

# 地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性影响的研究

左 恒, 吴爱祥, 王贻明, 江怀春

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 根据原地浸出过程中裂隙岩块中溶浸液渗流性质受地电场作用影响的特点, 建立电场作用下裂隙岩块的电动渗流模型, 并通过电动渗流实验研究地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性的影响。研究表明, 地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性影响非常明显, 裂隙岩块中溶浸液的电动渗流特性与地电场强度、岩块渗透率和溶浸液流体性质等因素密切相关。在同等压力梯度下, 受地电场作用的裂隙岩块中溶浸液渗流速度随正向电场强度增加明显增大, 随反向电场强度增加明显减小; 地电场能够强化或者减弱裂隙岩块中溶浸液的渗流扩散能力和溶浸液对岩块的润湿作用。

**关键词:** 岩石力学; 地电场; 溶浸液; 渗流特性; 原地浸出

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)05 - 0972 - 05

## STUDY ON EFFECT OF GEOELECTRIC FIELD ON SEEPAGE PROPERTIES OF LEACHING SOLUTION IN FRACTURED ROCK BLOCK

ZUO Heng, WU Aixiang, WANG Yiming, JIANG Huaichun

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

**Abstract:** According to the properties of influences of geoelectric field on solution seepage, a model of electro-dynamic seepage has been established; and the influences have been investigated through experiments. The results indicate that it is obvious that the geoelectric field affects the seepage properties; and the electro-dynamic seepage properties are affected by factors such as the intensity of geoelectric field, the permeability of rock mass, the characters of leaching solution and so on. Under the same pressure gradient, the seepage velocity of leaching solution well increases with the intensity of positive electric field, and decreases with the negative electric field. The seepage diffusibility of leaching solution and its wetting ability to fractured rock mass can be enhanced or weakened by the electric field.

**Key words:** rock mechanics; geoelectric field; leaching solution; seepage property; in-situ leaching

## 1 引言

原地浸出是根据物理化学原理和化学工艺, 将溶浸液、气体和微生物通过钻孔注入天然埋藏条件下的矿体中, 有选择性地溶解、浸出和回收矿石岩块中有益组分的一种采矿方法。随着高品位、易选矿床资源的日益枯竭, 该技术已逐渐发展成为一种

回收品位低、复杂、难处理的矿产资源重要手段, 在国内外广泛应用于铜、金、银、铀等矿山<sup>[1]</sup>。浸出过程中, 溶浸液在裂隙岩块中的渗流性质是决定浸出效果最为关键的因素<sup>[2]</sup>, 矿石岩块是受结构面纵横切割、具有一定结构的多裂隙体, 同时赋存于一定的地质环境中。因此, 溶浸液运移、渗流扩散以及浸润不仅与裂隙岩块的性质相关, 而且还将受到地质环境的影响<sup>[3]</sup>。

**收稿日期:** 2006 - 09 - 27; **修回日期:** 2007 - 01 - 08

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB619206); 国家创新群体项目(50321402); 国家杰出青年科学基金资助项目(50325415)

**作者简介:** 左 恒(1976 -), 男, 1999年毕业于中南工业大学应用地球物理专业, 现为博士研究生, 主要从事溶浸采矿和地电场理论与实践方面的研究工作。E-mail: csuzuoheng@163.com

在采矿界, 通常将地层中的地电场、地应力场和地温度场统称为地球物理场<sup>[4]</sup>。受岩块结构、地应力场以及地温度场等诸多因素影响的裂隙岩块中渗流特性的研究已有不少成果<sup>[5~13]</sup>, 但对于地电场作用下裂隙岩块中溶液渗流特性的研究, 国内外在这方面的研究成果至今鲜见报道。地电场作为地球物理场的主要部分, 对于地层中的某些物质, 其作用是非常明显的<sup>[14~17]</sup>。地电场和地下渗流场是岩体物理力学环境中的重要组成部分, 裂隙岩块渗流受电场的影响, 而渗流场的改变也会对电场产生影响, 两者产生相互影响的耦合作用<sup>[18~20]</sup>。因此, 研究地电场作用对裂隙岩块中浸矿溶浸液渗流特性的影响, 有助于更全面了解溶浸液在岩块中的渗流、扩散和浸润等规律, 对于促进原地浸出采矿技术的发展具有重要意义。

