

研究论文

# 电场强化铜矿排土场氧气传质

左 恒<sup>1,2</sup>, 王贻明<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; <sup>2</sup> 台山市建筑工程质量检测站, 广东 台山 529200)

**摘要:** 在排土场微生物浸出过程中, 通过电场作用下的气泡受力分析和强化传质实验, 首次提出了利用电场强化氧气向溶浸液中传质过程的方法, 结果表明: 电场能够强化氧气向溶浸液中的传质过程, 而且效果和电场的强弱以及浸矿溶浸液的性质有关; 实验中所加电场强度和溶浸液浓度越高, 电场强化传质的效果越明显。传质速率的大小和传质系数、气泡大小、气泡在水中的运动、气液比以及气相氧气的质量浓度等因素有关。在强度为  $80 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$  的电场作用下, 和没有电场的情况相比, 总传质系数提高 28.2%。

**关键词:** 电场; 氧气; 传质; 气泡; 溶浸液; 铜矿排土场

中图分类号: TD 982

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 12-3001-05

## Enhancing mass transfer of oxygen in copper ore dump by electric field

ZUO Heng<sup>1,2</sup>, WANG Yiming<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

<sup>2</sup> Construction Engineering Quality Testing Station of Taishan, Taishan 529200, Guangdong, China)

**Abstract:** In the process of bioleaching of ore dump, a novel method for enhancing mass transfer of oxygen in leaching solution under electric field was put forward, and some experiments were performed to study its mechanism. The results showed that mass transfer could be enhanced by using electric field, and the effect of electric field on enhancing mass transfer was related to the strength of electric field and the properties of leaching solution. The higher the strength of electric field and the concentration of leaching solution, the more evident the effect of electric field. Mass transfer rate was affected by such factors as mass transfer coefficient, the size and movement of bubble, gas/liquid ratio and mass concentration of oxygen in gas phase. When the strength of electric field was  $80 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$ , total mass transfer coefficient would be 28.2% higher than that without electric field.

**Key words:** electric field; oxygen; mass transfer; bubble; leaching solution; copper ore dump

## 引 言

铜矿排土场微生物强化浸出是根据堆置浸出技术, 将氧气、溶浸液和浸矿微生物注入到排土场中, 有选择性地浸出排土场矿石中有益成分的新技术, 是当今铜矿资源二次利用中最为有效的方法<sup>[1]</sup>。浸出过程中, 由于氧气的溶解度不高, 溶浸

液中溶解氧质量浓度比较低, 实际做到氧气的高效传质, 达到比较高的溶解氧质量浓度是比较困难的<sup>[2]</sup>。氧气作为浸出化学反应的氧化剂和微生物生长繁殖的生长剂, 在浸出中起到非常重要的作用<sup>[3-4]</sup>。因此, 强化氧气在溶浸液中的传质, 意味着在较短的时间内可以达到较高的溶解氧质量浓度, 氧气和溶浸液接触的体积、条件将大为减少,

2007-03-16 收到初稿, 2007-07-14 收到修改稿。

联系人及第一作者: 左恒 (1976—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB619206)。

Received date: 2007-03-16.

Corresponding author: ZUO Heng. E-mail: csuzuoheng@163.com

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB19206).

供氧工艺费用大大降低<sup>[5]</sup>，进而可以达到矿石的高效浸出。

为强化浸出过程中氧气传质的效果，国内外学者对其进行了很多研究，在技术措施上采取休闲作业方式、松动爆破、控制段高来增强排土场中的氧气含量，收到一定效果，但没有从根本上解决问题<sup>[6-7]</sup>。研究指出，电场对于气液、混合液体系统有着非常明显的影响，电场作用可以有效地强化物质间的传质效果<sup>[8-10]</sup>。本文在铜矿排土场微生物强化浸出中，首次提出利用电场强化氧气向溶浸液传质的新方法，通过电场作用下的气泡受力理论分析和强化传质实验，研究了电场作用对氧气传质的影响。结果表明该方法可以有效增强氧气在溶浸液中的传质效果。

