

基于通径系数分析的细菌脱硫实验条件优化

艾纯明, 吴爱祥, 王洪江

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

摘要 为探明金属硫化矿细菌脱硫的影响因素与作用机理, 采用嗜酸细菌进行柱浸实验。实验方案采用均匀设计法, 分析了溶液初始 pH 值、布液强度和矿石平均粒径 3 个因素对脱硫效果的影响。脱硫实验结果表明, 布液强度对矿石脱硫率的影响最大, 矿石粒径次之, pH 值最小。对脱硫率进行回归分析, 结果表明, 布液强度、pH 值与脱硫率为正相关, 矿石粒径与脱硫率为负相关, 脱硫率预测最大值可达到 19.66%。此外, 电镜扫描显示, 细菌脱硫作用使矿石表面由致密变为疏松, 矿石表面的硫含量由 43% 左右降低至 15% 左右, 表面脱硫率为 65%, 矿石的可燃性降低。

关键词 细菌脱硫; 通径分析; 硫化矿

中图分类号 TD75

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.008

Experimental condition optimization of bacterial desulfurization based on path coefficient analysis

AI Chunming, WU Aixiang, WANG Hongjiang

Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education; University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Acidophilus bacteria desulfurization column leaching is used to explore the effect of the desulfurization of metal sulfide ore and the feasibility of inhibiting the spontaneous combustion. Uniform design is used in the experiment in which factors investigated include initial pH value, liquid arrangement intensity and average particle size of ore. Regression analysis of desulfurization rates by liquid shows that the liquid arrangement intensity influences the desulfurization most, the ore particle size less, and the pH value the least. Liquid arrangement intensity and pH are positively correlated with the desulfurization rate, but ore particle size negatively. The result of SEM shows that the sulfur content of the ore surface is reduced to 15% or less from about 43%. The ore flammability is lower, with the surface desulfurization rate being 65%.

Keywords bacterial desulfurization; path coefficient analysis; sulfide ore

硫化矿石自燃是金属矿山开采中面临的严重灾害之一, 中国有近 1/3 的金属矿山存在内因火灾的危险^[1]。矿石自燃不仅造成矿石损失, 还会造成大量工程报废、毒气污染等后果^[2,3]。硫化矿内因火灾的根本原因是矿石中硫元素的氧化放热。充足的氧气及不断聚集的热量是主要的外在因

素^[4,5]。传统抑制硫化矿自燃的措施主要集中在阻隔空气、快速散热两方面^[6,7], 并不能从根本上解决硫的氧化问题, 无法根除内因火灾。

将细菌脱硫技术用于防止硫化矿自燃, 利用菌液将矿石表面的硫氧化, 对于危害的防治就由被动变为主动。细

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074013, 51104011)

作者简介: 艾纯明, 博士研究生, 研究方向为低品位矿石溶浸采矿技术, 电子信箱: a3aizi@163.com; 王洪江(通信作者), 教授, 研究方向为金属矿山高效开采技术, 电子信箱: wanghj1988@126.com

引用格式: 艾纯明, 吴爱祥, 王洪江. 基于通径系数分析的细菌脱硫实验条件优化[J]. 科技导报, 2015, 33(15): 54-59.

菌脱硫目前主要应用于处理含硫气体、石油脱硫及净化含硫废水等领域^[8-12],对于矿石的细菌脱硫主要应用在煤炭脱硫^[13,14]。目前的研究表明,细菌脱硫应用在金属高硫矿防火中可行^[15]。

本研究通过金属硫化矿的细菌脱硫实验,应用通径分析探讨主要影响因素及作用机理。通径分析是通径系数分析的简称,这一分析方法已广泛应用于动植物遗传育种和作物栽培的研究工作中。

1 细菌脱硫实验

1.1 实验材料

所用矿样取自安徽铜陵新桥硫铁矿,矿石以胶状黄铁矿为主,其中硫的质量分数为45%,存在极大自燃危险性。该矿山已探明的硫铁矿地质储量为8711万t,目前矿山采矿能力为200万t/a。20世纪90年代该矿山发生了4起矿石自燃火灾^[6],当矿石堆存时间超过30~50 d时,易发生自燃。

