

含水层渗流突变过程地电场响应的物理模拟

刘盛东^{1,2} 杨彩² 赵立瑰²

(1. 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; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 根据渗流地电场原理, 建立砂质含水层渗流电测物理模型, 并采用网络并行电法技术, 对模型注水和放水过程中的电性参数进行实时测量。实验结果表明: 向含水层注水时, 含水层的自然电位先期出现一极小值, 随后表现为上升趋势并达到极大值, 含水层激励电流和激励电位呈上升趋势。含水层放水突变时, N极在自由空间, 自然电位下降; N极在水源空间, 自然电位上升; B、N极在同一空间, 激励电位下降; B、N极处于不同空间, 激励电位上升; 激励电流不受B、N极所在空间影响, 保持稳定。放水结束后, 自然电位和激励电位呈下降趋势, 激励电流明显下降, 对不饱和水量敏感性好。视电阻率值可以表征含水层的注水、放水过程, 其值的高低与砂层含水量成反比。

关键词: 含水层渗流; 突变; 地电场响应; 物理模拟实验; 网络并行电法

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Physical simulation research on response to geoelectricity of the aquifer in seepage mutation process

LIU Sheng-dong^{1,2}, YANG Cai², ZHAO Li-gui²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to the principle of geoelectric field, the seepage-electric model of water-bearing sand layer was established. With the network parallel electrical technique, electrical parameters were real-time monitored in the process of water injection and water discharge of the model. The results show that during water injection, the spontaneous potential appears upward and reaches maximum after a lower turning point at first. Meanwhile the exciting voltage and exciting current are gradually on the rise. When water discharge mutation, if N pole is placed in the free-space, the spontaneous potential declines, while N pole is placed in the water source, the spontaneous potential rises; if B and N poles are in the same space, the exciting voltage declines, while they are in different spaces, the exciting voltage increases; the exciting current can't be affected by the space of B and N poles, remaining unchanged. After water discharge, spontaneous potential and exciting voltage presents downtrend. Meanwhile the exciting current descends obviously, and it is sensitive to the unsaturation water. Apparent resistivity value is inversely proportional to the moisture content of sand layer, and it can characterize the process of water injection and water discharge of aquifer.

Key words: aquifer seepage; mutation; geoelectric field response; physical simulation experiment; network parallel electrical technique

煤矿水害主要表现为水体的渗流突变, 包括裂隙渗流、岩体渗流、煤体渗流等, 其中煤体渗流突变是老空突水的主要案例^[1-4]。渗流地电场特征对于地下

水渗流过程具有指示作用, 通过矿井地下水的渗流地电场探测与矿井水害案例的对比研究可以为矿井水害预警提供技术方法和理论基础^[5-9]。地下水渗流

引起地电场的响应与煤矿突水的预测预报、突水水量分析具有密切的相关性^[10-13]。

通过对煤矿突水案例的总结与分析,根据水力学的地下水渗流原理和渗流地电场的概念,设计室内地下水渗流突变电测模型,采用网络并行电法仪监测地下水渗流及其在突变过程中地电场的自然电位、激励电流、激励电位及视电阻率瞬态响应特征,分析地下水渗流过程及其在突水过程变化时地电场参数的响应,为煤矿突水灾害的防治技术提供基础。

1 物理实验模型与实验流程

设计渗流突变实验模型装置如图1所示,分为顶板突水模型及底板突水实验模型两种。容器由多节的绝缘材料亚克力筒组成,每节筒参数为:外径150 mm、内径104 mm、高300 mm,可任意组合。采用粗砂为填充介质来模拟含水层,含水层为单独一节,其上装有32个电极,采用 4×8 (共4列,每列自上而下编号共8个电极)的均匀排列方式,电极采用直径0.7 mm、长度为37 mm的碳棒,实验用水为自来水。顶板突水模型上部是两节空亚克力筒(图1(a)),其下部亚克力筒的底部有一控水阀门,水流方向自上而下。底板突水实验模型(图1(b))供水端在下,其上部亚克力筒上有一控水阀门,保证最终水面高度恒定,水流方向自下而上。

