

老挝某金矿石重选-环保药剂浸金研究

康维刚, 陈京玉

(天津华勘集团有限公司, 天津 300170)

摘 要: 针对老挝某蚀变岩型金矿石开展了尼尔森重选和重选尾矿环保药剂浸金实验。在磨矿细度 -0.074 mm 占 75%, 尼尔森选矿机重力值为 60 G's, 水量为 3.8 L/min, 给矿速度 600 g/min 条件下, 重选精矿可回收原矿中 47.2% 的金。重选尾矿磨矿至 -0.074 mm 占 90%, 矿浆浓度为 40%, 石灰用量 2000 g/t, 铁氰化钾助浸剂用量 100 g/t, 预处理 2 h, 金蝉环保药剂用量 2000 g/t, 浸出 32 h 的条件下, 重选尾矿浸出回收率 92.0%, 可回收原矿中 48.6% 的金。最终金总回收率 95.8%。

关键词: 有色金属冶金; 金矿; 尼尔森重选; 尾矿浸出; 助浸剂; 环保药剂

中图分类号: TD953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)01-0061-06

Study on gravity separation and environmental friendly agent leaching of a gold ore in Laos

KANG Wei-gang, CHEN Jing-yu

(Tianjin Huakan Group Co. Ltd., Tianjin 300170, China)

Abstract: Knelson gravity separation (GS) and gold leaching of GS tailings by environmental friendly agents were conducted to beneficiate an altered rock type gold ore from Laos. The recovery rate of gold in the raw ore is 47.2% of GS under the following conditions: the grinding fineness of -0.074 mm accounting for 75%, a force of 60 G's Knelson Concentrator, 3.8 L/min of water flow and 600 g/min of feeding speed. The leaching operation recovery rate of GS tailings is 92.0% and the recovery rate of gold in the raw ore is 48.6% under the grinding fineness of -0.074 mm content accounting for 90%, 40% of slurry concentration, pretreatment 2 h after adding 2000 g/t of lime and 100 g/t of auxiliary leaching reagent potassium ferricyanide, 2000 g/t of Jinchuan environmental agent, leaching time 32 h. The total gold recovery rate is 95.8%.

Key words: non-ferrous metallurgy; gold ore; Knelson gravity separation; tailings leaching; auxiliary leaching reagent; environmental agent

黄金是一种贵金属, 是制作首饰和钱币的重要原料。随着科学技术和现代工业的发展, 黄金在航空航天、医学、电子学和其他工业部门, 也发挥着重要的作用。对黄金的需求不断增加, 合理开发利用黄金矿山对黄金产业可持续发展有重大意义^[1]。

老挝某金矿矿石属蚀变岩型金矿石, 金为矿石中唯一可回收元素。矿石中金矿物粒度组成以中粗粒金为主, 适于用重选法提前回收。金属矿物以铁的硫化物为主, 主要包括黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿等, 部分金包裹在硫化物中, 属于较难处理金矿石。

尼尔森选矿机是一种高效的离心重选设备, 具有处理量大、富集比高、体积小、生产成本低等优点^[2-6], 可用于重选矿物的优先选矿。金蝉环保药剂^[7-11]是一种非氰试剂, 主要成分为三聚氰酸盐、硫脲、碱和碳酸盐等, 具有低毒环保特性。用金蝉环保药剂替代氰化钠, 可避免剧毒氰化物药剂带来的环境污染和危害等潜在问题。本文针对该金矿矿石, 采用尼尔森重选获取金精矿, 采用环保药剂浸出回收重选尾矿中的金, 根据获得的最佳工艺参数进行验证试验, 为现场生产提供技术依据。

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 天津市“一带一路”科技创新合作项目(18PTWJHZ00080)

第一作者: 康维刚, 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 有色金属选矿。E-mail: kwg1979@aliyun.com

1 矿石性质

老挝某金矿矿石多元素定量分析、矿物相含量和金粒度测量结果分别列于表 1~表 3。

表 1 矿石多元素定量分析结果

Tab.1 Multi-element quantitative analysis results of ore /%								
元素	Au*	Ag*	C 有	S	As	Sb	TFe	SiO ₂
含量	5.47	1.3	<0.01	1.25	0.31	0.0004	6.43	51.12
元素	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	WO ₃	Cu	/
含量	3.10	11.28	9.21	1.55	2.05	0.0082	0.010	/

