

新催化体系硫代硫酸盐法提金^①

李光胜¹, 吴金甜², 徐超¹, 朱幸福¹, 李鹏³, 董中林², 徐斌²

(1.山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东烟台 261441; 2.中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083; 3.山东黄金矿业股份有限公司, 山东济南 250103)

摘要: 为构建浸金效果好、硫代硫酸盐消耗低且浸出液中的金能被高效回收的新型浸金体系, 比较了不同金属离子与有机配体组合催化硫代硫酸盐浸金的效果, 并采用树脂吸附法回收浸出液中的金。结果表明, Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系的 Au 浸出效果好, Au 浸出率和硫代硫酸盐消耗分别为 89.72% 和 15.28 kg/t。该体系浸金过程中, 甘氨酸催化 Au⁺ 与 S₂O₃²⁻ 配位以及在碱性条件下稳定 Ni²⁺, Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰ 催化 O₂ 的还原。采用树脂吸附法回收金时, 浸出液中 Ni 离子几乎不会在树脂上吸附, 不与 Au 离子产生竞争吸附, Au 吸附率达 98.13%; 载金树脂解吸时只需采用简单的一段工艺, 即可直接解吸 Au。

关键词: 金属离子; 有机配体; 吸附; 解吸; 催化体系; 硫代硫酸盐法; 树脂吸附; 提金

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.022

文章编号: 0253-6099(2024)03-0100-06

Gold Extraction by Thiosulphate Leaching in New Catalytic System

LI Guangsheng¹, WU Jintian², XU Chao¹, ZHU Xingfu¹, LI Peng³, DONG Zhonglin², XU Bin²

(1. Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co Ltd, Yantai 261441, Shandong, China; 2. School of Mineral Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Shandong Gold Mining Co Ltd, Jinan 250103, Shandong, China)

Abstract: In order to determine a new type of gold leaching system, which can not only bring good leaching effect with low consumption of thiosulfate, but also make the gold in the lixivium to be efficiently recovered, the leaching effects of gold with thiosulfate catalyzed by different combination of metal ions and organic ligands were compared, and then the gold in the lixivium was recovered by resin adsorption. The results indicate that the Ni²⁺-glycine-thiosulfate system can bring good Au leaching effect, showing Au leaching rate up to 89.72% with thiosulfate consumption of 15.28 kg/t. During the gold leaching process in this system, glycine catalyzes the coordination of Au⁺ with S₂O₃²⁻ and also stabilizes Ni²⁺ under alkaline conditions, and Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰ catalyzes the reduction of O₂. When Au is recovered by resin adsorption, Ni ions in the lixivium are hardly adsorbed on the resin, and do not compete with Au ions for adsorption, resulting in Au adsorption rate up to 98.13%. Then, only one-step process is required for desorption of gold-loaded resin, that is, Au can be directly desorbed.

Key words: metal ion; organic ligands; adsorb; desorb; catalytic system; thiosulfate method; resin adsorption; gold extraction

一直以来, 氰化法因工艺简单、金回收率高在浸金工艺中占据着主导地位, 但氰化物毒性极强, 容易造成严重的环境和健康问题^[1-2]。近年来, 非氰浸金工艺, 如卤素法、硫脲法、硫氰酸盐法和硫代硫酸盐法等, 受到广泛关注^[3]。卤素法^[4]和硫氰酸盐法^[5]在酸性条

件下浸金, 会严重腐蚀设备, 且试剂消耗量大、成本较高。硫脲法浸出周期短、选择性高, 但硫脲自身不稳定且被视为一种可能的致癌物质, 目前已不再提倡使用^[6]。硫代硫酸盐法在碱性介质中浸金, 对设备腐蚀小, 浸出剂无毒且价格便宜, 浸出速率快、时间短, 被认

① 收稿日期: 2023-12-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174271)

作者简介: 李光胜(1970—), 男, 山东招远人, 高级工程师, 主要从事选冶技术与应用及工艺矿物学研究。E-mail: lig@sd-gold.com

通信作者: 徐斌(1982—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为贵金属提取与分离。E-mail: xuandy@126.com

