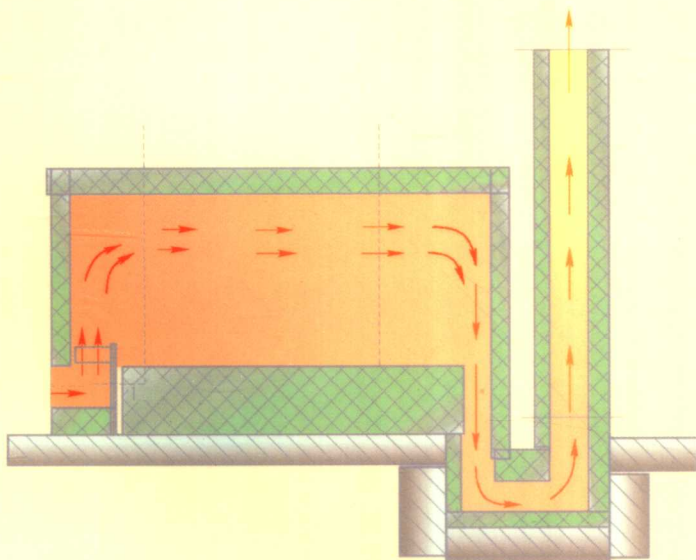


高等学校规划教材  
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

# 热工基础与工业窑炉

主 编 徐利华 延吉生



冶金工业出版社

高等学校规划教材

# 热工基础与工业窑炉

主 编 徐利华 延吉生  
副主编 邱云萍 刘 明 连 芳

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2006

## 内 容 简 介

本书是根据当前冶金及硅酸盐工程专业教学要求而编写的教材。本教材着重阐述重大高温工程和材料生产过程所涉及的热工设备的基本理论,主要包括窑炉气体运动、传热传质及燃料燃烧等基本原理,并运用这些热工基础理论对各类硅酸盐工业常见炉窑的基本构造、热工特性和操作原理进行了讨论。本教材还介绍了有关钢铁工业炉窑的一些基本知识,旨在扩大读者对冶金工业炉窑的构造、热工知识及相关技术的了解,并为培养高层次专业人才奠定基础。本教材每章前都配有本章要点,每章后都有习题,便于读者学习使用。

本教材可供高等院校冶金、能源、硅酸盐专业及其他高温专业的师生在教学时使用,也可供从事相关专业的工程技术人员以及国外来中国留学、进修人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热工基础与工业窑炉/徐利华等主编. —北京:冶金工业出版社,2006.7  
ISBN 7-5024-3989-7

I.热… II.徐… III.①热工学 ②工业炉窑  
IV.①TK122 ②TK17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043768 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)  
责任编辑 张卫(联系电话:010-64027930,电子信箱:bull2820@sina.com) 王雪涛  
文字编辑 顾宝德 美术编辑 李心  
责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 牛晓波  
北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销  
2006年7月第1版,2006年7月第1次印刷  
170mm×227mm; 11.5印张; 202千字; 174页; 1-3500册  
26.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893  
冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 前 言

《热工基础与工业窑炉》是根据当前冶金及硅酸盐工程专业教学要求而编写的教材。本教材着重阐述重大高温工程和材料生产过程所涉及的热工设备的基本理论,主要包括窑炉气体运动、传热传质及燃料燃烧等基本原理;运用这些热工基础理论对各类硅酸盐工业常见炉窑的基本构造、热工特性和加热技术进行分析和讨论。本教材还介绍了有关钢铁工业的一些基本炉窑知识,旨在扩大广大读者对高温工业炉窑的构造、热工特性及相关节能环保技术的普及与了解,并为培养高层次专业人才奠定基础。本教材可供工科高等院校冶金、能源、硅酸盐及相关专业师生教学时使用,也可供从事相关专业的工程技术人员和进修人员参考。

本教材由北京科技大学无机非金属材料系徐利华教授、科技部资源与环境处延吉生处长担任主编,邸云萍博士、刘明博士和连芳博士任副主编。浙江大学潘洪革教授、翁文剑教授,清华大学黄勇教授、李建保教授,北京科技大学李文超教授、孙加林教授和王福明副院长对本教材进行了审阅。

