

基于孔间直流电透视的煤层底板采动破坏电阻率时移变化规律与机理

岳建华^{1,2}, 滕小振¹, 胡双贵¹, 刁丹阳¹, 张河瑞³

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 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 221116; 3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:煤层采动过程中, 底板应力状态的改变会产生变形与破坏, 而不同煤层采动过程中底板破坏具有一定的规律。目前基于直流电阻率法的煤层底板水害监测主要集中于底板变形与破坏的电阻率响应特征上。为了研究工作面回采过程中煤层底板的电性时移变化特征, 采用孔间直流电透视观测系统和时移电阻率反射系数法, 通过数值模拟和现场试验揭示了煤层底板采动破坏电阻率时移规律。首先, 针对典型地电模型, 对比单独反演和时移电阻率变化率的结果, 验证了孔间直流电透视时移方法的可靠性。然后, 针对煤层底板采动破坏, 分析了采动过程中底板承压水导升与底板破坏带的电性响应规律与特征, 并讨论了时移电阻率反射系数确定煤层底板破坏深度的可行性, 为野外施工提供理论依据。最后, 通过现场监测试验, 获得工作面回采过程中煤层底板的电性变化特征, 并采用时移电阻率反射系数 R 确定了工作面底板岩层的破坏深度为 15 m。结果表明: 利用孔间直流电透视法获得的煤层底板采动破坏电阻率时移特征可在一定程度上消除了监测数据中的地层因素和随机噪声影响, 且时移电阻率反射系数可用来确定煤层底板破坏深度。该方法将探测目标从单一的研究地质异常转换到对煤层采动过程中工作面底板破坏的全生命周期动态监测, 进而实现了工作面底板结构破坏的精细刻画。

关键词: 时移监测; 采动破坏; 孔间直流电透视; 正演模拟; 煤层底板

中图分类号: P631 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0601-15

Time-lapse change pattern and mechanism of resistivity of coal seam floor mining damage based on inter-hole DC perspective

YUE Jianhua^{1,2}, TENG Xiaozhen¹, HU Shuanggui¹, XI Danyang¹, ZHANG Herui³

(1. School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: During the coal mining process, the change in the floor stress state of coal seam will produce deformation and failure. The seam floor failure in different coal mining processes has a certain law. At present, the water disaster monitoring of coal seam floors based on the DC resistivity method mainly focuses on the resistivity response characteristics of floor deformation and damage. To investigate the temporal changes in the electrical properties of the coal seam floor dur-

收稿日期: 2023-11-22 修回日期: 2024-01-21 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1590

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (42230811); 江苏省重大科技示范资助项目 (BE2020644)

作者简介: 岳建华 (1964—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士生导师。Tel: 0516-83993620, E-mail: yuejh@cumt.edu.cn

通讯作者: 滕小振 (1996—), 男, 河南周口人, 博士。E-mail: tb20010013b31d@cumt.edu.cn

引用格式: 岳建华, 滕小振, 胡双贵, 等. 基于孔间直流电透视的煤层底板采动破坏电阻率时移变化规律与机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 601-615.

YUE Jianhua, TENG Xiaozhen, HU Shuanggui, et al. Time-lapse change pattern and mechanism of resistivity of coal seam floor mining damage based on inter-hole DC perspective[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 601-615.



移动阅读

ing mining, this study employs the inter-hole DC perspective observation system and the time-lapse resistivity reflection coefficient method. Through numerical simulation and field tests, the study uncovers the temporal variation law of the resistivity of coal seam floor induced by mining activities. First, this paper compares the results of individual inversion and time-lapse resistivity change rates for a typical geoelectric model to validate the reliability of the inter-hole DC perspective time-lapse method. Next, considering the mining-induced damage to the coal seam floor, this paper analyzes the electrical response patterns and characteristics of the rise of confined water and the damage zone in the floor during the mining process. It also discusses the feasibility of using a time-lapse resistivity reflection coefficient to assess the depth of coal seam floor damage, offering a theoretical basis for field construction. Finally, the on-site monitoring tests reveal the electrical change characteristics of coal seam floor during the coal mining process. The time-lapse resistivity reflection coefficient R is utilized to determine the damage depth of the rock layer of the working face floor, which is found to be 15 m. The study results demonstrate that the time-lapse characteristics of the resistivity of coal seam floor mining damage obtained by the inter-hole DC perspective method can mitigate the influence of formation factors and random noise in the monitoring data to a certain extent. Additionally, the time-lapse resistivity reflection coefficient can be utilized to determine the depth of coal seam floor failure. This method transforms the detection target from the single study of geological anomalies to the full life cycle dynamic monitoring of the floor damage of the working face in the process of coal mining and then realizes the detailed depiction of structural damage to the working surface floor.

Key words: time-lapse monitoring; mining damage; inter-hole direct current perspective; forward simulation; coal seam floor

煤层开采引起的集中应力会造成底板破坏,底板应力场及破坏深度的研究是底板承压水突水研究的基础^[1]。煤层底板突水是采动矿压和水压共同作用的结果,工作面回采过程中,煤层底板因应力变化产生变形、破坏使得底板隔水层厚度变薄,削弱了岩体的隔水性能,容易形成导水裂隙带,导通深部岩溶水发生突水事故^[2-3]。因此,研究煤层底板破坏带深度且实时监测其动态发育演化过程,是矿井水害防治中亟待解决的难题之一。

李富等^[4]结合煤层底板的破坏机理对易突水区域的电阻率变化进行分析,建立3种模型,并对突水点进行预测,设计出一种快速、有效、方便的矿井直流电法数据采集系统来预测底板的突水情况。张平松等^[5-6]为研究煤层采动过程中底板破坏与上覆岩层受采动超前影响至后期的动态发育规律及特征,先后采用震波CT探测技术与立体直流电法对采动过程中底板及上覆岩层进行连续探测。雷贵生等^[7]采用矿井直流电法探测带压工作面底板,含水层、潜在突水构造的位置及其分布规律取得很好的效果。刘树才^[3]在岩样物性分析的基础上建立底板采动导水裂隙带动态演化地电模型,得出煤层底板导水裂隙演化过程中的视电阻率响应特征。王家臣等^[8]采用矿井电剖面法探测工作面回采过程中底板破坏深度及岩层电性特征的变化。高召宁等^[9-11]采用直流电法,根据采动过程中岩层电阻率值的时空变化,探讨了底板岩层及覆岩破坏

与电阻率的响应关系,分辨岩层结构破坏及裂隙发育规律。张峰等^[12]采用高分辨电法仪在承压水上开采的相似模拟实验中探测煤层底板岩层电阻率,有效反应煤层底板在水压和顶板压力作用下的变化以及回采过程中不同时间的底板变形与破坏变化情况。

近些年直流电法由探测逐渐转变为监测,为地下电阻率成像提供了随时间的变化特征。DAILY等^[13-14]提出了一种使用初始数据和后续数据的比率反演方法,突出了电阻率相对于背景值的变化。KIM等^[15]开发了一种使用空间变化跨模型约束的时移反演算法并提出了选择性跨模型约束,用来识别所有随时间的显著变化,该方法在监测堤坝渗漏区中取得良好的效果。KARAOULIS等^[16]将空间和时间约束转换为活动约束,在反演中纳入先验信息,进而来区分与噪声相关的伪影,得到电阻率的真实变化,也解决了电阻率层析成像随深度增加分辨率降低的问题。LI Shucai等^[17]提出了一种以多电极阵列为特征的三维感应极化方法,并将其与时移反演实时监测和井间电阻率法相结合引入到隧道和矿山等地下工程突水灾害的预测预警。LIU Bin等^[18]将先验时间梯度约束与对观测数据进行归一化,以增强模型参数的敏感性,过滤初始模型的假异常,突出模型随时间变化的重要信息,并在隧道突水引起的地下水运移监测中成功应用。马欢等^[19]通过归一化延时电阻率法反演有效地分辨出电阻率结构的微小变化。李飞等^[20]基于延时高密

度电法的覆岩精细探测方法, 建立采前和采后的三维地质地球物理模型, 通过数值仿真计算得到了覆岩变形破坏的异常特征。孙卫民等^[21]对常见堤防隐患开展三维正演数值模拟分析, 研究了时移高密度电法在堤防隐患探测技术上的有效性。张建智^[22]根据填埋场地的物性参数, 模拟不同深度低阻体的响应特征, 证实了填埋场中所测的渗滤液电阻率、残值及视反射系数随时间具有动态变化特征。ZHOU Wenlong 等^[23]将分布式光纤传感技术和电阻率三维反演方法应用到监测深部特厚煤层开采过程中受应力影响煤层底板变形破坏的精细特征。LIU Bin 等^[24]提出了一种重构连续测量并执行 GPU 并行反演数据集的方案, 该方案能够准确的定位和描述介质电阻率的快速变化。张清明等^[25]开展了注水前后连续 3D 电阻率探测试验, 通过引入电阻率反射系数, 分析了注水前后不同时刻的电阻率变化规律。徐涛等^[26]基于时移电阻率法基本原理, 开展了膨胀土岸坡含水平裂缝结构电阻率法正演模拟, 采用数据比算法对不同时刻视电阻率归一化, 反映出了膨胀土岸坡局部电性结构细微变化。苏鹏等^[27]在常规电阻率反演算法的基础上, 推导了延时电阻率反演公式, 得出延时反演算法可以消除不同观测数据集中所包含的随机误差, 减少假异常的出现。在饱和岩石中, 电导率对原生孔隙度和次生孔隙度都很敏感, JOHNSON 等^[28]使用三维时移电阻率成像来监测深部岩层压力改变后岩层裂缝的电场响应规律。YANG Haiping 等^[29]基于并行电法监测技术, 采用约束时移电阻率反演方法, 消除了反演伪影, 最终确定了工作面底板破坏带的最大深度。KIM 等^[30]将二维反演导出的初始模型进行三维反演, 通过时移电阻率成像为基坑施工过程中监测地下地面稳定性提供了一种有效方法。

