文章编号: 1004-0609(2013)01-0274-08

好氧和厌氧条件下 Acidithiobacillus ferrooxidans 菌 对 Fe³⁺氧化 FeS₂ 的影响

刘欣伟1, 冯雅丽1, 李浩然2, 杨志超1, 蔡震雷1

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083;2. 中国科学院过程工程研究所 生化工程国家重点实验室,北京 100190)

摘 要: 嗜酸氧化亚铁硫杆菌(Acidithiobacillus ferrooxidans: A. ferrooxidans 菌)是目前研究得最多的浸矿细菌,其能量代谢途径复杂多样。在好氧和厌氧气氛下,分别对 Fe³⁺浸出黄铁矿及 A. ferrooxidans 菌对 Fe³⁺氧化浸出黄铁 矿的影响进行了研究,并且利用 A. ferrooxidans 菌构建微生物燃料电池,研究在不同气氛下 A. ferrooxidans 菌对电 子传递过程的影响。结果表明:在好氧和厌氧气氛下,加菌时的黄铁矿浸出率比无菌时的分别提高了 40.03%和 27.76%。在好氧和厌氧气氛下,A. ferrooxidans 菌均可以提高电子传递速率,进而加快氧化还原反应的进行,说明 A. ferrooxidans 菌在厌氧环境下,能以 Fe³⁺为电子受体、含还原性硫的黄铁矿为电子供体来进行呼吸作用,获得生命活动所需的能量。在实验结果和前人工作的基础上提出在厌氧情况下,A. ferrooxidans 菌进行呼吸作用的 一条可能的路线图。

关键词:嗜酸氧化亚铁硫杆菌;铁氧化系统;硫氧化系统;电子传递 中图分类号:Q935 文献标志码:A

Effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on pyrite oxidation by ferric iron under aerobic and anaerobic conditions

LIU Xin-wei¹, FENG Ya-li¹, LI Hao-ran², YANG Zhi-chao¹, CAI Zhen-lei¹

 (1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
 2. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering,

Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Acidithiobacillus ferrooxidans (A. ferrooxidans) is the most widely studied bacteria, which is used in leaching ores work. The pyrite leached by ferric iron and the effect of A. ferrooxidans on pyrite leaching were studied under the aerobic and anaerobic atmosphere, respectively. Bio-cathode microbial fuel cells were constructed in accordance with the characteristics of A. ferrooxidans, and then used to study the effect of A. ferrooxidans on the electron transfer process under the aerobic and anaerobic atmosphere. The results show that, under the aerobic and anaerobic atmosphere, the leaching rates of pyrite are 40.03% and 27.76% more than those of chemical leaching, respectively. Under the aerobic and anaerobic atmosphere, the presence of A. ferrooxidans both can improve the electron transfer rate, and thus speed up the conduct of the redox reaction. This demonstrates that, in the anaerobic environment, A. ferrooxidans can be respiration using Fe³⁺ as electron acceptor and pyrite containing reduced sulfur as electron donor. On the basis of experimental results and previous work, a possible electron transport chain of A. ferrooxidans under anaerobic condition was proposed. **Key words:** Acidithiobacillus ferrooxidans; iron oxide system; sulfur oxide system; electron transport

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20876160, 21176026); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRT-TP-09-002B) 收稿日期: 2012-02-02; 修订日期: 2012-07-11

通信作者: 冯雅丽, 教授, 博士; 电话: 010-62311181; E-mail: ylfeng126@126.com

嗜酸氧化亚铁硫杆菌(Acidithiobacillus ferrooxidans: A. ferrooxidans 菌)是典型的化能自养菌,属于革兰氏 阴性细菌,好氧嗜酸,主要生长在 pH 值为 1~3 的环 境中,由于能生长在亚铁、元素硫和硫化物矿物上, 因而是迄今已报道的 20 多种浸矿细菌中被研究得最 多的浸矿细菌。自从 A. ferrooxidans 菌的浸矿作用被 发现以来就存在直接作用说和间接作用说^[1-3]。对于直 接间接反应机理,不同的学者有不同的认识,不同的 硫化矿,细菌浸出的反应机理有可能不同,但多数学 者认为细菌的浸矿过程是以间接作用为主的^[4-6]。

