

中性环境中硫氰酸盐浸取废旧线路板中的金

梁昌金¹, 马传净²

(1. 韩山师范学院 陶瓷学院, 广东 潮州 521041; 2. 青岛科技大学 环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042)

摘 要: 由于贵金属资源稀缺, 从二次资源中回收利用金等贵金属成为趋势。研究了一种在中性环境中提取废旧线路板(WPCBs)中金的新方法。将预处理(去除铜等贱金属)后的废旧线路板粉末加入到 0.8 mol/L 的络合剂硫氰酸铵溶液中, 调 pH 至中性, 通过添加氧化剂 30%双氧水, 在固液比为 1:40, 双氧水用量为 1.5 mL, 温度为 20℃、振荡速度 300 r/min、反应 1 h 条件下, 金浸出率可达 96%。

关键词: 有色金属冶金; 废印刷线路板; 金; 硫氰酸盐; 双氧水

中图分类号: X76, TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2015)04-0056-07

Gold Leaching from Waste Circuit Boards with Thiocyanate in Neutral Environment

LIANG Changjin¹, MA Chuanjing²

(1. School of Ceramic, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, Guangdong, China; 2. College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: Because of the increasing scarce of precious metals, recycling gold and other precious metals from secondary resources has become a trend. A new method to extract gold from waste printed circuit boards (WPCBs) in neutral environment was explored. After pretreatment (removal of copper and other base metals), the waste PCBs powder was mixed with 0.8 mol/L ammonium thiocyanate solution, and then pH of the solution was adjusted to neutral. Ammonium thiocyanate served as a complexing agent. The gold leaching rate reached 96%, when the solid-liquid ratio was 1:40, the dosage of hydrogen peroxide was 1.5 mL, the temperature was 20, the oscillation speed was 300 r/min, and the reaction time was 1 h.

Key words: nonferrous metallurgy; waste PCBs; gold; thiocyanate; hydrogen peroxide

随着全球高品位金矿资源日益减少, 以及对黄金需求的逐渐增大, 从大量增长的电子垃圾中寻求金资源显得尤为火热^[1-9]。目前世界上广泛使用的提金方法是氰化法, 它浸出率高, 工艺成熟, 设备简单, 生产成本低^[10-11]。但是氰化物是剧毒物, 严重污染环境, 危害操作者的安全; 易受铜、铁、铅、砷等杂质的干扰^[12]。因此, 人们一直在寻找能够代替氰化物的提金方法^[13]。

硫氰酸盐作为拟卤素之一, 具有同卤素相似的性质^[14]。在氧化剂存在的条件下, 无论从化学结构、热力学还是电化学方面看, 硫氰酸盐都能够与金形

成稳定的化合物^[11, 14-15]。使用硫氰酸盐从矿石中提金已经得到了广泛的研究^[12, 15-19]。该法浸取速度快、效率高, 浸取剂性质稳定, 毒性也较小^[20-21], 在浸取含金黄铁矿精矿时, 硫氰酸盐法对金的浸出率和氰化法接近, 但比硫代硫酸钠法和硫脲法的浸出率高; 对金的浸取速度, 硫氰酸盐和硫脲法相似, 比氰化法快^[16]。在浸出含铜矿石时, 与氰化法相比受铜含量的影响小^[12], 且硫氰酸盐能够在工业过程中以副产物的形式再生获得, 因此是一种很有前途的方法。随着金矿资源日益减少, 近几年, 硫氰酸盐也被用于其他一些含金资源中金的浸取, 如工业废

收稿日期: 2015-05-07

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM008); 清华大学固体废物处理重点实验室项目(swmes 2011-02)。

