



碘化浸出液电沉积金工艺

李桂春, 孟 齐, 康 华, 闫晓慧

(黑龙江科技大学 矿业工程学院, 哈尔滨 150022)

摘 要: 针对碘化浸出液中金回收效率低、电能消耗高等问题, 采用电沉积法从碘化浸出液中电沉积金。考察阴极液金浓度、阳极液碘质量分数、阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 、槽电压对金沉积率的影响。采用响应面法以阳极液碘质量分数、阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 、槽电压为变量因素, 金沉积率为响应值, 研究各变量因素之间的交互作用以及对金沉积率的影响规律。结果表明: 阳极液碘质量分数、阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 和槽电压与金沉积率的主效应关系为: 槽电压 > 阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ > 阳极液碘质量分数, 并得出了以金沉积率为响应值的二阶回归方程。优化后工艺条件为: 阴极液金浓度 10 mg/L、阳极液碘质量分数 0.58%、阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 1:6.5、槽电压 12 V、电解时间 2 h, 三次验证实验的金沉积率均值为 97.83%, 与模型预测值 98.15% 十分接近, 证明响应面法优化得到的二次多项式模型具有可行性。同时, 该工艺条件适用于实际应用, 金沉积率仍可达 97% 以上。

关键词: 碘化浸出液; 电沉积法; 金沉积率; 响应面法; 工艺条件

文章编号: 1004-0609(2020)-08-1925-09

中图分类号: TF111

文献标志码: A

碘化浸金是一种新型环保提金法, 提金过程中形成的金碘络合物的稳定性仅次于金氰络合物的, 且体系溶液中的配位体在 pH 为 0~14 范围内均可以稳定存在, 故是一种很有发展前景的提金方法^[1-3]。碘化浸出液的处理是碘化浸金工艺的关键部分, 目前, 关于碘化浸出液中金的高效回收相关研究较少, 其关键问题是将碘化浸出液中的络合离子态金以单质金形式回收^[4-5]。溶液中离子态金属的回收方法主要包括: 锌粉置换法^[6]、活性炭吸附法^[7]、离子交换法^[8]、溶剂萃取法^[9]和电沉积法^[10]。相比而言, 电沉积法具有操作方便、回收成本低、选择性好和回收率高等优点。一些学者对电沉积法进行了相关研究, 李桂春等^[11]对碘化浸金后的浸出液进行电沉积金实验, 结果表明: 槽电压为 4 V, 金的起始浓度不低于 40 mg/L, 电解时间 4~6 h, 电沉积法回收碘化浸出液中的金具有可行性且回收效果明显。不足之处为原矿直接进行浸出时金浓度远远低于实验室条件下的, 导致在实际生产中无法直接应用。在此研究基础上, 徐渠等^[12]先进行预处理去除非目的离子, 然后考察了阳极碘质量分数、阴极金浓度、槽电压和电解时间对金电沉积率的影响, 得出金的回收率达 95% 以上。SAHIN 等^[13]采用电沉积法处理含金浸出液, 从能耗角度与活性炭吸附法进行

对比, 得出电沉积法经济成本仅为活性炭吸附法的一半左右, 为工业化应用提供支持。

虽然一些研究人员已经对电沉积金工艺做了相关研究, 但是关于较低金浓度的碘化浸出液电沉积金研究尚不够系统和完善。为此, 本研究以配制较低金浓度的 Au-I₂-KI 溶液作阴极液, 考察阴极液金浓度、阳极液碘质量分数、 $n(I_2):n(I^-)$ 、槽电压和电解时间对金沉积率的影响。利用 Design-Expert.V8.0.6 软件对试验结果进行响应面分析、优化工艺条件, 建立电沉积金响应面回归模型, 为碘化浸金工艺的浸出液处理部分提供数据参考, 同时, 为碘化浸金实现工业化应用提供支持。

1 实验

1.1 原理

阴极反应: 金在电解槽的阴极板上发生还原反应, 并伴随析氢反应的发生:



基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674110)

收稿日期: 2019-08-04; **修订日期:** 2019-12-24

通信作者: 李桂春, 教授, 博士; 电话: 13199513977; E-mail: liguichun2002@163.com

阳极反应：阴极区的碘离子通过阴离子交换膜进入阳极区，在阳极被氧化生成碘单质：



随着阳极区碘离子浓度的升高，会与阳极溶液中过量的碘化钾继续反应：



待反应结束后，阳极区一部分碘沉积在阳极板上，一部分碘会循环溶解于碘液中^[14]。

1.2 材料与设备

试剂：碘、碘化钾均为分析纯，纯金箔(99.99%)，试验用水为去离子水。

仪器：岛津国际贸易有限公司的 AA-6880 原子分光光度计；上海海康电子仪器厂的 FA214 电子天平；深圳市兆信电子仪器设备有限公司的 RXN-305D 直流稳压电源。

