

高等学校规划教材

# 水泥热工机械设备

姜煜林 主编

武汉工业大学出版社

94

## 内容提要

本书专论水泥工业生产中的热工机械设备,着重介绍水泥煨烧、冷却、干燥机械设备的基础理论、主要设计内容及方法和具有代表性的机械设备的类型、构造、工作原理、特点以及主要参数的确定方法等。本书共分三篇十三章,包括回转窑、机械立窑、冷却与干燥机械设备。

本书为高等学校建材机械专业的规划教材,也可供有关科研、设计、生产部门的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

水泥热工机械设备/姜煜林主编. —武汉:武汉工业大学出版社,1996.12  
ISBN 7-5629-1206-8

I. 水 II. 姜 III. 水泥工业-热工-机械设备 IV. TQ172.6

武汉工业大学出版社出版发行

(武昌路狮路14号 邮编430070)

江苏盐城市盐阜大众报社印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:360千字  
1996年12月第1版 1996年12月第1次印刷  
印数:1—2500 定价:21.50元

## 前 言

本书是由国家建材高等专科学校教学指导委员会、国家建筑材料工业局教材编审委员会审定的高等专科学校建材机械专业规划教材。

《水泥热工机械设备》这门课程是高等工科院校建材机械专业的重要专业课。通过该课程的学习,使学生掌握本学科的基本理论和设计方法,熟悉各种典型机械设备的构造、工作原理、特点及确定主要工作参数的方法。

按照高等工程专科学校主要是为各中小型企业培养既有一定理论知识又有较强实际应用能力的工程技术人员这一要求,考虑到水泥热工机械设备与水泥工艺密切相关的特点,针对该门课程专科教材为空白、本科教材也甚少的现状,确定编写本书的指导思想是:系统地阐述本学科的基本理论、基础知识和设计方法,强调理论分析和实际应用,而简化推导过程,力求能够适应专、本科共用;结合水泥工艺、热工基本理论叙述有关内容,使学生能从工艺要求出发设计机械设备,并有利拓宽学生的知识面;全书图文并茂,并附有较多的适用图表,满足了学生在课程设计和毕业设计中资料的基本需要,并为有关工程技术人员提供一本有实用价值的参考书;全书在内容的选取上既考虑到重点突出,又兼顾到一定的覆盖面,并注重全书的系统性、科学性和新颖性。

本书共分三篇十三章,第一篇回转窑、第二篇机械立窑、第三篇冷却、干燥机械及设备。

参加本书编写工作的有:盐城工学院姜煜林(第一篇第一、二、三、四、五章);山东建筑材料工业学院程鸿机(第一篇第六、七、八章、第三篇第十二章);湖南建材工业高等专科学校蒋冬青(第二篇第九、十章);洛阳高等工业专科学校刘建寿(第三篇第十三章);上海同济大学汪小鸿(第二篇第十一章)。

全书由盐城工学院姜煜林主编并统稿,由武汉工业大学郑金宝教授主审。在编写过程中得到了有关院校和单位的老师、专家们的支持和帮助,武汉工业大学出版社朱益清老师为本书的出版做了大量细致的工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1996年8月

# 目 录

## 第一篇 回转窑

<b>第一章 回转窑总体设计</b> .....	1
<b>第一节 概述</b> .....	1
一、 回转窑作用及在水泥工业中的应用 .....	1
二、 回转窑发展过程及趋势 .....	2
<b>第二节 水泥熟料煨烧工艺简介</b> .....	5
一、 硅酸盐水泥熟料组成 .....	5
二、 回转窑内硅酸盐水泥熟料形成过程 .....	6
<b>第三节 回转窑结构组成与机械设计特点</b> .....	10
一、 回转窑结构组成 .....	10
二、 回转窑机械设计特点 .....	11
<b>第四节 回转窑规格及筒体形式的确定</b> .....	12
一、 回转窑规格计算 .....	12
二、 筒体形式选择 .....	19
<b>第五节 回转窑主要参数计算</b> .....	20
一、 回转窑斜度 .....	20
二、 回转窑转速 .....	20
三、 物料在窑内停留时间 .....	21
四、 填充率计算 .....	23
<b>第二章 回转窑水泥生产方法与窑外热交换装置</b> .....	24
<b>第一节 湿法回转窑</b> .....	24
一、 生产流程及工作原理 .....	24
二、 链式热交换装置 .....	25
<b>第二节 立波尔窑</b> .....	27
一、 生产流程及工作原理 .....	28
二、 加热机构造 .....	29
三、 加热机选型计算 .....	29
<b>第三节 悬浮预热器窑</b> .....	30
一、 旋风式悬浮预热器窑 .....	31
二、 立筒式悬浮预热器窑 .....	34
三、 悬浮预热器窑旁路放风技术 .....	37