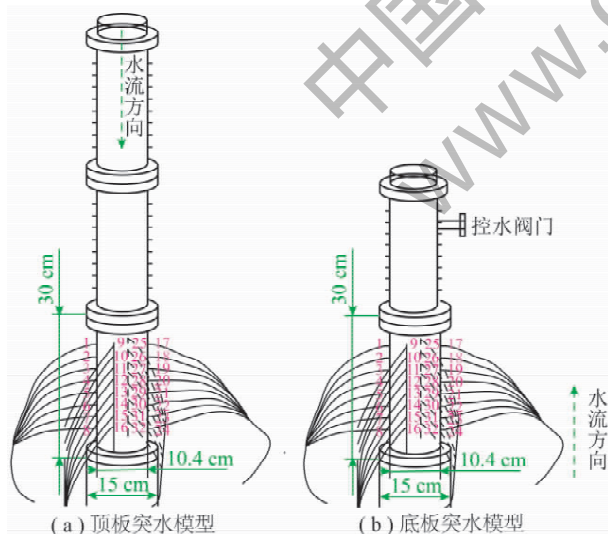


图1 渗流突变实验模型的设计

Fig. 1 The design of seepage mutation experimental model

实验数据采用网络并行电法仪采集,仪器采集模式为AM法^[14-16],恒流时间0.5 s,采样间隔10 ms,供电方式为单正法,并行电法通过公共供电电极B和公共测量电极N来实现实时测量^[14-16]。B、N极放置位置定义为自由空间和在水源空间:自由空间指在放水位置附近,相当于出水口附近的采煤巷道空间;

水源空间指含水层内水源附近,相当于潜在水源体的内部空间。

顶板突水模型实验通过改变B、N极的位置进行分组测试。如图2所示,B极在水源空间,N极在自由空间(图2(a)),N极在水源空间,B极在自由空间(图2(b)),B、N极同在水源空间(图2(c)),B、N极同在自由空间(图2(d));图2(e)为含水层富水动态示意,1~6所在位置分别表示不饱和、开始注水、注满饱和、开始放水、饱和放水结束、不饱和空干等连续实验状态的时间点,6与1状态相似。对于B、N极在相同的位置所对应的相同渗流突变实验反复进行3次,每次从含水层不饱和开始,向上部的两个亚克力筒加水至同一要求刻度线,打开下部控水阀门放水,直至水全部放完,为一次测试。同一含水层状态,对应4种B、N极状态,要进行12次以上的有效实验。

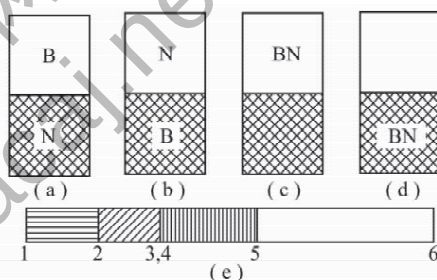


图2 实验数据表达图例说明

Fig. 2 Illustration of experimental data legend

底板突水实验模型,B、N极放置在亚克力筒底部即在水源空间,通过下部控水阀门给含水层注水,通过上部出水口排泄。本组模型实验共采集了9次。

2 顶板突水实验结果与分析

本次实验数据通过并行电法仪处理软件解编后,得到自然电位、激励电位、激励电流及视电阻率数据,作出自然电位、激励电位及激励电流随时间的变化图和视电阻率图,分别对其进行分析解释。

