

国内氰化法浸出金矿中金的研究进展

刘淑杰¹, 代淑娟^{1*}, 张作金¹, 白丽梅²

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063200)

摘要: 基于中国期刊全文数据库(CNKI), 检索了2014~2018年氰化法浸出金矿中金的论文和专利, 对国内相关研究进行综述讨论。文献分析表明, 对贫金矿的开发是近年来研究的热点, 有关氰化工艺、氰化条件、尾渣处理和贫液净化的研究较多, 但氰化浸出条件之间的交互影响, 以及脉石矿物对氰化浸出效率影响的相关研究较少。建议通过工艺完善、加强应用软件模拟等研究, 不断完善金矿氰化浸出理论与实践, 提高金矿资源的利用率。

关键词: 有色金属冶金; 金矿; 氰化法; 文献分析

中图分类号: TF831; TD92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)02-0088-07

Research Progress in Gold Leaching from Gold Ores by Cyanidation in China

LIU Shujie¹, DAI Shujuan^{1*}, ZHANG Zuojin¹, BAI Limei²

(1. School of Mineral Engineering, University of Science & Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China;

2. School of Mineral Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: Based on China National Knowledge Infrastructure (CNKI), papers and patents on cyanide leaching of gold ores from 2014 to 2018 were retrieved, and related domestic research was reviewed and discussed. Literature analysis shows that the development of lean gold ores was a hot topic in the recent years. There were many studies on the cyanidation process, cyanidation conditions, tailings treatment and purification of barren solution, but few on the interaction between cyanidation leaching conditions and the influence of gangue minerals on the cyanidation leaching efficiency. It is suggested that the theory and practice about the cyanide leaching of gold ore should be perfected and the utilization rate of gold ore resources should be improved through the study of process improvement and application software simulation.

Key words: non-ferrous metallurgy; gold ore; cyanidation; document analysis

随着宇航、电子、电气、医疗工业等对黄金的需求量日益增加, 金矿资源不断被开采利用, 独立金矿床、易处理矿石消耗殆尽, 低品位金矿石愈来愈多, 黄金选矿成本也愈来愈高。难处理金矿石增多^[1-6], 对金矿进行预处理、强化浸出过程等逐渐成为热点。

氰化法浸出金矿是最受欢迎和应用效果最好的提金方法之一, 预处理技术与氰化浸出联合工艺逐

步成熟, 对氰化后尾渣、贫液的处理与净化越来越受重视。刘志楼等^[7]详细介绍了处理难浸金矿的研究方法和研究进展, 对强化氰化进行了概括, 对焙烧、加压氧化、细菌氧化等预处理技术从机理、优缺点及应用现状展开描述, 总结了不同矿物应采取不同或者多种处理方法, 从而提高氰化浸金率。马平杰^[8]对氰化浸出过程中形成的含氰尾矿、废水中氰化物的特点及危害进行了介绍, 探讨了氰化物常

收稿日期: 2018-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574146)

第一作者: 刘淑杰, 女, 硕士研究生, 研究方向: 难处理金选冶。E-mail: 18341263876@163.com

*通讯作者: 代淑娟, 女, 博士, 教授, 研究方向: 难处理金选冶及菱镁矿选矿研究。Email: shujuandai@163.com

规处理技术及新型处理技术。

本文基于中国期刊全文数据库(中国知网, CNKI),检索了近5年(2014年1月1日~2018年10月10日)来国内关于金矿中金氰化浸出的相关论文和专利,通过对相关研究成果进行总结,发现研究热点,归纳研究重点,找寻存在的问题和不足,为研究工作提出建议方向,促进黄金行业的可持续发展提高。

1 文献统计及分布

为了解我国氰化法浸出金矿资源的研究现状,以《CNKI 中国学术文献网络出版总库》为数据来源,对2014年1月1日~2018年10月10日时间段的相关文献、专利进行了检索。利用知网高级检索条件,以“主题=‘金矿’”文献检索到的记录有8723条,为了使文献具有代表性,对文献进行全面整理,排除其中与氰化法浸出金矿不相关的论文,最终纳入分析的文献共计101篇,硕士论文4篇,综述类文献9篇,工艺类文献67篇,其他文献21篇;以“主题=‘金矿’”专利检索到的记录有260条,与氰化法浸出金矿相关的专利共计29篇。

