

陈友德 武晓萍 编著

水泥预分解窑工艺 与耐火材料技术

SHUINI YUFEN
JIEYAO GONGYI
YU
NAIHUO CAILIAO JISHU



化学工业出版社

陈友德 武晓萍 编著

水泥预分解窑工艺 与耐火材料技术

SHUINI YUFEN
JIEYAO GONGYI
YU
NAIHUO CAILIAO JISHU



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥预分解窑工艺与耐火材料技术/陈友德, 武晓萍
编著. —北京: 化学工业出版社, 2011. 2
ISBN 978-7-122-10264-5

I. 水… II. ①陈…②武… III. 水泥-预分解-干
法-耐火材料 IV. TQ172. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 262090 号

责任编辑: 常 青

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 周 遥

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18 1/4 字数 430 千字 2011 年 5 月北京第 1 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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

水泥熟料煅烧十分复杂，与原燃料性能、生料成分、生料细度及均化程度、燃煤细度及煅烧状况、煅烧工艺及装备、生产控制、熟料率值等因素有关。而窑内熟料煅烧既看不清又不能接触，更难做到取样分析，只能依靠设置的工况操作参数和对原燃料、生料、熟料的检测数据来控制生产。由于原燃料性能和生产控制变化频繁，当熟料煅烧过程中出现问题时，难以及时判断提出解决措施，需要通过多次实践来解决，往往给生产带来损失，尤其是近年来随着工业废弃物、城市生活垃圾、污泥大量用作水泥生产原燃料，这种现象更为频繁。

水泥熟料烧成系统耐火材料的使用寿命除与其性能有关外，更多地与生产操作直接关联。熟料煅烧过程中，在高温状态下各种元素化合物呈现的固、液、气相对熟料的形成及其质量起到关键作用，所产生的热应力、热化学侵蚀、热机械应力在长期生产过程中对耐火衬体及耐热金属部件造成损坏。但也正是这些应力损坏，促进了耐火材料及所配用金属部件的性能优化及其应用技术的进展。

水泥熟料煅烧是由矿山开采、原料均化、生料制备等多条环链组成，环链上的任何一个结点变化，必然引起相关结点的变化，关键结点变化甚至影响整条环链和周边环链的变化，各条环链的相互影响从某种意义上讲类似人体，但比人体简单。正如人们平日生活必须保养，才能健康，水泥生产同样必须做好从原料进厂到熟料煅烧整个工艺过程的控制和装备维护，才能得以实现低消耗生产高质量的熟料。而当生产发生事故时，像医生治病一样，必须通过各种检测装置测得正常生产和事故情况的数据，依据基础理论和实践经验分析判断事故原因，提出措施，在较短时间内使生产恢复正常。

本书基于水泥生产相关理论和笔者长期生产实践经验，对原燃料性能、生料制备状况、熟料煅烧过程预热器系统和回转窑系统结皮、结圈、结块以及“飞砂”、“雪人”等现象与耐火衬料、金属部件的使用状况及损坏情况进行了阐述，对熟料煅烧过程中熔体（液相）温度、黏度等性能和烟气温度、成分对衬体产生的热应力、热化学侵蚀、热机械应力进行了综合分析，提出了改进措施。

水泥工业发展的趋势是大量使用工业废弃物等作为代用原燃料和混合材，以进一步节约资源、减少 CO_2 排放，本书对使用工业废弃物对生产的影响及缓解措施均作了简介，供有关水泥生产厂家参考，还可供耐火材料厂家开发新产品参考。

我国水泥产量和生产线数量以及所用耐火材料消耗量长期高居世界首位，本书若能对改善生产起到微薄作用，笔者心已足矣！

本书在撰写过程中，得到许多同事和专业人士的帮助，在此，特别感谢汪海滨的帮助，同时十分感谢参与校审的倪金妹、赵锦花和协助解决有关资料的白波、朱金波、郭修智、刘旭、王伟、唐新宇以及参与打字及图形处理的樊立彦、张伟、郑金召、陈海华等人。

限于水平，书中难免有不妥之处，恳请读者指正。

编著者

2010年12月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国预分解窑耐火材料发展历程	1
一、预分解窑的发展历程	1
二、耐火材料的发展过程	3
第二节 水泥生产技术进展对耐火材料性能的需求	4
一、传统回转窑	4
二、预热器窑	4
三、预分解窑	5
四、预分解窑技术进展	6
参考文献	8
第二章 水泥熟料的形成	9
第一节 生料	9
一、主要化学成分和次要化学成分	9
二、化学成分对熟料煅烧的影响	10
三、石灰石原料性能	11
四、二氧化硅矿物的选用	14
五、铝、铁氧化物对熟料熔体等的影响	16
六、氧化镁与熟料煅烧及水泥性能	18
七、生料均化	20
第二节 水泥熟料的形成过程	25
一、碳酸钙的分解	26
二、固相反应	27
三、熔体与熟料烧结	28
四、熟料熔体的性质	29
五、熟料颗粒结构的形成	36
六、二氧化硅与熟料煅烧	37
七、游离氧化钙	39
八、熟料的微细结构	42
第三节 熟料在窑内的煅烧过程	46
一、熟料率值及矿物组成	46
二、生料的易烧性	49
三、熟料煅烧温度	50
四、熟料熔体性质	51
五、预分解窑内各带的划分	51
六、预分解窑内熟料的形成过程	52

