

综合评述

铜氨/胺体系下硫代硫酸盐浸金的电化学研究进展*

蔡鑫^{1,2}, 崔毅琦^{1,2}, 何建^{1,2}, 贺俊傲^{1,2}, 童雄^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 云南省金属矿尾矿资源二次利用工程研究中心, 云南 昆明 650093)

摘要:硫代硫酸盐法浸金是一种具有应用前景的无氰浸出方法, 与传统氰化法相比, 具有浸出用时短、浸出速率快、低毒环保等优点。基于硫代硫酸盐浸金体系的复杂性, 从电化学角度论述了铜氨/胺体系下硫代硫酸盐浸金的电化学行为及浸金过程中硫代硫酸盐、铜/铜氨络合离子、氨/胺之间的作用方式。

关键词:硫代硫酸盐; 浸出; 电化学; 金

中图分类号: TD953⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2019)05-0156-04

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.045

Research Progress in Electrochemistry of Thiosulfate Gold Leaching in Copper Ammonia/Amine Systems

CAI Xin^{1,2}, CUI Yiqi^{1,2}, HE Jian^{1,2}, HE Junao^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources, Kunming 650093, China)

Abstract: Thiosulphate gold leaching is a kind of cyanide-free leaching method with application prospect. Compared with the traditional cyanide method, it has the advantages of short leaching time, fast leaching rate, low toxicity and environmental protection. Based on the complexity of thiosulfate gold leaching system, the electrochemical behavior of thiosulfate gold leaching in copper ammonia/amine system and the interaction mode between thiosulfate, copper/copper ammonia complex ion and ammonia/amine in the gold leaching process were discussed.

Key words: thiosulfate; leaching; electrochemistry; gold

前言

一直以来氰化法在浸金工艺中占据着主导地位, 但是氰化物为剧毒性化合物, 对环境不友好, 危害人体健康。硫代硫酸盐能与金生成稳定络合物, 是一种环保、低毒的浸出剂, 具有浸出速率快、浸出用时短、且不受含铜、硫、碳等矿物影响的优势, 是最有可能代替氰化物的非氰浸出药剂^[1-3]。近几十年

来, 很多研究团队致力于硫代硫酸盐浸金的研究。研究表明在铜氨体系中可达到理想的浸金效果, 但同时考虑到氨水的环境问题, 近年来许多学者研究利用乙二胺代替氨水, 也可取得不错的效果。与氰化法相比, 硫代硫酸盐浸金过程更为复杂, 不仅存在金的溶解, 还会发生硫代硫酸盐与铜、铜氨络合离子的氧化还原副反应。电化学研究是探索体系中组分间相互作用的重要手段, 本文以此为切入点, 对铜氨/

* 收稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51664028, 51104077)

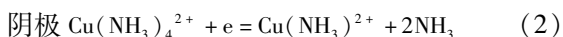
作者简介: 蔡鑫, 硕士研究生, 主要从事稀贵金属选冶研究。

通信作者: 崔毅琦, 女, 博士, 副教授, 主要从事稀贵金属选冶研究。

胺体系下硫代硫酸盐浸金的电化学行为进行了综述分析。

1 金的浸出电化行为

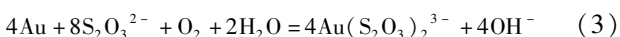
氨性硫代硫酸盐体系中金的浸出属于电化学腐蚀行为^[4], 电化学研究和热力学计算表明: 其本质是金的氧化和铜的还原^[5]。该过程表现为: 金在阳极表面失去电子, Au 被氧化成 Au^+ ; 铜离子在阴极表面获得电子, $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 被还原成 $\text{Cu}(\text{NH}_3)^{2+}$, 电极反应如下:



在浸金体系中, 硫代硫酸根离子主要是作为金的络合配位体, 使金形成 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 。Zhang. S 等^[6]认为铜氨体系下硫代硫酸盐浸金还伴随着其他复杂的副反应过程。例如, 在溶液中含氧并且 $\text{pH} > 10$ 的条件下, 浸出液中的 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 使硫代硫酸盐氧化成连四硫酸盐, 延长反应时间, 连四硫酸盐又会发生歧化反应生成 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和连三硫酸盐。可见硫代硫酸盐、氨、铜离子、 $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ 的络合基团及硫代硫酸盐的氧化产物间组成了一个及其复杂的浸金体系。

