

# 水泥工业热工过程及设备

山东建筑材料工业学院 主编



中等专业学校试用教材

中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

# 水泥工业热工过程及设备

山东建筑材料工业学院 主编

中国建筑工业出版社



本书系水泥工艺专业中等专业学校试用教材，介绍水泥生产过程中热加工的基础知识和有关设备。内容包括：流体力学基础及流体输送设备（包括固体颗粒流态化）、燃料及燃烧计算、传热学、干燥过程及设备、熟料煅烧过程及设备、热工测量仪表等。以阐述基本概念为主，简介设计计算方法，并力求联系生产实际。

本书也可供水泥工业技工学校、职工业余教育和有关水泥工作者参考。

中等专业学校试用教材  
**水泥工业热工过程及设备**  
山东建筑材料工业学院 主编

\*  
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*  
开本：787×1092毫米 1/16 印张：27 插页：1 字数：654千字  
1981年6月第一版 1981年6月第一次印刷  
印数：1-11,700册 定价：2.20元  
统一书号：15040·4078

## 前 言

本教材是根据1978年8月全国中等专业学校水泥工艺专业教材大纲会议制订的“热工过程及设备教材大纲（水泥工艺专业适用）”编写的。适用教学时数为176学时（包括实验课10学时）。

本课程的任务是研究水泥生产热加工过程中的下述内容：

流体流动、固体颗粒流态化、燃料燃烧、传热、干燥和煨烧等方面的有关理论；

干燥和煨烧过程中有关设备的结构和工作原理；

干燥和煨烧过程的热工计算、设备选型和简易设计计算；

干燥和煨烧过程的基本操作原理；

干燥和煨烧过程中常用测量仪表的测量原理和使用知识。

使用本教材时，对基础理论方面的内容要配合必要的实验和章末的基本习题及思考题，边讲边练，加深理解，以巩固所学知识；对实践方面的内容，如设备和仪器的结构、工作原理和操作使用等，可配合实物、模型、幻灯和生产现场进行教学，以节省实践性内容教学时数和提高教学质量。本书采用国际单位制，但图表、标准目前仍使用工程单位制，本书引用时未加改动，请读者注意，使用时需进行换算。

本书由李兆钰主编。各章编写人员及分工如下：山东建筑材料工业学院李兆钰（第一、四、六章）、韩梅祥（第五章）、周沛（第三章）、张福崑（第二章），洛阳建筑材料工业学校邱士琪（第四章）。

本书由武汉建筑材料工业学院孙晋涛主审。其他参加审稿人员有：李俭之、黄锦扬（建筑材料科学研究院）、王朝亨（同济大学）、徐佐璋（上海建筑材料工业专科学校）、刘述祖（北京市建筑材料工业学校）。

由于编者水平有限，实践经验不足，时间仓促，对国际单位制的使用不够熟悉，故书中缺点错误在所难免，望读者批评指正。

编 者  
1980年12月

# 目 录

物理量的因次与单位制度 .....	1
第一章 流体力学基础及流体输送设备 .....	6
第一节 流体的物理性质 .....	6
一、流体的密度 .....	6
二、流体的密度与温度、压力的关系 .....	8
三、流体的粘性 .....	8
第二节 流体静力学基础知识 .....	11
一、流体静压力及其特征 .....	11
二、流体静力学基本方程式 .....	12
第三节 流体动力学基础知识 .....	14
一、流量和流速 .....	14
二、稳定流动与不稳定流动 .....	14
三、流体流动的状态 .....	15
四、流体在导管中的速度分布和层流底层 .....	17
五、流体流动的连续性方程式 .....	18
六、流体具有能量的种类 .....	19
七、伯努利方程式 .....	20
八、流体流动时的压头损失 .....	23
第四节 相似理论简介 .....	33
一、相似概念 .....	33
二、相似现象的共性 .....	35
三、相似准数的导出(因次分析法) .....	36
四、相似现象的判别 .....	37
五、实验及实验数据的整理 .....	38
第五节 固体颗粒流态化 .....	40
一、固体流态化的过程 .....	40
二、气体流化床的性质 .....	42
三、流化床的形态及不正常现象 .....	42
四、固体颗粒有关参数的计算 .....	45
五、流化床的压力降 .....	47
六、流态化临界速度 .....	48
七、流态化极限速度 .....	49
八、流化床的优缺点 .....	52
第六节 流体输送设备 .....	53
一、自然通风装置——烟囱 .....	53
二、风机 .....	57

