



金矿生物预氧化中溶解氧浓度的变化及其影响

沈蔡龙^{1,2}, 岳馥莲^{1,2}, 张广积^{1,2}, 王 敏³, 杨 超^{1,2}

- (1. 中国科学院过程工程研究所 绿色过程与工程重点实验室, 生化工程国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学 化学工程学院, 北京 100049;
3. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010)

摘 要: 通气动力成本过高是含砷难处理金矿的生物氧化预处理法中存在的主要问题, 在不同矿浆浓度、不同反应器条件下开展含砷难处理金矿生物氧化实验, 重点监测反应体系中溶解氧浓度、氧化还原电位 φ 、pH 和砷浓度的变化; 采用 5 L 反应器开展不同矿浆浓度实验。结果发现: 25%矿浆浓度实验中溶解氧浓度低至 225 $\mu\text{g/L}$, 但其生物氧化过程仍可正常进行, 表现为 φ 持续上升和 pH 持续下降, 由此推测在生物氧化工业生产中无需维持过高的通气强度。采用 80 L 反应器开展 25%矿浆浓度实验, 结果发现, 与 5 L 反应器实验相比, 虽然其通气比更低, 但得益于其导流筒带来的矿浆悬浮作用及较大的高径比, 溶解氧浓度明显提高。由此推测, 在生物氧化工业生产中可以采用优化反应器设计的方式, 在不增加通气成本的前提下, 提高矿浆中的溶解氧浓度。

关键词: 溶解氧; 生物氧化; 砷浓度; 氧化还原电位; 导流筒

文章编号: 1004-0609(2021)-01-0106-08

中图分类号: TF18

文献标志码: A

引文格式: 沈蔡龙, 岳馥莲, 张广积, 等. 金矿生物预氧化中溶解氧浓度的变化及其影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 106–113. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39649

SHEN Cai-long, YUE Fu-lian, ZHANG Guang-ji, et al. Variation of DO concentration in biological pretreatment of gold ore and its effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 106–113. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39649

世界金矿资源的三分之二为难处理金矿, 这些难处理金矿大多为包裹型的含砷难处理金矿^[1-2], 此类矿物需要进行预氧化处理以除掉包裹在黄金微粒表面的含砷硫化物后才能进行黄金的氰化提取^[3]。焙烧法、加压氧化法和生物氧化法是目前最常用的含砷难处理金矿预氧化方法, 其中生物氧化法具有操作简单、设备投资较低、绿色环保等明显优势, 但此法反应速度较慢、矿浆停留时间长, 造成通气时间长、通气动力成本过高^[4-7]。将气态氧以经济的方法最大限度地溶入矿浆是提高氧化槽

效率的重要手段, 谢纪元等^[8]在烟台黄金冶炼厂的生物预氧化车间采用空气分散器的方法弥散空气, 显著提高了经济效益。

因为溶解氧是含砷难处理金矿被生物氧化过程中的最终电子受体, 所以溶解氧浓度是生物氧化反应器运行的重要指标^[9-10]。SUN 等^[11]在不同溶解氧浓度下于 1.5 L 搅拌槽反应器中采用氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*), 在 41 °C 开展了 10%矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿实验研究, 结果表明较高的溶解氧浓度可以带来更快的生

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1904204); 中国科学院洁净能源创新院合作基金(DNL201902); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC030); NSFC-EU 项目(中欧)(31961133018)

