响应曲面法优化硅孔雀石中钴的还原浸出①

唐正鹏[1,2,3,4]，郭建维[1]，李帅[2,5]，陈鹏[2,5]，李金富[2,5]，郭秋松[2,3,4]

（1.广东工业大学 轻工与化工学院，广东 广州 510006；2.广东省科学院资源利用与稀土开发研究所，广东 广州 510650；3.稀有金属分离与综合利用国家重点实验室，广东 广州 510650；4.广东省稀土开发与应用重点实验室，广东 广州 510650；5.广东工业大学 环境科学与工程学院，广东 广州 510006）

摘　要：采用响应曲面法的中心组合设计，以焦亚硫酸钠为还原剂，对硅孔雀石氧化铜钴矿在硫酸溶液体系下还原酸浸过程的控制因素进行系统优化，研究各因素对钴浸出率的影响，获得合理的浸出条件以减少浸出过程中硅胶造成的干扰。结果表明，适宜的浸出参数为：初始硫酸浓度 2.0 mol/L、温度 80 ℃、液固比 4 mL/g、搅拌速度 350 r/min、浸出时间 30 min，该条件下钴浸出率可达 85.16%。

关键词：硅孔雀石；焦亚硫酸钠；响应曲面法；中心组合设计；还原酸浸；湿法冶金；钴；硫酸浸出

中图分类号：TF111；TF816　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.019

文章编号：0253-6099（2025）06-0108-06

Optimization of Reductive Leaching of Cobalt from Chrysocolla by Response Surface Methodology

TANG Zhengpeng[1,2,3,4], GUO Jianwei[1], LI Shuai[2,5], CHEN Peng[2,5], LI Jinfu[2,5], GUO Qiusong[2,3,4]

(1. *School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *Guangdong, China*; 2. *Institute of Resource Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *Guangdong, China*; 3. *State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangzhou* 510650, *Guangdong, China*; 4. *Guangdong Province Key Laboratory of Rare Earth Development and Application, Guangzhou* 510650, *Guangdong, China*; 5. *School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *Guangdong, China*)

Abstract: With sodium metabisulfite as a reducing agent, the copper-cobalt oxide ore of chrysocolla was treated by reductive leaching process in sulfuric acid solution system, and the controlling factors in the process were systematically optimized by adopting a central composite design for response surface methodology. Based on investigation of effects of various factors on cobalt leaching rate, appropriated leaching conditions were obtained for reducing the interference caused by silica gel during the leaching process. The results show that under the following optimal conditions, including sulfuric acid with an initial concentration of 2.0 mol/L, temperature of 80 ℃, liquid and solid in a ratio of 4 mL/g, stirring at a speed of 350 r/min and leaching time of 30 min, the cobalt leaching rate can reach 85.16%.

Key words: chrysocolla; sodium metabisulphite; response surface methodology; central composite design; reductive acid leaching; hydrometallurgy; cobalt; sulfuric acid leaching

氧化铜钴矿主要产于非洲国家，是当前湿法冶金提取金属钴及钴化学产品的主要矿物原料。氧化铜钴矿中主要矿物为硅孔雀石、氧化钴、羟水铜氯、软锰矿、闪锌矿和水铝石[1-3]。硅孔雀石是微观结构嵌布复杂的硅酸盐与碳酸盐混合矿，共伴生一定含量的铜、钴等战略性金属元素，是一类具有重要开采利用价值的原生氧化铜钴矿资源[4-5]。从硅孔雀石中提取有价金属的方法主要有湿法冶金与火法冶金。常规湿法冶金工艺为还原酸浸法，通过化学反应将钴矿石中的钴转化为可溶性化合物，将其从溶液中

① **收稿日期**：2025-05-25
基金项目：国家重点研发计划（2022YFC2904601）
作者简介：唐正鹏（2001—），男，湖南永州人，硕士，主要研究方向为湿法冶金。E-mail：zhengpengtang@qq.com
通信作者：郭建维（1968—），男，陕西韩城人，博士，教授，主要研究方向为高分子精细化工。E-mail：guojw@gdut.edu.cn
郭秋松（1973—），男，江西都昌人，博士，教授级高级工程师，主要研究方向为有色金属湿法冶金。E-mail：guoqiusong@163.com

