

电阻率层析成像法监测系统在矿井突水模型试验中的应用

刘 斌, 李术才, 李树忱, 李利平

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 为实现矿井突水过程中岩层断裂和渗流通道形成过程的实时监测和前兆信息捕捉, 将三维电阻率层析成像法作为一种实时成像监测手段尝试引入到矿井突水模型试验的监测工作中。采用具有自动采集功能的电阻率层析成像监测系统, 实现介质电阻率变化数据的实时动态监测。提出优化反演效率的计算方法, 利用 Cholesky 分解法求解电阻率层析成像正演中的大型线性方程组, 利用预条件共轭梯度法求解反演方程, 由此建立三维电阻率层析成像实时反演方法, 实现原始数据的快速反演和动态图像的实时输出。提出以电阻率层析成像法为主, 结合原始视电阻率数据分析和关键点数据时程曲线分析的多参数监测分析方法。在试验过程中, 利用层析成像法得到防突层裂隙产生、扩展直至贯通的实时动态图像, 得到主要裂隙和渗流通道的产生位置、形成过程等信息, 与实际情况基本一致。综合 3 种方法的分析结果, 得出防突层发生突水断裂的诱因, 并确定捉到确切前兆信息的最早时, 该时刻比突水发生时刻提前 998 s。模型试验证明, 电阻率层析成像系统有效地反映岩层断裂及渗流通道的形成过程, 成功地捕捉到一系列前兆信息, 为突水灾害的及时预警预报提供重要参考。

关键词: 采矿工程; 矿井突水; 模型试验; 实时监测; 前兆信息; 三维电阻率层析成像; 快速反演算法

中图分类号: TD 76

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0297 - 11

APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY MONITORING SYSTEM TO MINE WATER INRUSH MODEL TEST

LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, LI Liping

(*Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*)

Abstract: For real-time monitoring of rock fracture and seepage channel formation and capturing of precursory information in process of mine water inrush, 3D electrical resistivity tomography(ERT) is applied to real-time monitoring work in mine water inrush model test. ERT monitoring system with automatic-acquisition function is used to implement real-time and dynamic monitoring work for resistivity variation. An optimization scheme for ERT inversion is proposed, in which Cholesky decomposition algorithm is used to solve large linear system in ERT forward modeling and preconditioning conjugate gradient(PCG) algorithm is used for inversion equation. Thus 3D ERT real-time inversion method is set up; to realized quick inversion of originally observed data and real-time output of dynamic images. In addition, a multi-parameter monitoring and analysis method is proposed, in which ERT is considered as a main means combined with analysis of originally apparent resistivity data and time-history curves for key points data. In the test process, dynamic images of crack generation, propagation and transfixion in

收稿日期: 2009 - 07 - 17; **修回日期:** 2009 - 11 - 09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209407); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA11Z131); 国家自然科学基金专项基金项目(50727904); 西部交通建设科技项目(200931800008)

作者简介: 刘 斌(1983 -), 男, 2005 年毕业于山东大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下工程不良地质体超前地质预报与治理、灾害预警等方面的研究工作。E-mail: liubin0635@163.com

aquifuge are obtained by ERT. The position and formation process of the major crack and seepage channel are also obtained, which are consistent with actual situation in the test. By comprehensive analysis of the results obtained with multi-parameter monitoring and analysis method, inducement of the fracture and inrush in aquifuge are gained. And the earliest time for capturing precursory information is obtained, which is 998 s ahead of inrush. The model test shows that the formation process of the crack and seepage channel is effectively reflected; and a series of precursory information is captured successfully by using ERT; and this system can give important reference to in-time early warning and prediction of inrush disaster.

Key words: mining engineering; mine water inrush; model test; real-time monitoring; precursory information; 3D ERT; algorithm for quick inversion

1 引言

在我国,突水事故已经成为危害矿井安全的主要灾害。据统计在煤矿生产中近 20 a 来有 250 多对矿井被水淹没,直接经济损失高达人民币 350 多亿元。而且,随着矿井水文地质条件的复杂化,矿井突水灾害呈不断上升趋势,突水事故还会越来越严重。目前,全国 600 余处国有重点煤矿中受水害威胁的矿井达 285 处,占 47.5%,受水害威胁的储量达 2.5×10^{11} t。为处理煤矿水害,我国每年排出矿井水 56×10^8 m³,造成矿区水源枯竭、水与生态环境遭到破坏^[1-2]。另外,在交通隧道、输水隧洞等地下工程中,突水灾害问题亦非常严重,其中岩溶地区隧道施工中 80% 遇到水害,隧道突水、突泥已成为施工过程中最常遇到并具有极大危害性的地质灾害^[3]。因此,开展采动条件下矿井突水前兆监测研究具有重大的理论和工程价值。

通过监测突水过程中的应力、应变、位移、温度、水压等物理量的变化来捕捉突水前兆信息是进行突水预测预报的常用方法和手段^[4],取得了较好的效果。但目前关于岩体破坏和突水通道形成过程的动态监测方法的报道较少。杨天鸿等^[4]提出“采动压力和水压力扰动应力场诱发微破裂(微震活动性)是矿山突水前兆本质特征”的学术观点,指出微震监测在对岩层破坏和突水通道形成的监测和精确定位方面具有独特的优势;姜福兴等^[5]利用微震监测技术准确诊断出断层和陷落柱等构造活动的强度、烈度以及相关的时空参数,证明该技术是实现突水预警预报强有力的地球物理监测手段;施龙青和韩进^[6]提出,对于岩层突水问题,采动应力和水压力作用下岩层破断渗流通道的形成过程是突水机制研究的核心内容和关键问题。而在岩体破坏和突

水通道形成的过程中,必然伴随地下水的活动。对于离子导体类岩石,含水量是影响其导电性的决定性因素,因此岩层突水必然导致岩体导电性发生动态变化。这就为利用直流电阻率法监测突水过程提供了物理基础。近年来,直流电阻率法在震前兆监测、断层失稳监测、矿井顶板失稳预报、岩石裂隙扩展监测等方面的研究较为深入,取得了较好的效果^[7-9]。但是上述研究工作中均采用了单一极距的对称四极装置形式,从视电阻率时程曲线中直观地获得信息,该方法主要有 2 个缺点:(1) 仅是对局部某几个点的导电性变化的监测,无法获得较大范围内岩体导电性变化的详细信息,可能会导致重要前兆信息的遗漏;(2) 受电极距测深的影响,对深部岩体电性变化响应不敏感,导致无法获得岩体破坏初期的信息,导致预警发布的延迟。