第四节 烧成系统的物料循环	53
一、物料的熔融温度	54
二、氯化物循环	58
三、硫化物循环	59
四、碱化合物循环	61
第五节 结皮、结块、结圈、窑皮、“飞砂”、“雪人”等形成机理及减缓措施	62
一、结皮、结圈、结块的形成机理	62
二、预热器系统结皮堵塞	63
三、回转窑分解带长厚窑皮、结圈、结块	67
四、烧成带窑皮、结圈	69
五、“飞砂”、“雪人”熟料	78
第六节 燃料燃烧	85
一、煤粉的燃烧过程	85
二、燃煤性能	85
三、回转窑内燃料燃烧特性	89
四、燃烧的物理性能	92
五、过剩空气	96
六、火焰形状与传热	98
七、理论火焰温度	98
第七节 回转窑燃烧器	99
一、燃烧器设计	99
二、旋流强度	101
三、火焰稳定性	101
四、燃烧器的型式	102
五、火焰的形状和控制	108
参考文献	110
第三章 耐火衬料和金属部件承受应力及损坏	113
第一节 热应力	113
一、衬料损坏状况	113
二、熟料率值与热应力	115
三、热应力判断因素	115
四、烧成带热负荷	117
五、热温差应力	117
第二节 化学侵蚀	118
一、原燃料成分	118
二、化合物的循环	118
三、衬体的化学侵蚀	118
四、化学侵蚀损坏状况	120
五、碱、氯、硫与衬料成分的化学反应	122
六、氧化-还原反应	126

第三节 机械应力	127
一、衬体损坏状况	127
二、衬体承受的机械应力	130
第四节 衬体承受应力的综合分析	139
一、烧成系统的工况温度	139
二、预热器、分解炉系统	140
三、三次风管系统	143
四、窑门罩	144
五、燃烧器	144
六、篦冷机	145
七、回转窑	146
第五节 金属部件的损坏	151
一、损坏应力种类	152
二、金属损坏原理	152
三、金属部件承受的应力	156
四、金属的保护	159
第六节 工业废物作原燃料对耐火衬料的影响	164
一、化合物的种类和数量	165
二、衬料的损坏	166
三、生料率值波动	167
四、燃料性能波动	168
五、衬砖损坏实例	171
参考文献	174
第四章 耐火材料品种的选用	175
第一节 耐火材料的性能	175
一、熔点	175
二、化学成分及矿物组成	176
三、结构性能	177
四、力学性质	178
五、热性能	180
第二节 硅铝系制品	182
一、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系二元相图	182
二、使用范围	184
三、系列耐碱砖	185
四、系列高铝砖	187
第三节 不定形耐火材料	187
一、低水泥耐火浇注料	188
二、使用状况及施工方式	189
三、耐碱浇注料	190
四、高性能耐火浇注料	191

五、轻质耐碱隔热浇注料	194
第四节 隔热耐火材料	195
一、概述	195
二、组织结构及特点	195
三、主要性能	196
四、隔热材料的工况需求	199
五、高温硅酸钙板	199
六、超细 SiO_2 微粉复合隔热材料	202
七、高铝质隔热材料	204
第五节 火泥	207
一、火泥	207
二、高温火泥	208
第六节 碱性耐火材料制品	209
一、碱性砖性能及组成	209
二、阻抗体技术进展	211
三、改性剂技术进展	213
四、直接接合镁铬砖	218
五、镁铝尖晶石砖	220
六、镁铁、镁锰尖晶石砖	221
七、镁铅砖	222
八、白云石砖	222
九、我国预分解窑用碱性砖的发展历程	222
第七节 抗碱侵蚀耐火材料技术进展	226
一、 SiC 抗结皮耐火材料	227
二、锆质抗结皮耐火材料	231
三、 SiO_2 浸渍高铝砖	233
四、低 SiC 、 ZrO_2 含量耐火浇注料	234
第八节 碱性砖的技术进展	236
一、高比例镁铝尖晶石砖	236
二、镁橄榄石砖	238
三、铝铁尖晶石砖	240
四、微细孔径低孔隙率碱性砖	241
第九节 碱性砖的技术性能比较	243
一、热应力、热化学应力、热机械应力大小的判断公式	243
二、碱性砖性能的对比方法	246
参考文献	249
第五章 衬料设计、施工、烘干、升温和日常操作运行控制	251
第一节 衬料设计	251
一、材质选用	251
二、砖型配置	256

