

引文格式:王普蓉,徐国印,戴惠新,等. 基于 Excel 回归建模的响应曲面法优化高泥氧化铜矿酸浸工艺[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 96-104.

Wang Purong, Xu Guoyin, Dai Huixin, et al. Optimization of acid leaching process for high-clay copper oxide ore using response surface methodology based on excel regression modeling[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 96-104.

基于 Excel 回归建模的响应曲面法优化高泥氧化铜矿酸浸工艺

王普蓉^{1,2}, 徐国印², 戴惠新¹, 赵珈庚², 吴昌洪²

(1.昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 2. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

[摘 要] 针对单因素工艺试验及 Design-Expert 软件成本高的问题,本研究以高泥氧化铜矿硫酸浸出为研究对象,采用中心复合设计(CCD)开展 20 组酸浸试验,以硫酸浓度、液固比和浸出时间为自变量,铜浸出率为响应值,利用 Excel 建立二次回归模型并进行方差分析及响应曲面最优解求解。结果表明:模型高度显著($F=91.14, R^2=0.988$);因素对浸出率的影响力排序为硫酸浓度>浸出时间>液固比,硫酸浓度与液固比的交互作用呈显著负面影响;响应曲面最优解求解得到的最优工艺条件为硫酸浓度 96.16 g/L、液固比 3.26 mL/g、浸出时间 4.32 h,预测浸出率 83.39%,验证试验获得浸出率 84.15%,二者吻合良好,表明模型的预测准确性和优化结果的可靠性。本研究方法以 Excel 替代专业统计软件,不仅为高泥氧化铜矿的硫酸浸出工艺提供了一种高效的参数优化策略,而且为矿物加工及其他相关领域的工艺优化提供了一种成本效益高、操作简便的解决方案。

[关键词] 高泥氧化铜矿; 酸浸; 响应曲面法; Excel; 回归分析; 工艺优化

[中图分类号] TF811; TF803.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0096-09

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.010

0 引言

随着硫化铜矿和易处理氧化铜矿资源的逐渐枯竭,难处理的高泥氧化铜矿已成为铜资源提取的重要原料。高泥氧化铜矿石中通常含有大量细粒级矿物,这些矿物比表面积大,易吸附大量浮选药剂,严重恶化浮选环境,进而对中粒级和粗粒级矿物的浮选产生不利影响。另一方面,由于细粒级矿物粒度细小,容易被酸浸出。因此,高泥氧化铜矿常采用中粒级和粗粒级矿物浮选-细粒级矿物浸出

的组合工艺进行处理。

酸浸法是处理结合率高、氧化率高、含泥量高的氧化铜矿石的常用且有效方法,尤其适用于含硅酸盐酸性脉石的氧化铜矿石^[1]。在酸浸过程中,常用的酸浸剂包括硫酸、盐酸和硝酸等^[2-5],影响酸浸效率的关键因素包括矿石粒度、矿浆浓度、酸浸剂种类和用量、浸出时间、浸出温度和搅拌速度等。由于影响高泥氧化铜酸浸率的因素众多,传统单因素变量试验方法成本高昂,且无法对变量之间的交互作用进行定量分析^[6,7]。因此,采用合理的试验设计和结果分析方法,是优化难处理氧化铜矿酸浸工艺的核心问题。

响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种在有限试验次数与材料条件下,通过数学模型对工艺参数进行精细优化的统计方法。该方法基于科学的试验设计,通过构建多元二次回归方程拟合因素与响应值之间的非线性关系,并借助

[收稿日期] 2026-02-03 [修订日期] 2026-04-01

[录用日期] 2026-04-02 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 王普蓉(1982—),陕西富平人,硕士,讲师,博士在读,研究方向为资源综合利用。

[通信作者] 戴惠新(1966—),男,汉族,湖南娄底人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿产资源综合利用、磁选理论与设备研发等研究。

[基金项目] 四川省科技计划重点项目“攀枝花含钛高炉渣提钛关键技术研究与应用”(2022YFS0458)。

方差分析(ANOVA)评估模型及其系数的显著性。此外,RSM能够解释不同工艺参数间的交互作用及其对响应值的综合影响,借助等高线图和三维响应曲面图直观展示优化区域,从而确定最佳工艺条件。目前,科学试验中的RSM设计主要借助Design-Expert软件实现,该软件操作简单,然而价格昂贵,每年使用成本达数万元,在直观获取优化过程与初步结果方面存在一定局限性。此外,该软件在数据分析中未充分结合数理统计原理,提供的分析结果较为片面,且未对回归模型的拟合优度与模型系数的显著性进行深入的综合评估。

