

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.05.011

季铵盐类离子液体萃取 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 性能研究

吴汉娇,王海文,陈云龙,胡显智,字富庭

(昆明理工大学理学院,昆明 610093)

摘要: 硫代硫酸盐提金是一种绿色环保的非氰提金方法,但高效回收金浸出液中的金尚待进一步研究。以甲基三辛基氯化铵(TOMAC)为萃取剂,考察了萃取条件(萃取剂浓度、相比、萃取时间)及金浸出液性质(pH、硫代硫酸盐浓度、初始 Au(I)浓度)对 TOMAC 萃取 Au(I)性能的影响。结果表明:室温条件下, TOMAC 为萃取剂能从硫代硫酸盐金浸出液中高效萃取 Au(I)。当 A/O=1、pH=9、硫代硫酸盐浓度 0.1 mol/L、TOMAC 浓度 1.8 g/L 时,对低浓度金(0~25 mg/L)几乎能完全萃取;采用 1 mol/L NaCl 能有效反萃出 TOMAC 有机相中的 Au(I)。TOMAC 萃取 Au(I)的机制为:TOMAC 通过其表面的 Cl^- 与溶液中的 Au(I)发生离子交换,形成 $[\text{C}_{25}\text{H}_{54}\text{N}]_3[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]$ 络合物。TOMAC 对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 具有良好的萃取性能,可实现硫代硫酸盐金浸出液中 Au(I)的高效回收,具有对硫代硫酸提金技术的潜在应用价值。

关键词: 硫代硫酸盐;甲基三辛基氯化铵;离子液体;萃取;金

中图分类号:TF831

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)05-0076-07

Study on the Extraction Properties of $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ with Quaternary Ammonium Salt Type Ionic Liquids

WU Hanjiao, WANG Haiwen, CHEN Yunlong, HU Xianzhi, ZI Futing

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 610093, China)

Abstract: Thiosulfate gold extraction is a green and environmentally friendly non-cyanide gold extraction method, but the efficient recovery of gold in gold leaching solution needs further research. Using methyl trioctylammonium chloride (TOMAC) as extractant, the effects of extraction conditions (extractant concentration, phase ratio, extraction time) and the properties of gold leaching solution (pH value, thiosulfate concentration, initial Au (I) concentration) on the extraction performance of Au (I) by TOMAC were investigated. The results show that at room temperature, TOMAC as extractor can efficiently extract Au(I) from gold thiosulfate leaching solution. When A/O = 1, pH = 9, thiosulfate concentration is 0.1 mol/L, TOMAC concentration is 1.8 g/L, the low concentration of gold (0–25 mg/L) can be extracted almost completely. Au (I) in TOMAC organic phase can be effectively stripped by 1 mol/L NaCl. The extraction mechanism of Au (I) by TOMAC is as follow: TOMAC forms $[\text{C}_{25}\text{H}_{54}\text{N}]_3[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]$ complex through ion exchange of Cl^- on its surface with Au (I) in solution. TOMAC has good extraction performance for $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$, and can realize efficient recovery of Au (I) in thiosulfate gold leaching solution, which has potential application value for thiosulfate gold leaching technology.

Key words: thiosulfate; methyl trioctyl ammonium chloride; ionic liquid; extraction; gold

收稿日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52264031)

作者简介:吴汉娇(1999-),女,硕士研究生;通信作者:胡显智(1964-),男,博士,教授

黄金因其优异的化学稳定性、导电导热性、耐腐蚀性和延展性等物化性质被广泛用于首饰、电子、医疗、催化和航天航空领域^[1]。黄金从矿石中提取通常使用氰化物作为金浸出剂,但现有金矿大多品位低且含铜和碳等元素,不利于氰化法浸出^[2-3]。此外,剧毒氰化物的使用也会对生物和环境造成危害。因此,非氰化提金成为研究热点,研究较多提金试剂有:硫代硫酸盐、硫脲、硫氰酸盐、卤素和石硫合剂等^[4-6]。其中硫代硫酸盐法因其无毒、腐蚀性低、且能有效浸出铜质或碳质金矿被认为是最有应用前景的非氰提金方法^[7-8]。然而,金浸出液中的 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 难回收的问题限制了其大规模工业应用。因此,实现金的高效回收成为这一技术产业化的瓶颈^[9]。