三、筒体散热	262
四、衬体牢固性	265
五、衬料设计的发展方向	265
第二节 衬料砌筑施工	265
一、衬料的订货、验收、存放及检测	266
二、衬料砌筑施工	266
三、施工验收	270
第三节 耐火衬体的烘干和升温	270
一、衬体烘干	270
二、衬体升温	271
三、烘干、升温曲线	272
第四节 日常操作运行控制	273
一、减缓衬体受力	274
二、减少生产事故	274
三、稳定窑的热工制度	274
参考文献	274
第六章 预分解窑耐火材料的发展趋势	275
第一节 耐火材料需求量	275
一、水泥产量发展状况	275
二、耐火材料消耗状况	276
第二节 耐火材料的技术进展	280
一、预分解窑技术进展	280
二、耐火材料的发展趋势	282
参考文献	283

第一章 绪论

第一节 我国预分解窑耐火材料发展历程

半个世纪以来,世界水泥总产量从1950年的1.3亿吨增加到2008年的28.6亿吨(熟料约22.8亿吨),预计在2010年世界经济复苏后,仍会出现较大的增长。世界水泥工业所消耗的耐火材料2005年为185万吨,其中碱性砖消耗量为115万吨,非碱性的耐火材料为70万吨。

20世纪水泥工业有两次重大的技术突破,第一次是传统回转窑在20世纪初得到全面推广,第二次是预分解技术的出现,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、现代化的发展,而与水泥工业配套的耐火材料,也反映出此发展趋势。简略地说,20世纪初至50年代是以黏土、高铝质耐火材料来满足以湿法窑为主的传统回转窑的生产和发展。20世纪50年代以后,上述材料的性能进一步完善和提高,出现了镁质、特种高铝质以及各种成分的耐火浇注料来适应悬浮预热,随着预分解窑技术的发展带来新的技术需求使这些产品性能进一步得到优化、提高。进入21世纪,随着工业废物作水泥生产的代用原燃料的数量逐年增加,一些碱、氯、硫的化合物对水泥熟料生产和耐火材料带来了危害,促进了抗碱、氯、硫侵蚀的高性能镁质和高铝质耐火材料技术的发展,目前这种趋势仍在进行中。

一、预分解窑的发展历程

我国水泥工业一直以传统的回转窑为主导,20世纪60年代以前是以湿法窑为主,60年代起立窑迅速发展,限于历史条件,50年代在国际上出现且60年代大量发展的预热器窑在我国没有得到发展。20世纪70年代中期,在预热器技术的基础上,国际上出现了新型干法预分解窑生产技术,产量成倍增长,热耗有较大下降,迅速在世界范围内发展。原国家建材局随即投入资金,组织人员进行开发,20世纪70年代中期至80年代初期为熟料烧成生产线实验研究开发阶段,其成果是投产了性能较差的几台小型预分解窑生产线,难于推广应用。直至20世纪80年代初,才有少量生产线投入生产,其规模为400~1000t/d,总产能不足150万吨熟料。由于这些生产线的生料制备均为传统的干法窑生料制备,难于满足预分解窑的生产需求,以至于投产后工艺、装备事故不断,产品质量较差,运转率低,热耗高,产量低,经济效益差,难于大量推广应用。为改变上述状况,必须开展水泥生产过程中从生料制备至熟料煅烧的全部工艺装备技术,才能保证预分解窑生产线正常生产。

从 20 世纪 80 年代起,我国水泥工业在国内开发成果的基础上,吸收了引进的大型生产线的技术,进行了 10 余项工艺、装备、自动化技术的试验研究和百余项装备的开发设计。上述集成创新的工艺装备技术集中在江西水泥厂 2000t/d 新型干法生产线上,投产后被誉为我国水泥工业发展史的重要里程碑。该生产线虽然达到科技攻关要求,但产量等主要技术指标距设计要求仍有较大差距,一些关键装备及其附属部件常出事故,影响生产。为此,又进行了 10 余项水泥生产关键装备制造专利技术的引进,消化吸收,在国内试制后,于 20 世纪 90 年代中期在吉林双阳水泥厂 2000t/d 生产线上投入生产,做到生产线投产即达产的目标。

吉林双阳 2000t/d 级生产线虽然生产技术得以完善,但存在产量低,基建投资偏高的问题。20 世纪 90 年代中期起,在引进装备专利制造、消化、吸收基础上,进行了再创新,开展了生料系统的单段破碎、均化装备及辊式生料磨系统装备和烧成系统的预热器分解炉、篦冷机、燃烧器等技术装备的开发。上述开发的工艺装备确保 20 世纪 90 年代后期投产的 2000t/d 级生产线产量增至 2500t/d 以上,运转率大幅提高,热耗下降了 8%~10%,电耗也有较大幅度下降,且水泥产量质量优良,而投资仅增加 5%~8%。由于产量大幅增加,促使单位投资大幅下降,这意味着新型干法预分解窑生产技术已全面成熟,而且单位熟料投资较传统的回转窑、立窑均低,且性价比高,经济效益好,为 21 世纪新型干法预分解窑生产技术和产能的发展打了坚实的基础。

