

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2025.01.001

引用格式: 陈俊南, 衷水平, 翁威, 迟晓鹏, 谭文, 蔡教忠, 曾广圣, 谢锋. 湿法提金技术进展及机理探讨[J]. 矿冶, 2025, 34(1): 1-11.

CHEN Junnan, ZHONG Shuiping, WENG Wei, CHI Xiaopeng, TAN Wen, CAI Jiaozhong, ZENG Guangsheng, XIE Feng. Insight into the progress and mechanism of hydrometallurgical gold leaching technologies[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(1): 1-11.

湿法提金技术进展及机理探讨

陈俊南^{1,2} 衷水平^{1,2} 翁威^{1,2} 迟晓鹏^{1,2} 谭文^{1,2}
蔡教忠^{1,2} 曾广圣^{1,2} 谢锋³

(1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350108;

2. 福建省新能源金属绿色提取与高值利用重点实验室, 福州 350108;

3. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘 要: 氰化物具有高毒性, 在黄金选冶过程中会产生大量的含氰废水及尾渣亟待处理。随着环保政策的日益完善及人们环保意识的逐渐增强, 绿色、无毒的非氰浸金药剂逐渐成为研究热点。在过去几十年中, 已研发了三十余种非氰浸金药剂及方法, 包括硫脲、硫代硫酸盐、硫氰酸盐、卤化法、多硫化物法和氨基酸等。由于存在种种技术障碍, 当前非氰浸金药剂的开发与应用大都集中在实验室规模或中试试验规模。此外, 还有部分学者聚焦于新型环保提金药剂的开发与应用。这类提金药剂在某些复杂难处理金矿工业实践中具有比氰化物更好的选择性、更快的浸出速率和安全环保等优点, 但也存在药剂耗量较大、使用条件复杂、提金机理不明确, 提金尾液污染环境等问题。鉴于此, 本文详细介绍了各类浸金药剂的性质, 系统阐述和讨论各类药剂的提金机理、发展现状及优缺点, 最后总结并展望了各类提金药剂的潜在工业应用前景。

关键词: 湿法冶金; 金; 氰化法; 非氰化法; 浸金药剂; 浸出机理

中图分类号: TF831; TD953 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2025)01-0001-11

Insight into the progress and mechanism of hydrometallurgical gold leaching technologies

CHEN Junnan^{1,2} ZHONG Shuiping^{1,2} WENG Wei^{1,2} CHI Xiaopeng^{1,2} TAN Wen^{1,2}
CAI Jiaozhong^{1,2} ZENG Guangsheng^{1,2} XIE Feng³

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory of Green Extraction and High value Utilization of New Energy Metals, Fuzhou 350108, China;

3. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Cyanide is a high toxic reagent, and there are a large amount of cyanide containing wastewater and tailings in the gold smelting process, which urgently need to be treated. With the increasing improvement of environmental policies and the increasing awareness of environmental protection among people, green, non-toxic and non-cyanide gold leaching agents have gradually become a research hotspot. Over the past few decades, more than thirty non cyanide gold leaching agents and methods have been developed, including thiourea, thiosulfate, thiocyanate, halogenation, polysulfide, and amino acids. Due to various technical barriers, the development and application of non-cyanide gold leaching agents are mostly focused on laboratory scale or pilot scale trials. In addition, some scholars focus on the development and application of new environmentally friendly gold extraction agents. This type of gold extraction agent has advantages such as better selectivity, faster leaching rate, and safety and environmental

收稿日期: 2024-12-11

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2023J05024); 福建省清洁能源材料重点实验室开放基金资助项目(CXLH-202401)

第一作者: 陈俊南, 博士, 讲师, 主要从事湿法冶金技术研究。E-mail: chenjunnan@fzu.edu.cn

通信作者: 衷水平, 博士, 教授; E-mail: 283320086@qq.com

protection than cyanide in some complex and refractory gold mining industrial practices. However, there are also some problems such as high reagent consumption, complex usage conditions, unclear gold extraction mechanism, and environmental pollution caused by gold extraction tailings. In view of the above problems, this paper provides a detailed introduction to the properties of various gold leaching agents, systematically elaborates and discusses the gold extraction mechanisms, development status, advantages and disadvantages of various agents, and finally summarizes and prospects the potential industrial application prospects of various gold extraction agents.

Key words: hydrometallurgy; gold; cyanide process; non-cyanide process; gold leaching agents; leaching mechanism

氰化法提金具有工艺成熟、流程简单、试剂价格便宜等优点,目前仍是黄金生产行业的首要选择。但是氰化物有剧毒,含氰废水及尾渣的大量排放可能会污染生态环境及危害人体健康。2016年,我国环保部发布的《国家危险废物名录》(以下简称《名录》)将“采用氰化物进行黄金选矿过程中产生的氰化尾渣”正式纳入管理范畴(废物类别:HW33,废物代码:092-003-33)^[1]。2018年1月1日起,国家对这类危险废物征收高达1 000元·t⁻¹的环境保护税^[2],这一举措对黄金生产行业构成严峻挑战。中国黄金协会积极制定了《黄金行业氰渣污染控制技术规范》,并成功推动了氰化尾渣在2021年实施的新版《名录》中临时豁免^[3]。进一步地,《国家危险废物名录(2025版)》对氰化尾渣的描述做出了调整,将“采用氰化物进行黄金选矿过程中产生的氰化尾渣和含氰废水处理污泥”变更为“采用氰化物进行黄金选矿过程中产生的含氰废水处理污泥和金精矿氰化尾渣”,代表着黄金行业全泥氰化尾渣和堆浸氰化尾渣从《名录》中移除^[4]。这一里程碑式的事件,标志着黄金行业在绿色发展道路上取得了显著进展。但是黄金生产企业仍面临氰化尾渣的高治理成本问题,促使行业迫切寻求解决方案。因此,研究开发绿色、无毒、环境友好型的非氰提金技术,从源头上消除含氰尾矿废液的环境危害问题,已成为我国黄金行业实现健康可持续发展的关键课题。在过去几十年中,湿法提金技术取得了显著进展,本文将系统介绍并归纳各类提金方法,包括氰化法、非氰化法以及新型环保提金药剂,重点论述各类药剂的提金机理、发展现状及优缺点,并对各类提金药剂的潜在工业应用前景进行展望。

1 金的浸出原理

一价金离子或三价金离子在水溶液中均不能稳定存在,易被还原为单质金。为了在水溶液中稳定简单金离子,有必要引入络合配体和适当的氧化剂,以确保浸金反应的正常发生。无论浸金试剂是固态、

液态还是气态,含金化合物总是共价结合,而且到目前为止大多数是配合物^[5]。

金的不同价态取决于浸出体系中氧化剂的强弱。当体系中氧化剂的氧化性较弱时,如O₂、Cu²⁺、Fe³⁺等氧化剂,金被氧化成一价金离子,进而与溶液中的配体(L)结合形成稳定的配合物,反应式见式(1)和式(2)。常见的一价金配合物包括Au(CN)₂⁻、Au(S₂O₃)₂³⁻和Au(NH₂CSNH₂)₂⁺等。



