

周启友,杭悦宇,刘汉乐等. 饱和和排水过程中岩石电阻率各向异性特征的电阻率成像法研究. 地球物理学报, 2009, 52(1): 281~288

Zhou Q Y, Hang Y Y, Liu H L, et al. The anisotropic properties of rock resistivity during saturation and desaturation processes revealed by electrical resistivity tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(1):281~288

饱和和排水过程中岩石电阻率各向异性特征的 电阻率成像法研究

周启友¹, 杭悦宇², 刘汉乐¹, 戴水汉¹, 徐建平¹

1 南京大学地球科学系、水科学系, 南京 210093

2 江苏省中国科学院植物研究所, 南京 210014

摘 要 从电阻率的角度研究岩石裂隙介质的各向异性特征是一种方便而有效的方法, 但多限于空间单个点上的测量数据分析. 通过在砂岩岩样上的饱和与排水实验以及同步进行的高密度电阻率成像监测, 探讨了应用高密度电阻率成像法获得图像研究岩石各向异性特征的可能性, 分析了饱和与排水过程中岩石电阻率在不同方向上的响应特性. 结果表明, 电阻率成像法在分析岩石裂隙介质的各向异性方面具有多方向成像和动态监测的优点, 可以通过对不同方向上获得的电阻率图像的分析, 提取出岩石沉积结构的分布模式, 清晰地反映出岩石在饱和和排水过程中电阻率变化空间分布模式的各向异性特征.

关键词 岩石电阻率, 各向异性特征, 电阻率成像法, 饱和过程, 排水过程

文章编号 0001-5733(2009)01-0281-08

中图分类号 P319

收稿日期 2008-01-01, 2008-10-26 收修定稿

The anisotropic properties of rock resistivity during saturation and desaturation processes revealed by electrical resistivity tomography

ZHOU Qi-You¹, HANG Yue-Yu², LIU Han-Le¹, DAI Shui-Han¹, XU Jian-Ping¹

1 Department of Hydrosociences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract With electrical resistivity parameter, it is convenient and effective to analyze the anisotropic properties of fractured rocks. However, only resistivity data obtained at individual points were used for this analysis now. Based on water saturation and desaturation experiments made on a sandstone block and simultaneous monitoring with high density electrical resistivity tomography (ERT), in this paper we investigated the possibility of using resistivity images from the ERT to study the anisotropic properties of the rock, and analyzed the responses of rock resistivity measured at different directions to the water saturation and desaturation processes. The results indicate that as the ERT has a advantage of being able to multi-directional imaging and monitor, on the basis of a analysis of resistivity images obtained at different directions, it is possible to characterize the spatial distribution patterns of the rock structure, and illustrate the anisotropic properties of the spatial distribution patterns in the rock resistivity changes during water saturation and desaturation processes.

基金项目 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目和国家自然科学基金项目(40371021)资助。

作者简介 周启友,男,1963年生,教授,主要从事包气带水文学、水文地球物理学和水资源与水循环方面的教学科研工作,在高密度电阻率成像法方面有长期的研究。E-mail:zhouqy@nju.edu.cn

Keywords Rock resistivity, Anisotropic properties, Electrical resistivity tomography, Saturation process, Desaturation process

1 引言

各向异性特征是岩石裂隙介质一种普遍存在的特性. 断裂带的空间展布、微裂隙的扩展、岩体的力学性质、导水导热特性和结构特征等通常不仅具有显著的非均质特性,同时也存在着不同程度的各向异性特征. 对岩石裂隙介质各向异性特征的研究有助于认识岩体结构的分布模式,了解相关参数在不同方向上的空间分布特征,无论在野外大尺度的条件下还是在室内小尺度的条件下,都具有重要的理论和实际意义.

从电阻率的角度研究岩石裂隙介质的各向异性特征是近年来本领域研究的一个重要方向. 陈峰等^[1,2]通过单轴压缩、低围压三轴压缩、剪切和二维约束的单轴压缩等一系列的实验研究,探讨了岩石视电阻率变化最大的各向异性主轴方向与岩石的主破裂方向之间的关系和用岩石电阻率变化各向异性探测岩石微破裂扩展的方法. 结果表明,当裂隙和破碎带通过区域的测点时,视电阻率变化的各向异性结果较好,且所求得各向异性主轴方向趋向一致,并与破碎带方向基本吻合. 采用岩石电阻率变化各向异性方法能反映裂隙扩展的优势方位,确定裂隙扩展的位置或区域,同时还具有较强的抗系统干扰的能力. 廖椿庭等^[3]也通过室内实验分析了动态岩石电阻率变化的各向异性与岩体裂隙扩展的水网络导电通路变化之间的关系,提出了定量确定隐伏断裂扩展前兆的方法. 郝锦琦等^[4]通过在磁铁矿石岩圆柱样品上对截面进行的二维电阻率成像,分析了岩石在反复加载和卸载条件下介质内部结构的变化,结果发现岩石中裂隙的存在与所含液体的饱和状态是主破裂发生前控制岩石电阻率变化的两个最重要的因素. 为了研究介质在剪切和摩擦滑动过程中的视电阻率变化,陈峰等^[5]对均匀和不均匀模压制成的模型进行了剪切实验,结果表明距剪切和摩擦滑动裂隙近的测点,视电阻率变化幅度大,介质视电阻率变化幅度的大小与剪切和摩擦滑动的裂隙部位密切相关. 这一结论与 Zhou^[6]在花岗岩和凝灰岩有限块体上所获得的随测定点到裂隙距离的增加岩石电阻率变化幅度逐渐减小的结果完全一致.