*注：Au、Ag 含量单位为 g/t，本文下同。

表 2 矿石矿物组成检测结果

Tab.2 Mineral composition analysis results of ore %			
金属矿物		非金属矿物	
矿物	相对含量	矿物	相对含量
黄铁矿	2.4	石英	33
毒砂	0.7	绢云母、绿泥石、斜长石等硅酸盐矿物	45.3
黄铜矿	0.05		
磁黄铁矿	0.05	方解石、白云石等碳酸盐矿物	18
金红石、钛铁矿等氧化物	0.5		
小计	3.70	小计	96.30
合计	100		

表 3 金粒度测量结果

Tab.3 Measurement results of gold particle size						
粒级区间/mm	>0.1	0.1~0.074	0.074~0.053	0.053~0.037	<0.037	合计
相对含量/%	16.0	20.1	17.8	26.2	19.9	100

从表 1~表 3 数据可以看出，原矿中金的综合品位为 5.47 g/t。矿石中金属矿物含量较低，仅占矿物相对含量的 3.70%。其中，以铁的硫化物为主，主要包括黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿，还含有少量的黄铜矿，占矿物相对含量的 3.20%；氧化物以金红石和钛铁矿为主，占矿物相对含量的 0.50%。脉石矿物以石英、绢云母、绿泥石等硅酸盐矿物为主，其次为方解石、白云石等碳酸盐矿物。矿石类型为蚀变岩型金矿石。

矿石中金主要以自然金形式存在，约占 66.5%；其次以类质同象或包裹体形式赋存在黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿等硫化物中，黄铁矿中占 22.7%；毒砂、

黄铜矿和磁黄铁矿中占 8.7%，脉石矿物中含量少。属于微细粒包裹体，或者为极细小的黄铁矿、毒砂等包裹体。

矿石中金矿物粒度组成以中粒金为主，0.037~0.074 mm 占 44%；粒度大于 0.074 mm 的粗粒级占 36.1%；小于 0.037 mm 粒级的占 19.9%。该矿石中金粒级属中粗粒金(合计占比 80.1%)。

2 实验部分

2.1 设备及试剂

主要实验设备包括 PEX-100×125 鄂式破碎机、XPS-250×150 辊式粉碎机、RK/ZQM(BM) φ150×50 智能锥形球磨机、KC-MD3 尼尔森离心选矿机、RK/XJT-1.0 浸出搅拌机等。

浸金所用金蝉环保药剂来自广西森合高新科技股份有限公司。其他试剂包括过氧化钠(Na₂O₂)、铁氰化钾(K₃[Fe(CN)₆])、石灰(CaO)等均为分析纯。

2.2 实验方法

2.2.1 尼尔森重选

将 15 kg 样品磨矿至细度为-0.074 mm 占 75%，进行制浆。尼尔森选矿机重力值设定为 60 G's，控制冲洗水量为 3.8 L/min，开启尼尔森选矿机。控制给矿速度为 600 g/min，使矿浆均匀地给入尼尔森选矿机进行离心重选，定期取下富集锥清理重砂。分选完毕，利用淘金盘对收集的重砂进行淘洗，淘洗产品作为精矿；淘洗尾渣同尼尔森重选尾渣一同作为尾矿。对得到的精矿和尾矿进行过滤烘干，称重并计算产率。精矿全部用王水溶解，采用容量法测定金，计算精矿回收率；尾矿作为后续浸金的原料，取样后采用火试金-原子吸收光谱法测定金品位。重力选矿流程如图 1 所示。

