

## 微细浸染型金矿强化湿法预处理研究

杨典奇<sup>1</sup>, 唐 云<sup>1\*</sup>, 唐立靖<sup>1</sup>, 王 珏<sup>1</sup>, 王红星<sup>2</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025; 2. 黔西南金龙黄金矿业有限责任公司, 贵州 黔西南州 552405)

**摘要:** 采用两段充气预处理-非氰化工艺浸出微细浸染型金矿, 研究了浸出条件对金浸出效率的影响。结果表明, 在氧化和碱浸预处理 2 个阶段充气可提高金浸出率; 氧化预处理 2 h 后, 加入氢氧化钠(20 kg/t)碱浸预处理 4 h, 加入氧化钙(40 kg/t)替代氢氧化钠, 用 TY-3 浸出剂(8 kg/t)浸出 4 h, 金浸出率可达 87.21%。浸出渣的物相分析、扫描电镜观察及 X 射线能谱分析结果显示, 硅酸盐、碳酸盐中的金可被有效浸出, 浸出渣中的石英、黄铁矿表面发生腐蚀, 部分黄铁矿氧化。

**关键词:** 有色金属冶金; 微细浸染型金矿; 充气; 两段预处理; 非氰浸出

**中图分类号:** TD953, TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)04-0044-05

### Enhanced Hydrometallurgical Pretreatment of Micro-disseminated Gold Ore

YANG Dianqi<sup>1</sup>, TANG Yun<sup>1\*</sup>, TANG Lijing<sup>1</sup>, WANG Jue<sup>1</sup>, WANG Hongxin<sup>2</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Qianxinan JinLong Gold Mining Limited Liability Company, Qianxinan 562405, Guizhong, China)

**Abstract:** The effects of leaching conditions on gold recovery from a micro-disseminated gold ore were studied by following a non-cyanide leaching procedure with two-stage impregnation during inflation. The results showed the gold leaching rate can be increased by air inflation in 2 stages of oxidation and alkali pretreatment. After oxidation pretreatment for 2 hours, sodium hydroxide (20 kg/t) was added for ensuing alkali leaching pretreatment for 4 hours, and then the calcium oxide (40 kg/t) was added to replace the sodium hydroxide. Finally the TY-3 leaching agent (8 kg/t) was used to leach for 4 hours. An overall gold leaching rate of up to 87.21% was achieved. Phase analysis, SEM and X-ray energy spectrum of the resulting residues showed that the gold in silicate and carbonate could be effectively leached out. The quartz and pyrite surface in leaching residues had been corroded, and also part of pyrite was oxidized.

**Key words:** nonferrous metallurgy; the micro-disseminated gold ore; air inflation; two-stage pretreatment; non-cyanide leaching

随着金矿资源的大规模开采, 易选别金矿日益枯竭, 开发利用微细浸染型难选金矿是我国黄金选矿的趋势<sup>[1]</sup>。微细浸染型金矿中金通常被黄铁矿、石英等包裹很难与浸出剂接触反应<sup>[2-3]</sup>, 使得其细磨后的直接氰化浸出率通常小于 80%, 为了使金暴露,

提高金的浸出率, 微细浸染型金矿在浸出前必须经过预处理<sup>[4]</sup>。预处理主要通过以下 2 种途径实现: 其一, 对于硫化矿包裹金(如黄铁矿和毒砂)型的金矿, 通过氧化硫化物, 使被包裹的金暴露, 从而形成多孔状氧化物, 这样有利于浸出剂和微细金粒接

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1404)、十二五科技支撑计划(No. 2012BAB08B06)、贵州大学研究生创新基金(研理工 2016080)。

第一作者: 杨典奇, 男, 硕士研究生, 研究方向: 难选矿石的选矿技术及资源综合利用。E-mail: xfy10490@163.com

\*通讯作者: 唐 云, 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 难选矿石的选矿技术及资源综合利用。E-mail: 642205669@qq.com

