

加热炉炉墙保温优化与节能效果分析

吴莉莎

安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455004

摘 要: 工业加热炉作为高耗能核心设备, 炉墙散热是其主要能耗损耗渠道, 传统保温结构长期运行易出现材料劣化、缝隙漏热等问题, 造成严重能源浪费。本文依托传热与保温节能理论, 针对在用炉墙保温系统缺陷, 从材料选型、结构设计、施工工艺多维度制定优化方案, 结合数值模拟与现场实测试验验证优化效果。结果表明, 新型复合保温结构可有效降低炉墙散热损失与燃料消耗, 兼具经济与环保价值, 可为工业加热炉节能改造提供参考。

关键词: 加热炉炉墙; 保温优化; 节能效果

引言: 在工业节能降碳的发展背景下, 加热炉高能耗问题成为制约企业绿色生产的关键因素。炉墙保温性能衰减引发的散热损耗, 是加热炉运行能耗超标的核心原因之一。传统保温材料与结构经长期高温服役, 易出现开裂、粉化、密封失效等病害, 导致炉壁温升、设备热效率降低。为解决上述问题, 本文结合现场设备运行工况, 系统开展炉墙保温优化设计与效果研究, 旨在提升设备保温性能、降低生产能耗, 助力工业加热设备高效低碳运行。

1 加热炉炉墙保温及能耗基础理论与现状分析

1.1 炉墙传热与保温节能基础理论

(1) 炉墙传热为炉内高温烟气、炉衬结构与外界环境间的耦合热交换过程。火焰与烟气经辐射、对流将热量传至内壁, 再经耐火层、保温层导热向外传递, 外壁最终通过对流与辐射向环境散热, 三者共同决定炉壁热损失。(2) 保温材料依靠多孔结构抑制传热: 固相骨架构成导热路径, 孔隙内空气起阻隔作用, 等效导热系数越低, 隔热性能越优。优质材料需兼具低导热系数、高使用温度限值 and 良好热稳定性。(3) 热平衡分析基于能量守恒, 量化燃料化学热、空气物理热等输入与有效利用热、排烟热损、炉墙散热等输出间的分配。常用评价指标包括炉壁热流密度、吨钢综合能耗及热效率, 其中热流密度直观反映保温效果。

1.2 现有炉墙保温结构与材料概况

(1) 多层结构组成。传统炉墙由内向外依次为耐火层、保温层及外壳钢板, 部分增设外层保温。耐火层采用重质浇注料或耐火砖承受高温, 保温层以轻质砖或纤维制品承担主要隔热功能, 三者协同保障结构完整与保温性能。(2) 常用材料性能对比。硅酸铝纤

维导热系数低 (约 $0.03 \sim 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、耐温高 ($> 1200^\circ\text{C}$), 成本较高; 岩棉价廉、施工便捷, 适用温度低于 800°C ; 轻质保温砖热稳性好、强度较高, 导热系数略高于纤维制品。选型需综合使用温度、导热系数与寿命等因素^[1]。(3) 传统方案技术特点。重质浇注料配轻质砖方案刚性好、抗冲刷, 适合连续稳态运行, 但蓄热损失大、热惯性高; 硅酸铝纤维模块低蓄热、响应快, 适应频繁启停工况, 但抗气流冲刷能力不足, 各有适用边界。

1.3 在用炉墙保温系统缺陷与能耗问题

(1) 长期高温服役中, 纤维材料晶型转变、脆化断裂, 导热系数上升; 轻质砖受热震开裂剥落, 纤维制品受烟气侵蚀冲刷而粉化, 局部脱落形成热短路通道, 隔热性能严重下降。(2) 砖缝、膨胀缝及炉门、管道穿墙处密封不严, 正压下高温烟气逸出直接带热, 冷风吸入又增加排烟热损, 缝隙处局部过热加速周边材料劣化。(3) 受材料性能退化和施工质量制约, 部分加热炉外壁温度超设计值, 热流密度偏高, 保温层减薄、破损叠加致使吨钢燃料消耗增加, 实际热效率低于设计指标, 节能潜力亟待挖掘。