在电阻率成像中, 通常首选高密度电法, 该方法破坏性较小且成本较低, 但其分辨率随着深度的增加而迅速降低。孔间电阻率成像以布置钻孔为代价, 对于一定深度的目标体, 其分辨能力将远优于其他观测方式, 尤其适用于监测煤层底板某一深度破坏的高分辨率要求。孔间电透视法探测理论与方法研究方面, 白登海和于晟^[31]从 Shima 方法出发, 系统的阐述了浅层电阻率层析成像的原理和方法。王桦等^[32]提出了单极-单极孔间直流电阻率法, 通过水压致裂过程中电阻率变化的测试, 证明了该方法的可行性。BELL-MUNT 等^[33]为评估不同装置形式对地下结构的分辨能力, 提出了灵敏度和异常检测的指标。WANG Haoran 等^[34]阐述了孔间电阻率成像中产生对称效应的原因, 并提出了组合数据反演方法与加权模型叠加

技术来有效地抑制对称效应, 提高空间分辨率, 该研究对电极装置的选择和结果解释具有重要意义。蒋林城等^[35]通过对不同的异常体模型进行数值模拟, 综合灵敏度剖面图, 发现灵敏度等值线剖面图的疏密、形态、正负值范围等对分辨率有着直接的影响, 并对各种复杂异常体在反演图中所呈现的不同形态进行了区别分析与归类。张欣欣^[36]基于扩展卡尔曼滤波的时序反演方法, 利用孔间电阻率法完成了地下水运移的实时监测数值模拟和物理试验。付强等^[37]定性分析并总结了各模型反演图像中必然伪影的存在和分布规律, 为跨孔电阻率探测的解释提供了指导。

笔者在上述学者的研究基础上, 将孔间直流电透视观测系统应用到监测煤层底板采动破坏规律的研究中, 通过数值模拟对比了比值法与反射系数法对监测数据的处理效果, 确定反射系数法能直观的突出底板破坏的异常范围与边界。然后, 建立多组典型的地电模型, 验证孔间直流电透视方法的准确性, 揭示采动过程中底板承压水导升与底板破坏带的电性响应规律与特征。最终, 开展井下监测试验, 结合现场监测数据准确判断煤层底板的破坏范围。

1 方法原理

1.1 孔间直流电透视法

孔间直流电透视法通过在钻孔 1 内布设供电电极建立稳定电场, 在钻孔 2 内布设测量电极, 根据电位差 ΔU_{MN} 和电极之间的相对位置关系推断钻孔间的地电响应特征, 通常采用式 (1) 计算视电阻率 ρ_s :

$$\rho_s = K \Delta U_{MN} / I \quad (1)$$

式中, K 为装置系数; ΔU_{MN} 为测量电极电位差; I 为供电电流强度。

孔间直流电透视测量如图 1 所示, 首先 A_1 供电, 供电过程中另一钻孔中的测量电极依次测量 $B_1 \sim B_{11}$ 电极处的电位。 A_1 供电结束后, $A_2 \sim A_{11}$ 依次供电重复上述步骤。然后将钻孔 1 与钻孔 2 交换测试, 由钻孔 2 内电极依次供电, 钻孔 1 内电极测量电位。该方法能够增加勘探区域内的覆盖次数, 进而提高分辨率。

1.2 直流电阻率正反演方法

正反演是解决地球物理问题的重要工具。正演模拟能够在给定电阻率模型的情况下计算预测数据, 反演可以根据实际观测的数据重建电阻率模型。在直流电阻率正演模拟中, 使用有限元离散化来求解以下偏微分方程组^[38]:

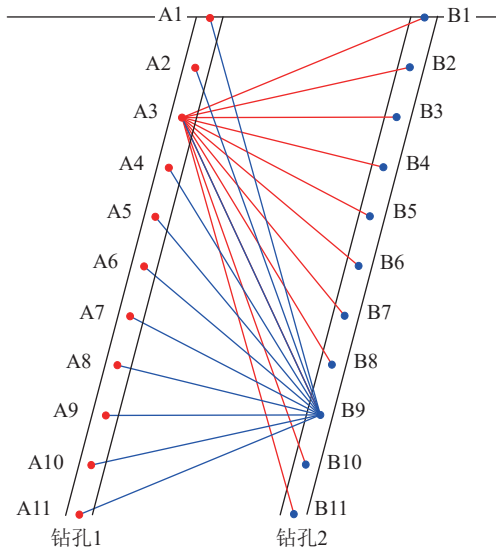


图 1 孔间直流电透视法观测系统示意

Fig.1 Schematic diagram of inter-hole DC fluoroscopy observation system

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = I [\delta(r - r_{s^+}) - \delta(r - r_{s^-})] \quad (2)$$

式中, σ 为电导率; ϕ 为电势; 等式右端项为电流源项, 这里 r 为测量点位置, r_{s^+} 和 r_{s^-} 分别为正电流源与负电流源的位置; $\delta(r - r_s)$ 为以电流源位置为中心的狄拉克函数。

对于常规的直流电法而言, 反演是通过现场采集的数据获得可靠地下电性结构的过程。在电阻率反演中, 地下电性结构为离散的模型参数电阻率, 其反演问题是一个病态问题, 因此需要采取正则化的方法来避免反演中的病态问题:

$$\phi(m) = \phi_d + \beta \phi_m \quad (3)$$

式中, ϕ_d 为数据拟合差; ϕ_m 为模型正则项; β 为正则化参数, 用以平衡两项的贡献。

式 (3) 具体展开形式为

$$\phi(m) = \frac{1}{2} \|W_d [d(m) - d_{\text{obs}}]\|^2 + \frac{\beta}{2} \|W_m (m - m_{\text{ref}})\|^2 \quad (4)$$

式中, W_d 为一个数据加权矩阵, 它是一个对角矩阵; $d(m)$ 为正演所得的预测数据; d_{obs} 为观测数据; W_m 为模型加权矩阵; m 为迭代模型; m_{ref} 为参考模型。

最小化目标函数为

$$\frac{\partial \phi(m)}{\partial m} = 0 \quad (5)$$

利用高斯-牛顿法求其模型迭代公式, 可得

$$\left(J^T W_d^T W_d J + \beta W_m^T W_m \right) \delta m = - \left\{ J^T W_d^T W_d [d(m) - d_{\text{obs}}] + \beta W_m^T W_m (m - m_{\text{ref}}) \right\} \quad (6)$$

式中, J 为雅可比矩阵, 形式为

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i(m)}{\partial m_j} \quad (7)$$

式中, $d_i(m)$ 为迭代模型 m 生成的第 i 个数据点的预测值; m_j 为迭代模型 m 的第 j 个分量。

1.3 时移电阻率法

时移电阻率法是在常规电法的基础上增加了时间维, 即在同一地点采用相同的装置形式在不同的时间重复进行数据采集。数据处理时反演出同一地点不同时刻电阻率与初始时刻的差异, 从而研究地下介质电阻率随时间的变化。

孔间直流电透视的正演算子用 f 表示, 工作面采动前和采动后探测^[20]可分别表示为

$$f(m_{t_0}) = d_{t_0}, f(m_t) = d_t \quad (8)$$

式中, m_{t_0} 、 m_t 分别为工作面采动前和采动后模型参数; d_{t_0} 、 d_t 分别为采动前和采动后探测数据。

通过探测数据反演计算可得到 2 次探测的反演模型参数:

$$m_{t_0} = f^{-1}(d_{t_0}), m_t = f^{-1}(d_t) \quad (9)$$

由于底板破坏相对地质构造、地层岩性和富水性电性特征不明显, 为消除背景场影响, 常用差值法对不同时刻的反演结果进行时移处理, 为突出底板破坏后电性结构的局部微小变化, 在差值法的基础上提出了比值法的时移处理方法^[20-21]:

$$\Delta M = \frac{m_t - m_{t_0}}{m_{t_0}} \quad (10)$$

式中, ΔM 为 t 时刻相较于 t_0 时刻的视电阻率变化率。

为进一步研究煤层底板的变形破坏规律, 突出异常边界的响应特征, 笔者将 SU Maoxin 等^[39-40]提出的基于反射系数分析 ERT 高分辨率成像的解释方法引入到时移数据处理中, 进而放大底板破坏范围边界处的数据特征, 实现孔间直流电透视法的高分辨率成像。

$$R = \frac{m_t - m_{t_0}}{m_t + m_{t_0}} \quad (11)$$

式中, R 为视电阻率反射系数, 该系数是基于反射系数原理, 得到的时移电阻率相对背景场的变化。

2 理论模型测试

2.1 时移反演程序验证

为了验证孔间直流电透视时移反演的有效性, 笔者进行了数值模型实验, 首先建立 2 个正演模型 (图 2), 两平行钻孔间距 30 m, 钻孔与水平面夹角 75°, 电极间距为 5 m, 采用单极-单极观测装置进行数值模拟, 观测数据采集方式如图 1 所示。图 2(a) 为电阻率 100 $\Omega \cdot \text{m}$