1.1 年度分布

对纳入分析的101篇文献及29篇专利按刊载年份整理,如表1所列。

表1 氰化法浸出金矿研究文献和专利的年代分布

Tab.1 The years distribution of gold leaching by cyanidation in literatures and patents

年份	文献	专利
2014	12	3
2015	21	10
2016	26	4
2017	22	6
2018	20	6

1.2 研究热点分析

在研究阶段,以“低品位”、“难选”,“难浸”、“难处理”及“预处理”为主题的文献48篇,占文献总数(101篇)的47.52%;专利10篇,占专利总数(29篇)的34.48%。这一数据说明对贫金矿的开发利用是研究的热点。

1.3 研究重点分布

通过对文献、专利分析表明氰化法浸出金矿的研究主要集中在3个方面:优化浸出条件、浸出工

艺及氰化贫液净化、尾渣资源回收,也有部分文献和专利研究内容包括强化浸出和助浸效果及探索浸出交互影响等。分类情况见图1。

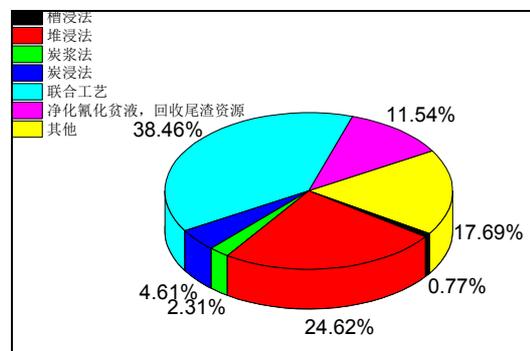


图1 金矿氰化浸出研究方向分类情况

Fig.1 Classification of research directions for the cyanide leaching of gold ores

氰化物有剧毒,在氰化浸出金矿过程中形成含氰废水、含氰尾矿等,对环境造成污染。然而从近5年中国知网收录的文章来看,研究人员对氰化法浸出金矿的研究热情依然很高,其原因主要为以下2方面:1) 尽管当前对非氰提金技术研究较多,但实践表明其黄金提取效果差;氰化法不仅对矿石的适应性强,金回收率高,而且操作工艺简单,成本低,有利于规模化生产。2) 近年来随着金矿的开发利用,优质金矿资源逐渐减少,低品位金矿资源愈来愈多,对氰化法提金的要求愈来愈高,强化浸出工艺及助浸效果、处理氰化尾渣与贫液、优化氰化系统及探索浸出交互影响等是当前重点。

2 研究现状分析

2.1 浸出条件研究

氰化法浸出金矿的条件主要包括磨矿细度、浸出液pH值、矿浆浓度、氰化剂用量、浸出时间等因素对金浸出效果的影响。根据矿石性质不同分为原矿直接氰化浸出、浮选金精矿氰化浸出和浮选尾矿氰化浸出。

对于原矿直接氰化浸出,原矿品位在1~8 g/t不等,矿石性质相对简单,浸出液pH≈11,磨矿细度-0.074 mm占90%以上,矿浆浓度为20%~40%,氰化钠用量2~3 kg/t,浸出时间24~48 h,对金的浸出率在80%~96%不等^[9-13]。对于浮选金精矿浸出,王众^[14]对贫硫低砷低品位金矿石采用一粗一精两扫浮选流程,得到金精矿中金品位27.60 g/t,金回

收率为82.84%，金矿浸出试验氰化钠用量4.50 kg/t，浸出48 h，浸出率达95%；陈景河等^[15]在专利中对高铈含矿难处理金精矿采用湿法除铈-加压氧化预处理-炭浸氰化提金工艺，氧化渣矿浆浓度为30%~40%，pH为9~10，氰化钠浓度0.5%~1%，浸出18~20 h，加入活性炭20~50 g/L，金浸出率达96.20%。对于浮选尾矿浸出，李军等^[16]对西藏某石英脉金矿采用一粗一精两扫、中矿顺序返回的闭路浮选流程对浮选尾矿进行氰化浸出，浮选尾矿金品位为0.35 g/t，金主要存在于石英及硅酸盐矿物中，采用无氰浸出，效果不理想；氰化浸出中浸出液pH≈11，矿浆浓度为40%，氰化钠用量3 kg/t，浸出48 h，金浸出率为79.31%。刘新刚等^[17]对含铁含铜难选金矿石浮选尾矿进行氰化浸出，pH值为10~11，氰化剂选用氰化钠（在矿浆中质量分数为0.1%~0.05%），浸出24 h，获得金品位为1.57%，金浸出率为72.84%。

