

无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺试验研究

张磊,郝福来,张世鏢

(长春黄金研究院有限公司)

摘要:针对无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺中硫代硫酸盐易氧化分解、硫代硫酸金络合物稳定性差及传统活性炭吸附法效率低等问题,发现由浸金剂CG528、氧化剂CG525、络合剂CG524和催化剂CG527形成的药剂体系中,药剂之间产生协同作用,构建高效稳定的无氨硫代硫酸盐浸出体系;同时,研制出将树脂直接加入浸出矿浆中使之边浸边吸,无须对矿浆进行固液分离就可实现金富集回收的树脂吸附工艺。结果表明:采用无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺金浸出率(86.58%)与氰化工艺金浸出率(86.32%)相当;液相中金吸附率为95.69%。研究结果可为无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺的工业化应用提供技术支撑。

关键词:无氨;硫代硫酸盐;树脂;浸出;氰化;矿浆;工艺机理

中图分类号:TD923

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)08-0035-04

doi:10.11792/hj20250807

引言

氰化工艺是常用的传统提金工艺,但随着生态环境硬制约问题的日益突显及氰化工艺在某些难处理金矿浸出时存在的缺点,科研工作者对非氰化工艺浸金药剂及工艺进行了大量研究,开发出了多种非氰、高效、无毒、无污染的浸金新药剂和新工艺,有些新工艺已经达到工业应用水平,并取得了显著效果^[1-4]。目前,非氰化浸金工艺主要有硫代硫酸盐法、硫脲法、卤素及其化合物法、多硫化物法、石硫合剂法等。其中,硫代硫酸盐法因具有浸金速率快、无毒、成本低、对杂质不敏感、浸金指标较高及对设备无腐蚀等一系列优点,被认为是最具潜力取代氰化工艺的一种非氰化工艺^[5-12]。然而,该工艺在实际应用中面临硫代硫酸盐易氧化分解、硫代硫酸金络合物稳定性差、传统活性炭吸附法对硫代硫酸金络合物吸附能力有限等挑战^[13-20]。针对上述问题,本研究开发出高效稳定的无氨硫代硫酸盐浸出体系及高选择性吸附树脂。研究成果可为无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺的工业化应用提供技术支撑,对推动黄金工业的绿色可持续发展具有重要意义。

1 重选尾矿性质

原矿金品位1.28 g/t,为唯一有价回收元素。由于矿石中含有一定量的大粒金,为消除这部分大粒金

对浸出结果的影响,在浸出工艺前加入重选作业(磨矿细度-0.074 mm占比90%),重选金回收率35.92%。重选尾矿主要化学成分分析结果见表1,金矿物嵌布特征见图1。由表1、图1可知:重选尾矿金品位为0.82 g/t,金属硫化物以磁黄铁矿为主,其次为毒砂,另含有少量黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,金属氧化物为褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿、白铁矿等。脉石矿物以石英、绢云母、白云母、黑云母、绿泥石等为主。单体连生金占88.93%,包裹金占11.07%,其中,脉石矿物包裹金占6.19%,金属矿物包裹金占4.88%。

表1 重选尾矿主要化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of major chemical composition in gravity separation tailings

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S
w/%	0.82	2.37	0.006	<0.05	<0.05	4.07	1.37
成分	Sb	As	C	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
w/%	<0.05	0.42	0.23	0.44	2.16	61.80	14.17

注:1)w(Au)/(g·t⁻¹);2)w(Ag)/(g·t⁻¹)。

2 试验结果与讨论

2.1 氰化试验

为评价无氨硫代硫酸盐浸金效果,对金品位为0.82 g/t的重选尾矿开展氰化试验。结果表明:在磨

收稿日期:2025-04-06;修回日期:2025-06-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907803)

作者简介:张磊(1985—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为稀贵金属资源化利用;E-mail:ccgrixy@chnegri.cn