分离出来,这一过程可以有效提取矿石中的钴元素,提高资源利用率。相较于火法冶金,湿法冶金工艺产生的废气、废渣较少,对环境的污染相对较小,适用性也更强[6-8]。还原酸浸法常用酸[9-10]或含氨溶液[1]作为浸出剂来浸出氧化铜钴矿物,其中硫酸以其完全适配后段电积提纯工艺的优势,是氧化铜钴矿石的优选浸出剂。然而,硅孔雀石酸浸的过程中会产生硅胶,影响浸出效果[11]。因此,克服硅胶形成问题成为亟待解决的关键问题。为了减轻硅胶对钴浸出效率的负面影响,传统工艺普遍倾向于采用低酸度浸出[12-14]或氨浸法。尽管这些方法在一定程度上取得了成效,但浸出周期显著延长,难以满足当前对高效、环保提取技术的迫切需求。

本文以还原酸浸法处理硅孔雀石铜钴矿,并采用响应曲面法(response surface methodology,RSM)[15-17]优化浸出条件,通过考察合理的浸出条件减少硅胶造成的干扰,以获得合适的试验参数,从而实现对硅孔雀石中钴的高效提取。

1　试验

1.1　试验原料及设备

试验原料硅孔雀石铜钴矿由中国五矿集团有限公司提供,原矿采自非洲国家刚果(金),经选矿除杂富集后,外观为浅绿色粉体,平均粒度 180 μm。对原矿进行化学分析,结果见表 1。由表 1 可知,原矿中钴品位为0.120%,非金属元素 SiO_2 含量为56.473%,耗酸组分 CaO 和 MgO 含量分别为 2.973%和 18.818%。

表 1　硅孔雀石样品化学分析结果(质量分数)

Table 1　Chemical composition of chrysocolla ore　%

Co	Cu	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Mn	CaO	SO_3
0.120	3.997	18.818	56.473	3.104	9.260	0.197	2.973	0.330

矿样 SEM-EDS 分析结果见图 1 和表 2。钴矿物主要分布在锰土中,该矿样杂质主要为绿泥石、绢云母、石英和白云石。

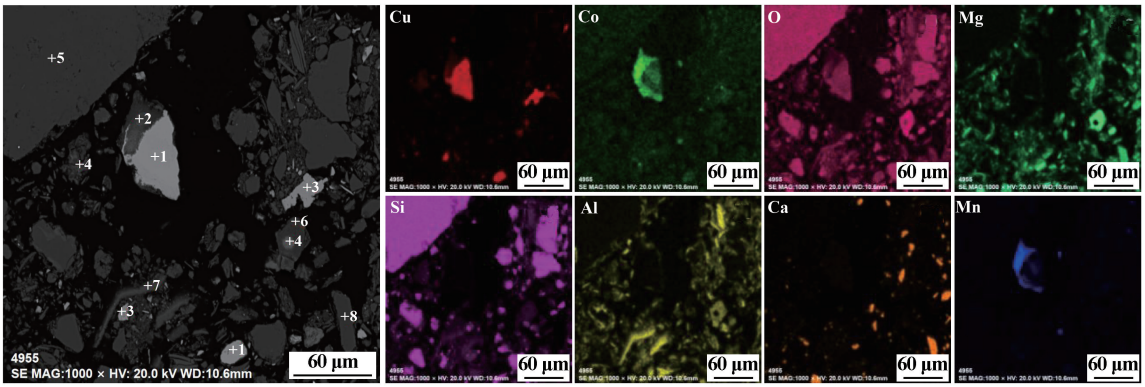


图 1　硅孔雀石 SEM 图像

Fig. 1　SEM images of chrysocolla ore

表 2　硅孔雀石 EDS 分析结果(质量分数)