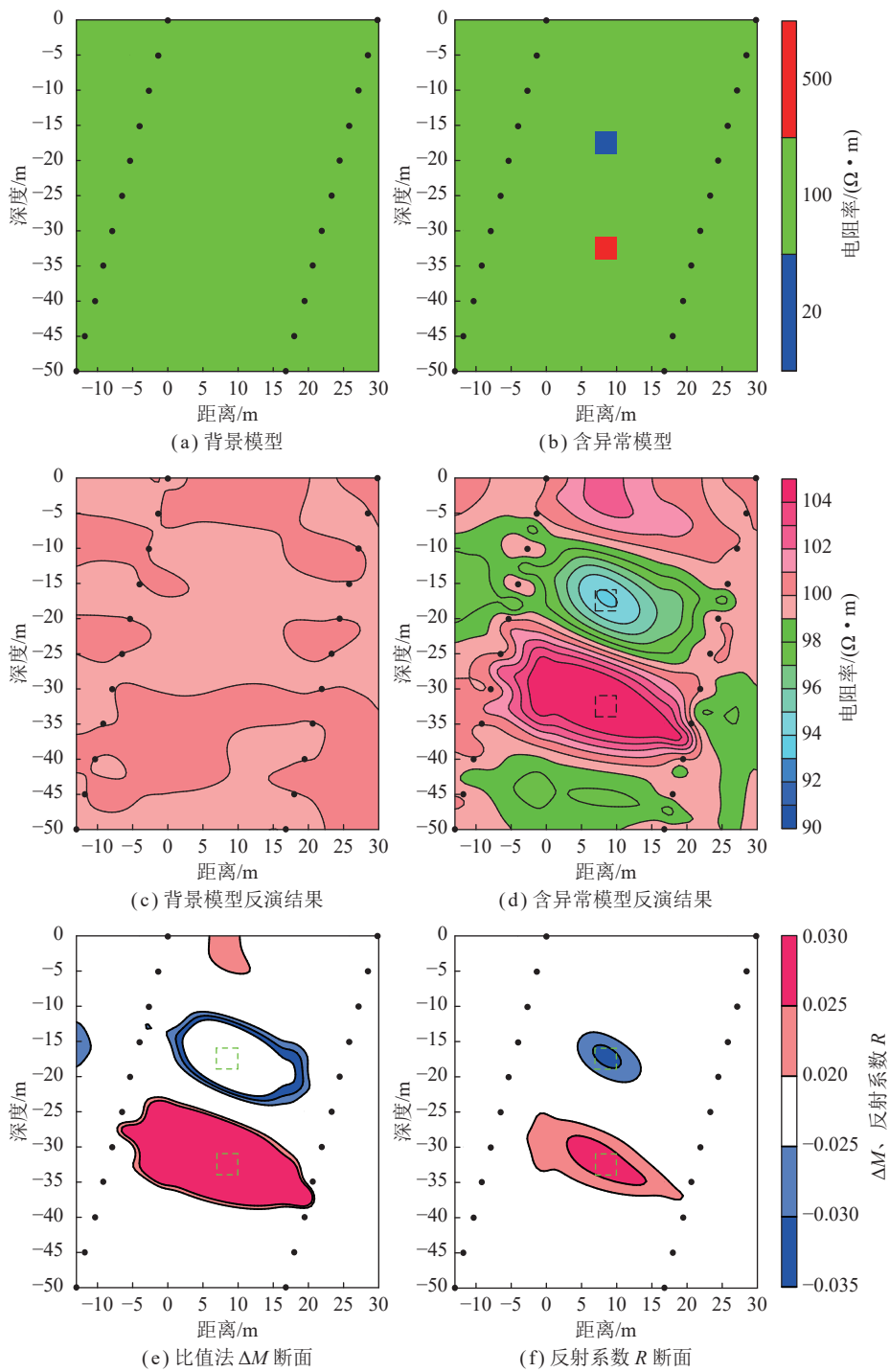


图 2 孔间直流电透视法时移反演验证

Fig.2 Verification of time-lapse inversion of inter-hole DC perspective method

的背景模型,为了体现相对背景的微小变化,图 2(b)为添加了几何尺寸 3 m×3 m 的异常体,低阻异常电阻率为 20 Ω·m,高阻异常电阻率为 500 Ω·m。单独反演上述 2 组模型可以看出,异常体在整个电阻率模型空间的分布范围较大,异常边界不明显(图 2(c)、(d))。采用式(10)与式(11)的数据处理方法得到时移电阻率变化率与反射系数断面图(图 2(e)、(f)),其中反射系数法能更准确的突出异常边界和范围。

2.2 煤层底板采动破坏电阻率时移规律分析

为建立合理的地球物理模型,首先分析煤层开采围岩电阻率变化规律。工作面回采过程中,煤层底板经历周期性的应力变化。当应力在岩石弹性范围之内时,底板岩层发生弹性形变,因岩层受压导致原生孔隙、裂隙减小;当应力超过岩石弹性范围时,底板岩层发生塑性形变,产生大量新生裂隙,甚至导致岩石破碎^[41]。如图 3 所示 A 区是超前应力压缩区, B 区是

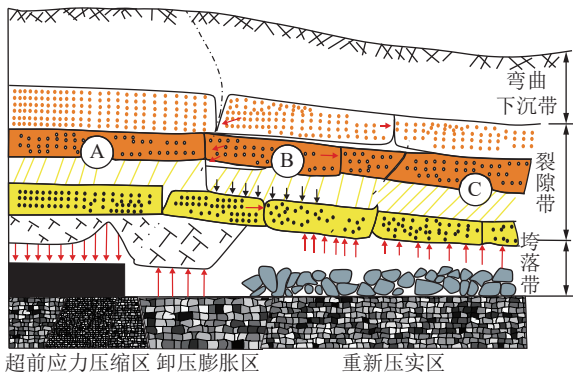


图 3 底板岩层破坏分区示意

Fig.3 Schematic diagram of floor rock layer damage zoning

卸压膨胀区, C 区为重新压实区, 其中应力卸载与集中会向底板深部传递, 进而影响底板破坏深度与范围^[42-43]。应力变化会导致岩石内部结构发生变化, 进而引起电性变化。时移电阻率法可以有效的监测底板岩层破坏后电阻率与背景值之间的差异, 进而得到煤层底板的变形及破坏范围。由于常规高密度电阻率法的分辨率随勘探深度增加而逐渐降低, 为克服这一问题, 笔者采用孔间直流电透视观测系统, 在巷道底板布置钻孔, 将电极置于钻孔中, 这意味着模型分辨率在目

标深度处不会降低。

2.2.1 煤层底板承压水导升模型

当采动的裂隙破坏了隔水层且与含水层导通时, 含水层的承压水受压力作用沿导升带向上运移, 导升带充水前后电阻率与围岩差异明显, 据此可以建立一组 (多个) 正演模型 (图 4), 采用孔间直流电透视监测底板承压水的导升过程, 并结合时移方法追踪其随时间的变化特征, 模拟数据中加入了 3% 的随机噪声。图 4(a) 为背景模型, 背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 含水层电阻率为 $20 \Omega \cdot m$, 隔水层电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ 。图 4(b)~(e) 为承压水沿导升带的运移过程, 其中图 4(d) 为受采动破坏影响隔水层裂隙发育形成导水通道, 承压水沿导水通道向上运移。图 5 为时移模型的反演结果, 随着承压水的不断上升, 电阻率模型反演结果整体有下降趋势, 但由于噪声和误差的影响, 反演结果中存在与模型无法对应的假异常, 同时模糊了所设置的异常边界及范围。为准确界定异常边界及范围, 以背景模型 (图 4(a)) 为基准, 得到时移电阻率反射系数 R 的断面 (图 6)。由图 6 可以看出消除背景场及随机噪声影响后, 压制了假异常的影响, 最终得到的异