为是极有希望取代氰化法的无毒提金方法^[7]。然而,该方法目前在工业上并未广泛应用,其中一个原因是浸出过程中会加入氨水和铜离子催化硫代硫酸盐对金的浸出,但 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 也会加速硫代硫酸盐的分解,造成硫代硫酸盐消耗量大^[8-11];另一个原因是浸出液中的 $[\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3]^{5-}$ 与 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ 有相似的电离构型,都会被树脂吸附,解吸金之前需要先解吸铜,导致金回收工艺较为复杂^[12]。

本文对传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系进行了优化,筛选了不同金属离子和有机配体的组合,旨在构建一种浸金效果好、硫代硫酸盐消耗低的新型浸金体系,并提出高效的金回收技术。研究结果有助于解决硫代硫酸盐法提金工业化应用所面临的“两大问题”,推动硫代硫酸盐法提金的工业化应用进程。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验用金矿的化学成分和矿物组成分别见表1和图1。该金矿中Au品位为48.0 g/t,其余化学成分主要为Fe、S、O和Si。金矿中主要矿物为黄铁矿和石英。

表1 金矿主要化学成分(质量分数) %

Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Fe	S	Si	O	Cu
48.0	85.0	18.02	17.31	19.06	34.3	0.38
Pb	Zn	Al	Ca	Mg	K	Na
0.14	0.12	4.73	1.61	0.90	2.13	1.01

1) 单位为g/t。

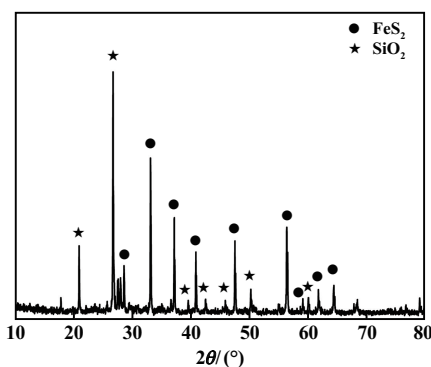


图1 金矿X射线衍射图谱

表2为金矿中金物相分布结果。该原矿中金主要以单体金和连生金形式存在,占75.1%,这部分金容易与浸出剂接触而被浸出。剩余的金主要被包裹在氧化物和硫化物中,难以与浸出剂接触从而难被浸出。因此,需要将其磨至一定细度,使得该部分包裹的金充分暴

露出来,才能达到良好的浸金效果。

表2 金矿中金化学物相分析结果

金物相	含量/(g·t ⁻¹)	分布率/%
单体金+连生金	36.05	75.1
氧化物中金	8.35	17.4
硫化物中金	3.36	7.0
硅酸盐中金	0.24	0.5
合计	48.00	100.0

采用普通球磨机对200 g金矿进行研磨,得到磨矿曲线如图2所示。磨矿15 min时,-0.038 mm 粒级占比就能达到98.33%,此时被包裹的金基本解离。随着磨矿时间延长,-0.038 mm 颗粒占比增幅较小。实验所用浸出矿均为磨矿15 min后的金矿。

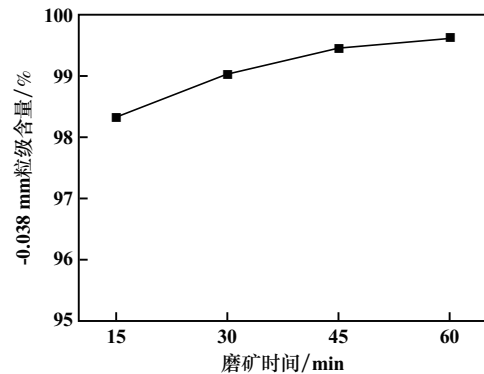


图2 金矿磨矿曲线

1.2 实验方法

1.2.1 浸出实验

浸出实验在250 mL烧杯中进行,添加原矿25 g,液固比为4:1,使用电动异步搅拌器,转速300 r/min,浸出温度50℃,浸出时间8 h,浸出液初始pH值为10,每隔1 h调整一次溶液pH值。浸出结束后对矿浆进行抽滤,测量所得滤液中硫代硫酸盐和金属离子浓度。