Table 2　EDS analysis of chrysocolla ore　%

矿物名称	图 1 中标注号	C	O	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Mn	Fe	Co	Cu
假孔雀石	1	—	29.00	—	—	0.57	9.89	—	—	1.73	—	1.24	57.13
		—	30.19	0	0.27	0.36	11.64	—	—	—	0.40	—	57.13
锰土	2	—	31.14	0.86	0.41	2.91	—	0.20	0.48	23.58	0.67	11.97	26.79
孔雀石	3	7.70	35.19	0.09	0.05	0.24	—	—	—	—	0.26	—	56.47
		8.17	36.16	0.06	0.10	0.17	0.12	—	—	—	0.34	—	54.87
硅孔雀石	4	—	37.83	7.41	4.54	17.74	—	—	0.24	—	1.58	—	29.95
		—	34.35	0.86	0.59	19.02	—	0.19	—	—	0.41	—	43.99
石英	5	—	53.24	—	0.17	46.59	—	—	—	—	—	—	—
绿泥石	6	—	45.13	22.22	13.66	15.27	—	—	—	—	0.57	0.10	3.04
绢云母	7	—	45.16	2.58	19.25	20.33	—	8.19	—	—	1.61	0.05	1.48
白云石	8	—	51.44	12.58	—	—	—	—	22.97	—	0.11	—	0.17

1.2　试验原理及方法

硅孔雀石矿中钴常以 Co^{3+} 形式存在,难以直接硫酸浸出,浸出过程中加入还原剂将 Co^{3+} 还原为 Co^{2+} 进行浸出[18]。还原剂为焦亚硫酸钠(分析纯,广州化学

试剂厂)。原矿钴浸出过程中的主要化学反应如下:

$$CoO + H_2SO_4 = CoSO_4 + H_2O \quad (1)$$

$$4CoO(OH) + 3H_2SO_4 + Na_2S_2O_5 = 4CoSO_4 + Na_2SO_4 + 5H_2O \quad (2)$$

$$2Co_2O_3 + 3H_2SO_4 + Na_2S_2O_5 = 4CoSO_4 + 3H_2O + Na_2SO_4 \quad (3)$$

浸出试验在配有机械搅拌器的油浴锅中进行,使用250 mL玻璃三颈烧瓶作为反应器,避免溶液蒸发损失。在试验设计中,以钴的转化率为响应变量。浸出时间恒定为30 min。油浴锅升温到工作温度后,将矿样放入玻璃反应器中预热5 min,加入一定量硫酸和还原剂,启动试验程序。

1.3 试验设计

中心组合设计(central composite design,CCD)试验使用Design-Expert 10.0.1.0软件,通过考察钴浸出反应的性能,确定工艺条件。该方法有助于分析各参数之间的相互作用效果,以及以最佳的试验次数优化有效参数[15,19]。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,Spectro Arcos,德国SPECTRO公司)测定硅孔雀石硫酸浸出过程钴的浸出率。浸出率计算公式为:

$$Y_{Co} = \frac{CV}{\omega M} \quad (4)$$

式中:Y_{Co}为钴浸出率,%;C为溶液中钴离子的质量浓度,mg/L;V为试验后溶液总体积,mL;ω为钴品位,%;M为试验所取矿样总质量,g。

依据原矿中的钴品位(0.120%),设定还原剂用量为矿样质量的1%,在CCD试验设计中主要考察温度(A,℃)、初始硫酸浓度(B,mol/L)、液固比(C,mL/g)和搅拌速度(D,r/min)的影响,以钴浸出率Y_{Co}为响应值。CCD试验的因素和水平如表3所示。

表3 CCD试验因素和水平

Table 3 Factors and levels in CCD experiment

水平	因素A	因素B	因素C	因素D
-2	20	0.5	1	200
-1	40	1.0	2	250
0	60	1.5	3	300
1	80	2.0	4	350
2	100	2.5	5	400