电阻率层析成像技术在勘探领域的成功应用为解决上述问题和困难提供了新的思路和方法。电阻率层析成像法利用大量电极组成电极阵列,通过电极阵列的扫描性测量来采集介质的导电性信息,通过大量的数据反映介质内部的详细电性结构。由于电阻率层析成像法具有高精度、高分辨率等普通电法无法比拟的优点,国内外一些学者对该方法进行了深入的研究。目前该方法被成功应用于水文地质和岩土工程等领域,例如探测地下水渗流路径,探明三维空间中土壤污染物的范围,对滑坡灾害进行探测、监测和预报,室内岩石破裂试验过程监测等方面^[10-13]。在矿井围岩破坏和地下水活动监测方面,张平松等^[14]利用立体直流电法和三维电阻反演成像技术对采煤面覆岩变形与破坏进行动态测试,具有判定准确、动态效应强的特点;刘树才等^[15]对煤层底板采动导水裂隙带演化地电模型进行了深入的正演研究,并将该方法成功用于工程实际。上述研究对围岩破坏和地下水活动的电阻率法监测具有重

要的探索意义和推动作用,但目前总体来说,利用电阻率层析成像法进行突水前兆监测的文献或报道较少,对于突水前兆的电阻率层析成像实时监测的研究不够系统和深入,尤其在反演成像技术方面,快速稳定的实时反演方法有待研究和开发。

利用具有实时数据采集功能的电法仪器和层析成像测量网络,以较高的采样率对岩层实施自动监测,可实时采集反映岩层破裂和地下水活动等过程的动态电阻率变化信息,从而识别和捕捉到包括岩层断裂和突水通道形成在内的重要突水前兆信息,为突水灾害的预测提供参考。但是,目前对于矿井突水过程中的电阻率层析成像数据响应特征缺乏系统研究,没有与实时监测匹配的快速稳定的实时反演成像方法,因此本文从矿井突水模型试验入手,对电阻率层析成像实时监测方法和系统进行探索和研究。针对矿井突水物理模型试验中突水过程监测与前兆信息的捕捉,本文主要进行了以下 3 方面的研究工作:(1) 设计了电阻率层析成像实时监测系统,实现了数据的全程实时自动采集;(2) 综合了 Cholesky 分解算法与预条件共轭梯度算法的优点,建立了适用于实时监测的快速反演方法,利用动态输出的真电阻率分布图像对岩层破断渗流通道形成过程进行实时监测;(3) 提出了以电阻率层析成像数据为主的“三结合”(原始视电阻率数据、层析成像数据和关键点时程曲线相结合)的多参数监测分析思路,多个参数之间相互补充、相互印证,有效的提高了突水前兆信息捕捉的成功概率。本文利用上述研究成果对矿井突水模型试验中突水过程进行了实时监测,并结合实际开挖情况对电阻率层析成像法实时监测系统的可行性和有效性进行了评价。

2 电阻率层析成像实时监测系统与方法

与基于勘探目的的电阻率层析成像法相比,用于实时监测的电阻率层析成像法具有全程自动监测、快速反演成像、多参数综合判断的特点。

2.1 电阻率层析成像实时监测系统

图 1 为本文所采用的电阻率层析成像实时监测系统,主要由计算机、主机(重庆奔腾生产的 WDA-1 型)、多路电极转换器(重庆奔腾生产的 WDZJ-3 型)、电源和测量电缆组成。该系统主要特点如下:



图 1 电阻率层析成像实时监测系统

Fig.1 Real-time monitoring system based on ERT

(1) 对数据采集软件进行了改进,扫描完一组数据之后无须人工干预自动进行下一组数据的测量,实现了数据的实时自动采集。

(2) 借助蓝牙设备实现了主机与计算机之间的数据实时传输,为快速反演和实时数据输出奠定了基础。

2.2 快速反演成像方法

正演是反演的前提和基础,本文利用有限单元法求解三维点源电场异常电位的变分问题以实现电阻率层析成像的正演。利用八节点六面体单元对求解区域进行剖分,得到单元系数矩阵,最终合成总体系数矩阵,得到的线性方程组为

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{K}'\mathbf{u}_0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 和 \mathbf{u}_0 分别为含有各节点异常和正常电位值的向量, \mathbf{K}' 和 \mathbf{K} 分别为正常和异常电位向量的总体系数矩阵。

对于节点 i , 正常电位 u_{0i} 可表示为

$$u_{0i} = \frac{I}{2\pi\sigma_0 R} \quad (2)$$

式中: R 为该节点与电源点的距离, I 为电流, σ_0 为电源点附近围岩的电导率。

求得每个节点的正常电位值后,便得到正常电位向量 \mathbf{u}_0 。这样式(1)就成为以节点异常电位为未知量的线性方程组,求解该方程便可得到节点的异常电位,从而得到节点的总电位值,即

$$v_i = u_i + u_{0i} \quad (3)$$

式中: v_i 与 u_i 分别为节点 i 的总电位值和异常电位值。在有限单元法数值正演中,式(1)的求解是关键步骤,相关求解方法将在后面进行详细地介绍。

本文的反演方法建立在上述有限元数值正演的

基础之上，采用具有光滑约束的最小二乘三维电阻率反演方法，将电阻率反演问题线性化，并引入光滑约束，经过正则化处理得到反演成像方程，即

$$(A^T A + \lambda C^T C) \Delta m = A^T \Delta d \quad (4)$$

式中： A 为敏感度矩阵，又称为偏导数矩阵，表示数值正演得到的理论观测数据对模型参数的偏导数矩阵； Δm 为每次反演迭代中模型参数增量向量； Δd 为观测数据 d_{obs} 与正演理论值 d_m 的残差向量，其中， d_m 为根据给定的模型参数由数值正演得到的理论观测数据； λ 为拉格朗日常数，代表着反演方程中光滑约束的权重； C 为光滑度矩阵^[16~18]。

利用式(4)可以得到每次反演迭代中的模型参数增量 Δm ，从而求得下一次迭代中的模型参数 m_{i+1} ，即

$$m_{i+1} = m_i + \Delta m \quad (5)$$

式中： m_i 为本次迭代中的模型参数向量。

本文所采用的电阻率层析成像法反演的流程如图 2 所示。首先设定网格电阻率的初值，通过正演得到理论观测数据 d_m ，若 d_m 与实际观测数据 d_{obs} 相差较大，则求解反演方程得到新的模型参数。当理论观测数据与实际观测数据之间的误差达到容许范围时，将此时得到的模型参数作为反演的结果，并将反演结果输出。反演收敛的判据为 $rus < \epsilon_{inv}$ ，其中 rus 为观测数据 d_{obs} 与正演理论值 d_m 之间的均方误差。

