

文章编号:0253-9993(2013)01-0050-05

煤层围岩破裂过程中的自然电位响应

吴超凡^{1,2},刘盛东^{2,3},杨胜伦⁴,路拓³,王勃³

(1. 龙岩学院 资源工程系,福建 龙岩 364012;2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221008;3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221008;4. 安徽惠洲地质灾害研究设计院,安徽 合肥 230088)

摘要:煤层开采过程中,围岩破裂伴有电子逃逸现象,引起自然电场的变化。通过建立数值模型与设计岩层开采模拟实验,发现岩层裂隙发育部位自然电位降低,且裂隙发育越完全电位越低;岩层压缩区自然电位升高。煤矿开采过程实际监测发现:在煤层顶板“三带”中,垮落带自然电位低,且变化比较稳定;断裂带自然电位表现较为不稳定,变化频繁;弯曲下沉带表现为高电位,且极为稳定,变化较小。

关键词:围岩破裂;自然电位;电法勘探

中图分类号:P631.3 **文献标志码:**A

Natural potential response during the coal rock failure process

WU Chao-fan^{1,2}, LIU Sheng-dong^{2,3}, YANG Sheng-lun⁴, LU Tuo³, WANG Bo³

(1. School of Resource Engineering, Longyan University, Longyan 364012, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Anhui Huizhou Institute of Subterranean Calamity, Hefei 230088, China)

Abstract: In wall rock failure process, the electronic escape phenomenon normally occurs, which causes the change of the natural electric field in the coal rock. Through the establishment of a numerical model and design of a rock mining simulation experiment, the authors found the natural electrical potential of rock at crack development site is reduced, and it is much lower with a full fracture development, while the natural electrical potential increases at rock compression area. The findings in the monitoring in coal mine mining demonstrate that in the three zones of seam roof, the natural electrical potential is low and stable at caving zone; more unstable and frequent alternation at crack development zone; high, stable and less changes at bending sink zone. Natural electrical potential alternation plays a guiding role and has practical significance for determining the fracture development level and scope of fracture zones at coal seam floor and roof.

Key words: rock failure; natural potential; electrical detection

在自然条件下,不需向地下供电,地面两点间能观测到一定的电位差,这表明地下存在着天然电流场,简称自然电场^[1]。自然电场主要是因为电子导电矿体的电化学反应以及地下水中电离子的过滤或扩散作用等因素形成^[2]。自然电位测量法是一种传统的地电场勘探方法,能敏感地反映地电场中异常电荷变化。在采矿、石油开采、水文地质、考古、地热、堤坝探测、山体滑坡、天然地震预测预报等领域得到广泛应用^[3-4]。

目前国内外深入研究自然电位的并不多见,在自然电位实验方面,许多室内实验只设置了一、两对电极进行测量,研究的内容仅限于得到自然电位变化的信息,这对自然电位的产生及产生源的判断是很不够的,所以需要在空间上对自然电位的变化进行密集而全面的研究。其次,野外的一些实验虽然在空间上有了充分的展布,但在测量时通常是测完一个点再测下一个点,不能同时测所有的点,在时间上不能动态连续,对于自然电位产生的机理也没有足够的认识。

收稿日期:2012-01-04 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2011BAK07B02);国家自然科学基金资助项目(51004102);福建省自然科学基金资助项目(2010J01262)

作者简介:吴超凡(1964—),男,福建仙游人,副教授。E-mail:cf6606@163.com

本文通过动态连续监测围岩的破裂过程自然电位的变化,从时间上分析破裂与自然电位变化的关系,研究设定的剖面上自然电位的变化与电荷分布,深化对围岩破裂中自然电位发生变化的物理机理的认识。希望通过对围岩破裂过程中自然电位在时空上变化的深入研究,对比煤层开采前后自然电位的变化,以确定煤层开采的影响范围,为煤矿的安全生产服务。

煤层正常的采动影响在垂直剖面上的分布状况是呈现以采场为中心,以直接顶、底板以及煤壁为起始点向四周扩展逐渐减弱和消失。将采动稳定后的岩层按其破坏程度,大致分为 3 个不同的开采影响带:即垮落带、断裂带和弯曲带,简称“三带”^[5-8]。

