

文章编号: 1671-251X(2023)01-0036-11

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18052

工作面采动破坏过程电阻率动态响应特征研究

鲁晶津

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 矿井电阻率法在采煤工作面水害隐患监测中发挥着重要作用,但工作面采动破坏过程的异常响应会对底板水害隐患的识别形成较大干扰。为了提高矿井电阻率法对采煤工作面底板水害隐患监测的解释精度,同步考虑覆岩破坏和底板破坏的影响,建立工作面采动破坏过程动态地电模型,通过矿井电阻率法三维数值模拟和反演成像,分别进行顶板监测和底板监测,分析采动破坏过程的电阻率动态响应特征,识别和提取底板水害隐患的电阻率响应特征。分析结果表明:采动破坏过程形成的电阻率异常区随回采工作面推进向前移动,在超前支撑压力的作用范围内会出现相对低阻异常,在采空区范围内会出现相对高阻异常;工作面固定位置的电阻率响应在回采过程中会经历先降低、后升高、再降低的过程,该过程与工作面回采过程中顶底板经历的周期性应力变化和破坏过程基本一致;底板水害隐患的低阻异常响应强度与其相对回采工作面的位置有关,当底板水害隐患的展布范围与采空区范围有所重合时,采空区的高阻异常响应会削弱底板水害隐患的低阻异常响应;当底板水害隐患的展布范围与超前支撑压力影响区范围有所重合时,二者的低阻异常响应会叠加在一起,使低阻异常响应得到一定幅度的增强;针对底板水害隐患进行纯异常提取后,可以消除采动破坏过程的影响,不同位置的底板水害隐患其纯异常响应强度基本一致,其垂向影响范围均大于采动破坏的垂向影响范围。

关键词: 工作面采动破坏; 电阻率动态响应特征; 矿井电阻率法; 底板水害隐患监测; 纯异常提取

中图分类号: TD745

文献标志码: A

Study on dynamic response characteristics of resistivity in mining failure process of working face

LU Jingjin

(CCTEG Xi'an Research Institute(Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The mine resistivity method plays an important role in monitoring hidden danger of water hazards in coal working face. However, the abnormal response of mining failure process of coal working face will interfere with the identification of hidden danger of floor water hazards. In order to improve the interpretation precision of the mine resistivity method for monitoring hidden danger of floor water hazard in coal working face, simultaneously considering the influence of overburden failure and floor failure, a dynamic geoelectric model of the mining failure process in coal working face is established. The roof monitoring and floor monitoring are respectively carried out through three-dimensional numerical simulation and inversion imaging of mine resistivity method. The dynamic response characteristics of resistivity in the mining failure process are analyzed. The resistivity response characteristics of floor water hazard are identified and extracted. The analysis results show that the resistivity anomaly area formed in the process of mining failure moves forward with the advancing of the working face. There will be relatively low resistivity anomaly in the action range of the advance support pressure, and relatively high resistivity anomaly in the goaf area. The resistivity response at the fixed position of the

收稿日期: 2022-10-15; 修回日期: 2022-12-31; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42274184); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2022JZ-16); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项(2022-3-TD-KJHZ001)。

作者简介: 鲁晶津(1983—), 女, 湖北随州人, 副研究员, 博士, 主要从事矿井电磁法勘探及其应用研究工作, E-mail: lujingjin@cctegxian.com。

引用格式: 鲁晶津. 工作面采动破坏过程电阻率动态响应特征研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 36-45, 108.

LU Jingjin. Study on dynamic response characteristics of resistivity in mining failure process of working face[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 36-45, 108.



扫码移动阅读

working face will experience a process of first decreasing, then increasing, and then decreasing in the mining process. This process is basically consistent with the periodic stress change and failure process of the roof and floor in the mining process of the working face. The low resistance abnormal response intensity of floor water hazard is related to its position relative to the working face. When the distribution range of floor water hazard overlaps with that of goaf, the high resistance abnormal response of goaf will weaken the low resistance abnormal response of floor water hazard. When the distribution range of floor water hazard danger overlaps with the area affected by the advance support pressure, the low resistance abnormal response of the two will be superimposed together. The low resistance abnormal response can be enhanced to a certain extent. The influence of the mining damage process can be eliminated after the pure anomaly extraction of the hidden danger of floor water hazard. The pure abnormal response intensity of floor water hazards at different positions is basically the same, and their vertical influence scope is larger than that of mining damage.

