

四川某低品位微细粒氧化金矿非氰浸出试验研究

陈福林¹, 杨晓军², 文永才¹, 王志杰¹, 黄 延¹

(1. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000;

2. 四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心, 成都 610081)

摘 要: 对金品位为 2.02 g/t 的某低品位氧化微细粒金矿开展了全泥浸出提取金的试验研究。优选出非氰浸出剂 CC-1, 确定了相应工艺参数, 在此基础上开展了 3 个粒级柱浸试验, 对柱浸含金溶液进行了活性炭吸附试验, 研究表明该矿石适宜于利用非氰浸出剂 CC-1 堆浸回收金。矿石磨至-200 目占 80%、矿浆液固比 2:1、石灰用量 3000 g/t 原矿、CC-1 浓度 0.10%、浸出时间 30 h 条件下金浸出率 92.75%; 在石灰用量 3000 g/t、CC-1 浓度 0.10%、浸出时间 10 d 时-10 mm 矿样 Au 浸出率 92.46%, 浸出时间 15 d 时-20 mm 及-30 mm 矿样 Au 浸出率分别为 91.49%、89.24%。采用 CC-1 作为浸出剂的含 Au 溶液活性炭吸附率为 95.72%~97.11%。

关键词: 低品位; 氧化金矿; 非氰浸出; 活性炭吸附

中图分类号: TD953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)03-0046-05

Experimental study on non- cyanide leaching of a low grade oxidized micro fine gold ore in Sichuan

CHEN Fulin¹, YANG Xiaojun², WEN Yongcai¹, WANG Zhijie¹, HUANG Yan¹

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua Iron & Steel Research

Institute Co. Ltd. of Pangang Group, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Chengdu Comprehensive Rock and

Ore Test Centre of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: Leaching experiments were carried out to extract Au from a low-grade oxidized fine-grained gold ore with Au grade of 2.02 g/t by adopting the whole slime leaching method. The non-cyanide leaching agent CC-1 was selected and the corresponding parameters were determined. On this basis, leaching tests were done on three ore samples of different particle size and then gold was absorbed from the leaching solution by activated carbon filled in column. It is shown that the heap leaching with the non-cyanide leaching agent CC-1 was suitable for the ore. The leaching rate of Au reached 92.75%, when the ore was ground to -200 mesh accounting for 80% and the slurry liquid-solid ratio was 2:1 and the lime dosage was 3000 g/t raw ore and the CC-1 concentration is 0.10% and the leaching time was 30 h. The adsorption rate of gold from the leaching solution was up to 95.72% ~ 97.11%.

Key words: low grade; oxidized gold ore; non-cyanide leaching; activated carbon adsorption

金主要用于国家硬通货储备和制作装饰品, 同时金及其合金还广泛应用于珠宝、陶瓷、电子、电气、化工、宇航和国防尖端工业^[1-2]。金在地壳中常以自然元素存在, 少量与硫、硒、碲和锑形成化合物存在于矿石中形成金矿床^[3-5]。自然界中, 金常与

银共生, 并与黄铁矿、方铅矿、毒砂、黄铜矿、辉钼矿和闪锌矿密切相关^[1, 3, 6]。金的选别方法与其赋存状态和载金矿物紧密相关, 常见金矿选别工艺有重选、浮选、堆浸、全泥氰化浸出、氧化焙烧浸出、高压氧化浸出及微生物浸出等^[3-4, 7-11]。

收稿日期: 2022-09-11

第一作者: 陈福林, 男, 高级工程师; 研究方向: 矿产资源综合利用和难选矿石选矿; E-mail: 277454853@qq.com

虽然氰化法具有浸金效果稳定、成本低、工艺简单、在提金领域占统治地位等优势，但氰化物具有剧毒、危害从业人员身体健康、环境污染严重、对特殊矿种浸出时间长等缺陷。近年来，随着世界各国对安全环保越来越重视和易选矿石的逐渐减少，硫代硫酸盐法、硫氰酸盐法、硫脲法、液氯法、多硫化物与石硫合剂法等非氰浸金逐渐得到广泛研究和应用^[12-14]。本文针对某低品位含金石英脉型微细粒氧化金矿开展了实验室全泥浸出、非氰柱浸及含金浸液活性炭吸附试验研究。

