

电场作用对提高微生物浸矿性能的影响

左 恒, 吴爱祥, 王贻明

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 在排土场微生物强化浸出过程中, 结合电场生物工程技术, 以氧化亚铁硫杆菌为研究对象, 提出利用电场作用提高微生物浸矿性能的方法, 探讨电场作用对微生物生长代谢以及渗流特性的影响。结果表明: 电场作用对氧化亚铁硫杆菌生长代谢的影响非常明显, 适当的电场可有效强化其生长代谢能力, 过高的电流会抑制氧化亚铁硫杆菌生长; 电场作用下, 排土场孔隙中微生物的渗流能力明显增强, 微生物电动渗流效应在渗透率高排土场中尤为明显。

关键词: 电场作用; 排土场; 氧化亚铁硫杆菌; 生长代谢; 渗流能力; 溶浸液

中图分类号: TD 98

文献标识码: A

Effect of electric field on improving leaching ability of microbe

ZUO Heng, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Using the technology of electric field and microbe in the process of bioleaching, the novel method for improving leaching ability of microbe in ore dump by electric field was put forward, and the influence of electric field on growth and seepage properties of *thiobacillus ferrooxidans* (*T.f*) was investigated. The results indicate that it is obvious that the electric field affects on growth of *T.f*, and the growth ability of *T.f* can be enhanced or weakened by the electric field. The seepage ability of microbe of *T.f* well increases under the electric field, and the effect is more effective in the porous of high permeability ore dump.

Key words: effect of electric field; ore dump; *thiobacillus ferrooxidans*; growth and metabolism; seepage ability; leaching solution

金属矿排土场微生物强化浸出是根据堆置浸出技术, 将浸矿微生物、溶浸液和气体注入到排土场中, 有选择性地浸出排土场中矿石有用成分的新技术。其生产工艺简单, 生产成本低, 环境友好, 资源利用率高, 是生物工程技术在矿产开发领域的开拓性应用^[1-2]。利用微生物强化排土场浸出是因为浸矿微生物具有在多孔介质中渗流的特性^[3-5]。微生物和所需要的营养物质均以溶质的形式存在于溶浸液中, 以溶浸液为载体进行传输, 从而为微生物在整个排土场中生长、

代谢及其对矿石性质的改变提供条件^[6-7]。

微生物浸矿性能是浸出过程中的关键因素, 提高微生物的浸矿性能就是强化微生物在排土场孔隙中的生长代谢能力以及渗流能力, 进而为提高矿石的浸出效果奠定基础。

近年来, 电场技术与生物工程技术之间有了日益紧密的联系, 这一动向不仅开拓了电场技术的新领域, 也为生物工程技术提供了新的研究手段^[8-10]。本文作者在铜矿排土场微生物浸出过程中, 结合电场生物工

程技术，以最具代表性的浸矿微生物—氧化亚铁硫杆菌为对象，通过理论分析及实验，研究了电场作用对微生物生长代谢规律以及渗流特性的影响。

1 电场生物效应机理

微生物本身是一个复杂的系统，具有较复杂的生理特性，而且极易受外界环境的干扰。因而电场生物效应不仅受电场作用时间、电场功率以及电场频率的影响，还受生物自身生理特性和各种环境因素的影响，电场的生物效应是内外因素共同作用所表现出来的综合效应，并且生物效应也并不是按某一种方式进行，而极有可能是多途径，多层次地进行。因此，电场生物效应的多元性也就使其同时具有复杂性和不定性。

微生物是不断生长的个体，有其生长发育的不同阶段，在不同的生理阶段生物体自身特性有所不同，因而电场作用也表现出不同的生物效应。

微生物体内存在着电位变化等生物电现象，微生物处在各种电场中，将电场作用于微生物会使微生物生长繁殖得到抑制或者加强，这就是电场生物效应。电场生物效应机理非常复杂，目前认为主要通过以下几方面起作用^[11-13]。

1) 一定的电场强度和电场作用时间可以激活酶的活性，电场作用改变酶的活性主要通过两方面来实现：一方面，酶一般都带有大量的正负电荷，这些电荷在溶液中会使其周围产生水化层。如果电场强度较大，电场作用对酶溶液的极化，必然破坏这些水化层。如果电场强度较低，无法拉动电荷周围的水化层，水分子热运动的能量比电场极化同体积水分子所需的能量还高时，电场对酶的处理无效；另一方面，电场作用可使微生物体内荷电物质的分布、运动发生变化，引起各种次级键的变化从而改变了酶的构象及活性，对生命活动产生调节作用。

