

富氧熔炼提升铜冶金生产效率的工业试验

戴华荣

山东中金岭南铜业有限责任公司 山东 东营 257091

摘要:传统铜熔炼工艺存在热利用率低、矿物反应不充分、生产工况稳定性弱等问题,制约冶金生产效能提升。通过优化熔炼气氛条件、重构工艺运行体系,本文结合工业化试验条件开展富氧熔炼技术探究,分析富氧环境下矿物转化机理与参数作用规律,搭建标准化试验流程与工况管控模式。完善设备适配改造与生产运维体系,优化熔炼工艺运行逻辑,有效改善铜冶金熔炼状态,提升工业生产整体运行能效与稳定性。

关键词:铜冶金;富氧熔炼;熔炼工艺;工况调控;生产适配

引言:铜冶金熔炼是矿产资源富集提纯的关键工序,熔炼工况与工艺模式直接决定生产运行质量。传统空气熔炼模式惰性气体占比高,热损耗量大,矿物氧化转化效率有限,难以适配现代化高效连续生产需求。富氧熔炼可优化炉内反应氛围,强化冶金反应进程,改善渣铜分离效果。结合熔炼机理与工业生产条件,开展工艺适配、设备改造及流程管控优化,能够稳步提升铜冶金生产效率,推动熔炼工艺体系提质升级。

1 铜冶金富氧熔炼基础理论与工艺体系

1.1 富氧熔炼冶金反应机理

铜精矿富氧熔炼依靠高纯度氧气,重塑硫化铜矿物的氧化、分解与造渣全过程。普通空气熔炼氧含量有限,矿物氧化反应不够彻底,硫、铁等杂质的氧化速率偏低,整体反应推进程度不足。高氧工况能够提升炉内氧分压,突破传统熔炼的热力学平衡局限,让硫化铜、硫化铁等主料的氧化反应充分正向进行。熔炼阶段,铁的硫化物优先氧化生成氧化铁,结合矿脉杂质完成造渣,实现铜与铁的有效分离^[1]。剩余硫化铜持续发生自热氧化,逐步生成并富集冰铜。更高的氧分压可以降低反应活化能,推动低温环境下的深度氧化和脱硫反应顺利进行,从热力学与动力学角度提升反应效率,实现铜资源高效回收和杂质有效脱除。

1.2 富氧环境下铜矿物熔融转化机制

工业用铜矿物多为硫化复合共生结构,杂质与铜质紧密结合,常规熔炼很难实现高效转化与分离。高氧环境可以改变矿物熔融相变特性,入炉固体精矿快速受热软化、晶格裂解。铁硫化学键率先断裂,铁组分持续氧化进入炉渣,铜组分在低铁高氧的熔体环境中重新聚合,形成高品位冰铜。氧气可穿透矿料表层结构,消除氧化钝化层带来的反应阻滞,让颗粒内部残存硫化物持续参与造渣氧化。熔体持续反应后会出现明显分层,高

密度冰铜沉降于炉底,低密度炉渣向上浮动,完成固态精矿向液态富集产物的完整转化与分离。

1.3 富氧熔炼关键工艺参数作用原理

富氧浓度、熔炼温度、投料配比、炉内压力直接决定富氧熔炼的生产效果,四类参数分别调控炉内反应状态。氧分压随富氧浓度升降产生变化,浓度不足无法强化冶金反应,浓度超标会诱发铜组分过度氧化,造成金属流失。熔炼温度决定矿料熔融速度和熔体流动性能,合适温度可保证造渣反应完全,优化渣铜分离效果。温度失衡会引发熔体粘稠、反应滞后或炉体热负荷超标。投料配比把控硫化物与氧气的反应比例,直接干预脱硫脱铁效果和冰铜品质。稳定的炉内压力可以隔绝外界气流干扰,维持炉内反应氛围稳定,保障各项冶金反应平稳推进。