本次模拟实验通过研究自然电位的变化,预测在煤层开采过程中煤层围岩的变化情况。

1 煤层开采过程中围岩破坏监测的数值模拟

对于开采过程中的围岩破坏监测,目前应用广泛的是有限差分正演数值模型。把地下二维横断面划分为 N 个单元网格,网格可以为规则或不规则的。每个单元或节点上赋予一定的电位值,这样就可以构建成所需的初始正演数值模型^[9]。

(1) 有限差分法。有限差分法是将求解区划分为 N 个长方形或正方形网格,以网格节点上的电位值表示电势场的空间分布,然后将网格各节点的电位值表示成相邻节点电位值的线性函数,由此可得出一个方程数与节点相同的高阶线性方程组,用计算机解此方程组求出各节点的电场值,以此确定电场的空间分布。为了说明有限差分法的原理,现以二维等步长差分格式为例,如图 1 所示。用平行于坐标轴的两组直线簇将地下划分成正方形网格,相邻两坐标线的距离为 h :

$$x = ih \quad (i = 0, 1, 2, \dots, M)$$

$$z = kh \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N)$$

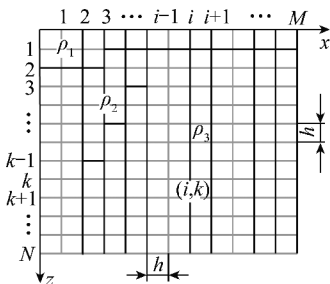


图 1 等步长正方形网格

Fig. 1 Square grids of equal step

每个正方形为一个单元,步长为正方形边长 h 。节点是网格的交点。任一节点的坐标 (x, z) 可表示为 (ih, kh) ,简化为 (i, k) 。用阶梯状折线取代原来的

曲线段。节点在边界线以内的称为内节点,节点在边界上的称为边界节点。某一节点 (i, k) 处的电位为 $U(i, k)$,由于 h 很小,可将节点 (i, k) 四周的电位在节点处展成泰勒级数:

$$U(i + 1, k) = U(i, k) + U'_x(i, k)h + U''_x(i, k) \frac{h^2}{2} - U'''_x(i, k) \frac{h^3}{3!} + \dots$$

式中, U'_x, U''_x 分别为 U 对 x 的一阶和二阶导数。

经过推导便可得到内节点的差分方程:

$$U(i, k) = [U(i + 1, k) + U(i - 1, k) + U(i, k + 1) + U(i, k - 1)] / 4$$

边界节点相应的差分方程可根据边界条件给出。给定已知地质条件后,求解线性方程组便可以得出电位 U 在空间的分布。

(2) 数值模拟。基于有限差分理论,建立数学模型,数值模拟电位在空间的分布。采集的数据为全电场空间电位值,保持电位测量的同步性,避免了不同时间电位测量数据的干扰问题。在煤层围岩上下方向分别布置电法测线,布置剖面如图 2 所示。

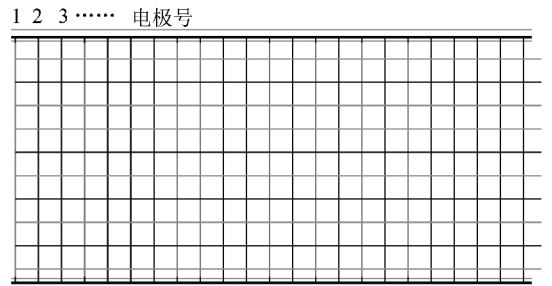


图 2 数值模拟采集空间布置

Fig. 2 Numerical simulation of acquisition spatial arrangement

其模拟过程是利用采集垂直剖面上的电位变化情况,通过将煤层垂直剖面利用有限差分割分二维网格,求取各网格电位分布,从而得出煤层围岩垂直剖面电位分布情况。根据不同地质异常体与正常煤体间的电性差异情况,从而给出煤层围岩内地质异常区的电位分布范围,以确定煤层的采动影响。

根据以上数值模拟获得的数据进行处理,得到电位变化情况,剖面如图 3 所示。

从图 3 中能够清晰地分出采动煤层、周围破裂的围岩与没有收到影响的区域,可以看出自然电位测量能敏感地反映异常电荷的变化。从数值模型可以得到这样的结论,破裂可能导致自然电位变化。这是由于裂隙产生时裂隙末端产生电子发射(电子逃逸),在末端局部区域产生正电荷并很快平衡,形成类似充放电的电位脉冲。

