

## 中心复合设计针铁矿法从含钴生物浸出液中除铁

李海军, 杨洪英, 陈国宝, 周立杰, 刘媛媛

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 在单因素实验的基础上, 研究操作过程各因素对除铁率及钴回收率的影响, 并采用中心复合设计实验方法对除铁过程进行优化建模。结果表明: 部分水解针铁矿法(即 E.Z 针铁矿法)适用于含钴生物浸出液的除铁过程, 得到的数学模型与实验结果具有较高吻合度, 偏差的绝对值小于 1%。该模型的方差分析结果显示, 在 pH 值为 3.5~4.5 的范围内, 除铁率的主要影响因素为温度、晶种量及其交互作用, 而 pH 值与晶种量之间的交互作用对除铁率的影响可被忽略; 钴回收率的主要影响因素为 pH 值及 pH 值与晶种量之间的交互作用。该模型可用于生产中针铁矿除铁过程控制参数的优化。

**关键词:** 钴; 生物浸出; 除铁; 针铁矿法; 中心复合设计; 等高线图

**中图分类号:** TF816

**文献标志码:** A

## Goethite deironization process for cobaltiferous bioleaching solution by central composite design

LI Hai-jun, YANG Hong-ying, CHEN Guo-bao, ZHOU Li-jie, LIU Yuan-yuan

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The central composite design experimental method was employed to establish and optimize the model of iron removal process on the basis of the single factor experiment. Meanwhile, the influencing factors of the iron removal rate and the cobalt recovery were also discussed. The results show that, E.Z goethite method is suitable for the iron removal process from the cobaltiferous bioleaching solution, and its mathematical model is well fitted with the trial result. Their absolute deviation is less than 1%. The results of model variance analysis show that, when the pH value is in the range of 3.5–4.5. Temperature, the amount of seed crystal and the interaction between them are the main control factors for the iron removal rate. The interaction between the amount of seed crystal and pH value affects the iron removal rate weakly. It is also found that the cobalt recovery changes markedly with pH value, and the interaction between pH value and the amount of seed crystal. Besides, the model can be used to optimize the control parameters of the iron removal process.

**Key words:** cobalt; bioleaching; iron removal; goethite process; central composite design; contour map

钴是一种重要的金属, 钴冶炼工艺主要采用火法, 少数采用加压湿法氧化技术。相对于火法及加压氧化技术, 生物浸出技术具有成本低、环境友好等优点。目前, 采用生物冶金技术处理铜钴低品位矿石已取得了较好效果<sup>[1]</sup>, 但这种技术尚需完善。其中, 高浓度

铁离子是一个从生物浸出液中分离及提纯有价金属所必须克服的问题<sup>[2-3]</sup>。

针铁矿法是湿法冶金的传统除铁技术。赵永等<sup>[4]</sup>研究了锌焙烧烟尘浸出液的还原氧化针铁矿法(V.M 针铁矿法)除铁过程。实验结果表明, 氧化时间及空气

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51174062, 51104036); 国家高技术研究发展计划项目(2012AA061502, 2012AA061501); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAE06B05); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(N110602005, N110302002, N100602207)

**收稿日期:** 2012-10-14; **修订日期:** 2013-04-28

**通信作者:** 杨洪英, 教授, 博士; 电话: 024-83673932; E-mail: yanghy@smm.neu.edu.cn

流量对除铁效果影响不显著。邓永贵等<sup>[5-6]</sup>以含锌料液为基础,研究了部分水解针铁矿法(E.Z 针铁矿法)除铁过程,采用准均相成核法提高了针铁矿晶种制备效率,采用微分反应器装置控制 E.Z 针铁矿法除铁过程,证实当  $\text{Fe}^{3+}$  浓度高于 1 g/L 时,除铁效果良好。彭建蓉等<sup>[7]</sup>采用针铁矿法从高钢铁的硫化锌精矿加压浸出液沉淀钨后的溶液中除铁,终点铁浓度控制在 10 mg/L 以下,并充分利用尾气热量降低成本。熊富强等<sup>[8]</sup>研究了含钨物料,建立了 V.M 针铁矿法除铁过程的动态模型,该模型拟合程度高,可根据工艺对实验结果进行预测。

