

新型干法水泥熟料烧成工艺优化与能耗降低研究

张立军

焦作千业水泥有限责任公司 河南 焦作 454171

摘要：新型干法水泥熟料烧成环节是水泥生产能耗管控的核心点位，普遍存在热耗、电耗偏高的生产问题。本文以焦作千业水泥生产线实际工况为依托，系统分析熟料烧成工艺流程、设备运行原理及能耗构成，梳理原料工况、预热分解参数、篦冷机运行及系统散热等关键能耗影响因素。从原料预处理、预热分解系统、回转窑制度、篦冷机换热四个维度设计针对性工艺优化方案，配套余热改造、低氮燃烧、智能变频及密封保温等辅助节能技术。通过全方位工艺优化与技术适配，可有效改善窑内热工制度，减少无效热损耗与设备电耗，对水泥生产线节能降本、提质增效具备实际参考价值。

关键词：新型干法水泥；熟料烧成；工艺优化；方案设计；能耗降低

引言：水泥行业属于高耗能、高排放基础产业，熟料烧成工序能耗占整条生产线能耗比重最大，是行业节能降耗改造的重点环节。随着行业产能管控与能耗标准日趋严格，传统粗放式烧成工艺存在的参数匹配不合理、热利用率低、系统损耗大等问题逐步凸显，制约企业生产成本控制与绿色生产发展。为有效解决生产线高能耗痛点，针对性开展烧成工艺优化与能耗降低研究。通过梳理现场生产问题、剖析能耗影响因素、设计落地性较强的优化方案，旨在改善烧成系统运行工况，降低单位熟料能耗，为同类干法水泥生产线节能改造提供实践依据。

1 新型干法水泥熟料烧成工艺及能耗现状分析

1.1 新型干法熟料烧成核心工艺流程

新型干法水泥熟料烧成以悬浮预热、预分解技术为核心，是当前水泥行业主流生产工艺。整体工艺流程连贯紧凑，原材料经配料、粉磨处理后，送入预热器完成多级预热，大幅提升物料初始温度。预热后的物料进入分解炉，在低温环境下完成碳酸盐分解反应，随后送入回转窑进行高温煅烧，生成熟料矿物。最终高温熟料落入篦冷机快速冷却，完成熟料成型。整套工艺实现物料、气流逆向换热，有效提升热利用率，但实际生产中流程匹配度不足易造成能源浪费。

1.2 烧成系统关键设备工作原理

烧成系统核心设备包含预热器、分解炉、回转窑和篦冷机。预热器依托多级旋风筒，利用窑尾高温废气对物料悬浮预热；分解炉通过煤粉燃烧提供热量，保障物料充分分解；回转窑为倾斜旋转设备，依靠高温火焰实现物料烧结、晶型转化；篦冷机以高压冷风穿透熟料层，完成熟料冷却与余热回收，将热量回馈至窑炉系统，是热量循环利用的关键设备。

1.3 生产线能耗构成与测评指标

熟料烧成环节是水泥生产能耗核心，主要分为热耗与电耗两类。热耗以煤粉燃烧耗能为主，占烧成总能耗八成以上，用于物料预热、分解、煅烧；电耗主要来自风机、篦冷机、输送设备运行耗能。行业核心测评指标为熟料综合热耗、单位熟料电耗、废气余热利用率，指标数值直接反映生产线节能水平，也是工艺优化的核心考核依据。

1.4 现阶段烧成工艺能耗偏高问题及成因

目前多数生产线普遍存在能耗偏高问题，核心成因集中在三方面。（1）原料处理不规范，物料粒度不均、配比波动大，导致煅烧受热不均，需额外增加燃料消耗。（2）设备运行参数匹配不合理，预热分解系统换热效率不足，窑内温度、风速控制失衡，热损失严重。（3）系统密封、保温不到位，窑体、管道散热及漏风问题突出，篦冷机余热回收利用率低，大量热能随废气散失，最终造成整体能耗居高不下^[1]。

2 熟料烧成系统能耗影响关键因素

结合新型干法水泥生产线实际运行工况，熟料烧成系统能耗受原料工况、预热分解参数、篦冷机运行状态及系统热损耗四类核心因素管控，各因素相互关联，直接决定生产线能耗指标，具体关键因素如下：（1）原料工况因素。原料的化学成分、配比稳定性及颗粒粒度是能耗基础影响条件。原料中碳酸盐含量波动、杂质成分超标，会增加分解反应热需求。同时，物料粉磨粒度不均匀、粗颗粒占比过高，会导致物料预热分解不充分，窑内煅烧负荷增大。原料含水率过高也会造成预热系统水汽蒸发耗热增加，进一步提升烧成热耗。（2）预热分解系统运行参数。预热器各级风速、风温、料风配