1 试验

1.1 原料和试剂

1.1.1 原料

试样采自于四川省木里县某金矿床氧化带，矿样化学成分见表 1，金化学物相分析结果见表 2。

表 1 样品化学成分分析结果(质量分数)

Tab.1 The chemical elements (mass fraction) of the sample /%						
成分	Au*	Ag*	S	As	TFe	Cu
含量	2.02	<1.0	0.03	0.10	8.70	0.01
成分	Pb	Zn	有机碳	SiO ₂	MgO	CaO
含量	0.0045	0.0152	0.20	54.36	2.70	3.93
成分	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO
含量	12.01	2.40	0.09	0.33	1.73	0.21

*注：Au、Ag 含量单位为 g/t，本文下同。

表 2 样品金的化学物相分析结果

Tab.2 Chemical phase analysis results of gold in the sample						
项目	游离金	碳酸盐	褐(赤)铁矿	硫化物	硅酸盐	总计
金含量/(g/t)	1.66	0.09	0.16	0.05	0.06	2.02
分布率/%	82.18	4.46	7.92	2.48	2.96	100

由表 1 及表 2 可知，原矿金品位 2.02 g/t，以游离金为主，部分包裹于(赤)褐铁矿、碳酸盐、硅酸盐及硫化物中。矿石属含金石英脉型氧化矿，原生的黄铁矿和砷黄铁矿蚀变较为彻底，人工重砂和显微镜下均未见金颗粒，判定其为微细粒金矿。矿样主要金属矿物为针铁矿，为黄铁矿蚀变产物，呈粉尘、隐晶质混杂于脉石矿物间，或沿脉石矿物粒间淋滤充填，或与显微鳞片状绢云母混为一体；其脉石矿物主要为绢云母和石英，少量斜长石。

1.1.2 浸金试剂

试验用非氰浸出剂为实验室自制药剂 CC-1 及 CC-2。CC-1 由化学纯 Na₂S₂O₃、多硫化铵、卤化物、Na₂SO₄、CuSO₄ 及少量添加剂按一定比例配制并经特殊加工得到，CC-2 由化学纯 Na₂S₂O₃、(NH₄)₂SO₄、Na₂SO₄、CuSO₄ 及少量添加剂按一定比例机械研磨混匀后得到。制备好的浸出剂密封、遮阴保存。CC-1 及 CC-2 均为浅灰色固体粉末，常温下易溶于水。对比试验用 NaCN 为工业级，石灰和椰壳活性炭为工业级，NaOH 为化学纯。

1.2 试验方法

1.2.1 全泥滚瓶浸出试验

全泥滚瓶浸出试验是在扰流紊态的矿浆中考察浸出剂种类及浓度、磨矿细度、石灰用量(pH)、浸出时间等因素对矿样金浸出效果的影响，并优选出非氰浸出剂。试验过程如下：将样品破碎混匀至-2 mm，经 XMB-φ200×240 棒磨机磨细、澄清浓缩至液固比 2:1 装入玻璃滚瓶，加入定量的石灰和浸出剂后置于 XMB-70 型三辊四筒磨矿机上，调速至 30 r/min 进行滚瓶全泥浸出试验，浸出试验完成后，矿浆经真空抽滤后得含金贵液，滤饼经 3 次清水冲洗过滤后得贫液和浸渣。采用 GB/T 11066.8-2009 标准方法测定溶液和浸渣中的金含量，金浸出率(R_{Au})按浸出液(贵液+贫液)中含金量与浸出液+浸出渣总含金量的比值计算。

1.2.2 柱浸试验

柱浸试验是为了模拟堆浸条件，考察采用非氰浸出剂时矿样中金的浸出效果。试验中将样品分别破碎、筛分至-30、-20 及-10 mm 等 3 个粒级样品，将与适量石灰混匀的各粒级样品置于 φ30 cm×1.2 m 有机玻璃柱中开展柱浸试验。柱浸过程如下：1) 用清水润湿整个矿层；2) 以全泥滚瓶浸出试验优选出的浸出剂开展柱浸试验，用定量的 0.025% NaOH 水溶液、0.10%浸出剂溶液循环喷淋浸出，根据循环浸出液中浸出剂下降程度补加浸出剂，浸出完成得含金贵液；3) 循环浸出完成后，用 0.025% NaOH 水溶液、0.05%浸出剂溶液喷淋浸出，浸出液不循环，直至浸出液中金浓度≤0.02 mg/L，视为终点，浸出完成得贫液和浸渣，计算金浸出率。

