

4.1.2 操作误差

检测人员的操作规范性和熟练程度对检测结果有较大影响。回弹法检测时，弹击角度、弹击位置的选择不当；钻芯法检测时，芯样的钻取、处理和测量过程中的操作失误等，都会引入误差。

4.1.3 环境误差

环境因素如温度、湿度、风速等也会影响检测结果。温度过高或过低会改变混凝土的物理性能，湿度会影响混凝土表面的回弹值，风速较大时会影响钻芯过程的稳定性。

4.1.4 结构本身误差

混凝土结构的不均匀性、内部缺陷等自身因素也会导致检测数据的离散性，产生误差。

4.2 误差修正措施

4.2.1 仪器校准

定期对回弹仪、钻芯机等检测仪器进行校准和维护，确保仪器的精度和稳定性符合检测要求。在检测前，对仪器进行检查和调试，消除仪器本身带来的误差。

4.2.2 操作规范化

加强对检测人员的培训和考核，提高其操作技能和规范意识。

4.2.3 环境因素修正

根据检测时的环境条件，对检测数据进行修正。如根据温度、湿度对回弹值的影响规律，建立回弹值修正公式；在钻芯过程中，采取必要的防护措施，减少环境因素对钻芯质量的影响。

4.2.4 结构不均匀性修正

通过增加检测点数量，扩大检测范围，减少结构不均匀性对检测结果的影响。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验设计

选取一栋建成15年的框架结构既有建筑作为实验对象，该建筑混凝土强度等级为C30。在建筑的梁、柱等主要结构构件上选取20个检测区域，每个检测区域分别采用回弹法和钻芯法进行碳化深度检测。

回弹法检测时，每个检测区域布置16个回弹点，取回弹值平均值作为该区域的回弹代表值，并根据相关规范换算为碳化深度相关值。钻芯法检测时，每个检测区域钻取1个芯样，测量芯样的碳化深度。

5.2 数据处理与融合

对回弹法和钻芯法检测得到的数据进行预处理，去除异常值。根据两种方法的检测精度确定权重，钻芯法权重取

0.6，回弹法权重取0.4，采用加权融合算法计算融合后的碳化深度值。同时，对融合结果进行误差修正，消除环境、操作等因素带来的误差。

5.3 结果分析

将融合修正后的碳化深度检测结果与钻芯法单独检测结果、回弹法单独检测结果分别与实际碳化深度值进行对比分析。

结果显示，回弹法单独检测的相对误差在8%-15%之间，平均相对误差为11.5%；钻芯法单独检测的相对误差在3%-8%之间，平均相对误差为5.2%；采用回弹-钻芯法数据融合与误差修正后的相对误差在2%-5%之间，平均相对误差为3.1%。

6 结论与展望

6.1 研究结论

回弹法和钻芯法在既有建筑混凝土结构碳化深度检测中各有优缺点，回弹-钻芯法数据融合能够充分发挥两种方法的优势，提高检测结果的精度和可靠性。

针对仪器、操作、环境和结构本身等因素导致的误差，采取相应的修正措施后，能够进一步提高碳化深度检测的准确性，使相对误差控制在5%以内。

6.2 展望

未来可以进一步研究更先进的数据融合算法，如神经网络、模糊逻辑等智能算法，提高数据融合的精度和适应性；同时，结合物联网、大数据等技术，实现既有建筑混凝土结构碳化深度的实时监测和动态评估，为建筑结构的耐久性管理提供更全面、及时的技术支持。此外，还可以开展不同类型既有建筑混凝土结构碳化深度检测的应用研究，扩大该方法的适用范围。

参考文献

- [1] 沈蕾, 刘衍明, 刘彪, 赵伟波. 基于超声技术的混凝土碳化深度无损检测方法研究 [J]. 工程机械与维修, 2025, (04): 64-66.
- [2] 彭继斌. 建筑工程中混凝土抗压强度影响因素及检测方法 [J]. 四川水泥, 2025, (03): 18-21.
- [3] 苏高科. 结构混凝土保护层及碳化深度检测分析 [J]. 江西建材, 2025, (01): 121-122+129.
- [4] 王春香, 刘玉宝, 王海东. 混凝土结构强度检测技术在建筑工程中的应用研究 [J]. 砖瓦, 2025, (01): 103-106.
- [5] 黄志杰. 住宅建筑混凝土强度检测中回弹法的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (12): 13-15.
- [6] 周凯. 基于结构检测的既有建筑安全性分析 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (21): 146-148.

