

## 微细浸染型金矿的微波焙烧预处理研究

杨典奇<sup>1</sup>, 唐云<sup>1,2\*</sup>, 唐立靖<sup>1</sup>, 姜凤<sup>1</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学省级非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 研究了微波焙烧预处理对微细浸染型难处理金矿浸出的影响。正交试验表明, 各因素对浸出率影响程度大小依次为: 微波焙烧温度、焙烧时间、浸出时间、浸出剂 TY-3 用量和氢氧化钠用量。在微波焙烧温度 550℃, 焙烧时间 40 min, 浸出剂 TY-3 用量 14 kg/t, 氢氧化钠用量 8 kg/t, 浸出 10 h 的优化条件下, 浸出率达 94.8%。XRD 分析结果表明, 经微波加热焙烧后, 原矿中黄铁矿转化为赤铁矿。与马弗炉焙烧对比, 微波焙烧可能具有选择性加热作用, 更有利于矿石中包裹金的暴露。

**关键词:** 有色金属冶金; 微细浸染型金矿; 预处理; 微波焙烧

**中图分类号:** TD953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)01-0065-04

### Research on Micro-disseminated Gold Ore by Microwave Roasting Pretreatment

YANG Dianqi<sup>1</sup>, TANG Yun<sup>1,2\*</sup>, TANG Lijing<sup>1</sup>, Jiang Feng<sup>1</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Provincial Level Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The leaching of a micro-disseminated gold ore by microwave roasting was investigated. The orthogonal experiment results showed that the factors exerting on the leaching rate are microwave roasting temperature, roasting time, dosage of the leaching agent TY-3 and amount of sodium hydroxide in influence sequence. A leaching rate of 94.8% was achieved when the microwave roasting was carried out at 550℃ for 40 min, followed by leaching for 10 h with TY-3 at a dosage of 14 kg/t and sodium hydroxide at a concentration of 8 kg/t. According to the XRD results, the microwave roasting can promote the transformation of pyrite to hematite. Compared with the conventional muffle furnace roasting, microwave roasting may have the merit of selective heating, facilitating the exposure of gold from the wrapped ore.

**Key words:** non-ferrous metallurgy; micro-disseminated gold ore; pretreatment; microwave roasting

我国黄金需求持续增长, 易处理金矿资源日益减少, 使得难处理微细浸染型金矿的开发利用成为研究热点。微细浸染型金矿中金嵌布粒度极细, 金主要以浸染状包裹于石英、硫化物、硅酸盐或碳酸盐矿物中, 只有少部分金存在矿物的间隙中, 矿石中还含有碳基质, 属于极难处理金矿石。预处理是该类金矿浸出前必不可少的部分, 预处理是通过物理、化学等方法消除各种有害杂质对后续浸出的影

响或破坏难浸金包裹物的晶格结构, 使包裹金暴露, 有利于后续金的浸出。

常用预处理方法包括焙烧氧化、微生物氧化、加压氧化等。微生物氧化周期较长, 菌种适应性受到限制, 加压氧化对设备要求高、投资大。目前, 应用较广的是焙烧氧化法, 通常采用两段焙烧脱砷和硫, 在 450~600℃脱砷、550~800℃脱硫, 工艺较为复杂、能耗高、对环境不友好<sup>[1]</sup>。因此, 迫切

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 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

需要研发适合此类金矿的预处理工艺。

微波焙烧时升温速度快、加热效率高、耗能低、对环境友好等优点逐渐受到重视<sup>[2-3]</sup>。魏明安等<sup>[4]</sup>用微波处理难浸微细粒包裹金，微波预处理可以有效打开黄铁矿包裹金，大幅度提高金浸出率。赵俊蔚等<sup>[5]</sup>用微波处理碳质金矿石，结果表明，微波处理碳质矿物是可行的。碳质矿物能通过微波作用，迅速加热除去，解决后续“劫金”问题。

此前已经研究了微细浸染型金矿微波焙烧预处理后边磨边浸<sup>[6]</sup>以及碱性热压脱碳预处理<sup>[7]</sup>，在此基础上，本文以该类型金矿为研究对象，研究微波预处理工艺对浸出影响，优化微波焙烧预处理条件，为该类型金矿石的开发利用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和设备

试验使用的微细浸染型金矿石与此前研究<sup>[6]</sup>所用的原料相同，金含量为 3.51 g/t，为高碳(2.51%)、含硫(2.57%)难处理金矿石。试验使用的其他原料均为工业级。所使用浸出剂 TY-3 为自制非氰浸出剂。