编者感谢国家自然科学基金重点项目、国家科技攻关计划、国家“863”计划以及教育部科学技术研究重点项目的资助。

由于编者水平所限,书中不妥之处,希望读者批评指正。

编 者  
2006年1月

# 目 录

绪 论 .....	1
<b>1 窑炉气体力学</b> .....	<b>3</b>
1.1 气体的主要特征.....	3
1.2 气体力学基本定律.....	6
1.3 气体运动过程中的阻力.....	14
1.4 气体的逸出.....	19
1.5 可压缩气体的流动.....	21
1.6 流股及流股作用下窑内气体运动.....	27
1.7 烟囱、喷射器与流态化原理 .....	28
1.8 氮化炉中气氛作用与反应机理.....	33
习题与思考题 .....	38
<b>2 传热</b> .....	<b>40</b>
2.1 传导传热——导热.....	40
2.2 对流换热.....	48
2.3 热辐射.....	59
2.4 综合传热.....	71
2.5 换热器.....	74
2.6 不稳定导热.....	76
2.7 传质原理.....	84
习题与思考题 .....	90
<b>3 干燥过程与设备</b> .....	<b>92</b>
3.1 湿空气.....	92
3.2 干燥器的物料平衡与热量平衡.....	94

---

3.3 干燥过程	99
3.4 干燥设备	104
习题与思考题	106
<b>4 燃料与燃烧</b>	<b>107</b>
4.1 燃料特性及各类燃料	107
4.2 燃烧计算	111
习题与思考题	117
<b>5 陶瓷、耐火材料工业窑炉</b>	<b>118</b>
5.1 隧道窑	118
5.2 间歇窑	121
习题与思考题	124
<b>6 玻璃工业窑</b>	<b>125</b>
6.1 玻璃的熔制过程	125
6.2 玻璃池窑	126
习题与思考题	129
<b>7 水泥工业窑</b>	<b>130</b>
7.1 概述	130
7.2 回转窑	131
7.3 立窑	132
习题与思考题	134
<b>8 钢铁工业窑炉</b>	<b>136</b>
8.1 炼铁高炉	136
8.2 炼钢转炉	141
习题与思考题	144
<b>9 薄板坯连铸连轧生产用加热炉及炼钢炉</b>	<b>145</b>
9.1 薄板坯连铸连轧工艺技术	145
9.2 薄板坯连铸连轧加热技术	152

---

9.3 薄板坯连铸连轧生产用炼钢炉 .....	155
习题与思考题 .....	162
<b>附 录</b> .....	163
附录 1 干空气的热物理性质 .....	163
附录 2 在大气压力( $p = 1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ )下烟气的热物理性质 .....	164
附录 3 气体的平均比定压热容 .....	164
附录 4 耐火材料及建筑材料的热导率 .....	165
附录 5 绝热材料的热导率 .....	166
附录 6 各种材料的辐射黑度 $\epsilon$ .....	167
附录 7 湿空气的相对湿度 $\Phi(\%)$ 表 .....	168
附录 8 空气及煤气的饱和水蒸气含量(0.1 MPa) .....	169
<b>名词术语</b> .....	170
<b>参考文献</b> .....	173

## 结 论

无论是硅酸盐工业,还是冶金工业,窑炉生产工艺往往是其最为核心的部分。任何一种硅酸盐(或钢铁)产品,都要经过特定的炉窑进行煅烧。在煅烧过程中,物料在窑内要发生一系列物理、化学以及高温物理化学变化。如果窑炉的设计不合理或操作上存在缺陷,势必影响产品的产量和质量,或浪费原料,增加制品的能耗,严重时出现大量废品。

我国硅酸盐窑炉发展历史源远流长,5000年前就出现烧制陶瓷的升焰窑,之后又相继出现了利用山坡自然倾斜兴建龙窑、阶梯窑,以及景德镇的蛋形窑,明宋期间出现官窑。随着科学技术发展,硅酸盐产品不断扩大,生产工艺更新,根据人们对硅酸盐制品的产量、质量、能耗,对环境污染等提出更高的要求,各种新型窑炉不断出现。

一般在硅酸盐工业中,常用的热工设备包括:原料煅烧设备有立窑(竖窑)、回转窑;制品烧成设备有间歇式的倒焰窑、梭式窑和连续式隧道窑;玻璃熔融设备有池窑、坩埚窑等。此外还有各种类型的原料、半成品干燥设备,如转筒干燥器、流态化烘干机、室式干燥器、隧道式干燥器、链式干燥器等。