目前,国内外对A. ferrooxidans 菌浸矿过程中间 接作用机理的研究主要是在好氧条件下考察了细菌对 Fe³⁺氧化浸出硫化矿的影响,在厌氧条件下,A. ferrooxidans 菌对 Fe³⁺氧化浸出硫化矿的影响尚未见报 道。并且在 A. ferrooxidans 菌浸出硫化矿的堆浸和槽 浸过程中都存在气体的传质问题,如果气体的传质效 果不好,可能会影响 A. ferrooxidans 的浸矿效果。针 对此情况,本文作者在厌氧条件下,考察 A. ferrooxidans 菌对 Fe³⁺氧化浸出黄铁矿的影响;并设计 了一套微生物燃料电池体系(MFC)^[7-10],利用 MFC 体 系模拟 A. ferrooxidans 菌在好氧和厌氧条件下对氧化 还原过程中电子传递速率的影响,直接通过外电路电 压记录氧化还原速率的大小,进而反映出 A. ferrooxidans菌在不同气氛下对Fe³⁺氧化浸出硫化矿的 影响程度。并且在前人对 A. ferrooxidans 菌铁氧化系 统和硫氧化系统[11-13]研究的基础上,提出了在厌氧环 境下, A. ferrooxidans 菌以 Fe³⁺作为电子受体过程中一 条可能的电子传递图,以期对硫化矿微生物冶金中一 系列问题具有一定的指导作用和理论意义。

1 实验

1.1 菌种和培养基

菌株:本研究所用菌株是由本实验室保藏的嗜酸 氧化亚铁硫杆菌(A. ferrooxidans 菌),是从铜矿山酸性 废水中分离筛选出来的菌株,细胞形态为杆状,驯化 培养后作为实验用菌株。所用光合产电菌是从厌氧消 解污泥中通过富集、分离和筛选得到的,为混合菌种。

实验所用培养基组成如下:

生长培养基为 9K 培养基: (NH₄)₂SO₄ 0.15 g/L; MgSO₄·7H₂O 0.05 g/L; K₂HPO₄ 0.05 g/L; Ca(NO₃)₂ 0.05 g/L; FeSO₄·7H₂O 0.01 g/L, 用 20%硫酸调节 pH 值。

浸矿培养基为修改后的含 Fe³⁺离子的 9K 培养基: (NH₄)₂SO₄ 0.15 g/L; MgSO₄·7H₂O 0.05 g/L; K₂HPO₄ 0.05 g/L; Ca(NO₃)₂ 0.05 g/L; Fe₂(SO₄)₃ 9 g/L, 用 20% 硫酸调节 pH 值。

1.2 黄铁矿单矿物制备

实验用黄铁矿单矿物是从矿山采集的富块矿破碎 后浮选,再经摇床分选出精矿后,用玛瑙球磨机干磨 筛分出粒径小于 46 µm、质量分数约为 90%的精矿粉 作为实验样品,其化学成分分析结果见表 1,黄铁矿 纯矿物 XRD 谱见图 1。

表1 黄铁矿纯矿物主要元素分析结果

Table 1 Pure pyrite mineral element analysis results (massfraction, %)

Fe	S	Other
41.85	47.83	10.32



Fig. 1 XRD pattern of pyrite

1.3 实验方法

1.3.1 Fe³⁺溶液浸出

取 100 mL 修改后的含 Fe³⁺离子的 9K 培养基加入 250 mL 的锥形瓶中,用 H₂SO₄或 NH₃·H₂O 水溶液调 节 pH 至 1.8,分别加入 0.1 g、0.2 g、0.5 g 和 1 g 的黄 铁矿并加入 0.1 g 的 HgCl₂ 灭菌剂,通入空气或 N₂气 体(15 min),溶液中的气体达到饱和后用橡胶塞密封, 在浸出过程中通过橡胶塞上带有的细小橡胶管继续向 浸出液中充入气体,以保持溶液的好氧或厌氧气氛, 将密封的锥形瓶放入恒温水浴摇床振荡器中振荡浸 出,间隔一定的时间用注射器通过橡胶塞上的微小出 气孔从浸出液中取 1 mL 液体测定溶液的总铁浓度和 氧化还原电位,取出的液体用蒸馏水补充。

