

文章编号:1007-967X(2005)S0-0003-03

## 广西贵港高砷浮选金精矿微波预处理试验研究\*

马少健, 乔红光, 莫伟, 封金鹏, 刘力章

(广西大学 资源与环境学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**对微波加热时间、微波场中添加剂的种类及用量进行了试验研究, 结果表明微波预处理方法对该浮选金精矿有效, 能显著提高金的氰化浸出率。

**关键词:**微波加热; 难处理金精矿; 预处理

**中图分类号:**TD921 **文献标识码:**A

随着易处理金矿的日益减少, 从各种难浸金矿石中提金已成为国内外黄金开发的热门课题, 也是举世公认的难题。而预处理是难浸金矿石开发利用的关键技术, 因此获得了国内外黄金工作者的高度重视。

预处理是通过物理、化学和机械动力等方法破坏难浸金矿物的晶格结构及消除各种有害杂质, 使包裹金暴露出来。微波预处理方法从 20 世纪 80 年代以来, 一直被用于难浸金矿石的预处理研究, 取得了一定的成果。本文就微波预处理方法在广西贵港高砷浮选金精矿的应用进行了研究, 内容包括微波加热时间、微波场中添加剂种类及用量等对预处理效果的影响。

### 1 试验方法

#### 1.1 试验原料

试验物料为广西贵港六梅金矿的浮选金精矿, 精矿中主要金属矿物有毒砂( $\text{FeAsS}$ )和黄铁矿( $\text{FeS}_2$ ), 脉石矿物以石英( $\text{SiO}_2$ )为主, 其特点是含 As 和  $\text{SiO}_2$  高, 金以晶格金的形式分布于毒砂和黄铁矿中。试验物料的主要化学成分如表 1。

表 1 浮选金精矿主要化学成分(%)

元素	Au(g/t)	S	As	Fe	Sb	Pb	C	Zn	Cu
含量	75	17.5	8.41	16.81	4.98	2.08	1.8	1.83	0.13

#### 1.2 试验过程

矿样经过磨矿后添加适当的添加剂混匀, 进行微波加热, 后经过磨矿、酸洗, 然后进行常规氰化浸出, 对浸渣进行化验分析。

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 微波处理时间

试验采用 NaOH 和  $\text{NaNO}_3$  作为添加剂, 其用量分别为 160 kg/t 和 20 kg/t, 采用间隔加热的方法, 每次加热 10 min, 分别对 5 个矿样进行 10、20、30、50、80 min 加热, 试验结果如图 1 所示。

图 1 中曲线表明, 随着微波作用时间延长, 浸出率逐渐增加, 到 50 min 后, 曲线趋于平缓, 此时浸出率已经达到 80.94%。当加热时间增加到 80 min 时, 浸出率已经达到 90% 以上, 可见为了增加金的浸出率, 需要长时间的微波加热。

试验中, 观察到有烟雾产生, 矿样呈赤热状, 同时在微波炉的底盘及侧壁上有白色粉末, 在微波炉的排气口处可见到黄色的粉末。据文献<sup>[2,3]</sup>记载, 烟雾为  $\text{As}_2\text{O}_3$  和  $\text{SO}_2$ 。经物

相分析表明, 白色粉末为  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{O}_3$ , 黄色粉末为单质 S。

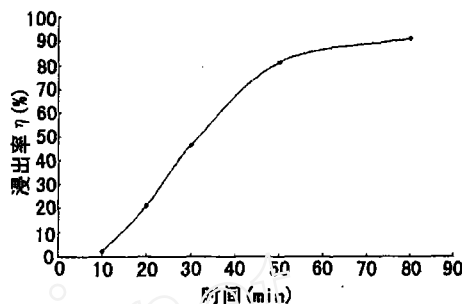


图 1 微波预处理时间对浸出率的影响

(160 kg/t NaOH, 20 kg/t  $\text{NaNO}_3$ )

虽然增加加热时间能提高浸出率, 但加热时间延长, 费用势必增加, 同时综合考虑其它因素, 所以在后续的试验中微波加热时间定为 50 min。

#### 2.2 微波场中添加剂的影响

已有的研究表明,  $\text{KMnO}_4$ 、NaOH、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等添加剂可以有效促进微波加热反应的进行, 因此, 选择了前三种添加剂, 分别考察了其单独添加和组合添加时对预处理效果的影响。