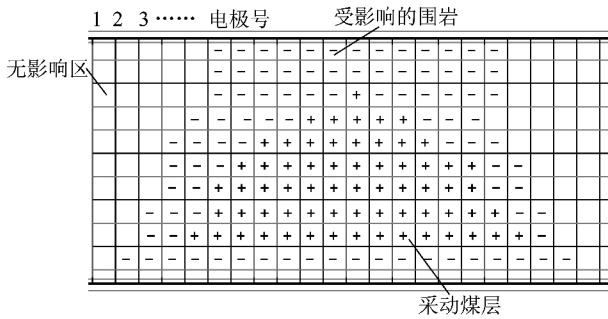


图3 自然电位变化剖面

Fig. 3 Change profile of spontaneous potential

应用到煤层开采的现象中,由于卸压作用,岩层应力发生改变,导致岩层裂隙发育,引起电子逃逸。岩石在破裂的过程中,岩层内部的正电荷逃逸出来,使得表面自然电位升高,在裂隙发育的部位,由于正电荷的丢失,自然电位降低。因此煤层在破裂时产生裂隙,改变了煤体自身自然电位的分布情况,当裂隙发育时裂隙末端产生电子发射,布置在顶板覆岩中的电极就可以监测到这种电荷的分布变化(势场的重新分布),通过分析这种变化可以对煤层开采造成顶板覆岩变形破裂情况进行分析。

但是由于数值模拟的局限性,只能对自然电位的变化情况作出划分,未能就各位置的自然电位能量以及受煤层采动影响的“三带”做出划分,以下通过物理模拟达到上述两种研究目的。

2 煤层开采过程中围岩破坏监测的物理模拟

模拟实验与现场数据采集采用网络并行电法^[10]。并行网络电法为改进的高密度电法,它的突出优势就是采集数据速度快,可以在线观测及远程控制,克服了传统高密度电法串行采集效率不高的缺点,采用了并行采集,即一个电极供电,多个电极同时测量,然后使用电子转换开关自动切换到供电电极,使数据采集的时间大大缩短。

网络并行电法实现了电位变化的同步阵列测量,达到对自然电场、一次场和二次场的全电场时空观测目的^[11-12]。网络并行电法将电法数据采集模式归纳为AM法和ABM法两种模式^[13-14],任一电极供电,其余所有电极并行测量电位,供电电极测量电流,采集数据效率比传统的高密度电法仪大大提高。利用网络并行电法的全电场时空特性,可进行四维电法勘探,为围岩破坏动态监测提供了硬件基础^[15]。

2.1 物理模型的建立

结合矿井实际生产情况,在满足相似比条件下,基于煤层采动模拟实验台建立平面实验模型(图4),以便模拟煤层开采过程中覆岩变形与破坏规律。模

型架的尺寸为5.0 m×0.2 m×1.5 m(长×宽×高)。根据不同的配比(河砂:碳酸钙:石膏)分别模拟覆岩材料:泥岩80:14:6;粉砂岩87:4:9;煤90:7:3;炭质泥岩90:7:3;砂质泥岩83:12:5。在煤层1的顶板位置,沿仰角为40°,布置32个电极。电极编号从上到下依次为1~32号。电极间距为5 cm。采用AM法测量开采过程中覆岩裂隙发育过程中的自然电位变化情况。每0.5 h开采一次,一次开采2个网格长度(开采方向沿箭头指向),每次采后,使用恒流时间为0.5 s,采样间隔20 ms进行测量。

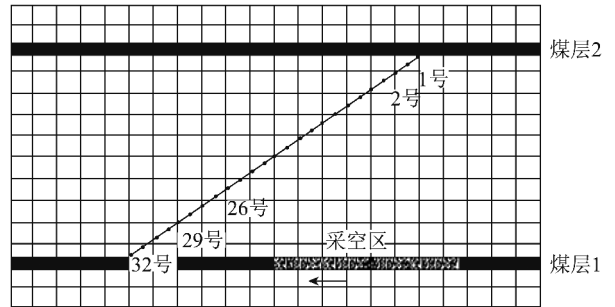


图4 煤层开采二维模拟实验模型

Fig. 4 2D experimental models simulate coal mining

2.2 数据处理及成果分析

处理思路:从解编出的自然电位数据中选取1号电极测量电流,其余电极测量电位的数据,求其均值,将该组数据使用均值做归一化处理、成图。物理模型处理成果图如图5所示。图5振幅为自然电位,灰色表示负值,黑色表示正值,面积越大,表示自然电位的绝对值越大。

