

炼铜转炉耐火材料损耗的冶金成因及延长寿命方案

刘芝月

山东中金岭南铜业有限责任公司 山东 东营 257091

摘要: 炼铜转炉耐火材料是冶炼核心耗材, 极易因复杂炉内工况损耗失效, 制约转炉炉役寿命与生产效率。本文系统剖析耐火材料损耗核心成因, 涵盖高温化学侵蚀、热工波动热震损毁、流体机械冲刷及生产运维不当四类关键因素。从材质优化、工艺调控、运维防护三方面构建综合延寿方案, 经工业应用证实, 该方案可大幅延长炉衬寿命、降低生产成本, 兼具安全与绿色生产效益。

关键词: 炼铜转炉; 耐火材料损耗; 冶金成因; 延长寿命方案

引言: 炼铜转炉是火法炼铜的核心设备, 其炉衬耐火材料的服役状态直接决定冶炼连续性与生产经济性。转炉冶炼存在高温波动、熔体冲刷、气氛交替、渣蚀渗透等严苛工况, 导致耐火材料损耗速率快、更换频次高, 不仅增加耐材消耗与运维成本, 还易引发生产停机、安全隐患。为解决该行业痛点, 本文深入探究耐火材料损耗的冶金机理, 针对性制定优化方案, 为转炉长寿高效运行提供技术支撑。

1 炼铜转炉及耐火材料基础理论与工况特性

1.1 炼铜转炉冶炼工艺与工作原理

(1) 转炉吹炼阶段划分为造渣期与造铜期。造渣期以石英熔剂加入为核心, 将冰铜中的FeS氧化为FeO并与SiO₂结合形成铁橄榄石渣(2FeO·SiO₂), 吹炼温度控制在1150~1250℃, 终点以白铜(Cu₂S)出现为标志。造铜期将白铜继续氧化脱硫, 产出粗铜, 温度提升至1250~1300℃, 终点凭借“铜样”判断。(2) 炉内呈现高温、强冲刷与剧烈气氛变化的冶金工况特征。熔池温度波动显著, 风眼区受一次风强烈搅拌, 熔体湍流冲刷剧烈; 炉内气氛在氧化性(吹炼期)与还原性(停吹期)之间交替切换, 伴随高浓度SO₂腐蚀性气体^[1]。(3) 转炉炉衬各区域服役环境差异显著。风眼区承受熔体高速冲刷与温度骤变, 损耗最为剧烈; 炉口及炉帽区受高温烟气辐射及熔体喷溅, 热震频繁; 炉缸区长期浸泡于熔体与熔渣中, 化学侵蚀与渗透严重; 炉身中上部则以渣线侵蚀与热震剥落为主要损耗形式。

1.2 炼铜转炉常用耐火材料性能特征

(1) 镁铬质耐火材料以方镁石和铬铁矿为主晶相, Cr₂O₃含量一般为8%~20%, 具有优异的高温强度和抗渣侵蚀性; 镁铝质耐火材料以镁铝尖晶石为核心, Al₂O₃含量为5%~15%, 抗热震性较好, 但抗铁硅渣侵蚀能力较弱。(2) 核心技术指标包括: 高温抗折强度反映高温承

载能力; 抗渣性表征抵抗熔渣化学侵蚀的程度; 热震稳定性反映材料抵抗温度急剧变化而不开裂的能力; 气孔率与透气度则决定熔渣渗透难易程度。(3) 镁铬质材料适配强碱性渣侵蚀工况, 但存在Cr⁶⁺环境污染缺陷, 且抗热震性相对不足; 镁铝质材料适配热震频繁区域, 但抗低粘度高铁渣侵蚀能力较差, 高温强度也略逊于镁铬质材料。

1.3 耐火材料常规损耗类型与失效形式

(1) 化学侵蚀失效方面, 熔渣中FeO、SiO₂等组分沿气孔及晶界渗透进入耐火材料内部, 与基质中MgO、Cr₂O₃等发生反应生成低熔点相(如橄榄石、辉石类), 导致原结构层变质剥落, 逐步减薄直至失效。(2) 物理损毁失效主要表现为热震剥落, 即在停吹、加料、倒渣等操作引起的温度骤变下, 材料内部产生热应力超过结构强度而出现龟裂与层状剥落; 高温软化导致材料蠕变变形甚至坍塌; 结构开裂则源于温度梯度所致热膨胀失配。(3) 机械损耗失效集中于风眼区和熔池区。高速鼓风与熔体湍流对耐火材料工作面产生强烈剪切冲刷; 气流中夹带的固体颗粒产生冲蚀磨损; 加料、捣打等操作伴随硬质物料撞击, 造成材料表面碎裂与脱落。