21 世纪为我国预分解窑大发展的时期,随着国内经济的高速发展,为满足市场的需求,开发并兴建了大型 3000t/d 级、4000t/d 级、5000t/d 级、6000t/d 级、10000t/d 级系列国产装备生产线,目前已投入生产的预分解窑熟料生产线已超过 1000 台。预分解窑熟料产能从 2000 年的 0.64 亿吨,增至 2008 年的 6.51 亿吨(水泥产量 8.68 亿吨),见表 1-1,这个数量超出世界上任何一个洲的水泥产量,与此同时我国新型干法预分解窑生产技术装备也大量输出至海外,占 2007 年世界兴建水泥生产线总产能的 35%以上。

表 1-1 中国和世界水泥年产量(1950~2008 年) 单位:百万吨

项目	1950 年	1960 年	1970 年	1980 年	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2006 年	2008 年
中国水泥产量	1.41	15.65	25.75	79.86	145.95	209.71	475.61	597	1064	1235	1400
中国预分解窑水泥产量				0.59	4.62	12.80	32.00	55.00	473.0	517.4	868
世界水泥产量	132	302	583	866	930	1154	1421	1640	2323	2571	2860

注:中国水泥产量将立窑统计在内,而世界水泥产量则未统计立窑产量。

2008 年我国水泥产能 18.7 亿吨,其中新型干法水泥 11 亿吨,水泥产量 14 亿吨,人均年消费量超过 1050kg,预分解窑水泥产量约 8.68 亿吨,人均消费量低于 670kg,尚有一定的发展空间。2009 年在建水泥生产线 418 条,产能 6.2 亿吨,另外还有已核准尚未开工的生产线 147 条,产能 2.1 亿吨,这些生产线全部建成后,预分解窑水泥产能将达到 19.3 亿吨,产能将出现严重过剩。为此,水泥工业将严格控制新增水泥产能,执行等量淘汰落后产能的原则,对尚未开工水泥项目一律暂停建设并进行一次认真清理,支持企业在现有生产线上进行余热发电、粉磨系统节能改造和处置工业废物以及城市污泥与垃圾等综合利用。新项目水泥熟料烧成热耗要低于 105kg 标准煤/t 熟料,水泥综合电耗小于 90kW·h/t 水泥,石灰石储量服务年限必须满足 30 年以上,废气粉尘排放浓度小于

50mg/m³ (标准状况)。这意味着国内水泥工业生产将从数量增加转为质量提高,对生产提出更高的要求。同年国际上水泥总量估计为 28.6 亿吨,人均消费总量低于 300kg,尚较大的发展空间,只有通过技术进步,才能在国际市场上得到发展。也就是说,新型干法水泥在今后较长的时期内,国内还要发展,而国际上还有更为广阔的市场,新型干法水泥生产技术必将进一步提高。

二、耐火材料的发展过程

耐火材料是保证熟料煅烧正常生产的重要原材料,预分解窑的发展促进了耐火材料的生产和技术进展。

在早期试验研究发展阶段,由于生产线规模小,使用的耐火材料都是用于传统回转窑的黏土质和高铝质材料。20 世纪 80 年代初期,冀东、宁国等大型新型干法生产线引进时,限于当时的技术水平和国内缺乏预分解窑所需的品种,以至于整条生产线所需的耐火材料及备品全套引进。20 世纪 80 年代中期兴建的江西水泥厂 2000t/d 生产线上使用的耐火材料由中国建筑材料科学研究院耐火所负责产品开发,天津水泥工业设计研究院负责全套烧成生产线耐火衬料的图纸设计,首次对全系统进行配套使用,虽然当时材料的品种不全,且性能不够完善,但在品种开发、窑衬设计、工程施工及生产应用等方面,取得了不同程度的认识和提高。

随着预分解窑生产及技术发展,耐火材料的品种和质量也随之提高和完善,产能也相应增加,至 20 世纪 90 年代中期,形成了耐碱砖系列产品,耐碱浇注料系列产品,刚玉质和高铝质低水泥耐火浇注料产品,硅酸钙板及硅藻土系列隔热材料产品,部分碱性砖系列产品,上述产品在近年来的预分解窑生产大发展的过程中,性能得到进一步优化提高,与此同时,还开发出一些新的品种来满足生产的需求。目前,碱性砖可以满足 5000t/d 级及其以下规模生产线的需求,高铝质、黏土质的材料和耐火浇注料以及隔热衬料完全满足 12000t/d 级及其以下规模生产线的需求,有些还出口到国外。在此期间,耐火衬料的设计由初期的全套引进,通过消化吸收、生产实践及优化提高,逐步转为自行设计,已完全能承担不同规模的全套预分解窑生产线的图纸设计。此外,通过上千条生产线的现场施工,施工技术在实践过程中全面提高,目前不仅承担国内不同规模的预分解窑耐火衬料施工图的设计,还随装备大量出口至国外,可以说在设计 and 施工方面已能完全胜任生产发展的需求。