目前,针对针铁矿法除铁的研究多侧重除铁率,但该方法除铁过程易造成有价金属的损失,客观地限制了其应用,解决这一问题的首选方案是在除铁率优化的同时解决有价金属的损失问题。方开成等<sup>[9]</sup>采用针铁矿法处理含钴、镍废料电容液中的铁,除铁率高于 99%,且钴损失较少。王艳等<sup>[10]</sup>研究了含钴废渣硫酸化焙烧浸出液的除铁问题,采用针铁矿法除铁,单步钴损失率为 0.3%,除铁率可达 99.5%。陈红彬<sup>[11]</sup>采用针铁矿法对钴白合金酸浸液进行除铁研究,结果表明,除铁温度和终点 pH 值对除铁效果的影响显著大于平衡时间对除铁效果的影响,在 pH 值为 3.0、温度为 85 °C 的环境中恒温 2 h 后,浸出液中残余铁浓度低于 0.01 g/L,且钴损失较少。

尽管含钴溶液针铁矿法除铁的优势已被众多研究成果所证实,但以往报道多采用单因素实验研究方法,忽略了除铁过程的交互作用。除铁过程是多因素影响下的复杂问题,需要通过多因素实验设计方案才能获得更为准确、可靠的结果。中心复合设计是一种逼近实际的实验设计方案。本文作者联合利用单因素实验方法和中心复合实验设计方案,研究生物浸钴液的针铁矿法除铁过程,探索除铁条件优化的新途径。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

本实验所用生物浸钴液来自东北大学生物冶金实验室,浸钴液的主要成分如表 1 所列。浸出液细菌含

表 1 生物浸钴液的化学成分

Table 1 Chemical composition of cobaltiferous bioleaching solution (mass concentration, g/L)

Fe	Co	Cu	Ca	Mg	Si
29.83	2.04	0.02	0.38	0.16	0.65

量为  $10^{12}$  cell/L。实验药剂均为市售分析纯。

实验所用针铁矿晶种在碱性条件下制备的<sup>[12]</sup>。通过日本岛津公司生产的 SSX-550 型扫描电子显微镜及荷兰 Panalytical 公司生产的 PW3040/60 型 X 射线衍射仪对其进行表征,结果分别如图 1 和 2 所示。由形貌分析结果可知,该晶种是由直径小于 10 nm 的晶须构成(图 1),具有较大的比表面积,在除铁过程中其可与浸出液充分接触。物相分析结果表明,该晶种为纯净的针铁矿(图 2)。

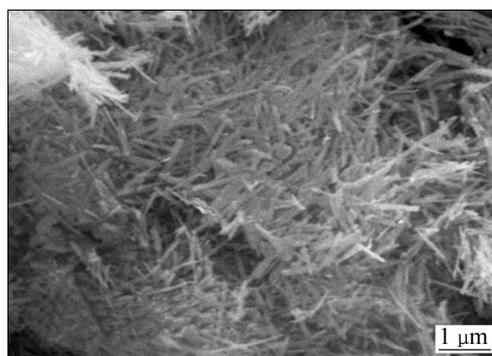


图 1 针铁矿晶种的 SEM 像

Fig. 1 SEM image of goethite seed

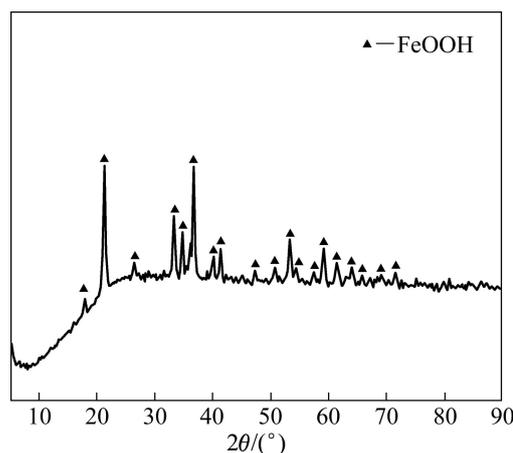


图 2 针铁矿晶种的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of goethite seed

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 针铁矿除铁

针铁矿除铁实验装置为自制,如图 3 所示。研究方法如下:先向容器中注入已调节酸度的蒸馏水 50 mL,并加入一定量的晶种,启动搅拌器,按照实验要求控制温度在 50~90 °C 之间。随后,通过温度电极、pH/Ion 电极控制向反应器中加入中和剂或浸出液。中和剂为浓度 100 g/L 的碳酸钠水溶液。