现有的从硫代硫酸盐浸出液中回收金的主要方法包括:吸附法、金属置换法、溶剂萃取法、电解沉积法等^[10]。 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 由于电负性高和基团大等特点很难被活性炭有效吸附;虽然树脂能较好地吸附回收 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$,但树脂易粉化及非目标金属离子大量富集的问题限制了其在硫代硫酸盐提金领域的应用^[11]。此外,电沉积法和金属置换法对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的回收效率低,选择性较差^[12-13]。具有回收率高、操作和设备简单等优点的溶剂萃取法有望成为回收 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的有效方法。溶剂萃取主要在于萃取剂的选择。相比于常见的有毒、易挥发、存在环境污染隐患的有机萃取剂,具有绿色、不可燃、热力学稳定和溶解度好等理化性质的离子液体似乎更具优势^[14]。在提金方面,关于离子液体的研究多集中于氯化物介质^[15-18],用离子液体从硫代硫酸盐浸金体系中回收 $\text{Au}(\text{I})$ 的报道较少。人们已经对离子液体作萃取剂或稀释剂提取金进行了研究,哌啶、吡咯烷和吡啶等离子液体已被研究用作贵金属萃取的萃取剂^[19-21]。因此,使用这些离子液体提取微量的金是有效的。季铵盐类离子液体作为一种高效的金属离子萃取剂已经被广泛关注^[22-24,28]。然而,其对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的萃取性能研究还未见报道。因此,本文以甲基三辛基氯化铵(TOMAC)为萃取剂,乙酸乙酯为稀释剂,探索季铵盐类离子液体在硫代硫酸盐浸金体系中回收 $\text{Au}(\text{I})$ 的应用。主要考察萃取时间、初始 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度、A/O 比(水相与离子液相的体积比)、硫代硫酸盐浓度、萃取剂浓度等因素对萃取剂回收 $\text{Au}(\text{I})$ 性能的影响,并探讨了 TOMAC 萃取硫代硫酸盐金浸出液中 $\text{Au}(\text{I})$ 的机理。

1 试验部分

1.1 试验原料及试剂

甲基三辛基氯化铵(TOMAC,98%)购自麦克林公司;金粉(99.99%)购自贵研铂业股份有限公司;乙酸乙酯、过氧化氢(30%)、盐酸、硝酸、硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$),均为分析纯试剂。试验用水均为去离子水。

1.2 萃取方法及溶液中 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度的测定

$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 溶液根据文献^[25]制备:取 0.5 g 金粉加入到含有 200 mL 50%王水的烧杯中加热溶解,冷却后用 50%王水定容至 1 000 mL,即金储备液,备用。

准确移取一定体积的金储备液于烧杯中,置于电加热板上加入 1:3 盐酸(体积比)烘至近干,反复 3 次,赶去溶液中的 NO_3^- ,中途加入 10% KCl 溶液,冷却后加入硫代硫酸钠溶液,定容,即得 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 溶液。

$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 溶液浓度依据萃取试验要求而定,并用氢氧化钠或盐酸调节 pH 至设定值。

$\text{Au}(\text{I})$ 的萃取:向 250 mL 烧杯中加入 50 mL 含一定量离子液体的有机相,以及 50 mL 浓度 50 mg/L 的 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 溶液(相比 A/O = 1),室温下 500 r/min 搅拌一段时间后静置分层,澄清后进行两相分离,利用原子吸收光谱仪(AAS-300)测定水相中 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度,有机相中的 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度由萃取前后水相中金属离子浓度的差值计算得到。通过萃取率($E, \%$)衡量萃取剂从模拟浸金液中萃取 $\text{Au}(\text{I})$ 的效果,计算式:

$$E = 100\% \times (C_{\text{aq},0}V_0 - C_{\text{aq}}V) / (C_{\text{aq},0}V_0) \quad (1)$$

式中, $C_{\text{aq},0}$ 、 C_{aq} 分别表示萃取前后水相中 $\text{Au}(\text{I})$ 的浓度(mg/L); V_0 、 V 分别为萃取前后水相体积(mL)。

1.3 样品制备

取 5 mL 滤液于烧杯中,加入 3 mL 30%的 H_2O_2 氧化 15 min 后,加入 2 mL 1:3 盐酸,将 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 充分氧化,随后将烧杯置于电热板加热,待溶液变澄清后加入 3 滴 10% KCl,烘至近干,冷却后以 5%王水溶解并定容至 25 mL,过滤,取滤液测定水相中 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度;萃取后的有机相经 3~5 次去离子水洗后,进行 FTIR 表征。

2 结果与讨论

2.1 萃取条件对 TOMAC 萃取 $\text{Au}(\text{I})$ 性能的影响

2.1.1 离子液体的选择

在室温、 $\text{Au}(\text{I})$ 浓度 50 mg/L、硫代硫酸盐浓

度 0.1 mol/L、A/O=1、pH=9、时间 5 min、萃取剂浓度均为 1.8 g/L 的条件下,选用乙酸乙酯为稀释剂,考察 P204、1-辛基 3-甲基咪唑四氟硼酸([Omim]BF₄)、溴代十六烷基吡啶(CPB)、TOMAC 等 4 种离子液体对硫代硫酸盐浸金体系中 Au(I) 的萃取性能,结果如图 1 所示。