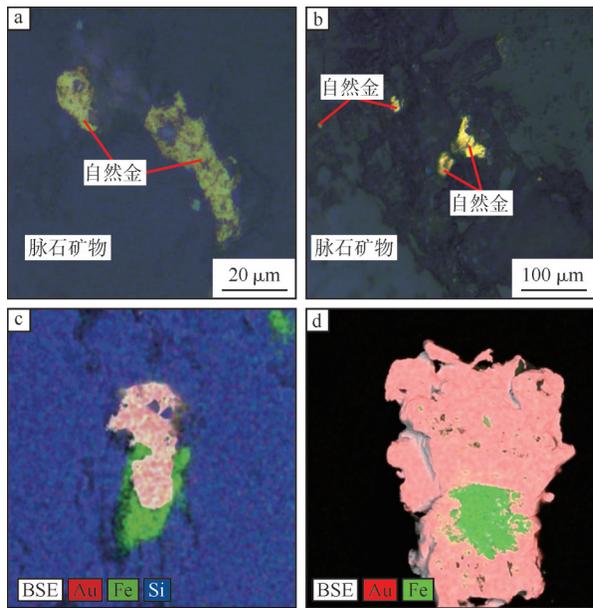


图1 金矿物嵌布特征

Fig. 1 Occurrence characteristics of gold minerals

矿细度-0.074 mm 占比90%,矿浆浓度33%,矿浆pH值11,NaCN用量1 kg/t,浸出时间36 h条件下,金浸出率为86.32%。

2.2 无氨硫代硫酸盐浸出试验

无氨硫代硫酸盐浸金体系在常温常压下进行,通过添加氧化剂CG525促进矿石中金溶解。为保证氧化剂在矿浆体系中能够稳定存在,添加适量络合剂CG524,使溶解的金与溶液中 $S_2O_3^{2-}$ 络合,并加入催化

剂CG527和浸金剂CG528。通过开展不同初始pH条件试验,浸金剂CG528、氧化剂CG525、络合剂CG524和催化剂CG527用量试验,CG524与CG525配比试验,确定在这4种试剂最佳用量和配比条件下,得到最佳金浸出率及无氨硫代硫酸盐的最低用量。试验流程见图2,各药剂条件试验结果见图3,优化条件及试验结果见表2。

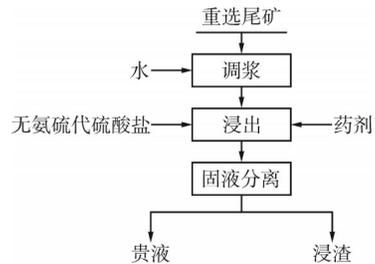


图2 无氨硫代硫酸盐浸出工艺优化流程

Fig. 2 Flowchart of optimized ammonia-free thiosulfate leaching process

由图3、表2可知:在浸金剂CG528浓度为0.08 mol/L,氧化剂CG525浓度为15 mmol/L,络合剂CG524与氧化剂CG525的浓度比为2.0,催化剂CG527浓度为5 mmol/L,矿浆溶液初始pH值为7.0,常温常压浸出24 h条件下,金浸出率为86.35%,与氰化工艺浸出率(86.32%)几乎一致,在保证浸出指标的同时,实现了金的无氰化浸出。

