

氧化亚铁硫杆菌浸出某低品位磷矿的试验研究

王大鹏^{1,2,3}, 渠光华^{1,2,3}, 孙伟^{1,2,3}

1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合重点实验室, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025

中图分类号: TD925⁺.5; TD971⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0131-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.020

摘要 采用氧化亚铁硫杆菌浸出低品位磷矿, 探究氧化亚铁硫杆菌的最优生长条件, 并通过逐级转移驯化得到能耐受高矿浆浓度的细菌, 采用驯化细菌浸出磷矿, 达到提高浸出率的目的。试验结果表明: 以 P_2O_5 品位为 13.17% 的贵州某磷矿为研究对象, 在温度为 33 °C、初始 pH 为 1.6 氧化亚铁硫杆菌活性较强, 浓度较高为 $1.63 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$ 。驯化后氧化亚铁硫杆菌浸出磷矿效率为 76.6%, 未经驯化的氧化亚铁硫杆菌浸出磷矿效率仅为 60.3%。在矿浆质量浓度为 1%、3%、5%、7%、9% 时, 磷矿浸出率分别为 56.4%、70.4%、75.2%、64%、44.7%。以黄铁矿为营养物时磷矿的浸出率为 78.6%, 比以硫磺为营养物时浸出率高 17.1 个百分点。该研究提高了低品位磷矿的浸出率, 缩短了磷矿浸出时间。

关键词 低品位磷矿; 氧化亚铁硫杆菌; 微生物浸出; 浸出率

引言

磷矿是工业和农业生产的重要原料, 是关乎一个国家经济发展的命脉。近几年来我国对磷的需求量仍在逐年增加^[1-3]。传统的磷矿选矿方法主要包括擦洗脱泥、重选、浮选、焙烧、酸浸等^[4-5], 这些方法对复杂难选的矿石适应性强, 工艺相对成熟^[6]; 但工艺耗能高、工序复杂、对环境污染大、选矿效率较低, 很难实现对低品位磷矿的高效利用^[7-9]。微生物选矿不仅能够处理低品位复杂难选矿石, 而且具有环境友好、反应温和、工艺流程短、能耗低等优点^[9-10]。相比之下, 采用生物浸出选别磷矿是一种很好的手段, 而如何有效地利用生物浸出方法从低品位磷矿中高效提取磷是人们所重点关注的^[11-12]。

已有研究表明, 磷矿的浸矿机理与微生物的生长行为密切相关。微生物直接吸附在矿物表面形成外包膜, 产生高效催化酶, 加速了硫化物的氧化, 使得有用矿物发生溶解浸出^[13-14]; 另一方面, 细菌具有氧化性, 浮游在液相中氧化 Fe^{2+} , 使溶液中含有氧化物, 加上硫的存在会生成有机酸从而与磷酸钙发生反应生成磷酸^[15]; 大多数研究者赞成上述两种机制协同作用, 但哪种作为主导尚存争议^[16-17]。生物在浸出过程中存在一

系列的复杂反应, 主要受生物因素、物理化学因素、金属离子浓度等的影响^[18]。龚文琪^[19]利用氧化亚铁硫杆菌浸出中低品位磷矿, 在初始 pH 为 1.8、加入表面活性剂 10 d 时完成浸出, 最终浸出率为 48%; 袁向利^[20]在试验过程中控制菌种接种量 15%、矿浆浓度为 15 g/L, 在 20 d 时完成浸出, 最终浸出率 58.89%; 李凌凌等^[21]研究以黄铁矿为能源物质浸出中低品位磷矿, 在矿石粒度小于 74 μm 浸出 22 d 浸出率 70.15%。上述试验研究虽已达到浸出磷矿的目的, 但均存在着浸出率低、浸出周期长、矿浆浓度低等问题, 这极大地限制了中温菌浸矿工业化的发展。

本文通过采用氧化亚铁硫杆菌浸出低品位磷矿, 研究浸矿细菌的最佳生长条件, 通过转移培养方式驯化氧化亚铁硫杆菌增强浸矿菌的耐受度, 从而提高最佳矿浆浓度, 探究驯化细菌的浸出效果和不同营养物下的菌群活性和浸出率, 从而达到缩短浸出时间、提高浸出率的目的。

1 试验材料与方法

1.1 试验菌种与样品

试验所用氧化亚铁硫杆菌取自贵州大学某实验

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 贵州省科技计划项目([2017]1050)

作者简介: 王大鹏(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物选矿, E-mail: 1733250618@qq.com。

渠光华(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微生物选矿, E-mail: 452226344@qq.com。

室, 细菌培养采用改良 9K 培养基^[21]。矿样取自贵州某磷矿, 经自然风干、粉碎、磨矿并筛分至 0.125 mm, 再采用 1 mol/L 硫酸进行酸预浸, 中和碱性物质, 过滤、烘干备用。矿样化学元素分析矿样组成结果如表 1。可以看出, 该矿样 P₂O₅ 的含量为 13.17%, 属于低品位磷矿。

