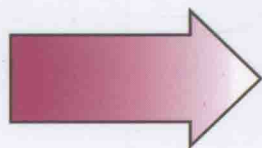


材料科学与工程专业
应用型本科系列教材

面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书



无机非金属材料热工过程及设备

主 编 陈景华 张长森 蔡树元 副主编 邓育新 杜吉亮

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

材料科学与工程应用型本科系列教材
面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书

无机非金属材料热工过程及设备

主 编 陈景华 张长森 蔡树元
副主编 邓育新 杜吉亮

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料热工过程及设备/陈景华,张长森,蔡树元主编. —上海:华东理工大学出版社,2015.4

材料科学与工程专业应用型本科系列教材

ISBN 978-7-5628-4127-2

I. ①无… II. ①陈… ②张… ③蔡… III. ①无机非金属材料—热工过程—高等学校—教材 ②无机非金属材料—工业炉窑—高等学校—教材 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 048513 号

材料科学与工程专业应用型本科系列教材
面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书

无机非金属材料热工过程及设备

主 编 / 陈景华 张长森 蔡树元

副 主 编 / 邓育新 杜吉亮

策划编辑 / 马夫娇

责任编辑 / 花 魏

责任校对 / 李 晔

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64251137(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟市华顺印刷有限公司

开 本 / 787mm×1092mm 1/16

印 张 / 24.5

字 数 / 670 千字

版 次 / 2015 年 4 月第 1 版

印 次 / 2015 年 4 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-4127-2

定 价 / 68.00 元

联系我们: 电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>



前 言

无机非金属材料热工过程及设备涉及材料生产中的燃料燃烧过程、物料干燥过程及物料烧结(熔化)过程等三个环节。热工窑炉部分包括水泥窑、陶瓷窑、玻璃池窑和混凝土养护窑四部分。

热工过程是无机材料生产中最重要工序,窑炉则是关键的热工设备。物料在烧制过程中,内部发生一系列物理、化学及物理化学变化,这些变化过程与窑炉结构及操作过程密切相关。如果窑炉设计不合理、操作管理上有缺陷,必然会影响质量、产量或增加原料和燃料消耗,增加产品的成本,甚至还会产生废品。因此,热工过程及窑炉在无机材料产品生产中的地位是十分关键的,常被称为无机材料工厂的“心脏”。

本书打破传统的按产品种类分别编写的模式,把属于无机非金属材料热工过程及设备知识结合在一起,按照“以传统过程及设备为基础,兼顾发展中的最新技术及设备”的原则组织编写内容,突出“三个结合”,即:热工过程与设备相结合,传统知识与新技术相结合,系统性与实用性相结合。本书可作为无机非金属材料专业应用型本科教材,也可作为相关专业工程技术人员工作、学习的参考书。

全书共分9章,第4~8章由陈景华编写;第3章由张长森编写,第2章、第9章由蔡树元编写,第1章由邓育新编写;中国玻璃控股有限公司的杜吉亮参与了玻璃池窑及相关设备部分的编写工作。中国建材国际工程集团有限公司的朱锦杰对玻璃池窑结构设计方面的内容进行了审核,在此表示衷心感谢。全书由陈景华统稿。

鉴于编者水平有限,本书难免有不足之处,欢迎读者在使用过程中多提宝贵意见。

编 者

2014年12月

目 录

1 燃料燃烧过程及燃烧设备	1
1.1 固体燃料的燃烧过程及设备	1
1.1.1 固体燃料的燃烧过程	1
1.1.2 煤的层燃燃烧设备	2
1.1.3 煤粉燃烧过程及燃烧设备	4
1.1.4 沸腾燃烧法及沸腾炉	8
1.2 液体燃料的燃烧过程及燃烧设备	9
1.2.1 重油的雾化过程	9
1.2.2 重油的燃烧过程	11
1.2.3 重油的燃烧设备	12
1.2.4 轻质柴油烧嘴	13
1.2.5 液体燃料的先进燃烧技术	14
1.3 煤气的制备过程及设备	19
1.3.1 煤的气化及煤气的种类	19
1.3.2 混合煤气的制造原理	22
1.3.3 煤气发生炉的分类和构造	30
1.3.4 煤气的净化	32
1.3.5 气化方法进展	34
1.4 气体燃料的燃烧过程及设备	36
1.4.1 高速调温烧嘴	37
1.4.2 平焰烧嘴	41
1.4.3 浸没式烧嘴	41
1.4.4 天然气的燃烧过程及烧嘴	41
思考题	46
2 干燥过程及设备	47
2.1 概述	47
2.1.1 干燥的意义	47
2.1.2 干燥的方法	47
2.1.3 对流干燥方法	48
2.2 湿空气的性质及 $I-x$ 图	49
2.2.1 湿空气的性质	49
2.2.2 湿空气的 $I-x$ 图	55
2.3 干燥过程	63
2.3.1 湿物料所含水分的性质	63
2.3.2 干燥机理	64