浸出液滴加完成后继续保温 2 h,使沉淀物充分陈

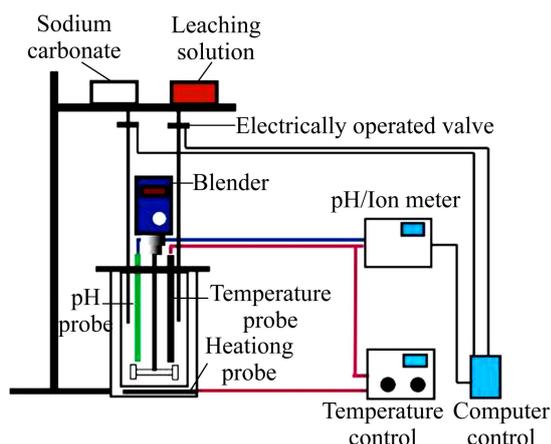


图3 除铁过程实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment units for iron removal process

化。得到的悬浊液经过滤分离,分别测定滤液中  $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  浓度,并按式(1)和(2)计算浸出液的除铁率( $\eta_1$ )和钴回收率( $\eta_2$ ):

$$\eta_1 = \frac{c_{\text{Fe}_0^{3+}} - c_{\text{Fe}_1^{3+}}}{c_{\text{Fe}_0^{3+}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{c_{\text{Co}_1^{2+}}}{c_{\text{Co}_0^{2+}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $c_{\text{Fe}_0^{3+}}$  和  $c_{\text{Co}_0^{2+}}$  分别为初始状态时浸出液中  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Co}^{2+}$  的浓度;  $c_{\text{Fe}_1^{3+}}$  和  $c_{\text{Co}_1^{2+}}$  分别为反应终态液中  $\text{Fe}^{3+}$  及  $\text{Co}^{2+}$  的浓度。

### 1.2.2 中心复合设计

针对单因素实验(温度、pH值、晶种等影响因素)中获取的每个因子最佳的区间范围,在单因素实验的最优区间内进行中心复合设计实验,该实验为3因子3水平实验。通过中心复合设计实验可确定各因素之间可能存在的交互作用,分析实验区间内除铁率和钴回收率的主要控制因素,并可对实验结果进行建模。在本研究中,使用的软件为 Design-Expert Version 8.0.5 试用版。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH值、温度和晶种量对针铁矿除铁法的影响

铁矾法及针铁矿法除铁操作的差异主要体现在操作pH值的差异。图4所示为pH值、温度和晶种量对针铁矿除铁法除铁率的影响。由图4可见,当pH值大于2.5时,硫酸体系中的  $\text{Fe}^{3+}$  主要以针铁矿及其先驱

体矿物(如水铁矿和施氏矿物)的形式析出;而当pH值小于2.5时,则主要以铁矾的形式析出。在相同条件下,铁矾的结晶速度比针铁矿及其类似矿物的结晶速度更慢。因此,在pH值小于3.0的区间内各实验点除铁率的差异显著,在pH值大于3.0的区间内除铁率变化平缓(图4(a))。

在pH值2.0~4.0范围内,  $\text{Fe}^{3+}$  生成沉淀类型依次为铁矾 ( $\text{MeFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ )、施氏矿物 ( $\text{Fe}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{10}(\text{SO}_4)_3$ ) 和水铁矿 ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), 由于