1.2.2 吸附实验

采用树脂吸附法回收浸出液中的金。实验在250 mL烧杯中进行,取浸出液100 mL,强碱性阴离子IRA-400型树脂7 g,采用磁力搅拌器搅拌,搅拌速度300 r/min。在0 min、2 min、5 min、10 min、20 min、30 min、60 min时从吸附液中取出1 mL样品,分析溶液中金属离子浓度。

1.2.3 解吸实验

采用磁力搅拌静态解吸的方法解吸铜,搅拌速度为300 r/min,解吸剂为100 mL的0.5 mol/L氨水+0.75 mol/L硫酸铵混合溶液,解吸时间为2 h。采用树脂柱动态解吸的方法解吸金,流速为0.5 mL/min,解

吸剂为 100 mL 的 1 mol/L 氯化钾+0.3 mol/L 亚硫酸钠混合溶液。解吸过程中,间隔适当时间取样分析溶液中金属离子浓度。

1.3 分析方法

采用碘滴定法测定溶液中硫代硫酸盐浓度,采用电感耦合等离子体分析方法测定溶液中的金属离子浓度。

2 实验结果与讨论

2.1 金属离子和有机配体筛选

2.1.1 Fe^{3+} 离子

探究了有机配体种类对 Fe^{3+} 催化硫代硫酸盐浸金的影响, Fe^{3+} 浓度为 0.02 mol/L, 有机配体浓度为 0.2 mol/L, 硫代硫酸钠浓度为 0.3 mol/L, 所得试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,以甘氨酸为配体时,金浸出率最高,为 33.75%;柠檬酸的金浸出率次之,为 16.41%;焦磷酸的金浸出率第三,为 14.31%。总体而言, Fe^{3+} 催化硫代硫酸盐浸金的效果较差,这可能是 Fe^{3+} 与有机配体的络合能力差,导致大部分 Fe^{3+} 在碱性条件下生成沉淀物。

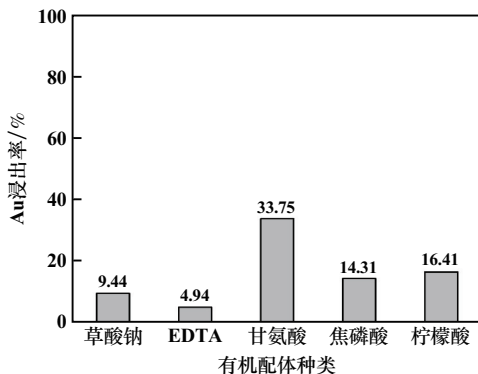


图3 Fe^{3+} -有机配体-硫代硫酸盐体系浸出结果

2.1.2 Cu^{2+} 离子

探究了有机配体种类对 Cu^{2+} 催化硫代硫酸盐浸金的影响, Cu^{2+} 浓度为 0.02 mol/L, 有机配体浓度为 0.2 mol/L, 硫代硫酸钠浓度为 0.3 mol/L, 所得试验结果如图 4 所示。由图 4 可知, Cu^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系的金浸出率最高,为 78.63%,说明 Cu^{2+} 离子与甘氨酸配位效果较好。以焦磷酸和柠檬酸为配体时, Cu^{2+} 离子对硫代硫酸盐浸出有一定的催化效果,体系的金浸出率较低,分别为 15.24% 和 16.01%。配体为草酸钠和 EDTA 时,体系金浸出率极低,均小于 10%。

2.1.3 Ni^{2+} 离子

探究了有机配体种类对 Ni^{2+} 催化硫代硫酸盐浸金的影响, Ni^{2+} 浓度为 0.02 mol/L, 有机配体浓度为 0.2 mol/L,

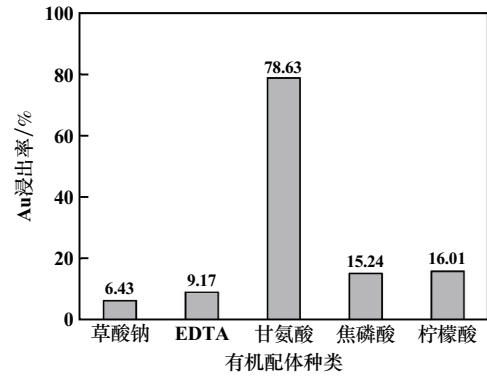


图4 Cu^{2+} -有机配体-硫代硫酸盐体系浸出结果

硫代硫酸钠浓度为 0.3 mol/L, 所得试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,以甘氨酸为配体时金浸出率最高,达 89.72%,说明甘氨酸能与 Ni^{2+} 形成较稳定的络合物,进而较好地催化硫代硫酸盐浸金。以焦磷酸为配体时,金浸出效果次之,浸出率为 31.94%。当配体为草酸钠、柠檬酸和 EDTA 时,也有一定的浸出效果,但金浸出率均低于 30%。