三、离心泵.....	83
第二章 燃料及燃烧计算 .....	93
第一节 概述.....	93
一、水泥工业对燃料的要求.....	93
二、燃料的分类.....	94
第二节 燃料的主要性质.....	94
一、燃料的组成及表示方法.....	94
二、燃料的发热量.....	99
三、水泥工业用燃料热工特性.....	102
第三节 燃料燃烧计算.....	104
一、燃料燃烧计算内容及基本概念.....	104
二、空气用量和烟气生成量及其成分和密度的计算.....	105
三、燃烧温度及其计算.....	112
第三章 传热学 .....	119
第一节 传热的基本概念.....	119
一、传热的基本条件.....	119
二、传热的基本方式.....	119
第二节 传导传热.....	121
一、导热的基本概念及定律.....	121
二、导热系数.....	123
三、稳定传导传热的计算.....	124
第三节 对流传热.....	131
一、对流传热过程的分析.....	131
二、对流传热的基本定律(牛顿冷却定律).....	131
三、对流传热准数方程式.....	131
四、不同情况下对流传热系数及传热计算.....	134
第四节 辐射传热.....	138
一、辐射传热的基本概念.....	138
二、辐射传热的基本定律.....	140
三、固体间的辐射传热.....	144
四、气体辐射.....	149
第五节 综合传热.....	155
一、传热统一公式.....	155
二、一种气体通过平壁传热给另一种气体.....	157
三、一种气体通过圆筒壁传热给另一种气体.....	158
四、窑体表面散热计算.....	160
第四章 干燥过程及设备 .....	163
第一节 概述.....	163
第二节 湿空气的基本性质.....	163
一、湿度.....	164
二、湿空气的密度.....	166
三、热含量.....	167

四、干球温度、湿球温度和露点 .....	167
第三节 湿空气的 $I-x$ 图 .....	169
一、 $I-x$ 图的作法 .....	169
二、 $I-x$ 图的应用 .....	171
第四节 干燥过程的物料平衡和热平衡 .....	175
一、物料平衡 .....	175
二、热量平衡 .....	177
三、干燥过程的图解计算 .....	179
第五节 物料干燥的物理过程 .....	184
一、物料中所含水分的性质 .....	184
二、干燥过程的机理 .....	185
三、影响干燥速度的因素 .....	187
第六节 干燥设备 .....	188
一、回转烘干机 .....	188
二、流态烘干机 .....	197
三、带烘干的磨机 .....	201
第七节 固体燃料的燃烧过程及燃烧设备 .....	205
一、概述 .....	205
二、块煤的燃烧过程及燃烧设备 .....	206
三、煤粉的燃烧过程及燃烧设备 .....	214
第五章 熟料的煅烧过程及设备 .....	222
第一节 水泥熟料的形成 .....	222
一、水泥熟料的形成过程 .....	222
二、水泥熟料的形成热 .....	225
第二节 水泥熟料在回转窑内的煅烧 .....	232
一、回转窑的煅烧方法与分类 .....	232
二、回转窑“带”的划分 .....	235
三、回转窑内的燃料燃烧 .....	237
四、回转窑内的物料运动 .....	241
五、回转窑内的气体流动 .....	242
六、回转窑内的传热 .....	244
第三节 回转窑的结构 .....	246
一、筒体 .....	246
二、轮带 .....	247
三、托轮与窑体的窜动 .....	248
四、挡轮 .....	251
五、传动装置 .....	252
六、密封装置 .....	254
七、煤粉燃烧装置 .....	256
八、窑衬 .....	257
第四节 回转窑的热交换装置 .....	260
一、干法窑的热交换装置 .....	260
二、湿法窑的热交换装置 .....	271

