

响应曲面法优化 NaClO 浸出贵州难浸金矿中的金

许才武¹, 蒋中刚², 唐道文^{1*}, 袁 鑫¹, 邹 涛¹, 邱 洋¹

(1. 贵州大学 材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 贵州紫金矿业股份有限公司, 贵州 黔西南 562205)

摘 要: 采用响应曲面法(RSM)优化 NaClO 浸出贵州难浸金矿中的金, 探究了 NaClO 浓度、温度、液固比、pH 值 4 个因素之间的交互作用及其对金浸金率的影响, 并进行了参数优化。RSM 分析表明, 各因素对金浸出率的显著程度为: NaClO 浓度>液固比>pH>温度, NaClO 浓度和 pH 之间的交互作用较为显著; 得到较优的浸金工艺条件为: 反应时间 3 h, NaClO 浓度 0.9 mol/L, 初始 pH=13.4, 液固比 8.2, 温度 27 °C, 在此条件下金的浸出率为 93.4%。

关键词: 难浸金矿; NaClO; 响应曲面法; 优化

中图分类号: TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)02-0062-07

Optimization of NaClO leaching process of gold from refractory gold ores in Guizhou by response surface methodology

XU Caiwu¹, JIANG Zhonggang², TANG Daowen^{1*}, YUAN Xin¹, ZOU Tao¹, QIU Yang¹

(1. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Zijin Mining Company Limited, Qianxinan 562205, Guizhou, China)

Abstract: The response surface methodology (RSM) was used to optimize NaClO leaching process of gold from the refractory gold ores in Guizhou, and the interaction among four factors, namely, NaClO concentration, temperature, liquid-solid ratio and pH, and their effects on the gold leaching rate were investigated, and the parameters were optimized. RSM analysis showed that the significant order of each factor on the gold leaching rate was NaClO concentration > liquid-solid ratio > pH > temperature, and the interaction between NaClO concentration and pH was more significant. A good gold leaching rate of 93.4% were achieved under the condition as follows: a reaction time of 3 h, NaClO concentration of 0.9 mol/L, pH=13.4, liquid-solid ratio of 8.2, and temperature of 27 °C.

Key words: refractory gold ore; sodium hypochlorite; response surface method (RSM); optimize

金被广泛应用在航空航天、电子设备、工艺品、金融投资及国际储备等众多领域, 是极其重要的贵金属。目前, 全球易选冶的金矿资源日益枯竭, 但是黄金需求量上涨, 这就迫切需要开发占全球已探明金矿资源三分之二的难浸金矿。而贵州省具有储量丰富的难浸金矿, 该种金矿目前已探明的黄金储量超过 200 t, 远期储量超过 500 t, 具有极大的经济价值^[1-3]。当前, 氰化法仍是黄金生产的主要方法, 但因氰化物属于剧毒物质, 会产生大量含氰废

水和废渣, 严重污染环境和影响周边居民生活, 目前已有相当多国家禁止使用氰化法提金^[4]。因此, 开发和研究针对贵州难浸金矿的非氰化浸出工艺意义重大^[5]。

本实验在中低温条件下采用 NaClO 溶液进行浸出难浸金矿的实验研究。NaClO 可以在分解载金矿物 FeS₂ 和 FeAsS 的同时络合浸出金, 具有以下优点: 1) 流程短。预处理和浸出合二为一。2) 无污染。避开了氰化物剧毒带来的生产操作难度和对环

收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1412 号)

第一作者: 许才武, 男, 硕士研究生; 研究方向: 冶金工程; E-mail: 2980894995@qq.com

*通信作者: 唐道文, 男, 教授; 研究方向: 贵金属及冶金资源综合利用; E-mail: tangdaowen@sina.com

境造成的压力。3) 浸金效果好。浸金所需时间短，且金在氯化物溶液中不会形成氧化物或氢氧化物钝化膜^[6-7]。

NaClO 浸金是一种高效、低毒、环保的非氰化提金工艺。采用响应曲面法(RSM)，可得到 NaClO 浸出贵州难浸金矿各因素对金浸出率影响的显著程度和较优工艺条件。为该类金矿的选冶优化、工业应用以及提高浸金率等方面提供理论指导。

1 实验

1.1 矿石特征

选用贵州紫金矿业股份有限公司的难浸金矿石作为研究对象，该金矿床位于贵州省黔西南州贞丰县境内。该金矿的矿石外观呈致密块状灰岩，球磨机破碎后经 XRF 荧光光谱仪分析得到矿石的化学组成，结果见表 1，其中金的含量为 15.03 g/t^[8-9]。