这些研究促进了我们对岩石电阻率各向异性特

征与断裂带空间展布和微裂隙扩展方向之间关系的认识,但由于观测数据仅限于空间某个点上,对岩石电阻率各向异性特征的分析还难于在二维或三维的条件下进行. 近年来发展起来的高密度电阻率成像法(简称 ERT)以其多维、尺度可变和动态监测的优势在地下水水文学、包气带水文学和环境工程领域得到了广泛的应用. 在地质体勘探^[7,8]、圈定多孔介质中的流体流动和污染范围^[9~12]、三维土壤水动态监测^[13]、地下空洞周围非饱和带形成过程研究^[14]等方面都表现出独特的优势. 在小尺度岩石样品上,伍开江和周启友^[15,16]应用 ERT 方法研究了岩柱中的水体入渗和溶质运移过程,并对该过程进行了动态可视化监测. 郝锦琦等^[4]通过对岩石圆柱截面的二维 ERT 成像,揭示了介质内的微细结构,为其探讨视电阻率变化的原因提供了基本资料. 虽然这些研究还仅仅是在圆柱截面上的二维 ERT 成像,但它为利用 ERT 图像在二维或三维空间上分析岩石电阻率的各向异性特征创造了条件.

通过在岩样上的饱水与排水过程实验以及同步进行的高密度电阻率成像监测,本文的目的是探讨应用高密度电阻率成像法所获得的图像分析岩石各向异性特征的可能性,了解在饱水与排水过程中岩石电阻率在不同方向上的响应特性.

2 实验材料与方法

实验材料为一产自澳大利亚的 30 cm×30 cm×2 cm 的石英砂岩,沉积层理明显. 在砂岩岩样中心 10 cm×10 cm 左右的区域,以横向和纵向均为 1cm 左右的电极间距,高密度布置了 121 个铅制电极,形成一个 11×11 的电极网络. 电极布置时,先在砂岩上钻一深 2 mm、直径 1 mm 左右的小孔,然后再封入铅制电极,使其与周围岩石紧密接触.

电极通过电缆与一个 216 通道的高密度电法勘探系统(Next-400,日本兴和株式会社制)相连,该系统可以通过给定的组合向任意两个电极供电,测定其他任意两个电极之间的电位差,因此,每四个电极为一个组合即可获得一个数据. 供电电流采用 1 mA、2 Hz 的交替直流电,按四极法在 X、Y、XY(左下一右上)和 -XY(左上-右下)四个方向上进行,最大和最小电极间隔系数均为 1,每次扫描大约

需要 13 min,一次可获得 304 个数据.电极布置与测定方式如图 1 所示,为表示电极在砂岩岩样上的具体位置,图中也给出了相应岩样的图片.

实验过程由饱水过程和排水过程两个阶段构成.饱水过程中,将干燥的砂岩岩样水平置于电导度为 $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的自来水水槽中,水槽材料为不导电的聚乙烯塑料.水层高度刚好和岩样的厚度一致,以便水层不会从上部侵入岩样的顶面.在静水压力和毛细力的作用小,岩样逐渐饱和,水分逐渐从岩样顶面渗出.当岩样顶面渗水的面积与整个岩样的面积相近并与水槽中的水体基本连成一片时,即认为岩样已经达到饱和,饱和过程结束,共扫描测定了 44 次(不包括水分连成一片后的测定).

排水过程或非饱和过程在同一水槽中进行.将上一阶段饱水的岩样从水槽中竖立起来,使岩样的下端淹没在 2 cm 深的水槽中,上端在重力作用下排水.排水过程持续到观测的数据变化不大为止,共进行了 62 次扫描测定(不含饱水过程中所作的测定).

为了防止蒸发和外界因素的影响,整个水槽用塑料单覆盖,并连续记录整个实验过程中的温度变化,用于资料分析中的温度校正.