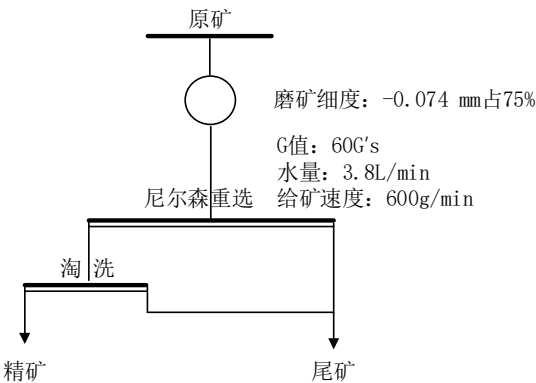


图 1 重选实验流程及条件

Fig.1 Flowsheet and conditions of Knelson gravity separation

2.2.2 尾矿中金的浸出

尾矿中金的搅拌浸出流程如图 2 所示。

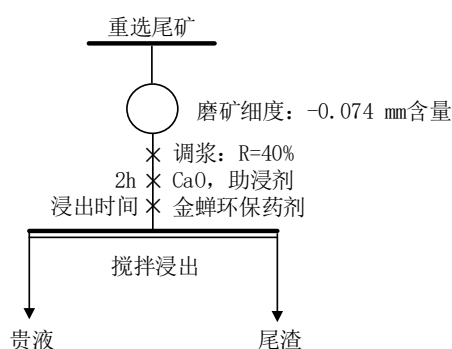


图 2 重选尾矿环保药剂浸金实验流程

Fig.2 Flowsheet of environmental agent leaching of GS tailings

浸出实验每次取尾矿样品 300 g，磨矿后配制成浓度 40% 的矿浆，添加石灰及助浸剂，开启搅拌预处理 2 h 后，添加浸金剂进行搅拌浸出。达到设定浸出时间后，取出过滤、洗涤，尾渣烘干，取样测定尾渣金品位，计算金浸出率。浸出实验主要考察磨矿细度、助浸剂及用量、石灰用量、金蝉环保药剂用量、浸出时间等条件对浸金效果的影响。

3 结果与讨论

3.1 尼尔森重选

矿石中，中粗颗粒金合计占金矿物颗粒组成的 80.1%，采用重力选矿提前回收可以提高金的综合回收率。原矿按选定条件进行尼尔森重选，结果如表 4 所列。表 4 结果表明，在选定操作条件下，尼尔森重选获得精矿产率为 0.021%，金品位为 12499 g/t，可回收原矿中 47.2% 的金，重选精矿经进一步富集后可直接进入冶炼提纯作业。说明该矿石中的金适宜采用尼尔森选矿机预先重选回收。重选尾矿中金品位为 2.89 g/t，后续采用浸出法回收。

3.2 重选尾矿中金的浸出

3.2.1 磨矿细度

矿石的磨矿细度决定了金的解离度，理论上磨矿细度越细，金解离度越高，但磨矿细度越细，所需要的能耗就越高，矿石过磨也会影响金的浸出效果，因此选择合适的矿石磨矿细度至关重要。结合实际情况，在矿浆浓度为 40%，石灰用量为 3000 g/t，碱预处理 2 h，金蝉环保药剂用量 2000 g/t，浸出时间为 40 h 条件下，考察了磨矿细度对浸金效果的影响。结果如图 3 所示。

表 4 尼尔森重选实验结果(-0.74 mm 75%)

Tab.4 Test results of Knelson gravity separation(-0.74 mm 75%)

产物名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
重精矿	0.021	12499	47.2
尾矿	99.979	2.89	52.8
原矿	100	5.47	100

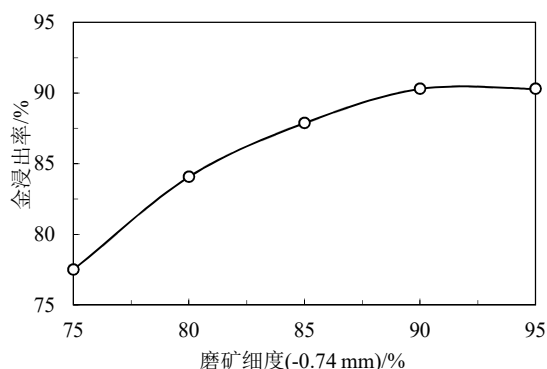


图 3 磨矿细度对浸出效果的影响

Fig.3 Influence of grinding fineness on leaching performance

由图 3 可以看出，随着磨矿细度-0.074 mm 含量的增加，尾渣金品位不断降低，金浸出率不断升高。当磨矿细度达到-0.074 mm 含量占 90% 时，金浸出率 90.3%；之后随着磨矿细度增加，金浸出率保持稳定。因此合适的磨矿细度为-0.074 mm 含量占 90%。