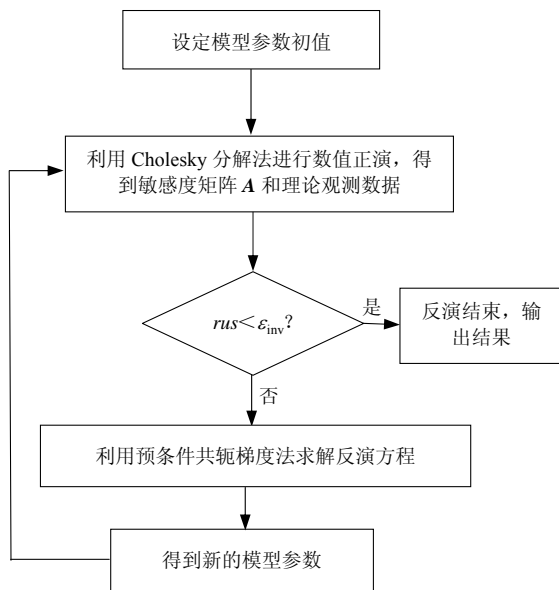


图 2 电阻率层析成像反演流程图
Fig.2 Inversion process of ERT

在整个反演流程中，计算量最大的是敏感度矩阵 A 和反演方程的求解，所以提高二者的求解速度是实现快速反演的关键，为此设计了 Cholesky 分解法与 PCG 算法相结合的计算效率优化方案：

(1) 敏感度矩阵的求解^[18]：利用互换定律法求解敏感度矩阵，互换定律法要求每计算一次敏感度矩阵需要进行多次正演，故采用 Cholesky 分解法求解 A 。针对多次正演，Cholesky 分解法只需对有限元系数矩阵进行一次分解，然后对不同的电源点只需进行回代即可，其计算效率相对于迭代法或高斯 LU 分解法具有明显优势。

(2) 反演成像方程的求解：利用预条件共轭梯度算法求解反演方程，避免了矩阵乘 $A^T A$ 和 $C^T C$ 的直接计算，且将雅可比迭代的块对角矩阵(即系数矩阵的对角线矩阵)作为预条件矩阵，其计算速度明显高于高斯类方法和其他预条件共轭梯度法^[19, 20]。

(3) 模型参数初值的选取：对于线性反演方法而言，模型参数初值的选取对反演收敛速度的影响较大。因为矿井突水过程是一个连续的过程，所以将本次的反演结果作为下一组原始数据反演的模型参数初值，有效地减少了反演迭代的次数，提高了反演速度。

2.3 多参数监测方法

与原始监测数据相比，电阻率层析成像反演结果能够更为真实地反映介质的导电性结构，但是由于反演需要一定的时间，如果单纯依靠反演结果必然导致前兆信息捕捉的滞后，这对突水预测不利。基于此问题，提出了以层析成像数据为主的“三结合”(原始视电阻率数据、层析成像数据和关键点时程曲线相结合)的监测分析方法，多参数、多角度地进行突水前兆信息的识别与捕捉，以提高信息捕捉的成功概率。

3 模型试验

该试验旨在通过开展巨型含水体下方矿井采区开挖的模型试验，实时监测突水过程中围岩应力、位移、渗流以及电场等多个信息的变化，以捕捉突水灾害发生的前兆信息。其中电阻率层析成像实时监测法是主要的监测手段之一。该试验采用平面应力模型，图 3 为模型架照片(矿井采区突水模型试验中要拆除模型前后板)。图 4 为模型中岩层组成的三维示意图，给出了岩层的组成以及含水构

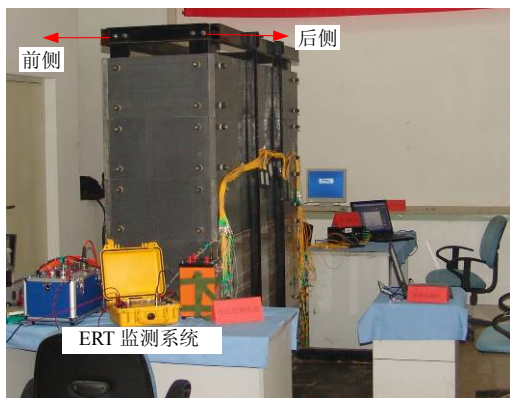


图 3 矿井突水模型试验架

Fig.3 Model test fixture for mine water inrush

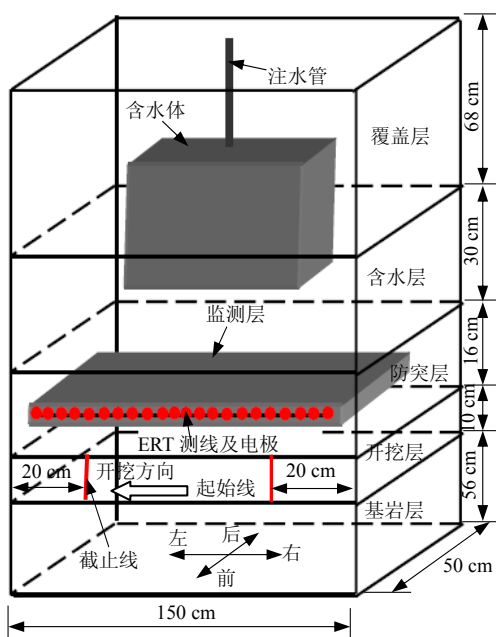


图 4 模型试验中岩层组成示意图

Fig.4 Sketch of rock composition in model test

造、监测层的位置。其中防突层上方的含水层中预置了含水构造以模拟作用在防突层上的水压力，该含水构造为六面体高强 PVC 水箱，其外部尺寸为 50 cm×50 cm×30 cm，箱体的六面皆镂空，外贴拉密细尼龙滤网，保证水与周围材料的相互作用。水压加载系统由水压增压器和数字控制系统组成，以实现水压加载的精确控制。防突层自上至下由软岩层(厚 8 cm)、监测层(厚 1 cm)、硬岩层(厚 5 cm)和软岩层(厚 2 cm)组成^[21]。该试验中的试验材料为新型流固耦合试验材料，分别以石蜡和液压油为胶结剂和调节剂，以砂和滑石粉为骨料，该试验材料不导电，故在防突层中设置了电阻率层析成像监测