第五节 熟料冷却装置 .....	283
一、单筒冷却机 .....	284
二、多筒冷却机 .....	285
三、篦式冷却机 .....	286
第六节 回转窑的操作 .....	290
一、开窑点火与挂窑皮操作 .....	290
二、正常煅烧操作和控制 .....	291
三、不正常煅烧操作 .....	296
第七节 回转窑的热工计算 .....	297
一、回转窑筒体尺寸与生产能力的关系 .....	297
二、回转窑筒体尺寸的确定 .....	298
三、回转窑产量的计算 .....	300
四、回转窑的物料平衡与热平衡 .....	302
第八节 窑外分解技术 .....	311
一、工艺概要及生产流程 .....	311
二、分解炉的类型与结构 .....	314
三、分解炉的工作原理 .....	318
四、窑外分解系统主要设备尺寸的概算 .....	322
第九节 立窑煅烧水泥熟料 .....	326
一、立窑内熟料的煅烧过程与“带”的划分 .....	326
二、立窑内的燃料燃烧 .....	328
三、立窑内的气体流动 .....	331
四、立窑内的传热 .....	333
五、立窑内的物料运动 .....	334
第十节 立窑的结构 .....	335
一、窑体 .....	336
二、加料装置 .....	338
三、卸料装置 .....	338
四、卸料密封装置 .....	342
五、通风装置 .....	343
第十一节 立窑的简易热工计算 .....	345
一、立窑规格的确定 .....	345
二、立窑生产能力的计算 .....	346
三、立窑燃料消耗量的确定 .....	347
四、立窑鼓风量的确定 .....	347
五、立窑废气量的确定 .....	348
六、鼓风机的选型与烟囱计算 .....	348
第六章 热工测量仪表 .....	351
第一节 概述 .....	351
一、热工测量仪表在水泥生产过程中的作用 .....	351
二、热工测量仪表的分类和品质指标 .....	351
第二节 压力测量仪表 .....	352
一、液柱式压力计 .....	352



二、弹性式压力计	354
三、差压计	356
四、测压仪表的选择和安装	357
第三节 流量测量仪表	360
一、动压式流量计	360
二、节流式流量计	367
三、转子流量计	370
四、湿式流量计	373
第四节 气体中含尘率的测定	373
一、管道外滤尘法	374
二、管道内滤尘法	377
第五节 气体湿度的测定(干湿球温度计法)	380
第六节 温度测量仪表	382
一、膨胀式温度计	382
二、压力式温度计	385
三、热电偶温度计	386
四、热电阻温度计	395
五、半导体电阻温度计	398
六、接触式测温元件的安装	400
七、热辐射式高温计	400
第七节 气体成分分析器	406
一、CO <sub>2</sub> 自动分析器工作原理	406
二、CO+H <sub>2</sub> 自动分析器工作原理	407
三、O <sub>2</sub> 自动分析器工作原理	408
附录	411
一、工程单位制和国际单位制的换算	411
二、管道经济流速	412
三、烟气(压力为101325帕时)的物性参数	412
四、干空气(压力为101325帕)的物性参数	412
五、在饱和线上蒸汽的物性参数	413
六、在饱和线上水的物性参数	414
七、空气的相对湿度表	415
八、单位代号说明	419
主要参考文献	420
附图一 湿空气 <i>I</i> - <i>x</i> 图(低温)(总压99.321千帕)	

# 物理量的因次与单位制度

## 一、物理量的因次

生产过程中的物质，都具有各种不同的物理性质，如粘度、密度、导热系数等；而且常需用各种不同的参数，如温度、压力、速度等来表示过程的特征。尽管这些物理量种类繁多，各不相同，但都可以通过几个彼此独立的基本量来表示其性质。常用的基本量如长度( $L$ )、力( $F$ )或质量( $M$ )、时间( $T$ )和温度( $\theta$ )等。应用这些基本量来表示物理量的特性的式子称为量纲或因次式。例如速度的因次式为 $LT^{-1}$ ；加速度的因次式为 $LT^{-2}$ 等。

物理量的因次式可以用来判别物理量关系式的正确性。因为一个物理方程式，其等号两端不仅数值相等，而且因次式也必须相等，只有因次式相同的项才能相加减。例如，竖直上抛运动的位移公式 $S = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$ ，等号左边 $S$ 的因次式为( $L$ )，因此等号右边各项的因次式一定也为( $L$ )。如果关系式等号两边的因次式不相等，那么这个关系式就是错误的。

## 二、单位制度

用以表示各个物理量大小的单位，有各种不同的计量制度，如米制和英制，米制中又有绝对单位制和工程单位制。除了上述单位制外还有从米制发展而来的国际单位制。国际单位制是1960年第十一届国际计量大会通过的，其国际代号为SI，我国简称国际制。