矿石经机械破碎后根据实验要求筛分为不同粒径,密封保存。

实验菌株取自安徽铜陵新桥硫铁矿矿坑水,为常温嗜酸氧化型细菌。在富集培养之后加入矿石进行驯化。

1.2 实验装置

矿石的脱硫实验在自制有机玻璃圆柱内进行,如图1所示。有机玻璃柱内径为65 mm,装矿高度600 mm,浸柱底部有阀门。矿柱的上下方均设有上下液位箱,为有机玻璃箱。通过磁力泵进行溶液循环。

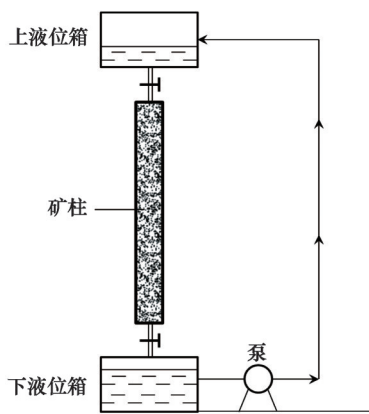


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.3 实验方案

实验采用均匀设计法确定实验方案如表1所示,分析溶液初始pH值、布液强度和矿石平均粒径3个因素对细菌脱硫率的影响。

脱硫实验共进行了44 d,每4 d测一次溶液的pH值、电位E值和SO₄²⁻质量浓度。

表1 高硫矿细菌浸出柱浸实验方案

Table 1 Experiment scheme of bio-leaching of high-sulfur ore

编号	pH值	布液强度/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	粒径/mm
柱1	2.7	240	3
柱2	2.1	480	5
柱3	1.5	160	7
柱4	3.0	400	9
柱5	2.4	80	11
柱6	1.8	360	13

1.4 脱硫率的计算方法

脱硫率是判断细菌脱硫效果好坏的重要指标,本次实验采用液计脱硫率和表面脱硫率来反映脱硫前后矿石含硫量的变化。根据溶液中SO₄²⁻质量浓度和溶液体积计算矿石的液计脱硫率:

$$S = \frac{\alpha_i V_i}{QC} \times 10^4 \quad (1)$$

式中,S为液计脱硫率,%;α_i为第i级反应合格液质量浓度,g/L;V_i为第i级反应合格液的体积,L;Q为脱硫前矿石质量,g;C为矿石中硫含量,%。

液计脱硫率易测量,可以用来对比矿石的整体脱硫效果,但不能代表矿石表面的真实脱硫率。鉴于液计脱硫率的局限性,本次实验采用电镜扫描技术,计算矿石表面脱硫率,对液计脱硫率的结果进行补充。

2 结果与分析

2.1 溶液pH值变化规律

硫化矿脱硫柱浸实验中溶液的pH值变化如图2所示。由图2可知,在脱硫反应的初期,溶液的pH值均呈现大幅度下降的趋势。这是由于细菌处在大量繁殖期,其活动主要通过直接作用、间接作用与溶液中的Fe²⁺和矿石表面的FeS₂发生氧化反应,如式(2)、式(3)所示。反应产生的H⁺大于消耗

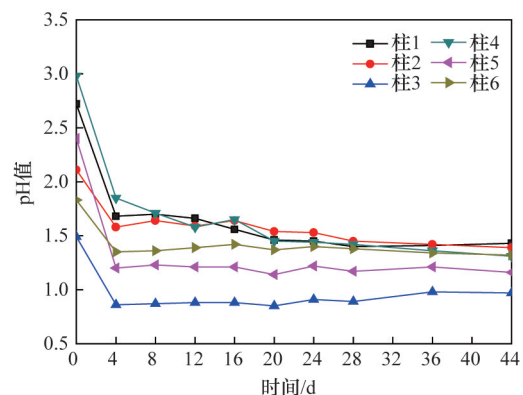
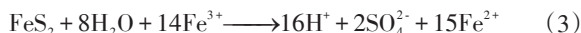
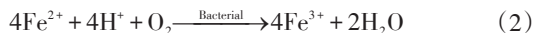


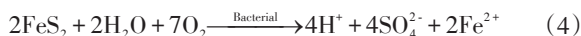
图2 溶液pH值随时间变化

Fig. 2 Changes of pH value of solution

的量,使溶液 pH 值降低。在反应前 4 d 天柱 1~柱 6 的 pH 值由 1.5~3.0 降低到 0.86~1.85。



在脱硫反应的中后期细菌吸附在矿石表面,与矿石表面的 FeS₂ 作用:



在反应后期,细菌代谢所产生的一些有机废物积累到较高浓度,对其生长会产生抑制作用^[7]。在细菌繁殖速度稳定后,脱硫反应的产酸量与耗酸量大体相当,因此溶液的 pH 值趋于稳定。

2.2 溶液电位 E 值变化规律

硫化矿脱硫柱浸实验中溶液电位 E 值随时间变化曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,在反应初期(0~4 d)溶液电位 E 值基本呈现下降趋势。这是因为矿石与溶液发生的生化反应使溶液中 Fe²⁺ 含量增加,如式(3)所示。溶液中 Fe³⁺/Fe²⁺ 浓度比值减小,所以溶液电位 E 值降低。

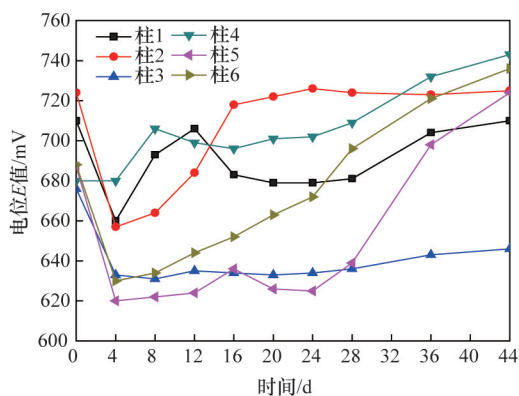


图 3 溶液电位随时间变化

Fig. 3 Changes of electric potential of solution

随着反应的进行,溶液中的 Fe²⁺ 在细菌的作用下被转化为 Fe³⁺,如式(2)所示,溶液的电位 E 值逐渐升高。此后,溶液中的 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 相互转化,Fe³⁺/Fe²⁺ 浓度比值波动较小,电位 E 值也趋于平稳,平均在 640~740 mV。

2.3 脱硫率的变化规律

根据式(1)计算出柱浸实验的脱硫率,其随时间的变化规律如图 4 所示。图 4 表明,脱硫率是随着时间的延长而增长。柱 2 的脱硫率增长速度最快,而柱 5 的增长速率最慢。这与浸出时的布液强度有关,布液强度越大脱硫率就越高。柱 2 的喷淋强度为 480 L/(m²·h);而柱 5 只有 80 L/(m²·h),为 6 组实验中最低值。

对柱 2 的脱硫率进行拟合分析,其与时间的关系如图 5 和式(5)所示(复相关系数 R=0.99)。

$$S_2 = 0.4089t + 0.4768 \quad (5)$$

式中,S₂为柱 2 液计脱硫率,%;t 为脱硫时间,d。

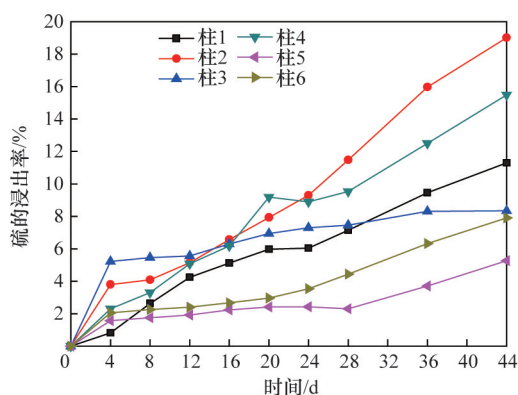


图 4 液计脱硫率随时间变化

Fig. 4 Changes of desulfurization rate

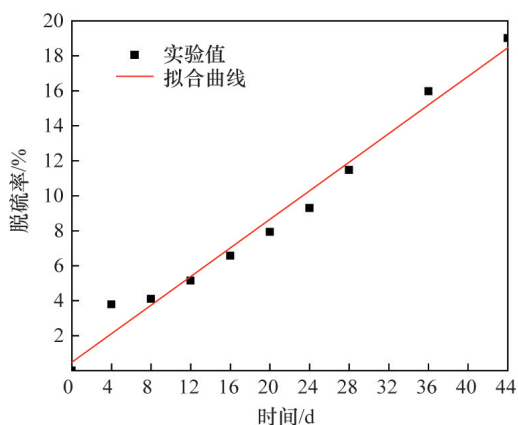


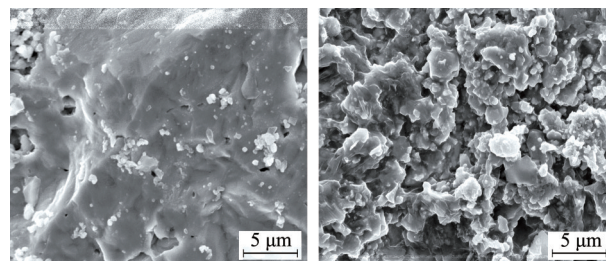
图 5 柱 2 脱硫率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of desulfurization rate of column 2