表 1 矿石化学组成

Tab.1 Chemical composition of the ore						/%
成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
含量	46.4	15.6	10.9	8.19	7.88	5.79
成分	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	As ₂ O ₃	MnO	BaO
含量	2.23	1.61	0.40	0.34	0.25	0.12
成分	Na ₂ O	SrO	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂		
含量	0.11	0.05	0.03	0.02		

由表 1 可知，金矿石中 SiO₂、CaO 和 Al₂O₃ 含量最多，分别为 46.4%、15.6%和 10.9%，Fe、S、Mg 等元素含量次之。根据 X 射线衍射分析的结果，金矿的主要物相为二氧化硅、碳酸钙、白云石、黄铁矿，未出现金或金的化合物衍射峰。

1.2 仪器及试剂

主要设备：A3AFG 型火焰原子吸收分光光度计、X-Pert PRO 型 XRD 衍射仪、1800 型 XRF 荧光光谱仪、202-4ABS 型电热恒温干燥箱、PHS-3C 型精密 pH 计、GWA-UN4-S30 型超纯水器。

主要试剂：NaClO 溶液、盐酸、硝酸、氟化钠、酒石酸、氢氧化钠、三正辛胺，均为分析纯试剂。

1.3 实验方法

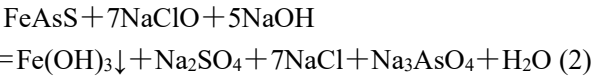
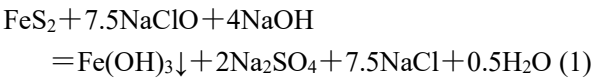
取 25 g 制备得到的矿粉(-74 μm 粒级占 92%)置于 500 mL 洁净烧杯中，加入配置好的浸出剂，进行定速定温搅拌浸出。浸出结束后将矿浆抽滤、干燥得到浸出渣。最后用泡沫塑料富集-火焰原子吸收

光谱法测定浸出渣中的金含量，得到金的浸出率。

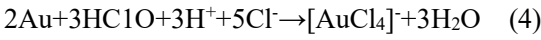
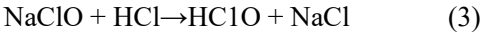
响应曲面法能够同时研究多种要素间的相互作用、获得高精度的回归方程进而合理展望找到最优工艺条件。其一般步骤有：设计试验方案，进行试验并收集数据，试验数据检查，分析试验数据，模型拟合，剔除非显著项，模型诊断，对选定模型分析解释，求解最佳点的因素水平及最佳值，进行验证实验。

1.4 实验原理

贵州难浸金矿中载金矿物多以黄铁矿和砷黄铁矿为主^[10]。碱性介质中，在以 NaClO 为氧化剂的作用下，矿物中的 S 和 As 首先氧化成 S₂O₃²⁻和 AsS₃³⁻，随后氧化成 SO₄²⁻和 AsO₄³⁻，反应见式(1)和式(2)：



而 NaClO 浸金是在 Au-Cl-H₂O 体系中进行的，在该体系中，Au³⁺与 Cl⁻形成稳定的配合物，在 5 < pH < 8 时，AuCl₄⁻能在溶液中稳定存在，反应见式(3)和式(4)。标准状态下，这些反应的热力学趋势愈来愈小^[11]。



从 Au-Cl-H₂O 系的 E-pH 图(图 1)可看出在不同 pH 条件下金的存在形式。在 NaClO 强碱体系中，随着 pH 值的提高，AuCl₄⁻稳定性变差，逐渐以 Au(OH)₃形式沉淀；当继续碱化时，当 pH > 13 时，Au(OH)₃表现出两性而溶解，形成了 H₂AuO₃⁻和 HAuO₃²⁻^[7]。反应如式(5~8)：