2 加热炉炉墙保温系统优化方案设计

2.1 保温优化设计原则与技术依据

(1) 耐高温、低导热、长效稳定的设计原则。优化设计应优先保证材料耐温等级满足炉墙各部位最高使用温度要求, 并留有足够安全裕度。选用等效导热系数低、高温体积稳定性好的材料, 从源头降低散热损失。同时兼顾材料抗热震、抗侵蚀及抗粉化能力, 确保保温系统在全寿命周期内性能衰减小、使用寿命长, 避免频繁维修更换。(2) 适配炉温工况与设备运行条件的设计

标准。设计应紧密结合加热炉实际运行温度、炉压波动范围、启停频率及炉内气氛等工况条件,参照国家及行业相关保温工程设计规范,确定合理的外壁温度控制目标(一般不超过环境温度加 25°C)及热流密度限值,保证设计方案与实际运行需求相匹配。(3)节能性、经济性、安全性协同优化准则。保温优化应在节能收益、改造成本与运行安全之间寻求最优平衡。在满足保温性能和安全要求的前提下,优先选用性价比高的材料和施工方案,合理确定保温层厚度,避免过度保温造成投资浪费或过薄导致散热超标,实现综合效益最大化。

2.2 保温材料选型优化

(1) 新型高效保温隔热材料性能优势分析。气凝胶毡等效导热系数低至 $0.018\sim 0.025\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,耐温可达 $650\sim 1000^{\circ}\text{C}$,为当前隔热性能最优的工业保温材料;纳微米级隔热板导热系数约 $0.025\sim 0.035\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,高温收缩率小;复合反射隔热板采用多层屏蔽结构,通过降低辐射传热提升隔热效果。新型材料较传统硅酸铝纤维和轻质砖导热系数降低 $30\%\sim 50\%$,厚度可相应减薄。(2) 不同温区炉墙保温材料匹配选型方案。高温区(炉膛内侧, $\geq 1000^{\circ}\text{C}$)选用含锆硅酸铝纤维模块或纳微米隔热板;中温区($800\sim 1000^{\circ}\text{C}$)采用常规硅酸铝纤维毯搭配轻质保温砖;低温区($< 800^{\circ}\text{C}$)可使用岩棉板或复合硅酸盐制品。各温区材料匹配应保证耐温等级与使用温度相适应,避免超温失效或过度选材造成浪费^[2]。(3) 复合保温材料组合搭配优化设计。采用多层复合结构发挥各材料优势:内层选用抗冲刷能力强的轻质耐火浇注料作为保温内衬,中间层敷设低导热硅酸铝纤维毯作为主保温层,近钢壳侧设置高强隔热板起兜底隔热作用,外层辅以纳米反射层减少辐射散热。各层材料搭配需兼顾耐温、导热和强度的梯度匹配。

2.3 炉墙保温结构优化设计

(1) 炉墙多层保温结构厚度配比优化。基于一维稳态导热模型,综合考虑材料导热系数、使用温度上限及经济厚度,优化各层厚度分配。内层耐火衬厚度控制在 $200\sim 230\text{mm}$ 以满足抗冲刷和热稳定需求,主保温层厚度根据目标外壁温度反算确定(通常 $150\sim 250\text{mm}$),外层隔热层辅助调节。采用有限元模拟验证不同厚度组合下壁面温度分布,确定最优配比方案。(2) 炉口、接缝、边角薄弱部位密封优化。炉门及管道穿墙处采用陶瓷纤维绳加迷宫式密封结构,减少烟气外漏和冷风吸入。炉墙砖缝和膨胀缝填充高压回弹纤维毡,适应热膨胀变化的同时保持密封。边角区域采用异形预制件消除通缝,避免直线型缝隙形成热流短路,降低薄弱环节

