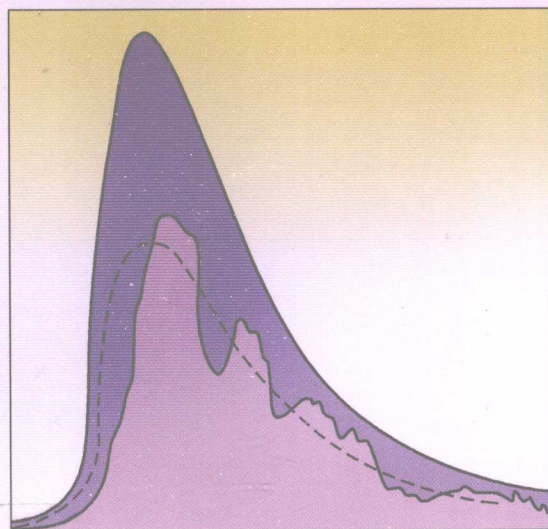


高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

无机材料热工基础

肖奇 黄苏萍 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

无机材料热工基础

肖 奇 黄苏萍 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

内 容 简 介

本书着重介绍了无机材料工业热工基础理论及其相关设备,主要内容包括气体力学基础、传热学、传质原理、燃料及其燃烧、干燥过程与设备、水泥工业窑炉、陶瓷工业窑炉、玻璃工业窑炉。本书教材注重介绍热工基础理论的研究方法与解决问题的思路,既注意逻辑思维的严密性,又强调理论与工程实践的有机结合,使学生能在更高的认知层面上进一步综合、灵活应用热工基础的知识去分析问题、解决问题。

本教材既可作为高等院校材料科学与工程、无机非金属材料、粉末冶金、建筑材料、矿物材料和相关专业教学用书或参考书;也可供科研设计院所、厂矿企业中从事无机材料、矿物材料及相关领域工作的广大科研人员、工程技术人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机材料热工基础/肖奇,黄苏萍编著. —北京:冶金工业出版社,2010.1

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-5106-6

I. ①无… II. ①肖… ②黄… III. ①无机材料—热工学—高等学校—教材 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 231661 号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 贾玲 美术编辑 李新 版式设计 张青

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5106-6

北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 1 月第 1 版,2010 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;12.25 印张;323 千字;182 页;1-2500 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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

材料是人类赖以生存的物质基础和科学技术发展的核心与先导,没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术。材料分为金属材料、无机非金属材料(简称无机材料)、有机高分子材料和复合材料四大类。无机材料产品因其应用范围广而成为材料领域研究和开发的重点。作为新世纪高科技的支撑,21世纪材料类专业人才在掌握基本理论的同时,必须掌握科学的研究方法,并具有一定的工程开发和研究能力、创新能力。

“无机材料热工基础”是无机材料专业的主干课程之一,是从基础课到专业课的过渡课程。本书既有理论性,又注重理论与实践相结合,全书共分9章,包括绪论、气体力学基础、传热学、传质原理、燃料及其燃烧、干燥过程与设备、水泥工业窑炉、陶瓷工业窑炉、玻璃工业窑炉。本书整合了材料工程的共性基础原理(流体力学原理、传热原理、传质原理和燃料燃烧理论)以及上述理论典型运用的单元过程(物料的干燥、燃料的燃烧以及热工窑炉)。本书在编写过程中既注意逻辑思维的严密性,又强调理论与工程实践的有机结合,并试图将最新的工程科技成果充实到教材之中。本书内容主要包括两大部分:(1)热工基本理论部分:包括气体力学原理、传热原理、传质原理和燃烧理论,学生通过学习可以掌握材料领域工程问题的基本规律,为解决工程实际问题打下坚实理论基础。(2)工程应用部分:主要包括燃烧设备、干燥设备以及无机材料工业窑炉,重点阐述运用热工基本理论知识分析各类热工设备的构造、热工特性、操作原理,学生能在更高的认知层面上进一步综合、灵活应用热工基础的知识去分析问题、解决问题。

本书既可作为高等院校材料科学与工程、无机非金属材料、粉末冶金、建筑材料、矿物材料和相关专业教学用书或参考书;也可供科研设计院所、厂矿企业中从事无机材料、矿物材料及相关领域工作的广大科研人员、工程技术人员、管理人员参考。