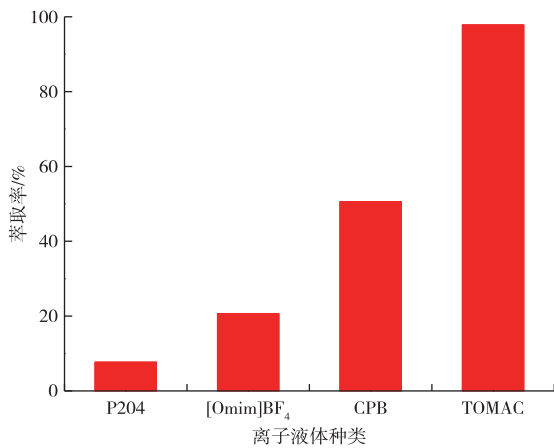


图 1 不同萃取剂对萃取硫代硫酸盐溶液中金的影响

Fig. 1 Effect of different extractant on extraction of gold in thiosulfate solution

由图 1 可知,P204 和[Omim]BF₄ 对 Au(I) 的萃取率极低,平衡时萃取率分别为 17%、11%;使用 CPB 与 TOMAC 对 Au(I) 进行萃取,其萃取率分别达到了 59%和 93%。相较而言,TOMAC 对硫代硫酸盐溶液中的 Au(I) 具有更好的萃取性能,萃取性能的差异可能是四种离子液体具有的官能团及碳链长短不同造成的。

2.1.2 离子液体浓度对萃取 Au(I) 的影响

萃取剂浓度是影响 Au(I) 萃取率的一个重要因素。适量的萃取剂不仅可以达到量化的萃取效果,也可以节约萃取成本。在室温、pH=9、A/O=1、初始 Au(I) 浓度 50 mg/L、Na₂S₂O₃ 浓度 0.1 mol/L 的条件下,调整 TOMAC 浓度为 0.1~4 g/L,探究 TOMAC 浓度对金萃取效果的影响,振荡时间固定为 5 min,试验结果如图 2 所示。

从图 2 可得,Au(I) 萃取率随 TOMAC 浓度增加而逐渐增加,当萃取剂浓度达到 1.8 g/L 时萃取率不再发生明显变化,当萃取剂浓度为 4 g/L 时萃取率为 98.65%。这一现象主要与 TOMAC 的萃取容量有关,萃取剂浓度越高,与溶液中的 Au(S₂O₃)₂³⁻ 反应越完全,从而金的萃取率越高。为进一步研究,后续萃取剂浓度控制为 1.8 g/L。

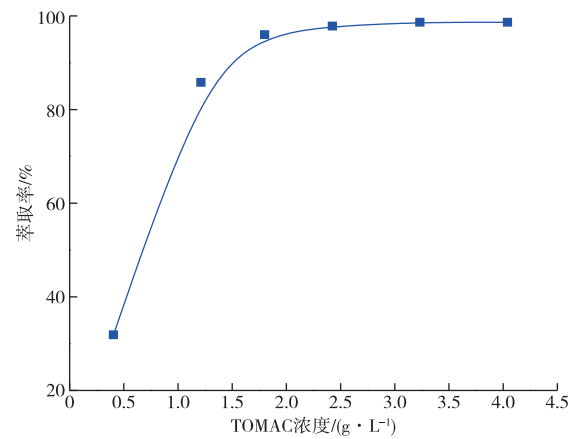


图 2 萃取剂浓度对萃取硫代硫酸盐溶液中金的影响

Fig. 2 Effect of extractant concentration on the extraction of gold in thiosulfate solution

2.1.3 时间对萃取 Au(I) 的影响

液-液萃取是两相间分子扩散及有效碰撞的过程,在室温、TOMAC 浓度 1.8 g/L、pH=9、A/O=1、初始 Au(I) 浓度 50 mg/L、Na₂S₂O₃ 浓度 0.1 mol/L 的条件下,搅拌 0.5~10 min,探究溶液中 Au(I) 的萃取率与萃取时间的关系,结果如图 3 所示。溶液中金离子的萃取率随着萃取时间的增加而增加,当萃取时间为 5 min 时,萃取趋于平衡,萃取率为 95%。因此,后续萃取时间选择 5 min。