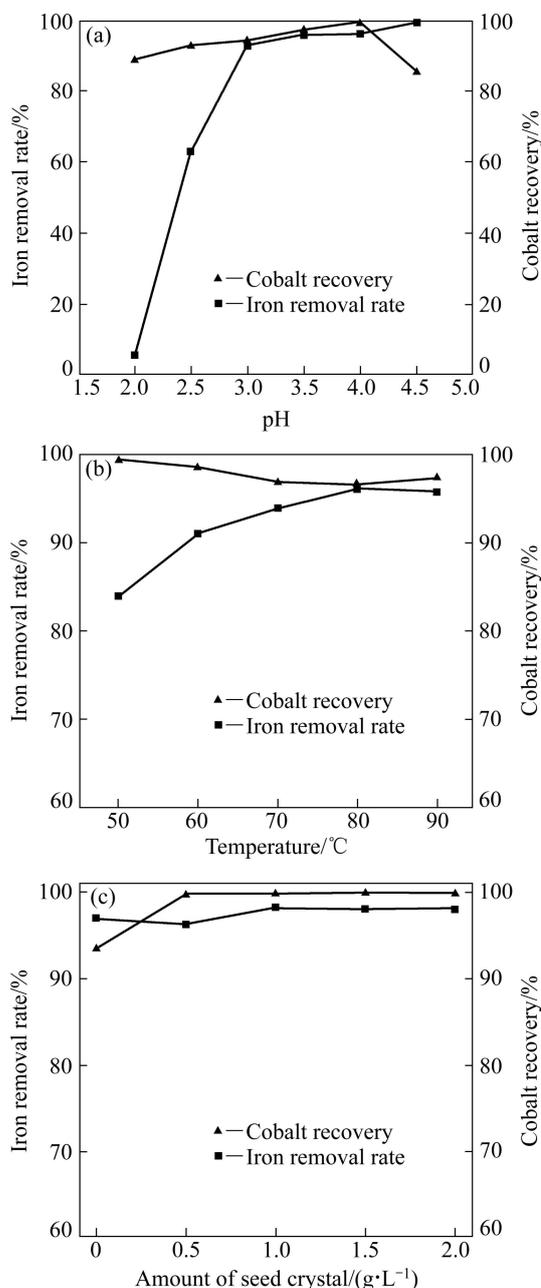


图4 pH值、温度和晶种量对针铁矿除铁法除铁率的影响  
Fig. 4 Effect of pH, temperature and amount of seed crystal on iron removal rate and cobalt recovery: (a) 70 °C, seed crystal 0.50 g/L; (b) pH=3.0, seed crystal 0.50 g/L; (c) pH=3.0, 70 °C

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>量依次减小, 其对 Co<sup>2+</sup>的吸附能力依次减弱, 钴回收率增加, 当 pH 值大于 4.0 时, 钴逐渐损失于水解(图 4(a))。

如图 4(b)所示, 除铁温度升高, 溶液中的 Fe<sup>3+</sup>沉淀率增加。由于针铁矿对钴的吸附反应为吸热过程, 温度的升高必然导致钴的吸附增加<sup>[13]</sup>。因此, 温度升高, 钴回收率呈现降低趋势。

向浸出液中添加针铁矿晶种可减少钴损失, 且当其添加量大于 1.00 g/L 后钴回收接近 100%(图 4(c))。

在单因素实验结果中选取适当的参数范围, 能够同时兼顾除铁率和钴回收率。在本研究中, 可将 pH 值控制在 3.0~4.0, 温度控制在高于 70 °C, 晶种量控制在 0.05~0.15 g/L 之间。

## 2.2 中心复合设计实验结果及模型建立

### 2.2.1 中心复合设计实验结果及模型

针铁矿法除铁是一个多因素影响下的复杂过程。为了精确研究这些因素之间的关系, 进行中心复合设计实验, 并建立数学模型。根据单因素实验结果, 设计 3 因素、3 水平的中心复合设计实验, 参数如下: 温度(70 °C, 80 °C, 90 °C), pH 值(3.5, 4.0, 4.5), 晶种量(0.5 g/L, 1.0 g/L, 1.5 g/L), 中心点为(80 °C, 4.0, 1.0 g/L)。中心复合设计实验运行结果列于表 2。