第四节	窑外分解窑 .....	41
一、	概述 .....	41
二、	SF 窑 .....	43
三、	其它型式分解炉 .....	46
四、	分解炉主要尺寸估算 .....	49
<b>第三章</b>	<b>筒 体 .....</b>	<b>50</b>
第一节	概述 .....	50
一、	筒体存在的主要问题 .....	50
二、	筒体径向变形控制措施 .....	51
三、	筒体设计步骤 .....	52
第二节	筒体结构及设计 .....	53
一、	筒体支点数及支点跨距的初步确定 .....	53
二、	筒体钢板厚度的初步确定 .....	54
三、	挡轮及大齿圈在筒体上的位置 .....	54
四、	窑内装置 .....	54
五、	筒体载荷计算 .....	56
第三节	筒体弯曲应力计算及校核 .....	58
一、	筒体计算基本假设 .....	58
二、	用力矩分配法计算支座弯矩及反力 .....	58
三、	筒体弯曲强度计算实测 .....	63
第四节	筒体缩颈温度应力计算 .....	73
第五节	筒体安装尺寸计算 .....	75
一、	筒体热膨胀 .....	75
二、	总图基础水平距离及标高尺寸的计算 .....	76
<b>第四章</b>	<b>轮带 .....</b>	<b>78</b>
第一节	概述 .....	78
一、	轮带作用及主要损坏型式 .....	78
二、	轮带截面形状 .....	78
三、	轮带在筒体上的安装方式 .....	80
四、	垫板结构型式 .....	81
五、	轮带与筒体垫板间隙 .....	82
第二节	轮带弯曲应力和径向变形 .....	84
一、	轮带弯曲应力计算 .....	84
二、	轮带径向变形计算 .....	86
第三节	轮带圆环温度应力 .....	87
一、	概述 .....	87
二、	轮带圆环壁中的温度分布规律 .....	87
三、	圆环温度应力计算及分析 .....	88

第四节	轮带与托轮间接触应力 .....	91
一、	概述 .....	91
二、	接触应力计算及分析 .....	91
第五节	轮带设计 .....	93
一、	轮带和托轮的材料组合 .....	93
二、	轮带结构尺寸的初定 .....	94
三、	轮带上各应力叠加计算及校核 .....	97
<b>第五章</b>	<b>托轮支承装置 .....</b>	<b>98</b>
第一节	支承装置结构型式 .....	98
一、	概述 .....	98
二、	刚性支承 .....	98
三、	自调支承 .....	100
第二节	托轮及其轴承设计 .....	101
一、	托轮上的作用力 .....	101
二、	调整螺栓所受的作用力 .....	102
三、	托轮设计 .....	102
四、	托轮轴设计 .....	104
五、	滑动轴承 .....	105
第三节	托轮调整 .....	106
一、	窑体产生轴向窜动原因 .....	106
二、	控制窑体轴向窜动措施 .....	107
<b>第六章</b>	<b>挡轮装置 .....</b>	<b>110</b>
第一节	挡轮装置分类与结构 .....	110
一、	挡轮作用和分类 .....	110
二、	挡轮结构 .....	110
第二节	挡轮装置设计计算 .....	113
一、	挡轮基本参数 .....	113
二、	挡轮上作用力 .....	113
三、	由接触强度确定挡轮直径 .....	115
第三节	液压挡轮参数及主要零件设计 .....	116
一、	液压挡轮设计 .....	116
二、	液压系统设计 .....	116
三、	主要零件设计 .....	116
<b>第七章</b>	<b>传动装置 .....</b>	<b>119</b>
第一节	传动装置特点及传动方式 .....	119
一、	传动装置特点 .....	119
二、	传动方式 .....	120
三、	电动机选型 .....	122

第二节	大齿圈与小齿轮 .....	124
一、	大齿圈与小齿轮的配置及在筒体上的安装方式 .....	124
二、	齿轮参数选择及结构设计 .....	126
第三节	传动功率计算 .....	127
一、	主传动电机功率 .....	127
二、	辅助传动电机功率 .....	131
<b>第八章</b>	<b>窑口结构及窑端密封装置</b> .....	<b>133</b>
第一节	窑口结构 .....	133
一、	气冷式窑口 .....	133
二、	导热管冷却式窑口 .....	134
三、	刷冷式窑口 .....	134
第二节	窑端密封装置 .....	135
一、	密封装置作用和特点 .....	135
二、	密封装置结构 .....	136

