



职业技术教育国家规划教材

热工设备与测试技术

Regong Shebei yu Ceshi Jishu

王汉立 刘晓勇 主编

*Regong Shebei
yu
Ceshi Jishu*

武汉理工大学出版社

热工设备与测试技术

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书为职业技术教育硅酸盐工艺及工业控制专业教学用书。全书涵盖了水泥、玻璃、陶瓷等专业热工设备及热工测试技术方面的内容,介绍了水泥工业、玻璃工业、陶瓷工业中典型窑炉的基本结构、工作原理、操作要点、窑炉的节能以及热工仪表基本知识、热工测试技术等专业知识。

本书反映了新的热工设备和新的生产技术,可供水泥、玻璃、陶瓷等专业工程技术人员参考,也可作为技术工人培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

热工设备与测试技术/王汉立,刘晓勇主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2005.8

职业技术教育国家规划教材

ISBN 7-5629-2297-7

I. 热…

II. ①王… ②刘…

III. 硅酸盐-化学工业-加热设备-高等学校-教材

IV. TQ170.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005354 号

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:wutp@public.wh.hb.cn

印 刷 者:湖北地矿印业有限公司印刷

经 销 者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:20.5

字 数:512 千字

版 次:2005 年 8 月第 1 版

印 次:2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》的精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部“要加强学生实践能力、技术运用能力的培养,充分反映新兴技术、新兴产业对技能培养的要求,满足经济结构战略性调整、技术结构优化升级和高科技产业迅猛发展对人才培养的要求”的职业技术教育培养目标,建材行业职业教育教学指导委员会组织有关院校的专家、教师就《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》的课程开发进行了认真的行业调研、深入细致的改革方案论证及课程大纲审定工作。武汉理工大学出版社根据教育部对职业技术教育教材“要逐步建立以能力培养为基础的、特色鲜明的专业教材和实训指导教材”的教材建设要求,组织全国近 30 所院校和企业单位的专家、教师编写了职业技术教育《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》国家规划教材。

职业技术教育《硅酸盐工艺及工业控制专业》和《建筑与工程材料专业》国家规划教材开发的理念是,突破传统职业教育的课程体系,突破传统行业以产品定位专业的界限,立足以材料生产工艺的共性、以相关学科和产业的衔接为教材开发目标;注重推广行业产品的国家标准,注重现代教育技术的开发和使用;突出职业技术教育能力本位的教育观念,以知识和能力单元为基本模块组织教材开发,使教材内容可以根据高等职业技术教育和中等职业技术教育的教学目标进行教学基本模块的组合;部分教材的开发,结合行业岗位培训、职业(岗位)资格的鉴定规范组织编写,可以作为企业岗位培训、职业资格鉴定的培训教材。

建材行业职业技术教育国家规划教材的出版,对于行业人力资源开发与提高行业从业人员的素质,必将起到积极的促进作用。但是,随着我国加入 WTO 和现代企业制度的逐步建立与完善,产业技术进步和技术岗位重组力度的加大,职业技术教育国家规划教材的不断更新与完善将是我们今后的一个长期工作。因此,我们殷切地希望广大读者在使用本教材的过程中,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

前言

前 言

《热工设备与测试技术》教材适用于职业技术教育硅酸盐工艺及工业控制专业的专业教学。该课程的主要任务是:使学生了解、熟悉、掌握硅酸盐工业生产过程中常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点、日常维护;了解、掌握硅酸盐工业热工测量的基本知识以及热工测量仪表、测量参数及测量点的确定;了解筑炉材料的特性,初步掌握窑炉热平衡测算及窑炉的节能方法。

本教材总学时数为96学时,涵盖了水泥、玻璃、陶瓷工厂及其他硅酸盐材料工厂的热工设备和热工测量的内容。建议教师在使用本教材时,有针对性地重点讲授相关专业的内容,相应增加该专业的学时数,减少其他专业的学时数。本课程是一门实践性较强的专业课,在教学过程中应突出职业教育的特点,培养学生的动手能力,提高其职业技能,尤其是在进行热工仪表和热工测量内容的教学时,要以实践教学为主,带学生到生产现场进行热工测定,训练其操作技能。也可以借助于多媒体教学手段,特别是计算机仿真软件进行教学。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

由于编写时间及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本教材由湖北教育学院王汉立、河北建材职业技术学院刘晓勇主编。全书共分五章,第1章第1、4、5节由山西综合职业技术学院张振平编写;绪论及第1章第2、3节由湖北教育学院王汉立编写;第2章及第5章第3节由河北建材职业技术学院刘晓勇编写;第3章及第5章第4节由天津城建学院高职院校马玉书编写;第4章由绵阳职业技术学院况金华编写;第5章第1、2节由云南冶金专科学校陈伟编写。