在陶瓷、耐火材料工业中,过去长期使用间歇式倒焰窑。该窑炉占地面积小、结构简单、投资少、操作灵活;但由于砌筑体耗热大,烟气余热得不到利用,热效率低,且出、装窑劳动强度高,所以多数中型以上的生产厂家都以隧道窑替代传统的倒焰窑。

由于隧道窑的连续操作,烟气与制品的余热可以得到充分利用,目前在陶瓷、耐火材料工业中得到广泛的应用。但其本身也不断发展与完善。我国于20世纪50年代建造第一条60m黏土砖隧道窑,之后又建立了高铝、硅砖、镁砖隧道窑。随着直接结合碱性砖等优质耐火材料的出现,高温烧成温度达1750℃以上,甚至出现了达到1900℃的超高温隧道窑。在结构上国外又出现断面大、长度短的顶燃式隧道窑。传统陶瓷行业中结合隧道窑工作原理,发展了辊道窑、推板窑等窑炉。而现代技术陶瓷领域出现诸如氮化硅、赛隆新材料,这种在非氧化气氛烧结的陶瓷制品又对传统窑炉的热工技术提出了新的挑战。

在原料煅烧方面,广泛采用的是立窑和回转窑,随着耐火原料二步煅烧技术



的发展,在原料轻烧方面各种流态化技术取得较大进展,如沸腾轻烧、悬浮轻烧等。在原料死烧方面出现了温度达 1900℃ 以上的高温竖窑和回转窑。对水泥熟料的煅烧采用回转窑。为了利用回转窑烟气热量的充分交换,50 年代出现带悬浮预热器,70 年代由于窑外分解技术的出现,新型回转窑得到迅速发展。

在钢铁冶金工业中,高炉是炼铁工业的主要热工设备。自高炉问世 200 多年来,随着人们对产量的要求和原料燃料条件的改善,以及鼓风能力的提高,高炉炉型也在不断地演变和发展。目前高炉炉型为五段式炉型,近代高炉向着大型横向发展。氧气转炉是转炉炼钢的主体热工设备。此外电弧炉是炼钢电炉的一种,目前随着连续铸钢技术、炉外精炼技术的发展,钢材质量、产量、劳动生产率都得到大幅度改善。

综上所述,从工业窑炉的发展可以看出窑炉发展和生产工艺改进密切相关。为发展新型无机材料及其各类复合材料,目前在科研工作中也发展了一些规模较小的各种炉子,如常见的无压烧结马弗炉、气氛烧结炉(氮化炉、碳管炉)、热压烧结炉(HP)、气压炉(GPS)和热等静压炉(HIP)。由于在实验中烧结试样体积较小,炉膛尺寸也较小,因此在产品的产量和能耗方面也很少顾及。但是,一旦试验产品试制成功而进入产业化阶段,就要全面考虑经济效益和社会效应等问题。

全面掌握热工理论是控制把握工业窑炉的关键。如降低制品热耗,提高传热速率,减少热损失,窑内气体运动合理,减少气体穿越物料的阻力损失,保证燃料在炉内的充分燃烧问题。为达到上述要求,了解并掌握热工相关理论十分必要。这些方法和知识主要有:

- (1) 窑炉气体力学:以研究窑炉内气体运动规律,引导窑炉内气体运动的方法。
- (2) 传热学:以研究窑炉内热量交换规律,提高传热速率,减少热量损失的途径。
- (3) 质量交换原理:以研究质量交换过程及其影响因素为主。
- (4) 干燥原理:含有不同水分的物料和空气随温度变化时所发生的一系列物理变化。
- (5) 燃料燃烧理论:以了解各类燃料性质、来源和燃烧机理为重点。

本教材在学习热工基础理论的基础上,介绍各类热工设备的工作原理和热工特性,其中包括燃烧设备、干燥设备、热交换设备、原料煅烧设备、制品烧成设备和熔融设备。

在学习本教材的同时,还应该通过认识实习、生产实习、课程设计等教学环节来加深和巩固教学内容。

本教材按照 36~50 学时编写。

# 1 窑炉气体力学

## 本章要点:

气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的一门科学,而窑炉气体力学则研究窑炉工作过程中气体的宏观物理与化学行为(运动与静止,生成与消失)。