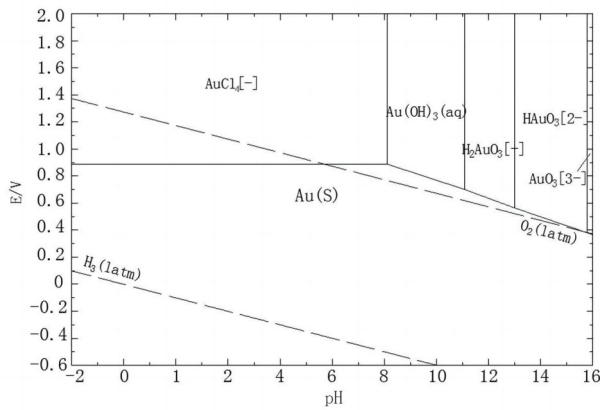
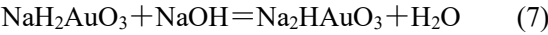
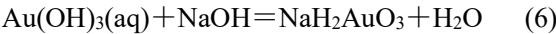
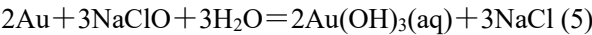


图 1 Au-Cl-H₂O 系 E-pH 图(298.15K)

Fig.1 E-pH diagram of Au-Cl-H₂O system (298.15K)



根据以上分析,在 NaClO-NaOH 体系中,FeS₂ 和 FeAsS 很容易被分解,与此同时,被 FeS₂ 和 FeAsS 包裹的微粒金被剥离而暴露在 NaClO 溶液中,反应生成 H₂AuO₃⁻和 HAuO₃²⁻使金从固相中转移到溶液中而被浸出,从而实现一步法浸金^[11-12]。

1.5 响应曲面法实验设计

前期的理论分析和试验表明,NaClO 对贵州难浸金矿具有一定的浸出效果,金的最佳浸出率为 90.90%。表明 NaClO 其作为氧化剂可以有效打开贵州难浸金矿中硫化物对金的包裹,使后续的金浸出剂与金颗粒充分接触,且其本身可以作为络合剂,具有一定的浸金能力^[13-14]。因此,如何优化实验获得 NaClO 浸出贵州难浸金矿最优工艺条件,最大程度的提高浸出率成为了当前需要解决的主要问题。

采用响应曲面法进行交互试验设计,应用 Design expert v8.0.6.1 中的 BBD 设计模块进行四因素三水平的中心复合设计试验。在前期试验的基础上,对响应曲面试验因素的中心点和水平进行了合理的选择。试验中各因素的水平、变化步长见表 2。将表 2 的实验因素、水平值录入 Design expert v8.0.6.1 软件,依据软件生成的实验方案进行实验。

表 2 响应曲面试验因素水平编码

Tab.2 Horizontal coding of response surface test factors

因素	变量	水平		
		-1	0	1
A	NaClO 浓度/(mol/L)	0.3	0.6	0.9
B	温度/°C	25	30	35
C	液固比	6	9	12
D	反应 pH	12.5	13	13.5

2 结果与讨论

2.1 拟合回归方程的建立

实验方案中共有 29 组试验点,响应曲面法实验方案和结果见表 3。对表 3 的试验数据进行多元二次方程拟合,拟合回归方程如下:

$$\begin{aligned} Y = & +90.91 + 3.27A - 0.11B + 0.57C + 0.33D - 1.35AB \\ & - 0.69AC + 1.71AD + 2.02BC - 1.71BD - 1.04CD \\ & - 5.30A^2 - 2.92B^2 - 3.94C^2 - 1.93D^2 \end{aligned}$$

表 3 响应曲面设计方案及实验结果

Tab.3 Response surface design scheme and experimental results

编号	因素				金浸出率 Y/%
	A	B	C	D	
1 [#]	0.6	30	9	13	90.9
2 [#]	0.6	25	9	12.5	85.5
3 [#]	0.9	30	9	12.5	84.1
4 [#]	0.9	25	9	13	86.8
5 [#]	0.3	35	9	13	81.4
6 [#]	0.6	30	12	13.5	84.1
7 [#]	0.9	35	9	13	85.5
8 [#]	0.9	30	9	13.5	88.2
9 [#]	0.6	35	9	12.5	86.9
10 [#]	0.9	30	12	13	85.5
11 [#]	0.6	25	6	13	84.1
12 [#]	0.3	30	9	12.5	81.4
13 [#]	0.6	35	12	13	86.8
14 [#]	0.3	30	9	13.5	78.7
15 [#]	0.6	30	12	12.5	85.5
16 [#]	0.6	25	12	13	82.8
17 [#]	0.6	30	9	13	90.9
18 [#]	0.6	35	9	13.5	84.1
19 [#]	0.3	25	9	13	77.4
20 [#]	0.6	35	6	13	80.1
21 [#]	0.6	25	9	13.5	89.6
22 [#]	0.3	30	12	13	80.1
23 [#]	0.6	30	9	13	90.9
24 [#]	0.3	30	6	13	77.4
25 [#]	0.6	30	6	12.5	84.1
26 [#]	0.6	30	9	13	90.9
27 [#]	0.9	30	6	13	85.5
28 [#]	0.6	30	6	13.5	86.8
29 [#]	0.6	30	9	13	90.9