第一作者: 梁昌金, 男, 助教, 研究方向: 固体废弃物处理。E-mail: liangchangjin@163.com

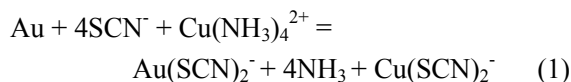
渣^[22]、废弃印刷电路板^[23]等。

每一个浸金系统都要有其适当的氧化剂和络合剂^[24]。硫氰酸盐是一种络合剂，它需要在适当的氧化剂条件下进行金的溶解^[25]，常用的方法有加软锰矿^[16, 21](MnO_2)和 Fe^{3+} ^[11, 17, 26-27]，除此之外也有用溴^[28]、硫脲和硫酸铜^[29]及碱性加压氧化^[19, 30]。但是，使用 MnO_2 和 Fe^{3+} 作为氧化剂，需要在酸性条件下进行。而且强酸环境下，电子垃圾中的 Cu 会与 SCN^- 反应生成 CuSCN 沉淀，影响金的浸出；如果用 MnO_2 作氧化剂， MnO_2 还会与硫氰酸盐发生反应，增加硫氰酸盐的消耗^[18]。在酸性条件和氧压下，对设备的要求比较高，增加浸出成本，所以探寻新的氧化剂成为必然。

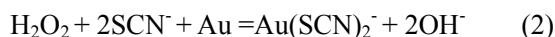
根据文献^[31]推导，只有氧化剂的氧化还原电位在 0.47 V 以上，硫氰酸盐浸金反应才能发生，双氧水的氧化还原电位在 0.87~1.77 V 之间，在中性介质适当条件下满足将 Au 氧化成 $\text{Au}(\text{SCN})_2^-$ 或 $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$ 的条件。虽然在碱性条件下，双氧水会把硫氰酸盐氧化^[32]，但是研究^[33]显示，双氧水对 SCN^- 的氧化不是直接进行的，速率很慢，所以低浓度的双氧水对其影响很小。另外，Guzman 等^[34]和 Yang 等^[35]研究表明，在氰化法浸金中，双氧水是作为氧化剂而不是氧气来源促进浸金的阴极反应的。因此，本文以硫氰酸盐作为络合剂，以双氧水为氧化剂，在中性条件下研究浸出废弃印刷电路板(PCBs)中的金，分别考察了硫氰酸盐的浓度、双氧水的加入量、温度、pH 和时间对浸金率的影响，以得到最佳的提取条件。

1 浸金原理

在不添加双氧水的条件下，用氨水调节 pH 至中性(PCB 粉末是用一定浓度硝酸预处理，所以加入硫氰酸盐后，溶液显酸性)， SCN^- 浓度较大时，根据与金的络合强度： $\text{SCN}^- > \text{NH}_3$ ，金的提取发生如下反应^[36]：



加入双氧水条件下，同样用氨水调至 pH=7 左右，提取金的反应如下：



过程如图 1 所示。

由于在中性介质中，双氧水可能发生分解，所以也可能存在少量的反应(1)和如下反应：

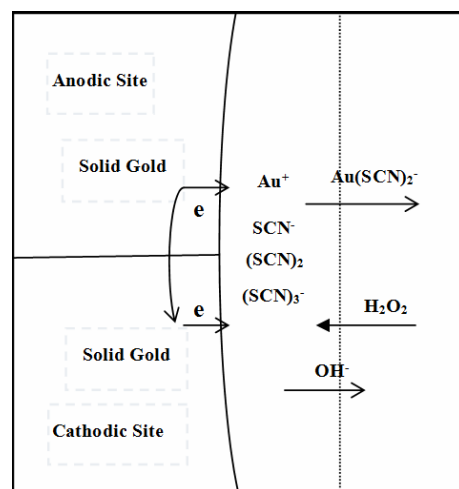
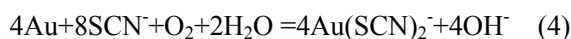
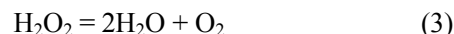


图 1 硫氰酸盐法溶解金的电化学过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electrochemical process for the dissolution of gold in thiocyanate solutions