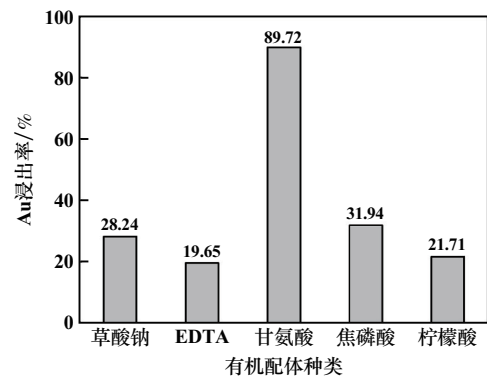
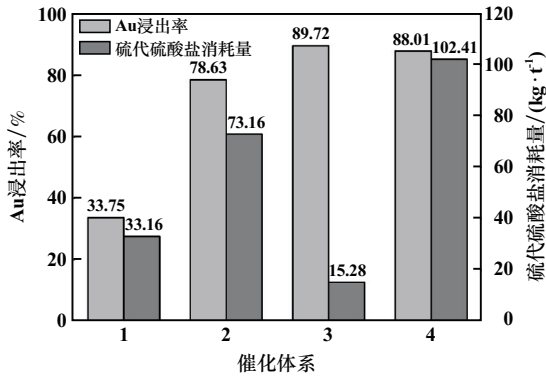


图5 Ni^{2+} -有机配体-硫代硫酸盐体系浸出结果

2.1.4 各金属离子最优催化体系浸出效果比较

上述研究结果表明,不同金属离子均与甘氨酸作用时的浸出效果最佳,各最优催化体系的金浸出率和硫代硫酸盐消耗量如图 6 所示。作为比较,还进行了传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐浸出试验, Cu^{2+} 浓度 0.02 mol/L, 氨水浓度 2 mol/L, 硫代硫酸钠浓度 0.3 mol/L, 浸出温度 25 °C, 其他浸出条件与新催化体系一致。由图 6 可知,甘氨酸-硫代硫酸盐新催化体系中,金属离子为 Ni^{2+} 时,金浸出率最高,为 89.72%,硫代硫酸盐消耗最低,为 15.28 kg/t。传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系的金浸出率为 88.01%,硫代硫酸盐消耗高达 102.41 kg/t。与传统浸出体系相比, Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系的金浸出率更高、硫代硫酸盐消耗更低。这可能是镍的高价化合物对硫代硫酸盐的氧化作用较弱,硫代硫酸盐的消耗较低,有利于 Au 的浸出。



1—Fe³⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系；2—Cu²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系；
3—Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系；4—Cu²⁺-氨水-硫代硫酸盐体系
图6 各金属离子最优催化体系的金浸出率及硫代硫酸盐消耗量

2.1.5 Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸金机理

在Cu²⁺-氨催化硫代硫酸盐浸金机理的基础上,提出了Ni²⁺-甘氨酸催化机理,如图7所示。在阳极区,Au失去电子,首先与C₂H₄NO₂⁻配位生成Au(C₂H₄NO₂)₂⁻,接着Au(C₂H₄NO₂)₂⁻与S₂O₃²⁻反应生成Au(S₂O₃)₂³⁻。因此,甘氨酸在阳极的主要作用是催化Au⁺与S₂O₃²⁻配位。在阴极区,Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰被O₂氧化生成Ni₃O₄,Ni₃O₄得到Au失去的电子又被还原成Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰。因此,甘氨酸在阴极的主要作用是在碱性条件下稳定Ni²⁺,Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰催化O₂的还原。