式(5)表明,脱硫率 S₂ 和脱硫时间 t 为线性关系。由收缩核模型^[18]可知,脱硫反应服从外扩散控制动力学方程,这与前面分析的脱硫率主要受布液强度影响的结论一致。提高布液强度,加快溶液在矿石表面的更新速度,有利于提高脱硫率。

2.4 脱硫前后矿石表面特征分析

在柱 2 中的相同位置,分别于细菌脱硫前后取一矿样,对其表面进行电镜扫描,结果如图 6 和图 7 所示。



(a) 脱硫前

(b) 脱硫后

图 6 细菌脱硫前后矿石表面形貌

Fig. 6 Ore surface morphologies before and after bacterial desulfurization

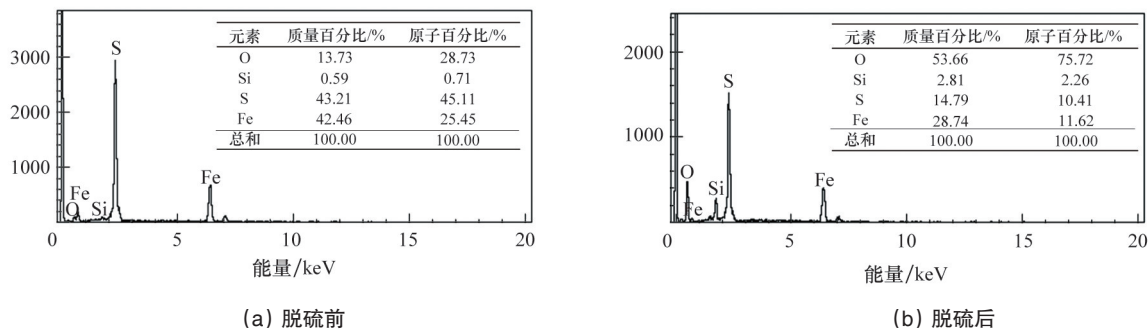


图7 细菌脱硫前后硫化矿表面能谱

Fig. 7 Energy spectrums of ore surface before and after bacterial desulfurization

图6表明,在脱硫反应之前矿石表面较为致密、光滑,脱硫反应使得矿石表面变得十分疏松,侵蚀痕迹明显。

从图7可以看出,经过细菌的脱硫作用矿样表面S元素所占比例明显减少,O元素的含量有所增加,细菌的氧化作用明显。

原矿表面S元素的质量分数为43%左右,经过细菌脱硫之后减少至15%左右,由此计算出的脱硫率为65%,远大于柱2的液计脱硫率(18.9%)。这是因为液计脱硫率计算的是溶液中硫含量占矿石中全部硫的百分比,而细菌的脱硫作用主要发生在矿石的表面,因此液计脱硫率偏小。相对而言,通过电镜扫描可得出矿石表面的含硫量变化,计算出的表面脱硫率更具有代表性。

由金属硫化矿硫含量与自燃性的关系可知,硫的质量分数小于15%时自燃的可能性较小^[19]。分析表明,虽然液计脱硫率只有不到20%,但矿石表面的脱硫率较高,矿石表面的硫含量降至15%以下,说明细菌脱硫作用可有效阻止矿石内部的硫元素被氧化,达到抑制硫化矿自燃的目的。同时在细菌脱硫反应过程中,矿石被菌液浸润,亦不存在自燃风险。

3 结果分析与优化

3.1 脱硫率回归方程

通过DPS(data processing system)软件对脱硫率进行回归分析,以脱硫率为因变量,pH值、布液强度、矿石粒径为自变量进行二次多项式逐步回归,得到回归方程(相关系数 $R=0.9994, P=0.0499$):

$$S = 8.1415 + 4.255 \times 10^{-5} x_2^2 - 0.06628 x_3^2 + 0.1793 x_1 x_3 + 2.85 \times 10^{-4} x_2 x_3 \quad (6)$$