本书由中南大学肖奇和黄苏萍编著。肖奇拟定教材编写大纲和编写框架，并编写了绪论、第1~4章、第6章、第8章，黄苏萍编写了第5章、第7章。全书由肖奇负责统稿。本书在编写过程中，谭小科、欧阳林莉、高兰等研究生在文献查阅、文字校对方面做了大量的工作，本书的出版也得到了冶金工业出版社的大力支持，作者在此一并表示衷心的感谢！同时对书中所引用文献资料的中外作者致以诚挚的谢意！

鉴于作者水平所限，书中不妥之处恳请广大读者批评指正。

作 者

2009年9月于长沙岳麓山下

目 录

0 绪论	1
0.1 无机材料工业在国民经济中的作用	1
0.2 无机材料工业热工过程的共性	2
0.3 无机材料工业热工过程的个性	2
0.4 无机材料热工基础的学习内容	4
1 气体力学基础	5
1.1 研究对象与研究方法	5
1.2 气体的主要物理性质	5
1.2.1 压缩性	5
1.2.2 黏性	6
1.3 气体静力学基本方程	7
1.3.1 作用于气体上的力	7
1.3.2 静止气体基本方程	7
1.4 气体动力学基本方程	8
1.4.1 基本概念	8
1.4.2 连续性方程	9
1.4.3 理想流体运动微分方程	10
1.4.4 伯努利方程	11
1.5 压头损失	14
1.5.1 摩擦损失	14
1.5.2 局部损失	15
1.6 压缩性气体流动	16
1.6.1 一维稳定流动的伯努利方程	17
1.6.2 压缩性气体流动的连续性方程	18
1.6.3 压缩性气流中各参数的变化规律	19
1.6.4 压缩性气体经喷管的流动	20
1.7 气体喷射流	21
1.7.1 自由射流	22
1.7.2 冲击射流	24
1.7.3 限制射流	24
习题与思考题	25

2	传热学	27
2.1	基本概念	27
2.1.1	传热方式	27
2.1.2	温度场	28
2.1.3	稳定传热与不稳定传热	28
2.2	导热	28
2.2.1	傅里叶定律	28
2.2.2	稳定导热传热量的计算	28
2.3	对流换热	32
2.3.1	对流换热的机理	32
2.3.2	牛顿冷却定律	33
2.3.3	对流换热系数确定	33
2.3.4	对流换热系数的若干实验公式及其应用	33
2.4	辐射传热	35
2.4.1	基本概念	35
2.4.2	黑体辐射的基本定律	36
2.4.3	实际固、液体的辐射与吸收特性	37
2.4.4	物体表面间的辐射传热	39
2.4.5	气体与固体间的辐射传热	43
2.4.6	火焰辐射	46
2.5	综合传热	47
2.5.1	传热基本方程	47
2.5.2	通过平壁的综合传热	47
2.5.3	通过圆筒壁的综合传热	49
	习题与思考题	50
3	传质原理	51
3.1	基本概念	51
3.1.1	传质的基本方式	51
3.1.2	浓度	51
3.1.3	速度	51
3.1.4	质量通量和摩尔通量	52
3.2	传质微分方程	52
3.2.1	传质微分方程的推导	52
3.2.2	传质微分方程的简化	54
3.2.3	初始条件和边界条件	55
3.3	分子传质	55
3.3.1	菲克第一定律	55

3.3.2	稳态分子传质	56
3.3.3	非稳态分子传质	60
3.4	对流传质	63
3.4.1	对流传质的通量方程	63
3.4.2	对流传质的浓度边界层	63
3.4.3	若干对流传质系数的实验公式	64
3.4.4	对流传质系数模型	65
3.4.5	相间稳态传质和双膜理论	68
	习题与思考题	71
4	燃料及其燃烧	72
4.1	燃料的种类和特性	72
4.1.1	燃料的种类	72
4.1.2	燃料的化学组成与换算	75
4.1.3	燃料发热量	76
4.2	燃烧计算	76
4.2.1	助燃空气量计算	76
4.2.2	燃烧产物量计算	78
4.2.3	助燃空气量和燃烧产物量计算的近似计算方法	78
4.2.4	燃烧产物成分的计算	78
4.2.5	燃烧温度的计算	79
4.3	燃料燃烧过程的基本原理	80
4.3.1	燃烧的概念	81
4.3.2	燃烧过程的基本阶段	81
4.3.3	燃烧过程的基本条件	81
4.3.4	燃料燃烧反应机理	84
4.4	燃烧方法与燃烧装置	84
4.4.1	气体燃料的燃烧	84
4.4.2	液体燃料的燃烧	86
4.4.3	固体燃料的燃烧	89
	习题与思考题	91
5	干燥过程与设备	92
5.1	概述	92
5.1.1	干燥的定义	92
5.1.2	干燥方法	92
5.1.3	干燥系统的组成	93
5.1.4	干燥设备的分类	93
5.2	湿空气的性质	93

