

SHUINI SHULIAO DUANSHAO GUOCHENG YU CAOZUO

水泥熟料 煅烧过程与操作

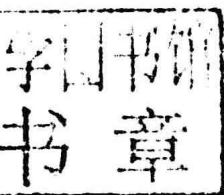
主 编 田文富 李丽霞
主 审 隋良志

中国建材工业出版社

普通高等院校材料工程类规划教材

水泥熟料煅烧过程与操作

主编 田文富 李丽霞
主审 隋良志



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥熟料煅烧过程与操作/田文富, 李丽霞主编.

—北京: 中国建材工业出版社, 2015. 9

普通高等院校材料工程类规划教材

ISBN 978-7-5160-1255-0

I. ①水… II. ①田… ②李… III. ①水泥-熟料烧
结-高等职业教育-教材 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 155851 号

内 容 简 介

本书是高职高专材料工程技术专业的教学用书, 对水泥预分解窑煅烧技术与操作进行了比较全面、系统的介绍, 内容包括预分解窑系统的工艺原理、主要设备的类型、结构、工作原理、技术参数、操作方法、常见故障及其处理方法, 热工测量及标定实例等。本书尤其针对当前节能与环保的发展要求, 阐述了水泥窑余热发电的先进技术以及国内先进实例和水泥预分解窑协同处置城市生活垃圾。在结构上采用“任务简介”“知识目标”“能力目标”和“复习思考题”的模式, 便于学生更好地学习、掌握其核心内容。

本书可作为从事水泥生产的工程技术人员和技术工人的学习用书, 可用于各个层次的成人教育教学, 及在职员工岗位技术培训和技术等级晋升考前辅导教学, 还可作为高等院校相关专业师生的教学参考读物。

水泥熟料煅烧过程与操作

主编 田文富 李丽霞

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 21.5

字 数: 546 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

印 次: 2015 年 9 月第 1 次

定 价: 49.80 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

本教材根据高职高专教育的特点与要求,结合材料工程技术专业方向的人才培养目标,针对先进的新型干法水泥生产技术,以“专业服务行业、课程服从岗位、教学符合实际”的专业教学改革理念,为满足高职院校硅酸盐工程专业、材料工程技术专业及建材行业职业技能培训等专业的职业技术教育教学的要求,满足新型干法水泥企业的用人需求,尤其是对中控操作员的需求,编者组织编写了这本教材。

本教材依据“中国建设教育协会 2012—2014 年高等教育科学研究课题(项目名称:《水泥熟料煅烧过程与操作》课程项目化教学改革的研究)”编写而成。从水泥中控操作员的实际工作过程入手,以职业岗位工作内容为基础,以职业技能培养为核心,以工学结合为原则,遵循职业能力培养的基本规律,重新整合、优化教学内容,比较详细地介绍了新型干法水泥企业的生产工艺流程、主要设备、主要控制参数、正常开车及停车、正常操作控制、常见生产故障及处理等方面的知识技能。本教材主要体现了如下几个特点:

(1) 行业企业专家指导,使教学内容和企业实际更加吻合,体现了工学结合的特色,以行动为导向的任务驱动模式编写教材,具有很好的实用性;

(2) 每一任务都有任务简介、知识目标及能力目标,便于学生学习;

(3) 对传统教材的内容体系进行优化整合,内容新颖,重点突出,具有很好的适用性;

(4) 课程由生产准备、正常煅烧操作、煅烧过程异常情况与故障处理等形成八个项目,25 个任务的课程内容体系,突出可操作性;

(5) 本教材附有 5 套模拟试题,受篇幅限制,这部分试题及参考答案放在中国建材工业出版社网站上,供读者免费下载。

本教材由黑龙江建筑职业技术学院的田文富、河北建材职业技术学院的李丽霞任主编,山西职业技术学院的姚通稳、高建荣、焦晓飞任副主编。具体分工为:田文富编写项目四中的任务 1 至任务 5、项目六中的任务 1、附录及全书统稿;李丽霞编写项目三;姚通稳编写项目八;高建荣编写项目四中的任务 6 和项目六中的任务 2;焦晓飞编写项目七;绵阳职业技术学院胡家林编写项目二;河北建材职业技术学院张向红编写项目一和项目五;伯努力(北京)仿真技术有限公司的许加达编写项目四中的任务 7。

本教材由黑龙江建筑职业技术学院隋良志教授主审。

在本教材的编写过程中,得到了哈尔滨北方水泥有限公司、伊春北方水泥有限公司、佳木斯北方水泥有限公司等单位有关水泥专家指导,编者参考了行业专家学者和兄弟院校同仁的著作和论文,在此特向他们表示诚挚的感谢!

鉴于编者水平有限、时间仓促,错误和不妥之处在所难免,敬请读者、水泥业界的专家及同仁批评指正。

编者

2015 年 7 月

目 录

项目一 预分解窑水泥熟料的形成	1
任务1 预分解窑煅烧技术的应用	1
一、熟料煅烧技术概述	1
二、预分解窑煅烧技术	5
复习思考题	9
任务2 水泥熟料的形成	10
一、水泥熟料的形成过程	10
二、水泥熟料的形成热及其计算	13
复习思考题	19
项目二 预分解窑煤粉的制备	20
任务1 煤粉制备技术与设备的应用	20
一、预分解窑用煤	20
二、煤粉制备	22
复习思考题	32
项目三 预分解窑煅烧系统的描述	33
任务1 旋风预热器的应用	33
一、预热器的发展	33
二、旋风预热器的作用	35
三、旋风预热器的结构	35
四、旋风预热器的工作	40
五、影响预热器热效率的因素	43
复习思考题	44
任务2 分解炉的应用	44
一、分解炉的作用	44
二、分解炉的分类	45
三、分解炉的热工特性	47
四、分解炉介绍	49
复习思考题	55
任务3 回转窑的应用	56
一、回转窑的作用	56
二、回转窑的结构	57
三、窑内工艺带的划分	63
四、回转窑的工作	65
复习思考题	71