2.1 渗流突变过程的自然电位响应

为研究渗流突变过程中自然电位的变化规律,从4种不同B、N极位置实验数据中提取1~8号电极的自然电位数据,作出自然电位随时间的变化曲线,如图3所示。注水时,随着含水层水量的增加,自然电位普遍出现一降低转折点后上升到极大值点。N极放置在自由空间(图3(a)、(d)),注水时,自然电位上升明显,注水前后自然电位差值达到80~100 mV;放水时自然电位下降,下降幅度达到20~50 mV,在放水渗流过程中自然电位表现为下降趋势。N极放置在水源空间(图3(b)、(c)),注水时自然电位上升幅

度为 10 ~ 20 mV,放水时自然电位下降幅度为 10 ~ 30 mV,在放水渗流过程中自然电位表现为上升趋势

势。饱和放水结束后,进入非饱和放水的不稳定渗流空干阶段,自然电位整体呈下降趋势。

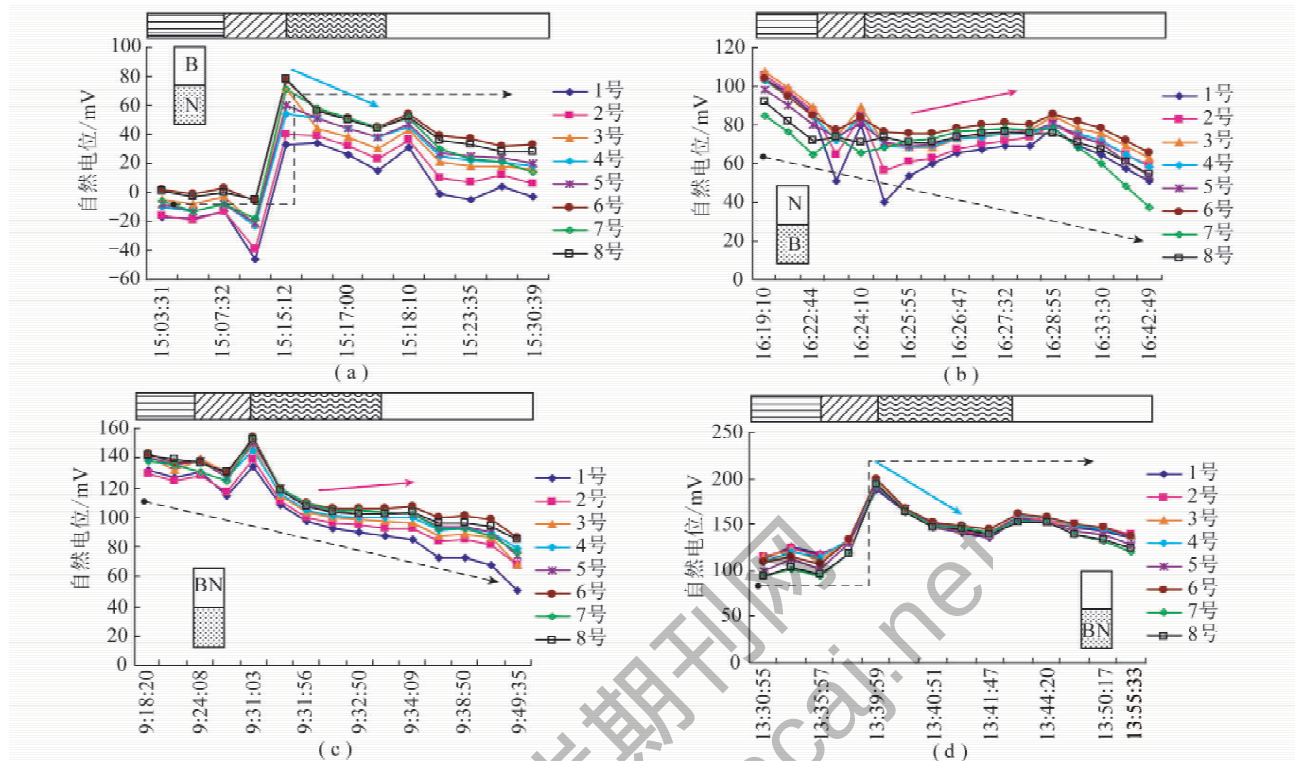


图 3 不同 B、N 极位置的自然电位动态响应

Fig. 3 Variation curves of spontaneous potential with time at different B, N pole positions