式中,S为脱硫率,%; x_1 为pH值; x_2 为布液强度, $L/(m^2 \cdot h)$; x_3 为矿石粒径,mm。

3.2 影响因素的通路系数分析

在脱硫率的回归方程中,3个因素的相关系数为 $r_1=0.3363; r_2=0.8420; r_3=-0.5343$ 。由此可知对脱硫率的影响大小顺序为:布液强度(x_2)>矿石粒径(x_3)>pH值(x_1)。根据相

关系数的符号可初步判断3个因素中,脱硫率与布液强度和pH值为显著正相关,与矿石粒径为显著负相关。但由于3个因素在回归方程中并不是以一次项形式存在,因此需要通过通路系数继续进行分析。式(6)中各项对应的通路系数如表2所示。

表2 脱硫率相关因素的通路系数
Table 2 Path coefficients of relevant factors of desulfurization rate

因素	直接作用	通过 x_2^2	通过 x_3^2	通过 $x_1 x_3$	通过 $x_2 x_3$
x_2^2	0.7225		0.0886	-0.0068	0.0580
x_3^2	-0.7901	-0.0810		0.2508	0.0544
$x_1 x_3$	0.3104	-0.0157	-0.6384		0.0458
$x_2 x_3$	0.0909	0.4608	-0.4729	0.1564	

通路系数是变量标准化后的偏回归系数,是具有方向性的相关系数,能表示自变量与因变量之间的关系,可用来估计自变量对因变量直接影响效应的大小,比较其相对重要性。若通路系数为正值,说明方程中的该项与因变量为正向作用,即此项数值与因变量取值增减性相同。利用通路系数分析,可以建立最优多元回归方程。

3.2.1 溶液pH值

溶液pH值(x_1)的增加会导致回归方程中 $x_1 x_3$ 值增大,由表2可知, $x_1 x_3$ 的直接通路系数为正值($P_{13}=0.3104$),即为正向直接作用。将式(6)中的 x_2, x_3 取定值,得出脱硫率与 x_1 之间的关系,如图8所示($x_2=480, x_3=5$)。由图8可以看出,增大溶液初始pH值可以提高细菌脱硫率。通过前面的实验结果可知,在细菌脱硫过程中溶液的pH值均呈现下降趋势,说明脱硫作用的产酸速度快,较高的初始pH值利于脱硫反应。而且脱硫细菌应存在于一个适宜的pH值环境,较低的pH值会抑制细菌的生长^[20]。

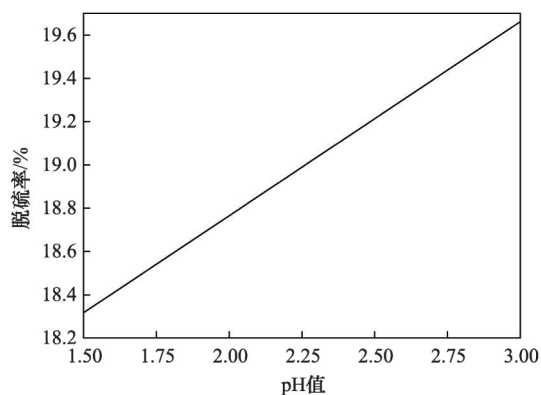


图8 细菌脱硫率与溶液初始pH值的关系
Fig. 8 Relationship of bacterial desulfurization rate with initial pH of the solution

3.2.2 布液强度

布液强度(x_2)的增加会导致回归方程中 x_2^2 和 x_2x_3 值增大, x_2^2 和 x_2x_3 的直接通径系数均为正值($P_{22}=0.7225$; $P_{23}=0.0909$),为正向直接作用,脱硫率与 x_2 的关系如图9所示($x_1=3$, $x_3=5$)。由图9表明,增大布液强度可以提高细菌脱硫率。动力学分析结果亦表明脱硫率和布液强度的关系为正相关。

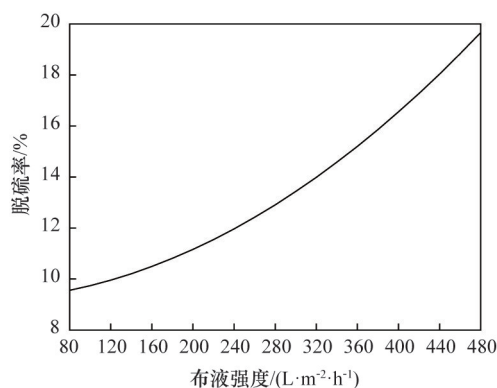


图9 细菌脱硫率与布液强度的关系
Fig. 9 Relationship of bacterial desulfurization rate with spray intensity

