

次生硫化铜矿制粒试验

尹升华^{1,2)}, 陈威^{1,2)}✉, 刘家明²⁾, 宋庆²⁾

1)北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083 2)北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083
✉通信作者, E-mail:ustbchenwei@126.com

摘要 为解决堆浸过程中由于大量矿粉存在而导致矿堆渗透性差、浸出率低等问题,以次生硫化铜矿为原料,开展了制粒试验研究. 考察了不同制粒黏结剂对矿粉的黏结效果,确定了最佳的制粒黏结剂、制粒工艺以及制粒方法. 通过正交制粒试验,明确了影响制粒试验的主要因素. 试验结果表明:不同制粒黏结剂的黏结效果排序依次为:SFS-2 > SFS-3 > 水泥 > 半水石膏 > SFS-1 > SFS-0 > 硅酸钠 > 阳离子型聚丙烯酰胺. 当选用黏结剂 SFS-2,黏结剂占矿粉质量分数为 8%、加酸量为 $25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 以及制粒过程喷水质量分数为 30% 时,所制矿团效果最佳. 其湿强度达到 94.62%,抗压强度达到 417.44 N,矿团酸浸维持完好时间超过 25 d,矿团形态基本维持不变,无明显破裂现象. 正交制粒试验得到多因素对次生硫化铜矿制粒的影响由大到小依次为:黏结剂占矿石质量分数、加酸量和制粒喷水量. 对选定的黏结剂进行细菌接种试验显示,黏结剂对细菌群落无明显影响. 添加黏结剂试验组细菌数量为 $8.79 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$,未添加黏结剂试验组细菌数量为 $8.86 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$. 对制粒后矿团进行浸矿试验结果显示,矿粉制粒后铜浸出率提高了 12.74%,制粒通过增大矿物之间的孔隙,增加浸出液与矿石的接触,进而提高铜浸出率.

关键词 制粒黏结剂; 湿强度; 抗压强度; 次生硫化铜矿; 生物浸矿

分类号 TD862

Agglomeration experiment of secondary copper sulfide ore

YIN Sheng-hua^{1,2)}, CHEN Wei^{1,2)}✉, LIU Jia-ming²⁾, SONG Qing²⁾

1)Key Laboratory of Ministry of Education for High-Efficient Mining and Safety of Metal, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2)School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail:ustbchenwei@126.com

ABSTRACT The presence of a large amount of fine particles and muddy ore during the heap leaching process leads the occurrence of low leaching rate. Herein, agglomeration experiments using low-grade secondary copper sulfide ore were conducted to enhance the poor heap permeability and low leaching rate caused by the presence of a large amount of fine particles during the heap leaching process. The optimum binder, agglomeration technology, and agglomeration method were selected after investigating the bonding effects of different binders on mineral particles. The effect of single factor, including the binder mass fraction, acid quality, and bulk of water spraying on agglomeration experiments were conducted before the orthogonal experiment. The key factors that have a considerable effect on agglomeration were identified through the orthogonal experiment. According to the experimental results, the order of bonding effect of different granulation binders is as follows: SFS-2 > SFS-3 > cement > hemihydrate gypsum > SFS-1 > SFS-0 > sodium silicate > cationic polyacrylamide. The effect of agglomeration is the best when SFS-2 is selected as a binder, the acid quality is measured as $25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, and the mass fraction of spraying water is 30% during the agglomeration process. The wet strength and compressive strength re-

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家优秀青年科学基金资助项目(51722401); 国家自然科学基金重点资助项目(51734001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-18-003C1)

ches up to 94.62% and 417.44 N, respectively, after drying. The acid leaching time of agglomerations is maintained for more than 25 d, during which the shape of agglomerations remains unchanged and is without obvious fracture. According to the orthogonal experiment, the factors affecting the agglomeration in the descending order are as follows: binder mass fraction, acid quality, and bulk of water spraying. The bacterial inoculation experiment in the presence of binder was conducted, but it shows no considerable effect of binder on the bacterial community. The bacterial number of experiment in the presence of binder reaches $8.79 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$, while that in the absence of binder is $8.86 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$. The leaching experiments results show that the copper leaching rate increases by 12.74% after agglomeration because agglomeration increases the porosity between the minerals and improves the contact between leaching solution and minerals.

KEY WORDS binder; wet strength; compressive strength; secondary copper sulfide ore; bioleaching

生物浸矿提取铜、稀土等金属已运用于工业生产,具有生产成本低、回收流程短、绿色环保等优点,实现了矿产资源的高效开采^[1-3]. 生物浸矿原地回收金属时,矿堆中矿石粒径分布、溶浸液渗透性以及分布均匀性等均是重要的影响因素^[4-5]. 实际生产过程中,由于矿石采出、破碎、筑堆等步骤产生了大量粉矿,直接采用含有大量粉矿的矿石筑堆时会导致诸多问题^[6-8]. 如颗粒偏析,即松散状物料中的粗细颗粒发生分离而各自聚集的现象,破坏了矿石的混合均匀性^[9]. 同时大量粉矿筑堆也会导致堆浸过程中出现板结现象,堵塞溶浸液在矿堆中的流道,导致矿石颗粒无法完全被润湿,进而降低了矿石浸出率,造成大量资源的浪费^[10]. 此外,对于高含泥量的矿石而言,由于矿堆渗透性差,影响矿物的浸出,导致大量含泥矿石被废弃^[11-12].