表 2 中心复合设计实验运行结果

Table 2 Test results with central composite design

Run	Independent variable			$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
	A: Temperature/°C	B: pH	C: Amount of seed crystal/(g·L <sup>-1</sup> )		
1	90	4.0	0.50	99.59	99.75
2	80	4.0	1.00	99.91	99.07
3	90	3.5	1.00	98.59	97.56
4	90	4.5	1.00	99.65	87.65
5	80	3.5	0.50	96.23	98.35
6	70	4.0	1.50	97.53	98.53
7	80	3.5	1.50	96.02	99.07
8	80	4.0	1.00	99.92	99.02
9	70	4.5	1.00	98.44	89.01
10	70	4.0	0.50	96.11	99.54
11	90	4.0	1.50	96.79	98.75
12	80	4.5	1.50	99.85	87.37
13	80	4.5	0.50	99.87	91.39
14	80	4.0	1.00	99.64	99.43
15	70	3.5	1.00	94.76	98.57
16	80	4.0	1.00	99.32	99.15
17	80	4.0	1.00	99.19	99.81

研究结果显示, 实验中心点除铁率及钴回收率平均值分别为 99.60%和 99.30%, 除铁率及钴回收率均高于中心复合设计实验的平均值(98.32%和 96.58%), 除铁效果及钴回收效果优异。

对表 2 中数据采用二次方程进行拟合时, 拟合度较高(除铁率和钴回收率  $P$  值分别为 0.000 2 及 0.000 1), 以二次方程为基础建立除铁率( $\eta_1$ )和钴回收率( $\eta_2$ )的模型分别为

$$\eta_1 = -93.8125 + 2.61105A + 33.5085B + 24.3115C - 0.131AB - 0.211AC - 0.01112A^2 - 2.497B^2 - 3.917C^2 \quad (3)$$

$$\eta_2 = -272.782 + 0.84655A + 175.7435B + 14.8565C - 0.0175AB - 4.74BC - 0.005A^2 - 22.392B^2 + 1.388C^2 \quad (4)$$

### 2.2.2 模型分析

除铁率及钴回收率二次拟合模型的方差分析结果分别如表 3 和 4 所列。方差分析结果表明, 模型对实验结果具有较高的拟合度( $P$  值分别为 0.000 2 和 0.000 1), 而实验结果的偏差中来自于噪声的干扰不显著( $P$  值为 0.105 6 和 0.159 9), 该模型能够描述本实验过程所涉及的除铁率及钴回收率。

由除铁率模型方差分析结果可知, 在研究的区间内, 除铁率主要受温度与晶种量控制, 与单因素的实验结果不同, pH 值对除铁率的影响不再明显(表 3)。

表3 除铁率二次模型拟合结果方差分析

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) of fitting results of iron removal rate based on quadratic model

Source	Sum of square	df	Mean square	F value	P-value prob>F	Significance
Model	44.77	8	5.6	20.22	0.000 2	Significant
A	8.75	1	8.75	31.62	0.000 5	
B	3.65	1	3.65	13.19	0.006 7	
C	7.42	1	7.42	26.80	0.000 8	
AB	1.72	1	1.72	6.20	0.037 5	
AC	4.45	1	4.45	16.09	0.003 9	
A <sup>2</sup>	5.2	1	5.2	18.81	0.002 5	
B <sup>2</sup>	1.64	1	1.64	5.93	0.040 9	
C <sup>2</sup>	4.04	1	4.04	14.59	0.005 1	
Residual	2.21	8	0.28			
Lack of fit	1.77	4	0.44	3.96	0.105 6	Not significant
Pure error	0.45	4	0.11			
Cor total	46.98	16				

表4 钴回收率二次模型拟合结果方差分析

Table 4 ANOVA of fitting results of cobalt recovery based upon quadratic model

Source	Sum of square	df	Mean square	F value	P-value prob>F	Significance
Model	325.997 1	8	40.749 64	191.676 2	<0.000 1	Significant
A	0.931 618	1	0.931 618	4.382 098	0.069 7	
B	99.088 15	1	99.088 15	466.086 1	<0.000 1	
C	2.769 33	1	2.769 33	13.026 24	0.006 9	
AB	0.030 625	1	0.030 625	0.144 052	0.714 2	
BC	5.616 9	1	5.616 9	26.420 5	0.000 9	
A <sup>2</sup>	1.054 738	1	1.054 738	4.961 225	0.056 5	
B <sup>2</sup>	131.947 8	1	131.947 8	620.649 7	<0.000 1	
C <sup>2</sup>	0.506 985	1	0.506 985	2.384 733	0.161 1	
Residual	1.700 77	8	0.212 596			
Lack of fit	1.270 05	4	0.317 513	2.948 667	0.159 9	Not significant
Pure error	0.430 72	4	0.107 68			
Cor total	327.697 9	16				