1.3.2 细菌+Fe³⁺溶液浸出

取 70 mL 修改后的含 Fe³⁺离子的 9K 培养基和 30 mL 处于对数生长期的 A. ferrooxidans 菌液加入 250

276

mL的锥形瓶中,其他试验方法与 1.3.1 节中相同。 1.3.3 *A. ferrooxidans* 菌的电子传递

构 建了 双 室 微 生 物 燃 料 电 池 体 系 来 研 究 A. ferrooxidans 菌的电子传递过程,电池装置如图 2 所示^[14]。该电池由玻璃制成,由两个直径为 45 mm, 高为 200 mm 的圆桶构成阴、阳极室,中间用直径为 25 mm,长为 30 mm 的玻璃管相连,以未抛光高纯石 墨棒为电极,阳极加入阳极液,阴极为缓冲液,中间 由双极膜隔开。阴、阳极室上部均设有进样口、进气 口。

高纯石墨电极使用前用 1 mol/L HCl 浸泡去除杂 质离子,使用完后再用 1.0 mol/L 的 NaOH 浸泡以除 去其表面吸附的细胞。电极室、电极以及电极缓冲液 均需在 121 ℃下湿热灭菌 20 min。无特殊说明时,电 池在 30 ℃环境下运行。阳极加入光合产电菌,接种 前通 N₂-CO₂ (80:20)混合气除尽装入的培养基中的 氧气,接种后密封或者缓慢通混合气。阴极加入 *A. ferrooxidans* 菌,接种后持续通空气或氮气,两极室 均缓慢搅拌。整个电池的组装、接种过程均无菌操作。

1.4 主要仪器及分析方法

1) 主要仪器: 722 型光栅分光光度计; pHS-29A 型酸度计; DZS-707 型多参数分析仪; SZX-B 型恒温 水浴振荡摇床。

2) 分析方法: 总铁分析采用邻菲啰啉分光光度法 测定^[15]; 实验过程中浸出液氧化还原电位的测定采用 DZS-707 型多参数分析仪; pH 采用 pH 计来测定。

3) 黄铁矿浸出率的测定: 黄铁矿浸出率由下式计 算。

 $R = \frac{m_{\rm Fe^{3+}} - m_{\rm OFe^{3+}}}{m_{\rm pv} w_{\rm Fe}} \times 100\%$

式中: R 为黄铁矿浸出率; m_{Fe³⁺} 为溶液中铁离子的总

质量; *m*_{OFe³⁺} 为溶液中开始加入的铁离子的总质量; *m*_{py} 为溶液中加入的黄铁矿粉的总质量; *w*_{Fe} 为黄铁矿 中铁的质量分数。

电压采集:数据采集卡瑞博华 AD8201H16 位,32 通道,编程双端方式工作,采集精度 0.1 mV。

2 结果与分析

在好氧和厌氧条件下, A. ferrooxidans 菌对 Fe³⁺ 氧化浸出黄铁矿的影响

在浸出液矿浆浓度分别为 0.1%, 0.2%, 0.5%和 1%的情况下, 分别考察在好氧和厌氧(氮气)气氛下, *A. ferrooxidans* 菌对 Fe³⁺化学氧化浸出黄铁矿的影响, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在好氧和厌氧气 氛下, *A. ferrooxidans* 菌对 Fe³⁺氧化浸出黄铁矿都有促 进作用。且随着矿浆浓度的增大, 细菌的促进作用稍 微有所降低, 这主要是因为矿浆中的矿物颗粒和矿浆 中矿物剪切力都会影响细菌生长,造成细菌停滞期延长。当矿浆浓度为 1%时, 在好氧和厌氧气氛下, 加 菌 时 的 黄 铁 矿 浸 出 率 比 不 加 菌 时 的 分别提 高 了 40.03%和 27.76%。