当体系中氧化剂的氧化性较强时,如Cl₂、Br₂、Ca(ClO)₂、HNO₃等氧化剂,金被氧化成三价金离子,常见的三价金配合物包括AuCl₄⁻、AuBr₄⁻、AuI₄⁻和Au(SCN)₄⁻等。

2 金的浸出方法

金的浸出方法主要包括氰化法和非氰化法。近年来,研究较为广泛的非氰提金技术包括硫脲、硫代硫酸盐、硫氰酸盐、卤化法、多硫化物法和氨基酸等。还有部分研究人员和黄金生产企业聚焦于新型环保提金剂的开发与应用,以替代传统氰化浸金药剂。下面将详细介绍各类提金技术的基本原理、发展现状及优缺点。

2.1 氰化法

氰化法是一种利用碱金属氰化物(NaCN、KCN等)的水溶液作为溶剂,浸出并提取金银矿石中金银的技术方法。1887年,英国冶金专家John MacArthur首次发表了题为“Process of Obtaining Gold and Silver from Ores”的专利,详细介绍了利用氰化物浸出矿石中金、银的方法。经过一百多年的不断应用与持续发展,氰化法因具有金回收率高、试剂价格便宜和对矿石适用性强等特点,已成为现代黄金提取的主要方法^[6]。

图1为金-水系和金-氰根-水系的电位-pH值图。由图1(a)可知,在水溶液的热力学稳定区域内,

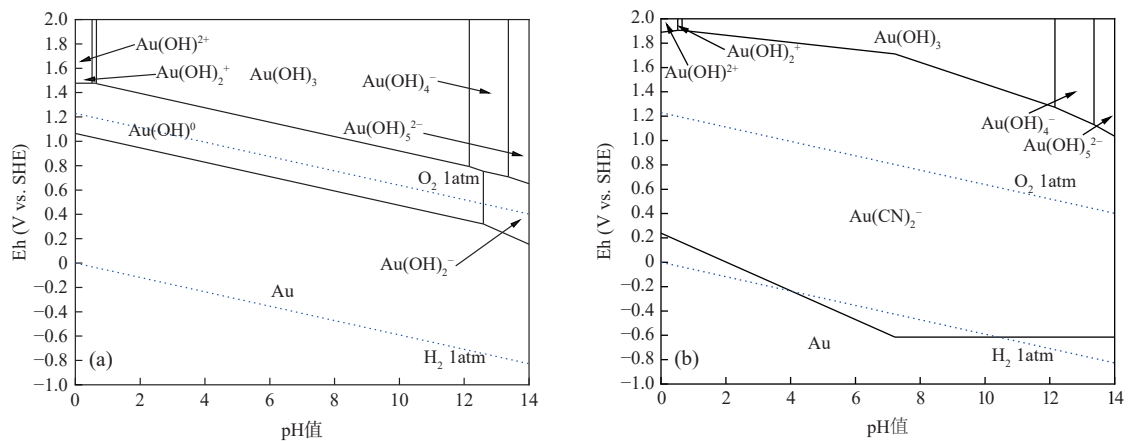


图1 电位-pH值图 (a) Au-H₂O体系; (b) Au-CN⁻-H₂O体系(298 K, 1 atm, [Au]_T=10⁻⁴ mol·L⁻¹, [CN⁻]_T=10⁻² mol·L⁻¹)

Fig. 1 Eh-pH diagrams for (a) Au-H₂O system, (b) Au-CN⁻-H₂O system (298 K, 1 atm, [Au]_T=10⁻⁴ mol·L⁻¹, [CN⁻]_T=10⁻² mol·L⁻¹)

金主要以单质金的形式存在；提高溶液电位，单质金会转变为Au(OH)⁰或Au(OH)₃。Au⁺和Au³⁺的标准还原电位分别为+1.69 V和+1.50 V，表明金离子的氧化性很强。由图1(b)可知，氰根配体可有效与Au⁺络合，将Au⁺的标准还原电位从+1.69 V降低至-0.57 V，且Au(CN)₂⁻配合物能在较宽的电位和pH值范围内稳定地存在于水的热力学稳定区域，为金的浸出提供了有利条件。

目前，全世界约80%以上的黄金都是以Au(CN)₂⁻配合物的形式浸出进入溶液，进而被选择性回收^[7]。然而，氰化物有剧毒。含氰废水及废渣的简单排放会污染水体，引起鱼类、家畜乃至人群急性中毒。随着相关环保法律法规的不断出台与完善，以及人们对环境保护意识和公共安全意识的逐渐增强，氰化法的工业化应用受到前所未有的阻碍与挑战。含氰

废水及尾渣的高治理成本问题也为黄金企业带来沉重负担。因此，湿法提金系统亟待开发出一种能有效替代氰化工艺的绿色、无毒、非氰浸金药剂。

2.2 非氰化法

表1汇总了部分Au(I/III)配合物的稳定常数及标准电位。由表1可知，金与氰化物形成的Au(CN)₂⁻配合物的稳定常数大(logβ=38.30)，性质非常稳定，比硫代硫酸盐、硫脲和硫化物等配体的稳定常数高出几个数量级。根据浸出体系的适宜pH值可以看出，除氰化物溶液pH值要求大于9以外，硫代硫酸盐、氨及氨基酸浸金体系的适宜pH值也在碱性区间，而硫脲体系、氯化体系和硫氰酸盐体系的溶液pH值都需要控制在3以下。

非氰浸金体系的开发与应用极大地丰富和促进了黄金生产企业对不同含金物料的选择性提取及回

表1 Au(I/III)配合物的稳定常数及标准电位^[7]

Table 1 Stability constants and standard potentials for Au(I/III) complexes^[7]

编号	配体	配合物	稳定常数/logβ	标准电位/V	pH值
1	CN ⁻	Au(CN) ₂ ⁻	38.30	-0.57	>9
2	NH ₂ CSH ₂ N	Au(NH ₂ CSH ₂ N) ₂ ⁺	23.30	0.38	<3
3	Cl ⁻	AuCl ₂ ⁻	9.10	1.11	<3
		AuCl ₄ ⁻	25.30	1.00	<3
4	Br ⁻	AuBr ₂ ⁻	12.00	0.98	5~8
		AuBr ₄ ⁻	32.80	0.97	5~8
5	I ⁻	AuI ₂ ⁻	18.60	0.58	5~9
		AuI ₄ ⁻	47.70	0.69	5~9
6	S ₂ O ₃ ²⁻	Au(S ₂ O ₃) ₂ ³⁻	28.70	0.17	8~10
7	SCN ⁻	Au(SCN) ₂ ⁻	17.10	0.66	<3
		Au(SCN) ₄ ⁻	43.90	0.66	<3
8	HS ⁻	Au(HS) ₂ ⁻	29.90	-0.25	<9
9	SO ₃ ²⁻	Au(SO ₃) ₂ ³⁻	15.40	0.17	>4
10	NH ₃	Au(NH ₃) ₂ ⁺	13.00	0.57	>9
11	Glycinate	Au(NH ₂ CH ₂ COO) ₂ ⁻	18.00	0.63	9

