力为:

$$\tau = \frac{f}{F} = -\mu \frac{dw}{dy} \quad (\text{Pa}) \quad (1.12)$$

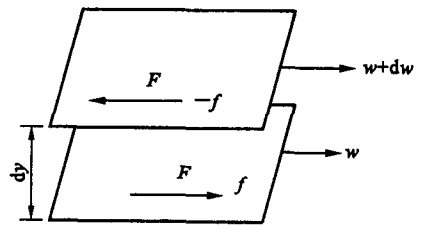


图 1.2 内摩擦力推导示意图

式中  $f$ ——相邻两层流体之间的内摩擦力或称剪切力, N;

$F$ ——相邻两层流体之间的接触面积,  $\text{m}^2$ ;

$\frac{dw}{dy}$ ——相邻两层流体之间的速度梯度,  $1/\text{s}$ , 表示垂直于流体流动方向的速度变化率;

$\mu$ ——比例系数, 称为绝对动力粘度系数, 简称动力粘度或粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$\tau$ ——单位面积上的内摩擦力, 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。

根据流体是否具有粘性, 可分为实际流体和理想流体。实际流体是指流体具有粘度, 在运动时具有抵抗剪切变形的能力, 即存在摩擦力。理想流体是既无粘性又完全不可压缩, 在运动时也不能抵抗剪切变形。

#### 1.1.4.2 相对粘度和粘度及其换算

由式(1.12)可知:

$$\mu = -\frac{\tau}{\frac{dw}{dy}} \quad (1.13)$$

粘度可以看做是速度梯度为 1 时, 单位接触面积上的内摩擦力, 它表示流体的粘滞性, 其

大小随流体性质而异。

在工程上有时以运动粘度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的密度之比,用符号  $\nu$  表示。即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1.14)$$

运动粘度  $\nu$  又称相对粘度或运动粘度系数。

在工程上还采用各种相对粘度。相对粘度有多种表示方法,我国常采用恩氏粘度,用符号  $^{\circ}E$  表示。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  $t$ (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  $t_0$ (s) 的比值,即:

$$^{\circ}E = \frac{t}{t_0} \quad (1.15)$$

恩氏粘度  $^{\circ}E$  与运动粘度  $\nu$  之间的关系为:

$$\nu = \left( 0.0731 ^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} \right) \times 10^{-4} \quad (1.16)$$

当  $^{\circ}E > 10$  时,恩氏粘度  $^{\circ}E$  与运动粘度  $\nu$  之间的关系为:

$$\nu = 0.0741 ^{\circ}E \times 10^{-4} \quad (1.17)$$

流体的粘度通常由实验测定。

水的粘度  $\mu$  通常可用经验公式计算:

$$\mu = \frac{0.0001775}{1 + 0.0387t + 0.000221t^2} \quad (1.18)$$

式中  $t$ ——水的温度,°C;

$\mu$ ——温度为  $t$ °C 时水的粘度,Pa·s。

气体的动力粘度与温度的关系可近似用下式表示:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.19)$$

式中  $\mu$ ——温度为  $t$ °C 时气体的粘度,Pa·s;

$\mu_0$ ——0°C 时气体的粘度,Pa·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: $C=173$ 。

#### 1.1.4.3 粘度与温度的关系

流体的粘度随流体种类不同而不同,并随压强、温度变化而变化。相同条件下,液体的粘度大于气体的粘度。对常见的流体,如水、气体等,粘度随压强的变化不大,一般可忽略。

温度是影响粘度的主要因素。

流体产生粘性的原因是流体内部质点之间存在引力和流体运动时质点所产生的动量交换。对于液体,分子间的引力是产生粘性的主要因素,当温度升高,吸引力减小,所以粘度减小。对于气体,当温度升高,分子运动加快,动量交换频繁,所以粘度增加。

由于流体粘度计算比较复杂,因此将水、空气的粘度列于表 1.2,以便使用时查找。

需要指出,剪应力符合式(1.12)的流体称为牛顿型流体,如水、各种低粘度油类和各种气体均属于这一类。剪应力不符合式(1.12)的流体,如泥浆、高粘度油类等称为非牛顿型流体。

表 1.2 在 101325Pa 水和空气的密度  $\rho$ 、粘度  $\mu$  和运动粘度  $\nu$  与温度的关系

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	水			空气		
	密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粘度 $\mu \times 10^6$ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	运动粘度 $\nu \times 10^6$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粘度 $\mu \times 10^6$ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	运动粘度 $\nu \times 10^6$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
-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	1308	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