层。监测层中的材料采用黏土等导电材料。由于监测层位于防突层之中，故监测层中电阻率信息的变化可直观地反映采动应力和水压力作用下防突层的变化信息。监测层的位置和测线布置见图 4，电极布置采用施伦贝谢尔装置形式，电极总数为 30 根，每组成像数据包包含 196 个视电阻率值，每组数据的采集耗时约为 6 min。需要指出的是在实际矿井中的岩体一般可导电，将电极布置在围岩表面即可，不需要内嵌监测层。

在试验过程中，将开始开挖的时刻作为零时刻，由起始线(见图 4)开始，到截止位置结束，由右向左开挖，总共进行了 8 个开挖步，开挖步长均匀，每一步开挖完毕，待各监测数据稳定后再进行下一步开挖。02: 38: 24 时防突层发生垮塌和突水，各参数的监测工作完毕。需要说明的是，在开挖之前含水构造已经注水，且水已经渗透到监测层，由视电阻率数据可推测监测层已经达到饱和，因此监测层在起始时刻表现为低电阻特性。在开挖之前采集一组成像数据作为初始数据。

4 试验数据分析

采用“三结合”的方法对测量数据进行分析：

- (1) 对比不同时刻的原始视电阻率数据及其相对变化值，定性分析监测层的电阻率变化情况并推断岩层的突水发展情况；
- (2) 利用三维电阻率层析成像方法得到层析成像数据，得到不同时刻的监测层的真实电阻率结构及其相对变化值分布，以捕捉岩层破裂、坍塌及突水等现象的真实信息；
- (3) 研究关键点电阻率数据随时间的变化情况，以直观地捕捉突水灾害发生的前兆信息。最后结合上述分析结果，作出综合判断。

4.1 视电阻率数据及其相对变化值分析

4.1.1 数据分析

对于施伦贝谢尔装置形式，视电阻率数据的结构阵列如图 5(a)所示，该数据阵列中共有 14 行，27 列。按照图 5(a)所示的数据结构绘制初始数据断面图，如图 5(b)所示。从多组原始数据中选取 6 组数据，绘制成断面图并作插值处理，如图 6(a)所示，其中每个断面图的小标题为数据的采集时刻。

为了更为清晰地分析介质的导电性的变化，将开挖之前得到的初始数据作为背景数据计算相对电

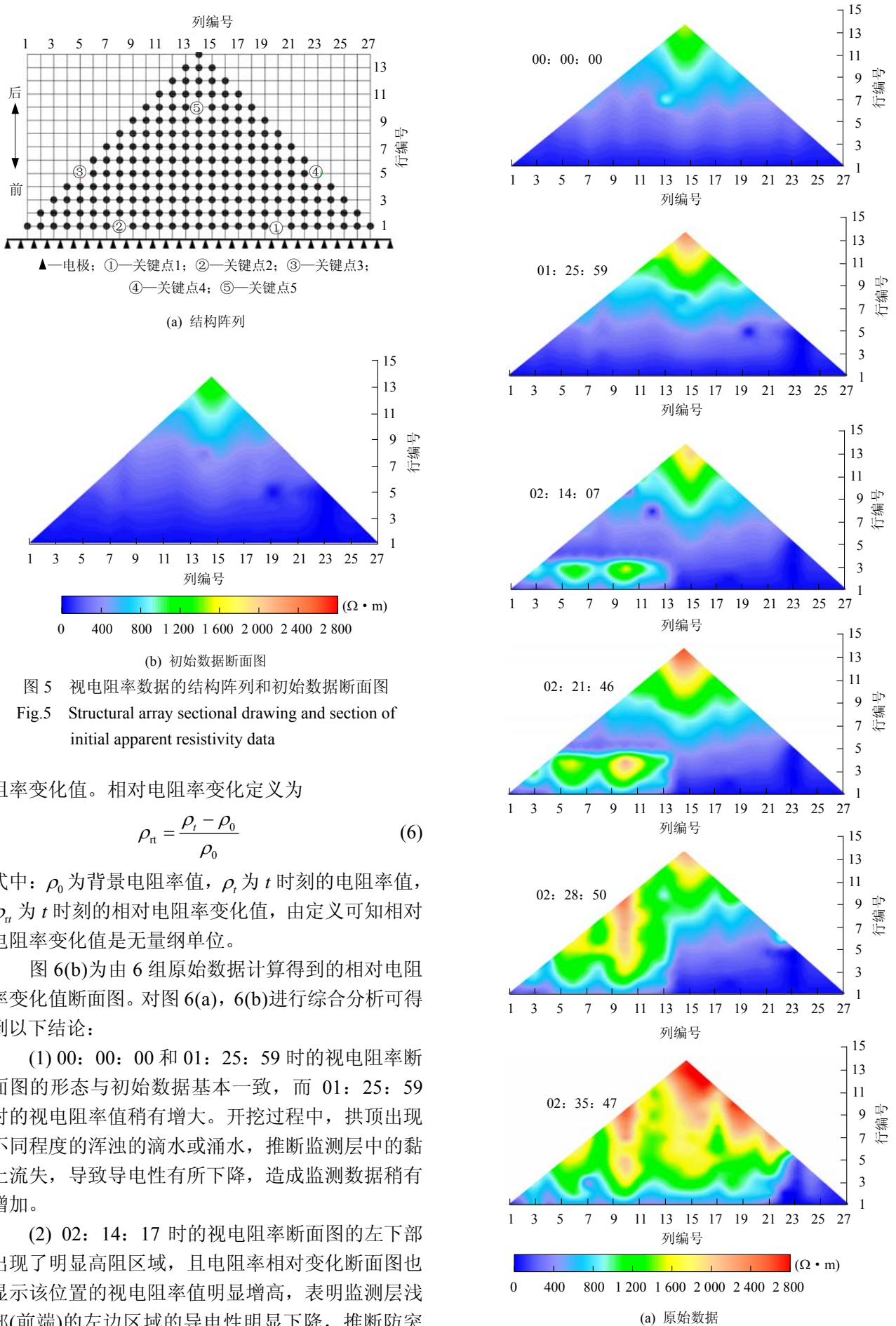


图5 视电阻率数据的结构阵列和初始数据断面图
 Fig.5 Structural array sectional drawing and section of initial apparent resistivity data