本文通过建立电场作用下裂隙岩块中的电动渗流模型和矿石岩芯的电动渗流实验, 研究了地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性的影响。

## 2 地电场作用下裂隙岩块的电动渗流模型

电动渗流效应指多孔介质中的液体在电场作用下所产生的渗流现象, 其机制可定性解释为液体中的带电粒子, 尤其是液-固界面上双电层中的带电粒子在电场作用下的定向移动。利用岩体裂隙毛管理论可建立地电场作用下的毛管电动渗流物理模型(见图 1), 并假设<sup>[21, 22]</sup>: (1) 在孔隙很小的毛管中, 荷电粒子运移速度不太大, 所以液体在毛管中流动为层流; (2) 忽略孔隙壁的静电作用, 毛管内荷电粒子的分布不受面电荷的影响, 其体电荷密度是均匀的; (3) 忽略带电粒子间的相互作用; (4) 液体中的荷电粒子团除受电场力作用外, 主要受液体的黏滞力作用。

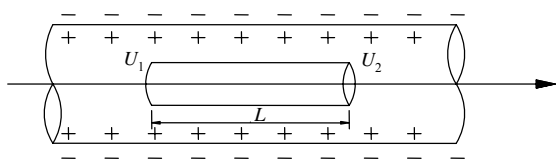


图 1 毛管电动渗流物理模型

Fig.1 Physical model of electro-dynamic seepage in capillary

多孔介质中液体流动遵循达西定律<sup>[23]</sup>, 可以将其用矢量来表示如下:

$$\vec{v}_h = L_1 \text{grad}H \quad (1)$$

式中:  $\vec{v}_h$  为渗流速度;  $H$  为总水头, 即位置水头和压力水头之和;  $L_1$  为与介质渗透率  $k$  和黏滞阻力  $\mu$  有关的比例常数。

L. Casagrand<sup>[24]</sup>的研究结果表明, 在多孔介质中, 由电力梯度产生的液体流动同样遵循达西定律形式, 即

$$\vec{v}_e = L_2 \text{grad}U \quad (2)$$

式中:  $\vec{v}_e$  为电渗流速度;  $U$  为实用电压;  $L_2$  为与溶浸液流体电导率、介电常数、 $\xi$  电势以及体电荷密度  $\rho_e$  等有关的比例常数。

将水力梯度和电力梯度下的液体流动方程联合起来可以得到裂隙岩块的电动渗流方程为

$$\vec{v} = L_1 \text{grad}H + L_2 \text{grad}U \quad (3)$$

因此, 在原地浸出过程中, 溶浸液在矿石岩块中的运动主要在以下几种因素的影响下完成: (1) 重力; (2) 流体的外部压力; (3) 水-空气界面上的毛细管力; (4) 水-矿物界面上的吸附力; (5) 溶液浓度差的渗透力; (6) 温度梯度; (7) 气体和蒸汽的压力; (8) 蒸发; (9) 引起水电渗运动的地下电流。

## 3 方法及实验

实验矿样取自江西德兴铜矿的硫化铜矿石, 矿石加工制成 2 组直径为 20 mm、高 100 mm 的圆柱状铜矿石岩芯模型  $m_1$ ,  $m_2$  和  $m_3$ , 每组实验的岩芯模型为 3 个。

矿石岩芯的裂隙是指位于两个近似平行的平面之间、破坏固体完整性的空隙。3 组实验岩芯中的裂隙较为发达, 按位置可分为与矿块表面无关的裂隙、与矿块表面有关的裂隙以及改变矿块表面的裂隙三类。岩芯裂隙由微裂隙和穿透裂隙组成。微裂隙与岩芯表面没有联系, 其长度不超过岩芯的大小, 是局限范围内的裂隙。穿透裂隙延伸到岩芯表面, 穿透岩芯, 裂隙形态复杂, 正是这些与岩芯表面相连的裂隙为溶浸液沿岩块表面及内部迅速分布创造了有利条件。