目前,采用响应面法优化工艺参数并研究工艺参数对难选氧化铜矿石酸浸铜的多种影响的新文献并不多见。在这些文献中,分析方法通常未对响应面图、拟合回归模型及模型系数的显著性检验结果进行综合统计分析,这些统计分析内容的缺失导致试验数据分析无法深入揭示各个工艺参数对铜浸出的多重影响规律。Xu Bai等^[8]利用Design-Expert软件,结合中心复合设计(CCD)与响应曲面法,对某难选氧化铜矿浮选尾矿中铜的浸出过程进行了优化研究。该研究分析了浸出温度、浸出时间及硫酸浓度等因素对铜浸出效率的影响,借助Design-Expert软件的预测功能,确定了实现最高浸出效率的最佳条件。Mostafa Hosseinzadeh^[9]利用Design-Expert软件,采用全析因设计(FFD)与响应面法研究了硫酸浓度、矿浆浓度、粒度及浸出时间对低品位氧化铜矿中提取铜(Ⅱ)的优化影响,并通过响应面图分析与Design-Expert软件的预测函数得到了提取Cu(Ⅱ)的最佳工艺条件。然而,该研究并未结合相关数理统计知识对数学模型系数的显著性进行综合分析,也未深入探讨工艺参数对浸出率的多重影响规律。

本研究的目标是利用Excel这一广泛使用且经济的软件,结合其在多数优化研究中尚未被充分挖掘的统计分析功能与最优解求解能力,将“Excel+响

应曲面法”推向工艺优化前沿。通过简单操作即可完成回归分析、方差分析(ANOVA)及最优解求解;相较于价格昂贵且需配备加密狗的Design-Expert软件,Excel模板可一键群发、现场秒改参数,真正实现“人人可做RSM”。本研究采用响应曲面法优化难处理氧化铜矿洗矿脱泥后-1 mm粒级的浸出工艺,具体分为以下关键步骤。

1)试验设计与数据收集。在前期探索性试验的基础上,通过单因素试验确定对细粒级铜矿浸出工艺影响最大的关键工艺参数及其取值范围。采用中心复合设计(CCD)方法设计并开展一系列浸出试验。

2)模型建立。利用CCD试验结果与Excel软件,基于最小二乘法构建用于预测浸出率的数学回归模型。

3)数据分析与图形化。借助Excel的绘图功能,根据回归模型绘制响应曲面图与等高线图。通过综合分析回归模型及其系数,探讨工艺参数对浸出率的多重影响规律。

4)优化求解。使用Excel的规划求解(Solver)功能对回归模型进行响应曲面分析与优化求解,以确定最佳浸出工艺条件,实现最大浸出率。

1 试验介绍

1.1 原料

试验用原料来自云南东川汤丹铜矿,试样中的铜矿物组成以硅孔雀石和孔雀石为主,并含有少量黄铜矿、铜硫矿、赤铜矿、钛铁矿、褐铁矿及锰矿。脉石矿物以石英为主,其次为白云石、方解石、绿泥石和长石。该氧化铜矿石的原矿化学多元素分析结果、铜物相分析结果以及粒度分析结果分别见表1、表2和表3。结果表明:试样的铜品位为1.07%,氧化率为91.63%(结合铜+游离氧化铜),结合率为18.69%,泥化程度(-0.01 mm为泥化级别)超过25%。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical multi-element analysis results of raw ore (mass fraction)

	Cu	Fe	MnO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	As	Ag(g/t)	Au(g/t)	TiO ₂
成分												
含量	1.07	4.31	0.65	4.91	3.72	8.08	57.1	0.10	0.02	0.87	<0.1	1.4

这些数据对于理解矿物的物理和化学特性至关重要,直接关系到矿物的浸出效率。具体而言,

氧化率和结合率的高低显著影响铜的浸出率;泥化程度则可能影响浸出速率及浸出效率。此外,矿物

表2 铜物相分析结果

Table 2 Results of copper phase analysis %

铜物相	硫化铜	结合铜	游离氧化铜	其他	总铜
含量	0.02	0.20	0.78	0.07	1.07
铜分布率	1.87	18.69	72.94	6.50	100.00

表3 粒度分析结果

Table 3 Particle size analysis results %

粒度/mm	产率	负累计 产率	Cu品位	Cu 占有率	负累计Cu 占有率
-1+0.043	14.86	100.00	0.83	11.48	100.00
-0.043+0.038	9.47	85.14	0.93	8.20	88.51
-0.038+0.019	36.55	75.67	0.97	33.01	80.31
-0.019+0.01	13.90	39.12	1.21	15.72	47.30
-0.01+0.005	23.32	25.22	1.36	29.53	31.58
-0.005	1.90	1.90	1.16	2.05	2.05
合计	100.00		1.07	100.00	

的粒度分布对浸出过程也有显著影响,较小的颗粒通常具有更大的比表面积,从而有利于提高浸出速率。

1.2 设备及试剂

1)试剂。硫酸为分析纯,试验时用去离子水配制为试验所需浓度。

2)仪器。上海力辰邦西仪器有限公司生产的LC-OES-60SH型电动磁力搅拌仪;常熟佳衡天平仪器有限公司生产的DT-1002A型电子天平;郑州圣元仪器有限公司生产的DHG-2080B型电热恒温鼓风干燥箱;河北博汇仪器有限公司生产的SHB-Ⅲ型循环水式真空泵。

