基于响应曲面法的高铜低硫精矿焙烧参数优化模型①

罗星[1,2], 赵富城[1,2], 贾康乐[1,2], 范海宝[1,2], 蒲俊[1,2]
(1.华刚矿业股份有限公司, 北京 100039; 2.中铁资源集团有限公司, 北京 100039)

摘 要: 采用响应曲面法(RSM)的中心组合设计(CCD),以焙烧温度和氧气浓度为影响因素、焙砂铜浸出率为响应值,构建了二元二次回归预测模型。结果表明,预测模型 P 值为 0.018 2、调整决定系数为 0.810 1、信噪比为 7.323 6,具备良好的可靠性与预测精度。焙烧温度对铜浸出率影响极显著,氧气浓度影响不显著,二者交互作用较弱。通过 Design-Expert 软件优化参数,得到优化的焙烧工艺参数为:焙烧温度 750 ℃、氧气浓度 30%,此条件下,铜浸出率预测值为 97.47%。在优化参数指导下,工业应用焙砂铜浸出率为 98.17%。

关键词: 高铜低硫精矿; 硫化铜矿; 焙烧; 响应曲面法; 参数优化; 浸出率; 预测模型
中图分类号: TF811 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.032
文章编号: 0253-6099(2026)04-0210-05

Optimization Model for Roasting Parameters of High-Copper Low-Sulfur Concentrate Based on Response Surface Methodology

LUO Xing[1,2], ZHAO Fucheng [1,2], JIA Kangle[1,2], FAN Haibao[1,2], PU Jun[1,2]
(1.*Huagang Mining Co., Ltd.*, *Beijing* 100039, *China*; 2.*China Railway Resources Group Co., Ltd.*, *Beijing* 100039, *China*)

Abstract: By adopting central composite design (CCD) of response surface methodology (RSM), a binary quadratic regression prediction model was established, with roasting temperature and oxygen concentration as influencing factors and copper leaching rate of calcine as the response value. It is shown that the prediction model presents a P value of 0.018 2, adjusted determination coefficient of 0.810 1, and signal-to-noise ratio of 7.323 6, exhibiting favorable reliability and prediction accuracy. Roasting temperature has an extremely significant effect on copper leaching rate, while oxygen concentration brings insignificant effect, and their interaction is weak. The parameters were optimized via Design-Expert software, and the optimal roasting process parameters are obtained as follows: roasting temperature of 750 ℃ and oxygen concentration of 30%. Under such optimized parameters, the predicted copper leaching rate of calcine is 97.47%, while the copper leaching rate of calcine in industrial applications reaches 98.17%.

Key words: high-copper low-sulfur concentrate; copper sulfide ore; roasting; response surface methodology; parameter optimization; leaching rate; prediction model

中非铜钴成矿带作为全球巨型铜钴成矿省,已探明铜储量达 1.4 亿 t,其产出的硫化铜精矿具有高铜、低硫、低铁的典型特征[1-2]。焙烧-浸出-电积工艺是该类精矿的主流处理技术,焙烧过程为关键预处理环节,直接影响焙砂中铜的赋存形态及后续浸出效率。高铜低硫精矿因硫含量低(小于 15%),无法实现自热焙烧,需添加硫磺或采用富氧焙烧技术补充热量,以维持焙烧温度,而焙烧温度与氧气浓度的耦合作用易导致产物中出现铁酸铜、硅酸铜等难浸出相,造成铜浸出率波动(浸出率设计值 97.00%,实际运行中可能低于 82%)[3-4]。

目前,高铜低硫精矿焙烧参数优化多依赖单因素实验或经验调控,难以揭示因素间的交互作用规律[5-6]。响应曲面法(RSM)作为一种融合数学与统计的试验设计方法,可通过少量试验建立多因素与响应值的量化模型,实现工艺参数的精准优化,已广泛应用于冶金、选矿等领域[7-9]。然而,针对高铜低硫精矿焙

