

基于响应面法的镍渣中硫酸镍硫化焙烧工艺参数优化

徐兴

浙江三晟化工有限公司 浙江衢州 324000

【摘要】镍渣属于金属冶炼过程中产生的可回收利用的废弃副产物，将这类镍渣高效回收利用，对于应对镍矿产资源不足的情况、支持环保型金属冶炼发展有着重要价值。从这类镍渣中提取回收硫酸镍，是实现资源重复利用的重要途径，而硫化焙烧工艺是实现该目标的重要前期处理步骤。通过科学方式调整工艺的具体操作条件，对于提高金属提取比例、减少能源消耗以及降低生产过程中的污染。文章研究了基于响应面法的镍渣中硫酸镍硫化焙烧工艺参数优化，期望能为相关人员提供参考。

【关键词】响应面法；镍渣；硫酸镍；硫化焙烧；工艺优化

Optimization of Process Parameters for Nickel Sulfate Sulfuration Roasting from Nickel Slag Using Response Surface Methodology

Xu Xing

Zhejiang Sansheng Chemical Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324000

【Abstract】 Nickel slag is a recyclable by-product generated during metal smelting processes. The efficient recovery and utilization of such nickel slag holds significant value for addressing nickel ore resource shortages and supporting the development of environmentally friendly metal smelting. Extracting nickel sulfate from this slag represents a crucial pathway for resource reuse, with sulfuration roasting serving as a key preliminary step in achieving this goal. Scientifically optimized process conditions enhance metal extraction efficiency, reduce energy consumption, and minimize production-related pollution. This study investigates parameter optimization for the nickel sulfate sulfuration roasting process using response surface methodology, aiming to provide valuable references for relevant practitioners.

【Key words】 Response surface methodology; nickel slag; nickel sulfate; sulfide roasting; process optimization

引言：

镍是现代工业中非常重要的工业原料，可以用在不锈钢生产、电池制造以及高端合金制作等多个领域。随着天然开采的镍矿资源不断减少，内含镍、钴、铜等有价值金属的镍渣，就成了拥有很高回收价值的可用资源。但这类镍渣中的金属大多以很难处理的硅酸盐或者氧化物形式存在，直接进行回收的难度非常大。硫化焙烧工艺需要提前加入硫化药剂，在特定的气体环境中将需要提取的金属转变成可以通过浸泡方式轻松提取的硫化物形态，为之后采用湿法浸泡提取流程提取金属打下良好的前期基础。怎样调整焙烧过程中的重要操作参数，以实现金属高效且有针对性的形态转换，是目前相关研究需要攻克的重要课题。

一、硫化焙烧的基本原理与反应机理

硫化焙烧工艺是火法冶炼领域处理硫化矿物的重要前期处理步骤，这套方法的基本原理是将物料温度控制在自身熔点以下的高温区间中，通过调整整个反应体系的温度、周围气体环境和反应推进的节奏，让硫化矿物能够按照预设方向完成气固两相的高温化学反应，完成矿物内部硫元素的分离以及需要提取金属的物质形态重新塑造，为之后的金属提取工序准备好符合要求的物料状态，同时还能让硫元素集中起来方便后续进行回收再利用。从反应本质层面分析，该过程以金属硫化物的氧化反应作为主要流程，在 773K 到 1273K 的工业常用焙烧温度区间中，硫化物和氧气发生的主要氧化反应会释放大量热量，而且反应过程无法逆转，能够

生成金属氧化物和二氧化硫气体，同时还会随着硫酸盐生成、硫化物高温分解这类副反应出现，整个反应的进行路径和最终生成的产物类型，由整个系统的热平衡状态、物料界面间的物质传递速度等条件共同决定，反应体系的温度、氧气分压、气相中硫氧化物的浓度，都是调整反应定向进行的重要控制参数。