装置：电解槽为自制的矩形复合材料槽(12 cm×8 cm×9 cm)，电解槽由阴离子交换膜隔开，阳极板(石墨板，120 mm×70 mm×4 mm)和阴极板(钛板，120 mm×70 mm×1 mm)分别连接直流稳压电源的正极和负极。

1.3 两极溶液配制

阳极液的配制：先将一定量的碘化钾倒入烧杯中，加去离子水搅拌稀释溶解，再倒入相应量的碘单质，加去离子水至溶液体积为 50 mL，搅拌至烧杯底部的碘单质不再溶解即可。

阴极液的配制：由反应方程式 $2\text{Au} + \text{I}^- + \text{I}_3^- \rightarrow 2\text{AuI}_2^-$ 和 $\text{I}_2 + \text{I}^- \rightarrow \text{I}_3^-$ 计算出碘单质的量，再根据碘与碘化钾质量比计算出碘化钾的量，先将碘化钾倒入烧杯中，加去离子水搅拌稀释溶解，然后倒入碘单质，加去离子水至溶液体积为 50 mL，加入金箔搅拌至完全溶解。

1.4 实验方法

电沉积金试验方法：将已配制的 Au-I₂-KI 溶液(50 mL)倒入电解槽的阴极区，碘和碘化钾配制的碘液(50 mL)倒入电解槽的阳极区，室温(25 ℃)条件下，分别考察阴极液金浓度、阳极液碘质量分数、 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 、槽电压对金沉积率的影响。用原子吸收分光光度计对阴极区沉积后溶液进行金含量测定，计算金沉积率：

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中： η 为金沉积率，%； ρ_0 为电解前阴极区溶液中金浓度，mol/L； ρ_1 为电解完成后阴极区溶液中金浓度，mol/L。

响应面试验设计方法：在单因素试验基础上，采用 Design-Expert8.0.6 软件，使用 Box-Behnken 中心组合设计方法^[15]对电沉积金过程的主要影响因素进行响应面试验和分析。以阳极液碘质量分数、阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 、槽电压为变量因素，金沉积率为响应值对碘化浸出液电沉积金工艺条件进行优化，得出最佳电沉积金工艺条件。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

2.1.1 阴极液金浓度对金沉积率的影响

为了考察阴极液金浓度对金沉积率的影响，配制不同金浓度的 Au-I₂-KI 溶液，在阳极液碘质量分数 0.6%，阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:8$ ，槽电压 12 V，电解不同时间后，阴极液金浓度对金沉积率的影响如图 1 所示。

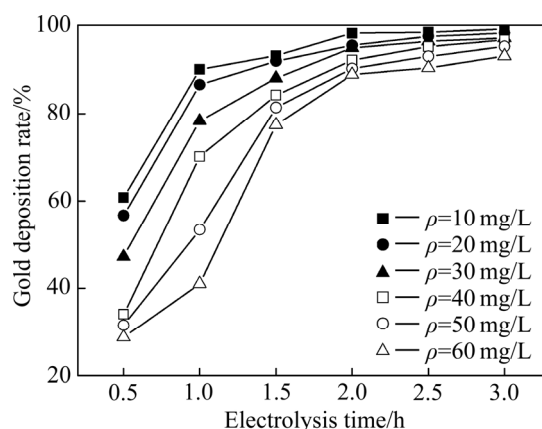


图 1 阴极液金浓度对金沉积率的影响

Fig. 1 Effect of gold concentration on gold deposition rate

由图 1 可知，随着阴极液金浓度的升高，金沉积率呈下降趋势。在电解 0.5~1.5 h 内，金沉积率升高趋势明显，由于反应初期阴极区溶液的金碘络合离子浓度较高，阴极材料表面主要的反应为还原沉积金。电解 2 h 后，10~60 mg/L 阴极液金沉积率都为 90% 以上，当金起始浓度为 10 mg/L 时，金沉积率最高，可达 98.19%，继续电解金沉积率升高趋势缓慢，因为随着阴极液金浓度的升高，阴极液中 I^- 浓度也越大，需要更长的电解时间才能使金的沉积最大化，并产生大量的析氢反应^[16]。故选择阴极液金浓度为 10 mg/L 进行

试验。

2.1.2 阳极液碘质量分数对金沉积率的影响

考察阳极液碘质量分数对金沉积率的影响, 在阴极液金浓度 10 mg/L, 阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:6$, 槽电压 12 V, 电解不同时间后, 阳极液碘质量分数对金沉积率的影响如图 2 所示。

