

# 金在碱性硫脲溶液中溶解的电化学动力学

王云燕, 柴立元

(中南大学冶金科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 研究了金在碱性硫脲溶液中阳极溶解的电化学行为及动力学。结果表明, 硫脲浓度由 0 增加至 0.2 mol/L 时, 开路电势由 -130 mV 移至 -280 mV, 达到稳态的时间由 400 s 延长至 800 s。循环伏安曲线上正向扫描时 700 mV 的电流峰为金的阳极氧化峰, 850 mV 之后阳极电流急速上升为氧气的大量析出, 反扫时 220 mV 处为溶液中金离子的还原峰。溶液中加入硫脲使金的阳极氧化峰电势负移了 30 mV, 峰电流则提高了 15.5 倍。由于硫脲的分解及其产物对金电极表面的钝化, 硫脲浓度由 0.05 mol/L 增加至 0.20 mol/L 时, 阳极峰电势由 655 mV 负移至 480 mV, 峰电流则由 1.985 mA 降至 0.095 28 mA。pH 值升高有利于金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解。温度由 25 °C 升高至 35 °C 时, 峰电流由 0.761 mA 迅速增加至 4.387 mA, 峰电势由 655 mV 负移至 596 mV, 有利于金的溶解; 但温度太高会增加硫脲自身的氧化分解。金的阳极溶解为不可逆电荷转移反应。

**关键词:** 金; 碱性硫脲溶液; 溶解; 电化学行为; 电化学动力学

**中图分类号:** TF801      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2008)03-0529-06

## 1 前言

自从 1941 年首次报道硫脲法提金以来, 由于其无毒、高效、受其他元素干扰小等特点, 成为该领域研究中倍受关注的热点, 世界各国对硫脲提金的理论及工艺开展了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>。研究者们<sup>[4-6]</sup>对酸性硫脲浸金的机理、工艺条件、影响因素、动力学等进行了大量研究工作, 奠定了酸性硫脲浸金的工业应用基础。但酸性硫脲浸金过程中, 硫脲首先被氧化生成二硫甲脒, 然后缓慢反应形成高价硫的化合物如硫磺, 二硫甲脒进一步分解增加了硫脲消耗, 而且分解产物易使金钝化, 降低了硫脲的溶金效率。酸性硫脲在 H<sup>+</sup> 的催化作用下易分解形成尿素和硫化氢, 酸性越高, 硫脲消耗越大。此外, 在酸性溶液中, 金矿中的铜、汞、铅、铋等的溶解及作为氧化剂的 Fe<sup>3+</sup> 与硫脲生成络合物 FeSO<sub>4</sub>[CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> 均造成硫脲过多消耗, 降低硫脲的溶金效率, 增加生产成本; 而且酸性溶液引起设备腐蚀严重、溶金不具有选择性、溶液的再生和净化工序复杂等一系列问题, 都是传统硫脲浸金法不能广泛工业应用的重要原因。

为克服酸性硫脲提金过程存在的缺点, 人们试图采用碱性硫脲溶液提金。然而, 硫脲在碱性溶液中不稳定, 易分解为硫化物和氨基氰, 而且有报道<sup>[7]</sup>硫脲溶金时 pH 值必须小于 1.78, 否则金不能溶解。这使许多人认为碱性硫脲溶液提金只能是一种设想。然而, 我们对碱性硫脲从含金废料中选择性溶金这一具有重大经济意义的“设想”进行了研究, 并从硫脲在碱性介质中的稳定性入

手, 进行了大量探索, 发现某种化学物质(称之为稳定剂)在一定程度上能抑制碱性硫脲的不可逆分解, 实现碱性硫脲溶液从废料中电化学选择性溶金<sup>[8-15]</sup>。

金在碱性硫脲溶液中的电化学行为、电化学动力学、机理等基础研究可为碱性硫脲浸金新技术的成功工业化提供理论支撑。本研究采用电化学测试技术, 如循环伏安法、稳态极化法等, 并结合理论分析, 系统研究金在碱性硫脲溶液中阳极溶解的电化学行为、电化学动力学及各种条件(如硫脲浓度、溶液 pH 值、温度等)对金溶解的影响, 旨在从电化学角度认识碱性硫脲浸金的本质, 为碱性硫脲的高效浸金提供理论依据。