矿石制粒是一种有效的改善高含泥矿石堆浸和粉矿堆浸渗透性能的措施^[13]. 通过加入黏结剂及润湿剂,将物料连续滚动成球状,从而使细颗粒矿石重新聚集,最终改变矿石的物理、化学性质^[14]. 近年来,国内外专家开展了大量先制粒再入堆堆浸工艺研究,目前制粒技术日渐完善和成熟^[15]. 黎湘虹等对鑫泰含泥氧化铜矿进行制粒预处理,结果表明制粒后的粒矿堆高 3 m,经硫酸喷淋浸出 25 d,铜浸出率 78.02%,25 d 浸出后矿堆仍具有良好的渗透性^[16]. 梁建龙等针对某地高含泥质氧化铜矿石的低渗透性问题,通过试验成功找到一种价廉易得耐酸的 LN3 粘合剂,使用此种粘合剂造粒后,矿石渗透性大大提高,能满足堆浸要求. 其浸出率大于 95%,浸出酸耗为 $93 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[17]. 谭海明对低品位高含泥氧化铜矿采用酸法制粒进行堆浸,结果表明效果良好,浸出率大于 90%,矿石浸出后颗粒保持完好,矿柱渗透性能良好^[18]. 吕萍针对低品位高含泥氧化铜矿进行了制粒堆浸研究,经济有效的实现了对低品位矿石中有价金属的回收^[19]. 尽管大量效果较好的黏结剂已经运用于制粒,但是更加经济、高

效、易得的黏结剂研究仍然存在空白.

本文以次生硫化铜矿为研究对象,对开采和破碎时产生的粉矿进行制粒,研究了适合次生硫化铜矿酸浸制粒的黏结剂,同时考察了各个黏结剂对制粒效果的影响,得出最佳的制粒条件. 探讨了黏结剂对浸矿细菌生长活性的影响,并对制粒后矿团进行浸矿试验,分析了制粒对改善浸出率的作用机理. 为合理解决堆浸过程中矿堆渗透性差、浸出率低等问题提供新方法.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验矿样取自福建省某铜矿,其主要成分以及铜物相分析结果如表 1 和表 2 所示. 矿石主要金属元素为 Cu 和 Fe,其中铜的质量分数为 0.70%,此外矿石中 S 质量分数较高达到 1.10%. 绝大多数铜以硫化物的形式赋存,次生硫化铜和原生硫化铜占比分别为 0.60% 和 0.05%. 氧化率低,氧化铜占比为 0.04%.

表 1 矿样主要元素质量分数

Table 1 Mass fraction of major elements in mineral samples

							%
Cu	Fe	S	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
0.70	1.67	1.10	0.30	0.04	5.29	91.00	

表 2 铜物相分析结果(质量分数)

Table 2 Cu phase analysis results of mineral samples

氧化铜	原生硫化铜	次生硫化铜	结合铜	总 Cu
0.04	0.05	0.60	0.01	0.70

本试验菌液取自福建某铜矿酸性矿坑水,主要含有嗜酸氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*). 使用 9K 培养基对细菌进行实验室富集、纯化及驯化,9K 培养基组成及含量为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $3.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KCl $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 K_2HPO_4 $0.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 44.20 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 试验方法

本试验采用酸法制粒^[20]. 所用矿石主要为次生硫化铜矿, 含有少量氧化铜矿、氧化钙以及氧化镁. 制粒过程中添加适量稀硫酸, 与矿石中的产气物质发生反应, 同时在矿团内部生成沉淀, 反应过程如式(1)~(2)所示, 以增强矿团内部强度, 防止制粒后由于酸浸导致矿团中含有各种脉石矿物与酸反应生成气体, 致使矿团内部孔隙变大, 降低矿团强度.



在自制直径为 300 mm 的塑料制粒圆盘中进行制粒. 塑料制粒圆盘倾角和转速可调, 设定初始制粒倾角和转速为 20° 和 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 按比例将不同粒径的矿石与制粒黏结剂加入到塑料制粒圆盘中, 混酸喷水制备湿矿团.