2 炼铜转炉耐火材料损耗的核心冶金成因分析

2.1 高温冶金反应引发的化学侵蚀损耗

(1) 高温下熔渣与耐火材料基体的化学反应侵蚀机理: 熔渣中FeO、SiO₂在高温下沿砖体气孔向内部扩散, 与方镁石(MgO)、铬铁矿反应生成铁橄榄石(熔点约1205℃)、镁橄榄石及(Mg, Fe)O固溶体。反应产物与原始砖体热膨胀系数差异显著, 冷却时产生剥落裂纹; 同时Fe₂O₃与Cr₂O₃反应形成含铬铁酸盐, 破坏尖晶石骨架, 导致结构强度衰退。(2) 铜硫熔体、氧化物对耐火材料孔隙的渗透腐蚀机制: 白铜和粗铜熔体黏度极低(<0.05Pa·s), 在毛细力驱动下沿贯通气孔快速渗

入。 Cu_2O 与 MgO 反应生成低熔点铜酸盐,造成"黑心"变质层; Cu_2S 高温分解产生硫蒸气,与铬铁矿反应引起晶间腐蚀。渗透深度可达10~30mm,形成致密-疏松分层结构,最终整层剥落^[2]。(3)炉渣碱度、杂质组分对侵蚀速率的影响规律:渣碱度($R = \text{CaO}/\text{SiO}_2$)在0.3~0.8范围内,碱度每降低0.1, SiO_2 活度增加,对镁质组分的侵蚀速率提升约15%~25%。杂质 ZnO 、 PbO 等显著降低渣液相线温度(下降80~120℃),增强浸润性与渗透深度,使侵蚀速率较纯氧化物渣渣提高2~4倍。

2.2 热工工况波动导致的热震损毁损耗

(1)转炉间歇生产引发的温度骤升骤降与热应力累积:每炉周期内炉衬表面经历 $25^\circ\text{C} \rightarrow 1300^\circ\text{C} \rightarrow 800^\circ\text{C}$ 的急剧循环,单次温差达1000℃以上,加热冷却速率 $50 \sim 100^\circ\text{C}/\text{min}$,产生极大瞬时热应力($\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$)。应力超过材料抗拉强度(5~15MPa)时即引发微裂纹,循环中逐步累积扩展^[3]。(2)反复热循环下耐火材料裂纹萌生、扩展与剥落机理:热循环初期微裂纹在气孔、晶界等应力集中区萌生。循环超过50次后,裂纹沿镁铬颗粒边缘及结合相扩展连通,形成平行于热面的网状裂纹系统,热面层(5~20mm)因热膨胀失配而整体剥落。高温下结合相软化降低断裂韧性,加速剥落进程。(3)超温冶炼工况加剧高温蠕变与结构失效:炉温长期超1400℃时,硅酸盐结合相大量玻璃化,黏度骤降,产生不可逆稳态蠕变(速率 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{h}^{-1}$),砖体永久伸长挤胀相邻砖缝,造成炉衬拱起、砖体压裂乃至局部坍塌,具有时间累积和加速恶化特征。

2.3 流体动力学作用下的机械冲刷损耗

(1)吹炼气流搅动引发的炉内熔体高速冲刷作用:一次风以100~150m/s射入熔池,熔体冲刷速率达3~8m/s,冲刷磨损 $E = k \cdot v^n$ ($n = 2 \sim 3$)与流速平方至立方成正比。风口圆周区域形成环状沟槽磨损带,年损耗速率可达50~100mm。(2)炉内气液固多相流体运动对炉衬表面的磨损机制:气泡破裂产生冲击波和微射流,造成冲击疲劳;悬浮固体颗粒撞击砖面产生犁削与凿削,30°~50°撞击角磨损最严重,磨损率随颗粒浓度和粒径增大指数上升。(3)风口、渣线等关键区域局部高强度冲刷成因:风口区受射流直接冲击,剪切力 $> 200\text{Pa}$,砖体反复膨胀收缩致松动;渣线区液面波动($\pm 100 \sim 200\text{mm}$),渣层周期覆盖剥离,渣中颗粒摩擦磨损,叠加三相界面电化效应,形成"马蹄形"凹坑,为炉衬寿命瓶颈部位。