在硅酸盐工业以及冶金工业中所涉及的窑炉大多数以燃料燃烧产生的气体作为载热介质。窑炉气体有许多种,而主要的是烟气和空气。为此,气体的输送、气体在窑炉空间的运动、废气的排出等对窑炉操作都很重要。本章研究的中心问题是气体流动。

气体和液体一样,都具有流动性,它们同属于流体。流体力学基本定律在气体力学研究中仍然适用。但它们之间也存在一定差别,各自具有本身的特性,只有了解了气体的特性,才能把流体力学的知识准确地应用于窑炉系统的气体力学研究中。如气流的流动形态、速度与方向对热交换过程有影响,气流的混合对燃料燃烧过程有影响,而气氛性质(氧化、还原、中性、氯化)、气流压强以及阻力对排烟系统和装置设计均有重要影响。

## 1.1 气体的主要特征

### 1.1.1 理想气体状态方程

对于理想气体,温度-压强-体积之间的关系可以用理想气体状态方程式表示:

$$pV = nRT \quad (1-1)$$

式中  $p$ ——气体压强<sup>●</sup>,  $N/m^2$ ;

● “压强”在工程上习惯称为“压力”。

在国际单位制(SI)中,压强这个量的单位名称为“帕[斯卡]”,单位符号用“Pa”表示,其单位常用由SI词头构成的倍数单位,即“MPa”表示;帕(Pa)的物理意义为牛[顿]/米<sup>2</sup>( $N/m^2$ ),即  $1 Pa = 1 N/m^2 = 10^{-6} N/mm^2$ ,  $1 MPa = 1 N/mm^2$ 。在窑炉工业生产中,以往压强的单位多以非法定计量单位“毫米水柱”(mmH<sub>2</sub>O)表示,它们之间的关系为:  $1 Pa = 0.102 mmH_2O$ ;  $1 mmH_2O = 9.807 Pa$ 。

压强的其他非法定计量单位与其法定计量单位“Pa”之间的换算关系为:

$$1 \text{ atm(标准大气压)} = 101325 Pa = 101 kPa = 760 mmHg = 10.33 mH_2O$$

$$1 \text{ at(工程大气压)} = 98070 Pa = 98 kPa = 735.6 mmHg = 10 mH_2O$$

$V$ ——气体体积,  $\text{m}^3$ ;  
 $n$ ——气体物质的量,  $\text{kmol}$ ;  
 $R$ ——摩尔气体常数,  $8314\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ ;  
 $T$ ——气体的热力学温度,  $\text{K}$ 。

由于  $n = m/M$

式中  $m$ ——气体的质量,  $\text{kg}$ ;  
 $M$ ——气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{kmol}$ 。

式(1-1)又可写成

$$pV = \frac{m}{M} \cdot RT$$

当气体质量  $m$  为  $1\text{ kg}$ , 理想气体的温度、压强、比体积(或密度)之间关系可表示为:

$$pv = RT/M; \quad p/\rho = RT/M$$

式中  $v$ ——气体比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  
 $\rho$ ——气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在工程上常见的气体,如氧气、氢气、氮气、一氧化碳气体、水蒸气以及它们所组成的空气和烟气,当其压强较小(与大气压比较)和温度不太低(与室温比较)时,可以当作理想气体处理。

在恒温条件下,气体比体积和密度随压强变化(状态 1→状态 2)的关系为:

$T = \text{常数}$ ,  $pv = \text{常数}$ ,  $p/\rho = \text{常数}$ , 则有

$$p_1/p_2 = v_2/v_1 = \rho_1/\rho_2$$

式中  $p_1$ 、 $p_2$ ——分别为状态 1 和状态 2 气体的压强,  $\text{Pa}$ ;

$v_1$ 、 $v_2$ ——相应压强下气体的比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$\rho_1$ 、 $\rho_2$ ——相应压强下气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在恒压条件下,气体比体积和密度随温度变化的关系为:

$p = \text{常数}$ ,  $v/T = \text{常数}$ ,  $\rho T = \text{常数}$ , 则有

$$v_t/v_0 = T_t/T_0, \quad V_t/V_0 = T_t/T_0, \quad \rho_t/\rho_0 = T_0/T_t$$

式中  $v_0$ 、 $v_t$ ——分别为标准状态下( $273.15\text{ K}$  和  $1$  标准大气压)和热力学温度为  $T_t$ ( $273 + t^\circ\text{C}$ )时气体的比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$T_0$ 、 $T_t$ ——分别为标准状态下和温度  $t$  时气体的热力学温度,  $\text{K}$ ;

$V_0$ 、 $V_t$ ——分别为标准状态下和  $T_t$  时气体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$\rho_0$ 、 $\rho_t$ ——分别为标准状态下和  $T_t$  时气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

从上面的关系式可以看出,气体的比体积或体积与温度成正比,温度升高,气体比体积或体积增加;而气体密度与温度成反比,温度升高,气体密度相应降低。

[例 1-1] 将  $1000 \text{ m}^3$ ,  $0^\circ\text{C}$  空气送入加热器中加热,标准状态下空气密度为  $1.293 \text{ kg/m}^3$ ,求加热至  $250^\circ\text{C}$  时气体的体积和密度。

$$\text{解} \quad V_t = V_0 T_t / T_0 = 1000 \times 523 / 273 = 1916 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\rho_t = \rho_0 T_0 / T_t = 1.293 \times 273 / 523 = 0.67 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

由此例题可以看出,空气经过加热后体积明显增加,而密度明显下降,因此在窑炉的热工计算中,不能忽略气体体积和气体密度随温度的变化。当气体压强接近于标准大气压时,必须根据气体所处温度进行换算。

### 1.1.2 气体黏度与温度之间的关系

黏性流体所产生的内摩擦力由牛顿黏性定律确定

$$\tau = \eta du/dy \quad (1-2)$$

式中  $du/dy$ ——速度梯度,  $\text{s}^{-1}$ ;

$\tau$ ——剪切力, Pa;

$\eta$ ——黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

在流体力学计算中,也常用  $\nu = \eta/\rho$ ,  $\nu$  称为运动黏度,单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

气体黏度与温度之间的关系表示为

$$\eta_t = \eta_0 [(273 + C)/(T + C)] (T/273)^{3/2} \quad (1-3)$$

式中  $\eta_t$ ——在  $t(^\circ\text{C})$  时气体的黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

$\eta_0$ ——在  $0^\circ\text{C}$  时气体的黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

$T$ ——气体的热力学温度, K;

$C$ ——与气体性质有关的常数。

各种气体的  $\eta_0$  和  $C$  值见表 1-1。

表 1-1 各种气体的  $\eta_0$  和  $C$  值

气 体	$\eta_0/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$C/\text{K}$	$C$ 值适用的温度范围/ $^\circ\text{C}$
空气	$1.71 \times 10^{-7}$	114	0~300
$\text{N}_2$	$1.66 \times 10^{-7}$	118	50~100
$\text{O}_2$	$1.87 \times 10^{-7}$	138	17~186
$\text{CO}_2$	$1.37 \times 10^{-7}$	239.7	-21~302
$\text{CO}$	$1.66 \times 10^{-7}$	118	15~100
$\text{H}_2$	$0.84 \times 10^{-7}$	71.7	-21~302
$\text{CH}_4$	$1.20 \times 10^{-7}$	198	17~100

续表 1-1

气 体	$\eta_0/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$C/\text{K}$	C 值适用的温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
$\text{C}_2\text{H}_4$	$0.96 \times 10^{-7}$	225.9	-21~302
$\text{NH}_3$	$0.96 \times 10^{-7}$	377	15~184
$\text{SO}_2$	$1.17 \times 10^{-7}$	416	18~100
$\text{H}_2\text{O}$	$0.82 \times 10^{-7}$	673	-
发生炉煤气	$\approx 1.45 \times 10^{-7}$	$\approx 150$	-
燃烧产物	$\approx 1.47 \times 10^{-7}$	$\approx 170$	-