2.2 模型方差及可信度分析

利用 Design expert v8.0.6.1 软件进行方差分析可得金浸出率回归模型的方差分析数据,见表 4。图 2 为残差的正态概率分布图和预测值和残差对比图。图 3 为实际值和预测值对比图和残差和实验次数的关系图。

通常在方差分析中利用 P 值代表模型的显著性,当 P<0.05 时,代表模型具有显著性;当 P<0.001 时,代表模型具有高度显著性。由表 4 可知,回归模型 P<0.0001,表明回归模型达到高度显著水平。

表 4 金浸出率回归模型的方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression model of gold leaching

rate					
方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	442.12	14	31.58	26.58	< 0.0001
A	128.51	1	128.51	108.17	<0.0001
B	0.15	1	0.15	0.12	0.7297
C	3.88	1	3.88	3.26	0.0923
D	1.33	1	1.33	1.12	0.3081
AB	7.31	1	7.31	6.15	0.0264
AC	1.88	1	1.88	1.59	0.2285
AD	11.64	1	11.64	9.79	0.0074
BC	16.28	1	16.28	13.7	0.0024

续表 4 (Tab.4 continued)

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
BD	11.64	1	11.64	9.79	0.0074
CD	4.33	1	4.33	3.64	0.0771
A ²	181.9	1	181.9	153.1	<0.0001
B ²	55.47	1	55.47	46.69	<0.0001
C ²	100.87	1	100.87	84.9	<0.0001
D ²	24.06	1	24.06	20.25	0.0005
残差	16.63	14	1.19		
失拟项	16.63	10	1.66		
纯误差	7.15×10 ⁻⁴	4	1.79×10 ⁻⁴		
总和	458.75	28			

$R^2=0.963749$

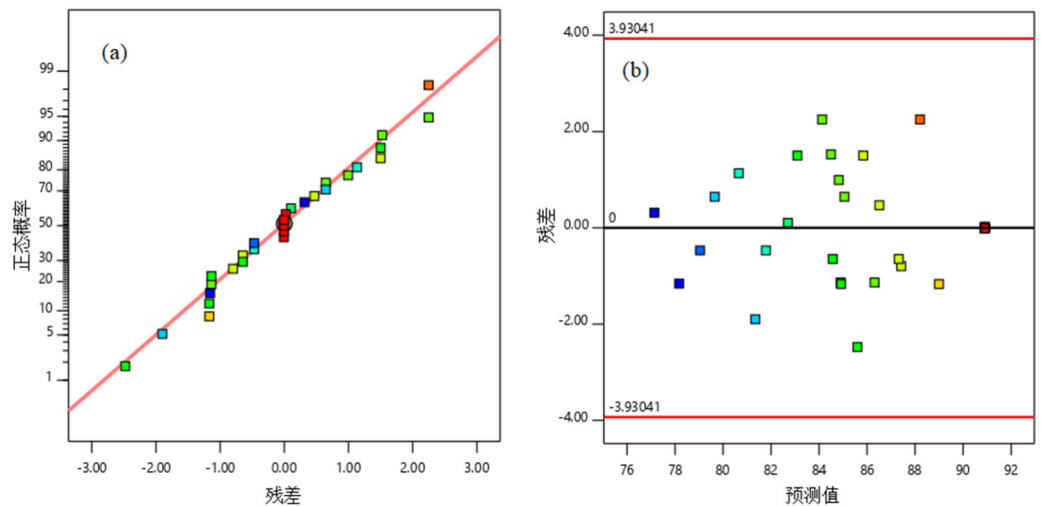


图 2 残差的正态概率分布图(a)、预测值和残差对比图(b)

Fig.2 Plot of normal probability distribution of residuals (a), comparison of predicted values and residuals (b)