从图 3 中还可以看出,在 4 种矿浆浓度和好氧条件下,*A. ferrooxidans* 菌对 Fe³⁺的催化作用较大;在厌氧气氛下,*A. ferrooxidans* 菌对 Fe³⁺的催化作用较小。这主要是因为在好氧条件下,溶液中的氧气充足,*A. ferrooxidans* 菌以氧气作为呼吸作用的最终电子受体进行呼吸作用,获得生命活动所需的各种能量而生长繁殖,因此可快速地将溶液中的 Fe²⁺氧化成 Fe³⁺,将元素硫氧化成硫酸,进而加快黄铁矿的氧化浸出。在通入氮气的厌氧气氛下,*A. ferrooxidans* 菌对 Fe³⁺氧化黄





图 2 双室微生物燃料电池装置示意图与实物图

Fig. 2 Schematic diagram (a) and physical map (b) of dual-chamber microbial fuel cell



图 3 在好氧和厌氧条件下 A. ferrooxidans 菌对黄铁矿浸出率的影响

Fig. 3 Effect of *A. ferrooxidans* on epyrite leaching rate under conditions of aerobic and anaerobic and different pulp concentrations: (a) 0.1%; (b) 0.2%; (c) 0.5%; (d) 1%

铁矿也有促进作用,主要原因是在厌氧的情况下,A. *ferrooxidans*菌可在以Fe³⁺作为电子供体提供能量的情况下生长^[16-18]。矿浆浓度为 1%时,在不同条件下, 浸出过程中溶液的氧化还原电位如图4所示。

从图 4 可知,浸出过程中,在好氧不加菌、厌氧 不加菌和厌氧加菌的情况下,溶液的氧化还原电位均 逐渐下降,主要原因是在不加菌的情况下,Fe³⁺氧化 黄铁矿生成 Fe²⁺,导致[Fe³⁺]/[Fe²⁺]比值降低,溶液氧 化还原电位 φ 下降;在氦气加菌的厌氧气氛下,Fe³⁺ 在氧化黄铁矿的同时,*A. ferrooxidans* 菌利用 Fe³⁺作为 呼吸作用的最终电子受体,获得细胞生长所需的各种 能量,进而促进黄铁矿的浸出,使溶液中 Fe²⁺浓度逐 渐升高,溶液氧化还原电位 φ 下降。在好氧加菌的情 况下,浸出前 4 d,溶液的氧化还原电位 φ 也逐渐降 低,这主要是因为在浸出开始时,细菌生长处于停滞 期,细菌氧化 Fe²⁺的速度小于 Fe²⁺的生成速度,浸出 时间超过 4 d 时,细菌生长旺盛,氧化 Fe²⁺的速度加



图 4 不同条件下溶液的氧化还原电位随时间的变化曲线



快, [Fe³⁺]/[Fe²⁺]比值逐渐增大, 溶液的氧化还原电位 上升。

2.2 A. ferrooxidans 菌对氧化还原过程的影响

为了消除干扰因素,更直接、准确地研究 A. ferrooxidans 菌在好氧和厌氧情况下对 Fe³⁺氧化浸 出 FeS₂的影响,构建了微生物燃料电池。同时为了消 除 FeS₂在溶解过程中的二次成矿问题带来的干扰,电 池阳极中加入醋酸钠代替 FeS₂作电子供体。在微生物 燃料电池体系中,氧化还原速率可以直接通过外电路 电流记录,能更准确、迅速地反映出微生物对氧化还 原过程的影响程度。

2.2.1 好氧条件下加菌与不加菌 MFC 的产电性能

以光合产电菌作为阳极、A. ferrooxidans 菌作为阴极的微生物燃料电池,阴阳极分别发生以下反应:

1) 阳极反应:

 $CH_{3}COO^{-}+4H_{2}O \longrightarrow 2HCO_{3}^{-}+9H^{+}+8e$

2) 阴极反应

 $8Fe^{3+}+8e \xrightarrow{Biocatalysis} 8Fe^{2+}$

微生物燃料电池的阳极产电菌以醋酸钠为原料 (电子供体),在生物体内各种酶催化的条件下产生电 子和质子。电子通过石墨棒电极、外电路传递给阴极; 质子通过质子交换膜传递给阴极。阴极以缓冲液中的 Fe³⁺为电子受体,接受电子后被还原为 Fe²⁺。

图 5 所示为电池阴极加入 A. ferrooxidans 菌和不加 A. ferrooxidans 菌时的产电性能。从图 5 可知,在 阴极加入 A. ferrooxidans 菌的电池体系中,外电路电 压可稳定在 413 mV 左右。而未加入 A. ferrooxidans 菌的微生物燃料电池的外电路电压只有 350 mV,说明 在有微生物存在的条件下,电子传递速率比较大。微 生物的存在促进了电子在溶液与电极之间的传递。在 不加 A. ferrooxidans 菌的 MFC 中,随着电池运行时间 的增加,电池的电压会随着阴极缓冲液中 Fe³⁺的消耗 而减小。当 Fe³⁺消耗尽时,MFC 的电压降低到背景值。 再向阴极液中加入 Fe³⁺,则电池的电压会增加,随着 Fe³⁺的耗尽,电池的电压又会降低到背景值。

2.2.2 好氧与厌氧情况下 A. ferrooxidans 菌对电子传 递速率的影响

图 6 所示为微生物燃料电池运行稳定时通空气与 通氮气的电压比较。由图 6 可知, 阴极通入空气的 MFC 产生电压要高于通氮气的电池所产生的电压。在 通空气的条件下,电池的电压增大了约 30 mV。在通 氮气的厌氧条件下, MFC 也产生了 380 mV 左右的电 压,说明在厌氧条件下, *A. ferrooxidans* 菌也是可以存 活的。这主要是因为 *A. ferrooxidans* 菌同时拥有铁氧 化系统和硫氧化系统,在无氧或缺氧的条件下也可以



图 5 微生物电池的运行情况

Fig. 5 Operation conditions of microbial fuel cells: (a) Adding *A. ferrooxidans*; (b) Without *A. ferrooxidans*



图 6 不同气氛下微生物燃料电池运行情况

Fig. 6 Operation condition of microbial fuel cell under different atmospheres

生长,进而提高氧化还原过程的电子传递速率。但在 无氧呼吸过程中,电子供体和受体之间也需要细胞色 素等中间电子传递体,并伴随有磷酸化作用,底物可 被彻底氧化,从而产生较多能量来供细菌生长繁殖, 但不如有氧呼吸产生的能量多。因此,MFC体系在通 空气的情况下,其外电路电压要高于通氮气的 MFC 体系。

3 A. ferrooxidans 菌作用下电子传递 模型推测

从以上浸出实验和 MFC 的运行结果可知,在好 氧和厌氧两种情况下, *A. ferrooxidans* 菌均可以促进 Fe³⁺对黄铁矿的氧化浸出。原因在于 *A. ferrooxidans* 菌的生物学特性之一就是铁氧化系统和硫氧化系统并 存^[11-13]。 A. ferrooxidans 菌在有氧条件下通过铁氧化系统 进行呼吸作用,依靠 Fe^{2+} 、各种还原性硫化物及 H_2 氧化来提供能量生长,电子传递途径如图 7 所示^[19]。

在无氧条件下, A. ferrooxidans 菌能以 Fe³⁺或以 S 为电子受体、H₂为电子供体,或以 Fe³⁺为电子受体、 还原性含硫化合物为电子供体来进行呼吸作用。在 A. ferrooxidans 菌中,关于元素硫的氧化已证实存在两种 机制^[20],且这两种情况下的硫氧化酶均定位于周质空 间^[21-22]。