### 1.1.3 气体所受的浮力

在已往的液体计算中,极少考虑大气的浮力,而对窑炉中所存在的热气体进行计算时,务必要考虑大气的浮力。例如对于  $1 \text{ m}^3$  的水,其质量为  $1000 \text{ kg}$ ,在重力场作用下,其重力约为  $9810 \text{ N}$ ,在  $20^{\circ}\text{C}$  大气中所受大气浮力约为  $11.76 \text{ N}$ ,只占重力的  $0.12\%$ ,故而忽略气体浮力的影响在工程上是允许的。而对于  $1 \text{ m}^3$  密度为  $0.5 \text{ kg/m}^3$  的热气体自重仅为  $4.9 \text{ N}$ ,而气体浮力则为  $11.76 \text{ N}$ ,故进行热气体计算时,不能忽略气体浮力的影响。

## 1.2 气体力学基本定律

### 1.2.1 静力学基本方程式

对重力场作用下的静止流体,将欧拉平衡微分方程式在密度不变的情况下进行积分求解,得到静力学基本方程式

$$p + \rho g z = \text{常数} \quad (1-4)$$

对处于平衡状态流体内的 1,2 点(如图 1-1a 所示),可列出静力学基本方程式

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 \quad (1-5)$$

式中  $p_1, p_2$ ——分别为 1,2 两点流体的压强,Pa;

$z_1, z_2$ ——分别为 1,2 两点距基准面的距离,m;

$\rho$ ——流体密度, $\text{kg/m}^3$ ;

$g$ ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

为应用方便,式(1-5)可写成

$$p_1 = p_2 + \rho g (z_2 - z_1) = p_2 - \rho g H \quad (1-6)$$

式中  $H$ ——1,2 两点间的垂直距离,m。

[例 1-2] 如图 1-1b 所示的窑炉,内部充满热烟气,温度为  $1000^{\circ}\text{C}$ ,烟气在标准状态的密度  $\rho_{t,0}$  为  $1.30 \text{ kg/m}^3$ ,窑外空气温度  $20^{\circ}\text{C}$ ,空气标准状态的密度

$\rho_{a,0}$  为  $1.293 \text{ kg/m}^3$ , 窑底内外压强相等, 均为  $101325 \text{ Pa}$ 。求距离窑底  $0.7 \text{ m}$  处窑内、外气体的压强各是多少? 其相对压强多大?

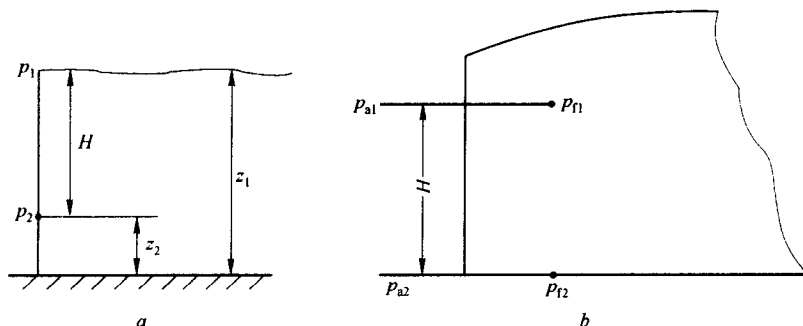


图 1-1 图示

a—静止流体的压强分布; b—例 1-2 附图

解 首先根据公式  $\rho_t/\rho_0 = T_0/T_t$ , 求出烟气、空气分别在  $1000^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$  时的密度:

$$\rho_a = 1.293 \times 273/293 = 1.21 (\text{kg/m}^3);$$

$$\rho_f = 1.30 \times 273/(273 + 1000) = 0.28 (\text{kg/m}^3)$$

其次, 根据基本方程式求出气体压强:

$$p_{a1} = p_{a2} - \rho_a g H = 101325 - 1.21 \times 9.81 \times 0.7 = 101317 (\text{Pa})$$

$$p_{f1} = p_{f2} - \rho_f g H = 101325 - 0.28 \times 9.81 \times 0.7 = 101323 (\text{Pa})$$

最后, 距窑底  $0.7 \text{ m}$  处相对压强  $p_{f1} - p_{a1} = 101323 - 101317 = 6 (\text{Pa})$ 。

### 1.2.2 连续性方程式

连续性方程式表示为: 当流体在管道内做稳定流动时, 通过管道任一截面的质量流量都相等。它是质量守恒定律在流体力学中的具体应用。根据流体在管道中的流动 (如图 1-2 所示), I—I, II—II, III—III 断面处可写出如下关系式。即:

$$f_1 u_1 \rho_1 = f_2 u_2 \rho_2 = f_3 u_3 \rho_3 = \text{常数} \quad (1-7)$$

式中  $f$ ——各截面面积,  $\text{m}^2$ ;