目 录

0 绪论	(1)
1 水泥工业热工设备	(3)
1.1 水泥熟料的煅烧方法	(3)
1.1.1 水泥熟料的形成	(3)
1.1.2 水泥熟料的形成热	(6)
1.1.3 加速熟料煅烧的措施	(7)
1.1.4 水泥熟料煅烧方法及窑型的演变	(7)
1.2 回转窑	(9)
1.2.1 回转窑的结构	(9)
1.2.2 回转窑的工作原理	(28)
1.2.3 回转窑的操作	(37)
1.3 预分解窑	(44)
1.3.1 悬浮预热器	(44)
1.3.2 预分解窑	(46)
1.3.3 预分解窑操作及热工参数控制	(51)
1.4 立窑	(56)
1.4.1 立窑的工作原理及结构	(57)
1.4.2 立窑煅烧水泥熟料的方法	(63)
1.4.3 立窑的煅烧操作	(64)
1.5 干燥设备	(70)
1.5.1 回转烘干机	(70)
1.5.2 燃烧室	(74)
1.5.3 立式烘干机	(75)
复习思考题	(77)
参考文献	(78)
2 玻璃工业热工设备	(79)
2.1 玻璃的熔制过程及玻璃池窑的分类	(79)
2.1.1 玻璃的熔制过程	(79)
2.1.2 玻璃池窑的分类	(80)
2.2 玻璃池窑的构造及工作原理	(83)
2.2.1 玻璃熔制	(83)
2.2.2 热源供给	(103)

2.2.3	余热回收	(105)
2.2.4	排烟供气	(108)
2.2.5	玻璃池窑的工作原理	(109)
(1) 2.3	玻璃池窑的作业制度	(112)
(8) 2.3.1	温度制度	(112)
(2) 2.3.2	压力制度	(114)
(8) 2.3.3	投料及液面控制	(116)
(8) 2.3.4	泡界线	(117)
(8) 2.3.5	火焰及火焰气氛	(118)
(7) 2.4	退火窑	(119)
(7) 2.4.1	玻璃退火过程	(119)
(8) 2.4.2	退火窑的分类与窑型	(121)
(8) 2.4.3	基本构造和工作原理	(122)
(83) 2.4.4	退火窑的温度制度及其控制	(125)
(78) 2.5	玻璃池窑的砌筑与节能	(127)
(44) 2.5.1	玻璃池窑砌筑	(127)
(44) 2.5.2	玻璃池窑节能	(136)
(84)	复习思考题	(139)
(12) 参考文献		(140)
(82)	3 陶瓷工业热工设备	(141)
(82) 3.1	陶瓷制品的焙烧过程	(142)
(40) 3.1.1	陶瓷工业窑炉的种类及特点	(142)
(107) 3.1.2	陶瓷制品的焙烧过程	(144)
(10) 3.2	隧道窑的结构及工作原理	(146)
(44) 3.2.1	隧道窑的工作系统与热工制度	(147)
(27) 3.2.2	隧道窑的结构	(150)
(77) 3.2.3	隧道窑的工作原理	(161)
(18) 3.3	隧道窑的操作控制	(165)
(49) 3.3.1	隧道窑的烘烤	(166)
(49) 3.3.2	隧道窑热工制度的控制	(168)
(49) 3.3.3	隧道窑常见的故障及排除的方法	(171)
(47) 3.4	喷雾干燥系统	(173)
(80) 3.4.1	喷雾干燥的特点及喷雾干燥机分类	(173)
(88) 3.4.2	雾化器	(174)
(88) 3.4.3	喷雾干燥的流程	(177)
(801) 3.4.4	陶瓷坯体的其他干燥方法	(178)
3.5	筑炉材料与节能	(180)
3.5.1	筑炉材料	(180)

3.5.2 陶瓷窑炉的节能	(185)
复习思考题	(187)
参考文献	(187)
4 其他硅酸盐工业热工设备	(188)
4.1 耐火材料及耐火制品煅烧设备	(188)
4.1.1 耐火材料煅烧设备	(188)
4.1.2 耐火制品烧成设备	(193)
4.2 烧结砖瓦	(199)
4.2.1 烧结砖瓦的窑型	(199)
4.2.2 烧结砖瓦窑炉的节能	(206)
4.3 混凝土制品养护设备	(207)
4.3.1 混凝土制品常压热养护	(207)
4.3.2 养护设施	(212)
4.3.3 养护制度及其控制技术	(213)
复习思考题	(214)
5 热工仪表与热工测试技术	(215)
5.1 热工测量仪表基本知识	(215)
5.1.1 常用热工仪表的组成及分类	(215)
5.1.2 测量方法	(217)
5.1.3 测量仪表的测量误差和主要品质指标	(218)
5.1.4 温度测量仪表	(222)
5.1.5 气体测量仪表	(244)
5.2 水泥回转窑热工测定	(272)
5.2.1 回转窑的热工计算	(272)
5.2.2 回转窑热工测定	(281)
5.3 玻璃熔窑热工测定	(298)
5.3.1 玻璃熔窑热工测定概述	(298)
5.3.2 玻璃熔窑热工测定项目的设置	(299)
5.3.3 玻璃熔窑热工测定项目的实施	(304)
5.4 陶瓷隧道窑的热工测定	(305)
5.4.1 陶瓷隧道窑热工测定项目的设置	(305)
5.4.2 陶瓷隧道窑热工测定项目的实施	(309)
复习思考题	(320)