触反应,使金由固相转入液相,提高浸出率。其二,预先去除活性有机碳等妨碍浸出的“劫金”有害物质,或者改变其理化性质使之失去或削弱其“劫金”效应,从而提高金的回收率<sup>[5]</sup>。

针对微细浸染型金矿,在前期研究了传统焙烧预处理、微波焙烧预处理、碱性热压预处理以及湿法两段预处理<sup>[6-7]</sup>,相比其他预处理方法,两段湿法预处理具有成本较低、操作简单、设备需求不高以及环境友好的特点<sup>[8]</sup>。本文拟通过充气方式强化两段湿法预处理工艺,并对经过预处理后的金矿进行非氰浸出研究,优化两段湿法预处理工艺,为微细浸染型金矿的湿法预处理开发利用提供技术支持。

## 1 实验

### 1.1 原矿的性质

矿石中有价元素主要是金,其品位为 3.46 g/t。 $\text{SiO}_2$  含量最高,占 71.88%,矿石中有机碳含量为 2.51%。矿石中主要矿物为石英、方解石及硫化矿,硫化矿以黄铁矿为主,此外还有高岭土、蒙脱石等粘土矿物。金主要以微细粒浸染或包裹于石英、硅酸盐、硫化物及碳酸盐矿物中,还有部分金以游离态存在各矿物间隙中。矿物的化学成分分析、矿物组成分析、金的物相分析见文献<sup>[9]</sup>所述,扫描电镜分析及能谱分析见图 1 和表 1。

由图 1 可知,石英和黄铁矿表面形貌光滑、结构致密。表 1 可知原矿元素主要包括 Si、O、C、S、Ca 和 Fe,主要矿物有石英、黄铁矿和方解石。213 点主要元素包括 C、O、S、Ca 和 Fe,主要矿物有黄铁矿和方解石,214 点主要元素包括 Si 和 O,主要矿物为石英,215 点主要元素有 Fe 和 S,主要矿物为黄铁矿。

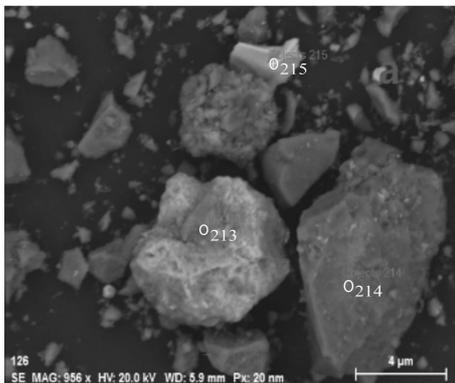


图 1 原矿扫描电镜图像

Fig.1 SEM images of the gold ore

表 1 原矿不同位置的能谱化学成分(摩尔分数,%)

Tab.1 Chemical compositions (EDS) of raw ore samples collected at different points (mole fraction, %)

位置点	213 <sup>#</sup>	214 <sup>#</sup>	214 <sup>#</sup>
x(C)	5.65	10.64	22.28
x(O)	62.15	65.92	15.41
x(Al)	1.45	0	0.8
x(Si)	2.31	22.37	1.5
x(S)	10.41	0	39.85
x(Ca)	11.23	0	0
x(Fe)	6.78	0	20.16

## 1.2 实验方法及设备

### 1.2.1 预处理实验

将矿样采用湿式球磨,使磨矿细度-0.074 mm 占 95%,矿样经分样后批次实验矿样量约为 100 g。调节液固比,加入 TY-1、TY-2 药剂(常用药剂、无毒)在 XJT-II 型充气浸出搅拌机(充气量 150~160 L/h)进行一定时间的氧化预处理。保持充气状态下加入碱,进行一定时间的碱浸预处理。

### 1.2.2 浸出实验

预处理矿浆添加氧化钙调节 pH,再加入非氰浸出药剂 TY-3。浸渣经过滤、多次洗涤和烘干制样,采用高温灼烧-王水溶样-聚氨酯泡塑吸附-硫脲解吸-火焰原子吸收光谱法测定样品中金含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 预处理影响因素