### 1 电场作用下的气泡受力分析

电场作用下，假设气液体系中溶浸液为各向同性的电介质体，气泡为球形。气泡表面在液体中受到表面张力、黏性力、电场力作用，而气泡整体受浮力、重力、介电电泳力作用，电场对两相系统中气泡的作用如图 1 所示。考虑到气泡内外电介质的介电常数不同，电场作用下，气泡表面有极化电荷产生。由于气泡界面内外电介质介电常数的变化趋势对于气泡的上下部正好相反，因此气泡的上部感应出正电荷，下部感应出负电荷，但总带电量为零。

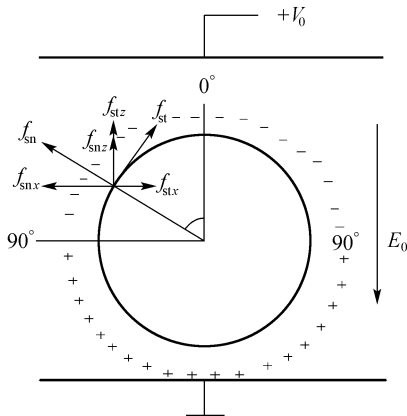


图 1 电场作用下气泡表面的电应力分布  
Fig. 1 Force distribution of bubble affected by electric field

根据电磁学理论，电场中的流体所受到的电场力  $f_e$  可写为<sup>[11]</sup>

$$\vec{f}_e = q\vec{E} - \frac{1}{2}E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right] \quad (1)$$

式中  $E$  为电场强度， $q$  为自由电荷密度， $\epsilon$  为溶浸液的介电常数， $\rho$  为溶浸液的质量密度。

根据 Gauss 定理，将式 (1) 表达成 Maxwell 应力张量形式为

$$\vec{f}_{sj} = \epsilon_j (\vec{n} \cdot \vec{E})_j \cdot \vec{E}_j - \frac{\epsilon_j}{2} E_j^2 \left( 1 - \frac{\rho}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{d\rho} \right)_j \vec{n}_j \quad (2)$$

式中 下角标  $j$  取  $l$  时表示为液相，取  $g$  时表示为气相； $s$  代表气液界面； $\vec{n}_j$  为各相的单位法向分量。

根据气泡界面上的边界条件： $\vec{n}_l = -\vec{n}_g$ ， $\vec{t}_l = -\vec{t}_g$  (其中  $\vec{t}_l$ 、 $\vec{t}_g$  分别为气、液两相切向分量)，则可以得到作用于气液界面的合力为<sup>[9]</sup>

$$\vec{f}_s = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_l (E_{ln}^2 - E_{lt}^2) - \epsilon_g (E_{gn}^2 - E_{gt}^2) + \rho_l E_l^2 \frac{d\epsilon_l}{d\rho_l} - \rho_g E_g^2 \frac{d\epsilon_g}{d\rho_g} \right] \vec{n}_l + (\epsilon_l E_{ln} E_{lt} - \epsilon_g E_{gn} E_{gt}) \vec{t}_l \quad (3)$$

由静电学理论<sup>[12]</sup> 可得两种不同介质界面的静电场边界条件为： $\epsilon_l E_{ln} - \epsilon_g E_{gn} = q_{es}$ ， $E_{lt} = E_{gt}$  (其中  $q_{es}$  为界面的极化电荷量)。根据气液介质的边界条件以及介质中的场强分布<sup>[13]</sup>，可得气液界面上法向电应力  $f_{sn}$  和切向电应力  $f_{st}$  分别为<sup>[9]</sup>

$$f_{sn} = \frac{9\epsilon_0 E_0^2}{2(2+X)^2} \left\{ \frac{(\epsilon_{rl} - 1)^2}{3} + \left[ \left( \frac{\epsilon_{rl}^2 + 4\epsilon_{rl} - 2}{3} \right) X^2 - \left( \frac{\epsilon_{rl}^2 - 2\epsilon_{rl} + 4}{3} \right) \right] \cos^2 \theta \right\} \quad (4)$$

$$f_{st} = \frac{9\epsilon_0 \epsilon_{rg} E_0^2}{(2+X)^2} (XY - 1) \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