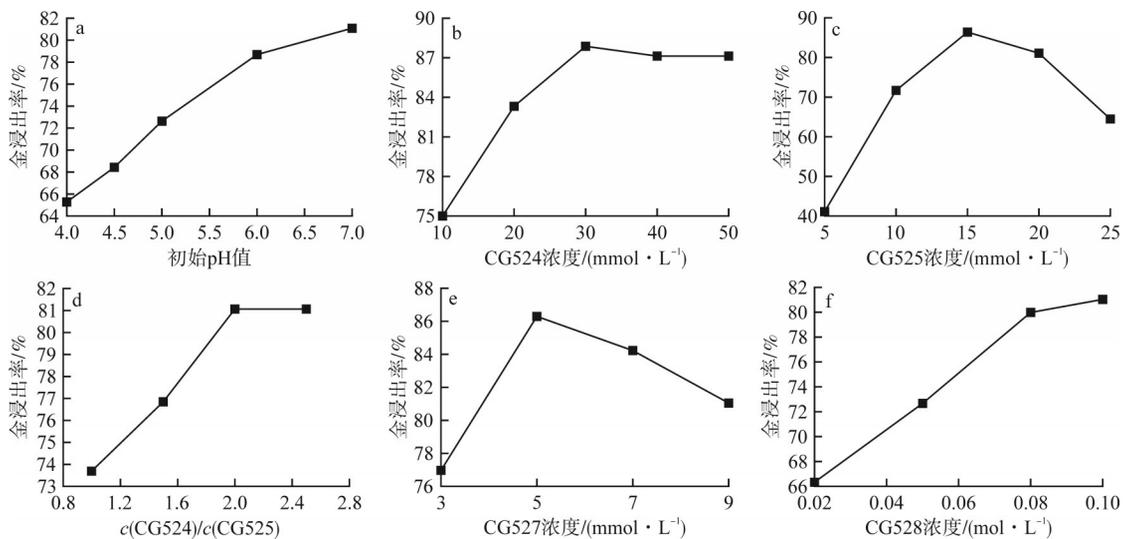


图3 各药剂条件试验结果

Fig. 3 Results of reagent condition tests

表2 条件试验结果

Table 2 Results of condition tests

重选尾矿金品位/ (g·t ⁻¹)	矿浆浓度/%	CG528 浓度/ (mol·L ⁻¹)	CG525 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	CG524 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	CG527 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	浸出时间/h	浸渣金品位/ (g·t ⁻¹)	金浸出 率/%
0.82	40	0.08	15	30	5	24	0.13	86.35

2.3 树脂吸附试验

采用常规树脂吸附及铁粉置换法能够较好回收浸出液中的金,但这2种方法需要将矿浆进行固液分离,增加了工艺的复杂性。树脂吸附工艺是指将树脂直接加入浸出矿浆中,使之边浸边吸,无须对矿浆进行固液分离就可实现金的提取回收,树脂吸附工艺流程见图4。

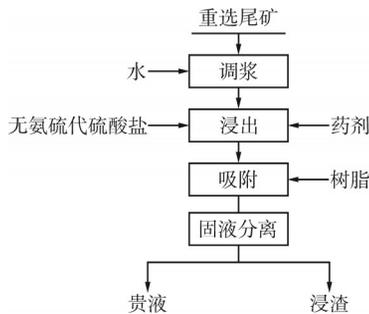


图4 树脂吸附工艺流程

Fig. 4 Flow of resin adsorption process

选择3种不同型号的强碱性阴离子树脂 A-21S、A194 和 A500CPlus 进行对比试验。不同型号树脂物化特性见表3,添加不同型号树脂时的金浸出率及贵液中金的吸附率结果见表4。由表4可知:A-21S型树脂的综合指标较优。

对A-21S型树脂、氧化剂CG525、催化剂CG527和浸金剂CG528开展用量试验,结果见图5。由图5可知:在树脂密度不低于5 g/L,氧化剂CG528浓度为0.10 mol/L,催化剂CG525与浸金剂CG524的浓度比为1:2,氧化剂CG525浓度为2.5 mmol/L,催化剂CG527浓度为10 mmol/L,浸出时间为24 h条件下,金

表3 不同型号树脂物化特性

Table 3 Physicochemical properties of different types of resins

指标	A-21S	A194	A500CPlus
主体结构	交联聚苯乙烯	大孔聚苯乙烯与DVB交联	大孔聚苯乙烯与二乙烯基苯交联
物理形态	湿润球状	球形颗粒	球形颗粒
离子	Cl ⁻	Cl ⁻	Cl ⁻
总交换容量/(meq·mL ⁻¹)	1.3	3.0×10 ³	1.15
粒径/mm	0.3~1.2	0.8~1.3	0.524~1.2
湿度/%	54±3	44~52	57~63
pH值	0~14		
反洗密度/(g·L ⁻¹)	670~710		670~700
溶解性	不溶	不溶	不溶
密度/(g·L ⁻¹)			1.08

表4 不同型号树脂对金浸出率及吸附率影响

Table 4 Effects of different resin types on gold leaching rate and adsorption rate

树脂型号	浸渣金品位/(g·t ⁻¹)	ρ(浸液)/(mg·L ⁻¹)	金浸出率/%	金吸附率/%
A500CPlus	0.18	0.095	86.36	83.33
A500CPlus	0.16	0.108	87.88	81.38
A-21S	0.17	0.036	87.12	93.74
A-21S	0.16	0.025	87.88	95.69
A194	0.20	0.040	84.85	92.86