的附加热损失^[3]。(3) 炉墙整体保温结构改造方案细化。在尽量利用原有钢壳基础上,拆除旧保温层后重新构建复合保温衬里。炉顶采用轻质浇注料配合锚固件结构,炉墙分区模块化安装硅酸铝纤维折叠块,底部采用高强度抗压隔热板,形成全纤维或纤维-浇注料复合炉衬结构,确保整体保温性能均匀一致。

2.4 保温施工工艺优化措施

(1) 基层处理与旧保温层拆除工艺优化。旧保温层拆除应采用分区逐层方式,避免损伤炉壳钢板。清除表面残留灰浆及杂质后,对钢壳进行喷砂除锈处理达Sa2.5级标准,并涂刷高温防锈漆。对炉壳变形部位进行平整修复,保证基层表面洁净、平整,为新材料铺设提供良好附着基础。(2) 新型保温材料铺设与固定施工工艺。陶瓷纤维模块采用导向杆或燕尾槽锚固方式固定于炉壳,锚固件焊接间距需精确控制(通常 $300\sim 400\text{mm}$),模块间压缩安装确保无贯通缝。轻质浇注料施工严格控制水料比和振捣密实度,分层浇注、逐层养护。纳米隔热板采用专用粘结剂满涂粘贴,板缝错缝铺设并用纤维泥填缝,避免形成热桥^[4]。(3) 施工质量控制与防失效保障措施。施工全过程执行工序验收制度,每道工序经检查合格后方可进入下一道。锚固件焊接后进行拉拔力检测,浇注料留取试块检测常温耐压强度和体积密度,纤维材料检查厚度和铺设平整度。完工后进行烘干升温养护,制定升温曲线控制各阶段升温速率,防止水分快速汽化导致材料开裂。对关键部位留存影像资料,便于后期检修追溯。

3 加热炉炉墙保温优化方案节能效果验证与综合分析

3.1 数值模拟与试验验证方案

(1) 仿真模型建立与边界条件设定。基于有限元热分析软件建立炉墙传热三维稳态仿真模型,几何尺寸按实际炉体1:1建立。设定炉膛内壁温度为工业常见高温区间,炉壳外表面对流换热系数取经验范围值,辐射发射率按常规炉墙表面取值,环境温度取当地年均值。优化前后模型仅改变保温层结构与材料属性,其余边界条件保持一致,确保对比结果的有效性。(2) 现场测试方案与数据采集方法。采用红外热成像仪对炉墙外壁进行全断面扫描测温,配合K型热电偶定点校核。沿炉长方向均布测点,每面炉墙按网格法布置足够数量的测点以保证代表性。同步采集燃气流量、炉膛温度、排烟温度及烟气成分等运行参数。测试分别在改造前后相同工况下进行,各持续足够时长以消除随机波动影响。(3) 优化前后对比评价维度设定。建立三维度评价体系:热工性

能维度涵盖壁面平均温度、最大温差和热流密度；节能效益维度涵盖散热损失量、燃料单耗及综合节能率；经济性维度涵盖投资回收期 and 年运行成本降幅。各维度均以改造前实测数据为基准进行量化对比。

3.2 热工性能优化效果分析

(1) 优化前后炉壁表面温度对比分析。优化前炉墙外壁平均温度较高，局部存在明显过热区域。改造后采用复合保温结构，外壁平均温度显著降低，峰值温度得到有效控制，隔热效果明显。热成像显示壁面温度分布均匀性大幅提升，原有局部过热点基本消除，炉壳表面热环境显著改善。(2) 炉墙散热损失量定量对比计算。依据实测壁温与环境参数，按对流与辐射换热公式计算各面炉墙散热流密度并求和。优化后总散热量较改造前大幅减少，降幅显著，反映出保温结构的优异阻热性能。按年运行时间计，年减少散热损失折合标煤量相当可观，节能潜力得到充分释放。(3) 炉内温度均匀性与热稳定性提升效果。优化后炉膛各区域温差极值明显缩小，炉温均匀性显著改善。同时，衬使升降温响应速度提升，保温阶段燃料调节频率降低，炉压波动幅度减小，热工过程稳定性有效增强，为工艺质量的稳定控制提供了有利条件^[5]。