2.3.3	影响干燥速率的因素	67
2.3.4	制品在干燥过程中的体积变化	68
2.4	干燥过程计算	69
2.4.1	干燥工艺流程	69
2.4.2	物料中水分含量的表示方法	70
2.4.3	物料平衡计算	70
2.4.4	热量平衡计算	72
2.4.5	干燥过程的图解	75
2.5	干燥方法与干燥设备	78
2.5.1	干燥设备的分类及对干燥设备的要求	78
2.5.2	回转烘干机	79
2.5.3	三筒烘干机	82
2.5.4	隧道干燥窑	83
2.5.5	流态干燥器	84
2.5.6	喷雾干燥机	84
2.5.7	其他干燥方法	84
	思考题	85
	习题	86
3	水泥生产热工过程与设备	87
3.1	概述	87
3.1.1	水泥熟料的形成过程	87
3.1.2	熟料形成的热化学	88
3.2	回转窑	91
3.2.1	概述	91
3.2.2	回转窑的结构	93
3.2.3	回转窑的工作原理	95
3.3	悬浮预热器	105
3.3.1	概述	105
3.3.2	旋风预热器的工作原理	105
3.3.3	影响旋风预热器换热效率的因素	108
3.3.4	旋风筒的结构和参数	110
3.3.5	各级旋风预热器性能的配合	117
3.3.6	旋风预热器(SP)的分类、特点以及几种典型的旋风预热器	119
3.4	分解炉	126
3.4.1	概述	127
3.4.2	分解炉的工作原理及工艺性能	129
3.4.3	分解炉的类型	131
3.4.4	几种典型分解炉的结构特征	137
3.4.5	国内分解炉技术进展	143
3.4.6	预分解窑系统中窑的性能	146
3.5	水泥熟料冷却机	148
3.5.1	概述	148

3.5.2	筒式冷却机	151
3.5.3	篦式冷却机	153
3.5.4	其他篦式冷却机简介	162
	思考题	164
4	玻璃熔窑	165
4.1	概述	165
4.1.1	玻璃的熔制过程	165
4.1.2	玻璃熔窑的分类	166
4.1.3	典型池窑的结构特征	168
4.2	玻璃池窑	169
4.2.1	玻璃熔制部分	170
4.2.2	热源供给部分	179
4.2.3	余热回收部分	181
4.2.4	排烟供气部分	181
4.3	池窑的工作原理	183
4.3.1	池窑内玻璃液的流动	183
4.3.2	池窑内热量传递	187
4.3.3	火焰空间内气体的流动	188
4.4	池窑的熔制制度	190
4.4.1	温度制度及制订	190
4.4.2	压力制度	192
4.4.3	泡界线制度	194
4.4.4	液面制度	194
4.4.5	气氛制度	194
4.4.6	换向制度	195
4.5	玻璃池窑结构设计	195
4.5.1	投料部分设计	195
4.5.2	熔化部设计	196
4.5.3	分隔装置设计	205
4.5.4	冷却部设计	211
4.5.5	成型部设计	212
4.5.6	小炉结构设计	215
4.5.7	玻璃池窑结构设计方案	220
4.6	玻璃工业与熔窑技术新进展	222
4.6.1	用增碳法提高火焰辐射率以强化火焰向玻璃液的传热	222
4.6.2	改变窑壁辐射光谱来强化窑壁向玻璃液的传热	222
4.6.3	加强窑体保温	223
4.6.4	改进玻璃成分	223
4.6.5	强化熔制	223
4.6.6	水蒸气层成型的新技术	227
4.6.7	采用废气余热利用新技术	228
4.6.8	窑炉环保的新技术	231

思考题	231
5 余热回收设备	233
5.1 蓄热室	233
5.1.1 蓄热室的结构	233
5.1.2 蓄热室的类型	237
5.1.3 蓄热室的工作原理	239
5.1.4 蓄热室的结构设计	241
5.1.5 排烟供气系统的设计	244
5.2 换热器	244
5.2.1 换热器的类型	245
5.2.2 换热器的结构	246
5.2.3 换热器的工作原理	247
5.2.4 换热器的结构设计	248
思考题	248
6 锡槽	250
6.1 浮法玻璃成型过程及其对锡槽的要求	250
6.1.1 浮法玻璃成型过程	250
6.1.2 浮法玻璃成型过程对锡槽的要求	251
6.2 锡槽的分类与结构	254
6.2.1 锡槽的分类	254
6.2.2 锡槽的结构	255
6.3 锡槽的作业制度	260
6.3.1 温度制度	260
6.3.2 气氛制度	261
6.3.3 压力制度	261
6.3.4 锡液液面位置和锡液深度	262
6.4 锡槽的结构设计	262
6.4.1 流液道的设计	263
6.4.2 锡槽形状的确定	263
6.4.3 锡槽尺寸的确定	263
6.4.4 保护气体用量的确定	266
思考题	267
7 退火窑	268
7.1 玻璃的退火过程及退火制度	268
7.1.1 玻璃制品中的热应力	268
7.1.2 退火原理	269
7.1.3 退火过程	270
7.1.4 退火参数的计算	271
7.1.5 浮法玻璃退火曲线实例	276
7.2 退火窑分类及结构	277