1.3 分析检测方法

1.3.1 矿团湿强度测定

将干燥后的矿团, 质量为 M_1 , 放置于烧杯中加水直至淹没, 浸泡 24 h. 然后将矿团从烧杯中取出, 对烧杯底部残余的矿粉经过干燥后称重得到质量为 M_2 , 则得到湿强度 S_m 计算公式如下.

$$S_m = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (3)$$

1.3.2 矿团抗压强度测定

使用全自动压力试验机测定矿团抗压强度, 设定加载速率为 $0.20 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$. 将矿团放置在压力测

定装置平台上, 向矿团缓慢施加压力直至矿团破裂, 矿团抗压强度值即为矿团破裂时显示的压力值.

2 结果与讨论

2.1 制粒黏结剂的选择

本试验选择了 SFS-0、SFS-1、SFS-2、SFS-3、水泥、硅酸钠、半水石膏以及阳离子型聚丙烯酰胺 8 种制粒黏结剂. 称取 8 份质量为 200 g 的矿粉, 分别向矿粉加入 8 种占矿粉质量分数为 5.0% 的制粒黏结剂, 设定塑料制粒圆盘倾角和转速分别为 20° 以及 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 控制制粒时间为 10 min, 制粒过程的喷水量占矿粉质量分数为 30%.

试验结果显示, 添加不同黏结剂制粒后矿团的平均粒径由大到小排序依次为: SFS-2 (11.41 mm)、SFS-3 (10.93 mm)、水泥 (9.32 mm)、SFS-1 (8.61 mm)、SFS-0 (8.29 mm)、半水石膏 (8.08 mm)、硅酸钠 (7.90 mm) 以及阳离子型聚丙烯酰胺 (6.96 mm). 当添加的黏结剂为 SFS-2 时, 相同的制粒条件下, 矿粉黏合效果最佳. 当添加的黏结剂为阳离子型聚丙烯酰胺时, 矿粉黏合成团效果最差.

由于本试验所用次生硫化铜矿工业生产中多采用酸性条件下生物浸矿提取铜金属, 所以本试验矿团使用酸浸的方法测量矿团维持完整状态时间, 将固化 48 h 后的矿团放入烧杯中, 加入使用稀硫酸调节 pH 值为 2.0 的酸性溶液至矿团全部浸没, 观察和记录矿团形态以及破裂所需要的时间, 结果如表 3 所示.

表 3 不同黏结剂矿团完全破裂所需时间

Table 3 Break time of aggregation with different binders

SFS-0	SFS-1	SFS-2	SFS-3	水泥	硅酸钠	半水石膏	阳离子型聚丙烯酰胺
<8	<10	>20	>20	<16	<3	<2	<3

由表 3 可知, 添加 SFS-0 和 SFS-1 作为黏结剂所制矿团在酸性溶液中浸泡时间不超过 10 d 全部破裂, 以硅酸钠、半水石膏和阳离子型聚丙烯酰胺为黏结剂所制矿团不超过 3 d 完全破裂, 以水泥为黏结剂所制矿团不超过 16 d 完全破裂, 而利用 SFS-2 和 SFS-3 作为黏结剂所制矿团在酸性溶液中浸泡时间超过 20 d, 在烧杯底部只残余少量从矿团上脱落的矿粉, 矿团基本维持浸泡前的形态.

2.2 黏结剂对细菌群落影响

根据矿团酸浸完全破裂所需时间、黏结剂材料价格以及易得性经过初步比较, 选定 SFS-2 作为本试验黏结剂. 基于本试验采用细菌浸矿, 对所选用

的黏结剂进行细菌接种试验, 考察黏结剂对细菌生长活性的影响. 接种试验采用 9K 培养基作为基底, 装液量 200 mL, 黏结剂浓度为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值调节至 2.0, 细菌接种量为 30 mL, 放置于恒温 30°C 、转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中. 黏结剂对细菌生长活性的影响结果如图 1 所示.

由图 1 可知, 不同培养基下细菌培养试验中细菌数量峰值无显著区别. 含有 9K 培养基以及含有 9K 和 SFS-2 培养基中细菌数量均呈现出细菌数量先降后升最终趋于稳定的趋势. 由于细菌接种对环境具有适应期, 所以接种试验前期细菌数量下降. 在以 9K 和 SFS-2 为培养基的试验组中, 由于添

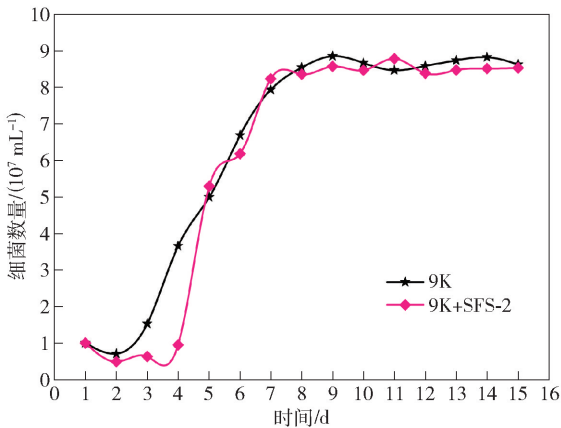


图 1 不同培养基底细菌数量变化

Fig. 1 Variation of bacterial concentration in different culture bases

加了 SFS-2, 细菌接种后的环境适应时间大于 9K 培养基试验组环境适应期. 两个接种试验组中细菌数量峰值分别达到了 $8.86 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$ 和 $8.79 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$, 认为添加剂对细菌影响可以忽略不计.