收稿日期: 2020-01-15; **修订日期:** 2020-09-12

通信作者: 张广积, 研究员, 博士; 电话: 010-82544929; E-mail: gjzhang@ipe.ac.cn

物氧化速度及细菌生长速度, 维持正常生物氧化过程的溶解氧浓度不得低于 1.2 mg/L。已有研究^[12-15]也大多认为难处理金矿生物氧化过程能正常进行的溶解氧浓度有一极限值, 约为(1.2~1.5) mg/L。LIU 等^[16]研究发现, 当溶解氧浓度低于 200 $\mu\text{g/L}$ 时, 氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)无法在 9K 培养基中生存。WANG 等^[17]在不同溶解氧浓度下于 1.5 L 搅拌槽反应器中采用类氧化亚铁微螺菌(*Leptospirillum ferriphilum-like bacteria*)和嗜热硫氧化硫化杆菌(*Sulfobacillus thermosulfidooxidans*)混合菌种, 在 41 $^{\circ}\text{C}$ 开展了 10% 矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿实验研究, 结果发现, 当溶解氧浓度不超过 3.75 mg/L 时, 生物氧化速度随溶解氧浓度的升高而增加。吴涛等^[4]先后在 100 L 普通搅拌槽和 100 L 导流式搅拌槽中采用氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*), 于 35 $^{\circ}\text{C}$ 开展了 10% 矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿研究, 发现导流筒起到的导流和加强混合的作用有利于细菌氧化含砷金精矿的反应。然而, 已有研究中的矿浆浓度和温度条件离工厂生产实际尚有一定距离, 也很少有研究涉及生物氧化不同阶段中溶解氧浓度的变化及其对生物氧化过程的影响以及反应器结构对溶解氧浓度的影响。

为此, 本研究中采用氧化亚铁钩端螺旋菌(*Leptospirillum ferrooxidans*)与喜温硫杆菌(*Acidithiobacillus caldus*)混合菌种于 45 $^{\circ}\text{C}$ 下开展不同矿浆浓度、不同反应器实验, 通过分析不同反应条件下溶解氧浓度的变化及其对反应过程的影响, 以期实现反应过程的优化和通气动力成本的降低。

1 实验

1.1 材料和试剂

实验所用矿物为来自湖南省的含砷难处理金矿, 经破碎、磨矿后备用, 经激光粒度仪测量可知 90% 以上颗粒 $< 100 \mu\text{m}$ 。矿样 XRD 分析表明其主要成分为黄铁矿, 其次为砷黄铁矿和石英, 其化学成分分析结果见表 1(由北京矿冶研究总院分析)。

主要实验试剂如下: 浓硫酸, 相对分子质量 98.078, 分析纯(北京化工厂), 质量分数 95%~98%;

表 1 含砷难处理金矿指定化学成分分析

Table 1 Specific element analysis of arsenic-bearing refractory gold ore (mass fraction, %)

Fe	As	S	SiO ₂	Others
24.31	2.16	18.80	25.50	29.23

磷酸二氢钾, 相对分子质量 174.17, 分析纯(国药化学试剂有限公司); 硫酸铵, 相对分子质量 132.14, 分析纯(国药化学试剂有限公司)。

1.2 菌种

实验所用菌种为氧化亚铁钩端螺旋菌(*Leptospirillum ferrooxidans*)与喜温硫杆菌(*Acidithiobacillus caldus*)混合菌种, 两种细菌都由中国科学院微生物研究所提供并经实验室长期驯化培养。首次混合时先将培养好的 100 mL 氧化亚铁钩端螺旋菌(*Leptospirillum ferrooxidans*)经 0.22 μm 滤膜过滤后, 重新分布于 30 mL Leathen 培养基, 再向其中加入 10 mL 培养好的喜温硫杆菌(*Acidithiobacillus caldus*), 两种细菌在混合前经显微镜计数估算初始比为 10:1。

1.3 实验设备

恒温振荡摇床(太仓市豪诚实验仪器制造有限公司)用于细菌的接种培养。5 L 玻璃搅拌槽反应器成套设备(北京瑞成伟业仪器设备有限公司)用于小试实验研究, 高径比为 1.5, 实验装置如图 1 所示, 包括玻璃搅拌反应器主体, 恒温水浴加热循环机, 静音无油空压机等。研制的 80 L 不锈钢搅拌槽反应器成套设备用于中试实验研究, 高径比为 2, 除加装如图 2 所示导流筒外, 实验装置同图 1。

1.4 分析仪器与方法

用 XSZ-H7 双目生物显微镜(重庆光学仪器有限公司)观察矿浆中细菌的生长情况, 用 FE-20 梅特勒 pH 计(梅特勒-托利多仪器有限公司)测定矿浆的 pH 和 ϕ , 用 ULTIMA-DV5300 电感耦合等离子原子发射光谱仪(法国 JY 公司)进行砷浓度的测定, 用 Dmax-2000 型 X 射线衍射仪(日本理学公司)进行 XRD 分析, 用 InPro6860i 光学溶解氧传感器(梅特勒-托利多仪器有限公司)测定矿浆的溶解氧浓度。

