

# 套筒石灰窑热工制度优化及节能降耗措施

雒焕慧

青海盐湖镁业有限公司 青海西宁 810000

**摘要:** 石灰套筒窑作为石灰生产的关键窑炉设备,具有生产效率高、工艺成熟等优势,但传统运行模式下能耗偏高、污染较严重的问题日益突出。本文深入分析其热工制度及运行短板,从燃烧系统、热力回收、电加热技术及自动控制等维度提出优化方案,并通过实践验证。结果表明,改造后窑炉能耗降低20%,污染物排放显著减少,生产效率提升15%,为石灰行业节能降耗与绿色转型提供了可行路径。

**关键词:** 套筒石灰窑;热工制度;节能降耗

石灰作为钢铁、建材、化工等行业的基础原料,其生产工艺与装备水平直接影响下游产业的发展质量。然而,随着国家“双碳”目标的推进及环保法规的收紧,传统石灰套筒窑热工制度不合理、能源利用率低、污染排放超标的弊端愈发凸显。在此背景下,对石灰套筒窑进行热工制度优化与节能降耗改造,不仅是企业降低生产成本、提升市场竞争力的内在需求,更是行业响应国家绿色发展号召、实现可持续发展的必然选择。本文结合某企业实际改造案例,系统阐述技术路径与实践效果,为同类窑炉升级提供参考。

## 一、石灰套筒窑工作原理及热工制度问题分析

### (一) 工作原理

石灰套筒窑主要由内、外两个套筒构成,石灰石从窑顶料仓进入,在重力作用下沿套筒间隙向下运动。燃料(通常为煤粉或焦炭)在窑内特定区域燃烧,产生的高温烟气与石灰石逆向接触,使石灰石发生 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 的煅烧反应。空气经底部鼓入,参与燃烧并携带热量向上传递,最终废气从窑顶排出。物料在窑内的滚动、翻转保证了煅烧的均匀性,最终生成的生石灰从窑底卸出。

### (二) 热工制度现存问题

燃烧效率低下传统石灰套筒窑多采用单级燃烧方式,燃料与空气混合不充分,导致燃烧火焰短且局部温度过高,一方面造成燃料浪费(实测燃料单耗达155kgce/t),另一方面使窑内温度场分布不均,石灰石煅烧程度差异大,生烧、过烧现象并存<sup>[1]</sup>。

热能回收不足窑炉排出的高温废气(温度约400-500℃)和冷却后生石灰的显热(温度约150-200℃)未

得到有效利用,热能直接散失,据测算热损失占总输入热量的30%以上。

温度控制粗放依赖人工经验调整窑内温度,缺乏精准的自动化调控手段,煅烧周期长达3.5小时,且温度波动范围超过 $\pm 50^\circ\text{C}$ ,影响生石灰活性度(改造前活性度仅280ml/4N-HCl)。

负荷调节滞后窑体荷重(物料填充量)因人工操作存在较大波动,导致窑内物料运动速度不稳定,进一步加剧热工制度的紊乱,设备运转率仅85%。

## 二、热工制度优化及节能降耗技术措施

### (一) 燃烧系统优化:分级预热与混合燃烧技术

从热工理论角度,燃料的燃烧效率与着火温度、空气混合程度密切相关。针对传统石灰套筒窑燃烧不充分的问题,我们采用“燃料预热+分级燃烧+配风优化”的集成技术方案。在燃料预热环节,选用列管式预热器,利用窑尾废气余热将煤粉从常温预热至90℃,使燃料挥发分提前释放,着火温度降低约50℃,显著提升燃烧初期的反应速率。分级燃烧区域的划分是核心:预燃区位于窑体中下部,通过低氧环境(过剩空气系数0.8)实现燃料的缓慢着火,温度控制在850-950℃;主燃区为石灰石煅烧的核心区域,通过足量空气供给(过剩空气系数1.2)使燃料充分燃尽,温度维持在1150-1250℃;燃尽区位于窑体上部,通过二次风补充(占总风量30%)确保未燃尽颗粒完全燃烧,温度控制在900-1000℃。三个区域通过不同角度的燃料喷枪与配风装置实现精准调控,使火焰长度从传统的2-3m延长至4-5m,覆盖更多石灰石物料<sup>[2]</sup>。

### (二) 热力回收系统改造:双回路余热利用技术

基于“能量梯级利用”原则,我们构建了“烟气-

石灰石”和“石灰-助燃空气”的双回路余热回收系统，最大限度回收窑炉余热。对于“烟气-石灰石”回路，选用翅片管式换热器，换热管采用ND钢材质（耐硫酸露点腐蚀），管排间距设计为180mm，以平衡换热效率与烟气阻力。窑尾废气（温度450℃）流经换热器时，将热量传递给入窑石灰石，使石灰石预热至150℃，废气温度则降至200℃以下，热回收效率达72%。回收的热量除预热物料外，还可用于厂区供暖或生产用水预热，实现能源的多场景利用。