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

试剂：硫氰酸铵、浓度为 30% 的双氧水、氨水、硫酸、硝酸、盐酸、高氯酸、氢氟酸，以上试剂均为分析纯。

仪器：TAS-986 型原子吸收分光光度计，回旋式水浴恒温振荡器，电热板，密封式制样粉碎机，抽滤机。

2.2 实验方法

2.2.1 预处理

废旧电脑电路板经过拆解、剪切成小块后，用粉碎机粉碎成 75 μm 左右的粉末。称取 5.000 g 原粉末，用 120 mL 稀硝酸（浓硝酸：蒸馏水=1:4）预处理去除有机物及铜、锌等贱金属，过滤，得到的粉末用蒸馏水清洗、过滤多次，烘干备用，粉末呈现弱酸性。取 0.500 g 处理后的粉末，用王水、 HClO_4 、HF 等酸高温消解后，用原子吸收分光光度计测得预处理后的粉末中金的含量为 $\omega_1=0.0545 \text{ mg/g}$ 。

2.2.2 浸出实验

取步骤 2.2.1 中预处理后的粉末 0.500 g，加入 20 mL 一定浓度的 NH_4SCN 溶液，用 1:10 稀释的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 1:30 稀释的 H_2SO_4 调节 pH 至中性，然后将反应器放入水浴恒温振荡器中，并加入一定体积 30% 的 H_2O_2 ，控制振荡速度为 300 r/min，在一

定温度下反应一段时间。待反应完成后,将反应溶液过滤到 50 mL 容量瓶中,利用原子吸收分光光度计测定溶液中金的含量 ω_2 , 并计算浸金率 x :

$$x = \omega_2 / \omega_1 \times 100\% \quad (5)$$

3 结果与讨论

实验选取 NH_4SCN 浓度、 H_2O_2 加入量、反应时间、反应温度和 pH 五个因素进行正交测试,通过正交实验确定各因素对浸金率的影响大小。其中 NH_4SCN 浓度对浸金率影响最大,反应时间影响最小,并且找到各影响因素的最佳搭配: NH_4SCN 浓度为 0.8 mol/L, 双氧水用量为 1.5 mL, pH=5; 反应温度为 20℃, 反应时间为 1 h。最后,通过控制变量法对各单因素进行实验分析。

3.1 NH_4SCN 浓度对金浸出率的影响

反应条件: 预处理后的 PCB 粉末 0.500 g, 20 mL 一定浓度的 NH_4SCN , 1.5 mL 30% 的双氧水, pH=7 左右, 浸取温度 20℃, 时间 60 min, NH_4SCN 的浓度分别为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0、1.2 mol/L, 不同浓度 NH_4SCN 对应浸出率如图 2 所示。

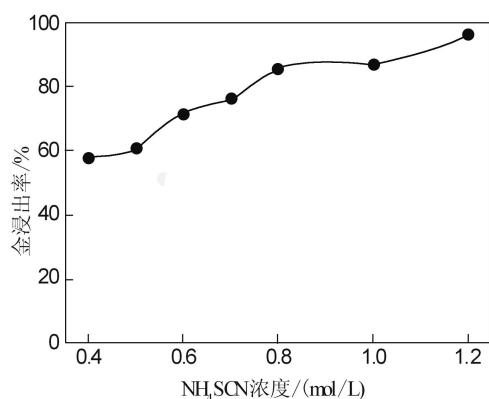


图 2 NH_4SCN 的浓度对金浸出率的影响

Fig.2 Effect of NH_4SCN concentration on the leaching rate of gold

如图 2 所示,随着 NH_4SCN 浓度的增加,金的浸出率逐渐升高。这是因为伴随 SCN^- 浓度的增加,溶液中 SCN^- 的含量也就逐渐增多,因此越来越多的 Au 与 SCN^- 结合成络合物,从而使金的浸出率逐渐升高。从图中还可以看出金的浸出率随 SCN^- 浓度增加还有增加的趋势,只是在 SCN^- 浓度大于 0.8 mol/L 后,金的浸出率提高的比较缓慢,从试剂成本考虑,选取 SCN^- 浓度为 0.8 mol/L 进行下一步实验。

3.2 双氧水的用量对金浸出率的影响

反应条件: 预处理后的 PCB 粉末 0.500 g, 20 mL 浓度为 0.8 mol/L 的 NH_4SCN , 加入一定体积 30% 的双氧水, pH=7 左右, 提取温度 20℃, 时间 60 min, 其中双氧水加入量分别为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mL, 对应浸出率如图 3 所示。