2 试验结果与讨论

2.1 CCD试验设计及试验结果

CCD试验设计矩阵和试验结果见表4。

表4 CCD试验设计矩阵和试验结果

Table 4 CCD matrix and experiment results

序号	因素A	因素B	因素C	因素D	响应值Y_{Co}/%
1	60	1.5	3	400	81.17
2	80	2.0	4	350	84.88
3	60	1.5	3	300	78.87
4	80	2.0	2	250	81.25
5	80	1.0	4	250	79.35
6	60	1.5	1	300	75.87
7	60	1.5	3	300	80.39
8	40	2.0	4	250	77.74
9	40	2.0	4	350	79.18
10	80	1.0	4	350	85.25
11	60	1.5	3	200	80.00
12	40	1.0	2	350	76.58
13	100	1.5	3	300	82.99
14	40	2.0	2	350	76.14
15	40	2.0	2	250	77.10
16	60	1.5	3	300	80.41
17	40	1.0	4	250	73.82
18	40	1.0	4	350	75.93
19	80	2.0	4	250	85.04
20	60	1.5	3	300	80.92
21	60	1.5	3	300	80.73
22	40	1.0	2	250	71.76
23	60	1.5	5	300	81.13
24	60	1.5	3	300	80.10
25	60	0.5	3	300	77.16
26	60	2.5	3	300	83.68
27	80	1.0	2	250	78.82
28	80	2.0	2	350	82.23
29	20	1.5	3	300	67.85
30	80	1.0	2	350	80.04

2.2 钴浸出率的CCD试验结果分析

采用二次多项式分析和二次模型分析变量与反应的关系,验证硫酸溶液从硅孔雀石矿物浸出钴的模型。

根据方差分析,回归模型的显著性检验结果如表5所示。对于一定数量的自由度,模型的F值应大于F分布的列表值。使用二次模型验证硫酸溶液从硅孔雀石矿物中浸出钴的F值为8.94,这是显著的。硫酸溶液从硅孔雀石矿物中浸出钴的拟合不显著,p值为0.769 4(大于0.05),表明二次模型在本研究中是有效的。

模型汇总统计结果见表6。如果模型中有许多项,而样本量不是很大,则调整后的R^2可能明显小于调整前的R^2。使用硫酸溶液从硅孔雀石矿物中浸出钴的R^2为0.958 6,与调整后的R^2(0.920 0)一致。硫酸浸出的预测R^2为0.788 2,调整后的R^2与预测R^2相差应在20%以内,以保持良好的一致性。R^2的高值表明二次方程能代表给定试验域下的系统[20]。

表 5　回归模型显著性检验结果

Table 5　Significance test results of regression model

参数	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	备注
Mean vs total	188 200	1	188 200			
Linear vs mean	355.78	4	88.94	29.60	< 0.000 1	
2FI vs linear	14.81	6	2.47	0.78	0.597 5	
Quadratic vs 2FI	42.48	4	10.62	8.94	0.000 7	显著
Cubic vs quadratic	7.10	8	0.89	0.58	0.769 4	Aliased
Residual	10.72	7	1.53			
合计	188 700	30	6 289.02			

表 6　模型汇总统计结果

Table 6　Statistical results of models

参数	标准差	R^2	校正决定系数	预测决定系数	预测残差平方和
Linear	1.73	0.825 7	0.797 8	0.737 8	112.97
2FI	1.78	0.860 0	0.786 4	0.690 9	133.19
Quadratic	1.09	0.958 6	0.920 0	0.788 2	91.28
Cubic	1.24	0.975 1	0.896 9	−1.709 8	1 167.66

硅孔雀石中钴元素浸出过程拟合的二阶响应曲面模型的方差分析见表 7。可以看出,温度、初始硫酸浓度对硅孔雀石浸出有极显著作用(p<0.000 1)。通过比较 F 值的大小可知,各因素对钴元素浸出影响的大小顺序为:温度(A)>初始硫酸浓度(B)>液固比(C)>搅拌速度(D)>初始硫酸浓度与搅拌速度的交互作用(BD)>温度与液固比的交互作用(AC)>液固比与搅拌速度的交互作用(CD)>初始硫酸浓度与液固比的交互作用(BC)>温度与初始硫酸浓度的交互作用(AB)>温度与搅拌速度的交互作用(AD)。