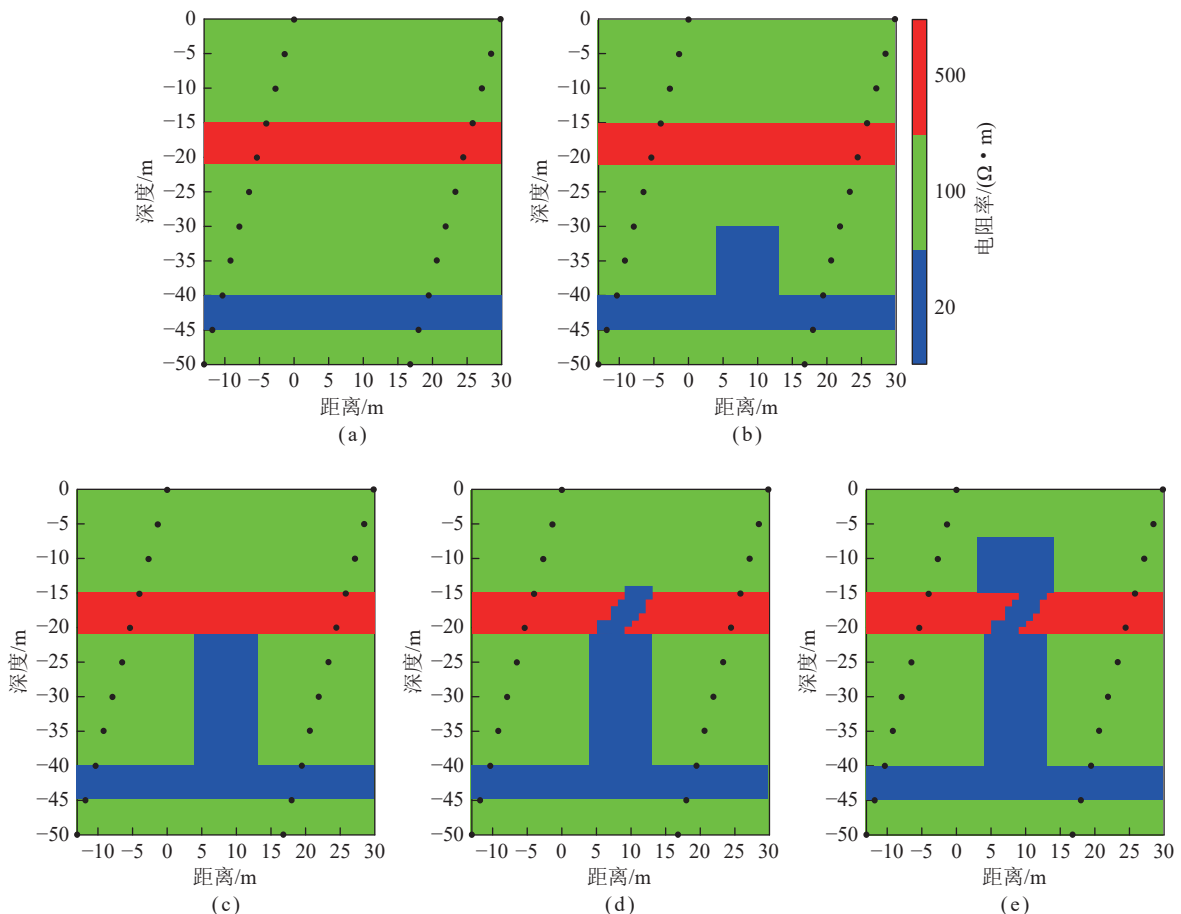


图 4 煤层底板承压水导升模型

Fig.4 Coal seam floor confined water lift model

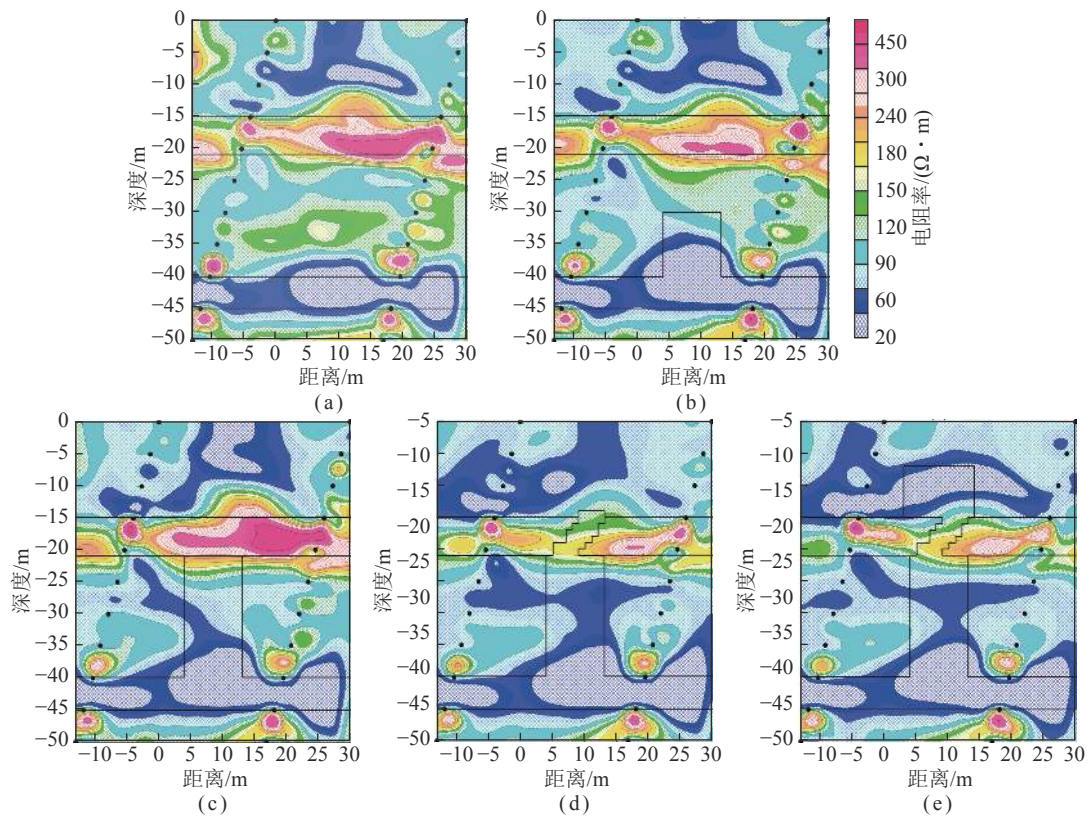


图 5 煤层底板承压水导升时移模型反演断面

Fig.5 Cross-sectional view of time-lapse model inversion of confined water in coal seam floor

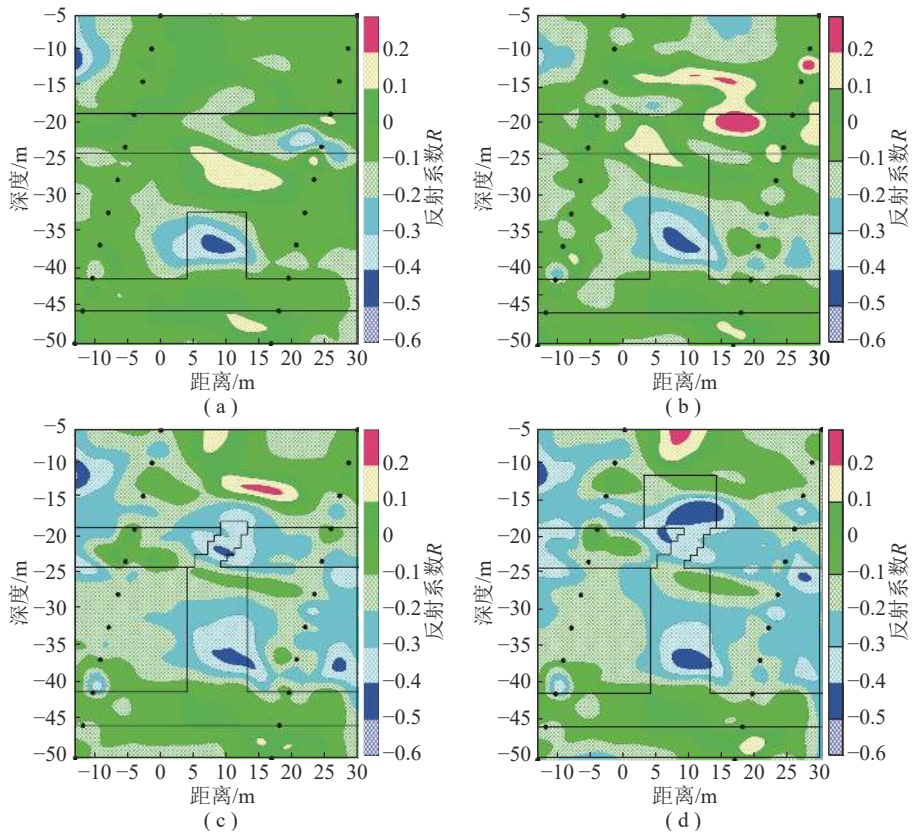


图 6 煤层底板承压水导升反射系数 R 断面

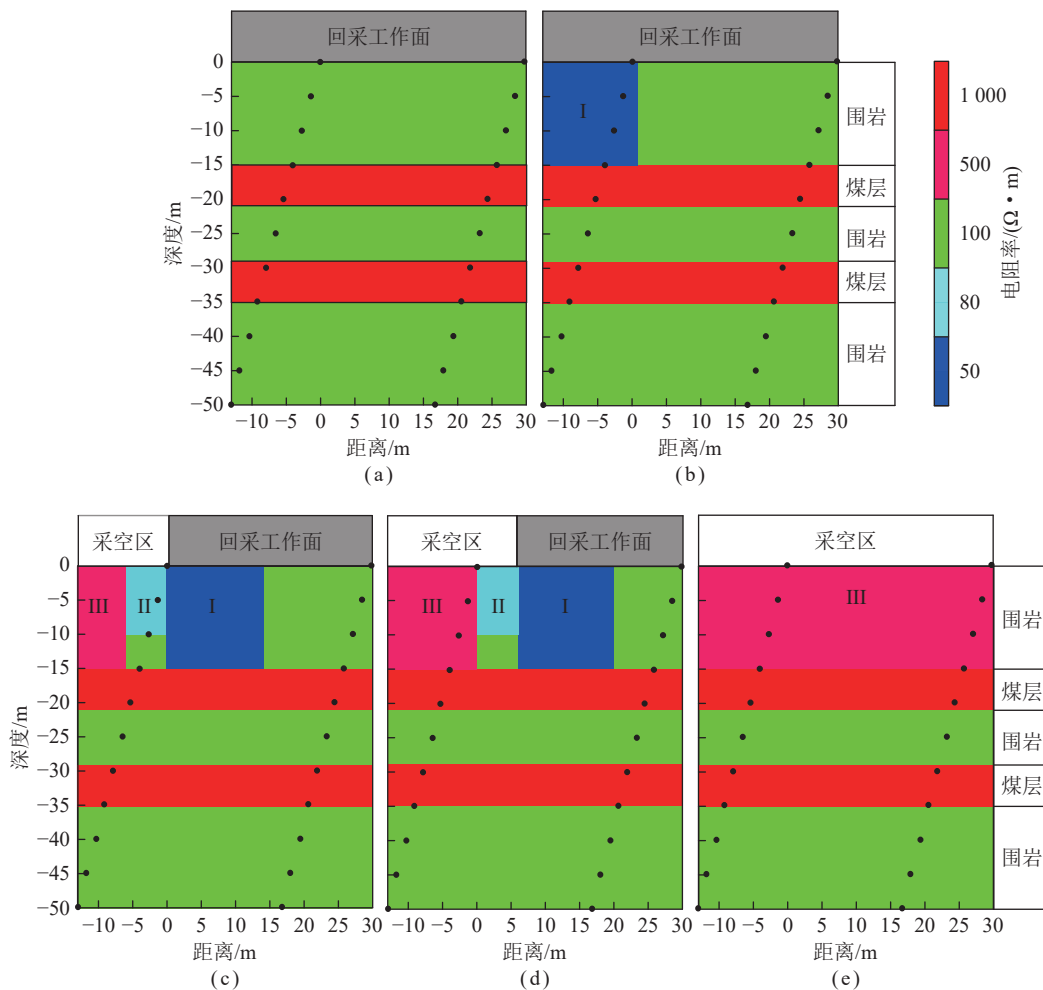
Fig.6 Cross-sectional view of the coal seam floor pressurized water conduction reflection coefficient R

常范围及形态与所设模型接近,更能反映出不同时间的承压水导升过程。

2.2.2 煤层底板采动破坏模型

在上述数值模拟的基础上,结合勘探区地层的分布特征设置典型的正演模型,分析煤层采动过程中底板岩层破坏的地电场响应规律及特征。结合实际地质资料 9-2 号煤层距巷道底板 15~21 m, 11 号煤层距巷道底板 29~35 m, 煤层电阻率设置为 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$, 围岩电阻率设置为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$ 。根据煤层采动过程中底板破坏裂隙带发育过程及电性变化规律,将其分为压缩区、过渡区及膨胀破坏区等 3 个不同导电性区域: ① 工作面前方受超前应力影响围岩孔隙及裂隙被压

