

高等学校教材

XINXING GANFA SHUINI
SHENGCHAN JISHU YU SHEBEI

新型干法水泥 生产技术与设备

第二版

李海涛 主编

郭献军 吴武伟 副主编



化学工业出版社

TQ172
1012.1-2



NUAA2013086538

高等学校教材

新型干法水泥 生产技术与设备

第二版

李海涛 主编

郭献军 吴武伟 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

2013086538

本书系第二版,在保持第一版特色的基础上,对全书内容进行了全面调整、优化和更新,并对部分章节内容进行了删减或补充。

全书共分九章,从水泥生产原材料、燃料、配料、预均化到水泥制成,详细介绍了水泥生产过程主要设备的结构、工作原理、性能特点、操作维护以及常见故障处理。生料粉磨系统重点讲述了立磨粉磨系统,并补充了辊压机终粉磨系统和申卸烘干磨系统;烧成系统主要讲述了各种预热预分解系统、回转窑、新型篦冷机、多风道燃烧器、煤粉制备与计量、耐火材料配置及施工;水泥制成部分对辊压机、立磨和管磨机组成的各种粉磨系统以及立磨、筒辊磨水泥终粉磨系统以及球磨机、辊压机、高效选粉机等内容作了详尽介绍。

本书可作为高等院校水泥工艺专业方向以及相关专业教材,也可供从事水泥工业科研、设计、生产技术及管理人员参考,还可作为水泥企业职工培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

新型干法水泥生产技术与设备 / 李海涛主编. —2
版. —北京: 化学工业出版社, 2013. 9
高等学校教材
ISBN 978-7-122-18141-1

I. ①新… II. ①李… III. ①水泥-干法-生产工
艺-高等学校-教材②水泥-干法-生产-化工设备-高等
学校-教材 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 179395 号

责任编辑: 窦 臻
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数456千字 2013年10月北京第2版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

8818808108

第二版前言

本书自 2005 年出版以来，承蒙广大读者厚爱，曾多次重印。在此期间，新型干法水泥生产技术得到了快速发展。为了适应现代化水泥生产和教学需要，我们重新编写了《新型干法水泥生产技术与设备》。

第二版保持了第一版的特色，在内容上做了全面调整、优化与更新，并对部分章节内容进行了删减或补充。全书共分九章，详细介绍了水泥生产工艺过程及主要设备的结构、工作原理、运行参数、操作维护以及常见故障的预防与处理。

本书收集了国内新型干法水泥生产线生产、建设和改造过程中的成功经验和生产运行数据，查阅了业内资深专家、学者近期发表的有关新型干法水泥方面的论文和其他相关文献，并结合作者多年的教学和实践总结撰写而成，内容翔实、通俗、实用。

本书由洛阳理工学院李海涛任主编，郭献军、吴武伟任副主编。洛阳理工学院王晓峰、刘辉敏、张冬阳、张明海，中联登电水泥有限公司何继刚参加了编写工作。

在编写过程中，得到了有关高等院校、设计研究院和水泥企业的大力支持和热情帮助，在此一并表示感谢。

由于本人水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者和水泥行业的专家、同仁提出批评和改进意见。

李海涛
2013 年 6 月

第一版前言

以预分解窑为代表的新型干法水泥生产技术是国际公认的代表当代技术发展水平的水泥生产方法。它具有生产能力大、自动化程度高、产品质量高、能耗低、有害物排放量低、工业废弃物利用量大等一系列优点，成为当今世界水泥工业生产的主要技术。

近年来，我国新型干法水泥生产技术得到了飞速发展。尤其是进入 21 世纪，大批 5000t/d 熟料新型干法水泥生产线的建成、投产，标志着我国新型干法水泥生产技术已经成熟。目前全国已建成的新型干法水泥生产线约 400 余条，产能达 3 亿多吨，占我国水泥总产量的 32% 以上。

新型干法水泥生产技术的发展，使得水泥生产新工艺、新技术、新设备及操作控制手段日益更新，造成水泥生产企业工程技术人员、生产控制操作人员及高级技术工人短缺，职工技术、知识结构更新迫在眉睫。为满足水泥生产企业员工技术培训、水泥工艺专业教学需要，我们以近几年的教学讲义为基础，结合水泥工业发展及企业的要求，编写了《新型干法水泥生产技术与设备》，并以期为从事水泥工作的同行们提供学习、技术交流和参考的资料。

本书以国内已建成的 1000~5000t/d 熟料新型干法水泥生产线为主，收集了大量在新线建设、日常生产和技术改造过程中的成功经验与存在不足，查阅了业内资深专家、学者近期发表的有关新型干法水泥方面的论文和相关文献，从石灰石破碎、原料预均化堆场、生料制备及均化、预分解烧成与冷却、水泥制成及预分解系统调节与控制等方面，系统地介绍了新型干法水泥生产的工艺过程及设备的结构性能、运行参数和操作维护等。内容系统、新颖、翔实、通俗、实用、可靠。

全书共分九章，重点介绍了立磨生料粉磨系统、预分解系统、多风道燃烧器和第三代篦式冷却机的结构、性能特点、操作控制与维护以及常见故障的预防处理，辊压机及第三代选粉机的结构、运行参数和操作维护等。还介绍了水泥熟料形成过程、回转窑结构及耐火衬料的选用和施工注意事项。

本书由李海涛主编，郭献军、吴武伟副主编，王晓峰、任和平、张伟、陈白生及同力水泥有限公司曹庆霖参加了编写。在编写过程中，得到了系领导和协作单位的大力支持和热情帮助，在此一并表示感谢。