2) 正常情况下，细胞内外维持约有 80 mV 的静息膜电位，形成势垒。而细胞膜两侧的离子浓度与势垒高度有一定的关系，离子出入膜必须穿过这层势垒。当电场作用于生物体，细胞膜上会产生 120~180 mV 的跨膜电位，使势垒发生变化，因而改变细胞膜的通透性。嵌入细胞膜中的大分子物质要受到这个膜电位的影响，这种大分子物质有带电的组团，对电场十分敏感。这些分子或组团在跨膜电位的作用下，即使发生少量的构象变化，也会对细胞功能产生影响。

3) 电场的作用可使溶浸液流体中正、负离子的运动迁移速度加快，而正、负离子运动的加快以及和微生物体接触机会增加对微生物正常的生理活动产生影响。

2 电场作用下氧化亚铁硫杆菌生长代谢特性

2.1 方法及装置

实验所用的氧化亚铁硫杆菌 T-1 菌株从广东大宝山浸矿水中分离获得，原始菌株在 9 K 培养基中的 Fe²⁺ 氧化周期为 80 h。经过 6 个月驯化培养，驯化菌株的 Fe²⁺ 氧化周期为 28 h。将细菌用细菌滤膜过滤，再用 pH2.0 的硫酸溶液冲洗 3 次，洗去细菌表面的铁沉淀物，得到去铁细菌并悬浮于无铁培养基中，作为本次研究菌液。为防止杂菌污染，反应器均经过严格灭菌，整个反应箱置于紫外灯灭菌的无菌室中运行。反应器中是经过杀菌后再接种过氧化亚铁硫杆菌的纯培养液。

图 1 所示为电场作用下氧化亚铁硫杆菌生长代谢实验系统示意图。1 号反应器为对照生物反应器，不与直流电源相连。2 号反应器为电场生物反应器，其中 2 块电极板分别与直流电源的正极与负极相连，反应器内同时发生阳极反应与阴极反应。反应器尺寸均为长 12 cm，宽 12 cm，高 10 cm。反应器置于恒温装置中，以便控制反应器内的温度。每个反应器中均安装有搅拌器，以保证反应器内反应液混合均匀。电流由直流电源提供，并由直流电表测定。电极板为宽 10 cm、厚 8 mm、高 8 cm 的石墨板，其与导线相连处用导电胶粘结，并涂有防水绝缘漆。

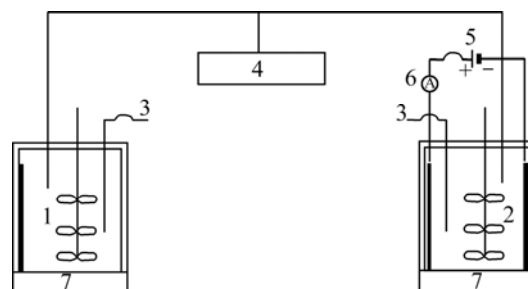


图 1 电场作用下氧化亚铁硫杆菌生长代谢实验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of experiment set of growth of *T.f* under electric field: 1—Check bioreactor; 2—Electrical bioreactor; 3—Sampling outlet; 4—pH-control system; 5—DC electric; 6—Ampere meter; 7—Temperature-control system

分别在开始培养的第 0、4、8、12、16、24、32、40、48、56、60、64、和 80 h 测定 0、1、3、6、10、15、25、35、100 和 200 mA 电流条件下氧化亚铁硫杆菌菌落形成数 CFU 值(colony-forming unit), 并绘制其生长曲线。

2.2 实验结果

电场作用对氧化亚铁硫杆菌生长代谢的影响如图 2~4 所示。由图可以看出: 在电流为 1 mA 和 3 mA 时, 氧化亚铁硫杆菌的生长速率与对照反应器(0 mA)基本在同一水平, 随着时间的增长, 生长速率稍有提高, 这表明低电流对氧化亚铁硫杆菌生长代谢的影响不明显。当电流为 6 mA 和 10 mA 时氧化亚铁硫杆菌的生长速率明显比对照反应器快, 其中电流为 10 mA 时氧化亚铁硫杆菌的生长速率最快。随着电流的继续升高至 15 mA 和 25 mA 时, 电场-生物反应器中氧化亚铁硫杆菌生长速率变化没有电流为 10 mA 时明显。