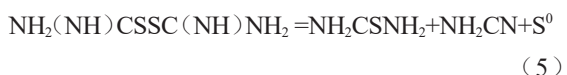
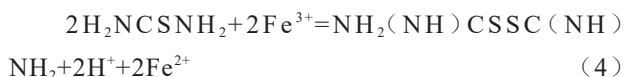
收。以下将重点介绍几种可能的具有工业化应用前景的非氰浸金技术及方法。

2.2.1 硫脲法

硫脲(H_2NCSNH_2), 也称硫代尿素, 是一种具有还原性质的含硫有机化合物, 水溶性好, 能与多种金属离子如 Au、Cu、Pb、Zn 等形成稳定的配合物。在碱性条件下, 硫脲易发生分解反应, 生成硫化物和氨基氧。而氨基氧会进一步转化为尿素, 进而造成试剂的额外损耗。硫脲浸金反应通常在酸性条件下进行, Fe^{3+} 是目前最合适的氧化剂^[8], 发生的化学反应见式(3)。



硫脲也会被三价铁氧化成二硫甲醚。二硫甲醚是活性很高的氧化剂, 对金的溶解起到促进作用。但是在硫脲浸金过程中, 随着二硫甲醚的不断累积, 硫脲会不可逆地分解为硫或硫化氢, 形成钝化层覆盖在金表面, 阻碍金的浸出, 造成试剂的大量消耗。

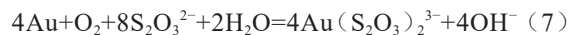


影响硫脲浸金的因素主要有酸度、温度、氧化剂、添加剂、矿物组分及外场等。2022年, ZHANG等采用机械活化与硫脲浸出相结合的方法从难浸金精矿焙砂中提取金^[9], 并给出如下最佳浸出条件: 硫脲浓度 $2.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 Fe^{3+} 浓度 $2.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、木质素磺酸钠浓度 $0.60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、输入频率 45 Hz、液固体积质量比(以下简称“液固比”)为 4:1、温度 40°C 、浸出时间 55 min。木质素磺酸钠的加入使金提取率从 93.60% 提高到 96.50%。2020年, 任传裕等采用生物预氧化—酸性硫脲浸金联合工艺处理新疆某低品位难处理金矿^[10], 得到的较优硫脲浸出条件为: 温度 25°C 、pH 值 1.50、液固比 5:1、硫脲浓度 $25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、搅拌速度 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、浸出时间 5 h。在此条件下, 金的最高浸出率可达到 97.84%。

相较于传统氰化提金工艺, 硫脲浸金法展现出更低的毒性, 对环境和人体健康更为友好, 同时还具有溶金速率快、杂质干扰离子少等优点, 但是因硫脲成本高、稳定性差, 且在浸出过程中存在试剂消耗量大等问题, 硫脲浸金法与工业应用预期仍有一定差距。研究人员正在积极优化发展酸性硫脲浸金技术的工业化应用^[11], 包括氧化剂的选择优化, 硫脲浸金机制的深化理解, 以及联合浸金工艺的开发与实施。

2.2.2 硫代硫酸盐法

硫代硫酸盐无毒、易溶于水, 能与多种金属离子结合, 是一种常见的络合剂。金在硫代硫酸盐溶液中的浸出反应见式(7)。



常温常压下, 金在硫代硫酸盐溶液中的溶解速度非常缓慢。主要原因在于溶液中的氧含量非常有限, 且溶解氧对金的催化溶解反应活性较低。研究表明, 铜离子和氨的加入能极大地促进金的溶解过程^[12]。其中, 铜离子作为氧化剂, 可起到催化氧化金浸出的作用, 氨作为配体可与铜离子结合形成 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 配合物, 防止铜离子在碱性条件下的大量水解。而且, 氨也是金离子的有效配体, 氨协同硫代硫酸根浸金, 可加快金的溶解速率^[13]。然而 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 配合物在催化金浸出的同时, 也会氧化硫代硫酸根($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)生成连四硫酸盐($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$), 造成试剂的大量消耗。同时, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 会进一步氧化分解为 $\text{S}_3\text{O}_6^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 等多种含硫化合物。这些杂质可能会累积在金表面, 形成钝化层, 阻碍浸出液中有有效试剂与金的接触, 从而抑制金的浸出^[14, 15]。因此, 传统的铜-氨-硫代硫酸盐体系在浸金过程中对氨浓度一般要求较高 ($>1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 这一方面是为了降低铜离子对硫代硫酸盐的反应活性, 另一方面是可以进行协同浸金, 提高浸金速率。然而氨的大量使用不仅影响现场操作环境, 增加操作成本, 还会造成氨氮废水的环境污染^[16]。

学者们对氨态硫代硫酸盐浸金体系进行了大量研究, 包括体系热力学, 浸出动力学, 体系稳定性及添加剂等^[17-20]。如 AYLMOORE 和 MUIR 对铜-氨-硫代硫酸盐体系进行了热力学分析, 并构建了铜-氨-硫代硫酸盐体系和金-氨-硫代硫酸盐体系的电位-pH 值图和物种分布图^[17]。结果表明: 铜-氨-硫代硫酸盐浸金体系的最佳电位值在 0.25~0.30 V, pH 值在 9~10。金的浸出过程主要由 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}/\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$ 氧化还原电对催化氧化。FENG 和 DEVENTER 研究了硫化物对铜-氨-硫代硫酸盐溶液中溶金速率的影响^[18]。结果表明: 金在硫化物存在时的浸出率顺序依次为: 磁黄铁矿 > 毒黄铁矿 > 方铅矿 > 黄铁矿 > 闪锌矿 > 黄铜矿。MOHAMMADI 等使用铜-氨-硫代硫酸盐浸出某难处理氧化金矿^[19], 发现在最佳条件下, 用浓度分别为 0.10、3、0.012 5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫代硫酸盐、氨和硫酸铜混合溶液在 40°C 浸出 16 h, 金的提取率最高可达到 55%。WANG 等研究了某碳质金矿在铜-氨-硫代硫酸盐溶液中的浸出行为, 考察了微波焙烧

对强化浸金的影响机理^[20]。结果表明：在 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CuSO_4 、 $0.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、初始pH值11.00、 50°C 和浸出时间5 h条件下，金的最大浸出率为74.20%，高于67%的常规氰化浸金率。在 500°C 、30 min的微波焙烧条件辅助处理时，金的浸出率更高，可达到90.20%。