## 2 实验

电化学曲线的测量采用 CHI660A 电化学工作站, 三电极体系, 电解槽为带有砂芯玻璃隔膜的 H 型电解槽, 研究电极为铂丝电极(面积 1 cm<sup>2</sup>), 辅助电极为大面积铂片, 参比电极为 1 mol/L NaOH 的 Hg/HgO 电极(-114 mV vs. SHE), 采用带有 Luggin 毛细管的盐桥消除不同溶液间的液体接界电势及降低溶液的欧姆电阻。研究电极在使用前先用 10 μm 金相砂纸抛光至镜面光亮, 然后用水浸泡, 二次蒸馏水洗涤。所用溶液用分析纯试剂及二次蒸馏水配制。实验时溶液温度由 DL501 型超级恒温器控制, 每次实验前通氮气 15 min 以除去溶液中的溶解氧。电势均相对于标准氢电极(SHE)。

工艺条件为: pH 值 12.5, 温度 25 °C, 稳态极化曲

线测量中以铂电极为工作电极时的扫描速度取 1 mV/s, 以金电极为工作电极时的扫描速度取 10 mV/s, 循环伏安曲线的扫描速度为 50 mV/s.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 金电极在不同浓度碱性硫脲溶液中的开路电势

金在硫脲溶液中的静电势主要体现为硫脲在金表面的“吸附电层”电势, 其吸附过程符合 Freundlich 吸附等温方程<sup>[16-19]</sup>. 金电极在不同浓度碱性硫脲溶液中的开路电势随时间的变化曲线如图 1 所示. 随硫脲浓度的增大, 金电极在碱性硫脲溶液中的起始开路电势和稳定开路电势均负移, 硫脲浓度为 0, 0.1 和 0.2 mol/L 时, 其开路电势分别为 -130, -260 和 -280 mV. 硫脲浓度为 0 时, OH<sup>-</sup> 在金电极表面的吸附较快便达到了平衡, 而当硫脲浓度为 0.1 和 0.2 mol/L 时, 金电极在碱性硫脲溶液中达到稳定开路电势的时间为 800 s. 通常认为电解质在电极表面吸附达到平衡很快<sup>[20]</sup>, 因此, 金电极在碱性硫脲溶液中的开路电势需很长时间才稳定的原因是硫脲的分解引起的.

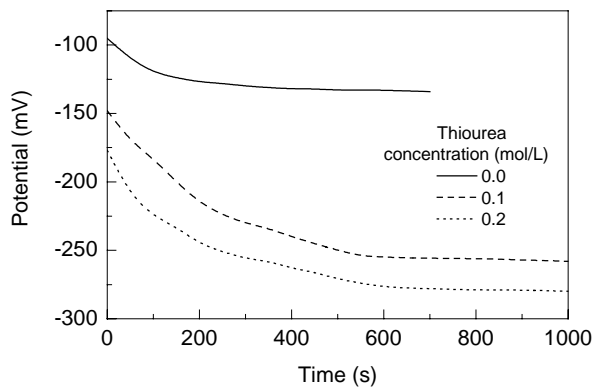


图 1 金电极在不同浓度硫脲溶液中的开路电势与时间的关系  
Fig.1 Open circuit potential-time curves of gold electrode in alkaline thiourea solution with different concentrations

#### 3.2 金在碱性硫脲溶液中氧化还原峰对应反应的确定

##### 3.2.1 碱性介质中金的氧化峰与还原峰

金电极在碱性介质中的循环伏安曲线如图 2 所示. 正向扫描时在 700 mV 处出现氧化峰, 反扫时在 220 mV 处出现还原峰, 根据电解液的组成(NaOH, H<sub>2</sub>O)及电极(Au)判断, 氧化峰和还原峰分别对应金的氧化和溶液中金离子的还原, 与文献[21]中金在 0.1 mol/L KOH 溶液中所获得循环伏安曲线一致.

以铂电极为工作电极的循环伏安曲线表明, 在电势为 850 mV 时开始析出氧气, 900 mV 之后氧气大量析出. 可以确定金电极 700 mV 处的氧化峰为金阳极溶解进入

溶液形成硫脲金配合物, 850 mV 开始出现的电流急速上升为溶液中 OH<sup>-</sup> 被氧化析出氧气的反应.