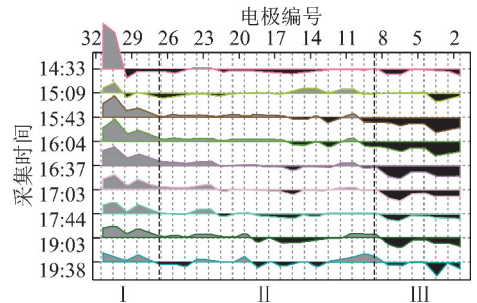


图5 模拟煤层开采实验自然电位变化曲线

Fig. 5 Spontaneous potential diagram of curves for coal mining experiment

从图5上模拟结果可以看出:煤层开采过程中,顶板“三带”特征明显。在垮落区,自然电位较小,归一化后电位为负(图5区域I)。随着煤层向前推进,顶板“三带”发育明显。垮落带上限高度为第27号电极位置。从区域II可以看出:裂隙较为发育。断裂带自然电位起伏变化较为明显,近垮落带一端表现为低电位,与弯曲下沉带分界处为低电位,中间表现

为高电位。从区域Ⅲ可以看出:弯曲下沉带自然电位表现为高电位。在垮落带发育完全的区域,弯曲下沉带自然电位较发育不完全的区域高。

从实验效果中发现,自然电位高的区域为压缩区,该区域内部岩层较为完整;由于尖端放电,裂隙吸附负电荷在垮落带自然电位表现为低电位;在裂隙发育部位,裂隙发育较多,故在裂隙发育区域,自然电位表现为低电位。

3 煤层开采过程中围岩破坏监测的应用实例

皖北煤电集团公司祁东矿 7130 工作面位于井田东翼一水平三采区,工作面沿走向布置,风巷靠近“四含”防水煤柱。工作面起止标高-375 ~ -417 m,平均走向长 1 663 m,倾向宽 89 ~ 152 m。该工作面基本顶为浅灰色中砂岩,局部为细砂岩及砂泥岩互层,厚度为 8.41 ~ 20.75 m,平均 14.4 m;直接顶为深灰色泥岩,局部为浅灰色粉砂岩及中砂岩,厚度不稳定 0 ~ 3.7 m,平均厚 1.7 m;底板为灰 ~ 深灰色泥岩,泥质结构,致密、块状、含植物碎片。

3.1 观测系统布置

电法监测工作采用网络并行电法仪布置远程监测系统,如图 6 所示。电极布置在巷道内施工的仰角钻孔中,共 48 个,电极编号从上到下依次为 1 ~ 48 号,电极间距 2 m,钻孔仰角为 20°,钻孔平面方位偏向巷道面外 10°,钻孔斜长 103 m,孔径为 91 mm。从 2008-09-20—10-12 连续监测,数据采集模式为 AM 法工作,B 电极设在钻场后方 200 m,N 电极设在监测钻场位置,每次供电激励恒流时间为 0.5 s,采样间隔为 20 ms,供电方式为单正法,与室内物理模拟采集参数相一致。