阻率变化值。相对电阻率变化定义为

$$\rho_{\pi} = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0} \quad (6)$$

式中： ρ_0 为背景电阻率值， ρ_t 为 t 时刻的电阻率值， ρ_{π} 为 t 时刻的相对电阻率变化值，由定义可知相对电阻率变化值是无量纲单位。

图 6(b) 为由 6 组原始数据计算得到的相对电阻率变化值断面图。对图 6(a), 6(b) 进行综合分析可得到以下结论：

(1) 00: 00: 00 和 01: 25: 59 时的视电阻率断面图的形态与初始数据基本一致，而 01: 25: 59 时的视电阻率值稍有增大。开挖过程中，拱顶出现不同程度的浑浊的滴水或涌水，推断监测层中的黏土流失，导致导电性有所下降，造成监测数据稍有增加。

(2) 02: 14: 17 时的视电阻率断面图的左下部出现了明显高阻区域，且电阻率相对变化断面图也显示该位置的视电阻率值明显增高，表明监测层浅部(前端)的左边区域的导电性明显下降，推断防突

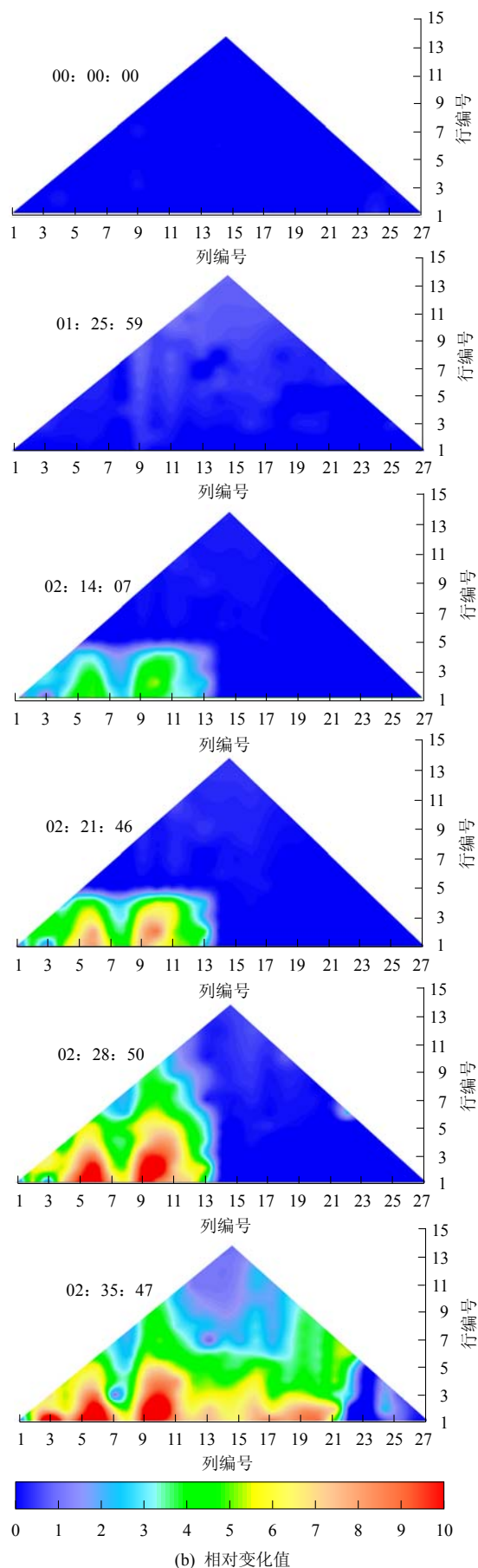


图 6 不同时刻视电阻率断面图
Fig.6 Sectional drawing of apparent resistivity data at different times

层在该位置出现裂缝, 导致黏土和水流失加快。02: 21: 46 时该位置的导电性进一步降低, 其形态与 02: 14: 17 时基本一致。

(3) 02: 28: 50 时的视电阻率断面图和相对电阻率变化断面图均出现了明显的突变, 高阻范围扩展到左侧的大部区域, 表明监测层的导电性结构发生突变。02: 35: 47 时的断面图表明高阻范围向右发展, 扩展到大部区域。02: 38: 24 时防突层中部发生失稳坍塌和突水, 电阻率层析成像实时监测终止。

由图 6 可看出, 02: 28: 50 时的断面图形态发生突变, 可视作防突层即将发生坍塌突水的重要前兆信息, 该时刻较突水坍塌灾害的发生时刻提前了 574 s。

4.1.2 与实际试验情况对比

图 7 为防突层中断裂发生、发展直至坍塌突水的照片。首先在左侧产生裂缝(见图 7(a)), 然后在中部出现裂缝(见图 7(b)), 中部裂缝的扩展速度超过了左侧裂缝, 导致防突层(含监测层)中部于 02: 38: 24 时发生断裂, 防突层(含监测层)坍塌呈 V 字形并发生突水(见图 7(c)), 最后防突层的左侧发生断裂(见图 7(d))。

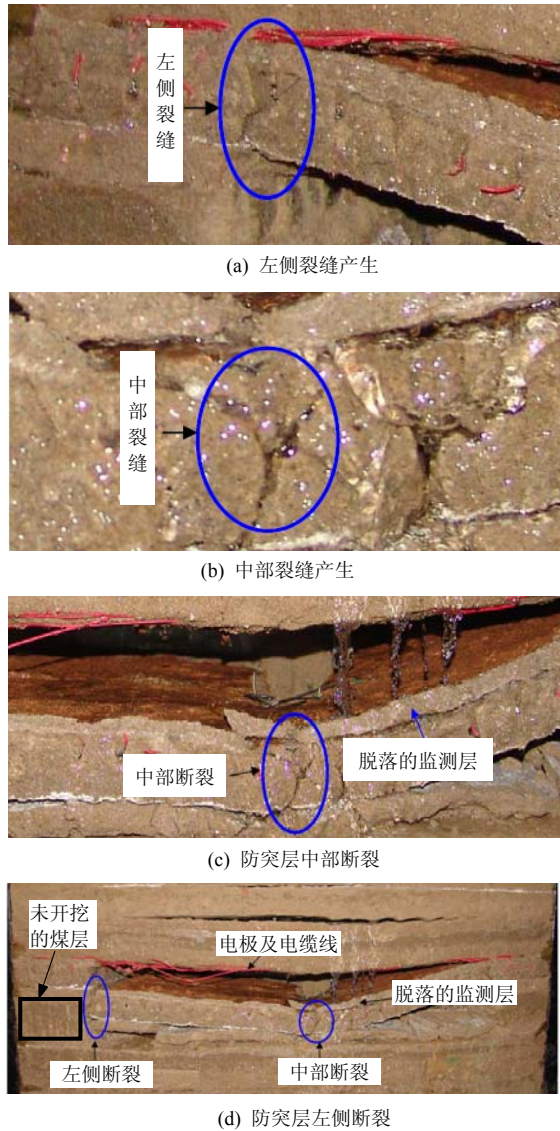
可见, 虽然利用视电阻率值及其相对变化值断面图相结合的分析方法有效地捕捉到了突水前兆信息, 但利用该方法只能定性推断破裂发生的大致区域和过程, 无法获知更详细的前兆信息。