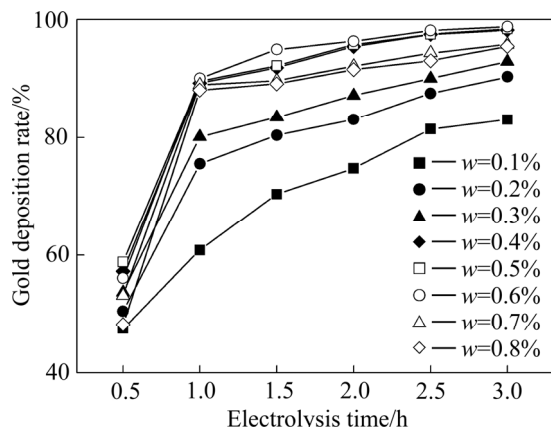


图 2 阳极液碘质量分数对金沉积率的影响

Fig. 2 Effect of iodine content in anode liquid on gold deposition rate

由图 2 可知, 当阳极液碘质量分数为 0.1%~0.6% 时, 随着碘质量分数的增大, 金沉积率逐渐上升。阳极液碘质量分数为 0.1% 时, 电解 2 h 后, 金沉积率仅为 74.72%, 由于阳极液中 I_2 过少时, 相应的 I^- 量也较少, 流入阴极区的电流较小, 引起氧化还原反应速度缓慢。当碘质量分数为 0.6% 时, 金沉积率达到最大值 97.3%, 继续增加碘质量分数, 金沉积率逐渐降低, 原因是阳极碘液碘浓度过高时, 阴极区的 I^- 和 I_3^- 向阳极区流动的速率减小, 导致阴极液中金出现溶解-沉积的循环反应, 降低了金的沉积效率^[17]。因此, 阳极液中碘的质量分数为 0.6% 较为合适。

2.1.3 阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 对金沉积率的影响

考察阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 对金沉积率的影响, 在阴极液金浓度 10 mg/L, 阳极液碘质量分数 0.6%, 槽电压 12 V, 电解不同时间后, 阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 对金沉积率的影响如图 3 所示。

由图 3 可知, 当阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 为 1:2~1:8 时, 随着摩尔比的减小, 金沉积率逐渐升高。阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:2$ 时, 电解 2 h 后, 金沉积率为 80.15%, 由于阳极碘液在整个反应中充当电解质作用, 溶液中碘化钾的量较少时, 反应开始后阳极液中的碘离子不足会引起发生氧化反应速率减慢, 影响阴极区金的还原沉积^[18]。继续增加碘化钾的量, 金沉积率不断上升, 当 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:6$ 时, 电解 2 h 后, 金沉积率为 98.01%,

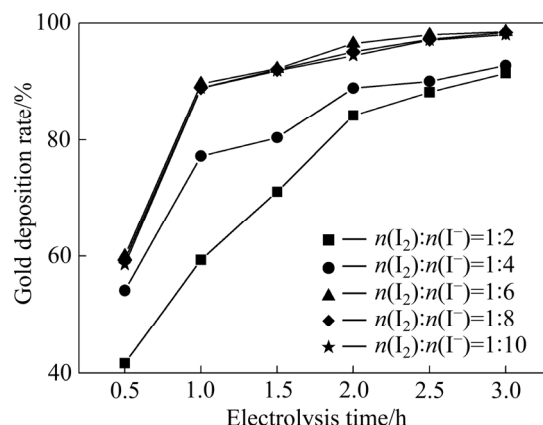


图 3 阳极液中 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ 对金沉积率的影响

Fig. 3 Effect of $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ in anode solution on gold deposition rate

再继续增大 KI 的量, 金沉积率略有下降, 原因是阳极区 I^- 和 I_3^- 的量已高于阴极区时, 流向阳极区的电流减小, 从而抑制阴极金的沉积, 即阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:6$ 较为合适。

2.1.4 槽电压对金沉积率的影响

槽电压是电沉积法处理含金浸出液的关键因素, 因其提供离子迁移的动力, 对金沉积速率影响较大。因此, 在阴极液金浓度 10 mg/L, 阳极液碘质量分数 0.6%, 阳极液 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:6$, 电解不同时间后, 槽电压对金沉积率的影响如图 4 所示。

由图 4 可知, 当槽电压为 4 V 时, 电解 2 h 后的金沉积率仅为 69.3%, 继续增大槽电压, 金沉积率呈逐渐上升趋势, 当槽电压为 12 V 时, 金沉积率达到最大值 97.1%, 继续增大槽电压, 金沉积率升高趋势不明显。在电沉积过程中, 槽电压直接影响反应速率的快慢, 金属离子转移到阴极材料进行还原沉积反应的