## 第二篇 机械立窑

<b>第九章</b>	<b>机械立窑总体设计</b> .....	<b>144</b>
第一节	概述 .....	144
一、	水泥立窑发展简史及分类 .....	144
二、	立窑煅烧方法简介 .....	145
第二节	机械立窑结构组成及参数确定 .....	146
一、	机械立窑结构及工作原理 .....	146
二、	机械立窑结构参数确定 .....	149
三、	机械立窑工艺参数确定 .....	153
<b>第十章</b>	<b>机械立窑主要部件及装置</b> .....	<b>156</b>
第一节	喂料装置 .....	156
一、	工作要求及分类 .....	156
二、	结构及工作原理 .....	156
第二节	窑罩与烟囱 .....	158
一、	窑罩 .....	158
二、	烟囱 .....	159
第三节	窑体 .....	160
一、	窑体组成 .....	160
二、	窑体型式分类 .....	161
三、	窑体结构尺寸确定 .....	161
第四节	卸料装置 .....	163

一、卸料装置工作要求及分类 .....	163
二、盘式卸料装置 .....	163
三、塔式卸料篦子 .....	164
四、辊式卸料装置 .....	165
五、往复式卸料篦子 .....	167
六、卸料装置支承与密封 .....	167
第五节 传动装置 .....	170
一、传动装置工作要求及分类 .....	170
二、机械传动 .....	170
三、液压传动 .....	171
第六节 卸料密封与控制 .....	176
一、卸料密封装置工作要求及分类 .....	176
二、料封工作原理 .....	177
三、料封出料器类型、结构与设计 .....	178
四、料封出料器结构与设计 .....	179
五、料位控制仪 .....	180
<b>第十一章 预加水成球系统</b> .....	183
第一节 概述 .....	183
一、预加水成球工艺流程 .....	183
二、预加水成球机理及特点 .....	185
第二节 预加水成球系统主要机械设备 .....	189
一、新型盘式成球机 .....	189
二、管式螺旋喂料机 .....	194
三、双轴搅拌机 .....	198

## 第三篇 冷却、干燥机械及设备

<b>第十二章 水泥熟料冷却机</b> .....	201
第一节 筒式冷却机 .....	201
一、单筒式冷却机 .....	202
二、多筒式冷却机 .....	202
三、新型多筒冷却机 .....	203
第二节 篦式冷却机 .....	205
一、篦式冷却机分类及特点 .....	205
二、推动篦式冷却机 .....	205
三、回转篦式冷却机 .....	212
四、振动篦式冷却机 .....	212



第三节	其他形式冷却机 .....	213
一、	立筒式冷却机 .....	213
二、	再冷式冷却机 .....	214
三、	几种主要冷却机的比较 .....	214
<b>第十三章</b>	<b>干燥设备</b> .....	<b>216</b>
第一节	概述 .....	216
一、	干燥意义 .....	216
二、	干燥设备分类及在水泥工业中的应用 .....	216
三、	物料干燥的物理过程 .....	217
第二节	回转式烘干机 .....	219
一、	回转式烘干机生产流程及工作原理 .....	219
二、	回转式烘干机结构 .....	220
三、	回转式烘干机传热方式与气体流向 .....	224
四、	回转式烘干机参数确定 .....	225
五、	内循环式烘干机简介 .....	229
第三节	概述 .....	230
一、	流态烘干机简介 .....	230
二、	流态烘干机流程、工作原理及结构 .....	231
三、	流态烘干机参数确定 .....	231
第四节	其他烘干设备和方法 .....	234
一、	重力式烘干机 .....	234
二、	悬浮烘干机 .....	235
三、	烘干——粉磨 .....	236
四、	破碎——烘干 .....	237
五、	烘干设备发展趋势 .....	237

# 第一篇 回转窑

## 第一章 回转窑总体设计

### 第一节 概述

#### 一、回转窑作用及在水泥工业中的应用

##### (一)作用

回转窑是对散状或浆状物料进行加热处理的一种回转圆筒形的煅烧设备。在建材工业中,用回转窑来煅烧水泥熟料;在化学工业中,用回转窑生产苏打、煅烧磷肥、硫化钡;在有色冶金工业中,用回转窑生产氧化铝等。在其他一些工业部门,回转窑也有着广泛的用途。

回转窑是一个带有3%~6%斜度安放在支承装置上的钢质薄壁圆筒,在其中部由传动装置带动作慢速转动。为了保护筒体,减少散热,在筒体内镶砌耐火砖。物料从窑的高端(又称窑尾端)加入,由于筒体倾斜安装,窑内物料在沿周向翻转的同时沿轴向移动,从而缓缓地流经整个筒体,经过复杂的物理、化学变化,由生料变成熟料,从其低端(又称窑头端)卸出,进入熟料冷却机。而燃料则从其低端喷入窑内的高温区燃烧,在窑尾的自然或机械通风的作用下,热烟气与物料逆向地流经全窑,最后经过收尘由烟囱排入大气中。

回转窑适于处理固体颗粒和气体介质间的物理化学过程。它有如下优点:

1. 由于物料在圆筒内不断翻转,使埋入物料层深处的颗粒不断翻到表面层和气体介质直接接触,因而物理化学反应能均匀进行,使得产品质量好。
2. 倾斜圆筒的旋转,使物料能自行周向翻动并轴向移动,这样就不必在圆筒内装置耐高温、耐磨材料的刮板和搅耙等。故它特别适合于高温反应过程的物料煅烧。

##### (二)水泥生产工艺对回转窑的要求

水泥生产过程,可以概括为“两磨一烧”三大环节。两磨就是生料制备和水泥制备的粉磨过程;一烧就是生料通过回转窑,在高温作用下,经过一系列的物理、化学变化而成为熟料的煅烧过程。从水泥工艺来看,煅烧是物料唯一的“质变”过程。生产实践表明,回转窑无论从功能上还是设备投资上而言,都是水泥生产中一台重要的设备。同时回转窑的技术性能和运转情况,在很大程度上决定着水泥的质量、产量和生产成本。所以,人们把它看作水泥厂的“心脏”。

机械设备是为生产工艺服务的。一台良好的设备首先应千方百计地满足生产工艺的要求,同时还要考虑制造、维修等多方面的因素。对回转窑而言,一般应达到下列几方面的要求:

1. 能满足生产工艺的要求。如能达到指定的产量、质量、热耗指标等。

2. 单位机重产量高,由此可减小设备尺寸,做到“设备小,产量大”。
3. 运转可靠,便于操作控制,并能满足安全生产要求。
4. 尽量简化结构,降低制作成本,同时便于安装、维修。

## 二、回转窑发展过程及趋势

自 1824 年出现第一台间歇操作的土立窑后,水泥生产迄今已有 170 多年的历史。限于当时的技术水平,这种简陋的生产方法持续了约半个世纪之久。19 世纪末叶回转窑的出现,给水泥工业带来了革命性的变化。兰萨姆(F. Ransome)于 1885 年在英国首先取得了专利,并将第一台回转窑投入了生产,图 1-1 为兰萨姆水泥回转窑的专利图。当初使用的燃料为天然气,接着改为烧油,最后才开始烧煤。

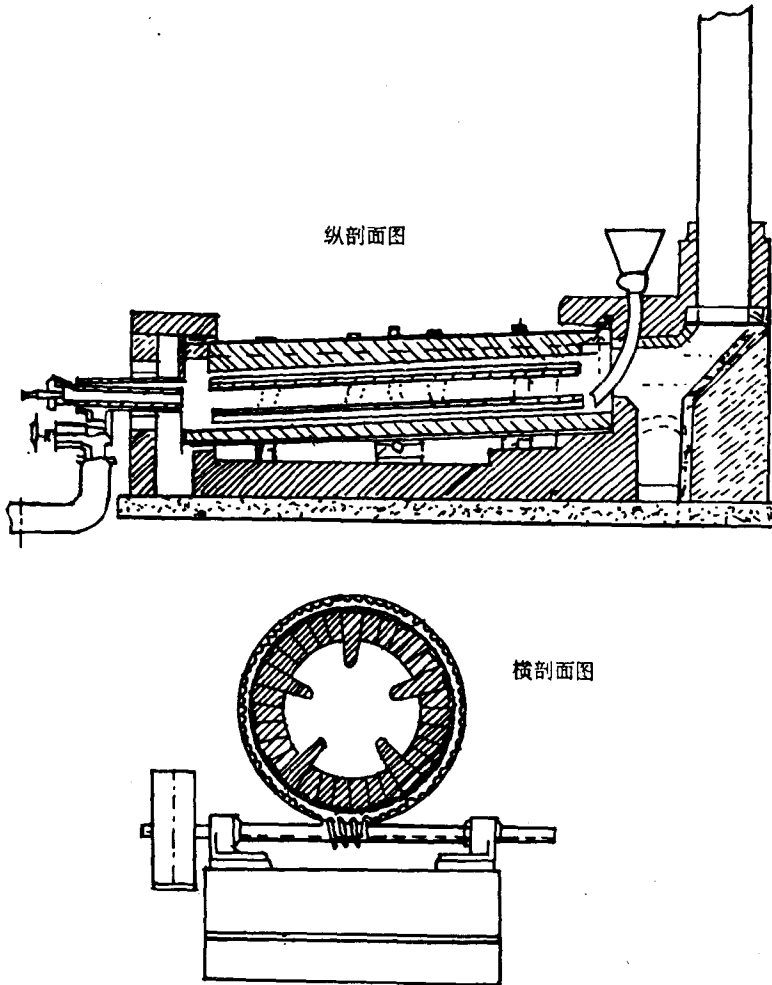


图 1-1 兰萨姆水泥回转窑专利图

第一批回转窑的尺寸为 $(\Phi 1.6\text{ m} \sim \Phi 1.9\text{ m}) \times (19.5\text{ m} \sim 24.0\text{ m})$ ,产量为  $30\text{ t/d} \sim 50\text{ t/d}$ 。从图 1-1 断面中可以看到,为促进热交换用耐火砖砌筑了扬料装置,这一装置一直