20 世纪 90 年代中期,在原国家建材局组织下,由研究、设计、施工、耐火材料制造、水泥生产厂家的有关人员通过两年的努力,完成了《水泥回转窑用耐火材料的使用规程》(以下简称《规程》)的编制,由原国家建材局于 1995 年 8 月审定颁布,《规程》对预分解窑用耐火材料的生产供应、设计施工和使用维护等各个环节都提出了明确的要求,同时明确在全国范围内预分解窑使用的耐火砖尺寸与国际接轨,采用国际通用的 VDZ 和 ISO 砖型。这对延长窑衬的使用寿命,提高熟料的产量和质量,降低能源和耐火材料的消耗量,以及耐火砖的标准化生产,降低生产成本,便于维护,保护设备安全,提高水泥生产的经济效益,起到指导作用,为预分解窑用耐火材料的生产技术发展作出了贡献。

改革开放的 30 余年来,我国工业迅速发展,钢铁和水泥的产量均居世界首位,耐火材料的生产能力、生产量和消耗量也稳居世界首位。我国耐火材料工业和水泥工业一样也

是从“大而不强”，逐步转入“又大又强”的过程中。进入 21 世纪，随着水泥预分解窑生产技术和产能在我国快速增长，与之配套的耐火材料工业在我国迅速的发展，质量和产能不断提高，从 2006 年以后 5000t/d 回转窑内衬完成实施国产化配置，一些产品的技术性能已接近国际先进水平，有些还出口至国外。从总体来看，和国外优质产品相比，技术仍存在差距，目前 5000t/d 生产线烧成带和过渡带上用的碱性砖，回转窑分解带、窑门罩、篦冷机进料口部位的特种高铝质耐火砖，以及硅酸钙板、耐碱系列等产品性能有待进一步提高。此外，适用于工业废物作原燃料所生产的高化学应力的耐火材料还有待开发。

随着预分解窑技术进展和生产能力的进一步提高，与之配套的耐火材料必将取得进展，深信在较短的时间内，我国的预分解窑用耐火材料不仅在数量上，而且在技术性能上都将位居世界前列。

第二节 水泥生产技术进展对 耐火材料性能的需求

一、传统回转窑

早期的传统回转窑是湿法窑和干法长窑、余热锅炉窑，热耗均在 $4.18 \times 1500 \text{ kJ/kg}$ 熟料以上，熟料煅烧温度一般低于 1350°C ，烧成带用高铝砖，其余部分使用黏土砖。随着技术的进展，出现了利用窑尾废气的立波尔加热机以及配套的冷却机，热耗降低至 $4.18 \times 1200 \text{ kJ/kg}$ 熟料左右，熟料煅烧温度超过 1350°C ，一般的高铝砖难以满足生产需求，必须具有较高的耐火度和抗熟料化学侵蚀及抗热震性能强的新品种耐火砖，此时，出现了特种高铝砖、磷酸盐砖和普通镁铬砖，新品种耐火砖的出现，不仅满足了立波尔窑的生产，还进一步提高了传统窑衬料的使用周期，因此得以广泛推广和应用。

二、预热器窑

20 世纪 50 年代初投入市场的预热器窑，其生产工艺呈现了一系列的特点，提出了与传统回转窑使用的耐火材料不同的需求。其主要不同之处是热耗降至 3762 (4.18×900) kJ/kg 熟料，熟料煅烧温度接近和超过 1400°C ，在高温情况下，熟料中的钙硅熔融物和碱硫化物与 Al_2O_3 形成低温共熔体，在工况苛刻的窑上，几天之内就可将高铝质衬砖损坏，只得在窑内大量使用性能高的碱性砖，其长度为 $(5 \sim 8)D$ 。另一个差别是碱、硫、氯挥发组分在系统内挥发循环，衬料受富集气体和结皮物的侵蚀，形成膨胀性碱裂损坏，在上述易结皮部位，采用了系列耐碱侵蚀的耐碱砖和耐碱浇注料。此外，预热器系统散热面积增大，为减少筒体散热损失，保持窑内热工制度正常和稳定，出现了热导率低、工况温度高、容重轻的硬质硅酸钙板隔热材料和性能优良的隔热砖。