由于测定所用的电极布置在整个岩样的中心区域,虽然边界效应对视电阻率计算结果在水平方向上的影响不会很大,但在厚度方向上有不可忽视的作用.为此,考虑边界效应的影响,采用 Zhou^[17] 所提出的方法计算砂岩的视电阻率值:

$$\rho_a = K_{AB}^{MN} \frac{P^{MN}}{I}, \quad (1)$$

$$K_{AB}^{MN} = 8\pi \left[\sum_{k=-g}^g \sum_{j=-g}^g \sum_{i=-g}^g \left(\frac{1}{R_{ijk}^{AM}} - \frac{1}{R_{ijk}^{BM}} - \frac{1}{R_{ijk}^{AN}} + \frac{1}{R_{ijk}^{BN}} \right) + \sum_{k=-(g+1)}^{g+1} \sum_{j=-(g+1)}^{g+1} \sum_{i=-(g+1)}^{g+1} \left(\frac{1}{R_{ijk}^{AM}} - \frac{1}{R_{ijk}^{BM}} - \frac{1}{R_{ijk}^{AN}} + \frac{1}{R_{ijk}^{BN}} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 P^{MN} 为电位电极 M 、 N 之间的电位差, I 为输出电流, K_{AB}^{MN} 为电极装置系数, R_{ijk}^{AB} 为电流电极 A 的第 (i, j, k) 个镜象电流源距电位电极 B 之间的距离.为此,根据式(1)和(2)即可获得各测定点上的岩样视电阻率值,再通过插值便获得在平面二维空间上的视电阻率分布图像.由于本实验所用的砂岩岩样仅 2 cm 厚且电极间距在 1 cm 左右,根据有限块体上的感度分布特征^[17],由此获得的岩样视电阻率二维图像可以近似地看作真实的岩样电阻率分布图像.

为了消除实验过程中温度变化对所获得的岩石电阻率的影响,采用公式

$$\rho = \rho_z e^{-kz} \quad (3)$$

对岩样的电阻率进行了修正^[6],式中 ρ 和 ρ_z 分别为温度为 t 和零摄氏度时的电阻率, k 为电阻率衰减系数.取 $k=0.026$,并将各点上的电阻率值统一修正为 20°C 时的值,即得相同温度条件下的岩样电阻率空间分布图像.

3 结果与讨论

3.1 岩石电阻率空间分布的各向异性特征

图 2 给出了 X 、 Y 、 XY 和 $-XY$ 四个方向在饱和过程早期(时间 2004-03-05 16:00,为节省篇幅后文统一省去年份)与末期(03-09 10:00)和排水过程早期(03-09 10:20)与末期(03-16 18:00)的岩石电阻率平面分布图.与图 1 中的岩样图像对比表明,无论是早期还是末期,在 Y 和 XY 方向获得的电阻率空间分布特征与岩石的沉积结构特征总体上相吻合,但并不一一对应.电阻率分布图反映了电极 E93 # 和 E75 # 所在处的层理特征,但却未能表现出电极 E69 # 和 E29 # 所在处的结构特征.在 X 和 $-XY$ 方向上获得的电阻率分布图像更是与岩石的沉积结构特征有很大的不同.这一方面说明岩石电阻率参数具有明显的各向异性,只有在合适的测定方向上所获得的电阻率图像才能反映出岩石的沉积结构特征,同时也表明仅仅利用某一时刻的电阻率图像很难反映出岩石结构的全部.

通过末期图像和早期图像的对比,图 2 还反映了岩石电阻率在整个实验过程中的变化过程,说明了岩石各向异性特征在时间上所具有的稳定特性.同时也表明,即使是到了排水过程的末期,岩石的电阻率也还没有恢复到实验初期时的电阻率范围,岩石还没有完全干燥到实验初期时的状态.

通过矢量表示,图 3 显示了对应饱和过程和排水过程末期岩石电阻率空间分布的各向异性特征.为使结果显示清晰,在饱和过程和排水过程中分别采用了不同尺度的矢量长度.从图中看出,无论是在饱和过程末期还是在排水过程的末期,岩石电阻率在平面空间上的分布都呈现出明显的非均质性和各向异性.随着空间位置的不同,岩石电阻率各向异性的程度也不同.例如,在电极号为 E69 # 和 E93 # 处的各向异性特征就比电极号为 E29 # 和 E75 # 处的明显.然而,虽然不同区域电阻率的大小分布有一定的规律性(如在排水过程的末期),但仅从图 3 还很难看出岩石电阻率各向异性在空间分布上所具有的