将岩芯模型抽空后, 用实验用水测量岩芯孔隙体积, 计算岩芯渗透率, 分别测得岩芯模型  $m_1$  的渗透率  $k_1 = 7.65 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ , 岩芯模型  $m_2$  的渗透率为  $k_2 = 4.84 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ , 岩芯模型  $m_3$  的渗透率  $k_3 = 1.68 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 。

实验系统主要由流体渗流实验装置和电场实施装置两大部分组成(见图 2)。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。实验

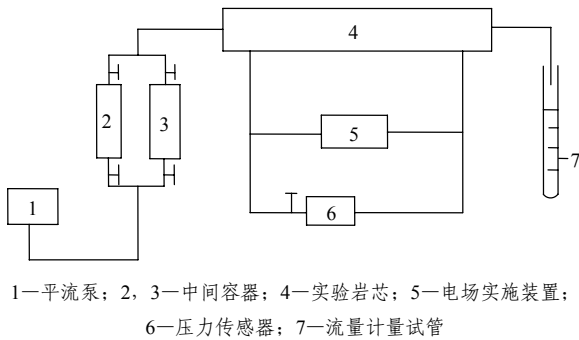


图 2 电场作用下多孔介质中渗流实验

Fig.2 Seepage experiment in porous media by effect of electric field

溶浸液为低浓度硫酸溶液，岩芯模型  $m_1$ 、 $m_2$  和  $m_3$  的溶浸液浓度分别为： $L_1=196\text{ mg/L}$ ， $L_2=294\text{ mg/L}$ ， $L_3=490\text{ mg/L}$ 。

溶浸液浸润岩块的过程是从溶液进入其表面开始的，溶浸液与岩块的接触方式可以分为多种。对于绝大部分岩块来说，浸润和散流都进行得比较充分，浸润不仅表现在散流上，而且也表现在靠近孔隙表面部分的浸透和毛细管裂隙中球状弯月面的形成上。在岩块表面浸润的同时，溶浸液沿裂隙和矿物孔隙涌入岩块内部，由于毛细管作用，溶浸液进入裂隙空间及距离很近的岩块表面间的自由空间。

进行电场作用下溶浸液电动渗流实验时，先将实验流体装入中间容器，岩芯模型放入岩芯夹持器中，安装好相应的阀门及管线；然后将饱和溶浸液的岩芯分别做不加电和外加正、反向电场的渗流实验，记录压力和流出的溶浸液流量随时间的变化。

实验过程中用正向和反向电场模拟地电场，指定与溶浸液流向同向的电场为正向电场，反之为反向电场。实验 1 是在一个大小不变的正向和反向电场作用下，测定在不同压力梯度溶浸液浓度为  $L_3$  时在岩芯模型  $m_2$  中的渗流速度；实验 2 是在保持进、出口的流体压力不变的条件下，依次在岩芯模型  $m_1$ 、 $m_2$  和  $m_3$  两端的电极板上施加不同强度的正向电场，测定在不同强度电场作用下的溶浸液  $L_3$  渗流量比值；实验 3 是在保持进、出口的流体压力不变的条件下，测定不同强度正向电场作用下，溶浸液浓度为  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  时在岩芯模型  $m_3$  中的渗流速度。

实验过程中要保持岩芯模型两端接触紧密、不漏液和岩芯模型不张裂。

## 4 实验结果分析

### 4.1 地电场对溶浸液渗流速度的影响

实验中，溶浸液渗流速度是岩芯断面上单位时间流过的流体量，即  $V = Q/A$ ，流体压力梯度是岩芯两端面压力差  $(P_1 - P_2)$  与试件长度  $L$  的比值，即  $(P_1 - P_2)/L$ 。图 3、4 分别给出了岩芯模型  $m_2$  在正向和反向电场作用下溶浸液渗流速度与流体压力梯度的关系曲线。