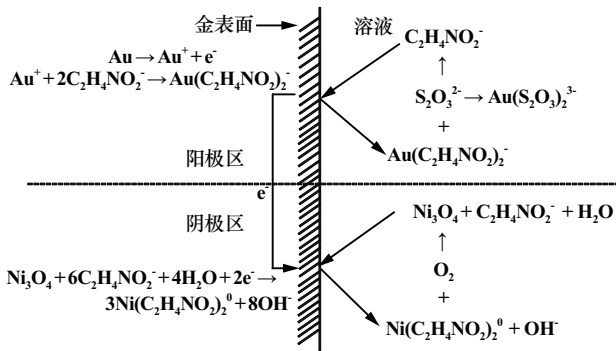


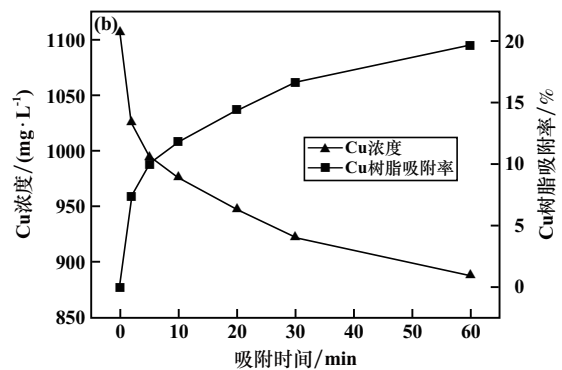
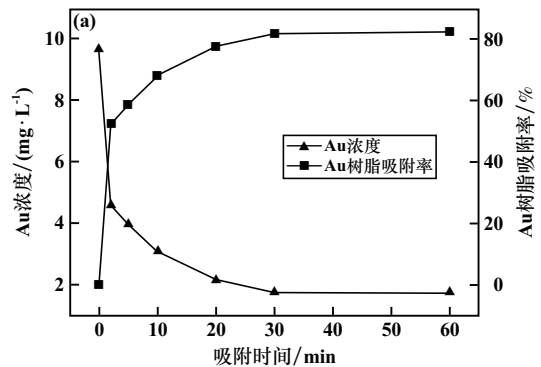
图7 Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸金机理图

2.2 不同体系树脂吸附结果

2.2.1 传统Cu²⁺-氨水-硫代硫酸盐体系

传统Cu²⁺-氨水-硫代硫酸盐体系浸出液中Au、Cu浓度及树脂对Au、Cu的吸附率随时间的变化如图8所示。由图8(a)可以看出,随着吸附时间延长,体系中Au浓度总体呈下降趋势,其中0~2 min,Au浓度从9.67 mg/L迅速下降到4.60 mg/L;吸附30 min时,Au浓度降至1.75 mg/L;30 min后,Au浓度维持稳定。0~30 min,Au吸附率呈上升趋势,此后上升速率逐渐变缓,30 min后,Au吸附率稳定在81.90%左右。由图8(b)

可以得出,0~60 min范围内,Cu浓度和Cu吸附率随着时间的延长分别持续下降和上升。0~30 min,体系Cu浓度由1106.65 mg/L急剧下降至921.77 mg/L,Cu吸附率迅速增加至16.71%;吸附60 min时,Cu浓度下降至888.00 mg/L,Cu吸附率达19.76%。在传统Cu²⁺-氨水-硫代硫酸盐体系中,Cu离子会与Au离子产生竞争吸附,树脂上绝大多数吸附位点被Cu离子占据,这也是Au不能完全被树脂吸附的重要原因。



(a) Au; (b) Cu

图8 Cu²⁺-氨水-硫代硫酸盐体系金属离子浓度及树脂吸附率变化

2.2.2 Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系

Ni²⁺-甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸出液中Au、Ni浓度及树脂对Au、Ni的吸附率随时间的变化如图9所示。图9(a)表明,前2 min内Au在树脂表面快速吸附,吸附率达75.13%,2 min以后吸附速率变缓,10 min以后吸附速率趋于平衡,Au吸附率达到了93.38%,浸出液中Au浓度降至0.65 mg/L;10~60 min,Au离子继续在树脂上吸附,60 min时吸附率可达98.13%。从图9(b)中可以看出,0~10 min内,Ni吸附率逐渐降低;10 min后,Ni浓度和Ni吸附率几乎不随时间变化,最终Ni吸附率为1.5%。Ni离子在树脂上的吸附率极低,不会和Au离子产生竞争吸附,其根本原因是Ni离子的主要存在形式(Ni(C₂H₄NO₂)₂⁰和Ni₃O₄)与Au离子的主要存在形式(Au(S₂O₃)₂³⁻)在结构和价态上存在较大差异,