0 绪 论

水泥、玻璃、陶瓷等硅酸盐材料是国民经济建设不可缺少的基础性材料,它们有一个共同特点,就是在生产过程中都要经过高温煅烧或者加热处理。我们通常将用来煅烧和加热的设备称之为热工设备,例如:水泥窑、玻璃熔窑、陶瓷隧道窑以及各种烘干机等。

热工设备往往是一个复杂的系统。在这个系统中,燃料燃烧提供了热量,物料经过输送、加热、发生物理化学反应、冷却等过程成为“熟料”。根据能量守恒原理,对于一个稳定的系统,输入热量之和应等于输出热量之和,我们称之为“热平衡”。通过热平衡计算,可以确定单位产品的热耗,并为热工设备的选型提供依据。

水泥、玻璃、陶瓷的生产工艺不同,所选用的热工设备也不相同。水泥工业热工设备主要是指水泥窑。水泥窑分为回转窑和立窑两大类。传统的回转窑又分为湿法回转窑、干法回转窑和半干法回转窑。随着科技的进步和发展,原料预均化技术、生料均化技术、新型粉磨技术、自动化控制技术在水泥生产工艺中大量采用,以悬浮预热和窑外分解技术为核心的新型干法水泥回转窑系统逐步取代了传统的干法回转窑、湿法回转窑以及半干法的立波尔窑,实现了水泥的文明化生产方式。2003 年我国水泥总产量为 8.63 亿 t,其中新型干法水泥约为 2 亿 t,占全国总量的 23%。单机能力大型化、生产与管理信息化、水泥生产生态化(节能利废)已成为水泥窑的发展方向。今后数十年,我国在控制水泥总产量的同时,将逐步提高新型干法水泥的比重,使其达到 80% 以上。对于立窑系统,尽管它不属于先进的窑型,但基于我国的基本国情,目前仍大量存在,尤其在交通不便的地区,立窑仍具有生命力。

玻璃工业热工设备主要是指玻璃熔窑。从整体上分,玻璃熔窑分为玻璃池窑和玻璃坩埚窑。现在,除了一些特殊玻璃产品外,后者基本上不再使用。而玻璃池窑按照所生产玻璃制品的品种差异来分,又可以分为平板玻璃池窑和日用玻璃池窑两大类。二者在结构上的根本区别主要在于池窑熔化部与冷却部之间的玻璃液分隔装置上,前者为浅层分隔,后者为深层分隔。平板玻璃的成型方法又有传统工艺和浮法工艺之分,传统工艺包括有槽法、无槽法、平拉法、压延法等成型方法。但是,随着科学的发展和技术的进步,这些传统的平板玻璃成型方法因其工艺落后、生产出的玻璃制品质量相对较差,而呈现出逐渐被淘汰的趋势;与之相反,用锡槽进行平板玻璃成型的浮法工艺却显示出强大的生命力。现在,浮法工艺的平板玻璃生产线已经大部分甚至全部实现了计算机控制操作,进入了现代化文明生产的行列。成型后的玻璃产品需要进一步再加热退火才能成为高质量的玻璃产品,这是玻璃生产的一大特色。

目前,陶瓷工业使用最广泛的热工设备是隧道窑,这种窑型热效率高,且容易实现自动化生产。辊道窑的出现使得快速烧成、全自动控制和低污染生产成为可能。由于实现了快速烧成,辊道窑的烧成周期已经降到 30min 左右,从而大大提高了产品的产量,降低了烧成能耗。再者,由于辊道窑烧成过程中要求严格的“均衡稳定”操作,因此全面实现自动控制操作成为必要和可能,这也就大大节省了人力资源。另一方面,由于高质量的清洁燃料可以烧制出高质量、高品位、高档次的陶瓷产品,因此陶瓷生产厂家纷纷摒弃传统的非洁净燃料而转向使用低

污染甚至基本无污染的清洁燃料,从而也大大改善了生产过程对环境造成的污染。但是,由于自身结构的限制,辊道窑还不能完全代替窑车式隧道窑。

上述几种热工设备的结构、工艺流程等诸多方面存在着很大的差异,但是,它们的烧制过程、热工特性有许多相似之处,它们都需要进行热平衡计算、窑炉本身需要砌筑与保温、热工参数测量、借助于计算机系统进行自动控制等等。

合理地选择耐火材料,才能使水泥回转窑、玻璃池窑、陶瓷隧道窑长时间连续安全运转。对于水泥回转窑来讲,常用的耐火材料是高铝砖、镁质砖以及浇注料;玻璃熔窑常用的耐火材料是硅砖和电熔锆刚玉砖;陶瓷隧道窑常用的耐火材料是轻质粘土砖、轻质高铝砖和耐火纤维等。根据窑系统内部不同区域的温度、使用条件分别选用不同种类的耐火材料,既能保证窑炉经久耐用,又可合理地降低成本。

