

# 脉冲微泡强化黄铜矿浸出机制研究

罗梦恒<sup>1,2</sup>, 杨思原<sup>1</sup>, 陈兴海<sup>1,3</sup>, 黄凌云<sup>2</sup>, 刘 诚<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

3. 华刚矿业有限公司, 北京 100039)

**摘要:**为提高黄铜矿浸出效率,研究了在常规加热浸出体系的基础上,引入脉冲微泡手段,通过提高浸出过程中传质效率,降低硫化层的影响。探讨了动力学,分析了浸出渣形貌,揭示了脉冲微泡强化浸出的作用机制。研究结果表明:脉冲微泡体可显著提高黄铜矿浸出率,且提升幅度随微泡尺寸减小而增加;常规浸出最佳条件下铜浸出率仅为 53.6%,而在相同条件下,孔板孔径尺寸分别为 94、75 $\mu\text{m}$  时的铜浸出率可提高至 62.48% 和 80.40%。SEM 检测结果表明,脉冲微泡可有效改善硫化层在黄铜矿表面的聚集程度与覆盖面积,其作用机制可能是由于脉冲微泡具有较高的传质效率,能使反应速率加快,同时其破灭时释放的局部高温高压能削弱浸出过程的硫化层钝化作用,从而提高黄铜矿浸出效果。

**关键词:**黄铜矿;脉冲微泡;强化浸出;动力学;机制

**中图分类号:**TF803.21;TF811

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2617(2026)03-0291-08

**DOI:**10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.003

黄铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )是最丰富的含铜矿物形态,约占全球铜储量的 70%<sup>[1]</sup>。工业上通常采用火法工艺从高品位铜矿石中提取铜<sup>[2]</sup>。但随着含铜矿物资源的不断开采,铜矿石品位降低,杂质含量日益增加,采用传统火法工艺已无法从中经济高效提取铜,且该工艺在实施过程中还会排放大量温室气体及含二氧化硫废气,会对环境造成污染<sup>[3]</sup>;而湿法浸出工艺在经济和环境保护方面相较火法更具优势,因此逐渐成为了研究热点。但黄铜矿在浸出过程中产生的副反应产物或中间产物(单质硫或聚硫化物)会覆盖在表面,形成单质硫或聚硫化物组成的硫化层,抑制反应发生,导致铜浸出效率降低<sup>[4-7]</sup>。针对该问题,可通过预处理活化<sup>[8-10]</sup>与浸出过程强化方式加以改善。主要的浸出过程强化方式包括助浸剂强化和外场强化。助浸剂可通过改变浸出液电位、强化传质和改善硫化层电导率等方式提高黄铜矿浸出

效率<sup>[1]</sup>,常用助浸剂有黄铁矿<sup>[11]</sup>、Ag 离子<sup>[12]</sup>、铁离子<sup>[13]</sup>等;外场强化的主要方式有超声强化<sup>[14]</sup>、微波强化<sup>[15]</sup>和压力场强化<sup>[16]</sup>。这两种浸出过程强化方式都能有效提升黄铜矿浸出效率,但也存在能耗大、操作较复杂、对设备要求较高等缺陷。

随着化工行业对生产效率提升与工艺集成化的需求持续攀升,微气泡技术因在强化传质效率方面优势明显,已成为行业研究与应用的热点<sup>[17-18]</sup>。微气泡技术是以生成微气泡为核心,利用其独特物理化学特性实现过程强化的跨领域技术体系<sup>[19]</sup>,具有高比表面积、高表面活性及独特的流体力学特性,可显著提升反应体系中氧化剂的传质效率<sup>[20-23]</sup>。

为改善黄铜矿浸出效果、降低浸出过程能耗、减少氧化剂用量,基于微泡强化传质潜在优势,试验研究了采用结构简单、成本低、效率高的脉冲式微泡发生方法强化浸出黄铜矿,探讨了浸出动力

收稿日期:2025-11-27;修订日期:2026-01-19

基金项目:国家自然科学基金(52374276);云南省基础研究计划重点项目(202401AS070051)。

第一作者简介:罗梦恒(2001—),男,硕士,主要研究方向为湿法冶金。

通信作者简介:杨思原(1990—),男,博士,教授,主要研究方向为选冶联合。E-mail:siyuan.yang@whut.edu.cn。

学,并借助 SEM-EDS 分析了浸出渣形貌,以揭示脉冲微泡对黄铜矿强化浸出的作用机制。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 原矿性质组成