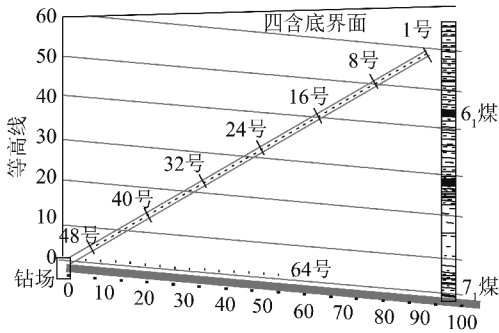


图 6 观测系统布置

Fig. 6 Arrangement of observation system

3.2 自然电位观测资料及数据处理

3.2.1 各电极自然电位随时间变化曲线

处理思路与物理模型数据处理一样,如图 7 所示。面积的大小表示自然电位的绝对值大小。

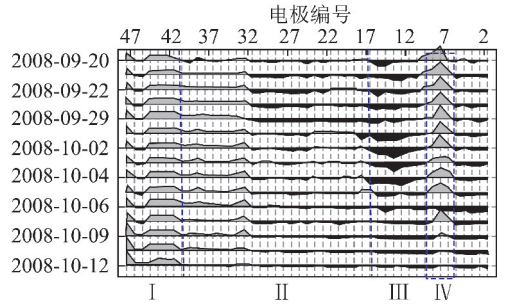


图 7 祁东矿顶板自然电位变化曲线

Fig. 7 Spontaneous potential diagram of curves for roof of Qidong Mine

由图 7 可见,在监测初期,32 号电极位置(垂高 22 m)以下为砂岩地层,显示为低自然电位;以上地层为泥岩和煤层段,显示为高自然电位。

9 月 22 日开始,7 ~ 9 号电极(垂高 47 ~ 50 m,虚线框区域)段自然电位变低,一直到 10 月 12 日,为低自然电位,表现为离层特性。10 ~ 17 号电极(垂高 40.57 ~ 46.21 m,区域Ⅲ)段自然电位较为稳定,表明未明显受采动影响,为整体弯曲下沉带。从 9 月 22 日开始,16 ~ 32 号电极段(垂高 23.67 ~ 39.45 m,区域Ⅱ上段),该范围为泥岩段地层,表现为高自然电位段,自然电位变化较频繁;40 ~ 31 号电极段(垂高 13.53 ~ 22.55 m,区域Ⅱ下段),该范围为粉砂岩段地层,表现为低自然电位段,自然电位变化较频繁。该范围与裂隙带发育范围基本一致。42 ~ 45 号电极(垂高 9.02 ~ 12.40 m,区域Ⅰ上段)段,该范围为中砂岩段地层,表现为低自然电位段,自然电位变化较为稳定;47 ~ 48 号电极(垂高 5.64 ~ 7.90 m,区域Ⅰ下段)段,该范围为泥岩段地层,表现为低自然电位段,自然电位变化比较稳定,该范围与垮落带发育范围基本一致。

3.2.2 单个电极自然电位的变化

图 8 是祁东矿 7130 工作面监测钻孔中单个电极在煤层开采过程中自然电位的变化曲线。可以看出:各电极自然电位从 9 月 29 日到 10 月 2 日下降,10 月 4 日至监测结束有上升的趋势,引起自然电位下降的原因是顶板覆岩破裂;自然电位上升原因是顶板覆岩破坏导致离层、裂隙发育。分析总的自然电位变化曲线可以得出自然电位变化的规律:随着采煤工作面向监测钻孔不断推进、顶板上覆岩体破碎的发展过程中,自然电位总体变化呈上升—下降—上升的趋势。

4 结论与展望

从数值模拟、物理模型实验与电法监测实例可以看出:自然电位对围岩破裂发育情况具有较好的响

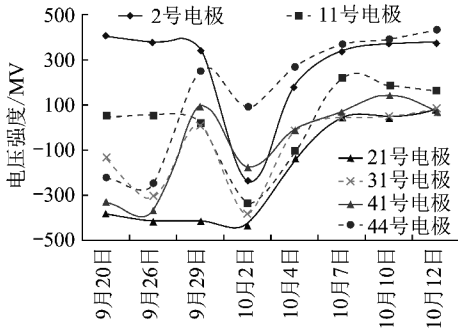


图8 各电极随时间的变化曲线

Fig. 8 Change of each natural electron curves with time

应。岩层裂隙发育部位,自然电位降低,且发育越完全电位越低;岩层压缩区,自然电位升高。在顶板“三带”中,垮落带自然电位低,且变化比较稳定;断裂带自然电位表现较为不稳定,变化频繁;弯曲下沉带自然电位表现为高电位,且极为稳定,变化较小。

不足之处:电法数据处理上,利用自然电位法分析采煤工作面上覆岩体破坏区域范围只能是定性分析而不能定量计算。如果充分利用所采集的电法数据,分析电性参数的变化与矿井其他危害的关系,建立一定的对应关系,有望达到定量分析的目的。

通过自然电位勘探,实现在时空域对岩层裂隙发育的跟踪观测,掌握岩层裂隙发育的规律,实现对围岩破坏的定性、定量判断,对于煤矿安全生产、矿井水害防治、煤层顶板管理具有重要的实用价值和意义,可以为煤矿安全、高效生产服务。

参考文献:

[1] 李宏,张伯崇. 水压致裂实验过程中自然电位测量研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(7):1425-1429.
Li Hong,Zhang Bochong. Study on spontaneous potential measurement during hydraulic fracturing experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(7):1425-1429.