3.2.2 助浸剂及用量

由于该矿石中主要金属矿物为铁的硫化物，且与金关系密切，黄铁矿和毒砂等的存在对浸金药剂消耗及浸出效果均会造成一定影响。为了减少药剂消耗，提高金浸出率，研究了加入过氧化钠和铁氰化钾作为助浸剂^[12-13]对金浸出效率影响。在磨矿细度-0.074 mm 含量为 90%，矿浆浓度为 40%，石灰用量为 3000 g/t，加入不同量的过氧化钠或铁氰化钾作为助浸剂，石灰和助浸剂预处理 2 h，金蝉环保药剂用量为 2000 g/t，浸出 40 h，考察助浸剂用量对金浸出效果的影响。结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 结果可以看出，在过氧化钠助浸剂用量为 100 g/t 时，金浸出率明显得到提高，由不添加助浸剂时的 90.3% 提升至 92.0%，之后随着过氧化钠用量增加，尾渣金品位基本不再降低，金浸出率基本保持稳定，过氧化钠较适宜的用量为 100 g/t。

由图 5 可以看出，在铁氰化钾助浸剂用量为 100 g/t 时，金浸出率由不添加助浸剂时的 90.3% 提高至 92.0%，之后继续增加铁氰化钾用量，尾渣金品位

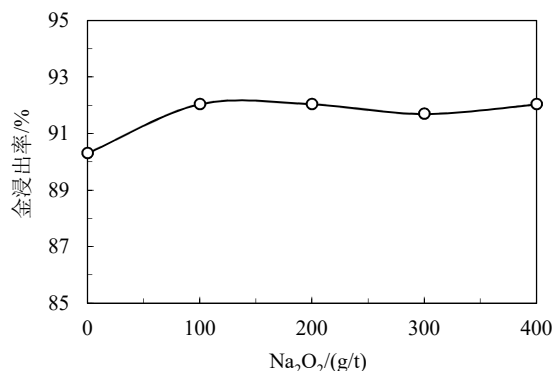


图 4 过氧化钠助浸剂对浸出效果的影响

Fig.4 Influence of auxiliary leaching reagent sodium peroxide on leaching performance

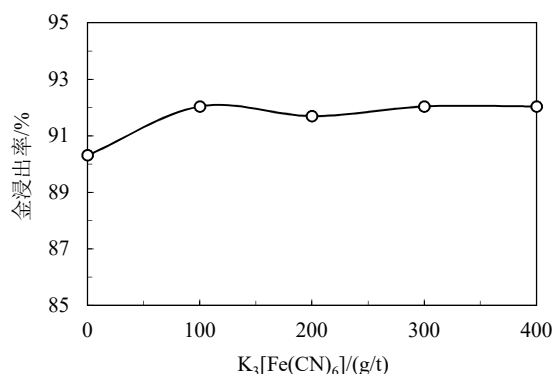


图 5 铁氰化钾助浸剂对浸出效果的影响

Fig.5 Influence of auxiliary leaching reagent potassium ferricyanide on leaching performance

基本保持不变，浸出率不再提高，因此铁氰化钾较适宜的用量为 100 g/t。

助浸剂及用量实验表明，助浸剂对该矿石中的金浸出具有促进作用，两种氧化剂较适宜的用量均为 100 g/t。但考虑到强氧化剂过氧化钠对运输保存条件要求高，具有强腐蚀性，而铁氰化钾相对温和，因此最终确定铁氰化钾作为助浸剂。

3.2.3 石灰用量

磨矿细度-0.074 mm 含量为 90%，矿浆浓度为 40%，铁氰化钾助浸剂用量为 100 g/t，石灰和助浸剂预处理 2 h，金蝉环保药剂用量为 2000 g/t，浸出时间为 40 h 条件下，考察了石灰用量(对应不同的 pH 值)对浸出效果的影响，结果如图 6 所示。由图 6 结果可以看出，随着石灰用量的增大，pH 值升高，尾渣品位逐渐降低。当石灰用量达到 2000 g/t 时，矿浆初始 pH 值为 11.5，金浸出率 92.0%；之后随着石灰用量增加，pH 值进一步升高，但尾渣金品位不再降低，金浸出率基本保持稳定。根据这一结果，石灰用量采用 2000 g/t，矿浆 pH 值>11.5 为宜。