2.3 单因素条件制粒试验

2.3.1 黏结剂添加量的影响

试验条件为 200 g 矿粉, 分别加入占矿粉质量分数 1%、2%、4%、6%、8%、10% 和 12% 的 SFS-2 黏结剂, 塑料制粒圆盘倾角和转速分别为 20° 以及 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 喷水量为 30%, 制粒时间 10 min, 固化 48 h, 加酸量为 $30 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 矿团的抗压强度、湿强度随黏结剂添加量的变化曲线如图 2 所示.

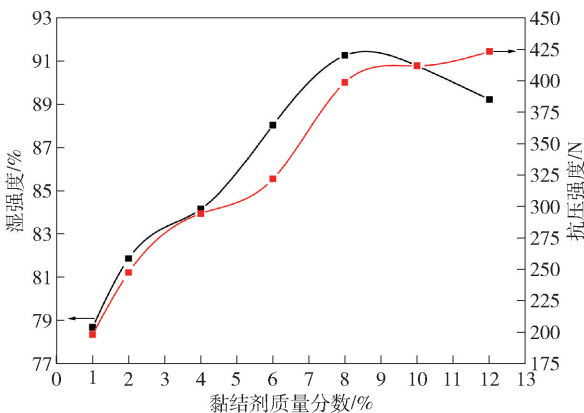


图 2 不同黏结剂含量矿团湿强度与抗压强度变化

Fig. 2 Variation of wet strength and compressive strength under different binders' mass fractions

由图 2 可知, 制粒后矿团的抗压强度均随着 SFS-2 黏结剂含量的增加而增加. 矿团的湿强度首先随着 SFS-2 黏结剂含量的增加而增加, 当黏结剂 SFS-2 质量分数超过 8%, 矿团的湿强度变化不明显, 因此确定后续试验 SFS-2 黏结剂的添加质量分数为 8%.

2.3.2 制粒过程喷水量的影响

试验条件为 200 g 矿粉, 添加 SFS-2 黏结剂质量分数为 8%, 塑料制粒圆盘倾角和转速分别为 20° 以及 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 喷水量分别设置为矿粉质量的 15%、20%、25%、30%、35% 和 40%, 制粒时间 10 min, 固化 48 h, 加酸量 $30 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

当喷水量为 35% 和 40% 时, 制粒矿团由于表面过湿黏结在一起, 无法形成完整形态的矿粒. 同时部分矿团和矿粉附着在塑料制粒圆盘盘壁上, 致使矿粉成团困难. 而当喷水量为 15%、20%、25% 和 30% 时, 矿团的抗压强度分别为 97.68、136.25、214.39 和 419.87 N , 矿团的湿强度分别为 59.23%、68.47%、78.15% 和 92.36%. 喷水量为 30% 时矿团的抗压强度和湿强度均高于喷水量为 15%、20% 和 25% 时的结果. 由单因素条件制粒试验可确定最佳喷水量为 30%, 并确定后续试验喷水量为 30%.

2.3.3 加酸量的影响

试验条件为 200 g 矿粉, 添加 SFS-2 黏结剂占矿粉质量分数为 8%, 塑料制粒圆盘倾角和转速分别为 20° 以及 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 喷水量为 30%, 制粒时间 10 min, 固化 48 h, 加酸量分别为 15、20、25、30、35 和 $40 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. 矿团抗压强度以及湿强度随加酸量的变化曲线如图 3 所示.

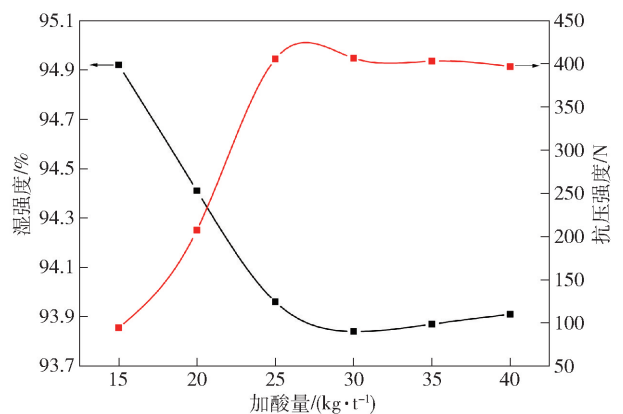


图 3 不同加酸量矿团湿强度与抗压强度变化

Fig. 3 Variation of wet strength and compressive strength under different acid qualities