2.2 浸出工艺研究

氰化浸出工艺可分为堆浸、槽浸、炭浆、炭浸及联合工艺等。由于低品位、难处理金矿的增多，近年来关于氰化浸出工艺的文章多以堆浸及联合工艺为主。

金品位在0.5~1.5 g/t的氧化矿，金未与硫化矿物紧密共生，常选用堆浸工艺^[18]。对堆浸小型实验室、工业实践、堆浸的制粒及堆浸影响因素等方面研究较多。孟庆秋^[19]对长山壕金矿采用的堆浸工艺进行了详细描述，原矿品位0.82 g/t，破碎粒度9 mm占80%，氰根浓度一般控制在 $(350\sim 400)\times 10^{-6}$ ，pH值为11.0~11.5，滴淋强度一般为8~10 L/(m²·h)，时间大约为240 d，金浸出率约为60%，优点在于矿山地区处于北方较干旱，布液系统选择埋管滴淋可实现全年运营，缺点是堆浸过程中未进行充氧。代淑娟等^[20]对辽宁某低品位金矿进行了堆浸试验，对-2 mm粒级的矿石制粒处理，pH值为10~11，氰化钠浓度0.04%，浸出时间27 d，获得浸出液含金1.44 mg/L，浸渣品位0.11 g/t，金浸出率为83%。

近年来，难处理金矿联合工艺以预处理+氰化浸出的研究居多，也有选矿法+氰化、强化氰化过程及添加助浸剂等。刘泽等^[21]对卡林型金矿进行氧化焙烧预处理，碱性环境下氧化浸金，氰化物浓度3 g/L，浸出24 h，金浸出率93.81%。郭金溢等^[22]对金精矿进行细菌氧化-氰化浸出，氧化渣氰化浸出条件为pH值为10~11，液固比3:1，加入活性炭0.03 kg/L，氰化钠溶液2%，摇瓶振荡24 h，金浸出率为

97.18%，但因金精矿含硫较高，故氧化时间较长。谢营邦等^[23]对浮选金精矿进行高压氧化-预处理渣再磨-氰化浸出工艺处理，预处理渣中主要含石英及硅酸盐类矿物，再磨后浸出率由76.72%增加到94.30%。燕超^[24]对含砷金矿进行微波强化氰化浸出，微波功率约539 W，氰化物浓度0.5%，浸出时间24 h，经氢氧化钠碱浸预处理后，金浸出率由23.52%提高到67.51%，外加微波助浸后，浸出率提高到75.21%。陈新林等^[25]在专利中报道，氰化助浸剂原料，氰化铵6~8份，硝酸铅1~3份和过氧化氢1~2份按质量份数配比，磨矿细度-0.074 mm占90%以上，pH值为10~12，加入助浸剂1~2 kg/t，搅拌2~4 h，加入氰化物1~5 kg/t，搅拌24~48 h，对金矿浸出效果良好，该助浸剂主要适用于金赋存在石英脉石中。

部分论文研究了槽浸、炭浆及炭浸工艺。邱显扬等^[26]对云南某含铜金矿进行小型试验，采用浸出槽及浸出吸附槽组成的全泥氰化工艺，采用分点加氰化钠方式，氰化钠总用量3.2 kg/t，总浸出时间30 h，金浸出率为93.40%。苏玉花^[27]对姚安金矿进行全泥氰化-炭浆法提金，-0.074 mm占92%~95%，液固比3:1，pH值为11，氰化钠用量2.5 kg/t，浸出24 h，浸出率为94.07%，并展望了炭浆吸附后的含氰废水用漂白粉去除。罗星等^[28]对热压氧化渣进行炭浸氰化试验，pH=10.5，氰化钠用量为0.27~0.29 kg/t，添加活性炭60 kg/t，浸出2~4 h，金浸出率为95.34%。炭浸法与炭浆法相比，工艺简单，作业时间短，金浸出率高。