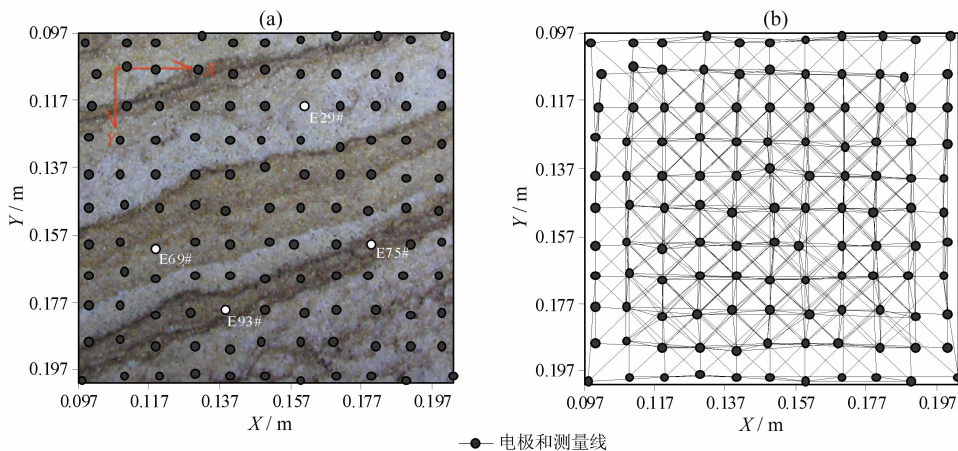


图 1 砂岩岩样上高密度电阻率成像法的电极布置和测量模式

Fig. 1 The electrodes and measurement patterns for ERT in the sandstone block

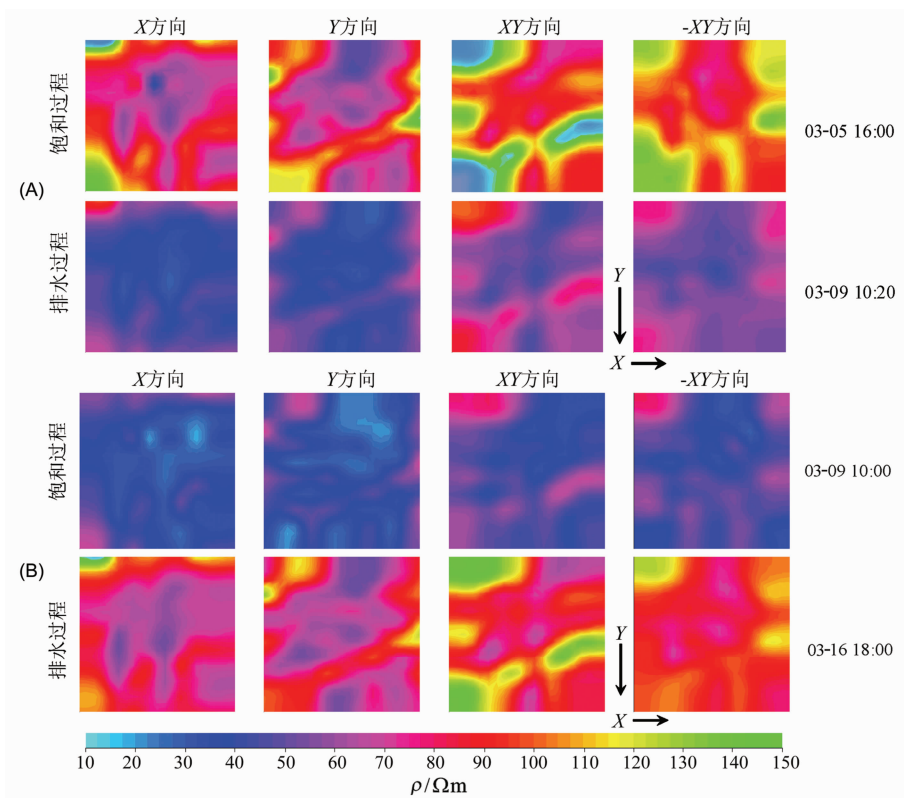


图 2 饱和过程和排水过程早期(A)和末期(B)不同方向上所获得的电阻率空间分布

Fig. 2 The resistivity distributions measured in different directions during saturation and desaturation periods.

特征. 饱和过程和排水过程的比较表明, 岩石的饱和过程有助于岩石电阻率的均一化和各向异性程度的减小, 而岩石的排水过程则加剧了岩石电阻率空间分布的非均质性和各向异性的程度.

为了进一步说明岩石电阻率空间分布的各向异性特征, 图 4 给出了不同方向上获得的岩石电阻率值分别在 X、Y、XY 和 $-XY$ 四个方向上的实验半变差图, 图中的横线是相应的方差.

首先, 从实验半变差曲线与纵坐标轴的交点(块金值, nugget effect)均在零左右可以看出, 利用高密度电阻率成像法所获得的岩石电阻率在所观测的尺度上没有明显的随机分布特征, 说明岩石电阻率具有显著的空间分布结构或模式.

