

# 微细浸染型金矿超声波强化预处理实验研究

马德全<sup>1</sup>, 唐云<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 552405)

**摘要:** 针对微细浸染型金矿的矿石性质, 采用超声波强化两段预处理-非氰浸出工艺进行研究, 考察氧化剂用量、预处理时间、浸出时间、超声波功率、超声波时间对金浸出率的影响。结果表明, 在超声波功率为 120 W、时间为 150 min, 强氧化剂 TY-1 用量为 6 kg/t、催化剂 TY-2 用量为 2 kg/t、氧化时间为 4 h、氢氧化钠用量为 20 kg/t、碱预处理时间为 10 h、非氰浸出剂 TY-3 用量为 10 kg/t、浸出时间 2 h 的条件下, 可获得 86.43% 的金浸出率。

**关键词:** 微细浸染型金矿; 超声波; 两段预处理; 非氰浸出

中图分类号: TF831 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2019)01-0037-05

## Research on Ultrasonic-enhanced Pretreatment of Micro-disseminated Gold Ore

MA Dequan<sup>1</sup>, TANG Yun<sup>1\*</sup>, WANG Hongxing<sup>2</sup>

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

2. Southwest Guizhou Golden Dragon Gold Mining Co. Ltd., Southwest Guizhou 552405, Guizhou, China)

**Abstract:** Based on the properties of the micro-disseminated gold ore, a two-stage pretreatment method enhanced by ultrasonic was adopted before the non-cyanide leaching process. The influence of amount of the oxidant, enhanced pretreatment time, leaching time, ultrasonic power, and ultrasonic time on the gold leaching rate was investigated. The results showed that the gold leaching rate of 86.43% can be achieved, when the power of the ultrasonic wave was 120 W and the time was 150 minutes and the amount of strong oxidizing agent TY-1 was 6 kg/t and the amount of catalyst TY-2 was 2 kg/t and the oxidation time was 4 hours and the amount of sodium hydroxide was 20 kg/t and the alkali preprocessing time was 10 hours and the amount of non-cyanide leaching agent TY-3 was 10 kg/t.

**Key words:** micro-disseminated gold ore; ultrasound wave; two-stage pretreatment; non-cyanide leaching

我国已探明的黄金储量中, 30%为难选金矿<sup>[1]</sup>, 难选金矿是指细磨后直接氰化浸出时金的浸出率低于 80%的金矿<sup>[2]</sup>。难处理金矿通常含有硫、砷、碳等杂质, 组成十分复杂, 其类型多样, 难选金矿分为 3 类<sup>[3]</sup>: 微细浸染型、与碳共生型、金与脉石矿物共生。当矿石同时含有含碳基质和硫化物时, 称为双重难选矿石。预处理决定着难选金矿的浸出率, 常用的方法有焙烧法、化学氧化法、生物氧化法和

微波焙烧法等<sup>[4-5]</sup>。由于化学氧化法环境友好, 条件控制相对简单, 已成为当前研究的热点与重点<sup>[6]</sup>。

针对品位大于 3 g/t 的微细浸染型金矿, 本项目组采用两段湿法预处理, 取得了较好的成果<sup>[7-8]</sup>。但对于小于 2 g/t 微细浸染型金矿该工艺还存在不足, 本文以金矿品位低于 2 g/t 微细浸染型金矿为研究对象, 在前期研究的基础上, 优化实验工艺, 并加入超声波<sup>[9]</sup>对金矿进行强化预处理。

收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(51864010)、贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1404)、贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5781)。

第一作者: 马德全, 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: dqmahpu@163.com

\*通讯作者: 唐云, 女, 教授, 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

## 1 实验部分

### 1.1 矿石性质

矿石为微细浸染型金矿，主要有价元素是金，品位为 1.4 g/t，SiO<sub>2</sub> 含量为 53.02%。有害元素为有机碳、硫和砷。矿石中主要矿物为石英、方解石和硫化矿，硫化矿以黄铁矿为主，大部分石英的结晶形态良好，颗粒粗大，少部分为隐晶质结构，抗腐蚀能力强。金主要以微细粒浸染包裹于石英、硅酸