1.2.3 柱浸含金溶液活性炭吸附试验

为进一步考察采用 CC-1 为浸出剂时矿石堆浸的可行性，采用活性炭吸附柱对柱浸含金溶液进行吸附试验，吸附装置如图 1 所示。

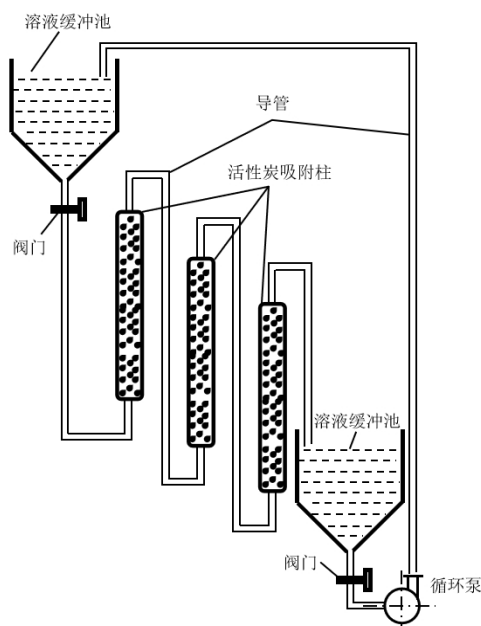


图1 含金浸液活性炭吸附装置

Fig.1 Activated carbon adsorption device for leaching solution containing Au

吸附操作流程为：1) 称取约 180 g 清洗、烘干后的干净、粒度 1~2 mm 的椰壳活性炭等比例置于 3 个 $\phi 4\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 有机玻璃柱；2) 将柱浸贵液和贫液混合后以 10 L/h 的速度给入第一个炭吸附柱底部，第三个吸附柱顶部溢流返回吸附柱底部，形成循环吸附；3) 24 h 后取出载金炭，清洗、烘干、称重，测定载金炭和贫液中金含量，其中载金炭全熔分析。活性炭金吸附率按载金炭含金量(载金炭金品位 $\times$ 载金炭重量)与载金炭含金量+贫液含金量(贫液金品位 $\times$ 贫液体积)的比值计算。

2 结果与讨论

2.1 浸出条件对全泥非氰浸出效果的影响

2.1.1 浸出剂种类及浓度对全泥浸出效果的影响

在磨矿细度-200 目占 80%、石灰用量 3000 g/t、浸出时间 24 h，考察了浸出剂种类及浓度对矿样中金浸出率的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知，1) NaCN 及非氰浸出剂 CC-1、CC-2 均可浸出矿石中的大部分金；2) 3 种浸出剂金的浸出率均随浸出剂浓度升高先迅速升高后保持稳定；3) 金浸出效果 $\text{NaCN} \approx \text{CC-1} > \text{CC-2}$ ；4) 浸出剂耗量 $\text{CC-2} > \text{NaCN} > \text{CC-1}$ 。从矿石金的浸出效果和耗量综合评定，CC-1 浸出效果优于 NaCN 和 CC-2。