① **收稿日期**: 2026-02-02
基金项目: 中铁资源重点项目(2026-重点-04)
作者简介: 罗星(1987—),男,江西萍乡人,硕士,高级工程师,主要从事焙烧和制酸生产管理。E-mail:570492050@qq.com

烧过程中焙烧温度和氧气浓度耦合作用对铜浸出率的影响,尚缺乏系统性研究。基于此,本文采用中心组合设计(CCD)开展响应曲面分析,系统考察焙烧温度、氧气浓度对焙砂铜浸出率的影响规律,建立预测模型并优化工艺参数,为工业生产中焙烧参数的精准调控提供理论支撑与技术参考。

1　试验材料与方法

1.1　试验原料

试验所用硫化铜精矿取自刚果(金)某焙烧制酸厂调浆系统,其主要化学成分见表 1。由表 1 可知,硫化铜精矿中 Cu、S、Co 含量分别为 63.93%、12.76%、0.53%,TFe 品位为 2.52%,杂质元素(Pb、Zn、As)含量均小于 0.005%,属于高铜低硫的精矿。

表 1　硫化铜精矿主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of copper sulfide concentrate

%

Cu	Pb	Zn	Co	TFe	Au[1)]	Ag[1)]
63.93	<0.005	<0.005	0.53	2.52	0.55	5.52
As	S	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Mn
<0.005	12.76	5.06	1.15	1.63	0.90	0.024

1) 单位为 g/t。

表 2 为硫化铜精矿物相分析结果。由表 2 可知,精矿中铜主要以硫化铜矿物形式存在,占比为 78.69%,其次为赤铜矿和其他氧化矿;铁矿物包裹铜占 0.33%,其他矿物包裹铜占 0.20%。

表 2　硫化铜精矿物相分析结果

Table 2　Phase analysis of copper sulfide concentrate

相别	铜含量/%	分布率/%
赤铜矿	6.82	10.49
其他氧化矿	6.69	10.29
硫化铜	51.15	78.69
铁矿物包裹铜	0.21	0.33
其他矿物包裹铜	0.13	0.20
合计	65.00	100.00

1.2　试验设备与方法

1.2.1　焙烧试验

采用马弗炉(SRJX-8,天津市泰斯特仪器有限公司)进行焙烧试验,每次取 100 g 精矿置于刚玉坩埚中,按设定温度、氧气浓度进行焙烧,保温时间 2 h。氧气浓度通过空气与氧气混合气体调控,由气体质量流量计精确控制,总气流量为 500 mL/min。

1.2.2　浸出试验

焙烧产物(焙砂)采用硫酸浸出,浸出条件参照工业生产参数:浸出温度 60 ℃、液固比 8∶1,搅拌速率 300 r/min、终点 pH 值 0.8~1.0、浸出时间 8 h。浸出完成后,采用真空抽滤分离浸出液与浸出渣,通过化学分析法分析浸出渣中的铜含量,并计算焙砂铜浸出率。铜浸出率(Y)计算式如下:

$$Y = 1 - \frac{m_1 \times \beta}{m_2 \times \alpha} \tag{1}$$

式中:m_1 为浸出渣质量,g;β 为浸出渣铜含量,%;m_2 为试验原料质量,100 g;α 为试验原料铜含量,%。

1.3　试验设计

采用响应曲面法中的中心组合设计,选取焙烧温度(X_1)和氧气浓度(X_2)为自变量,铜浸出率(Y)为响应值。根据前期单因素实验结果,确定自变量取值范围:焙烧温度 600~900 ℃、氧气浓度 20%~40%。表 3 为中心组合设计因素与水平。试验设计包含 4 个因素点、4 个轴点和 5 个中心点,共 13 组试验,中心点重复 5 次以检验试验误差。

表 3　中心组合设计因素与水平

Table 3　Factors and levels for central composite design

编码水平	X_1/℃	X_2/%
−1.41	537.87	15.86
−1	600	20
0	750	30
1	900	40
1.41	962.13	44.14

1.4　数据处理

采用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合,建立焙烧温度、氧气浓度与铜浸出率的二次多项式模型;通过方差分析(ANOVA)检验模型显著性。