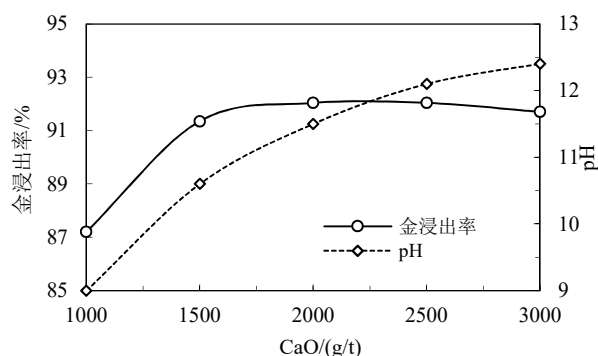


图 6 石灰用量对浸出效果的影响

Fig.6 Influence of lime dosage on leaching performance

3.2.4 金蝉环保药剂用量

在磨矿细度-0.074 mm 含量为 90%，矿浆浓度为 40%，铁氰化钾助浸剂用量为 100 g/t，石灰用量为 2000 g/t，石灰和助浸剂预处理 2 h，浸出时间为 40 h 条件下，考察了金蝉环保药剂用量对浸金效果的影响。结果如图 7 所示。

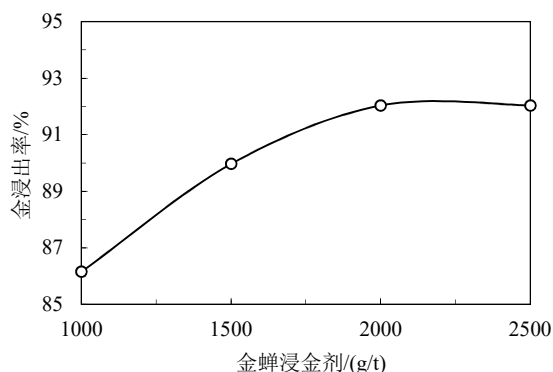


图 7 金蝉环保药剂用量对浸出效果的影响

Fig.7 Influence of Jinchan environmental agent dosage on leaching performance

由图 7 可知，随着金蝉环保药剂用量的增加，尾渣金品位逐渐降低，金浸出率不断提高。当金蝉环保药剂用量达到 2000 g/t 时，达到最高 92.0%，之后加大金蝉环保药剂用量金浸出率不变。金蝉环保药剂的适宜用量为 2000 g/t。

3.2.5 浸出时间

在磨矿细度-0.074 mm 含量为 90%，矿浆浓度为 40%，铁氰化钾助浸剂用量为 100 g/t，石灰用量为 2000 g/t，石灰和助浸剂预处理 2 h，金蝉浸金剂用量为 2000 g/t 条件下，考察了浸出时间对浸金效果的影响。结果如图 8 所示。