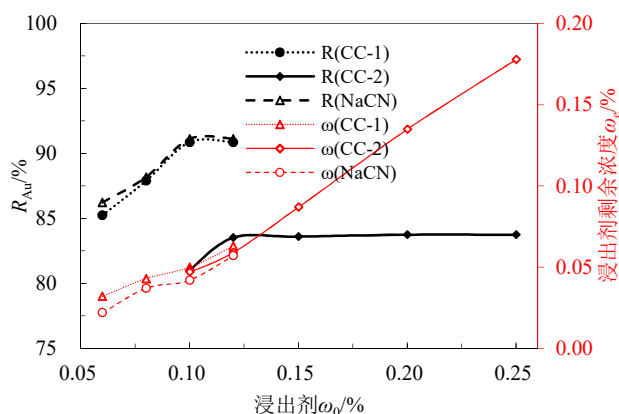


图2 浸出剂种类及浓度对金浸出率的影响

Fig.2 Effects of leaching agent types and concentrations on Au leaching rate

2.1.2 全泥浸出参数对 CC-1 浸出金效果的影响

采用 0.1% CC-1 溶液为浸出剂，经试验优选出的最佳工艺参数为磨矿细度-200 目占 80%、石灰用量 3000 g/t (pH 9.8)、浸出时间为 30 h，上述参数对金浸出率的影响如图 3~图 5 所示。

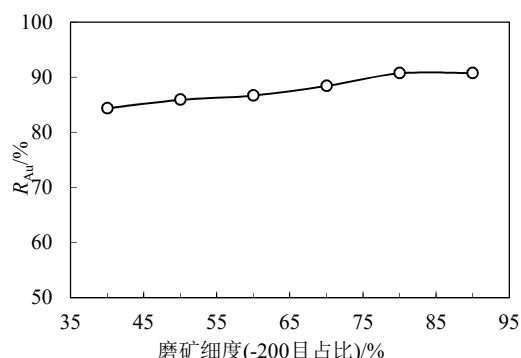


图3 磨矿细度对金浸出率的影响

Fig.3 Effects of grinding fineness on Au leaching rate

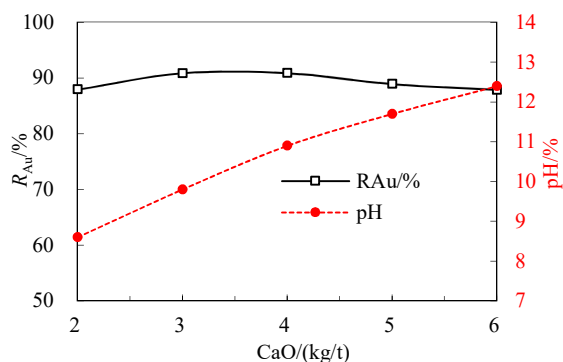


图4 石灰用量对金浸出率(CC-1)的影响

Fig.4 Effects of lime consumption on Au leaching rate (CC-1)

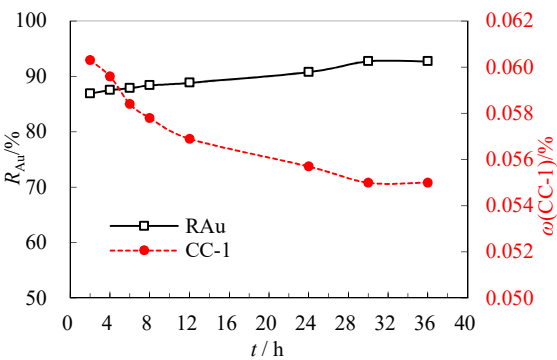


图 5 浸出时间对金浸出率的影响(CaO: 3 kg/t (pH 9.8))
Fig.5 Effects of leaching time on Au leaching rate

由图 3~图 5 可知, 1) 采用 CC-1 作为浸出剂时, 磨矿细度、石灰用量(pH)、浸出时间等参数对金浸出效果均有显著影响; 2) 随着磨矿细度提高和浸出时间延长, 金浸出率先升高后基本保持稳定(图 3、图 5), 石灰用量增大(pH 升高)使金浸出率先升高后有所下降(图 4); 3) 在磨矿细度-200 目占 80%、石灰用量 3000 g/t 原矿(pH=9.8)、浸出时间 30 h 时, 采用浓度 0.10%的 CC-1 浸出, 金浸出率为 92.75%。

2.2 浸出条件对柱浸效果的影响

参照全泥非氰浸出条件, 采用石灰用量 3000 g/t 原矿、NaOH 用量 277.78 g/t 原矿、浸液浸出剂 CC-1 浓度 0.10%、循环浸出液体积 80 L、洗液体积 40 L、喷淋面积 706.5 cm²、矿石重量 90 kg 等参数开展柱浸试验。柱浸试验其余参数见表 3, 矿石粒度及浸出时间对矿样金浸出率的影响如图 6 所示。