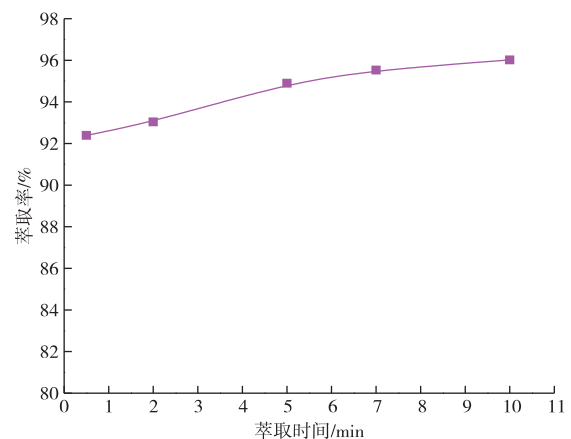


图 3 萃取时间对萃取硫代硫酸盐溶液中金的影响

Fig. 3 Effect of extraction time on the extraction of gold in thiosulfate solution

2.1.4 相比 A/O 对萃取 Au(I) 的影响

相比 A/O 是评价一个萃取体系性能好坏的重要参数。在室温,初始 Au(I) 浓度 50 mg/L、TOMAC 浓度 1.8 g/L、pH=9、Na₂S₂O₃ 浓度 0.1 mol/L 的条件

下搅拌 5 min, 研究 A/O 对 TOMAC 萃取金离子性能的影响, 结果如图 4 所示。由图 4 可得, TOMAC 对溶液中金离子的萃取性能随着 A/O 的增大逐渐减弱。当 A/O=4 时, 溶液中金离子的萃取率仅为 26.6%。这是由于有机相中萃取剂的萃取能力和萃取容量是有限的, 随着水相占比的增加, 萃取剂的有效性和萃取容量也在逐渐降低, 后续试验选择 A/O=1 进行。

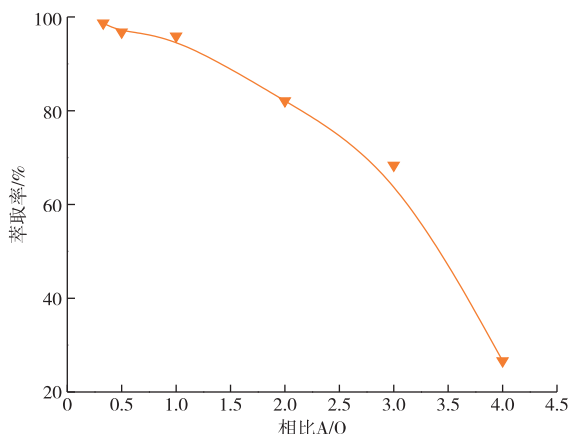


图 4 A/O 比对萃取硫代硫酸盐浸金体系中金的影响

Fig. 4 Effect of A/O ratio on the extraction of gold in thiosulfate solution

2.2 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 溶液性质对 TOMAC 萃取 Au(I) 的影响

2.2.1 溶液 pH 对 TOMAC 萃取 Au(I) 性能的影响

溶液中 H^+ 与 OH^- 离子浓度的变化会影响溶液中硫代硫酸根的形态及萃取剂的表面电荷。因此, 用 NaOH 和 HCl 调整溶液的 pH(6~11), 探究 pH 对 TOMAC 萃取 Au(I) 性能的影响。

在室温、A/O=1、初始 Au(I) 浓度 50 mg/L、TOMAC 浓度 1.8 g/L、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 浓度 0.1 mol/L 的条件下搅拌 5 min, 溶液中金离子萃取效果如图 5 所示。TOMAC 在较宽的 pH 范围内(6~11)对 Au(I) 的萃取率都高于 90%, 表明 TOMAC 在硫代硫酸盐浸金体系中的 Au(I) 萃取性能几乎不受溶液 pH 影响。在 pH 为 8~9 范围内萃取率相对较高, 分别为 94.10% 和 94.25%。实际生产中, 硫代硫酸盐金浸出液偏弱碱性, 因此, 后续萃取试验 pH 控制在 9。

2.2.2 硫代硫酸盐浓度对 TOMAC 萃取 Au(I) 性能的影响

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 是金浸出时的络离子, 在金浸出过程中起配位作用, 浸金体系中金常以 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 络离