前期探索实验表明, TY-1 药剂用量 4 kg/t、TY-2 用量 2 kg/t、氧化预处理时间为 2 h,氢氧化钠预浸出时间为 4 h,非氰浸出剂 TY-3 用量为 8 kg/t 时,金浸出效果较好。在此基础上,固定氧化预处理条件,进行放大试验研究,考察碱浸过程各因素及充气方式对金浸出的影响。

#### 2.1.1 氢氧化钠用量对金浸出率的影响

氧化预处理后,固定氢氧化钠碱浸时间为 2 h,浸出剂 TY-3 用量 8 kg/t、浸出时间为 4 h,考察氢氧化钠用量对金浸出率的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,氢氧化钠用量 50 kg/t 时,金浸出率出现最大值,为 71.85%。这可能是在 50 kg/t 时,氢氧化钠和石英反应充分,使石英包裹的金暴露,有利于金的浸出;也可能是氢氧化钠用量 50 kg/t 时形成的碱性环境有利于浸出剂 TY-3 的浸出。因此,选取氢氧化钠用量为 50 kg/t。

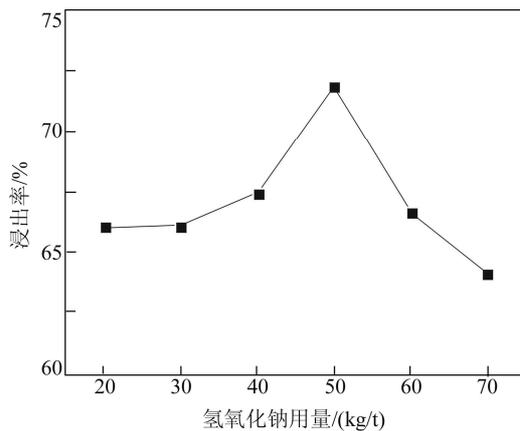


图 2 氢氧化钠用量对金浸出率的影响

Fig.2 Effect of the NaOH dosages on the gold leaching rate

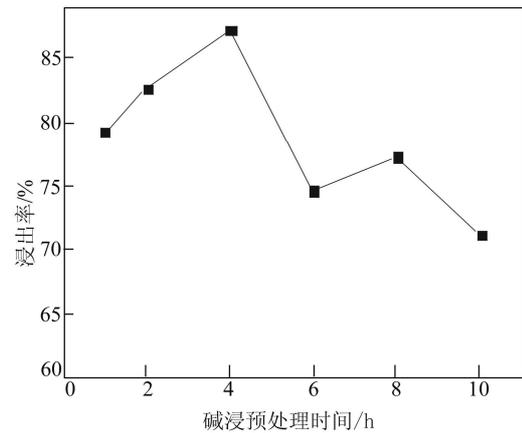


图 3 碱浸预处理时间对金浸出率的影响

Fig.3 Effect of alkali pretreatment time on the gold leaching rate

### 2.1.2 充气对金浸出率的影响

矿石中硫化矿包裹金占 15.94%<sup>[10]</sup>, 为了打开硫化矿包裹金, 采用充空气进一步消除硫化矿对金浸出的影响。采用 2.1.1 的优化条件浸出, 考察充气方式对金浸出率的影响, 结果如表 2 所列。

表 2 不同阶段充气对金浸出率的影响

Tab.2 Effect of aerating steps on the gold leaching rate

试验号	充气阶段	浸出率/%
1	氧化充气	81.42
2	碱浸充气	82.82
3	氧化充气+碱浸充气	85.12
4	碱浸充气+浸出充气	81.03
5	全程	80.80

由表 2 可知, 在氧化阶段和碱浸阶段充气效果较好, 金浸出率为 85.12%。因为这时硫化矿氧化效果较好, 使包裹的金暴露, 有利于金的浸出。在非氰浸出过程中充气对金浸出率无提升作用, 这可能是通入的空气中二氧化碳和氢氧化钠发生反应, 氢氧化钠减少, 溶液 pH 发生改变导致。因此, 选取在氧化和碱浸 2 个阶段充气。