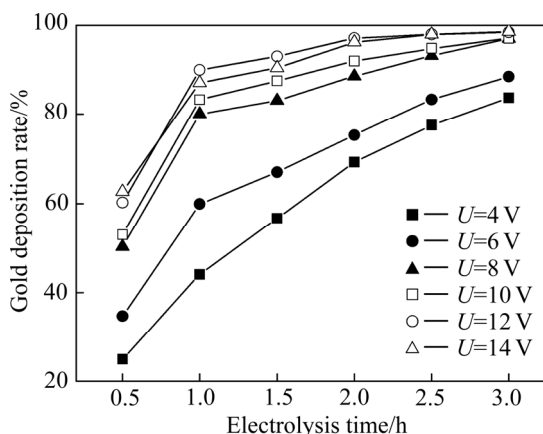


图 4 槽电压对金沉积率的影响

Fig. 4 Effect of cell voltage on gold deposition rate

速率是关键因素，因为溶液依靠离子进行导电，较大电压会使溶液形成电降，减小了电能的转化率。实际应用中，在达到较高沉积率的前提下，尽量减小槽电压以减少电能损耗，提高经济收益^[19]。

2.2 响应面法优化试验

通过单因素试验结果可知，阳极液碘质量分数、阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$ 、槽电压和电解时间都对金沉积率有较大的影响。为了进一步分析各因素交互作用及其对金沉积率影响的显著性，采用响应面法优化碘化浸出液电沉积金工艺条件，试验设计的中心为单因素试验的最优工艺条件，即阳极液碘质量分数 0.6%，阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)=1:6$ ，槽电压 12 V。

2.2.1 试验设计

利用 Design-Expert8.0.6 软件设计三因素三水平的响应面试验，以金沉积率为响应值，在阴极液金浓度为 10 mg/L，电解时间 2 h 的条件下进行优化试验。各因素取值见表 1，响应面分析方案与试验结果见表 2。

2.2.2 响应面试验结果回归分析

阳极液碘质量分数(w ，因子 A)、阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$ (r ，因子 B)、槽电压(U ，因子 C)为自变量，金沉积率为响应值，进行响应面试验分析，回归分析结果见表 3。

由表 3 可知， P 值表示因子影响的显著性，其数值越小越显著，该模型 $F=86.35$ ， $P<0.0001<0.05$ ，表明模型极显著，而失拟项 $F=2.40$ ， $P>0.05$ 失拟不显著，即实验无失拟因素存在，模型可以用于预测实际情况。其中，AB、 A^2 、 B^2 、 C^2 为显著影响因子，即阳极液碘质量分数、阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$ 、槽电压都对金沉积率有显著影响。由图 5 可知，金沉积率的预测值与真实值的关系，大部分真实值都落在预测直线上，相对误差小于 5%，说明该模型可以描述试验因素和金沉积率的相关性。

表 1 响应面分析因素与水平

Level	Factor		
	Mass fraction of iodine in anolyte, $w/\%$, A	Anolyte $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$, r , B	Cell voltage, U/V , C
-1	0.5	1:4	10
0	0.6	1:6	12
1	0.7	1:8	14

表 2 响应面分析方案与试验结果

Table 2 Analytical project and test results of response surface method						
Serial number	A	B	C	Gold deposition rate/%		
				Experimental value	Predicted value	Residual
1	0	0	0	96.45	96.87	-0.42
2	-1	0	-1	89.1	88.91	0.19
3	0	0	0	97.32	96.81	0.51
4	-1	0	1	93.97	94.23	-0.26
5	0	0	0	96.33	96.84	-0.51
6	1	1	0	86.4	87.31	-0.91
7	1	0	1	92.75	92.5	0.25
8	-1	1	0	92.02	91.91	0.11
9	0	1	1	92.62	91.9	0.72
10	1	-1	0	92.33	92.68	0.35
11	1	0	-1	86.35	86.02	0.33
12	0	0	0	96.81	96.66	0.15
13	0	1	-1	87.17	86.83	0.34
14	0	-1	-1	89.76	89.98	-0.22
15	-1	-1	0	93.04	92.33	0.71
16	0	0	0	97.12	96.68	0.44
17	0	-1	1	94.77	95.02	-0.25

将金沉积率响应值与各因素进行回归拟合，得出二阶回归方程为： $Y=96.81-1.29w-1.59r+2.59U-1.23wr+0.38wU-0.14rU-3.07w^2-2.79r^2-3.19U^2$ 。

从回归方程模型因变量的方差分析可知，模型一次项 A($P=0.0003$)、B($P<0.0001$)、C($P<0.0001$)影响显著；交互项 AB($P=0.0025$)影响显著，AC($P=0.1959$)和 BC($P=0.6170$)影响不显著；二次项 A^2 ($P<0.0001$)、 B^2 ($P<0.0001$)、 C^2 ($P<0.0001$)影响极显著。根据系数绝对值 $a=1.29$ 、 $b=1.59$ 、 $c=2.59$ ，可知因素的主效应关系为：槽电压>阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$ >阳极液碘质量分数。