其次, 无论是在哪一个测定方向上, 也无论是在饱和过程还是排水过程的末期, 所获得的岩石电阻率都在不同的方向上显示出了明显不同的相关长度

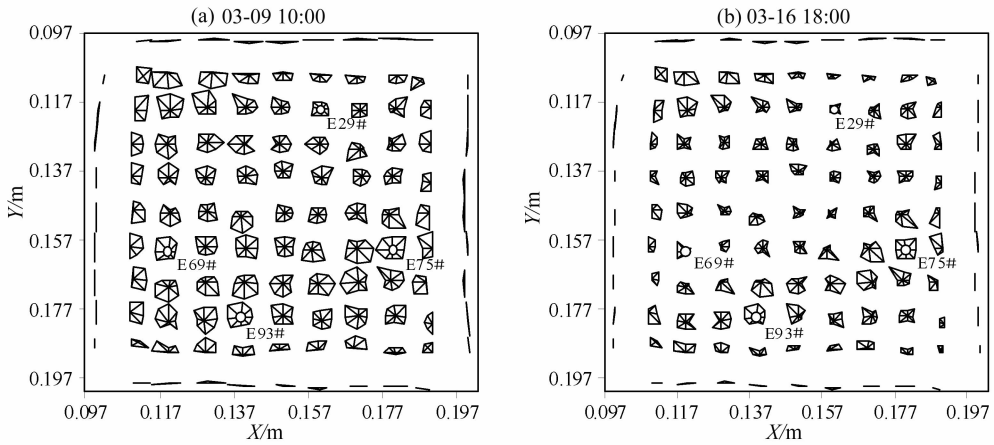


图3 岩石电阻率的各向异性特征

电阻率由电极位置出发的矢量表示,大小由归一化到 0.001 m(最小值)至 0.0125 m(最大值)间的矢量的长度代表。

Fig. 3 Anisotropy of the rock resistivity

The resistivity is expressed by a vector from the electrode, and is represented by the vector length normalized

(correlation range),说明岩石电阻率空间分布具有普遍的各向异性特征.但不同方向测得的岩石电阻率之间又都具有不同的各向异性特性,并受岩石饱和和状态的影响.例如,对于饱和过程末期 Y 方向上的实验半变差曲线(图 4(a~d)中四方块曲线),其在 X、XY 和 -XY 三个方向获得的实验半变差都达到或接近相应的基台值(sill),而在 Y 方向上获得的实验半变差却始终小于相应的基台值,处于正相关状态,说明在 Y 方向上获得的岩石电阻率并未完全反映出该方向上电阻率的空间变异特性.比较图 4f 和 4b 可以看出,岩石的排水过程虽然对 X、XY 和 -XY 三个方向上的实验半变差曲线影响不大,但却对 Y 方向上的实验半变差曲线产生了明显的影响.排水过程促进了 Y 方向上电阻率相关长度的减小,增加了岩石电阻率在该方向上的空间变异性.

参照图 1 中的岩样图像,将四个方向分为 Y、XY 和 X、-XY 两组,在图 4c 和 4g 中可以看出两组方向的实验半变差曲线在尺度较小时分别具有明显不同的斜率,前者大后者小,说明前两个方向的空间变异性要大于后两个方向.由于这两个方向正好是与岩石沉积层理近似垂直的方向,因此它反映出在 XY 方向上获得的垂直层理方向的岩石电阻率具有空间变异性大和相关长度小的自然特性,与岩石沉积结构的分布特征相吻合.

上述结果表明,由于介质各向异性特征的普遍存在,在不同的测定方向上所获得的电阻率分布图像具有明显不同的空间分布结构.这种空间分布结构的不同不是测定误差所致,它反映了监测对象在不同方向上所具有的不同的导电特性.只有在某个

合适的方向上进行测定时,所获得的岩石电特性的空间分布特征才与岩石的沉积结构特征相吻合.因此,通过对高密度电阻率成像法获得的不同方向上的电阻率参数空间分布图像的分析,我们可以间接的认识岩石物理特性在不同方向上的空间分布特征.

3.2 岩样的饱和过程

通过上述分析可知,在 Y 和 XY 方向所获得的岩石电阻率图像能较好的反映岩石沉积结构的分布特征.为此,我们选用 Y 方向上获得的岩石电阻率图像,并将饱和过程开始前的电阻率值作为背景值,来分析饱和过程中岩石电阻率增值空间分布的时间变化过程(图 5).由于岩石电阻率随含水量的增加而降低,岩石的饱和过程将引起岩石电阻率值的降低.在饱和过程的初期,岩石电阻率的降低普遍较小,但在 E93 # 和 E75 # 电极所在层理的两端和左上角都出现了电阻率降低较大的区域.随着岩石的不断饱和,这些电阻率降低较大的区域不断扩大,并在 E93 # 和 E75 # 电极所在层理处连成一条电阻率降低较大的条带.在该条带的左上侧还可隐约看见一条断续的、电阻率降低值不大的条带,位置上与电极 E29 # 和 E69 # 所夹的层面对应.虽然,因为电阻率本身有绝对值大小的差异,还不能将电阻率降低最大的区域直接解释为水分入渗的优先区域,但电阻率增值空间分布的时间变化过程清晰地反映了岩样的沉积结构特征和饱和过程的非均匀入渗特性却是肯定的,显示了高密度电阻率成像法在动态监测方面的优势.

