

电场作用提高排土场渗透性能的机理

左 恒, 王贻明, 陈学松, 江怀春

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 根据多孔介质中电动力学效应, 在排土场浸出过程中, 提出利用电场作用强化排土场渗透性能的方法, 通过机理分析探讨了电场作用对排土场渗透性能的影响。结果表明: 电场作用能有效降低双电层作用对排土场渗透率的影响; 在足够大的电场力作用下, 孔隙中双电层产生定向迁移, 双电层厚度减小, 排土场渗透率明显提高; 在低渗透排土场中, 排土场渗透率因数随电场强度增大而单调递增; 而在高渗透排土场中, 电场作用对排土场渗透率影响的幅度较小, 表明利用电场作用提高低渗透率排土场的渗透性能具有非常大的潜力。

关键词: 电场作用; 排土场; 溶浸液; 双电层; 渗透性能

中图分类号: TD 98

文献标识码: A

Mechanism of improving permeability in dump by effect of electric field

ZUO Heng, WANG Yi-ming, CHEN Xue-song, JIANG Huai-chun

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

Abstract: Based on electro-dynamic effect in porous media, the novel method for enhancement of permeability of dump in leaching process by effect of electric field was put forward, and the mechanism of the effect of electric field on the permeability of dump were introduced. The results show that the permeability of ore dump by electronic double layer can be depressed by effect of electric field. The thickness electronic double layer can be decreased by power of electric field large enough. The increment of permeability coefficient in low permeability dump is bigger than that in high permeability dump, showing that the potential is big to improve the permeability of dump with high clay content by effect of electric field.

Key words: effect of electric field; dump; leaching solution; electronic double layer; permeability

排土场微生物强化浸出是根据堆置浸出技术, 将溶浸液、氧气和微生物注入到排土场中, 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、环境友好及资源利用率高^[1-3]。随着矿产品消费量的不断上升, 矿产资源的开发力度也越来越大, 而开采条件较好的矿产资源逐渐枯竭, 露天排土场固体废弃物的开发利用就愈来愈重要, 微生物浸出技术在排土场中得到越来越广泛的应用^[4-6]。

在国内外金属矿山排土场的堆浸生产中, 由于排

土场孔隙形状复杂、堆体高度大、矿石粒度变化范围宽、泥质含量高和压实度高, 排土场普遍都存在渗透性能差和浸矿溶浸液渗流扩散能力过低的问题。排土场渗透性能的好坏是堆置浸出成败的关键工艺条件, 过低的渗透率导致浸矿溶浸液渗流扩散能力差和氧气传输困难, 而这恰恰又是制约排土场堆浸技术发展的主要因素^[7-9], 因此, 提高排土场渗透性能将有助于改善排土场矿石浸出率及缩短堆浸周期^[10-13]。

为了改善排土场的渗流性能, 国内外学者对其进

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2004CB619206); 国家科技创新群体资助项目(54321042); 国家杰出青年科学基金资助项目(50325415)

收稿日期: 2006-07-20; 修訂日期: 2006-11-28

通讯作者: 左 恒, 博士研究生; 电话: 0731-8830851; E-mail: cszuoheng@163.com

行了很多研究, 取得了一些研究成果, 开发了一些新技术^[14-16]。但对物理场作用强化排土场渗透性能的研究, 国内外关于这方面的研究至今报道较少。本文作者在大型金属矿排土场微生物强化浸出过程中, 根据多孔介质中流体的电动力学效应, 着重研究了电场作用对排土场渗透性能的影响。本研究以电场作用提高排土场渗透性能的机理研究为物理场作用强化排土场微生物浸出的进一步研究奠定基础。

1 排土场孔隙中的双电层特性

浸矿溶液流体在排土场孔隙渗流和扩散过程中, 溶液流体与矿石固体表面接触, 溶液的阴离子被吸附在矿石表面上, 由于正、负电荷的静电作用, 在被吸附表面附近形成剩余的阳离子分布, 这个吸附表面附近区域就形成双电层, 双电层模型如图 1 所示^[17-18]。由于范德华力和静电力的作用, 第一层阳离子被强束缚在吸附层表面, 构成双电层的紧密层。由于浓度差的影响, 在紧密层外的阳离子可以向流体本体扩散, 这样又形成双电层的扩散层。扩散层由静电作用力和浓差扩散所控制, 紧密层与扩散层间的界面称为剪切面^[19]。