4 种实验的自然电位变化曲线形态总体满足过滤电场和山地电场的原理^[4]。含水层注满水或突水时自然电位均出现一极大值现象,分析认为,是含水层突水瞬间,水压的变化造成含水层水体与含水层骨架的位错,形成了电性异常。实验结果还表明,将无穷远公共电极(N)放置在远离含水层的自由空间,更有利于监测到这种异常电位。

2.2 渗流突变过程的激励电位响应

为研究渗流突变过程中激励电位的变化情况,从 4 种不同 B、N 极位置实验数据中提取 1 ~ 8 号电极的激励电位数据,作出激励电位随时间的变化图(图 4)。当 B、N 极在同一空间(图 4(c)、(d)),注水时,激励电位呈上升趋势,上升幅度满足跨步电压原理,电极与公共负极 B 越远其上升幅度越大,反之越小;放水时,激励电位下降,从饱和放水到不饱和放水阶段,激励电位出现明显下跳。当 B、N 极处于不同空间(图 4(a)、(b)),注水时,激励电位上升,上升幅度与 N 极距离呈跨步电压关系,这是由于并行测试系统的电位测量都是通过 N 极进行差值计算;放水时,激励电位下跳至最低值,从饱和放水向不饱和放水阶段演变,激励电位逐渐上升;放水空干阶段,激励电位呈下降趋势,并逐渐恢复至加水之前的状态。

激励电位的变化与 B、N 极位置关系明显,激励电位对于含水层的充、放水过程的敏感程度,主要与 N 极有关,依次从靠近 N 的电极到远离 N 的电极而升高。因此,利用激励电位不同空间动态变化曲线,采用与 N 极呈跨步电压的原理,可以解释含水层的突变现象。

2.3 渗流突变过程的激励电流与视电阻率响应

激励电流即一次场电流随时间的变化如图 5 所示,激励电流不受 B、N 极所在空间影响,变化规律保持一致。注水时,激励电流逐渐升高,至含水层饱和后激励电流达到最高值;放水后,在饱和放水过程中激励电流基本保持不变;进入不饱和放水阶段,激励电流开始出现明显下降,并逐渐恢复到注水前状态。激励电流对不饱和水量反映敏感。

采用三级法计算视电阻率,其变化规律如图 6 所示,初始不饱和态的视电阻率值是 $370 \Omega \cdot m$,随着水从上部注入,视电阻率值从上往下变低,注满水时,其视电阻率值为 $40 \Omega \cdot m$ 。在放水初期,由于粗砂处于饱水状态下,视电阻率基本保持不变;随着放水的进行,视电阻率逐渐升高,上部最先变为高阻,最终视电阻率值上升至 $310 \Omega \cdot m$,接近注水前的状态。视电阻率对于含水层的突变过程,整体上具有可视性。