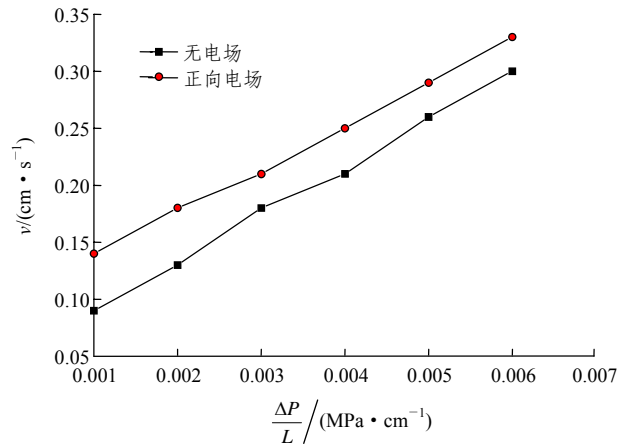


图 3 正向电场作用下溶浸液渗流速度与流体压力梯度的关系曲线

Fig.3 Relation curves of seepage velocity and pressure under effect of positive electric field

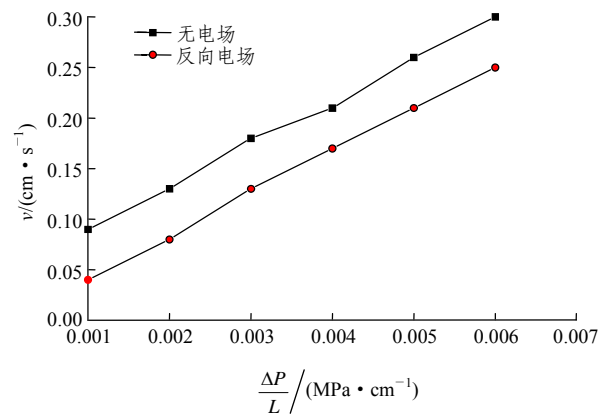


图 4 反向电场作用下溶浸液渗流速度与流体压力梯度的关系曲线

Fig.4 Relation curves of seepage velocity and pressure under effect of negative electric field

从实测点的变化趋势来看，溶浸液渗流速度随流体压力梯度的增加而增大，且基本成线性增加，即

$$v = k(\Delta P / L) \tag{4}$$

式(4)说明溶浸液在多孔介质岩芯模型中的渗流符合达西定律。实验 1 的结果也表明，相同液体压力梯度下，正向电场作用下溶浸液渗流速度大于

无电场时的溶浸液渗流速度; 反向电场作用下溶浸液渗流速度小于无电场时的溶浸液渗流速度。这也说明, 正向电场作用下溶浸液在岩芯中的渗流速度提高了, 即等效于岩芯的渗透率增大, 正向电场作用下岩芯的渗透率  $k_e$  大于无电场时岩芯的渗透率  $k$ ; 反向电场作用下, 溶浸液在岩芯中的渗流速度降低了, 即等效于岩芯的渗透率减小。因此, 地电场为正向电场时, 地电场的作用能够有效强化裂隙岩块中溶浸液的渗流扩散能力和溶浸液对岩块的润湿作用。

### 4.2 地电场电动渗流与岩芯渗透率的关系

实验 2 的结果如图 5 所示, 图中给出了岩芯模型  $m_1$ ,  $m_2$  和  $m_3$  在正向电场作用和无电场两种情况下的溶浸液渗流量比  $Q_e/Q$  与电场强度  $E$  的关系曲线。从图 5 中可以看出,  $Q_e/Q$  随  $E$  的增大基本呈线性增加; 在相同电场强度下, 渗透率大的岩芯渗流量比值大, 这是由于在高渗透岩芯中, 作用于溶浸液上的电动能量大部分转化为流体的动能, 而在低渗透岩芯中, 电动能量大部分因克服流体渗流阻力而损耗的缘故。

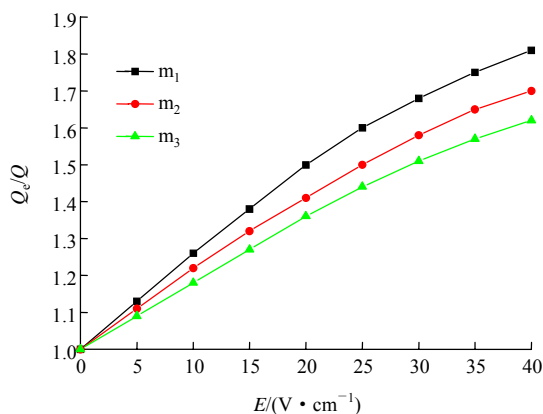


图 5 溶浸液流量比  $Q_e/Q$  与电场强度  $E$  的关系曲线

Fig.5 Relation curves of leaching solution flow ratio  $Q_e/Q$  and electric field strength  $E$