2.3 氰化贫液净化和尾渣资源回收研究

对氰化贫液，姜得男等^[29]向贫液中加入氧化剂、还原剂以及催化剂并鼓入空气，此化学法对浸出过程无影响，铜锌转化为沉淀物，通过沉淀转换剂，能成为合格的铜锌产品。降向正等^[30]采用酸化吹脱-碱液吸收法净化氰化贫液，氰化物平均回收率为78%，铜去除率98.65%，还可去除部分锌和硫氰酸盐，证明了该贫液中导致氰化物消耗多、金浸出率低的主要物质为铜离子。

对氰化尾渣，张斌等^[31]对尾渣用硫酸铵进行活化，采用三粗一扫-粗选精矿合并精选流程，可获得金品位40.70 g/t、回收率40.86%的精矿。朱军廷^[32]对阿希金矿氰化浸出的尾渣进行了闭路浮选试验，其优点为对尾渣增设自制脱气重粗砂分级槽，消除了尾渣在输送过程中被大量气体干扰，对粗选、扫选添加水玻璃，在精选一添加六偏磷酸钠，降低了

矿泥粘度，精矿品位由 17.00 g/t 提高到 23.80 g/t。王莹等^[33]研究含氰尾渣自然降解规律，得出降解反应符合一级动力学反应模型，初始氰化物质量分数越高，氰化物降解速度越快，并且在较高温度下氰化物降解速度较快。

3 氰化法浸出研究方向

3.1 存在的问题

氰化法浸金应重视降低消耗及资源的综合利用。氰化浸金过程中形成的贫液多采用酸化回收、萃取回用等方法。酸化回收后的贫液还含一定量的氰化物、硫氰根及重金属离子；萃取回收有价元素，杂质、有机相循环使用都会降低萃取率，氰化物含量、重金属离子达不到国家排放标准，不宜直接排放。氰化贫液闭路循环，需补加大量的氰化物进行浸金，同时重金属离子不断累积，不仅降低氰化物溶液活性，消耗大量氰化物，运营成本增加，金浸出效果也不理想。氰化浸金过程中形成的尾渣，对水及土壤造成严重污染，危害周边环境，尾渣中的有价元素需回收利用，常采用浮选法处理尾渣，但浮选分离仍然存在难度。

探索金在氰化浸出过程中交互影响因素很重要。尽管已对金矿氰化浸出的影响条件做了大量的研究工作，但对条件之间的交互影响研究较少。王健等^[34]对玛尔卡库里大断裂带新疆某金矿进行了基于响应面法的全泥氰化浸出试验，金矿中脉石矿物以硅酸盐类矿物为主，考察浸出过程中试验条件之间交互作用对金氰化浸出的影响，得出磨矿细度是影响浸出率的显著因素，磨矿细度、氰化钠用量及浸出时间之间均存在交互作用，磨矿细度与此两因素间的交互作用显著，但对浸出试验获得的浸出率比理论预测值低 0.77 个百分点的情况未做分析。

脉石矿物会影响氰化浸出效率。金矿石中脉石矿物常为石英及硅酸盐类矿物，在金矿浸出过程中，有时金的理论浸出率低于实际浸出率 20%~30%，这种偏差普遍存在。超细磨预处理技术适合处理硅酸盐包裹型难浸金矿^[35-36]。丁文涛等^[37]对甘肃某高硫高砷难处理金精矿进行了常规氰化、氰化渣再磨-氰化、超细磨-预处理-氰化，三种工艺都不能有效浸出石英包裹金。其中超细磨能打开大部分硫化矿包裹的金，但在氰渣中约 90% 都是石英包裹的金，这部分金难以浸出。金的流失理论上是不存在“劫金”现象，尤其对含大量石英及硅酸盐类矿物，金

流失较为严重。为考察金与石英及硅酸盐类矿物是否发生相互作用，黎文辉等^[38]对高岭石与金溶液经处理后进行焙烧试验，结果表明高温破坏了高岭石结构使其与金发生束缚效应。马芳源等^[39]将斜长石与金溶液混合，研磨后经离心，对上清液进行了原子吸收测定，证明斜长石与金存在吸附作用。