##### 2.2.1 添加剂种类影响大小的比较

采用 3 因素 3 水平的正交试验对  $\text{KMnO}_4$ 、NaOH、 $\text{NaNO}_3$  三种添加剂对预处理效果影响的大小进行了比较, 其中因素 NaOH 的三个水平是添加量分别为 120、160、200 kg/t, 因素  $\text{NaNO}_3$  的三个水平是添加量分别为 10、20、30 kg/t, 因素  $\text{KMnO}_4$  的三个水平是添加量分别为 2、3、4 kg/t, 试验及数据处理结果见表 2。

试验结果表明, 三种添加剂对试验结果都有影响, 影响的顺序为  $\text{NaOH} > \text{KMnO}_4 > \text{NaNO}_3$ 。事实上, 在前期探索的试验中发现在没有添加 NaOH 的情况下, 微波加热并没有烟气产生, 矿样也不红热, 且金的浸出率极低, 而该试验中添加 NaOH 用量为 120 kg/t 时, 金的浸出率达到 97.03%, 因此证明了 NaOH 在微波场中起了非常重要的作用。初步分析是, 在微波处理时加入 NaOH, 一方面增加微波吸收介质量<sup>[2]</sup>, 加速升温过程, 另一方面使从矿物基质中分离出来的 S 和 As 与 NaOH 作用生成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaAsO}_4$ , 将 As 和 S 固定在焙砂中, 避免生成挥发性的  $\text{As}_2\text{O}_3$  和  $\text{SO}_2$ 。

虽然三种药剂对试验结果都有影响, 但具体每种药剂对

\* 收稿日期: 2005-06-20

作者简介: 马少健, 男, 博士, 教授。

步的试验求证。

表 2 组合添加剂正交试验

序号	添加剂(因素)用量(kg/t)			试验结果		
	NaOH (因素 A)	NaNO <sub>3</sub> (因素 B)	KMnO <sub>4</sub> (因素 C)	最终称 重(g)	浸渣品 位(g/t)	浸出率 (%)
1	120	10	2	71.0	3.17	97.03
2	120	20	3	75.2	6.07	93.92
3	120	30	4	73.0	3.42	96.67
4	160	10	3	76.7	13.50	86.20
5	160	20	4	77.1	14.0	85.60
6	160	30	2	77.6	5.74	94.06
7	200	10	4	75.1	5.10	94.89
8	200	20	2	75.2	8.49	91.49
9	200	30	3	73.7	14.4	85.85
				因素 A	因素 B	因素 C
各因素水平各水平				Σ1/3	95.87	92.71
平均效应				Σ2/3	88.62	90.34
[氰化浸出率计/%]				Σ3/3	90.74	92.19
最大差值影响顺序				A>C>B		

### 2.2.2 高锰酸钾的影响

通过上述试验虽然能看出各因素对预处理结果影响的大小,但不能反应因素间的协同效应,因此,进一步研究了各添加剂单独添加和两两组合添加以及它们各自用量的影响。

众所周知,KMnO<sub>4</sub>是一种强氧化剂,对大多数化学反应都能够起到催化剂的作用,所以考察了它作为添加剂对微波预处理效果的影响。试验中固定其它两种添加剂的量,分别为 160 kg/t NaOH, 20 kg/t NaNO<sub>3</sub>, 改变 KMnO<sub>4</sub> 的用量,分别在其用量为 0、2、3、4 kg/t 的情况下进行试验,结果如图 2 所示。

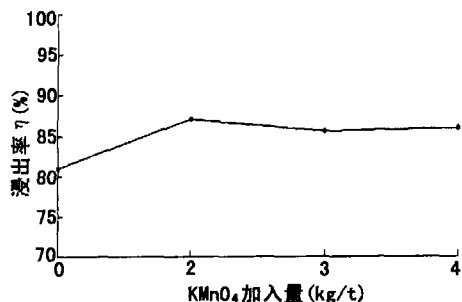


图 2 KMnO<sub>4</sub> 加入量对微波预处理效果的影响  
(160 kg/t NaOH, 20 kg/t NaNO<sub>3</sub>)

由图 2 可知在没有添加 KMnO<sub>4</sub> 的情况下,微波预处理后金的氰化浸出率仅为 80.94%。当 KMnO<sub>4</sub> 的用量为 2 kg/t 时,浸出率达到 87.08%,但随着 KMnO<sub>4</sub> 用量的增加,浸出率没有明显提高,因此后续实验中将 KMnO<sub>4</sub> 用量定为 2 kg/t。