1.4 传统熔炼与富氧熔炼的工艺差异机制

传统熔炼以空气为氧化介质,氧含量占比低,炉内反应速率慢且热效率偏低。空气中大量氮气不参与冶金反应,持续带走炉内热量,稀释反应氛围,削弱矿物氧化与熔融转化效果。富氧熔炼大幅削减惰性氮气占比,提升有效反应组分含量,减少热能无效损耗。传统熔炼需要持续外源供热维持炉温,整体能耗偏高,矿料反应不够完全,尾渣铜含量居高不下。富氧熔炼依靠氧化放热构建自热反应体系,降低外部供热消耗。纯净的反应环境让矿物转化更为充分,有效提升冰铜品位与铜回收率,缩减固废、废气排放量,工艺运行能效和生产稳定性远超传统熔炼模式。

2 富氧熔炼工业试验方案设计

2.1 工业试验设备系统配置

富氧熔炼试验依托现场现有铜熔炼主体设备进行针对性改造与工况适配,搭建适配高氧熔炼条件的成套工业化试验系统。整套系统由熔炼炉体、富氧精准喷吹装置、密闭供料设备、余热回收装置及渣铜分离配套设

备组成，所有设施均按照工业连续生产标准完成优化升级。改造工作着重提升炉体密闭性能，隔绝外界空气渗入，规避杂气干扰炉内富氧反应氛围。喷吹装置可精准调节氧气喷射压力与流量，让氧气与炉内矿料充分接触、均匀反应。配套测控设备可实时匹配不同试验工况，完成参数微调与数据常态化采集，充分适配各类富氧熔炼试验的开展条件，保障试验工况稳定可控^[2]。

2.2 试验原料与熔炼介质配置标准

试验所用铜精矿原料取自工业量产批次，固定矿物组分、含水率及杂质含量，规避原料波动对试验数据的干扰。原料经过筛分、烘干与均化处理，把控颗粒粒度区间，保障物料熔融反应状态均匀。熔炼介质以工业高纯氧气为核心，严格限定氧气纯度、杂质含量，杜绝有害气体混入炉内引发副反应。造渣溶剂选用标准化石英砂原料，稳定硅铁配比，保障造渣反应规律可控。所有原料与介质均执行统一验收标准，保证试验变量单一，提升试验结果的真实性与参考价值。

2.3 富氧供给系统工艺调控方式

富氧供给系统采用分级稳压调控模式实现精准供氧。系统依托稳压阀、流量调节阀及在线监测组件，实现氧气压力、浓度、流量的独立调节。根据熔炼阶段的热负荷与反应强度，梯度调整富氧参数，适配矿料氧化、熔融、造渣不同阶段的反应需求。管路设置稳压缓冲结构，削弱气压波动带来的工况扰动。系统可实时匹配炉内反应状态调整供氧强度，维持炉内氧分压稳定，规避高氧浓度骤变引发的炉温异常、物料过度氧化等问题，保障试验工况连续平稳。

2.4 熔炼工序分段试验流程设计

熔炼试验流程分为升温预热、低氧适配、富氧熔炼、静置分离、降温收尾五个递进阶段。预热阶段完成炉体升温与设备调试，排查设备运行隐患。低氧适配阶段逐步提升炉内氧含量，使工况平稳适配富氧熔炼环境。富氧熔炼阶段稳定工艺参数，开展连续投料、氧化熔融与冰铜富集作业。静置分离阶段实现熔体分层，完成渣铜高效分离。降温收尾阶段规范停机操作，记录设备与物料状态，形成闭环试验流程，如表1所示。

表1 熔炼工序分段试验流程及管控目标

试验阶段	核心工序内容	阶段管控目标
升温预热阶段	炉体梯度升温、全设备工况调试、隐患排查	设备运行正常，炉体工况满足熔炼启动条件
低氧适配阶段	小幅提氧、适配炉内氛围、磨合供氧系统	消除工况突变风险，完成富氧环境适配过渡
富氧熔炼阶段	连续投料、精准供氧、氧化熔融、冰铜富集	稳定试验参数，完成核心熔炼试验作业