1.3 试验方法

1.3.1 试验过程和浸出原理

试验采用500 mL玻璃烧杯作为反应器皿,在25℃恒温条件下进行,搅拌速度固定为500 r/min,液固比定义为硫酸溶液体积(mL)与氧化铜试样质量(g)之比,单位为mL/g。为考察硫酸浓度对铜浸出率的影响,设置硫酸浓度分别为46.36 g/L、60 g/L、80 g/L、100 g/L和113.64 g/L,每次试验中硫酸溶液体积固定为250 mL。具体试验步骤如下所述。

1)浆料制备。根据预定的浸出液固比,将称量好的氧化铜试样加入硫酸溶液中,制备成浆料。

2)搅拌反应。在不同预定时间内共进行20次试验。每组试验中,为保证充分混合,搅拌速度均

设定为500 r/min。

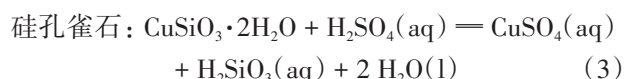
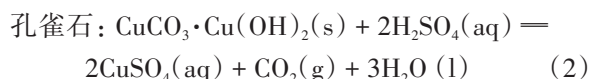
3)分离与干燥。反应结束后,采用抽滤方式实现固液分离,所得固体部分经105℃恒温干燥后称重。

4)化验分析。将所有样品送至实验室进行化验分析,并按式(1)计算浸出率。

$$y = (1 - \frac{M_2 C_2}{M_1 C_1}) 100\% \quad (1)$$

式中:y代表浸出率的响应变量; M_1 和 M_2 分别代表试样和过滤残渣的重量; C_1 和 C_2 分别代表试样和过滤残渣的铜品位。

试样中的主要矿物是孔雀石、硅孔雀石和石英,故酸浸中主要化学反应如式(2)和(3)所示^[9]。



在式(2)和(3)中,化学反应的程度受pH值控制,以上化学反应的进行需要足够低的pH值(通常在1~3之间)^[10]。

1.3.2 中心复合设计(CCD)试验

中心复合设计(CCD)是一种既高效又具有统计学依据的试验设计方法,能够生成足以拟合一个二次回归数学模型的代表性数据。在初步浸出试验中,考察硫酸溶液的浓度(最优范围为60~100 g/L)、浆料的液固比(最优范围为1~4 mL/g)以及浸出时间(最优范围为2~6 h)这三个影响浸出效率的关键工艺参数。基于CCD原则,优化研究中设计并执行了20次试验,其中包括8个因素水平点、6个轴向点和6个中心点,每个中心点试验的结果取两次测量值的算术平均数^[11]。

在CCD框架内, ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 代表自然变量,而 X_1 、 X_2 、 X_3 则分别对应于这些自然变量的规范化变量,即 X_1 对应硫酸溶液浓度、 X_2 对应液固比、 X_3 对应浸出时间。规范化变量与自然变量之间的转换关系由式(4)定义。通过这种转换,可以实现试验数据的标准化,从而更容易地进行统计分析和模型拟合。这种方法便于实验者半定量地评估每个工艺参数对浸出率的影响,并识别它们之间的相互作用规律,最终确定最佳的浸出条件。

$$\xi_i = \frac{(\xi_i, 1 - \xi_i, -1)}{2} x_i + \frac{(\xi_i, 1 + \xi_i, -1)}{2} \quad (4)$$

在其他非关键因素不变的情况下,3个变量的水平见表4。

Excel 回归分析是一种科学方法,其通过对试验结果进行线性方程式的拟合,来分析数据。在中心复合设计(CCD)的试验中,这些结果通常用于构建

一个线性模型,以反映试验变量和响应值之间的关系。表5为 CCD 设计矩阵及实验结果,由表5可知,在所考察的工艺参数范围内,浸出率的响应值介于 59.31% 到 82.18% 之间。

表4 CCD 实验设计代码及参数水平

Table 4 Code and parameter levels used for CCD

工艺参数	规范化变量	自然变量	规范变量的水平				
			-1.68	-1	0	1	1.68
硫酸溶液浓度/(g/L)	X_1	ξ_1	46.36	60	80	100	113.64
液固比/(mL/g)	X_2	ξ_2	0.65	1.5	2.75	4	4.85
浸出时间/h	X_3	ξ_3	0.64	2	4	6	7.36

表5 CCD 设计矩阵与实验结果

Table 5 Experimental results of CCD with the linear design

序号	浸出参数			规范变量									浸出率/%
	硫酸溶液浓度/(g/L)	液固比/(mL/g)	浸出时间/h	X_1	X_2	X_3	X_1X_2 (A)	X_2X_3 (B)	X_1X_3 (C)	X_1^2 (D)	X_2^2 (E)	X_3^2 (F)	
1	100	4	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	81.06
2	100	4	2	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	80.03
3	100	1.5	6	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	80.04
4	60	4	6	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	72.14
5	60	1.5	6	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	67.63
6	100	1.5	2	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	81.95
7	60	4	2	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	71.53
8	60	1.5	2	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	64.45
9	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
10	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
11	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
12	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
13	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
14	80	2.75	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80.23
15	113.64	2.75	4	1.68	0	0	0	0	0	1.68	0	0	82.18
16	46.36	2.75	4	-1.68	0	0	0	0	0	1.68	0	0	59.31
17	80	4.85	4	0	1.68	0	0	0	0	0	1.68	0	79.19
18	80	0.65	4	0	-1.68	0	0	0	0	0	1.68	0	74.75
19	80	2.75	7.36	0	0	1.68	0	0	0	0	0	1.68	81.45
20	80	2.75	0.64	0	0	-1.68	0	0	0	0	0	1.68	77.77