5.2.1	湿空气的主要参数	93
5.2.2	湿空气的 $I-X$ 图	95
5.3	干燥计算	96
5.3.1	物料平衡	97
5.3.2	热量平衡	98
5.3.3	理论干燥过程和实际干燥过程	99
5.4	干燥过程的基本原理	100
5.4.1	物料中水分的结合方式	100
5.4.2	物料干燥过程	100
5.4.3	影响干燥速率的因素	102
5.4.4	制品在干燥过程中的收缩和变形	104
5.5	喷雾干燥	104
5.5.1	喷雾干燥基本原理	104
5.5.2	雾化器的分类及特点	108
5.5.3	喷雾干燥的优缺点	110
5.6	冷冻干燥	111
5.6.1	冷冻干燥原理	111
5.6.2	冷冻干燥特点	111
5.7	超临界流体干燥	112
5.7.1	超临界流体干燥原理	112
5.7.2	超临界流体干燥工艺流程与实验装置	113
5.7.3	超临界流体干燥的优缺点	113
	习题与思考题	114
6	水泥工业窑炉	115
6.1	概述	115
6.1.1	水泥工业窑炉的发展与演变	115
6.1.2	水泥工业窑炉的分类	116
6.2	预分解窑技术原理	116
6.2.1	熟料形成的工艺特点	116
6.2.2	回转窑对工艺要求的适应性	116
6.2.3	几种回转窑热工布局的比较	117
6.3	预分解窑的生产流程	118
6.4	预分解窑的分类	118
6.4.1	按制造厂命名分类	118
6.4.2	按分解炉内气流、物料运动特征分类	119
6.4.3	按分解炉特征及气体流程综合分类	119
6.5	几种典型的预分解窑	119
6.5.1	旋流式预分解窑	119

6.5.2	喷腾式预分解窑	121
6.5.3	旋流-喷腾式预分解窑	123
6.5.4	悬浮式预分解窑	125
6.5.5	沸腾式预分解窑	125
6.6	分解炉的热工特性	127
6.6.1	分解炉内的燃烧	127
6.6.2	分解炉内的传热	128
6.6.3	分解炉内的气体运动	129
6.6.4	分解炉内的旋风效应与喷腾效应	130
6.6.5	分解炉内的分解过程	132
6.7	预分解窑系统中回转窑的热工特性	133
6.7.1	回转窑的功能	133
6.7.2	回转窑内的工艺带及其热效应	133
6.7.3	回转窑内的燃料燃烧	134
6.7.4	回转窑内的物料运动	134
6.7.5	回转窑内的传热能力及发热能力	134
6.7.6	回转窑内的热负荷	135
	习题与思考题	135
7	陶瓷工业窑炉	136
7.1	概述	136
7.1.1	陶瓷工业窑炉的发展概况	136
7.1.2	陶瓷工业窑炉的分类	136
7.2	隧道窑	136
7.2.1	隧道窑的工作系统	136
7.2.2	隧道窑的结构	137
7.2.3	隧道窑内的气体流动	138
7.2.4	隧道窑内的传热	141
7.3	间歇窑	143
7.3.1	倒焰窑	143
7.3.2	新型间歇窑	144
7.4	电热窑炉	146
7.4.1	概述	146
7.4.2	电阻炉	146
7.4.3	感应炉	148
7.4.4	电弧炉	149
7.4.5	等离子炉	150
7.4.6	微波烧结炉	152
	习题与思考题	154