### （三）电加热技术应用：精准控温与快速煅烧

电加热技术的引入是对传统热工制度的重要补充，其核心价值在于实现窑内温度的精准调控与快速响应。我们选用氮化硅陶瓷电加热管，该材料具有耐高温（长期工作温度1300℃）、热导率高（约30W/(m·K)）、抗氧化性强的特点，表面负荷控制在3.0W/cm<sup>2</sup>，确保使用寿命超过10000小时。电加热管安装于窑体煅烧带两侧，呈对称分布，总功率根据窑炉规模设定为150kW。从热工调控角度，电加热系统与窑内温度传感器（铂铑热电偶，测量精度±1℃）形成闭环控制：当煅烧带温度低于设定值（1180℃）时，电加热自动启动，通过辐射换热快速提升区域温度；当温度达到设定值后，电加热功率自动降低，维持温度稳定<sup>[3]</sup>。

### （四）荷重自动控制技术：智能调控与稳定运行

窑体荷重（物料填充量）的稳定是热工制度稳定的前提，我们通过“传感器监测+智能算法+执行机构联动”的技术路径，实现荷重的精准控制。硬件层面，在窑体不同高度（距窑底5m、10m、15m处）安装压力传感器（量程0-50kPa，精度0.2%），实时监测物料对窑体的压力；在窑顶布料口安装雷达料位计（测量范围0-30m，精度±10mm），辅助判断物料填充高度。执行机构方面，窑底卸料装置采用变频调速电机（调速范围0-50Hz），窑顶布料装置采用伺服电机控制的旋转布料器，确保卸料与布料的精准性。软件层面，基于西门子S7-1500PLC开发了模糊PID控制算法，该算法可根据荷重变化趋势（如上升速率、当前荷重与目标荷重的偏差）提前调整卸料频率与布料量，使荷重波动控制在±3%以内。

## 三、辅助系统优化：减少热损失与提升系统协同性

### （一）窑体保温结构改进

传统石灰套筒窑窑体保温多采用单一耐火砖结构，存在热导率高、保温寿命短的问题，窑体表面温度可达

80-100℃，热损失占总热耗的8%-10%。为进一步降低热损失，我们采用“耐火层+保温层+防护层”的三层复合结构优化。

耐火层选用刚玉莫来石砖，该材料Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量≥85%，耐火度高达1790℃，能承受窑内高温气流冲刷与物料磨损，使用寿命较传统黏土砖延长2倍。砌筑时采用干砌工艺，砖缝严格控制2mm以内，同时对砖面进行预打磨处理，减少缝隙漏热。保温层核心采用硅酸铝纤维模块，其导热系数仅0.035W/(m·K)（200℃时），密度为220kg/m<sup>3</sup>，施工中通过310S不锈钢锚固件焊接固定（耐温1200℃，防高温腐蚀脱落），模块间采用错缝拼接，避免出现保温盲区。防护层选用彩钢板复合岩棉板，既防止保温层受外界环境侵蚀，又进一步阻隔热量散失。

改造后，窑体表面温度降至40℃以下，热损失占比降至3%以内，单台窑炉年节约标煤约800吨，相当于间接提升热效率5个百分点。

### （二）通风系统优化

通风系统是保障燃烧充分与余热回收的关键辅助系统，传统系统存在风机能耗高、管道阻力大、风量分配不均的问题。本次优化从风机选型与管道改造两方面入手。

风机方面，将原有定频离心风机替换为高压变频离心风机，采用永磁同步电机驱动，电机效率达95%以上。通过变频器与窑内氧含量传感器联动，实现风量的动态调节：当窑内氧含量高于5%时，自动降低风机转速，减少无效送风；当氧含量低于3%时，提升转速补充风量，确保燃烧效率。管道改造上，除采用流体力学仿真优化管径、内壁涂陶瓷耐磨涂层外，还对管道法兰连接处加装柔性石墨密封垫片（耐温650℃），解决传统垫片高温老化漏风问题，使管道漏风率从8%降至2%以下；同时在主管道分支处增设流量调节阀，可根据各燃烧区域热需求精准分配风量，进一步提升系统协同性。改造后，风机电耗从28kWh/t降至21kWh/t，降幅达25%。

## 四、运行管理体系升级：保障技术落地与长效节能

### （一）智能监控平台搭建

为实现热工制度的全流程可视化管控，搭建基于物联网与大数据的智能监控平台，整合窑炉运行、能耗、环保等多维度数据。平台硬件由数据采集终端、边缘计算网关与云服务器构成，可实时采集窑内温度、压力、氧含量、燃料消耗、废气排放等20余项关键参数，采集