表 7　硅孔雀石酸浸提钴过程方差分析

Table 7　Variance analysis for sulfuric acid leaching of cobalt from chrysocolla

参数	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	413.07	14	29.50	24.83	<0.000 1	显著
A	259.33	1	259.33	218.20	<0.000 1	
B	51.23	1	51.23	43.11	<0.000 1	
C	32.20	1	32.20	27.09	0.000 1	
D	13.02	1	13.02	10.95	0.004 8	
AB	0.29	1	0.29	0.24	0.630 3	
AC	3.14	1	3.14	2.64	0.124 8	
AD	0.019	1	0.019	0.016	0.901 9	
BC	0.55	1	0.55	0.46	0.506 2	
BD	10.16	1	10.16	8.55	0.010 5	
CD	0.65	1	0.65	0.55	0.470 8	
A^2	36.14	1	36.14	30.41	< 0.000 1	
B^2	0.29	1	0.29	0.24	0.630 0	
C^2	3.93	1	3.93	3.31	0.089 1	
D^2	0.56	1	0.56	0.47	0.503 1	
残差	17.83	15	1.19			
失拟项	15.19	10	1.52	2.88	0.127 6	不显著
纯误差	2.64	5	0.53			
总和	430.89	29				

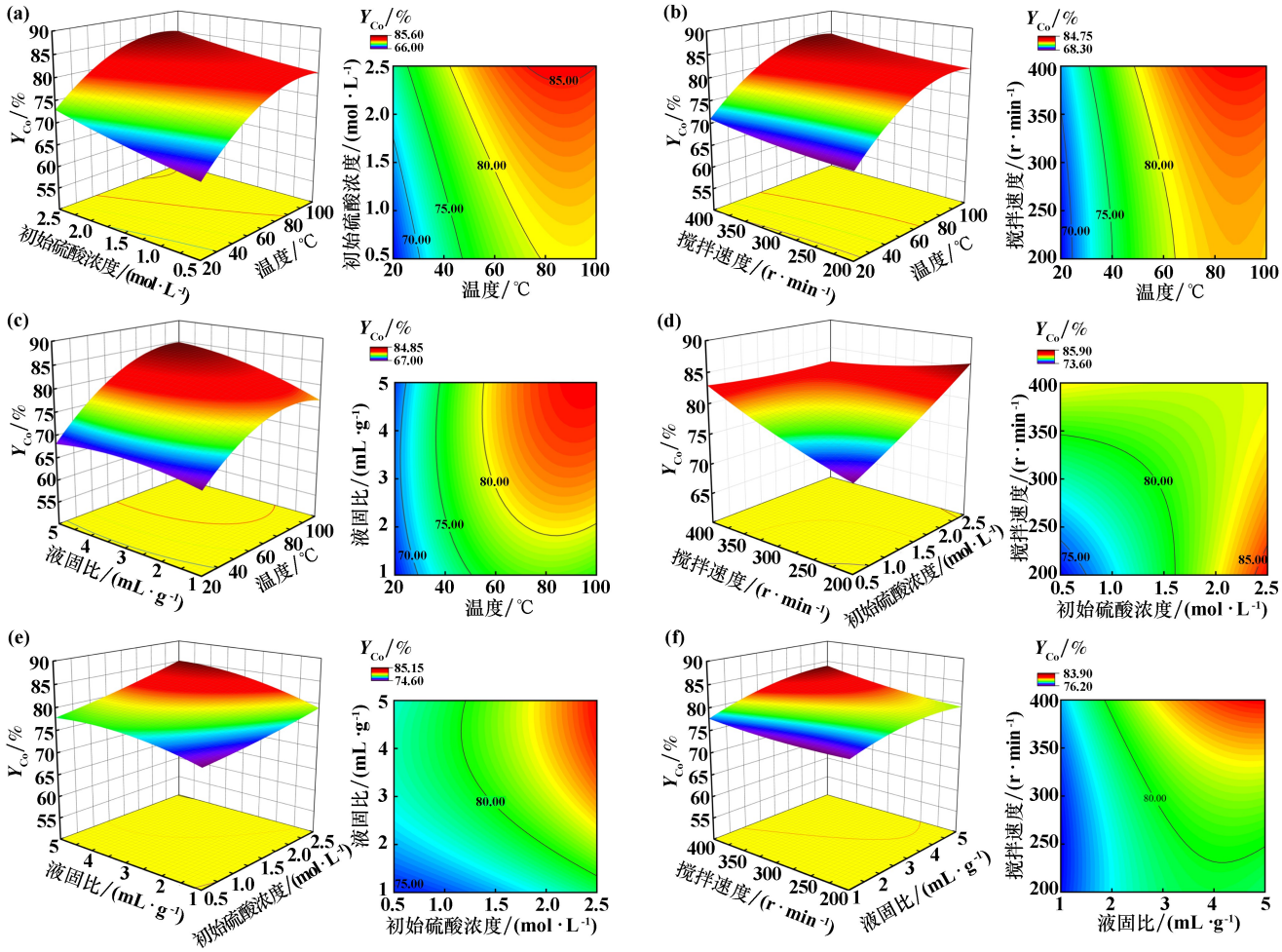
高 F 值(24.83)和概率 p 值(<0.000 1)确保二次模型具有高显著性,证实了不显著的拟合检验缺失[低 F 值(2.88)和 p 值(0.127 6)],二次模型充分证明了硅孔雀石矿物中钴元素的浸出[20]。