8 玻璃工业窑炉	155
8.1 概述	155
8.1.1 玻璃的生产过程	155
8.1.2 玻璃池窑的分类	155
8.1.3 玻璃池窑的发展概况	156
8.2 火焰池窑	157
8.2.1 火焰池窑的结构	157
8.2.2 火焰池窑内玻璃液的流动	161
8.2.3 火焰池窑内的传热	163
8.3 电熔窑炉	164
8.3.1 电熔窑炉的优缺点	164
8.3.2 电熔窑炉的分类	165
8.3.3 几种典型的玻璃电熔窑炉	167
习题与思考题	173
附 录	174
附录 I 干空气的热物理性质	174
附录 II 在大气压力下烟气的热物理性质	175
附录 III 工业管道粗糙度	175
附录 IV 常用局部阻力系数	176
附录 V 常用固体材料的导热系数 λ_0 及温度系数 b 的数值	177
附录 VI 某些材料或物质的辐射黑度 ε	177
附录 VII 常见气体的黑度及其修正系数	178
附录 VIII 湿空气的相对湿度	180
参考文献	182

0 绪 论

0.1 无机材料工业在国民经济中的作用

人类的发展历史充分证明,材料是社会文明和人类进步的里程碑。材料是人类赖以生存的物质基础和科学技术发展的核心与先导。材料的品种、产量和质量标志着一个国家的现代化水平。没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术。材料分为金属材料、无机非金属材料(简称无机材料)、有机高分子材料和复合材料四大类。无机材料分为传统无机材料和新型无机材料。传统无机材料一般是指以天然的硅酸盐矿物(黏土、石英、长石等)为主要原料,经高温窑烧制而成的一大类材料,其化学组成均为硅酸盐,主要包括陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料。新型无机材料则是指应用于高科技领域的由氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物以及各种无机非金属化合物经特殊的先进工艺制成的具有优异性能的无机新材料,包括特种陶瓷、特种玻璃、特性水泥、新型耐火材料、人工晶体、半导体材料等。

水泥是基本建设的基础材料。目前,水泥品种已达一百余种。普通水泥大量用于工业与民用建筑;油井水泥用作石油开采的固井材料;道路水泥用于公路、机场建设;中热和低热硅酸盐水泥用于筑坝发电、防洪固岸等水利工程;抗硫酸盐水泥用于海洋工程和防侵蚀的隧道工程;某些特种性能的水泥还可用于防辐射等特殊要求的工程。水泥还可与多种材料组成复合材料,满足各种新型工业建设的需要。

玻璃是工业、建筑业、交通运输业和高技术领域不可缺少的配套材料。如平板玻璃、中空玻璃、隔声隔热的泡沫玻璃在现代建筑中较普遍采用;夹层玻璃用于汽车、飞机等交通工具的风挡和门窗;光学玻璃用以制造光学仪器的核心部件;玻璃化学仪器是化学、生物学等必备的实验用具;玻璃大型设备与管道可以满足化学工业耐温耐蚀的特殊要求;玻璃纤维、玻璃棉及其纺织品是电气绝缘、化工过滤和隔声、隔热、耐蚀的优良材料,它们与各种树脂制成的玻璃钢用以制造绝缘器件和各种壳体(如船舶和火箭发动机的壳体);印刷制板玻璃是现代微电子技术、摄影、测绘技术和空间精密技术领域不可缺少的材料。

陶瓷对人民生活、经济建设以及科学技术的发展有极为重要的作用,它和金属材料、有机高分子材料并称为当代三大固体材料。日用陶瓷是日常生活必需品,在发展对外贸易中有很重要的作用;各种建筑、卫生陶瓷(如各种陶瓷砖、彩釉砖、卫生洁具)大量用于现代化建筑工程;特种陶瓷广泛应用于宇航技术、电子技术、生物工程和原子能、机械、化学工业中。如:陶瓷绝缘材料;耐腐蚀的化工设备;燃气轮机用的耐高温、高强度、高韧性陶瓷部件;与热核聚变、核探测器及地下核试验等工程配套使用的陶瓷制品;用于人工牙齿、人工骨、人工心脏、膜、人工眼的生物陶瓷等等。

耐火材料可用作高温窑炉等热工设备的结构材料以及工业用的高温容器和部件,因其能承受各种物理化学作用及机械作用,因此在冶金、硅酸盐、化工、动力、石油、机器制造等工业中得到广泛的应用。近十几年来由于高温技术的迅速发展,特殊耐火材料的应用领域不断扩大。

具有电、磁、声、光、热等信息的存储、转换功能的新型无机功能材料,正在日益广泛地被应用在现代高技术领域,如微电子、航天、能源、计算机、激光、通信、光电子、传感、红外、生物医学和环