试验用黄铜矿取自新疆哈密某选厂,其 X 射线衍射(XRD)结果如图 1 所示。其特征峰与黄铜矿标准卡片基本吻合,说明样品为高纯度黄铜矿。原矿通过破碎、磨矿及筛分后待用,经粒度检测, $D_{50}$  为  $39.47\ \mu\text{m}$ , $D_{75}$  为  $75.19\ \mu\text{m}$ (图 2)。采用 X 射线荧光分析仪(XRF)分析其化学组成,结果见表 1。可以看出,样品的主要元素为 S、Cu、Fe,质量分数分别为 34.44%、34.02%、30.57%,进一步证明其矿样纯度较高。样品的 SEM-EDS 分析结果如图 3 所示。EDS 分析结果表明,样品中主要含有 Cu、Fe、S 元素,这与 XRF、XRD 分析结果基本一致,进一步表明样品为纯度较高的黄铜矿;其表面存在少量被氧化部分。SEM 分析结果表明,样品中大部分颗粒粒径较小,仅存在小部分较大粒径颗粒,这与粒度检测结果基本吻合。

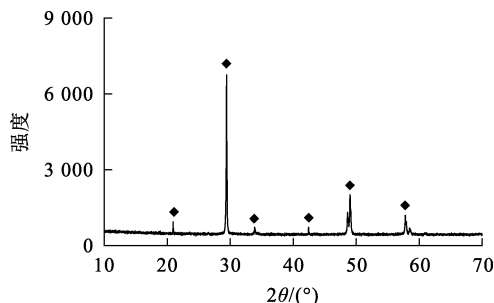


图 1 原矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of raw ore

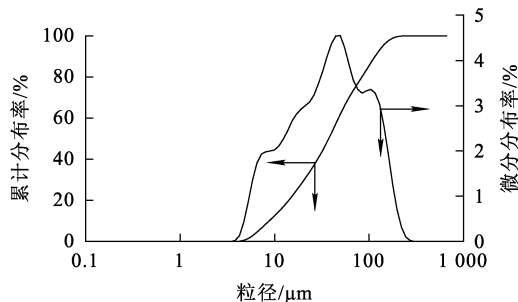


图 2 激光粒度曲线

Fig. 2 Laser particle size curve

表 1 原矿的 XRF 检测分析结果  
Table 1 XRF detection analysis results of raw ore

| raw ore |       |       |      |      |      |      |      | %    |
|---------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| S       | Fe    | Cu    | Ca   | Si   | Mg   | Zn   | P    | Sn   |
| 34.44   | 30.57 | 34.02 | 0.38 | 0.23 | 0.23 | 0.06 | 0.02 | 0.01 |

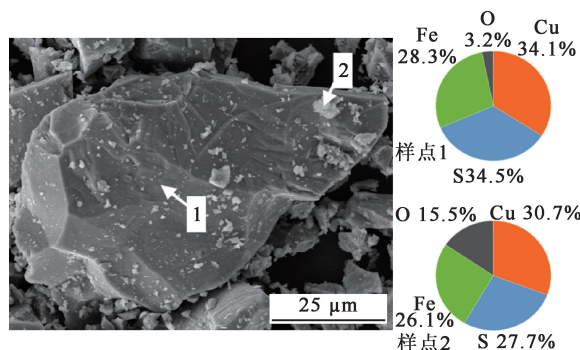


图 3 原矿的 SEM-EDS 分析结果

Fig. 3 SEM-EDS analysis results of raw ore

### 1.2 试验方法

常规试验在烧杯中进行,使用恒温水浴锅加热和磁力搅拌器搅拌。将一定浓度的过氧化氢与硫酸加热到设定温度后,投入一定量的黄铜矿样品,每 0.5 h 滴加 3~4 mL 过氧化氢溶液,反应一段时间后用滤纸进行过滤。采用 ICP 测定滤液中铜离子含量。

脉冲微泡加热强化浸出试验在自主搭建的微泡浸出装置中进行。该装置主要由空气压缩机、压力调节阀、空气流量计、高频电磁阀、控制台与微泡发生器,以及连通各个部件之间的管道构成(图 4)。

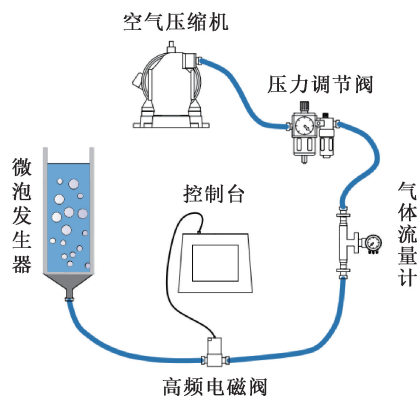
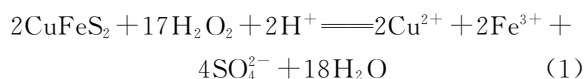


图 4 脉冲微泡浸出装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of pulsed microbubble leaching device