二、影响硫化焙烧效果的关键因素识别

(一) 焙烧热工制度参数匹配

焙烧热工制度中温度与时间的协调控制，是决定硫化焙烧效果的重要组成部分，这两个参数的匹配情况，直接决定硫化反应能否顺利发生以及反应进行的快慢。控制好温度的临界区间，是硫化反应顺利推进的基本前提，如果温度控制在过低范围，硫化反应的速度会无法达到正常需求，需要转化为硫化物的目标金属氧化物无法完成充分的反应过程；如果温度过高，则会让负责提供硫的药剂快速挥发浪费，还会造成物料熔化结块，破坏硫化产物内部的固定结构，甚至让目标硫化物受热分解。焙烧停留的时长和温度之间有明显的相互影响，如果停留时长过短，无法完成物料内部形态的充分转化以及硫粒子在物料中的均匀扩散；如果停留时长过长，则会让硫化产物出现二次氧化或者烧过头的情况。采用分阶段升温的操作，可以通过逐步调整炉内的温度环境，在低温段完成负责提供硫的药剂的稳定分解以及能参与反应的硫成分的均匀扩散，在高温段让目标金属氧化物充分转化为需要的硫化物，将温度和时间的参数调整到合适的状态，可以避免不需要的其他反应发生，提升硫化反应的针对性和反应完成的比例，同时减少整个工序的能源消耗，降低物料的浪费量。

(二) 物料基础理化特性调控

物料自身的物理和化学性质，是硫化焙烧反应能够发生的基础，物料的各种状态参数，直接决定硫化反应的难易程度以及最终的转化效果。物料中含有的矿物种类和结构，直接决定硫化反应发生的基本流程，和硅酸盐结合在一起的金属氧化物，要先打破原有的晶体结构，释放出能参与反应的金属活性位置，才能顺利完成硫化转化。物料破碎和磨碎的精细程度，决定了单位质量的表面积以及能和药剂接触的面积，颗粒比较小的物料占比提升，可以明显增加负责提供硫

的药剂和能参与反应的金属成分的接触机会，缩短硫粒子在固体物料中移动的距离，让整个硫化反应的速度变快。矿石里的非目标杂质成分，会参与到焙烧过程中产生不需要的反应，不仅会生成熔点比较低的混合物质，挡住硫粒子在物料中扩散，还会消耗体系中的能参与反应的硫成分，形成无效的硫化物，直接让目标金属的硫化效果变差。同时物料的含水量以及内部的孔隙情况，会影响焙烧过程中热量和物质传递的速度，改变硫化反应的均匀程度以及反应的进行过程，通过提前处理工序调整物料的物理和化学性质，可以为硫化焙烧打造最合适的反应前提条件。

(三) 反应体系气氛与药剂适配

焙烧体系中的气体环境和药剂体系互相配合，是保证硫化焙烧反应朝着想要的方向进行、提升硫化效果的重要前提。负责提供硫的药剂的类型和使用量，直接决定体系中能参与反应的硫成分的供应量，如果药剂用量不够，无法满足目标金属氧化物完成硫化反应的需要，很难形成完整牢固的硫化物覆盖层；如果药剂用量过多，则会增加生产的成本以及后续的环保处理负担。能降低体系中氧气含量的添加剂，可以准确调整体系中的氧气含量水平，有效减少硫化剂被氧气分解消耗以及二氧化硫气体的生成，明显提升硫成分的使用效率，同时可以促进和其他物质结合在一起的金属氧化物还原成活性更高的状态，为硫化反应提供更多能参与反应的位置，加快硫化反应的速度。焙烧体系中的气体环境，直接决定硫化反应的进行方向，如果采用不参与反应的气体环境，可以减少硫化剂被无效消耗的情况；如果采用稍微带点还原性的气体环境，可以让硫化反应朝着想要的方向更快推进；如果使用含有较多氧气的气体环境，则会让硫化产物被氧化分解变回原来的状态。通过调整气体环境和药剂体系互相配合，可以让硫化反应朝着想要的方向进行，提升整个焙烧过程的稳定程度以及硫化效果。