目前我国在工程技术上还应用工程单位制，以长度、力和时间作为基本量，并规定它们的单位——米、公斤力、秒为基本单位。质量为导出量，它的相应单位为导出单位——公斤力·秒<sup>2</sup>/米。

而国际单位制是以长度、质量和时间作为基本量，并规定它们的单位为——米、公斤(千克)、秒为基本单位。力为导出量，它的相应单位为导出单位——牛顿(公斤·米/秒<sup>2</sup>)。

目前绝大部分工业较发达的国家都积极地推广国际单位制，原来采用英制的国家也大部分决定放弃英制，采用或准备采用国际单位制，不少国家宣布在不长时间内完成向国际单位制过渡。国际单位制有如下优点：

(1) 国际单位制包括力学、热学、电磁学、光学、声学、化学等所有领域的计量单位，它使科学技术、生产、日常生活等所有方面的计量单位统一在一个单位制中。

(2) 可以消除多种单位制和单位并用的现象，从而避免了很多不合理甚至矛盾的现象。例如压力单位：国际单位制用帕斯卡代替了公斤力/厘米、公斤力/米<sup>2</sup>、工程大气压、标准大气压、毫米水柱、毫米汞柱、巴、达因/厘米等所有压力单位。又如功、能和热量这几个量，虽然测量形式不同，但它们在本质上是相同的量，在国际单位制中只用一个单位焦耳便代替了过去常用的公斤力·米、尔格、千卡、千瓦·小时等多种单位，这样就避免了同类量却有不同量纲的矛盾。

(3) 国际单位制取消了相当数量的各种单位，大大简化了一些物理量的表示形式，

省略了很多不同单位制和单位之间的换算系数（如热功当量等）和计算手续。

（4）国际单位制澄清了一些量和单位的概念。例如，过去长期以来，公斤既是质量的单位又是重量的单位。在国际单位制中公斤（千克）只作为质量的单位，而重量（力）的单位为牛顿。

（5）便于国家之间的科学技术交流。

我国国务院于一九七七年五月二十七日颁发的《中华人民共和国计量管理条例（试行）》第三条规定：“我国的基本计量制度是米制（即公制），逐步采用国际单位制”。教育部也发了“关于教材采用国际单位制的通知”。

本书按照国家规定采用国际单位制。可是我国当前科技领域里的计算公式、计算图表、产品样本和测量仪表的刻度等都是用的工程单位制，所以必须熟悉两种单位制的换算，以适应目前社会上普遍使用工程单位制的客观实际。

### 1. 两种单位制（国际单位制和工程单位制）的换算

#### （1）长度和时间

两种单位制的长度和时间的单位均为米（m）和秒（s），因此不存在换算问题。由长度和时间二个基本量导出的一切导出量的单位也相同，也不存在换算问题，如：面积（ $m^2$ ）；速度（ $m/s$ ）；加速度（ $m/s^2$ ）；运动粘度（ $m^2/s$ ）。

#### （2）质量和重量（力）

国际单位制定“国际千克原器”的质量为1公斤(kg)，作为基本单位；工程单位制定“国际千克原器”在纬度 $45^\circ$ 海平面上受地球的引力为1公斤力(kgf)，作为基本单位。因此国际单位制的质量和工程单位制的重量在数值上是一致的，不用换算。

但要注意，为了区别两种单位制的单位“公斤”，工程单位制中重量(力)的单位“公斤”后面加一符号“力”(f)成为“公斤力”(kgf)以资区别国际单位制中质量的单位“公斤”(kg)。

#### 1) 重量(力)：

在国际单位制中质量是基本量，它以“国际千克原器”的质量定为1公斤。而重量(力)是导出量，“国际千克原器”受地球的引力(纬度 $45^\circ$ 海平面上)为：

$$\begin{aligned} \text{力} &= \text{质量} \times \text{加速度} \\ &= 1 \text{ 公斤} \times 9.80665 \text{ 米/秒}^2 \\ &= 9.80665 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}^2 \\ &= 9.80665 \text{ 牛} \end{aligned}$$