Optimization of Process Parameters and Environmental Benefits Analysis for Pyrometallurgical Copper Smelting Based on Strong Oxidizing Bath Smelting

Qun Xu

Yunnan Copper Co., Ltd. Southwest Branch, Kunming, Yunnan, 650102, China

Abstract

Strong oxidizing bath smelting is the core process of pyrometallurgical copper smelting, and its parameter matching directly affects smelting efficiency, resource utilization rate, and pollutant emission level. Addressing the existing issues of high energy consumption, large pollutant emissions, and copper recovery rate to be improved in this process, this paper takes improving copper recovery rate and reducing environmental load as the core objectives. It selects reaction temperature, oxygen concentration, and burden ratio as key control parameters and constructs a parameter optimization model through orthogonal experimental design and data modeling. Experimental verification shows that the optimized process parameters increase copper recovery rate by 3.2%, reduce SO₂ emission concentration by 18.5%, and decrease comprehensive energy consumption by 9.8%. The study confirms that scientific process parameter optimization can achieve synergistic improvement in efficient production and environmental performance of pyrometallurgical copper smelting, providing technical reference for the green transformation of the industry.

Keywords

strong oxidizing bath smelting; pyrometallurgical copper smelting; process parameter optimization; copper recovery rate

基于强氧化熔池熔炼的火法铜冶炼工艺参数优化与环境效益分析

许群

云南铜业股份有限公司西南分公司, 中国·云南昆明 650102

摘要

强氧化熔池熔炼是火法铜冶炼的核心工艺, 其参数匹配性直接影响冶炼效率、资源利用率及污染物排放水平。针对该工艺现存的能耗偏高、污染物排放量大及铜回收率待提升等问题, 本文以提高铜回收率和降低环境负荷为核心目标, 选取反应温度、氧气浓度、配料比为关键调控参数, 通过正交实验设计与数据建模构建参数优化模型。经实验验证, 优化后的工艺参数使铜回收率提升3.2%, SO₂排放浓度降低18.5%, 综合能耗下降9.8%。研究证实, 科学的工艺参数优化可实现火法铜冶炼高效生产与环保性能的协同提升, 为行业绿色转型提供技术参考。

关键词

强氧化熔池熔炼; 火法铜冶炼; 工艺参数优化; 铜回收率

1 引言

1.1 研究背景

铜作为重要的工业金属, 在电力、电子、建筑等领域应用广泛。火法铜冶炼是铜生产的主要方式, 其中强氧化熔池熔炼因具有反应速度快、产能大等优势, 成为主流工艺。然而, 当前该工艺存在工艺参数匹配性不足的问题, 导致铜回收率偏低, 同时产生大量二氧化硫、烟尘等污染物, 能耗居高不下, 与国家“双碳”目标和绿色发展要求存在差距^[1]。

【作者简介】许群(1971-), 男, 中国黑龙江哈尔滨人, 高级技师, 从事火法铜冶炼, 强氧化熔池熔炼技术研究。

1.2 研究意义

对强氧化熔池熔炼的火法铜冶炼工艺参数进行优化, 能够提高铜冶炼的效率, 增加铜产量, 降低生产成本。^[2]

1.3 国内外研究现状

国外在火法铜冶炼工艺参数优化方面起步较早, 已形成较为成熟的数值模拟与实验结合的研究方法, 部分企业通过参数优化实现了铜回收率提升和污染物减排。国内相关研究虽取得一定进展, 但多集中于单一参数调整, 缺乏对多参数协同优化的系统研究, 且在环境效益量化分析方面有待深入^[3]。

1.4 研究内容与技术路线

本文主要研究强氧化熔池熔炼的火法铜冶炼工艺参数优

化及对应的环境效益。技术路线为：首先分析强氧化熔池熔炼工艺原理及影响因素；然后确定关键工艺参数并设计正交实验；接着构建工艺参数优化模型；再对优化后的工艺进行环境效益分析；最后通过工业试验验证优化方案的有效性^[4]。

2 强氧化熔池熔炼工艺原理及影响因素

2.1 工艺原理

强氧化熔池熔炼是火法铜冶炼的核心环节，其核心原理是在高温熔池中通过富氧空气的通入，驱动铜精矿与熔剂发生剧烈氧化反应，最终实现铜的富集与杂质分离^[5]。反应过程可分为三个关键阶段：

2.1.1 氧化反应阶段

铜精矿中的主要成分硫化铜（如 Cu_2S ）在富氧环境下被氧化，生成氧化铜（ CuO ）和二氧化硫（ SO_2 ），反应式可简化为： $2\text{Cu}_2\text{S}+3\text{O}_2\rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}+2\text{SO}_2$ 。