任务4 篦式冷却机的应用	71
一、水泥熟料冷却机的发展	71
二、篦式冷却机的作用	72
三、对篦式冷却机的要求	72
四、篦式冷却机的结构	73
五、几种典型冷却机介绍	74
复习思考题	82
任务5 多通道煤粉燃烧器的应用	82
一、水泥窑用燃烧器的发展	83
二、回转窑对煤粉燃烧器的要求	84
三、三风道燃烧器	84
四、四风道燃烧器	85
复习思考题	90
项目四 预分解窑煅烧系统中央控制室操作	91
任务1 中控操作员具备的能力及认识中央控制室	91
一、中控操作员应具备的能力	91
二、中控操作员要做到“四勤”	93
三、认识中央控制室	93
复习思考题	94
任务2 中控预热器的操作	95
一、预热器系统正常操作	95
二、预热器系统主要工艺参数的控制	97
三、预热器系统异常情况的处理	98
复习思考题	100
任务3 中控分解炉的操作	100
一、分解炉系统正常操作	100
二、分解炉系统主要工艺参数的控制	102
三、分解炉系统异常情况的处理	103
复习思考题	103
任务4 中控回转窑的操作	104
一、回转窑系统正常操作	104
二、回转窑系统主要工艺参数的控制	119
三、回转窑系统异常情况的处理	125
复习思考题	134
任务5 中控篦冷机的操作	134
一、篦冷机系统正常操作	134
二、篦冷机系统主要工艺参数的控制	139
三、篦冷机系统异常情况的处理	141
复习思考题	144
任务6 多风道燃烧器的操作	144

一、燃烧器正常操作·····	144
二、异常情况的处理·····	152
复习思考题·····	154
任务7 中控仿真系统·····	155
一、5000t/d 新型干法水泥熟料生产线仿真系统简介·····	155
二、烧成系统·····	159
复习思考题·····	164
项目五 预分解窑用耐火材料·····	165
任务1 耐火材料在预分解窑的使用·····	165
一、耐火材料的主要性能·····	165
二、预分解窑常用耐火材料品种和特征·····	171
三、预分解窑对耐火材料的要求·····	179
四、预分解窑用耐火材料的选择·····	180
五、预分解窑用耐火材料的砌筑·····	185
复习思考题·····	191
项目六 水泥熟料煅烧的节能与环保·····	192
任务1 水泥窑纯低温余热发电的应用·····	192
一、余热发电的发展历程·····	192
二、我国水泥窑余热发电技术现状·····	193
三、中低温余热发电系统流程·····	195
四、纯低温余热电站主要设备及其作用·····	200
五、低温余热发电工程实例·····	202
复习思考题·····	203
任务2 水泥窑协同处置废弃物技术的应用·····	203
一、水泥窑焚烧处理危险废物和城市生活垃圾·····	204
二、水泥窑协同处置生活垃圾技术·····	207
三、水泥窑处置废弃物应用实例·····	209
复习思考题·····	212
项目七 预分解窑系统热工参数测量·····	213
任务1 预分解窑系统温度的测量·····	213
一、温度测量的基本知识·····	213
二、温度测量仪表及使用·····	215
三、测温技术的应用·····	232
复习思考题·····	233
任务2 预分解窑系统压力的测量·····	233
一、压力测量的基本知识·····	233
二、压力测量仪表·····	235
三、压力测量仪表的使用·····	239
复习思考题·····	241
任务3 预分解窑系统流量的测量·····	241

一、流量测量的基本知识·····	241
二、流量测量仪表及使用·····	242
复习思考题·····	250
任务4 预分解窑系统气体成分的测量·····	250
一、气体成分测量的基本知识·····	251
二、气体成分测量仪表及使用·····	251
复习思考题·····	256
任务5 预分解窑系统气体的含尘率和湿度的测定·····	256
一、气体含尘率测量仪表·····	256
二、气体湿度测量仪表·····	263
复习思考题·····	264
项目八 预分解窑的热工测试·····	265
任务1 预分解窑的热工计算·····	265
一、物料平衡计算·····	265
二、热平衡计算·····	269
复习思考题·····	278
任务2 预分解窑的热工测试·····	279
一、预分解窑系统的热工测试·····	279
二、预分解窑系统的热工标定实例·····	292
复习思考题·····	317
附录A 国际制、工程制单位换算表·····	318
附录B 常用材料物理参数·····	319
附录C 各种气体的常数·····	321
附录D 各种气体的平均比热容·····	323
附录E 烟气的物理参数·····	324
附录F 燃料的平均比热容·····	325
附录G 熟料矿物成分的平均比热容·····	326
附录H 熟料、窑灰、生料的平均比热容·····	327
附录I 热工设备不同温差、不同风速的散热系数·····	328
附录J 表面散热系数的修正方法·····	330
附录K 湿空气的 $I-x$ 图·····	333
参考文献·····	334