### 2.2.3 氢氧化钠的影响

从前面的分析已知,NaOH 在微波场中起到了非常明显的促进作用。下面的两组试验分别考察 NaOH 与其它添加剂组合或其单独添加对预处理效果的影响。

组合试验时,其它添加剂的使用情况分别为 KMnO<sub>4</sub> 2 kg/t、NaNO<sub>3</sub> 1 kg/t。由于在表 1 中当 NaOH 的用量为 120 kg/t 时,金的氰化浸出率已经达到 97.03%,为了更好的优化

其用量,所以本试验只考察了 NaOH 用量低于 120 kg/t 的情况,即 NaOH 用量分别为 40、80、120 三种情况,试验结果如图 3 所示。

图 3 表明随着 NaOH 用量的增加,曲线呈上升趋势,浸出率越来越高。

可是,在探索试验中曾发现当 NaOH 的用量增加到一定程度时,微波预处理后易形成很坚硬的固熔体,对试验的进行非常不利。例如试验过程中曾将 40 g NaOH 加入 100 g 矿样中进行微波加热,结果发现该过程中烟量明显减少,预处理后的试样极其坚硬,难以从承载容器中剥离开来,也不利于后续的磨矿作业。因此应将 NaOH 的用量控制在适当的范围里。

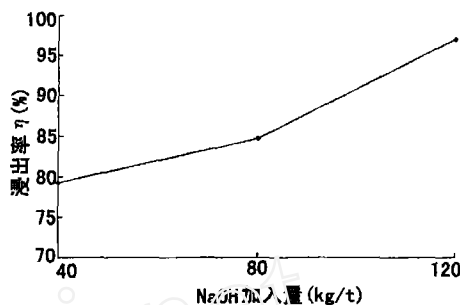


图 3 NaOH 用量对微波预处理效果的影响  
(KMnO<sub>4</sub> 2 kg/t, NaNO<sub>3</sub> 1 kg/t)

此外,试验还考察了单独使用 NaOH 时对微波预处理效果的影响。当 NaOH 用量分别为 120、160、200 kg/t 时,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当 NaOH 用量从 120 kg/t 增加到 200 kg/t 时,金的氰化浸出率并没有明显增加,因此 NaOH 的用量控制在 120 kg/t 左右比较合适。此外从图中还可看出,在没有其它添加剂的情况下金的氰化浸出率最高仅为 91.96%,因此将该试验结果与表 2 进行对比,可得结果如表 3 所示。可见,在微波场中单独使用 NaOH 时对浸出率的影响效果并没有组合药剂的好。

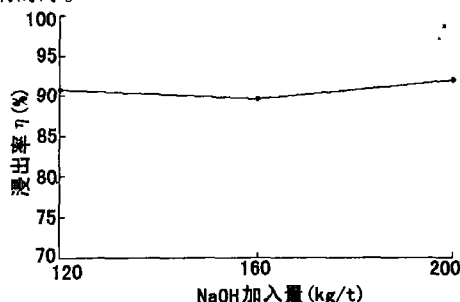


图 4 NaOH 的加入量对微波预处理效果的影响

表 3 组合添加剂与单一添加剂对微波预处理效果的影响对比

KMnO <sub>4</sub> 加入量(kg/t)		氰化浸出率(%)
120	无	90.73
120	2	97.03
160	无	89.62
160	2	94.06
200	无	91.96
200	2	91.49

(下转第 2 页)

10%, 大块率显著降低, 并且基本杜绝因水孔而产生的根底。

### 3 空气柱间隔装药法装药结构

爆区的前排孔抵抗线通常较小且分布不均匀, 为控制爆堆的前抛距离, 保证爆破安全, 因此前排孔的药量通常设计较小。通过以往爆破后观察可知, 整个爆区产生的大块, 大多出现在前排, 原因主要是前排的药柱偏底, 一般仅为 4~5 m, 这样会有一半的药量在炮孔的超身部分, 对孔口下 7~8 m 范围 (L1) 内的岩石作用力十分有限, 因此我们把这一部分的岩石叫大块产生区, 如图 2 所示。