在前人工作的基础上,本文作者提出在厌氧情况下,*A. ferrooxidans* 菌进行呼吸作用的一条可能的路线,如图 8 所示。

厌氧条件下, 黄铁矿在 Fe³⁺溶液中发生的可能化



图 7 A. ferrooxidans 菌亚铁氧化系统电子传递模式简图

Fig. 7 Model of electron transport pathway of iron oxidation of A. ferrooxidans





Fig. 8 Model of electron transport pathway of sulfur oxidation of *A. ferrooxidans* under anaerobic conditions: a—Thiosulfate reductase; b—Hydrogen sulfite- Fe^{3+} oxidoreductase; c—Sulfite reductase; d— Fe^{3+} reductase

学反应如下:

 $\operatorname{FeS}_{2} + 2\operatorname{Fe}^{3+} \longrightarrow 3\operatorname{Fe}^{2+} + 2\operatorname{S}^{0} \tag{1}$

 $FeS_2 + 6Fe^{3+} + 3H_2O \longrightarrow 7Fe^{2+} + S_2O_3^{2-} + 6H^+$ (2)

 $S_2O_3^{2^-} + 8Fe^{3^+} + 5H_2O \longrightarrow 2SO_4^{2^-} + 8Fe^{2^+} + 10H^+$ (3)

生成的元素硫和硫代硫酸根通过细胞外膜转运到 周质空间后,在硫氧化酶的作用下最终氧化成硫酸, Fe³⁺作为最终电子受体,生成 Fe²⁺。

4 结论

 在不加菌的情况下,不同气氛下 Fe³⁺浸出黄铁 矿的规律大致相同;有菌时,细菌的氧化作用使黄铁 矿的浸出率明显提高,在好氧和厌氧气氛下,黄铁矿 的浸出率较无菌时分别提高了 40.03%和 27.76%。

2)利用 A. ferrooxidans 菌构建微生物燃料电池, 利用 MFC 体系模拟 A. ferrooxidans 菌在好氧与厌氧条 件下对氧化还原过程中电子传递速率的影响。在好氧 和厌氧气氛下, A. ferrooxidans 菌均可以提高氧化还原 过程中的电子传递速率。在实验结果和前人工作的基 础上,提出了在厌氧情况下, A. ferrooxidans 菌进行呼 吸作用的一条可能的路线图。

REFERENCES

 张广积, 袁秋红, 方兆珩, 杨 超. 铁闪锌矿细菌浸出过程中 亚铁和细菌初始浓度的影响[J]. 过程工程学报, 2007, 7(3): 536-540.
 ZHANG Guang-ji, YUAN Qiu-hong, FANG Zhao-heng, YANG Chao. Effects of external addition of Fe²⁺ and inoculum on

bioleaching of marmatite flotation concentrate[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(3): 536–540.

- [2] 罗志雄,张广积,方兆珩.采用中温菌和常温菌浸出含砷金精矿[J].中国有色金属学报,2007,17(8):1342-1347.
 LUO Zhi-xiong, ZHANG Guang-ji, FANG Zhao-heng.
 Bioleaching arsenic-containing gold concentrates with MLY and *Atf* [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(8): 1342-1347.
- [3] 程海娜. 斜方蓝辉铜矿、铜蓝和黄铜矿生物浸出及机理[D].长沙: 中南大学, 2010: 4-7.

CHENG Hai-na. Bioleaching and mechanism of anilite, covellite and chalcopyrite[D]. Changsha: Central South University, 2010: 4–7.

[4] EDWARDS K J, HU B, HAMWES R J, BANFIELD J F. A new

look at microbial leaching patterns on sulfide minerals[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2001, 34(3): 197–206.