三、基于响应面法的镍渣中硫酸镍硫化焙烧工艺参数优化

(一) 响应面试验设计与变量筛选

在完成单组单一变量的前期测试后，结合镍渣进行硫化焙烧时的反应热特性与反应速度规律，搭建响应面试验的整体框架并选出对结果影响较大的关键变量，避开单组单一变

量测试无法分析多个因素互相影响的问题。以镍渣中硫酸镍的硫化转化效率作为主要测试指标,筛选焙烧温度、焙烧时长以及硫化药剂的搭配比例等对硫化焙烧效果影响较大的参数,明确各参数的合理变动范围以及调整梯度,按照 Box-Behnken 试验设计的思路搭建试验组合的标准化矩阵表格,合理安排因子测试点、极限参考点与基准重复测试的组数。研究者通过重复开展基准点测试,准确测算整个测试过程中的系统误差,通过优化测试执行流程与数据记录方式,保证测试得到的数据稳定且准确。研究者结合镍渣中矿物的组成特点以及硫化反应的实际规律开展整体试验设计,确保变量选取覆盖烧制过程的热工参数、所用药剂的搭配方式等重点方面,防止因为参数范围设定不当,导致后续的模式推演出现偏差。研究者为后续搭建推演模型以及调整工艺参数提供全面且符合科学逻辑的测试数据支持。

(二) 回归模型构建与性检验

根据响应面试验得到的实际测试数据,借助专业数据分析软件搭建多变量二次推演模型,建立硫化转化效率和各个重点工艺参数之间的多项式形式推演公式,测算不同因素对硫化焙烧最终效果的影响比例以及实际作用规律。通过方差分析测试模型以及各个影响因素的匹配效果,综合评估模型的 F 值、P 值、决定系数、校正决定系数以及变异系数等主要参考指标,确认模型和实测数据的契合程度以及数据统计层面的准确程度。同时逐个测试各个影响因素的一次项、二次项以及互相影响的项的结果,明确各因素对测试指标的影响大小,去掉模型中没有统计参考价值的内容,对推演模型进行优化调整。研究者对优化后的模型提出明确要求,要达到极高的准确度要求,同时拟合过程中产生的误差项带来的负面影响不能过大,保证模型推导出来的数值和实际测试得到的数据能够高度吻合,可以准确体现工艺调整参数和硫化焙烧最终效果之间的内在联系。研究者为后续分析参数互相

影响以及找到最合适的工艺调整方案提供准确的数学推演依据。

(三) 参数交互效应与最优解求解

根据搭建完成的多变量二次推演模型,通过三维的反应变化曲面图以及二维的等高对比图展开分析,完整分析各个重点工艺参数之间的互相影响规律,直观展现两个因素同时调整变化时硫化转化效率的变化情况,理清不同参数之间互相促进以及互相制约的效果,明确哪些对硫化焙烧效果影响最大的因素组合,测算不同参数搭配方式下最终测试指标的变化范围。将硫酸镍的硫化转化效率最大化作为主要优化目标,结合实际生产中的工艺可操作性、设备能承受的负荷以及经济投入的限制条件,确定各个工艺调整参数的合理变动范围。通过对多项式推演公式计算一阶导数为零的临界位置,搭配数值迭代的计算方式找到满足所有限制条件的最佳工艺参数搭配方案,确定焙烧温度、焙烧时长以及硫化药剂的搭配比例等重点参数的理论上的最佳数值。研究者同时结合工业生产的实际情况,将参数调整为符合生产实际的常用数值,形成可以直接应用到生产中的工艺参数标准。

结语

镍渣是含有镍、钴这类可回收利用金属的工业废弃物,对这类废料进行高效回收,可以减轻天然矿石供应压力,带动冶金行业向环保方向发展。使用含硫药剂配合高温环境预处理的加工方式,是制备硫酸镍原料的必要步骤,该工艺效果受温度调控标准、原料本身的质地和成分特点、炉内环境及药剂配合效果等多重因素影响。通过分析多参数关联关系的方法,系统调整优化整条加工流程的各项参数后,可以明确不同参数之间的影响规律,强化硫转化成效。

参考文献

- [1]田家怡,彭祥玉,王雯雯,等.基于响应面法的镍渣中硫酸镍硫化焙烧工艺参数优化[J].现代矿业,2023,39(1):137-142.
- [2]李寅,李春林,周东风,等.硫酸镍-硫酸亚铁溶液赤铁矿法除铁行为[J].中国有色金属学报,2025,35(2):621-632.
- [3]张忠.硫酸镍钴盐的水热合成及其在催化还原 4-硝基苯酚中的应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2023.

作者简介:徐兴,出生年月:1987.9.2,男,汉族,籍贯:浙江衢江,学历:专科,职称:助理工程师(化工)。