本专业高职高专学生,应掌握上述硅酸盐工业常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点;熟悉热工测量仪表和测量的基本方法,掌握测量参数及测量位置的确定;了解筑炉材料的特性,初步掌握窑炉热平衡计算及节能方法。

为了满足企业定向培养学生的要求,教师可以专门讲授重点章节,以强化学生的专业知识,提高学生解决生产过程中常见问题的能力。

本专业高职高专学生,应掌握上述硅酸盐工业常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点;熟悉热工测量仪表和测量的基本方法,掌握测量参数及测量位置的确定;了解筑炉材料的特性,初步掌握窑炉热平衡计算及节能方法。

本专业高职高专学生,应掌握上述硅酸盐工业常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点;熟悉热工测量仪表和测量的基本方法,掌握测量参数及测量位置的确定;了解筑炉材料的特性,初步掌握窑炉热平衡计算及节能方法。

本专业高职高专学生,应掌握上述硅酸盐工业常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点;熟悉热工测量仪表和测量的基本方法,掌握测量参数及测量位置的确定;了解筑炉材料的特性,初步掌握窑炉热平衡计算及节能方法。

1 水泥工业热工设备

本章提要

本章系统地介绍了水泥热工设备。合格生料在水泥窑中连续加热,经过一系列的物理化学反应,变成熟料,再进行冷却。熟料的形成热就是熟料形成在理论上消耗的热量,约为1734kJ/kg-ck。回转窑是煅烧水泥熟料的主要设备。悬浮预热和窑外分解技术改变了传统回转窑内物料堆积态的预热和分解方法。立窑的结构及操作相对简单,自动化程度较低。水泥厂多采用回转烘干机来烘干物料。

1.1 水泥熟料的煅烧方法

水泥是重要的建筑材料之一,它的煅烧方法从立窑生产到现代干法生产经过了180年的历史。而水泥熟料是水泥生产的半成品,其形成过程是一个重要的环节,它决定着水泥产品的产量、质量、消耗三大指标。本节将主要阐述熟料的形成过程和水泥窑型的发展与演变过程。

1.1.1 水泥熟料的形成

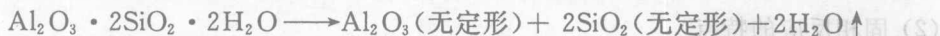
水泥熟料的形成过程,是对合格生料进行煅烧,使其连续加热,经过一系列的物理化学反应,变成熟料,再进行冷却的过程。整个过程主要分为水分蒸发、粘土质原料脱水、碳酸盐分解、固相反应、烧结反应及熟料冷却六个阶段。

1.1.1.1 水分蒸发

入窑物料当温度从室温升高到100~150℃时,物料中的自由水全部被排除,这一过程称为干燥过程,它是一个吸热过程。特别是湿法生产,因为料浆中的含水量为32%~40%,要在干燥过程中将水分全部蒸发,故此过程较为重要。

1.1.1.2 粘土质原料脱水

当入窑物料的温度升高到450℃时,粘土中的主要组分高岭石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)将发生脱水反应,吸收热量脱去其中的化学结合水。



脱水后变成无定形的 Al_2O_3 和 SiO_2 。在900~950℃时,由无定形物质变成晶体,同时放出热量。此过程是放热过程。

1.1.1.3 碳酸盐分解

(1) 碳酸盐分解反应

当物料温度升高到600℃以上时,石灰石中的碳酸钙和原料中夹杂的碳酸镁进行分解,在 CO_2 分压为一个大气压下,碳酸镁和碳酸钙的剧烈分解温度分别是750℃和900℃。此过程是强吸热过程。





(2) 碳酸盐分解反应的特点

① 碳酸盐分解时,要放出大量的 CO_2 气体。

② 碳酸盐分解时需要大量的热量,其热效应为 1660kJ/kg-CaCO_3 ,这些热量大约占熟料形成热的一半左右。碳酸盐分解所需的温度不高,但所需的热量最多,所以这一过程对于提高热的利用率有着重要的影响。

(3) 影响碳酸钙分解的因素

① 温度 当 CO_2 的分压一定时,温度越高,碳酸钙分解速度越快。

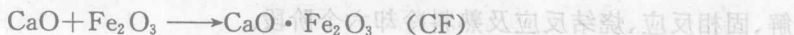
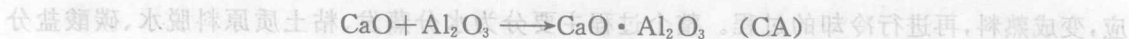
② CO_2 的分压 当温度一定时, CO_2 的分压越低,碳酸钙越易分解。因此,在煅烧窑内加强通风,及时将 CO_2 气体排出,有利于 CaCO_3 的分解。窑内废气中的 CO_2 含量每减少 2%,可使分解时间缩短约 10%;当窑内通风不畅时, CO_2 含量增加,且影响燃料的燃烧,使窑温降低,延长了 CaCO_3 的分解时间。