由图 3 可知, 矿团的湿强度首先随着加酸量 ($15 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 的增加而下降, 由于矿石中耗酸脉石会与硫酸反应生成气体, 随着加酸量的增加, 气体的生成量增多, 对矿团形成过程中的损坏作用增大, 造成矿团湿强度降低. 而后随着加酸量 ($25 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 的增加而维持相对稳定, 这是由于添加的硫酸与矿石中耗酸脉石充分反应后, 不再生成气体, 进而减弱了气体对矿团形成过程中的损坏作用. 矿团的

抗压强度首先随着加酸量 ($15 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 的增加而增加, 由于加酸能够与耗酸脉石发生反应, 在矿团内部生成沉淀, 进而增强了矿团内部强度, 反应过程如式(1) ~ (2) 所示. 而后随着加酸量 ($25 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 的增加而维持相对稳定, 可能的原因是添加的硫酸与矿石中耗酸脉石充分反应, 不再生成更多的沉淀.

2.4 正交制粒试验

正交试验即预先假定各个影响因素相互独立, 然后探讨多个单因素对试验的影响, 普遍适用于研究多因素的作用. 本正交试验着重考察黏结剂添加量、加酸量、制粒喷水量 3 个因素对矿粉制粒的影响, 各个因素安排 4 个水平, 总共需要进行 16 次试验. 根据正交试验设计原理, 3 因素 4 水平的正交试验可选用 $L_{16}(4^3)$ 表, 制定正交制粒试验方案如表 4 所示.

表 4 3 因素 4 水平制粒正交试验

Table 4 Three factors of four horizontal orthogonal test

水平	因素		
	黏结剂质量分数/%	加酸量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	喷水量/%
1	2	20	20
2	4	25	25
3	6	30	30
4	8	35	35

2.4.1 正交制粒试验结果

试验主要考察矿粉制粒后酸浸保持完好状态时间、矿团湿强度以及抗压强度的变化, 所以本正交制粒试验对不同黏结剂质量分数、加酸量和制粒喷水量进行对比, 探讨不同制粒条件组合下各个待考察因素变化情况. 制粒正交试验结果如表 5 所示.

由表 5 可知, 当添加黏结剂 SFS-2 占矿粉质量分数为 8%、加酸量为 $25 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 以及制粒喷水量 30% 时, 矿团湿强度、抗压强度以及酸浸维持完整形态时间分别为 94.62%、417.44 N 以及 25 d. 此条件下矿团湿强度值最大, 抗压强度值最高, 黏结剂对矿粉的黏结效果最佳.

2.4.2 制粒试验影响因素的重要性分析

对表 5 中数据进行极差分析, 研究不同因素对制粒试验的影响程度, 如表 6 所示, 其中 K_{ij} 指第 j ($j=1, 2, 3$) 因素对应的 i ($i=1, 2, 3, 4$) 水平制粒试验之后矿团酸浸维持完整形态时间之和, $\bar{K}_{ij} = K_{ij}/4$, $R_j = \max(\bar{K}_{ij}) - \min(\bar{K}_{ij})$. 对正交制粒试验中矿团湿强度与抗压强度进行分析, 结果如图 4 所示.

基于正交试验原理, 极差 R_j 越大, 表明研究的

表 5 正交制粒试验方案与结果

Table 5 Orthogonal experiment schemes and results

组别	黏结剂质量分数/%	加酸量/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	喷水 量/%	湿强 度/%	抗压 强度/N	酸浸维持 完整形态 时间/d
1	2(1)	20(1)	20(1)	90.41	102.53	<11
2	2(1)	25(2)	25(2)	91.08	105.96	<13
3	2(1)	30(3)	30(3)	90.24	98.92	<12
4	2(1)	35(4)	35(4)	89.96	100.81	<8
5	4(2)	20(1)	25(2)	91.02	121.07	<9
6	4(2)	25(2)	20(1)	90.83	123.81	<14
7	4(2)	30(3)	35(4)	92.78	114.77	<12
8	4(2)	35(4)	30(3)	90.44	111.84	<10
9	6(3)	20(1)	30(3)	92.78	182.87	<16
10	6(3)	25(2)	35(4)	90.99	195.37	<18
11	6(3)	30(3)	20(1)	91.92	188.48	<14
12	6(3)	35(4)	25(2)	93.29	201.29	<13
13	8(4)	20(1)	35(4)	92.33	382.61	<18
14	8(4)	25(2)	30(3)	94.62	417.44	>25
15	8(4)	30(3)	25(2)	91.09	402.69	<23
16	8(4)	35(4)	20(1)	90.98	392.83	<14

注: 括号中数字代表水平.