7.2.1	间歇式退火窑及结构	278
7.2.2	半连续式退火窑及结构	278
7.2.3	连续式退火窑及结构	279
7.3	辊道式退火窑	280
7.3.1	退火窑热绝缘区(保温区)的结构	280
7.3.2	退火窑非热绝缘区(非保温区)的结构	282
7.3.3	退火窑辊道结构	283
7.4	网带式退火窑	283
7.4.1	燃气退火窑	284
7.4.2	烧重油退火窑	285
7.4.3	电热退火窑	286
7.4.4	强制气流循环式退火窑	287
7.4.5	用高速喷嘴的强制循环式退火窑	288
7.5	退火窑的设计计算	290
7.5.1	确定退火制度	290
7.5.2	退火窑长度的计算	290
7.5.3	窑体尺寸的计算	291
7.5.4	燃料消耗量计算	292
	思考题	292
8	陶瓷窑	293
8.1	概述	293
8.1.1	陶瓷的烧成过程	293
8.1.2	陶瓷窑的分类	294
8.2	陶瓷隧道窑	294
8.2.1	隧道窑的分类	294
8.2.2	隧道窑的分带及结构	295
8.2.3	隧道窑窑体	295
8.2.4	运输系统	301
8.2.5	燃烧设备	304
8.2.6	排烟与调温系统	305
8.2.7	气幕	308
8.2.8	其他隧道窑简介	313
8.3	隧道窑的工艺流程及烧成制度	316
8.3.1	隧道窑的工艺流程	316
8.3.2	陶瓷的烧成制度	316
8.4	陶瓷辊道窑	318
8.4.1	辊道窑的特点	318
8.4.2	辊道窑的分带及工作系统	319
8.4.3	辊道窑的结构	320
8.5	日用瓷辊道窑	334
8.5.1	高温日用瓷辊道窑的特点	335
8.5.2	窑体结构与砌筑材料	335

8.5.3	窑具	335
8.5.4	工作系统布置	336
8.6	陶瓷间歇窑	337
8.6.1	概述	337
8.6.2	倒焰窑	337
8.6.3	梭式窑	341
8.6.4	罩式窑	348
8.7	隧道窑和辊道窑的最新发展动态	349
	思考题	350
9	混凝土制品热养护设备	352
9.1	概述	352
9.1.1	混凝土养护工艺	352
9.1.2	混凝土加速养护的方法	352
9.1.3	热养护的特点	353
9.2	热养护过程	353
9.2.1	湿热养护	353
9.2.2	湿热养护过程中的主要矛盾	353
9.2.3	常压热养护制度	354
9.2.4	水泥水化热	357
9.3	间歇作业热养护设备	358
9.3.1	养护坑	358
9.3.2	间歇作业隧道蒸汽养护窑	361
9.3.3	太阳能养护	362
9.4	连续作业热养护设备	364
9.4.1	水平隧道窑	364
9.4.2	折线型隧道窑	366
9.5	高压蒸汽养护	369
9.5.1	蒸压混凝土制品的原理	369
9.5.2	蒸压釜的结构	369
9.5.3	蒸压釜的安全性要求	370
9.5.4	蒸压釜的选用	370
9.6	其他热养护方法	370
9.6.1	干热养护与干湿热养护	370
9.6.2	热流体的养护法	371
9.6.3	红外线养护法	372
9.6.4	微波养护法	372
9.6.5	电热养护法	372
	思考题	372
附录 1	湿空气的相对湿度 ϕ 表	374
附录 2	湿空气的 $I-x$ 图 ($p=99.3 \text{ kPa}$, $t=-10\sim 200^\circ\text{C}$)	375
附录 3	湿空气的 $I-x$ 图 ($p=99.3 \text{ kPa}$, $t=0\sim 1450^\circ\text{C}$)	376
	参考文献	377

1 燃料燃烧过程及燃烧设备

水泥工业中应用得最多的是固体燃料煤,煤的燃烧方法有层燃燃烧法、喷燃燃烧法和沸腾燃烧法。层燃燃烧是将块煤放在炉篦上铺成一定厚度的煤层进行燃烧。喷燃燃烧是先把原煤经过破碎、烘干和粉磨,制成一定细度的煤粉,然后随空气喷到燃烧室或窑内进行悬浮燃烧。沸腾燃烧是利用空气动力使煤粒在沸腾状态完成燃烧反应的。燃烧方法不同,燃烧过程也各有特点。

传统的层燃燃烧法,由于其燃烧效率低、自动化水平不高以及对环境污染较大等原因,在水泥工业上已鲜有应用。现在应用最多的是燃烧效率很高的煤粉燃烧法,其次是沸腾燃烧法。

玻璃工业中应用得最为广泛的燃料是重油、天然气或焦炉煤气,它们的热值较高,能满足熔化玻璃的要求。

陶瓷工业中应用得最多的燃料是气体燃料(煤气、天然气、液化石油气)和液体燃料(轻柴油、重油)。

1.1 固体燃料的燃烧过程及设备

1.1.1 固体燃料的燃烧过程

固体燃料的燃烧过程可以分为准备、燃烧和燃烬三个阶段。

1. 准备阶段

准备阶段包括燃料的干燥、预热和干馏。固体燃料受热后,其中所含的水分汽化,此时温度在 110°C 左右,水分全部逸出后干燥结束。显然,水分越多,干燥消耗的热量越多,所需要的时间也越长。固体燃料干燥后,若温度继续上升则开始分解,放出挥发物,最后剩下固体焦炭,这一过程又称作干馏。燃料挥发分越多,开始放出挥发物的温度就越低;反之,燃料挥发分越少,这一温度就越高。就煤而言,褐煤开始放出挥发物的温度最低,大约为 130°C ;无烟煤最高,约 400°C ;烟煤介于上述两者之间。