1.1.1.4 固相反应

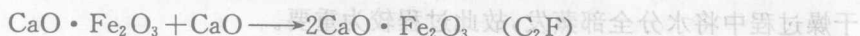
硅酸盐水泥熟料的主要矿物是硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)、铁铝酸四钙(C_4AF),其中 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 三种矿物是由固态物质相互反应生成的。从原料分解开始,物料中便出现了性质活泼的氧化钙,它与入窑物料中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 进行固相反应,形成熟料矿物。

(1) 固相反应过程

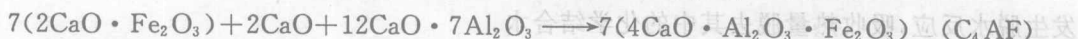
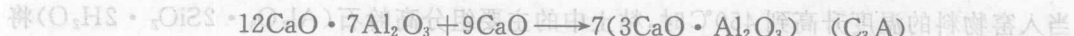
约 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 时



$900\sim 1100^\circ\text{C}$ 时



$1100\sim 1300^\circ\text{C}$ 时



(2) 固相反应的特点

固相反应在进行时放出一定的热量,故亦称为“放热反应”阶段。

(3) 影响固相反应的因素

① 生料的细度及均匀程度 生料细度高,则表面积大;生料的分散及均匀程度高,则使生料中各成分之间充分接触,均有利于固相反应的进行。

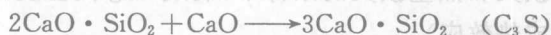
② 原料的物理性质 原料中含有石英砂,石灰石结晶粗大,使固相反应难以进行,熟料矿物很难生成。

③ 温度 温度提高使质点能量增加,加快了质点的扩散速度和化学反应速度,有利于固相反应的进行。

1.1.1.5 硅酸三钙(C_3S)的形成和烧结反应

水泥熟料中的主要矿物是硅酸三钙,而它的形成需在液相中进行。当温度达到 1300°C 时, C_3A 、 C_4AF 及 R_2O 熔剂矿物变成液相, C_2S 及 CaO 很快被高温熔融的液相所溶解并进行化学反应,形成 C_3S 。

(1) 烧结反应



该反应也称为石灰吸收过程。它是在 $1300 \sim 1450 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范围进行,故称该温度范围为烧成温度范围;在 1450°C 时此反应十分迅速,故称该温度为烧成温度。

(2) 影响烧结反应的因素

① 温度 烧结反应所需的反应热甚微,但需要使物料达到烧成所需的温度才能顺利形成 C_3S ,从而提高熟料的质量。

② 时间 为使烧结反应完全进行,需保证一定的反应时间,一般为 $10 \sim 20\text{min}$ 。

③ 液相量 液相量多,液相粘度低,则有利于 C_3S 的形成,但容易结圈、结块等,难以操作;液相量少,则不利于 C_3S 的形成。一般应控制液相量为 $20\% \sim 30\%$ 。

当温度降到 1300°C 以下时,液相开始凝固,由于反应不完全,没有参与反应的 CaO 就随着温度降低而凝固其中,这些 CaO 称为游离氧化钙,习惯上用 $f\text{-}CaO$ 表示。为了便于区别,称其为一次游离氧化钙,它对水泥安定性有重要影响。

1.1.1.6 熟料的冷却过程

熟料烧成后出窑的温度很高,需要进行冷却,这不仅便于熟料的运输、储存,而且有利于改善熟料的质量,提高熟料的易磨性,还能回收熟料的余热,降低热耗,提高热效率。改善熟料质量体现在以下几个方面:

(1) 熟料冷却能够防止或减少 C_3S 的分解

C_3S 在 1250°C 时分解成为 C_2S 和 CaO ,出现了二次游离氧化钙,它虽然对水泥安定性没有大的影响,但降低了熟料中 C_3S 的含量,从而也影响了熟料的强度。故需急冷以快速越过这个温度线,保留较多的 C_3S 。

(2) 熟料冷却能够防止或减少 C_2S 的晶型转变

C_2S 由于内部结构不同,有不同的结晶形态,而且相互之间能发生转化。当温度低于 500°C 时,将由 β 型 C_2S 转变成为 γ 型 C_2S ,密度由 $3.28\text{g}/\text{cm}^3$ 变为 $2.97\text{g}/\text{cm}^3$,体积增加了 10% 左右。由于体积增加产生了膨胀应力,引起了熟料的“粉化”现象。而且 γ 型 C_2S 几乎没有水化强度,因此粉化料属废品。所以熟料急冷能防止其晶型转变,以免降低强度。