硫代硫酸盐因绿色无毒、浸金速率快、试剂价格便宜等优点被认为是最有前景的非氰替代药剂。对于氰化法难处理的碳质金矿和含铜金矿等矿石，硫代硫酸盐体系表现出良好的浸出性能，提金率优于常规氰化工艺^[21]。但是传统的铜-氨-硫代硫酸盐体系因氨的使用所引起的毒性、氨氮废水及试剂消耗量大等问题极大地限制了硫代硫酸盐浸金工艺的发展与应用。因此，研究开发无氨-硫代硫酸盐提金技术体系，突破现有硫代硫酸盐体系的技术瓶颈，是推动和促进其工业化应用的根本途径。新配体如乙二胺(EDA)、乙二胺四乙酸(EDTA)、三乙胺(TEA)、草酸、酒石酸、苹果酸及柠檬酸等的引入，极大地丰富和拓展了硫代硫酸盐浸金体系^[22-26]。各种添加剂如腐殖酸(HA)、羧甲基纤维素(CMC/CMS)、聚乙烯醇磷酸铵(AAPP)、正磷酸盐和聚磷酸盐等的使用，均可有效降低铜离子对硫代硫酸盐的反应活性，降低试剂消耗量，提高金浸出率^[27-30]。还有部分学者采用镍基、钴基、铁基化合物取代传统铜基催化剂，提出和构建了新型硫代硫酸盐体系协同催化氧化金的浸出^[31-33]。新体系的开发与应用极大地丰富和促进了硫代硫酸盐浸金工艺的工业化进程。

2.2.3 硫氰酸盐法

硫氰酸盐浸金体系是以硫氰酸盐(NH_4SCN 、 NaSCN)和氧化剂包括 Fe^{3+} 、 MnO_2 、 O_2 以及 H_2O_2 等组成。以 Fe^{3+} 为例，其浸金机理如下所示。



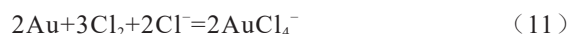
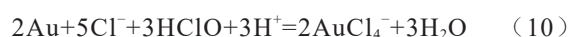
由于硫氰酸盐的毒性远低于氰化物，且稳定性优于硫脲，因此，硫氰酸盐是一种非常有前景的非氰浸金药剂^[34]。但硫氰酸盐体系通常在酸性条件下浸出金、银，和硫脲试剂一样存在对设备抗酸腐蚀要求高，试剂使用量及消耗量大等问题。在实际矿石浸出过程中，随着伴生矿物的逐渐溶解，溶液pH值逐渐升高，金的浸出率则不断降低。张建元等^[35]针对低硫金精矿和焙烧金精矿性质，采用硫氰酸盐法浸金，考察了硫氰酸钠浓度、浸出时间、二氧化锰添加量、甘氨酸添加量等对金浸出率的影响，获得了最佳浸金条件，并与氰化法进行了对比分析，结果表明：在

浸出时间48 h、溶液pH值为1、液固比2:1、二氧化锰添加量 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、甘氨酸添加量 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的最佳条件下，当硫氰酸钠浓度为 $1.00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，低硫金精矿金品位从 $47.22 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 降到 $9.11 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ，金浸出率为80.70%，其金浸出率和浸金速率均小于氰化法；当硫氰酸钠浓度为 $0.60 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，焙烧金精矿金品位从 $51.90 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 降到 $1.50 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ，金浸出率为97.10%，其金浸出率和浸金速率都接近于氰化法。2021年，黄彪林等^[36]研究了用硫氰酸盐和硫酸铁从金精矿生物氧化渣中浸出金，结果表明：粒度为 -37 mm 占97%的氧化渣在 750°C 下焙烧2 h，用 $1.00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫氰酸盐和 $0.60 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸铁溶液浸出，控制体系pH值为2，液固比3:1，浸出4 h和常温常压条件下，金浸出率达94.61%。

硫氰酸盐体系浸金效果与氰化物相当，并且具有浸出速度快，浸出环境适应能力强，酸碱条件下均可进行浸出的优点^[37]。然而，硫氰酸盐浸金工艺依然存在一些问题需要深入解决，如硫氰酸盐法需要较高浓度的硫氰酸铵，浸出和过滤设备防腐蚀要求高、富液中金的回收、浸出液的循环使用、研究各种药剂与硫氰酸盐协同浸金的工艺与机理、预处理和碱浸工艺的优化等，从而使得硫氰酸盐广泛替代氰化物浸金，实现工业化应用。

2.2.4 卤化法

卤素(Cl、Br、I)的化学性质非常活泼，易失去电子，是常见的强氧化剂。同时，卤素本身也可直接作为配体与金属离子进行络合形成稳定的配合物，被广泛地应用于冶金工业中。氯化法提金的主要反应见式(9~11)。溴化法和碘化法具有与氯化法相似的浸出原理。



由于氯的活性很高，金表面不存在被钝化的现象。因此，氯化法浸金具有浸出速率快、浸出率高的优点。氯化法提金适用于处理碳质金矿、经酸洗后的金矿石和含砷精矿等^[38]。HASAB等^[39]研究发现，在金浸出过程中，由于硫化物的氧化和酸的生成，矿浆pH值逐渐降低，在初始pH值11、搅拌速度 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和浸出温度 25°C 条件下，用 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ 、 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的精矿，2 h后金的浸出率达到82%。CARVALHO等^[40]研究了由次氯酸钙和亚氯酸钠

混合溶液从某氧化型金矿中浸出金。结果表明：氰化法处理该矿石 24 h 后，金的浸出率达到 90%， $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ 和 NaCl 的理想浓度分别为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，最佳浸出 pH 值为 4~6；在优化条件下，金的最大提取率可达到 84%；与相同条件下的氰化法相比，次氯酸盐体系在更短的时间内实现了更高的提金率。但是氯化法也存在一些缺点与不足，如试剂消耗量大、试剂价格高、设备腐蚀严重、试剂再生困难等，氯化法浸金的工业化应用有待进一步研究。

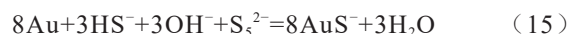
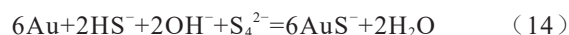
溴化法提金具有浸出速率快、浸出率高、无毒、对浸出 pH 值变化适应性强和试剂可循环使用等优点。但是溴元素具有危险性，很难安全地储存及运输，因此，溴化法提金也一直未能在工业上推广使用。宋庆双和李云巍^[41]讨论了溴化法提取金银的热力学条件，用高银金精矿进行了溴化法提金试验。结果表明，一次浸出焙烧矿有价金属元素浸出效果明显，金、银的浸出率分别为 98% 和 95%。SOUSA 等^[42]使用含溴试剂 (NaBr 、 NaOCl 和 HCl) 浸出葡萄牙某金矿，探究了温度、固液比、浸出试剂的组成、搅拌速度、浸出时间、预处理的效果以及向溴溶液中添加氧化剂等对溴化提金溶解速率的影响，发现当浸出条件为 4.40 g NaBr 、 30 mL NaOCl 、 42 mL HCl 和 $28 \text{ mL H}_2\text{O}$ 、液固比为 1:1、温度在 95°C 、搅拌速度为 $450 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、不调节 pH 值和浸出时间为 4 h 时，金矿经焙烧后溴化提金率最高，可达到 89%；添加 H_2O_2 和 FeCl_3 可获得 80% 的金回收率，但环境危害要低得多。