实,压缩区围岩电阻率有所降低,设置为 $50\ \Omega \cdot \text{m}$; ② 过渡区电阻率与围岩变化不大,设置为 $80\ \Omega \cdot \text{m}$ 。③ 在不考虑破坏带导通含水层时,工作面后方的采空区处在减压区内,致使该区域底板岩层产生底鼓且裂隙发育,电阻率值升高,该区为膨胀破坏区,电阻率为 $500\ \Omega \cdot \text{m}$ 。采动应力向下传递过程中,由于 9-2 号煤层处于弹性形变状态,电阻率变化不大且能有效阻止应力的向下传递,因此采动破坏深度设置为 15 m。根据煤层回采进度建立一组(多个)正演模型(图 7),煤层采动前原始应力状态下地电模型如图 7(a)所示,图 7(b)为采动开始时初次来压的地电模型,图 7(c)~(e)为工作面后方出现采空区的地电模型。



注: I—压缩区; II—过渡区; III—膨胀破坏区。

图 7 煤层底板采动破坏地电模型

Fig.7 Geoelectric model of coal seam floor mining damage

图 8(a) 为原始应力状态下反演得到的电阻率等值线,该结果主要反映原始地层电阻率的主要分布特征,可以看出孔间直流电透视对纵向与横向的分辨率较高,地层电阻率分布与所设模型一致。图 8(b) 为初次来压时的反演结果,受超前应力影响压缩区电阻率减小。图 8(c)、(d) 为工作面后方有采空区分布,

前方有超前应力影响,由反演结果可以看出膨胀破坏区电阻率逐渐升高,但钻孔之间压缩区范围难以区分。图 8(e) 为采空区已完全经过钻孔,煤层底板为膨胀破坏区,由反演结果可以看出受高阻煤层及随机噪声影响,钻孔之间异常区视电阻率变化不大,对异常范围及特征的界定比较困难。

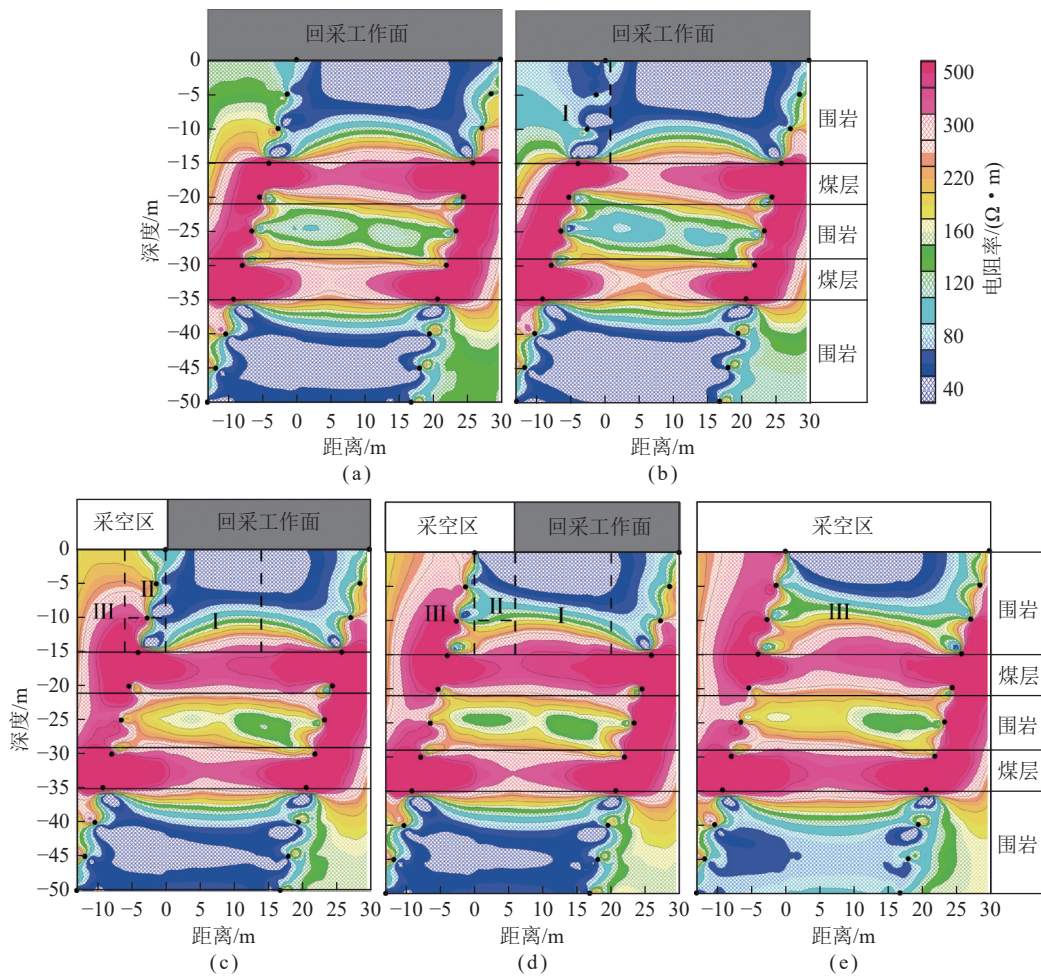


图 8 煤层底板采动破坏时移模型反演断面

Fig.8 Sectional view of time-lapse model inversion of coal seam floor mining damage

为消除地层因素及随机噪声影响,突出岩层变形破坏特征,采用时移电阻率反射系数 R 的数据处理方法,得到反射系数 R 的断面(图 9)。由图 9(a)可以看出,消除相关干扰及背景电阻率后,压缩区异常特征较为明显,与所设地电模型吻合。图 9(b)~(d)与单独反演相比工作面后方的膨胀破坏区电阻率升高较为明显,更能反映出底板岩层的变形破坏特征。由此得出时移反演电阻率变化率法可将地层因素及随机噪声的影响基本消除,重点突出岩层结构变化的区域。

3 底板孔间直流电透视监测试验

3.1 监测数据采集

为保证监测效果提高分辨率,本次试验工作面施工设计采用孔间直流电透视法,如图 10 所示,测线参数及数据采集方式与数值模拟一致。在 91203 工作面回风巷内布置观测站,以工作面初采位置为坐标原点,钻孔 1 坐标(160,0)、钻孔 2 坐标(190,0),孔深 50 m,钻孔与水平面夹角 75° ,在水平面上的投影与回风巷

走向一致,电极间距为 5 m,采用多芯电缆连接将电极置入孔内指定位置,电极与孔壁间通过注浆浆耦合。根据现场信号强度测试结果,本次试验选用单极-单极观测装置进行监测数据采集。数据采集时首先钻孔 1 中所有电极作为供电电极,钻孔 2 中所有电极接收,然后再将钻孔 2 中电极作为供电电极,钻孔 1 中电极接收。监测期间工作面推进距离见表 1。

3.2 实测数据反演结果分析

对孔间直流电透视监测数据进行反演处理,得到了底板岩层电阻率的响应特征(图 11)。图 11(a)为钻孔 1 距工作面开切眼 11.2 m 时初次采集数据得到的反演结果,将其作为背景电阻率。从图 11(a)可以看出,底板岩层电阻率高起伏,探测深度 $0\sim-48$ m 内主要表现出 3 个电性分界面; $0\sim-15$ m 内主要由砂岩组成,受地质条件影响电阻率为 $80\sim 120 \Omega \cdot \text{m}$; $-15\sim-35$ m 电阻率主要在 $200\sim 400 \Omega \cdot \text{m}$,该层反映的高阻异常主要为 9-2 号煤层和 11 号煤层影响; $-35\sim-48$ m 主要由砂岩及灰岩组成,电阻率主要分布在 $80\sim 180 \Omega \cdot \text{m}$ 。

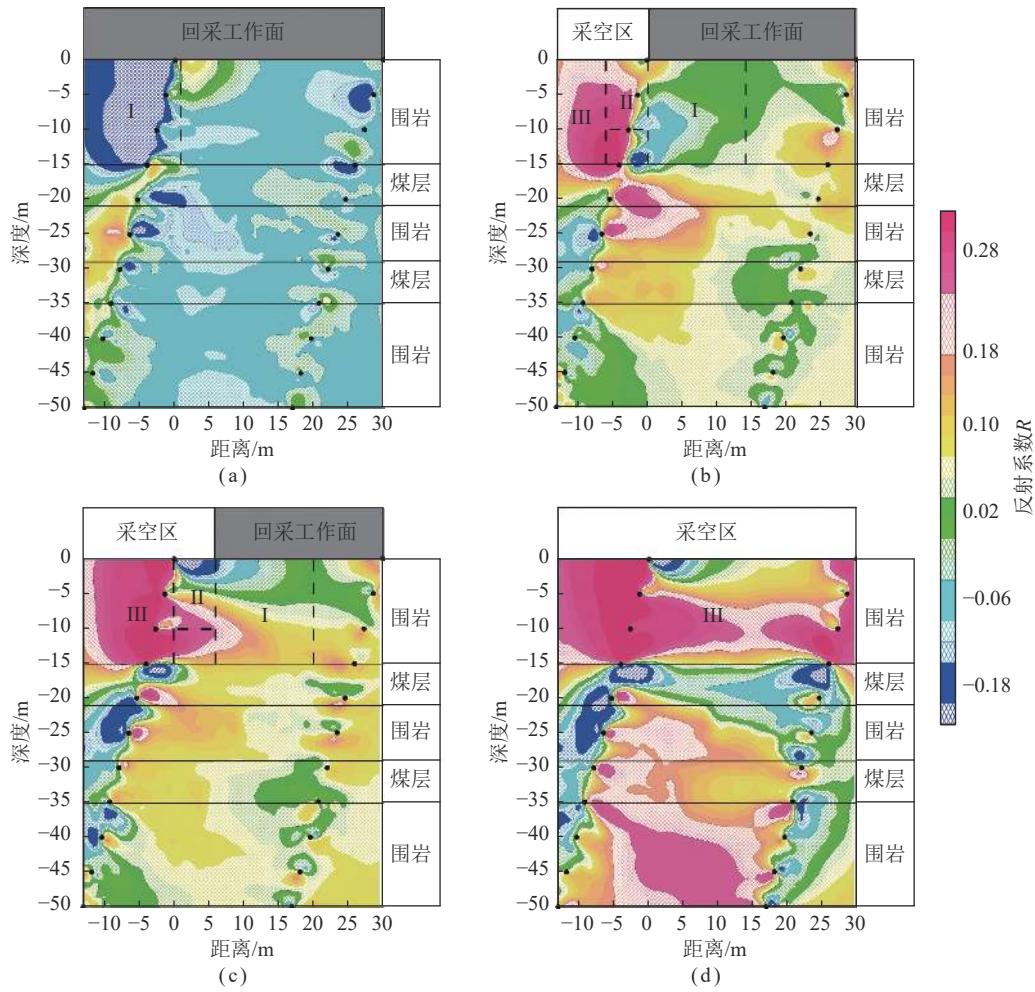


图 9 煤层底板采动破坏反射系数 R 断面

Fig.9 Sectional view of reflection coefficient R of coal seam floor mining damage