Key words: mining damage of working face; dynamic response characteristics of resistivity; mine resistivity method; monitoring of hidden danger of floor water hazard; pure anomaly extraction

0 引言

我国大多数煤矿水文地质条件复杂^[1],部分煤矿工作面顶底板经注浆改造后,突水事故仍时有发生,迫切需要矿井水害隐患地质信息透明化为煤矿开采保驾护航^[2-4]。

工作面回采过程中的水害事故往往是由于顶底板破坏导致新生裂隙与含水层导通而引起的。要实现矿井水害隐患地质信息透明化,仅依靠回采前的静态地质探查是远远不够的,还需要对采动过程中动态发育的水害隐患进行实时监测。目前,针对采煤工作面的水害监测技术主要以微震监测^[5]、矿井电阻率法监测^[6]和光纤多参数(水温、水压、应力等)传感器监测^[7]为主。其中矿井电阻率法监测具有识别裂隙含水性的优势,在水害监测中应用前景广阔^[8]。然而,矿井电阻率法属于体积勘探,监测数据中既包含水害隐患的异常响应信息,也包含覆岩变形破坏、底板破坏等采动破坏的异常响应信息。一般采动破坏的规模和范围远大于水害隐患,其异常响应会对水害隐患的识别形成较大干扰。为了准确识别水害隐患的异常响应信息,需要深入分析工作面采动破坏过程的电阻率响应特征。

在覆岩变形破坏的电阻率响应特征研究方面,于师建等^[9]、程久龙等^[10-11]通过物理模拟和数值模拟对覆岩破坏“上三带”的电阻率进行了量化;张平松等^[12-14]采用立体电法对顶板岩层变形与破坏裂隙发育特征展开研究,获得了垮落带和断裂带的发育高度;王莹等^[15]建立了煤层受采动影响下覆岩电性动态变化的地电模型,通过正演模拟对覆岩电性变化规律展开研究;吴荣新等^[16-17]通过顶板孔中阻率法分析了工作面采动超前影响范围、覆岩导水裂隙带高度等。在底板破坏的电阻率响应特征研究方

面,刘树才等^[18]建立了底板采动导水裂隙带动态演化地电模型,通过三维正演获得了煤层底板导水裂隙演化过程中的视电阻率响应特征;张朋等^[19]通过数值模拟和井下试验获得了底板破坏带超前应力压缩区和膨胀区的电阻率特征;孙希奎等^[20]进行了煤层底板破坏规律电阻率法动态监测,获得了开采扰动在时间和空间上的变化特征;吴基文等^[21]对注浆底板破坏深度展开研究,获得了煤层底板采动裂隙演化过程的电阻率响应特征;张平松等^[22]利用跨孔电阻率CT获得了采动过程中工作面底板破坏的地电场响应特征。

可见,由于煤层顶底板破坏机理不同,岩石破坏的电阻率响应特征也有所不同。针对工作面采动破坏电阻率响应特征的研究,一般从覆岩变形破坏和底板破坏2个方面分别展开,却忽略了覆岩变形破坏和底板破坏是同步存在、相互影响的事实。杨海平等^[23]在采煤工作面同时进行煤层顶底板全空间地电场特征监测研究,获得了煤层顶底板采动前后电阻率同步响应特征,对保障工作面安全回采具有现实应用价值。

为了进一步提高矿井电阻率法对采煤工作面底板水害隐患监测的解释精度,本文同步考虑覆岩变形破坏和底板破坏的影响,建立工作面采动破坏过程动态地电模型,通过矿井电阻率法三维数值模拟和反演成像,分析采动破坏过程的电阻率动态响应特征,识别和提取底板水害隐患的电阻率响应特征,为矿井水害隐患地质信息透明化提供技术支撑。

1 电透视法三维数值模拟和反演成像

1.1 电透视法三维数值模拟

电透视法采用人工点电源激发稳定的地下电场,由于电场具有可叠加的特性,单极源和偶极源激

发的电场都可以通过求解点电源的电场分布来获得。采煤工作面一般位于地下数百米,在该深度放置点电源所激发的稳定电场可视为全空间场,其满足以下边值问题:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla(\sigma \nabla u(x, y, z)) &= -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) \\ \left(\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial \mathbf{n}} + \frac{u(x, y, z)}{r(x - x_0, y - y_0, z - z_0)} \cos \theta \right) \Big|_{\Gamma_R} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子; σ 为任意点的电导率; u 为任意点的电位; (x, y, z) 为空间中任意点的坐标; I 为电流强度; δ 为狄拉克函数; (x_0, y_0, z_0) 为点电源的坐标; \mathbf{n} 为边界面外法向; θ 为点电源至边界的半径向量与 \mathbf{n} 之间的夹角; r 为任意点到点电源的距离; Γ_R 为模型的外边界面。