2　结果与讨论

2.1　试验结果

表 4 为试验设计及结果。由表 4 可知,铜浸出率范围为 46.80%~97.48%,中心点(X_1 = 750 ℃,X_2 = 30%)铜平均浸出率为 97.46%,相对标准偏差(RSD)为 0.011 7%,表明试验重复性良好。当焙烧温度为 962.13 ℃、氧气浓度为 30%时,铜浸出率达 94.80%;焙烧温度 537.87 ℃时,铜浸出率仅 46.80%。低温条件下硫化物氧化不完全,大量铜以硫化铜形式存在,难以被硫酸浸出。

表 4 试验设计及结果

Table 4 Experimental design and corresponding results

编号	X_1/℃	X_2/%	Y/%
1	600	20	82.16
2	900	20	88.74
3	600	40	85.61
4	900	40	95.70
5	537.87	30	46.80
6	962.13	30	94.80
7	750	15.86	83.20
8	750	44.14	97.45
9	750	30	97.47
10	750	30	97.46
11	750	30	97.45
12	750	30	97.48
13	750	30	97.46

2.2 模型建立与显著性检验

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合,得到铜浸出率(Y)与焙烧温度(X_1)、氧气浓度(X_2)的回归模型方程(编码形式):

$$Y = 97.46 + 10.57X_1 + 3.82X_2 + 0.88X_1X_2 - 11.46X_1^2 - 1.70X_2^2 \quad (2)$$

回归模型中一次项系数的正负反映因素对响应值的影响趋势,绝对值大小反映影响强度。由式(2)可知,X_1 系数(10.57)大于 X_2 系数(3.82),且均为正值,表明两种因素均能促进铜浸出率提升,其中焙烧温度的影响更为显著。

对模型进行方差分析,结果见表 5。模型的 F 值为 5.97,P 值为 0.018 2,$P<0.05$,表明模型整体显著,能够有效描述自变量与响应值的关系。从因素显著性来看,X_1 和 X_1^2 的 P 值均小于 0.01,表明焙烧温度对铜浸出率影响极显著;X_2 和 X_2^2 的 P 值均大于 0.05,影响不显著;X_1X_2 的 P 值为 0.833 3,大于 0.05,交互作用较弱。调整决定系数(R^2_{Adj})为 0.810 1,表明模型可解释 81.01%的铜浸出率变化,剩余变异主要来自原料性质微小波动等随机因素。信噪比(7.323 6)大于 4,说明模型具有良好的预测精度和可靠性。

表 5 二阶模型方差分析

Table 5 ANOVA of second-order model

参数	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	1 927.30	5	385.46	5.97	0.018 2
X_1	893.64	1	893.64	13.84	0.007 5
X_2	116.76	1	116.76	1.81	0.220 6
X_1X_2	3.08	1	3.08	0.047 7	0.833 3
X_1^2	913.53	1	913.53	14.15	0.007 1
X_2^2	20.30	1	20.03	0.310 3	0.594 8
残差	451.90	7	64.56	—	—
失拟项	451.90	3	150.63	1.159×10^{-6}	<0.000 1

注:R^2_{Adj} = 0.810 1;信噪比 = 7.323 6

2.3 因素影响规律分析

2.3.1 单因素影响分析

图 1 为双因素交互作用对焙砂铜浸出率影响的响应曲面图。由图 1 可知,铜浸出率随焙烧温度升高呈现先增大后减小的趋势;当焙烧温度低于 750 ℃时,随着焙烧温度升高,硫化铜氧化反应速率加快,更多铜转化为易浸出的 CuO 和 $CuSO_4$,铜浸出率显著提升;当焙烧温度高于 750 ℃时,温度过高导致 CuO 与 Fe_2O_3 反应生成难浸出的铁酸铜($CuFe_2O_3$),同时 $CuSO_4$ 开始分解为 CuO,铜浸出率略有下降。氧气浓度对铜浸出率的影响较为平缓,这是因为高铜低硫精矿中硫含量较低,氧气浓度达到一定水平后,氧化反应已趋于完全,继续增加氧气浓度对反应进程影响有限。响应曲面的倾斜程度随焙烧温度变化更为显著,进一步验证了焙烧温度对铜浸出率的影响大于氧气浓度对铜浸出率的影响。