主要试验设备为 HM-X06-16 型微波高温反应器(昆明理工大学非常规冶金实验室)，采用热电偶进行测温，控温方式为手动调节功率控制(功率 0.25~1 kW)；使用的马弗炉(XL-1，鹤壁市蓝翔电器有限公司)功率为 3 kW。焙烧器皿为普通陶瓷坩埚。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 焙烧试验

称取 100 g 原矿，用微波高温反应器或马弗炉对原矿进行焙烧，再将焙砂磨至-0.074 mm 占 90%。

#### 1.2.2 浸出试验

将-0.074 mm 占 90%的焙砂进行调浆，使液固比 3:1，加入氢氧化钠和浸出剂 TY-3，在磁力搅拌器上进行搅拌浸出。浸出一段时间后，浸渣经多次洗涤、过滤和烘干制样，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>[8]</sup>，并计算金浸出率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验

根据前期的探索试验，对微波焙烧温度(A)、微波焙烧时间(B)、浸出剂 TY-3 用量(C)、氢氧化钠用量(D)、浸出时间(E)进行试验设计，采用五因素四

水平正交试验，各因素和水平见表 1，正交试验结果见表 2。

表 1 正交试验各因素及水平

Tab.1 The factors and levels of orthogonal experiment

Level	Factor				
	A/°C	B/min	C/(kg/t)	D/(kg/t)	E/h
1	400	20	8	2	6
2	450	40	10	4	8
3	500	60	12	6	10
4	550	80	14	8	12

表 2 正交试验结果

Tab.2 The results of orthogonal experiment

No.	Factor					Au leaching rate/%
	A	B	C	D	E	
1	1	1	4	3	2	38.9
2	2	1	1	1	3	44.7
3	3	1	3	4	1	52.8
4	4	1	2	2	4	71.4
5	1	2	3	2	3	50.9
6	2	2	2	4	2	58.0
7	3	2	4	1	4	63.0
8	4	2	1	3	1	91.4
9	1	3	1	4	4	50.1
10	2	3	4	2	1	67.7
11	3	3	2	3	3	87.0
12	4	3	3	1	2	86.8
13	1	4	2	1	1	68.8
14	2	4	3	3	4	52.2
15	3	4	1	2	2	63.9
16	4	4	4	4	3	92.2
K <sub>1</sub>	208.7	207.8	250.1	263.3	280.7	
K <sub>2</sub>	222.6	263.3	285.2	253.9	247.6	
K <sub>3</sub>	266.7	291.6	242.7	269.5	274.8	
K <sub>4</sub>	341.8	277.1	261.8	253.1	236.7	
R	133.1	83.8	42.5	16.4	44.0	

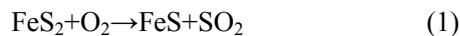
由表 1、2 可知，A<sub>4</sub>B<sub>4</sub>C<sub>4</sub>D<sub>4</sub>E<sub>3</sub> 为较优水平，浸出率为 92.2%。通过极差分析可知，各因素影响程度从大到小依次为：焙烧温度、焙烧时间、浸出时间、浸出剂 TY-3 用量和氢氧化钠用量。由于微波焙烧温度 550℃时，获得较好浸出率，因此，在焙烧温度 550℃、浸出时间相同条件下，分别采用微

波和马弗炉焙烧,考察焙烧时间对浸出效果的影响。即选取正交试验序号为 4、8、12、16 与马弗炉焙烧进行试验比较,金浸出率见表 3。

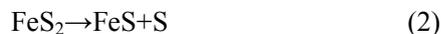
表 3 微波焙烧和马弗炉焙烧预处理后的金浸出率( $R_{Au}$ )对比  
Tab.3 The difference in gold leaching rate ( $R_{Au}$ ) between micro-wave roasting and muffle furnace roasting

No.	$R_{Au}/\%$	
	Microwave roasting	Muffle furnace roasting
4	71.4	47.2
8	91.4	53.7
12	86.8	77.5
16	92.2	83.7

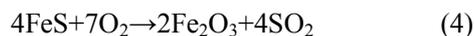
由表 3 可知,在相同浸出条件下,矿石经不同焙烧预处理后浸出率相差很大,微波焙烧效果优于马弗炉焙烧。其原因是微波焙烧属于选择性加热,不同矿物吸波不同,石英吸波较差,有机碳、黄铁矿吸波性能较好<sup>[9]</sup>,消除了有机碳对后续浸出的影响,可促进黄铁矿( $FeS_2$ )脱硫和转化,反应为<sup>[10]</sup>:



或:



最终转化为赤铁矿( $Fe_2O_3$ ):



石英和黄铁矿等矿物间产生热应力断裂,导致表面结构疏松,且存在大量孔隙,磨矿过程中有利于单体解离,浸出过程中增加金与浸出剂接触面积,提高浸出效果,使金矿石更加容易处理<sup>[9]</sup>。

## 2.2 微波焙烧温度、焙烧时间优化试验

### 2.2.1 微波焙烧温度对金浸出率的影响

在正交试验中较优水平  $A_4B_4C_4D_4E_3$  基础上优化焙烧温度,降低能耗。选取试验条件:焙烧时间 80 min、浸出剂 TY-3 用量 14 kg/t、氢氧化钠用量 8 kg/t、浸出时间 10 h,研究焙烧温度对金浸出率的影响,结果见表 4。

表 4 微波焙烧温度对金浸出率( $R_{Au}$ )的影响

Tab.4 The influence of microwave roasting temperature on gold leaching rate ( $R_{Au}$ )

$T/^\circ C$	450	475	500	525	550
$R_{Au}/\%$	38.4	77.6	81.4	84.0	92.2

由表 4 可知,浸出率随着微波焙烧温度增加而增加,焙烧温度 550 $^\circ C$ ,获得 92.2%的浸出率。由于温度超过 600 $^\circ C$ 时,试验过程中矿样“烧结”现象严重,导致试验无法进行,浸出率在 550 $^\circ C$ 时已达 92.2%,考虑能耗问题,未进行焙烧温度高于 550 $^\circ C$ 的试验。焙烧温度 525 $^\circ C$ 和 550 $^\circ C$ 时,浸出率相差较大,因此,选取微波焙烧温度 550 $^\circ C$ 。

### 2.2.2 微波焙烧时间对金浸出率的影响

选取微波焙烧温度 550 $^\circ C$ 、浸出剂 TY-3 用量 14 kg/t、氢氧化钠用量 8 kg/t、浸出时间 10 h,研究微波焙烧时间对金浸出率的影响,结果见图 1。

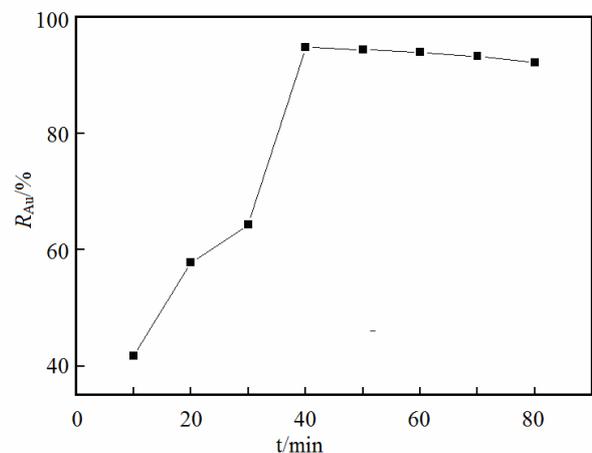


图 1 微波焙烧时间对金浸出率的影响

Fig.1 The influence of microwave roasting time on gold leaching rate

由图 1 可知,当焙烧时间小于 40 min,浸出率随着焙烧时间增加而增大;焙烧时间较短时,可能由于黄铁矿和砷黄铁矿未完全分解,不能完全破坏包裹金,导致包裹金不能与浸出药剂接触,浸出率较低。焙烧时间 40 min 时,金的浸出率达到最高值 94.8%。当焙烧时间大于 40 min 时,浸出率逐步降低,这可能是由于发生过烧,产生二次包裹。因此,选取微波焙烧时间 40 min。

### 2.3 XRD 表征

将微波 550 $^\circ C$ 下焙烧 40 min 所得矿样磨至 -0.074 mm 后,缩分取样,进行 XRD 分析,与原矿样品进行对比,所得结果如图 2 所示。

由图 2 可知,原矿经 550 $^\circ C$ 微波焙烧 40 min 后,黄铁矿衍射峰消失,出现了赤铁矿的衍射峰。验证了前述微波加热使黄铁矿包裹的金暴露,增加金与浸出剂接触的机会,金浸出率提高的判断。