3.3 岩样的排水过程

由于含水量的减少和导电性的降低,岩样的排

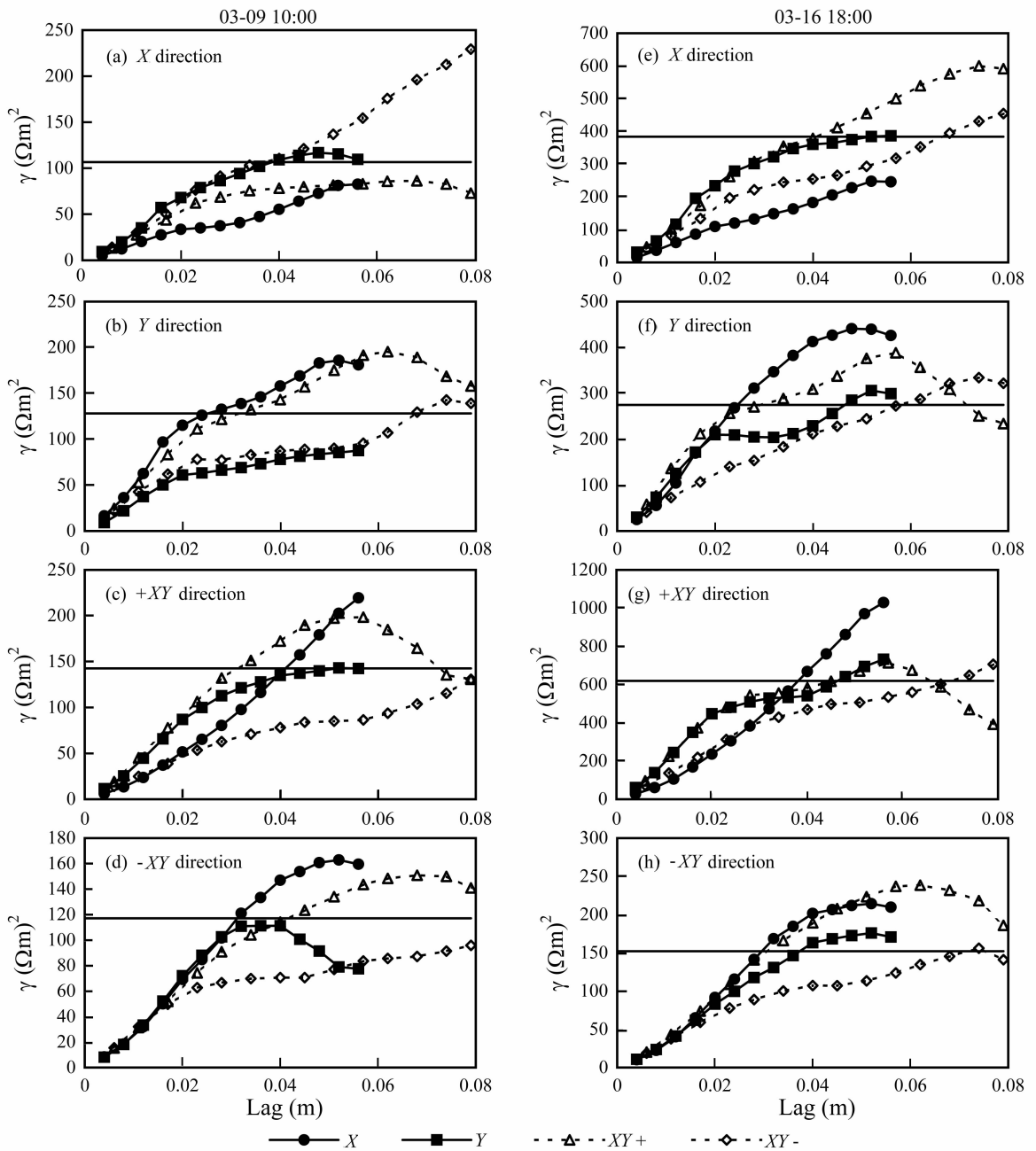


图 4 在四个方向上获得的岩石电阻率的实验半变差图

Fig. 4 The experimental semi-variograms for rock resistivity distributions measured at four different directions.