(3) 熟料冷却能够防止或减少 C_3S 晶体长大

有资料表明,晶体粗大的 C_3S 会使强度降低且难以粉磨,熟料急冷可以避免晶体长大。

(4) 熟料冷却能够防止或减少 MgO 晶体析出

当熟料慢冷时, MgO 结晶成方镁石,其水化速度很慢,往往几年后还在水化,水化后的产物体积增大,使水泥制品发生膨胀而遭破坏。急冷可使 MgO 凝结于玻璃体中,或者结晶成细小的晶体,其水化速度与其他成分大致相等,不会产生破坏作用。

(5) 熟料冷却能够防止或减少 C_3A 晶体析出

结晶型 C_3A 水化后易产生快凝现象,急冷后可以防止快凝现象发生,同时还可以提高水泥的抗硫酸盐性能。

1.1.2 水泥熟料的形成热

1.1.2.1 水泥熟料形成热的概念

所谓熟料的形成热,是指在一定的生产条件下,用某一基准温度(一般是 0℃ 或 20℃)的干燥物料,在没有任何物料损失和热量损失的条件下,制成 1kg 同温度的熟料所需要的热量称为熟料的形成热(熟料形成热效应)。

因此,熟料的形成热就是熟料形成在理论上消耗的热量,它仅与原、燃料的品种,性质及熟料的化学成分和矿物组成,生产条件等因素有关。

1.1.2.2 水泥熟料形成热的计算方法

水泥熟料在形成过程中发生一系列物理化学变化,有些是吸热反应,有些是放热反应,将全过程的总吸热量减去总的放热量,并换算为每生成 1kg 熟料所需要的净热量就为熟料的形成热。

现以 20℃ 为计算的温度基准。生成 1kg 熟料需理论生料量约为 1.55kg。在一般原料的情况下,根据物料在反应过程中的化学反应热和物理热,可计算出生成 1kg 普通硅酸盐水泥熟料的理论热耗如表 1.1 所示。

表 1.1

吸收热量	kJ/kg-ck	%	放出热量	kJ/kg-ck	%
干物料由 20℃ 加热到 450℃ 吸热	697	16.4	粘土无定形物质结晶放热	41	1.6
粘土脱水吸热	164	3.9	熟料矿物形成放热	410	16.4
脱水物料由 450℃ 加热到 900℃ 吸热	800	18.9	熟料由 1400℃ 冷至 20℃ 放热	1476	59.0
碳酸盐分解吸热	1948	46.0	CO ₂ 由 900℃ 冷至 20℃ 放热	492	19.7
剩余物料由 900℃ 加热到 1400℃ 吸热	523	12.4	水汽由 450℃ 冷至 20℃ 放热	82	3.3
形成液相吸热	103	2.4	合计	2501	100
合计	4235	100	$Q = 4235 - 2501 = 1734 \text{ kJ/kg-ck}$		

由此可见,生成 1kg 熟料理论上所需的热量约为 1734kJ/kg-ck,而碳酸盐分解所需的热量占熟料形成热的 46%,故提高热的利用率应从碳酸盐的分解着手,采取有效措施,降低熟料的单位热耗。熟料冷却放出的热量占熟料形成过程中放出热量的 59%,回收熟料中的热量对降低熟料热耗也是十分重要的。

此外,熟料的形成热还可下列经验公式进行计算:

$$Q_{\text{形}} = G_{\text{干}}(4.5\text{Al}_2\text{O}_3 + 29.6\text{CaO} + 17\text{MgO}) - 284$$

式中 $Q_{\text{形}}$ ——熟料形成热, kJ/kg-ck;

$G_{\text{干}}$ ——生成 1kg 熟料所需理论干生料量, kg;

$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}$ ——生料中各氧化物含量, %。

在实际生产中,生产 1kg 熟料所需的热量称为熟料的单位热耗,它远远大于熟料的形成热。目前热利用率比较高的生产厂,其熟料的单位热耗也在 3000kJ/kg-ck 以上,所以水泥生产的热效率是较低的,一般只有 30%~40%。若能提高水泥生产的热效率,将对水泥工业是一个大的贡献。

1.1.3 加速熟料煅烧的措施

1.1.3.1 矿化剂的使用

生料中加入某种物质后使生料在煅烧过程中能够加速熟料的形成,降低液相出现温度,而本身不参加反应或只能参加中间物的反应,这种物质统称为矿化剂。常用的矿化剂有萤石、石膏、硫铁矿等,若同时使用两种以上的称为复合矿化剂。

萤石是常用的矿化剂,它的矿化作用有二,其一是加速 CaCO_3 的分解反应和固相反应,其二是加速 C_2S 的形成。在立窑生产中,由于温度的不均匀性,加入萤石能使熟料最低共熔温度降低,提前出现液相并降低粘度,使熟料的烧成温度降低,还能够扩大烧成范围,所以效果比较显著;而在回转窑生产中,由于窑内物料的温度差不大,如果采用萤石作为矿化剂,使配料组分增多,不但影响水泥的性能,并且萤石价格也比较贵,对耐火材料有腐蚀作用,故一般不用矿化剂。