上式中导出单位“公斤·米/秒<sup>2</sup>”用专门名称“牛顿”代之，用代号“牛”(N)表示。

1牛的力就是对质量为1公斤的物体，使产生1米/秒<sup>2</sup>加速度的力。

而工程单位制中以重量(力)为基本量，它以“国际千克原器”受地球引力(纬度 $45^\circ$ 海平面上)定为1公斤力(kgf)。

因此，两种单位制重量(力)的换算关系为：

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$$

#### 2) 质量：

工程单位制中以重量(力)为基本量，它以“国际千克原器”受地球引力(纬度 $45^\circ$ 海平面上)定为1公斤力(kgf)，那么其质量为：

$$\begin{aligned} \text{质量} &= \frac{\text{力}}{\text{加速度}} \\ &= \frac{1 \text{ 公斤力}}{9.80665 \text{ 米/秒}^2} \\ &= 0.101972 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米} \end{aligned}$$

而国际单位制以“国际千克原器”定为质量 1 公斤。

所以两种单位制质量的换算关系为：

$$1 \text{ 公斤}(\text{kg}) = 0.101972 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}(\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m})$$

### (3) 密度和重度

国际单位制的密度单位为公斤/米<sup>3</sup>；工程单位制的重度单位为公斤力/米<sup>3</sup>。国际单位制的密度  $\rho$  和工程单位制的重度  $\gamma$  在数值上是相同的。另外比容的数值在两种单位制中也相同，只是在工程单位制中把比容定义为  $\frac{1}{\gamma}$ ，而国际单位制中则定义为  $\frac{1}{\rho}$ 。

国际单位制取消了重度的概念，重度  $\gamma$  可用密度  $\rho$  乘重力加速度  $g$  取代之。

### (4) 压力

工程单位制中压力常用单位是公斤力/米<sup>2</sup>，国际单位制的压力单位是“帕斯卡”（牛顿/米<sup>2</sup>），其代号为“帕”（Pa）。

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf/m}^2 &= 9.80665 \text{ N/m}^2 \\ &= 9.80665 \text{ Pa} \end{aligned}$$

目前，标准大气压(atm)暂时可与国际单位制并用。

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

### (5) 粘度

工程单位制中动力粘度的单位是“公斤力·秒/米<sup>2</sup>”，国际单位制中动力粘度的单位是“帕·秒”。它们之间的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2 &= 9.80665 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \\ &= 9.80665 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

运动粘度的单位，两种单位制是一致的，不用换算。

### (6) 温度

国际单位制中温度单位采用热力学温度（绝对温度）单位——开尔文，用代号“开”（K）表之，符号用  $T$ 。照顾到习惯的需要，国际单位制也可采用摄氏温度单位，代号为“°C”，符号用  $t$ 。它们之间有如下的关系：

$$T = t + 273.15$$

开尔文与摄氏度仅是作为计算起点的选择不同，而温度间隔的划分是一样的，因而凡涉及到温差的地方用(K)或(°C)在数值上是相同的，即：

$$\Delta t = \Delta T$$

### (7) 功、能和热量

在国际单位制中，功、能和热量统一用一个单位“焦耳”，其代号为“焦”(J)。其定义是：1 牛顿的力，沿着力的方向作用 1 米路程所作的功称为 1 焦耳，即：

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$= 1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

工程单位制和国际单位制的换算关系如下：

$$1 \text{ kgf}\cdot\text{m}=9.80665\text{J}$$

$$1 \text{ cal(卡)}=4.1868\text{J}$$

### (8) 功率和热流

在国际单位制中，功率和热流统一用一个单位“瓦特”，代号为“瓦”(W)。其定义是：每秒做1焦耳的功，其功率为1瓦特，即：

$$1 \text{ W}=1 \text{ J/s}$$

两种单位制的换算关系如下：

$$1 \text{ kcal/h(千卡/时)}=\frac{4.1868\times 10^3}{3600} \text{ J/s}$$

$$=1.163\text{W}$$

### (9) 物质的量单位

国际单位制中为计量物质结构粒子数量的单位用“摩尔”，代号为“摩”(mol)。它是由以往的“克分子”演变而来的。

摩尔的定义是：一定量的任何物质所包含的结构粒子数与0.012公斤碳12的原子数目( $6.023\times 10^{23}$ )相等，这一一定量的物质就叫做1摩尔。其结构粒子可能是原子、分子、离子、电子及其它粒子，或是这些粒子的特定组合。