3.2.3 矿石粒径

矿石粒径的通径分析相对复杂,矿石粒径(x_3)的增加会导致回归方程中 x_3^2 、 x_1x_3 和 x_2x_3 值增大。 x_3^2 的直接通径系数为负($P_{33}=-0.7901$),为负向直接作用,但 x_1x_3 和 x_2x_3 的直接通径系数均为正值($P_{13}=0.3104$; $P_{23}=0.0909$)。因为 x_3^2 的负效应较强,所以在大部分取值范围,增大矿石粒径不利于脱硫率的提高。但是脱硫率与矿石粒径的关系并不一直是单调递减,在某个区间(3~5.1 mm)增大矿石粒径可对脱硫率起到正向作用,如图10所示($x_1=3$, $x_2=480$)。

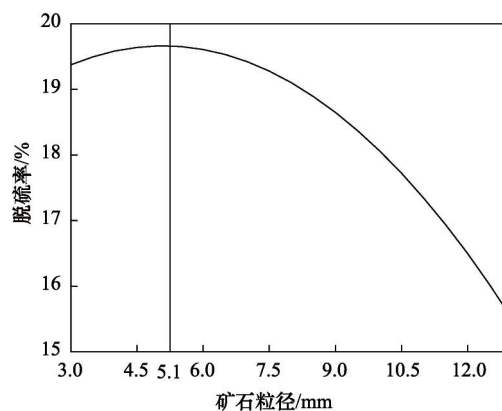


图10 细菌脱硫率与矿石粒径的关系
Fig. 10 Relationship of bacterial desulfurization rate with particle size of ore

对于单个矿石的脱硫反应来说,矿石的粒径越小,比表面积越大,越利于细菌脱硫反应。但是在柱浸或堆浸中还需考虑矿石颗粒群的渗透性,矿石粒径越小,粉矿越多,矿柱的渗透性越差,越不利于菌液的流动。

3.3 实验结果优化

通过限定约束条件 $x_1=1.5\sim 3$, $x_2=80\sim 480$, $x_3=3\sim 13$,利用Matlab数学软件对式(6)进行带约束条件的非线性规划,得到了脱硫率的最大值。

脱硫率的优化结果表明,当溶液初始pH值为3.0,布液强度为 $480\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,矿石粒径为5.1 mm时脱硫率可达到最大值19.66%。在优化条件中pH值和喷淋强度取值均为实验条件中的最大值,矿石粒径取值接近于最小值,和前面的分析结果一致。在优化条件下进行了3组验证实验,得到脱硫率分别为18.65%、19.68%、19.53%,平均为19.29%。结果表明,实验值和预测值有较好的吻合。

4 结论

1) 柱浸实验中,矿石的液计脱硫率为19%,对应的表面脱硫率为65%。脱硫后矿石表面含硫量低于15%,自燃可能性较小,达到了通过细菌脱硫抑制矿石自燃的目的。同时,由于细菌脱硫作用集中在矿石表面,因此对矿石的金属回收影响较小。

2) 液计脱硫率的回归分析结果表明,对脱硫率的影响大小顺序为布液强度、矿石粒径和pH值。脱硫率与布液强度和pH值为正相关,与矿石粒径为负相关。

3) 液计脱硫率的实验条件优化结果显示,当溶液初始pH值为3.0,布液强度为 $480\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,矿石粒径为5.1 mm时液计脱硫率可达到最大值19.66%。

参考文献(References)