阴离子强碱性树脂可以实现选择性吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 。

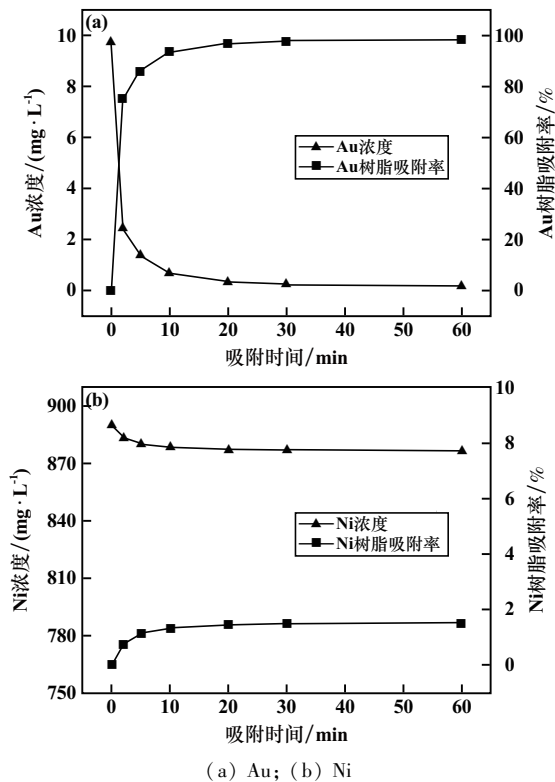


图9 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系金属离子浓度及树脂吸附率变化

2.3 不同体系载金树脂解吸结果

2.3.1 传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系

采用树脂吸附法回收传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系浸出液中 Au 的同时, Cu 也会被树脂吸附。因此, 为了分离 Au 和 Cu, 载金树脂需进行两段解吸, 即先解吸 Cu 再解吸 Au。Cu 解吸率曲线如图 10 所示。10~40 min, Cu 的解吸速率非常快, 铜解吸率从 32.05% 迅速上升至 68.98%; 随着时间延长, Cu 的解吸速率逐渐减慢, 100 min 后, Cu 解吸率稳定在 91.13% 左右。

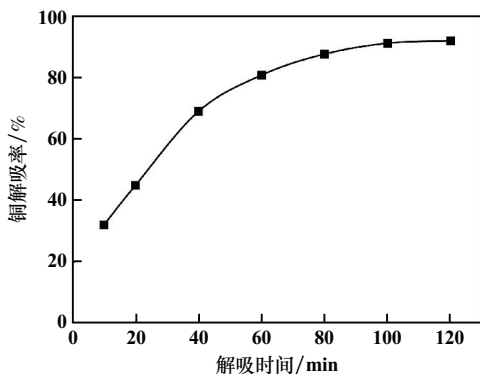


图10 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系 Cu 解吸率变化

Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系解吸液中 Au 浓度变

化如图 11 所示。40~60 min, Au 解吸率迅速增长, 解吸液中 Au 浓度由 4.57 mg/L 快速增加至 47.31 mg/L; 60 min 后解吸液中 Au 浓度开始下降, 下降速率逐渐减慢, 解吸曲线出现了拖尾现象, 即 Au 的解吸速率缓慢降低。在 200 min 时, 金浓度降低到 0.62 mg/L, 此时 Au 解吸率为 97.88%。