为了获得最大浸出率,需要对这些工艺参数进行精确的优化。这通常涉及到使用 Excel 的回归分析工具,如“数据分析”功能中“回归”选项,来确定

最佳的参数组合。通过这种分析,可识别出对浸出率影响最为显著的参数,以及对浸出效率影响的规律。最后优化试验条件,以达到最佳的浸出效果。

1.4 优化方法

本研究采用的浸出参数优化方法基于二次回归数学模型,该模型用于估计浸出率与工艺参数之间的相互关系(式(5)),并利用 Excel 2010 软件辅助完成优化过程。

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_2 X_3 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_1^2 + \beta_8 X_2^2 + \beta_9 X_3^2 + \beta_0 \quad (5)$$

式中: Y 表示浸出率这一响应变量; X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表硫酸浓度、矿浆液固比和浸出时间这三个主要工艺参数的规范化变量; β_0 是常数项系数值; β_1 、 β_2 和 β_3 是线性项的回归系数; β_4 、 β_5 和 β_6 是交互项的回归系数; β_7 、 β_8 和 β_9 是二次项的回归系数。

由于 Excel 软件的回归分析功能仅限于线性方程,因此需要将式(5)转换为线性形式,即式(6)所示的线性方程,以便在 Excel 中进行分析。

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 A + \beta_5 B + \beta_6 C + \beta_7 D + \beta_8 E + \beta_9 F + \beta_0 \quad (6)$$

式中: Y 代表浸出率的响应变量; X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表硫酸浓度、矿浆液固比和浸出时间这三个主要工艺参数的编码值; A 、 B 、 C 、 D 、 E 和 F 分别对应于式(5)中的 $X_1 X_2$ 、 $X_2 X_3$ 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 等规范化变量; β_0 是恒定的回归系数; β_1 至 β_9 是回归系数。

通过最小二乘法 and Excel 2010 的回归分析工具,可以根据 CCD 试验结果估算出式(6)中的所有系数。

2 结果与讨论

2.1 优化模型的拟合及其方差分析

基于中心复合设计(CCD)的试验数据,利用最小二乘法和 Excel 2010 的回归分析工具估算式(6)(亦即式(5))的各回归系数,获得用于优化浸出过程的回归模型,见式(7)。

$$Y = 6.28 X_1 + 1.33 X_2 + 0.67 X_3 - 1.56 X_1 X_2 + 0.05 X_2 X_3 - 0.58 X_1 X_3 - 3.49 X_1^2 - 1.29 X_2^2 - 0.35 X_3^2 + 80.24 \quad (7)$$

式中: Y 代表浸出率; X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表浸出参数(硫酸溶液浓度、矿浆液固比和浸出时间)对应的规范变量。

模型的检验是数据分析中的关键步骤,因为一个不合适的模型可能会导致误导性的结论^[12]。方差分析(ANOVA)是可以用于检测所拟合回归模型的显著性的数学工具,其具有可以评估模型对数据

的拟合程度,并识别模型中的异常值和影响点的特点,通过排除这些异常数据点,可以提高模型的可靠性,并获得高度可信的模型来优化和预测浸出率。回归模型式(7)的方差分析结果详见表6。在表6二次回归模型的显著性检验中, F 值越大表明模型的显著性更高,更可靠。模型的 F 值为91.14,表明模型具有很高的显著性。同样,较高的 R^2 值0.988(接近于1的值)也是比较理想的,并且 R^2 值(0.988)与调整后的 R^2 值(0.977),两者都非常接近于1,揭示出其它非主要参数对浸出率没有显著影响,模型的可信度较强。

表6 二次回归模型的显著性检验

Table 6 Significance test of the second-order regression model

分析项	自由度	总方差	平均方差	F值	P值	显著性
模型	9	779.77	86.64	91.14	<0.000 1	显著
残差	10	9.51	0.95	—	—	—
总计	19	789.27	—	—	—	—

$R^2=0.988$, 调整后 $R^2=0.977$

利用 Excel 软件的回归分析工具对式(7)的回归系数进行显著性检验,结果汇总在表7中。在式(7)中,正的回归系数意味着相应变量对浸出率有正面的提升作用,而负的回归系数则表示有负面的抑制作用。根据统计学原理,表7中模型系数的 p 值是衡量该系数显著性的指标, p 值越小,表明该系数对浸出率的影响越显著^[12]。

具体来说, p 值小于0.1通常被视为统计上显著

表7 二次回归系数的显著性检验结果

Table 7 Results of significance test for coefficients of the second regression model