在固体燃料燃烧的准备阶段,由于燃烧尚未开始,基本上不需要空气。这一阶段中燃料干燥、预热、干馏等过程都是吸热过程。热量的来源主要是燃烧室内灼热火焰、烟气、炉墙以及邻近已经燃着的燃料。一般希望这个阶段所需的时间越短越好,影响它的主要因素有煤的性质、水分含量、燃烧室内温度和燃烧室的结构等。

2. 燃烧阶段

燃烧阶段包括挥发分和焦炭的燃烧。

挥发分中主要是碳氢化合物,比焦炭更易着火,因此当逸出的挥发分达到一定的温度和浓度时,它就先于焦炭着火燃烧。通常把挥发分着火燃烧的温度粗略地看作固体燃料的着火温度。挥发分多的燃料,着火温度低;反之,挥发分少,着火温度高。应当指出的是,通常所说的着火温度只

是固体燃料着火的最低温度条件,在该温度下燃料虽然能着火,但燃烧速度较低。实际生产中,为了保证燃烧过程稳定,加快燃烧速度,通常要求把燃料加热到较高的温度,例如褐煤要加热到 $550\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,烟煤为 $750\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,无烟煤为 $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

焦炭是固体燃料的主要燃质。对煤来说,焦炭是煤燃烧过程中放出热量的主要来源,其发热量一般占总发热量的一半以上。由于焦炭的燃烧是多相反应,焦炭燃烧所需的时间比挥发分长得多,完全燃烧也比挥发物更困难。因此,如何保证焦炭的燃烧完全、迅速,是组织燃烧过程的关键之一。在这一阶段,要保持较高的温度条件,供给充足的空气,并且要使空气和燃料充分混合。

3. 燃烬阶段(或称灰渣形成阶段)

焦炭块将烧完时,焦炭外壳包了一层灰渣,使空气很难掺入其中参与燃烧,从而使燃烧进行得很缓慢,尤其是高灰分燃料就更难燃尽。这阶段的放热量不大,所需空气量也很少,但仍需保持较高温度,并给予一定时间,尽量使灰渣中的可燃质完全燃烧。燃烬是固体燃料所特有的,液体和气体燃料没有燃烬阶段。

1.1.2 煤的层燃燃烧设备

煤的层燃燃烧是指绝大部分燃料在炉篦上燃烧,而可燃气及一小部分细屑燃料则在燃烧室空间内呈悬浮态燃烧。层燃燃烧一般要进行三项主要操作:加煤、拨火和除渣。凡上述三项操作都由机械操作完成的燃烧室称为机械化燃烧室;只有一项或两项操作采用机械操作的称半机械化燃烧室;全部由人工完成的称人工操作燃烧室(或称手烧炉)。这里只介绍机械化层燃燃烧室。

机械化层燃燃烧室,有回转炉篦、倾斜推动炉篦、振动炉篦等几种。

1. 构造和工作原理

回转炉篦燃烧室又称为链条炉,是一种使用历史最为悠久的机械化燃烧室。它的主要结构部分是一条无端的链状炉篦(图 1-1),当炉篦由前向后缓缓回转时,便把煤由煤斗下部经过煤闸门送入燃烧室进行燃烧,灰渣由尾部排出。这种炉篦既是承托燃烧层的装置,又是加煤和除渣设备。燃烧用的一次空气,首先送至装在回转炉篦腹中的风舱,然后自下而上穿过炉篦通风孔隙进入燃烧层中,空气的流动方向与煤层的运动方向相互垂直交叉。

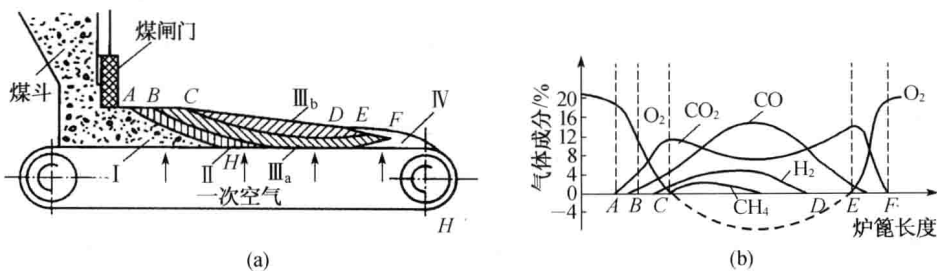


图 1-1 回转炉篦燃烧室中燃料燃烧过程示意图

I—新燃料干燥预热区; II—挥发分逸出、燃烧区; III_a—焦炭燃烧氧化区;
III_b—焦炭燃烧还原区; IV—灰渣燃烬区

倾斜推动炉篦燃烧室是借炉篦的推动作用进行加煤、拨火和除渣的一种机械化燃烧室。这种炉篦(图 1-2)由活动炉条和固定炉条所组成,两种炉条相间布置、互相搭接排列成阶梯状。炉篦的倾斜角度 α 小于燃料的自然休止角。活动炉条由传动机构带动可做往复运动。当活动炉条自左向右推进时,固定炉条上的煤便被推到相邻的下一块活动炉条上,当活动炉条往左运动时,

由于固定炉条的阻挡,活动炉条上的煤便被拨动而落到相邻的下一块固定炉条上。如此反复,煤层便由煤斗进入燃烧室并沿炉篦面缓缓地向炉篦后部移动。燃烧用的一次空气由炉篦下方供入。