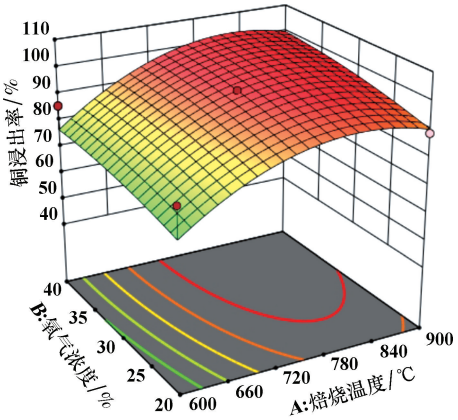


图 1 双因素交互作用对焙砂铜浸出率影响的响应曲面图

Fig. 1 Response surface plot showing effect of two-factor interaction on copper leaching rate of calcine

2.3.2 交互作用分析

响应曲面图和等高线图可直观反映因素间交互作用对响应值的影响。图 2 为两因素交互作用对焙砂铜浸出率影响的等高线图。等高线图的形状可判断交互作用强度,若等高线呈椭圆形,表明因素交互作用显著;若等高线呈圆形,则交互作用较弱。由图 2 可知,等高线接近圆形,与方差分析结果一致(X_1X_2 的 P 值为 0.833 3),说明焙烧温度与氧气浓度的交互作用对铜浸出率影响较小。

从矿物学与反应动力学角度分析,二者交互作用较弱的核心原因为:一定温度范围内,高铜低硫精矿的氧化反应进程以受温度控制的动力学过程为主导,焙烧温度直接决定了硫化铜(如辉铜矿)的氧化反应速

率、产物晶型转化速度以及难浸出相的生成趋势[10-11]；而氧气浓度在试验设定的范围内，达到一定阈值后便不再是氧化反应的限制性环节，此时体系内的氧分压满足硫化物氧化的基础需求，即使进一步提高氧气浓度，也无法加速受温度主导的氧化反应进程，因此焙烧温度与氧气浓度的叠加效应不强，交互作用表现较弱。

在实际工业生产中，氧气浓度的调控还需兼顾制酸系统的 SO_2 浓度要求（通常需维持在 4.0%以上），因此氧气浓度不宜过高（一般控制在 24%左右），通过优化焙烧温度（740～750 ℃），可保障铜浸出率稳定在 97%以上。

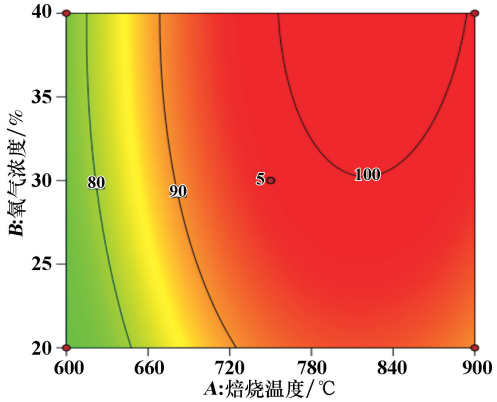


图 2　两因素交互作用对焙砂铜浸出率影响的等高线图

Fig. 2　Contour plot showing effect of two-factor interaction on copper leaching rate of calcine

2.4　工艺参数优化与验证

采用 Design-Expert 软件的参数优化模块，以铜浸出率最大化为目标，结合工业生产实际约束条件（焙烧温度 700～800 ℃、氧气浓度 20%～40%），得到优化的工艺参数为：焙烧温度 750 ℃、氧气浓度 30%，此时铜浸出率预测值为 97.47%。为验证模型的可靠性，在优化工艺参数下进行 3 组平行验证试验，铜浸出率分别为 97.45%、97.48%、97.46%，平均值为 97.46%，与预测值相对误差仅为 0.01 百分点，表明模型预测精度较高。