模型项	回归系数	系数值	标准误差	t统计量	P值	显著性
x_1	β_1	6.28	0.26	23.81	<0.0001	显著
x_2	β_2	1.33	0.26	5.04	0.001	显著
x_3	β_3	0.67	0.26	2.53	0.030	显著
$x_1 x_2$	β_4	-1.56	0.34	-4.53	0.001	显著
$x_2 x_3$	β_5	0.05	0.34	0.13	0.896	不显著
$x_1 x_3$	β_6	-0.58	0.34	-1.69	0.121	不显著
x_1^2	β_7	-3.49	0.26	-13.58	<0.0001	显著
x_2^2	β_8	-1.29	0.26	-5.01	0.001	显著
x_3^2	β_9	-0.35	0.26	-1.38	0.198	不显著

的,意味着该系数对浸出率有显著影响;而 p 值大于0.1则表明该系数的影响不显著。基于这些标准,可以得出以下结论。

1) 硫酸浓度对浸出率的影响最为显著,超过浸出液固比和浸出时间的影响。这表明硫酸浓度是影响浸出率的关键因素。

2) 矿浆液固比对浸出率的影响小于浸出时间,但两者都在适当的范围内对浸出率有正向影响。

3) 当硫酸浓度或浸出液固比过高时,会对浸出率产生显著的负面影响。这可能是因为过高的硫酸浓度或液固比可能导致反应条件过于剧烈,不利于铜的浸出。

4) 与硫酸浓度和液固比相比,浸出时间过长对浸出率的负面影响不显著,说明在本研究的条件下,浸出时间对浸出率的影响相对较小。

5) 交互项 X_1X_2 (硫酸浓度 $\times$ 液固比) 的系数为-1.56,且 $p=0.001<0.1$,表明硫酸浓度与液固比的交互作用对浸出率具有显著的负面影响。这可能是因为二者共同作用时,过高的硫酸浓度和液固比加剧了不利反应条件,从而抑制铜的浸出。而交互项 X_2X_3 与 X_1X_3 的 p 值分别为0.896、0.121,均远大于0.1,说明液固比与浸出时间、硫酸浓度与浸出时间之间的交互作用对浸出率的影响不显著。这可能是因为浸出时间在这三个参数中对浸出率的影响最小,即便延长浸出时间,对浸出率的提升亦不明显。

6) 从机理层面分析,酸浓度决定质子活性,初期酸度越高,铜的溶出越快;但酸度过高会导致离子强度升高,杂质中的铁、铝共沉淀形成结壳,反而阻碍扩散,出现“酸多无益”的拐点。液固比增大可稀释矿浆,减薄团聚层,使酸更易渗入;然而,继续增加水量会降低铜离子浓度梯度,削弱传质驱动力,提升效果有限。时间延长在前段可迅速完成表面反应,后段则受硅酸盐包裹层限制,浸出趋于停滞,同时同步溶出的杂质会抵消部分收益,因此时间影响最弱。高酸配合高液固比协同作用,易促成致密沉积层,这是负交互效应的主要原因;而酸与时间、液固比与时间之间缺乏协同通道,故交互作用不显著。

综上,经Excel回归分析所获的系数差异,实质上反映了浸出过程中主导因素的演变机制,为后续在酸耗控制、Fe-Al抑制及扩散强化等方面的精准优

化提供了理论靶点。通过回归分析,不仅确定了各工艺参数对浸出率的独立影响,还揭示了其交互作用对浸出率的综合效应,为浸出工艺优化提供了重要的参考依据。

为了检验预测模型与试验结果的一致性,将式(7)预测的浸出率与表5中的试验浸出率进行比较,结果如图1所示。图1表明,所预测的浸出率与试验浸出率具有良好的一致性。

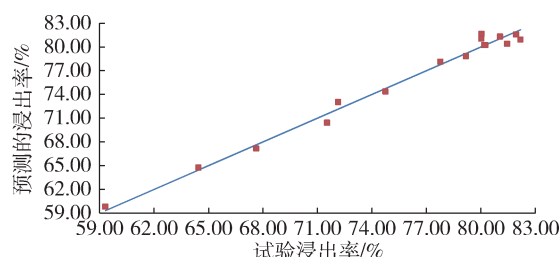


图1 浸出率的试验与预测结果

Fig. 1 Test and prediction results of leaching rate

2.2 工艺参数影响规律的响应曲面分析

利用Excel软件的绘图功能,根据式(7)绘制了工艺参数对浸出率影响的响应曲面图,如图2、图3和图4所示。这些图表展示了在保持其中一个规范变量不变的情况下,另外两个规范变量对浸出率的影响规律。