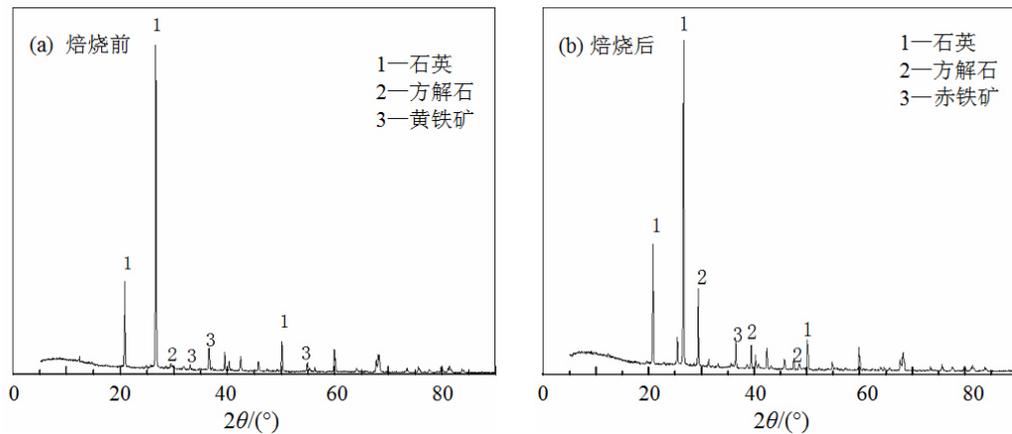


图 2 微波焙烧前(a)后(b)矿样的 XRD 图谱  
Fig.2 XRD spectra of the sample before (a) and after (b) microwave roasting

### 3 结论

本文研究了微波加热预处理对微细浸染型难处理金矿的影响, 结果表明:

1) 正交试验表明, 金浸出率因素影响程度从大到小依次为: 焙烧温度、焙烧时间、浸出时间、浸出剂 TY-3 用量和氢氧化钠用量。

2) 采用优化条件, 在微波焙烧温度  $550^{\circ}\text{C}$ 、微波焙烧时间 40 min, 浸出剂 TY-3 用量 14 kg/t, 氢氧化钠用量 8 kg/t, 浸出时间 10 h 时, 金的浸出率达到 94.8%。

3) 与马弗炉焙烧相比, 微波焙烧效果更优。由于微波焙烧为选择性加热, 对有机碳和黄铁矿具有更好的加热效果, 使黄铁矿转化为赤铁矿, 促进金包裹物解离, 提高金的浸出率。

### 参考文献:

- [1] 谷晋川, 刘亚川, 谢扩军, 等. 难选冶金矿微波预处理研究[J]. 有色金属, 2003(2): 55.  
GU J C, LIU Y C, XIE K J, et al. Microwave pretreatment of refractory gold ores[J]. Nonferrous metals, 2003(2): 55.
- [2] 魏莉, 贾微. 难浸金矿石预处理新工艺-微波焙烧[J]. 黄金, 2003(12): 29.  
WEI L, JIA W. A new pretreatment technology of refractory gold ore-microwave roast[J]. Gold, 2003(12): 29.
- [3] PICKLES C A. Microwaves in extractive metallurgy: Part 2-A review of applications[J]. Minerals engineering, 2009(13): 1112-1118.
- [4] 魏明安, 张锐敏. 微波处理难浸微细粒包裹金的试验研究[J]. 矿冶, 2001(1): 74.  
WEI M G, ZHANG R M. Study on microwave pretreatment of refractory microdimensional gold packaged by pyrite in gold ores [J]. Mining & metallurgy, 2001(1): 74.
- [5] 赵俊蔚, 郑晔, 邢志军, 等. 微波处理碳质金矿石技术研究[J]. 黄金, 2008(3): 35-38.  
ZHAO J W, ZHENG Y, XING Z J, et al. Researches on carbon-bearing gold ore treatment with microwave[J]. Gold, 2008(3): 35-38.
- [6] 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(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(1): 85-89.
- [7] 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(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(3): 52-55.
- [8] 张明祖, 覃路燕, 郭炳北. 泡沫塑料富集原子吸收法测定矿石中的金[J]. 黄金, 2013(3): 72-75.  
ZHANG M Z, QIN L Y, GUO B B. Determination of gold in ore by polyurethane foam pre-concentration and atomic absorption spectrometry[J]. Gold, 2013(3): 72-75.
- [9] AMANKWAH R K, OFORI-SARPONG G. Microwave heating of gold ores for enhanced grindability and cyanide amenability [J]. Minerals engineering, 2011(6): 541-544.
- [10] 李钊, 张梅, 王习东. 微波在冶金过程中应用的现状与前景[J]. 过程工程学报, 2007(1): 186-193.  
LI F, ZHANG M, WANG X D. Applications of microwave in metallurgical processes[J]. The Chinese journal of process engineering, 2007(1): 186-193.