表 1 矿样主要成分
Table 1 Main components of ore sample /%

成分	SiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
含量	29.33	24.00	13.17	13.51	9.79	3.14	2.87	1.64
成分	F	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	SrO	Cl	V ₂ O ₅	As ₂ O ₃
含量	0.841	0.425	0.150	0.141	0.052 8	0.012 8	0.008 6	0.008 5

1.2 试验方法

1.2.1 氧化亚铁硫杆菌 pH 值和温度的优化

氧化亚铁硫杆菌接种量 5%, 设置温度 30 °C, 转速 140 r/min 恒温摇床, pH 值依次设为 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.6、2.8、3.0, 将黄铁矿通过陶瓷研钵手工研磨至 0.075 mm 以下高温灭菌, 用灭菌的药匙量取 1 g 黄铁矿加入 100 mL 锥形瓶中, 作为氧化亚铁硫杆菌生长的营养物。定时取样测定细菌浓度; 确定最佳 pH 值后, 温度依次设为 24、27、30、33、36、39、42 °C, 定时取样测定细菌浓度。

1.2.2 氧化亚铁硫杆菌的驯化

将培养至对数期的氧化亚铁硫杆菌分别加入 20、40、60、80 g/L 磷矿进行四代转移培养驯化, 在最佳生长条件下进行驯化生长, 定期测定 pH 值变化。在第 4 次驯化结束后, 进行固液分离, 取上清液进行富集得到大量的驯化菌群。在最佳生长条件下, 每隔 12 h 取 1 mL 的菌种溶液逐级稀释 10⁷ 倍, 测定氧化亚铁硫杆菌浓度。

1.2.3 氧化亚铁硫杆菌浸出试验

取经 80 g/L 磷矿驯化的氧化亚铁硫杆菌 5 mL 接种到 9K 培养基, 在最适生长条件下富集培养至对数生长期, 设置矿浆质量浓度梯度 1%、3%、5%、7%、9% 分别加入到菌种富集液中, 通过定期检测浸矿体系 pH 值和氧化还原电位(ORP)的变化确定最佳矿浆浓度; 重复上述富集过程, 设置对照组试验, 探究经驯化与未经驯化菌群的浸矿效果差异以及在黄铁矿和硫磺为营养物下的菌群活性以及浸出效果。

1.3 测试方法

pH 采用雷磁(E-210F)型 pH 计测定; 氧化还原电位采用笔式 ORP 电位仪(CT-8022 型)测定; Fe²⁺和 Fe³⁺用国标 1, 10-菲罗啉分光光度法测定; 浸出液中磷含量用钼酸铵分光光度法测定; 细菌浓度通过血球计数板在光学显微镜测定。

2 结果与讨论

2.1 氧化亚铁硫杆菌最佳 pH 值和温度的优化

由图 1(a)可知, 氧化亚铁硫杆菌浓度随 pH 升高呈先升高后下降的趋势。细菌浓度与 pH 呈现出类似于正态分布, 当 pH 为 1.6 时, 氧化亚铁硫杆菌活性较好, 细菌浓度最高为 1.42×10⁸ mL⁻¹; 且当 pH 升高到 3.0 时, 细菌生长受到明显影响, 细菌浓度低于 1×10⁷ mL⁻¹。当 pH 低于 1 时, 细菌的生长也受到很大的抑制, 因此菌群的较适生长 pH 为 1.6。李翰林等^[23]研究了氧化亚铁硫杆菌的生长特性, 他们得出在初始 pH 为 1.7 时, 浸矿体系中细菌的活性最好, 细菌浓度最高。

由图 1(b)可知, 氧化亚铁硫杆菌浓度随温度升高也呈先升高后下降的趋势。在最佳初始 pH 条件下当温度为 33 °C 时, 细菌浓度最高为 1.63×10⁸ mL⁻¹; 而当温度高于 39 °C 或低于 27 °C 时, 微生物的生长受到明显抑制, 细菌最高浓度仅为最适温度时的一半, 因此氧化亚铁硫杆菌的较适生长温度为 33 °C。王超远^[24]

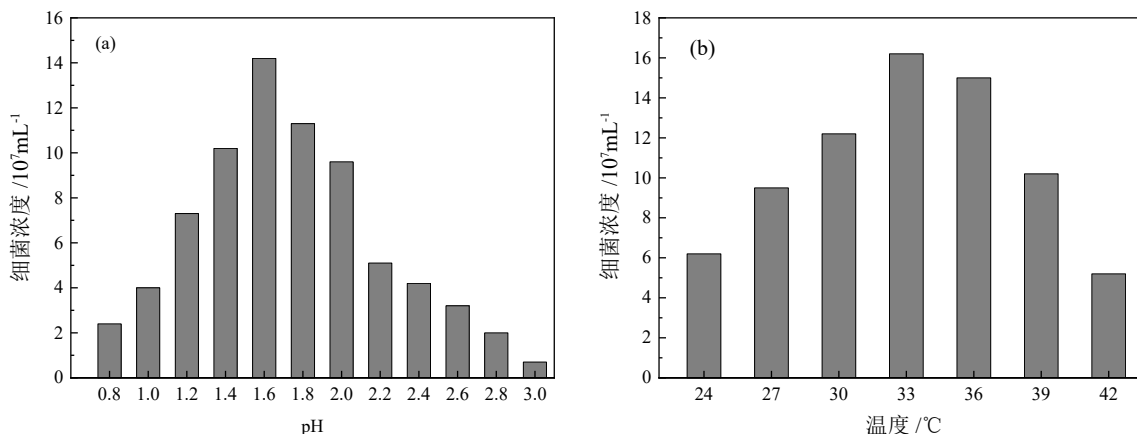


图 1 不同 pH(a)、温度(b)下氧化亚铁硫杆菌的细菌浓度

Fig. 1 Bacterial concentration of thiobacillus ferrooxidans at different pH (a) and temperature (b)