子形式存在, 其浓度对金吸附性能的影响至关重要。在室温、pH=9、A/O=1、TOMAC 浓度 1.8 g/L、初始 Au(I) 浓度 50 mg/L、搅拌时间 5 min 的条件下, 探究 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 浓度分别为 0.01、0.05、0.1、0.25、0.5 mol/L 时, 对 TOMAC 萃取 Au(I) 性能的影响。由图 6 知: 随着 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 浓度从 0.01 mol/L 增加到 0.5 mol/L, TOMAC 对金离子的萃取率从 100% 下降到 74.93%, 表明溶液中 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的浓度对 TOMAC 萃取 Au(I) 有抑制作用, 这可能是高浓度的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 会占据含金络合物与萃取剂的反应位点, 致使萃取剂中的可交换位点减少, 从而导致萃取率降低。实际硫代硫酸盐浸金中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度大多在 0.1~0.2 mol/L, 这表明采用 TOMAC 萃取 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 是适宜的。

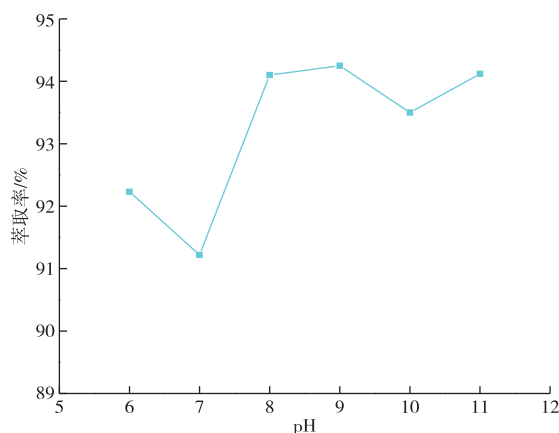


图 5 pH 对 TOMAC 萃取性能的影响

Fig. 5 Effect of pH value on extraction performance of TOMAC

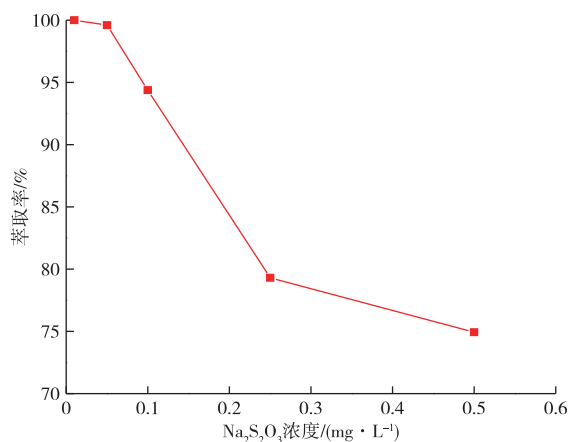


图 6 硫代硫酸钠浓度对 TOMAC 萃取 Au(I) 性能的影响

Fig. 6 Effect of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ concentration on extraction performance of Au(I) by TOMAC

2.2.3 初始 Au(I)浓度对 TOMAC 萃取性能的影响

萃取剂对金属离子的可萃取量是恒定的,萃取时的初始浓度直接关系着 TOMAC 对 Au(I)的萃取率。在室温、pH=8、A/O=1、TOMAC 浓度 1.8 g/L、Na₂S₂O₃ 浓度 0.1 mol/L、搅拌时间 5 min 的条件下,探究了不同初始金浓度对 TOMAC 萃取 Au(I)性能的影响,结果如图 7 所示。可以看出,随着 Au(I)初始浓度的增加,TOMAC 对 Au(I)的萃取率逐渐下降。当 Au(I)初始浓度高达 200 mg/L 时,TOMAC 对金离子的萃取率仅为 35.22%,而相对于 Au(I)初始浓度低(0~25 mg/L)的溶液,其 Au(I)几乎完全萃取。显然,萃取剂对金属离子的饱和萃取量是恒定的,当萃取剂中的位点耗尽后,溶液中的金离子不再被萃取到有机相中。溶液中初始金浓度越高,要求的 TOMAC 浓度越高。

2.3 TOMAC 及其与 Au(I)萃合物的表征分析

2.3.1 TOMAC 萃取-反萃分析

反萃不仅能富集有机相中的金离子,且有利于萃取试剂的循环利用。TOMAC 与 Au(I)萃合物有机相根据 1.2 节制备(初始 Au(I)浓度 50 mg/L、TOMAC 浓度 1.8 g/L、pH=9),然后分别用 50 mL 浓度为 1 mol/L 的亚硫酸钠、氢氧化钠、硫氰酸钾、硫脲、硫代硫酸钠、氯化钠溶液来反萃有机相中的 Au(I)。反萃在 A/O=1、时间为 5 min 的条件下