比及分解炉温度、煤粉喂料量是核心管控参数。生产线运行中,各级预热器换热效率失衡、系统拉风过大或过小,会造成废气余热流失、换热不充分。分解炉温度波动、物料停留时间不足,会导致碳酸盐分解率偏低,未分解物料进入回转窑,大幅增加窑内煅烧能耗。(3)窑炉与冷却机运行工况。回转窑煅烧温度、窑速、填充率直接影响熟料烧成质量与能耗。窑速控制不当会造成物料煅烧时间不足或过长,产生无效热耗。篦冷机鼓风量、篦速匹配不合理,会降低熟料急冷效果,余热回收效率下降,高温熟料热量无法有效回供系统,造成热能浪费。(4)系统热损耗因素。烧成系统本体保温破损、筒体漏风、管道密封不严是主要能耗损耗点。窑体、预热器外壳散热超标,系统负压失衡引发冷风渗入,会破坏窑内热工制度,增加燃料消耗,是生产线长期高能耗的重要诱因^[2]。

3 新型干法水泥熟料烧成工艺优化方案设计

3.1 原料预处理与配比优化工艺设计

原料工况稳定是烧成系统低耗运行的基础,针对原料粒度不均、配比波动、含水率偏高等问题,制定精细化优化方案。(1)原料配比精准调控。结合熟料矿物设计要求划定各类原料配比范围,改用在线成分检测设备,每小时取样分析并动态调整配料,稳定生料三率值,减少煅烧参数频繁变动。同时严控原料中碱、硫、氯等有害组分,避免杂质富集影响系统热效率。(2)物料粉磨粒度优化。调整生料磨运行参数与研磨体配置,把控0.08mm方孔筛筛余指标,减少粗颗粒入窑,保证物料比表面积均匀。规范粉磨作业标准,防止过度粉磨,平衡粉磨电耗与烧成能耗。(3)原料含水率管控。完善原料堆场防护设施,对高湿原料进行预烘干,严格控制入窑生料水分,降低水分蒸发产生的潜热损耗,同时减少预热器结皮、堵料故障,保障系统连续运行。

3.2 预热分解系统结构与运行参数优化

预热分解系统是熟料烧成换热的核心环节,针对系统换热效率低、风料配比失衡、分解率不足等问题,从运行参数与局部结构两方面开展优化,提升系统余热利用率。(1)风料配比参数优化。结合生产线负荷,分级调整预热器各级通风量、风速,匹配生料下料量,优化逆向换热效果。杜绝系统拉风过大造成的废气热流失,以及拉风不足导致的物料预热不充分问题。稳定各级预热器出口温度,缩小温度波动区间,保证物料逐级、均匀吸热。(2)分解炉运行工况优化。精准控制分解炉煤粉喷入量与喂料量的匹配度,稳定分解炉恒温区间,保证生料碳酸盐充分分解。针对低负荷生产工况,调整煤

粉喷射角度与分散状态,避免局部高温结焦、低温积料问题,将入窑物料分解率稳定在高标准区间,大幅减轻回转窑煅烧压力。(3)系统结构与积料整改。定期清理预热器旋风筒内壁、管道弯道积灰结皮,疏通换热通道。检查并修复预热器、分解炉连接处密封部件,杜绝冷风渗入、热风外泄问题,稳定系统负压环境,减少热损耗,提升整体换热效率^[3]。

3.3 回转窑烧成工艺制度优化方案

回转窑负责熟料矿物烧成,窑内工况直接影响能耗与产品质量,针对窑速波动、温度失衡、煅烧带偏移等问题制定优化措施。(1)窑温与煅烧带优化。根据来料及熟料状态调整火焰形态与长度,固定高温煅烧带位置,防止煅烧不充分或热量空耗,保证物料顺利完成固相反应与矿物结晶,减少补燃带来的燃料消耗。(2)窑速与物料填充率调控。依据产能设定合理窑速,稳定窑内物料填充率,规避低速过烧、高速欠烧问题,通过标准化参数管控兼顾煅烧质量与能耗指标。(3)窑体保温与密封优化。全面排查筒体保温层,更换破损、脱落的耐火保温材料,降低表面散热。修复窑头、窑尾密封装置,治理漏风、漏料问题,维持窑内热工制度稳定。

3.4 篦冷机冷却换热工艺优化设计

篦冷机兼具熟料冷却与余热回收作用,针对风量分配不合理、篦速匹配差、余热利用率低等问题开展工艺优化。(1)冷却风量精准匹配。取消固定送风模式,按照下料量与熟料温度分区调节各风室风量,高温区域强化通风实现快速冷却,中低温区域适度减风,降低风机无效电耗,减少余热流失。(2)篦速与料层厚度优化。统一料层厚度管控标准,微调篦速保持料层平整均匀,增大冷风与熟料接触面积,提升二次风、三次风温度,依靠余热循环减少煤粉用量。(3)设备故障常态化防控。定期检查篦板、密封结构与风机管路,及时清理积灰堵料,解决偏风、漏风等问题,保障设备稳定运行,持续提升系统余热回收能力,实现烧成系统整体降耗^[4]。