项目一 预分解窑水泥熟料的形成

内容简介：本项目主要介绍了水泥熟料煅烧窑的演变，预分解窑煅烧技术，硅酸盐水泥熟料的形成过程及其计算等。

学习目标：了解熟料煅烧技术发展历程，熟悉熟料煅烧工艺流程，掌握预分解窑生产工艺流程及特点，掌握水泥熟料的形成过程，熟悉水泥熟料形成热的计算过程。

任务1 预分解窑煅烧技术的应用

任务简介：本任务主要介绍了熟料煅烧技术的发展历程；熟料煅烧工艺流程及其特点；预分解窑生产工艺流程及煅烧技术特点。

知识目标：了解熟料煅烧技术的发展历程；熟悉各种熟料煅烧工艺流程及其特点；掌握预分解窑生产工艺流程及煅烧技术特点。

能力目标：能熟练表述熟料煅烧技术的发展历程；能正确论述各种熟料煅烧流程及其特点；能正确表达预分解窑生产工艺流程及煅烧技术特点。

一、熟料煅烧技术概述

（一）熟料煅烧技术发展历程

水泥自 1824 年诞生以来，其生产工艺过程历经多次变革。作为水泥熟料煅烧工艺的核心设备，水泥窑先后经历了立窑、干法回转窑、湿法回转窑、立波尔窑、悬浮预热窑、预分解窑的演变。在这些发展过程中，水泥烧成系统越来越优化，为社会的发展做出了巨大的贡献。

远在 19 世纪初期，人们烧制水泥熟料是在间歇式的土立窑中进行的。土立窑采用的是一种原始的煅烧方法，即人工加料、人工卸料，间歇煅烧，热耗高、产量低，质量难以保证。土立窑的最大缺点是物料在窑内除了自己下降外，不能做其他任何运动，因而煅烧不良。

1877 年，英国人克兰普同取得了回转窑烧制水泥熟料的专利权。1885 年，第一台回转窑在英国泰晤士河朗森建成投产。1888 年，在回转窑下加设了一个回转圆筒，可以冷却熟料，并预热空气以助燃烧，这便是单筒冷却机的创始。为了使窑容能适应熟料烧成的需要，1893 年，出现了扩大燃烧带的窑，即干法中空窑。这种干法中空窑排出的废气温度高达 $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，造成很大的热量浪费。1898 年，第一次在 24m 长的干法回转窑窑尾装设了余热锅炉，以利用从窑内排出的废气余热，其后得到了推广。

为了使生料的成分更均匀，1905 年出现了湿法生产。湿法生产是在原料磨内把生料磨成料浆，把搅拌均匀的料浆喂入窑内煅烧。在此之后，土立窑得到了改进，喂料和卸料实现了机械化，尤其是转动的卸料篦子，使物料在立窑内能有适当的运动，大大改善了煅烧状况，这就是 1910 年发明的机械化立窑。在湿法窑上，1911 年德国水泥化学家库尔首创在窑的尾端悬挂链条。1930 年以后，还出现了扩大分解带和烧成带的哑铃型窑。

湿法的优点是所磨制的含水 35% 左右的料浆能较均匀地调和，但是因为料浆含水，增加了热耗。为了克服这一缺点，20 世纪初及其以后的数十年间，研究试验过各种办法，如：加长回转窑的长度，在窑内悬挂链条或热交换器，在窑尾加装料浆过滤器或料浆蒸发机等，都取得了不同的效果。

1928 年，出现了立波尔窑。这种窑的煅烧过程是将生料粉加上 12%~14% 的水制成球粒，球粒首先在窑尾装设的回转篦子上受到窑的废气的预热，然后进入回转窑煅烧成为熟料。由于料球已经受到预热，发生部分分解，因而节约了热耗，使每千克熟料的热耗只需要 1000~1100kcal。从实质上说，立波尔窑的回转篦子就是“窑外分解”技术的开始。立波尔窑是德国人立列普于 1928 年发明的，以后由德国波利休斯公司制造，故名“立波尔窑”。

1950 年，德国成功研制悬浮预热器窑。这种窑在窑尾装设了旋风筒，生料在旋风筒内先受到由窑尾排出来的废气的预热，使 40% 左右的碳酸钙先行分解，然后进入窑内。这就能降低熟料的热耗，并使回转窑的产量大为增加。悬浮预热器窑因制造公司所采用的不同形式而分别称为“洪堡窑”和“多波窑”。

悬浮预热器窑传到美国之后，由于原料含碱量较高，旋风筒和管道内容易产生粘结和堵塞，并且也使熟料中的碱量增高，因而这种窑在美国停用了十多年。后来，由于采用了“旁道放风”的方法，即从旁道放出 10%~20% 的气体，才使这种窑能处理高碱原料。

在悬浮预热器窑系统中，也可以采用两级旋风和一个三钵立筒来组成，这种立筒预热器窑较易适应含碱量较高的生料。

“窑外分解”是 20 世纪 70 年代的新技术。这种系统是在悬浮预热的旋风筒下部加装一个“分解炉”，在旋风预热器中，已经分解了 40% 碳酸盐的生料，在分解炉内再进行分解，使生料中 90% 的碳酸盐分解，然后再进入回转窑烧成水泥熟料。这种系统不仅可使热耗降低到 750~800kcal/kg，而且大大增加了回转窑的单位容积产量。一般说来，它的产量为悬浮预热器窑产量的两倍以上。因而它具有很大的优越性，为干法生产开辟了广阔的前景。

（二）熟料煅烧工艺流程

水泥熟料煅烧工艺根据窑型不同主要有回转窑和立窑两种煅烧系统。

1. 回转窑煅烧系统流程

最早的回转窑煅烧系统只有一台回转窑和送煤设备，后来为适应工业规模生产的需要，组成了比较完善的基本流程，如图 1-1 所示。该流程主要由回转窑、冷却机、喷煤管以及驱动物体流动的风机和烟囱所组成。