钴元素浸出过程的三维响应曲面图和等值线图见图 2。从图 2 可知,浸出温度、初始硫酸浓度、搅拌速度和液固比等参数对硅孔雀石还原酸浸过程中钴回收率产生相互关联影响,其中,浸出温度和初始硫酸浓度对浸出过程的响应更显著。由图 2(a)可见,钴浸出率先升高后下降,主要是因为硅溶出后进入溶液中,伴随酸的消耗,pH 值升高,硅胶逐渐增多,存在溶出钴的被动损失。由图 2(b)和(d)可以看出,搅拌速度对钴浸出有促进作用,钴回收率随着搅拌速度增加而提升。由图 2(c)、(e)和(f)可见,钴回收率随着液固比增加而增加。由图 2 中各交互条件下的响应面图和等值线图可知,初始硫酸浓度、温度、搅拌速度和液固比是硅孔雀石铜钴矿浸出提取钴的重要条件参数,其中浸出温度和初始硫酸浓度是硅孔雀石酸浸提钴过程的关键影响因子。

2.3　优化条件下浸出验证试验

对于响应曲面中钴浸出率随着温度和酸度增加先增加后减少的现象,开展了温度和酸度单因素验证试验。还原剂焦亚硫酸钠用量为矿样质量的 1%,初始硫酸浓度 2.0 mol/L、液固比 4 mL/g、搅拌速度 350 r/min、浸出时间 30 min 条件下,进行了浸出温度验证试验,结果见图 3(a);温度 80 ℃,其他条件不变,进行了初始硫酸浓度验证试验,结果见图 3(b)。由图 3(a)可知,温度对钴的溶解有显著影响;适当升高浸出温度,钴浸出率增大;但温度超过一定程度后,继续升高浸出温度,钴浸出率开始缓慢下降。由图 3(b)可知,初始硫酸浓度增加,钴浸出率逐渐增大;初始硫酸浓度超过 2.0 mol/L后,继续增加硫酸加入量,钴浸出率开始下降。这与响应曲面预测结果基本一致,说明温度和酸度过高会促进硅酸盐成分与酸发生反应,在溶液中形成硅胶,这种现象大大增加了固液分离的难度。常规条件试验难以精细化调控和抑制硅胶的生成,影响钴浸出率。响应曲面法通过过程模拟和数据统计,可实现条件参数的精确推导。