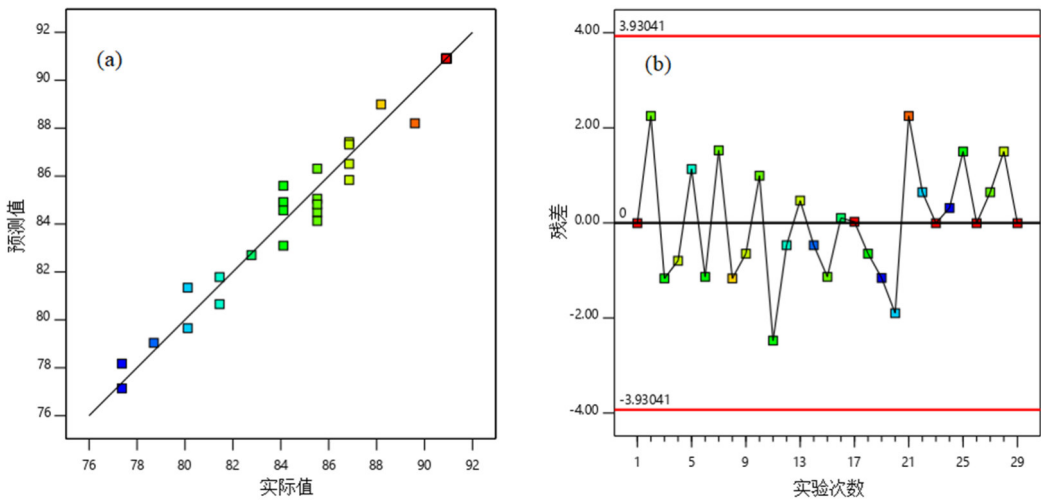


图 3 预测值与实际值响应图(a)，残差与实验次数关系图(b)

Fig.3 Predicted versus actual value response plot (a), residual versus number of experiments plot (b)

$R^2=0.963749$, 说明该模型能够解释响应值变化的 96.3749%, 模型具有良好的拟合程度, 相关性强^[15]。

由图 2(a)可看出, 坐标点基本在一条直线上, 残差服从正态分布, 表明模型假设具有合理性、可靠性。由图 2(b)可看出, 坐标点基本无规律分布, 残差的散点波动范围基本保持不变, 不随预测值的变化而变化, 表明残差具有随机性和不可预测性, 说明模型具有可靠性。

由图 3(a)可知, 图中的点与斜线的距离越近, 代表实际值与预测值越相近, 即方程的拟合程度越高, 由于图 3(a)中的点集中分布在斜线附近, 表明该模型拟合程度很好, 与实际条件差异较小。图 3(b)可知, 实验点随机分布在残差 0 点线的两端, 说明残差分布均匀, 残差较小。此外, 在实验次数为 1~29 的条件下, 残差的范围为 -3~3 之间, 表明实验拟合程度好, 能够很好地代表金浸出模型。

由图 2、图 3 可知, 数据的分布的线性明显, 没有出现异常的数据点, 表明模型具有合理性、可靠性和可行性。

2.3 响应曲面分析

响应面沿不同方向的陡峭程度能够反应相应因素对最终实验结果的显著程度, 等高线的形状也可以直观的反映出各因素间交互的程度, 等高线沿不同方向的密集程度反应了各因素对实验结果的显著程度^[16]。图 4~图 9 为各因素两两之间对金浸出率交互作用的三维响应曲面图, 图片底部的投影为等高线图。

由图 4 可知, 在 NaClO 浓度与温度相互作用过程中, 随着温度的增加, 金浸出率随着 NaClO 浓度增加而迅速增大。由此可知, NaClO 浓度对金浸出率的影响显著大于温度。对响应曲面图底部投影得到的等高线图进行分析可知, 等高线中沿 NaClO 浓度方向的等高线密集程度明显高于温度, 说明 NaClO 浓度对金浸出率的影响更为显著。由图 5 可知, 在 NaClO 浓度与液固比相互作用的过程中, 随着液固比增加, 金浸出率随着 NaClO 浓度的增加而迅速增大。由此可知, NaClO 浓度对金浸出率的影响显著大于液固比。对等高线进行分析可知, NaClO 浓度对金浸出率的影响更为显著。由图 6 可知, 在 NaClO 浓度与 pH 相互作用的过程中, 随着 pH 缓慢由 12.5 提升至 13.5, 金浸出率随着 NaClO 浓度的增加而迅速增大。由此可知, NaClO 浓度对金浸出率的影响显著大于 pH。对等高线进行分析可知, NaClO 浓度对金浸出率的影响更为显著。