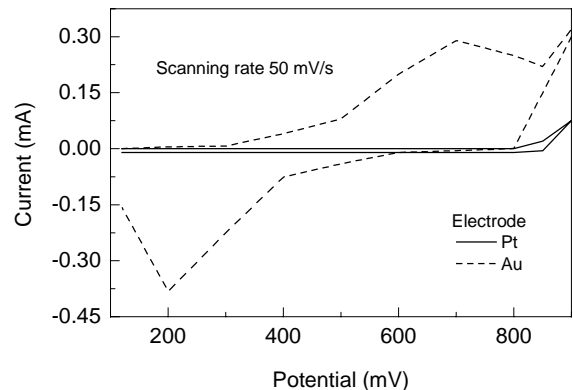


图 2 金及铂电极在碱性介质中的循环伏安曲线  
Fig.2 Cyclic voltammetric curves of Au and Pt electrodes in alkaline medium

##### 3.2.2 碱性硫脲溶液中金的氧化峰电势及氧气析出电势

0.05 mol/L NaOH 溶液及碱性硫脲溶液中金电极的稳态极化曲线如图 3 所示, 对应的氧化峰电流及峰电势如表 1 所示. 溶液中硫脲的加入使金的阳极氧化峰电势负移了 30 mV, 峰电流则比 NaOH 提高 15.5 倍, 表明由于形成了稳定的硫脲金配合离子, 金在碱性硫脲溶液中更易于氧化溶解. 另外, 曲线还表明 2 种溶液中氧气开始析出的电势均为 850 mV.

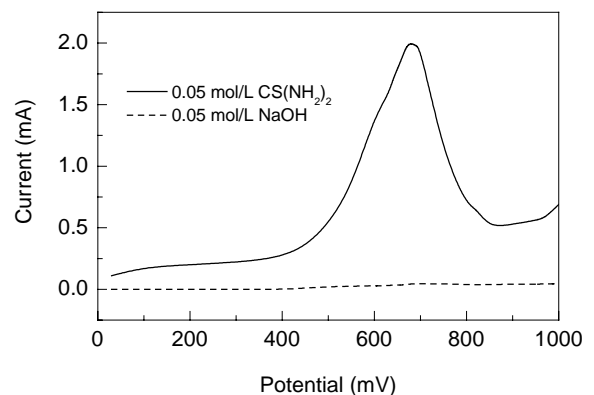


图 3 金电极在 NaOH 及碱性硫脲溶液中的稳态极化曲线  
Fig.3 Stable polarization curves of gold electrode in NaOH solution and alkaline thiourea solution

表 1 金电极在 NaOH 及碱性硫脲溶液中的氧化峰电流及峰电势  
Table 1 Anodic peak current and potential of electrode dissolving in NaOH solution and in alkaline thiourea solution

| Medium                                       | Peak potential (mV) | Peak current (mA) |
|--|---------------------|-------------------|
| 0.05 mol/L NaOH                              | 700                 | 0.121             |
| 0.05 mol/L CS(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> | 670                 | 1.993             |

##### 3.3 金阳极溶解与硫脲浓度的关系

图 4 为金电极在不同浓度硫脲溶液中的稳态极化

曲线, 表 2 为各峰电流与峰电势. 由图及表可以看出, 硫脲浓度越高, 金阳极溶解的峰电流越小, 峰电势也逐渐变小. 硫脲浓度由 0.05 mol/L 增加至 0.20 mol/L 时, 阳极峰电势由 655 mV 负移至 480 mV, 峰电流则由 1.985 mA 降至 0.09528 mA. 理论上讲, 硫脲浓度越高, 金越容易溶解至溶液中形成稳定的配合物, 但由于硫脲的分解及其产物对金电极表面的钝化, 造成金阳极溶解的峰电流随硫脲浓度的升高而降低, 这使金阳极溶解反应历程变得复杂, 故实际浸出金矿或含金废料时需控制合适的硫脲浓度.

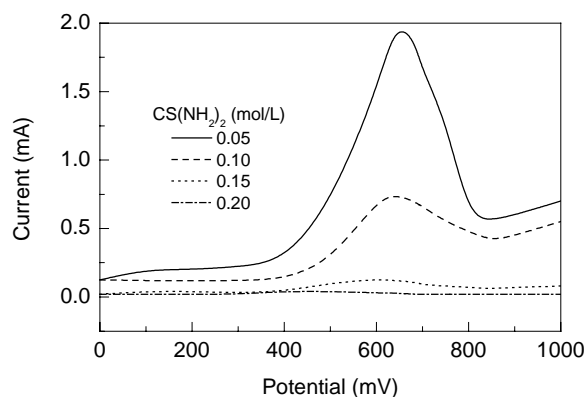


图 4 金电极在不同浓度碱性硫脲溶液中的稳态极化曲线  
Fig.4 Stable polarization curves of gold electrode in alkaline thiourea solution with different  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  concentrations