由表 3 及图 6 可知, 1) 矿样经表 3 及上述工艺参数进行柱浸, 可使金有效浸出; 2) 矿样粒度越小, 柱浸时塌陷越明显; 3) 矿样粒度越粗, 金浸出率有所下降; 4) -10 mm 矿样浸出过程前 3 d、-20 mm 及 -30 mm 矿样浸出过程前 8 d, 金浸出率相对较低且变化不大, 随后金的浸出率迅速增加直至终点, 表明柱浸过程的前期粗粒矿石内部金并未明显溶出, 而是浸出液浸润矿石颗粒内部后才会使其内部金溶出; 5) -10 mm 矿石 10 d 金的浸出率为 92.46%, -20 mm 矿石 15 d 金的浸出率为 91.49%, -30 mm 矿石 15 d 金的浸出率为 89.24%。

2.3 柱浸含金溶液活性炭吸附结果

3 个粒级矿样柱浸含 Au 溶液活性炭吸附试验结果列于表 4。由表 4 可知, 经 CC-1 浸出后含金溶液采用活性炭吸附, 可使 95.72%~97.11%的金进入活性炭, 对矿样采用堆浸法回收金无明显不良影响。

表 3 矿样柱浸试验工艺参数

工艺参数	样品		
	-10 mm 样品	-20 mm 样品	-30 mm 样品
浸液流速/(mL/min)	11.11	13.89	13.89
喷淋强度/[L/(min·m ²)]	0.16	0.20	0.20
入柱矿层高/mm	796	825	850
柱浸结束时层高/mm	728	770	800
塌陷度/%	8.54	6.67	5.88
最终贵液 Au/(mg/L)	1.95	1.97	2.00
最终贫液 Au/(mg/L)	0.302	0.218	0.056
浸出制度	循环浸出 8 d, 洗涤 2 d	循环浸出 13 d, 洗涤 2 d	循环浸出 13 d, 洗涤 2 d
CC-1 耗量/(kg/t 原矿)	2.32	1.78	1.45
浸渣 Au/%	0.15	0.17	0.22
RAu/%	92.46	91.49	89.24

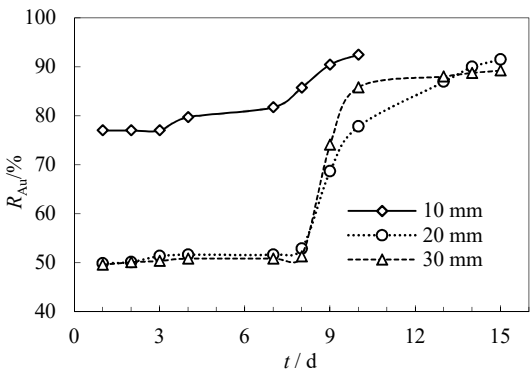


图 6 粒度及浸出时间对金浸出率的影响
Fig.6 Effects of ore size and leaching time on Au leaching rate

3 结论

- 1) 矿样含金 2.02 g/t, 金主要以游离形式存在, 矿样主要金属矿物针铁矿为黄铁矿深度蚀变产物, 为低品位微细粒氧化石英脉金矿石, 有利于用浸出法回收。
- 2) 经浸出剂种类及浓度、磨矿细度、石灰用量(矿浆 pH)、浸出时间等工艺参数条件试验确定非氰浸出剂 CC-1 对矿样金具有良好的浸出效果; 磨矿细度-200 目占 80%、矿浆 pH 9.8、CC-1 浓度 0.10%、浸出时间 30 h 时, 金浸出率 92.75%。
- 3) 采用非氰浸出剂 CC-1 经柱浸可有效浸出

表 4 柱浸含金溶液活性炭吸附试验结果

Tab.4 Adsorption test results of column leaching Au-containing solution on activated carbon

样品名称	柱浸溶液		载金炭		吸附贫液		载金炭 吸附率/%
	体积/L	Au/(mg/L)	质量/g	Au/(μg/g)	体积/L	Au/(mg/L)	
-10 mm 样品	120.0	1.401	181.0742	888.7	120.0	0.06	95.72
-20 mm 样品	120.0	1.386	180.4427	895.1	120.0	0.04	97.11
-30 mm 样品	120.0	1.352	179.8678	875.3	120.0	0.04	97.04