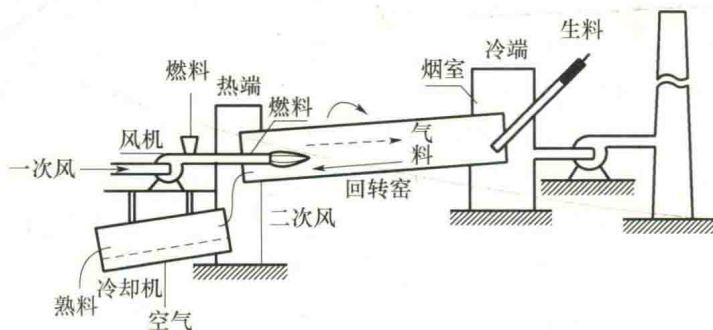


图 1-1 回转窑煅烧系统的基本流程

由于窑筒体倾斜放置且在不断回转，使自窑冷端（习惯称“窑尾”）烟室处喂入的生料，连续向热端（窑头）运动，在窑内不断被高温逆向流动的烟气所加热而烧成熟料。最后经过窑头罩下端落入冷却机中，经空气冷却后排出。燃料（主要是煤粉，也可用油或天然气）由一次空气经喷煤管送入窑头，经冷却机来的空气被预热（吸收熟料显热）到 $400\sim 800^{\circ}\text{C}$ 左右，由窑头进入窑内供助燃用，这部分热风被称为二次风。煤粉燃烧生成的烟气，其温度一般比熟料烧成温度高 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 即 $1650\sim 1750^{\circ}\text{C}$ ，从窑头向窑尾方向流动。在流动过程中，一方面满足烧成反应温度即 1450°C 物料温度的要求和温度分布的要求，同时又不断将热量传给生料，供预热和分解需要。因而气体本身温度和组成都在改变，最后经烟室由烟囱排出。系统中气体流动，早期只用烟囱，后来改用窑头鼓风机和窑尾排风机联合驱动，因而强化了生产。

由于生料制备有干法与湿法之分，因此回转窑可以采取的煅烧方法也有区别。随着技术的发展，湿法窑煅烧方法已经淘汰。因此，这里不准备对上述所有煅烧系统进行全面阐述，仅就在近代生产技术上有代表性的干法回转窑煅烧系统作不同深度的介绍。

2. 干法回转窑煅烧系统

干法回转窑煅烧系统有：干法中空长窑；或装有窑内热交换器如链条、耐火格子砖等；干法短窑带余热锅炉；干法短窑与料球加热机组组合的立波尔窑；干法短窑与悬浮预热器、预分解炉组合的 SP 窑和 NSP 窑，又称新型干法窑。

（1）中空干法回转窑系统

中空窑是干法窑中最原始的一种形式，筒体内除砌有窑衬外，没有装设任何热交换装置，其生产流程如图 1-2 所示。

普通干法回转窑装备落后，自动化程度低，产量低（一般仅为 $4.4\sim 5.0\text{t/h}$ ），窑内传热效率差，高温废气的热损失大，热耗高（大多高于 6000kJ/kg ），由于均化效果差导致生料成分波动大，熟料质量差且不稳定，废气温度高，生产过程中扬尘点较多，粉尘污染大。

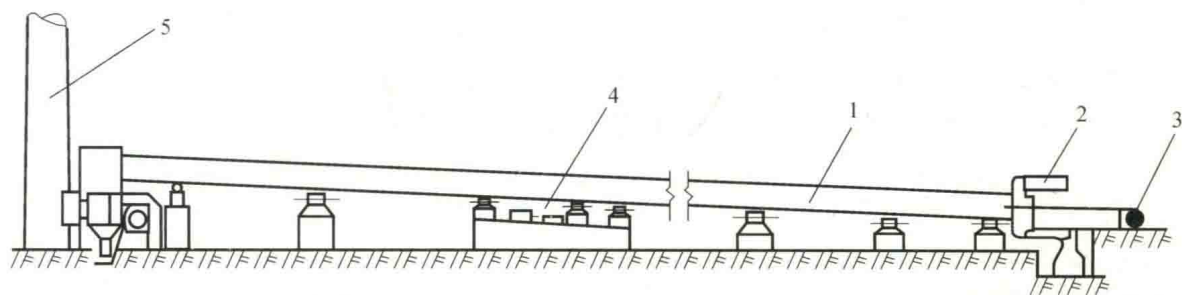


图 1-2 中空式回转窑流程图

1—回转窑；2—多筒式冷却机；3—鼓风机；4—传动装置；5—烟囱

（2）带余热锅炉的回转窑

由于中空窑内物料与气流接触面积很小，所以传热效率很低，废气温度很高，热损失很大。为回收废气中的热量，在窑尾后面设置余热锅炉进行发电，这种窑称为带余热锅炉的回转窑。其生产流程如图 1-3 所示。

（3）立波尔窑

立波尔窑是 1928 年发明的，它是在回转窑尾部连接一台回转式炉篦子加热机。将生料粉在成球设备上加工成球，喂入加热机。生料随着篦板向窑尾方向运动，料层被出窑高温

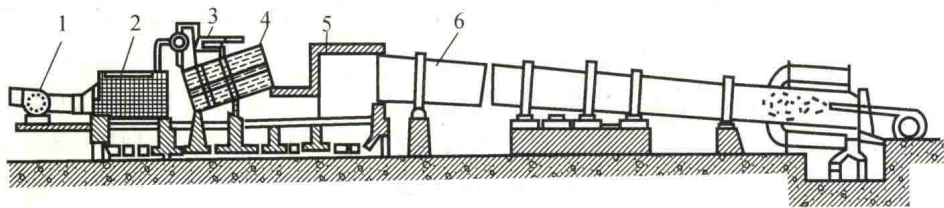


图 1-3 带余热锅炉的回转窑流程图

1—排风机；2—省煤器；3—蒸汽过热器；4—锅炉；5—烟室；6—回转窑

(约 1000℃) 废气穿透时不断被加热、干燥和部分分解。物料通过加热机的时间约 12～16min。由加热机入窑的生料的平均温度可达 700～800℃，加热机排出废气温度为 100℃。由于料球层的过滤作用，废气含尘量很低，且含有一定的水蒸气，是适合电收尘要求的理想条件。从热经济角度看，立波尔窑是回转窑干法生产的重大发展，其热耗比原来降低 50% 以上。立波尔窑的生产流程如图 1-4 所示。