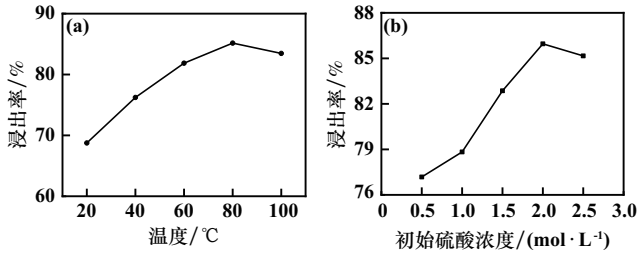
还原剂焦亚硫酸钠用量为矿样质量的 1%,浸出时间 30 min,通过 Design-Expert 10.0.1.0 软件得到优化条件为:温度 80 ℃、初始硫酸浓度 2.0 mol/L、液固比 4 mL/g、搅拌速度 350 r/min。在此条件下进行了 3 次



(a) 初始硫酸浓度和温度；(b) 搅拌速度和温度；(c) 液固比和温度；(d) 初始硫酸浓度和搅拌速度；(e) 初始硫酸浓度和液固比；(f) 搅拌速度和液固比

图 2 各交互作用影响下酸浸提钴的响应曲面图和相应的等值线图

Fig. 2 Response surface graphs and corresponding contour plots for acid leaching of cobalt under various interactions



(a) 温度；(b) 初始硫酸浓度

图 3 温度与初始硫酸浓度验证实验结果

Fig. 3 Verification test of temperature and initial sulfuric acid concentration

验证试验，结果如表 8 所示。验证试验结果表明，该优化条件下钴平均浸出率可达 85.16%。

3 结论

1）采用响应曲面法对钴的还原浸出条件进行优化，浸出回归模型分析结果表明，钴浸出率受多种因素交互作用影响，其中温度与初始硫酸浓度是影响钴浸出率的关键因素。

2）采用硫酸浸出硅孔雀石中钴的优化条件为：初始硫酸浓度 2.0 mol/L、温度 80 ℃、液固比 4 mL/g、搅拌速度 350 r/min、浸出时间 30 min，该条件下钴浸出率可达 85.16%。

3）响应曲面法通过过程模拟和数据统计优化浸出条件，能有效减少硅胶干扰和提高钴浸出率，可实现条件参数的精确推导。

表 8 验证试验结果

Table 8 Verification test results

序号	钴质量浓度/(mg·L^{-1})	收样体积/mL	浸出率/%
1	180.55	56.7	85.31
2	168.24	60.1	84.26
3	178.40	57.8	85.91
平均			85.16

参考文献(References):

[1] 龚傲,吴选高,喻小强,等. 选择性还原氨浸从高硅低品位铜钴矿中提取铜、钴的工艺及其浸出动力学[J]. 过程工程学报, 2020, 20(10):1156-1165.
GONG Ao, WU Xuangao, YU Xiaoqiang, et al. Process and leaching kinetics of extracting copper and cobalt from high silicon low grade copper-cobalt ore by selective reduction ammonia leaching[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020,20(10):1156-1165.

[2] 刘芳斌,姚刚,谢添. 刚果(金)氧化钴矿浸出动力学研究[J]. 中国有色冶金, 2020,49(4):90-95.
LIU Fangbin, YAO Gang, XIE Tian. Leaching kinetic of cobalt oxide ore from Democratic Republic of the Congo[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020,49(4):90-95.

[3] 廖乾,解振朝,李淮湘,等. 某含钴氧化型铜矿选冶联合成套工艺研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):86-89.
LIAO Qian, XIE Zhenchao, LI Huaixiang, et al. A combined beneficiation and metallurgy technique for processing cobalt-bearing oxide copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):86-89.

[4] 张琳,方建军,赵敏捷,等. 硅孔雀石活化浮选研究进展[J]. 矿产综合利用, 2017(3):17-21.
ZHANG Lin, FANG Jianjun, ZHAO Minjie, et al. Research and application progress of activation of floating chrysocolla[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(3):17-21.

[5] ZUO Q, WANG Z A, WU D D, et al. Ammonia-induced corrosion and modification of chrysocolla surface for enhanced adsorption of sulfide species[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024,682:132884.