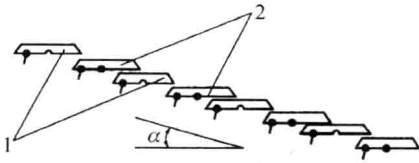


图 1-2 倾斜推动炉篦示意图

1—活动炉条; 2—固定炉条

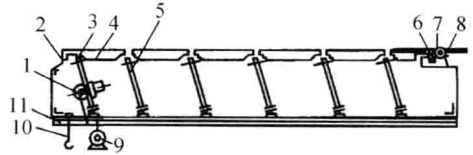


图 1-3 固定支点振动炉篦

1—激振器(偏心块); 2—前密封; 3—炉条;
4—拉杆; 5—弹簧板; 6—填料; 7—后密封片;
8—活动挡灰板; 9—激振器电动机;
10—地脚螺栓; 11—减振橡皮垫

振动炉篦燃烧室中振动炉篦主要由激振器、板状炉条、上框架、弹簧板、下框架、密封板等几部分组成(图 1-3)。安装炉条的上框架由弹簧板支撑。弹簧板向前倾斜,与水平成 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 的倾斜角,用固定支点连接于下框架上,在振动炉篦上,煤是靠惯性力的作用而向后移动的。当弹簧板向前下方振动时(图 1-4(a)),炉篦上的煤受到一个向后上方的惯性力,这个力抵消了煤的一部分重力,使煤与炉篦间的摩擦力减小,如果炉篦振动得足够剧烈,煤就在这惯性力的作用下向后移动;当弹簧板向后上方振动时(图 1-4(b)),煤受到一个向前下方的惯性力,这个力使煤作用在炉篦上的压力增大,它们之间的摩擦力也相应增大,此时观察振动情况,煤或者不动,或者向前运动,但其向前移动的速度比上述向后移动慢。因此,炉篦振动时,煤层便由煤斗送入燃烧室并向后移动。一次空气也是由炉篦下方的风舱提供,空气的流动方向与煤层的运动方向相互垂直交叉。

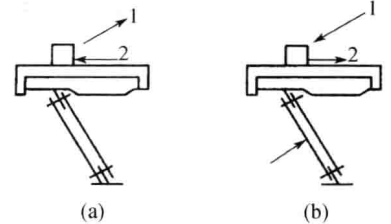


图 1-4 炉篦振动时煤的受力情况

1—惯性力; 2—摩擦力

2. 燃烧过程的特点

回转炉篦、倾斜推动炉篦和振动炉篦的构造原理虽然不同,但煤层都是由前向后运动,均属于前给式燃烧室,因此煤在这些燃烧室内的燃烧过程比较接近。

回转炉篦燃烧室内,燃料的燃烧过程如图 1-1 所示。区域 I 是新燃料区,燃料在这里进行干燥预热。由于该区燃料层底面不存在灼热的焦炭层,而从炉篦下面送来的空气一般温度也不高,因此煤层干燥预热所需要的热量,主要依靠炉内火焰和高温炉墙的辐射热供给。因此,燃料的加热和点燃是从燃料层上表面开始,然后逐渐向下传递的,着火条件比人工操作燃烧室差。区域 II 是挥发物逸出、燃烧区。区域 I 和区域 II 的界面 AH 是挥发物逸出的前沿。它的斜度取决于炉篦的移动速度和由上而下燃烧的传播速度。燃烧层的导热性很差,因此燃烧的传播速度仅 $0.2\sim 0.5$ m/h,只相当于炉篦移动速度的几十分之一。界面 AH 也几乎是燃料着火的前沿。从点 A 向右,挥发物逸出层的厚度逐渐增大,至点 B 开始进入焦炭燃烧氧化区 III;从点 B 向右,焦炭燃烧层厚度也愈来愈厚,到达点 C 时,超过了氧化层的厚度(燃料颗粒直径的 $3\sim 5$ 倍),便进入焦炭燃烧还原区 III。到达点 D 时,上表面的燃料首先燃尽形成灰烬。

回转炉篦、倾斜推动炉篦和振动炉篦三种机械化燃烧室之间,也有一些不同的特点。

倾斜推动燃烧室与回转燃烧室相比,回转炉篦燃烧室燃料层主要靠上面加热引燃;而在倾斜推动炉篦燃烧室内,炉篦对燃料层不断地耙动,这可以使在燃料层表面已着火燃烧的“红煤”翻到燃料

层的下部,因此它除了上面引燃之外,还存在下部着火的火源,引燃条件比回转炉篦好。回转炉篦在整个燃烧过程中,燃料与炉篦之间没有相对运动,所以要靠人工来进行拨火操作;而在推动篦上活动炉篦的耙拨运动可以改善燃料层的透气性,挤碎焦块,剥落包裹在燃料颗粒外面的灰层,起着拨火的作用。因此,推动炉篦燃烧室可以燃用具有黏结性、高灰分、难以着火的低质烟煤。此外,它构造较为简单,金属耗量较小,这也是比回转炉篦性能更优越的方面。但倾斜推动炉篦由于炉篦有倾斜度,而炉条又是水平运动,侧密封较难处理,漏风、漏煤较多。另外,这种炉篦的冷却表面很小,处于燃烧地段的炉篦又永远直接与高温煤层接触,不像回转炉篦那样有空行程的冷却条件,所以很容易被烧坏,而且在运行过程中当炉条被烧坏或脱落时,也难以发现和更换。因此,推动炉篦燃烧室不适宜燃用挥发分低、灰分少、发热量高的烟煤和贫煤,燃烧强度也不能太高。