沿用了好几十年。

### (一) 回转窑水泥生产方式的演变

初期回转窑喂入的生料象立窑那样也是料球。但后来发现,将很稠的料浆喂入窑内也可以生产出熟料,料浆在窑尾端受到烘干并成球,然后继续向前在窑头端烧成熟料。

湿法窑的出现,曾是水泥生产技术上的大进步,与初期的干法窑相比,在工艺上有许多优点,如生料均化效果好,产品质量高,运转率高等。

为了解决回转窑烧成能力和预烧能力的矛盾,以及为了提高质量和增加产量,回转窑的窑型及其结构也都有了新的发展。

为了延长物料在窑内的停留时间,以便获得较高的热传递,出现了窑头(烧成带)扩大、窑尾扩大或两端扩大的哑铃型窑型,以及在窑尾装设各种热交换装置如格子式热交换器、悬挂链条等,有的在格子式热交换器内还装有载热体。但是窑体扩大后,在一定程度上破坏了物料在窑内运动的均衡性,有碍于窑的操作。

1930年,德国伯力鸠斯公司研制了立波尔窑,即用半干法生产水泥:物料先在成球机内成球,然后进到回转的炉篦子上进行预热烘干和部分分解再入窑内继续煅烧。

1950年,西德洪堡公司成功地研制了悬浮预热器窑,称洪堡窑,随后又相继出现了多波尔型、史密斯型、克虏伯型、米亚格型等各种悬浮预热器窑。在60年代,悬浮预热器窑发展很快,简称“SP”窑,各国普遍采用,而且日趋大型化。

70年代初,首先由日本石川岛公司和秩父水泥公司,研制出窑外分解法,简称SF法。随后其他公司也陆续成功地研制出RSP法、MFC法、KSV法、DD法等窑外分解技术。

窑的规格(窑径×长度)随产量而不断加大(参见表1-1)。日产量为3600t的湿法长窑直径达7m以上,长度达200多米。这对制造、运输、安装、耐火砖的砌筑和剥落等带来一系列的问题。因此,各种窑型发展的根本途径就是用单元装置(炉篦子加热机,预热器,窑外分解炉等)来替代窑尾预热、分解带的作用,从而达到缩小窑规格(在相同产量情况下)或提高产量(在相同规格情况下)的目的。图1-2从上到下为湿法长窑与带一、二、四级悬浮预热器窑,以及带窑外分解炉窑的窑型比较。

表 1-1 回转窑直径与产量的关系

窑 型	窑 直 径 (m)		
	5	6	7
湿法长窑(t/d)	1000~1300	1700~2200	3000~3500
干法长窑(t/d)	1500~2000	2500~3000	4000~4500
悬浮预热器窑(SP)(t/d)	2500~2800	4000~4500	5500~6000

总之,无论哪一种水泥生产方法,到目前为止,还都离不开回转窑这个基本设备。

### (二) 回转窑发展趋势

随着水泥工业的发展和技术的进步,回转窑日趋大型化。这里所说的大型化有两个含义:一是窑规格的逐渐扩大,二是窑的单机产量的不断提高,而且在不同的年代有不同的标准。进入70年代后,随着窑外分解技术的出现,一条工艺线的日产量实际已可达9000t,而日产量为2000t~4000t的窑已很普遍。

表 1-2 列出了截止 1977 年投产的各种窑型的最大规格和产量。

表 1-2 各种窑型的最大规格和产量

生产方法 (窑型)	国家	水泥公司	水 泥 厂	窑规格(m)	产量 (t/d)	备 注
干 法	日本			$\Phi 6.2 \times 165$	3300	
湿 法	美国	Dundee	Clarksvill	$\Phi 7.62/6.40$ $/6.91 \times 232$	3600	
立波尔窑	西德		勒格多尔夫	$\Phi 5.6 \times 90$	3300	
悬浮预热器窑	日本	宇 部	伊 佐	$\Phi 6.2 \times 125$	5500	维达格型
窑外分解窑	日本	宇 部	伊 佐	$\Phi 6.2 \times 125$	9000	KSV 型