研究结果同时证实,除铁率还受到因素之间的交互作用的影响。其中以温度和晶种量之间的交互作用最为明显,而pH值与晶种量之间的交互作用可以忽略。此外,二次项对除铁率的影响与一次项的一致。

钴回收率模型方差分析结果表明,在研究区间内钴回收率主要受到pH值的影响,而受温度及晶种量的影响较小(表4)。交互作用分析显示,钴回收率受pH值与晶种量之间的交互作用影响较大,而温度和晶种量之间的交互作用对钴回收率的影响可以忽略。模型中二次项对钴回收率的影响与一次项的一致。

### 2.2.3 二次模型的响应面分析

图5和6所示分别为除铁率及钴回收率对应的二次模型2D等高线图。等高线图反映了除铁过程温度和pH值、温度和晶种量之间的交互作用对除铁率及钴回收率的影响。

除铁率模型的等高线呈现脊状分布,这说明pH值、温度及晶种量之间存在的交互作用均对除铁率有影响(图5)。

在钴回收率等高线图中,钴回收率的等高线近似呈平行“直线”状分布,这说明钴回收率受到pH值

的影响显著, 而受温度及晶种量的影响较弱。如 pH 值大于 4.00 后, 升高温度对钴回收率的影响已不显著, 而要使钴的回收接近完全, 则 pH 值不能超过 3.90 (图 6)。

2.2.4 拟合模型验证分析

为检测模型的有效性, 在中心复合设计实验的参数区间内选择 3 点 {(pH, 晶种量, 温度)}(3.90, 0.60 g/L, 70 °C), (4.40, 0.90 g/L, 75 °C), (3.60, 1.40 g/L, 89 °C)

进行模型回归分析。在本实验中, 采用式(5)表示模型拟合值相对实际值的偏差(D)。

$$D = \frac{A - S}{A} \times 100\% \tag{5}$$

式中: A 表示实验中的测量值; S 为由上述模型得到的拟合值。实验结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 该模型的拟合值与验证实验结果的吻合度较高, 除铁率模型平均偏差为 0.26%, 钴回收

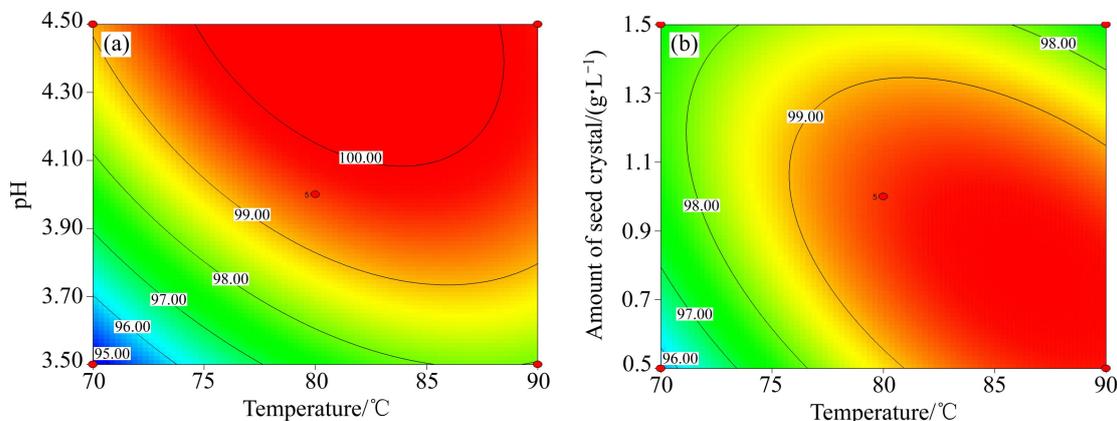


图 5 除铁率(%)交互作用等高线图

Fig. 5 Contour maps of influence of interaction between various factors on iron removal rate (%): (a) pH and temperature at amount of seed crystal of 1.00 g/L; (b) Amount of seed crystal and temperature at pH=4.00