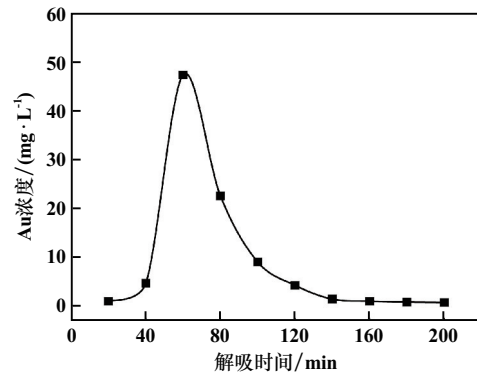


图11 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系解吸液中 Au 浓度变化

2.3.2 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系

采用树脂吸附法回收 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸出液中 Au 时, Ni 离子几乎不会吸附在树脂上。因此, 载金树脂的解吸只需采用简单的一段工艺。 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系解吸液中 Au 浓度变化如图 12 所示。刚开始时, Au 的解吸速率非常快, 解吸液中 Au 浓度急剧增加, 最大 Au 浓度出现在 40 min, 达到了 56.34 mg/L。40~80 min, Au 浓度急剧下降至 1.48 mg/L, 没有出现拖尾现象, 说明 Au 解吸速率快; 80~200 min, Au 浓度缓慢降低到 0.66 mg/L, Au 解吸率为 99.08%。

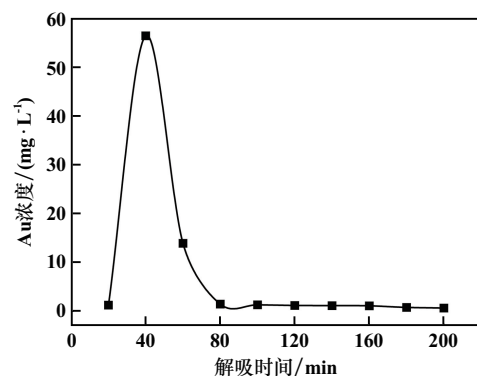


图12 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系解吸液中 Au 浓度变化

3 结 论

为解决传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系浸金过程中存在的硫代硫酸盐消耗量大、氨污染严重及金回收工艺复杂等问题, 本文将金属离子与有机配体进行组

合,筛选出浸金效果好、硫代硫酸盐消耗量低的新型浸金体系,并与传统的 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系进行比较。提出新催化体系浸金机理,构建新型、高效的硫代硫酸盐提金技术。主要的创新点和结论如下:

1) 金属离子和有机配体筛选结果表明: Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系 Au 浸出率、硫代硫酸盐消耗分别为 89.72%、15.28 kg/t,与传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系相比, Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系的 Au 浸出率更高、硫代硫酸盐消耗更低。

2) Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸金过程中,甘氨酸的主要作用为催化 Au^+ 与 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 配位以及在碱性条件下稳定 Ni^{2+} 。 $\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_4\text{NO}_2)_2^0$ 被 O_2 氧化生成 Ni_3O_4 , Ni_3O_4 得到 Au 失去的电子又被还原成 $\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_4\text{NO}_2)_2^0$, $\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_4\text{NO}_2)_2^0$ 的主要作用是催化 O_2 的还原。

3) 采用树脂吸附法回收金时,传统 Cu^{2+} -氨水-硫代硫酸盐体系浸出液中 Cu 离子会与 Au 离子产生强烈的竞争吸附,导致 Au 吸附率较低,仅为 81.90%,载金树脂需先解吸 Cu 再解吸 Au。而 Ni^{2+} -甘氨酸-硫代硫酸盐体系浸出液中 Ni 离子的主要存在形式($\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_4\text{NO}_2)_2^0$ 和 Ni_3O_4)与 Au 离子的主要存在形式($\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$)在结构和价态上存在较大差异,不会与 Au 离子产生竞争吸附,Au 吸附率可以达到 98.13%,载金树脂可以直接解吸 Au。