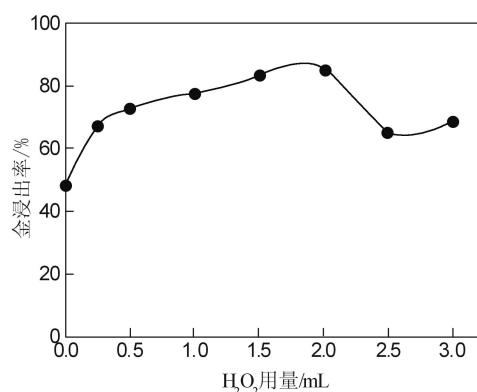


图 3 双氧水的用量对金浸出率的影响

Fig.3 Effect of hydrogen peroxide dosage on gold leaching rate

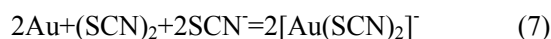
由图 3 可以看出,随着双氧水用量的增加,金的浸出率也相应的提高,这是因为双氧水是浸金过程中的氧化剂,浓度越高反应(2)进行的越完全。但是当双氧水的用量达到 2.0 mL 时,金的浸出率达到最高为 89.35%,随后双氧水的用量再增加,浸金率却呈现下降趋势,这是因为高浓度的双氧水氧化消耗掉部分 SCN^- 。

另外,当不加入双氧水时,金仍有将近 50% 的浸出率。主要是由于粉末中的 Cu 与调节溶液 pH 时使用的氨形成铜氨络合离子 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, 发生了式(1)的反应。

3.3 pH 值对金浸出率的影响

反应条件: 预处理后的 PCB 粉末 0.500 g, 20 mL 浓度为 0.8 mol/L 的 SCN^- , 1.5 mL 30% 双氧水, 提取温度 20℃, 时间 60 min, 改变 pH 值分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9, 对应金浸出率变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出, pH<2 时, 金的浸出率比较高, 这是因为溶液中氢离子可提高 H_2O_2 的氧化能力, 促使下列反应的进行:



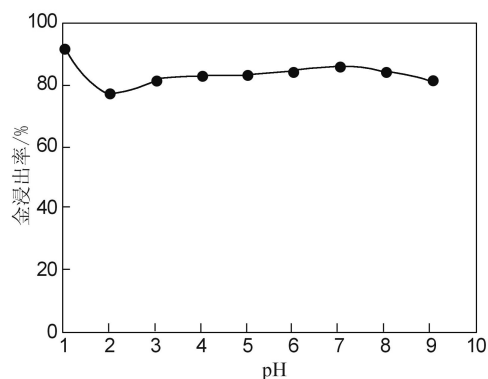
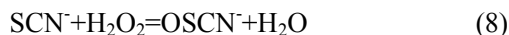


图4 pH 值对金浸出率的影响

Fig.4 Effect of pH on the leaching rate of gold

而 pH 在 2~9 的范围内, 金的浸出率变化不大。pH>8 会使得 SCN^- 与过量的 H_2O_2 发生式(8)反应^[37], 消耗 SCN^- , 降低金的浸出:



随后, 生成的 OSCN^- 将与 H_2O_2 发生反应, 生成最终氧化产物 SO_4^{2-} 。

从图 4 还可以看出, pH>2 后, 金的浸出率相差不大, 考虑到酸性的增加会加大对设备的要求, 增加投入成本, 所以选择 pH=7 进行实验, 以便实现工业化应用。

3.4 温度对金浸出率的影响

反应条件: 预处理后的 PCB 粉末 0.500 g, 20 mL 浓度为 0.8 mol/L 的 SCN^- , 1.5 mL 30% 双氧水, pH≈7, 时间 60 min, 浸取温度分别设定为 20、25、30、40、50℃, 其对金浸出率的影响如图 5 所示。