振动炉篦燃烧室中,当炉篦振动时,煤层上下松动,不易结块,因此它的拨火性能、燃烧层内空气和燃料的接触,以及对煤种的适应性等都比回转炉篦好,但由于振动会导致飞灰损失较大。此外,与推动炉篦相似,处于高温地段的炉条工作条件也较恶劣,特别是当通风孔隙被堵塞时,很容易被烧损。

1.1.3 煤粉燃烧过程及燃烧设备

由于煤粉燃烧具有效率高、煤耗低、温度高、调节方便等优点,目前我国水泥厂主要采用煤粉作为回转窑的燃料。

1. 煤粉燃烧过程

煤粉的燃烧采用喷燃法,其燃烧空间为窑炉的炉膛(如水泥回转窑)或是专设的燃烧室(如水泥烘干机及锅炉的燃烧室等)。

煤粉燃烧的特点是煤粉随空气喷入燃烧室后,呈悬浮状态,一边随气流继续往前流动,一边依次进行干燥、预热、挥发分逸出和燃烧、焦炭粒子燃烧等过程。燃烧产生的热烟气经挡火墙上方的喷火口送进烘干机或其他窑炉加热物料,燃尽后的煤灰一部分被烟气带走,一部分落入灰坑。在回转窑内,则边燃烧边把热量传给物料,煤灰绝大部分在窑内降落并掺入物料。煤粉燃烧所需要的空气一般分两部分供入。对于传统的旋流式和直流式煤粉烧嘴而言,习惯上将随煤粉一起进入燃烧室或窑内的空气称为一次空气,另外单独供入的空气称为二次空气。

根据煤粉是在悬浮状态下进行燃烧的特点,在组织燃烧时,应注意以下几点:

(1) 合理组织炉内气流以加速煤粉着火

煤粉干燥、预热和干馏过程所需的热量,除了靠炉内高温火焰和炉墙的辐射传热之外,冷热气流之间的对流传热也起很大作用。因此,为了加速煤粉着火,一方面要注意保持较高的炉膛温度,另一方面则应采用合适的煤粉烧嘴,合理组织炉内气流,加强刚入炉的煤粉气流与炉内热气体之间的混合,以增加对流传热。

(2) 合理控制一次风量和一次风温

一次风量大,将煤粉与一次风混合物加热到着火温度所需的热量就大,因此一次风量应尽量少些。另外,当煤粉加热到着火温度时,煤中放出的挥发分首先燃烧,挥发分基本上燃烧完后焦炭才开始燃烧,因此一次风量也不宜过少,大体上应满足煤粉挥发物燃烧的需要。此外,确定一次风量比例时,还要考虑煤粉制备系统的设计要求和窑炉的特性。通常烘干机煤粉燃烧室采用的一次风量比例见表1-1。二次风主要是提供给焦炭粒子的燃烧。同样,提高一次风温度对煤粉着火也是有利的,特别是燃用低挥发分的煤如无烟煤和贫煤时。但为了防止煤粉气流发生爆炸,一次风预热温度具有一定限制,一般不预热。二次风的预热则没有限制。

表 1-1 煤粉燃烧室一次风量比例和过剩空气系数

煤种	无烟煤	贫煤	烟煤	烟煤	褐煤
$V_{daf}/\%$	2~9	10~17	<30	>30	>40
一次风量/ $\%$	15~20	20~25	25~30	30~45	40~45
空气系数 α	1.25	1.25	1.20	1.20	1.20

(3) 合理控制空气系数

保持较高的炉膛温度,对加速煤粉着火和燃烬过程都是有利的。而合理控制空气系数(α)则是提高炉膛温度的重要措施之一。一般煤粉燃烧室的 α 值见表 1-1。如果燃烧室采用两个或多个烧嘴,则应注意各烧嘴间风量分配的均匀性。为了满足烘干机对烟气温度的要求而掺入的冷风,应在煤粉基本燃烬以后的位置再掺入。水泥回转窑的 α 值一般为 1.05~1.15。

(4) 确定合适的一次风喷出速度

煤粉和空气的混合物从烧嘴喷出到着火燃烧所走过的轨迹,形成黑火头;着火以后,炽热的炭粒所走过的轨迹,形成明亮的火焰。其他条件不变,增大一次风喷出速度,黑火头将延长,过大时甚至会引起灭火。但也不能过小,至少必须大于煤粉的火焰传播速度,以防止发生回火的危险。火焰传播速度与煤中挥发分、灰分的含量有关,如图 1-5 所示。挥发分含量低不易着火的煤,一次风速应小一些,以免黑火头拉得很长;挥发分高容易燃烧的煤,一次风速应大一些,以加速燃烧,提高火焰温度。一次风速增大,一方面增大煤粉的射程,可能使火焰伸长;另一方面强化了焦炭粒子与二次风的混合,有利于加速炭粒燃烧,但可能使火焰缩短。因此,一次风速变化时,火焰长度如何变化,要看上述互为消长的两种因素的综合结果。此外,确定一次风速时,还要考虑输送煤粉的要求,即保证大部分煤粉在燃烬之前保持悬浮状态,否则会落进灰坑造成不完全燃烧的热损失。