本书可供水泥工业的科研、设计、生产建设、工程技术及管理人员参考，也可作为水泥专业大专院校师生教学用书。

由于时间仓促、水平有限，书中缺点错误在所难免，希望广大读者和水泥行业的专家、同仁提出批评和改进意见。

编者

2005 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.5 预均化堆场的布置型式及堆、 取料方式	18
1.1 水泥在国民经济中的地位和作用	1	3.5.1 预均化堆场的布置型式	18
1.2 新型干法水泥生产技术现状	1	3.5.2 堆料方式	20
1.2.1 国外新型干法水泥生产技术现状	1	3.5.3 取料方式	21
1.2.2 国内新型干法水泥生产技术现状	2	3.6 堆料机和取料机	22
1.3 水泥工业的发展趋势	3	3.6.1 圆形堆场混匀堆、取料机	22
1.4 水泥工业的可持续发展	4	3.6.2 矩形堆场堆、取料机	23
第 2 章 原燃料及配料	5	3.7 影响均化效果的因素及解决措施	28
2.1 水泥生产原料	5	第 4 章 生料制备	30
2.1.1 石灰质原料	5	4.1 概述	30
2.1.2 硅铝质原料	5	4.2 立磨	30
2.1.3 校正原料	5	4.2.1 立磨的特点	30
2.2 水泥生产燃料	6	4.2.2 立磨的工作原理	30
2.2.1 燃料的组成及表示方法	6	4.2.3 各种型式立磨的结构特点	30
2.2.2 回转窑对燃料的质量要求	8	4.2.4 工艺参数	38
2.3 硅酸盐水泥熟料的矿物组成	9	4.2.5 立磨的控制与操作	45
2.3.1 硅酸三钙 (C_3S)	9	4.2.6 常见故障及排除	49
2.3.2 硅酸二钙 (C_2S)	10	4.3 辊压机终粉磨	52
2.3.3 铝酸三钙 (C_3A)	10	4.3.1 系统工艺流程	52
2.3.4 铁铝酸四钙 (C_4AF)	10	4.3.2 操作与控制	52
2.4 硅酸盐水泥熟料的率值	11	4.4 中卸烘干磨	55
2.4.1 石灰饱和系数	11	4.4.1 系统工艺流程	55
2.4.2 硅酸率	11	4.4.2 操作与控制	57
2.4.3 铝氧率 (或称铁率)	11	4.5 生料均化	59
2.5 熟料化学成分、矿物组成和各率值 之间的关系	11	4.5.1 概述	59
2.6 配料计算	12	4.5.2 多料流式均化库	62
2.6.1 配料的目的是基本原则	12	4.5.3 各种类型均化库的比较	67
2.6.2 配料计算的依据	12	第 5 章 预分解系统	68
2.6.3 配料方案的选择	13	5.1 预热器	68
2.6.4 配料计算	13	5.1.1 预热器的发展	68
第 3 章 原燃料预均化	17	5.1.2 预热器的分类	68
3.1 预均化基本原理及意义	17	5.1.3 预热器的作用及特点	68
3.1.1 基本原理	17	5.2 预热器的工作原理	69
3.1.2 预均化的意义	17	5.2.1 预热器的换热功能	69
3.2 预均化效果的评价方法	17	5.2.2 物料分散	70
3.2.1 标准偏差	17	5.2.3 锁风	71
3.2.2 均化效果	17	5.2.4 气固间换热	72
3.3 预均化堆场的选用条件	18	5.2.5 气固分离	73
3.4 预均化堆场的类型	18	5.2.6 影响预热器热效率的因素	75