4 烧成工艺节能辅助技术适配与优化

4.1 余热回收利用系统优化改造

窑头、窑尾废气余热是烧成系统主要可回收能源,原有余热系统普遍存在换热效率低、热风浪费、设备积灰堵塞等问题,针对性优化改造如下:(1)优化余热换热装置结构。针对余热锅炉换热管积灰、换热面积不足的问题,更换高效翅片换热管,调整管束排布方式,提升废气与换热介质的接触效率。增设在线清灰装置,定时清理管壁附着粉尘,避免积灰结垢导致的换热系数下降,保障余热稳定回收。(2)规整热风回用路径。对窑尾高

温废气、篦冷机余风管道进行整改,封堵管道旁路漏风点,优化风管走向,减少热风输送过程中的温度损耗。将回收的高温热风精准对接生料烘干、原料预热工序,替代部分燃煤热源,降低烧成系统综合热耗。(3)优化余热负荷匹配。根据生产线产能波动,动态调整余热系统运行负荷,杜绝低负荷工况下余热设备空转、低效运行问题,提升余热资源利用率。

4.2 高效低氮燃烧技术适配与工艺调整

传统煤粉燃烧方式存在燃烧不充分、火焰偏移、高温区集中等问题,既造成燃料浪费,也易产生大量氮氧化物。通过适配高效低氮燃烧技术,同步优化燃烧工艺,实现节能与减排协同。(1)更换低氮燃烧器并精准调试。适配新型多通道低氮燃烧器,调整煤粉风道、旋流风、直流风配比,优化火焰形态与燃烧范围,让煤粉在窑内充分弥散、完全燃烧,减少不完全燃烧产生的燃料损耗,提升燃烧热效率。(2)分级燃烧工艺优化。完善分解炉分级送风、分级送煤制度,控制炉内燃烧温度梯度,规避局部高温过热现象。合理控制煤粉燃烧速率,延长燃料燃烧反应时长,杜绝瞬时燃烧放热过快、热量散失严重的问题,稳定炉内热工环境。(3)燃煤适配调整。根据燃烧设备工况,筛选适配细度、挥发分的燃煤原料,杜绝劣质煤、细度超标煤粉入炉,从源头保障燃烧效率,降低单位熟料煤耗。

4.3 智能化温控与变频节能技术融合应用

传统生产线多为人工手动调控设备负荷,风机、电机长期工频运行,温控精度不足,无效电耗偏高。引入智能温控与变频技术,实现设备精准化、低耗化运行。(1)智能温控系统升级。搭建烧成系统实时温度监测体系,在预热器、分解炉、回转窑、篦冷机关键点位布设高精度测温元件,实时采集温度数据。依托数据反馈自动微调燃料供给、通风量、设备转速,替代人工经验调控,减少温度波动带来的能耗损耗。(2)大功率设备变频改造。对窑尾风机、篦冷机风机、投料输送电机等大功率设备加装变频装置。摒弃工频恒速运行模式,根据生

产负荷动态调节设备转速,规避阀门节流、设备满负荷空转造成的电能浪费,有效降低烧成系统辅助设备电耗。

4.4 系统密封与保温节能优化技术措施

系统漏风、筒体散热是极易被忽视的能耗损耗点,长期运行会破坏热工平衡,增加燃料与电力消耗,需通过专项改造实现节能降耗。(1)全系统密封整改。对窑头、窑尾柔性密封装置进行检修更换,填补密封间隙。全面排查预热器、管道法兰、检修门、观察孔等点位,采用耐高温密封材料封堵漏风点,阻断外界冷风渗入和内部热风外泄,稳定系统负压与温度工况。(2)筒体保温结构优化。对回转窑、预热器、高温风管外露部位进行全面检查,更换脱落、开裂、老化的耐火保温层。采用复合耐高温保温材料加厚整改,降低设备筒体表面散热速率,减少无效热损失,提升系统整体热利用率^[5]。

结束语: 本文通过对新型干法水泥熟料烧成系统开展现状分析、因素探究与工艺优化,明确了造成烧成能耗偏高的核心诱因。结合生产线实际运行条件,完成原料管控、窑炉设备、换热系统的主体工艺优化,搭配多项节能辅助技术改造,形成一套完整的烧成系统节能降耗方案。优化方案可有效解决生产过程中换热不充分、参数波动大、余热浪费、系统漏热漏风等常见问题,稳定熟料烧成热工制度,降低燃煤与电力消耗。

参考文献:

- [1]曹志怀.水泥熟料烧成过程中结圈机理与工艺控制研究[J].中国科技期刊数据库工业C,2026(3):153-156.
- [2]吴开全,杨东敏,苟博锋,马军喜.稻壳灰协同稻壳替代燃料在水泥熟料生产中降低煤耗的应用研究[J].中国科技期刊数据库工业B,2026(4):005-008.
- [3]徐靖,周丽,任强强,杨少波.水泥熟料预煅烧-烧成工艺特性试验研究[J].煤炭学报,2022,47(11):3851-3859.
- [4]唐金泉,唐兆伟.新型干法水泥熟料生产线转产石灰的可行性讨论[J].中国水泥,2023(9):59-62.
- [5]石静兰,邓锡坤.高温短时煅烧技术在水泥熟料生产中的应用[J].水泥,2026(4):28-30.