式中  $\theta$  为气泡界面上的点所在半径同  $z$  轴的夹角； $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{rl}$  和  $\epsilon_{rg}$  分别为真空介电常数、液体相对介电常数和气体相对介电常数； $X$  为气、液电导率之比； $Y$  是液、气介电常数比值。

将法向和切向应力分别沿水平和垂直方向分解为  $f_{snx}$ 、 $f_{snz}$ 、 $f_{stx}$ 、 $f_{stz}$ ，如图 1 所示。

外电场力的作用使介质气泡由球形变成了沿电场方向的椭球形，电场力对气泡是产生拉伸作用还是产生压制作用，取决于电场分布以及电场方向，气泡受力变形如图 2 所示。

假设气液介质中与电场力抗衡的只有表面张力，而且气泡在临界破碎时仍保持球形，忽略重力及黏性力的影响，当达到临界破碎时，电场作用力应等于气泡表面张力。令气泡临界破碎电场强度为  $E_0$ ，由式 (3) ~ 式 (5) 计算可以得出，随着溶浸液介电常数增大，气泡的临界破碎电场变小，气泡越容易破碎；体系两相界面张力越大，电场中的气泡更趋稳定，气泡越难破碎；随着溶浸液溶液电导率和质量密度的升高，临界破碎电场减小，

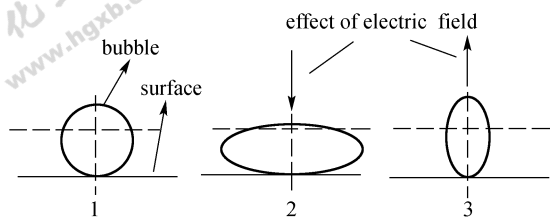


图 2 气泡受力变形图

Fig. 2 Diagram of bubble deformation affected by electric field

1—initial bubble; 2—pressed bubble; 3—drawn bubble

气泡越容易破碎；气泡直径越大，临界破碎电场减小。

## 2 方法和实验

实验系统示意图如图 3 所示。实验系统主要包括工业瓶装氧气、玻璃转子流量计、电场强化传质的气液混合装置和配套的电场实施装置。

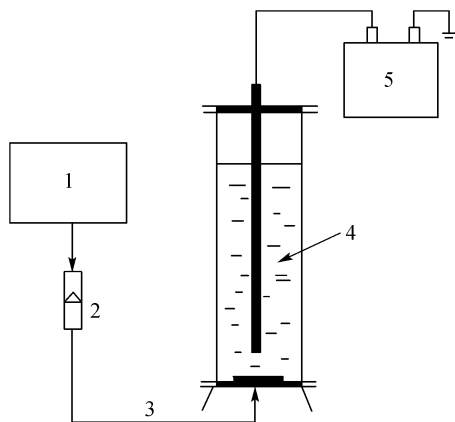


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of experimental system

1—oxygen; 2—glass rotor flowmeter;  
3—pipeline of gas; 4—enhancing set of gas/liquid by electric field; 5—electric field experiment

电场强化传质的气液混合实验装置由有机玻璃圆筒、鼓泡装置、微孔膜曝气器和电极等组成。有机玻璃圆筒的外径约 180 mm、内径为 160 mm、高 1.4 m，底部装有微孔膜曝气器；鼓泡装置中心轴线处有一个下端密封的玻璃芯管，在底部有有机玻璃的定位支撑架，顶部有固定中心电极的尼龙固定夹套，玻璃芯管外径 12 mm、内径 10 mm；玻璃管内预先灌溶浸液，有一段不锈钢丝浸入溶液中和工频变压器的高压端相连。气液混合系统处在高压电极和接地电极之间的电场中，因为有玻璃介