1.1.3.2 使用矿渣配料

炼铁厂每生产 1t 生铁,将有 0.7~0.8t 矿渣产生。矿渣可直接用作水泥的混合材,也可将质量差的矿渣用作水泥的原料。矿渣的化学组成主要是一些氧化物,其中 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 占总量的 90% 以上,它与硅酸盐水泥熟料的化学组成很相似,差别仅在于矿渣中 CaO 的含量(40% 左右)比熟料中 CaO 含量低,而矿渣中 SiO_2 含量(40% 左右)比熟料中 SiO_2 含量高,所以也可以说矿渣是高硅低钙的熟料。正由于矿渣的化学成分与水泥熟料相近似,所以矿渣可以用作干法水泥的原料配入生料中。

由于矿渣已经过高温处理,原来的矿物都已分解成活性的氧化物,有的已形成熟料中有用的矿物,如硅酸二钙($\beta\text{-C}_2\text{S}$),所以将矿渣作为原料配入生料中,在煅烧过程中就减少了碳酸钙等分解所需要的分解热。因此,采用矿渣代替粘土所配成的生料好烧成,能提高产量,降低煤耗。

由于矿渣内含有硅酸二钙($\beta\text{-C}_2\text{S}$),加水后能凝结硬化,因此湿法生产中不宜采用矿渣配料。

1.1.4 水泥熟料煅烧方法及窑型的演变

1.1.4.1 水泥熟料的煅烧方法

水泥熟料的生产方法分为干法生产、湿法生产以及半干法生产。干法生产是指干生料粉进入窑内进行煅烧;湿法生产是将原料加水粉磨,粘土用淘泥机制成泥浆,然后将含水量为 32%~40% 的生料浆搅拌均匀后入窑煅烧;半干法生产是将生料粉加入 12%~14% 的水分成球后,再入窑进行煅烧。

1.1.4.2 水泥窑型的演变

自发明水泥以来,水泥窑型发生了巨大的变化,经历了立窑、干法中空回转窑、湿法窑、立波尔窑、悬浮预热器窑以及窑外分解窑的变化。其规模从 19 世纪的日产几吨,发展到目前日

产 1 万 t,增加了 1000 倍以上。

1824 年,世界上第一台立窑在英国诞生,这是人类最早煅烧水泥熟料的方法和窑型。它是一个竖直放置的静止的圆筒,窑内自然通风,生料制成块状,与燃料块交替分层加入窑内,采用间歇的人工加料和出料操作。立窑的产生揭开了水泥工业窑的历史。1877 年出现了回转窑,它是一个倾斜卧着的回转圆筒,生料粉由高端加入,低端有燃料燃烧,物料一方面运动一方面被煅烧,这便是最早的干法回转窑生产(见图 1.1)。

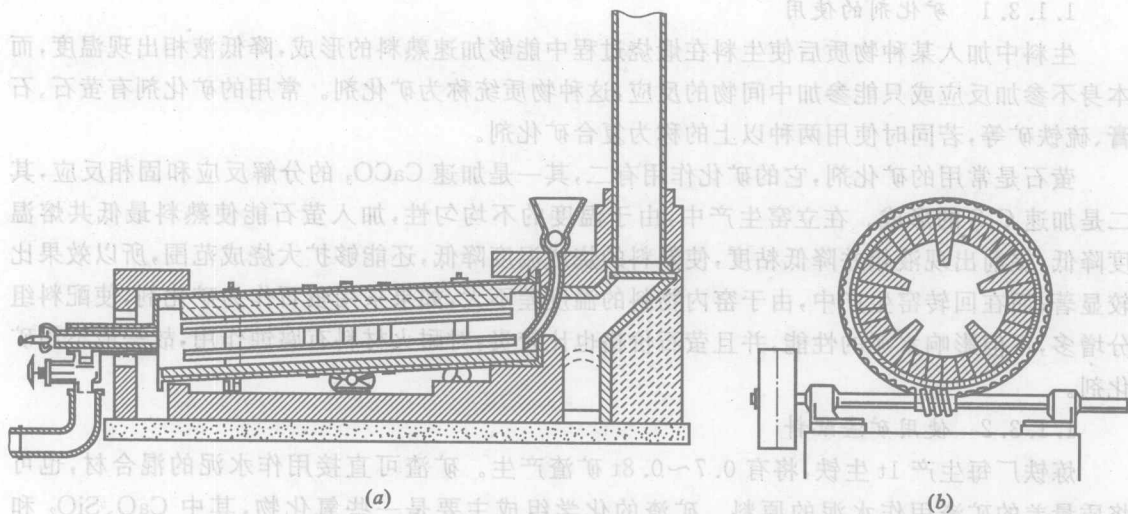


图 1.1 回转窑的最初形式

(a) 纵剖面图; (b) 横剖面图

在干法回转窑的生产中,初期的回转窑窑体较短,出窑废气的温度较高,热耗较多。随后出现了干法长窑,即所谓的干法中空窑,以及带预热锅炉的回转窑。由于干法生产中生料粉得不到充分的均化,熟料质量难以提高,在 1905 年出现了湿法回转窑。湿法生产中的生料浆能够充分搅拌均匀,使熟料质量大幅度提高,发展比较迅速,但湿法生产的热耗相当大,这也是湿法生产的主要缺点。与此同时,立窑也发挥了自己的优势,得到了迅速的发展,1910 年实现了机械化的连续生产,它是将生料和燃料混合成球入窑煅烧,窑底部用机械进行强力通风,较显著地提高了立窑熟料的质量。在水泥熟料的煅烧领域里,曾有一段时期,干法回转窑、湿法回转窑、立窑形成了三足鼎立的局面。