图 1-3 为水泥窑单机产量的发展趋势曲线。

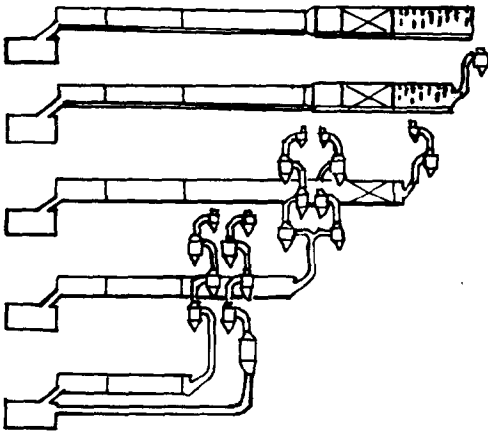


图 1-2 各种窑型长度比较

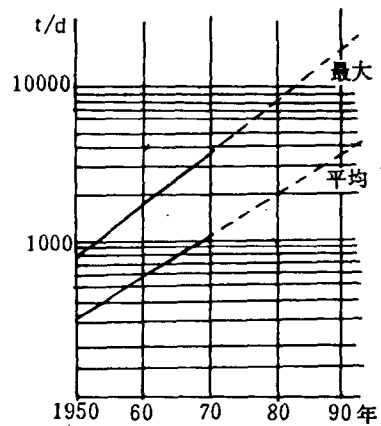


图 1-3 水泥窑发展趋势

必须指出,自从出现窑外分解技术后,虽然窑的产量急剧增长,但是回转窑本身的规格尺寸并没有与产量成比例的加大。现在直径最大的回转窑仍保持在 20 多年前投产的  $\Phi 7.6 \text{ m} \times 232 \text{ m}$  窑。据认为,回转窑大型化,虽然制造技术上是可能的,但也绝非易事,尤其对超大零件更存在着运输上的困难。

水泥设备大型化是 20 多年来国外水泥工业发展中极为突出的一个特点。它具有占地面积小,设备投资少,管理简单,便于自动化,劳动生产率高,生产成本低,以及单机产量高和热耗低等优点。所以国外新建的水泥厂,有不少都是由大型设备组成的单一生产线。但是,大型化的发展是有限度的。当设备尺寸加大到一定规格后,其效率的提高并不显著,反而会带来一些新的问题。

据统计,当产量高于 2500 t/d ~ 3000 t/d 时,单位产量的设备投资就看不出有优越性,而全厂投资的经济性也几乎不存在了。此外,由于回转窑规格过大,各配件费用高,窑衬寿命也短,6 m 直径窑的窑衬寿命只有半年,约等于 4 m 直径窑使用寿命的三分之一(参见图 1-4),因此,应根据本国具体情况,确定设备大型化规模。

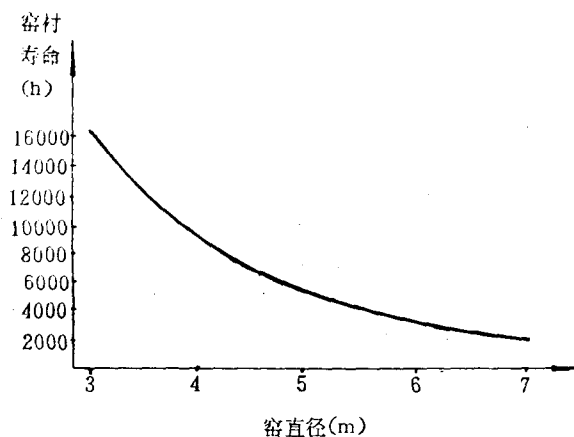


图 1-4 窑衬寿命与窑直径的关系

总之,干法、大型化生产是当今水泥生产的发展趋势。而且,悬浮预热器窑和窑外分解窑将成为生产水泥熟料的主要窑型。

## 第二节 水泥熟料煅烧工艺简介

### 一、硅酸盐水泥熟料组成

硅酸盐水泥之所以是一种水硬性胶凝物质,是因为水泥熟料中含有具有水硬性的矿物。硅酸盐水泥的性质在很大程度上又取决于矿物的组成。

硅酸盐水泥熟料中主要含有硅酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , 简写成  $\text{C}_3\text{S}$ )、硅酸二钙( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , 简写成  $\text{C}_2\text{S}$ )、铝酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , 简写成  $\text{C}_3\text{A}$ )和铁铝酸四钙( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , 简写成  $\text{C}_4\text{AF}$ )四种矿物。还有少量的游离氧化钙、方镁石、玻璃体等。

这四种矿物是由生料中的氧化钙( $\text{CaO}$ )、二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )经过高温煅烧化合而成的,其单矿物强度见表 1-3。

表 1-3 熟料单矿物的强度(试验资料)

矿物名称	抗压强度(MPa)				
	3 d	7 d	28 d	90 d	180 d
$\text{C}_3\text{S}$	24.7	31.6	43.0	53.8	59.0
$\text{C}_2\text{S}$	0.5	1.4	3.5	4.3	11.5
$\text{C}_3\text{A}$	7.7	8.3	7.2	9.6	6.6
$\text{C}_4\text{AF}$	11.7	12.4	12.4	18.5	27.9