5.3 旋风预热器的结构及技术参数	75	6.6.1 冷却机性能评价	161
5.3.1 旋风筒的结构	75	6.6.2 推动篦式冷却机的发展	162
5.3.2 新型旋风筒的结构	78	6.6.3 阻力篦板	162
5.4 分解炉	82	6.6.4 第四代篦式冷却机	165
5.4.1 概述	82	6.6.5 故障与处理	169
5.4.2 各类分解炉的结构特点	83	6.7 回转窑煤粉燃烧器	169
5.4.3 分解炉的工艺性能	102	6.7.1 回转窑对煤粉燃烧器的要求	169
5.4.4 分解炉的热工特性	108	6.7.2 回转窑煤粉燃烧器的设计	170
5.4.5 分解炉内的传热	112	6.7.3 回转窑煤粉燃烧器的型式	172
5.4.6 分解炉内的气体运动	112	6.7.4 常见故障及处理	177
5.4.7 分解炉中的旋风效应与喷腾效应	113	6.8 耐火材料	178
5.4.8 生料和煤粉的悬浮及含尘浓度	115	6.8.1 预分解窑的工艺特性及对耐火材料的要求	178
5.5 预分解系统的结皮堵塞	115	6.8.2 回转窑内耐火材料损坏的原因	179
5.5.1 碱、硫、氯等有害成分富集及危害	115	6.8.3 预分解窑用耐火材料的种类及性能	180
5.5.2 预热器系统的结皮堵塞及预防	116	6.8.4 预分解窑系统耐火材料的配置	182
5.5.3 旁路放风系统	117	6.8.5 耐火材料的施工	183
5.5.4 防止黏结堵塞的其他措施	118	6.8.6 窑衬的烘烤	186
第6章 水泥熟料的烧成	119	第7章 水泥制成	187
6.1 水泥熟料的形成过程	119	7.1 概述	187
6.1.1 干燥过程	119	7.2 水泥预粉磨系统	187
6.1.2 黏土原料脱水	119	7.2.1 辊压机预粉磨系统	187
6.1.3 碳酸盐分解	119	7.2.2 主磨预粉磨系统	189
6.1.4 固相反应	119	7.3 水泥终粉磨系统	191
6.1.5 碳酸三钙(C ₃ S)的形成和 炼结反应	120	7.3.1 立磨水泥终粉磨系统	191
6.1.6 熟料的冷却过程	120	7.3.2 辊压机水泥终粉磨系统	193
6.2 水泥熟料的形成热	121	7.3.3 筒辊磨水泥粉磨系统	194
6.3 回转窑的结构	122	7.3.4 分别粉磨工艺	196
6.3.1 筒体	122	7.4 粉磨设备	196
6.3.2 支承装置	123	7.4.1 球磨机	196
6.3.3 传动装置	127	7.4.2 辊压机	217
6.3.4 密封装置	129	7.5 选粉机	222
6.4 回转窑工作原理	134	7.5.1 O-Sepa 选粉机	222
6.4.1 回转窑内的反应	134	7.5.2 TESU 型双分离式高效选粉机	226
6.4.2 窑内物料的运动	135	7.5.3 TLS 组合式选粉机	227
6.4.3 回转窑内的燃料燃烧	138	7.5.4 V 形选粉机	227
6.4.4 回转窑内的气体流动	141	第8章 除尘器	229
6.4.5 回转窑内的传热	142	8.1 电除尘器	229
6.4.6 预分解窑的特点	145	8.1.1 电除尘器的特点	229
6.5 煤粉制备系统	146	8.1.2 电收尘器的工作原理	229
6.5.1 风扫式钢球磨系统	146	8.1.3 电收尘器的工作参数	231
6.5.2 辊式煤磨系统	151	8.1.4 电收尘器常见故障及处理	234
6.5.3 煤粉制备系统巡检及安全	158	8.1.5 常见故障及排除	238
6.5.4 煤粉计量装置	158	8.2 气箱脉冲袋式收尘器	241
6.6 水泥熟料冷却机	161	8.2.1 概述	241

8.2.2	结构及工作原理	241
8.2.3	气箱脉冲袋收尘器的选用	243
8.3	BFRS (P) 系列大型反吹袋式除尘器	244
8.3.1	概述	244
8.3.2	结构及工作原理	245
8.3.3	技术特点	245
8.4	LCM 长袋脉冲袋收尘器	246
8.4.1	概述	246
8.4.2	工作原理	246
8.4.3	技术特点	246
8.4.4	系列设计	247
8.4.5	过滤风速	247
8.4.6	安装及调试	247
8.4.7	维护和检修	248
8.5	袋式除尘器过滤材料的选择	249
8.5.1	水泥工业含尘气体的特性	249
8.5.2	选择滤料注意事项	249
8.5.3	国内几种滤料的技术性能	250

第9章 预分解窑系统的调节与控制 252

9.1	预分解窑调节控制的目及原则	252
9.1.1	预分解窑调节控制的目	252
9.1.2	预分解窑调节控制的一般原则	252
9.2	预分解窑的点火投料操作	253
9.2.1	点火投料前的必备条件	253
9.2.2	点火投料步骤	253
9.3	回转窑挂窑皮操作	254
9.4	预分解窑的正常运行操作	255
9.4.1	预分解窑系统调节控制参数	255
9.4.2	正常操作下过程变量的控制	257
9.5	停窑操作	259
9.5.1	正常停窑	259
9.5.2	事故停窑	260
9.6	非正常条件下的操作及故障处理	261
9.6.1	预分解窑系统常见工艺故障及 处理方法	261
9.6.2	预分解窑系统异常参数的调整	266

参考文献 271

第 1 章 绪论

1.1 水泥在国民经济中的地位和作用

水泥是国民经济建设的重要基础原材料之一，可广泛用于民用、工业、农业、水利、交通和军事等工程。虽然制造水泥的能耗较高，但它与砂、石等集料制成的混凝土却是一种低能耗的建筑材料。目前国内外尚无一种材料可以替代它的地位。作为国民经济的重要基础产业，水泥工业已经成为国民经济社会发展水平和综合实力的重要标志。

1.2 新型干法水泥生产技术现状

新型干法水泥生产技术，是以悬浮预热和预分解技术为核心，利用现代科学理论和技术，并采用计算机及其网络化信息技术进行水泥生产的综合技术，具有优质、高效、节能、环保和可持续发展等特点。

新型干法水泥生产技术的内容：原料矿山计算机控制开采、原燃料预均化、生料均化、新型节能粉磨、高效低阻预热器和分解炉、新型篦式冷却机、高耐热耐磨及隔热材料、计算机与网络化信息技术等。

1.2.1 国外新型干法水泥生产技术现状

(1) 预分解系统 高效低阻预热器在系统阻力不增加或略有降低的情况下，出现了 6 级、多级热交换预热器，6 级预热器出口废气温度下降至 $260\sim 280^{\circ}\text{C}$ ，多级预热器降至 260°C 以下。

单系列预热器具有操作简单、筒体散热损失低等特点，目前已有 $6000\text{t}/\text{d}$ 规模采用单系列的成功案例；技术先进的预分解系统阻力已降至 5 级 4500Pa 、6 级 5200Pa 以下。

技术先进的分解炉可大量燃烧低挥发分、低热值的燃料、工业废弃物、城市生活垃圾， NO_x 排放值（标准状况）低于 $500\text{mg}/\text{m}^3$ ，占系统烧成燃料比例超过 65%，入窑物料分解率超过 92%。