浸出率与氰化工艺金浸出率相当,为86.58%,液相中金吸附率为95.69%。

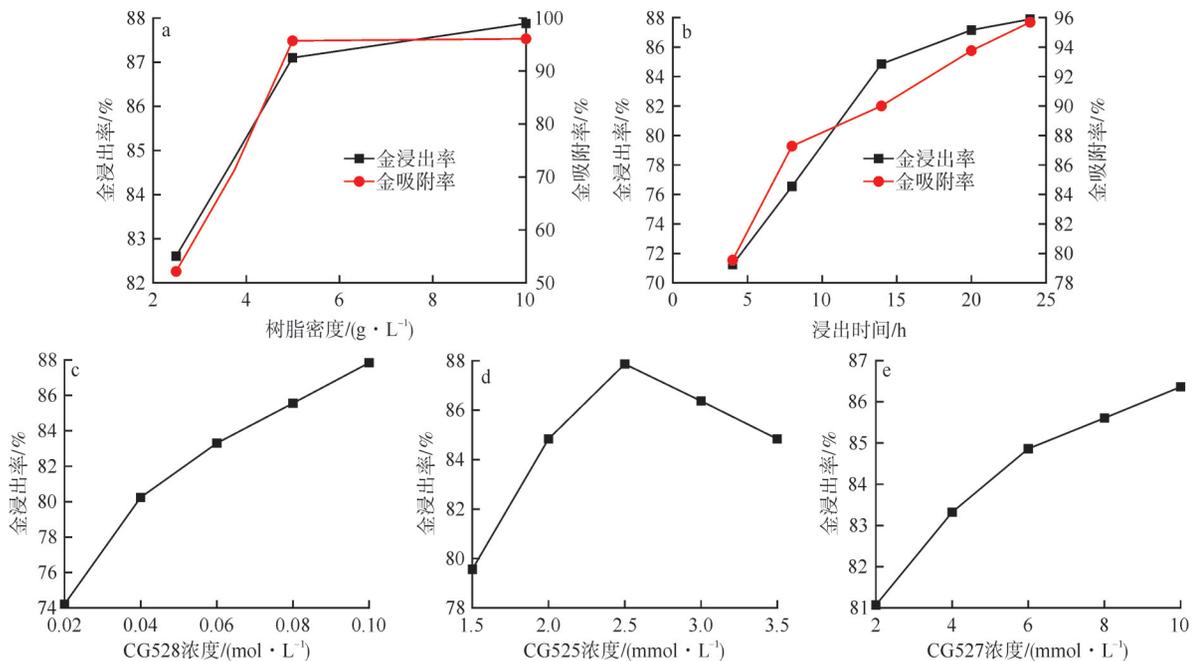


图5 工艺参数优化结果

Fig. 5 Results of process parameter optimization

3 结论

1)重选尾矿金品位 0.82 g/t, 氰化工艺金浸出率为 86.32 %。

2)通过添加自主研发的浸金剂 CG528、氧化剂 CG525、络合剂 CG524 和催化剂 CG527 及条件优化, 构建了无氨硫代硫酸盐浸金体系, 金浸出率 (86.35 %) 与氰化工艺指标相当, 且无氨硫代硫酸盐试剂消耗量较低。该体系能够在常温常压中性条件下操作, 便于应用实施。

3)采用无氨硫代硫酸盐浸出一树脂吸附提金工艺, 选择强碱性阴离子树脂 A-21S 为载体, 金浸出率为 86.58 %, 与氰化工艺金浸出率相当; 液相中金吸附率为 95.69 %。该工艺可为黄金工业的绿色可持续发展提供技术支持。

[参考文献]