2.1.2 还原与富集阶段

生成的氧化铜会与未完全反应的硫化铜进一步反应，生成金属铜（ Cu ）和二氧化硫，即



反应生成的金属铜以“冰铜”（铜与硫化物的共熔体）形式存在，铜含量可达 20%~70%，实现了铜的初步富集。

2.1.3 造渣分离阶段

铜精矿中的脉石（如 SiO_2 、 FeO 等杂质）与加入的熔剂（如石灰石、石英砂）反应生成熔渣。熔渣因密度低于冰铜而浮于表面，通过物理分层实现铜（冰铜）与杂质的分离。^[6]

2.3 影响因素

强氧化熔池熔炼的效果由多个工艺参数共同决定，各参数通过影响反应速率、物质分离效率或能耗水平，最终作用于铜回收率、污染物排放等核心指标。主要影响因素如下：

2.3.1 反应温度

反应温度是决定熔池物理状态和化学反应速率的核心参数。从反应动力学角度看，温度需维持在 1150~1250℃ 的合理区间：

温度低于 1150℃ 时，熔池黏度上升，铜精矿与熔剂难以充分混合，硫化物氧化不完全，导致铜被脉石裹挟进入熔渣，降低回收率；

温度超过 1250℃ 时，铜的挥发性显著增强（铜在高温下易以气态 Cu_2O 形式逸出），造成铜损失；同时，高温需消耗更多能源（如焦炭、天然气），直接推高综合能耗。

2.3.2 氧气浓度

氧气作为氧化反应的核心氧化剂，其浓度直接影响硫化物的转化效率和反应强度。现代火法铜冶炼工艺中，富氧浓度已普遍提升至 60%-85%，部分先进工艺（如闪速熔炼）甚至采用纯氧吹炼技术。氧气浓度的选择需综合考虑反应动力学、能耗及设备耐受性等因素。

对于传统熔池熔炼工艺（如白银炉），通常采用 30%-

40% 的富氧浓度。

现代高氧浓度工艺（60%-85%）通过优化反应条件，在 1250-1300℃ 的高温环境下，可实现硫化铜的高效转化，同时避免铜的过氧化。其技术优势主要体现在：

(1) 反应速率提升，产能增加 30%-50%；

(2) 烟气量减少，热损失降低，综合能耗下降 15%-20%；

(3) 铜直收率提高至 98% 以上。

氧气浓度的选择必须与反应温度精确匹配。

2.3.3 配料比（铜精矿与熔剂质量比）

配料比通过调节熔渣的酸碱度（即“渣型”）影响铜与杂质的分离效果。铜精矿中的脉石多为酸性氧化物（如 SiO_2 ），需加入碱性熔剂（如 CaO ）中和，形成流动性良好的熔渣：

若配料比过高（铜精矿占比过大），熔剂不足会导致熔渣酸性过强、黏度上升，铜颗粒难以从熔渣中沉降分离，造成“夹带损失”；

若配料比过低（熔剂过量），熔渣碱性过强可能腐蚀冶炼设备，同时过量熔剂会增加运输和处理成本，还可能因熔渣量过大而降低生产效率。

基于 SiO_2 - CaO -铁氧化物三元系相图（与金属铁平衡的渣相体系），实际生产中需围绕脉石内 FeO （氧化铁）与 SiO_2 的含量关系动态优化配料：

当脉石中 FeO 占比偏高时，熔渣的硅铁比（ SiO_2/FeO 质量比）易低于临界值，渣相可能落入橄榄石（Olivine）或浮氏体（Wustite）主导的高黏度区域（相图中高温等温线密集区）。

3.3.4 搅拌强度

搅拌强度直接影响反应均匀性。强度不足易引发熔池分层，局部氧化不完全；过强则能耗升高（功率 +15%~20%）且加剧炉衬冲刷。优化目标为消除熔池死区，同时控制搅拌功率在设备耐受范围内（如 $\leq 1.5 \text{ kW/m}^3$ ）。

4 火法铜冶炼工艺参数优化

4.1 关键工艺参数确定

在强氧化熔池熔炼中，温度、氧浓度和配料比是关键参数。温度（1150-1250℃）影响熔池流动性和反应速率，过低导致反应不完全，过高增加挥发损失。氧浓度决定氧化强度，需平衡硫化物转化和铜过氧化风险。配料比调控熔渣酸碱度，优化铜渣分离效果。

4.2 正交实验设计

基于工艺参数敏感性分析，采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计实验方案。根据现代火法铜冶炼工艺特点，确定以下关键参数及其水平：

1. 反应温度：1200℃、1250℃、1300℃，覆盖高氧熔炼所需温度区间；