进行电透视法三维数值模拟时,将点电源在均匀全空间中激发的电位作为一次场,其解析形式为

$$u^p(x, y, z) = \frac{I}{4\pi\sigma_0 r(x - x_0, y - y_0, z - z_0)} \quad (2)$$

式中: u^p 为一次场电位; σ_0 为供电电极周围的围岩电导率。

u^p 同样满足式(1),具体形式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla(\sigma_0 \nabla u^p(x, y, z)) &= -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) \\ \left(\frac{\partial u^p(x, y, z)}{\partial \mathbf{n}} + \frac{u^p(x, y, z)}{r(x - x_0, y - y_0, z - z_0)} \cos \theta \right) \Big|_{\Gamma_R} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

假设存在异常电性介质的全空间总场由一次场和二次场组成:

$$u(x, y, z) = u^p(x, y, z) + u^s(x, y, z) \quad (4)$$

式中 u^s 为二次场电位。

将式(4)代入式(1),并与式(3)相减,可得二次场 u^s 满足的边值问题:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla(\sigma \nabla u^s(x, y, z)) &= -\nabla[(\sigma - \sigma_0) \nabla u^p(x, y, z)] \\ \left(\frac{\partial u^s(x, y, z)}{\partial \mathbf{n}} + \frac{u^s(x, y, z)}{r(x - x_0, y - y_0, z - z_0)} \cos \theta \right) \Big|_{\Gamma_R} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

采用有限差分法对上述边值问题进行离散,对离散得到的大型线性方程组采用代数多重网格法^[24]进行求解,获得二次场电位 u^s 的数值解。总的电位场 u 可根据式(2)和式(4)计算。

下文对不同的模型进行电透视法三维数值模拟计算时,采用偶极-偶极观测装置进行数据采集,当某一条测线上的电极作为激发场源时,与其相对的另一条测线上的电极进行观测数据采集。2条测线轮换进行场源激发和数据采集。

1.2 电阻率三维反演

电阻率三维反演的目标函数为

$$\Phi(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}})\|^2 + \frac{\beta}{2} \|\mathbf{W}_m(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}})\|^2 \quad (6)$$

式中: \mathbf{m} 为用于反演迭代的模型; \mathbf{W}_d 为数据权重矩阵; $\mathbf{d}(\mathbf{m})$ 为对给定的电导率模型进行正演计算所得的模拟观测数据; \mathbf{d}_{obs} 为实际观测数据,具体为观测电压除以输入电流; β 为正则化参数,用于平衡最小化过程中数据误差和模型正则化的影响; \mathbf{W}_m 为模型正则化矩阵; \mathbf{m}_{ref} 为参考模型。

目标函数的第1项保证了反演所得的模型能与观测数据相匹配,第2项在最终模型的基础上强加了关于模型形状、结构等的先验信息。

电阻率三维反演流程如图1所示。

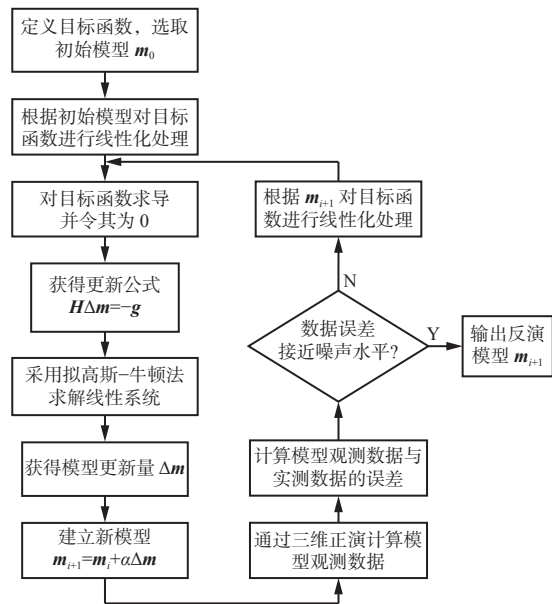


图1 电阻率三维反演流程

Fig. 1 Flow of 3D electrical resistivity inversion

为了获得 $\Phi(\mathbf{m})$ 最小值,对式(6)进行线性化处理,并对模型参数求导后令其为0,获得模型更新公式:

$$\mathbf{H}\Delta\mathbf{m} = -\mathbf{g} \quad (7)$$

式中: \mathbf{H} 为海森矩阵, $\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \beta \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m$, \mathbf{J} 为雅可比矩阵, $\mathbf{J} = \partial \mathbf{d}(\mathbf{m}) / \partial \mathbf{m}$; $\Delta\mathbf{m}$ 为模型更新量; \mathbf{g} 为目标函数梯度, $\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}}) + \beta \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}})$ 。

采用拟高斯-牛顿法^[25]对式(7)进行求解,以获得最佳模型更新量 $\Delta\mathbf{m}$ 。之后建立一个新模型:

$$\mathbf{m}_{i+1} = \mathbf{m}_i + \alpha \Delta\mathbf{m} \quad (8)$$

式中: \mathbf{m}_{i+1} 为第 $i+1$ 次迭代得到的模型; α 为线性搜索参数,用来控制模型更新的幅度。

由于式(8)是对 \mathbf{m}_i 进行线性化所得,新模型 \mathbf{m}_{i+1} 不一定是全局最优解,还需重新对 \mathbf{m}_{i+1} 进行线性化,并再执行一次更新迭代。重复上述迭代过程,直至目标函数或数据误差减小至可接受的水平。

考虑到在煤矿井下实际应用中,围岩电阻率一般难以准确获取,本文对不同模型的电透视法模拟探测结果进行反演时,初始模型均选取由煤系地层平均视电阻率构建而成的均匀电阻率模型。此外,由于电透视法所有观测数据都位于一个平面上,难以区分异常响应是来自顶板还是来自底板,为了降低反演结果的多解性,在反演计算过程中加入了空间约束条件。对顶板监测数据进行反演时,将反演目标区域限定在顶板往上的空间内;对底板监测数据进行反演时,将反演目标区域限定在底板往下的空间内。

2 采动破坏过程动态地电模型

在工作面回采过程中,采掘活动造成的煤层顶底板破坏具有垂向分带、水平分区的特征^[26]。对于煤层覆岩变形破坏而言,按照岩层破坏程度不同,在垂直方向上可分为垮落带、断裂带和弯曲下沉带,一般称之为“上三带”,其中垮落带和断裂带岩层沿煤层工作面推进方向又可划分为3个区:煤壁支撑区、离层区和重新压实区。煤层采动后,其底板岩层在采动矿压作用下,也会造成不同程度的破坏。对采动后煤层底板破坏规律的深入研究和现场实测表明,采动后煤层底板存在“下三带”:破坏带、隔水层带和承压水导升带。其中底板破坏带在支撑压力的作用下,沿煤层工作面推进方向又可分为4个区:超前应力压缩区、过渡区、卸压膨胀区和重新压实区。根据工作面推进方向支撑压力的分布规律,顶板的煤壁支撑区与底板的超前应力压缩区基本对应,顶板的离层区与底板的卸压膨胀区基本对应,顶板的重新压实区与底板的重新压实区基本对应。

覆岩变形破坏电阻率响应的物理模拟和实测结果显示^[10],垮落带电阻率为正常围岩的4~6倍,断裂带电阻率为正常围岩的2~3倍,弯曲下沉带电性特征受采动影响不明显。对采动影响下底板岩层导电性变化规律的研究结果表明^[18],煤层底板岩层超前应力压缩区电阻率有所下降,但幅度不大。过渡区电阻率与原岩相比变化不大。卸压膨胀区电阻率与岩层的含水性相关:若岩层含水,则卸压膨胀区因充水,电阻率大幅下降;若岩层干燥,则膨胀区因裂隙高度发育,电阻率大幅升高。重新压实区电阻率也与岩层含水性相关:岩层含水时其电阻率有所增大,但与原岩相比仍为低阻;岩层干燥时其电阻率有所减小,但与原岩相比仍为高阻。

根据上述原理,建立工作面采动破坏过程动态地电模型。如图2所示,将煤系地层简化为三层地

电模型,自上而下依次为砂岩层、煤层和石灰岩层,各层厚度和电阻率设置:原始顶板岩层厚度为1 000 m,电阻率为 $200 \Omega \cdot \text{m}$;煤层厚度为5 m,电阻率为 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$;原始底板岩层厚度为1 000 m,电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。采空区在原始煤系地层模型的基础上简化为五层地电模型,自上而下依次为原始顶板岩层、顶板断裂带、顶板垮落带、底板破坏带和原始底板岩层,各层厚度和电阻率根据回采进度不同而有所区别。