图 6 所示为金沉积率的响应曲面和等高线图，该组图的响应面坡度越陡，则表明交互作用越显著，反之则表示交互作用不显著。等高线图的轮廓能直观地表现出两因素之间交互作用的程度，圆形表示交互作用不显著，椭圆形表示交互作用显著^[20]。金沉积率随着阳极液碘质量分数、槽电压的增加和阳极液 $n(\text{I}_2):n(\Gamma)$ 的减小，都是呈先增后减的变化趋势，三维响应面与抛物线图形相似，说明金沉积率的最大值出

表 3 回归分析结果

Table 3 Regression analysis results

Source of variation	Quadratic sum	Degree of freedom	Mean sum of square	F value	P value	Significance
Regression model	222.59	9	24.73	86.35	<0.0001	Significant
A	13.26	1	13.26	46.30	0.0003	
B	20.13	1	20.13	70.28	<0.0001	
C	53.72	1	53.72	187.55	<0.0001	
AB	6.03	1	6.03	21.04	0.0025	
AC	0.59	1	0.59	2.04	0.1959	
BC	0.078	1	0.078	0.27	0.6170	
A ²	39.76	1	39.76	138.83	<0.0001	
B ²	32.67	1	32.67	114.07	<0.0001	
C ²	42.86	1	42.86	149.65	<0.0001	
Residual	2.00	7	0.29			
Lack of fit	1.29	3	0.43	2.40	0.2085	Non-significant
Pure error	0.72	4	0.18			
Total deviation	224.60	16				

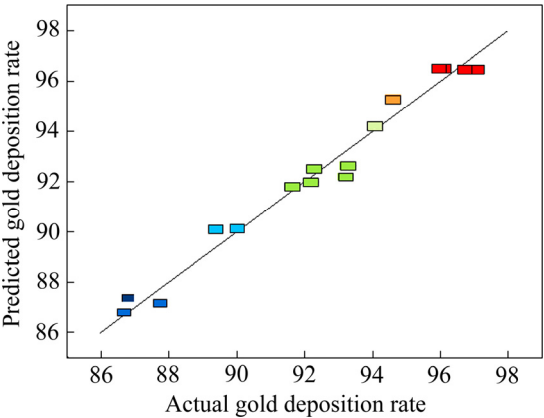


图 5 金沉积率预测值与实际值对应关系图

Fig. 5 Diagram of relationship between predicted value and actual value of gold deposition rate

现在顶点附近区域, 从模型中可以找到最大值点^[21], 即此试验结果与单因素试验结果变化规律一致。

2.2.3 响应面条件优化及验证实验

为了验证响应面优化模型的可行性, 对响应面优化最佳工艺条件进行验证试验。模型预测最优工艺条件为: 阳极液碘质量分数 0.578%, 阳极液 $n(I_2):n(I^-)=1:6.45$, 槽电压 12.08 V。在此条件下, 金沉积率预测值可达 98.15%。为方便操作, 将工艺条件进行修正为阳极液碘质量分数 0.58%, 阳极液 $n(I_2):n(I^-)=1:6.5$, 槽电压 12 V。在此条件下进行 3 次验证实验, 电解 2 h 后, 金沉积率分别为 97.81%、97.56%、98.12%, 均值

表 4 响应面优化验证结果

Table 4 Verification result of response surface optimization

Condition	Mass fraction of iodine in anolyte/%, A	Anolyte $n(I_2):n(I^-)$, B	Cell voltage/V, C	Gold deposition rate/%
Optimal condition	0.578	1:6.45	12.08	98.15
Adjustment conditions	0.58	1:6.5	12	97.83

为 97.83%, 与预测值非常接近, 证明响应面优化后的碘化浸出液沉积金工艺条件具有可行性。

2.3 实际碘化浸出液电沉积金实验

通过对实际碘化浸出液进行成分及含量分析, 得出浸出液中金浓度为 9.51 mg/L, 将浸出液过滤处理后进行电沉积金实验。沉积金工艺由以上实验结果综合得出: 阳极液碘质量分数 0.6%, 阳极液 $n(I_2):n(I^-)=1:6$, 槽电压 12 V, 实际碘化浸出液中金的沉积率如图 7 所示。由图 7 可以看出, 电解时间 2 h 后, 金沉积率为 97.45%。实验结果与配制的碘化浸出液相比金沉积率相差不大, 证明该工艺条件适用于实际碘化浸出液中电沉积金。但是由于实际碘化浸出液中有多种金属离子以及其他杂质会影响金的沉积效果, 后续将会对此进行深入的研究。