碘与金形成的络合物比溴和氯与金形成的络合物更稳定，这是碘化物浸金的优势，碘-碘化物体系还具有较低的电势和较高的浸出速率，对贵金属浸出有很好的选择性等优点^[43]。但是制约碘化法浸金技术发展的主要原因是浸出成本较高，其工业化的关键是如何降低浸出成本以及如何从浸出液中回收金和碘。徐渠等^[44]针对碘化法从废弃印刷线路板中提取金的工艺设计，分别考察了碘的质量分数、 $n(\text{I}_2)/n(\text{I}^-)$ 值、液固比、 H_2O_2 的质量分数、pH 值、浸出时间和浸出温度对金浸出率的影响，给出的最佳工艺条件：碘的质量分数 1.1%、 $n(\text{I}_2):n(\text{I}^-)=1:10$ 、 H_2O_2 质量分数 1.5%、浸出时间 4 h、液固比 10:1、浸出温度 25°C 、溶液 pH 值为中性，该条件下的金浸出率可达到 97.50%。康华等^[45]针对碘化法浸金工艺存在成本高、药剂消耗大等问题，基于单因素试验，采用 Box-Behnken Design 响应面法设计试验方案，考察碘初始质量浓度 (A)、液固比 (B) 和浸出时

间 (C) 对金浸出率的影响，建立响应面回归模型，发现变量因素及其交互作用与金浸出率的主效应关系为： $C>B>A$ ， $AC>BC>AB$ ，在粒径小于 $74 \mu\text{m}$ 的颗粒占总量的 99.30%、pH 值 6~7、碘初始质量浓度 $7.20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、碘与碘化钾摩尔比 1:6、液固比 3.8:1、浸出时间 3.7 h 的最佳工艺条件下，金浸出率为 91.02%，与预测值 91.25% 非常相近。

2.2.5 多硫化化合物法

多硫化化合物法是以多硫化钠、多硫化钙、多硫化铵等为基础，借助多硫螯合离子对金离子具有很强的络合能力，具有选择性强、浸出速度快、浸出率高等特点，适用于处理含砷、锑的含金硫化精矿^[46]。多硫化物法浸金的主要反应见式 (12~15)。



龙炳清等^[47]使用多硫化铵和多硫化钠作浸金试剂处理含金硫化矿浸出渣，结果发现两种浸出试剂均可获得较高的浸金率，但温度对浸金效果有显著影响；多硫化铵由于热稳定性较差，升温具有一定的限制性，多硫化钠则无此局限；多硫化铵回收元素硫不需加入其他试剂，但设备较复杂，多硫化钠则相反，设备简单，但需消耗一定量的酸。郭学益等^[48]以氧压渣为原料，考察了酸性硫脲体系和碱性多硫化物体系碳浸法浸金效果。结果表明：碱性多硫化物体系浸金率较酸性硫脲体系浸金率高 30%，碱性多硫化物体系包裹金得到释放和暴露，有利于金的高效浸出。在碱性多硫化物体系最优条件下，金的浸出率可超过 85%。超声波辅助强化金浸出率为 89.77%，超细磨预处理金浸出率为 91.95%。

与氰化法相比，多硫化化合物工艺的的优点在于试剂成本较低、选择性较强、并具有浸出“劫金”性质金矿和其他不适于氰化浸出矿石的潜在能力^[47]。但多硫化物法浸金也存在一些缺点和不足，如多硫化物自身的热稳定性差，升温时易分解产生硫化氢，恶化生产环境，危害身体健康。因此，多硫化化合物法浸金的工业化应用有待进一步研究。

2.2.6 氨基酸法

氨基酸是含有碱性氨基和酸性羧基的有机化合物，氨基中的氮原子 ($-\text{NH}_2$) 与金有很强的络合倾向，其次是羧基中的氧原子 ($-\text{COO}$)。氨基酸中的 O 原子和 S 原子可作为电子供体，与其他金属元素反

应形成稳定、易溶解的配合物。研究表明, Au^0 可溶于多种氨基酸溶液, 其中半胱氨酸、青霉胺和组氨酸对金的溶解效率最高^[49], 组氨酸溶液对金的溶解效果最好^[50], 碱性氨基酸-过氧化氢体系适用于低品位金矿原地浸出或堆浸^[51]。与组氨酸和丙氨酸相比, 金在甘氨酸溶液中的溶解度最高, 使用甘氨酸和组氨酸混合溶液比单一甘氨酸溶液溶金量更高, 但其中的机理尚不清楚。

单一氨基酸体系的浸金速率非常缓慢, 且浸出条件易受温度、pH 值、试剂浓度和外场环境等条件的影响, 将氨基酸加入其他体系进行协同浸金, 可获得比较满意的结果^[52, 53]。如 FENG 等^[52]通过添加 L-缬氨酸、甘氨酸、DL- α -丙氨酸和 L-组氨酸对某黄铁矿精矿进行氨态硫代硫酸盐浸出, 发现氨基酸与铜离子形成的配合物比铜-氨配合物更稳定, 氨基酸的存在降低了铜离子对硫代硫酸盐的反应活性, 硫代硫酸盐消耗量降低。尽管浸出过程中初始动力学较低, 但氨基酸的加入, 特别是 L-组氨酸, 可大大提高了金的提取率, 硫代硫酸盐的消耗也随着氨基酸浓度的增加而减少。WU 等^[53]采用硫氰酸铵与甘氨酸协同体系浸金, 发现甘氨酸具有溶解金的特性可作为协同浸出剂, 提高金的浸出率, 在硫氰酸盐溶液中加入甘氨酸, 可减少硫氰酸盐的分解反应, 从而降低硫氰酸铵的用量。

氨基酸类药剂具有来源广泛、成本低廉、无毒环保的显著优势, 在就地浸出和堆浸提金领域展现出良好的发展潜力。然而, 单一氨基酸溶液的溶金速度较为缓慢。为提升浸金效率, 可通过结合氨基酸与其他浸金试剂, 优化复合浸金体系的协同效应。这种组合方式不仅能显著提高金的浸出率, 还能有效降低其他试剂的消耗量。因此, 利用协同效应探索创新的浸金试剂组合, 将成为未来浸金技术发展的重要方向。

2.3 新型环保提金剂

为了替代传统氰化浸金药剂, 近年来, 学者们成功研发出许多新型环保提金剂。这些环保药剂在市场上已有多款成熟产品, 如金蝉黄金选矿剂、CG505A 浸金剂、绿金提金药剂、敏杰提金剂和圣的 (Sandioss) 选矿药剂等, 这些新型药剂主要由氧化钠、氮、铵根、钙和铁等元素构成, 其核心有效成分普遍包含聚合氰胺钠或碳化三聚氰酸钠^[54], 可以作为氰化钠的替代药剂用于提取金, 在提高金浸出率、缩短浸出时间和生产降低成本等方面起到了积极的作