进行。图 8(a)为不同反萃剂对反萃效果的影响。可以看出,氯化钠和亚硫酸钠的反萃效果较佳,反萃率分别达到 97.54%和 96.6%。考虑成本,选择氯化钠作为反萃剂,以进一步探究浓度对反萃效果的影响,结果如图 8(b)所示。可以看出,随着氯化钠浓度增高,反萃率逐渐升高,当氯化钠浓度达到 1 mol/L 时反萃率不再发生明显变化。Cl⁻及 SO₃²⁻可能按照 TOMAC 的萃取机制将 Au(I)反萃至溶液中,这与硫代硫酸盐浓度影响趋势相似。

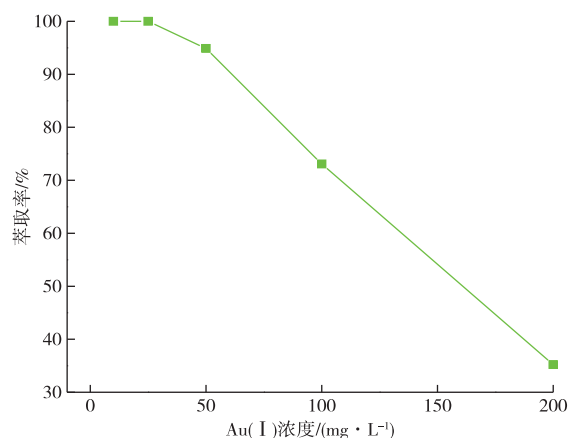


图 7 Au(I)浓度对 TOMAC 萃取性能的影响
Fig. 7 Effect of Au(I) concentration on extraction performance of TOMAC

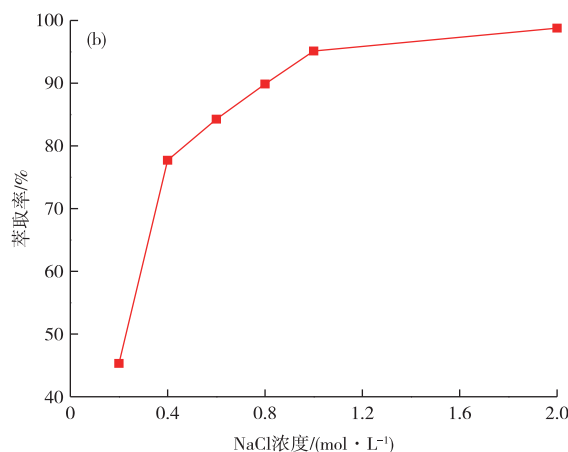
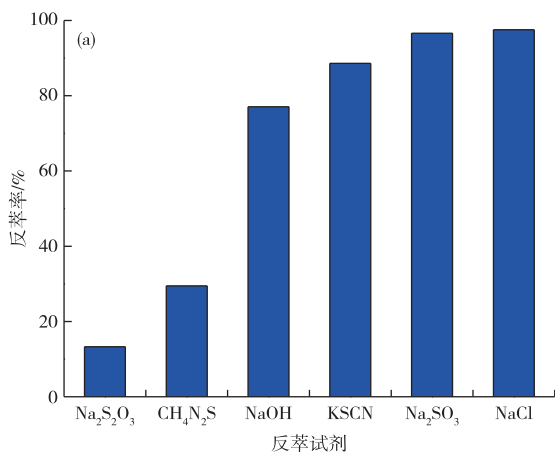


图 8 不同反萃剂对反萃效果的影响(a)及 NaCl 浓度对 TOMAC 萃取性能的影响(b)
Fig. 8 Effects of different stripping agents on stripping efficiency(a) and NaCl concentration on TOMAC extraction performance(b)

2.3.2 FTIR 分析

为详细研究 TOMAC 反应前后的官能团变化,使用傅里叶红外光谱仪对萃取剂 TOMAC、稀释剂及 TOMAC-Au 进行表征,结果如图 9 所示。图 9 中,

2 900 cm⁻¹左右为饱和 C—H 的伸缩振动,1 762 cm⁻¹为乙酸乙酯 C=O 的伸缩振动峰,1 236 cm⁻¹为 C—O 的伸缩振动峰。2 928、2 857 cm⁻¹为 TOMAC 脂肪链—CH₂ 的拉伸振动峰;1 463、1 376 cm⁻¹为

TOMAC的季铵基的特征峰^[26-28]。通过对比反应前后萃取剂的光谱图,在1 009、597.8 cm⁻¹处分别有S=O和S-O的伸缩振动峰,这说明Au(I)是以Au(S₂O₃)₂³⁻的形式被萃取到有机相中以达到分离回收金的目的^[29]。