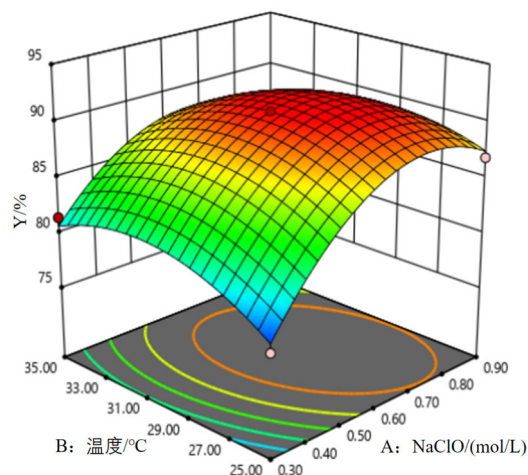


图 4 NaClO 浓度和温度对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.4 Three-dimensional response surface plot of the effect of NaClO concentration and temperature on gold leaching rate

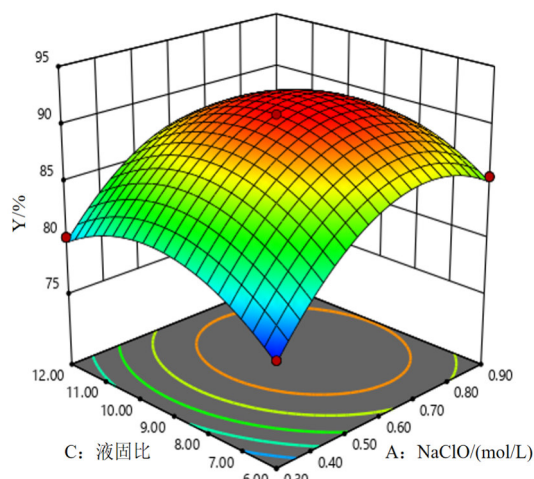


图 5 NaClO 浓度与液固比对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.5 Three-dimensional response surface plot of the effect of NaClO concentration and liquid-to-solid ratio on gold leaching rate

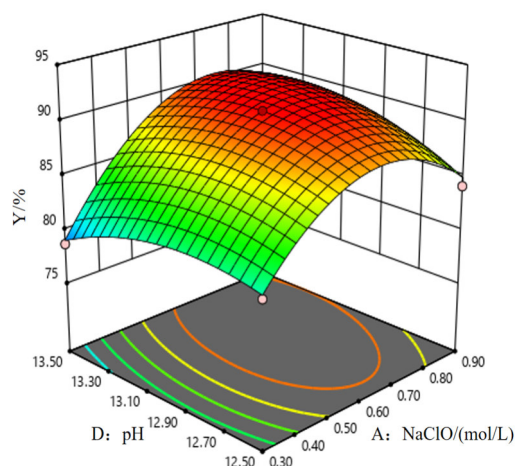


图 6 NaClO 浓度与 pH 对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.6 Three-dimensional response surface plot of the effect of NaClO concentration and pH on gold leaching rate

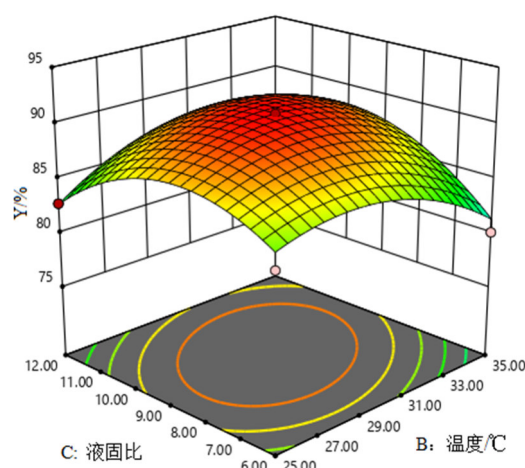


图 7 温度与液固比对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.7 Three-dimensional response surface plot of the effect of temperature and liquid-to-solid ratio on gold leaching rate

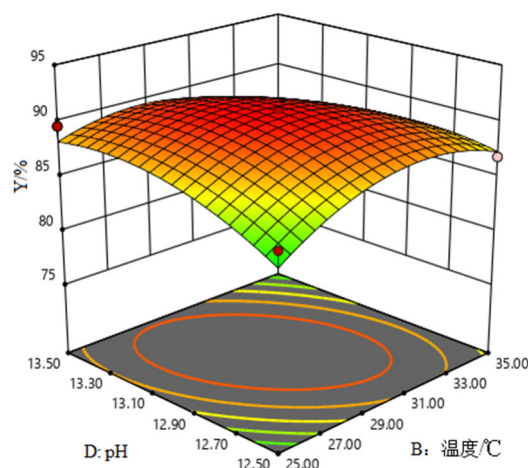


图 8 温度与 pH 对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.8 Three-dimensional response surface plot of the effect of temperature and pH on gold leaching rate