4.2 反演得到的真电阻率及其相对变化值分析

利用快速反演方法对原始数据进行反演处理, 在建立有限单元模型时, 由于监测层的厚度只有 1 cm, 故在厚度方向上划分了 2 层, 模型在 x, y, z 方向上的网格数分别为 70, 2 和 20 个。以 01: 25: 59 时的原始数据的反演为例, 达到收敛所需的迭代次数为 8 次, 总耗时为 520 s(计算机主频为 1.83 GHz, 内存为 1.0 GB)。每次迭代耗时约 65 s, 其中 Cholesky 分解法正演耗时约 1 s, 敏感度矩阵耗时约 21 s, PCG 法求解反演方程耗时约 39 s。可见上述反演方法具有迭代次数少, 收敛速度快的优点。

分析反演结果发现 y 方向上 2 层的电性分布完全一致, 故文中只给出了各时刻导电性分布的俯视图。图 8(a), 8(b)分别为反演计算后各时刻监测层的电阻率结构图和电阻率相对变化(电阻率相对变化与视电阻率相对变化的定义相同)分布图。对图 8(a)和 8(b)综合分析, 可得到如下结论:

(1) 00: 00: 00 和 01: 25: 59 时监测层的电阻率分布较为均匀, 与初始电阻率结构基本一致, 表明在开挖扰动之下防突层并未出现破裂或裂缝,



(a) 左侧裂缝产生

(b) 中部裂缝产生

(c) 防突层中部断裂

(d) 防突层左侧断裂

图 7 防突层中断裂发展情况

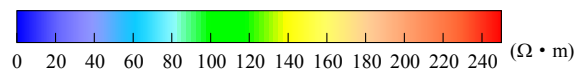
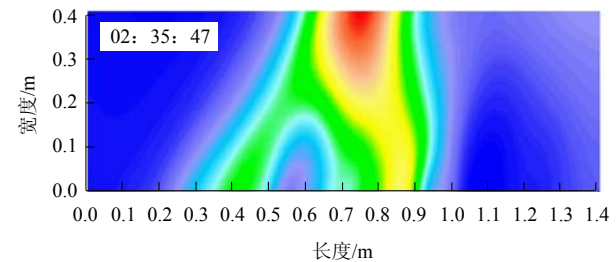
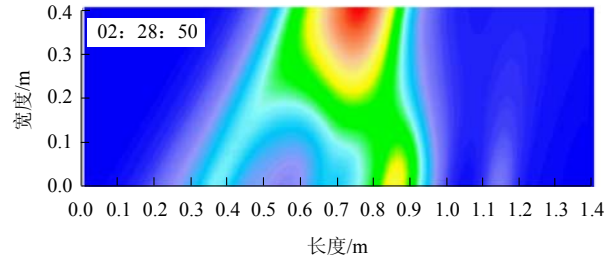
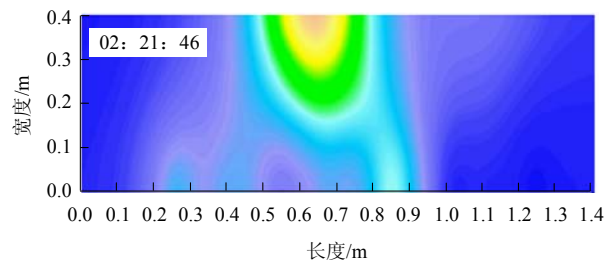
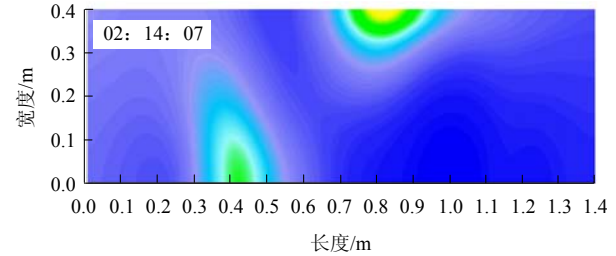
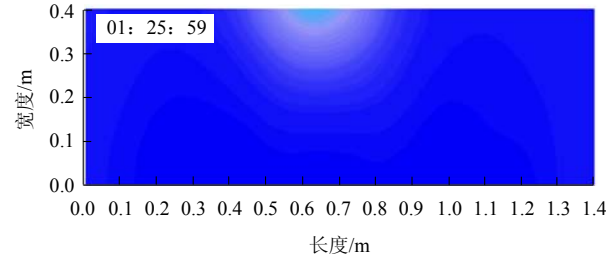
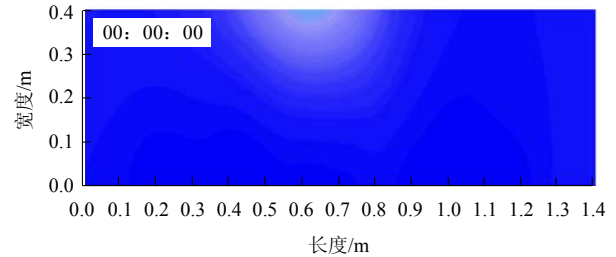
Fig.7 Process of crack propagation in aquifuge

监测层的电阻率对开挖扰动的响应不敏感。

(2) 02: 14: 07 时的断面图表明在前端左侧(0.4~0.5 m 处)和后端的中部(0.8 m 处)出现了狭长的高阻区域, 表明在这 2 处分别产生了裂缝或裂隙, 推断黏土和水在开挖过程中流失, 导致电阻率增高。由于该时刻的层析成像图明显反映了裂隙的产生, 这是防突层发生坍塌突水的重要前兆信息, 所以该时刻可视为捕捉到前兆信息的起始时刻。