20 世纪 70 年代中期，在预热器窑生产的基础上，出现了预分解窑，在窑尾预热器系统内增设分解炉，从冷却机抽热风通过三次风管入分解炉内作燃烧空气。分解炉内燃料提供的热量供生料分解用，熟料煅烧的热量由窑头燃烧器提供。由于生料分解所需的热量较熟料煅烧的热量多，在生产过程中，约 60% 的燃料由分解炉提供，而约 40% 的燃料由窑头燃烧器供应，因而在同一直径的窑，产量几乎增加了 1 倍以上，热耗相应降低，上述工

艺性能的变化，促使预分解窑对耐火材料提出新的技术要求。

三、预分解窑

新型预分解窑在生产工艺上有一系列特点，对耐火材料提出了一系列不同于传统回转窑的新要求。

1. 窑温更高

预分解窑配用热回收效率约 70% 以上的厚层篦式冷却机和一次风比例少的多风道燃烧器，窑头又加强了密闭和隔热，燃料燃烧充分，火焰集中，离窑熟料温度高达 1400℃ 以上，入窑二次风温可达 1050℃，系统内上下过渡带、烧成带、窑门罩、冷却机进料部位和高温区以及燃烧器前端等部位的工作温度远高于传统窑上的相应部位。因此，窑的烧成带及上下过渡带必须使用碱性砖；窑后端的分解带则使用既耐温又抗碱侵蚀的特种高铝质耐火材料；窑门罩、冷却机前端以及燃烧器等均需应提高耐火衬料的性能。

2. 窑速加快

传统回转窑的转速一般只有 60~70r/h；早期的预分解窑提高至 180~210r/h，个别高达 240r/h。在高转速、大直径和高温度的大型窑上，窑衬所受热应力、机械应力的综合破坏效应比传统窑上大得多。这就要求在窑转动过程中，窑衬无论在冷态和热态下均具有足够强度和稳定性。所以，在耐火材料制造和窑衬设计中都要保证更严的精确度，并要求更高的施工技术。

3. 碱等挥发性组分的侵蚀

预分解窑系统内，碱的硫酸盐和氯化物等组分挥发凝聚，反复循环，导致窑料中这些组分的富集。和入窑生料相比，最热级预热器的窑料中 R_2O 、 SO_3 和 Cl^- 的含量往往分别增达 5 倍、3~5 倍和 80~100 倍，相应部位窑气中这些组分的含量也大增。在最热部位的两级预热器、分解炉、上升烟道、喂料斜坡和窑筒体后部 1/3 的部位，即所有砖面温度为 800~1200℃ 的部位（当原燃料含氯高时更扩及 600~1200℃ 的部位），窑料中形成低熔融温度的矿物，裹带其余窑料在料面上形成结皮，严重时干扰窑的正常运行，必须停窑处置。所用普通黏土砖和高铝砖受来自窑料和窑气渗入砖内的碱化物等的侵蚀，体积产生膨胀，使砖“碱裂”损坏。实践证明窑料含有的 $SO_3 > 1\%$ 且含 $Cl > 0.015\%$ 时，这种现象就会发生。

当出窑熟料中碱硫化合物的含量过高时，冷却机热端、窑门罩和三次风管中的普通黏土砖和高铝砖就会发生“碱裂”损坏。

4. 耐磨性能

预分解窑生产的特点就是细颗粒熟料（俗称飞砂料）多，在生产过程中随二次风返回窑内影响生产，大量的飞砂料随三次风管系统进入分解炉，对衬料产生严重磨蚀。在篦冷机与熟料接触的部位，也会产生严重的磨蚀，这些均对衬砌的耐火衬体提出抗磨蚀要求。

5. 系统结构复杂

预分解窑和预热器窑系统的结构极为复杂，所需求的品种和砖型相应复杂，这给耐火材料的生产、贮存和施工都带来困难，提出了砖型和窑衬设计简化及标准化的要求。为减少生产和施工的困难，使生产成本降低，便于保证火砖和砌筑后窑衬的质量，在耐火材料图纸设计时，应尽量简化砖型。20 世纪 80 年代引进的冀东厂烧成系统砖型有 85 种，现

国内设计的预分解窑生产线砖型经简化后已降至 30 种以下，见表 1-2。

表 1-2 烧成系统不动设备耐火砖砖型数量 单位：种

生产线	预热器分解炉系统	三次风管	篦冷机	窑门罩	合计
冀东	59		16	10	85
江西	35	13	15	11	74
现图纸	13	13	0	0	26

6. 筒体散热

预分解窑的生产工艺先进，但散热面积较大，见表 1-3。早期的 2000t/d 级生产线兴建时，因国内尚不生产热导率低的高温硅酸钙板，不得不采用热导率高的隔热砖，以至于投产后所测得的单位筒体散热损失高达 $4.18 \times 90 \text{kJ/kg}$ 熟料。随着国产硅酸钙板等优质隔热材料的开发，在预分解烧成系统中大量应用，筒体散热损失已下降至 $4.18 \times 60 \text{kJ/kg}$ 以下，较早期熟料降低 $4.18 \times 30 \text{kJ/kg}$ 熟料以上，按 2000t/d 级产能计算，每天节约 8.571t 标准煤粉，年节约 2650t，年减少 6625t CO_2 排放。