1.5 实验方法

1.5.1 细菌接种培养

细菌接种培养在恒温振荡摇床中进行, 温度为 45 °C, 转速为 100 r/min。先向 250 mL 锥形瓶中加入 80 mL 自来水、20 mL 混合菌液, 再按硫酸铵 3 g/L、磷酸二氢钾 0.5 g/L、含砷金矿 50 g/L 加入营养源, 最后调节 pH 为 2 以下, 培养至 φ 约 500 mV(Ag 标准电极)时取出。

1.5.2 不同矿浆浓度实验

不同矿浆浓度实验(10%、25%)在 5 L 玻璃反应器中进行。10%矿浆浓度实验先按 1.5.1 中所述培养得到 500 mL 混合菌液后与自来水共计 3.5 L 加入玻璃反应器中, 再加入 350 g 含砷金精矿; 25%矿浆浓度实验先按 10%矿浆浓度实验所述培养至 φ 约 500 mV 后, 再加入 525 g 含砷金精矿, 使最终矿浆浓度达到 25%。通气速度为 0.3 m³/h, 其他条件同 1.5.1, 定期取样测试。

1.5.3 不同反应器实验

不同反应器实验(5 L 玻璃反应器、80 L 不锈钢反应器), 基于 25%矿浆浓度开展。前者如 1.5.2 中 25%矿浆浓度实验所述; 后者先按 1.5.2 中 10%矿浆

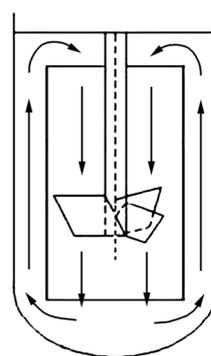


图2 导流筒示意图

Fig. 2 Schematic diagram of draft-tube

浓度实验所述培养得 3.5 L 混合菌液后与自来水共计 50 L 加入 80 L 不锈钢反应器中, 按 10%矿浆浓度接种培养至 φ 约 500 mV 后, 再加入 7.5kg 含砷金精矿, 使最终矿浆浓度达到 25%。通气速度 1.3 m³/h, 其他条件同 1.5.1, 定期取样测试。

2 结果与讨论

2.1 不同矿浆浓度实验情况分析

于 5 L 玻璃反应器中开展不同矿浆浓度实验(10%和 25%), 图 3 所示为不同矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿中溶解氧浓度随时间的变化。由图 3 可知, 不同实验中溶解氧浓度都先降低, 再保持平稳, 最后有所回升, 25%矿浆浓度实验中的溶解氧浓度整体明显低于 10%矿浆浓度实验中的。图 4 所示为不同矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿 φ 变化。从图 4 发现, 25%矿浆浓度实验中 φ 前期上升明显慢于 10%矿浆浓度实验中的。实验结果表明, 25%矿浆浓度实验中矿物溶解及细菌生长耗氧量较大使得溶解氧浓度整体明显更低, 已有研究表明^[12-15], 含砷金矿生物氧化正常进行的溶解氧浓度有一极限值约(1.2~1.5) mg/L, 而本实验中溶解氧浓度曾低至 225 μ g/L, 但其生物氧化仍可正常进行, 表现为 φ 持续上升、pH 持续下降及细菌数量的缓慢增长。

矿浆中 φ 值是由 Fe³⁺和 Fe²⁺的比值决定的, SAND 等^[18]认为黄铁矿的生物氧化过程主要由两个步骤组成, 分别为细菌氧化 Fe²⁺生成 Fe³⁺(见式(1))