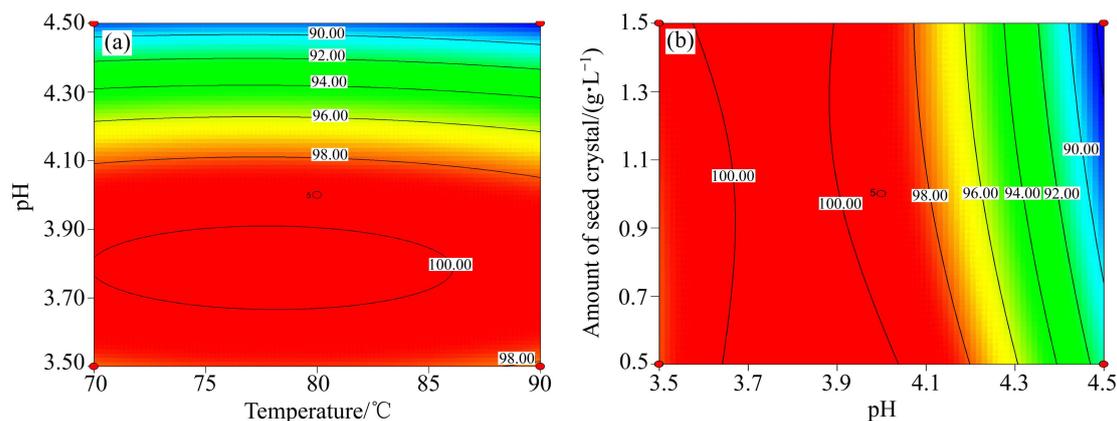


图 6 钴回收率(%)等高线图

Fig. 6 Contour maps of interaction between various factors on cobalt recovery (%): (a) pH and temperature at amount of seed crystal of 1.00 g/L; (b) Amount of seed crystal and temperature at pH=4.00

表 5 模型相对偏差分析结果

Table 5 Analytical results of relative deviation of model

Experimental point	Actual value		Fitted value		Relative deviation/%	
	Cobalt recovery	Iron removal rate	Cobalt recovery	Iron removal rate	Cobalt recovery	Iron removal rate
(3.90, 0.60 g/L, 70 °C)	97.32	100.00	96.48	100.33	0.86	-0.34
(4.40, 0.90 g/L, 75 °C)	100.00	91.87	100.67	92.30	-0.67	0.46
(3.60, 1.40 g/L, 89 °C)	98.93	99.50	98.00	99.46	0.94	0.05

率模型的平均偏差为 0.81%。两模型相对偏差的绝对值均小于 1%。

### 3 结论

1) 单因素实验结果表明, 当中和剂为 100 g/L 的碳酸钠溶液, 反应器搅拌速率为 600 r/min 的条件下, 获得的针铁矿法除铁较优区间如下: pH 值 3.5~4.5, 温度 70~90 °C, 晶种量 0.50~1.50 g/L。

2) 利用中心复合设计实验进行数学建模, 得到适用于含钴生物浸出液除铁过程的数学模型。该模型的拟合值与验证实验结果的吻合度较高, 二者偏差的绝对值小于 1%。

3) 在 pH 为 3.5~4.5 范围内, 温度与晶种量是控制除铁率的主要因素, 而钴回收率主要受 pH 值的影响。中心复合设计实验得到的等高线图可描述各因素之间的交互作用。温度和晶种量之间的交互作用对除铁率的影响明显; 而对于钴回收率, pH 值和晶种量之间的交互作用是主要影响因素。等高线图表示的区域可作为除铁过程的控制参数。