- [1] 符岩, 陈俊南, 谢锋, 等. 硫代硫酸盐浸金技术研究现状[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(12): 43-53.
- [2] 龚乾, 胡洁雪. 硫代硫酸盐法处理含铜硫化金精矿[J]. 化工冶金, 1990(2): 145-152.
- [3] 张磊, 郭学益, 田庆华, 等. 难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J]. 黄金, 2021, 42(6): 60-68.
- [4] 郝福来, 张世鏢, 郑晔, 等. 硫代硫酸盐浸金技术研究进展[J]. 黄金, 2018, 39(7): 61-63.
- [5] 吴冰. 复杂难处理金矿石预处理工艺研究现状及进展[J]. 黄金, 2020, 41(5): 65-72.
- [6] XIE F, CHEN J N, WANG J, et al. Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3 506-3 529.
- [7] 张良林, 童雄, 徐晓军. 氨性硫代硫酸盐浸金体系中氧化剂选择探讨[J]. 金属矿山, 2005(11): 31-33.
- [8] LIUX L, JIANG TAO, XU BIN, et al. Thiosulphate leaching of gold in the Cu-NH₃-S₂O₃²⁻-H₂O system: An updated thermodynamic analysis using predominance area and species distribution diagrams[J]. Minerals Engineering, 2020, 151: 106336.
- [9] LIU X L, XU B, YANG Y B, et al. Effect of galena on thiosulfate leaching of gold[J]. Hydrometallurgy, 2017, 171: 157-164.
- [10] 刘克俊, 李剑虹, 李长根. 用硫代硫酸盐溶液浸出和回收金[J]. 国外金属矿选矿, 2005(3): 13-18.
- [11] ZHANG Y, ZI F T, HU X Z, et al. Mechanism of pyrite oxidation in copper(II)-ethylenediamine-thiosulphate gold leaching system[J]. Electrochimica Acta, 2021, 390: 138752.
- [12] ZHANG Y, CHEN Z, ZI F T, et al. New insights into the oxidation mechanism of pyrite in copper-containing sulfuric acid: An electrochemical, AFM, Raman spectroscopy and XPS investigation[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(6): 061502.
- [13] 童雄, 张良林. 硫代硫酸盐浸金过程的热力学判据[J]. 有色金属, 2004(3): 38-40.
- [14] CHEN J N, XIE F, WANG W, et al. Leaching of gold and silver from a complex sulfide concentrate in copper-tartrate-thiosulfate solutions[J]. Metals, 2022, 12(7): 1152.
- [15] CHEN J N, XIE F, WANG W, et al. Leaching of a carbonaceous gold concentrate in copper-tartrate-thiosulfate solutions[J]. Minerals Engineering, 2022, 183: 170605.
- [16] 童雄, VALDIVIESO A L, 肖植强, 等. 硫代硫酸盐法浸出墨西哥某低品位、难处理含铜金矿石的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2002(4): 42-45, 41.
- [17] 张文阁, 王振忠, 李玉玲. 用氨性硫代硫酸盐从矿物原料中浸出金银的化学研究[J]. 有色矿冶, 1986(6): 24-30.
- [18] 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.
- [19] HASHEMZADEHFINI M, FICERIOVÁ J, ABKHOSH K E, et al. Effect of mechanical activation on thiosulfate leaching of gold from complex sulfide concentrate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 21(12): 2 744-2 751.
- [20] WANG J, XIE F, PAN Y, et al. Leaching of gold with copper-citrate-thiosulfate solutions[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022(7): 916-925.

Experimental study on ammonia-free thiosulfate leaching-resin adsorption gold extraction process

Zhang Lei, Hao Fulai, Zhang Shibiao

(Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: To address key challenges in the ammonia-free thiosulfate leaching-resin adsorption gold extraction process, such as the easy oxidative decomposition of thiosulfate, the low stability of thiosulfate-gold complexes, and the low efficiency of conventional activated carbon adsorption, a novel reagent system composed of leaching agent CG528, oxidant CG525, complexing agent CG524, and catalyst CG527 was developed. This system exhibits synergistic effects among its components, forming an efficient and stable ammonia-free thiosulfate leaching system. Meanwhile, a resin adsorption technique was established, whereby resin is directly added to the leaching slurry to enable simultaneous leaching and adsorption, eliminating the need for solid-liquid separation and achieving effective gold enrichment and recovery. Results show that the gold leaching rate using the ammonia-free thiosulfate leaching-resin adsorption gold extraction process reaches 86.58 %, comparable to the cyanidation leaching rate of 86.32 %, with a gold adsorption rate from the solution of 95.69 %. These findings provide technical support for the industrial application of the ammonia-free thiosulfate leaching-resin adsorption gold extraction process.

Keywords: ammonia-free; thiosulfate; resin; leaching; cyanidation; slurry; process mechanism