(2) 回转窑 回转窑长径比从 15 左右的三挡窑缩短至 $10\sim 13$ 的二挡窑。窑的单位容积产量从 $3.0\text{t}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ 提高至 $6.0\text{t}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ 。筒体散热损失从三挡窑的大于 $35\text{kcal}/\text{kg}$ 下降至二挡窑的 $26\sim 30\text{kcal}/\text{kg}$ ($1\text{kcal}=4.18\text{kJ}$ ，下同)。窑速从 $3\text{r}/\text{min}$ 提高至 $4\text{r}/\text{min}$ 以上，物料在窑内停留时间从 40min 逐步下降至 30min 以下。

二挡窑和三挡窑相比，设备重量降低约 10%，还具有运行平稳、安装简单、维护方便等优点。进入 21 世纪，国际上新建生产线投入的二挡窑数量已超过三挡窑。

为满足不同性能的燃料和工业废弃物的燃烧，燃烧器设计从以往的内风旋流发展为内风、外风双旋流，且在风道中间部位增设了液体或固体废物或不同性能粉状燃料通道，以满足不同性能的燃料燃烧要求。新型燃烧器的一次净空气量为 6%，煤风为 2%~4%，合计一次风量为 8%~10%。

(3) 冷却机 第四代无漏料冷却机由若干条纵向熟料冷却输送通道组成，运行速度随料层冷却情况自动调节。通道单独通风，热交换时间可以控制，确保不同粒径熟料得以冷却，

冷却风量(标准状况)约为 $1.6\text{m}^3/\text{kg}$ 熟料,热回收率超过76%,篦床有效面积负荷大于 $45\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。同时具有结构紧凑,机内无输送部件,篦板不与热熟料直接接触,磨损小,熟料输送无阻碍,输送效率稳定,模块化设计,安装维护方便,篦下无漏料,不需设置拉链机,整机高度低等一系列优点。

(4) 熟料烧成系统 由6级或多级预热器、低 NO_x 分解炉系统、二挡短窑、高效燃烧器、第四代篦冷机组成的5000t/d熟料烧成系统,设计热耗低于 $690\text{kcal}/\text{kg}$ (长期运行生产热耗 $730\text{kcal}/\text{kg}$),熟料电耗 $17\sim 19\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

(5) 水泥粉磨 世界水泥粉磨技术呈多元化趋势,粉磨设备也向大型化、低耗高效及自动化方向发展。辊压机+V形选粉机+管磨机预处理的双闭路粉磨系统,比较先进的粉磨电耗指标已低于 $27\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

辊压机终粉磨系统完全取消了球磨机,由辊压机承担全部的粉磨功耗,其水泥粉磨电耗可降到 $21\sim 22\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

立磨水泥终粉磨系统具有工艺流程简单、建筑面积和占地面积小、单位产品电耗低、允许入磨物料水分高、运转率高、粉磨效率高、操作维护简单、运行费用低、单机规模大等诸多优点而被广泛采用。国际上新建的水泥生产线粉磨系统对立磨终粉磨系统的选用率已达80%以上。其水泥粉磨电耗可达 $25\sim 29\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

由法国FCB公司开发的Horomill和FLS公司后来推出的CEMAX型筒辊磨,配用高效选粉机组成闭路水泥粉磨工艺,其水泥粉磨系统电耗约 $25\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

分别粉磨工艺制备的水泥颗粒级配更合理,强度增进率高,制造成本低,水泥粉磨电耗一般在 $30\sim 40\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,是水泥粉磨工艺发展和改造的方向。

1.2.2 国内新型干法水泥生产技术现状

通过引进、吸收、消化,冷热态模拟实验、计算机模拟技术等研发手段,以及大批生产线的建设和生产实践,使我国水泥工业得到了快速发展。

(1) 合理使用低品位原燃料 通过对矿山开采和搭配、原、燃料和生料的均化等技术的研发,使新型干法水泥生产原、燃料的许用范围得到较大的拓宽。目前新型干法生产使用的原料中,石灰石的氧化钙、氧化镁含量可分别放宽到45%、4.0%;燃煤的挥发分 $<2.0\%$,全硫含量 $<3.0\%$,灰分可高达40%;对原料中的有害组分碱、氯、硫等的许用范围也扩大了。

(2) 原料、生料制备系统 大型石灰石单段锤式破碎机,产量可达 $1500\sim 1700\text{t}/\text{h}$;用于破碎黏土、粉砂岩、煤等物料的大型齿辊式破碎机,产量达到 $550\text{t}/\text{h}$;用于破碎硬硅质原料的大型反击式破碎机,产量达到 $400\text{t}/\text{h}$ 。

自行设计制造的大型辊磨,主要技经指标达到国际先进水平。

采用国产辊压机生料终粉磨系统,通过生产实践和优化改进,节能效果更加显著。

(3) 熟料烧成系统 从20世纪70年代开始,我国水泥工业科研人员研究新型干法水泥生产烧成技术,综合多种专业学科,开发了具有自主知识产权、达到国际先进水平的水泥预热、预分解系统技术,解决了系统优化和规模放大技术难题;同时,结合机械制造专业,进行适应不同建设条件、不同长径比大型回转窑和第三、第四代熟料冷却机的研发,实现了各种规模水泥熟料烧成系统的国产化,并使烧成系统主要技术经济指标达到世界先进水平。国产先进的预热、预分解系统换热效率高,阻力损失小,可根据工艺需求按5级或6级布置。对于5级布置的预热、预分解系统,其 C_1 筒出口气体温度可小于 320°C ,系统压降低于 4.8kPa ;新型篦式冷却机系统热回收效率大于72%,熟料冷却用风量(标准状态)为 $1.8\sim 2\text{m}^3/\text{kg}$ 。