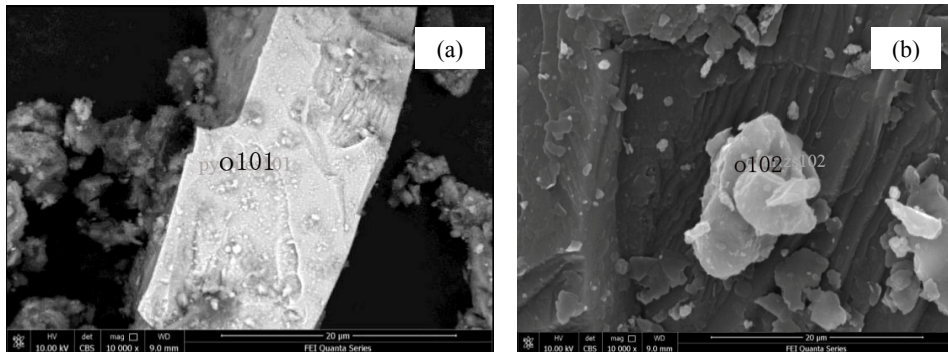


图 1 原矿中黄铁矿(a)和石英(b)表面扫描电镜图 Fig.1 The SEM images of pyrite(a) and quartz(b) in gold ore

表 2 原矿中不同位置能谱化学成分

Tab.2 Chemical compositions (EDS) of the gold ore at different points (mole fraction/%)

位置点	101 <sup>#</sup>	102 <sup>#</sup>
x(C)	13.73	11.53
x(O)	5.62	55.12
x(Al)	0.72	4.27
x(Si)	1.39	27.91
x(S)	47.71	0
x(Ca)	1.88	0.46
x(Fe)	28.77	0

由图 1 和表 2 可以看出，图 1(a) 101<sup>#</sup>位置主要元素包括 S 和 Fe，主要矿物为黄铁矿，黄铁矿表面光滑，相比周围矿物颗粒较为粗大。图 1(b) 102<sup>#</sup>位置主要元素包括 Si 和 O，主要矿物为石英。

### 1.2 实验方法

采用湿式球磨，磨矿至-0.074 mm 占 95%，由

表 3 正交实验的因素与水平 Tab.3 Orthogonal factors and levels

水平	A	B	C	D	E	F	G
	TY-1 用量/(kg/t)	TY-2 用量/(kg/t)	氧化时间/h	氢氧化钠用量/(kg/t)	碱预处理时间/h	TY-3 用量/(kg/t)	浸出时间/h
1	6	1	2	20	10	8	1
2	8	2	4	50	14	10	2

盐、硫化物及碳酸盐矿物中。原矿化学成分分析、原矿中黄铁矿和石英扫描电镜图及对应的能谱化学成分分别见表 1、图 1 和表 2。

表 1 原矿化学成分分析结果

/%

Tab.1 Analysis results of chemical composition of the gold ore

组分	Au/(g/t)	As/(g/t)	TS	Pb	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	C <sub>有机</sub>
含量	1.4	503	1.48	0.01	4.51	53.02	26.01	0.99

于影响金矿浸出率的因素较多，为了获得较好的浸出率，采用正交实验对工艺条件进行研究，确定优化组合，然后在氧化过程进行超声波预处理，通过改变超声波功率和时间提高金矿浸出率。浸出后的浸渣经过滤、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<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交实验

采用正交实验对工艺条件进行研究，选强氧化剂 TY-1 用量、催化剂 TY-2 用量、氧化时间、氢氧化钠用量、碱预处理时间、非氰浸出剂 TY-3 用量、浸出时间共 7 个因素<sup>[5]</sup>，每个因素选取 2 个水平，按 L<sub>8</sub>(2<sup>7</sup>)进行实验，各因素水平见表 3，正交实验结果与分析见表 4。