2.4 生产工艺与运维不当的辅助损耗成因

(1)原料配比、熔剂添加不合理加剧炉渣侵蚀性:

冰铜品位波动使 FeO 产出不稳,石英添加失配使渣 FeO/SiO_2 偏离1.8~2.2最佳范围。比值偏低时 SiO_2 活度过高增强 MgO 溶解,偏高时渣黏度降低增加渗透深度,侵蚀速率可升高30%~50%。(2)启停炉操作、冷却制度不规范引发额外结构损伤:升温 $> 150^\circ\text{C}/\text{h}$ 或强制风冷 $> 100^\circ\text{C}/\text{min}$ 可致纵深贯穿裂纹;停炉保温炉温上下不均(温差 $> 300^\circ\text{C}$)产生附加应力;不规范水冷可单次造成 $> 10\text{mm}$ 剥落层^[4]。(3)炉衬砌筑质量、日常检修维护不到位加速损耗失效:砖缝 $> 2\text{mm}$ 或泥浆不实形成渗透通道;混砌膨胀系数差异产生应力集中;修补界面结合不良易优先开裂;缺乏定期测厚和科学喷补,局部减薄难以及时发现,突破安全厚度将导致穿炉事故,大幅缩短炉役寿命。

3 炼铜转炉耐火材料寿命延长综合优化方案

3.1 耐火材料材质优化与结构改良方案

(1)优选高稳定性、低气孔率改性镁铬质复合耐火材料:采用电熔镁铬砂与合成尖晶石为原料,通过微粉复合与高温烧成工艺,显气孔率控制在13%以下, Cr_2O_3 含量优化至12%~18%;引入 ZrO_2 或 TiO_2 添加剂促进原位尖晶石生成,利用微裂纹增韧提高抗热震性;高温抗折强度较常规产品提升20%以上,抗渣渗透深度降低约35%。(2)优化炉衬分层结构:工作层采用高性能镁铬砖(厚度350~400mm),直接接触熔体与渣层;过渡层采用镁铝尖晶石砖(厚度150~200mm),缓冲热应力与化学侵蚀;背衬层采用轻质保温浇注料(厚度100~150mm),兼具隔热和应力吸收功能。三层热膨胀系数由内向外梯度递减,避免膨胀失配导致结构破坏。(3)关键损耗区域预制补强结构与耐磨防护层增设技术:风眼区预制整体式风眼砖套,消除砖缝渗透通道,延长使用寿命40%以上;渣线区域加厚工作层并镶贴预反应镁铬-锆复合砖,借助 ZrO_2 相变增韧提高抗热震性;风口、渣线等高损区域喷涂 SiC 质或铬刚玉耐磨涂层(厚度3~5mm),形成致密物理屏障,降低熔体冲刷和化学渗透速率。

3.2 冶炼工艺参数精准调控优化方案

(1)精准控制吹炼温度,杜绝超温冶炼:依托红外测温与热电偶耦合在线监测,造渣期稳定在1180~1230℃,造铜期控制在1250~1280℃,超温阈值1320℃,超温时自动调节氧料比和风量,超温频率降低80%以上,避免高温加速结构软化和化学侵蚀。(2)动态调整炉渣组分与碱度,提升炉渣 MgO 饱和度:依据冰铜品位实时计算石英添加量,控制终渣 $\text{FeO}/\text{SiO}_2 = 1.8 \sim 2.2$ 、碱度 $R = 0.4 \sim 0.6$;通过在线XRF快速分