在上述四种矿物中,硅酸三钙凝结硬化较快,早期强度和后期强度都高。为了制造高标号的水泥,可以适当提高熟料中硅酸三钙的含量。硅酸二钙凝结硬化较慢,早期强度低,但后期强度较高,甚至水化几年后还在发挥其强度。熟料中硅酸二钙含量多且冷却条件差时,易产生粉化现象。铝酸三钙在上述四种矿物中凝结最快,而且凝结时放出大量热,

强度亦发挥得很快(三天以内几乎就全发挥出来了),但是强度较低。铁铝酸四钙是一种复合矿物,它的凝结硬化速度比较正常,不过强度也较硅酸三钙低。

必须指出:上述结论主要是根据单矿物的水化特点得出的,它还不能够完全反映水泥在水化时各矿物间互相影响促进的内在关系。另外,各矿物强度还与其生成条件有关。因此,要想制得高质量的水泥熟料,单纯的提高硅酸三钙的含量是不对的,还应考虑各矿物间在水泥水化和凝结硬化时的相互影响。

一般回转窑和立窑烧制的水泥熟料,其矿物组成波动范围如表 1-4 所列。

表 1-4 水泥熟料矿物组成的波动范围(%)

窑 型	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	MgO	C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF+C <sub>3</sub> A
回转窑	45~59	17~30	6~11	10~18	<4.5	72~78	20~24
立 窑	33~53	22~14	6~12	10~14	<4.5	70~75	18~25

为了使制得的水泥熟料矿物组成在上述范围内,必须将生料中氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁等的百分含量控制在一定的范围内。一般水泥厂熟料中各氧化物的含量,控制在表 1-5 范围内。

表 1-5 水泥熟料中各氧化物的含量

氧化物名称	含量(%)	主要来源	
主要氧化物	CaO	64~68	石灰质原料(石灰石、白垩等)
	SiO <sub>2</sub>	20~24	粘土、砂岩
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4~7	粘土、矾土
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3~5.5	铁粉、铁矿渣
有害氧化物	MgO	<4.5	石灰质原料
	SO <sub>3</sub>	<1.0	煤灰、铁矿渣、粘土
	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	<1.0	粘土、煤灰

此外,在水泥熟料中,往往还可能含有微量的二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)、三氧化二锰(Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)及五氧化二磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)等。

## 二、回转窑内硅酸盐水泥熟料形成过程

水泥熟料煅烧过程是指生料在回转窑(或立窑)内由常温加热到 1400℃~1500℃的高温下,进行复杂的物理化学和热化学反应过程。在煅烧过程结束后,形成了各种矿物(C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF 等),从外观上看物料大部分已烧成 10 mm~20 mm 的颗粒,这种颗粒就称为硅酸盐水泥熟料(简称熟料)。因此说回转窑内物料的煅烧过程,实质上就是熟料矿物形成的过程。

根据生料在煅烧中发生的物理化学和热化学反应过程的特征,一般可分成五个工艺带,即:干燥预热带、碳酸盐分解带、放热反应带、烧成带和冷却带。当然各带不一定都在回转窑的筒体内,有的干燥带在窑外,有的干燥预热带在窑外,有的干燥预热及部分分解带

均在窑外等,而只有湿法长窑各带均在回转窑筒体内。现以湿法长窑为例,将各带的物理化学反应分述如下:

### (一)干燥预热带

该带的物料温度由入窑料浆温度至 750°C。这一带,由于物料受热后作用不同,因此往往把它分成两个带来叙述。

1. 干燥带。因为此带常常挂有链条,故又称链条带。此带入窑的料浆温度为室温,水分为 32%~40%。由于和高温废气接触,温度开始逐渐上升,温度升至 70°C~80°C 以后,因料浆水分迅速蒸发,粘度增加,流动性降低,逐渐浓缩成很稠的泥巴,最后成为块状生料。生料继续前进,就慢慢地一部分成为小球,一部分成为粉末。

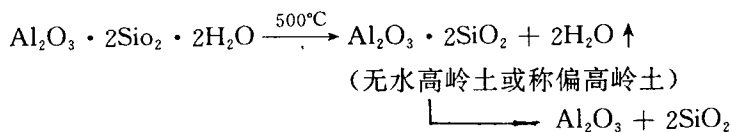
从工艺角度上看,干燥带并不是形成熟料的主要工艺带,仅是形成熟料的准备带。但从热耗上来看,这一带任务是比较繁重的(指湿法窑)。如果取烧成带内每秒钟总的热量消耗为 1,则湿法窑的干燥带约为 2.4。因此,如忽视了这一带的作用,就会影响其他各带的工作。由于料浆中水分蒸发后形成了高粘度的泥巴,容易使窑内结泥浆圈(或称泥巴圈),从而影响窑的正常生产。另外,保持出链条带的物料具有一定的水分是很重要的。否则,水分过少生料易成粉状,增加物料的飞损;被废气带走的物料,又容易粘附在链条上,给结泥浆圈起了方便作用;落于料浆中的粉尘又会降低料浆的流动性。综上所述,干燥带的工艺任务是:保证出链条带的物料具有一定的水分(我国多数厂经验认为,保持在 3%~8% 较合适),使物料多数结成球粒,而不致松散成粉。