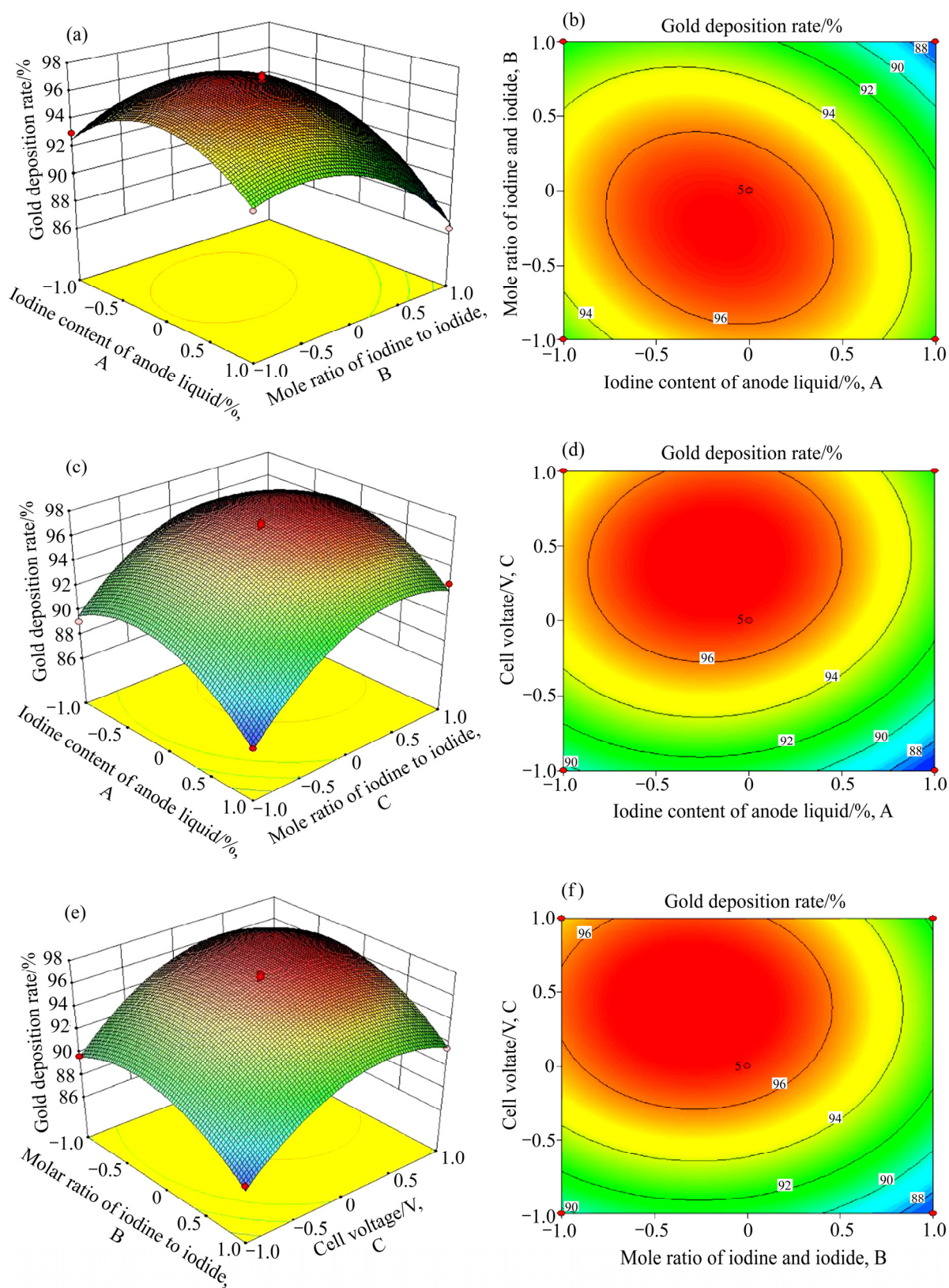


图6 金沉积率的响应曲面和等高线图

Fig. 6 Response surface and contour plots for gold deposition efficiency: (a) AB response surface; (b) AB contour map; (c) AC response surface; (d) AC contour map; (e) BC response surface; (f) BC contour map