表 6 矿团酸浸时间极差分析

Table 6 Analysis of the acid leaching time

K_{ij}	黏结剂质量分数/% 加酸量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 喷水量/%		
	$j=1$	$j=2$	$j=3$
K_{1j}	44	64	53
K_{2j}	45	70	58
K_{3j}	61	61	63
K_{4j}	90	45	66
\bar{K}_{1j}	11.00	16.00	13.25
\bar{K}_{2j}	11.25	17.50	14.50
\bar{K}_{3j}	15.25	15.25	15.75
\bar{K}_{4j}	22.50	11.25	16.50
R_j	11.50	6.25	3.25

第 j 个因素对试验影响就越大, 通过极差计算以及分析, 可得在制粒试验过程中黏结剂质量分数是影响矿团酸浸维持完整时间的主导因素, 其次是加酸量以及制粒喷水量.

2.5 制粒浸矿试验

对制粒干燥后的矿团进行浸矿试验, 试验条件为初始 pH 值为 2.0, 接种 150 mL 细菌溶液, 采用 0K 培养液进行浸矿试验, 0K 培养液组成及含量为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $3.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、

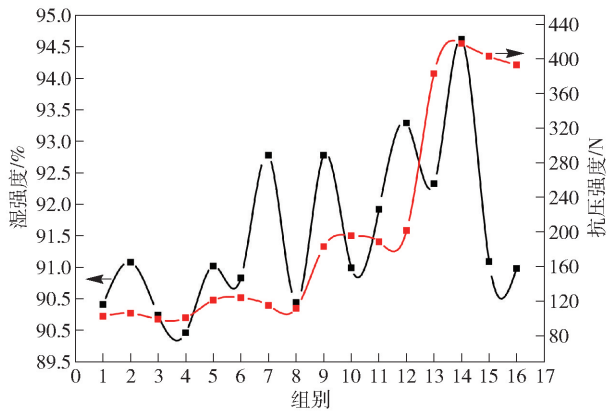


图 4 正交制粒试验矿团湿强度与抗压强度变化

Fig. 4 Variation of wet strength and compressive strength during the orthogonal experiment

KCl 0.10 g · L⁻¹、K₂HPO₄ 0.50 g · L⁻¹、Ca(NO₃)₂ 0.01 g · L⁻¹. 试验方案如表 7 所示, 试验装置及试验结果如图 5 ~ 7 所示.

表 7 浸矿试验方案

Table 7 Leaching experiment schemes

组别	矿石量/g	矿团量/g	矿粉量/g
A	200	200	0
B	200	0	200



图 5 试验装置. (a) A 组; (b) B 组

Fig. 5 Experimental devices: (a) group A; (b) group B

根据常水头试验法对 A、B 两个浸矿柱进行渗透系数测定. 保持试验过程中水头为一常数, 在透明浸矿柱中装填试样 (横截面为 a , 高度为 L), 打开水阀使水自上而下流经试样, 并自出水口处排出. 待水头差 Δh 和渗出流量 Q 稳定后, 量测经过一定

时间 t 内流经试样的水量 V , 则有渗透系数 k 为:

$$k = \frac{Q \cdot L}{a \cdot \Delta h} \quad (4)$$

由式(4)可计算 A、B 两个浸矿柱中渗透系数分别为 2.41 和 0.95 cm · s⁻¹. 由于 A 组中经过制粒后的矿团粒径较为均一, 进行试验时, 筑堆内孔隙率大, 进而提高了渗透系数; 而在 B 组中大量的矿粉堆积在堆体底部, 降低了矿柱的渗透率, 渗透系数较小. 浸矿柱内渗透系数的增加有助于空气流通, 增大矿石、矿团和溶浸液的接触面积.