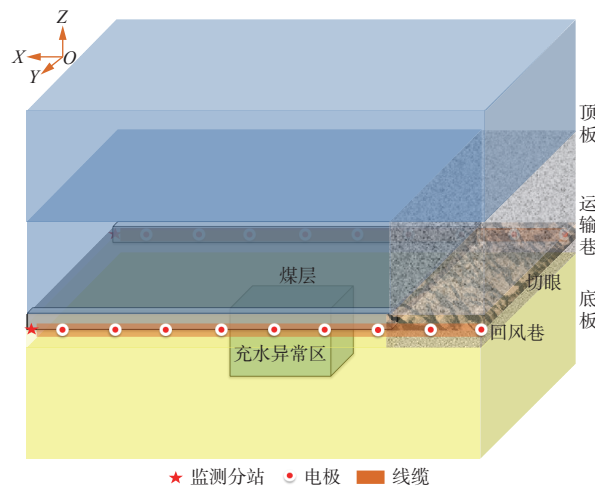


图2 工作面采动破坏模型

Fig. 2 Mining failure model of working face

为了模拟工作面回采过程中顶底板岩层电阻率动态变化过程,根据回采进度分别建立回采前、初次来压前、初次来压后、周期来压等不同回采阶段的工作面地电模型。模型根据导电性差异共设置10个破坏分区:断裂带离层区,电阻率为顶板岩层电阻率的3倍;断裂带重新压实区,电阻率为顶板岩层电阻率的1.5倍;垮落带离层区,电阻率为煤层电阻率的6倍;垮落带重新压实区,电阻率为煤层电阻率的3倍;卸压膨胀区,电阻率为底板岩层电阻率的3倍;底板破坏带重新压实区,电阻率为底板岩层电阻率的1.5倍;切眼/采煤工作区,电阻率为煤层电阻率的20倍;过渡区,电阻率为底板岩层电阻率的0.9倍;煤壁支撑区,电阻率为煤层电阻率的0.7倍;超前压缩区,电阻率为底板岩层电阻率的0.7倍。不同回采阶段的工作面地电模型包含的破坏分区有所不同,各分区的展布范围也有所不同,模型具体参数见表1。

工作面采动破坏模型以运输巷在煤层底界面上的起始位置为坐标原点建立坐标系 $OXYZ$,工作面倾向宽度为100 m、走向长度为200 m。表1中,假设来压步距为30 m,模型1对应工作面回采前开切眼阶段,回采进度为0;模型2对应工作面开始回采但

表 1 工作面地电模型参数

Table 1 Geo-electric model parameters of working face

模型编号	回采进度/m	回采阶段	充水异常	破坏分区	走向范围/m	倾向范围/m	垂向范围/m	电阻率/($\Omega \cdot m$)
1	0	回采前	无	切眼	0~6	0~100	0~5	20 000
2	10	初次来压前	无	垮落带离层区	0~10	0~100	0~7	6 000
				卸压膨胀区	0~10	0~100	-5~0	1 500
				采煤工作区	10~16	0~100	0~5	20 000
				过渡区	10~16	0~100	-5~0	450
				煤壁支撑区	16~40	0~100	0~5	700
				超前压缩区	16~40	0~100	-10~0	350
3	30	初次来压后	无	断裂带离层区	0~30	0~100	7~20	600
				垮落带离层区	0~30	0~100	0~7	6 000
				卸压膨胀区	0~30	0~100	-10~0	1 500
				采煤工作区	30~36	0~100	0~5	20 000
				过渡区	30~36	0~100	-5~0	450
				煤壁支撑区	36~60	0~100	0~5	700
				超前压缩区	36~60	0~100	-10~0	350
4	60	周期来压	无	断裂带重新压实区	0~30	0~100	7~20	300
				垮落带重新压实区	0~30	0~100	0~7	3 000
				底板破坏带重新压实区	0~30	0~100	-16~0	750
				断裂带离层区	30~60	0~100	7~20	600
				垮落带离层区	30~60	0~100	0~7	6 000
				卸压膨胀区	30~60	0~100	-10~0	1 500
				采煤工作区	60~66	0~100	0~5	20 000
				过渡区	60~66	0~100	-5~0	450
				煤壁支撑区	66~90	0~100	0~5	700
				超前压缩区	66~90	0~100	-10~0	350
5	60	周期来压	有	破坏分区与模型4一致	—	—	—	—
				充水异常区	10~50	30~70	-10~-50	20
6	60	周期来压	有	破坏分区与模型4一致	—	—	—	—
				充水异常区	40~80	30~70	-10~-50	20
7	60	周期来压	有	破坏分区与模型4一致	—	—	—	—
				充水异常区	80~120	30~70	-10~-50	20
8	60	周期来压	有	破坏分区与模型4一致	—	—	—	—
				充水异常区	120~160	30~70	-10~-50	20