金，矿石粒度与浸出时间对金的浸出效果有显著影响，浸出前期主要表现为浸出液进入矿石内部，后期才表现为浸取矿石内部的金；-10 mm 矿样 10 d 金浸出率 92.46%，-20 mm 和-30 mm 矿样 15 d 金浸出率分别为 91.49%和 89.24%。

4) 柱浸含金溶液采用活性炭吸附，金吸附率 95.72%~97.11%，与 NaCN 作为浸出剂相近。

5) 该低品位微细粒氧化金矿适宜采用非氰浸出剂 CC-1 堆浸回收金，无毒环保，应用前景良好。

参考文献：

[1] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京：地质出版社, 2014.

[2] 黄晟, 吕兵超, 廖银英, 等. 某含金多金属矿尼尔森重选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(2): 51-56.
HUANG S, LV B C, LIAO Y Y, et al. Study on nelson gravity separation of a polymetallic ore bearing gold[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2): 51-56.

[3] 陈福林, 杨晓军. 某金矿可选性试验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(4): 47-49.
CHEN F L, YANG X J. Experimental investigation on beneficiability of a gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(4): 47-49.

[4] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿[M]. 冶金工业出版社, 1987.

[5] 黄礼煌. 金银提取技术[M]. 北京：冶金工业出版社, 2001.

[6] 陈福林, 余新文, 杨晓军, 等. 某铜金矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(6): 11-14.
CHEN F L, YU X W, YANG X J, et al. Experimental research on mineral processing technology for separating a Cu-Au ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2010(6): 11-14.

[7] 何婷, 杨晓军, 陈福林, 等. 新型抑制剂 DH 在某碳质板岩金矿石浮选中的应用[J]. 现代矿业, 2016(7): 97-98.
HE T, YANG X J, CHEN F L, et al. Application of new depressant DH in flotation of a carbonaceous gold ore[J]. Modern Mining, 2016(7): 97-98.

[8] 赵杰, 赵志强, 罗思岗, 等. 某含砷金矿浮选提金降砷试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(2): 63-65.
ZHAO J, ZHAO Z Q, LUO S G, et al. Experimental study on gold extraction and arsenic reduction of an arsenic-bearing gold mine by flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(2): 63-65.

[9] 刘静宇. 某金矿重选尾矿回收金、铜的工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 112-115.
LIU J Y. Recovery of gold and copper from tailings of gravity separation in a gold ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1): 112-115.

[10] 林炜. 高压辊磨破碎原生金矿的柱浸试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(5): 56-60.
LIN W. Experimental study on column leaching of primary gold ore by high pressure roller grinding[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5): 56-60.

[11] 余洪, 谢蕾, 蔡祥, 等. 活性炭吸附回收浸出液中金络合物的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2019(1): 28-33.
YU H, XIE L, CAI X, et al. Research progress of recovery of gold complex by activated carbon from leaching liquid[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1): 28-33.

[12] 慕杰, 杨俊龙, 郭艳华, 等. 难选氧化金矿氰化助浸试验研究[J]. 贵金属, 2021, 42(1): 11-15.
MU J, YANG J L, GUO Y H, et al. Experimental study on cyanide leaching of refractory oxidized gold minerals[J]. Precious Metals, 2021, 42(1): 11-15.

[13] 陶媛媛, 项朋志, 周小华, 等. 硫脲浸金电化学行为研究[J]. 贵金属, 2021, 42(1): 22-27.
TAO Y Y, XIANG P Z, ZHOU X H, et al. Study on the electrochemical behavior of thiourea leaching gold[J]. Precious Metals, 2021, 42(1): 22-27.

[14] 贾玉娟. 高砷高硫金矿焙砂碱介质相重构及非氰浸金[D]. 贵阳：贵州大学, 2019.
JIA Y J. Phase reconstruction and non-cyanide leaching of hiah arsenic and hiah sulfur gold calcine in alkali mediums[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.