### REFERENCES

- [1] NDLOVU S. Biohydrometallurgy for sustainable development in the African minerals industry[J]. *Hydrometallurgy*, 2008, 91(1/4): 20-27.
- [2] MORIN D, PINCHES T, HUISMAN J, FRIAS C, NORBERG A, FORSSBERG E. Progress after three years of BioMinE—Research and technological development project for a global assessment of biohydrometallurgical processes applied to European non-ferrous metal resources[J]. *Hydrometallurgy*, 2008, 94(1/4): 58-68.
- [3] SLATER M J. Iron control in hydrometallurgy[J]. *Hydrometallurgy*, 1987, 18(1): 123.
- [4] 赵永, 蒋开喜, 王德全, 郭亚会. 用针铁矿法从锌焙烧烟尘的热酸浸出液中除铁[J]. *有色金属: 冶炼部分*, 2005(5): 13-15.  
ZHAO Yong, JIANG Kai-xi, WANG De-quan, GUO Ya-hui. Iron removal from hot acid leaching solution of zinc roasting dust by goethite process[J]. *Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy*, 2005(5): 13-15.
- [5] 邓永贵, 陈启元, 尹周澜, 张平民. 湿法炼锌浸出液针铁矿法除铁晶种的制备[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(S1): s27-s31.  
DENG Yong-gui, CHEN Qi-yuan, YIN Zhou-lan, ZHANG Ping-min. Preparation of goethite seeds for removal of ferrous/ferric ions from leaching solution of zinc in hydrometallurgy process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(S1): s27-s31.
- [6] 邓永贵, 陈启元, 尹周澜, 张平民. 锌浸出液针铁矿法除铁[J]. *有色金属*, 2010(3): 80-84.  
DENG Yong-gui, CHEN Qi-yuan, YIN Zhou-lan, ZHANG Ping-min. Removal of ferrous/ferric ions from zinc leaching solution by goethite process[J]. *Nonferrous Metals*, 2010(3): 80-84.
- [7] 彭建蓉, 王吉坤, 杨大锦, 阎江峰. 富铜高铁硫化锌精矿加压浸出液沉钨后溶液净化除铁研究[J]. *湿法冶金*, 2007, 26(2): 88-91.  
PENG Jian-rong, WANG Ji-kun, YANG Da-jin, YAN Jiang-feng. Study on removal of iron from pressure acid leaching liquor of zinc sulfide concentrate precipitated indium[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2007, 26(2): 88-91.
- [8] 熊富强, 桂卫华, 阳春华. 针铁矿法沉铁过程铁离子浓度集成预测模型[J]. *控制与决策*, 2012, 27(3): 329-334, 342.  
XIONG Fu-qiang, GUI Wei-hua, YANG Chun-hua. Integrated prediction model of iron concentration in goethite method to remove iron process[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(3): 329-334, 342.
- [9] 方成开, 谭佩君. 从钴镍废料电溶液中分离回收钴镍[J]. *湿法冶金*, 2003, 22(4): 169-182.  
FANG Cheng-kai, TAN Pei-jun. Separation and recovery of cobalt and nickel from electro-solution of Co-Ni waste[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2003, 22(4): 169-182.
- [10] 王艳, 周春山. 含钴废渣硫酸化焙砂浸出液中钴、铁、锰分离研究[J]. *化学世界*, 2001, 42(6): 289-290, 305.  
WANG Yan, ZHOU Chun-shan. Study on the separation of cobalt, iron and manganese from the leach solution of sulphated calcined cobalt residue[J]. *Chemical World*, 2001, 42(6): 289-290, 305.
- [11] 陈红彬. 用针铁矿法从钴白合金酸浸液中除铁研究[J]. *金属材料与冶金工程*, 2012(4): 27-29.  
CHEN Hong-bin. Iron removal from acidic leaching solution of Co white alloy by goethite process[J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2012(4): 27-29.
- [12] RODDA D P, JOHNSON B B, WELLS J D. Modeling the effect of temperature on adsorption of lead (II) and zinc (II) onto goethite at constant pH[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 184(2): 365-377.
- [13] LACKOVIC K, ANGOVE M J, WELLS J D, JOHNSON B B. Modeling the adsorption of Cd (II) onto Muloorina iolite and related clay minerals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 257(1): 31-40.

(编辑 陈卫萍)