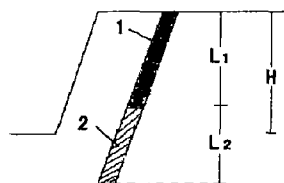


图2 采用空气柱间隔装药结构

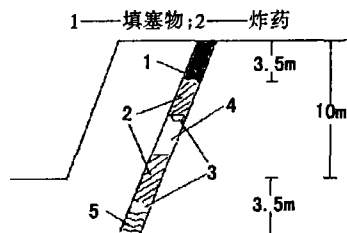


图3 木塞间隔装药法结构

1——填塞物; 2——炸药; 3——木塞; 4——空气柱; 5——孔底积水

针对这种情况, 我们采用了如图 3 所示的空气柱间隔装药法的装药结构, 将单孔的药量分成两部分装下, 每一部分各放有一组起爆药包, 当装完底部药量后, 在保证孔口填塞在 3.5~4 m 的情况下, 用尼龙带吊下木塞, 然后再装下顶部炸药量, 这样在木塞和下部药柱间就形成了一个空气柱间隔段, 当起爆时上下药柱的能量同时作用, 由于空气柱具备了绝热膨胀条件, 这样爆轰产物的绝热膨胀使爆破脉冲的峰值显著降低, 与此同时却使较高的脉冲压力作用时间延长了, 使爆破能量消耗发生再分配, 用于粉碎岩石的能量减少, 而用于破碎岩石的能量就增加了。另外, 由于孔内药柱的提高, 各孔炸药爆破作用范围增大, 使炸药在台阶上下分布较为均匀, 进一步提高炸药能量的利用率。

### 4 结 论

(1) 装药结构是调节炸药能量分布和控制爆破作用的有效途径, 采用木塞隔离体装药结构和空气柱间隔装药法, 可使炸药能量沿炮孔分布趋于均匀, 调节爆炸压力和作用时间, 改变爆破能量的分配状况, 提高炸药能量利用率, 改善爆破效果。

(2) 底部木塞间隔技术的应用, 可以提高岩石的破碎质量, 阻止炸药的失效, 避免因水孔原因改用浆状炸药而带来的施工困难和成本增加, 降低大块率且不留根底。同时可减少爆堆宽度和爆破后冲, 提高装药效率, 降低爆破振动强度。

(3) 应用间隔装药技术, 其投入小, 操作简单易行, 安全可靠, 技术经济效果显著, 可节约采矿成本近 20%, 可在类似露天矿广泛应用。

(上接第 4 页)

#### 2.2.4 硝酸钠的影响

从表 2 可知, 三种添加剂中  $\text{NaNO}_3$  对微波预处理效果的影响最小, 因此对于该添加剂有必要进一步探讨。

试验中固定添加剂及用量为 160 kg/t  $\text{NaOH}$ , 4 kg/t  $\text{KMnO}_4$ , 考察了  $\text{NaNO}_3$  的加入量分别为 0、10、20、30、100、150 kg/t 六种情况, 试验结果如图 5 所示。

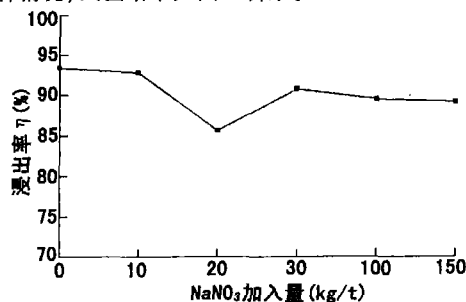


图5  $\text{NaNO}_3$  的加入量对微波预处理效果的影响  
(160 kg/t  $\text{NaOH}$ , 4 kg/t  $\text{KMnO}_4$ )

由图 5 可知, 当  $\text{NaNO}_3$  用量为 0 时, 氰化浸出率为 93.4%, 而随着  $\text{NaNO}_3$  用量的增加, 金的氰化浸出率反而下降。可见, 试验条件下, 添加剂  $\text{NaNO}_3$  对预处理效果产生不利影

响, 因此认为可去掉该添加剂。

### 3 结 论

(1) 通过微波预处理, 贵港高砷浮选金精矿的氰化浸出率由未经预处理的 0~13.6% 提高到 90% 以上, 说明这种预处理方法对该金矿是有效的。

(2) 微波预处理过程所发生的主要化学反应与常规焙烧法类似。

(3) 微波预处理时间、微波场中添加剂的种类及用量等对微波预处理效果均有一定影响, 在所研究的试验条件下, 预处理过程中较佳的试验条件为: 微波加热总时间为 50 min; 添加剂用量为  $\text{NaOH}$  120 kg/t,  $\text{KMnO}_4$  2 kg/t。

#### 参考文献:

- [1] Kazi E. Haque Microwave energy for mineral treatment processes - a brief review Int. J. Miner. Process. 57 1999; 7.
- [2] 谷晋川, 刘亚川, 谢扩军. 难选冶金矿微波预处理研究[J]. 有色金属, 2003(5): 55~57.
- [3] 金钦汉等. 微波化学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 289~291.
- [4] 魏 莉, 贾 微. 难浸金矿石预处理新工艺[M]. 2003(12): 30.
- [5] 莫 伟. 广西贵港高砷浮选金精矿氰化浸金试验研究[硕士学位论文][D]. 2003, 4.