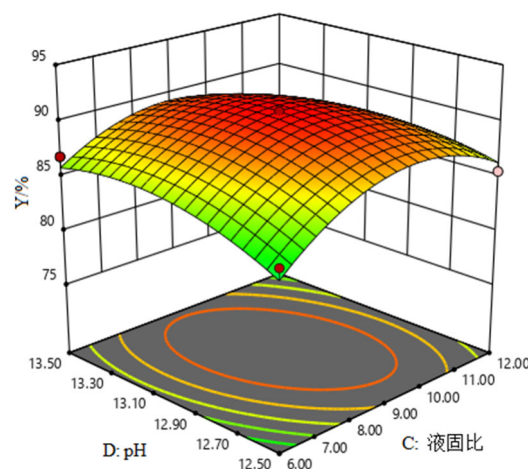


图 9 液固比与 pH 对金浸出率影响的三维响应曲面

Fig.10 Three-dimensional response surface plot of the effect of liquid-to-solid ratio and pH on gold leaching rate

由图 7 可知, 在温度与液固比相互作用的过程中, 随着温度由 25 °C 提升至 35 °C, 金浸出率随着液固比的增加而迅速增大。由此可知, 液固比对金浸出率的影响显著大于反应温度。对等高线进行分析可知, 液固比对金浸出率的影响更为显著。

由图 8 可知, 在温度与 pH 相互作用的过程中, 随着温度由 25 °C 提升至 35 °C, 金浸出率随着 pH 的增加而迅速增大。由此可知, pH 对金浸出率的影响显著大于温度。对等高线进行分析可知, pH 对金浸出率的影响更为显著。

由图 9 可知, 在液固比(C)与 pH(D)相互作用的过程中, 随着 pH 由 12.5 提升至 13.5, 金浸出率随着液固比的增加而迅速增大。由此可知, 液固比对金浸出率的影响显著大于 pH。对等高线进行分析可知, 液固比(C)对金浸出率的影响更为显著。

综上, 各因素对金浸出率的显著程度为: NaClO 浓度(A) > 液固比(C) > pH(D) > 温度(B), 且因素 NaClO 浓度(A)、pH(D)之间的交互作用较为显著。

通过 Design expert v8.0.6.1 软件中的 Numerical 模块对实验进行优化分析, 可以得到 NaClO 浸出贵州难浸金矿的最优浸出条件为在反应时间 3 h 下, NaClO 浓度为 0.9 mol/L, 温度为 27 °C, 液固比为 8.2, 初始 pH=13.4, 预测该条件下金浸出率为 93.2%。

2.4 验证实验

取矿粉 50 g, 液固比 8.2:1 (mL/g, 下同), 搅拌速率为 400 r/min, NaClO 浓度 0.9 mol/L, 在 27 °C, 初始 pH=13.4 的条件下浸出 3 h。为验证最优条件的稳定性与重复性, 在上述条件下进行 3 组平行实验, 金的浸出率分别为 93.5%, 93.4%、93.3%, 其平均值 93.4%与预测值基本相符。

3 结论

1) NaClO 既可作为强氧化剂能高效解离载金硫化物对金的包裹, 还能作为浸出络合剂进行高效环保的非氰浸金。

2) 通过响应曲面法优化实验, 得到各因素对金浸出率的显著程度为: NaClO 浓度 > 液固比 > pH > 温度, 其中 NaClO 浓度和 pH 之间的交互作用较为显著。

3) 通过优化实验, 得到 NaClO 浸出贵州难浸金矿的较优工艺条件为: 反应时间 3 h, NaClO 浓度 0.9 mol/L, 初始 pH=13.4, 液固比 8.2, 温度 27 °C, 预测该条件下金浸出率为 93.2%。

4) 在较优工艺条件下, 实际浸金率为 93.4%, 实测值与预测值相近, 该预测模型可靠有效且优化工艺合理可行, 该研究结果可为贵州难浸金矿的选冶优化、工业应用以及提高浸金率等方面提供理论指导。

参考文献:

- [1] 李堪灏, 焦芬, 吴奕彤, 等. 难处理金矿预处理及金回收技术进展[J]. 贵金属, 2022, 43(4): 87-96.
- LI G H, JIAO F, WU Y T, et al. Pretreatment and gold extraction status for refractory gold ore[J]. Precious Metals, 2022, 43(4): 87-96.
- [2] 向洪. 贵州卡林型金矿地质特征及成矿作用[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(6): 114-117.
- XIANG H. Geological characteristics and metallogenic role of Carlin-type gold ore in Guizhou[J]. Western Prospecting Project, 2022, 34(6): 114-117.
- [3] 高伟, 颜军, 黄勇, 等. “大音希声, 大象无形”——金矿床中的神秘家族: 卡林型金矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(1): 198-200.
- GAO W, YAN J, HUANG Y, et al. "Rare voice of big sound, elephant invisible" - The mysterious family of gold deposits: Carlin type gold deposits[J]. Mineral and Rock Geochemistry Bulletin, 2019, 38(1): 198-200.
- [4] CRAIG A J. The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective[J]. Applied Geochemistry, 2015, 57: 194-205.
- [5] 彭科波, 高利坤, 饶兵, 等. 金矿非氰化浸金研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 871-882.
- PENG K B, GAO L K, RAO B, et al. Progress of non-cyanidation gold leaching research in gold ore[J]. Journal of Engineering Science, 2021, 43(7): 871-882.
- [6] 吴浩. 含砷卡林型金矿碱性加压自浸金机理及工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- WU H. Study on the mechanism and process of alkaline pressurized self-leaching gold from arsenic-bearing Carlin-type gold ore[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [7] 黎铨海, 粟海锋, 黄祖强, 等. 次氯酸钠一步法浸金的原理与试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2001(1): 15-18.
- LI X H, SU H F, HUANG Z Q, et al. Principle and experimental study of one-step gold leaching with NaClO[J]. Chemical Minerals and Processing, 2001(1): 15-18.
- [8] 李国, 皮桥辉, 韦朝文, 等. 贵州水银洞金矿金的赋存状态[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(4): 817-829.
- LI G, PI Q H, WEI C W, et al. Fugitive state of gold at the Suiyin Cave gold mine in Guizhou[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(4): 817-829.
- [9] WEI D T, et al. Tennantite-tetrahedrite-series minerals and related pyrite in the Nibao Carlin-type gold deposit, Guizhou, SW China[J]. Minerals, 2020, 11(1): 2-2.
- [10] 席欣月, 崔毅琦, 王玉波, 等. 含砷硫化矿物对浸金影响的研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(4): 10-14.
- XI X Y, CUI Y Q, WANG Y B, et al. Research progress on the influence of arsenic-containing sulfide minerals on gold leaching[J]. Chemical Minerals and Processing, 2022, 51(4): 10-14.
- [11] 陈亮, 唐道文, 管桂超, 等. 次氯酸钠浸金电化学及难浸金矿浸出实验研究[J]. 贵金属, 2017, 38(4): 39-43.
- CHEN L, TAO D W, GUAN G C, et al. Experimental study on electrochemistry of NaClO leaching and leaching of refractory gold ores[J]. Precious Metals, 2017, 38(4): 39-43.
- [12] 师兆忠, 刘进, 王丽, 等. 盐酸浸出焙烧金精矿动力学研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(5): 27-32.
- SHI Z Z, LIU J, WANG L, et al. Kinetics of roasted gold concentrates by hydrochloric acid leaching[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 44(5): 27-32.
- [13] WEI S N, YANG Y, SU X Z, et al. Characterization of preg-robbing carbonaceous minerals from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit via spectroscopic techniques[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39: 169-188.
- [14] LI J H, WU P, XIE Z J, et al. Alteration and paragenesis of the basalt-hosted Au deposits, southwestern Guizhou province, China: Implications for ore genesis and exploration[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 131: 104034.
- [15] 王雷, 张俊峰, 解维平, 等. 硫化法处理含砷废水的响应曲面优化研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(4): 115-122.
- WANG L, ZHANG J F, XIE W P, et al. Response surface optimization study of sulfidation method for treating arsenic-containing wastewater[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(4): 115-122.
- [16] 赵刘闯, 赵建章, 周立云, 等. 贵州某金矿浮选条件的响应曲面法优化研究[J]. 贵金属, 2021, 42(3): 58-63.
- ZHAO L C, ZHAO J Z, ZHOU L Y, et al. Response surface method optimization study on flotation conditions of a gold mine in Guizhou[J]. Precious Metals, 2021, 42(3): 58-63.