表 2 金电极在碱性硫脲溶液中溶解的峰电流与峰电势  
Table 2 Peak current and peak potential of Au electrode dissolving in alkaline thiourea solution with different  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  concentrations

| $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ concentration (mol/L) | Peak potential (mV) | Peak current (mA) |
|--|---------------------|-------------------|
| 0.05   | 655                 | 1.985             |
| 0.10   | 655                 | 0.7605            |
| 0.15   | 605                 | 0.1713            |
| 0.20   | 480                 | 0.09528           |

### 3.4 pH 值对金在碱性硫脲溶液中溶解的影响

#### 3.4.1 pH 值对碱性硫脲溶液中金电极开路电势的影响

pH 值对金电极在碱性硫脲溶液中开路电势的影响如图 5 所示. 随溶液 pH 值的升高, 金电极在碱性硫脲溶液中的开路电势下降, pH 值为 8.02, 9.50, 11.0 和 12.5 时对应的开路电势分别为 0, -75, -150 和 -210 mV, 金易于溶解. pH 值为 8.02 时, 静置 1000 s, 金电极在溶液中的开路电势尚未稳定. pH 值为 9.5 和 11 时, 随静置时间延长, 金电极在溶液中的开路电势不断下降, 而 pH 值为 12.5 时, 随静置时间延长, 金电极在溶液中的开路电势呈现先下降后上升趋势, 但变化不明显, 说明 pH 高时硫脲溶液中金阳极溶解为一复杂的过程.

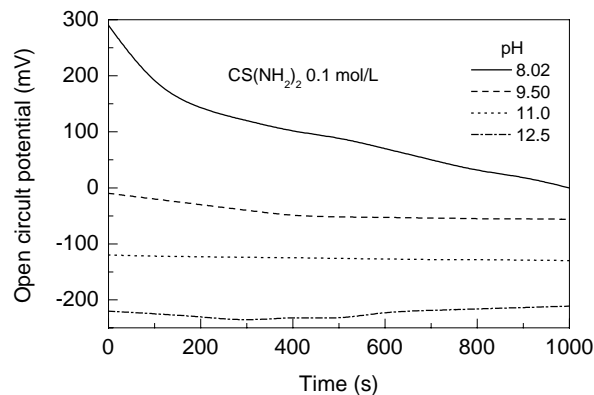


图 5 pH 值对金电极在碱性硫脲溶液中的开路电势的影响  
Fig.5 Effect of pH value on open circuit potentials of gold electrode in alkaline thiourea solutions

#### 3.4.2 pH 值对金电极在碱性硫脲溶液中稳态极化曲线的影响

图 6 为不同 pH 值时金电极在碱性硫脲溶液中的稳态极化曲线. 低 pH 值时, 随扫描电势正移, 阳极电流不断增大, 峰电流不明显; 高 pH 值时, 随扫描电势正移, 在 700 mV 处出现了一个金溶解的阳极电流峰. pH 值为 11.0 和 12.5 时, 峰电流分别为 0.3 和 0.75 mA, 此电流峰的出现是由于高 pH 值时金溶解与硫脲自身的氧化分解产物造成金电极表面钝化两方面作用引起的, 而且随 pH 值升高, 峰电流增大, 说明 pH 值升高有利于金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解.

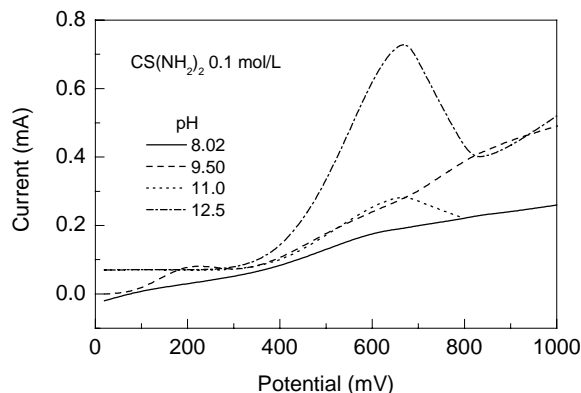


图 6 金电极在不同 pH 值碱性硫脲溶液中的稳态极化曲线  
Fig.6 Stable polarization curves of gold electrode in alkaline thiourea solutions with different pH values

#### 3.4.3 pH 值对金电极在碱性硫脲溶液中循环伏安曲线的影响

不同 pH 值时金电极在碱性硫脲溶液中的循环伏安曲线如图 7 所示. 随溶液 pH 值的升高, 金阳极溶解电流不断增大, 当 pH 为 12.5 时循环伏安曲线上出现了阳极氧化峰, 峰电流为 1.74 mA. 另外, 还可以看出, 金阳极溶解于碱性硫脲溶液后, 在回扫过程中并未发现硫