(4) 水泥粉磨系统 近十余年来,我国水泥粉磨工艺和装备发展迅速,在消化吸收外国引进技术的基础上,已自主开发出不同规模的立磨、不同类型的高效选粉机和挤压磨,以及其他节能粉磨设备。应用于我国日产熟料 2500t 以上的新型干法生产线上,可使吨水泥电耗降低到 $110\text{kW}\cdot\text{h}$ 以下;应用在我国管理好的日产 5000t 熟料新型干法生产线上,吨水泥电耗为 $90\sim 100\text{kW}\cdot\text{h}$,达到国际先进水平。

① 辊压机半终粉磨系统,其中辊压机分担了一半以上的粉磨功耗,通常可以使水泥粉磨电耗下降到 $26\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

② 辊压机终粉磨系统完全取消了球磨机,由辊压机承担全部的粉磨功耗,其水泥粉磨电耗可进一步减少到 $21\sim 22\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

③ CKP 立磨(不带选粉)和球磨机组成的粉磨系统,使水泥粉磨电耗降到 $26\sim 28\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

④ 立磨水泥终粉磨效率高、电耗低(比球磨机节电 $20\%\sim 30\%$)、工艺简单、调整品种灵活等诸多优点,电耗可降到 $25\sim 29\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

(5) 纯低温余热发电技术 目前,我国已开发出不同形式、不同技术特点的性能优良的水泥窑纯低温余热发电技术与装备,可以根据不同的水泥生产线和生产操作参数,采用不同特点和规模的发电技术,在不增加熟料烧成热耗生产操作条件下,吨熟料的发电量可达 $36\sim 40\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

(6) 工业废渣综合利用技术发展迅速 我国冶金、电力等各行各业迅猛发展,伴随产生的主要问题是工业废弃渣的排放量越来越多。

各种活化处理的高炉矿渣和粉煤灰以较大比例掺入水泥或混凝土中,既节约了能源、利用了废渣,还可有效地调节水泥品种、改善水泥性能,经济效益和社会效益显著。

针对不同固废资源的理化特性,利用电石渣、锰渣、磷渣、钢铁厂熔渣、城市及河道污泥等不同固废资源生产水泥,对循环经济和节能减排具有重大意义。

(7) 水泥窑协同处理废弃物技术 我国城市人均生活垃圾年产生量已经达到 450kg 或更多。水泥窑体积大,热容量也很大,且煅烧温度高,技术上具备协同处理废弃物的能力。20 世纪 90 年代以来,国外水泥行业已经有较多的利用废弃物部分取代水泥窑原、燃料来处理废弃物的实例,既处理了废弃物,又节约了矿物原燃料用量,效果很好。与国外相比,国内的废弃物在其构成、形态、性质等各方面差距较大,在利用处理上有其自身特点和难度。近 10 年来,国内一些大的水泥研究设计院及大水泥公司都在进行这方面的技术研究开发,北京水泥厂等一些水泥企业已利用这一技术,处理工业垃圾或废弃物,能高效处理二噁英,节能减排效果好。铜陵海螺引进日本川崎技术,实现了 $5000\text{t}/\text{d}$ 熟料水泥窑焚烧处理城市生活垃圾的工业应用,日处理城市生活垃圾 300t 。真正实现“减量化、再利用、再循环”。

1.3 水泥工业的发展趋势

(1) 水泥生产线能力的大型化 世界水泥生产线建设规模越来越大,已建成 $5000\sim 12000\text{t}/\text{d}$ 的生产线达 100 多条。

(2) 水泥工业生产的生态化

① 减少粉尘、 NO_2 、 SO_2 、重金属等对环境的污染。

② 实现高效余热回收,减少水泥电耗。

③ 不断提高燃料的代替率,降低熟料烧成热耗。

④ 努力提高窑系统的运转率,提高劳动生产率。

⑤ 开发生态水泥,减少自然资源的消耗。

⑥利用计算机网络系统,实现高智能型的生产自动控制和管理现代化。

(3) 水泥生产管理的信息化

①水泥生产过程的自动化、智能化。

②生产管理决策的科学化、网络化和信息化。

③企业商务活动电子化、网络化、信息化。

1.4 水泥工业的可持续发展

依靠科技进步,合理利用资源,大力节省能源;在水泥的生产和使用过程中尽量减少或杜绝废气、废渣、废水和有害有毒物质排放对环境的污染,维护生态平衡;大力发展绿色环保水泥;大量消纳本行业和其他工业难以处理的废弃物和城市垃圾;满足经济和社会发展对水泥的需求,并保持满足后代需求的潜力;支持国内经济和社会的可持续发展。

水泥工业可持续发展的内容。

①节约资源 提高资源利用率,少用或不用天然资源,鼓励使用再生资源,提高低质原材料在水泥工业中的可利用性,鼓励企业大量使用工业和农业废渣、废料及生活废弃物等作为原料生产建材产品。

②节约土地 采取少用或不用毁地取土作原料的行业可持续发展政策,以保护土地资源。

③节约能源 大量利用工业废料、生活废弃物作燃料,节约生产能耗,降低建筑物的使用能耗。

④节约水源 节约生产用水,将废水回收处理再利用。

第 2 章 原燃料及配料

2.1 水泥生产原料

生产硅酸盐水泥的主要原料为石灰质原料和硅铝质原料，有时还要根据原燃料品质 and 水泥品种，掺加校正原料以补充某些成分的不足，也可以利用工业废渣作为水泥的原料或混合材进行生产。