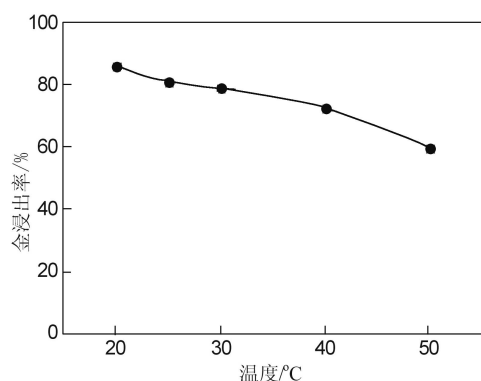


图5 温度对金浸出率的影响

Fig.5 Effect of temperature on the leaching rate of gold

从图 5 可以看出, 随着温度的升高, 金的浸出率呈递减的趋势。这主要是由于双氧水易分解, 随着温度的升高, 双氧水分解程度增加, 损失越来越大, 导致反应形成的可溶性配离子 $(\text{SCN})_2$ 减少, 从而不能参与溶解线路板中更多的金。

3.5 时间对金浸出率的影响

反应条件: 预处理后的 PCB 粉末 0.500 g, 20 mL 浓度为 0.8 mol/L 的 SCN^- , 1.5 mL 30% 双氧水, pH=7 左右, 提取温度 20℃, 改变反应时间 15、30、60、90、120 min, 其对金浸出率的影响如图 6 所示。

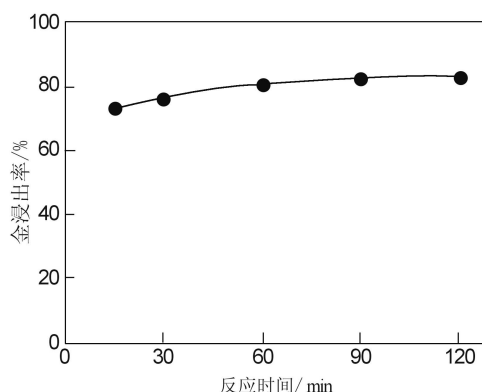


图6 反应时间对金浸出率的影响

Fig.6 Effect of reaction time on gold leaching rate

从正交试验看, 反应时间对结果的影响最小, 而且从图 6 可以看出, 当反应时间在 60 min 时, 金的最大浸出率达到 83.77%, 而 90 min 时金的最大浸出率为 83.88%。以后随着时间的增加, 金的浸出率变化不大, 考虑到时间和成本问题, 反应时间宜控制在 60 min。

3.6 优化条件实验

在上述研究的基础上, 确定优化实验条件为: 固液比 1:40, 双氧水用量 1.5 mL, 温度为 20℃、振荡速度 300 r/min、反应时间 1 h, 正交实验结果表明金的浸出率达到 96%, 详细结果如表 1 所示。

表1 金的浸出率正交实验结果及直观分析

Tab.1 Orthogonal experiment result and intuitive analysis of gold leaching efficiency

No.	硫氰酸铵/ (mol/L)	双氧水/ mL	反应 温度/℃	溶液 pH	反应 时间/h	金浸出 率/%
1	0.4	0.25	20	1	15	35.25
2	0.4	0.5	25	3	30	44.63
3	0.4	1	30	5	60	54.00
4	0.4	1.5	40	7	90	63.38
5	0.4	2	50	9	120	52.44
6	0.6	0.25	25	5	90	66.50
7	0.6	0.5	30	7	120	71.19
8	0.6	1	40	9	15	83.69
9	0.6	1.5	50	1	30	75.88
10	0.6	2	20	3	60	54.00
11	0.8	0.25	30	9	30	74.31
12	0.8	0.5	40	1	60	82.13
13	0.8	1	50	3	90	80.56
14	0.8	1.5	20	5	120	96.19
15	0.8	2	25	7	15	79.00
16	1.0	0.25	40	3	120	50.88
17	1.0	0.5	50	5	15	82.13
18	1.0	1	20	7	30	79.00
19	1.0	1.5	25	9	60	83.69
20	1.0	2	30	1	90	89.94
21	1.2	0.25	50	7	60	83.69
22	1.2	0.5	20	9	90	82.13
23	1.2	1	25	1	120	91.50
24	1.2	1.5	30	3	15	77.44
25	1.2	2	40	5	30	85.25
K_1	249.69	310.63	346.57	374.69	357.50	
K_2	351.25	362.19	365.31	307.50	359.06	
K_3	412.19	388.75	366.88	384.07	357.50	
K_4	385.63	396.57	365.31	376.25	382.50	
K_5	420.00	360.63	374.69	376.25	362.19	
$\bar{K}_1$	49.94	62.13	69.31	74.94	71.50	
$\bar{K}_2$	70.25	72.44	73.06	61.50	71.81	
$\bar{K}_3$	82.44	77.75	73.38	76.81	71.50	
$\bar{K}_4$	77.13	79.31	73.06	75.25	76.50	
$\bar{K}_5$	84.00	72.13	74.94	75.25	72.44	
极差R	34.06	17.19	5.62	15.31	5.00	