质阻挡，不会出现电解电流，对传质过程产生影响的是电场力作用。强化传质所使用的电源为工频变压电源，输出电源是直流电，输出电压最高峰值 12 kV。实验中，分别在施加不同强度的电场和不加电场的情况下，测量进出接触反应装置的气体中氧气的质量浓度，测试溶浸液氧气的质量浓度，考察电场作用对氧气向溶浸液的传质过程的影响。

电压测试采用 TK9415 脉冲电压探头；溶浸液中溶解氧质量浓度测试采用 YSI58 型数字溶解氧测量仪；进出气液混合装置的气相氧气质量浓度测试采用 XO-2000 型氧气测试仪。

利用上述实验装置，采用间歇批量方式进行实验。在实验中保持气体流量、压力稳定，氧气流量为  $2.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。每次实验保持气液混合装置中液位为 120 cm，实验溶浸液为 3 种低浓度硫酸溶液，浓度分别为： $L_1$   $196 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $L_2$   $294 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $L_3$   $490 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

实验 1 是在不同强度（0、53.3、80、106.7  $\text{V} \cdot \text{mm}^{-1}$ ）电场作用下，测定溶浸液 2 中氧气的质量浓度；实验 2 是在强度为  $80 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$  的电场作用下，测定不同溶浸液中氧气的质量浓度。

## 3 结果及讨论

### 3.1 电场作用对氧气向溶浸液传质的影响

在不同强度电场作用下，溶浸液 2 中氧气的质量浓度随时间变化的测试结果见图 4。相同时刻溶浸液中氧气质量浓度有很大不同，加电场后的各种情况均比不加电场时的质量浓度高，在强度为  $80 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$  的电场作用下，和没有电场的情况相比，总传质系数提高 28.2%，这表明电场作用能够有效增强氧气的传质效果。这是由于在电场力的作用下，气泡的动能增强，运动速度加快，气液的接触频率增大。当气泡受到足够大的电场力时，气泡破裂，形成很多小的气泡，气液界面的接触面积增加。在气液界面处，由于电场对带电的或极化的气泡的影响而使得气泡的流体动力学状态同无电场作用下相比发生改变，气泡在上升过程的平动之外，存在比较剧烈的旋转运动以及液体在气泡周围的表面流<sup>[14]</sup>，大大增强气液的接触。气液接触的增强，有利于气体在液体中传质的强化。虽然实际应用中流场内电场的总电压相当高，但电流很小，因此该方法所需要的电功耗低，可忽略不计。

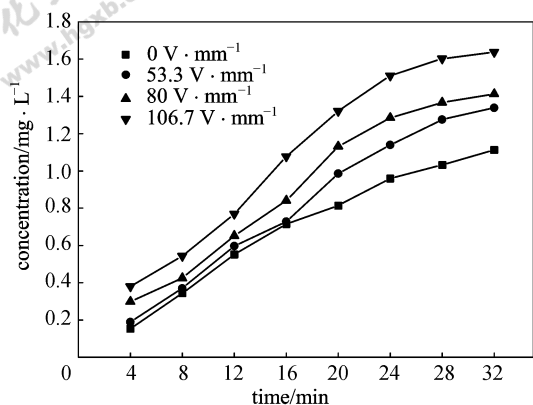


图 4 不同强度电场作用下溶浸液中氧气质量浓度随时间的变化

Fig. 4 Variety of concentration of oxygen in leaching solution with time by different electric field

### 3.2 溶浸液浓度对电场强化氧气传质的影响

强度为  $80 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$  的电场作用下, 不同溶浸液中氧气的质量浓度随时间变化的测试结果如图 5 所示。相同时刻不同浓度溶浸液中氧气质量浓度不同。溶浸液浓度高, 电场强化氧气向溶浸液中传质的效果更为明显。这是由于在不同的溶浸液中, 气泡表面受到的电场力大小不同; 溶浸液浓度越高, 溶浸液的介电常数越大, 液体同气体的相对介电常数之比越大, 气泡受到的电场力越大, 对气泡的变形产生的作用越明显, 从而更有利于传质的强化。