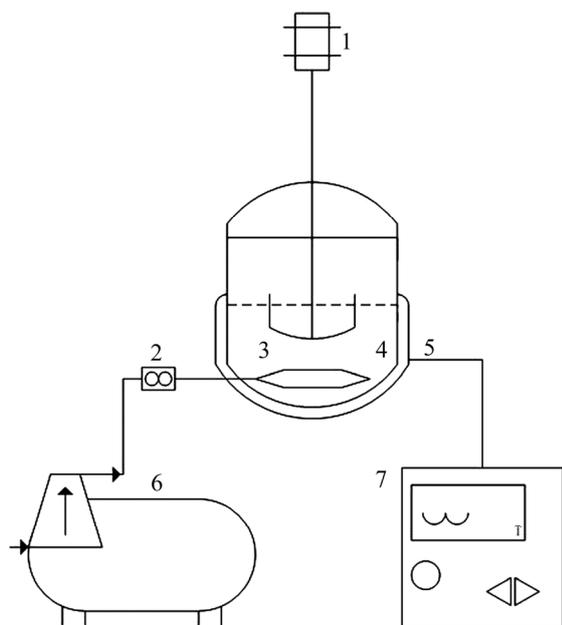


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of test devices: 1—Stirring paddle; 2—Gas meter; 3—Gas distributor; 4—Tank reactor; 5—Heating jacket; 6—Air compressor; 7—Heated water bath

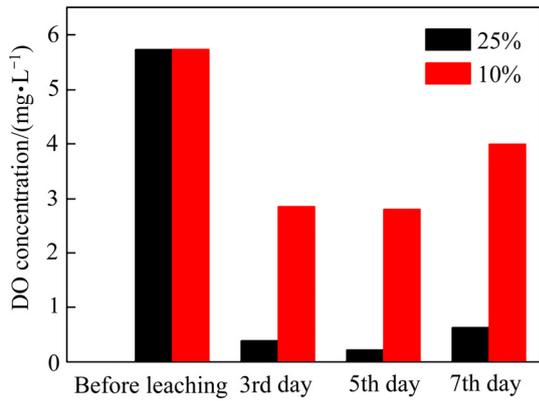
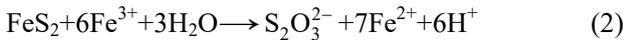
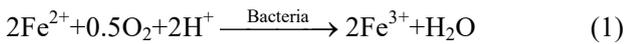


图 3 不同矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿中溶解氧浓度随时间的变化

Fig. 3 Variation of DO concentration with time in arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation at different pulp densities

和 Fe^{3+} 氧化矿石的反应(见式(2)):



结合 XRD 谱推测, 10%矿浆浓度实验中矿物在第 7 d 前已基本耗尽, 式(1)的进行导致 ϕ 在前期快速上升至 700 mV 以上并保持稳定, 这与 SUN 等^[11]、WANG 等^[17]发现在 10%矿浆浓度下, 含砷难处理金矿生物氧化实验中第 8 d 时 Fe^{2+} 浓度接近 0 的现象基本一致。25%矿浆浓度实验中矿物 XRD 谱在第 7 d 仍有黄铁矿的峰, 说明反应前期式(1)中生成 Fe^{3+} 的速度与式(2)中消耗 Fe^{3+} 的速度基本相当, 使得 ϕ 上升缓慢, 直到第 9 d 后, 矿物基本耗尽, 其 ϕ 快速上升。不同矿浆浓度实验中, ϕ 持续上升说明 Fe^{3+} 在反应体系中不断积累, Fe^{3+} 氧化矿石的反应(2)是整个生物氧化过程的控制步骤。即使在溶解氧浓度低至 225 $\mu\text{g/L}$ 的 25%矿浆浓度实验中, ϕ 也持续上升, 这意味着整个生物氧化过程的进行无需维持过高的溶解氧浓度。

不同矿浆浓度实验的 XRD 谱中黄铁矿和砷黄铁矿的峰都逐渐消失, 石英的峰强逐渐变大(见图 5)。25%矿浆浓度实验的 XRD 谱中仅有石英的峰, 而 10%矿浆浓度实验的 XRD 谱中出现黄钾铁矾的峰。从实验结果推测, 不同矿浆浓度实验的生物氧

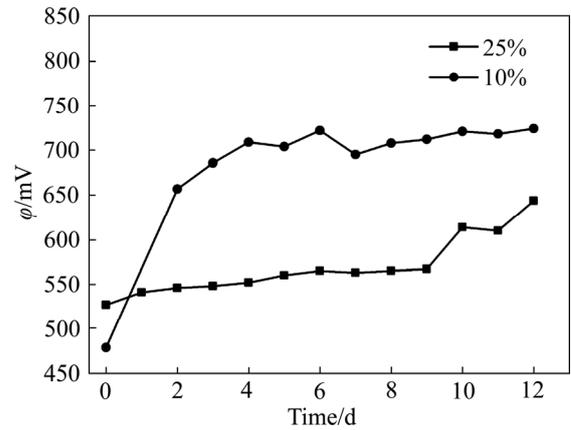


图 4 不同矿浆浓度下生物氧化含砷难处理金矿 ϕ 变化

Fig. 4 Variation of ϕ in arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation at different pulp densities