境保护等领域,成为现代高新技术、新兴产业和传统工业的主要物质基础。如半导体材料的出现,对电子工业的发展具有巨大的推动作用,计算机小型化和功能的提高,与硅、锗等半导体材料密切相关;涂覆 SiC 热解碳-碳结合等复合材料在空间技术的发展中产生了巨大作用;人工晶体、无机涂层、无机纤维等先进材料已逐渐成为近代尖端科学技术的重要组成部分。

纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到:无机材料在国民经济中的重要作用和地位,它们不仅是人民生活、工业生产和基础建设所必需的基础材料,也是传统工业技术改造、新兴产业和高新技术发展中不可缺少的重要物质基础和先导。可以预测,先进无机材料将是未来人类社会科技进步与社会文明发展的重要物质基础与支柱。

0.2 无机材料工业热工过程的共性

无机材料工业的热工过程主要是指预热、干燥、烧成过程和余热利用过程。在无机材料工业中,各种产品都需要经过热的加工过程。如某些耐火原料需经煅烧成熟料才可进一步加工生产,配制的水泥生料也需经高温煅烧为水泥熟料。陶瓷、耐火材料坯体需经高温烧成才能达到所要求的物理、化学特性。为了便于生产过程的进行,某些原料(煤、结合黏土)在磨细之前需经干燥处理,坯体在入窑烧成之前为获得足够的强度也需进行干燥处理。玻璃和其他熔铸制品则分别需在特定的熔窑中熔融。在上述各种热加工过程中,物料将进行一系列物理的、化学的变化,并最终决定产品的质量。因此,热加工在各类无机材料产品生产中都是不可缺少的重要工序。同时,在热加工过程中要消耗大量的燃料,而且燃烧过程的排放物如烟尘、 SO_2 、 NO_x 等是造成大气污染的重要原因之一。因此设计合理的热工设备(包括窑炉),组织好燃烧过程,是保证产品产量、质量,节约能源、降低成本、减少公害的重要措施。

要产生高温就需要有热量,这正是高等学校材料科学与工程学科无机非金属材料专业方向的本科教学需要设置与“热工”相关课程的重要意义所在。产生热量、利用热量的设备叫做“热工设备”。到目前为止,加热的热量是来自于燃料燃烧产生的热能或用电能所产生的热能。热工设备的先进性主要体现在:在能够保证稳定的产品质量及产量的前提下,要具有最大的热效率,即最低的单位产品热量消耗(简称热耗)和电能消耗(简称电耗)。也就是说,越先进的热工设备,其热效率越高,其单位产品的热耗和电耗越低。

在无机材料工业中,常用的热工设备有如下几部分:原料煅烧设备,如回转窑;制品烧成设备,如间歇式的倒焰窑、梭式窑和连续式的隧道窑;玻璃熔融设备,如池窑等;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、隧道式干燥器等。

各种类型的无机材料热工设备,尽管其具体产品种类不同,而且在结构、流程等诸多方面存在很大的差异,但是由于它们都是热工设备,因此仍然可以找出许多共性出来。这些共性问题就是它们所遵循的基本原理只有四种:流体力学原理、传热原理、传质原理以及燃料燃烧原理。各类无机材料热工设备都是在共同的热工过程基础理论指导下研究与设计的,相互之间都具有有机的联系。

0.3 无机材料工业热工过程的个性

在无机材料工业中,常用的热工设备包括干燥设备、燃烧设备、窑炉。而窑炉是在无机材料生产工艺中最为核心的部分。任何一种无机材料产品,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,势必要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。因此,下面分别介绍水泥工业窑炉、陶瓷工业窑炉和玻璃工业窑炉的发展概况。