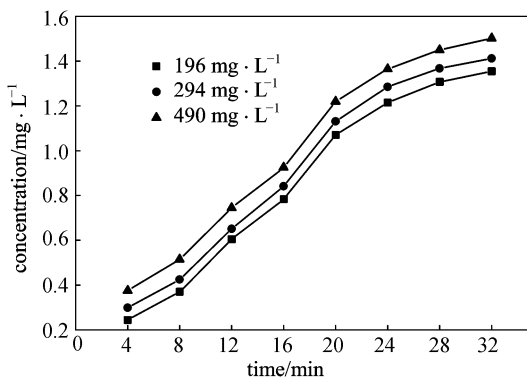


图 5 电场作用下不同溶浸液中氧气质量浓度随时间的变化

Fig. 5 Variety of concentration of oxygen in different leaching solution with time by electric field

## 4 电场作用下氧气的传质系数及传质速率

气液的传质能力可以通过总传质系数来评价, 因此可用不同实验条件下的总传质系数  $K_t$  来评价

电场的强化效果。根据气液传质理论<sup>[15]</sup>有

$$d\rho/dt = K_t(\rho^* - \rho) \quad (6)$$

式中  $d\rho/dt$  为单位体积的溶浸液在单位时间内所吸收的氧气质量, 称作氧气的传质速率  $R_c$ ;  $\rho^*$  为溶浸液氧气的饱和质量浓度;  $\rho$  为  $t$  时刻水中氧气的质量浓度。

由初始条件:  $t=0, \rho=0$ , 积分可得

$$\ln[(\rho^* - \rho)/\rho^*] = -K_t t \quad (7)$$

根据实验所得数据计算得到总传质系数  $K_t$ 。不同情况下的总传质系数  $K_t$  反映出电场强化氧气向溶浸液中的传质效果。

由于总传质系数  $K_t$  只反映传质的总效应, 为说明溶浸液中电场强化氧气传质的机制, 定义氧气向溶液中的传质速率  $R_c$  为<sup>[16]</sup>

$$R_c = K_t(\rho^* - \rho) = K_t(A/V)(\rho^* - \rho) \quad (8)$$

式中  $A$  为总的气液接触面积;  $V$  为接触装置的体积。式 (8) 反映了传质系数  $K_t$ 、接触面积  $A/V$  和传质推动力  $(\rho^* - \rho)$  三要素对传质过程的影响。为进一步分析电场强化传质的机理, 假设单位体积的气液接触面积为  $a$ , 则有

$$a = (V_a/v_b)(S_b/V_b) \quad (9)$$

式中  $V_a$  为液体单位截面的氧气气体送入量;  $v_b$  为气泡的运动速度;  $S_b$  为单个气泡的表面积;  $V_b$  为单个气泡的体积。根据亨利定律有  $\rho^* = \rho_G/H$ , 其中  $\rho_G$  为氧气的质量浓度,  $H$  为亨利常数, 可得传质速率为

$$R_c = K_t(V_a/v_b)(S_b/V_b)\left(\frac{\rho_G}{H} - \rho\right) \quad (10)$$

由式 (10) 可以看出, 传质速率  $R_c$  的大小和传质系数、气泡大小、气泡在溶浸液中的运动、气液比以及气相氧气的质量浓度等因素有关。

## 5 结 论

(1) 电场能够强化溶浸液中氧气的传质过程, 其强化传质效果和电场的强弱以及溶浸液的性质有关: 作用电场强度越高, 溶浸液浓度越大, 对于强化传质的效果越明显。虽然实际应用中流场内电场的总电压相当高, 但电流很小, 因此该方法所需要的电功耗低可忽略不计。