- [5] SAND W, GEHRKE T, JOZSA P G, SCHIPPERS A. Biochemistry of bacterial leaching-direct vs. indirect bioleaching[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 159–175.
- [6] TRIBUTSCH H. Direct versus indirect bioleaching[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59: 177–185.
- [7] LAI B, TANG X H, LI H R, DU Z W, LIU X W, ZHANG Q. Power production enhancement with a polyaniline modified anode in microbial fuel cells[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2011, 28(1): 373–377.
- [8] TANG X H, DU Z W, LI H R. Anodic electron shuttle mechanism based on 1-hydroxy-4-aminoanthraquinone in microbial fuel cells[J]. Electrochemistry Communications, 2010, 12: 1140–1143.
- [9] TANG X H, GUO K, TIAN J L, DU Z W, LI H R. Electrochemical treatment of graphite anode to enhance power production in microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 3558–3560.
- [10] TANG X H, GUO K, TIAN J L, DU Z W, LI H R. Microfiltration membrane performance in two-chamber microbial fuel cells[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 52: 194–198.
- [11] SCHIPPERS A, JOZSA P G, SAND W. Sulfur chemistry in bacterial of pyrite[J]. American Society for Microbiology, 1996, 62(9): 3424–3431.
- [12] 张成桂,夏金兰,王 晶,邱冠周. 嗜酸硫杆菌属硫氧化系统研究进展[J]. 生物技术通报,2007(1):59-65.
 ZHANG Cheng-gui, XIA Jin-lan, WANG Jing, QIU Guan-zhou.
 Progress on researches of sulfur oxidation system of *Acidithiobacillus* spp.[J]. Biotechnology Bulletin, 2007(1): 59-65.
- [13] 王 敏. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌亚硫酸还原酶的 α, β 亚基的表达纯化及相互作用[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 2-3.
 WANG Min. Expression, purification and interaction of α, β subunit of the sulfite reductase from *Acidithiobacillus ferrooxidans*[D]. Changsha: Central South University, 2007: 2-3.
- [14] 连 静, 冯雅丽, 李浩然, 杜竹伟. 微生物燃料电池的研究进展[J]. 过程工程学报, 2006, 6(2): 334-338.
 LIAN Jing, FENG Ya-li, LI Hao-ran, DU Zhu-wei. Progress in research on microbial fuel cells[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(2): 334-338.
- [15] 孙彦峰. 氧化亚铁硫杆菌浸出金川低品位镍磁黄铁矿的研究
 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 44-45.
 SUN Yan-feng. Study on bioleaching of low-grade nicopyrite in Jinchuan by *Thiobacillus ferrooxidans*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 44-45.
- [16] PRONK J T, LIEM K, BOS P, KUENEN J G. Energy transduction by anaerobic ferric iron respiration in *Thiobacillus*

ferrooxidans[J]. American Society for Microbiology, 1991, 57(7): 2063–2068.

- [17] OHMURA N, SASAKI K, MATSUMOTO N, HIROSHI S. Anaerbic respiration using Fe³⁺, S₀ and H₂ in the chemolithoautotrophic bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. American Society for Microbiology, 2002, 184(8): 2081–2087.
- [18] PRONK J T, BRUYN J C, BOS P, KUENEN J G. Anaerobic growth of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. American Society for Microbiology, 1992, 58(7): 2227–2230.
- [19] 张成桂,夏金兰,邱冠周. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌亚铁氧化系统研究进展[J]. 中国有色金属学报,2006,16(7):1239-1249.
 ZHANG Cheng-gui, XIA Jin-lan, QIU Guan-zhou. Progress in research on Fe^{2 +} oxidation system of *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(7): 1239-1249.
- [20] 夏乐先. 嗜酸硫杆菌硫代谢在硫化矿浸出中作用及其关键酶 性质研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 9-12.
 XIA Le-xian. Function of sulfur metabolism of *thiobacillus* in the bioleaching of sulfide minerals and properties of key sulfur-oxidizing enzymes[D]. Changsha: Central South University, 2008: 9-12.
- [21] LOCHOWSKA A, LWANIEKA-NOWIEKA R, PLOCHOCKA D, HRYNIEWICZ M M. Functional dissection of the LysR-type CysB transcriptional regulator: regions important for DNA bingding, inducer response, ologomerization and positive control[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2001, 276(3): 2098–2107.
- [22] ROHWERDER T, SAND W. Oxidation of inorganic sulfur compounds in acidophilic prokaryotes[J]. Engineering in Life Sciences, 2007, 7(4): 301–309.

(编辑 何学锋)