### 4.3 地电场电动渗流与溶浸液浓度的关系

地电场作用下, 不同浓度的溶浸液在岩芯模型  $m_2$  中溶浸液渗流速度与电场强度  $E$  的关系曲线见图 6。从图 6 中可以看出, 注入溶浸液浓度越高, 地电场作用下的渗流效应越明显, 这是比较容易理解的, 因为溶浸液浓度越高, 液体中的离子浓度越大, 其电动力学效应就越明显, 如果不考虑其他电物理和电化学效应, 地电场对裂隙岩块中高浓度溶浸液渗流特性影响更为明显。

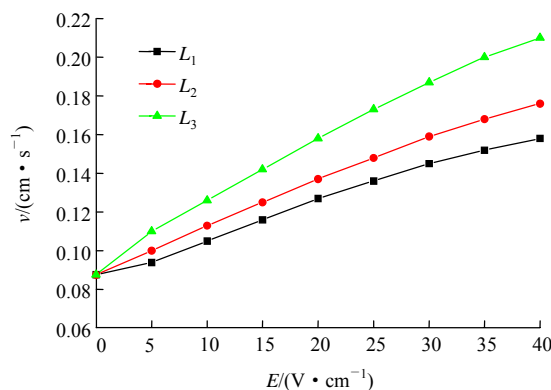


图 6 溶浸液渗流速度与电场强度  $E$  的关系曲线

Fig.6 Relation curves of leaching solution seepage velocity and electric field strength  $E$

## 5 结 论

本文通过电场作用下岩芯中的溶浸液渗流实验, 分析了原地浸出过程中地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性的影响, 结果表明:

(1) 原地浸出过程中裂隙岩块中溶液的渗流不但取决于溶液水力梯度作用, 还将受到地电场作用的影响, 其渗流速度按式(3)计算。

(2) 地电场对裂隙岩块中溶液渗流特性的影响非常明显, 在同等流体压力梯度下, 地电场作用下裂隙岩块中溶浸液渗流速度随正向电场强度增加明显增大, 随反向电场强度增加明显减小; 地电场作用能够有效强化或者减弱裂隙岩块中溶浸液的渗流扩散能力和溶浸液对岩块的润湿作用。

(3) 岩块渗透率越高, 地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流性质影响越明显。

(4) 溶浸液浓度越高, 地电场作用下裂隙岩块中溶浸液的电动渗流效应越明显。

### 参考文献(References):

[1] 浸矿技术委员会. 浸矿技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1994. (Committee of Solution Mining. The technique of solution mining[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994.(in Chinese))

[2] 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 Hongjiang, WU Aixiang, LIU Jinzhi. Seepage rule during leaching in dump[J]. Journal of Central South University, 2006, 37(2): 390 - 395.(in Chinese))