(2) 传质速率的大小和传质系数、气泡大小、气泡在水中的运动、气液比以及气相氧气的质量浓度等因素有关。

(3) 和传统的机械增强传质方法相比, 电强化

传质方法具有一些传统方法没有的优点。本文电场强化氧气传质过程的研究, 为铜矿排土场浸出过程中探求更有效的传质方法和达到更好的传质效果, 提供了新的途径和办法。初步的研究结果表明该方法有非常乐观的发展前景和应用价值。

## References

- [1] Wu Aixiang (吴爱祥), Wang Hongjiang (王洪江), Wang Jie (王劫). New techniques of bacterial leaching in large dump of copper mine. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2006, **16** (6): 1100-1107
- [2] Yue Jun (乐军), Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权), Luo Ling'ai (罗灵爱). Mass transfer in gas-liquid flow in microchannels. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (6): 1296-1303
- [3] Wang Hongjiang (王洪江), Wu Aixiang (吴爱祥), Luo Yizhong (罗一忠). Optimizing on meshwork of arranging drill in the tub-pouring leaching method in dump pit. *Journal of Hunan University of Science & Technology* (湖南科技大学学报), 2006, **20** (4): 1-5
- [4] Hofirex Z, Kerfoot D G E. The chemistry of the nickel copper matte leach and its application to process control and optimization. *Hydrometallurgy*, 1992, **29** (1/2/3): 357-364
- [5] Guo Ying (郭莹), Yuan Xigang (袁希钢), Zeng Aiwu (曾爱武), Yu Guocong (余国琮). Liquid mass transfer coefficient estimation for absorption based on measurement of concentration/velocity distributions. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (6): 1277-1283
- [6] Brierley C L. Bacterial succession in bioheap leaching. *Hydrometallurgy*, 2001, **59**: 249-256
- [7] Walter Krebs, Christoph Brombecher, Philipp P Bosshard, et al. Microbial recovery of metals from solid. *FEMS Microbiology Review*, 1997, **20**: 650-656
- [8] Liu Zhongyang (刘钟阳), Wu Yan (吴彦), Wang Ninghui (王宁会). Enhancement of mass transfer in  $O_3/H_2O$  contactor by electric field. *Chemical Engineering (化学工程)*, 2004, **32** (1): 52-55
- [9] Chen Feng (陈凤), Song Yaozu (宋耀祖), Chen Min (陈民). Analysis of the electric stresses acting on a bubble in electric field. *Journal of Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2005, **26** (suppl.): 146-148
- [10] Ptasiński K J, Kerckhof P J A M. Electric field driven separations: phenomena and applications. *Separation Science and Technology*, 1992, **27** (8/9): 995-1002
- [11] Panofsky W, Phillips M. Classical Electricity and Magnetism. Addison Wesley, trans. 2nd ed. London: Oxford University Press, 1962: 107-108
- [12] Yuan Changzhong (袁长忠), Xing Dingfeng (邢定峰), Yu Ying (俞英). Macroscopic kinetics of cathodic reaction in pilot-scale hydrogen production from indirect electrolysis of hydrogen sulfide. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (7): 1317-1321
- [13] Zaghoudi M C, Lallemand M. Study of the behaviour of a bubble in an electric field steady shape and local fluid motion. *International Journal of Thermal Science*, 2000, **39**: 39-45
- [14] Maximuk E P, Bologa M K. Some mechanisms of electric field influence on mass transfer processes in the gas-liquid system. *Journal of Electrostatics*, 1997, **40/41**: 663-669
- [15] Cheng Jiang (程江), Yang Zhuoru (杨卓如). Absorption and self decomposition of ozone in water. *Journal of South China University of Technology (华南理工大学学报)*, 1997, **25** (5): 77-81
- [16] Tang Hongbo (唐洪波), Zhang Mingqing (张敏卿), Lu Xueying (卢学英). Effect of electric field on vapor-liquid equilibrium. *Chemical Engineering (化学工程)*, 2001, **29** (4): 39-44