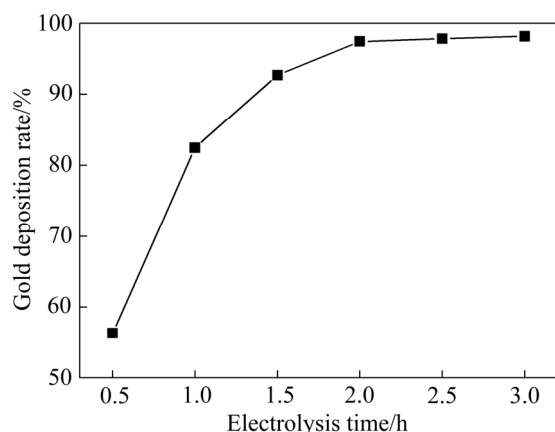


图7 实际碘化浸出液电沉积金

Fig. 7 Electrode position of gold in actual iodized leaching solution

3 结论

1) 以模拟碘化浸出液作阴极液进行电沉积金试验, 单因素条件试验表明: 阴极液金浓度为 10~30 mg/L, 阳极液碘质量分数为 0.4%~0.7%, 阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 为 1:6~1:10, 槽电压为 10~14 V, 电解时间为 2~3 h。

2) 响应面法得出阳极液碘质量分数、阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ 和槽电压三因素与金沉积率的二阶回归方程 $Y=96.81-1.29w-1.59r+2.59U-1.23wr+0.38wU-0.14rU-3.07w^2-2.79r^2-3.19U^2$ 。三因素的主效应关系为: 槽电压 > 阳极液 $n(I_2):n(I^-)$ > 阳极液碘质量分数。

3) 响应面优化结果表明, 最佳工艺条件为阴极液金浓度 10 mg/L, 阳极液碘质量分数 0.58%, 阳极液 $n(I_2):n(I^-)=1:6.5$, 槽电压 12 V, 电解时间 2 h 后, 金沉积率的实际值为 97.83%, 与模型预测值 98.15% 非常相近, 证明响应面优化碘化浸出液电沉积金工艺具有可行性。

4) 最佳工艺条件下, 实际碘化浸出液电沉积金的金沉积率仍可达到 97% 以上, 即该工艺条件适用于实际应用。

REFERENCES

[1] 李绍英, 赵留成, 孙春宝, 袁喜振, 王培龙, 邓祥意, 刘柯. 基于同时平衡原理的 $Au-I^-H_2O$ 系热力学分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1987-1992.
LI Shao-yin, ZHAO Liu-cheng, SUN Chun-bao, YUAN

Xi-zhen, WANG Pei-long, DENG Xiang-yi, LIU Ke. Thermodynamic analysis for $Au-I^-H_2O$ system based on principle of simultaneous equilibrium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1987-1992.
[2] KONYRATBEKOVA S S, BAIKONUROVA A, USSOLTSEVA G A, ERUST C, AKCIL A. Thermodynamic and kinetic of iodine-iodide leaching in gold hydrometallurgy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(11): 3774-3783.
[3] 袁喜振, 李绍英, 孙春宝, 王海霞, 赵留成, 李根壮, 郭林中. 浮选金精矿和难浸含铜金矿的碘化浸金[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(12): 3123-3128.
YUAN Xi-zhen, LI Shao-yin, SUN Chun-bao, WANG Hai-xia, ZHAO Liu-cheng, LI Gen-zhuang, GUO Lin-zhong. Gold extraction from gold concentrate and copper-bearing refractory gold ore by iodine-iodide solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(12): 3123-3128.
[4] WANG H X, SUN C B, LI S Y, FU P F, SONG Y G, LI L, XIE W Q. Study on gold concentrate leaching by iodine-iodide[J]. Int J Min Met Mater, 2013, 20(4): 323-328.
[5] 程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢羽佳. 模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1391-1398.
CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, ZHOU Ding-hui, XING Yi-jia. Copper recovery from artificial bioleaching lixivium of waste printed circuit boards[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1391-1398.
[6] 马万通, 高利坤, 董方, 陈龙. 硫脲浸金及置换法从硫脲溶液中回收金研究现状[J]. 湿法冶金, 2017, 36(4): 257-261.
MA Wan-tong, GAO Li-kun, DONG Fang, CHEN Long. Situations of leaching and replacement of gold in acidic thiourea solution[J]. Hydrometallurgy of China, 2017, 36(4): 257-261.
[7] 谭希发. 活性炭从氰化液中选择性吸金抑铜的研究[J]. 贵金属, 2016, 37(3): 51-55.
TAN Xi-fa. Research on copper-inhibition gold-selective adsorption of activated carbon from cyanide solution[J]. Precious Metals, 2016, 37(3): 51-55.
[8] PENG Z, LI Q G, LI Z Y, ZHANG G Q, CAO Z Y, GUAN W G. Removal of impurities from scandium solutions by ion exchange[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(12): 2953-2961.
[9] CHEN M J, HUANG J X, OLADELE A. Comparative study on copper leaching from waste printed circuit boards by