2.1.1 石灰质原料

石灰质原料是指以碳酸钙为主要成分原料，包括石灰石、泥灰岩、白垩、贝壳以及工业废渣（如电石渣、糖滤泥、碱渣、白泥）等，我国大部分水泥厂使用石灰岩和泥灰岩。石灰石是生产水泥的主要原料，每生产 1t 熟料大约需要 1.3t 石灰石。

石灰岩是由碳酸钙组成的化学生物沉积岩，主要矿物是方解石。纯方解石含有 56% 的 CaO 和 44% 的 CO_2 ，呈白色。石灰岩常混有白云石、硅石、含铁矿物和黏土等杂质，呈灰白、淡黄、红褐或灰黑等颜色。石灰岩呈块状、无层理，结构致密，性脆，密度为 $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ ，水分通常小于 2%。

泥灰岩是由碳酸钙和黏土物质同时沉积所形成的均匀混合的沉积岩。它是一种由石灰石向黏土过渡的岩石。氧化钙含量超过 45% 的泥灰岩称为高钙泥灰岩；含量小于 43.5% 的称为低钙泥灰岩，通常与石灰石搭配使用。泥灰岩是一种极好的水泥原料，其中石灰岩和黏土混合均匀，易烧性好，有利于提高窑的产量，降低燃料消耗。

2.1.2 硅铝质原料

硅铝质原料的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ，主要有黄土、黏土、砂岩、粉砂岩、页岩、河泥和尾矿（如铜尾矿、铅锌尾矿、矾土尾矿）等。为节约矿产资源，我国大部分水泥厂使用砂岩、粉砂岩、页岩和尾矿等。生产 1t 硅酸盐水泥熟料需 $0.3 \sim 0.4\text{t}$ 硅铝质原料。

黄土由花岗岩、玄武岩等经风化分解后，再经搬运、沉积而成。其黏土矿物以伊利石为主，其次是蒙脱石、石英、长石、方解石和石膏等。黏土是由钾长石、钠长石或云母等矿物经风化及化学转化，再经搬运、沉积而成的。

页岩是黏土受地壳压力胶结而成的黏土岩，层理分明，颜色不定，其成分与黏土类似。砂岩由海相或陆相沉积而成，是以 SiO_2 为主要成分的矿石。

尾矿是由选矿厂排出的尾矿浆，经自然脱水后所形成的固体废料，也包括与矿石一起开采出的废石。

2.1.3 校正原料

当石灰质原料和黏土质原料配合所得生料成分不能满足配料方案要求时，必须根据所缺少的组分，掺加相应的校正原料。

当原料中 SiO_2 不足时，常用砂岩、河沙、粉砂岩等作为硅质校正原料；当 Al_2O_3 不足时，常用粉煤灰、煤矸石、炉渣、铝矾土等作为铝质校正原料；当 Fe_2O_3 不足时，常用低品位铁矿石、硫酸渣、铜矿渣、铅矿渣等作为铁质校正原料。

生产硅酸盐水泥熟料对原料质量的一般要求见表 2-1。

表 2-1 生产硅酸盐水泥熟料对原料质量的一般要求

单位: %

原料名称		成分								SM	IM	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	SO ₃	Cl ⁻			石英或燧石
石灰石	一级品	>48				<2.5	<1.0	<1.0	<0.015	<4.0		
	二级品	45~48				<3.0	<1.0	<1.0	<0.015	<4.0		
泥灰岩		35~45				<3.0	<1.2	<1.0	<0.015	<4.0		
黏土类	一级品					<3.0	<4.0	<2.0	<0.015		2.7~3.5	1.5~3.0
	二级品					<3.0	<4.0	<2.0	<0.015		不限	2.0~2.7, 3.5~4.0
硅质校正原料			>70			<3.0	<4.0	<1.0	<0.015		>4.0	
铝质校正原料				>30		<3.0	<2.0	<1.0	<0.015			
铁质校正原料					>40	<3.0	<2.0	<2.0	<0.015			

新型干法水泥生产过程中, 采用了原燃料预均化、生料均化等措施, 为低品位石灰石的利用提供了保证, 使用 CaO 含量在 42% 左右、MgO 含量在 3%~5% 的低品位石灰石, 也能达到生产要求, 有效利用了资源。

2.2 水泥生产燃料

国内水泥工业主要燃料是煤。煤是古代植物和动物尸骸埋在地下, 在隔绝空气的条件下受地质作用, 经长期的物理和化学变化而形成的复杂有机化合物。随其形成的地质条件不同各种元素含量各异, 燃料的性质也不同。根据埋藏时间及碳化程度不同, 可分为泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤。

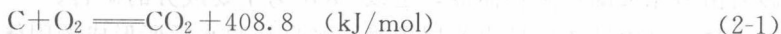
2.2.1 燃料的组成及表示方法

分析燃料的组成通常有元素分析法和工业分析法两种。

2.2.1.1 元素分析法

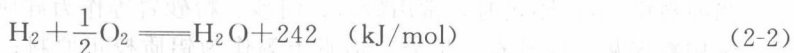
用化学分析方法分析燃料的元素组成, 得知燃料是由碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N)、硫 (S) 五种元素及灰分 (A) 和水分 (M) 组成, 其基本性质如下。

(1) 碳 (C) 碳是燃料中最主要的组分, 它在煤中的含量为 55%~99%, 在重油中的含量达 86% 以上, 在燃料中与氧、氢、氮、硫等组成各种有机化合物。当燃料受热燃烧时, 这些有机化合物首先分解, 然后再进行燃烧, 放出大量热。