将优化工艺参数应用于刚果（金）某焙烧制酸系统工业生产时，考虑到制酸系统对 SO_2 浓度的硬性要求，若采用模型优化的 30%氧气浓度，会导致焙烧烟气中 SO_2 浓度被稀释至阈值以下，影响制酸工序的正常运行，因此工业生产中需将氧气浓度调整为 24%。基于本模型的指导，通过对焙烧温度进行小幅微调，控制在 740～750 ℃区间内，有效弥补了氧气浓度未达最优值带来的影响，2025 年工业运行数据显示，焙砂铜浸出率达 98.17%，较优化前（97.00%）提升 1.17 百分点。这一结果充分体现了本模型在指导实际生产时的灵活性与实用性，根据工业系统的多工序协同需求进行参数微调，可实现理想的铜浸出效果。

3　结论

1）二次回归预测模型 P 值（0.018 2）小于 0.05，R^2_{Adj} 为 0.810 1，信噪比为 7.323 6，表明模型具有良好的可靠性和预测精度，可有效描述焙烧温度与氧气浓度对铜浸出率的影响规律。

2）焙烧温度对铜浸出率影响极显著，氧气浓度影响不显著，两者交互作用较弱。铜浸出率随焙烧温度升高呈现先增大后减小的趋势，随氧气浓度升高平缓上升，氧气浓度超过 30%时，铜浸出率增长趋缓。

3）优化的焙烧工艺参数为：焙烧温度 750 ℃、氧气浓度 30%，在此条件下，铜浸出率预测值为 97.47%，试验验证值为 97.46%，相对误差仅 0.01 百分点。在优化参数指导下，工业应用焙砂铜浸出率为 98.17%，研究成果可为高铜低硫精矿焙烧过程的精准调控提供科学依据。

参考文献（References）：

[1]　孙凯，张航，卢宜冠，等. 中非铜钴成矿带地质特征与找矿前景分析[J]. 中国地质，2022，49(1)：103-120.
Sun Kai，Zhang Hang，Lu Yiguan，et al. Analysis on geological characteristics and prospecting potential of the Central African Cu-Co metallogenic belt[J]. Geology in China，2022，49(1)：103-120.

[2]　高帮飞，沈阳，钟长汀，等. 刚果（金）绿纱铜钴矿床黑色页岩 Rb-Sr 测年及其区域成矿意义[J]. 地质学报，2021，95(4)：1029-1049.
Gao Bangfei，Shen Yang，Zhong Changting，et al. Rb-Sr dating of the black shale and its significance for regional metallogenesis，Luishia Cu-Co deposit，D R Congo[J]. Acta Geologica Sinica，2021，95(4)：1029-1049.

[3]　张海宝，骆贞江，孟祥龙，等. 刚果（金）铜钴矿湿法冶金工程实例分析[J]. 有色冶金设计与研究，2023，44(3)：9-14.
Zhang Haibao，Luo Zhenjiang，Meng Xianglong，et al. Analysis of hydrometallurgical engineering cases of copper-cobalt ore in Democratic Republic of Congo[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research，2023，44(3)：9-14.

[4]　曾培，陈兴海，马鑫铭. 高铜低铁硫化铜精矿预浸出-焙烧-酸浸试验研究[J]. 中国资源综合利用，2022，40(3)：7-9.
Zeng Pei，Chen Xinghai，Ma Xinming. Experimental study on pre-leaching-roasting-acid leaching of copper sulfide concentrate with high copper and low iron[J]. China Resources Comprehensive Utilization，2022，40(3)：7-9.

[5]　蔡超君，华一新，梁铎强. 硫化铜精矿焙烧的非等温动力学研究[J]. 昆明理工大学学报（理工版），2004，29(6)：22-26.

Cai Chaojun, Hua Yixin, Liang Duoqiang. Studies on non-isothermal kinetics of reaction of copper sulfide concentrate[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2004,29(6):22-26.