3.2 研究方向

微生物处理氰化贫液有应用前景。对微生物驯化处理可有效去除贫液中的氰化物及重金属等，但因氰化物有剧毒，对微生物菌株要求较高。

目前模拟软件应用到选矿领域非常有前景，例如在浮选中，Materials Studio 有很大潜能证明药剂分子与矿物之间有物理或化学吸附现象。在氰化浸出过程中，金与石英及硅酸盐类矿物相互作用，应用软件模拟，Materials Studio 中 CASTEP 模块可以进行量子化学计算，来证明石英与氰化金是否发生作用，或石英与金是否存在竞争氰化物现象。应用软件模拟指导助浸剂研发，含-OH，-COO 及-NH₂ 等官能团的表面活性剂，可有效吸附在石英及硅酸盐类矿物表面，对这类矿物表面进行改性，来有效抑制或降低金与石英及硅酸盐类矿物的相互作用，减少该类矿物对氰化浸出的影响，提高金浸出率。

应用软件测定分子结构、基团键的极性、表面张力、凝固点及溶解度等助浸剂的性能参数，将新型助浸剂应用到难处理硫化矿和难处理含碳矿、氧化矿以及含金硫化矿等典型金矿上，根据浸出前后浸出液中金浓度及浸出渣中金含量变化，计算金的浸出率，研究新型助浸剂的性质、助浸效果，与其它浸出剂的协同效应。采用原子力显微镜分析、红外光谱分析、电动电位测试及浸出液和浸出渣的其它理化性质等分析手段，研究新型助浸剂的作用机理，有效提高金的助浸效果。

4 结语

1) 通过对知网文献、专利数据检索分析，近 5 年来金矿中金的氰化浸出主要研究方向集中在浸出条件、浸出工艺及氰化贫液净化、尾渣资源回收等方面。

2) 在金矿预处理技术、矿山堆浸，金矿在氰化浸出过程中影响因素及氰化尾渣、贫液等方面的研究均有突破，但在新型助浸剂的研发、工艺优化、脉石矿物与金存在的作用等方面还有待加强。

3) 开发新技术提高浸出率、降低成本，应用模

拟软件,采用新方法和技术研究新型助浸剂,有助于进一步提高氰化法浸出金的技术进步。

参考文献:

- [1] 张作金,王倩倩,代淑娟. 碳质金矿预处理技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2017(5): 99-104.
ZHANG Z J, WANG Q Q, DAI S J. The development of pretreatment technology of carbonaceous gold ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2017(5): 99-104.
- [2] SONG Y, YANG H Y, TONG L L. Bioleaching of complex refractory gold ore concentrate of China: Comparison of shake flask and continuous bioreactor[J]. Advanced materials research, 2015, 1130: 243-246.
- [3] 罗星,李尽善,周卫宁,等. 某金矿热压氧化后氰化浸金氰化钠消耗实验研究[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 51-55.
LUO X, LI J S, ZHOU W N, et al. Research on the dosage of sodium cyanide used for leaching refractory gold ore after pressure oxidation procedure[J]. Precious metals, 2015, 36(4): 51-55.
- [4] LIU Q, YANG H Y, TONG L L, et al. Fungal degradation of elemental carbon in carbonaceous gold ore[J]. Hydrometallurgy, 2016, 160(2): 90-97.
- [5] 孙留根,袁朝新,王云,等. 难处理金矿提金的现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(4): 38-43.
SUN L G, YUAN C X, WANG Y, et al. Status and development of gold extraction from refractory gold ore[J]. Nonferrous metals (Extractive metallurgy), 2015(4): 38-43.
- [6] 陈伟,丁德馨,胡南,等. 微波焙烧预处理难浸含金硫精矿[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 2000-2005.
CHEN W, DING D X, HU N, et al. Pretreatment of refractory gold-bearing sulfur concentrates by microwave roasting[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2015, 25(7): 2000-2005.
- [7] 刘志楼,杨天足. 难处理金矿的处理现状[J]. 贵金属, 2014, 35(1): 79-83.
LIU Z L, YANG T Z. Treatment status for refractory gold ores[J]. Precious mtals, 2014, 35(1): 79-83.
- [8] 马平杰. 金矿尾矿及废水中氧化物的处理研究进展[J]. 中国新技术新产品, 2017(6): 109-110.
MA P J. Research progress on cyanide treatment in gold tailings and wastewater[J]. Chinese new technology and new products, 2017(06): 109-110.
- [9] 陈京玉,康维刚,于建华,等. 老挝某金矿工艺矿物学特性与其全泥氰化提金工艺相关性分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 1-3.
CHEN J Y, KANG W G, YU J H, et al. Research of relevance on mineralogical characters of gold ore and all-slime cyanidation process in Laos[J]. Nonferrous mtals (Mineral processing), 2018(4): 1-3.
- [10] 宋宝旭,李沛伦,邹坚坚. 山东某风化壳型金矿氰化浸出试验研究[J]. 矿冶, 2016, 25(1): 45-48.
SONG B X, LI P L, ZOU J J. Cyanide leaching study on a weathered gold ore in Shandong[J]. Mining & metallurgy, 2016, 25(1): 45-48.
- [11] 武俊杰,苏超,孙阳. 新疆某金矿氰化浸出试验研究[J]. 矿冶, 2017, 26(5): 59-61.
WU J J, SU C, SUN Y. Experimental study on cyanide leaching of a gold mine in Xinjiang[J]. Mining & metallurgy, 2017, 26(5): 59-61.
- [12] 赵民,吴天娇,赵国斌,等. 甘肃省某低品位金矿选矿试验研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(9): 110-114.
ZHAO M, WU T J, ZHAO G B, et al. Experimental research on beneficiation of a low-grade gold ore in Gansu province[J]. China mining magazine, 2015, 24(9): 110-114.
- [13] 武俊杰,薛刚,繆明亮,等. 甘肃某卡林型金矿选矿试验研究[J]. 现代矿业, 2015, 31(6): 72-76.
WU J J, XUE G, GOU M L, et al. Experimental study on a carlin type gold ore in Gansu[J]. Modern mining, 2015, 31(6): 72-76.
- [14] 王众. 某金矿选矿工艺试验研究[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(3): 43-46.
WANG Z. Experimental research on ore processing technology of a gold mine[J]. China mine engineering 2018, 47(3): 43-46.
- [15] 陈景河,王春,蔡创开,等. 高砷含砷难处理金精矿的提金方法: CN107815554A[P]. 2018-03-20.
CHEN J H, WANG C, CAI C K, et al. Gold extraction method for difficult treatment of gold concentrate with high arsenic content: CN107815554A[P]. 2018-03-20.
- [16] 李军,王露,李朋,等. 西藏某石英脉型金矿选矿试验研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(7): 108-111.
LI J, WANG L, LI P, et al. Beneficiation experiments on a gold-bearing quartz vein-type gold ore from Tibet[J]. China mining magazine, 2018, 27(7): 108-111.
- [17] 刘新刚,宋翔宇,翟晓辰. 某难选金矿综合回收试验研究[J]. 黄金, 2015, 36(10): 58-61.
LIU X G, SONG X Y, ZHAI X C. Experimental research