[6] 李祥,马保中,马玉天,等. 复杂铜钴共伴生矿有价金属回收综述[J]. 工程科学学报, 2024,46(8):1349-1357.
LI Xiang, MA Baozhong, MA Yutian, et al. Review on recovery of valuable metals from complex copper-cobalt co-associated mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024,46(8):1349-1357.

[7] 谢添,徐敬元,姚刚,等. 刚果(金)铜-钴矿业发展现状[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(11):3422-3435.
XIE Tian, XU Jingyuan, YAO Gang, et al. Review of development status of copper-cobalt mining in Congo(DRC)[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3422-3435.

[8] 杨卉芃,王威. 全球钴矿资源现状及开发利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(5):41-49.
YANG Huipeng, WANG Wei. Global cobalt resources status and exploitation trends[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,39(5):41-49.

[9] NTAKAMUTSHI P T, KIME M B, MWEMA M E, et al. Agitation and column leaching studies of oxidised copper-cobalt ores under reducing conditions[J]. Minerals Engineering, 2017,111:47-54.

[10] NICOL M J. The kinetics of the dissolution of malachite in acid solutions[J]. Hydrometallurgy, 2018,177:214-217.

[11] GIJSEMANS L, ROOSEN J, RIAÑO S, et al. Ammoniacal solvoleaching of copper from high-grade chrysocolla[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2020,6(4):589-598.

[12] 郑伟,兰川,王桂楼,等. 刚果(金)某铜钴矿酸浸试验研究[J]. 湖南有色金属, 2024,40(1):34-37.
ZHENG Wei, LAN Chuan, WANG Guilou, et al. Experimental study on acid leaching of a copper-cobalt ore in Congo(Kinshasa)[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2024,40(1):34-37.

[13] 王刚. 从刚果(金)某低品位氧化铜钴矿石中浸出铜钴试验研究[J]. 湿法冶金, 2023,42(5):469-473.
WANG Gang. Leaching of copper and cobalt from a low grade copper-cobalt oxide ore in Congo(Kinshasa)[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(5):469-473.

[14] 郭双华. 从某低品位氧化铜钴矿石中直接浸出铜钴[J]. 湿法冶金, 2021,40(3):190-192.
GUO Shuanghua. Direct leaching of copper and cobalt from a low-grade copper-cobalt oxide ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(3):190-192.

[15] 胡亚飞,李克庆,韩斌,等. 基于响应面法-满意度准则的混合骨料充填体强度发展与优化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022,53(2):620-630.
HU Yafei, LI Keqing, HAN Bin, et al. Strength development and optimization analysis of mixed aggregate backfill based on RSM-DF[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(2):620-630.

[16] 李小明,张欣华,邢相栋. 响应曲面法优化二次镍渣微晶玻璃热处理制度[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(7):116-123.
LI Xiaoming, ZHANG Xinhua, XING Xiangdong. Optimization of heat treatment schedule of secondary nickel slag microcrystalline glass by response surface method[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(7):116-123.

[17] ALTAŞ Y, TEL H, İNAN S, et al. An experimental design approach for the separation of thorium from rare earth elements[J]. Hydrometallurgy, 2018,178:97-105.

[18] 陈雄,李亚新,江源,等. 刚果(金)某低品位氧化铜钴矿强化还原浸出试验研究[J]. 有色金属工程, 2023,13(6):66-72.
CHEN Xiong, LI Yaxin, JIANG Yuan, et al. Experimental study on enhanced reduction leaching of a low grade copper cobalt oxide from D.R.Congo[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023,13(6):66-72.

[19] 刘伟,刘子龙,刘畅. 响应曲面法优化低品位铜钼矿生物浸出工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(9):3111-3120.
LIU Wei, LIU Zilong, LIU Chang. Optimization of bioleaching low-grade copper-molybdenum ore by response surface methodology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(9):3111-3120.

[20] VAFAEI F, TORKAMAN R, ALIMOOSAVIAN M, et al. Optimization of extraction conditions using central composite design for the removal of Co(II) from chloride solution by supported liquid membrane[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018,133: 126-136.

引用本文: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.