首先将空气吸入压缩机内,过滤和干燥其中的水分和杂质,将所得无油无水压缩空气通过压力调节阀调节至试验系统所需空气压力,而后经过空气管道流经空气流量计,为整个系统提供具有特定流量的气体。气体经过高频电磁阀时,将空压机产生的连续气流转化为具有特定开关频率的间歇性气流,即脉冲式气流;脉冲式气流通过微泡发生器的不同孔径大小的多孔孔板,即可持续生成不同尺寸范围的微气泡。

将微泡浸出装置产生的持续性脉冲微泡不断通入浸出体系中,在脉冲微泡与氧化剂的协同作用下,黄铜矿在浸出过程中的传质效率得以提高。在浸出过程中,选用  $\text{H}_2\text{O}_2$  作为氧化剂,发生的反应如下:



## 2 试验结果与讨论

### 2.1 常规浸出试验

#### 2.1.1 浸出时间对黄铜矿浸出的影响

固定试验条件为:浸出温度  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 过氧化氢浓度  $20\%$ , 硫酸浓度  $1\text{ mol/L}$ , 固液质量体积比  $1\text{ g}/50\text{ mL}$ , 在常规浸出体系下,考察浸出时间对铜浸出率的影响,结果如图 5 所示。

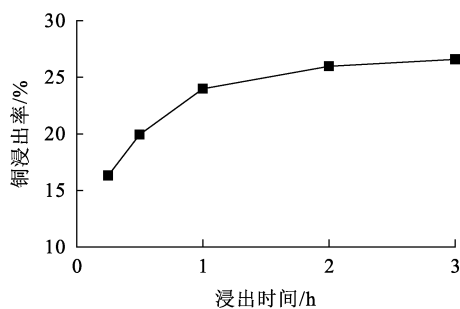


图 5 浸出时间对铜浸出率的影响

Fig. 5 Effect of leaching time on copper leaching rate

由图 5 可知:浸出  $2\text{ h}$  内,铜浸出率随浸出时间延长而升高,在浸出  $1\text{ h}$  后升高幅度趋缓,浸出在  $2\text{ h}$  时,铜浸出率升至  $25.96\%$ ;继续浸出,铜浸出率变化很小,趋于平稳,这是反应过程中黄铜矿不断被消耗,且随反应进行,所生成的副反应产物和中间反应产物会在矿石表面形成硫化层,抑制浸出反应进行所致<sup>[24]</sup>。综合考虑,确定最佳浸出时间为  $2\text{ h}$ 。

#### 2.1.2 浸出温度对黄铜矿浸出的影响

固定试验条件为:浸出时间  $2\text{ h}$ , 过氧化氢浓度  $20\%$ , 硫酸浓度  $1\text{ mol/L}$ , 固液质量体积比  $1\text{ g}/50\text{ mL}$ , 在常规浸出体系下,考察浸出温度对铜浸出率的影响,结果如图 6 所示。

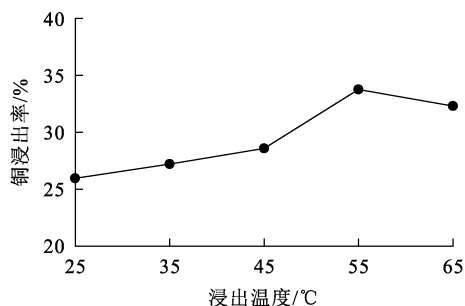


图 6 浸出温度对铜浸出率的影响

Fig. 6 Effect of leaching temperature on copper leaching rate

由图 6 可知:温度在  $25\sim55\text{ }^\circ\text{C}$  考察范围内,铜浸出率随温度升高而升高;温度升至  $55\text{ }^\circ\text{C}$  时,铜浸出率达最大值,为  $33.75\%$ ;随温度继续升高,铜浸出率反而下降,这是过氧化氢在高温环境下分解速率加快,且浸出产生的金属离子将进一步加速  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解所致<sup>[25]</sup>。综合考虑,确定适宜的浸出温度为  $55\text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 2.1.3 过氧化氢浓度对黄铜矿浸出的影响

固定试验条件为:浸出时间  $2\text{ h}$ , 浸出温度  $55\text{ }^\circ\text{C}$ , 硫酸浓度  $1\text{ mol/L}$ , 固液质量体积比  $1\text{ g}/50\text{ mL}$ , 在常规浸出体系下,考察过氧化氢浓度对铜浸出率的影响,结果如图 7 所示。