$u$ ——流体通过各截面的平均流速,  $\text{m/s}$ ;

$\rho$ ——各截面的流体密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

对于不可压缩气体, 密度不会发生变化, 则式(1-7)可表示为

$$f_1 u_1 = f_2 u_2 = f_3 u_3 = q_v = \text{常数} \quad (1-8)$$

式中  $q_v$ ——气体的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

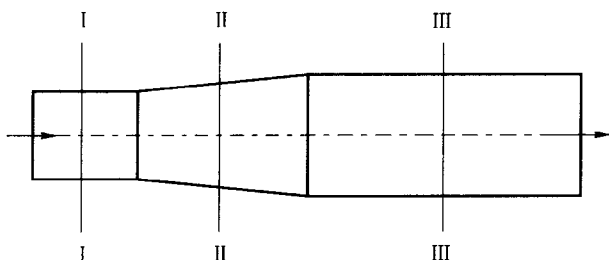


图 1-2 流体在管道中的流动

式(1-8)还可写成:

$$u_1/u_2 = f_2/f_1 \quad (1-9)$$

式(1-9)说明气体流速与截面面积成反比。

### 1.2.3 伯努利方程式

伯努利方程式是能量守恒定律在流体力学中的具体应用,在理想流体的稳定流动中,欧拉运动微分方程为

$$dp + \rho g dz + \rho d(u^2/2) = 0 \quad (1-10)$$

对于不可压缩的理想流体,  $\rho = \text{常数}$ , 则有  $d(p + \rho g z + \rho u^2/2) = 0$ 。

积分得到

$$p + \rho g z + \rho u^2/2 = \text{常数} \quad (1-11)$$

式中  $p$ ——单位体积流体所具有的压力能,在数值上等于流体静压强,通常称之为静压头,  $\text{J/m}^3$  或 Pa;

$\rho g z$ ——单位体积流体所具有的位能,通常称之为几何压头,  $\text{J/m}^3$  或 Pa;

$\rho u^2/2$ ——单位体积流体所具有的动能,通常称之为动压头,  $\text{J/m}^3$  或 Pa。

对于同一流线上的 1、2 两点,伯努利方程式可表示为

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho u_1^2/2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2/2 \quad (1-12)$$

若考虑流体在流动过程中因摩擦、冲击而消耗部分能量,列出伯努利方程式时必须考虑能量损失,1-2 处的伯努利方程式为

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho u_1^2/2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2/2 + h_{1-2} \quad (1-13)$$

式中  $h_{1-2}$ ——单位体积流体在流动过程中的能量损失,称为压头损失,  $\text{J/m}^3$  或 Pa。

上述伯努利方程式只适用于流体微小流束,在工程上需要研究适用于总流的伯努利方程式。对于均匀流断面,在该断面上各流线的  $p + \rho g z$  为常数,即任

取截面某点处的压强  $p$  和高度  $z$ , 所得几何压头与静压头之和就代表了整个截面的平均值, 但由于平均流速计算的动压头与各流线动压头的平均值不等, 为此应该引入修正系数  $a$ :

$$\frac{\overline{\rho u^2}}{2} = a \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (1-14)$$

式中  $\frac{\overline{\rho u^2}}{2}$  —— 流体流经某截面的平均动压头,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;

$\bar{u}$  —— 流体流经某截面的平均流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$a$  —— 修正系数,  $a = 2$  (圆管层流) 或  $a = 1.03 \sim 1.1$  (圆管湍流)。

则实际流体由 I—I 截面流至 II—II 截面时总流的伯努利方程式可表示为

$$p_1 + \rho g z_1 + a_1 \frac{\overline{\rho u_1^2}}{2} = p_2 + \rho g z_2 + a_2 \frac{\overline{\rho u_2^2}}{2} + h_{11-2} \quad (1-15)$$

在工程计算中, 气体在管内流动多属湍流,  $a$  值近似为 1。

流体运动沿程流量不变, 当流体出现支流时, 如图 1-3, 按照总能量的守恒与转化规律, 即  $qv_1 = qv_2 + qv_3$  列出三个截面的能量方程式为

$$qv_1(p_1 + \rho g z_1 + \rho u_1^2/2) = qv_2(p_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2/2 + h_{11-2}) + qv_3(p_3 + \rho g z_3 + \rho u_3^2/2 + h_{11-3})$$

式中  $qv_1$ 、 $qv_2$ 、 $qv_3$  —— 分别为流经 I—I, II—II, III—III 截面流体的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

[例 1-3] 如图 1-3 所示, 风机吸入口直径为 200 mm, 压力测量计测得水柱高度为 40 mm, 空气密度为  $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 不计气体流动过程的能量损失, 求风机的风量?