[1] 邬长福. 高硫金属矿床内因火灾及其灭火措施[J]. 矿业安全与环保,

- 2002, 29(2): 21-22.
Wu Changfu. Spontaneous combustion in high-sulfur metal mine and its control measures[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2002, 29(2): 21-22.
- [2] Soundararajan R, Amyotte P R, Pegg M J. Explosibility hazard of iron sulphide dusts as a function of particle size[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 51(1-3): 225-239.
- [3] 孙浩, 阳富强, 吴超, 等. 硫化矿石自燃机理及防治技术研究进展[J]. 金属矿山, 2009(12): 5-10.
Sun Hao, Yang Fuqiang, Wu Chao, et al. Research progress on mechanism of spontaneous combustion for sulfide ores and the control techniques[J]. Metal Mine, 2009(12): 5-10.
- [4] 王立磊, 王李管, 李珞铭. 堆积硫化矿散热影响因素的研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(1): 96-99.
Wang Lilei, Wang Liguang, Li Luoming. Study on the influencing factors of heat release of sulfide ore pile[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(1): 96-99.
- [5] 阳富强, 吴超, 刘辉, 等. 硫化矿石自燃的热分析动力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(8): 2469-2474.
Yang Fuqiang, Wu Chao, Liu Hui, et al. Thermal analysis kinetics of sulfide ores for spontaneous combustion[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(8): 2469-2474.
- [6] 吴大敏. 新桥硫铁矿矿石自燃特征及综合防治措施[J]. 化工矿物与加工, 2001(10): 20-22.
Wu Damin. The characteristics of spontaneous combustion of sulfide ores and the complex measures for preventing and extinguishing fire[J]. Industrial Minerals and Processing, 2001(10): 20-22.
- [7] 李孜军, 汪发松, 李光晓. 硫化矿石自燃阻化剂优选试验研究[J]. 安全与环境学报, 2009(3): 132-134.
Li Zijun, Wang Fasong, Li Guangxiao. Experimental study on the spontaneous combustion inhibitor of sulfide ores[J]. Journal of Safety and Environment, 2009(3): 132-134.
- [8] Li W, Tang H, Liu Q, et al. Deep desulfurization of diesel by integrating adsorption and microbial method[J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, 44(2): 297-301.
- [9] 田晓娟, 唐凌天, 彭立娥, 等. 石油脱硫微生物菌株的筛选及鉴定的研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 192-198.
Tian Xiaojuan, Tang Lingtian, Peng Li'e, et al. Research on identification and screen of microbial desulfurization strains for petroleum[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(6): 192-198.
- [10] Soleimani M, Bassi A, Margaritis A. Biodesulfurization of refractory organic sulfur compounds in fossil fuels[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(6): 570-596.
- [11] 王永川, 陈光明, 李建新, 等. 细菌湿法烟气脱硫试验研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 236-240.
Wang Yongchuan, Chen Guangming, Li Jianxin. Experimental research in fgd by liquid biochemical ways[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(8): 236-240.
- [12] Sarti A, Pozzi E, Chinalia F A, et al. Microbial processes and bacterial populations associated to anaerobic treatment of sulfate-rich wastewater [J]. Process Biochemistry, 2010, 45(2): 164-170.
- [13] Jorjani E, Chehreh C S, Mesroghli S. Prediction of microbial desulfurization of coal using artificial neural networks[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(14): 1285-1292.
- [14] Cardona I C, Márquez M A. Biodesulfurization of two colombian coals with native microorganisms[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(9): 1099-1106.
- [15] 罗飞侠, 王洪江, 吴爱祥. 金属硫化物的微生物脱硫可行性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 23-26.
Luo Feixia, Wang Hongjiang, Wu Aixiang. Analysis on feasibility of removing sulfur from metal sulfide ores with microorganism[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 23-26.
- [16] 吴法春. 新桥硫铁矿矿石自燃的原因及防灭火措施[J]. 矿业安全与环保, 2002, 29(3): 27.
Wu Fachun. Cause of spontaneous combustion of pyritic ore and its prevention and control measures in Xinqiao pyritic mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2002, 29(3): 27.
- [17] 邹俐宏, 钱林, 张燕飞, 等. 源自硫化矿区的 *Acidiphilium* 属菌的分离及其浸矿性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 336-341.
Zou Lihong, Qian Lin, Zhang Yanfei, et al. Isolation and identification of *Acidiphilium* strain DY from complex sulfide mines and its bioleaching characterization[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 336-341.
- [18] Lizama H M. A kinetic description of percolation bioleaching[J]. Minerals Engineering, 2004, 17(1): 23-32.
- [19] 张虹, 张春生. 黄铁矿自燃机理及其预防[J]. 铜业工程, 2004(3): 53-54.
Zhang Hong, Zhang Chunsheng. Principle of pyrite spontaneous combustion and its prevention[J]. Copper Engineering, 2004(3): 53-54.
- [20] 羊依金, 李志章, 邹长武, 等. 脱硫细菌的培育及最佳生长条件的研究[J]. 四川环境, 2006, 25(6): 17-19.
Yang Yijin, Li Zhizhang, Zou Changwu, et al. Study on cultivate and optimum culture condition of desulfurization microorganism[J]. Sichuan Environment, 2006, 25(6): 17-19.

(编辑 田恬)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。