4 结论

废旧电脑线路板粉末经预处理后的含金量为

0.0545 mg/g，并没有之前报道^[9]过的那么多，但是其中的金资源也是相当可观的。本研究主要得到以下结论：

(1) 中性条件下，使用硫氰酸盐作为络合剂，使用双氧水作为氧化剂，浸出废旧电脑线路板中的金是可行的。通过正交试验得出 NH_4SCN 浓度对浸金率影响最大，反应时间影响最小，并且获得各影响因素的最佳搭配： NH_4SCN 浓度为 0.8 mol/L，双氧水用量为 1.5 mL，pH=5；反应温度为 20℃，反应时间为 1 h。

(2) 通过单因素试验获得了各影响因素的最佳值，并且在最佳浸取条件下，金的最大浸出率可达到 96%。可以看出，在中性环境中使用硫氰酸盐浸取废旧线路板中的金具有广阔的前景。

参考文献：

[1] 梁晓辉, 李光明, 贺文智, 等. 中国电子产品废弃量预测[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 82-91.
Liang Xiaohui, Li Guangming, He Wenzhi, et al. The obsolete quantity forecast of electronic products in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(7): 82-91.

[2] 阮培华. 电子信息产品步入强制环保时代[J]. 高科技与产业化, 2007, 5: 66-69.
Ruan Peihua. Electronic information products step into the compulsory environmental era[J]. High-Technology & Industrialization, 2007, 5: 66-69.

[3] 王恺. 电子垃圾对环境与健康的影响探究[J]. 预防医学论坛, 2012, 18(9): 682-685.
Wang Kai. Research on the influence of electronic waste to environment and health[J]. Preventive Medicine Tribune, 2012, 18(9): 682-685.

[4] Widmer R, Oswald-Krapf H, Sinha-Khetriwal D, et al. Global perspectives on e-waste[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2005, 25(5): 436-458.

[5] 傅建捷, 王亚韡, 周麟佳, 等. 我国典型电子垃圾拆解地持久性有毒化学污染物污染现状[J]. 化学进展, 2011, 23(8): 1755-1768.
Fu Jianjie, Wang Yawei, Zhou Linjia, et al. Pollution status and perspectives of persistent toxic substances in E-waste dismantling area in China[J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(8): 1755-1768.

[6] Singh A, Sharma R K, Agarwal M, et al. Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India[J]. Trop