做过类似研究证明, 氧化亚铁硫杆菌在温度为 31℃ 氧化能力强, 浸出效率更高。

2.2 氧化亚铁硫杆菌的驯化

由图 2 可知, 在驯化过程中, 溶液的 pH 呈现出先升高后下降再升高的趋势。前期体系 pH 升高主要由于矿石中含有少量的碱性物质发生中和反应, 经 20 g/L 磷矿驯化的系统的 pH 在 48 h 升到最高为 2.21, 升高幅度较大, 随着驯化浓度的增加, 体系 pH 的变化幅度减小。随着驯化的时间延长溶液的 pH 呈现下降状态; 经 20 g/L、40 g/L 磷矿驯化系统在 120 h 时 pH 最低分别下降到 1.46 和 1.42, 而 60 g/L、80 g/L 驯化 108 h 溶液 pH 降到最低分别为 1.37 和 1.30, 说明此时氧化亚铁硫杆菌活性强并且产生了大量酸。而随着驯化时间的延长, 体系 pH 升高, 且磷矿浓度越高增长越快。由整个驯化过程可以看出氧化亚铁硫杆菌产酸能力增强, 通过逐级驯化提高了菌群的环境适应能力, 提高了氧化亚铁硫杆菌对磷矿浓度的耐受力。后续浸出试验采用 80 g/L 驯化的菌种。

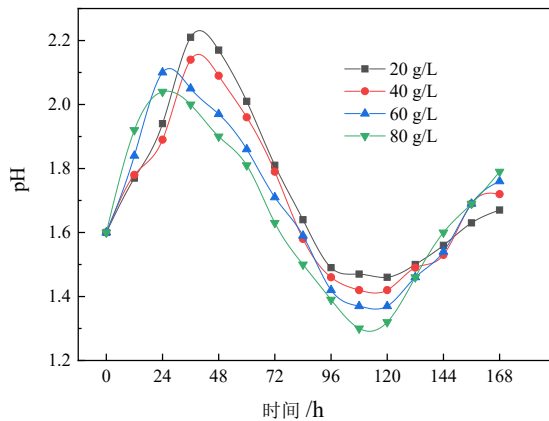


图 2 不同驯化浓度下浸矿系统的 pH
Fig. 2 pH of the system at different acclimation concentrations

2.2.1 驯化后氧化亚铁硫杆菌的生长曲线

由图 3 可知, 细菌生长分为缓慢增长期、对数增

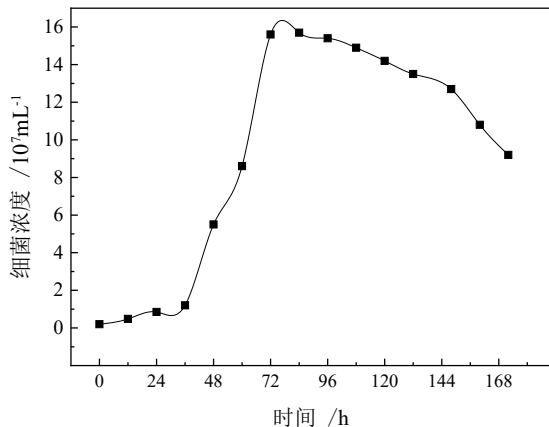


图 3 氧化亚铁硫杆菌的生长曲线
Fig. 3 Growth curve of thiobacillus ferrooxidans

长期、稳定生长期、衰亡期。溶液的 ORP 表现为先持续上升然后趋于稳定。在 0~36 h 氧化亚铁硫杆菌处于缓慢增长期, 此时会消耗掉溶液中的酸用于自身新陈代谢, 溶液的颜色由初始的浅绿色变为浅红色; 细菌浓度低, 硫化矿物的氧化分解与细菌的生长繁殖缓慢, 溶液中主要为 Fe^{2+} , 氧化还原电位呈现出缓慢升高状态。在 36~72 h 细菌处于对数增长期, 溶液颜色逐渐由浅红色变为棕红色, 此时微生物最活跃, 新陈代谢最旺盛, 产酸能力最强, 此阶段微生物浸矿能力也最强; 在此阶段的 ORP 呈现出持续增长的趋势, 且增长速率较快, 主要是硫化矿氧化速率增加, 体系中的大量 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} , 在此期间, 逐渐产生淡黄色沉淀物如图 4(a) 所示, 经 XRD 分析(b) 该沉淀为黄钾铁矾 $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$, 沉淀产生的原因是细菌氧化 Fe^{2+} 为 Fe^{3+} , Fe^{3+} 在酸性条件下水解生成微量 $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$; 在 72~108 h 微生物进入稳定期阶段, 此时期微生物繁殖和死亡处于相对平衡状态, 微生物数量达到顶峰, 并且溶液中的 $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ 逐渐增多, 达到一定数量会发生絮凝而变为沉淀。在 108 h 以后培养基中的营养物质被逐渐消耗完, 且有害物质不断积累, 氧化亚铁硫杆菌进入衰亡阶段, 微生物数量不断减少; 此时 Fe^{2+} 浓度低氧化速率降低但 Fe^{3+} 水解不断产生