## 1.2 流体静力学基础

### 1.2.1 流体静压强及其特性

#### 1.2.1.1 流体静压强

流体内部质点之间及流体与器皿之间无相对运动时,流体保持相对静止或相对平衡状态。在静止的流体内部取一隔离体,此时流体隔离体受到重力和流体内部压力的作用并保持平衡。如图 1.3 所示。现以一假想平面  $O-O$  为例。从任意方向将它切割成两部分 I、II,并将 I 部分移开。为了保持第 II 部分的平衡,用  $P$  代替第 I 部分对 II 的总作用力,则  $P$  称为流体静压力简称“压力”,即毗邻流体或其他物体作用在隔离体表面上直接施加的接触力。流体单位面积上的静压力,称为流体的静压强。在截面  $O-O$  上某点  $A$  的周围取一面积  $\Delta F$ ,作用在该面积上的作用力为  $\Delta P$ ,则流体的平均静压强为:

$$p_{av} = \frac{\Delta P}{\Delta F} \text{ (Pa)} \quad (1.20)$$

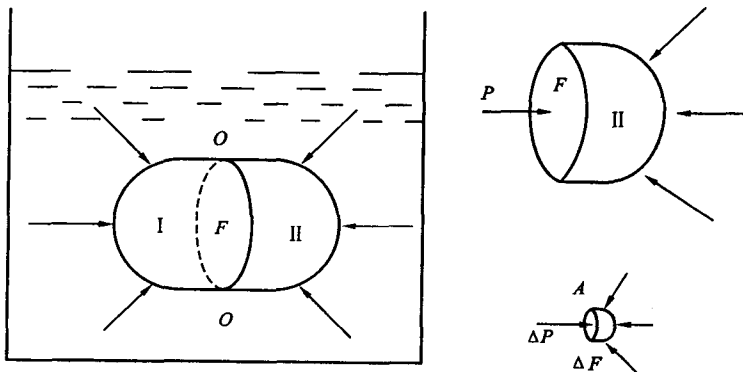


图 1.3 流体静压力



当作用在截面上的压力处处相等时, 截面上的压强为:

$$p = \frac{P}{F} \text{ (Pa)} \tag{1.21}$$

当  $\Delta F$  无限缩小, 平均静压强  $p_{av}$  就趋向于点  $A$  的静压强, 即:

$$\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} = p_A \text{ (Pa)} \tag{1.22}$$

$p_A$  称为  $A$  点静压强。

### 1.2.1.2 静压强的特性

流体静压强存在于流体内部或流体与固体壁面之间, 它垂直于其所作用的面积, 而且是沿着作用面的内法线方向。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, 只有法线方向的力存在, 即压强。流体不能承受拉力, 且具有易流动性。

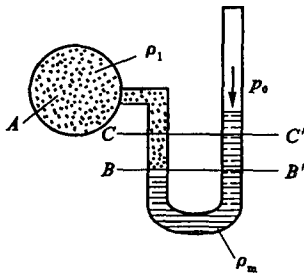


图 1.4 流体等压面

作用于静止流体同一点压强的大小各向相等, 并与作用面垂直。

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, 也可以是流体与固体之间的接触面。通常情况下液体和固体与气体之间的接触面称为自由面。

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。只有重力作用下的等压面应是静止、连通的同一水平面, 如图 1.4 所示, 断面  $B-B'$ ,  $C-C'$  为等压面。

### 1.2.1.3 流体静压强的物理意义及量度

静止均质仅受重力作用的流体其静压强在数值上等于该液体柱作用于它的底部单位面积上的流体重力。

如图 1.5 所示, 当作用在自由面上的压强  $p_0 = 0$  时, 设流体的密度为  $\rho$ , 流体柱的高度为  $h$ , 流体底部面积为  $A$ , 则作用于底部的流体柱的重力为  $\rho g A h$ , 根据式(1.21), 作用于底部的静压强为:

$$p = \frac{\rho g A h}{A} = \rho g h \text{ (Pa)} \tag{1.23}$$

或

$$h = \frac{p}{\rho g} \text{ (m)} \tag{1.24}$$

若作用在自由面上的压强  $p_0 \neq 0$ , 则:

$$p = p_0 + \rho g h \text{ (Pa)} \tag{1.25}$$

或

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g} \text{ (m)} \tag{1.26}$$

通过以上分析可知:

(1) 仅在重力作用下, 静止流体中某一点的静压强随深度按线性规律增加。

(2) 仅在重力作用下, 静止流体中某一点的静压强等于表面压强加流体的容重与该点淹没深度的乘积。