由图 8 结果可知，随着浸出时间的延长，尾渣金品位逐渐降低，金浸出率逐渐提高。当浸出时间

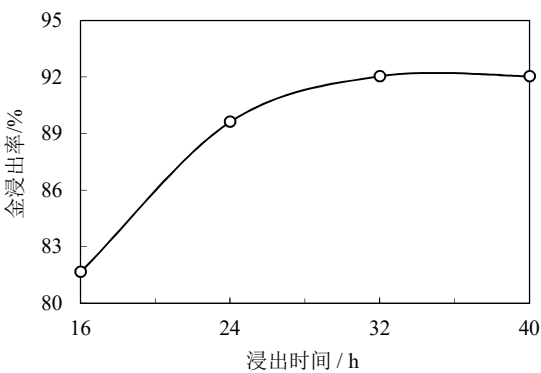


图 8 浸出时间对浸出效果的影响

Fig.8 Influence of leaching time on leaching performance

为 16 h 时，金浸出率为 81.7%；当浸出时间为 32 h 时，达到 92.0%，之后随着浸出时间延长，浸出率不再提高，因此较适宜的浸出时间为 32 h。

3.3 条件验证试验

为验证重选及重尾环保药剂浸金对老挝某金矿石浸出效果，开展了最优条件验证试验。流程见图 9，结果如表 5 和表 6 所列。

由表 5 结果可知，在磨矿细度为-0.074 mm 占 75%时，尼尔森重选验证实验，重精矿品位为 10381 g/t，产率为 0.028%，重选金回收率 53.1%。由表 6 结果可知，在重选尾矿磨矿细度为-0.074 mm 占 90%，矿浆浓度为 40%，石灰用量 2000 g/t，铁氰化钾助浸剂用量 100 g/t，预处理 2 h，金蝉环保药剂用量 2000 g/t，浸出 32 h 的条件下，重选尾矿中金的浸出率能够达到 90.6%以上，可回收原矿中 42%以上的金。重选+尾矿浸出合计，原矿中金的总回收率达到 95.5%以上。

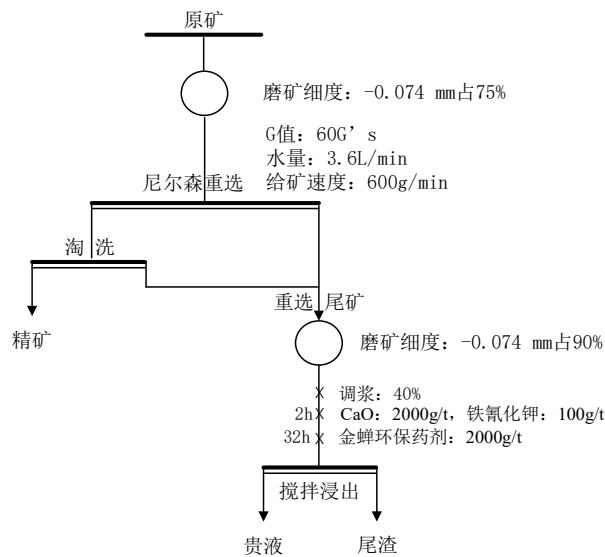


图 9 条件验证实验流程

Fig.9 Flowsheet of conditional verification test

表 5 重选条件验证实验结果(-0.074 mm 75%)

Tab.5 Test result of GS conditional verification (-0.074 mm 75%)

产物名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
重选精矿	0.028	10381	53.1
重选尾矿	99.972	2.56	46.9
原矿	100	5.47	100

表 6 重尾环保药剂浸金条件验证实验结果

Tab.6 Test result of environmental agent leaching conditional verification of GS tailings

序号	尾渣品位/(g/t)	浸出回收率/%	对原矿回收率/%	金总回收率/%
1	0.23	91.0	42.6	95.7
2	0.22	91.1	42.8	95.9
3	0.24	90.6	42.4	95.5

重选+尾矿浸出结果充分表明，中粗颗粒金在重选流程中得到回收，避免了中粗颗粒金在直接浸出工艺中长期留存而得不到及时回收的问题，实现了金能收早收的目的，经济效益显著。

4 结论

1) 老挝某金矿石中金品位为 5.47 g/t。金属矿物含量较低，以铁的硫化物为主。矿石中金矿物粒度组成以中粗粒金为主，适合采用重选-尾矿浸出工艺回收金。

2) 尼尔森重选探索实验表明，在磨矿细度 -0.074 mm 占 75%，尼尔森选矿机重力值为 60G's，水量为 3.8 L/min，给矿速度 600 g/min 条件下，重选精矿产率为 0.021%，重选精矿品位达到 12499 g/t，原矿重选金回收率 47.2%。

3) 重选尾矿环保药剂浸金实验表明，在磨矿细度为-0.074 mm 占 90%，矿浆浓度为 40%，石灰用量 2000 g/t，铁氰化钾助浸剂用量 100 g/t，预处理 2 h，金蝉浸金剂用量 2000 g/t，浸出 32 h 的条件下，浸出率 92.0%，可回收原矿中 48.6%的金。