人类最早人工煅烧熟料的方法和窑型是采用“立窑”，立窑的产生揭开了水泥工业窑的历史，但立窑生产能力小，熟料质量差，劳动强度大。1877年英国人克兰普汤发明了回转窑，英国的雷特里克·冉荪在1885年和1886年先后在英国和美国取得了用回转窑制造水泥的专利，干法回转窑存在如下缺点：(1)由于生料粉在窑内和高温气流的接触面积很小，传热效果较差，热利用率低，熟料单位热耗高；(2)干法生产对多组分原料适应性差，生料成分不易均匀，工艺控制困难。德国的立列波博士和波列休斯公司，对立窑与回转窑的结构、优势、功能、原理等进行了分析研究后于1928年创造了带回转炉算子的回转窑（立波尔窑）。立波尔窑吸取了立窑气体穿透料层传热效率高和回转窑煅烧能力强的优点，优点是传热效率较高，热耗较低，窑的单位面积产量较高，但生料球的预热不够均匀因而熟料质量比湿法窑差。1951年德国的F·缪勒把悬浮预热技术应用于水泥工业中，产生了第一台带悬浮预热器的回转窑，即在回转窑窑尾加一悬浮预热器，使原来在窑内呈堆积状态进行的物料预热及部分碳酸盐分解功能，移到窑后预热器中在悬浮状态下进行，从而改变了热传递状态。物料在悬浮状态下与热气流充分接触，传热面积比回转窑内成千倍的增加，因而传热速率大大加快，使在窑内约需1h的预热和部分碳酸盐分解过程，在预热器中缩短到30s即可完成，从而使窑的产量大幅度增加、产品质量提高、能耗下降，是水泥工业的一次重大技术突破。悬浮预热器的出现，大大地提高了回转窑的预热效果，但吸热量最大的反应仍在回转窑内进行，还未充分发挥悬浮传热的优越性。到20世纪70年代，日本石川岛公司和秩父水泥公司研制成功预分解技术，即在悬浮预热器与回转窑之间增设一个分解炉，在其中加入30%~60%的燃料，改变燃烧条件，使燃料燃烧的放热过程与生料分解吸热过程同时在悬浮（或流态化）状态下极其迅速的进行，分解率达85%~95%，从而使窑系统生产效率大幅度提高，产量上升，能耗下降，燃料选用面加宽，窑炉热效率提高到50%左右，环境污染也得到改善。预分解技术是继悬浮预热技术之后的又一次重大的技术突破，它已成为当今水泥煅烧技术发展的主导方向。

我国是生产陶瓷最早的国家，已有几千年的历史。远在5000年前我国就建造了烧陶器的竖穴窑、横穴窑，随后又建造了升焰式圆窑和方窑。在2500年前的战国时代，我国南方建造了烧陶瓷的倾斜式龙窑、北方建造了半倒焰的馒头窑。龙窑可以利用烟气来预热制品，又利用产品冷却之热来预热空气。龙窑和馒头窑最高烧成温度可达1300℃并可控制还原气氛。自宋代（距今约1000年）起山东淄博、陕西耀州等地，部分馒头窑已用煤作燃料来焙烧瓷器。明代（距今约600年）在福建德化创建了阶级窑。明末清初（距今约400年）在江西景德镇创建了蛋形窑（简称景德镇窑），在这些窑中烧出了我国著名的瓷器，这些窑对西欧有很大的影响。英国的纽卡斯特尔窑及德国的卡塞勒窑，就是仿照景德镇窑设计的，半倒焰的馒头窑是倒焰窑炉的前身，龙窑是隧道窑的前身。陶瓷烧成使用的窑炉从古代的古窑、龙窑、阶梯窑、镇窑等发展到现代的倒焰窑、梭式窑、隧道窑和辊道窑。燃料的结构不断改变，从烧柴到烧煤到适用于使用各种燃料（煤、重油、煤气等），在窑炉结构、制品运载方式、燃烧设备等方面也有了重大的改进。在每一个窑炉结构突变时期都带来陶瓷工业的一次飞跃发展。

就平板玻璃池窑而言，用机械方法制造平板玻璃问世于20世纪上半叶，成型方法曾经有多种，例如，有槽（垂直引上）法、无槽（垂直引上）法、平拉法、对辊法等许多成型方法，这些方法和更早的一些平板玻璃的成型方法被统称为传统工艺。1957年，英国人皮尔金顿在总结以前一些学者有关研究的基础上发明了浮法（成型）工艺，并建立了一条每天生产143t玻璃液的浮法玻璃生产线。后经进一步的改进，皮尔金顿兄弟有限责任公司（简称皮尔金顿公司）于1959年建厂，生产出了质量可与磨光玻璃相媲美的浮法玻璃产品，而拉制速度数倍乃至数十倍于传统（成型）工艺，该公司并取得了这项发明的专利权。随后，欧、美、日等发达国家的玻璃生产厂家纷纷购买