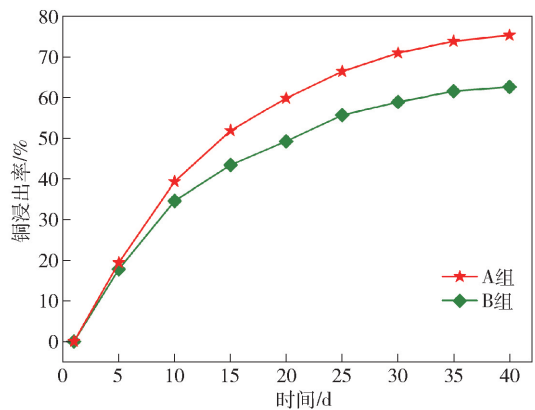


图 6 铜浸出率变化

Fig. 6 Variation of copper leaching rate

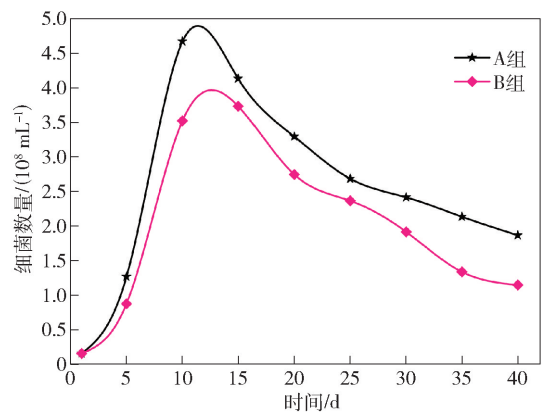


图 7 细菌数量变化

Fig. 7 Variation of bacterial concentration

图 6 和图 7 显示, 相同浸矿条件下, 试验组 A 中铜浸出率达到了 75.32%, 而试验组 B 中铜浸出率为 62.58%. 试验结果显示矿粉制粒后进行浸出试验铜浸出率有显著提高. 这是由于当采用粒径较为均一的矿石以及矿团进行试验时, 试验筑堆内孔隙率大, 空气易于流通, 氧气含量高, 矿石以及矿团和溶液有更加充分的接触, 主要浸矿细菌生长迅速 (细菌数量峰值 $4.87 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$), 试验组 A 中矿石以及矿团的粒径较大, 铜浸矿率更高; 而在试验组 B 中矿堆内含有大量的矿粉, 试验前期 (0 ~ 15 d) 由于

矿粉较为均匀的分布在矿堆内,对浸矿效果影响较小. 浸矿后期(15~45 d)由于矿粉随着浸出液转移到堆体底部,导致大量浸矿盲区出现,在该区域内溶液处于非饱和状态,空气不易流通,氧气含量低,导致低细菌数量(细菌数量峰值 $3.73 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$)和低铜浸出率^[21],矿堆底部板结现象如图 8 所示.

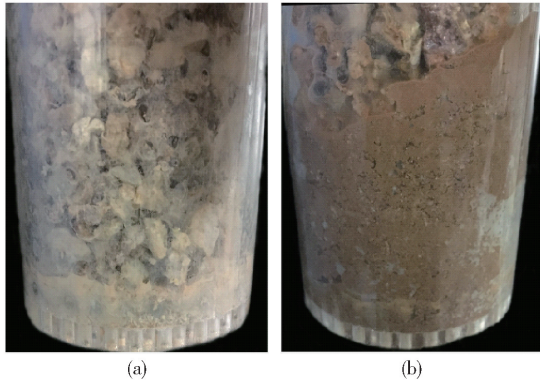


图 8 矿堆底部板结. (a) A 组; (b) B 组

Fig. 8 Hardening phenomenon of heap bottom: (a) group A; (b) group B

3 结论

(1) 通过试验对 SFS-0、SFS-1、SFS-2、SFS-3、水泥、硅酸钠、半水石膏以及阳离子型聚丙烯酰胺 8 种制粒黏结剂进行比较,结果表明:黏结剂的黏结效果依次为 SFS-2 > SFS-3 > 水泥 > 半水石膏 > SFS-1 > SFS-0 > 硅酸钠 > 阳离子型聚丙烯酰胺. 添加 SFS-2 黏结剂时,矿粉制粒效果最佳,其对应的矿团湿强度为 94.62%,抗压强度为 417.44 N,酸浸维持完好时间超过 25 d.

(2) 正交制粒试验结果显示:各个影响因素对矿团的影响排序依次为:黏结剂质量分数 > 加酸量 > 制粒喷水量. 其中黏结剂质量分数的影响最为显著.

(3) 通过试验得到 SFS-2 黏结剂对细菌生长影响有限,矿粉制粒后通过提高筑堆内孔隙率与渗透系数,易于空气流通,增加氧气含量以及增大矿石、矿团和溶液的接触面积,提高主要浸矿细菌生长速率,进而促进硫化铜矿的浸出.

参 考 文 献

[1] Quaicoe I, Nosrati A, Skinner W, et al. Agglomeration and column leaching behaviour of goethitic and saprolitic nickel laterite ores. *Miner Eng*, 2014, 65: 1

[2] Hoummady E, Golfier F, Cathelineau M, et al. A multi-analytical approach to the study of uranium-ore agglomerate structure and po-

rosity during heap leaching. *Hydrometallurgy*, 2017, 171: 33

[3] Hoummady E, Golfier F, Cathelineau M, et al. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching. *Miner Eng*, 2018, 127: 22

[4] Yang C R, Qin W Q, Lai S S, et al. Bioleaching of a low grade nickel-copper-cobalt sulfide ore. *Hydrometallurgy*, 2011, 106(1-2): 32

[5] Ahmadi A, Khezri M, Abdollahzadeh A A, et al. Bioleaching of copper, nickel and cobalt from the low grade sulfidic tailing of Golgozar Iron Mine, Iran. *Hydrometallurgy*, 2015, 154: 1

[6] Hu B, Yi Y, Liang C, et al. Experimental study on particles agglomeration by chemical and turbulent agglomeration before electrostatic precipitators. *Powder Technol*, 2018, 335: 186