续表：

试验阶段	核心工序内容	阶段管控目标
静置分离阶段	熔体静置、渣铜分层、产物初步分离	实现渣铜高效分离，保证产物富集效果
降温收尾阶段	梯度降温、停氧停机、状态记录、物料取样	闭环完成试验，留存完整工况与物料记录

2.5 试验过程参数监测与管控体系

试验搭建全覆盖参数监测管控体系，重点采集炉温、氧浓度、供氧压力、投料速度、熔体状态及产物品位等核心数据。采用在线实时监测与定时取样检测相结合的方式，动态掌握熔炼工况变化。设置参数阈值管控标准，炉内工况出现异常偏移时，可快速开展微调校正。全程记录试验数据并分类归档，排查参数波动诱因，规范试验操作行为。标准化管控模式可有效降低试验误差，保障各组试验数据具备可比性，为优化富氧熔炼工业工艺提供可靠数据支撑。

3 富氧熔炼工业试验实施过程

3.1 工业试验前期筹备工作内容

富氧熔炼工业试验正式开展前，需完成全方位落地筹备工作，保障试验有序推进。工作人员对熔炼炉体、富氧供给管路、测控装置等核心设备进行全面检修与调试，排查管路泄漏、设备卡顿、数据失灵等潜在问题，确保各类设备运行状态达标。依据试验方案核定原料、溶剂及高纯氧气储备量，复检物料组分、粒度与纯度指标，剔除不合格物料^[3]。完成试验人员岗位分工，明确各岗位职责与操作规范，针对富氧供氧、炉体操控、参数记录等关键工序开展实操交底。校准所有在线监测仪表，统一数据采集标准，搭建完整的试验台账体系，从设备、物料、人员、数据四个维度夯实试验基础。

3.2 阶段性试验开展实施流程

工业试验依照梯度递进的思路分段开展，规避一次性高负荷作业引发的工况失控问题。试验整体划分为四个作业阶段，各阶段负荷与运行参数逐级调整，匹配熔炼系统的适配规律与运行特性。低氧负荷试运阶段以较低富氧浓度驱动设备运行，完成整套系统磨合，稳定炉内基础工况。系统运行状态平稳后，逐步上调富氧浓度与熔炼负荷，趋近预设工艺参数区间，观测矿料熔融、造渣及冰铜富集的实时状态，记录基础运行数据。系统适配完成后进入稳态试验阶段，固定各项核心工艺参数，开展持续性熔炼作业，积累有效工业试验数据。试验收尾阶段有序实施降负荷操作，逐步下调供氧强度与炉温，按规范流程停机取样，整合成品物料与工况数据，完整覆盖熔炼试验全周期作业流程。

3.3 试验过程工况动态调控方式

试验运行期间依托炉内实时工况开展精细化动态调控,适配熔炼反应的状态变化。以炉温、氧分压、熔体流动性、渣铜分离效果为核心调控依据,微调供氧流量、投料速率及炉体热负荷。炉温出现小幅波动时,通过改变富氧浓度优化氧化放热效率,稳定炉内热环境。熔体粘稠度异常时,微调熔炼温度与物料配比,改善熔体流动状态。针对熔炼过程中出现的轻微氧化偏差、造渣不充分等问题,针对性调整单项工艺参数,维持炉内反应体系的稳定性,保障各阶段试验工况贴合试验标准要求。

3.4 试验全过程规范化管控模式

试验全程实行标准化、制度化管控,约束所有操作行为与数据管理流程。严格执行既定试验方案,杜绝随意更改工艺参数与操作步骤,所有工况调整均做好详细记录。落实定时巡检制度,持续监测设备运行状态、管路密封性及炉内反应氛围,及时处置轻微异常隐患。规范物料取样、送检与数据归档流程,保证每一组试验数据均可溯源。统一试验操作、数据记录、异常处置标准,最大程度降低人为操作误差与工况波动干扰,提升试验过程规范性与试验结果的准确性,为工艺优化提供可靠的工业试验依据。