[6] 陈雯,丘克强. 硫化铜精矿硫酸化焙烧的热力学分析[J]. 昆明工学院学报, 1989,14(1):48-53.
Chen Wen, Qiu Keqiang. The thermodynamic analysis of copper sulfide concentrate in the process of sulphatizing roasting[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences), 1989,14(1):48-53.

[7] 庞丹丹,姜琴,崔传发. 响应曲面法优化金绿宝石型铍矿中铍浸出率实验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):123-129.
Pang Dandan, Jiang Qin, Cui Chuanfa. Experimental study on improving leaching rate of beryllium from chrysoberyl by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):123-129.

[8] 欧乐明,邓颖,符海桃,等. 响应曲面法优化某低品位锡石浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):175-180.
Ou Leming, Deng Ying, Fu Haitao, et al. Optimization of low-grade cassiterite flotation by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):175-180.

[9] 唐正鹏,郭建维,李帅,等. 响应曲面法优化硅孔雀石中钴的还原浸出[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):108-113.
Tang Zhengpeng, Guo Jianwei, Li Shuai, et al. Optimization of reductive leaching of cobalt from chrysocolla by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):108-113.

[10] 徐文涛,周振华,杨帅峰,等. 基于焙烧-浸出工艺从某硫精矿中回收铜、钴[J]. 中国冶金, 2025,35(4):132-144.
Xu Wentao, Zhou Zhenhua, Yang Shuaifeng, et al. Copper and cobalt are recovered from a sulphur concentrate based on a roasting-leaching process[J]. China Metallurgy, 2025,35(4):132-144.

[11] Gayratov B, Gayratov B, Godirilwe L L, et al. Copper recovery from copper sulfide ore by combined method of collectorless flotation and additive roasting followed by acid leaching[J]. ChemEngineering, 2025,9(6):117.

引用本文:罗星,赵富城,贾康乐,等. 基于响应曲面法的高铜低硫精矿焙烧参数优化模型[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):210-214.
Luo Xing, Zhao Fucheng, Jia Kangle, et al. Optimization model for roasting parameters of high-copper low-sulfur concentrate based on response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):210-214.

(上接第209页)

[9] Cao F, Gan M, Fan X H, et al. Energy consumption optimization model and system for the pellet drying process of straight grate[J]. Drying Technology, 2024,42(8):1357-1369.

[10] Umadevi T, Kumar P M, Lobo N F, et al. Effect of iron ore pellet size on its properties and microstructure[J]. Steel Research International, 2009,80(10):709-716.

[11] Dwarapudi S, Devi T U, Rao S M, et al. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets[J]. ISIJ International, 2008,48(6):768-776.

[12] Iljana M, Paananen T, Mattila O, et al. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties[J]. Metals, 2022,12(2):302.

[13] Pal J, Ghoari S, Ammasi A, et al. Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters[J]. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 2017,53(1):37-46.

[14] 张国成,罗果萍,宋巍. 改善预热球团矿抗压强度的工艺优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):91-96.
Zhang Guocheng, Luo Guoping, Song Wei. Process optimization for improving compressive strength of preheated pellets[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):91-96.

[15] Umadevi T, Lobo N F, Desai S, et al. Optimization of firing temperature for hematite pellets[J]. ISIJ International, 2013,53(9):1673-1682.

[16] Meyer M, Lagoeiro L E, Graça L M, et al. Phase and microstructural characterization of iron ore pellet and their relation with cold crushing strength test[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2016,37(5):295-304.

[17] Prasad R, Soren S, Kumaraswamidhas L A, et al. Experimental investigation of different fineness and firing temperatures on pellets properties of different iron ore fines from Indian mines[J]. Materials, 2022,15(12):4220.

引用本文:温宝良,刘英才,宋灿阳,等. 粒级与宏观形态对带式焙烧机球团性能的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):203-209.
Wen Baoliang, Liu Yingcai, Song Canyang, et al. Effects of particle size and macro morphology on pellet properties of straight-grate induration machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):203-209.