(3) 02: 21: 46 时的断面图表明后端的中部(0.7 m 处)的高阻裂隙迅速扩展, 前端中部(0.8 m 处)产生了新的高阻裂隙, 而前端左侧(0.4~0.5 m 处)的高阻区域扩展缓慢。

(4) 02: 28: 50 时的断面图表明中部裂隙分别由前端和后端向内部扩展, 具有相互贯通的趋



(a) 电阻率分布图

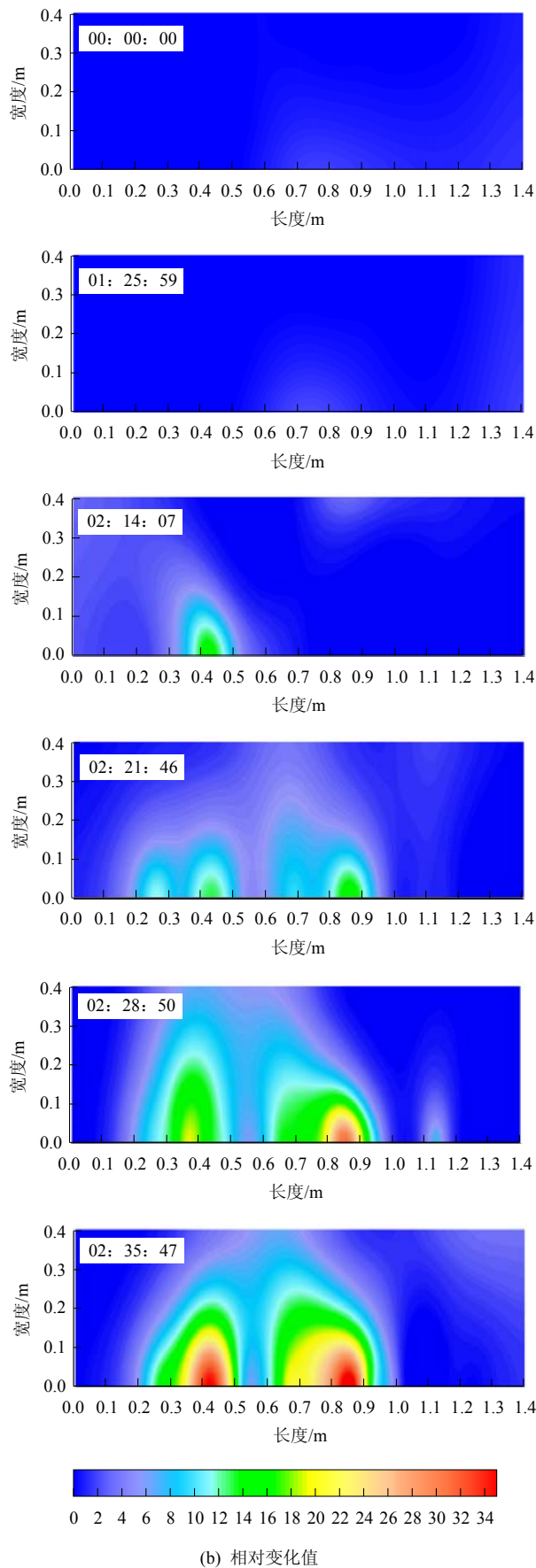


图 8 反演计算后不同时刻真电阻率分布图

Fig.8 Sectional drawing of true resistivity data at different times after inversion calculation

势, 而前端左侧(0.4~0.5 m 处)的高阻裂隙由浅部继续向深部扩展, 但其扩展速度慢于中部的裂隙, 由此可推断防突层的中部将先于左侧发生断裂坍塌。

(5) 02: 35: 47 时的断面图表明中部的裂隙几乎贯通, 而前端左侧(0.4~0.5 m 处)的裂隙的扩展速度随之亦加快。根据裂隙的状态可以推断防突层将在短时间内于中部发生断裂坍塌。

综上所述, 反演得到的真电阻率分布与相对变化数据所携带的信息具有互补的特征, 比如在 02: 21: 46 时真电阻率数据对前端中部的裂隙产生的响应并不敏感, 而相对变化数据清晰的反映了这一重要信息, 在 02: 35: 47 时相对变化图中未显示中部裂隙的贯通, 而真电阻率数据明显的显示出中部裂隙贯通的趋势。通过对二者的综合分析, 成功地捕捉到了防突层突水的一系列重要的前兆信息, 实时反映了防突层中的裂隙由产生、扩展到贯通的过程, 与实际情况基本一致。但层析成像结果存在不足之处, 主要有 2 点: (1) 虽然反演耗时较少, 但反演过程仍需要约 520 s, 这就导致前兆信息的发现时间比实际发生的时间延迟了 520 s, 因此有待进一步提高反演速度; (2) 由 02: 28: 50 和 02: 35: 47 时的断面图可看出左侧的裂隙在深部往右偏移了, 这是因为本文中反演方法的精度和分辨率随着深度的增加而增加。

4.3 关键点视电阻率时程曲线

为了更为直观地监测视电阻率时程变化信息, 在原始视电阻率数据阵列中选取了 5 个数据点作为关键点, 关键点位置如图 5 所示。其中, 关键点 1 (行号为 1, 列号为 20)和 2(行号为 1, 列号为 8)是为了监测浅部导电性变化, 关键点 3(行号为 5, 列号为 5)和 4(行号为 5, 列号为 23)是用于监测较深部两侧的导电性变化, 而关键点 5(行号为 10, 列号为 14)是为了监测深部的电阻率变化。图 9 为各点视

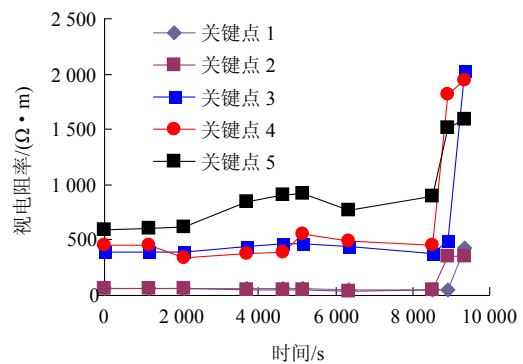


图 9 关键点视电阻率值时程曲线

Fig.9 Time-history curves of apparent resistivity for key points

电阻率值的时程曲线。各曲线均在 8 506 s(也就是 02: 21: 46 时)电阻率值突然增加, 直观有效地反映了防突层即将坍塌突水的前兆特征。

4.4 综合分析

对原始视电阻率数据、层析成像数据和关键点时程曲线的分析结果进行综合判断, 得到 2 个重要的结论: (1) 采动应力和水压力扰动下中部和左侧裂隙的生成及扩展是防突层发生突水断裂的诱因, 防突层的中部首先发生突水断裂的原因是中部裂隙的扩展速度明显快于左侧裂隙; (2) 通过对三者的前兆信息进行综合判识, 将 02: 21: 46 时作为捕捉到确切前兆信息的最早时刻, 该时刻比突水发生时刻提前了 998 s, 为及时预警提供了重要参考。