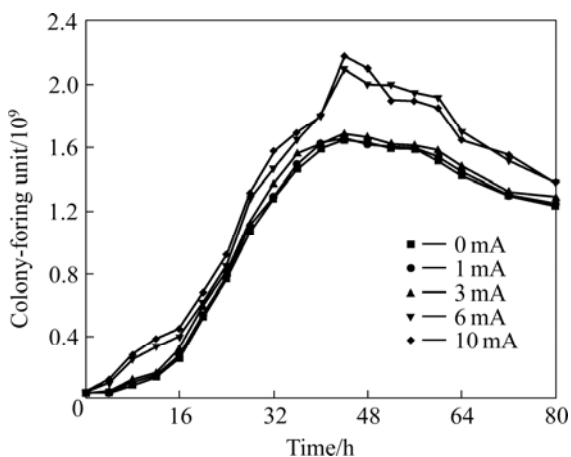


图 2 电场作用下氧化亚铁硫杆菌的生长曲线
Fig.2 Growth curves of *T.f* under electric field

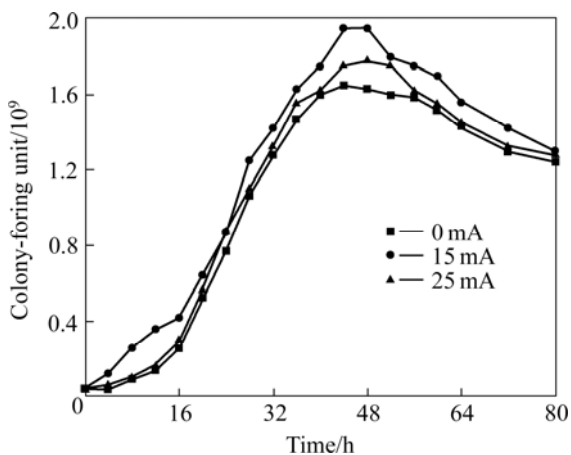


图 3 电场作用下氧化亚铁硫杆菌的生长曲线
Fig.3 Growth curve of *T.f* under electric field

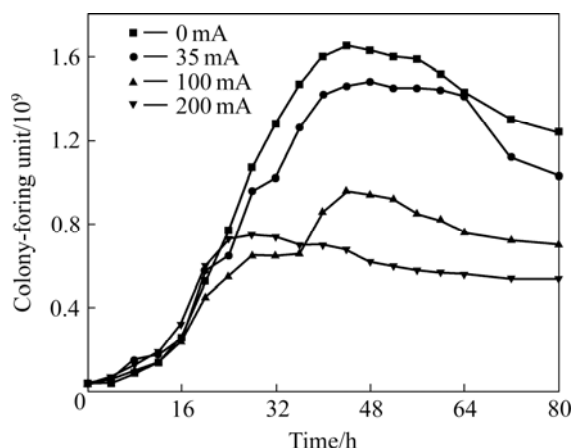


图 4 电场作用下氧化亚铁硫杆菌的生长曲线
Fig.4 Growth curve of *T.f* under electric field

当电流强度继续升高至 35~100 mA 时, 电场-生物反应器中氧化亚铁硫杆菌生长速率明显下降, 比对照反应器的生长速率低。在电流为 200 mA 时, 电场-生物反应器中氧化亚铁硫杆菌在第 20 h 开始出现负的生长速率。

3 浸矿微生物的电动渗流特性

3.1 微生物电动渗流原理

在多孔介质流体中施加电场作用, 由于电动渗流效应, 流体渗流增加变快^[14]。排土场是一种典型的多孔介质, 浸矿溶浸液在排土场孔隙中的渗流属于流体在多孔介质中的流动问题。浸出过程中, 微生物和所需要的营养物质均以溶质的形式存在于溶浸液中, 以溶浸液为载体, 进行渗流传输, 因此浸矿微生物的渗流必定受到电动渗流效应的影响。多孔介质微生物电动渗流物理模型如图 5 所示^[15]。