脲金配合离子的阴极还原峰,这说明硫脲金配离子能稳定地存在于溶液中。

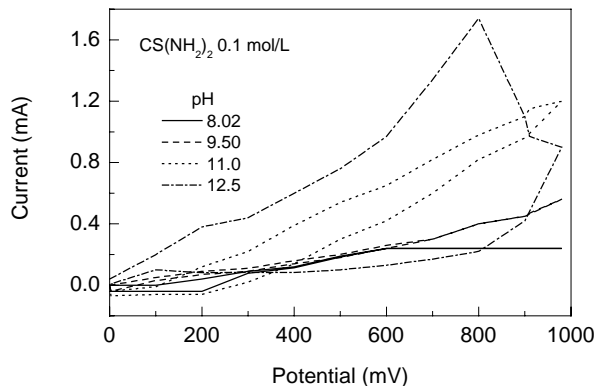


图7 金电极在不同 pH 值碱性硫脲溶液中的循环伏安曲线  
Fig.7 Cyclic voltammograms of gold electrode in alkaline thiourea solution with different pH values

### 3.5 温度对金在碱性硫脲溶液中溶解的影响

不同温度时金在碱性硫脲溶液中溶解的稳态极化曲线如图8所示,峰电流及峰电势见表3。温度为18℃时,随扫描电势正移,阳极电流增大,但一直很小,而且没有出现阳极峰电流。这说明碱性硫脲溶液浸金温度不能太低,否则金的溶解太慢。随溶液温度升高,金阳极溶解峰电流快速增加,温度由25℃升高至35℃时,峰电流由0.761 mA迅速增加至4.387 mA,峰电势由655 mV负移至596 mV,利于金的溶解。但温度太高会增加

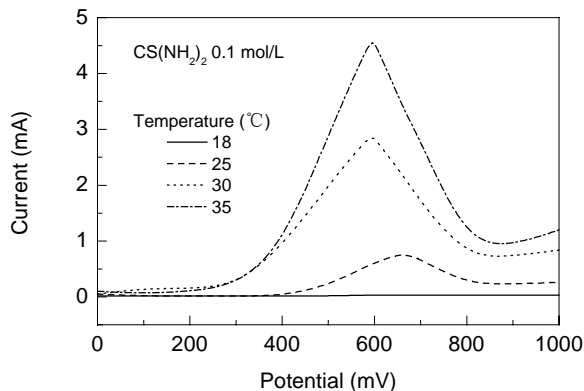


图8 不同温度时金电极在碱性硫脲溶液中的稳态极化曲线  
Fig.8 Stable polarization curves of gold electrode in alkaline thiourea solution at different temperatures

表3 金电极在不同温度碱性硫脲溶液中溶解峰电流与峰电势  
Table 3 Peak current and peak potential of Au electrode dissolving in alkaline thiourea solution at different temperatures

| Temperature (°C) | Peak potential (mV) | Peak current (mA) |
|------------------|---------------------|-------------------|
| 18               | —                   | —                 |
| 25               | 655                 | 0.761             |
| 30               | 592                 | 2.721             |
| 35               | 596                 | 4.387             |

硫脲自身的氧化分解,故实际浸出时取室温即可。

### 3.6 金在碱性硫脲溶液中溶解反应可逆性的确定

不同扫描速度时金电极在碱性硫脲溶液中的循环伏安曲线如图9所示,氧化峰对应的峰电流与峰电势见表4。随扫描速度增加,阳极峰电流增大,峰电势明显正移。

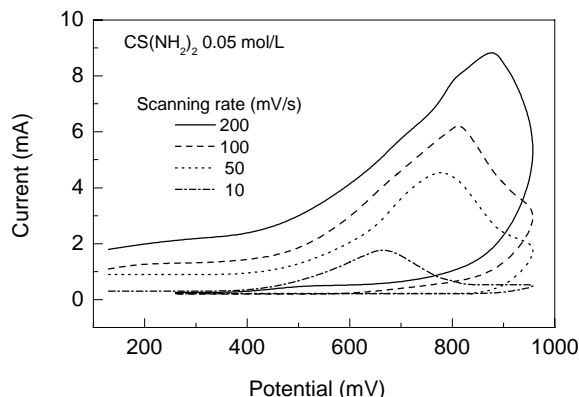


图9 不同扫描速度时金电极在碱性硫脲溶液中的循环伏安曲线

Fig.9 Cyclic voltammograms of gold electrode in alkaline thiourea solution at different scanning rates