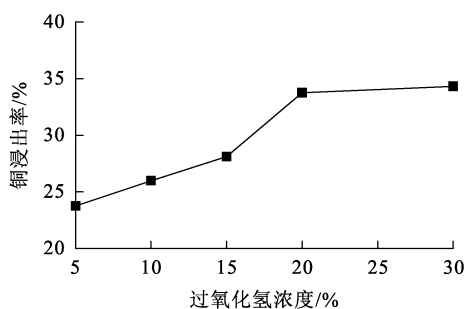


图 7 过氧化氢浓度对铜浸出率的影响

Fig. 7 Effect of hydrogen peroxide concentration on copper leaching rate

由图 7 可知:铜浸出率随过氧化氢浓度增大而升高;过氧化氢浓度增至  $20\%$  时,铜浸出率为

33.75%；继续增大过氧化氢浓度，铜浸出率几乎不变。这是由于过氧化氢分解速率与其自身浓度相关，浓度越大，分解速率越快<sup>[26]</sup>；但当浓度过高时，其对铜浸出率的促进作用不明显。综合考虑，确定适宜的过氧化氢浓度为 20%。

#### 2.1.4 硫酸浓度对黄铜矿浸出的影响

固定试验条件为：浸出时间 2 h，浸出温度 55 ℃，过氧化氢浓度 20%，固液质量体积比 1 g/50 mL，在常规浸出体系下，考察硫酸浓度对铜浸出率的影响，结果如图 8 所示。

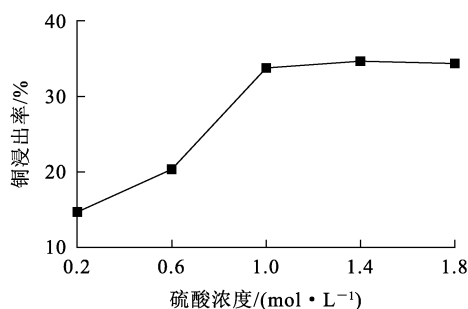


图 8 硫酸浓度对铜浸出率的影响

Fig. 8 Effect of sulfuric acid concentration on copper leaching rate

由图 8 可知：当硫酸浓度升至 1 mol/L 时，铜浸出率升至 33.75%；当 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度由 1 mol/L 升到 1.8 mol/L 时，铜浸出率几乎保持不变。这是因为在一定硫酸浓度(0.2~1 mol/L)范围内，溶液中的 H<sup>+</sup> 不断增多，可促进化学反应发生，使铜浸出率提升；但硫酸浓度超过 1 mol/L 时，由于硫化层附着于黄铜矿颗粒表面，阻碍了反应进行，铜浸出率不再有明显提升。综合考虑，确定适宜的硫酸浓度为 1 mol/L。

#### 2.1.5 固液质量体积比对黄铜矿浸出的影响

固定试验条件为：浸出时间 2 h，浸出温度 55 ℃，过氧化氢浓度 20%，硫酸浓度 1 mol/L，在常规浸出体系下，考察固液质量体积比对铜浸出率的影响，结果如图 9 所示。可知，随固液质量体积比减小，铜浸出率呈先升后降趋势：固液质量体积比减至 1 g/120 mL 时，铜浸出率达最大值，为 53.60%；继续减小固液质量体积比，铜浸出率反而下降。这是因为随固液质量体积比减小，浸出剂与样品的接触概率增大，传质效率较高，浸出率随之升高；而当固液质量体积比较大时，浸出体系黏度增加，反而不利于铜的浸出传质，致使浸出率

下降<sup>[8]</sup>。因此，确定适宜的固液质量体积比为 1 g/120 mL。

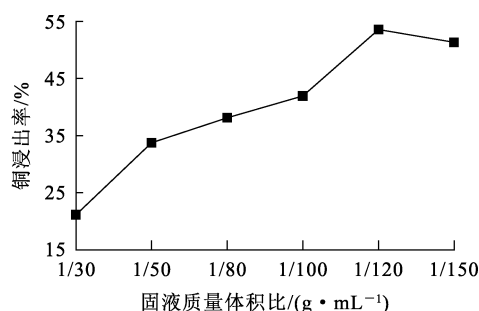


图 9 固液质量体积比对铜浸出率的影响

Fig. 9 Effect of solid mass to liquid volume ratio on copper leaching rate

## 2.2 脉冲微泡强化浸出试验

为探讨脉冲微泡强化浸出效果，在常规浸出试验确定的最佳浸出条件(过氧化氢浓度 20%，硫酸浓度 1 mol/L，固液质量体积比 1 g/120 mL，浸出温度 55 ℃)下进行脉冲微泡强化浸出试验。铜浸出率在不同尺寸微泡孔板孔径下的变化曲线如图 10 所示。

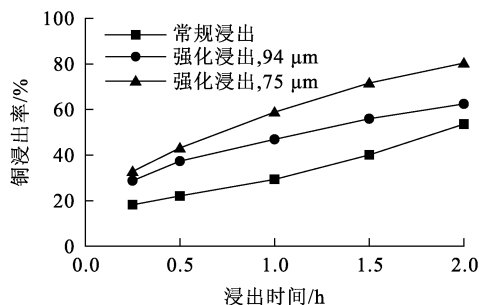


图 10 铜浸出率在不同尺寸微泡孔板孔径下的变化曲线

Fig. 10 Variation of copper leaching rate under different pore diameters of microbubble plate pores