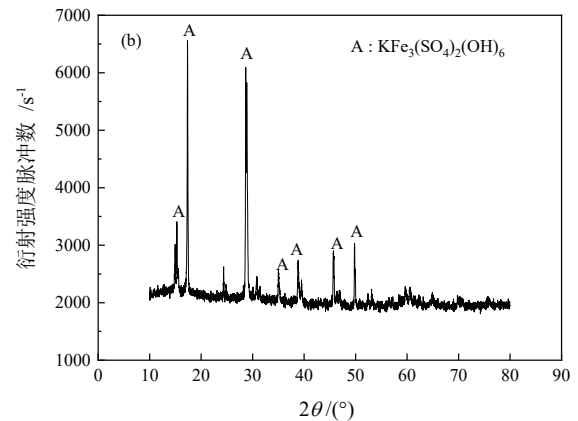


图 4 黄钾铁矾实物图(a)和 XRD 分析(b)
Fig. 4 Picture of jarosite (a) and XRD analysis (b)

$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ 沉淀, 导致浸矿体系中的 Fe^{3+} 含量逐渐下降, 体系的 ORP 处于平稳状态或缓慢下降趋势。ORP 值直接影响着生物浸出动力学^[25]。根据能斯特方程, 浸出溶液 ORP 值主要取决于其中 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 浓度比^[26], 而 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 浓度比却与浸出过程中细菌的生长及硫化物的氧化速率息息相关。试验中 ORP 超过 700 mV 时 Fe^{2+} 浓度过低, 细菌营养物质减少, 无法满足高浓度菌群生长需求, 细菌会大量死亡; 当 ORP 低于 300 mV 时溶液的酸性强也会抑制细菌生长, 本试验过程中 ORP 值最高为 650 mV(图 5)。通过综合氧化亚铁硫杆菌生长曲线和浸矿体系的 ORP 值变化, 浸出用的是对数期接近稳定期的细菌。

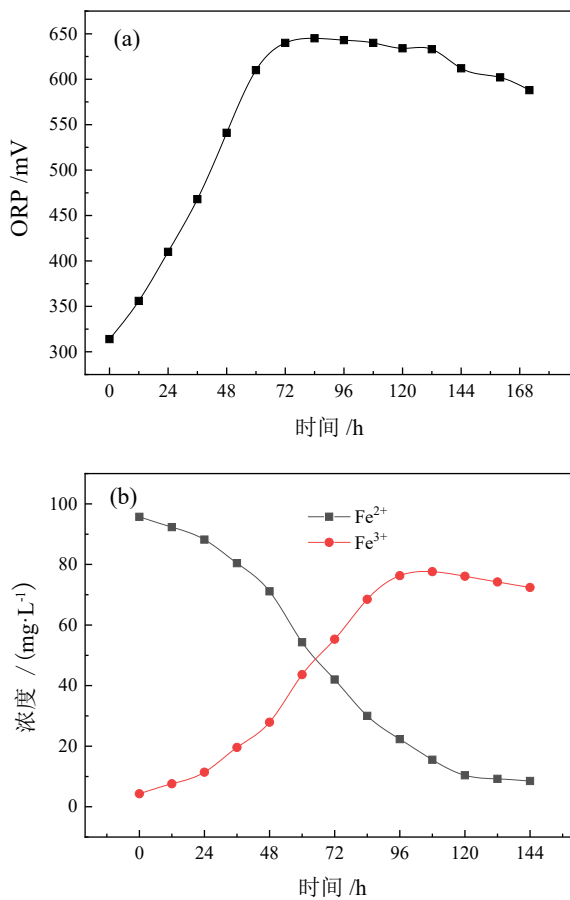


图 5 氧化亚铁硫杆菌生长过程中 ORP(a)和 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 含量(b)变化曲线
 Fig. 5 ORP (a) and Fe^{3+} 、 Fe^{2+} content (b) change curve during the growth of thiobacillus ferrooxidans

2.3 驯化后氧化亚铁硫杆菌的浸磷效果

2.3.1 驯化前后磷矿浸出率

由图 6 可知, 驯化后的氧化亚铁硫杆菌的磷矿浸出率要明显高于未经驯化的细菌。经过驯化的氧化亚铁硫杆菌在第 4~10 d 时浸出速率最快, 此阶段的 Fe^{3+} 浓度升高较快, 说明此时的磷矿浸出速率在加快, 在第 15 d 时浸出趋于稳定达到最高浸出率为 76.6%;