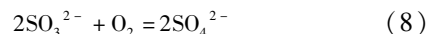
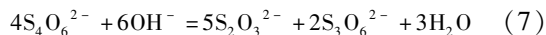
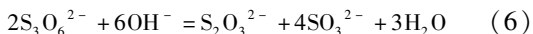
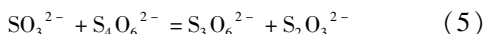
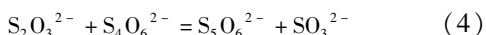
2 硫代硫酸盐的电化学行为

硫代硫酸盐浸出金的化学反应为:



单纯硫代硫酸盐作用下, Zelinsky. A. G^[7] 研究发现在电位为 0.1 ~ 0.5 V 时, 金以很低的浸出速率恒定溶解, 但在金电极上无钝化层形成; 当电位超过 0.8 V, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 被氧化, 金的表面完全钝化。Jeffrey. M. I^[8] 研究表明电位较低时, 每三个金原子表面覆盖一个硫原子; 电位较高时, 每一个金原子表面覆盖一个硫原子。电位越高, 金的表面上聚集的硫原子越多。

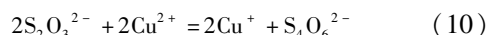
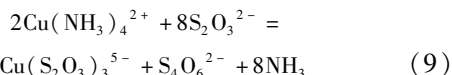
Wood. R^[9] 通过研究发现, 硫代硫酸盐在金的表面氧化形成连多硫酸盐或者是多硫聚物, 伴随着氧气的吸附最终产物氧化成 SO_4^{2-} ; 刘克俊等^[10] 认为这一过程是复杂和缓慢的, 可能经过多个副反应过程^[11]:



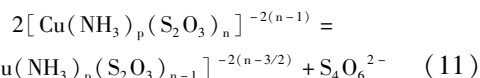
聂彦合^[12] 通过研究连多硫酸盐存在下金电极表面线性伏安曲线认为, 在不同的电位条件下连多硫酸盐会导致金阳极表面的电流密度减小, 金的溶出量明显降低。

硫代硫酸盐是一种亚稳态化合物, 自身易氧化分解, 同时也会受到溶液中 $\text{Cu}(\text{II})$ 的影响, 使浸金液的组分变得复杂, 浸金变得困难。

项朋志等^[13] 使用方波伏安法 (SWV) 和 Tafel 曲线研究表明, 随着硫代硫酸盐浓度的增大, 体系中 $\text{Cu}(\text{II})$ 的还原峰电流先增大后减小, 可见 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 参与了 $\text{Cu}(\text{II})$ 的络合, 多余的硫代硫酸盐还直接和 $\text{Cu}(\text{II})$ 离子发生氧化还原反应生成连多硫酸盐。该过程硫代硫酸盐反应如下:



而 Gamini Senanayake^[14] 认为铜离子将 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 氧化成 $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 是通过如下反应:

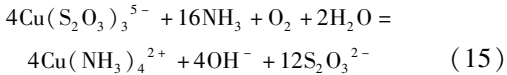
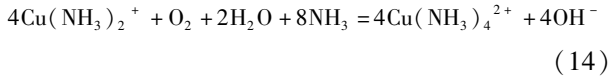
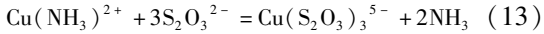


氨性硫代硫酸盐体系中, 硫氧离子自身的氧化还原反应、硫代硫酸根离子和铜离子发生的氧化还原反应都使得硫代硫酸盐的消耗量变大, 影响金的浸出。宇富庭等^[15] 认为可通过改善铜氨体系稳定硫代硫酸盐, 其方法为: (1) 改善热力学平衡, 主要通过改变溶液条件 (如加入 SO_4^{2-} 、 SO_3^{2-} 等) 来改变硫代硫酸根的氧化反应平衡体系及控制电位平衡; (2) 从动力学角度, 包括控制溶液中酸碱度、铜离子浓度。

3 铜/铜氨络合离子的电化行为

氨性硫代硫酸盐浸出需控制浸出液在碱性 ($\text{pH} > 9$) 条件下, 铜离子若不与络离子形成络合物便会水解沉淀 (铜离子开始水解的 pH 为 4.67, 当 pH 为 6.67 时基本上沉淀完全)。铜离子与游离的氨分子、硫代硫酸根离子都能形成配合物, 氨性硫代硫酸盐浸金体系中, 铜离子主要以 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}/\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 形式存在。P. L. Breuer 等^[16] 研究发现铜离子浸出过程中经历了如下过程: 铜氨产物 Cu