(5) 注意加速焦炭粒子的燃烧

煤粉着火以后,挥发物的燃烧较为迅速,但随后进行的焦炭粒子的燃烧则十分缓慢,如图 1-6 所示,这是根据燃用无烟煤粉时所测得的数据绘出的,曲线 C 表示沿火焰长度方向飞灰含碳量的变化。焦炭燃烧缓慢的主要原因是:燃烧过程中焦炭粒子表面包围了一层燃烧产物(炭粒与周围空气间的相对速度几乎等于零,因

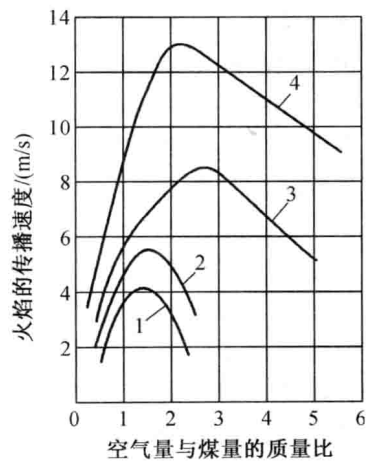


图 1-5 火焰传播速度与煤粉挥发分及灰分之间的关系

- 1—Var=15%, Aar=5%;
- 2—Var=30%, Aar=40%;
- 3—Var=30%, Aar=30%;
- 4—Var=30%, Aar=5%

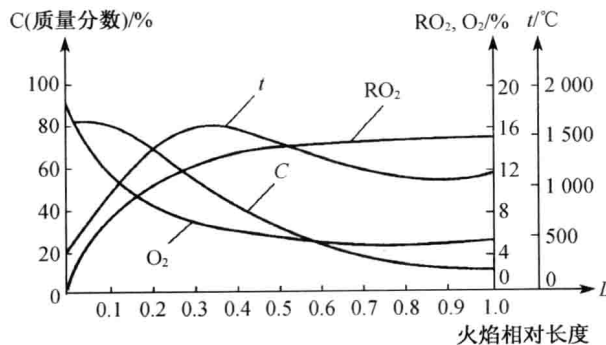


图 1-6 煤粉火焰沿长度方向的变化

此这一层燃烧产物很难消散),使氧分子向焦炭粒子表面扩散时,受到很大阻力;同时,焦炭粒子周围气体中氧的浓度不断降低。因此应设法加强气流的扰动,以加快氧的扩散速度;另外,合理控制空气系数,以保证燃烧后期仍有足够的氧浓度,从而使煤粉燃烧既迅速又完全。

(6) 制备细度合格且粒度均匀的煤粉

煤粉细一些,燃烧会较迅速完全;粒度均匀即含较少的粗粒煤粉,这也有利于完全燃烧。但煤粉若过细,则会降低煤磨产量,增加磨煤电耗。水泥回转窑用的煤粉细度一般要求 0.080 mm 方孔筛筛余为 8%~15%,煤粉挥发物含量高的取其较高值,反之取其较低值。

2. 煤粉烧嘴

煤粉烧嘴可分为旋流式和直流式两大类。

(1) 旋流式烧嘴

在旋流式煤粉烧嘴内装有使气体产生旋转运动的导流叶片,空气通过烧嘴时,由于导流叶片的导向作用,会产生强烈的旋转。有的是一次风或二次风单独旋转,也有的是一次风与二次风同时旋转。

如图 1-7 所示,这是一种固定轴向叶片旋流式烧嘴,一次风壳出口处装有固定的轴向叶片,使一次风通过时造成强烈旋转。图 1-8 是一次风壳出口固定旋流叶片的结构图。

当一次风旋转流股出了烧嘴后,将带动二次风一起旋转。在离心力的作用下,流股会迅速扩张成圆锥面。旋转流股的扩展,使火焰在炉膛中充满度好,同时流股的内缘和外缘还会带动周围气流一起向前流动,形成卷吸现象。这一卷吸作用在烧嘴中心线附近造成了负压区,于是离烧嘴远处的高温烟气便回流到煤粉气流根部,使煤粉温度升高而着火燃烧。旋转流股由于卷吸了烟气,其轴向速度迅速衰减,切向速度也由于流股的扩展使转动半径加大而衰减,因而其射程较短。采用此种旋流式烧嘴时,一次风和二次风的喷出速度可参照表 1-2。

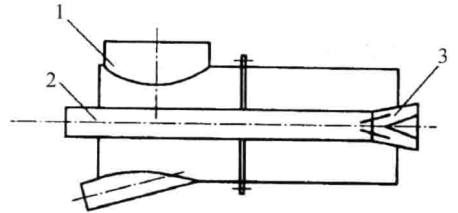


图 1-7 固定轴向叶片旋流式烧嘴

1—二次风壳; 2—一次风壳; 3—旋流叶片

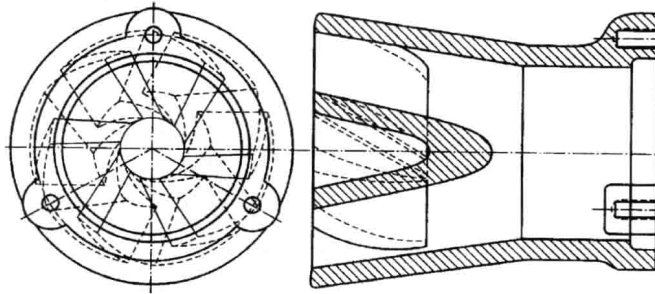


图 1-8 固定旋流叶片

表 1-2 一、二次风的风速

煤的种类	无烟煤	贫煤	烟煤	褐煤
一次风速/(m/s)	12~16	16~20	20~26	20~26
二次风速/(m/s)	18~22	20~25	20~30	20~30