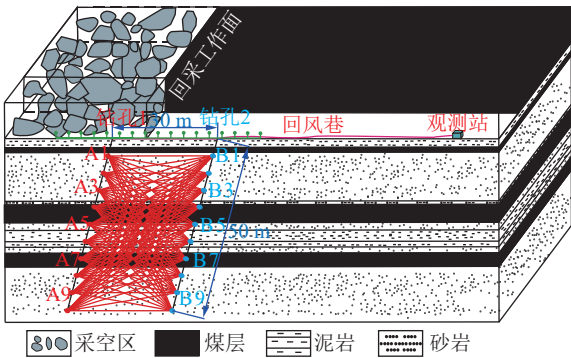


图 10 孔间直流电透视监测系统施工布置

Fig.10 Construction layout diagram of inter-hole DC perspective monitoring system

图 11(b) 为工作面向前推进 6.4 m, 此时钻孔 1 距开切眼 6.4 m, 与图 11(a) 相比电阻率略有升高但总体变化不大。图 11(c) 为工作面向前推进 12 m, 此时切眼位置与钻孔 1 重合, 后方为采空区。与图 11(a) 相比横向 148~160 m, 埋深 0~-15 m 电阻率有升高趋势, 局部电阻率由 $130 \Omega \cdot m$ 变为 $170 \Omega \cdot m$, 推断该变化为采空区影响底板岩层裂隙扩展导致岩石电阻

表 1 工作面推进距离

Table 1 Distance of advancing the working face

采集日期	9月18日	9月20日	9月22日	9月25日	9月27日	9月28日
开切眼距						
钻孔2距离/m	41.2	34.8	29.2	20.4	12.4	9.2

率升高。-15 m 以下岩层电阻率变化不大, 推断该层段未受扰动影响或 9-2 号煤阻断了底板扰动向下传播。图 11(d) 为工作面继续向前推进, 钻孔 2 距开切眼 20.4 m。与图 11(a) 相比横向 148.0~169.6 m, 埋深 0~-15 m 电阻率明显升高, 推测该区域为采空后底板膨胀破坏, 导致岩层电阻率升高。图 11(e)、(f) 分别为钻孔 2 距开切眼 12.4 m 和 9.2 m, 受煤层采动影响, 横向 148~180 m, 埋深 0~-15 m 较背景电阻率明显升高。

从图 11(b)~(f) 可以看出, 采空区位置的底板岩层 0~-15 m 电阻率有逐渐升高的趋势, 推断为煤层采空后底板应力释放, 岩层处于膨胀状态, 裂隙发育扩张, 导致电阻率升高。-15 m 以下区域由于 9-2 号

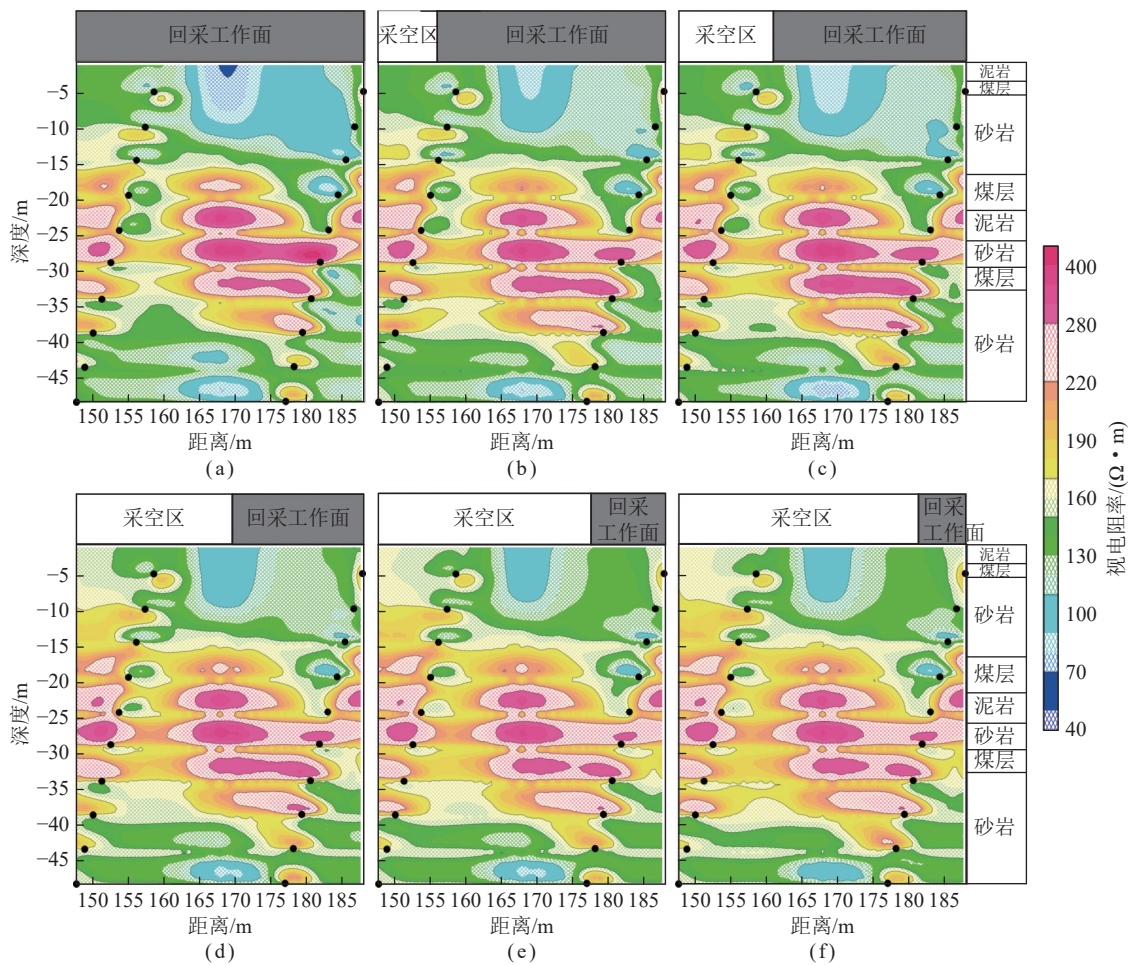


图 11 采动过程中底板岩层监测视电阻率反演断面

Fig.11 Sectional view of apparent resistivity inversion of floor rock layer monitoring during mining

煤与 11 号煤影响, 电阻率变化不明显, 综合实际地质资料及采动过程中岩层电阻率变化结果, 推断底板破坏深度在 15 m 左右。

为消除地层因素影响及数据采集过程中的测量误差等干扰因素, 突出地下介质电性结构的局部微小变化, 精细划分底板破坏范围, 对监测数据采用时移电阻率反射系数 R 的数据处理方法, 得到监测数据反射系数 R 的断面 (图 12)。

图 12(a)、(b) 为消除地层因素等干扰后得到的反射系数 R 断面, 可以看出 -20~-35 m 由煤层引起的高阻异常已经基本消除, 由于工作面后方初形成采空区, 而底板的变形破坏是周期性的应力变化引起的, 初始时工作面后方的异常变化较小。随着工作面向前推进, 后方采空区范围逐渐增大, 由图 12(c) 可以看出底板 0~-10 m 范围 R 变化较大, 据此推断岩层上方支撑压力减小导致裂隙发育, 电阻率升高。由于图 12(d)、(e) 数据采集时间间隔较近, 可以看出底板破坏范围与形态基本一致, 9-2 号煤层上方 R 整体升高, 由此推断底板破坏深度最深可达 15 m, 横向影响

范围 20 m 左右。

由图 12(a)~(e) 可以看出, 反射系数 R 断面与底板破坏范围有很好的对应关系。 R 的增大区域与膨胀破坏区范围一致, 所以在采空区范围内由于压力释放, 岩层内部裂隙发育, 导电性变差, 岩层电阻率升高。图 12(e) 显示 -35 m 以下出现的高阻异常与图 9(d) 的异常形态比较相似, 由于图 9(d) 中 -35 m 以下为未受采动破坏影响的区域, 据此印证了 91203 工作面 11 号煤层以下未破坏, 出现的高阻异常为观测装置影响产生的假异常。因此基于时移反演电阻率反射系数的数据处理方法, 可以准确划分底板的破坏范围及深度, 同时也能基本消除地层因素及数据噪声带来的假异常, 对于观测装置影响造成的假异常分布规律及特征需要在接下来的研究中做进一步的讨论。

为对比分析孔间直流电透视法的有效性, 对底板高密度电法监测数据进行处理得到底板岩层电阻率的响应特征 (图 13)。由图 13 可以看出, -15 m 以浅层整体呈现高阻异常, -15 m 以下电阻率相对较低。由于高阻煤层对电场及电流密度有屏蔽作用, 影响了