表 4 实验结果与正交分析

Tab.4 Orthogonal analysis of experimental results ore

编号	A	B	C	D	E	F	G	浸出率/%
1	1	1	1	1	1	1	1	65.10
2	1	1	1	2	2	2	2	59.00
3	1	2	2	1	1	2	2	73.15
4	1	2	2	2	2	1	1	64.82
5	2	1	2	1	2	1	2	62.71
6	2	1	2	2	1	2	1	60.38
7	2	2	1	1	2	2	1	67.48
8	2	2	1	2	1	1	2	63.82
$K_1$	262.07	247.19	255.4	268.44	262.45	256.45	257.78	
$K_2$	254.39	269.27	261.06	248.02	254.01	260.01	258.68	
$k_1$	65.52	61.80	63.85	67.11	65.61	64.11	64.45	
$k_2$	63.60	67.32	65.27	62.01	63.50	65.00	64.67	
极差	-1.92	5.52	1.42	-5.1	-2.11	0.89	0.22	
优选方案	A1	B2	C2	D1	E1	F2	G2	

从表 4 可以看出，金的最大浸出率为 73.15%。正交分析中最大的极差 5.52 为 TY-2 用量的极差，说明 TY-2 用量对金矿浸出率影响最大，取第二水平较好。其次是氢氧化钠用量的极差为 5.1，取第一水平。通过计算  $F$  检验差异显著性时，有  $F_A > F_{0.05}(f_{因}, f_{E})$  和  $F_B > F_{0.05}(f_{因}, f_{E})$ ，说明 TY-2 用量和氢氧化钠用量对实验结果影响显著，其他因素对实验结果影响不显著。综合考虑，即选取 TY-1 用量 6 kg/t，TY-2 用量 2 kg/t，氧化时间为 4 h，氢氧化钠用量为 20 kg/t，碱预处理时间为 10 h，TY-3 用量 10 kg/t，浸出时间为 2 h。由于采用两段湿法预处理对小于 2 g/t 微细浸染型金矿效果不理想，因此，实验加入超声波进行强化预处理。

## 2.2 超声波预处理探索试验

在磨矿细度-0.074 mm 占 95%的条件下，分别对试样进行直接非氰浸出和超声波预处理-非氰浸出探索实验，其结果见表 5。从表 5 可以看出，不加超声波处理的金矿，浸出率仅为 30.23%，而用超声波预处理的金矿浸出率为 55.87%，说明超声波预处理微细浸染型金矿对金浸出有一定的强化效果。

表 5 探索实验结果

Tab.5 Results of exploration tests

实验条件	金品位/(g/t)	浸出率/%
不加超声波	0.98	30.23
加入超声波	0.62	55.87

## 2.3 碱预处理超声波时间对金浸出率的影响

在 TY-1 用量为 6 kg/t，TY-2 用量为 2 kg/t，氧化时间为 4 h，碱用量为 20 kg/t，碱预处理时间为 10 h，非氰浸出剂 TY-3 用量为 10 kg/t，浸出时间为 2 h，超声波功率为 60 W 的条件下，碱预处理超声波时间对金浸出率的影响，结果见图 2。

由图 2 可以看出，金浸出率随着碱预处理超声波时间的增加有先增加后降低的趋势，超声波时间为零时金浸出率为 73%，当超声波时间为 150 min 时最大，金浸出率为 74.5%，金浸出率仅提高 1.5%，