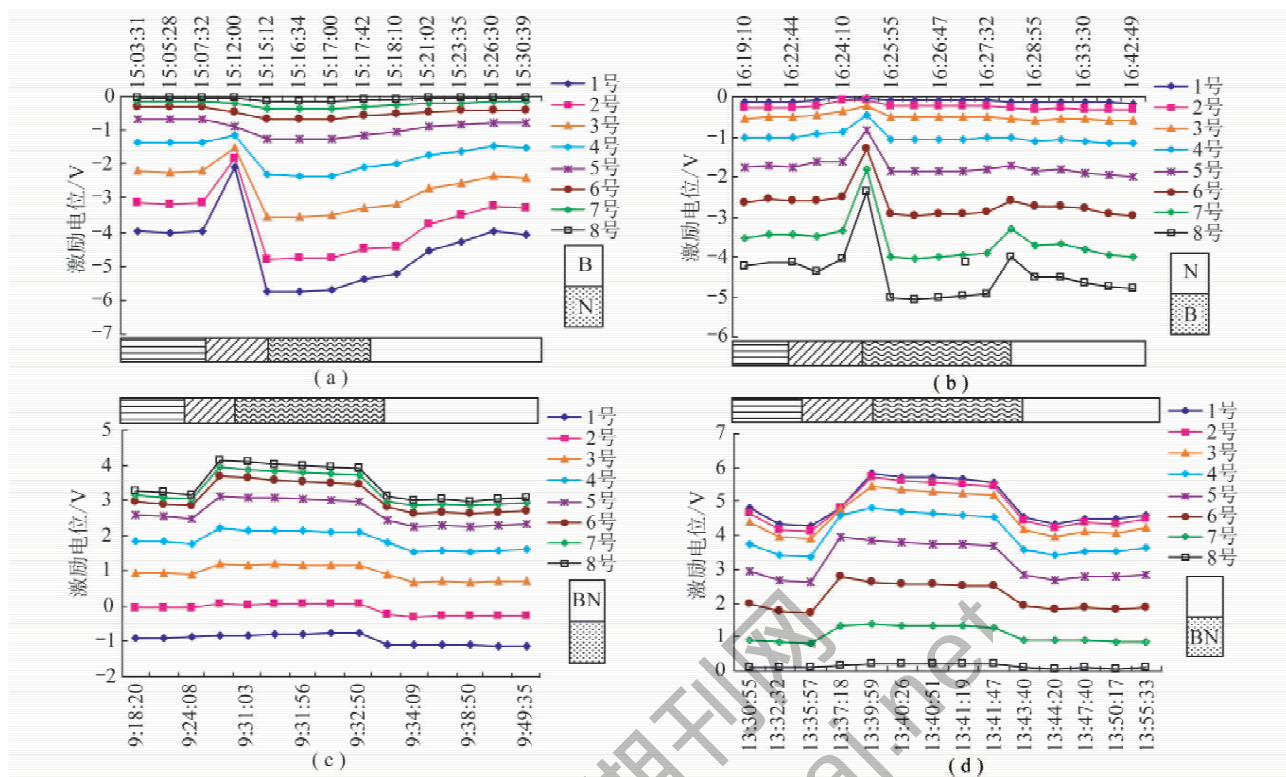


图4 不同B、N极位置激励电位随时间的变化

Fig. 4 Variation curves of exciting voltage with time at different B, N pole positions