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] 马明,胡文涛.含氟废水处理方法综述[J].江西化工,2011(1):34-36.
- [2] 段良洪,郭远贵,刘伟,等.湿法炼锌过程中纳米级二氧化硅除氟技术工艺研究[J].矿冶工程,2022,42(2):113-116.
- [3] 胡安生,张旭,沈庆峰,等.湿法炼锌硫酸盐溶液中除氟试验研究[J].矿冶工程,2015,35(4):101-103.
- [4] 雷蕾,赵婧男,张成鑫,等.新型化学除氟剂处理含氟工业废水效果研究[J].工业安全与环保,2023,49(3):99-101.
- [5] 吴兆清,许国强,彭晓平.含氟水处理的研究进展[J].湖南有色金属,2003,12(4):38-42.
- [6] 陈亮,向长柳,周曜,等.除氟剂 NY-Z02 在高盐含氟废水中除氟应用研究[J].矿冶工程,2023,43(4):110-114.
- [7] Aoudj S, Drouiche N, Ahcini M, et al. Coagulation as a post-treatment method for the defluoridation of photovoltaic cell manufacturing wastewater[J]. Procedia Engineering, 2012, 33: 111-120.
- [8] CHANG M F, LIU J C. Precipitation removal of fluoride from semiconductor wastewater[J]. Journal of Environmental Engineering, 2007, 133(4): 419-425.
- [9] 巩勤学,鲁俊雀,王杜,等.含铁、铝、钙复合除氟剂除氟性能[J].有色金属(冶炼部分),2020(6):87-91.

参考文献:

- [1] 周衍波,代淑娟,朱巨建.氰化提金工艺现状及非氰提金工艺的应用前景[J].有色矿冶,2016,32(2):28-31.
- [2] 李光胜.含铜金精矿铅盐预处理浸金技术研究[J].矿冶工程,2021,41(6):182-184.
- [3] 曹赓,郭军康,任倩,等.非氰化法浸金的技术进展及发展趋势[J].应用化工,2021,50(6):1672-1676.
- [4] 李桂春,卢寿慈.碘法浸金的研究[J].矿冶工程,2003,23(6):53-55.
- [5] 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):109-111.
- [6] 廖阳平,刘有才,朱忠泗.某硫铁矿烧渣的硫脲法浸金研究[J].矿冶工程,2021,41(6):178-181.
- [7] 余洪,蔡祥,陈聪.硫代硫酸盐浸金体系中活性炭表面 Zeta 电位研究[J].矿冶工程,2018,38(6):102-106.
- [8] 段玲玲,胡显智.硫代硫酸盐浸金研究进展[J].湿法冶金,2007,26(2):62-66.
- [9] Jeffrey M I. Kinetic aspects of gold and silver leaching in ammonia-thiosulfate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2001, 60(1):7-16.
- [10] Abbruzzese C, Fornari P, Massidda R, et al. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 1995, 39(1-3):265-276.
- [11] 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.
- [12] 赖才书,胡显智,字富庭.硫代硫酸盐浸金溶液中金的回收研究现状及发展趋势[J].矿冶,2011,20(2):40-43.

引用本文:李光胜,吴金甜,徐超,等.新催化体系硫代硫酸盐法提金[J].矿冶工程,2024,44(3):100-105.

- [10] 凌波.铝盐混凝沉淀除氟水[J].水处理技术,1990,16(6):418-421.
- [11] 周忠跃,赵华,张庆兰,等.硫酸锌溶液除氟工艺研究[J].云南冶金,2022,51(5):79-83.
- [12] Plankey B J, Patterson H H, Cronan C S. Kinetics of aluminum fluoride complexation in acidic waters[J]. Environmental Science & Technology, 1986, 20(2):160-165.
- [13] 侯郊,何翠萍,侯彦青,等.高盐废水脱除氟离子实验研究[J].世界有色金属,2022(12):142-145.
- [14] Eishi Y, Atsushi S, Masatoshi F. Removal of boron from wastewater by the hydroxyapatite formation reaction using acceleration effect of ammonia[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 237:277-282.
- [15] 余文娟.化学沉淀法去除饮用水中微量超标的氟、硬度及硫酸根[D].太原:太原理工大学,2012.
- [16] 欧阳石保,谌志新,陈若葵,等.用氢氧化铝从高氟废水中去除氟[J].湿法冶金,2021,40(3):245-248.
- [17] 覃剑.硫酸锌溶液中氟的脱除试验研究[J].甘肃冶金,2022,44(4):77-79.

引用本文:黄志勇,左晨鹏.聚合氯化铝-聚丙烯酰胺处理含氟废水研究[J].矿冶工程,2024,44(3):97-99.