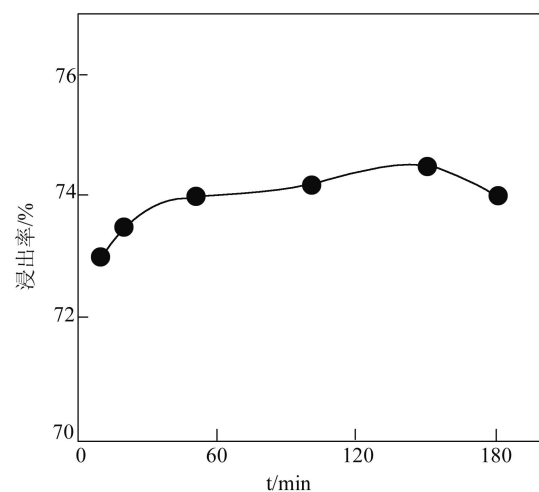


图 2 碱预处理超声波时间对金浸出率的影响

Fig.2 Effect of the alkali pretreatment ultrasonic time during the alkali pretreatment

整体变化不大。可能的原因是在碱性环境下，超声波产生的羟基自由基不稳定，不能对矿物进行氧化。考虑能耗问题，在碱预处理阶段不加入超声波。

#### 2.4 氧化预处理超声波时间对金浸出率的影响

在 TY-1 用量为 6 kg/t, TY-2 用量为 2 kg/t, 氧化时间为 4 h, 碱用量为 20 kg/t, 碱预处理时间为 10 h, 非氰浸出剂 TY-3 用量为 10 kg/t, 浸出时间为 2 h, 超声波功率为 60 W 的条件下, 考察氧化预处理阶段超声波时间对金浸出率的影响, 结果见图 3。

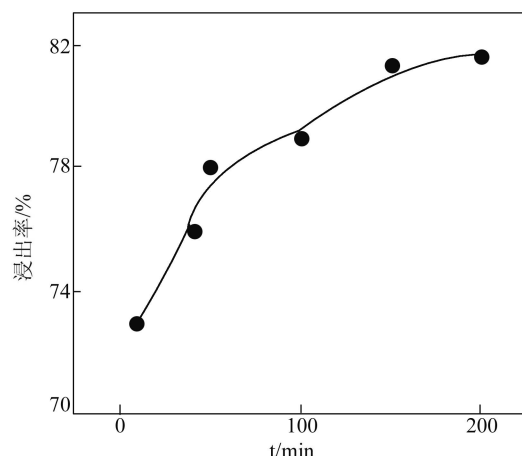


图3 氧化预处理超声波时间对金浸出率的影响

Fig.3 Effect of the oxidation pretreatment ultrasonic time during the oxidation pretreatment

由图3可以看出, 随着氧化预处理阶段超声波时间的增加金的浸出率先上升后不变, 当超声波时间为 200 min 时, 金浸出率最高, 为 81.59%。这是因为在超声波空化作用下, 可以在水相介质中产生羟基自由基, 氧化包裹金的矿物, 破坏其结构, 使金得以释放。同时在超声场下可以破坏矿物表面的单质硫和钝化膜, 减弱单质硫对后续提金的抑制作用<sup>[11]</sup>。由于在超声波时间为 150 min 时, 金的浸出率为 81.3%, 考虑到能耗问题, 所以选取氧化预处理阶段超声波时间为 150 min。

#### 2.5 超声波功率对金浸出率的影响

在 TY-1 用量为 6 kg/t, TY-2 用量为 2 kg/t, 氧化时间为 4 h, 碱用量为 20 kg/t, 碱预处理时间为 10 h, 非氰浸出剂 TY-3 用量为 10 kg/t, 浸出时间为 2 h, 超声波时间为 150 min 的条件下, 考察超声波功率对金浸出率的影响, 结果见图 4。