(2) 直流式烧嘴

直流式烧嘴的构造如图 1-9 所示。其中图 1-9(a)为直筒式的构造;图 1-9(b)中其烧嘴的前端带有拔哨式出口;图 1-9(c)中其烧嘴的拔哨前端又加一段导管,可使火焰适当加长。

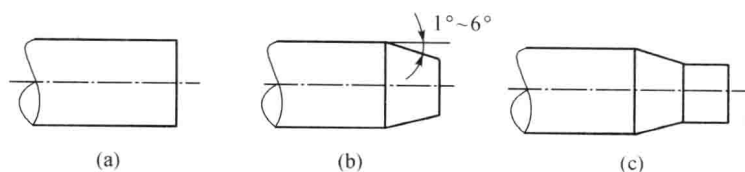


图 1-9 直流式烧嘴示意图

(a) 直筒式; (b) 拔哨式; (c) 拔哨导管式

采用直流式烧嘴时,二次风管可与一次风管做成同心套管,用二次风外包一次风供入燃烧室,也可将其分别于两处供入。直流式烧嘴的流体阻力较小,但它喷出的煤粉气流射程远,高温烟气的回流量也少,会使着火延迟且炉膛火焰充满度较差。

直流式烧嘴空气喷出速度一般比旋流式烧嘴所用风速大。一次风速为 $20\sim 30\text{ m/s}$,二次风速为 $40\sim 50\text{ m/s}$ 。挥发分高的煤取其较大值。

3. 煤粉燃烧室

煤粉燃烧室分立式和卧式两种。燃料由燃烧室顶部喷入的为立式(图 1-10),由侧壁喷入的为卧式(图 1-11)。卧式煤粉燃烧室占地较大,但向外散热面积较小。

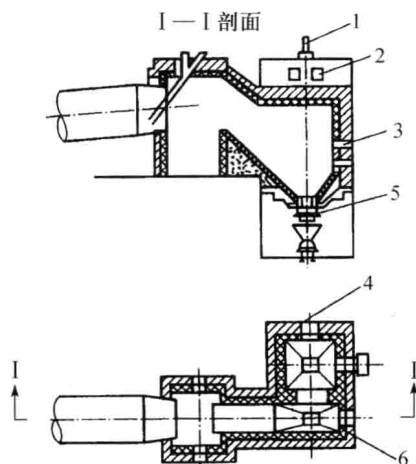


图 1-10 立式煤粉燃烧室

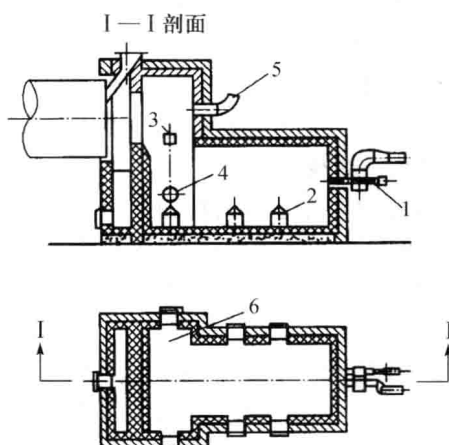
1—煤粉烧嘴; 2—防爆阀; 3—风量调节器;
4—炉门; 5—除灰门; 6—混合室

图 1-11 卧式煤粉燃烧室

1—煤粉烧嘴; 2—除灰门; 3—防爆阀;
4—风量调节器; 5—热风管; 6—混合室

煤粉燃烧室装有风量调节装置,可调节进入的冷空气量,将热烟气温度降到所需的温度。燃烧室上部装有防爆阀,当发生爆炸时,高压气流可由此通畅地排出,以防燃烧室被破坏。有时为了有效利用热量并降低燃烧室周围环境的温度,还在燃烧室的砖墙内砌有通道,使冷空气流过通道被预热后再经风机送入喷煤管。

煤粉燃烧室一般采用 $1\sim 2$ 个煤粉烧嘴。燃烧室较小时可采用 1 个。燃烧室较大时,在燃煤量相同的情况下,采用 2 个烧嘴可缩短喷燃方向的深度,布置烧嘴时,应注意使烧嘴与炉墙、烧嘴与烧嘴之间保持一定距离。

煤粉的燃烧全部在炉膛空间进行(有少数煤粉燃烧室设有小的炉篦,主要供点火用,也可使落在其上的粗煤粒继续燃烧),因此燃烧室燃烧的剧烈程度一般用炉膛容积热强度 q_V 表示, q_V 一般为 $140\sim 230\text{ kW/m}^3$ 。

除了容积大小之外,还应注意燃烧室的形状。在锅炉设计计算中采用炉膛截面热强度 q_A 作为