水过程将引起岩石电阻率值的增加. 图 6 给出了岩样排水过程中 Y 方向上获得的电阻率增值空间分布的时间变化过程. 与饱和过程类似, 我们同样将排水过程之前的电阻率值作为背景. 在排水过程的初期, 岩石电阻率普遍增加不大, 仅在岩石层理面两侧出现了电阻率增值较大的区域. 但随着进一步的排水, 这些电阻率增值较大的区域逐渐沿层理面扩展, 并相互连通, 最后形成与岩石层理面对应的电阻率增值较大的多个条带. 与图 5 的比较发现, 这些电阻率增值较大的区域与饱和过程中电阻率降低较大的

区域在空间结构上非常吻合, 说明岩石的排水过程沿袭了其饱和过程中的结构特征, 同样是一种非均匀的过程.

事实上, 通过与图 2 的比较可知, 图 5 和 6 中电阻率变化较大的区域正是图 2 中电阻率值相对较高的区域. 由于砂岩的岩石颗粒本身不会在短期的饱和和排水过程中有较大的电阻率变化, 电阻率的较大变化应该主要由岩石颗粒间空隙中的饱和和排水过程引起. 因此, 这意味着位于电极 E93# 和 E75# 层理附近的岩石要比其他区域的岩石具有更加疏松

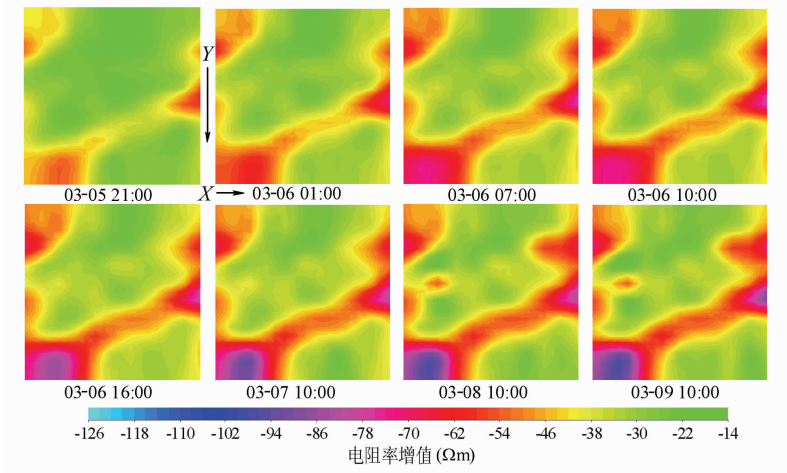


图 5 饱和过程中 Y 方向上获得的电阻率增值空间分布的时间变化过程
Fig. 5 The temporal variations of resistivity increment distribution obtained at Y-direction during the saturation period

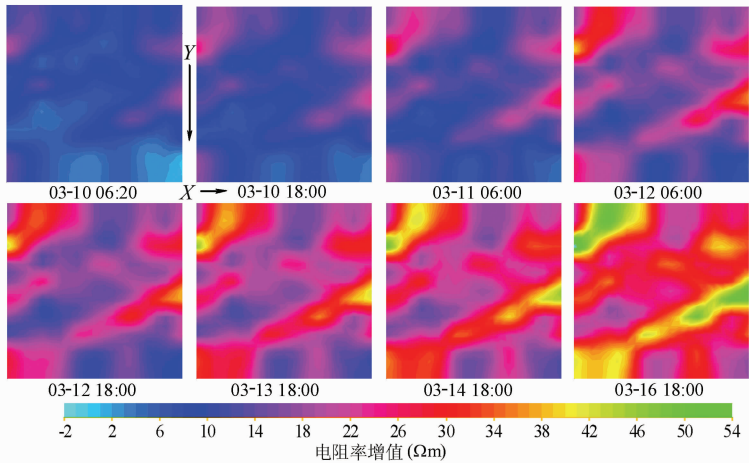


图 6 排水过程中 Y 方向上获得的电阻率增值空间分布的时间变化过程
Fig. 6 The temporal variations of resistivity increment distribution obtained at Y-direction during the desaturation period

的孔隙结构.

4 结 语

通过在小尺度岩样所做的高密度电阻率成像分析,本文首先探讨了小尺度电阻率成像的可能性,所得结果说明在电极间距为 1 cm 左右的样品尺度上进行高密度电阻率成像是完全可能的,所得的电阻率图像也是可靠的,完全可以用于分析岩石的各向异性特征.由此可以断定,只要样品的电阻值不超过仪器测定的上限,高密度电阻率成像法还可以进一步的在毫米尺度上进行,这为我们在小尺度上研究材料电阻率的非均质性和各向异性特征提供了一种新的手段.

其次,通过对不同测定方向上获得的电阻率图像的分析,充分说明了监测岩样具有显著的电阻率各向异性和非均质性,同时也证明了电阻率成像法具有在不同方向上对监测对象进行成像和动态监测的能力,可为研究勘测对象各向异性特征提供大量的电阻率资料.在 Y 和 XY 方向上获得的电阻率图像与岩样沉积结构的吻合,意味着当其他方法难以识别监测对象物理特性的空间分布特征时,高密度电阻率成像有可能成为其识别该物理特性空间分布特征的有效手段.