由图4可以看出, 随着超声波功率的增大, 金的浸出率先上升后下降, 当超声波功率为 120 W 时,

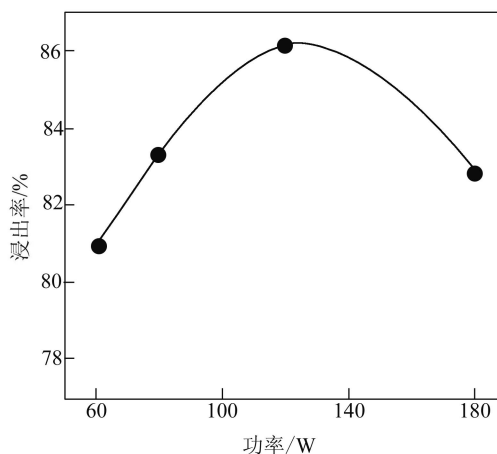


图4 氧化预处理超声波功率对金浸出率的影响

Fig.4 Effect of the oxidation pretreatment ultrasonic power during the oxidation pretreatment

浸出率最高, 为 86.15%, 这是因为随着超声波功率的增加, 矿物颗粒在溶液中扩散效果越好, 扩散速度越快, 硫酸根自由基与矿物颗粒有效碰撞几率越大<sup>[12]</sup>, 同时在一定范围内, 空化作用也随着功率增加而增大, 当空化饱和后, 功率的增大, 会引起大量的无用气泡, 这些气泡形成屏障, 阻碍超声波的扩散和衰减。在 120 W 时, 金的浸出率达到最高, 因此, 选取超声波功率为 120 W。

#### 2.6 浸渣分析

采用上述最优浸出条件, 即以 120 W 超声波处理时间 150 min, 氧化剂 TY-1 用量 6 kg/t、TY-2 用量为 2 kg/t、氧化时间为 4 h, 氢氧化钠用量为 20 kg/t、处理 10 h, TY-3 用量为 10 kg/t, 浸出时间 2 h, 处理 2 份不同矿物, 将所得浸渣用扫描电镜对其成分分别进行能谱扫描, 结果如表 6 所列。

由表 6 可见, 1<sup>#</sup>浸渣主要元素包括 O 和 Fe, 主要矿物为黄铁矿, 说明在超声波预处理条件下黄铁矿氧化充分, 黄铁矿全部氧化为氧化铁。2<sup>#</sup>浸渣主

表6 浸渣中能谱化学成分(摩尔分数)

元素	1 <sup>#</sup> 浸渣	2 <sup>#</sup> 浸渣
x(C)	9.23	11.23
x(O)	37.84	53.00
x(Al)	3.95	4.27
x(Si)	7.80	26.91
x(S)	0	0.25
x(Ca)	2.48	0.46
x(Fe)	44.68	3.74

要元素包括 Si 和 O, 矿物以石英为主, 石英表面腐蚀严重, 呈鳞片状; 浸渣中碳含量较高, 且在浸渣表面分布较均匀, 为了更好的提高金浸出率, 需进一步破坏有机碳的“劫金”。

### 3 结论

1) 超声波能较好的强化预处理金品位小于 2 g/t 微细浸染型金矿, 空化作用产生羟基自由基, 氧化金包裹物, 同时破坏矿物表面单质硫和钝化膜, 提高金浸出率。

2) 在超声波功率为 120 W、超声波处理时间为 150 min, 氧化剂 TY-1 用量 6 kg/t、TY-2 用量为 2 kg/t、氧化时间为 4 h, 氢氧化钠用量为 20 kg/t、碱处理时间为 10 h, TY-3 用量为 10 kg/t, 浸出时间 2 h 的条件下, 获得 86.15% 的金浸出率。