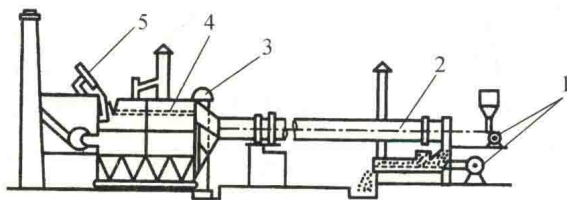


图 1-4 立波尔窑流程图

1—鼓风机；2—回转窑；3—提升机；4—加热机；5—成球盘

(4) 带悬浮预热器的干法窑系统

悬浮预热器窑是由一组悬浮式生料预热器和干法短窑 ($L/D < 20$) 组合而成，故简称 SP (Suspension Preheater) 窑，其代表性流程如图 1-5 所示。

受流态化技术发展的启发，将生料粉送入相互串联的一组换热单元中，在稀相气固悬浮状态下，进行反复有效的热交换，以充分回收窑尾烟气的热量。这一构思，经过实验由 F. Muller 发明，1951 年洪堡 (Humboldt) 公司率先在 $\Phi 2.5\text{m} \times 40\text{m}$ 干法立波尔窑上改造成四级旋风筒串联的预热器窑。投入运行后使窑的日产量由 121t 提高到 195t (提高 61.1%)，热耗由 6860kJ/kg 降到 4400kJ/kg (降低约 36%)。1965 年又出现了立筒式预热器 (Shaft Preheater)，即在立式圆筒内设置若干缩口，使料粉在变速气流中进行气固悬浮换热。立筒预热器热回收效果不及旋风预热器，但它具有结构简单、操作可靠、对原料适应性强、投资较省等特点。

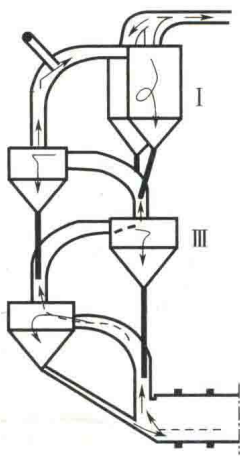


图 1-5 悬浮预热器窑流程图

悬浮预热器窑尤其是旋风预热器窑以其增产降耗的显著优点，被认为是熟料煅烧技术的一次重大革新。在解决生料均化及操作上的难题 (主要预热器会结皮堵塞) 后，旋风预热器窑得到了迅速发展，窑系统也日趋大型化，直径由原来 3m 左右扩大到 6m，日产熟料近 5000t。目前，大型预热器窑有数百台，预热器的结构形式也多种多样。经过不断完善，旋风预热器的采用，可使干法短窑产量提高到一倍以上，热耗降低 30%～50%，从而使许多

国家干、湿法生产的相对比重发生了显著变化。

(5) 带预分解炉的干法窑系统

带预热器和分解炉的窑，简称 NSP 窑。该系统是在带预热器的窑上再加设一个分解炉，在分解炉内再烧一把火，使经过分解炉的生料粉中的碳酸钙绝大部分得到分解，因此可较大幅度地提高窑的产量。其流程示意如图 1-6 所示。

系统中旋风筒级数序号，国内习惯由上而下排列并用 C_i 来表示。图中 C_4 来的热生料粉被加入到分解炉中，吸热分解后随气流携至 C_5 ，气固分离，已分解生料粉入窑。此料分解率控制在 90% 左右。气体由 C_5 排气管送入 C_4 中。生料在分解炉内分解所需的热量，主要由加入分解炉的煤粉燃烧提供。分解炉所需助燃空气由冷却机用管道送来，称三次风，温度在 700~850℃ 左右。窑头与分解炉两处用煤的比例通常为 0.4 : 0.6 或 0.6 : 0.4 之间。窑尾废气可以通过分解炉也可只通过预热器，具体根据设计意图而定。