由图 10 可知：采用脉冲微泡强化浸出体系时，铜浸出率随浸出时间延长而升高，且微泡孔板孔径越小，铜浸出率越高；浸出 2 h 时，微泡孔板孔径分别为 75 和 94 μm 下的铜浸出率分别达 80.40% 和 62.48%，均高于常规浸出率(53.6%)。说明在常规浸出体系中引入脉冲微泡能明显促进黄铜矿的铜浸出率提升。综合考虑，以 75 μm 微泡孔板孔径进行后续试验。

## 2.3 浸出动力学分析

黄铜矿的浸出动力学研究一般采用缩核模

型<sup>[27]</sup>。在此模型中,如果浸出过程由扩散模型控制<sup>[28]</sup>,则符合浸出动力学模型公式(2);如浸出过程由化学反应模型控制<sup>[29]</sup>,则符合浸出动力学模型公式(3)。

$$1+2(1-a)-3(1-a)^{2/3}=k_1t \quad (2)$$

$$1-(1-a)^{1/3}=k_2t \quad (3)$$

式中: $a$ —铜浸出率,%; $t$ —浸出时间,h; $k_1$ 、 $k_2$ —扩散模型、化学反应模型动力学反应速率常数, $s^{-1}$ 。

微泡孔板孔径为 75  $\mu m$ 、过氧化氢浓度 20%、 $H_2SO_4$  浓度 1 mol/L、固液质量体积比 1 g/120 mL 条件下,不同温度下铜浸出率随时间的变化曲线如图 11 所示。可知:铜浸出率与浸出时间和浸出温度均呈现正相关关系;脉冲微泡手段引入明显提高了黄铜矿在常规搅拌酸浸体系中的铜浸出率。

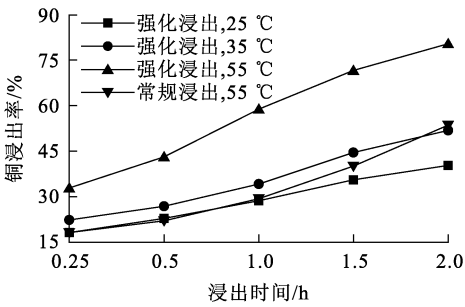
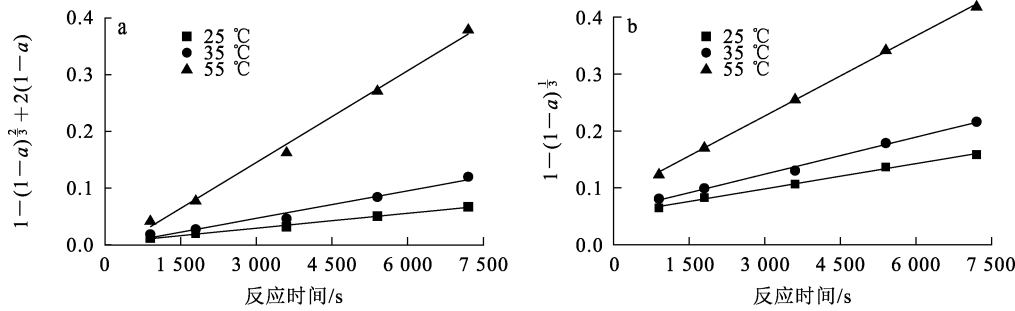


图 11 不同温度下铜浸出率随时间的变化曲线  
Fig. 11 Variation curves of copper leaching rate with time at Different Temperatures

将图 11 试验数据代入式(2)和(3)分别进行线性拟合,拟合曲线如图 12 所示,拟合相关系数见表 2。可知,不同温度下 2 种模型的拟合相关系数均较高。



a—扩散模型;b—化学反应模型

图 12 不同温度下 2 种动力学模型的拟合曲线  
Fig. 12 Fitting curves of the two kinetic models at different temperatures

| 表 2 不同温度下 2 种动力学模型的拟合相关系数                                                                |       |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|
| Table 2 Fitting correlation coefficients of two kinetic models at different temperatures |       |        |
| 温度/°C                                                                                    | 扩散模型  | 化学反应模型 |
| 25                                                                                       | 0.994 | 0.996  |
| 35                                                                                       | 0.976 | 0.995  |
| 55                                                                                       | 0.994 | 0.999  |