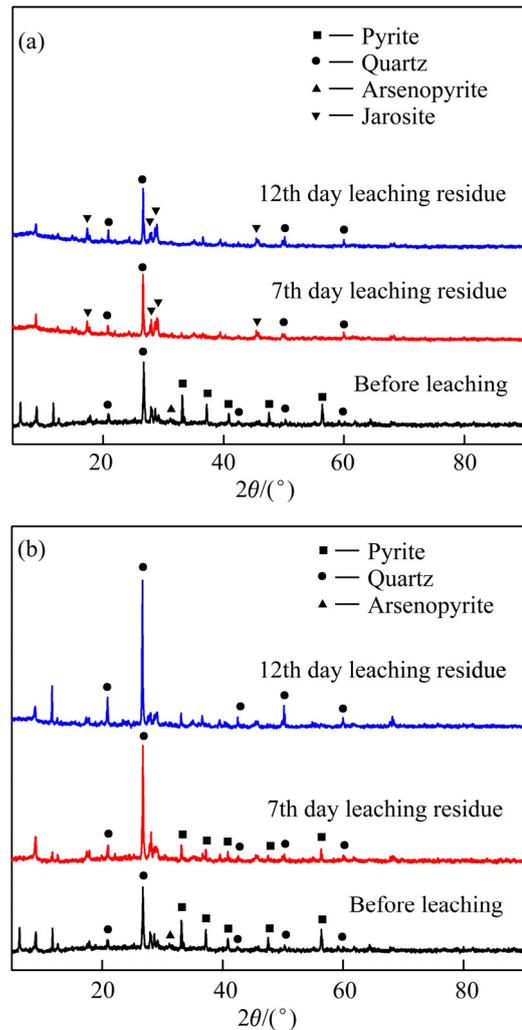


图 5 不同矿浆浓度下含砷难处理金矿生物氧化后的 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation at pulp densities of 10%(a) and 25%(b)

化效果良好, 25%矿浆浓度实验中没有黄钾铁矾生成的原因可能与其 φ 、pH 较低有关^[19]。

2.2 不同反应器实验情况分析

在不同反应器(5 L 玻璃反应器、80 L 不锈钢反应器)中开展 25%矿浆浓度实验(见图 6), 从图 6 中发现, 80 L 不锈钢反应器中的溶解氧浓度整体明显高于 5 L 玻璃反应器中。图 7 和 8 所示为不同反应器中生物氧化含砷难处理金矿 φ 和砷浓度的变化。从图 7、8 中发现, 尽管 80 L 不锈钢反应器中初始 φ 比 5 L 玻璃反应器中低, 但第 8 d 时两者的 φ 已经持平, 且第 4 d 时前者中砷浓度已经是后者的 1.71 倍。显微镜下观察可见 80 L 不锈钢反应器实验中细菌数量前期增长得更快, 如图 5(b)和 9 所示, 不同反应器实验中的 XRD 谱最终都只有石英的峰, 生物氧化效果良好。

从实验结果推测, 虽然 80 L 不锈钢反应器中的通气比(标准状态下每分钟每立方米矿浆中通入的空气量)比 5 L 玻璃反应器中小, 分别为 0.372 和 1.225 min^{-1} , 但是 80 L 不锈钢反应器中导流筒带来的矿浆悬浮作用^[4, 20]及较大的高径比, 有利于矿浆中溶解氧浓度的提高。吴涛等^[4]于 100 L 导流式搅拌槽中开展的含砷难处理金矿生物氧化研究中, 温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 矿浆浓度为 10%, 通气比为 0.1055 min^{-1} , 结果发现 φ 在 15 d 内逐渐升至 497 mV。与吴涛等^[4]的研究相比, 虽然本研究 80 L 反应器中的