碳是固体和液体燃料的主要热能来源。

(2) 氢 (H) 氢是燃料中的一种可燃成分, 对燃料性质的影响较大。它在燃料中有两种存在形式: 一种是和碳、硫化合的, 称为可燃氢 (或自由氢); 另一种是与氧化合的, 称为化合氢。化合氢不能参加燃烧反应。可燃氢在燃烧时具有很高的热效应, 1kg 可燃氢燃烧放出的热量, 约为 1kg 碳产生热效应的 3.5 倍。



氢在固体燃料中含量越多, 燃料的挥发分越高, 越容易着火燃烧, 燃烧的火焰也越长。氢在固体燃料中的含量一般不超过 5%, 在液体燃料中氢含量可达 14%。

(3) 氧 (O) 和氮 (N) 燃料中的氧和氮不参与燃烧, 不能放出热量, 它们的存在, 降低了燃料中可燃物的比例, 降低发热量。不过在一般固体和液体燃料中, 氧和氮的含量不高 (不包括灰分中氧化物中的氧), 为 1%~3%, 故影响不大。

(4) 硫 (S) 燃料中的硫有三种形态。

①有机硫化物, 硫与碳、氢、氧等结合成有机化合物, 在燃料中分布较均匀。

②金属硫化物, 如黄铁矿 FeS_2 等。

③无机硫化物, 以硫酸盐存在于燃料中, 如 CaSO_4 、 MgSO_4 、 FeSO_4 等。它们不能再进行氧化, 不参与燃烧反应, 是煤中灰分的一部分。

前两项的硫化物可挥发并参与燃烧, 放出热量, 称为可燃硫或挥发硫。

硫燃烧后虽能放出热量, 但会形成 SO_2 气体, 对人体有害。污染环境, 腐蚀设备, 影响产品质量, 所以, 硫是燃料中的有害成分。一般固体燃料含硫量大多在 2% 以内, 液体燃料中为 0.1%~3.5%。

(5) 灰分 (A) 燃料燃烧后剩下的不可燃烧的杂质称为灰分, 其成分多为硅酸盐等无机化合物, 如 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 等。其中 SiO_2 及 Al_2O_3 占大多数。

灰分是燃料中的有害成分, 灰分越多, 燃料品质越低。其影响如下。

①灰分的存在, 降低了燃料中可燃成分含量, 同时燃烧过程中灰分升温吸热, 消耗热量降低燃料的发热量。

②灰分过高时, 影响燃料的燃烧速度和燃烧温度, 使燃烧达不到工艺要求。

③灰分在较高温度下, 熔化产生液相, 使炉内或窑内结皮、结渣, 清炉时增加劳动强度, 并可夹带未燃组分, 造成机械不完全燃烧热损失。

固体燃料中灰分较多, 一般为 5%~35%, 劣质煤的灰分可达 40%~50%。液体燃料中的灰分较少, 一般不超过 1%。

(6) 水分 (M) 燃料中的水分是指自然水分 (不包括化合结晶水)。一般是机械地混入燃料的非结合水和吸附在毛细孔中的吸附水。燃料中的水分不仅不能燃烧放热, 而且汽化时要吸收大量汽化热。降低燃料品质。所以, 水分一般是燃料中的有害成分。但固体燃料含有少量水分可减少燃料飞损, 液体燃料含的水分如果以乳化状态存在, 还有利于燃烧。

2.2.1.2 工业分析法

其组成由挥发分 (V)、固定碳 (C)、灰分 (A) 及水分 (M) 组成, 分析方法简单, 应用较广。

(1) 收到基 指工厂实际使用的煤的组成, 即实际使用煤的组成 (原称应用基), 在各组成的右下角以 “ar” 表示。

$$C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + S_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100 \quad (2-3)$$

式中 C_{ar} , H_{ar} , ..., M_{ar} ——燃料中各组成的收到基的质量分数, %。

(2) 空气干燥基 指实验室所用的空气干燥煤样的组成 (将煤样在 20℃ 和相对湿度 70% 的空气下连续干燥 1h 后质量变化不超过 0.1%, 即可认为达到空气干燥状态, 此时煤中的水分与大气达到平衡), 在各组成的右下角以 “ad” 表示。

$$C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + S_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100 \quad (2-4)$$

式中 C_{ad} , H_{ad} , ..., M_{ad} ——燃料中各组成的空气干燥基含量, %。

空气干燥状态下留存在煤中的水分称为空气干燥基水分或内在水分 M_{ad} , 在空气干燥过程中逸出的水分称为外在水分 $M_{\text{ar},f}$ 。收到基水分分为总水分, 即内在水分与外在水分之和, 两者关系为:

$$M_{ar} = M_{ar,f} + M_{ad} \frac{100 - M_{ar,f}}{100} \quad (2-5)$$

(3) 干燥基 指绝对干燥的煤的组成。不受煤在开采、运输和贮存过程中水分变动的影
响，能比较稳定地反映成批贮存煤的真实组成，在各组成的右下角以“d”表示。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100 \quad (2-6)$$