未经驯化的氧化亚铁硫杆菌 6~9 d 时浸出速率最快, 在第 13 d 时浸出率达到最高, 浸出率为 60.3%, Fe^{3+} 生成的速率慢, 且浸出效率缓慢。这主要是由于经过驯化的菌群活性强, 产酸效果更好, 而未经驯化的浸矿菌生长受到抑制, 无法承受相对较高的矿浆浓度。驯化过的菌群 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 的速率明显高于未驯化的。对照组的浸出主要是由于培养基呈酸性状态, 属于单纯的化学浸出。

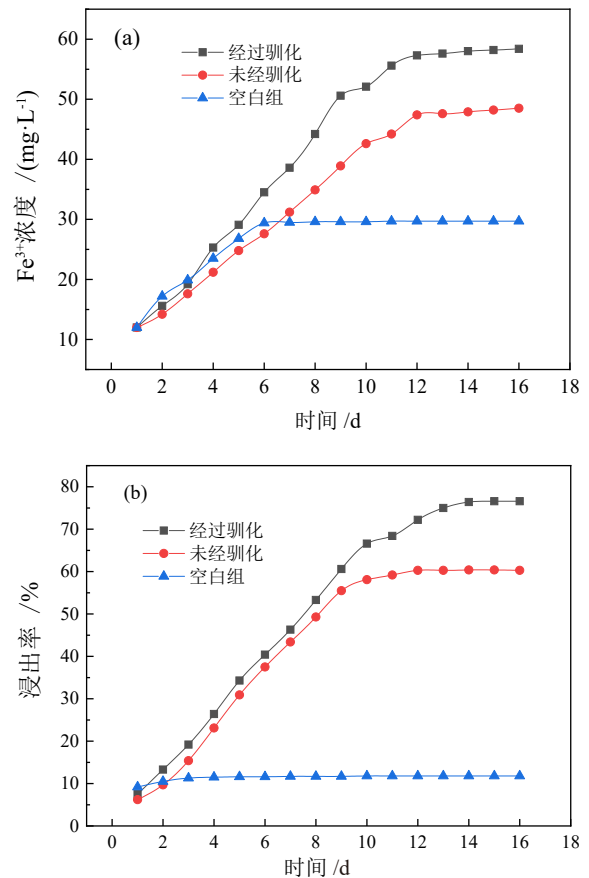


图 6 浸出过程中 Fe^{3+} 浓度(a)和浸出率(b)变化曲线
 Fig. 6 Variation curve of Fe^{3+} concentration (a) and leaching rate (b) during leaching

2.3.2 矿浆质量浓度对磷矿浸出率的影响

由图 7 可知, 随矿浆质量浓度逐渐提高浸矿体系达到的最高 pH 值降低且时间缩短。当矿浆质量浓度为 1% 时, 浸矿体系的 pH 略有升高, 后呈现不断下降趋势, 说明矿浆质量浓度过低, 细菌产生了过量酸, 体系的 ORP 值上升较快, 体系中的 Fe^{2+} 全部被氧化, 而随着矿浆质量浓度的逐渐升高浸矿体系 pH 上升的幅度增大, pH 下降速率缓慢, 细菌的活性受到抑制, 产酸能力减弱, 体系的 ORP 增长缓慢, Fe^{2+} 氧化速率减弱, 说明体系中的一部分酸被微生物消耗。当矿浆质量浓度为 9% 时体系的 pH 值升高到 2.25, 最低为 1.87, ORP 增长极为缓慢, 说明很大一部分微生物无法承受高浓度的重金属离子而失去活性。

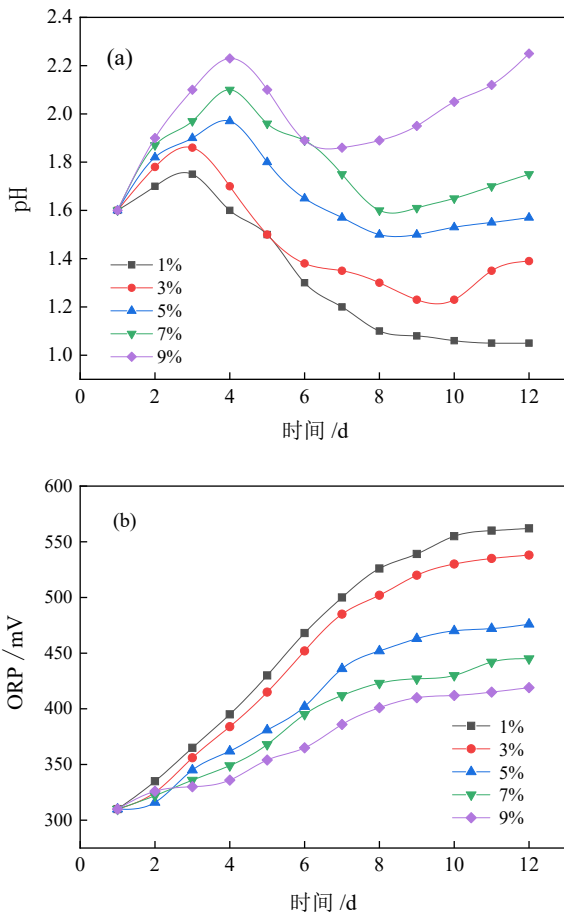


图 7 浸矿体系 pH(a)和 ORP(b)变化曲线
Fig. 7 pH (a) and ORP (b) change curve of ore leaching system