用^[55-60]。由于聚合氰胺钠是通过铁氰酸盐、硫脲或尿素与苏打等化工原料, 在催化氧化条件下合成的聚合物, 在碱性环境中, 聚合氰胺钠溶液易于分解, 并释放出 $\text{N}(\text{CN})_2^-$ 基团, 当存在氧气时, 该基团能与金形成稳定的络合离子, 使得新型环保提金剂在保持高效浸金性能的同时, 显著降低了对环境的毒害风险。碳化三聚氰酸钠化学分子式为 $\text{C}_3\text{Na}_3\text{O}_3\text{N}_3$, 其结构中的类氰基 (CN^-) 可与金有效络合。

但是, 在某些复杂难处理金矿工业实践中, 这些新型环保药剂虽然比氰化物有更好的选择性、更快的浸出速率和安全环保等优点, 但也存在药耗较大、使用条件复杂等问题^[61, 62]。而且, 市售的一些所谓无氰浸出药剂或非真正意义上的非氰无毒药剂, 或受限专利保护而无从获知其有效成分, 难以评价其工艺原理及技术应用可行性。部分人员认为这类药剂的本质仍然是氰化物浸金, 浸金尾渣和提金尾液仍然含有大量的 CN^- , 仅仅在浓度上低于传统 CN^- 含量或浓度。因此, 这类所谓的新型环保提金药剂仅仅是进入碱性矿浆之前不主要以 NaCN 或 KCN 存在于商品药剂中, 从而可能以非剧毒化学品的形式进行买卖、运输、储存。

表 2 汇总了不同类型浸金药剂的优缺点及应用情况。由表 2 可知, 氰化法因具有工艺成熟、成本低、适应性强、浸出率高等特点, 仍然是当前黄金生产行业的首要选择。然而, 随着国家对环境保护标准的不断提高, 黄金矿山企业生产压力日趋增大, 采用低毒无毒的非氰浸金药剂替代氰化钠将成为必然趋势。但现行的各种非氰浸金工艺及方法由于自身的局限性尚未能实现大规模工业化应用。新型环保浸金药剂浸出效果优异, 其浸出指标接近甚至超越了传统的氰化浸出, 推广意义重大, 但是浸出尾液仍残留聚合 CN^- 基团。因此, 从某种意义上来说, 新型环保提金剂并不能彻底解决氰化物所引起的环境危害问题。

其他浸金药剂如硫脲、卤化物、硫氰酸盐、氨基酸和多硫化物均因自身体系的局限性, 在生产实践中成功的案例并不多。比较而言, 硫代硫酸盐具有绿色无毒、浸金速率快、试剂价格便宜、适用于氰化法难处理的含碳、砷、铜等金矿、对设备无腐蚀等特点, 被广泛认为是最有前景的氰化替代试剂。但是传统的铜-氨-硫代硫酸盐体系也存在试剂消耗量高, 浸出液中金和银难以高效回收, 以及生产成本相对较高等问题。

表2 不同类型浸金药剂特征对比

Table 2 Characteristics comparison of different kinds of gold leaching agents

浸金药剂	主要活性成分	优点	缺点	应用情况
氰化物	CN ⁻	成本低、适应性强、浸出率高、工艺成熟	有剧毒、浸金速率缓慢、易受杂质影响	生产实践中已被广泛应用
硫脲	SCN ₂ H ₄	毒性低、溶金速率快、干扰离子少	成本高、消耗量大、酸性介质对设备有腐蚀	生产实践中成功应用的案例不多
卤化物	F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻	浸金速率快、浸金率高、对原料适应性强	成本高、高温强酸对设备腐蚀严重	生产实践上应用的案例不多
硫氰酸盐	SCN ⁻	毒性低、性质稳定、浸出速度快、适应能力强	试剂使用量及消耗量大、金的回收困难	生产实践上应用的案例不多
氨基酸	含有氨基和羧基的有机化合物	成本低、无毒环保,在堆浸提金方面具有一定发展前景	单一氨基酸溶液溶金速率非常缓慢	生产实践上应用的案例不多
多硫化物	S ²⁻ , S ₄ ²⁻ , S ₅ ²⁻	选择性强、浸出速度快,适用于处理含砷、锑金矿石	后续工艺不完善、生产成本低	生产实践上应用的案例不多
硫代硫酸盐	S ₂ O ₃ ²⁻	无毒、绿色环保、浸金速率快、适用于处理含碳、砷、铜等金矿,对设备无腐蚀	试剂消耗量高、浸出液中金和银难以高效回收、生产成本相对较高	已有最新在生产实践中成功运用的案例,待推广
新型环保提金剂	聚合氰胺钠或碳化三聚氰酸钠	环保无毒(或毒性低)、适应性较好、对设备无腐蚀	用NaCN的检测方法在药液中能检测出聚合CN ⁻	生产实践中已被广泛应用

虽然公开的文献报道表明尚无完全令人满意的非氰提取技术实现大规模工业化应用,但已有信息表明,一些世界知名黄金企业如Barrick和Newmont黄金公司已研发出经济有效环境友好型金矿石硫代硫酸盐提金技术,只是出于技术保密的原因而很少公开报导^[63]。

3 结论与展望

1) 氰化法提金具有工艺成熟、流程简单、试剂价格便宜等优点,目前仍是黄金生产企业的首要选择。但限于氰化物的高毒性,伴随着国家环保法律法规的不断实施与完善,绿色、无毒的非氰浸金技术的研发与应用势在必行。

2) 在众多非氰浸金技术中,硫代硫酸盐具有绿色无毒、浸金速率快、试剂价格便宜等优点,是最有前景的非氰替代药剂。目前已有最新在生产实践中成功应用的案例,只是出于技术保密等原因而很少公开报导,仍待进一步推广。

3) 协同浸金剂的开发与应用在不降低金浸出率的前提下,可显著减少试剂消耗量,大大降低生产成本。利用协同耦合效应,积极探索并研发新的浸金试剂组合方式,也是未来浸金技术发展的新趋势。

4) 在某些复杂难处理金矿工业实践中,新型环保药剂提金效果接近甚至优于传统氰化工艺,且具有更好的选择性、更低的毒性,以及更低的生产成本,但是这类提金药剂尾液中仍残留聚合氰根。因此,从某种意义上来说,这些所谓的新型环保提金药剂并不能彻底解决氰化物所引起的环境危害问题,其工艺原理和技术应用可行性也尚需进一步评价。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国环境保护税法(2016年12月25日第十二届全国人民代表大会常务委员会第二十五次会议通过)[N]. 环保工作资料选, 2017(1): 51-53.
Ministry of Ecology Environment of the People's Republic of China. Environmental protection tax law of the People's Republic of China (adopted at the 25th meeting of the Standing Committee of the 12th National People's Congress on December 25, 2016) [N]. Selection of Environmental Protection Work Materials, 2017, (1): 51-53.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 黄金行业氰渣污染控制技术规范[S]. 北京: 中国环境保护部, 2018: 4-6.
Ministry of Ecology Environment of the People's Republic of China. Technical specification for cyanide residue pollution control in the gold industry[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, 2018: 4-6.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 国家危险废物名录(2021年版)[N]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(4): 18-46.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. National hazardous waste list (2021 edition) [N]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021, (4): 18-46.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 《国家危险废物名录(2025年版)》公布[J]. 现代化工, 2025, 45(1): 76.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. National Hazardous Waste List (2025 Edition) [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(1): 76.