[2] Zhou Wangfang, Barry F Beck, J Brad Stephenson. Investigation of groundwater flow in karst areas using component separation of natural potential measurement[J]. Environmental Geology,1999,37(1-2):19-25.

[3] 龙海丽,郝锦琦. 自电位层析成像的理论及实验研究[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1343-1349.
Long Haili, Hao Jinqi. Theoretical and experimental research on self-potential tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6):1343-1349.

[4] 徐令周,关继腾,房文静. 自然电场的概率成像方法评价[J]. 物探与化探,2003,27(5):395-398.
Xu Lingzhou, Guan Jiteng, Fang Wenjing. The evaluation of the probability imaging technology for natural electric field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2003,27(5):395-398.

[5] Wu Chaofan, Wu Wenjin, Yang Weimin. Surveying on two-zone height of sublevel strip mining[J]. Journal of Coal Science & Engi-

neering(China),2010,16(2):129-134.

[6] 朱国维. 深部矿井工作面地质条件及其地球物理勘探技术[J]. 煤炭工程,2008(3):66-68.
Zhu Guowei. Geological conditions and other geophysical survey technologies of coal mining face in deep mine[J]. Coal Engineering, 2008(3):66-68.

[7] 鲁岩,邹喜正,崔道品,等. 围岩破碎圈的理论分析与实践[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(2):219-221.
Lu Yan, Zou Xizheng, Cui Daopin, et al. Theoretical analysis and practice of fragmentation circle in surrounding rock[J]. Journal of Liaoning Technical University,2007,26(2):219-221.

[8] 吴小平,施行觉,郭自强. 花岗岩压轴带点的实验研究[J]. 地球物理学报,1990,33(2):208-211.
Wu Xiaoping, Shi Xingjue, Guo Ziqiang. Granite with experimental study of anchor points[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(2):208-211.

[9] Cunningham A W B, Stephens S G. The effect of temperature variation on spontaneous potential production from explants of brain tissue in culture[J]. Experientia,1962,18(1):10-14.

[10] 刘盛东,吴荣新,胡水根,等. 网络分布式并行电法勘探系统[A]. 第22届年会论文集[C]. 成都:四川科学技术出版社,2006:251.
Liu Shengdong, Wu Shengxin, Hu Shuigen, et al. Network distributed parallel electric prospecting system[A]. Papers of the 22th Annual Meeting [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press,2006:251.

[11] 刘盛东,王勃,周冠群,等. 基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):267-276.
Liu Shengdong, Wang Bo, Zhou Guanqun, et al. Experimental research on mine floor water hazard early warning based on response of geoelectric field in groundwater seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):267-276.

[12] 王连生,燕守斌,沈霞. 大庆油田储层自然电位曲线的变异与孔隙压力解释[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(4):463-466.
Wang Liansheng, Yan Shoubin, Shen Xia. Variation of natural potential curves and interpretation of pore pressure in Daqing oilfield reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting,2005,40(4):463-466.

[13] 刘盛东,杨彩,赵立瑰. 含水层渗流突变过程地电场响应的物理模拟[J]. 煤炭学报,2011,36(5):772-777.
Liu Shengdong, Yang Cai, Zhao Ligui. Physical simulation research on response to geoelectricity of the aquifer in seepage mutation process[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(5):772-777.

[14] 胡水根,刘盛东. 电法勘探中并行数据采集与传统数据采集效率的比较研究[J]. 地球物理学进展,2010,25(2):612-617.
Hu Shuigen, Liu Shengdong. A comparative study of efficiency about traditional electrical and collateral electrical data collection in electrical prospecting[J]. Progress in Geophys., 2010,25(2):612-617.

[15] Hüseyin Göksu, Mehmet Ali Kaya, Ali Kökce. Solution of the inverse electromagnetic problem of spontaneous potential (SP) by very fast simulated reannealing (VFSR) [A]. Lecture Notes in Computer Science [C], 2005:618-621.