以前热工上常用的公斤分子量、公斤分子数、公斤分子体积等，在国际单位制中统统废除，而代之以摩尔，其关系可见表1。

物 质 的 量 单 位

表 1

国际单位制		工程单位制		换 算 关 系
名 称	单 位	名 称	单 位	
摩尔质量	公斤/摩(kg/mol)	公斤分子量	公斤力/公斤力分子	1公斤/摩=1000公斤力/公斤力分子
摩尔数	摩(mol)	公斤分子数	公斤力分子	1摩= $\frac{1}{1000}$ 公斤力分子
摩尔体积	米 <sup>3</sup> /摩(m <sup>3</sup> /mol)	公斤分子体积	米 <sup>3</sup> /公斤力分子	1米 <sup>3</sup> /摩=1000米 <sup>3</sup> /公斤力分子
摩尔浓度	摩/米 <sup>3</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	公斤分子浓度	公斤力分子/米 <sup>3</sup>	1摩/米 <sup>3</sup> = $\frac{1}{1000}$ 公斤力分子/米 <sup>3</sup>

上面举例说明了两种单位制换算的基本原理，有关单位换算的系数可查附录一。

### 2. 国际单位制的词冠

为了使数值处在0.1~1000之间，单用主单位是不够的，要在主单位前加词冠组成倍数单位或分数单位。各种词冠可见表2。

有关国际制词冠使用说明如下：

(1) 不允许用由几个国际词冠并列构成的组合词冠。例如：用1nm，而不允许用1m $\mu$ m。在国际制基本单位中，质量单位是唯一的在名称上带有词冠的。质量单位的倍数与分数单位的名称，仍在“克”字前加上词冠构成。

国际制词冠

表 2

倍乘词冠名称	中文 代号	国际 代号	为主单位 的倍乘数	倍乘词冠名称	中文 代号	国际 代号	为主单位 的倍乘数
艾克萨(exa)	艾	E	$10^{18}$	分(dec)	分	d	$10^{-1}$
拍它(peta)	拍	P	$10^{15}$	厘(centi)	厘	c	$10^{-2}$
太拉(tera)	太	T	$10^{12}$	毫(milli)	毫	m	$10^{-3}$
吉咖(giga)	吉	G	$10^9$	微(micro)	微	$\mu$	$10^{-6}$
兆(mega)	兆	M	$10^6$	纳诺(nano)	纳	n	$10^{-9}$
千(kilo)	千	K	$10^3$	皮可(pico)	皮	p	$10^{-12}$
百(hecto)	百	h	$10^2$	非姆托(femto)	非	f	$10^{-15}$
十(deca)	十	da	$10^1$	阿托(atto)	阿	a	$10^{-18}$

(2) 主单位前加上词冠后, 其单位变化如下:

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$$

$$1 \text{mg} = 10^{-3}\text{g}$$

(3) 如果带词冠的主单位上有指数, 则表明倍数单位或分数单位按指数自乘, 例如:

$$1 \text{cm}^3 = 1 (10^{-2}\text{m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3$$

$$1 \text{cm}^{-1} = 1 (10^{-2}\text{m})^{-1} = 10^2\text{m}^{-1}$$

(4) 选用国际制单位的倍数或分数单位时, 应使数值处在 0.1~1000 之间。例如:

$$12000\text{N} \quad \text{可写成} \quad 12\text{kN}$$

$$0.00394\text{m} \quad \text{可写成} \quad 3.94\text{mm}$$

$$1410\text{Pa} \quad \text{可写成} \quad 1.401\text{kPa}$$

$$2.8 \times 10^7\text{J} \quad \text{可写成} \quad 28\text{MJ}$$

但是在同一个量的数值表中, 或在一篇文章中讨论这些数值时, 即使有些数值不在 0.1~1000 范围内, 也最好使用一致的倍数单位或分数单位。对于有些量, 在特殊的使用场合, 可以用同一个习惯的倍数单位或分数单位。例如, 在机械制图中都使用毫米表示几何尺寸。



# 第一章 流体力学基础及流体输送设备

水泥工业的窑炉，不但要产生热量，同时还要把热量传递给所需加热的物料。窑炉内传递热量的媒介是燃料燃烧后所产生的炽热的气态燃烧产物。因此，在窑炉内燃料的合理燃烧以及有效地加热物料，是与气体的流动情况密切相关的。