表4 不同扫描速度时循环伏安曲线上阳极氧化峰对应的峰电势及峰电流

Table 4 Peak current and peak potential of Au electrode dissolving in alkaline thiourea solution at different scanning rates

| Scanning rate, $v$ (mV/s) | Peak potential, $\phi_p$ (mV) | Peak current, $i_p$ (mA) | $v^{1/2}$ | $\ln(v^{1/2})$ |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------|----------------|
| 10                        | 655                           | 1.985                    | 3.162     | 1.151          |
| 50                        | 780                           | 4.398                    | 7.071     | 1.956          |
| 100                       | 820                           | 6.042                    | 10.000    | 2.303          |
| 200                       | 870                           | 9.203                    | 14.142    | 2.649          |

在图9中的循环伏安曲线上回扫时未出现阴极还原峰,说明在扫描电势范围内未发生硫脲金配合离子的还原沉积,初步判断金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解为不可逆电极反应。此外,若金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解为不可逆电极反应,则电极反应在循环伏安曲线上表现有如下的几个特征<sup>[22,23]</sup>:

(1) 峰电势 $\phi_p$ (V)与扫描速度 $v$ (V/s)的关系为

$$\phi_p = \phi^0 - \frac{RT}{\alpha nF} \left[ 0.783 + \ln \left( \frac{\alpha n F D_0}{RT} \right)^{1/2} - \ln K_s - \ln(v^{1/2}) \right], \quad (1)$$

式中, $\phi^0$ 为标准电极电势(V), $R$ 为气体常数(8.314), $T$ 为温度(K), $\alpha$ 为传递系数, $n$ 为电子数, $F$ 为法拉第常数(C/mol), $D_0$ 为扩散系数[g/(s·cm<sup>2</sup>)], $K_s$ 反应速度常数[mol/(L·s)].即 $\phi_p$ 与 $\ln(v^{1/2})$ 成直线关系。

将表4中的峰电势 $\phi_p$ 与扫描速度 $\ln(v^{1/2})$ 作图,如图10所示,拟合直线为

$$\varphi_p = 0.4932 + 0.143 \ln(v^{1/2}), \quad R = 0.9987. \quad (2)$$

其线性关系表明电极反应不可逆。

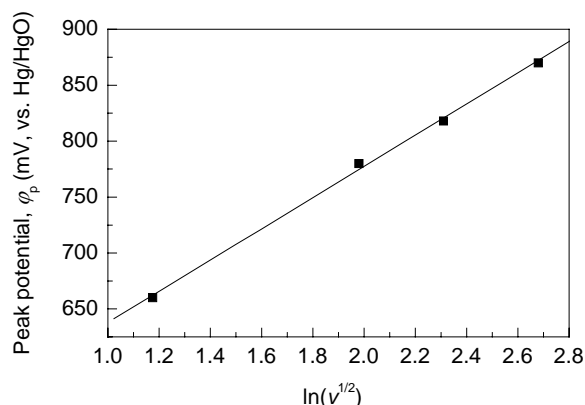


图 10 峰电势与扫描速度的关系

Fig.10 Relationship between peak potential and  $\ln(v^{1/2})$

(2) 电势扫描速度增加 10 倍, 峰电势向阳极方向移动  $30/(\alpha n)$  mV (25 °C). 本研究中扫描速度为 10 和 100 mV/s 时, 对应的峰电势分别为 655 和 820 mV, 差值为 165 mV; 而  $30/(\alpha n) = 170$  mV, 数据吻合, 同样说明电化学反应不可逆。

(3) 峰电流  $i_p$  与  $v^{1/2}$  呈线性, 关系式为

$$i_p = A + 2.99 \times 10^5 n^{3/2} (\alpha D_0)^{1/2} C_0^0 v^{1/2}. \quad (3)$$

式中,  $C_0$  为反应物初始浓度 (mol/L). 为此, 作  $i_p$  与  $v^{1/2}$  的关系图, 如图 11 所示, 拟合直线为

$$i_p = -0.1921 + 0.6515 v^{1/2}, \quad R = 0.9977. \quad (4)$$

其线性关系亦表明电极反应不可逆。

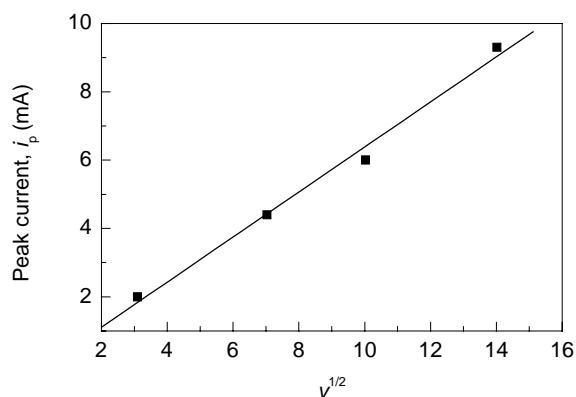


图 11 峰电流与扫描速度的关系

Fig.11 Relationship between peak current and  $v^{1/2}$

以上这些讨论充分说明了金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解为不可逆电荷转移反应, 与金在碱性硫脲溶液中溶解机理研究结论<sup>[24,25]</sup>一致。