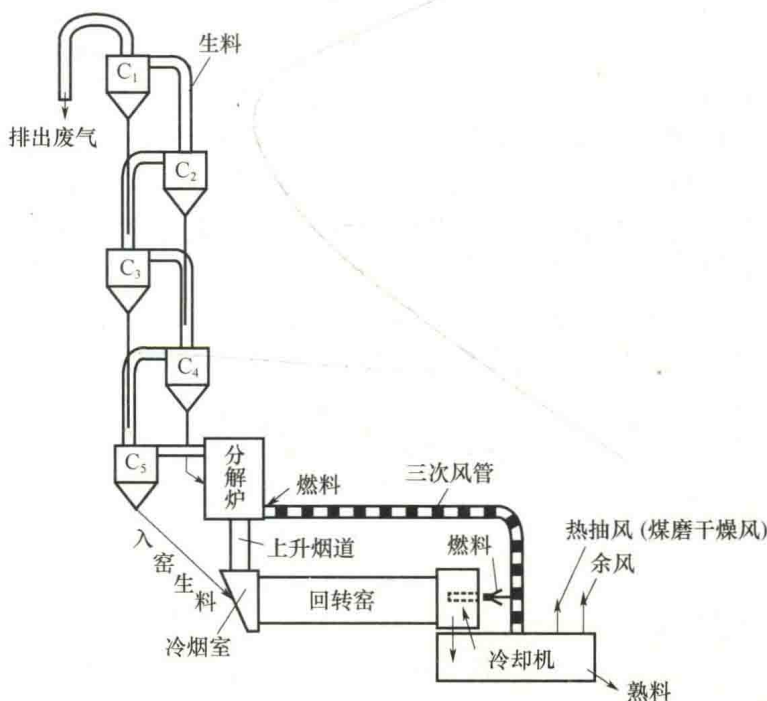


图 1-6 带五级旋风预热器 NSP 窑流程图

预热预分解窑系统的出现，使回转窑的热负荷大大降低，产量大幅度提高，因而使窑单机大型化又向前推进了一大步，达到接近 10000t/（日·台）的水平。SP 窑与 NSP 窑是在干法窑的基础上发展起来的，因此统称为新型干法窑。

二、预分解窑煅烧技术

预分解窑也称窑外分解窑，是 20 世纪 70 年代发展起来的一种煅烧工艺设备。由于生料预热和分解阶段需要吸收大量的热量，借鉴悬浮预热器利用稀相气固悬浮换热的成功经验，启发了将生料的预热和分解过程移至窑外以流态化方式来完成的技术新构思。但仅利用窑尾烟气中的热焓，不能满足碳酸盐分解需要的全部热量，因此，必须在窑外另辟第二热源，进而提出了在悬浮预热器和回转窑之间，加装一个专门的分解炉，并且要求燃料燃烧供热和分解反应吸热在炉内同步进行的设计意图。1971 年日本首先实现这一设想。这一煅烧新技术

的出现,立即在世界范围内引起强烈的反响,并很快得到推广应用,被誉为煅烧技术的一次重大革命,其发展之迅速,影响之深远是水泥生产技术史上所罕见的。

(一) 预分解窑技术的发展

自 20 世纪 70 年代初期日本石川岛公司 (IHI) 发明预分解窑以来,预分解窑技术发展经历了四个发展阶段。

第一阶段:20 世纪 70 年代初期至中期,为预分解技术诞生和发展阶段。

1971 年日本 IHI 公司与秩父公司共同开发出第一台 SF 窑,标志着预分解技术的诞生。该系统是在一台 $\Phi 3.9\text{m} \times 51.37\text{m}$ 的立波尔窑上改建的,拆除了立波尔窑的加热机,加装了四个串联的旋风筒式预热器和一台 FF (Flash-Furnace) 型分解炉 (又称 SF 型)。该窑投产后,产量提高了 1.5 倍,而热耗仅 3182kJ/kg 熟料。之后,日本各种类型的预分解窑相继出现,如三菱公司的 MFC 炉 (1971 年)、小野田水泥公司的 RSP 炉 (1972 年)、川崎与宇部水泥公司共同开发的 KSV 炉 (1974 年) 等。以后陆续出现了史密斯 (F. L. Smith) 公司的 SLC 炉、伯力休斯 (Polisius) 公司的 Prepol 炉、KHD 公司的 Pyroclon 炉等。

在此期间,分解炉都是以重油为燃料,分解炉的热力强度高,炉容偏小,大多依靠单纯的旋流、喷腾、流态化等效应来完成气固分散、混合、燃烧、换热等过程。因此,分解炉的功能对中、低质燃料的适应性较差。尽管如此,预分解窑与其他各种干法窑相比所表现出的良好性能,深受用户青睐,发展十分迅速。

我国从 1971 年开始研究预分解技术,先是以油为燃料,第一台日产 350t 熟料的烧油 SF 窑外分解试验生产线于 1976 年在吉林石岭水泥厂建成。随后转入以煤为燃料的各种类型预分解窑的研制、开发和建设。

在本阶段中,悬浮预热窑的发展优势逐渐被预分解窑所代替。但是,必须认识到悬浮预热窑是预分解窑的母体,预分解窑是悬浮预热窑发展的更高阶段。至今各种新型悬浮预热窑在预分解窑发展的同时,仍在继续发展完善,发挥着重要作用。

第二阶段:20 世纪 70 年代中、后期,为预分解技术完善、提高阶段。

1973 年国际石油危机之后,油源短缺,价格上涨,许多预分解窑被迫以煤代油,致使许多原来以石油为燃料研发的分解炉难以适应。通过总结改进,各种第二代、第三代分解炉应运而生,例如 N-SF 炉、CFF 炉、N-MFC 炉等即为典型代表。这些改进型或新型分解炉,为适应燃煤需要,不仅增大了炉容,在结构上也有很大的改进。为了提高燃尽率,延长物料在炉内的停留时间,许多分解炉结构采用了旋流-喷腾、流态化-悬浮或双喷腾等叠加效应,以改善和提高分解炉的功效。

在此期间,我国许多科研、设计单位再吸取国际各种预分解窑设计和生产经验的基础上,成功研制以煤为燃料的各种类型预分解窑,如邳县水泥厂、新疆水泥厂日产 700t 水泥熟料的 RSP 窑,辽宁本溪水泥厂日产 1200t 熟料的 KSV 窑。

第三阶段:20 世纪 80 年代至 90 年代中期,为悬浮预热和预分解技术日臻成熟、全面提高阶段。

随着生产经验的积累和预分解技术的提高,更为重要的是,为了降低综合能耗和生产成本,提高竞争能力,自 20 世纪 80 年代开始,由第二阶段的单纯对分解炉炉型和结构的改进,发展成为对预分解窑全系统的整体改进和开发阶段。其中包括旋风筒、换热管道、分解炉、回转窑、冷却机 (简称筒、管、炉、窑、机) 以及与之配套的耐火、耐热、隔热、耐磨