5 结 论

模型试验结果表明, 三维电阻率层析成像法监测系统对于突水过程具有实时监测、动态成像、反演速度快、响应灵敏的显著特点, 对岩层的坍塌突水灾害进行了成功的预测预报, 验证了该方法的可行性和有效性, 为该方法的实际工程应用奠定了重要的理论基础和试验基础。主要得到以下结论:

(1) 本文综合 Cholesky 分解法和预条件共轭梯度法的优点, 提出了的三维电阻率层析成像快速反演计算方法, 在实际计算中具有耗时少、收敛快的特点, 为实现动态实时监测奠定了基础。

(2) 利用三维层析成像数据实现了对监测层导电性结构的动态监测, 得到了裂隙产生、扩展直至贯通的实时图像, 得到了“采动应力和水压力扰动下中部和左侧裂隙的生成及扩展是本试验中防突层发生突水断裂的诱因”这一重要结论。

(3) 利用原始视电阻率值及其相对变化值断面图相结合的分析方法能够有效地定性推断断裂发生的大致区域和过程, 并有效地捕捉到了突水前兆信息; 而利用关键点数据的时程曲线直观有效地反映了防突层即将坍塌突水的突变前兆特征。

(4) 利用以层析成像数据为主的“三结合”的多参数监测分析方法, 可相互印证, 相互补充, 大大提高了前兆信息捕捉及识别的可靠度, 实现了对防突层突水的及时及早预警。

为了进一步提高三维电阻率层析成像法的监测质量和信息捕捉能力, 需要在以下 3 方面进行更深入的研究: (1) 提高原始数据的采样率, 缩短每组

数据的采集时间, 以获取更为丰富的数据; (2) 研究更为快速有效的反演方法, 提高反演计算的速度和深部网格的反演精度; (3) 建立对动态图像突变信息判断的量化方法, 从定量的角度判读图像的实时变化信息, 提高前兆信息的捕捉能力和可靠度。

参考文献(References):

- [1] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1-4.(MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application to water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 1-4.(in Chinese))
- [2] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 561-564.(MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, BAI Haibo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 561-564. (in Chinese))
- [3] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, 30(1): 7-9.(WANG Mengshu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004, 30(1): 7-9.(in Chinese))
- [4] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268-277.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, TAN Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277.(in Chinese))
- [5] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 932-1 938.(JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 932-1 938.(in Chinese))
- [6] 施龙青, 韩进. 底板突水机制及预测预报[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004.(SHI Longqing, HAN Jin. Floor water-inrush mechanism and prediction[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2004.(in Chinese))
- [7] 王新华, 祁贵仲, 赵玉林. 断层失稳前的扩展及电阻率前兆[J]. 中国科学(B 辑), 1984, 14(11): 1 026-1 038.(WANG Xinhua, QI Guizhong, ZHAO Yulin. The extension and resistivity precursory before fault instability[J]. Science in China(Series B), 1984, 14(11):

- 1 026 - 1 038.(in Chinese))
- [8] 杜学彬, 马占虎, 叶青, 等. 强地震附近电阻率对称四极观测的探测深度[J]. 地球物理学报, 2008, 1(6): 1 943 - 1 949.(DU Xuebin, MA Zhanhu, YE Qing, et al. The detection depth of symmetric four-electrode resistivity observation in/near the epicentral region of strong earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 1(6): 1 943 - 1 949.(in Chinese))
- [9] 葛宝堂, 李德春. 岩体电阻率观测技术预报顶板失稳的前景[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(2): 48 - 52.(GE Baotang, LI Dechun. The prospects for technique of detection rock resistivity applied prediction of roof failed in stability[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1993, 22(2): 48 - 52.(in Chinese))
- [10] WHITE P A. Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity[J]. Geophysics, 1994, 59(2): 192 - 201.
- [11] ARISTODEMOU E, THOMAS-BETTS A. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44(2/3): 275 - 302
- [12] 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨, 等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 662 - 1 669.(GUO Xiujun, JIA Yonggang, HUANG Xiaoyu, et al. Application of muti-electrodes electrical method to detection of slide-face position[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 662 - 1 669.(in Chinese))
- [13] 郝锦琦, 冯锐, 周建国, 等. 岩石破裂过程中电阻率变化机制的探讨[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 426 - 434.(HAO Jinqi, FENG Rui, ZHOU Jianguo, et al. Study of the mechanism of resistivity changes during rock cracking[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(3): 426 - 435.(in Chinese))
- [14] 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 workplace by 3D resistivity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 870 - 1 875.(in Chinese))
- [15] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348 - 356.(LIU Shucui, LIU Xinming, JIANG Zhihai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348 - 356.(in Chinese))
- [16] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.(WANG Jiaying. Inverse theory in geophysics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.(in Chinese))
- [17] 姚姚. 地球物理反演基本理论与应用方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.(YAO Yao. Basic theory and applications method in geophysics inversion[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.(in Chinese))
- [18] 黄俊革. 三维电阻率/极化率有限元正演模拟与反演成像[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2003.(HUANG Junge. 3D resistivity/IP modeling and inversion based on FEM[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2003.(in Chinese))
- [19] 吴小平, 徐果明. 利用共轭梯度法的电阻率三维反演研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 420 - 426.(WU Xiaoping, XU Guoming. Study of 3D resistivity inversion using conjugate gradient method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(3): 420 - 426.(in Chinese))
- [20] 雷光耀. 预处理技术与PCG算法[J]. 数学进展, 1992, 21(2): 129 - 139.(LEI Guangyao. Preconditioned technique and PCG algorithm[J]. Advances in Mathematics, 1992, 21(2): 129 - 139.(in Chinese))
- [21] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机制及其应用研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2009.(LI Liping. Study of catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2009.(in Chinese))