为进一步确认黄铜矿在微泡强化浸出体系的浸出过程所符合的动力学模型,采用 Arrhenius 方程<sup>[30]</sup>,即按照式(4)计算反应表观活化能。

$$k=Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4)$$

式中: $k$ —反应速率常数, $min^{-1}$ ;  $A$ —表观频率因子, $min^{-1}$ ;  $E_a$ —表观活化能, $kJ/mol$ ;  $R$ —理想气体

常数,8.314 J/(mol · K);  $T$ —热力学温度,K。  
经计算可知,扩散模型的  $E_a$  为 41.96 kJ/mol,化学反应模型的  $E_a$  为 33.12 kJ/mol。微泡强化浸出黄铜矿的  $\ln k-1/T$  拟合曲线如图 13 所示。

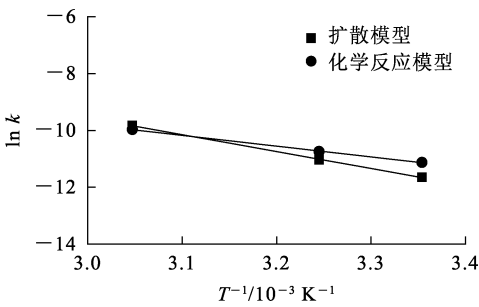
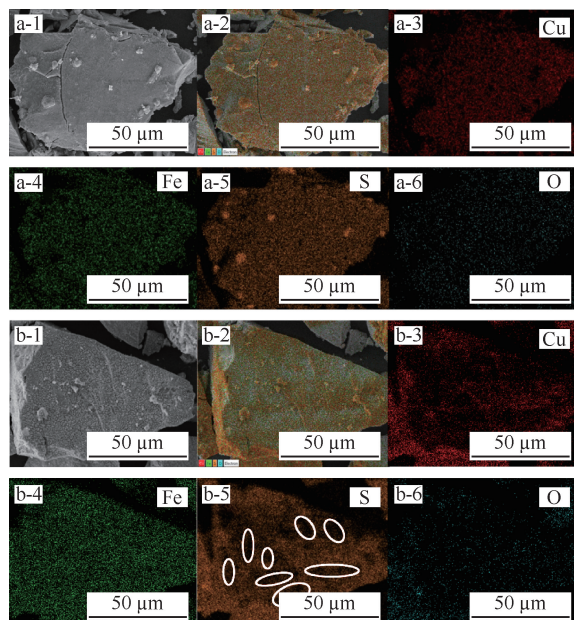


图 13  $\ln k-1/T$  拟合曲线  
Fig. 13 Fitting curves of  $\ln k-1/T$

结合图 13 和  $E_a$  计算结果可知,微泡强化浸出黄铜矿反应更符合化学反应模型<sup>[31]</sup>。说明在微泡强化浸出黄铜矿体系中,化学反应模型处于主导地位,同时也说明了硫化层的抑制作用在微泡强化黄铜矿体系中不再明显。

#### 2.4 浸出渣的 SEM-EDS 分析

对常规浸出体系和微泡强化浸出体系在最佳条件下所得浸出渣进行 SEM-EDS 分析,结果如图 14 所示。由图 14(a)可知,常规浸出渣表面平整,且硫元素在黄铜矿表面均匀分布,但在部分区域明显出现大量聚集现象,说明浸出过程中黄铜矿表面存在致密硫化层。而由图 14(b)可知,微泡强化浸出渣表面凹凸不平,粗糙蓬松,且硫元素分布不均,多处未识别到 S 元素(图 14(b)-5 中圆圈),说明在该体系下硫化层覆盖面积得到有效抑制。这可能是由于微气泡较高的传质效率加快,促进了黄铜矿和浸出剂反应<sup>[18]</sup>,从而提高了黄铜矿浸出效率所致。此外,浸出体系中的微泡在破裂时会释放瞬时局部高温高压<sup>[32-33]</sup>,这种物理作用会不断剥离表面生成的疏松钝化层,使新鲜的矿物表面暴露于浸出剂中,削弱硫化层的屏障作用,使反应回归化学反应模型主导,进一步强化黄铜矿与浸出剂的作用。



a—常规浸出体系;b—微泡强化浸出体系

图 14 SEM-EDS 分析结果

Fig. 14 SEM-EDS analysis results

### 3 结论

在常规氧化浸出体系下浸出黄铜矿是可行的,在最佳浸出条件(过氧化氢浓度 20%、硫酸浓度 1 mol/L、固液质量体积比 1 g/120 mL、浸出温度 55 ℃、浸出时间 2 h)下,铜浸出率为 53.6%。在相同条件下,采用 75 μm 微泡孔板孔径强化浸出,铜浸出率可提升至 80.40%。动力学分析结果表明,在微泡强化浸出体系下黄铜矿的浸出过程受化学反应模型控制,表观活化能为 33.12 kJ/mol。黄铜矿在浸出过程中反应剧烈,微泡的高传质效率和破裂时释放的局部高能量可减弱硫化层在黄铜矿表面聚集和覆盖的不利影响,从而强化黄铜矿的浸出效果。