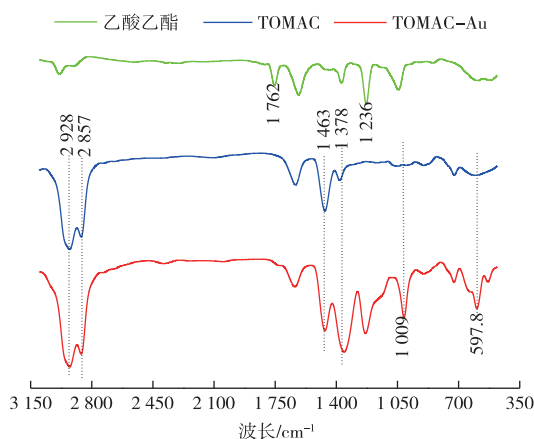
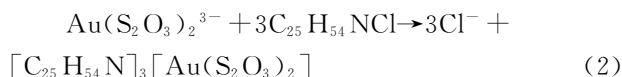


图9 乙酸乙酯、TOMAC及
TOMAC-Au的红外光谱图

Fig. 9 Infrared spectra of ethyl acetate,
TOMAC and TOMAC-Au

通过以上试验及FTIR表征结果得出TOMAC萃取金的机理为阴离子交换过程,萃取过程的反应方程式为:



硫代硫酸盐溶液中Au(I)的回收是通过C₂₅H₅₄NCl中的Cl⁻与Au(S₂O₃)₂³⁻进行离子交换,形成[C₂₅H₅₄N]₃[Au(S₂O₃)₂]络合物,将Au(I)萃取至有机相,从而分离萃取金。

3 结论

研究了TOMAC对Au(I)在硫代硫酸盐溶液中的萃取性能,通过一系列萃取试验和FTIR表征研究了TOMAC对Au(I)的萃取机理,结果表明:

1)季铵盐类离子液体TOMAC室温下从硫代硫酸盐金浸出液中萃取Au(I),在较宽的pH范围内(6.0~11.0),萃取率均达到90%,具有萃取率高、回收效果好的特点。

2)适宜条件下,1.8 g/L TOMAC对50 mg/L Au(I)的萃取率为95.90%,当金浓度小于25 mg/L时,TOMAC能够接近完全萃取;以NaCl为反萃剂进行反萃时,反萃率高达97.5%。

3)TOMAC的萃取机理为阴离子交换,即通过

C₂₅H₅₄NCl中的Cl⁻与Au(S₂O₃)₂³⁻进行离子交换,形成[C₂₅H₅₄N]₃[Au(S₂O₃)₂]络合物。

4)TOMAC具有高效的金离子回收能力,是回收Au(I)的潜在候选萃取剂。

参考文献

- [1] MAHANDRA H, FARAJI F, GHAREMAN A. Novel extraction process for gold recovery from thiosulfate solution using phosphonium ionic liquids [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(24): 8179-8185.
- [2] WAN R Y, LEVIER K M. Solution chemistry factors for gold thiosulfate heap leaching [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1/2/3/4): 311-322.
- [3] NAZARI A M, GHAREMAN A, BELL S. A comparative study of gold refractoriness by the application of QEMSCAN and diagnostic leach process [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 169: 35-46.
- [4] ZHAO L, HU X Z, ZI F T, et al. Development of stable, efficient, and recyclable amine-containing microspheres for gold(I) thiosulfate complex recovery [J]. 2022, 10(44): 14624-14635.
- [5] 张宏伟,王旭峰,陈俊南,等.酒石酸盐-硫代硫酸盐协同浸金[J].有色金属(冶炼部分),2023(5):32-36.
ZHANG H W, WANG X F, CHEN J N, et al. Tartrate-thiosulfate collaborative leaching of gold [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(5): 32-36.
- [6] 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.
FU Y, CHEN J N, XIE F, et al. Research status of gold leaching technology with thiosulfate [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(12): 43-53.
- [7] ZENG S L, JIA F F, YANG B P, et al. In-situ reduction of gold thiosulfate complex on molybdenum disulfide nanosheets for a highly-efficient recovery of gold from thiosulfate solutions [J]. Hydrometallurgy, 2020, 195: 105369. DOI:10.1016/j.hydromet.2020.105369.
- [8] SOLEYMANI M, SADRI F, GHAREMAN A. Effect of mixing acidic and alkaline pressure oxidation discharges with different ratios on gold thiosulfate leaching efficiency [J]. Hydrometallurgy, 2021, 205: 105744. DOI:10.1016/j.hydromet.2021.105744.
- [9] MAHANDRA H, FARAJI F, AZIZITORGHABEH A. Selective extraction and recovery of gold from complex thiosulfate pregnant leach liquor using Cyphos IL 101 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,