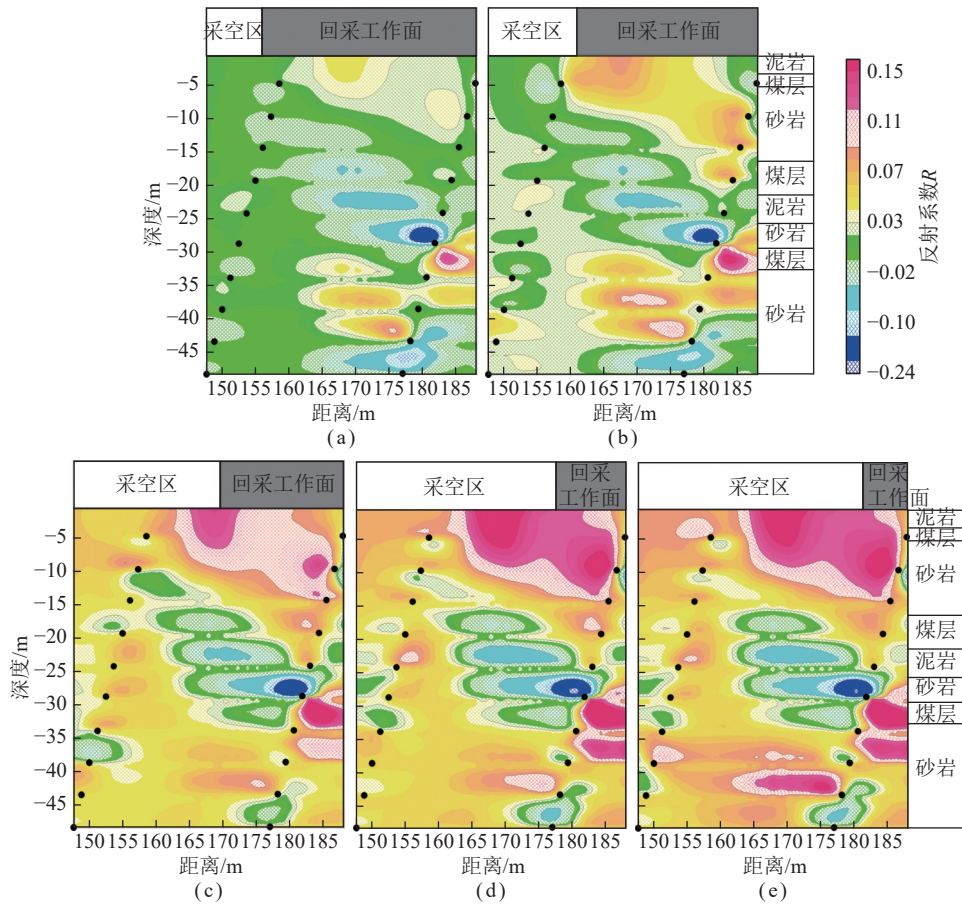


图 12 采动过程中底板岩层监测反射系数 R 断面

Fig.12 Cross-sectional view of monitoring reflection coefficient R of floor rock layer during mining process

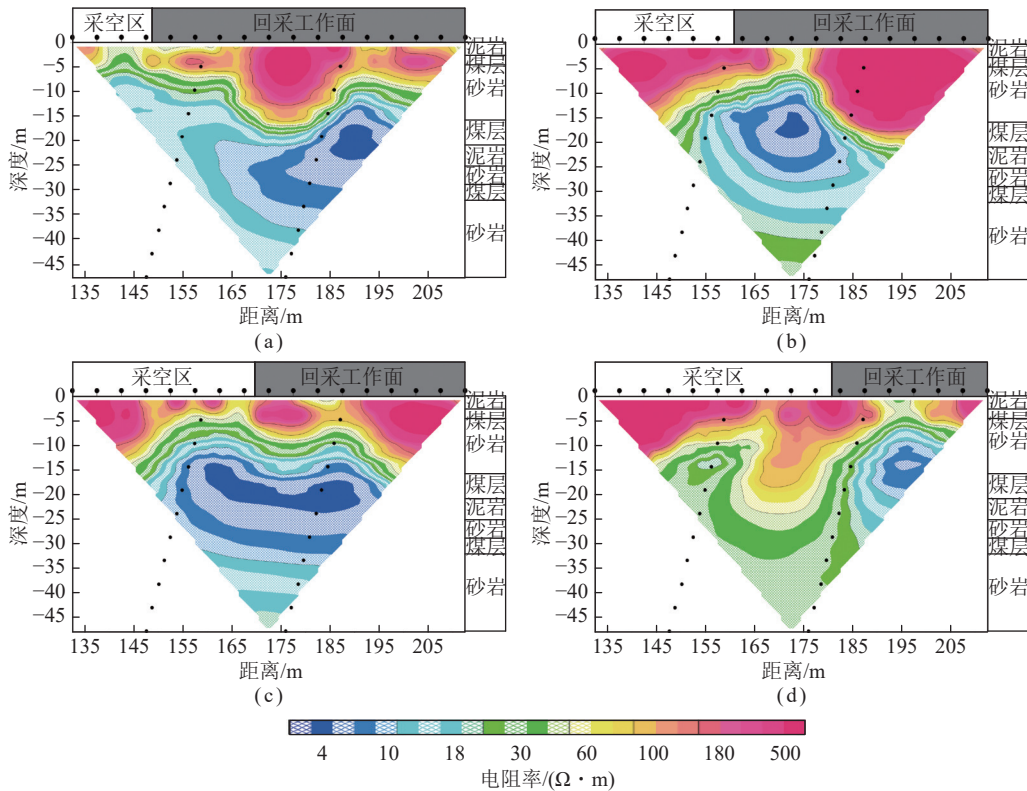


图 13 采动过程中底板高密度监测视电阻率断面

Fig.13 Cross-sectional view of apparent resistivity inversion of high-density monitoring of floor during mining process

勘探深度与分辨率, 导致电性响应特征与实际地质资料有明显差异。图14为反射系数 R 断面, 由于底板

高密度数据随深度增加分辨率不断降低且伴有假异常分布, 底板的变形破坏特征难以区分。

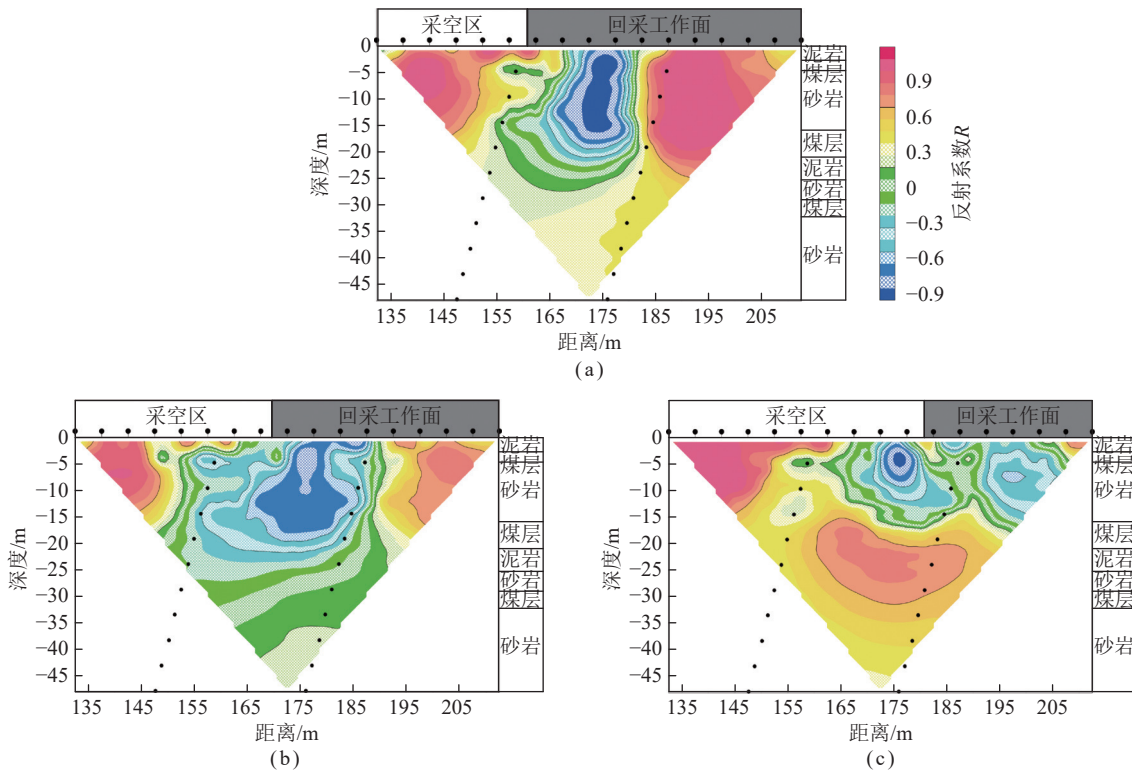


图14 采动过程中底板高密度监测反射系数 R 断面

Fig.14 Cross-sectional view of the reflection coefficient R of Multi-electrode monitoring of the floor during the mining process

4 结 论

(1) 设计了典型的煤层底板采动破坏地电模型, 通过正演模拟获得了底板破坏后岩层电阻率发生变化后地电场响应特征及规律, 为验证野外实际施工提供了理论依据。数值模拟结果表明: 孔间直流电透视法在监测底板破坏中分辨率高, 能够更好的区分地层界面, 同时对岩层内部电性变化的识别灵敏度更高。

(2) 孔间直流电透视法与常规电法相比具有采集数据量大、距离探测目标体近、观测精度高、地下信息丰富等特点。通过在煤层底板布设监测钻孔。该方法实现了采动过程中底板岩层破坏的动态监测, 通过对工作面底板岩层地电场研究, 揭示了煤层围岩底板采动前后电阻率响应特征, 最终可获得工作面底板破坏带深度及范围。

(3) 时移反演电阻率法将探测目标从单一的研究地质异常转换到对煤层采动过程中工作面底板破坏的全生命周期动态监测, 进而实现了工作面底板的精细化监测。该方法不仅能得到勘探目标的电阻率响应特征, 还能够通过时移规律分析采动过程中围岩的电阻率变化特征。通过理论与野外试验结果表明, 常规直流电法反演难以分辨电阻率结构的微小变化, 而

时移反演方法能够消除背景场及随机噪声的影响, 突出电阻率结构的微小变化。

参考文献(References):

- [1] 孟祥瑞, 徐铨辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1832-1836.
MENG Xiangrui, XU Chenghui, GAO Zhaoning, et al. Stress distribution and damage mechanism of mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1832-1836.
- [2] 张峰. 承压水上开采煤层底板裂隙时空演化规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014: 77-98.
ZHANG Feng. The research on space-time evolution of confined water in mining coal floor fractures[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014: 77-98.
- [3] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 124-143.
LIU Shucui. Mechanism of water inrush from coal seam floor and continuous survey of fractured zones in coal seam floor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008: 124-143.
- [4] 李富, 刘树才, 胡文武, 等. 煤层底板破坏带电阻率变化规律研究[J]. 能源技术与管理, 2006(3): 35-37.
LI Fu, LIU Shucui, HU Wenwu, et al. Research on the changing law of resistivity of coal seam floor failure zone[J]. Energy Technology and Management, 2006(3): 35-37.