2.2.1 硫酸浓度与浸出液固比的影响

图2为固定浸出时间4 h(0水平)下的硫酸浓度和浸出液固比对浸出率影响规律的曲面图和等高线图。由图2可得出,在浸出时间恒定为4 h(0水平)时,硫酸浓度和浸出液固比对浸出率具有一定的影响,随着硫酸浓度从60 g/L增加至约96 g/L,浸出率先逐渐增加至最大值,之后随着硫酸浓度的继续增加,对浸出率的影响减弱。同时,随着浸出液固比的增加,浸出率也逐渐增大至最大值,当浸出液固比增加至3 mL/g左右时,继续增加液固比会导致浸出率略微下降。这是因为在适宜的硫酸浓度范围内,较高的硫酸浓度有利于铜与硫酸的完全反应,而超过一定浓度后,高酸条件下,脉石矿物(白云石、方解石)溶出加剧,消耗大量酸液,使有效酸度未能按比例提升;同时Fe、Al等杂质离子大量溶出,可能与硅酸根形成胶体或氢氧化物沉淀,吸附于矿物表面,阻碍酸液扩散。此外,铜的可浸出部分在约96 g/L时已接近溶出极限,继续增加酸浓度

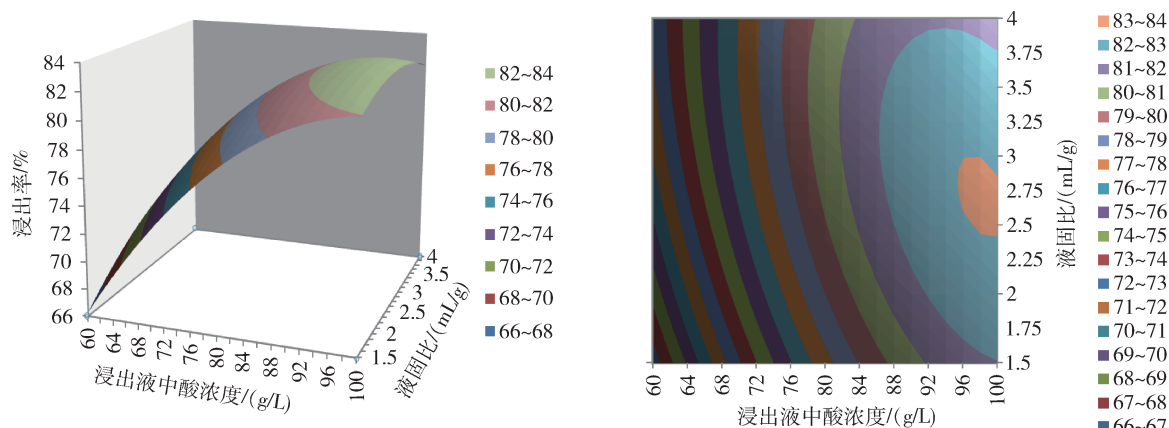


图2 浸出时间(4 h)下的硫酸浓度和浸出液固比对浸出率影响规律的曲面图和等高线图

Fig. 2 Surface and contour plot of the influence of sulfuric acid concentration and the liquid-to-solid ratio on the leaching rate at an intermediate leaching time (4 h)

贡献有限。因此,适宜的硫酸浓度约为96 g/L,浸出液固比约为3 mL/g,此时铜浸出率可达83%~84%。

2.2.2 浸出液固比与浸出时间的影响

图3为硫酸浓度固定为80 g/L(0水平)下的浸出液固比和浸出时间对浸出率影响规律的曲面图和等高线图结果。由图3可得出,随着浸出液固比的增加,浸出率先增加至峰值,当浸出液固比增加至3 mL/g左右时,继续增加液固比,浸出率几乎不再变化。同样,在2 h至4 h浸出时间范围内,增加浸出时间有利于提高浸出率,之后继续延长浸出时间,浸出率几乎不再变化。这表明铜的完全酸性浸出需要足够的浸出时间,但过长的浸出时间不会导致更多的矿物浸出。适宜的浸出液固比约为3 mL/g,浸出时间约为4 h,铜浸出率可达80%~81%。

2.2.3 硫酸浓度与浸出时间的影响

图4为浸出液固比恒定为2.75 mL/g(0水平)下的硫酸浓度和浸出时间对浸出率影响规律的曲面图和等高线图。由图4可得出,随着硫酸浓度和浸出时间的增加,浸出率先增加后基本保持不变。当硫酸浓度约为96 g/L,浸出时间约为4 h时,铜浸出率可达83%~84%。

2.3 最终优化结果

由图2-4的三维曲面图的凹性特征可以看出浸出率的响应变量有一个最大值,确定最佳工艺条件为硫酸浓度96 g/L左右、浸出液固比3 mL/g左右、浸出时间4.0 h左右,此条件下,浸出率可达83%~84%。

为了得到最大浸出率的具体值及其相应的工艺参数,采用Excel软件的规划求解工具求解式(7)