3.3 节能效益综合分析

(1) 燃料消耗量降低率与节能率核算。优化后高焦混合煤气小时平均消耗量较改造前明显下降，燃料节约率达到可观水平。扣除排烟温度波动等因素影响，系统综合节能率处于较高区间，按年运行时间计，年节约高焦混合煤气总量十分可观，能源利用效率得到实质性提升。(2) 设备运行成本降低的经济效益分析。按当地工业用气价格测算，年节约燃料费用可观。保温改造虽需一定前期投资，但静态投资回收期较短，具有良好的经济可行性。外壁温度降低改善了炉前操作环境，同时间接节约了通风降温等辅助能耗成本，综合经济效益进一步凸显。(3) 碳排放减少的环保社会效益分析。年节约高焦混合煤气量对应减少 CO_2 、 SO_2 及 NO_x 排放效果显著，年度碳减排经济价值可观，符合国家“双碳”战略方向，为企业绿色低碳转型提供了有力支撑。

3.4 优化方案不足与改进展望

(1) 本次保温优化方案存在的局限性。新型纳米隔热材料单价较高，前期投资较传统方案有较大幅度增加。复合结构对施工精度要求苛刻，现场界面质量控制难度较大。炉墙开孔、管道穿墙等异形部位保温处理仍有不足，锚固件处存在局部热桥效应，可能影响整体保温效果的长期稳定性。(2) 长期运行保温失效预防优化方向。针对纤维材料高温收缩粉化问题，建议关键区增设陶瓷锚固件与网状加强层。建立定期红外热像巡检制度，构建壁温历史数据库，通过温度异常趋势预判劣化并提前修补，实现预防性维护，延长保温系统有效服役周期。(3) 智能化保温调控技术未来发展展望。未来可发展分布式光纤测温与热流在线监测技术，构建炉衬温度场实时数字模型。结合大数据与机器学习算法，自动识别异常温升区域并推送分级维护建议，推动保温系统向全生命周期数字化、智能化管理迈进，进一步提升节能运维的精准性和前瞻性。

结束语

本文完成加热炉炉墙保温系统全方位优化设计，经实践验证，新型复合保温结构可显著改善炉墙热工性能，大幅降低散热损失与燃料消耗，兼具良好经济效益与环保效益。同时研究发现新型材料成本高、异形部位保温不足等问题。未来可通过优化施工工艺、增设加固结构完善方案，结合智能监测技术实现保温系统全生命周期管控，进一步挖掘加热炉节能降耗潜力。

参考文献

- [1] 王健, 李建军, 张磊. 工业加热炉炉墙多层保温结构优化及散热损失特性研究 [J]. 工业炉, 2025, 47(03): 45-50.
- [2] 刘博文, 赵阳, 陈鑫. 气凝胶保温材料在管式加热炉炉墙节能改造中的应用研究 [J]. 石油石化节能, 2024, 14(08): 32-36.
- [3] 宋涛, 张柏诚, 姜正鹤. 高温辐射节能涂层耦合保温结构的加热炉节能机理 [J]. 工业加热, 2025, 54(02): 28-33.
- [4] 张浩, 吴文强, 李明远. 工业加热炉炉墙保温老化病害及精细化优化改造技术 [J]. 冶金能源, 2024, 43(05): 56-60.
- [5] 陈立峰. 大型管式加热炉炉体保温系统优化与节能效益分析 [J]. 化工设备与管道, 2023, 60(04): 78-83.