## 4 结论

(1) 随硫脲浓度的增大, 金电极在碱性硫脲溶液中的起始和稳定开路电势均负移. 硫脲浓度由 0 增加至 0.1 和 0.2 mol/L 时, 其开路电势分别由 -130 mV 负移至 -260 和 -280 mV, 达到稳态的时间由 400 s 延长至 800 s. 金在碱性介质中的循环伏安曲线上正向扫描时在 700 mV 处出现氧化峰, 850 mV 之后阳极电流急速上升, 氧气大量析出, 反扫时在 220 mV 处出现还原峰. 碱性硫脲溶液中金的阳极氧化峰电势为 670 mV, 峰电流比在碱性氢氧化钠溶液中的提高了 15.5 倍, 表明金在碱性硫脲溶液中更易于氧化溶解, 无回扫峰。

(2) 由于硫脲的分解及其产物对金电极表面的钝化, 硫脲浓度越高, 金阳极溶解的峰电流越小, 峰电势也逐渐变小. 硫脲浓度由 0.05 mol/L 增加至 0.20 mol/L 时, 阳极峰电势由 655 mV 负移至 480 mV, 峰电流则由 1.985 mA 降至 0.09528 mA. 随溶液 pH 值的升高, 金电极在碱性硫脲溶液中的开路电势下降, pH 值为 8.02, 9.50, 11.0 和 12.5 时对应的开路电势分别为 0, -75, -150 和 -210 mV, 金易于溶解. pH 值为 11.0 和 12.5 时, 峰电流分别为 0.3 和 0.75 mA, pH 值升高有利于金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解. 随溶液温度的升高, 金阳极溶解峰电流快速增加, 温度由 25 °C 升高至 35 °C 时, 峰电流由 0.761 mA 迅速增加至 4.387 mA, 峰电势负移, 由 655 mV 负移至 596 mV, 有利于金的溶解. 但温度太高会增加硫脲自身的氧化分解, 实际浸出时取室温即可。

(3) 随扫描速度的增加, 阳极峰电流增大, 峰电势明显正移. 理论分析表明, 金在碱性硫脲溶液中的阳极溶解为不可逆电荷转移反应。

### 参考文献:

- [1] Murthy D S R, Vinod K, Rao K V. Extraction of Gold from an Indian Low-grade Refractory Gold Ore through Physical Beneficiation and Thiourea Leaching [J]. Hydrometallurgy, 2003, 68(1/3): 125-130.
- [2] Gonen N. Leaching of Finely Disseminated Gold Ore with Cyanide and Thiourea Solutions [J]. Hydrometallurgy, 2003, 69(1/3): 169-176.
- [3] Senanayake G. Gold Leaching in Non-cyanide Lixiviant Systems: Critical Issues on Fundamentals and Applications [J]. Miner. Eng., 2004, 17(6): 785-801.
- [4] Bolzan A E, Piatti R C V, Arvia A J. Electrochemical Processes at Gold Thiourea-containing Aqueous Acidic Solution Interfaces [J]. J. Electroanal. Chem., 2003, 552(1): 19-34.
- [5] Orgul S, Altalay U. Reaction Chemistry of Gold Leaching in Thiourea Solution for a Turkish Gold Ore [J]. Hydrometallurgy, 2002, 67(1/3): 71-77.
- [6] Senanayake G. Analysis of Reaction Kinetics, Speciation and Mechanism of Gold Leaching and Thiosulfate Oxidation by Ammoniacal Copper(II) Solutions [J]. Hydrometallurgy, 2004, 75(1/4): 55-75.