- 2022,61(16):5612-5619.
- [10] 梁雨梦,陈鹏,贾菲菲. 硫代硫酸盐浸金液中金回收的研究进展[J]. 金属矿山,2020,49(10):41-50.
LIANG Y M, CHEN P, JIA F F. A review on gold recovery from thiosulfate leaching solution[J]. *Metal Mine*, 2020, 49(10): 41-50.
- [11] DONG Z L, TAO J, XU B, et al. Recovery of gold from pregnant thiosulfate solutions by the resin adsorption technique[J]. *Metals*, 2017, 7(12): 555. DOI:10.3390/met7120555.
- [12] GROSSE A C, DICINOSKI G W, SHAW M J, et al. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors: a review[J]. *Hydrometallurgy*, 2003, 69(1): 1-21.
- [13] ARIMA H, FUJITA T, YEN W T. Gold cementation from ammonium thiosulfate solution by zinc, copper and aluminium powders[J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(3): 485-493.
- [14] GUO J J, TUCKER Z D, WANG Y, et al. Ionic liquid enables highly efficient low temperature desalination by directional solvent extraction[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 437. DOI:10.1038/s41467-020-20706-y.
- [15] XING W D, SEUNG L M, GAMINI S. Recovery of metals from chloride leach solutions of anode slimes by solvent extraction. Part II: recovery of silver and copper with LIX 63 and Alamine 336 [J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 180: 49-57.
- [16] XING W D, LEE M S, KIM Y H. Separation of gold(III) from hydrochloric acid solution containing platinum(IV) and palladium(II) by solvent extraction with Cyanex 272 and LIX 63[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 59: 328-334.
- [17] WANG M, WANG Q, GENG Y Q, et al. Gold(III) separation from acidic medium by amine-based ionic liquid[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 304: 112735. DOI:10.1016/j.molliq.2020.112735.
- [18] NAVARRO R, LIRA M A, SAUCEDO I, et al. Amberlite XAD-1180 impregnation with Cypos IL101 for the selective recovery of precious metals from HCl solutions[J]. *Gold Bulletin*, 2016, 50(1): 7-23.
- [19] TONG Y, YANG H X, LI J, et al. Extraction of Au(III) by ionic liquid from hydrochloric acid medium [J]. *Separation & Purification Technology*, 2013, 120: 367-372.
- [20] MATSUMIYA M, KINOSHITA R, TSUCHIDA Y, et al. Recovery of iridium by solvent extraction and direct electrodeposition using phosphonium-based ionic liquids[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168(5): 056501. DOI:10.1149/1945-7111/abfb34.
- [21] 白向林,李勇,吴喜龙,等. 离子液体在贵金属回收中的研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(7):48-54.
BAI X L, LI Y, WU X L, et al. Research progress of ionic liquids in recovery of precious metals [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(7): 48-54.
- [22] NGUYEN V T, SOFÍA R, KOEN B. Separation of precious metals by split-anion extraction using water-saturated ionic liquids[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22: 8375-8388.
- [23] ZSABKA P, HECKE V K, ADRIAENSEN L, et al. Solvent extraction of Am(III), Cm(III), and Ln(III) ions from simulated highly active raffinate solutions by TODGA diluted in Aliquat-336 nitrate ionic liquid[J]. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2018, 36(6): 519-541.
- [24] WANG W, YANG H L, CUI H M, et al. Application of bifunctional ionic liquid extractants[A336][CA-12] and[A336][CA-100]to the lanthanum extraction and separation from rare earths in the chloride medium[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50: 7534-7541.
- [25] YU H, HU X Z, ZI F T, et al. Adsorption of the gold-thiosulfate complex ion onto cupric ferrocyanide(CuFC)-impregnated activated carbon in aqueous solutions[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 154: 111-117.
- [26] WEI W, REDDY H K, BEDIAKO J K, et al. Aliquat-336-impregnated alginate capsule as a green sorbent for selective recovery of gold from metal mixtures [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 289: 413-422.
- [27] SITANDO O, SENANAYAKE G, DAI X, et al. A review of factors affecting gold leaching in non-ammoniacal thiosulfate solutions including degradation and in-situ generation of thiosulfate[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 178: 151-175.
- [28] WANG H W, HU X Z, ZI F T, et al. Aliquat-336 impregnated chitosan microspheres for Au(I) extraction from thiosulfate solution: Preparation, adsorption mechanism, and application[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 385: 122357. DOI:10.1016/j.molliq.2023.122357.
- [29] 王海文. Aliquat-336 萃取剂浸渍壳聚糖微球吸附[Au(S₂O₃)₂]³⁻的性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
WANG H W. Adsorption properties of Aliquat-336 impregnated chitosan microspheres for [Au(S₂O₃)₂]³⁻ [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.