此专利,建立了各自的浮法玻璃生产线。于是短时间内,在国际上,浮法玻璃取代了价格昂贵的磨光玻璃,占领了平板玻璃市场。我国于1971年在河南省洛阳市建成一条90t/d的浮法平板玻璃生产线,当时经过国家科委组织的鉴定,被命名为“洛阳浮法”。迄今,在国内外,浮法平板玻璃生产线已基本上取代了传统工艺的平板玻璃生产线,今后我国平板玻璃工业的发展应以该项现代平板玻璃生产技术为中心。目前该项技术得到很大发展,窑炉趋向大型化,窑炉结构和燃烧设备不断改进,并采用全窑保温、富氧燃烧等许多新的节能新技术,使产量、质量、熔窑热效率都有明显的提高。在日用玻璃制品的生产方面,尽管日用玻璃池窑曾经涌现过众多的窑型,但是随着市场竞争的日益加剧,马蹄焰蓄热式玻璃池窑在产品质量、生产成本和工艺简化程度等诸多方面表现出一定的优势。所以,目前的日用玻璃制品生产线中以采用马蹄焰蓄热式玻璃池窑的居多。凭借着高温下离子能导电的特性,使人类找到一种新的能源来熔化玻璃,也就是说使用电来熔化玻璃成为可能。经半个多世纪的实践,玻璃电熔突出的优越性使它得到了迅猛的发展。目前世界上半数以上的玻璃熔窑已采用了电熔,并且人们认为,在21世纪,电熔技术将是玻璃熔制技术主要的发展方向之一。

0.4 无机材料热工基础的学习内容

本书整合了材料工程的共性基础原理——流体力学原理、传热原理、传质原理和燃料燃烧理论以及上述理论典型运用的单元过程——物料的干燥、燃料的燃烧以及热工窑炉。本书内容包括两大部分:(1)热工基本理论部分,包括如下几方面:气体力学,以研究气体运动的规律为主;传热学,以研究热量交换规律,提高传热速率减少热量损失的途径为主;传质原理,以研究质量交换过程及其影响因素为主;燃烧理论,以了解各类燃料性质及燃烧机理为主,为合理组织燃烧打下基础。(2)工程应用部分,主要包括燃烧设备、干燥设备以及无机材料工业窑炉,重点阐述运用热工基本理论知识分析各类热工设备的构造、热工特性、操作原理,使学生能在更高的认知层面上进一步综合、灵活应用热工基础的知识去分析问题、解决问题。

1 气体力学基础

气体没有固定的形状和体积,能自发充满任何容器,具有很强的压缩性,体积膨胀系数也很大。

气体力学是从宏观角度研究气体平衡和流动规律及其应用的一门工程科学。

气体力学理论在发展无机材料窑炉设计的技术指导和正确进行窑炉操作方面是不可缺少的基础理论。无机材料窑炉中的气体有多种,而主要的是空气和燃料气体及烟气。它们起着雾化剂、助燃剂、反应剂、载热体等作用。纵观整个窑炉工作过程,从固体燃料的气化,液体燃料的雾化,气体燃料的入炉,气态燃烧产物加热物料,烟气离炉经烟道、余热回收设备,再从烟囱排出,自始至终都与气体流动相关联。如气流的分布状况对窑炉内压力和温度的分布以及控制有影响;气流的流动状态、速度和气流的流动方向对炉内热交换过程有影响;气体的压强和流动阻力对排烟系统和装置的设计有影响;气流的混合对燃料燃烧过程有影响;同时窑炉中的气体流动也常伴随有燃烧、传热、传质以及某些化学反应,它们对气体的流动又有一定的影响。可见,无机材料窑炉的某些特性和热交换过程是与气体的运动有着密切关系的,而窑炉中气体流动对传热的影响又是热工技术人员最感兴趣的问题。本章研究的中心问题是气体流动。

1.1 研究对象与研究方法

流体是液体与气体的统称,是一类受任何微小拉力或剪力作用下都能发生变形的物体。流体力学是研究流体处于平衡,运动以及流体与固体相互作用的力学规律,以及这些规律在实际工程应用的一门学科。气体力学是流体力学中的一部分,专门研究气体运动原理,压力与流速的关系和气体的混合同律等。

气体分子间距离较大,引力较小,自由运动较强烈。例如空气分子的有效直径约为 10^{-8} cm (数量级),而在常温常压下,分子间的距离约为 3×10^{-7} cm,比前者大很多。可见气体分子非常分散。