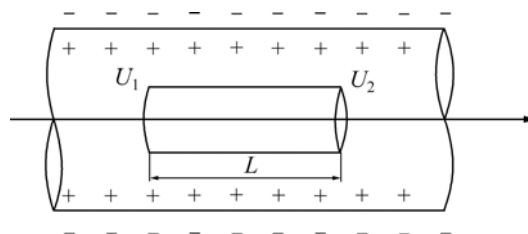


图 5 微生物电动渗流的物理模型
Fig.5 Physical model of electro-dynamic seepage of microbe

3.2 微生物电动渗流实验

如图 6 所示, 微生物电动渗流实验系统主要由微

生物渗流实验装置和电场实施装置两大部分组成。电场实施装置由交流电源、调压器、整流器、电流表和电压表组成。

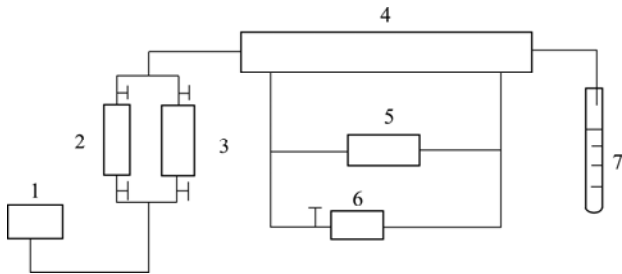


图6 电动渗流实验系统的示意图

Fig.6 Schematic diagram of the experimental set of electrodynamic seepage: 1—Advection pump; 2, 3—Internal container; 4—Ore model; 5—Electric field set; 6—Pressure-control system; 7—Measurement cylinder

取3组高压成型、级配不同的圆柱状铜矿石多孔介质模型 m_1 、 m_2 和 m_3 ，模型直径为 20 mm，高为 100 mm。将矿样模型抽空后，用实验用水测量模型孔隙体积，计算模型渗透率，分别测得 m_1 的渗透率 $k_1=7.86 \times 10^{-1} \mu\text{m}^2$ ， m_2 的渗透率 $k_2=1.65 \times 10^{-1} \mu\text{m}^2$ ， m_3 的渗透率 $k_3=5.84 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 。

实验溶浸液为低浓度硫酸溶液，溶液浓度为 196 mg/L。微生物菌液浓度为 5.6×10^6 cells/mL。

实验时，保持矿样模型4两端流体压力梯度不变，由电源5在矿样模型4的两端施加直流电场，微生物菌液在该电场作用下，以恒定的速度向右流动，并将左端平流泵1中的溶液不断地“吸入”矿样模型中。实验过程中，矿样模型的电场方向均和微生物菌液流动方向一致，并定义为正向电场。实验过程中保持矿样模型两端接触紧密、不漏液及模型不张裂。

实验是测定在不同强度电场作用下，矿样模型 m_1 、 m_2 和 m_3 中的微生物渗流量比值 Q_e/Q (微生物渗流量比值 Q_e/Q 是指单位时间内有电场作用和无电场作用时多孔介质中微生物渗流量之比)，实验结果如图7所示。由图可以看出，微生物在多孔介质渗流过程中，虽然微生物在矿石颗粒表面和孔隙中有一定的吸附，但在电场作用下，单位时间内微生物渗流量明显增大，即微生物在矿样模型中的渗流速度明显提高。作为电动渗流的驱动力，多孔介质中微生物渗流速度随电场强度的增加而递增。实验结果还表明，高渗透率矿样模型中的微生物渗流量比值高于低渗透率矿样模型。