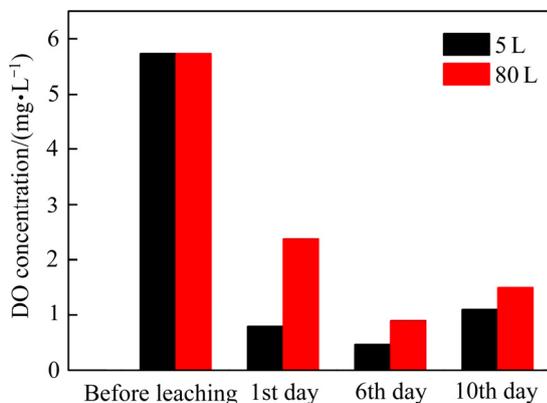


图 6 不同反应器中生物氧化含砷难处理金矿中溶解氧浓度随时间的变化

Fig. 6 Variation of DO concentration with time in arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation in different reactors

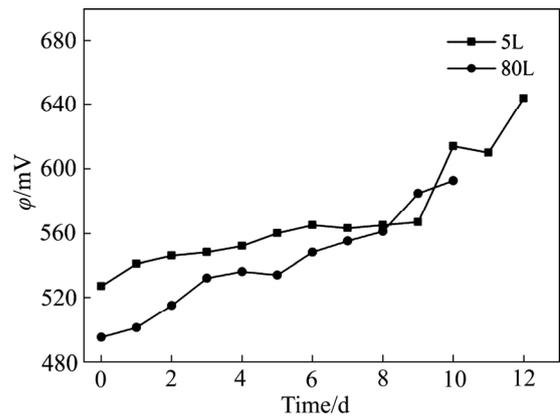


图 7 不同反应器中生物氧化含砷难处理金矿 φ 变化

Fig. 7 Variation of φ in arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation in different reactors

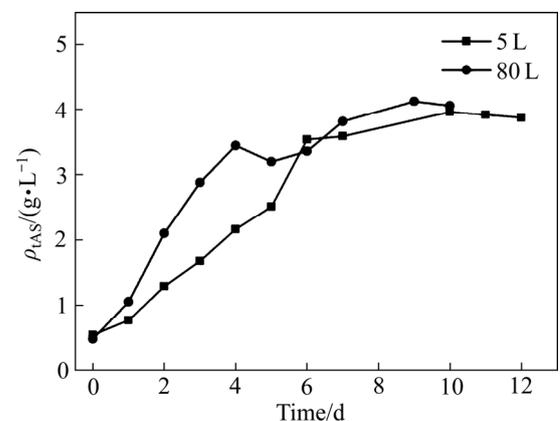


图 8 不同反应器中生物氧化含砷难处理金矿砷浓度变化

Fig. 8 Variation of arsenic concentration in arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation in different reactors

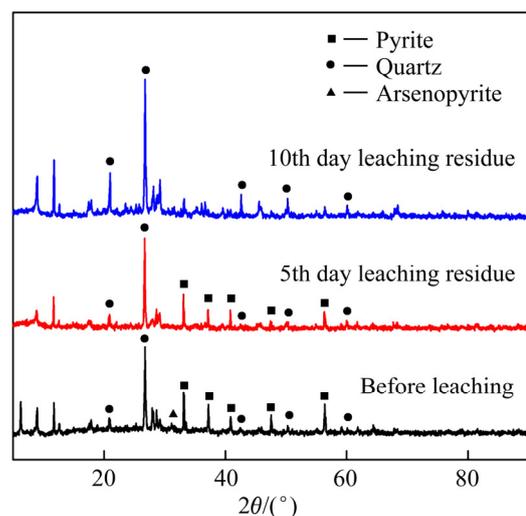


图 9 80 L 不锈钢反应器中含砷难处理金矿生物氧化后的 XRD 谱

Fig. 9 XRD patterns of arsenic-bearing refractory gold ore biooxidation in 80 L stainless steel reactor

通气比 0.372 min^{-1} 略高, 但是矿浆浓度达 25%, 温度提高至 $45 \text{ }^\circ\text{C}$, 且 φ 在 10 d 内升至 593 mV。一方面, 更高的矿浆浓度意味着更大的处理能力, 更高的温度意味着空气在矿浆中的溶解度减小; 另一方面, φ 的快速升高意味着更好的生物氧化效果。