#### 参考文献:

- [1] 吴越,廖亚龙,嵇广雄,等. 黄铜矿湿法提取铜的研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2022,47(5):10-21.  
WU Yue, LIAO Yalong, JI Guangxiong, et al. Research progress of hydrometallurgical extraction of copper from chalcopyrite [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 47(5): 10-21.
- [2] 冷红光,韩百岁,杨孟月. 黄铜矿浸出研究进展[J]. 湿法冶金,2021,40(5):355-360.  
LENG Hongguang, HAN Baisui, YANG Mengyue. Research progress on chalcopyrite leaching [J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(5): 355-360.
- [3] 司霖. 黄铜矿的湿法冶金工艺研究进展[J]. 山西冶金,2011(4):54-56.  
SI Lin. Progress in chalcopyrite hydrometallurgy process [J]. Shanxi Metallurgy, 2011(4): 54-56.
- [4] 宫晓杰,华晓鸣,宁志强,等. 黄铜矿浸出工艺发展现状[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(5):18-23.  
GONG Xiaojie, HUA Xiaoming, NING Zhiqiang, et al. Current status and future direction of copper leaching from chalcopyrite [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(5): 18-23.
- [5] LI Y, CHANDRA A P, GERSON A R. Scanning photoelectron microscopy studies of freshly fractured chalcopyrite exposed to O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2014, 133(6): 372-386.
- [6] LI Y, QIAN G J, LI J, et al. Chalcopyrite dissolution at 650 mV and 750 mV in the presence of pyrite [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2015, 5(3): 1566-1579.
- [7] AKE S, ADREI S, JAN P. XPS characterization of chalcopyrite chemically and bio-leached at high and low redox potential [J]. Minerals Engineering, 2005, 18(5): 505-515.