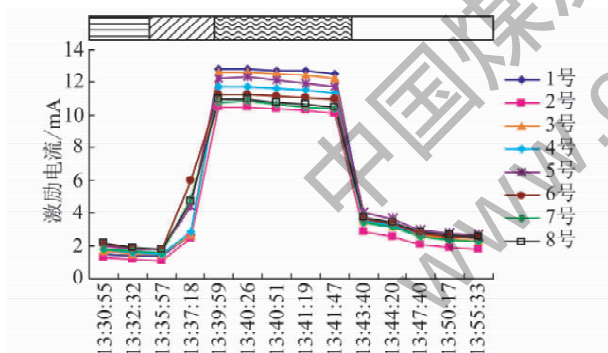


图5 激励电流随时间的变化折线

Fig. 5 Variation curves of exciting current with time

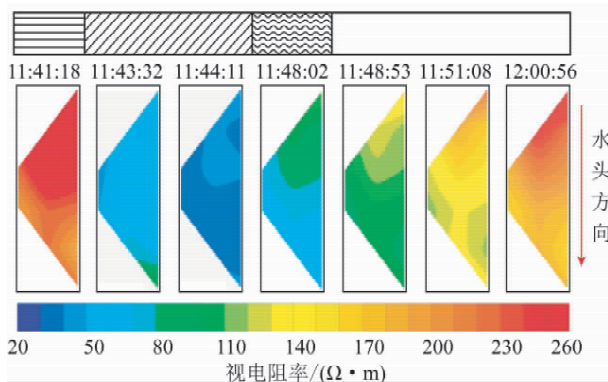


图6 视电阻率随时间变化的断面图

Fig. 6 The pictures of apparent resistivity with time

3 底板突水模拟实验

底板突水模拟实验的B、N极均放置在亚克力筒底部空间,与8号电极在同一平面的径向点上。实验过程如下:15:22:11开始注水,15:35:17水到达8号电极,15:43:48水到达1号电极,15:44:33水到达砂层顶部,17:10:15加大注水量,17:27:53水从上部控水阀门流出,水面保持恒定。从实验数据中提取1~8号电极自然电位、激励电位、激励电流及视电阻率数据,分别作出相应参数随时间的变化图及视电阻率图(图7、8)。

图7(a)是自然电位随时间的变化,从注水开始自然电位呈快速上升趋势,上升到极值点后,水体达到N极及8号电极附近,即在15:35:17出现陡降,其原因是水头抵达N极位置,水头处的正电荷拉低了测试电极电位所致;随后由于水头的继续上升,自然电位又重新逐渐上升,直到水体达到含水层顶界面时,形成自然电位的第二个极值;含水层被水体淹没后,自然电位呈平稳弱下降趋势;至17:10:15加大进水量时,再出现陡升现象;出水阀门出水后,自然电位出现波动现象。实验表明,自然电位的持续升高与波动,可做为突水前兆的敏感因子。