4 富氧熔炼工业生产配套体系完善

4.1 熔炼辅助系统配套适配改造

传统熔炼辅助系统适配常规空气熔炼工况,设备参数、管路配置与富氧熔炼生产模式存在适配偏差,无法满足高氧、高热负荷的生产需求。针对供料、除尘、余热回收及渣处理等辅助系统开展专项适配改造,优化整套生产线的匹配性。供料系统升级密闭输送结构,精准控制物料输送速率与下料均匀度,减少外界空气渗入炉内,稳定富氧熔炼氛围。除尘系统改造滤料与排风参数,适配富氧熔炼工况下的烟气组分与温度变化,提升烟尘收集效率。余热回收设备优化换热结构,适配富氧熔炼更高的烟气温度与热通量,提升热能回收利用率^[4]。渣处理设备调整运行参数,匹配富氧熔炼产物特性,保障炉渣冷却、分离作业稳定高效,筑牢连续工业化生产的设备基础。

4.2 富氧熔炼生产运行管控体系构建

结合富氧熔炼工艺特性,搭建适配工业化连续生产的专项运行管控体系。围绕供氧参数、炉内工况、物料

状态、产品质量四大核心维度,制定标准化生产管控细则。明确各生产岗位的操作规范、参数调控阈值与异常处置流程,规范日常生产的全流程操作行为。建立生产数据常态化记录与分析机制,对熔炼温度、氧浓度、投料参数等核心数据进行持续追踪,挖掘生产运行中的工况波动问题。配套设备巡检、定期维保、隐患排查制度,降低设备故障引发的生产波动。系统化的管控模式能够稳定生产工况,压缩人为操作偏差,保障富氧熔炼生产线长期平稳高效运行。

4.3 熔炼工艺适配性迭代优化路径

富氧熔炼工艺需依托工业生产数据持续迭代,逐步适配规模化、高效率的生产需求。以工业试验运行数据为基础,梳理工艺参数与生产指标的关联规律,针对性优化富氧浓度、熔炼温度、物料配比等核心参数的控制区间。结合生产过程中暴露的造渣效果、金属回收率、能耗水平等实际问题,分步完成工艺细节的优化调整。依托常态化生产运行积累的数据样本,持续修正工艺控制标准,逐步消除工艺与生产工况的适配短板。通过数据复盘、参数优化、现场验证的循环模式,持续提升熔炼工艺的稳定性与经济性,实现工艺体系的长效迭代升级。

结束语

富氧熔炼通过优化炉内反应气氛与热力学条件,改变传统熔炼的反应局限,有效强化铜矿物熔融转化与杂质脱除效果。从理论机理、试验方案、现场实施到配套生产体系的逐层完善,可持续规整熔炼工序运行状态,稳定工业生产工况。设备适配改造与精细化管控模式的落地,能够补齐传统工艺的运行短板,提升熔炼系统稳定性与生产效能,为铜冶金高效化、稳定化工业生产提供成熟的工艺参考与技术支撑。

参考文献

- [1]刘仰厚,温玮,杨嘉柏.富氧侧吹熔池熔炼含铜污泥生产实践[J].广州化工,2026,54(8):157-159.
- [2]郭徽,张岭,柏韬,等.铅冰铜富氧侧顶吹熔炼中试研究[J].绿色矿冶,2024,40(3):26-34.
- [3]吕军.富氧底吹炉熔炼系统直升烟道结焦问题的研究[J].有色冶金节能,2022,38(6):16-19,25.
- [4]吴晓松.铜钴渣资源化处理工艺设计研究[J].稀有金属与硬质合金,2026,54(3):45-53,62.