$(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 从阴极获得电子,还原成 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+$; 当 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 存在时, $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+$ 转变为 $\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 。在氧气存在的情况下^[17], 还原产物 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+/\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 被氧化再生成 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$, 该过程表现为:



氨性硫代硫酸盐浸金体系中,真正起氧化催化作用的是铜氨络离子 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ ^[18]。龚亚军^[19]和魏宝明^[20]发现铜氨络离子 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 较氧气具有更好的氧化效果,大量试验证明,溶液中的铜氨络离子使金的溶解速度增快 18 ~ 20 倍。原因在于:(1) 氧在水中的溶解度很低,一般情况下为 10^{-4} mol/L,而 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 在体系中的浓度可比 O_2 高上百倍;(2) $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 除了可以像 O_2 那样通过扩散和对流至阴极表面,还能借助电迁移的方式传递到阴极表面,即使是 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 的浓度低至 10^{-3} mol/L 时其扩散通量仍为 O_2 的 7 倍;(3) 与 O_2/OH^- 相比较, $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}/\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+$ 电对具有更好的氧化还原可逆性。

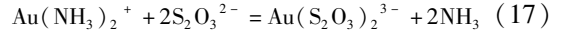
Zhang. S 等^[21]通过电化学和浸出试验验证了铜离子催化铜氨体系下硫代硫酸盐溶液中金的溶解。电化学研究表明,随着 $\text{Cu}(\text{II})$ 浓度的增加,对金的阳极溶解有积极地正向作用,当电位超过 0.3 V 的作用条件下,金的溶解速率显著提高,但是电位在 0.28 V 以下金的溶解缓慢,这可能在较低的电位下金的表面发生部分钝化。综上表明 $\text{Cu}(\text{II})$ 的作用行为复杂,这些研究被应用于实际生产,最终直观的影响表现在铜离子浓度的变化,张卿^[22]对某含砷难处理金矿进行了硫代硫酸盐浸出试验研究,发现铜离子浓度对硫代硫酸盐浸金有明显的影响,少量的铜离子可显著提高金的浸出率,当浓度为 0.06 mol/L 时,金浸出率达到最大值。

4 氨/胺的电化学行为

在没有氨的条件下^[23],铜(II)离子难以稳定,金溶解极化曲线有明显的钝化特征,金的溶出也很

缓慢;而氨的加入能够在很大程度上改变金的阳极溶解特性,使钝化作用减弱,峰电位负移,峰电流增大,金的溶出加快。Zhu 等^[24]通过分析氨存在时的化学阻抗谱,认为加氨后形成的中间产物对金的溶解起催化作用,其作用原理是通过氨稳定铜离子形成铜氨络合离子^[25],降低游离铜对硫代硫酸根离子的氧化,减少钝化物质的产生,同时还能在一定程度上还减少硫代硫酸盐的消耗量,从而促进金的溶解。

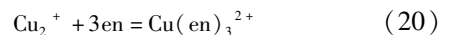
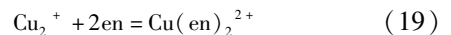
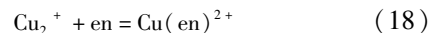
陈荃认为^[23]在硫代硫酸盐浸金的过程中,氨的作用是优先扩散到金的表面参与电极过程的电化学反应。实验表明随着 NH_3 浓度的增大,开路电位负移,表面电负性增大,当 NH_3 的浓度达到 1.0 mol/L 时,开路电位负移至 -600 mV (SCE),金表面电性对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 产生静电排斥作用,抑制硫代硫酸根向金表面输送。而 NH_3 的输送几乎不受影响, NH_3 优先扩散到金的表面和游离出的金离子络合生成 $\text{Au}(\text{NH}_3)_2^+$,硫代硫酸根离子取代 $\text{Au}(\text{NH}_3)_2^+$ 生成更为稳定的 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 离子^[26],其扩散结果最终表现在阳极上:



Baron. J. Y 等^[27]通过 SERS 光谱分析认为,氨与 Au^+ 形成的表面配合物可以抑制钝化物产生或在金表面上吸附。

Jeffrey^[28]试验发现含有 0.025 mol/L 铜、0.2 mol/L 硫代硫酸盐的溶液中,氨的最佳浓度为 0.4 mol/L,此时金的溶出电流最大,浸出率最高。当浓度低于 0.4 mol/L 时,大量的 $\text{Cu}(\text{II})$ 与硫代硫酸盐反应,一方面,对金溶解起催化作用的 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 的浓度较低,另一方面,硫代硫酸盐的消耗量增加,导致金的浸出率不高;当浓度高于 0.4 mol/L 时, $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ 电对的氧化电位降低,溶液中反应的驱动力减弱,金的浸出率也随之下降。

胡显智^[29]采用乙二胺代替氨或铵盐,形成胺性硫代硫酸盐体系。乙二胺是一种双齿结构配体,能和许多过渡金属离子形成稳定的络合物,其中 $\text{Cu}(\text{II})$ 与乙二胺发生三级络合,过程如下:



其中, $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 的稳定性最好,当乙二胺的浓度为 0.01 ~ 0.9 mol/L 时, $\text{Cu}(\text{II})$ 几乎全部以 Cu

$(\text{en})_2^{2+}$ 状态存在,其它两种形态可忽略不计。而且, $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 也比 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 更加稳定,尤其是在较宽的 pH 值范围内。因为 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 仅在较窄的 pH 范围内稳定,pH 升高和降低都很容易转化为 $\text{Cu}(\text{OH})_2$, 字富庭^[30] 计算得出,在 $\text{pH}=6\sim 10$ 范围内,含乙二胺的硫代硫酸盐浸金液中的 $\text{Cu}(\text{II})$ 主要以 $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 形式存在,而不会有 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 生成。

乙二胺也可以与 $\text{Cu}(\text{I})$ 络合成 $\text{Cu}(\text{en})^+$, 但是 $\text{Cu}(\text{en})^+$ 的稳定常数小于 $\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$, 因此,硫代硫酸盐溶液中的 $\text{Cu}(\text{I})$ 主要以 $\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 的形式存在。字富庭^[29] 研究认为,即使 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度很低时,浸金液中 $\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 可以占总 $\text{Cu}(\text{I})$ 的 80%。

聂彦合^[12] 研究表明二乙二胺合铜离子 $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 能减轻硫代硫酸盐氧化产物对金阴极造成的不利影响。乙二胺的加入可使金的腐蚀电流密度提高 8.78 倍,腐蚀电位降低 137.6%,促进金的腐蚀,其主要原因是:(1)乙二胺络合溶液中的二价铜离子, $\text{Cu}(\text{II})$ 还原为 $\text{Cu}(\text{I})$ 的还原电位正移,加快了 $\text{Cu}(\text{II})$ 的还原;(2) $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 减弱了金表面铜、硫钝化层的形成;(3)乙二胺的加入对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 有明显的稳定作用^[31]。

项朋志^[32] 等采用电化学手段研究乙二胺浓度对金浸出的影响认为,在一定浓度内增大乙二胺浓度对金的溶出是有利的。在 $0.02\sim 0.06\text{ mol/L}$ 范围,金的溶出峰电流随乙二胺浓度增加不断地增大,当乙二胺浓度达到 0.06 mol/L 时,浸出效果最佳,但是浓度再往上增大,金的溶出峰电流反而减小。较低浓度的乙二胺与铜离子形成二乙二胺合铜离子,游离的铜离子浓度降低,减少了 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的消耗,加快金的溶解;但是当乙二胺的浓度过高时,浸出液的 pH 值会升高,在一定的程度上造成硫代硫酸根离子和铜离子的水解,降低了其在浸出液中的浓度,抑制金的溶解。某卡林型金矿石的最佳工艺试验^[33] 和上述电化学研究结果基本一致。

5 结语

铜氨/胺体系下硫代硫酸盐浸金仍然存在着硫代硫酸盐不稳定、易氧化分解且消耗量大的问题,浸出过程复杂、氧化还原反应不够清晰、浸出液中组分也十分不明确。目前,对于浸金体系的强化和改善主要集中在三个方面:一是通过电化学研究进一步

明确主要组分在浸出过程中的电化学行为;二是在电化学研究的基础上控制各组分的用量,避免药剂的不必要消耗;三是控制电位条件,减少金的钝化。

参考文献:

- [1] Muir D M, Aylmore D G. Thiosulphate as an alternative to cyanide for gold processing - issues and impediments [J]. Mineral processing and extractive metallurgy, 2004, 113(1): 2 - 12.
- [2] Thomas K G, Fleming C, Marchbank A R, et al. Gold recovery from refractory carbonaceous ores by pressure oxidation, thiosulphate leaching and resin - in - pulp adsorption; US 5785736 [P]. 1998 - 07 - 28.
- [3] 孟奇,崔毅琦,童雄,等. 从硫代硫酸盐浸金溶液中回收金的研究现状[J]. 矿冶,2013(4):51 - 54.
- [4] Breuer P L, Jeffrey M I. An electrochemical study of gold leaching in thiosulfate solutions containing copper and ammonia [J]. Hydrometallurgy, 2002, 65(2):145 - 157.
- [5] 白成庆. 硫代硫酸盐溶金机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008:65 - 68.
- [6] Zhang S, Nicol M J. An electrochemical study of the dissolution of gold in thiosulfate solutions Part I: alkaline solutions [J]. Journal of applied electrochemistry, 2003, 33(9): 767 - 775.
- [7] Zelinsky A G, Novgorodtseva O N. EQCM study of the dissolution of gold in thiosulfate solutions [J]. Hydrometallurgy, 2013, 138(6): 79 - 83.
- [8] Jeffrey M I, Watling K, Hope G A, et al. Identification of surface species that inhibit and passivate thiosulfate leaching of gold [J]. Minerals engineering, 2008, 21(6): 443 - 452.
- [9] Wood R, Hope G A, Watling K M, et al. A spectrochemical study of surface species formed in the gold/thiosulfate system [J]. Journal of the electrochemical society, 2006, 153(7): D105.
- [10] 刘克俊,李剑虹,李长根,等. 用硫代硫酸盐溶液浸出和回收金[J]. 国外金属矿选矿,2005(3):10 - 15.
- [11] Gamini Senanayake. Role of copper(II), carbonate and sulphite in gold leaching and thiosulphate degradation by oxygenated alkaline non - ammoniacal solutions [J]. Minerals engineering, 2005(18): 409 - 426.
- [12] 聂彦合. 多硫酸盐对硫代硫酸盐浸金过程的影响及调控研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [13] 项朋志,刘琼,黄遥,等. 硫代硫酸盐浸金体系中铜氨影响研究[J]. 化学与生物工程,2017(12):14 - 16.
- [14] Gamini Senanayake. Analysis of reaction kinetics speciation and mechanism of gold leaching and thiosulfate oxidation by ammoniacal copper (II) solutions [J]. Hydrometallurgy, 2004, 75: 55 - 75.
- [15] 字富庭,何素琼,胡显智,等. 硫代硫酸盐浸金中硫代硫酸盐稳定性研究状况[J]. 矿冶,2012,(3):33 - 38.
- [16] P L Breuer, M I Jeffrey. Copper catalysed oxidation of thiosulfate by oxygen in gold leach solutions [J]. Minerals engineering, 2003(16): 21 - 30.
- [17] 蒋培军,崔毅琦,谢贤,等. 硫代硫酸盐浸银过程中氧化剂的作用机理分析[J]. 矿产保护与利用,2017(5):29 - 33.

parameters on the thiosulfate leaching of farzashouran refractory gold ore[J]. Mineral processing, 2014, 131: 43 - 50.

[27] Feng D, Van Deventer J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of carboxymethyl cellulose (CMC) [J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 115 - 121.

[28] Yong - bin YANG, Xi ZHANG, Bin XU, et al. Effect of arsenopyrite on thiosulfate leaching of gold [J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2015, 25: 3454 - 3460.

[29] 李汝雄, 王建基, 邝生鲁. 用金的阳极溶解方法研究氯化钠在硫代硫酸盐浸金过程中的作用[J]. 黄金, 2001, 22(2): 28 - 30.

[30] Feng D, VanDeventer J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of orthophosphate and polyphosphate [J]. Hydrometallurgy, 2011, 106: 38 - 45.

[31] Bin Xu, Yongbin Yang, Tao Jiang, et al. Improved thiosulfate leaching of a refractory gold concentrate calcinewith additives [J]. Hydrometallurgy, 2015, 152: 214 - 222.

[32] Feng D, Van Deventer J S J. The role of amino acids in the thiosulphate leaching of gold[J]. Minerals engineering, 2011, 24: 1022 - 1024.