频率达1次/秒，数据传输延迟≤50ms。

同时，平台新增历史数据对比与趋势预测功能：通过机器学习算法分析近1年、3年的热工参数变化规律，自动识别“高能耗工况”特征（如燃料单耗突增时的温度/风量匹配模式），并生成优化建议；此外，平台与企业ERP系统实现数据互通，能耗数据直接同步至成本核算模块，实时计算单位产品能耗成本，让生产决策更贴合经济效益目标。平台运行后，故障响应时间从原来的30分钟缩短至5分钟，热工参数异常发生率降低70%。

## （二）操作人员技能提升机制

技术优化需要配合专业操作才能发挥最大效能，因此建立“理论培训+实操考核+技能评级”的全方位培训体系。理论培训内容涵盖热工原理、设备结构、控制系统操作等，采用线上课程与线下讲座结合的方式，每月开展2次集中培训；实操环节创新搭建1:1模拟实训台，还原窑炉中控操作界面与典型故障场景（如煅烧带温度骤降、风机变频故障、余热换热器堵塞），让操作人员通过反复演练掌握应急处理流程，考核通过率与岗位绩效直接挂钩。

## （三）全生命周期成本管控

建立窑炉全生命周期成本管控体系，将节能降耗贯穿设备采购、运行、维护、报废的全过程。采购环节优先选用节能型设备与环保材料，综合考量初期投资与长期能耗成本，例如在换热器选型时，对比ND钢与316L不锈钢材质的导热效率与寿命成本，最终选择性价比更优的ND钢；运行环节细化能耗定额管理，按“班组-日-周”拆解能耗指标，超定额部分需提交原因分析报告，明确整改措施；维护环节制定设备定期保养计划，重点关注换热器、电加热管、传感器等关键部件，采用预防性维护替代故障维修，例如每3个月对电加热管进行绝缘检测，避免因元件老化导致的能耗虚高。

## 五、实践效果与数据分析

以某建材企业500t/d石灰套筒窑改造项目为实践案例，改造前后各项关键指标实现了全方位优化。在能耗控制上，燃料单耗从改造前的155kgce/t降至124kgce/t，降幅达20%；电耗也从38kWh/t降低至30kWh/t，减少幅度为21%；加上辅助系统优化带来的热损失减少，综合能耗较改造前降低23%。

生产效率方面，煅烧周期由原先的3.5小时缩短至2.8小时，效率提升20%；设备运转率从85%提高到95%，提升了10个百分点。产品质量维度，生石灰活性度从280ml提升至330ml，改善幅度近17.9%，生烧、过烧率从12%降至3%以下。

环保表现上，二氧化硫排放浓度从400mg/m<sup>3</sup>降至180mg/m<sup>3</sup>，削减幅度达55%；氮氧化物排放浓度从350mg/m<sup>3</sup>降至150mg/m<sup>3</sup>，降幅57%；烟尘排放浓度控制在10mg/m<sup>3</sup>以下，远低于国家排放标准。

产能层面，改造后窑炉年产能从设计的500t/d提升至550t/d（按年运行330天计算），年增产1.65万吨。经济效益上，年节约标煤约1.2万吨，节省电费、维护费等共计800万元，综合经济效益超千万元；环境效益上，年减少二氧化硫排放约260吨、氮氧化物排放约330吨，有力推动了企业的绿色可持续发展。

## 结束语

石灰套筒窑通过热工制度的系统优化，结合燃烧系统、热力回收、电加热及自动控制等核心技术，搭配辅助系统改进与运行管理升级，可实现能耗显著降低、污染有效削减、效率大幅提升的多重目标。本次改造实践表明，传统工业窑炉的节能升级不仅具备技术可行性，更能为企业带来可观的经济与环境效益。未来，随着智能化、低碳化技术的进一步渗透，石灰套筒窑的热工效率仍有提升空间。行业应持续探索多能互补（如结合太阳能、生物质能）、智慧调控的新型运行模式，同时加强产学研合作，推动节能技术的迭代升级，为建材产业绿色转型贡献力量。

## 参考文献

- [1]王蒙,刘广杰,逯宏强,冯忠辉,李少惠.石灰回转窑烟气脱硝技术节能降耗优化研究[J].耐火与石灰,2025,50(03):44-46.
- [2]魏建东,邓建民.电石生产过程中石灰窑尾气余热利用工艺[J].中国氯碱,2023,(11):50-53.
- [3]钟玲萍,张庆年,陈小鹏,覃玲意,陈奇.高活性石灰烧制过程的热力学与动力学分析[J].化工技术与开发,2023,52(11):19-22+40.