- on comprehensive recovery of a refractory gold ore[J]. *Gold*, 2015, 36(10): 58-61.
- [18] 张明洋. 堆浸工艺在低品位黄金矿山中的应用[J]. *现代矿业*, 2017, 33(8): 302-304.
ZHANG M Y. Application of heaving technology in low-grade gold mines[J]. *Modern mining*, 2017, 33(8): 302-304.
- [19] 孟庆秋. 中国北方大型堆浸金矿的实践与应用[J]. *世界有色金属*, 2017(12): 188.
MENG Q Q. The practice and application of large heap gold mine in Northern China[J]. *World non-ferrous metals*, 2017(12): 188.
- [20] 代淑娟, 马芳源, 胡志刚, 等. 辽宁某低品位金矿堆浸试验[J]. *辽宁科技大学学报*, 2015, 38(6): 473-477.
DAI S J, MA F Y, HU Z G, et al. Experiment on a gold ore of low-grade by heap leaching in Liaoning province[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2015, 38(6): 473-477.
- [21] 刘泽, 陈曼, 刘化江, 等. 火法湿法联合工艺从卡林型金矿中提金研究[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(4): 98-100.
LIU Z, CHEN M, LIU H J, et al. Extraction of gold from carlin-type deposit by a combined pyro- and hydro-metallurgical route[J]. *Mining and metallurgical engineering*, 2015, 35(4): 98-100.
- [22] 郭金溢, 蔡创开, 丁文涛, 等. 甘肃某难处理金矿预处理-氰化试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(2): 57-60.
GUO J Y, CAI C K, DING W T, et al. Experimental study on pretreatment-cyanide of a refractory gold ore in Gansu province[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2018(2): 57-60.
- [23] 谢营邦, 曾睿, 罗思强, 等. 低品位微细粒金矿浮选精矿的处理工艺研究[J]. *贵金属*, 2015, 36(1): 25-28.
XIE Y B, ZENG R, LUO S Q, et al. Processing technology on low-grade microgranular gold mine and its flotation concentrate[J]. *Precious metals*, 2015, 36(1): 25-28.
- [24] 燕超. 微波辅助碱浸预处理含砷金矿[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
YAN C. Pretreatment of arsenic-bearing gold ore with microwave- assisted alkaline leaching[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [25] 陈新林, 马忠臣, 于雪, 等. 一种黄金氰化助浸剂及其在氰化浸金工艺中的应用: CN108179279A[P]. 2018-06-19.
CHEN X L, MA Z C, YU X, et al. A gold cyanide aspirant and its application in the process of cyanizing gold: CN108179279A[P]. 2018-06-19.
- [26] 邱显扬, 宋宝旭, 胡真, 等. 某含铜金矿石氧化过程中铜的影响及解决途径[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2015(8): 50-53.
QIU X Y, SONG B X, HU Z, et al. Effect and solution of copper oxide dissolution on cyanide leaching process of copper-bearing gold ore[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2015(8): 50-53.
- [27] 苏玉花. 姚安金矿全泥氰化-炭浆法提金实验研究[J]. *甘肃科技*, 2018, 34(12): 31-32.
SU Y H. Experimental study of total mud cyanide-carbon slurry method in Yaoan[J]. *Gansu science and technology*, 2018, 34(12): 31-32.
- [28] 罗星, 李尽善, 周卫宁, 等. 某金矿预处理后炭浸法提金试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2016(9): 28-30.
LUO X, LI J S, ZHOU W N, et al. Research on carbon-in-leaching of gold ore after pretreatment[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2016(9): 28-30.
- [29] 姜得男, 徐名特, 阎赞, 等. 某金矿高浓度氰化贫液处理试验[J]. *矿产综合利用*, 2016(2): 85-88.
JIANG D N, XU M T, YAN Z, et al. Research on the process of barren liquor with high CN-concentration in a gold ore[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2016(2): 85-88.
- [30] 降向正, 王莹, 刘强, 等. 某金矿氰化贫液净化试验工艺参数研究[J]. *黄金*, 2017, 38(8): 66-68.
JIANG X Z, WANG Y, LIU Q, et al. Experimental research on the purification process parameters of cyanidation barren solutions from a gold mine[J]. *Gold*, 2017, 38(8): 66-68.
- [31] 张斌, 冯炎飞, 张勇. 陕西某金矿氧化尾渣的浮选活化试验[J]. *现代矿业*, 2016, 32(10): 48-50.
ZHANG B, FENG Y F, ZHANG Y. The flotation activation test of cyanide tailings in a gold mine in Shanxi province[J]. *Modern mining*, 2016, 32(10): 48-50.
- [32] 朱军廷. 新疆阿希金矿氰化尾渣资源回收的研究与应用[J]. *新疆有色金属*, 2017, 40(5): 74-76.
ZHU J T. Research and application on resource recovery of cyanide tailings in Axi Gold Mine in Xinjiang[J]. *Xinjiang non-ferrous metals*, 2017, 40(5): 74-76.
- [33] 王莹, 降向正, 刘晓红, 等. 某金矿尾矿渣中氰化物的分布及自然降解试验[J]. *黄金*, 2017, 38(12): 58-60.
WANG Y, JIANG X Z, LIU X H, et al. Experimental