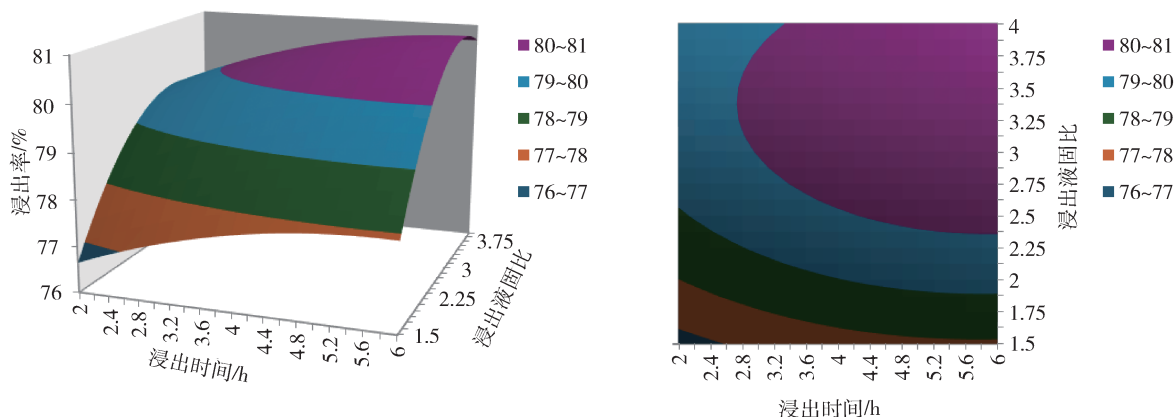


图3 硫酸溶液浓度(80 g/L)下的矿浆液固比和浸出时间对浸出率影响规律的曲面图和等高线图

Fig. 3 The surface and contour plots of the effect of pulp liquid-to-solid ratio and leaching time on leaching rate under medium sulfuric acid solution concentration (80 g/L)

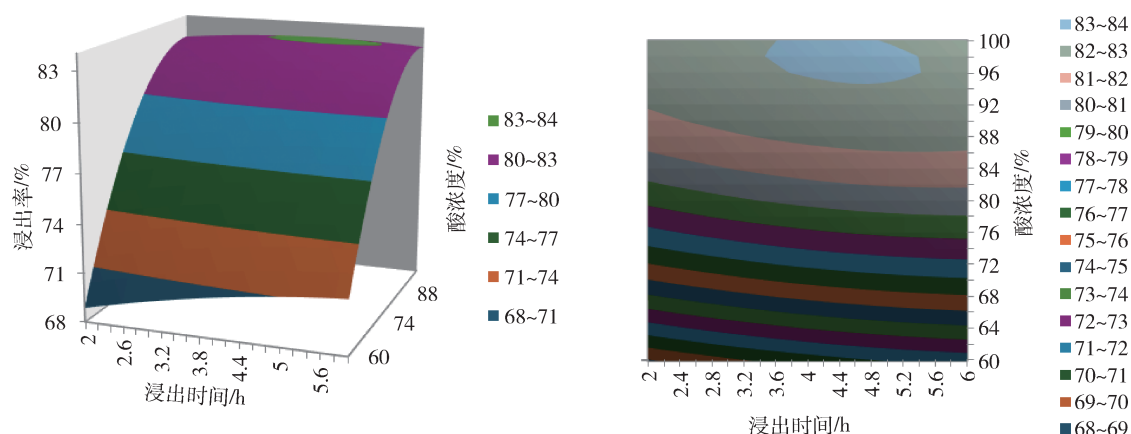


图4 矿浆液固比(2.75 mL/g)下的硫酸浓度和浸出时间对浸出率影响规律的曲面图和等高线图

Fig. 4 The surface and contour plot of the influence law of sulfuric acid concentration and leaching time on leaching rate under the medium pulp liquid-to-solid ratio(2.75 mL/g)

的最大值,此时获得最佳工艺参数的规划变量: $X_1=0.81$, $X_2=0.41$, $X_3=0.16$,对应的自然变量 $\xi_1=20X_1+80=96.16$, $\xi_2=1.25X_2+2.75=3.26$, $\xi_3=2X_3+4=4.32$,最大浸出率预测结果为83.39%。

在硫酸浓度为96.16 g/L,浸出液固比为3.26 mL/g,浸出时间为4.32 h的最佳工艺条件下进行验证浸出试验,可获得试验浸出率为84.15%的指标,这一值与预测值83.39%有较好的一致性。

3 结论

针对单因素工艺试验及Design-Expert软件成本高的问题,本研究以高泥化氧化铜矿硫酸浸出为研究对象,进行了20次部分条件酸浸试验,然后基于Excel软件完成了回归分析、方差分析(ANOVA)及响应曲面最优解求解,得到以下主要结论。

1)20次酸浸试验表明,在硫酸浓度60~100 g/L、浆料的液固比1~4 mL/g、浸出时间2~6 h的条件下,浸出率介于59.31%到82.18%之间。

2)Excel软件的回归分析表明,三个关键工艺参数在一定范围内均对浸出率具有正面影响作用,影响力排序为:硫酸浓度>浸出时间>矿浆液固比;硫酸浓度或浸出液固比过高时,会对浸出率产生显著的负面影响,浸出时间过长对浸出率的负面影响不显著。

3)硫酸浓度与液固比的交互作用对浸出率具有显著的负面影响,液固比与浸出时间、硫酸浓度与浸出时间之间的交互作用对浸出率的影响不显著。

4)利用Excel软件绘制工艺参数交互作用响应曲面图,确定最佳工艺条件为硫酸浓度96 g/L左右、浸出液固比3 mL/g左右、浸出时间4.0 h左右,此条件下,浸出率可达83%~84%。