- Ecol, 2010, 51(s2): 375-387.
- [7] 路阳, 王言. 浅析我国电子垃圾的现状与治理对策[J]. 环境卫生工程, 2012, 20(4): 34-36.
- Lu Yang, Wang Yan. Status and management countermeasures of E-waste in China[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2012, 20(4): 34-36.
- [8] Davis C, Heart S. Electronic waste: the local government perspective in Queensland, Australia[J]. Resources Conservation and Recycling, 2008, 52(8/9): 1031-1039.
- [9] 钱伯章. 国内外电子垃圾回收处理利用进展概述[J]. 中国环保产业, 2010(8): 18-23.
- Qin Bozhang. Progress summarization on recycling, treatment & utilization for electronic garbage at home and abroad China[J]. Environmental Protection Industry, 2010(8): 18-23.
- [10] Veit H M, De Pereira C C, Bernardes A M. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards[J]. JOM, 2002, 54(6): 45-47.
- [11] Li J, Safarzadeh M S, Moats M S, et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part I: Chemical and thermodynamic considerations[J]. Hydrometallurgy, 2012(113/114): 1-9.
- [12] 刘秉涛. 硫氰酸盐法从高铜硫化金矿中浸取金银的研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1994(4): 53-57.
- Liu Bingtao. Study on the extraction of gold from copper-rich sulfide ore by thiocyanate process[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1994(4): 53-57.
- [13] 涂博, 张亚辉, 尤大海, 等. 难处理金矿非氰提金方法研究现状[J]. 贵金属, 2013, 34(4): 73-81.
- Tu Bo, Zhang Yahui, You Dahai, et al. Research status of non-cyanide leaching technologies for refractory gold ores[J]. Precious Metals, 2013, 34(4): 73-81.
- [14] 巴博沙 O. 李桃, 译. 硫氰酸盐体系浸出金银的热化学[J]. 国外金属矿选矿, 1997(11): 38-49.
- [15] 刘秉涛, 庞锡涛. 硫氰酸盐法浸取金银的热力学分析[J]. 黄金, 1995, 16(3): 40-42.
- Liu Bingtao, Pang Xitao. Thermodynamical analysis of gold (silver) leaching by thiocyanate[J]. Gold, 1995, 16(3): 40-42.
- [16] 庞锡涛, 张淑媛, 徐琰. 硫氰酸盐法浸取金银的研究[J]. 黄金, 1992, 13(9): 33-37.
- Pang Xitao, Zhang Shuyuan, Xu Yan. Study of leaching gold and silver by thiocyanate process[J]. Gold, 1992, 13(9): 33-37.
- [17] 陈建勋, 庞锡涛. 硫氰酸盐法从含铜黄铁矿焙砂中浸金研究[J]. 黄金, 1997, 18(3): 33-38.
- Chen Jianxun, Pang Xitao. Study on leaching gold from the slag of Cu-bearing pyrite by thiocyanate[J]. Gold, 1997, 18(3): 33-38.
- [18] 庞锡涛, 薛山. 硫氰酸盐提金影响硫氰酸盐稳定性的因素[J]. 黄金, 1995, 16(8): 22-25.
- Pang Xitao, Xue Shan. Factors influencing the stability of thiocyanate in the course of gold extraction by thiocyanate process[J]. Gold, 1995, 16(8): 22-25.
- [19] 郭欢, 杨声海, 陈永明, 等. 硫氰酸盐体系从难处理硫化金精矿中氧压浸金[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2011(10): 23-26.
- Guo Huan, Yang Shenghai, Chen Yongming, et al. Oxidative pressure leaching of gold from refractory gold sulfide concentrates with alkaline thiocyanate solution[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2011(10): 23-26.
- [20] Arvin C F. The fatal toxic manifestations of the thiocyanates[J]. Journal of the American Medical Association, 1939, 112(12): 1125-1127.
- [21] Mudder T I, Botz M M. Cyanide and society: a critical review[J]. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, 2004, 4(1): 62-74.
- [22] 冀少华, 安莲英, 唐明林. 硫氰酸盐法从工业废渣中浸取金银的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2009(1): 43-44.
- Ji Shaohua, An Lianying, Tang Minglin. Experimental research on leaching of gold and silver from industrial residues by thiocyanate process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009(1): 43-44.
- [23] 张潇尹, 陈亮, 陈东辉. 硫氰酸盐法浸出废印刷线路板中的金[J]. 贵金属, 2008, 29(1): 11-14.
- Zhang Xiaoyin, Chen Liang, Chen Donghui. Study of gold leaching from PCB by thiocyanate process[J]. Precious Metals, 2008, 29(1): 11-14.
- [24] Sparrow G J, Woodcock J T. Cyanide and other lixiviant leaching systems for gold with some practical applications[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1995, 14(3/4): 193-247.
- [25] White H A. The solubility of gold in thiosulphates and thiocyanates[J]. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 1905, 6(10): 109-111.
- [26] 王治科, 张含, 叶存玲. 硫氰酸盐-铁(III)体系从废电路板中选择性浸出金银[J]. 有色金属: 冶炼部分,