为完成上述任务,必须生产中注意以下两点:

(1)使该带温度稳定在一定范围内(通过稳定废气温度来达到)。此带温度高低应根据窑的结构、生产能力以及料浆含水量来决定。

(2)选择适宜的链条挂法。

2. 预热带。物料在窑内继续前进,温度渐渐升高,当达到 500°C 左右时,化学反应就开始了,物料中的有机物(主要是粘土带进来的)发生了干馏和分解,同时高岭土也开始脱水,生成无定形的偏高岭土,并进一步分解为活性的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。其反式如下:



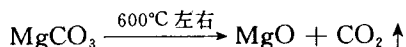
由于高岭土的脱水作用,使料球松散成淡黄色的粉末,成为绝对干燥的物料。

物料继续沿窑体前进,当温度升到 600°C~750°C 时,碳酸盐开始部分分解,但量不大。

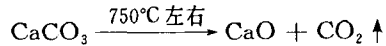
这一带的主要工艺任务是:迅速将物料提高到 750°C,因此取名为预热带。从热量消耗上看,烧成带为 1,预热带为 1.4 左右。干燥预热带长度约占整个窑长的 50%~60%。

### (二)碳酸盐分解带

该带的物料温度为 750°C~1000°C。进入此带物料中的碳酸盐(主要是碳酸钙,而碳酸镁含量很少)开始分解,且分解速度随着温度的升高而加快。由于分解出氧化钙量的增加且温度升高,约在 800°C 左右物料中就开始了少量的固相反应。碳酸盐分解反应如下:

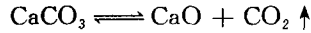






上列反应在 1000°C 左右表现得最为激烈。从热耗上看,烧成带为 1,这一带约为 2.8 左右。因此,该带的物料温度上升得很慢。这一带的主要工艺任务是碳酸盐的分解。该带长度约占窑长的 25%。

由化学反应动平衡原理知道,在一定的温度下,化学反应速度随生成物浓度增加而变慢,逐渐达到动平衡。即:



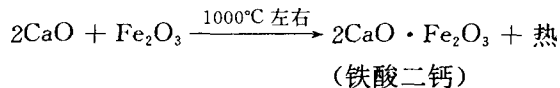
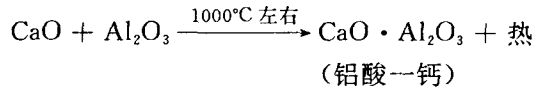
因此,为了使碳酸钙迅速分解,就必须随时破坏平衡。可采取下列措施:

1. 适当提高煅烧温度;
2. 及时从生成物中排出二氧化碳气体。

所以,合理的加强窑内通风是破坏上述化学平衡的有效措施之一。

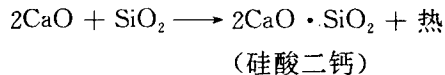
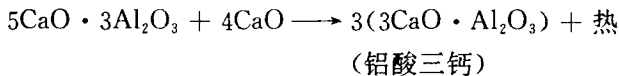
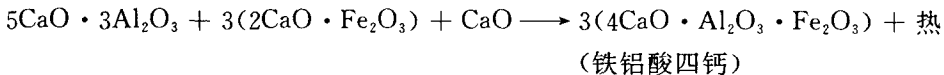
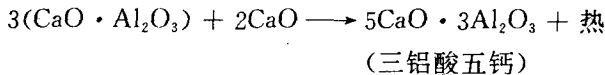
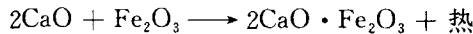
### (三)放热反应带

该带的物料温度为 1000°C~1300°C。由于碳酸钙分解产生了大量的氧化钙,这时物料温度又在 1000°C 以上,因而氧化钙与其它氧化物进一步发生固相反应,生成部分矿物,并且放出一定数量的热(每千克熟料大约放出 420kJ 热量)。由于此带发生的化学反应都是放热反应,故取名为放热反应带。现将其反应按顺序列出如下:



在上述温度范围内,同时有少量的 C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A 生成。

当温度提高到 1200°C 左右时,下列反应迅速进行:



上述各项反应都属于固相反应。在此反应中,各成分之间的反应仅限于颗粒间相互接触的表面。随着反应的进行,粉状物逐渐聚结,在该带末端出现球状的黄色粒子。由于该带中发生激烈的放热反应,使物料温度迅速地提高到 1300°C 左右,所以此带仅占窑长的 5%左右。

这一带末端,有少量物料开始熔融。

### (四)烧成带

烧成带又名烧结带,亦称石灰吸收带。物料温度在 1300°C~1450°C~1300°C 范围内。