最后,通过对岩样饱水过程和排水过程的成像和动态监测,本文充分说明了电阻率成像技术在动态监测勘测对象内发生的物理过程方面的优势.所作实验的结果表明,岩石的饱水过程和排水过程引

起了岩石特定区域电阻率值的较大变化,说明在这些区域内岩石具有相对疏松的结构特征。由于通过电阻率成像和动态监测可以实现对有关物理变化过程的可视化分析,因此该方法在提取相关参数、进行模拟分析和验证模拟结果方面都具有重要的应用前景。

参考文献(References)

- [1] 陈峰,安金珍,廖椿庭. 原始电阻率各向异性岩石电阻率变化的方向性. 地球物理学报, 2003, **46**(2): 271~280
Chen F, An J Z, Liao C T. Directional characteristic of resistivity changes in rock of original resistivity anisotropy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(2): 271~280
- [2] 陈峰,修济刚,安金珍等. 用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩石破裂前兆和确定主破裂扩展方向. 地震学报, 2000, **22**(2): 210~213
Chen F, Xiu J G, An J Z, et al. Detecting rupture precursors and determining the main fracture spread direction of rock with dynamic rock resistivity change anisotropy. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2000, **22**(2): 210~213
- [3] 廖椿庭,陈峰,吴满路,安金珍. 隐伏断裂扩展前兆探测新技术的研究. 地球学报, 2003, **24**(5): 453~458
Liao C T, Chen F, Wu M L, An J Z. A new technique for detecting the spreading precursor of underground concealed fracture. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2003, **24**(5): 453~458
- [4] 郝锦琦,冯锐,周建国等. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨. 地球物理学报, 2002, **45**(3): 426~434
Hao J Q, Feng R, Zhou J G, et al. Study on the mechanism of resistivity changes during rock cracking. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(3): 426~434
- [5] 陈峰,廖椿庭,安金珍. 剪切和摩擦滑动大模型的视电阻率变化幅度和各向异性. 地球物理学报, 2003, **46**(5): 667~675
Chen F, Liao C T, An J Z. Amplitude and anisotropy of apparent resistivity change in big models during shear and frictional slipping. *Chinese J. Geophys.*, 2003, **46**(5): 667~675
- [6] Zhou Q Y. A study on groundwater movement around cavity in fractured rocks using electrical resistivity tomography. Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC report, 2002. JNC TN7400 2002-001, 70pp
- [7] Shima H. 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, 1992, **57**(10): 1270~1281
- [8] Shima H. Inversion in electrical and electromagnetic exploration. *Journal of Geography*, 1995, **104**(7): 952~971
- [9] Binley A, Henry-Poulter S, Shaw B. Examination of solute transport in an undisturbed soil column using electrical resistance tomography. *Water Resour. Res.*, 1996, **32**(4): 763~769
- [10] Ramirez A, Daily W, LaBrecque D, Owen E, Chesnut D. Monitoring an underground steam injection process using electrical resistance tomography. *Water Resour. Res.*, 1993, **29**(1): 73~87
- [11] White P A. Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity. *Geophysics*, 1994, **59**(2): 192~201
- [12] Yang C H, Tong L T, Huang C F. Combined application of dc and TEM to sea-water intrusion mapping. *Geophysics*, 1999, **64**(2): 417~425
- [13] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, 2001, **37**(2): 273~285
- [14] Zhou Q Y, Matsui H, and Shimada J. Characterization of the unsaturated zone around a cavity in fractured rocks using electrical resistivity tomography. *Journal of Hydraulic Research*, 2004, **42**: 25~31
- [15] 伍开江,周启友. 岩柱中水体入渗过程的高密度电阻率成像法研究. 水文地质工程地质, 2005, **32**(2): 76~81
Wu K J, Zhou Q Y. Study about water infiltration process in rock block using high density electrical resistivity tomography. *Hydrological & Engineering Geology* (in Chinese), 2005, **32**(2): 76~81
- [16] 伍开江,周启友. 盐溶液入渗过程的电阻率成像法时空监测. 地球科学与环境学报, 2007, **29**(1): 95~98, 106
Wu K J, Zhou Q Y. Spatial and temporal monitoring of salt solution infiltration using electrical resistivity tomography. *Journal of Earth Sciences and Environment* (in Chinese), 2007, **29**(1): 95~98, 106
- [17] Zhou Q Y. A sensitivity analysis of DC resistivity prospecting on finite, homogeneous blocks and columns. *Geophysics*, 2007, **72**(6): 10.1190/1.2770537

(本文编辑 汪海英)