由图 8 可知, 矿浆质量浓度为 5% 时 12 d 磷矿浸出率达到平稳为 75.2%, 当矿浆质量浓度升高或者降低时浸出率均会下降。当矿浆质量浓度为 1% 时磷矿浸出速度最快, 在浸出第 7 d 时达到最高但浸出率只有 64%, 原因是产生过量的有机酸在氧化 Fe^{2+} 过程中在矿物表面形成大量元素硫、硫化产物和 $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, 从而导致矿物表面钝化, 阻碍了进一步浸出; 当矿浆质量浓度为 9% 时浸出率最低仅为 48.3%, 且

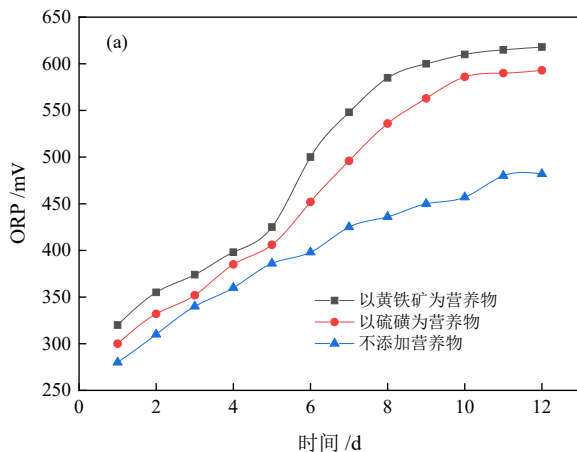


图 9 浸出过程中 ORP(a)变化和 Fe^{2+} 氧化率(b)曲线
Fig. 9 ORP (a) change and Fe^{2+} oxidation rate (b) curve during leaching

浸出效率缓慢。综合不同矿浆质量浓度浸矿体系的 pH 值、ORP 和浸出率得出氧化亚铁硫杆菌浸出磷矿的最佳矿浆质量浓度为 5%。

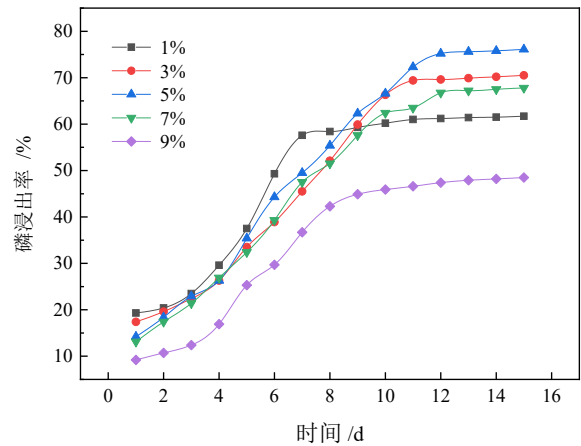


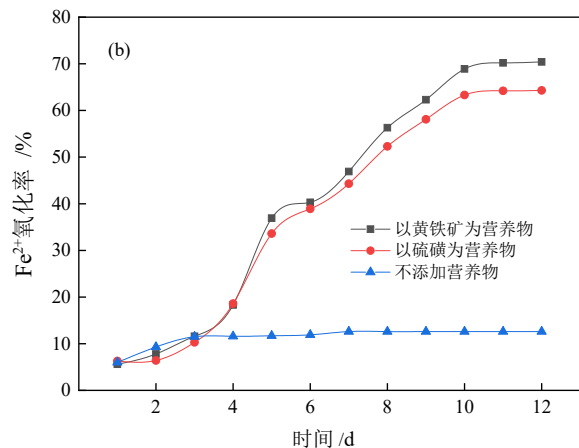
图 8 不同矿浆质量浓度下的磷矿浸出率
Fig. 8 Leaching rate of phosphate rock under different pulp concentration

2.3.3 不同营养物对磷矿浸出率的影响

由图 9 可知, 随浸出时间的延长, 磷矿浸出体系的 ORP 和 Fe^{2+} 氧化速率曲线呈缓慢上升趋势, 且以黄铁矿为营养物质的 ORP 和 Fe^{2+} 氧化速率明显高于以硫磺为营养物质, 表明以黄铁矿为营养物质菌群代谢旺盛, Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 的速率较高。由图 10 可知, 以硫磺为营养物、在 12 d 时磷浸出率为 60.5%, 且随着时间延长磷浸出率提高不大; 而以黄铁矿为营养物、在 12 d 时磷浸出率为 68.2%, 在 14 d 时磷浸出率提高至 78.6%。因此, 以黄铁矿为营养物质时浸出效果更好, 且黄铁矿来源丰富, 价格低廉, 可以有效降低浸出成本, 在操作时黄铁矿安全, 对人体危害小。