表 1-3 2500~5000t/d 级生产线筒体散热面积

项 目	预热器分解炉系统/ m^2	三次风管/ m^2	篦冷机/ m^2	窑门/ m^2	回转窑/ m^2	合计/ m^2	单位熟料面积/ (m^2/d)
2500t/d 单系列	2884	470	636	163	764	4907	1.9628
2500t/d 双系列	2890	470	636	163	754	4913	1.9652
5000t/d 双系列	4827	925	824	215	1086	7877	1.5754

四、预分解窑技术进展

1. 技术进展情况

预分解窑出现以来，生产技术不断发展和完善，生产规模逐年增大，目前新建的生产线生产能力主要为 4000~7000t/d，大型生产线为 10000~12000t/d。系统内的预热器、分解炉系统的性能不断完善和提高。回转窑长径比逐年下降，二支承窑大量出现，容积产量逐年上升。高效率的篦冷机逐步取代厚层篦冷机，又被效率更高的无漏料纵向运行冷却机取代。冲量和动量更大的多风道燃烧器火焰集中，烟气温度更高，可适用于烧质量差的燃煤和工业废燃料。由上述装备组成的烧成系统热耗，20 世纪 70 年代一般为 $4.18 \times (800 \sim 850) \text{kJ/kg}$ 熟料，筒体散热损失为 $4.18 \times 90 \text{kJ/kg}$ 熟料，窑运转率约 85%，下降至目前热耗低于 $4.18 \times 700 \text{kJ/kg}$ 熟料、筒体散热损失低于 $4.18 \times 60 \text{kJ/kg}$ 熟料以下，窑运转率提高至 92%~95%。

近年来，生态化水泥生产技术的进展在预分解窑上尤为突出，不同行业的工业废物大量地作为水泥原燃料，低品位燃料也大量应用，一些有害元素和重金属元素也随之带入系统内。此外，水泥生产过程中， NO_x 、 SO_x 等有害气体及粉尘排放的控制，以及六价铬造成水污染的限制，都对耐火材料提出了技术需求。

2. 不动设备衬料

一是与早期的系统相比，窑尾废气温度提高 100~150℃ 以上，碱、硫、氯等结皮阻塞的现象和部位均有所增加。采用工业废燃料和低品位燃煤后，有害物进一步增加，结皮阻塞现象进一步加剧。在易结皮部位的衬料，不仅考虑抗碱、氯、硫等有害物的侵蚀及防

结皮措施，还应考虑与衬料带来配套的金属锚钉和锚固件以及金属筒体承受高温和抗碱、硫、氯侵蚀的工况条件。

二是系统热耗逐年下降，燃料燃烧所需的二次空气量相应减少，再加上冷却机热效率的提高，入窑的二次空气温度进一步增加，以及多风道燃烧器的使用，使燃烧器前端、窑门罩、篦冷机进料口部位的温度有较大提高，上述部位衬料不仅承受较高温度的熟料和烟气及气流温度的热应力，还要承受熔体（液相）熟料和粉尘熟料的侵蚀，更为严重的是遭受表面带熔体（液相）的高温熟料的堆“雪人”的侵蚀。

三是燃料价格上涨，一些以往不能在水泥工业应用的燃煤，通过技术进步，现已在分解炉内大量应用，如低挥发分燃煤燃点温度高，且颗粒细，再加上三风道燃烧器的使用，易在分解炉内造成局部高温，这对分解炉的工作层及隔热层材料的使用温度及隔热性能提出了更高的技术要求。

四是窑的产量持续增加，预热器的规格和级数均在增加，预热器塔架所承受的金属筒体和衬料的负荷相应增大，必须减轻衬料重量来降低负荷及土建投资。一种措施是在保持衬料性能的前提下，降低衬料容重；另一种措施是适当减少工作层衬料厚度，这对衬砖的力学性能提出了更高的要求。

五是随着熟料质量要求的提高，煅烧温度相应提高，生料的配料率值相应增加，熟料在煅烧过程中飞砂料相应增加，这对三次风管、窑门、篦冷机内与熟料接触部位的衬体的磨蚀提出了更高的要求。