- research on the purification process parameters of cyanidation barren solutions from a gold mine[J]. *Gold*, 2017, 38(12): 58-60.
- [34] 王健, 余明东, 尚立军. 基于响应面法优化某金矿石全泥氰化浸出金试验[J]. *金属矿山*, 2018(6): 99-102.
WANG J, YU M D, SHANG L J. Optimization of gold leaching experiment on a gold ore using all-slime cyanidation by response surface method[J]. *Metal mine*, 2018(6): 99-102.
- [35] 李旭坚, 廖钦桓. 难浸金矿预处理技术及其应用[J]. *世界有色金属*, 2017(24): 76.
LI X J, LIAO Q H. Pretreatment technology and its application in refractory gold mine[J]. *World non-ferrous metals*, 2017(24): 76.
- [36] 马芳源, 代淑娟, 刘淑杰. 中国难处理金矿石研究现状[J]. *黄金*, 2017, 38(1): 64-67.
MA F Y, DAI S J, LIU S J. Pretreatment of gold and resources status of gold extraction and recycling[J]. *Gold*, 2017, 38(1): 64-67.
- [37] 丁文涛, 蔡创开, 许晓阳, 等. 某难处理金矿的工艺矿物学和提取冶金学研究[J]. *矿产综合利用*, 2016(2): 26-28.
DING W T, CAI C K, XU X Y, et al. Application of process mineralogy and research of extraction metallurgy in refractory gold process selection[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2016(2): 26-28.
- [38] 黎文辉, 毛德明, 侯莹莹, 等. 金矿石内高岭石在焙烧中束缚金的模拟研究[J]. *黄金地质*, 1999(4): 1-6.
LI W H, MAO D M, HOU Y Y, et al. Model study on the bound gold of the kaolinite in the gold ore during roasting[J]. *Gold geology*, 1999(4): 1-6.
- [39] 马芳源, 代淑娟, 刘淑杰. 研磨作用下长石吸附金的机械活化规律研究[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(12): 50-53.
MA F Y, DAI S J, LIU S J. Study on mechanical activation laws of plagioclase adsorptive gold under grinding [J]. *Mining R & D*, 2017, 37(12): 50-53.

【上接第 87 页】

- [16] 汪天龙, 邱清泉, 靖立伟, 等. 圆形复合式磁控溅射阴极设计及其放电特性模拟研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(7): 070703.
WANG T L, QIU Q Q, JING L W, et al. Design of circular composite sputtering cathode and simulation of its discharge characteristics[J]. *Acta physica sinica*. 2018, 67(7): 070703.
- [17] 张庆丰, 范晓鹏, 李贵成, 等. 一种新型磁控溅射靶材: CN204138753U[P]. 2015-12-04.
ZHANG Q F, FAN X P, LI G C, et al. Novel magnetron sputtering target material: CN204138753U[P]. 2015-12-04.
- [18] 陈长琦, 郭江涛, 方应翠, 等. 矩形平面磁控溅射阴极的磁场模拟及结构设计[J]. *真空*, 2008, 45(3): 65-69.
CHEN C Q, GUO J T, FANG Y C, et al. Simulation of magnetic field and structural design of rectangularly plane target cathode for magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2008, 45(3): 65-69.
- [19] 阳岸恒, 朱勇, 邓志明, 等. EBSD 研究高纯金溅射靶材的微观组织与织构[J]. *贵金属*, 2014, 6(3): 45-48.
YANG A H, ZHU Y, DENG Z M, et al. Investigation on microstructure and texture in high pure gold sputtering targets by EBSD[J]. *Precious metals*, 2014, 6(3): 45-48.
- [20] 朱勇, 阳岸恒, 张济祥, 等. 运用电子背散射衍射技术研究高纯金溅射靶材的微观组织与织构[J]. *有色金属工程*, 2016, 6(1): 5-8.
ZHU Y, YANG A H, ZHANG J X, et al. Microstructure and texture investigation of sputtering target materials of high purity gold by EBSD[J]. *Nonferrous metals engineering*, 2016, 6(1): 5-8.
- [21] 雷继锋. 集成电路制造用溅射靶材绑定技术相关问题研究[J]. *金属功能材料*, 2013(1): 48-53.
LEI J F. Research on bonding technology of sputtering target for IC manufacturing process[J]. *Metallic functional material*, 2013(1): 48-53.