- 2013(11): 32-35.
- Wang Zhike, Zhang Han, Ye Cunling. Selective leaching of gold and silver from waste printed circuit boards in thiocyanate-ferrous system[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2013(11): 32-35.
- [27] Kholmogorov A G, Kononova O N, Pashkov G L, et al. Thiocyanate solutions in gold technology[J]. Hydrometallurgy, 2002, 64(1): 43-48.
- [28] 王清江, 宗魏. 溴-硫氰酸盐体系浸取硫化矿中的金[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1996(3): 72-76.
- Wang Qingjiang, Zong Wei. Leaching gold from sulfide ore by system of bromine and thiocyanate[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1996(3): 72-76.
- [29] Yang X Y, Moats M S, Miller J D. Gold dissolution in acidic thiourea and thiocyanate solutions[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(11): 3643-3649.
- [30] 胡燕清, 杨声海, 陈永明. 某毒砂金矿硫氰酸盐氨性体系加压氧化提金探索试验[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(9): 34-37.
- Hu Yanqing, Yang Shenghai, Chen Yongming. Exploration test on gold extraction from arsenopyrite gold concentrate with oxidation pressure leaching process in ammonium thiocyanate-ammonia system[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2012(9): 34-37.
- [31] 王治科, 陈东辉, 陈亮. 硫氰酸盐浸金体系选择氧化剂的热力学判据[J]. 有色金属, 2006, 58(4): 26-28.
- Wang Zhike, Chen Donghui, Chen Liang. Thermodynamic criterion for oxidant selection in thiocyanate gold leaching[J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(4): 26-28.
- [32] 胡影. 弱碱性环境中双氧水氧化硫氰酸盐反应动力学[J]. 广州化工, 2014, 42(9): 60-62.
- Hu Ying. Oxidation kinetic of thiocyanate by hydrogen peroxide under weak alkaline solution[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(9): 60-62.
- [33] Wilson I R, Harris G M. The oxidation of thiocyanate ion by hydrogen peroxide I: The pH-independent reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 1960, 82(17): 4515-4517.
- [34] Guzman L, Segarra M, Chimenos J M, et al. Gold cyanidation using hydrogen peroxide[J]. Hydrometallurgy, 1999, 52(1): 21-35.
- [35] Yang Y B, Li Q, Jiang T, et al. Co-intensification of gold leaching with heavy metals and hydrogen peroxide[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(5): 903-909.
- [36] Vukcevic S. The mechanism of gold extraction and copper precipitation from low grade ores in cyanide ammonia systems[J]. Minerals Engineering, 1997, 10(3): 309-326.
- [37] 尹翠. 硫氰酸盐氧化反应的动力学分析[J]. 化工中间体, 2012(6): 55-60.
- Yin Cui. Kinetic of the oxidation of thiocyanate using capillary electrophoresis[J]. Chemical Intermediate, 2012(6): 55-60.

【上接第 55 页】

- [12] 李云, 王云, 孙建伟, 等. 降低含砷金精矿两段焙烧提金过程中氰化物用量的途径[J]. 矿冶, 2010, 19(4): 45-48.
- Li Yun, Wang Yun, Sun Jianwei, et al. Method for decreasing cyanide consumption of calcine by using two-stages roasting arsenic-bearing gold concentrate process[J]. Mining and Metallurgy, 2010, 19(4): 45-48.
- [13] 王宝胜. 氰化作业中降低氰化钠消耗的实践[J]. 黄金科学技术, 2007, 15(6): 43-46.
- Wang Baosheng. Practice of excellent changing a cyaniding work's condition to lower cyaniding sodium to consume[J]. Gold Science and Technology, 2007, 15(6): 43-46.
- [14] 李希科. 降低氰化钠单耗提高企业经济效益[J]. 矿产保护与利用, 1999(4): 37-39.
- Li Xike. Reducing consumption of sodium cyanide to improve economic benefits[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 1999(4): 37-39.
- [15] 陶云杰. 降低氰化钠消耗的途径[J]. 黄金, 1990, 11(11): 31-37.
- Tao Yunjie. Approaches to reduce the consumption of sodium cyanide[J]. Gold, 1990, 11(11): 31-37.