材料的制造技术、自控技术、环保设施等的整体改进和开发。开发了新型分解炉、高效低损旋风筒、新型高效冷却机、两支点短窑等一系列先进技术装备。单位熟料热耗已经达到 3000kJ/kg 熟料以下，水泥窑的热效率提高到 60%。在环保、电耗、生产规模以及余热、废渣、工业垃圾综合利用等方面，均已达到相当高的水平。

在此期间，为了加速科技进步，赶超国际先进水平，国内陆续引进了一批日产 2000~4000t 熟料的大型预分解窑生产线成套装备。同时又对日产 2000t 熟料的大型预分解窑生产线，20 世纪 80 年代中期组织引进了 16 项单机设计、制造技术，建设了双阳水泥厂，有组织地对一些有代表性的大型窑生产线进行了全面的技术分析与评议以及反求工程的研究，组织了新型预热器与分解炉的开发研究、水泥悬浮预热与预分解技术的理论研究、煤粉燃烧装置的研究等科技攻关，为消化吸收引进技术和发展创新有我国自己特色的预分解窑系统打下了坚实的基础。各个设计研究单位已经比较熟练地掌握了悬浮预热和预分解技术，各自研制开发了具有中国特色的预分解窑系统，建成了双阳、搓头、浩良河、滇西、东关、山东水泥厂等不同类型和规模的预分解窑生产线，并且出口到马来西亚、泰国等国的生产线均已取得“达标、生产”的优异成绩，各项技术经济指标也比较先进。

伴随着悬浮预热和预分解技术日臻成熟，预分解窑旋风筒、换热管道、分解炉、回转窑、篦冷机以及挤压粉磨，和同它们配套的耐热、耐磨、耐火、隔热材料，自动控制，环保技术等全面发展和提高，使新型干法水泥生产的各项技术经济指标得到进一步优化。

第四阶段：20 世纪 90 年代中期至今，为水泥工业向“生态环境材料型”产业迈进阶段。

随着人类社会对保护地球环境，实现可持续发展迫切性认识的迅速提高，发达国家水泥工业在工艺、装备进一步优化和实行“清洁生产”的同时，开始向“生态环境材料型”产业转型。实现“生态环境材料型”水泥产业有五大标志：一是产品质量提高，满足高性能混凝土的耐久性要求；二是尽力降低熟料热耗及水泥综合电耗，节省一次资源和能源；三是大力采用替代性原料和燃料，提高替代率；四是实行“清洁生产”，三废自净化；五是降解利用其他工业产生的废渣、废料、生活垃圾及有毒、有害的危险废弃物，为社会造福。

生产工艺得到进一步优化，环境负荷进一步降低，并且成功研发降解利用各种替代原、燃料及废弃物技术，以新型干法生产为切入点和支柱，水泥工业向水泥生态环境材料型产业转型。

（二）预分解窑生产工艺流程

预分解窑系统由旋风预热器、分解炉、回转窑和冷却机系统组成，其基本流程如图 1-7 所示。

以带四级旋风预热器的预分解窑系统为例。从物料的走向来看，生料粉经提升设备提升，喂入到连接 C_1 和 C_2 旋风筒的气体管道，被上升的热烟气分散，悬浮于热烟气中，同时进行热交换，然后被热烟气带进 C_1 旋风筒，在 C_1 旋风筒内旋转产生离心力，生料粉在离心力和重力的作用下与烟气分离，沉降到锥体而后落入连接 C_2 、 C_3 旋风筒之间的气流管道内，又被此处上升的热烟气分散并悬浮于热烟气中进行第二次热交换，被热烟气带进 C_2 旋风筒，与烟气分离后生料进入 C_3 、 C_4 旋风筒之间的烟气管道，与烟气换热并带入 C_3 筒，生料在 C_3 筒与烟气分离后进入分解炉，在分解炉内吸收燃料燃烧放出的热量，碳酸盐开始受热分解，并随气流进入 C_4 筒，已完成大部分碳酸盐分解的生料与气流在 C_4 筒分离后经下料管喂入回转窑，在回转窑内煅烧成熟料经冷却机冷却后卸出。

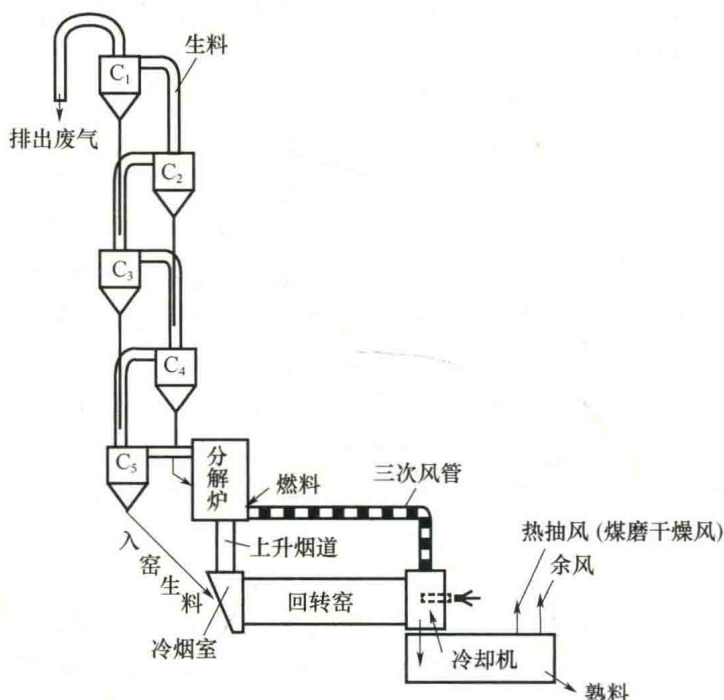


图 1-7 一个典型的新型干法水泥回转窑系统流程图

气流的流向与物料走向正好相反，在冷却机中被熟料预热的空气，一部分从窑头入窑作为窑的二次风供窑内燃料燃烧；一部分经三次风管引入分解炉供分解炉内燃料燃烧，出窑的高温废气通过窑尾上升烟道进入分解炉，分解炉排出的气体携带生料粉进入 C_4 筒，与料粉分离后依次再进入 C_3 、 C_2 、 C_1 旋风筒预热生料，在 C_1 旋风筒与生料分离，排出预热器。