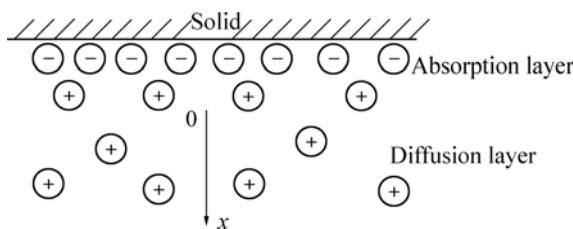


图 1 双电层模型

Fig.1 Model of electronic double layer

设溶液流体单元在排土场中以速度 v 运移距离 L , 定义毛细管的等效长度为 L_t , 则同样的溶液流体单元在毛细管中以平均流速 v_a 运移了距离 L_t , 二者的运移时间相同, 即 $L_t/v_a=L/v$ 。

根据毛细管中平均流速与达西定律的等价关系, 导出排土场渗透率 k 的表达式为

$$k = \frac{R^2 \phi}{8\tau^2} \quad (1)$$

式中 R 为毛管半径; ϕ 为孔隙度; τ 为迂曲度。

现引入一个多孔介质水力半径 R_h 来等效 R : $R_h=R/2$, 水力半径 R_h 可用孔隙度表示为

$$R_h = \frac{\phi D_p}{6(1-\phi)} \quad (2)$$

式中 D_p 为颗粒直径。

将式(2)代入式(1), 得

$$k = \frac{1}{72\tau^2} \frac{\phi^3 D_p^2}{(1-\phi)^2} \quad (3)$$

假设矿石颗粒表面有一厚度为 δ 的吸附双电层, 则其有效孔隙缩小(等于增大了有效颗粒直径), 其孔隙有效水力半径应为 $R'_h = R_h - \delta$, 等效颗粒直径为 $D'_p = D_p + 2\delta$, 则

$$R'_h = R_h - \delta = \frac{\phi'(D_p + 2\delta)}{6(1-\phi)} \quad (4)$$

式中 ϕ' 为考虑双电层厚度 δ 时的孔隙度。则可由下式确定:

$$\phi' = \frac{\phi D_p - 6(1-\phi)\delta}{D_p - 4(1-\phi)\delta} \quad (5)$$

由于双电层的存在, 排土场的实际渗透率 k' 为

$$k' = \frac{1}{72\tau^2} \left[\frac{\phi D_p - 6(1-\phi)\delta}{(1-\phi)} \right] \frac{\phi D_p - 6(1-\phi)\delta}{D_p - 4(1-\phi)\delta} \quad (6)$$

为了表示双电层厚度对排土场渗透率影响程度, 定义双电层作用下排土场渗透率因数 R_k 为

$$R_k = \frac{k}{k'} = \frac{\phi^3 D_p^2 [D_p - 4(1-\phi)\delta]}{[\phi D_p - 6(1-\phi)\delta]^2} \quad (7)$$

双电层厚度 δ 与矿石固体表面特性及溶液流体物性相关, 其取值范围大致为 1.44 nm~1.44 μm。依照排土场渗透率因数 R_k 与渗透率 k 的关系式, 绘制了排土场渗透率因数 R_k 与排土场渗透率 k 的关系曲线, 结果如图 2 所示。从图 2 中可看出, 排土场渗透率越低, 双电层厚度与绝对渗透率因数 R_k 的关系越明显。这表明, 在排土场微生物强化浸出过程中, 由于双电层的作用, 溶液在孔隙中的流通截面积减小, 排土场渗透率降低, 溶液对矿石的润湿作用明显下降。在泥质含量高的低渗透率排土场中, 双电层对渗透率的影响尤为明显。