[7] Wollborn T, Schwed M F, Fritsching U. Direct tensile tests on particulate agglomerates for the determination of tensile strength and interparticle bond forces. *Adv Powder Technol*, 2017, 28(9): 2177

[8] Vo T T, Mutabaruka P, Nezamabadi S, et al. Mechanical strength of wet particle agglomerates. *Mech Res Commun*, 2018, 92: 1

[9] Luo Y, Wen J K, Wu B, et al. Acid agglomeration and mechanism analysis of a low-grade oxide-sulfide mixed copper ore. *Chin J Eng*, 2017, 39(9): 1321
(罗毅, 温建康, 武彪, 等. 低品位氧硫混合铜矿的酸性制粒及机理. *工程科学学报*, 2017, 39(9): 1321)

[10] Zhang Y B, Zhou Y L, Jiang T, et al. Applications of MHA binder in oxidized pellets preparation from vanadium, titanium-bearing magnetite concentrates. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2012, 43(7): 2459
(张元波, 周友连, 姜涛, 等. MHA 黏结剂在钒钛磁铁矿氧化球团制备中的应用. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(7): 2459)

[11] Xie X L, Duan T, Zheng F Q, et al. Study of magnetite oxidized pellet prepared by modified composite binder. *Met Mine*, 2018(1): 79
(谢小林, 段婷, 郑富强, 等. 改性复合黏结剂制备磁铁矿氧化球团研究. *金属矿山*, 2018(1): 79)

[12] Li C X, Wang F F, Bai Y, et al. Experimental study on preparation of pellet binder by purified Ca-bentonite. *Bull Chin Ceram Soc*, 2018, 37(2): 672
(李彩霞, 王飞飞, 白阳, 等. 钙基膨润土提纯制备球团黏结剂试验. *硅酸盐通报*, 2018, 37(2): 672)

[13] Jia J H, Han H L, Duan D P, et al. Effect of different binder addition on strength of carbon-containing pelletized blast furnace dusts. *Iron steel Van Tit*, 2013, 34(6): 29
(贾继华, 韩宏亮, 段东平, 等. 黏结剂对高炉灰含碳球团强度的影响. *钢铁钒钛*, 2013, 34(6): 29)

[14] Yin Z X, Li X C, Bai Y, et al. Study on production of pellet by compound binder prepared with purified bentonite. *Met Mine*, 2018(4): 126
(殷志祥, 李秀晨, 白阳, 等. 提纯膨润土制备复合黏结剂用于生产球团试验. *金属矿山*, 2018(4): 126)

[15] Wu X, Peng X M, Chen Y H. New high efficient adhesive iron concentrate oxidized pellets experiment. *Mod Min*, 2016(9): 78

- (吴霞, 彭小敏, 陈玉花. 新型高效黏结剂铁精矿氧化球团试验. 现代矿业, 2016(9):78)
- [16] Li X H, Li C Y, Wang H. Acidified granulation pretreatment-heap leaching processing of argillious oxidized copper ore from Xintai Co. Ltd. *Nonferrous Met*, 2009, 61(1): 86
(黎湘虹, 黎澄宇, 王卉. 鑫泰含泥氧化铜矿制粒预处理堆浸工艺. 有色金属, 2009, 61(1): 86)
- [17] Liang J L, Liu H J, Wang Q L, et al. Experimental study on acid agglomeration heap-leaching of an oxidized copper ore on surface. *Min Res Dev*, 2012, 32(5): 37
(梁建龙, 刘惠娟, 王清良, 等. 地表氧化铜矿酸法制粒堆浸试验研究. 矿业研究与开发, 2012, 32(5): 37)
- [18] Tan H M. A study on granulated heap leaching of lowly graded and highly-mudded oxidized copper ore. *J Shaoyang Univ Nat Sci*, 2005, 2(1): 92
(谭海明. 低品位高含泥氧化铜矿的制粒堆浸新工艺研究. 邵阳学院学报:自然科学版, 2005, 2(1): 92)
- [19] Lü P. A study on granulated heap leaching of low graded and highly-mudded oxidized copper ore. *Min Res Dev*, 2001, 21(2): 32
(吕萍. 低品位高含泥氧化铜矿制粒堆浸新工艺的研究. 矿业研究与开发, 2001, 21(2): 32)
- [20] Quaicoe I, Nosrati A, Addai-Mensah J. Influence of binder composition on hematite-rich mixed minerals agglomeration behaviour and product properties. *Chem Eng Res Des*, 2015, 97: 45
- [21] Yin S H, Wang L M, Xie F F, et al. Effect of heap structure on column leaching of secondary copper sulfide. *Chin J Nonferrous Met*, 2017, 27(11): 2340
(尹升华, 王雷鸣, 谢芳芳, 等. 堆体结构对次生硫化铜矿柱浸的影响. 中国有色金属学报, 2017, 27(11): 2340)