假如气体力学一般地着眼于个别分子的微观行为,则不仅很难找出共同规律,而且用途很小。对工程有实际意义的是大量分子行为和作用的宏观效果与统计规律。因此,1753年欧拉首先提出了“宏观流体模型”——连续介质模型,即将流体视为由无数微团所组成的无间隙的连续介质。这样,可将流体的物理性质看成是空间和时间的连续函数。

实际上按气体分子运动论的基本数据可计算出,对 1cm^3 气体容器的每一个侧壁而言,在标准状态下气体分子的撞击频率约为 2.2×10^{28} 次/秒。由于分子碰撞频率如此之大,从力的传递或动量传递的宏观效果来看,完全可以将其视为内部不存在空隙的连续体。当然,在真空,特别是高真空系统中,连续体的概念是不真实的,这种情况下的气体运动已属于“分子流”的特殊范畴。

1.2 气体的主要物理性质

1.2.1 压缩性

众所周知,气体体积是随压力和温度而变化的,并且有

$$pV = nR_0T \quad (1-1)$$

式中, p 、 V 为气体的绝对压力与体积; T 为热力学温度; n 为气体的物质的量; R_0 为气体常数, 其值为 $R_0 = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

从式(1-1)可知, 在定温下, 当气体物质的量为 1 mol 时, 气体体积或密度(ρ)与压力(绝对压力)的关系为:

$$pV = \text{const} \text{ 或 } P/\rho = \text{const} \quad (1-2)$$

当压力恒定时, 式(1-1)变成:

$$V/T = \text{const} \text{ 或 } \rho T = \text{const} \quad (1-3)$$

式(1-3)还可以写成:

$$V_t = V_0 \cdot T/T_0 \text{ 即 } V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273}t \right) \quad (1-4)$$

$$\rho_t = \rho_0 \cdot T/T_0 \text{ 即 } \rho_t = \rho_0 \left(1 + \frac{1}{273}t \right) \quad (1-5)$$

气体分子间距大, 当压力或温度发生变化时, 其体积会发生较明显的变化, 对理想气体可由理想气体状态方程算出。在气体力学中, 当压力或温度发生变化时密度可视为常数的气体称为不可压缩流体; 反之, 称为可压缩流体。在压力变化不大(压差小于 10 kPa)或流速不太高(小于 70 m/s)的条件下, 气体的密度变化很小, 可以将密度(或体积质量)视为定值, 为了简化起见, 工程上也可近似视为不可压缩流体。这种简化处理的概念称为流体的不可压流体模型。

1.2.2 黏性

1.2.2.1 牛顿内摩擦定律

一切真实气体由于分子的扩散、频繁碰撞或分子间的相互吸引, 不同流速流体之间必有动量交换发生, 因而在流体内部会产生内摩擦力。这种力与作用面平行, 故又称流动剪应力, 通称黏性力。黏性力的大小可由牛顿内摩擦定律确定。牛顿经过研究, 于 1686 年阐述了以下规律: 流体内摩擦力大小, 与流层间接触面积成正比, 与速度梯度成正比, 与流体种类、温度等因素有关。写成数学表达式, 称为牛顿内摩擦定律, 即内摩擦力 F 等于:

$$F = -\mu \frac{du}{dy} A \quad (1-6)$$

式中, F 为内摩擦力, N ; $\frac{du}{dy}$ 为流层间的速度梯度, $1/\text{s}$; A 为流层间的接触面积, m^2 ; 比例系数 μ 称为动力黏性系数, 简称黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。还用到另一种黏度, 以 ν 表示, 即:

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-7)$$

式中, ν 为流体动力黏度与密度之比, m^2/s , ν 具有运动学量纲, 故又称运动黏度; μ 为流体动力黏度; ρ 为密度。

气体的黏度与气体种类、温度以及压力有关。温度升高时, 气体分子热运动加剧, 扩散、碰撞都增强, 故黏度增大。压力变化对气体分子热运动影响不大, 因而除了极高极低压以外, 通常可以不考虑压力的影响。

各种气体的黏度除与本身种类有关外, 还受温度影响。温度升高时, 气体分子热运动加剧, 扩散、碰撞都增强, 故黏度增大。压力变化对气体分子热运动影响不大, 因而除了极高极低压以外, 通常可以不考虑压力的影响。必须注意气体的运动黏度中包含密度的因素, 故气体的运动黏度将受压力的影响。