- [5] 张平松, 吴基文, 刘盛东. 煤层采动底板破坏规律动态观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3009–3013.
ZHANG Pingsong, WU Jiwen, LIU Shengdong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3009–3013.
- [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): 1870–1875.
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): 1870–1875.
- [7] 雷贵生, 韩德品. 矿井电法探测工作面底板潜在突水构造的应用[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(6): 24–26.
LEI Guisheng, HAN Depin. Application of mine electric method to probe mine water inrush structure in potential under coal mining face floor[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(6): 24–26.
- [8] 王家臣, 许延春, 徐高明, 等. 矿井电剖面法探测工作面底板破坏深度的应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 97–100.
WANG Jiachen, XU Yanchun, XU Gaoming, et al. Application of mine electric profiling method to detect floor failure depth of coal mining Face[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 97–100.
- [9] 高召宁, 孟祥瑞. 煤层底板变形与破坏规律电法动态探测研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2204–2209.
GAO Zhaoning, MENG Xiangrui. The dynamic electrical-detection of coal floor deformation and damage law[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(6): 2204–2209.
- [10] 高召宁, 孟祥瑞, 赵光明. 煤层底板变形与破坏规律直流电阻率CT探测[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 90–96.
GAO Zhaoning, MENG Xiangrui, ZHAO Guangming. DC electrical resistivity CT survey of deformation and damage law of coal floor[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(8): 90–96.
- [11] 高召宁, 郑志伟, 应治中. 电法测试技术在覆岩破坏监测中应用[J]. 中国煤炭, 2015, 41(3): 36–39.
GAO Zhaoning, ZHENG Zhiwei, YING Zhizhong. Application of testing technology of electrical method on monitoring overburen failure[J]. China Coal, 2015, 41(3): 36–39.
- [12] 张峰, 高召宁, 孟祥瑞, 等. 高分辨电法在承压水上开采相似模拟中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 145–148.
ZHANG Feng, GAO Zhaoning, MENG Xiangrui, et al. Application of high-resolution electrical apparatus on confined water mining similar simulation[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(4): 145–148.
- [13] DAILY W, RAMIREZ A, LABRECQUE D, et al. Electrical resistivity tomography of vadose water movement[J]. Water Resources Research, 1992, 28(5): 1429–1442.
- [14] DAILY W, RAMIREZ A, BINLEY A, et al. Electrical resistance tomography[J]. Leading Edge, 2004, 23(5): 438–442.
- [15] KIM K J, CHO I K. Time-lapse inversion of 2D resistivity monitoring data with a spatially varying cross-model constraint[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 74(2): 114–122.
- [16] KARAOULIS M, TSOURLOS P, J-H K, et al. 4D time-lapse ERT inversion: introducing combined time and space constraints[J]. Near Surface Geophysics, 2014, 11: 25–34.
- [17] LI S, LIU B, NIE L, et al. Detecting and monitoring of water inrush in tunnels and coal mines using direct current resistivity method: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(4): 469–478.
- [18] LIU B, LIU Z, LI S, et al. An improved Time-Lapse resistivity tomography to monitor and estimate the impact on the groundwater system induced by tunnel excavation[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 66(6): 107–120.
- [19] 马欢, 张洪洋, 郭越, 等. 时移电阻率法归一化数据反演分辨电阻率结构微小变化[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1320–1325.
MA Huan, ZHANG Hongyang, GUO Yue, et al. The normalized data inversion of time-lapse resistivity method for resolving small resistivity changes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1320–1325.
- [20] 李飞, 程久龙, 陈绍杰, 等. 基于时移高密度电法的覆岩精细探测方法研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(1): 1–7.
LI Fei, CHENG Jiulong, CHEN Shaojie, et al. Fine detection of overburden strata based on time lapse high density resistivity method[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(1): 1–7.
- [21] 孙卫民, 孙大利, 李文忠, 等. 基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 157–160, 184.
SUN Weimin, SUN Dazhao, LI Wenzhong, et al. Technology of detecting dyke's hidden danger using time-lapse high-density resistivity method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 157–160, 184.
- [22] 张建智. 时移电阻率法在垃圾填埋场渗滤液监测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(10): 80–85.
ZHANG Jianzhi. Application of timelapse resistivity method on refuse dump percolate monitoring[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(10): 80–85.
- [23] ZHOU W, ZHANG P, WU R, et al. Dynamic monitoring the deformation and failure of extra-thick coal seam floor in deep mining[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 163: 132–138.
- [24] LIU B, PANG Y, MAO D, et al. A rapid four-dimensional resistivity data inversion method using temporal segmentation[J]. Geophysical Journal International, 2020, 221(1): 586–602.
- [25] 张清明, 徐帅, 王锐, 等. 基于时移 3D 高密度电法的堤坝涵管接触渗漏探测研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 135–138.
ZHANG Qingming, XU Shuai, WANG Rui, et al. Study on contact leakage detection of dam culvert based on time-lapse 3D high density resistivity method[J]. Yellow River, 2021, 43(12): 135–138.
- [26] 徐涛, 王小毛, 陈爽爽, 等. 膨胀土岸坡渗透滑动时移电法检测试验研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 170–175.
XU Tao, WANG Xiaomao, CHEN Shuangshuang, et al. Experimental research of time-lapse electrical prospecting method in monitoring seepage slip of expansive soil bank slope[J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 170–175.
- [27] 苏鹏, 杨进. 时移电阻率反演模拟研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 159–164.
SU Peng, YANG Jin. Simulation study of inversion of time-lapse resistivity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 159–164.
- [28] JOHNSON T C, BURGHARDT J, STRICKLAND C, et al. 4D proxy imaging of fracture dilation and stress shadowing using elec-

- trical resistivity tomography during high pressure injections into a dense rock formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(11): e2021JB022298.
- [29] YANG H, LIU S, YANG C. Dynamic monitoring of mining destruction on coal seam floor with constrained time-lapse resistivity imaging inversion[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 84799–84808.
- [30] KIM B, JOUNG I, CHO A, et al. Monitoring the perturbation zone near a foundation excavation with electrical resistivity tomography: Comparison between time-lapse 3D and 2D inversions in single-profile study[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 205: 104772.
- [31] 白登海, 于晟. 电阻率层析成像理论和方法[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(1): 56–75.
- BAI Denghai, YU Sheng. Theory and methods of resistivity tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(1): 56–75.
- [32] 王桦, 纪洪广. 跨孔直流电阻率法 CT 勘探技术研究[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(5): 1833–1840.
- WANG Hua, JI Hongguang. Study on CT prospecting technology by the pole-pole cross-hole direct-current resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(5): 1833–1840.
- [33] BELLMUNT F, MARCUELLO A, LEDO J, et al. Capability of cross-hole electrical configurations for monitoring rapid plume migration experiments[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 124: 73–82.
- [34] WANG H, LIN C P. Cause and countermeasures for the symmetric effect in borehole-to-surface electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 248–259.
- [35] 蒋林城, 肖宏跃, 丁尚见, 等. 跨孔电阻率法装置灵敏度分析及分辨率讨论[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 815–822.
- JIANG Lincheng, XIAO Hongyue, DING Shangjian, et al. Analysis of sensitivity of arrays and resolution discussion of cross-hole resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 815–822.
- [36] 张欣欣. 基于扩展卡尔曼滤波的跨孔电阻率时序监测反演成像方法[D]. 济南: 山东大学, 2018: 46–74.
- ZHANG Xinxin. Time series inversion and monitoring method of cross-hole electrical resistivity tomography based on extended kalman filter[D]. Jinan: Shandong University, 2018: 46–74.
- [37] 付强, 李士强, 闫孝姮, 等. 三维跨孔电阻率 CT 观测电极序列优化及必然伪影分布规律总结[J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(5): 2263–2275.
- FU Qiang, LI Shiqiang, YAN Xiaoheng, et al. Optimization of the observation electrode array and summary of the distribution law of inevitable artifacts for 3D cross-hole resistivity CT[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(5): 2263–2275.
- [38] ADAM Pidlisecky, ELDAD Haber, ROSEMARY Knight. RESIN-VM3D: A 3D resistivity inversion package[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): H1–H10.
- [39] SU M, WANG P, XUE Y, et al. A high-resolution imaging and interpretation method for electrical resistivity tomography based on reflection coefficient analysis[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, 179(6–7): 2461–2486.
- [40] SU M, HAN M, XUE Y, et al. Waveform and resistivity data fusion imaging method based on the reflection coefficient[J]. *Acta Geophysica*, 2023, 71(1): 175–192.
- [41] 鲁晶津. 直流电阻率法在煤层底板水害监测中的应用研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(2): 18–25.
- LU Jingjin. Research on the application of direct current resistivity method in coal seam floor water inrush monitoring[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(2): 18–25.
- [42] 王连国, 韩猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 317–322.
- WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of mining floor[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 317–322.
- [43] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 973–984.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973–984.