3 结论

(1) 通过对氧化亚铁硫杆菌的最适生长条件(初



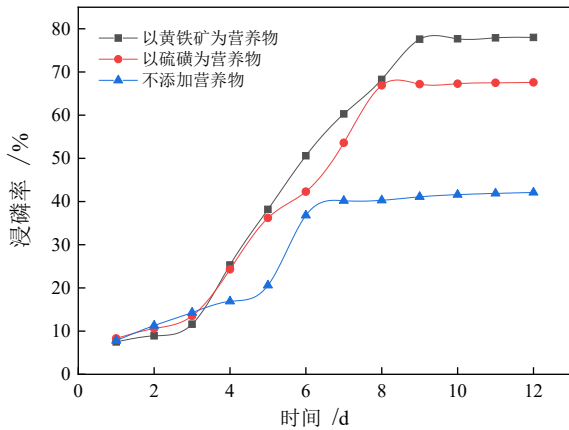


图 10 不同营养物下的磷矿浸出率

Fig. 10 Leaching rate of phosphate rock under different nutrients

始 pH、温度)进行优化,得出最佳培养条件为生长温度为 33 ℃、初始 pH 为 1.6,在最佳条件下 72 h 左右菌群的最高浓度为 $1.56 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$ 。

(2)经过逐级转移驯化,提高了氧化亚铁硫杆菌对高浓度矿浆的耐受度,经 80 g/L 驯化后磷矿浸出率为 76.6%,未经驯化的最终浸出率为 60.3%。在最佳矿浆质量浓度 5% 下的磷矿浸出率为 75.2%,当矿浆质量浓度升高或者降低时,浸出率均会受到明显影响。

(3)以黄铁矿为营养物时的磷浸出率为 78.6%,而以硫磺为营养物的磷浸出率为 61.5%,且以黄铁矿为营养物时的氧化亚铁硫杆菌的活性明显高于以硫磺为营养物时的活性。

参考文献:

- [1] 孔汇贤. 磷矿选矿进展及存在的问题[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(10): 144-146.
KONG H X. Progress and problems of phosphate ore dressing[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(10): 144-146.
- [2] 陈宇. 磷矿选矿工艺研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
CHUN Y. Study on beneficiation process of phosphate rock[D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2017.
- [3] 闫雅雯, 国亚非, 赵泽阳, 等. 2020年中国磷矿选矿年评[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(9): 54-59.
YAN Y W, GUO Y F, ZHAO Z Y, et al. China's phosphate ore dressing year in 2020[J]. Industrial Minerals and Processing, 2021, 50(9): 54-59.
- [4] 冯安生, 曹飞, 吕振福. 我国磷矿资源综合利用水平调查与评价[J]. 矿产保护与利用, 2017(2): 13-17.
FENG A S, CAO F, LV Z F. Investigation and evaluation of comprehensive utilization level of phosphate rock resources in china[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 13-17.
- [5] 刘文彪, 黄文莹, 马航, 等. 我国磷矿资源分布及其选矿技术进展[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(12): 19-25.
LIU W B, HUANG W X, MA H, et al. Distribution of phosphate ore resources in China and its mineral processing technology progress[J]. Industrial Minerals and Processing, 2020, 49(12): 19-25.
- [6] VAN, JONG-UN. Comparison of microbial leaching of arsenic and heavy metals from mine tailings[J]. Biotechnology And Bioprocess Engineering, 2015, 20(1): 91-99.
- [7] 池汝安, 肖春桥, 高洪, 等. 几种微生物溶解磷矿粉的动态研究[J].

化工矿物与加工, 2005(7): 2.

- CHI R A, XIAO C Q, GAO H, et al. Study on the dissolution of phosphate rock powder by several microorganisms[J]. Industrial Minerals and Processing, 2005(7): 2.
- [8] 孙伟, 渠光华, 王大鹏. 磷矿的微生物浸出研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 50-58.
SUN W, QU G H, WANG D P. Research progress in microbial leaching of phosphate rock[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(4): 50-58.
- [9] QURESHI, SHABNAM, RICHARDS. Microbial acidification and pH effects on trace element release from sewage sludge[J]. Environmental Pollution, 2018, 132(1): 61-71.
- [10] 刘俊. 低品位磷矿的微生物浸出研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
LIU J. Study on bioleaching of low-grade phosphate rock[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [11] 曹猛. 硫化矿微生物浸矿机理及动力学模型研究进展[J]. 广州化工, 2020, 48(22): 13-16.
CAO M. Research progress on mechanism and kinetic model of sulfide ore bioleaching[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(22): 13-16.
- [12] 关海燕. 嗜酸氧化硫硫杆菌浸出低品位磷矿及其机理[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
GUAN H Y. Leaching of low-grade phosphate rock by acidophilic thiobacillus thiooxidans and its mechanism[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- [13] 郑红艾. 硫化矿生物浸出过程的氧化机理及生物多样性研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
ZHENG H A. Study on Oxidation Mechanism and biodiversity of sulfide ore bioleaching process[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [14] 王明伟, 梁嘉琦, 曾伟民, 等. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌和嗜酸氧化硫硫杆菌联合浸出高锡多金属硫化矿[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(3): 76.
WANG M W, LIANG J Q, ZENG W M, et al. Joint leaching of high tin polymetallic sulfide ores by acidophilic thiobacillus ferrooxidans and acidophilic thiobacillus thiooxidans[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(3): 76.
- [15] 张宪. 嗜酸氧化硫硫杆菌的全基因组测序及硫氧化途径研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHANG X. Genome sequencing of thiobacillus thiooxidans acidophilus and its sulfur oxidation pathway[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [16] CHI R A, HUANGX H, XIAO C Q. Bioleaching of soluble phosphorous from rock phosphate containing pyrite with DES-induced Acidithiobacillus ferrooxidans[J]. Journal of central south university technology, 2009, 16(5): 758-762.
- [17] 吴晓燕. 多菌种协同分解中低品位磷矿的作用机理研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015.
WU X Y. Study on the mechanism of multi strain synergistic decomposition of medium and low grade phosphate ore[D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2015.
- [18] 宋健. 金属硫化矿微生物浸出及浸出机理数学模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
SONG J. Study on microbial leaching of metal sulfide ore and mathematical model of leaching mechanism[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.
- [19] 龚文琪, 陈伟, 张晓峰, 等. 氧化亚铁硫杆菌的分离培养及其浸磷效果[J]. 过程工程学报, 2007(3): 584-588.
GONG W Q, CHEN W, ZHANG X Z, et al. Isolation and cultivation of