图7(b)是激励电位随时间的变化,在15:35:17

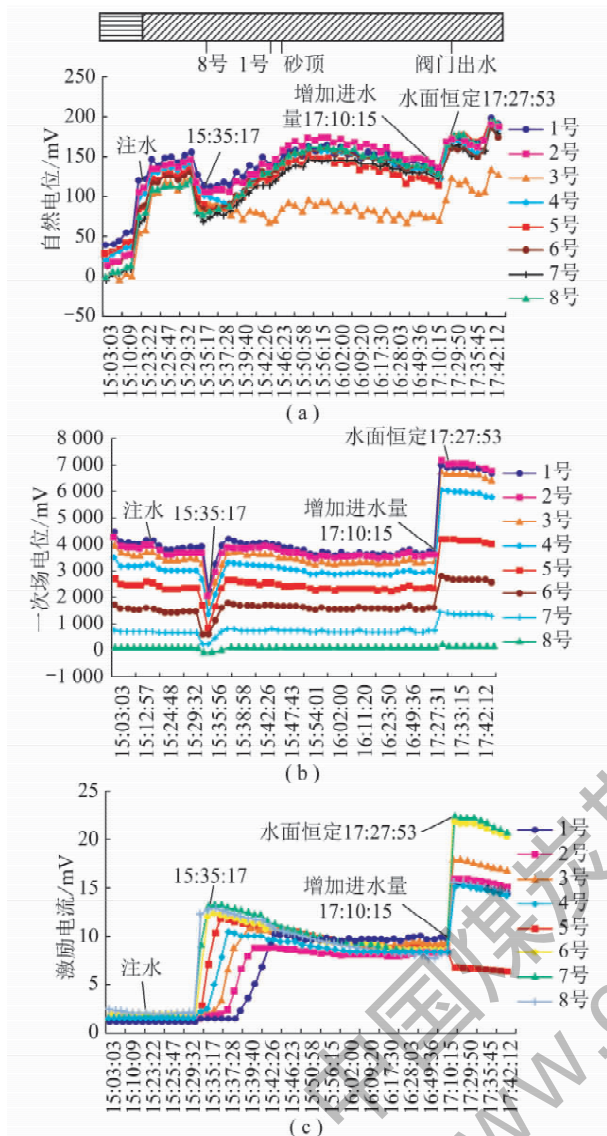


图7 底板突水模拟地电场参数响应

Fig. 7 The response of geoelectric parameters in floor water invasion simulate

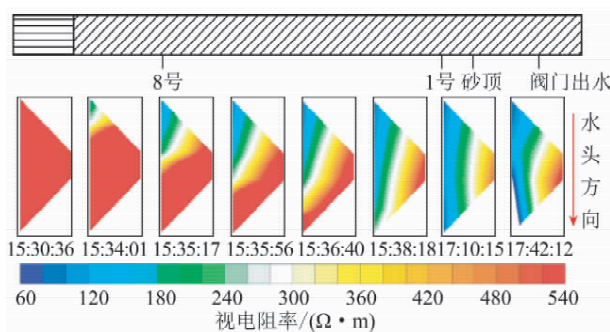


图8 在底板突水模拟中视电阻率随时间变化的断面图

Fig. 8 The pictures of apparent resistivity with time in floor water invasion simulation

一次场电位出现一个明显的“V”字形降低转折点,与水到达B、N极所在位置相对应;含水层饱水后激励电位稳定;17:10:15加大水量,激励电位陡升;上部

溢水后激励电位相对稳定。

图7(c)是激励电流随时间的变化,注水后,激励电流出现明显的升高,然后稳定于一定值,且不同位置电极的激励电流对应各自水头到达的时刻,如15:35:17水头到达8号电极、15:37:28水头到达4号电极、15:39:40水头到达2号电极等。17:10:15水量加大,激励电流出现明显分化;上部出水后,激励电流保持稳定。激励电流对于水体渗流位置敏感,水量增大,激励电流显著变动。

由图8可知,在进水初期阶段视电阻率剖面基本响应水头的位置,含水层的饱水状态与视电阻率密切相关。当介质饱水后,至上部水流溢出,视电阻率值基本不发生明显变化。

自然电位、激励电位和激励电流在底板突水模拟实验中,较好地反映了水体渗流、含水层饱水状态、进水量改变和突水的变化,进水量变化可以引起地电场变化,根据地电参数变化可以反映底板水量变化、水头位置及突水时刻。

4 结论与展望

(1) 地电场参数中的自然电位、激励电位、激励电流及视电阻率在渗流突变过程中具有明显的响应,可采用地电场方法来监测地下水渗流场的变化。

(2) 地电场监测的数据受到监测电极位置以及B、N电极位置的影响,不同电极的观测系统对应一定的地电场响应特征,观测系统的变化影响地电场参数及其分辨率的变化。

(3) 改变进水量的大小,地电场参数具有一定的变化,可以通过对这些参数的进一步研究,进行突水水量的判断。

(4) 通过并行电法中的三极法解编出的自然电位和视电阻率值,可作为突水前兆的敏感因子。

(5) 对渗流突变过程中的地电场特征研究还需进一步结合生产矿井实际进行定量研究与理论分析。

参考文献:

- [1] 缪协兴,刘卫群,陈占清.采动岩体渗流与煤矿灾害防治[J].西安石油大学学报(自然科学版) 2007 22(2):74-77.
Miao Xiexing, Liu Weiqun, Chen Zhanqing. Seepage of mining mass and control of mine disasters[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) 2007 22(2):74-77.
- [2] Zhang H Q, He Y N, Tang C A, et al. Application of an improved flow-stress-damage model to the criticality assessment of water inrush in a mine: a case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009 42(6):911-930.
- [3] 马占国,缪协兴,陈占清,等.破碎煤体渗透特性的试验研究[J].岩土力学 2009 30(4):985-989.