水泥生产过程中液体（水和料浆）的输送，在湿法生产中显得更为重要，它是生产中不可缺少的组成部分。

气体和液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的变形没有抵抗能力，故都具有流动性。由于气体和液体都具有这一基本的共同特征，因此，就把它们统称为流体。研究流体平衡和运动规律的科学称为流体力学。

气体和液体还存在着差别。我们知道，液体（例如水）的体积几乎是不随温度和压力的改变而变化的。可是气体（例如空气等）的体积，则随温度和压力的改变而有很大的变化。所以我们说，液体几乎不具有压缩性和膨胀性，而气体则具有很大的压缩性和膨胀性。

气体虽然有很大的压缩性和膨胀性，然而实际上窑炉中各部分的气体压力差只有大气压力的千分之几，甚至是万分之几，这一微小的压力变化并不会引起气体体积的显著改变；而且窑炉内的压力与大气压力十分相近。因此，压力对气体的压缩性和膨胀性的影响就更小了。窑炉内的温度是逐渐变化的，就其某一小段而言，往往温度的变化是很小的，那么对气体体积的影响就可以近似地忽略不计。在这种情况下，可以认为气体在窑炉中流动时，其密度不变，这样，比较完善的水力学中某些基本定律便可在一定程度上应用到窑炉上，给窑炉气体力学的研究带来方便。但是，当气体的压力和温度变化较大时，就应当考虑其体积的变化，不能认为密度不变，在计算中应当考虑其变化的结果。

## 第一节 流体的物理性质

### 一、流体的密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度。设 $m$ 为流体的质量（公斤）， $V$ 为流体的体积（米<sup>3</sup>）， $\rho$ 为流体的密度（公斤/米<sup>3</sup>），则：

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

水在4°C时的密度为1000公斤/米<sup>3</sup>；空气在标准状态（0°C及1大气压）下的密度为1.293公斤/米<sup>3</sup>。

在水泥生产过程中，会遇到流体的混合物，经常遇到的是气体的混合物，液体混合物遇到得较少。

对于气体混合物的密度，可按下列式计算：

$$\rho_m = \frac{1}{100}(\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n) \quad (1-2)$$

式中  $\rho_m$ ——气体混合物的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——气体混合物中各组分的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——气体混合物中各组分的体积百分数 (%) 。

在式(1-2)中, 等号右边表示 1 米<sup>3</sup>气体混合物中各组分的质量之和, 即气体混合物的密度。

对于液体混合物的密度, 可按下列式计算:

$$\rho_{ml} = \frac{1}{\frac{1}{100} \left( \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \right)} = \frac{100}{\frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n}} \quad (1-3)$$

式中  $\rho_{ml}$ ——液体混合物的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中, 各组分的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  
 $a_1, a_2, \dots, a_n$ ——液体混合物中, 各组分的重量百分数 (%) 。

在式(1-3)中, 等号右边的分母表示 1 公斤液体混合物中各组分的体积之和, 其倒数即为液体混合物的密度。

【例 1-1】 求空气在标准状态下的密度。

【解】 已知:  $\text{N}_2$  的分子量为 28,  $\text{O}_2$  的分子量为 32。

在标准状态下,  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的密度为:

$$\rho_{\text{N}_2} = \frac{28}{22.4} = 1.25 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{\text{O}_2} = \frac{32}{22.4} = 1.42 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

因空气中含有  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的体积百分数分别为 79% 和 21%, 故空气在标准状态下的密度为:

$$\rho_a = \frac{1}{100}(\rho_{\text{N}_2} x_{\text{N}_2} + \rho_{\text{O}_2} x_{\text{O}_2}) = \frac{1}{100}(1.25 \times 79 + 1.42 \times 21) = 1.29 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

由于  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的分子量和体积百分数均采用近似数值, 所以得到近似答案, 正确的答案应是 1.293 公斤/米<sup>3</sup>。

【例 1-2】 酒精的密度为  $0.79 \times 10^3$  公斤/米<sup>3</sup>, 现混合些水, 使其密度为  $0.84 \times 10^3$  公斤/米<sup>3</sup>。求酒精和水的重量混合物。