- thiobacillus ferrooxidans and its phosphorus leaching effect[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007(3): 584-588.
- [20] 陈伟. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌的培养特性和浸磷效果[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- CHEN W. Culture characteristics and phosphorus leaching effect of acidophilic thiobacillus ferrooxidans[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [21] 李凌凌. 嗜酸硫杆菌浸出中低品位磷矿及其浸矿机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- LI L L. Study on the leaching mechanism of low-grade phosphate rock by thiobacillus acidophilus[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [22] 申秋实. 嗜酸氧化硫杆菌产酸活性与低品位磷矿细菌浸出[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- SHEN Q S. Acidogenic activity of thiobacillus thiooxidans acidophilus and bioleaching of low-grade phosphate rock[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [23] 李翰林, 李茹. 氧化亚铁硫杆菌的生长特性及驯化[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(1): 41-45.
- LI H L, LI R. Growth characteristics and domestication of thiobacillus ferrooxidans[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(1): 41-45.
- [24] 王超远. 氧化亚铁硫杆菌浸出硫化铜矿试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- WANG C Y. Experimental study on leaching of copper sulfide ores by thiobacillus ferrooxidans[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.
- [25] 唐敏, 田野, 刘毅, 等. Fe^{2+} 对微生物浸出赞比亚酸浸渣的影响[J]. 当代化工, 2013, 42(6): 739-742.
- [26] TANG M, TIAN Y, LIU Y, et al. Effect of Fe^{2+} on microbial leaching of Zambian acid leaching residue[J]. Moder Chemical Research, 2013, 42(6): 739-742.

Experimental Study on Leaching of a Low-grade Phosphate Ore with Thiobacillus Ferrooxidans

WANG Dapeng^{1,2,3}, QU Guanghua^{1,2,3}, SUN wei^{1,2,3}

1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

2. State and Local Joint Key Laboratory of Efficient Utilization of Superior Mineral Resources in Karst Areas, Guiyang 550025, Guizhou, China;

3. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, Guizhou, China

Abstract: Thiobacillus ferrooxidans was used to leach a low-grade phosphate ore. The optimal growth conditions of Thiobacillus ferrooxidans was investigated, and the bacteria that could resistant to high slurry concentrations was obtained by step-by-step transfer of domestication. Domesticated bacteria was used to leach phosphate ore to achieve the purpose of improving the leaching rate. A phosphate mine in Guizhou with a grade of 13.17% P_2O_5 was used as the research object. The results showed that the activity of Thiobacillus ferrooxidans oxide was strong under the conditions of temperature of 33 °C and initial pH of 1.6, and the higher concentration was $1.63 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$. The P_2O_5 leaching rate of thiobacillus ferrooxidans after domestication was 76.6%, and the corresponding thiobacillus ferrooxidans without domestication was only 60.3%. When the mass concentration of slurry was 1%, 3%, 5%, 7% and 9%, the leaching rates of phosphate ore were 56.4%, 70.4%, 75.2%, 64% and 44.7%, respectively. The leaching rate of phosphate ore with pyrite as nutrient was 78.6%, which was 17.1 percentage points higher than the leaching rate with sulfur as a nutrient. The study improves the leaching rate of low-grade phosphate ore, and it shortens the phosphate leaching time.

Keywords: low grade phosphate rock; thiobacillus ferrooxidans; microbiological leaching; leaching rate

引用格式: 王大鹏, 渠光华, 孙伟. 氧化亚铁硫杆菌浸出某低品位磷矿的试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 131-137.

WANG Dapeng, QU Guanghua, SUN wei. Experimental study on leaching of a low-grade phosphate ore with thiobacillus ferrooxidans[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 131-137.