- Ma Zhanguo ,Miao Xiexing ,Chen Zhanqing ,et al. Experimental study of permeability of broken coal[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 ,30(4) : 985 - 989.
- [4] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [5] 刘盛东, 吴荣新, 张平松, 等. 三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J]. 煤炭学报, 2009 ,34(7) : 927 - 932.
- Liu Shengdong ,Wu Rongxin ,Zhang Pingsong ,et al. Study on three-dimensional parallel electrical survey and its applications in water disaster exploration in coal mines[J]. Journal of China Coal Society , 2009 ,34(7) : 927 - 932.
- [6] 张平松, 刘盛东, 吴荣新, 等. 采煤面覆岩变形与破坏立体电法动态测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009 ,28(9) : 1 870 - 1 875.
- Zhang Pingsong ,Liu Shengdong ,Wu Rongxin ,et al. Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workface by 3D resistivity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 ,28(9) : 1 870 - 1 875.
- [7] 吴荣新, 张平松, 刘盛东. 双巷网络并行电法探测工作面内薄煤区范围[J]. 岩石力学与工程学报, 2009 ,28(9) : 1 834 - 1 838.
- Wu Rongxin ,Zhang Pingsong ,Liu Shengdong. Exploration of two-gateway network parallel electrical technology for exploring thin-coal area within coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 ,28(9) : 1 834 - 1 838.
- [8] 张平松, 吴健生, 刘盛东. 隧道壁后注浆质量高密度电法测试的可能性[J]. 地下空间与工程学报, 2008 ,4(2) : 331 - 334.
- Zhang Pingsong ,Wu Jiansheng ,Liu Shengdong. Prospecting possibility with high density resistivity for quality of concrete behind segment in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2008 ,4(2) : 331 - 334.
- [9] 吴荣新, 刘盛东, 周冠群. 高分辨地电阻率法探测煤矿地质异常体[J]. 煤炭科学技术, 2007 ,35(7) : 33 - 38.
- Wu Rongxin ,Liu Shengdong ,Zhou Guanqun. High-resolution ground electric resistance rate method to probe unusual mass in mine geology [J]. Coal Science and Technology 2007 ,35(7) : 33 - 38.
- [10] 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 - 272.
- 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 - 272.
- [11] 王 勃, 刘盛东, 张 朋. 采用网络并行电法仪进行煤矿底板动态监测[J]. 中国煤炭地质, 2009 ,21(3) : 972 - 976.
- Wang Bo ,Liu Shengdong ,Zhang Peng. Application of network parallel electrical instrument on dynamic coal floor monitoring[J]. Coal Geology of China 2009 ,21(3) : 972 - 976.
- [12] Liu Shengdong ,Zhang Pingsong ,Cao Yu ,et al. Characteristic analysis on geological abnormality by multi-information of geophysics in the deep laneway[J]. Procedia Earth and Planetary Science 2009 ,1(1) : 936 - 942.
- [13] Zhang Pingsong ,Wu Jiansheng ,Liu Shengdong. Testing with high density resistivity method in prevention and cure for mine water disaster and its applied effect[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China) 2007 ,13(2) : 165 - 169.
- [14] 刘盛东, 刘士刚, 张平松, 等. 网络并行电法仪与稳态电法勘探方向[J]. 中国科技成果, 2007 ,24(7) : 31 - 36.
- Liu Shengdong ,Liu Shigang ,Zhang Pingsong ,et al. Network parallel electrical instrument and stationary electrical prospecting[J]. China Science and Technology Achievements 2007 ,24(7) : 31 - 36.
- [15] 刘盛东, 吴荣新, 胡水根, 等. 网络分布式并行电法勘探系统[A]. 中国地球物理 2006, 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 Rongxin ,Hu Shuigen ,et al. Prospecting system of the network distributivity parallel electricity method[A]. Proceedings of the 22nd Conference on China Geophysics 2006[C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press 2006: 251.
- [16] 刘盛东, 张平松. 分布式并行智能电极电位差信号采集方法[P]. 中国专利: 200410014020.0 2006 - 07 - 26.