4) 条件验证实验表明，尼尔森重选可以预先回收矿石中的中粗颗粒金，重选精矿产率 0.028%，重选精矿品位 10381 g/t，重选金回收率 53.1%；重选尾矿环保药剂浸出效果稳定，浸出率 90.6%，最终浸出渣金品位为 0.24 g/t，金的总回收率 95.5%。

参考文献:

- [1] 应永朋, 苏世杰, 陈攀, 等. 青海某金矿石选矿工艺试验研究[J]. 黄金, 2020, 41(8): 67-70.
YING Y P, SU S J, CHEN P, et al. Experimental study on the ore-dressing process for a gold ore in Qinghai[J]. Gold, 2020, 41(8): 67-70.
- [2] 李卫, 焦芬, 王旭, 等. 赞比亚某金矿选矿工艺试验研究[J]. 贵金属, 2019, 40(1): 30-36.
LI W, JIAO F, WANG X, et al. Experimental study on mineral processing technology for a gold ore from Zambia[J]. Precious Metals, 2019, 40(1): 30-36.
- [3] 黄业豪, 孙景敏, 李翠芬, 等. 内蒙古某金矿尼尔森重选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(3): 75-78.
HUANG Y H, SUN J M, LI C F, et al. Experimental study on the Knelson gravity separation of a gold ore in Inner Mongolia[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(3): 75-78.
- [4] 武俊杰. 陕西省某金矿尼尔森选金试验研究[J]. 贵金属, 2013, 34(3): 28-31.
WU J J. Study on Knelson beneficiation of gold ore in Shanxi Province[J]. Precious Metals, 2019, 34(3): 28-31.
- [5] 张崇辉, 何廷树, 孙腾飞, 等. 某金矿尼尔森重选试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(6): 34-37.
ZHANG C H, HE T S, SUN T F, et al. Application of Knelson concentrator in gravity separation of a gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(6): 34-37.
- [6] 康维刚, 陈京玉, 谢建平, 等. 老挝某金矿重选-重选尾矿氰化浸金实验[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4): 122-124, 129.
KANG W G, CHEN J Y, XIE J P, et al. Experiment of gravity concentration-cyanide gold leaching process for gold ore in Laos[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(4): 122-124, 129.
- [7] 郭鹏志, 邱沙, 吴艺鹏, 等. 采用环保“金蟬”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 Jinchuan leaching reagents[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(12): 131-135.
- [8] 康维刚, 陈京玉, 谢建平, 等. 老挝某金矿环保浸金工艺应用及优化[J]. 矿冶, 2020, 29(3): 31-35.
KANG W G, CHEN J Y, XIE J P, et al. Application and optimization of environmental friendly gold leaching process in a gold mine of Laos[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(3): 31-35.
- [9] 康维刚, 陈京玉, 谢建平, 等. 环保浸金剂在老挝爬奔金矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 26-29.
KANG W G, CHEN J Y, XIE J P, et al. Application of environmental friendly leaching agent in Phattem gold mine of Laos[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(2): 26-29.
- [10] 何美丽. 福建某低品位金矿新型浸金剂浸金试验[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 62-66.
HE M L. Gold leaching test of new gold ligands for a low-grade gold mine of Fujian[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(6): 62-66.
- [11] 党晓娥, 孟裕松. 环保药剂浸出多金属硫金矿及伴生元素在浸出过程的行为[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(10): 48-54.
DANG X E, MENG Y S. Leaching of polymetallic sulfur gold mine with environments-friendly reagent and leaching behavior of associated metals[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(10): 48-54.
- [12] 刘洋, 胡显智, 魏志聪. 助浸剂在氰化提金中的研究进展[J]. 矿冶, 2011, 20(2): 57-62.
LIU Y, HU X Z, WEI Z C. Research progresses on assistant leaching agent in cyanide leaching of gold ore[J]. Mining and Metallurgy, 2011, 20(2): 57-62.
- [13] 刘亚川, 谷晋川. 金矿石氰化浸出助浸剂研究[J]. 黄金, 1999(2): 37-39.
LIU Y C, GU J C. Study of leaching agent for cyanide leaching of gold ores[J]. Gold, 1999(2): 37-39.