- [5] NICOL M J, FLEMING C A, PAUL R L. The chemistry of the extraction of gold[J]. *Chemistry*, 1992, 15: 831-832.
- [6] HABASHI F. One hundred years of cyanidation historical note[J]. *CIM Bulletin*, 1987, 905(30): 108-114.
- [7] AYLMOORE M G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores[M]. *Gold Ore Processing*, 2016: 447-484.
- [8] 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.
- [9] ZHANG L, GUO X Y, TIAN Q H, et al. Improved thiourea leaching of gold with additives from calcine by mechanical activation and its mechanism[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 178. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107403.
- [10] 任传裕, 武彪, 尚鹤, 等. 生物预氧化-酸性硫脲浸金联合工艺[J]. *矿冶*, 2020, 29(4): 62-67.
- REN C Y, WU B, SHANG H, et al. Combined process of biological pre-oxidation and gold leaching with acid thiourea[J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29(4): 62-67.
- [11] 李骞, 沈煌, 张雁, 等. 硫脲浸金研究进展[J]. *黄金*, 2018, 39(1): 66-69.
- LI Q, SHEN H, ZHANG Y, et al. Research progress of thiourea gold leaching process[J]. *Gold*, 2018, 39(1): 66-69.
- [12] ABBRUZZESE C, FORNARI P, MASSIDDA R, et al. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy[J]. *Hydrometallurgy*, 1995, 39(1/2/3): 265-276.
- [13] SENANAYAKE G. Analysis of reaction kinetics, speciation and mechanism of gold leaching and thiosulfate oxidation by ammoniacal copper(II) solutions[J]. *Hydrometallurgy*, 2004, 75(1/2/3/4): 55-75.
- [14] SENANAYAKE G. Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part I: a review of the effect of hard-soft and Lewis acid-base properties and interactions of ions[J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 115-116: 1-20.
- [15] SENANAYAKE G, ZHANG X M. Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part II: effect of residual Cu(II), pH and redox potentials on reactivity of colloidal gold[J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 115-116: 21-29.
- [16] 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): 3506-3529.
- [17] AYLMOORE M G, MUIR D M. Thermodynamic analysis of gold leaching by ammoniacal thiosulfate using Eh/pH and speciation diagrams[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2001, 18: 221-227.
- [18] FENG D, VAN DEVENTER JSJ. Effect of sulfides on gold dissolution in ammoniacal thiosulfate medium[J]. *Metallurgical Materials Transactions B*, 2003, 34(1): 5-13.
- [19] MOHAMMADI E, POURABDOLI M, GHOBEITI-HASAB M, et al. Ammoniacal thiosulfate leaching of refractory oxide gold ore[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 164: 6-10.
- [20] WANG J, WANG W, DONG K, et al. Research on leaching of carbonaceous gold ore with copper-ammonia-thiosulfate solutions[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 137: 232-240.
- [21] 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.
- [22] 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, 107605.
- [23] FENG D, VAN DEVENTER J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(2): 143-150.
- [24] CHEN J N, XIE F, ZHANG H W, et al. Research on gold leaching from a refractory gold concentrate in copper-malic acid-thiosulfate solutions[J]. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2023, 40: 1501-1512.
- [25] YU H, ZI F, HU X, et al. The copper-ethane diamine-thiosulphate leaching of gold ore containing limonite with cetyltrimethylammonium ammonium bromide as the synergist[J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 150: 178-183.
- [26] WANG J, XIE F, WANG W, et al. Eco-friendly leaching of gold from a carbonaceous gold concentrate in copper-citrate-thiosulfate solutions[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 191. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.105204.
- [27] LIU X L, XU B, MIN X, et al. Effect of pyrite on thiosulfate leaching of gold and the role of ammonium alcohol polyvinyl phosphate (AAPP) [J/OL].

- Metals, 2017, 7(7): 278. <https://doi.org/10.3390/met7070278>.
- [28] FENG D, VAN DEVENTER J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of orthophosphate and polyphosphate[J]. Hydrometallurgy, 2011, 106(1/2): 38-45.
- [29] FENG D, VAN DEVENTER J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of carboxymethyl cellulose (CMC) [J]. Minerals Engineering, 2011, 24(2): 115-121.
- [30] XU B, YANG Y, LI Q, et al. Effect of common associated sulfide minerals on thiosulfate leaching of gold and the role of humic acid additive[J]. Hydrometallurgy, 2017, 171: 44-52.
- [31] ARIMA H, FUJITA T, YEN W T. Using nickel as a catalyst in ammonium thiosulfate leaching for gold extraction[J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 516-526.
- [32] CHANDRA I, JEFFREY M I. A fundamental study of ferric oxalate for dissolving gold in thiosulfate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2005, 77(3/4): 191-201.
- [33] LIU X, XU B, YANG Y, et al. Thermodynamic analysis of ammoniacal thiosulphate leaching of gold catalyzed by Co(Ⅲ)/Co(Ⅱ) using Eh-pH and speciation diagrams[J]. Hydrometallurgy, 2018, 178: 240-249.
- [34] YANG X, MOATS M S, MILLER J D, et al. Thiourea-thiocyanate leaching system for gold[J]. Hydrometallurgy, 2011, 106(1/2): 58-63.
- [35] 张建元, 刘昱辰, 王洪凯, 等. 金精矿硫氰酸盐浸金实验研究[J]. 黄金, 2021, 42(7): 63-66.
- ZHANG J Y, LIU Y C, WANG H K, et al. Experimental study on gold leaching from gold concentrates by thiocyanate[J]. Gold, 2021, 42(7): 63-66.
- [36] 黄彪林, 黄李金鸿, 曾祥荣, 等. 用硫氰酸铵从金精矿生物氧化渣中浸出金[J]. 湿法冶金, 2021, 40(6): 451-456.
- HUANG B L, HUANGLI J H, ZENG X R, et al. Leaching of gold from gold concentrate biooxidized slag using ammonium thiocyanate[J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(6): 451-456.
- [37] 吴浩, 黄万抚, 邱峰, 等. 硫氰酸盐浸金研究进展[J]. 贵金属, 2016, 37(3): 72-78.
- WU H, HUANG W F, QIU F, et al. Review of gold leaching by thiocyanate[J]. Precious Metals, 2016, 37(3): 72-78.
- [38] 钟晋, 胡显智, 字富庭, 等. 硫代硫酸盐浸金现状与发
- 展[J]. 矿冶, 2014, 23(2): 65-69.
- ZHONG J, HU X Z, ZI F T. Current situation and development of gold leaching with thiosulfate [J]. Mining and Metallurgy, 2014, 23(2): 65-69.
- [39] HASAB M G, RASHCHI F, RAYGAN S. Simultaneous sulfide oxidation and gold leaching of a refractory gold concentrate by chloride-hypochlorite solution[J]. Minerals Engineering, 2013, 50-51: 140-142.
- [40] CARVALHO F A D, RESENDE A, LEO V A. Gold leaching by sodium chloride and calcium hypochlorite solutions[J]. Global Conference on Extractive Metallurgy, 2018: 1787-1796.
- [41] 宋庆双, 李云巍. 溴化法浸出提取金和银[J]. 贵金属, 1997, 18(3): 36-40.
- SONG Q S, LI Y W. Gold-silver concentrate leaching by bromide process[J]. Precious metals, 1997, 18(3): 36-40.
- [42] SOUSA R, FUTURO A, FIÚZA A, et al. Bromine leaching as an alternative method for gold dissolution[J]. Minerals Engineering, 2018, 118: 16-23.
- [43] 彭科波, 高利坤, 饶兵, 等. 金矿非氰化浸金研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 871-882.
- PENG K B, GAO L K, RAO B, et al. Research progress of non-cyanide gold leaching in gold mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 871-882.
- [44] 徐渠, 陈东辉, 陈亮, 等. 废弃印刷线路板碘化法浸金研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(5): 911-914.
- XU Q, CHEN D H, CHEN L, et al. Iodine leaching process for recovery of gold from waste PCB[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 911-914.
- [45] 康华, 王会平, 李桂春, 等. 基于RSM-BBD的浮选金精矿碘化浸出工艺优化[J]. 黑龙江科技大学学报, 2020, 30(4): 356-360.
- KANG H, WANG H P, LI G C, et al. Optimization of iodization leaching process for gold concentrate flotation based on RSM-BBD[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2020, 30(4): 356-360.
- [46] HUNTER R M, STEWART F M, OARSOW T, et al. New alternative to cyanidation: bio-catalyzed bisulfide leaching[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1998, 19(1): 183-197.
- [47] 龙炳清, 陈希鸿, 宾万达, 等. 多硫化物浸金研究[J]. 黄金, 1987, 8(3): 35-39.