【解】 已知: 混合物的密度  $\rho_{ml} = 0.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 酒精的密度  $\rho_1 = 0.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 水的密度  $\rho_2 = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

酒精和水的重量混合比  $a_1 + a_2 = 100\%$

$$\rho_{ml} = \frac{1}{\frac{1}{100} \left( \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} \right)}$$

经整理得:

$$\frac{1}{\rho_{ml}} = \frac{1}{100} \left( \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} \right)$$

将数字代入:

$$\frac{1}{0.84 \times 10^3} = \frac{1}{100} \left( \frac{a_1}{0.79 \times 10^3} + \frac{a_2}{1 \times 10^3} \right)$$

用  $a_2 = 100 - a_1$  代入上式, 可解得:

$$a_1 = 71.7\%$$

$$a_2 = 100 - a_1 = 28.3\%$$

酒精和水混合后, 总体积要发生一点变化的, 上例是近似计算。

## 二、流体的密度与温度、压力的关系

液体的体积受温度和压力的影响很小。例如水，压力增加1大气压，体积只减小十万分之五；温度在80~100°C范围内的水，水温升高1度，体积只膨胀万分之七。因此，在工程计算上可以把液体的密度看作与温度、压力无关的常数。

一定质量的气体的体积受温度和压力的影响很大。其相互关系可用气体状态方程式表示：

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} \quad (1-4)$$

或 
$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5a)$$

或 
$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{1}{1 + \beta t} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1-5b)$$

式中  $V$ 、 $V_0$ ——质量为  $m$  公斤的气体在某一状态下和标准状态下的体积 ( $\text{m}^3$ )；

$p$ 、 $p_0$ ——气体在某状态下和标准状态下的绝对压力 (Pa)；

$T$ 、 $T_0$ ——气体在某状态下和标准状态下的温度 (K)；

$t$ ——气体在某状态下的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$\rho$ 、 $\rho_0$ ——气体在某状态下和标准状态下的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\beta$ ——气体在  $0^{\circ}\text{C}$  时的体积膨胀系数，其值为  $\frac{1}{273} (1/^{\circ}\text{C})$ 。

**【例 1-3】** 氧气瓶的容积为  $0.035 \text{m}^3$ ，其中氧气的压力是 148 大气压，温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ，求此氧气瓶中氧气的质量。

**【解】** 已知： $V = 0.035 \text{m}^3$ ， $p = 148 \times 101325 \text{Pa}$ ， $T = 273 + 20 = 293 \text{K}$ ，标准状况下氧的密度  $\rho_0 = 1.42 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0 p}{T p_0} = 1.42 \cdot \frac{273 \times 148 \times 101325}{293 \times 101325} = 196 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$m = \rho V = 196 \times 0.035 = 6.86 (\text{kg})$$

## 三、流体的粘性

我们用一棒分别搅动一缸重油和一缸水，感到搅动重油时费劲，我们通常说：这是因为重油比水的粘性大。那么粘性是什么物理性质的现象呢？下面我们来讨论这一问题。

处于静止状态的流体是表现不出粘性的，但流体一旦流动粘性会立即表现出来。

当流体在管道中作缓慢的流动时，通过测定，其速度分布情况如图 1-1 所示。紧贴管壁处的流体质点速度为零，这是因为流体分子与管壁的附着力大于其分子的内聚力所致。

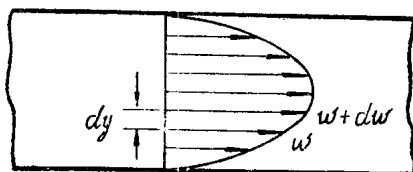


图 1-1 管道中流体流速分布图

紧贴管壁的这一层不流动的流体，通过流体的粘性作用而影响第二层流体的流速；同样，第二层流体又影响第三层流体的流速，如此层层影响。但这种影响是逐层减小的。因此，靠近管壁处的流速小，远离管壁处的流速大，管中心处流速最大，形成如图 1-1 所示的流速分布情况。

流体产生粘性的原因，是由于相邻流体层间分子的内聚力阻碍其相对滑动。另外是由于流体分子的热运动，使作相对运动的相邻两流体层之间有流体分子的相互掺混，因而产生动量交换，速度慢的一层的分子进入速度快的一层中去后，速度快的一层就会受到慢的