[3] 殷黎明, 杨春和, 王贵宾, 等. 地应力对裂隙岩体渗流特性影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 071 - 3 075.(YIN Liming, YANG Chunhe, WANG Guibin, et al. Study on effect of geostress on permeability of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 071 - 3 075.(in Chinese))
- [4] KELAYEFU A T T. Questions of physical geography[M]. [S. l.]: [s. n.], 1963.
- [5] 张文杰, 周创兵, 李俊平, 等. 裂隙岩体渗流特性物模实验研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 517 - 1 524.(ZHANG Wenjie, ZHOU Chuangbing, LI Junping, et al. Research progress of experimental study on seepage characteristic of fractured rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 517 - 1 524.(in Chinese))
- [6] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19 - 24.(SU Baoyu, ZHAN Meili, ZHAO Jian. Study on fracture seepage in the imitative nature rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 19 - 24.(in Chinese))
- [7] 耿克勤, 陈凤翔, 刘光廷, 等. 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(1): 102 - 106.(GENG Keqin, CHEN Fengxiang, LIU Guangting, et al. Experimental research on hydraulic properties of seepage flow in fracture[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1996, 36(1): 102 - 106.(in Chinese))
- [8] CHEN Z, NARAYAN S P, YANG Z. An experimental investigation on hydraulic behavior of fractures and joints in granitic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(8): 1 061 - 1 071.
- [9] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 651 - 1 655.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FU Shaolan. Study on seepage characteristics of a single rock fracture under shear stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 651 - 1 655.(in Chinese))
- [10] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FU Shaolan. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(in Chinese))
- [11] 杨春和, 王贵宾, 王 驹, 等. 甘肃北山预选区岩体力学与渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 815 - 822.(YANG Chunhe, WANG Guibin, WANG Ju, et al. Study on rock mass mechanics and seepage characteristics of candidate site—Beishan, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 815 - 822.(in Chinese))
- [12] 黄 涛. 裂隙岩体渗流 - 应力 - 温度耦合作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 77 - 82.(HUANG Tao. Coupling study among seepage-stress-temperature in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 77 - 82.(in Chinese))
- [13] 陈 波, 李 宁, 嵇瑞花. 多孔介质的变形场 - 渗流场 - 温度场耦合有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 467 - 472.(CHEN Bo, LI Ning, ZHUO Ruihua. Finite element analysis of fully coupled thermo-hydro-mechanic behavior of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 467 - 472.(in Chinese))
- [14] GOVETT G J S. Soil conductives assessment of an electric-chemical technique[M]. [S. l.]: [s. n.], 1974: 176 - 188.
- [15] 孙正江, 王华俊. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社, 1984: 3 - 18.(SUN Zhengjiang, WANG Huajun. Geoelectric conspectus[M]. Beijing: Earthquake Press, 1984: 3 - 18.(in Chinese))
- [16] 张云琳. 大地电场临震突变异常形态的初步研究[J]. 西北地震学报, 1980, 2(4): 50 - 54.(ZHANG Yunlin. A preliminary study on the features of abrupt anomalous change of the electrotelluric field[J]. Northwestern Seismological Journal, 1980, 2(4): 50 - 54.(in Chinese))
- [17] 毛桐恩, 席继楼, 王燕琼, 等. 地震过程中的大地电场变化特征[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 520 - 528.(MAO Tong'en, XI Jilou, WANG Yanqiong, et al. The variation characteristics of the telluric field in the process of earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(4): 520 - 528.(in Chinese))
- [18] 王宏图, 李晓红, 鲜学福, 等. 地电场作用下煤中甲烷气体渗流性质的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 303 - 305.(WANG Hongtu, LI Xiaohong, XIAN Xuefu, et al. Testing study on seepage properties of methane gas in coal under the action of geoelectric field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 303 - 305.(in Chinese))
- [19] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地球物理场中煤层瓦斯渗流方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 644 - 646.(WANG Hongtu, DU Yungui, XIAN Xuefu, et al. Seepage equation of coalbed gas in geophysical field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 644 - 646.(in Chinese))
- [20] 杜云贵. 地物场中煤层瓦斯渗流特性及瓦斯涌出[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 1995.(DU Yungui. Coal gas seepage properties and gas flood in physical geography field[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 1995.(in Chinese))
- [21] 张继红, 岳湘安, 陈喜玲, 等. 直流电场下油藏多孔介质中渗流特性的变化[J]. 高压电技术, 2005, 31(5): 44 - 46.(ZHANG Jihong, YUE Xiang'an, CHEN Xiling, et al. Variation of seepage flow characteristics in porous media of water drive reservoir in DC electric field[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 44 - 46.(in Chinese))
- [22] 张继红, 陈涛平, 李跃辉, 等. 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): 33 - 36.(ZHANG Jihong, CHEN Taoping, LI Yuehui, et al. The electrohydraulic seepage behavior of the fluid under applied DC electric field[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(3): 33 - 36.(in Chinese))
- [23] LEWIS R W, HTUILPHESON C. Numerical analysis of electro-osmotic flow in soil[J]. Journal of the Soil Mechanic and Foundations Division, ASCE, 1973, 99(SM8): 603 - 616.
- [24] CASAGRANDE L. Electro-osmosis and related Phenomena[C]// Harvard Soil Mechaiucs Series. No 66. Cambridge: [s. n.], 1962: 109 - 200.