本实验在接近工厂生产实际的反应条件下发现, 在含砷难处理金矿的生物氧化过程中, 可以通过优化反应器设计的方式在不增加通气成本的条件下, 提高矿浆中的溶解氧浓度。较高的溶解氧浓度在生物氧化反应前期可以促进微生物的生长, 反应前期较大的生物量在一定程度上有利于生物氧化过程的加快。

3 结论

1) 在不同矿浆浓度实验中, 溶解氧浓度随矿浆浓度的升高有明显降低, 当矿浆浓度为 25% 时, 溶解氧浓度低至 $225 \mu\text{g/L}$, 但其生物氧化过程仍可正常进行, 表现为 φ 持续上升、pH 持续下降。由此推测, 在金矿生物预氧化工业生产中无需维持过高的溶解氧浓度即可保证反应的正常进行, 可以适当降低通气强度以减少通气动力成本。

2) 在不同反应器实验中, 尽管 80 L 不锈钢反应器中通气比较低, 但由于导流筒带来的矿浆悬浮作用及较大的高径比, 其溶解氧浓度有明显提高, 在反应前期有利于细菌生物量的增长。由此推测在金矿生物预氧化工业生产中可以通过优化反应器设计的方式, 在不增加通气成本的条件下, 提高矿浆中的溶解氧浓度。

3) 在实验中发现矿浆中的溶解氧浓度随着反应的进行都先降低, 再保持平稳, 最后有所回升。由此推测在多个反应器串联连续操作的含砷难处理金矿生物预氧化工业生产中, 可以在后面的反应器中适当降低通气量, 以实现反应过程的优化和通气动力成本的降低。

REFERENCES

[1] 魏春霞. 中国金矿资源的现状及前景分析[J]. 中国金属通报, 2018(1): 19–20.

WEI Chun-xia. The situation and prospects of Chinese gold resources[J]. China Metal Bulletin, 2018(1): 19–20.

[2] 邱冠周, 刘学端. 用生物技术的钥匙开启矿产资源利用的大门[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1848–1858.

QIU Guan-zhou, LIU Xue-duan. Biotech key to unlock mineral resources value[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1848–1858.

[3] FRASER K S, WALTON R H, WELLS J A. Processing of refractory gold ore[J]. Minerals Engineering, 1991, 4(7/11): 1029–1041.

[4] 吴涛, 张广积, 李向阳, 等. 反应器结构对生物氧化含砷难处理金矿效率的影响[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(2): 88–93.

WU Tao, ZHANG Guang-ji, LI Xiang-yang, et al. Effect of reactor structure on the rate of biooxidation of arsenic-bearing refractory gold ore[J]. Gold Science and Technology, 2015, 23(2): 88–93.

[5] 陈聪, 姚香. 难处理金矿石预处理方法简述[J]. 黄金科学技术, 2004, 12(4): 27–30.

CHEN Cong, YAO Xiang. Nutsheu of pretreatment method of refractor gold ores[J]. Gold Science and Technology, 2004, 12(4): 27–30.

[6] 刘新星, 王国华, 谢建平, 等. 难处理含硫金精矿生物预氧化方法的强化工艺[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 2218–2225.

LIU Xin-xing, WANG Guo-hua, XIE Jian-ping, et al. Approaches to intensify bio-oxidation of refractory gold-bearing sulfide concentrates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(8): 2218–2225.

[7] ROSSI G. The design of bioreactors[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 217–231.

[8] 谢纪元, 刘青廷, 朱战胜. 烟台市黄金冶炼厂金精矿生物氧化-氰化提金工艺[J]. 黄金, 2003, 24(9): 31–32.

XIE Ji-yuan, LIU Qing-ting, ZHU Zhan-shen. The technology of biooxidation-cyaniding of refractory gold concentrate of Yantai City gold smeltry[J]. Gold, 2003, 24(9): 31–32.

[9] GARCIA-OCHOA F, GOMEZ E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(2): 153–176.

[10] GARCIA-OCHOA F, GOMEZ E, SANTOS V E. Oxygen uptake rate in microbial processes: An overview[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(3): 289–307.