六是为减少 NO_x 排放量，在分解炉中采用分级煅烧，即燃料在局部还原气氛内燃烧，衬料内 Fe_2O_3 易受还原气氛影响还原成二价铁，砖内的铁含量有所限制。

3. 回转窑衬体

一是窑产量增加，窑径加大，窑内烧成带衬砖所承受的单位热负荷随产量增加而增大，也易增大椭圆度对衬砖所承受的热机械应力。

二是窑速进一步增大，目前最高转速高达 330r/h，运转中易使火砖滑动，产生挤压损坏，这对窑内火砖的制造精度和施工质量提出更高的要求。

三是熟料质量要求愈来愈高，熟料中的石灰饱和系数 KH 、硅酸率 n 的率值进一步增加，熟料的煅烧温度也进一步增加。窑料中的熔体量、熔体表面张力、熔体黏度均发生变化，对窑皮的性能也有影响。上述情况对窑内烧成带和上下过渡带使用的耐火砖以及窑口、窑门罩、回转窑内其他高温部位的衬砖提出更高的温度要求，也对衬砖的高温强度、抗机械应力以及粘挂窑皮的性能提出要求。

四是通过技术进步，一些生产厂家长期使用 20%~30% 挥发分的燃煤，改为大量使用挥发分低于 10% 的无烟煤。此类煤粉颗粒细，且燃点高，火焰集中，对轮带附近烧成带耐火砖的抗机械应力提出了更高的需求。由于燃煤的挥发分低，没有完全燃烧的煤粉在燃烧的过程中沉积在没有窑皮的砖面上，造成耐火砖剥落。此外，含硫较高的燃煤在还原气氛下，由二氧化硫和氧化钙结合的硫酸钙分解，重新生成二氧化硫，在回转窑后部分解带易与窑料一起结厚窑皮、结圈、结大颗粒熟料，并对该部位窑衬和金属筒体造成化学侵蚀，相应对耐火衬料和金属材料提出抗化学侵蚀要求。

五是工业废物作原燃料的影响。20 世纪 80 年代初以来，工业发达国家逐步加大工业废物和市政垃圾作水泥原燃料的应用，目前个别国家原料代用超过 260kg/t 水泥，代用燃

料达到煅烧熟料热值的 60%，这种趋势仍在扩大。必须看到工业废物作原燃料对生产控制和熟料质量带来一定的影响。工业废物等作原燃料的品种多，数量少，成分难于均匀，入窑的原燃料成分波动大，硫、氯、碱等有害物成分及数量多，致使窑料的率值、生料易烧性、熔体量、熔体黏度等频繁变化，在生产操作时，需经常调整操作参数，以保证熟料质量稳定，但事实上很难做到，其结果是：

① 原燃料成分波动，熟料质量难以稳定；

② 生产中易出现不完全燃烧，增加了硫、氯、碱等有害元素化合物的循环，易出现窑尾后结圈、长厚窑皮及预热器系统结皮堵塞等现象；

③ 熔体量、熔体黏度的频繁变化，易使烧成带窑皮厚薄变化及坍塌；

④ 代用燃料性能不一，其火焰的位置也不一致，相应增加了烧成带长度的变化和 unstable。

上述情况对烧成系统内耐火砖和金属部件产生严重的损坏，必须提高性能才能满足生产需求。近年来一些耐火材料的性能，如耐火度、抗热震、抗硫碱侵蚀及抗机械应力均有较大提高。

六是六价铬的影响。水泥窑内大量使用三价的镁铬砖，在窑内与含碱的窑气作用后还原成极易溶于水的六价铬，工业化国家在 20 世纪 90 年代起就制定保护水源的限制值，规定饮用水限制值为 $0.05\text{mgCr(Ⅵ)}/\text{L}$ ，河流为 $0.30\text{mgCr(Ⅵ)}/\text{L}$ ，污水为 $0.50\text{mgCr(Ⅵ)}/\text{L}$ 。上述限制值迫使工业化国家停止使用含铬的耐火衬料。进入 21 世纪，又制定了限制水泥中含六价铬的数量，明确禁止使用和销售 Cr(Ⅵ) 含量超过 0.0002% 的水泥及拌和物，并制定了测试方法，上述要求进一步限制了镁铬砖的使用，必须开发适用于挂窑皮的新品种的碱性耐火砖。

参 考 文 献

- [1] 王燕谋编著. 中国水泥发展史. 北京：中国建材工业出版社，2005.
- [2] 雷前治，张建新. 甲子沧桑书巨变，盛世水泥铸辉煌. 中国水泥，2009，88（9）：9-13，89（10）：8-13.
- [3] 宋寿顺. 天津院的技术创新与我国水泥工业的发展. 水泥技术，2003，110（2）：7-10.
- [4] 陈友德. 水泥生产技术创新和耐火材料的发展趋势. 中国水泥，2002，2（7）：45-47，3（8）：46-47，4（9）：28-31.
- [5] 倪金妹. 万年型 2000t/d 熟料预分解系统的衬料设计. 水泥技术，1986，8（3）：18-23.
- [6] 陆纯煊，丁抗生，曾大凡等编著. 水泥回转窑用耐火材料使用规程（试行）及参考资料文集. 北京：水泥回转窑耐火材料使用规程编写组，1995.