式中 C_d, H_d, \dots, A_d ——燃料中各组成的干燥基含量，%。

(4) 干燥无灰基 指假想的无灰无水的煤组成。由于煤的灰分在开采、运输或洗煤过程
中会发生变化，所以除去灰分和水分的煤组成，可排除外界条件的影响。在各组成的右下角
以“adf”表示。

$$C_{adf} + H_{adf} + O_{adf} + N_{adf} + S_{adf} = 100 \quad (2-7)$$

式中 $C_{adf}, H_{adf}, \dots, S_{adf}$ ——燃料中各组成的干燥无灰基含量，%。

一般同一矿井煤的干燥无灰基组成不会发生太大变化，因此煤矿的煤质资料常以干燥无
灰基组成表示。

煤中的氢以两种形式存在：一种是与煤中的氧结合成水的化合氢，它不能进行燃烧反
应；另一种是和碳、硫结合在一起的可燃氢，称为净氢，能够燃烧并放出大量热量。

煤中的硫有三种存在形式：一种叫有机硫，是与碳氢化合物结合在一起的；另一种以硫
化物的形式存在，如 FeS_2 ；还有一种以硫酸盐的形式存在，如 $CaSO_4$ 、 $MgSO_4$ 、 $FeSO_4$ 、 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 等。有机硫和硫化铁中的硫均能燃烧生成 SO_2 ，又叫可燃硫。硫酸盐中的
硫除一小部分在高温下分解成 SO_3 外，其余均留在灰分中。

煤中的灰分是不能燃烧的矿物杂质，其主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO ，此外还有 K_2O 、 Na_2O 和 SO_3 。

不同基准的煤的组成需进行换算，其换算关系见表 2-2。

表 2-2 不同基准的煤的组成换算

已知的“基”	要换算的基			
	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

2.2.2 回转窑对燃料的质量要求

新型干法水泥生产采用了多风道燃烧器、高效篦冷机等，提高了二次风温度，对燃料要
求相对较低，用低质煤煨烧水泥熟料技术已成熟。

(1) 热值 燃料热值高，可以提高发热能力和煨烧温度；热值低，使煨烧熟料的单位煤
耗增加，窑的单位产量降低。一般要求燃料的低位热值大于 21000kJ/kg。

(2) 挥发分 挥发分和固定碳是可燃成分；挥发分低，着火温度高，黑火头长，热力不
集中。一般要求煤的挥发分在 18% 以上。但随着能源紧张和燃烧器的改进，低挥发分煤在
回转窑上的应用越来越普遍。如福建普遍采用挥发分在 3%~5% 的无烟煤，也能正常生产。

(3) 细度 煤粉太粗, 燃烧不完全, 增加能耗, 同时煤灰落在熟料表面, 降低熟料质量。

煤粉细度主要取决于燃煤种类和质量。煤种不同, 煤粉质量不同, 煤粉的燃烧温度、燃烧所产生的废气量也不同。对正常运行的回转窑, 在燃烧温度和系统通风量基本稳定的情况下, 煤粉的燃烧速度与煤粉的细度、灰分、挥发分和水分含量有关。绝大多数水泥厂, 水分一般都控制在 1.5% 以下。所以挥发分含量越高, 细度越细, 煤粉越容易燃烧。当水泥厂选定某矿点的原煤作为烧成用煤后, 挥发分、灰分基本固定, 只有改变煤粉细度才能满足燃烧工艺要求。但煤粉磨得过细, 既增加能耗, 又容易引起煤粉自燃和爆炸。因此确定符合本厂需要的煤粉细度, 对稳定烧成系统的热工制度, 提高熟料产质量和降低热耗都是非常重要的。根据煤粉挥发分和灰分含量来确定煤粉细度的经验公式。

① 烟煤 新型干法水泥厂都采用三风道或四风道燃烧器和高效篦冷机, 当煤粉灰分小于 20% 时, 煤粉细度应为挥发分含量的 0.5~1.0 倍; 当灰分高达 40% 左右时, 煤粉细度应为挥发分含量的 0.5 倍以下。

国内某水泥厂根据多年的生产实践, 总结出的经验公式如下。

$$R = 0.15 \left(\frac{V+C}{A+W} \right) V \quad (2-8)$$

也可用下列经验公式:

$$R = (1 - 0.01A - 0.011W) \times 0.5V \quad (2-9)$$

式中 R ——90 μm 筛筛余, %;

V ——煤粉的挥发分含量, %;

C ——煤粉的固定碳含量, %;

A ——煤粉的灰分含量, %;

W ——煤粉的水分含量, %。

② 无烟煤 伯力休斯公司介绍的烧无烟煤时煤粉细度经验公式如下。

$$R \leq \frac{27V}{C} \quad (2-10)$$

国外某公司的经验公式如下。

$$R \leq (0.5 \sim 0.6)V \quad (2-11)$$

国内某设计院提供的烧无烟煤经验公式如下。

$$R = \frac{V}{2} - (0.5 \sim 1.0) \quad (2-12)$$

必须指出, 许多水泥厂对煤粉水分控制不够重视, 认为煤粉中的水分能增加火焰的亮度, 有利于烧成带的辐射传热。但是煤粉水分高, 煤粉松散度差, 煤粉颗粒易黏结在一起, 影响煤粉的燃烧速度和燃尽率; 煤粉仓也容易结拱, 影响喂煤的均匀性。生产实践证明, 入窑煤粉水分控制在 $\leq 1.5\%$ 对水泥生产和操作较为有利。

2.3 硅酸盐水泥熟料的矿物组成

硅酸盐水泥熟料的矿物主要由组成硅酸三钙 (C_3S)、硅酸二钙 (C_2S)、铝酸三钙 (C_3A) 和铁铝酸四钙 (C_4AF) 组成。

2.3.1 硅酸三钙 (C_3S)

硅酸三钙是熟料的主要矿物, 其含量通常在 54%~60%。 C_3S 在 1250~2065 $^{\circ}\text{C}$ 温度范