- typical ionic liquid acids[J]. *Waste Management*, 2015, 41(7): 142–147.
- [10] 孟 齐, 李桂春, 申北臣, 王会平, 康 华. 电沉积法从含金浸出液中回收金研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(4): 917–921.
- MENG Qi, LI Gui-chun, SHEN Bei-chen, WANG Hui-ping, KANG Hua. Research progress on recovery of gold from gold-containing leaching solution by electrodeposition[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(4): 917–921.
- [11] 李桂春, 纪守峰, 王会平. 碘化浸金时从浸出液中提金及碘再生方法研究[J]. *矿冶工程*, 2006, 26(3): 42–47.
- LI Gui-chun, JI Shou-feng, WANG Hui-ping. Study on extraction of gold from leaching solution and method of iodine regeneration during iodized leaching of gold[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2006, 26(3): 42–47.
- [12] 徐 渠, 陈东辉, 陈 亮, 黄满红. 电解法从废弃印刷线路板的碘化浸金液中沉积金[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(6): 1130–1135.
- XU Qu, CHEN Dong-hui, CHEN Liang, HUANG Man-hong. Electrodepositing gold of iodine leaching solution from waste printed circuit board[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(6): 1130–1135.
- [13] SAHIN M, AKCIL A, ERUST C, ALTYNBEK S, GAHAN C S, TUNCUK A. A potential alternative for precious metal recovery from E-waste: Iodine leaching[J]. *Separation Science and Technology*, 2015, 50(16): 1520–15754.
- [14] 李桂春, 孟 齐, 康 华, 徐德永, 王会平. 碘化浸出液电沉积金的实验研究[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2019, 29(5): 552–555.
- LI Gui-chun, MENG Qi, KANG Hua, XU De-yong, WANG Hui-ping. Experimental study on electrodeposition of gold by iodized leaching solution[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2019, 29(5): 552–555.
- [15] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- QIU Yi-bing. *Experimental design and data processing*[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2008.
- [16] JADHAV U, SU C, HONG H. Leaching of metals from large pieces of printed circuit boards using citric acid and hydrogen peroxide[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23: 24384–24392.
- [17] 庞朝霞. 碘化法浸取金的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- PANG Zhao-xia. Study on the leaching of gold by iodization[D]. Shanghai: East China University of Technology, 2012.
- [18] SYED S. Recovery of gold from secondary sources—A review[J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 3: 30–51.
- [19] BEHNAMFARD A, SALARIRAD M M, VEGLIO F. Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation[J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2354–2363.
- [20] 马致远, 杨洪英. 响应曲面法优化铜阳极泥微波浸出硒工艺[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7): 2391–2397.
- MA Zhi-yuan, YANG Hong-ying. Microwave assisted leaching of selenium from copper anode slime optimized by response surface methodology[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(7): 2391–2397.
- [21] AZIZI D, SHAF AEI S Z, NOAPARAST M, ABDOLLAHI H. Modeling and optimization of low-grade Mn bearing ore leaching using response surface methodology and central composite rotatable design[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2295–2305.

Electrodeposition of gold in iodine leaching solution

LI Gui-chun, MENG Qi, KANG Hua, YAN Xiao-hui

(School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: In order to solve the problems of low recovery efficiency and high consumption of electric energy, gold was electrodeposited from the iodine leaching solution by electrodeposition. The effects of catholyte gold concentration, anolyte iodine mass fraction, anolyte $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$, and cell voltage on the gold deposition rate were investigated. Using the response surface method, the iodine mass fraction of the anode liquid, the $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ in anode liquid, and the tank voltage were taken as variable factors, and the gold deposition rate was taken as the response value. The results show that the main effects of iodine mass fraction, anolyte $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$, and cell voltage on the gold deposition rate from greater to littler are cell voltage, anolyte $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$, anodic liquid iodine mass fraction, and a second-order regression equation with a response rate of gold deposition was obtained. The optimized process conditions are as follows catholyte gold concentration of 10 mg/L, anolyte iodine mass fraction of 0.58%, anolyte $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)$ of 1:6.5, cell voltage of 12 V, electrolysis time of 2 h. The three times average gold deposition rate in the verification experiment is 97.83%, which is very close to the model prediction value of 98.15%, which proves that the quadratic polynomial model optimized by the response surface method is feasible. At the same time, the process conditions are suitable for practical application, and the gold deposition rate can still reach more than 75%.

Key words: iodinated leachate; electrodeposition method; gold deposition rate; response surface analysis; process conditions

Foundation item: Project(51674110) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-08-04; **Accepted date:** 2019-12-24

Corresponding author: LI Gui-chun; Tel: +86-13199513977; E-mail: liguichun2002@163.com

(编辑 李艳红)