研究表明^[20], 若双电层电荷分布是连续的, 则溶液中的电势分布可用 Poisson 公式描述。在静电平衡时, 为保持电中性, 固体表面上的电荷总量应该与液

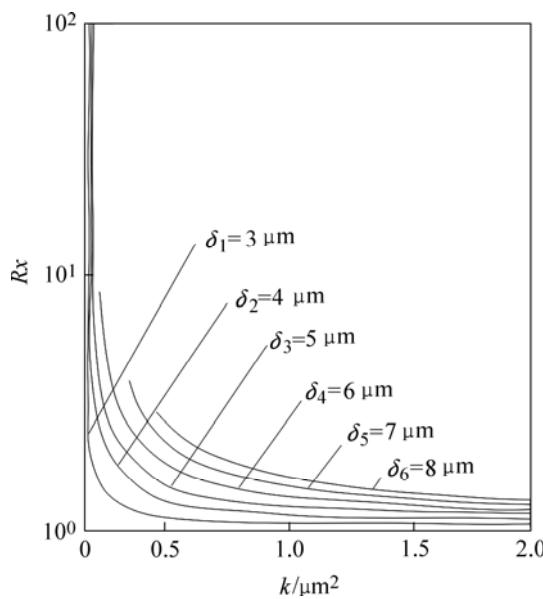
图 2 不同双电层作用时 R_k 与 k 的关系

Fig.2 Relationship between R_k and k by effect of different electronic double layers

相中的相等(符号相反), 由表面电荷密度与溶液体积电荷密度之间关系不难得出双电层表面电荷密度 σ_0 为

$$\sigma_0 = \frac{2\epsilon kT}{ze} \sinh(z\epsilon\varphi_0 / 2kT) \quad (8)$$

式中 ϵ 为流体的介电常数; z 为离子价数; e 为离子电荷量; T 为浸出温度; φ_0 为表面电势。

由此可见, 当多孔介质排土场中施加电场作用时, 双电层将受到电场力作用。当电场力足够大时, 双电层的扩散层将克服范德华力和静电力的作用, 在电场作用下作定向迁移。双电层厚度减小, 排土场的渗透率提高, 排土场孔隙中溶浸液流体的流通截面积增大, 进而提高了浸矿溶浸液在排土场中渗流扩散能力。

2 电场作用对排土场孔隙流体阻力系数的影响

流体阻力系数 $F_r = (dp/dx)_e / (dp/dx)_0$, 为度量浸矿溶浸液在孔隙中流动特性的重要参数, 式中 $(dp/dx)_e$ 和 $(dp/dx)_0$ 分别为有、无外加电场作用下的压力梯度。 F_r 与 v 的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 电场作用下, 流体阻力系数 $F_r \ll 1$, 在低流速下, F_r 出现负值, 说明此流速下水动力很小, 且用于克服渗流阻力的电动力消耗得很少, 主要是电动力在驱动孔隙中的流体,

因此当排土场中存在电场作用时, 电动力可以大幅度提高浸矿溶浸液渗流能力。而随着流速的增大, F_r 逐渐增大并趋于 1, 这表明随着流速增大, 渗流作用力以水动力为主, 电动力在其中占的比例逐渐减小。

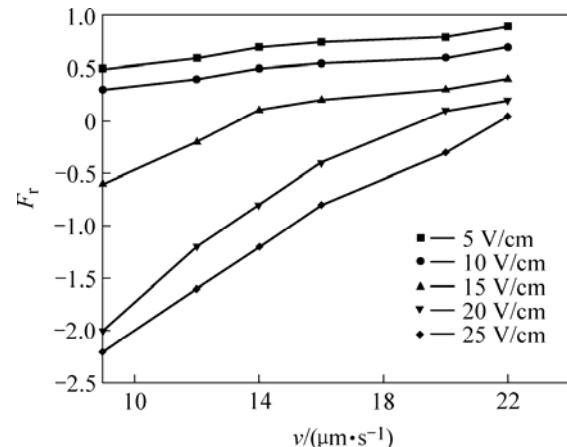
图 3 电场作用下 F_r 与 v 的关系

Fig.3 Relationship between F_r and v under effect of electric field

3 电场作用对排土场渗透率的影响

在排土场的两端施加电场作用, 使外加电场以电动力的形式作用于孔隙介质中的溶浸液流体, 其中一部分电动力转化为流体质点的动能, 加快流体在孔隙中流动; 另一部分电动力则为克服流体在渗流过程中的阻力而耗损。如果排土场的渗透率大, 则这部分耗损的电能越少, 相应地转化为流体动能的电能也越大。若不考虑其它因素的影响, 在电动渗流过程中, 阻力的大小实际上反映了孔隙渗透率的大小。如将电动力的损耗等效为水动力, 则电场作用下的排土场渗透率 k_e 可按下式计算:

$$k_e = \mu v_e / (dp/dx)_e \quad (9)$$

式中: v_e 为电动渗流速度; $(dp/dx)_e$ 为电动等效压力梯度。

定义电场作用下的排土场渗透率因数 R_{ke} 为

$$R_{ke} = k_e / k \quad (10)$$

式中 k 为排土场渗透率, 用实验蒸馏水通过矿样模型测得; R_{ke} 反映了在外加电场作用下, 排土场渗透率变化倍数。通过室内实验分析, 得出 R_{ke} 随外加电场强度 E 的普遍变化规律如图 4 和 5 所示。

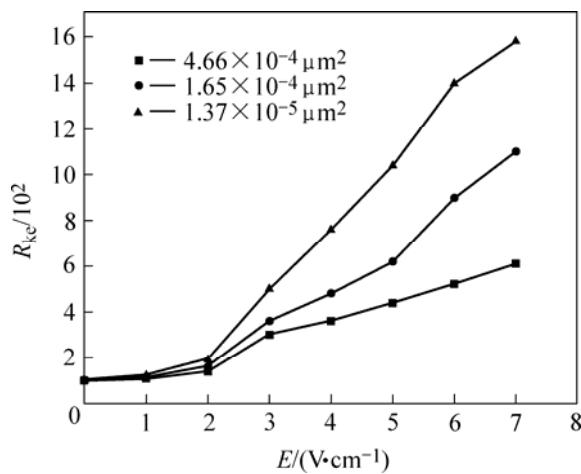


图 4 低渗透排土场渗透率因数与电场强度的关系

Fig.4 Relationship between permeability gene and intensity of electric field in low permeable ore dump

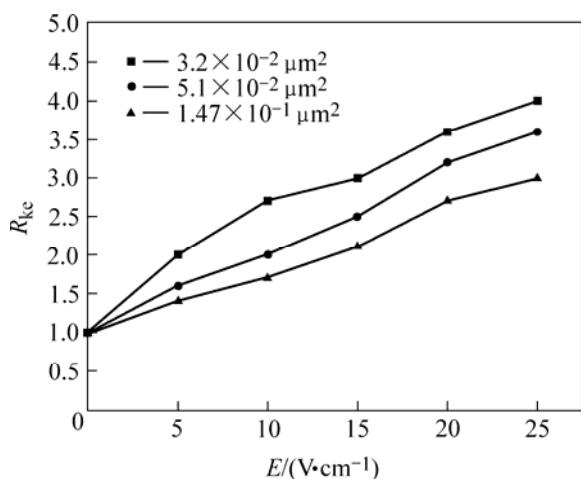


图 5 高渗透排土场渗透率因数与电场强度的关系

Fig.5 Relationship between permeability gene and intensity of electric field in high permeable ore dump

由图 4 可以看出，低渗透排土场在电场作用下的渗透率因数 R_{ke} 随电场强度 E 的增大而单调递增，且其值很大。例如在渗透率为 $1.37 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 矿样模型中，当电场强度为 5.0 V/cm 时， R_{ke} 增至 1 000，即在此强度电场作用下，该排土场的绝对渗透率提高了 1 000 倍。由图 5 可以看出，在渗透率高的排土场中，电场作用对排土场渗透率影响的幅度较小，这一点与前面的理论分析结果是一致的。由此可见，利用电场作用提高低渗透率排土场的渗透性能具有非常大的潜力。

4 结论

1) 浸出过程中，双电层对排土场渗透性能有非常明显的影响，在双电层作用下，溶浸液在排土场孔隙中的流通截面积减小，排土场的渗透率降低；在泥质含量高的低渗透排土场中，这种影响尤为明显。

2) 在足够大的电场力作用下，排土场孔隙中双电层产生定向迁移，双电层厚度减小，排土场渗透率明显提高。

3) 电场作用对排土场孔隙中溶浸液流体阻力系数的影响非常明显。

4) 在低渗透排土场中，排土场渗透率因数随电场强度增大而单调递增，且其值很大；而在高渗透排土场中，电场作用对排土场渗透率影响的幅度较小，这表明，利用电场作用提高低渗透率排土场的渗透性能具有非常大的潜力。