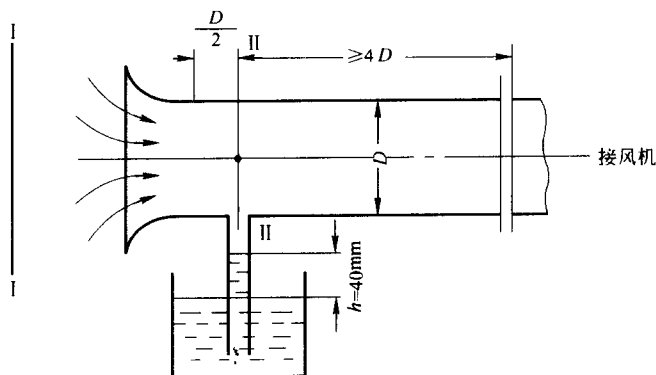


图 1-3 例 1-3 附图

解 选取图 1-3 中 I—I、II—II 截面, 列出伯努利方程式



$$p_1 + \rho g z_1 + \rho u_1^2 / 2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2 / 2 + h_{11-2}$$

因 I - I、II - II 截面处于同一高度, 有  $z_1 = z_2$ ; 空气静止  $u_1 = 0$ ; 不计压头损失,  $h_{11-2} = 0$ , 得到  $p_1 = p_2 + \rho u_2^2 / 2$ 。

因为  $p_1$  为大气压强,  $p_2 = p_1 - 40 \times 9.81 = p_1 - 392.4$ , 所以有  $\rho u_2^2 / 2 = 392.4$ ,  $u_2 = (392.4 \times 2 / 1.2)^{1/2} = 25.6 \text{ (m/s)}$ 。

流量  $qv = uF = 25.6 \times (\pi/4) \times 0.2^2 = 0.804 \text{ (m}^3/\text{s)}$ 。

### 1.2.4 两气体的伯努利方程

窑炉系统中充满了热气体, 周围为冷空气, 二者又相互连通, 冷空气对热气体所产生的浮力必然影响窑炉内气体的运动, 为此需推导出适合于冷热两种气体同时存在, 而又反映它们之间相互作用的伯努利方程式, 该方程式简称为两气体伯努利方程式。

#### 1.2.4.1 两气体伯努利方程式的推导

对容器内的热气体, 如图 1-4 所示, 列出 I-I、II-II 两截面的伯努利方程:

$$p_{h1} + \rho_h g z_1 + \rho_h u_1^2 / 2 = p_{h2} + \rho_h g z_2 + \rho_h u_2^2 / 2 + h_{11-2} \quad (1-16)$$

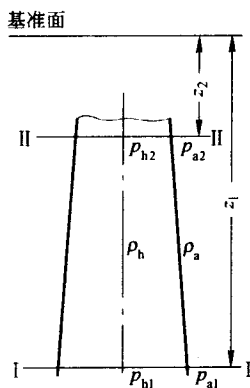


图 1-4 两气体伯努利方程式的推导

对容器外的冷空气, 也可列出伯努利方程。空气为静止,  $u = 0$ , 所以

$$p_{a1} + \rho_a g z_1 = p_{a2} + \rho_a g z_2 \quad (1-17)$$

式中  $\rho_a$ ——冷空气密度。

式(1-16) - 式(1-17)得

$$\begin{aligned} & (p_{h1} - p_{a1}) + g z_1 (\rho_h - \rho_a) + \rho_h u_1^2 / 2 \\ & = (p_{h2} - p_{a2}) + (\rho_h - \rho_a) g z_2 + \rho_h u_2^2 / 2 + h_{11-2} \end{aligned} \quad (1-18)$$