### 2.1.3 碱浸预处理时间对金浸出率的影响

采用 2.1.2 的优化条件, 改变其中碱浸预处理时间, 考察其对金浸出率的影响, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 在碱浸预处理时间 4 h 时, 金的浸出效果最好, 为 87.30%。当碱浸预处理时间小于 4 h 时, 石英和氢氧化钠反应不充分, 导致浸出剂不能很好地与石英包裹的金反应。当碱浸预处理时间大于 4 h 时, 由于石英和氢氧化钠生成较多硅酸

钠包裹在矿物表面, 形成致密的固体膜, 导致金不能与浸出剂充分接触, 金浸出率降低。因此, 选取碱浸预处理时间 4 h。

## 2.2 浸出影响因素

### 2.2.1 氧化钙替代用量对金浸出率影响

氢氧化钠用量 50 kg/t 时, 药剂成本较高。为了降低成本, 通过添加氧化钙替代, 减少氢氧化钠用量。如果在预处理时添加氧化钙, 会生成碳酸钙附着在矿物表面, 不利于浸出。因此在充气预处理完成后, 非氰浸出前才添加氧化钙调节溶液酸碱度。

采用 2.1.3 的优化条件, 改变其中氢氧化钠用量, 同时添加不同量的氧化钙, 考察其对金浸出率的影响, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 当氢氧化钠用量为 10 kg/t 时, 随着氧化钙用量的增加, 金的浸出率持续降低。当氢

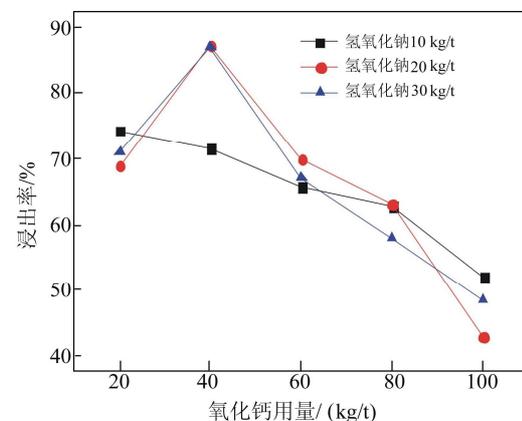


图 4 氧化钙和氢氧化钠用量对金浸出率的影响

Fig.4 Effect of the dosages of CaO and NaOH on the gold leaching rate

氧化钠用量大于 20 kg/t 时，随着氧化钙用量的增加，金的浸出率先增加后降低。氧化钙与水反应呈碱性有利于石英的破坏，但过量的氧化钙会产生碳酸钙覆盖在矿物表面，不利于浸出。在氢氧化钠用量为 20 kg/t、氧化钙用量为 40 kg/t 时，浸出效果最好，浸出率为 87.21%。后续预浸实验选取氢氧化钠用量为 20 kg/t，浸出前补加氧化钙 40 kg/t。