### 参考文献:

- [1] 王在谦, 唐云, 张覃, 等. 微细粒碳质金矿碱性热压预处理脱碳试验研究[J]. 黄金, 2014, 35(3): 52-55.  
WANG Z Q, TANG Y, ZHANG Q, et al. Study on the decarburization pretreatment of a microgranular disseminated type carbonaceous gold ore by alkaline hot-press oxidation[J]. Gold, 2014, 35(3): 52-55.
- [2] 徐名特, 姜得男, 阎赞, 等. 某金矿氰化尾渣浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2015(11): 56-59.  
XU M T, JIANG D N, YAN Z, et al. Experimental study on flotation of cyanide tailings from a gold mine[J]. Mining research and development, 2015(11): 56-59.
- [3] 周衍波, 代淑娟, 朱巨建. 氰化提金工艺现状及非氰提金工艺的应用前景[J]. 有色矿冶, 2016, 32(2): 28-31.  
ZHOU Y B, DAI S J, ZHU J J. Present situation of cyanide extraction process and application prospect of non-cyanide gold extraction process[J]. Non-ferrous mining, 2016, 32(2): 28-31.
- [4] 王帅, 李超, 李宏煦. 难浸金矿预处理技术及其研究进展[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(4): 129-134.  
WANG S, LI C, LI H X. Research progress of pretreatment technologies of refractory gold ores[J]. Gold science and technology, 2014, 22(4): 129-134.
- [5] 唐云, 杨典奇, 唐立靖, 等. 微细浸染型难选金矿两段预处理-非氰化浸出研究[J]. 矿冶工程, 2017, 35(1): 60-63.  
TANG Y, YANG D Q, TANG L J, et al. Experimental research on non-cyanide Leaching of micro-disseminated gold ore with two-stage pretreatment[J]. Mining and metallurgy engineering, 2017, 35(1): 60-63.
- [6] 余建文, 高鹏, 韩跃新, 等. 难浸金矿预处理方法的新进展[J]. 矿冶, 2013, 22(2): 59-62.  
YU J W, GAO P, HAN Y X, et al. New advances of refractory gold ore pretreatment method[J]. Mining and metallurgy, 2013, 22(2): 59-62.
- [7] 唐云, 唐立靖, 王在谦. 微细浸染金矿碱性热压预处理-硫代硫酸钠浸金[J]. 矿冶工程, 2016, 36(1): 63-67.  
TANG Y, TANG L J, WANG Z Q. Micrograined-disseminated-type gold ore leaching by alkaline hot press pretreatment-ammoniacal thiosulfate[J]. Mining and metallurgical engineering, 2016, 36(1): 63-67.
- [8] 唐立靖, 唐云, 许正波. 难选金矿微波预处理边磨边浸非氰化试验研究[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(1): 85-89.  
TANG L J, TANG Y, XU Z B. Experimental research on refractory gold ore pretreated by grinding and leaching simultaneously with non-cyanide[J]. Gold science and technology, 2015, 23(1): 85-89.
- [9] 崔维, 王仕兴, 彭金辉, 等. 超声波技术在黄金冶炼与加工领域的应用[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(3): 93-98.  
CUI W, WANG S X, PENG J H, et al. The application of ultrasound technology in gold smelting and processing[J]. Gold science and technology, 2015, 23(3): 93-98.
- [10] 杨典奇, 唐云, 唐立靖, 等. 微细浸染型金矿的微波焙烧预处理研究[J]. 贵金属, 2017, 38(1): 65-68.  
YANG D Q, TANG Y, TANG L J, et al. Research on micro-disseminated gold ore by microwave roasting pretreatment[J]. Precious metals, 2017, 38(1): 65-68.
- [11] 张卿. 某含砷难处理金矿超声强化浸金试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(4): 12-15.  
ZHANG Q. The effect of ultrasonic intensifying processing on leaching of a refractory gold ore containing arsenic[J]. Comprehensive utilization of minerals, 2010(4): 12-15.
- [12] 许世伟, 王建英, 郑升, 等. 泉山金矿氰化尾矿焙烧-超声波强化硫脲提金试验研究[J]. 黄金, 2013, 34(5): 49-51.  
XU S W, WANG J Y, ZHENG S, et al. Experimental study on cyanide tailings roasting-ultrasonic wave enhanced gold extraction using thiourea in quanshan gold mine[J]. Gold, 2013, 34(5): 49-51.