- [11] SUN Li-xin, ZHANG Xu, TAN Wen-song, et al. Effects of dissolved oxygen on the biooxidation process of refractory gold ores[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, 114(5): 531–536.
- [12] GLEISNER M, HERBERT JR R B, KOCKUM P C F. Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen[J]. *Chemical Geology*, 2006, 225(1/2): 16–29.
- [13] DE KOCK S H, BARNARD P, DU PLESSIS C A. Oxygen and carbon dioxide kinetic challenges for thermophilic mineral bioleaching processes[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2004, 32(2): 273–275.
- [14] D'HUGUES P, CEZAC P, CABRAL T, et al. Bioleaching of a cobaltiferous pyrite: A continuous laboratory-scale study at high solids concentration[J]. *Minerals Engineering*, 1997, 10(5): 507–527.
- [15] 杨松荣. 含砷难处理金矿石生物氧化提金基础与工程化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004: 37–56.
- YANG Song-rong. Fundamental and industrialization investigation on biooxidation of arsenic-bearing refractory gold ore[D]. Changsha: Central South University, 2004: 37–56.
- [16] LIU M S, BRANION R M R, DUNCAN D W. The effects of ferrous iron, dissolved oxygen and inert solids concentrations on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1988, 66(3): 445–451.
- [17] WANG Hong, ZHANG Xu, ZHU Ming-long, et al. Effects of dissolved oxygen and carbon dioxide under oxygen-rich conditions on the biooxidation process of refractory gold concentrate and the microbial community[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 80: 37–44.
- [18] SAND W, GEHRKE T, JOZSA P G, et al. (Bio)chemistry of bacterial leaching — Direct vs. indirect bioleaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2001, 59(2/3): 159–175.
- [19] 王敏. 生物成因黄铁矾合成的影响机制及其在酸性矿山废水治理中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 33–42.
- WANG Min. The mechanism of jarosite formation during ferrous iron oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and their applications to acid mine drainage treatment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 33–42.
- [20] LI Xiang-yang, YANG Chao, ZHANG Guang-ji, et al. Experimental studies on suspension of solid particles in a low-shear stirred vessel[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2011, 34(9): 1581–6.

Variation of DO concentration in biological pretreatment of gold ore and its effect

SHEN Cai-long^{1,2}, YUE Fu-lian^{1,2}, ZHANG Guang-ji^{1,2}, WANG Min³, YANG Chao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, CAS Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Dynamic Machinery Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010010, China)

Abstract: High cost on aeration is the major challenge in the biooxidation pretreatment of arsenic-bearing refractory gold ore. In present study, experiments at different pulp densities were carried out in different reactors. The variations of DO concentration, redox potential ϕ , pH and arsenic concentration were monitored during the biooxidation process. Firstly, experiments were carried out in a 5 L reactor at different pulp densities. The results show that the DO concentration at the 25% pulp density is significantly lower than that at the 10% pulp density. In spite of the low DO concentration, the ϕ increases and the pH decreases continuously at the 25% pulp density, indicating that low DO concentration can still sustain the biological process. It is suggested that relative low aeration intensity can be used in the industrial plant for low cost on aeration. Secondly, experiments were carried out in an 80 L reactor at the 25% pulp density. The 80 L reactor has a higher ratio of H/D than that of the 5 L reactor and it is equipped with a draft-tube. It is found that the DO concentration in the 80 L reactor is obviously higher than that in the 5 L reactor though the ventilation ratio in the 80 L reactor is lower than that in the 5 L reactor. The results imply that the draft-tube and higher ratio of H/D are helpful for the increase of DO concentration in the 80 L reactor. It is suggested that optimizing design of the reactor can increase the DO concentration in the industrial plant without extra cost on aeration.

Key words: dissolved oxygen; biooxidation; arsenic concentration; redox potential; draft-tube

Foundation item: Project(2019YFC1904204) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(DNL201902) supported by the Dalian National Laboratory For Clean Energy, CAS; Project(QYZDJ-SSW-JSC030) supported by the Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences; Project(31961133018) supported by the Program of NSFC-EU

Received date: 2020-01-15; **Accepted date:** 2020-09-12

Corresponding author: ZHANG Guang-ji; Tel: +86-10-82544929; E-mail: gjzhang@ipe.ac.cn

(编辑 龙怀中)