[33] 李峰, 丁德鑫, 胡南, 等. 难处理含金硫精矿的焙烧氧化 - 硫代硫酸盐浸出[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 831 - 837.

[34] 姜涛, 许时, 陈苾, 等. 含铜金矿自催化硫代硫酸盐浸金新工艺及化学原理[J]. 有色金属, 1992, 44(3): 30 - 33.

[35] 邓文, 伍荣霞, 刘志成, 等. 焙烧预氧化 - 硫代硫酸盐浸出某难处理金精矿[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 114 - 117.

[36] 陈立乐, 王景伟, 白建峰, 等. 硫代硫酸盐法浸出废旧 IC 芯片中金的试验研究[J]. 化工进展, 2015, 34(3): 884 - 890.

引用格式: 贺俊傲, 崔毅琦, 何建, 蔡鑫, 童雄. 氨性硫代硫酸盐浸出金银过程中降低硫代硫酸盐消耗量研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 160 - 166.

HE Junao, CUI Yiqi, HE Jian, CAI Xin, TONG Xiong. Research on reducing thiosulfate consumption during the process of leaching gold and silver by ammonia thiosulfate[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(5): 160 - 166.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E - mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第 159 页)

[18] 姜涛, 许时, 陈苾. 硫代硫酸盐浸金电化学研究(II)金的阴极溶解行为及机理[J]. 中南矿冶学院学报, 1993(2): 169 - 173.

[19] 龚亚军. 方铅矿碳酸化转化的电化学 - 动力学[D]. 北京: 中国科学院化工冶金研究, 1988.

[20] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.

[21] Zhang S, Nicol M J. An electrochemical study of the dissolution of gold in thiosulfate solutions. Part II: effect of copper[J]. Journal of applied electrochemistry, 2005(3): 339 - 345.

[22] 张卿. 某含砷难处理金矿超声强化浸金试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(4): 12 - 15.

[23] 陈苾, 姜涛, 许时. 硫代硫酸盐浸金电化学研究(I)金的阳极溶解行为及机理[J]. 中南矿冶学院学报, 1993(2): 169 - 173.

[24] Zhu Guocai. Electrochemical studies on the mechanism of gold dissolution in thiosulfate solutions[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 1994(1): 50 - 53.

[25] 许姣, 胡显智, 杨朋, 等. 氨性硫代硫酸盐体系中金溶解过程的腐蚀电化学行为[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2015(2): 123 - 129.

[26] 沈智慧, 张覃, 唐云. 用硫代硫酸盐浸出和回收金的研究进

展[C]中国有色金属学会: 2013 有色金属矿山环保高层论坛, 2013.

[27] Baron J Y, Mirza J, Nicol E A, et al. SERS and electrochemical studies of the gold - electrolyte interface under thiosulfate based leaching conditions[J]. Electrochimica acta, 2013, 111(6): 390 - 399.

[28] Jeffrey M I. Kinetic aspects of gold and silver leaching in ammonia - thiosulfate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2001, 60(1): 7 - 16.

[29] 胡显智. 一种以乙二醇为添加剂的硫代硫酸盐提取金的方法: CN101824545. 3[P]. 2010 - 09 - 08.

[30] 宇富庭. 铜(II)胺(氨)配离子在硫代硫酸盐浸金中构效关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

[31] 项朋志, 刘琼, 叶国华. 铜 - 乙二醇 - 硫代硫酸盐浸金体系中硫代硫酸盐消耗研究[J]. 黄金, 2018, 39(3): 59 - 62.

[32] 项朋志, 刘琼, 黄遥, 等. 基于硫代硫酸盐铜乙二醇浸金体系铜及乙二醇影响电化学研究[J]. 现代矿业, 2018(1): 151 - 154.

[33] 高鹏, 唐道文, 唐攒浪. 用硫代硫酸钠从某卡林型金矿石中浸出金试验研究[J]. 湿法冶金, 2017(1): 12 - 15.

引用格式: 蔡鑫, 崔毅琦, 何建, 贺俊傲, 童雄. 铜氨/胺体系下硫代硫酸盐浸金的电化学研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 156 - 159, 166.

CAI Xin, CUI Yiqi, HE Jian, HE Junao, TONG Xiong. Research progress in electrochemistry of thiosulfate gold leaching in copper ammonia/amine systems[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(5): 156 - 159, 166.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E - mail: kcbh@chinajournal.net.cn