REFERENCES

- [1] 吴爱祥, 王洪江, 王 勒. 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] 邓 彤, 文 震, 刘 东. 硫酸介质中氯化物参与下氧化浸出铜渣过程[J]. 中国有色金属学报, 2002, 11(2): 302–306.
DENG Tong, WEN Zhen, LIU Dong. Leaching of copper residue with oxygen in sulfuric acid with participation of chloride[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 11(2): 302–306.
- [3] 邱廷省, 聂光华, 张 强. 含铜金矿的压力氧化浸出及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 2028–2033.
QIU Ting-sheng, NIE Guang-hua, ZHANG Qiang. Mechanism of oxidation and leaching for copper bearing goldores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(12): 2028–2033.
- [4] Hofirex Z, Kerfoot D G E. The chemistry of the nickel copper matte leach and Its application to process control and optimization[J]. Hydrometallurgy, 1992, 29(1/3): 357–381.
- [5] Grewal I, Dreisinger D B, Krueger D, Muir D M. Total oxidation leaching of Cu₂S containing residue at INCO Ltd copper refinery: Laboratory studies on the reaction path-ways[J]. Hydrometallurgy, 1992, 29(1/3): 319–333.
- [6] Deng T, Muir D. Selective copper removal from cupriferous gold concentrate[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1995, 5(1):

- 36–41.
- [7] 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.
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.
- [8] 邱贤德, 阎宗岭, 刘 立, 王 辉. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950–954.
QIU Xian-de, YAN Zong-ling, LIU Li, WANG Hui. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rock fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 950–954.
- [9] 徐天有, 张晓宏, 孟向一. 堆石体渗透规律的试验研究[J]. 水利学报, 1998(1): 80–83.
XU Tian-you, ZHANG Xiao-hong, MENG Xiang-yi. Analysis on seepage property of rock fill mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(1): 80–83.
- [10] 浸矿技术委员会. 浸矿技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1994: 5–10.
Committee of Solution Mining. The Technique of Solution Mining[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994: 5–10.
- [11] 吴爱祥, 尹升华, 王洪江. 堆浸过程溶质运移机理与模型[J]. 中南大学学报, 2006, 37(2): 385–389.
WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, WANG Hong-jiang. Solute transport mechanism and model of dump leaching[J]. Journal of Center South University, 2006, 37(2): 385–389.
- [12] 李青松, 吴爱祥, 姜立春. 堆中布液浸出高泥矿堆的机理研究[J]. 矿冶工程, 2003, 23(2): 23–26.
LI Qing-song, WU Ai-xiang, JIANG Li-chun. Study on the mechanism of heap-leaching of high-clay ore heaps with heap inside solution distribution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003, 23(2): 23–26.
- [13] 吴爱祥, 李青松, 尹升华. 改善高泥矿堆渗透性的机理研究 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(4): 1–5.
WU Ai-xiang, LI Qing-song, YIN Sheng-hua. Study on the mechanism of improving the penetrability of the high-clay ore heaps[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18(4): 1–5.
- [14] 王洪江, 吴爱祥, 刘金枝. 排土场浸出过程中的渗流规律[J]. 中南大学学报, 2006, 37(2): 390–395.
WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, LIU Jin-zhi. Seepage rule during leaching in dump[J]. Journal of Center South University, 2006, 37(2): 390–395.
- [15] Brierley C L. Bacterial succession in bioheap leaching[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 249–255.
- [16] Wan R Y, Levier K M. Solution chemistry factors for gold thiosulfate heap leaching[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1/4): 311–318.
- [17] Kostoglou M, Konstandopoulos A G. Evolution of aggregate size and fractal dimension during Brownian coagulation[J]. J Aerosol Sci, 2001, 32(12): 1399–1460.
- [18] 蒋 新. 扩散双电层作用下的胶体粒子聚集过程模拟[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(1): 33–37.
JIANG Xin. Simulation of colloidal particles aggregation in presence of diffuse double layer[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2004, 18(1): 33–37.
- [19] Pride S R, Morgan F D. Electrokinetic dissipation induced by seismic waves. Geophysics, 1991, 56(7): 914–925.
- [20] 洪世铎. 油藏物理基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 43–46.
HONG Shi-duo. Foundation of Physical in Oil[M]. Beijing: Oil Industry Press, 1985: 43–46.

(编辑 李艳红)