- [7] 王周谭. 无氰浸金技术在我国的研究应用现状 [J]. 黄金科学技术, 1995, 3(6): 9–14.
- [8] 柴立元, 闵小波. 亚硫酸钠对碱性硫脲稳定作用的构效关系 [J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(5): 473–476.
- [9] Masazumi O, Ishikawa M, Chai L Y. Anodic Dissolution of Gold in Alkaline Solutions Containing Thiourea, Thiosulfate and Sulfite Ions [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2002, 12(3): 519–563.
- [10] Chai L Y, Wang Y Y. Electrochemical Behaviors of Gold and Its Associated Elements in Various Complexing Agents Solutions [J]. J. Central South Univ. Technol., 2003, 10(4): 287–291.
- [11] Wang Y Y, Chai L Y, Min X B, et al. Optimization of Highly Efficient Stable Reagent of Alkaline Thiourea Solution for Gold Lixiviation [J]. J. Central South Univ. Technol., 2003, 10(4): 292–296.
- [12] 王云燕, 柴立元, 闵小波, 等.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  对碱性硫脲溶液选择性溶金的影响 [J]. 中南工业大学学报, 2003, 34(6): 611–614.
- [13] 郑粟, 王云燕, 柴立元, 等. 高稳定性碱性硫脲体系对不同类型金矿的适应性 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(3): 289–294.
- [14] 郑粟, 王云燕, 柴立元. 基于配位理论的碱性硫脲选择性溶金机理 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(10): 1629–1635.
- [15] Zheng S, Wang Y Y, Chai L Y. Research Status and Prospect of Gold Leaching in Alkaline Thiourea Solution [J]. Miner. Eng., 2006, 19(3): 1301–1306.
- [16] 姜晓霞, 王景韞. 合金相电化学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 67–80.
- [17] Chai L Y, Okido M. Dissolution Theory of Gold in Alkaline Thiourea Solution (I). Anodic Behavior on Gold in Alkaline Thiourea Solution Containing  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1999, 9(1): 145–151.
- [18] Chai L Y, Okido M. Dissolution Theory of Gold in Alkaline Thiourea Solution (II). Electrochemical Study on Au–Fe Mix Anode in Alkaline Thiourea Solution Containing  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1999, 9(2): 393–398.
- [19] Chai L Y, Okido M. Dissolution Theory of Gold in Alkaline Thiourea Solution (III). Thermodynamics on Dissolution of Gold in Alkaline Thiourea Solution Containing  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1999, 9(3): 646–650.
- [20] 查全性. 电极过程动力学导论, 第2版 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 407–415.
- [21] 姜涛. 提金化学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998. 14–50.
- [22] 巴德 A J, 福克纳 L R. 电化学方法原理及应用 [M]. 谷林瑛, 吕鸣祥, 宋诗哲, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 1986. 615.
- [23] 舒余德, 陈白珍. 冶金电化学研究方法 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990. 159–277.
- [24] Chai L Y, Wang Y Y. Electrochemical Kinetics of Gold Dissolving in Alkaline Thiourea Solution [J]. J. Central South Univ. Technol., 2006, 13(5): 477–480.
- [26] Chai L Y, Wang Y Y. Mechanism of Gold Dissolving in Alkaline Solution [J]. J. Central South Univ. Technol., 2007, 14(4): 485–489.

## Electrochemical Kinetics of Gold Dissolution in Alkaline Thiourea Solution

WANG Yun-yan, CHAI Li-yuan

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** Electrochemical behavior and kinetics of gold dissolution in alkaline thiourea solution have been investigated by electrochemical techniques. The results indicate that open circuit potential moves negatively from  $-130$  mV to  $-280$  mV and the time for reaching stable state changes from 400 s to 800 s when the concentration of thiourea increases from 0 to 0.2 mol/L. The anodic current peak at cyclic voltammetric curves represents oxidation of gold, current increasing rapidly after 850 mV results from the evolution of oxygen when scanning positively, while the cathodic reduction peak at 220 mV is the reduction of gold–thiourea complex ion when scanning negatively. The peak potential of anodic oxidation moves negatively for 30 mV with the addition of thiourea, and peak current is raised 15.5 times. Anodic peak potential and current change from 655 mV down to 480 mV and from 1.985 mA down to 0.09528 mA, respectively when the concentration of thiourea increases from 0.05 mol/L to 0.20 mol/L. Anodic dissolution of gold becomes easier when improving pH value of solution. The peak current increases from 0.761 mA to 4.387 mA sharply and peak potential decreases from 655 mV to 596 mV when temperature rises from  $25^\circ\text{C}$  to  $35^\circ\text{C}$ . However, too high temperature will result in the decomposition of thiourea, so room temperature is optimal. Theoretical analysis illustrates that anodic dissolution of gold is an irreversible electron transfer reaction.

**Key words:** gold; alkaline thiourea solution; dissolution; electrochemical behavior; electrochemical kinetics