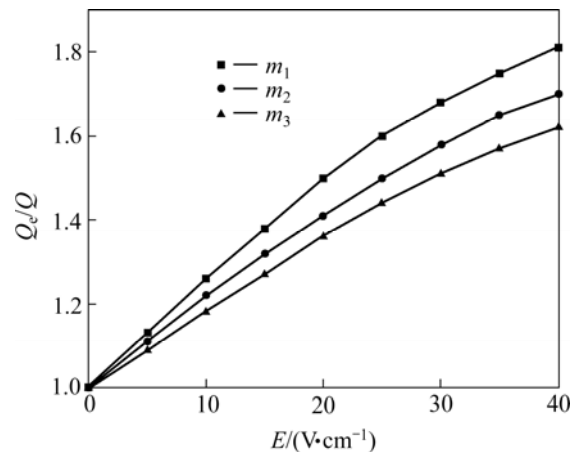


图7 微生物渗流量比 Q_e/Q 与电场强度 E 的变化曲线

Fig.7 Variety curves of microbe flow ratio Q_e/Q on electric intensity

这是由于在高渗透模型中，作用于微生物溶液上的电动能量大部分转化为流体的动能；而在低渗透模型中，电动能量部分由于克服溶液渗流阻力而损耗。

4 结 论

1) 电场作用对氧化亚铁硫杆菌生长代谢的影响非常明显，适当的电场作用可以有效地强化氧化亚铁硫杆菌的生长代谢能力。

2) 在低电流1~3 mA作用下，电场对氧化亚铁硫杆菌的生长速率基本没有影响；当电流为 6~25 mA 时，其生长速率明显提高；随着电流的继续升高至 35~100 mA，电场开始抑制氧化亚铁硫杆菌的生长代谢，在电流为200 mA时，氧化亚铁硫杆菌从第20 h 出现负增长。

3) 电场作用下，排土场孔隙中微生物的渗流速度及渗流能力明显增强；在高渗透率排土场中，微生物电动渗流效应尤为明显。

REFERENCES

- [1] 吴爱祥, 王洪江, 王 劫. 大型排土场细菌浸出新工艺[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(6): 1100-1107.
WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, WANG Jie. New techniques of bacterial leaching in large dump of copper mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(6): 1100-1107.
- [2] 王洪江. 大型铜矿排土场细菌强化浸出机理及新工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 6-20.

- WANG Hong-jiang. Study on the mechanism and new technology of bacterial accelerating leaching in large copper ore dump[D]. Changsha: Central South University, 2005: 6-20.
- [3] 雷光伦, 张智忠, 陈月明. 微生物渗流规律及能力研究[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(2): 148-155.
- LEI Guang-lun, ZHANG Zhi-zhong, CHEN Yue-ming. The transport ability and laws of microbe in oil reservoir[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(2): 148-155.
- [4] Chang M M, Chung F T. Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media[C]// SPE22845/66th Annual Technical Conference. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1991: 299-308.
- [5] 谷建伟, 刘彦卫. 微生物在多孔介质中渗流的数学模型[J]. 生物数学学报, 2003, 18(4): 423-426.
- GU Jian-wei, LI Yan-wei. The mathematical model of microbial seepage in porous media[J]. Journal of Biomathematics, 2003, 18(4): 423-426.
- [6] 闵小波, 柴立元, 钟海云. 氧化亚铁硫杆菌生长动力学参数[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 440-443.
- MIN Xiao-bo, CHAI Li-yuan, ZHONG Hai-yun. Kinetic parameters for growth of thiobacillus ferrooxidans[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 440-443.
- [7] QIU Guan-zhou, LIU Jian-she, HU Yue-hua. Electrochemical behavior of chalcopyrite in presence of thiobacillus ferrooxidans[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(1): 23-25.
- [8] 钟方丽, 曹宏斌, 李鑫钢. 外电场作用下的生物膜传质模型[J]. 吉林化工学院学报, 2003, 20(4): 59-61.
- ZHONG Fang-li, CAO Hong-bin, LI Xin-gang. Study on the model of mass transfer within biofilm under electric field[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2003, 20(4): 59-61.
- [9] Fan L S, Ramos R L, Wisecarver K D. Diffusion of phenol through a biofilm grown on activated carbon particles in a draft-tube three-phase fluidized-bed bioreactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1990, 35: 279-286.
- [10] Lewandowski Z, Webb D, Hamilton M. Quantifying biofilm structure[J]. Water Science and Technology, 1999, 39: 71-76.
- [11] Tong T Y. Electric activation of membrane enzyme enzymes[C]//First East Asian Symposium on Biophysics. Japan: The Biophysical Society of Japan, 1994: 39-42.
- [12] Costerton J W, Irvin R T, Cheng K J. The bacterial glycocalyx in nature and disease[J]. Annu Rev Microbiol, 1981, 35: 299-324.
- [13] Fox R T V, Sanson S. Lethal effects of an electrical field on *Armillaria mellea* in culture[J]. Mycological Research, 1996, 100(3): 318-320.
- [14] 张继红, 陈涛平. 流体在外加直流电场作用下的电动-水力渗流特性[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(3): 29-32.
- ZHANG Ji-hong, CHEN Tao-ping. The theoretical model of fluid-solid coupling seepage in low permeability reservoirs[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(3): 29-32.
- [15] 原海涵. 毛管理论在测井解释中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- YUAN Hai-han. Capillary theory applied in the explain of well[M]. Beijing: Oil Industry Press, 1995.

(编辑 李向群)