1928 年,在德国出现了带回转炉篦子加热机的回转窑,即立波尔窑。它是将生料粉加入一定的水分成球,在回转炉篦子加热机中加热干燥,然后入窑煅烧的生产方法。由于该技术使当时窑的产量大幅度提高,在 1935 年,人们更深刻地认识到这种技术的优点,因而成为盛极一时的窑型,主导了 20 世纪四五十年代的世界水泥工业,并逐步取代了代表二三十年代先进窑型的湿法生产工艺。但是,该窑由于生料球的预热不够均匀,因而熟料质量比湿法窑差,且加热机结构复杂,容易损坏,维修工作量大,窑的运转率低。1934 年丹麦的工程师研究成功了悬浮预热技术,在此基础上,1951 年德国的工程师把这一技术应用于水泥工业中。当时由于原料的预均化和生料的均化尚未解决,熟料质量无法与湿法生产相媲美,致使这种窑难以发挥潜力和迅速推广。直到实现了原料预均化和生料均化技术后,带悬浮预热器的回转窑才得到迅速的发展,成为六七十年代的主导窑型,而且为后来日本人发明窑外分解技术培植了“母体”。

1963年日本引入德国的悬浮预热器技术,经过研究和改进,于1971年发明了水泥窑外分解技术。自窑外分解技术发明以来,特别是80年代以来,世界上新建的大中型水泥厂,基本上都采用这种窑型。

在这些变化中有几次重大技术突破,第一次是20世纪初湿法回转窑的出现并得到全面推广,提高了水泥的产量和质量,奠定了水泥工业作为现代化工业的基础;第二次是20世纪50~70年代悬浮预热和预分解技术的出现(即新型干法水泥生产技术),大大提高了水泥窑的热效率和单机生产能力,促进了水泥工业向大型化、现代化方向的进一步发展;第三次是80年代以后计算机信息化和网络化技术在水泥工业中得到了广泛应用,使得水泥工业真正进入了现代化阶段。

目前我国已经能够自行设计5000t/d熟料的生产线,拥有比较成熟的生产技术,达到了现代化干法生产的水平。

1.2 回转窑

回转窑是一个倾斜放置的回转圆筒体。它有很多种类型,如中空式回转窑、干法长窑、湿法长窑等,其中以湿法长窑最为典型。

回转窑是一个物料输送设备。生料由窑尾喂入,由于窑筒体具有一定的斜度且不断回转,物料则逐渐向窑头运动。

回转窑又是一个煅烧设备。煤粉用鼓风机由窑头喷入,燃烧所需的空气由两部分组成,一部分是预先和煤粉混合并起输送作用的空气,叫做“一次空气”,一般占空气总量的15%~30%,大部分空气通过冷却机将熟料冷却,同时本身被预热到一定温度,进入窑内,这部分空气叫做“二次空气”。煤粉在窑内燃烧,形成高温火焰,一般可达1600~1700℃,放出大量热量,将物料加热,废气经过烟室,在排风机的抽引下,通过收尘器净化后排至大气中。

回转窑还是一个传热设备。回转窑筒体内的高温气体和物料相向运动,在运动过程中进行热量交换,物料接受高温气体、窑壁和火焰传给的热量,经过一系列的物理化学变化,被煅烧成熟料,随后进入冷却机,遇到冷空气又进行热交换,本身被冷却并将空气预热,作为二次空气进入窑内。

1.2.1 回转窑的结构

回转窑的规格是用筒体的内径和长度表示的。如 $\phi 3.5\text{m} \times 135\text{m}$ 回转窑,即表示筒体内径为3.5m,窑身长度为135m。假如窑有扩大带,那么,它的直径用分数来表示。如 $\phi 4.4\text{m}/4.15\text{m} \times 180\text{m}$ 回转窑,即表示筒体两端的内径为4.4m,而中间筒体的内径为4.15m,总长为180m。

虽然回转窑有很多种类型,但从窑体结构上看,基本上由筒体、轮带、托轮支撑装置、传动装置、窑头和窑尾密封装置等部分组成。

1.2.1.1 筒体

筒体由钢板卷制而成,是回转窑基体。其直径一般为2~6m,长度30~230m,筒体内镶砌有100~200mm厚的耐火材料,以保护筒体。筒体外套装有几道轮带,呈一定斜度(一般为3%~5%)安装在与轮带相对应的几对托轮上。