（三）预分解技术的特点

传统水泥熟料煅烧方法，生料的预热、分解和烧成过程均在窑内完成。回转窑作为烧成设备，由于它能够提供断面温度分布均匀的温度场，并能保证物料在高温下有足够的停留时间，尚能满足要求。但作为传热、传质设备则不理想，对需要热量较大的预热、分解过程很不适应。这主要是由于窑内物料堆积在窑底部，气流从物料的表面流过，气流与物料的接触面积很小，传热效率很低。同时窑内分解带的物料处于堆积状态，料层内分解的 CO_2 向气流扩散的面积很小，阻力大、速度慢，并且料层内部颗粒被 CO_2 气膜包裹， CO_2 的分压大，分解要求温度高，这就增加了石灰石分解的困难，降低了分解的速度。

悬浮预热、窑外分解技术的突破，从根本上改变了物料的预热、分解过程的传热状态，将窑内的物料堆积状态的预热和分解过程，分别移到悬浮预热器和分解炉内进行。由于物料悬浮在气流中，与气流的接触面积大幅度增加，因此传热极快、效率高，同时物料在悬浮态下均匀混合，燃料燃烧热及时传给物料，使之迅速分解。因此传热、传质均很迅速，大幅度提高了生产效率和热效率。

与其他类型水泥窑相比，窑外分解窑有以下特点：

在结构方面，预分解窑是在悬浮预热器窑的基础上，在悬浮预热器与回转窑之间增设一个分解炉，承担了原来在回转窑内进行的碳酸盐分解任务。

在热工方面，分解炉是预分解窑系统的“第二热源”，将传统回转窑从窑头加入全部燃

料的做法,改变为少部分从窑头加入,大部分从分解炉加入,从而改善了窑系统内的热工布局,大大地减轻了回转窑内耐火衬料的热负荷,延长了回转窑的寿命。

在工艺方面,将熟料煅烧工艺过程中耗热最多的碳酸盐分解的吸热过程移至分解炉内进行,由于燃料与生料粉混合均匀,燃料燃烧的放热过程与生料的碳酸盐分解过程在悬浮状态或流态化状态下极其迅速地进行,使燃烧、换热及碳酸盐分解过程都得到优化,更加适应熟料煅烧的工艺特点。

预分解窑是继悬浮预热器窑发明后的又一次重大技术创新,具备一系列优异性能,成为水泥生产的主导技术和发展方向。预分解窑的优点主要表现在以下几个方面:

(1) 单机生产能力大,窑的单位容积产量高。一般预分解窑单位容积产量为悬浮预热器窑的2~2.5倍,为湿法窑的6.2~7.2倍。

(2) 窑衬寿命长,运转率高。由于回转窑内热负荷减轻,延长了窑衬寿命和运转周期,耐火材料单位耗量减少。

(3) 单位熟料热耗较低。由于它利用了先进的传热原理,热效率高,而且它的余热利用充分,使得预分解窑的单位熟料热耗大幅降低。

(4) 有利于低质燃料的利用。由于分解炉内分解反应对温度要求较低,可利用低质燃料或可燃废弃物作燃料。

(5) 对含碱、氯、硫等有害成分的原料和燃料适应性强。因大部分碱、氯、硫在窑内较高温度下挥发,通过窑内的气体比悬浮预热器窑约减少一半,烟气中有害成分富集浓度大,当采用旁路放风时,对碱、氯、硫等有害成分的原料和燃料适应性强,可生产低碱水泥。

(6) NO_x 生成量减少,对环境污染小。由于50%~60%的燃料从窑内移至温度较低的分解炉内燃烧,许多类型的分解炉还设有脱 NO_x 喷嘴,可减少 NO_x 生成量,减少对环境的污染。

(7) 生产规模大,在相同生产能力下,窑的规格减小,因而占地少,设备制造安装容易,单位产品设备投资、基建费用低。

(8) 自动化程度高,操作稳定。

预分解窑具有突出优点,但也存在以下缺点:

(1) 预分解窑虽然对含碱、氯、硫等有害成分的原料和燃料适应性较强,但当原料中碱、氯、硫等有害成分含量高而未采取相应措施,或当窑尾烟气及炉气温度控制不当时,也易产生结皮,严重时可能出现堵塞现象。如果采用旁路放风,则将使热耗增加,并需增加排风、收尘等设备,同时收下的高碱粉尘较难处理。

(2) 由于自动化程度高,整个系统的控制参数较多,各参数间要求紧密准确的配合,因此,对技术管理水平要求较高。

(3) 与其他窑型相比,分解炉、预热器系统的流体阻力较大,电耗较高。

复习思考题

1. 为什么要在旋风预热器和回转窑之间加设一个分解炉?
2. 与其他类型水泥窑相比,窑外分解窑具有什么特点?
3. 窑外分解窑有哪些主要优缺点?
4. 什么是窑外分解技术?试述窑外分解窑的工艺流程?
5. 熟料煅烧工艺有哪些?