- LONG B Q, CHEN X H, BIN W D, et al. Study on polysulfide leaching of gold[J]. *Gold*, 1987, 8(3): 35-39.
- [48] 郭学益, 张磊, 田庆华, 等. 氧压渣非氰体系浸金及其机理[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(5): 1131-1141.
- GUO X Y, ZHANG L, TIAN Q H, et al. Gold leaching of high pressure acid leaching residue using a non-cyanide system and its mechanism[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(5): 1131-1141.
- [49] BROWN D H, SMITH W E, FOX P, et al. The reactions of gold(0) with amino acids and the significance of these reactions in the biochemistry of gold[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 1982, 67(1): 27-30.
- [50] ZHANG J R, LU J, YANG F, et al. An experimental study on gold solubility in amino acid solution and its geological significance[J]. *GEOCHIMICA*, 1996, 15, 296-302.
- [51] EKSTEEN J J, ORABY E A. The leaching and adsorption of gold using low concentration amino acids and hydrogen peroxide: effect of catalytic ions, sulfide minerals and amino acid type[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 70: 36-42.
- [52] FENG D, VAN DEVENTER J S J. The role of amino acids in the thiosulphate leaching of gold[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(9): 1022-1024.
- [53] WU H, FENG Y, HUANG W, et al. The role of glycine in the ammonium thiocyanate leaching of gold[J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 185: 111-116.
- [54] 印万忠, 缪彦. 金矿石的新型环保浸出剂研究现状与应用进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(1): 118-123.
- YIN W Z, MIAO Y. Research status and application progress of environment-friendly leaching agents for gold ores[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(1): 118-123.
- [55] 李杰, 邓劲松, 容树辉, 等. 采用"敏杰"提金剂代替氰化钠的堆浸工业实验研究[J]. *黄金*, 2014, 25(1): 60-63.
- LI J, DENG J S, RONG S H, et al. Industrial experimental study on the cyanide replacement by Minjie gold extraction agent in heap leaching[J]. *Gold*, 2014, 25(1): 60-63.
- [56] 郭鹏志, 邱沙, 吴艺鹏, 等. 采用环保"金蝉"药剂浸出老挝某金矿石实验研究[J]. *中国矿业*, 2015, 24(12): 131-135.
- GUO P Z, QIU S, WU Y P, et al. Experimental study on a gold ore in Laos with environment-friendly Jinchan leaching reagents[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(12): 131-135.
- [57] 吕超飞, 贾佳林, 张新岗, 等. 环保型浸金试剂Sandioss在陕西某金精矿中的应用研究[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(1): 92-96.
- LV C F, JIA J L, ZHANG X G, et al. Application of environment-friendly gold leaching reagent Sandioss in processing a Shanxi gold concentrate[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(1): 92-96.
- [58] 熊召华, 浦江东, 胡海平. 某难处理金矿石绿色高效联合提金工艺实验研究[J]. *黄金*, 2018, 39(1): 58-61.
- XIONG Z H, PU J D, HU H P. Experimental research of gold extraction from one refractory gold ore by combined green and high-efficient process[J]. *Gold*, 2018, 39(1): 58-61.
- [59] 薛臣, 李永胜, 李鹏, 等. 新型环保浸金剂在金兴矿业公司的实验应用[J]. *黄金*, 2021, 42(4): 60-62.
- XUE C, LI Y S, LI P, et al. Experimental application of new type environment-friendly gold leaching reagent in Jinxing mining company[J]. *Gold*, 2021, 42(4): 60-62.
- [60] 符元飞, 曹锋. 新型环保浸金剂在四方金矿的应用研究[J]. *现代矿业*, 2022, 38(5): 156-158.
- FU Y F, CAO F. Application research of new environmental protection leaching agent in sifang gold mine[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(5): 156-158.
- [61] 崔铭耀, 李传明, 苏慧丽, 等. 新型环保提金剂的研究及应用概况[J]. *黄金*, 2023, 44(10): 38-44.
- CUI M Y, LI C M, SU H L, et al. Study of novel environment-friendly gold extraction agents and review of their application[J]. *Gold*, 2023, 44(10): 38-44.
- [62] 徐斌, 刘星奥, 董中林, 等. 低毒提金剂的研究现状与应用[J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(11): 3713-3734.
- XU B, LIU X A, DONG Z L, et al. Research status and application of low toxicity gold lixivants[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(11): 3713-3734.
- [63] CHOI Y, BARON J, WANG Q, et al. Thiosulfate processing—from lab curiosity to commercial application[C]. In *Proceedings World Gold 2013*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, Australia, 2013: 45-50.