2.2.2 浸出剂 TY-3 对金浸出率的影响

采用 2.2.1 的优化条件，改变浸出剂 TY-3 的用量，考察其对金浸出率的影响，结果如图 5 所示。

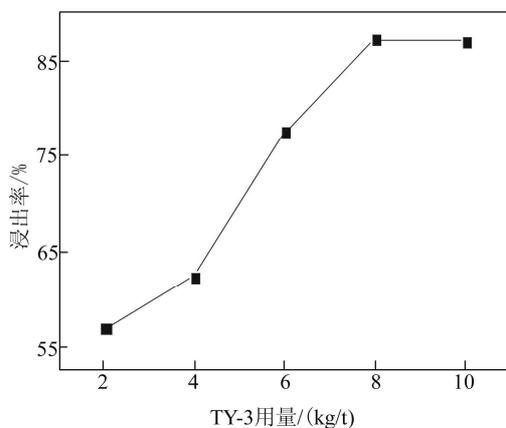


图 5 浸出剂 TY-3 用量对金浸出率的影响

Fig.5 Effect of the dosage of leaching agent TY-3 on the gold leaching rate

由图 5 可知，浸出剂 TY-3 用量 8 kg/t 时，金浸出率效果较高(87.21%)，与前期探索实验结果一致。由于浸出剂 TY-3 与溶液中铁等离子络合，消耗部分浸出剂 TY-3。浸出剂 TY-3 用量小于 8 kg/t 时，浸出剂 TY-3 不能充分与矿石中金络合。浸出剂 TY-3 用量 8 kg/t 时，络合较为充分。浸出剂 TY-3 用量大于 8 kg/t 时，金浸出率不再增加。因此，选取浸出剂 TY-3 用量为 8 kg/t。

2.2.3 优化的浸出工艺条件

综合前述研究，得到的优化工艺条件为：TY-1 用量 4 kg/t、TY-2 用量 2 kg/t、充气氧化预处理 2 h 后，补加 20 kg/t 氢氧化钠充气碱预浸 4 h，完成预处理后不再充气，补加 40 kg/t 氧化钙、用 8 kg/t 的 TY-3 浸出 4 h，最终获得 87.21%的金浸出率。工艺流程如图 6 所示。

2.3 浸出渣分析

2.3.1 物相分析

浸出渣金的物相分析结果及与原矿的对比列于表 3。

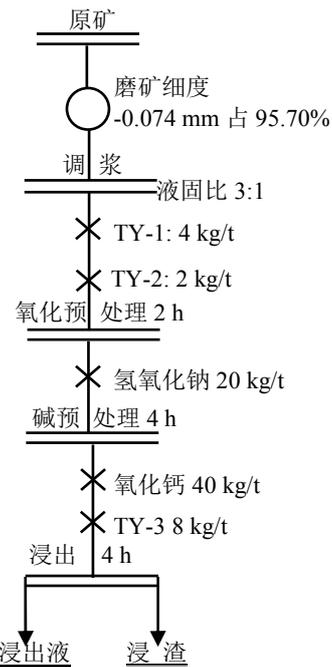


图 6 两段充气预处理-非氰提金流程图

Fig.6 Process flow for two step pretreatment and non-cyanide leaching with aeration

表 3 浸出渣中金物相分析及与原矿的对比

Tab.3 Comparison of gold phases between the residues and raw ore

物相	原矿 <sup>[7]</sup>	浸出渣	浸出率/%
	$\omega(\text{Au}) / (\text{g/t})$	$\omega(\text{Au}) / (\text{g/t})$	
游离金	0.37	0.16	56.76
碳酸盐	0.18	0.03	83.33
硫化物	0.55	0.184	66.55
硅酸盐	2.37	0.07	97.05
合计	3.47	0.444	87.21

由表 3 可知，硫化物中金含量从 0.55 g/t 减少到 0.184 g/t，硫化物中金浸出率仅为 66.55%。而游离金从 0.37 g/t 减少到 0.16 g/t，浸出率仅为 56.76%。游离金浸出率低原因可能源于非氰浸出剂 TY-3 的使用条件尚未优化。要获得更高的金浸出率，应有效回收硫化物中的金和游离金，需要在后续研究中加以解决。

2.3.2 浸出渣的扫描电镜及 X 射线能谱分析

通过扫描电镜分析考察浸出渣形貌，并对具有代表性的点进行 X 射线能谱分析，结果如图 7 和表 4 所列示。

原矿主要矿物有石英、黄铁矿，由图 7 和表 4 可知，浸出渣元素主要包括 Si、C、O、S、Ca 和 Fe，与原矿组成基本相同。分析图中各点元素组成，

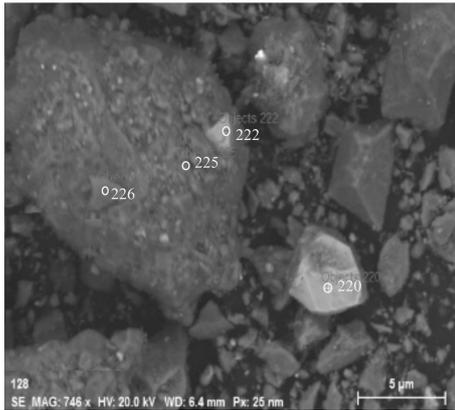


图 7 浸出渣扫描电镜图像

Fig.7 The SEM images of the residues

220 点和 222 点主要元素包括 S、Fe、O、C 和 Ca，主要矿物有黄铁矿。从原子百分含量来看，220 点 S 元素含量为 35.42%，222 点 S 元素含量为 28.83%，226 点主要元素包括 Si 和 O，主要矿物为石英，且