- [8] 王兵,李育彪,张世鹏,等.机械活化黄铜矿浸出动力学研究[J].中国矿业,2018(2):136-140.  
WANG Bing,LI Yubiao,ZHANG Shipeng,et al. Effects of mechanical activation on chalcopryrite leaching kinetics[J]. China Mining Magazine,2018(2):136-140.
- [9] 吴越,廖亚龙,马海飞,等.多金属复杂黄铜矿热活化及其非等温动力学研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(2):443-455.  
WU Yue,LIAO Yalong,MA Haifei,et al. Study on thermal activation and its non-isothermal kinetics of chalcopryrite [J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2023,54(2):443-455.
- [10] 李超.黄铜矿加压浸出行为研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [11] JAVAD K S M, AGHAZADEH V, SANDSTROM A. Acidic sulphate leaching of chalcopryrite concentrates in presence of pyrite[J]. Minerals Engineering,2011,24(5):381-386.
- [12] 范兴祥,彭金辉,黄孟阳,等.银离子在氧化浸出黄铜矿中的动力学研究[J].贵金属,2005(3):15-20.  
FAN Xingxiang,PENG Jinhui,HUANG Mengyang,et al. Study on kinetics of oxidative leaching of chalcopryrite in the presence of silver ion [J]. Precious Metals,2005(3):15-20.
- [13] 王翠红,张卫民.铁促进黄铜矿浸出的研究进展[J].湿法冶金,2010,29(2):67-70.  
WANG Cuihong,ZHANG Weimin. Research progress on promoted leaching of chalcopryrite by iron ion [J]. Hydro-metallurgy of China,2010,29(2):67-70.
- [14] 王贻明,吴爱祥,艾纯明.低品位硫化铜矿超声强化浸出实验与机理分析[J].中国有色金属学报,2013,23(7):2019-2025.  
WANG Yiming,WU Aixiang,AI Chunming. Experiment and mechanism analysis on leaching process of low grade copper sulfide intensified by ultrasonic wave[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2013,23(7):2019-2025.
- [15] 康石长,赵云良,温通,等.微波对黄铜矿浸出的强化作用与机理研究[J].金属矿山,2017(1):86-90.  
KANG Shichang,ZHAO Yunliang,WEN Tong,et al. Intensified leaching of chalcopryrite by microwave and its mechanism[J]. Metal Mine,2017(1):86-90.
- [16] CHÁIDEZ J,PARGA J,VALENZUELA J,et al. Leaching chalcopryriteconcentrate with oxygen and sulfuric acid using a low-pressure reactor[J]. Metals,2019,9(2):189.
- [17] KARAMAH E F,BISMO S,ANNASARI L,et al. Mass transfer study on micro-bubbles ozonation in a bubble column[J]. International Journal of Chemical Engineering Research,2010,2(2):243-252.
- [18] 张志炳.微界面传质强化技术[M].北京:化学工业出版社,2020:379-414.
- [19] NAIR S,AL-GHEETHI A M A,RAJU P K S V N,et al. Contemporary application of microbubble technology in water treatment[J]. Water Science & Technology,2022,86(9):2138-2156.
- [20] 孙权,王伟,陈泽.循环流化床锅炉节能降耗高效脱硫改造技术的研究与应用[J].电力设备管理,2025(12):273-278.  
SUN Quan,WANG Wei,CHEN Ze. Research and application of energy-saving,consumption-reducing and high-efficiency desulfurization transformation technology for circulating fluidized bed boilers[J]. Electric Power Equipment Management,2025(12):273-278.
- [21] 张欣.离子液体气液体系流动及传质规律研究[D].北京:中国科学院研究生院(过程工程研究所),2015.
- [22] XU Z Y,WANG Y,ZHU B Y,et al. Microbubble oxidation for  $\text{Fe}^{2+}$  removal from hydrochloric acid laterite ore leachate [J]. Materials(Basel,Switzerland),2023,16(21):6951.
- [23] 张江.臭氧氧化强化黄铜矿浸出及水污染控制研究[D].合肥:合肥学院,2023.
- [24] KUBRA O,MUHLIS N S. Investigation on microwave heating for direct leaching of chalcopryrite ores and concentrates [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2013(3):228-233.
- [25] 徐静.基于不锈钢及铜合金表面的环保型化学抛光技术研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [26] 钟理,陈建军.高级氧化处理有机污水技术进展[J].工业水处理,2002,22(1):1-5.  
ZHONG Li,CHEN Jianjun. Technical progress in organic effluent water treatment by advanced oxidation processes [J]. Industrial Water Treatment,2002,22(1):1-5.
- [27] LI Y,KAWASHIMA N,LI J,et al. A review of the structure,and fundamental mechanisms and kinetics of the leaching of chalcopryrite[J]. Advances in Colloid and Interface Science,2013(9):1-32.
- [28] HABASHI F. Principles of extractive metallurgy [M]. Québec:Métallurgie Press,1998.
- [29] LI Y,QIAN G,LI J,et al. Kinetics and roles of solution and surface species of chalcopryrite dissolution at 650 mV [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2015,161:188-202.
- [30] KAPLUN K,LI J,KAWASHIMA N,et al. Cu and Fe chalcopryrite leach activation energies and the effect of added Fe [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta,2011,75(20):5865-5878.
- [31] HIROSHI K,AIKO A. Effect of suspension potential on the oxidation rate of copper concentrate in a sulfuric acid solution[J]. Metallurgical Transactions; B,1985,16(4):695-705.
- [32] SUSLICK K S. Sonochemistry [J]. Science,1990,247(4949):1439-1445.
- [33] XIN C F,BAO S X,ZHANG Y M,et al. Ultrasonic-per-sulfate synergetic unlocking the efficient extraction of targeted Zn,In,and Ge in zinc slag;from experimental evalua-

tion to DFT study[J]. ACS Sustainable Chemistry and En-

gineering, 2025, 13(28): 10993-11008.

## Intensified Leaching of Chalcopyrite by Pulsed Microbubbles and Its Mechanism

LUO Mengheng<sup>1,2</sup>, YANG Siyuan<sup>1</sup>, CHEN Xinghai<sup>1,3</sup>, HUANG Lingyun<sup>2</sup>, LIU Cheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650093, China;

3. SICOMINES S. A., Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to improve the leaching efficiency of chalcopyrite, on the basis of the conventional heating leaching system, the pulse microbubble method is introduced to reduce the influence of the sulfide layer by improving the mass transfer efficiency in the leaching process. The kinetics is discussed, the morphology of the leaching residue is analyzed, and the mechanism of pulse microbubble-enhanced leaching is revealed. The results show that the pulsed microbubbles can significantly improve the leaching rate of chalcopyrite, and the increase rate rises with the decrease in microbubble size. Under the optimum conditions of conventional leaching, the copper leaching rate is only 53.6%, while under the same conditions, the copper leaching rate can increase to 62.48% and 80.40% when the pore size of the orifice plate is 94 and 75  $\mu\text{m}$ , respectively. The SEM test results show that the pulsed microbubbles can effectively improve the aggregation degree and coverage area of the sulfide layer on the surface of chalcopyrite. The mechanism may be that the pulsed microbubbles have higher mass transfer efficiency and can accelerate the reaction rate. At the same time, the local high temperature and high pressure released during the burst can weaken the passivation of the sulfide layer during the leaching process, thereby improving the leaching effect of chalcopyrite.

**Key words:** chalcopyrite; pulse microbubbles; enhanced leaching; dynamics; mechanism