析每15分钟反馈调节,以轻烧镁粉向渣中补充MgO至接近饱和(约8%~12%),使侵蚀速率降低25%~30%。

(3) 优化吹炼节奏与原料添加制度,稳定炉内热工工况:建立标准化吹炼曲线,控制一次风量波动 $\leq \pm 5\%$;采用脉冲式加料替代集中加料,使熔池温度波动由 $\pm 80^\circ\text{C}$ 收窄至 $\pm 30^\circ\text{C}$,降低急冷急热引发的热震频次。

3.3 炉衬运维与防护技术优化方案

(1) 规范炉衬砌筑、烘炉、启停炉标准化操作流程:严控砖缝 $\leq 1.5\text{mm}$ 、泥浆饱满度 $\geq 95\%$;烘炉采用阶梯升温曲线, $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 升至 300°C 保温4h, $80^\circ\text{C}/\text{h}$ 升至 800°C 保温6h, $60^\circ\text{C}/\text{h}$ 升至工作温度,总时间 $\geq 72\text{h}$;冷炉启动先预热至 500°C ,停炉降温速率 $\leq 30^\circ\text{C}/\text{h}$ 。(2) 采用表面涂层防护、可控冷却技术降低热震损伤:热面喷涂含 Cr_2O_3 、MgO复合陶瓷涂料(厚度 $0.5\sim 1\text{mm}$),高温烧结形成致密保护膜,渗透指数降低50%以上;停炉实施变频可控冷却,速率 $\leq 50^\circ\text{C}/\text{h}$,配合炉壳外壁喷雾均匀降温,消除局部过冷应力集中。(3) 建立炉衬损耗动态监测与精准检修维护机制:配置激光测距和超声波测厚仪,每炉次定点检测残余厚度,结合热成像建立三维侵蚀数据库;依据损耗预测模型制定喷补计划,残余厚度低于设计值70%时及时热态喷补;实行定修与状态检修结合,避免过度拆砌浪费^[5]。

3.4 优化方案应用效果与效益分析

(1) 工业应用后耐火材料使用寿命提升效果验证:某150t转炉实施优化后,风眼区蚀损速率由 $1.8\text{mm}/\text{炉次}$ 降至 $1.0\text{mm}/\text{炉次}$,渣线剥落频次减少65%;炉役平均寿命由240炉次延长至420炉次,增幅达75%。(2) 生产能耗、运维成本、停机损耗的经济效益分析:吨铜耐材消耗由

$7.5\text{kg}/\text{t}$ 降至 $4.3\text{kg}/\text{t}$,年节约采购费用160万元;检修人工和备件费年节省90万元;停炉升温能耗年节约70万元;停产损失减少约200万元,综合年经济效益超过520万元。(3) 工艺优化后的安全生产与绿色生产综合效益:稳定冶炼制度降低穿炉、漏铜安全事故风险;废旧耐材产生量减少42%,减轻固废处置压力;MgO饱和渣制度抑制 Cr^{6+} 溶出,喷补涂层减少粉尘排放;年降低 CO_2 排放约380t,实现安全与绿色协同提升。

结束语

本文明确了炼铜转炉耐火材料损耗的四大冶金核心成因,配套形成材质改良、工艺精准调控、标准化运维的一体化延寿体系。实践证明,优化方案可有效抑制炉衬化学侵蚀、热震剥落与机械冲刷损耗,显著提升转炉炉役寿命,降低生产能耗与固废排放。未来可结合智能化监测技术,持续优化参数适配性,进一步实现炼铜转炉安全、低碳、高效长效运行。

参考文献

- [1] 付琪琪,钟立桦,白文献,等.铜冶炼侧吹转炉镁铬质耐火材料损毁机制研究[J].耐火材料,2024,58(03):221-226.
- [2] 王勇,李红霞,刘国涛.铜转炉吹炼过程炉衬耐火材料失效机理与延寿技术[J].有色金属(冶炼部分),2023,13(08):56-62.
- [3] 张宇,陈松,杨鑫.镁铬耐火材料在炼铜转炉中的侵蚀机理及性能改良[J].硅酸盐通报,2022,41(11):3782-3788.
- [4] 刘军,周亮.炼铜转炉炉衬损耗关键影响因素及长效运维技术[J].中国有色冶金,2023,52(02):89-94.
- [5] 赵嘉伟.炼铜转炉耐火材料热震损毁机理及延寿优化措施[J].冶金与材料,2026,46(02):134-136.