226 点有 Fe 元素，但没有 S 元素，可见部分黄铁矿发生了氧化。

表 4 浸出渣不同位置的能谱化学成分(摩尔分数, %)

Tab.4 Chemical compositions (EDS) of residues at different points (mole fraction, %)

位置点	220 <sup>#</sup>	222 <sup>#</sup>	226 <sup>#</sup>
x(C)	19.69	26.12	14.47
x(O)	21.35	24.37	58.53
x(Al)	0	0	1.15
x(Si)	0.72	1.15	23.15
x(S)	35.42	28.83	0
x(Ca)	0.96	0.48	1.44
x(Fe)	21.85	19.06	1.25

为了更直观的看到石英和黄铁矿表面形态，增加扫描电镜放大倍数进行观察，如图 8 所示。

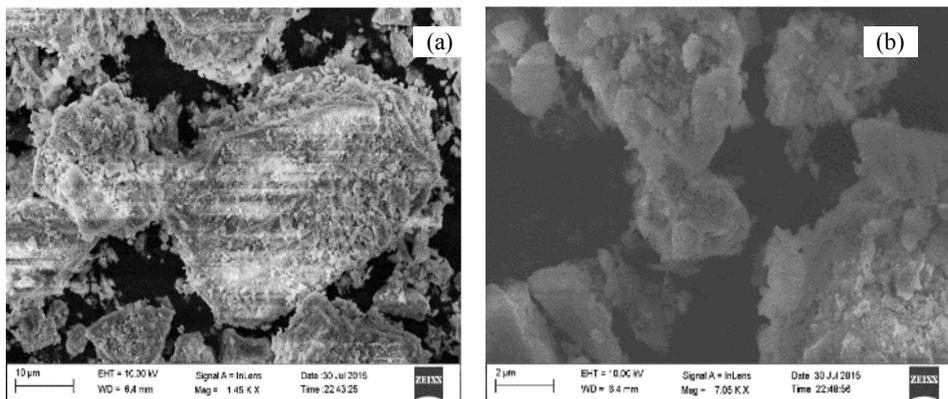


图 8 浸出渣中石英(a)和黄铁矿(b)表面扫描电镜图 Fig.8 The SEM patterns of quartz (a) and pyrite (b) in the residues

由图 8 可见，与原矿相比，浸出渣中石英和黄铁矿的表面形态受到腐蚀，其中石英腐蚀严重。根据表 3 中金物相分析的结果，硫化物中金浸出率为 66.55%。下一步的研究中应加大对黄铁矿的溶解。

### 3 结论

1) 在氧化和碱浸预处理阶段采用充气搅拌可显著提高微细浸染型金矿的非氰浸出率。经 TY-1 (4 kg/t)和 TY-2 (2 kg/t)氧化预处理 2 h 后，用 20 kg/t 氢氧化钠碱浸预处理 4 h (氧化阶段和碱浸阶段充气)，补加 40 kg/t 氧化钙，用 8 kg/t TY-3 浸出 4 h，金浸出率可达 87.21%。

2) 物相分析结果表明，硅酸盐(包含石英)、碳酸盐中的金可被有效浸出。但游离金和硫化物中金

的浸出率需进一步提高。

3) 浸出渣的扫描电镜及能谱分析结果表明，石英和黄铁矿表面受到腐蚀，石英表面腐蚀严重，部分黄铁矿发生了氧化。

### 参考文献:

- [1] 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.

【下转第 55 页】