5)采用Excel软件的规划求解工具求最大值,获得硫酸浓度、浸出液固比、浸出时间对应的最优解分别为96.16 g/L、3.26 mL/g、4.32 h,最大目标参数浸出率预测结果为83.39%。

6)验证试验表明,在硫酸浓度96.16 g/L、浸出液固比3.26 mL/g、浸出时间4.32 h的条件下,浸出率可达84.15%。该结果与模型预测的浸出率(83.39%)非常接近,表明模型的预测准确性和优化结果的可靠性。

本研究方法以Excel替代专业统计软件,不仅为高泥氧化铜矿的硫酸浸出工艺提供了一种高效的参数优化策略,而且为矿物加工及其他相关领域的工艺优化提供了一种成本效益高、操作简便的解决方案。

[参考文献]

- [1] Apua M Clotilde, Madiba Mapilane S. Leaching kinetics and predictive models for elements extraction from copper oxide ore in sulfuric acid [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2021, 121: 313-320.
- [2] Maleki H, Chehreghani S, Noaparast S G M. Dissolution kinetics of a copper oxide ore sample and optimizing the effective parameters, using response surface methodology [J]. Rudarsko-geolosko-naftni zbornik, 2023, 38(2): 75-85.
- [3] Ayodele T J, Daniyan A A, Adeleke A A, et al. Optimization of leaching parameters for the extraction of copper from hematite-dominated copper ore using response surface methodology (RSM)

- [J]. Nigerian Journal of Technology, 2023, 42(3): 353–363.
- [4] Wang, Chongqing, Sun Ruirui, Xing Baolin. Copper recovery from waste printed circuit boards by the flotation-leaching process optimized using response surface methodology [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2021, 71(12): 1483–1491.
- [5] Hao Juanjuan, Wang Xiaolu, Wu Yufei, et al. Optimizing the leaching parameters and studying the kinetics of copper recovery from waste printed circuit boards[J]. ACS omega, 2022, 7(4): 3689–3699.
- [6] Li Meng, Zhang Ying, Wang Xiaohui, et al. Extraction of copper, zinc and cadmium from copper-cadmium-bearing slag by oxidative acid leaching process[J]. Rare Metals, 2021, 40(10): 1–10.
- [7] Rao M D, Singh K K, Morrison C A, et al. Optimization of process parameters for the selective leaching of copper, nickel, and isolation of gold from obsolete mobile phone PCBs [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2021(4): 100180.
- [8] Bai Xu, Wen Shuming, Liu Jian, et al. Lin. Response surface methodology for optimization of copper leaching from refractory flotation tailings[J]. Minerals, 2018, 8(4): 1–13.
- [9] Hosseinzadeh M, Hosseini M. Investigation and optimization of influencing parameters on the copper extraction from a low-grade oxide deposit by acid leaching [J]. Metallurgical Research & Technology, 2019, 116(3): 409–413.
- [10] Shabani M A, Irannajad M, Azadmehr A R. Investigation on leaching of malachite by citric acid[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(9): 782–786.
- [11] Vitanov V I, Javaid N, Stephenson D J. Application of response surface methodology for the optimization of micro friction surfacing process [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(21–22): 3501–3508
- [12] Tan I A W, Ahmad A L, Hameed B H. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 137(3): 462–470.

Optimization of acid leaching process for high-clay copper oxide ore using response surface methodology based on excel regression modeling

Wang Purong^{1,2}, Xu Guoyin², Dai Huixin¹, Zhao Jiageng², Wu Changhong²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: To address the high cost of single-factor process experiments and Design-Expert software, this study investigates the sulfuric acid leaching of high-clay copper oxide ore. A central composite design (CCD) was employed to conduct 20 sets of acid leaching experiments. With sulfuric acid concentration, liquid-to-solid ratio, and leaching time as independent variables, and copper leaching rate as the response value, a quadratic regression model was established using Excel. Analysis of variance (ANOVA) and response surface optimization were performed to determine the optimal solution. The results show that the model is highly significant ($F = 91.14$, $R^2 = 0.988$). The influence of factors on the leaching rate follows the order: sulfuric acid concentration > leaching time > liquid-to-solid ratio. The interaction between sulfuric acid concentration and liquid-to-solid ratio exhibits a significant negative effect. The optimal process conditions obtained from the response surface optimization are: sulfuric acid concentration of 96.16 g/L, liquid-to-solid ratio of 3.26 mL/g, and leaching time of 4.32 h, with a predicted leaching rate of 83.39%. A verification experiment yielded a leaching rate of 84.15%, showing good agreement with the prediction, indicating the predictive accuracy of the model and the reliability of the optimization results. By replacing professional statistical software with Excel, this method not only provides an efficient parameter optimization strategy for the sulfuric acid leaching process of high-clay copper oxide ore but also offers a cost-effective and easy-to-operate solution for process optimization in mineral processing and other related fields.

Key words: high-mud oxidized copper ore; acid leaching; response surface methodology; Excel; regression analysis; process optimization