尚未初次来压阶段,回采进度为 10 m;模型 3 对应初次来压发生后的回采阶段,回采进度为 30 m;模型 4 对应工作面周期来压阶段,回采进度为 60 m。模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4 不含充水异常区。模型 5、模型 6、模型 7 和模型 8 以模型 4 为背景,在底板下方不同位置存在隐蔽充水异常区。

对上述模型进行电透视法模拟探测时,分别针对顶板监测和底板监测 2 种情况展开模拟计算。进

行顶板监测模拟时,将监测电极布置于巷道顶板岩层中。进行底板监测模拟时,将监测电极布置于巷道底板岩层中。运输巷和回风巷的测线长度均为 200 m,监测电极间距为 10 m,每条巷道各布置 21 个电极。下面将依次对上述模型展开电透视法三维数值模拟计算,并对监测模拟结果进行电阻率三维反演成像,根据成像结果分析采动破坏过程的电阻率动态响应特征。

3 电阻率动态响应特征分析

3.1 采动破坏过程电阻率动态响应特征

分别对模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4 进行电透视法三维数值模拟计算, 对采动破坏过程进行动态模拟监测。顶板监测和底板监测的反演成像结果分别如图 3、图 4 所示。由于反演的初始模型选取由煤系地层平均视电阻率构建而成的均匀电阻率模型, 所以获得的反演模型主要反映以该均匀电阻率模型为背景的相对电阻率变化情况。通过这种方式进行反演, 可以在一定程度上压制层状介质的影响, 突出强电性背景下的弱电率异常。

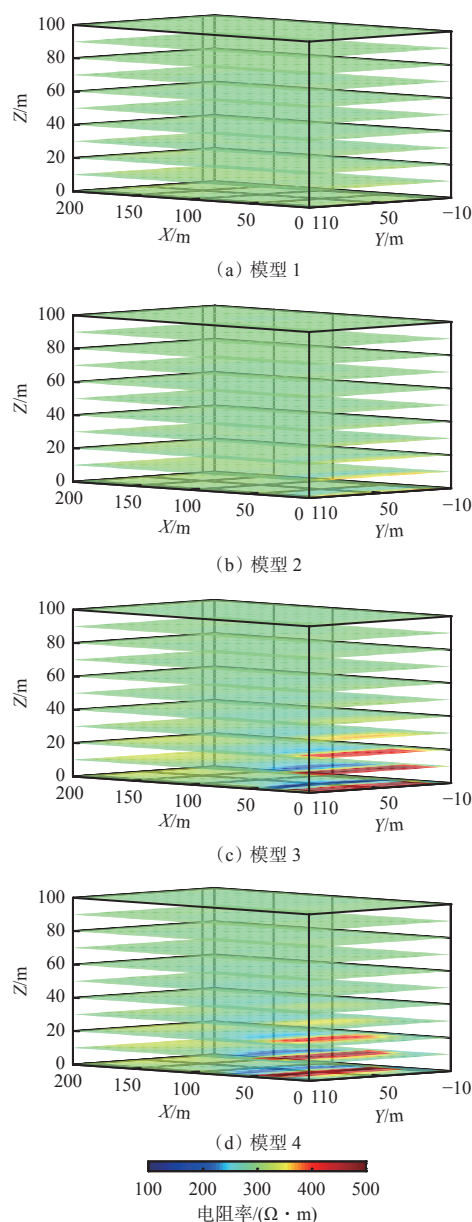


图 3 工作面采动破坏过程顶板监测反演成像结果
Fig. 3 Roof monitoring and inversion imaging results for mining failure process in working face

从图 3 和图 4 的反演成像结果可见, 不管是顶板

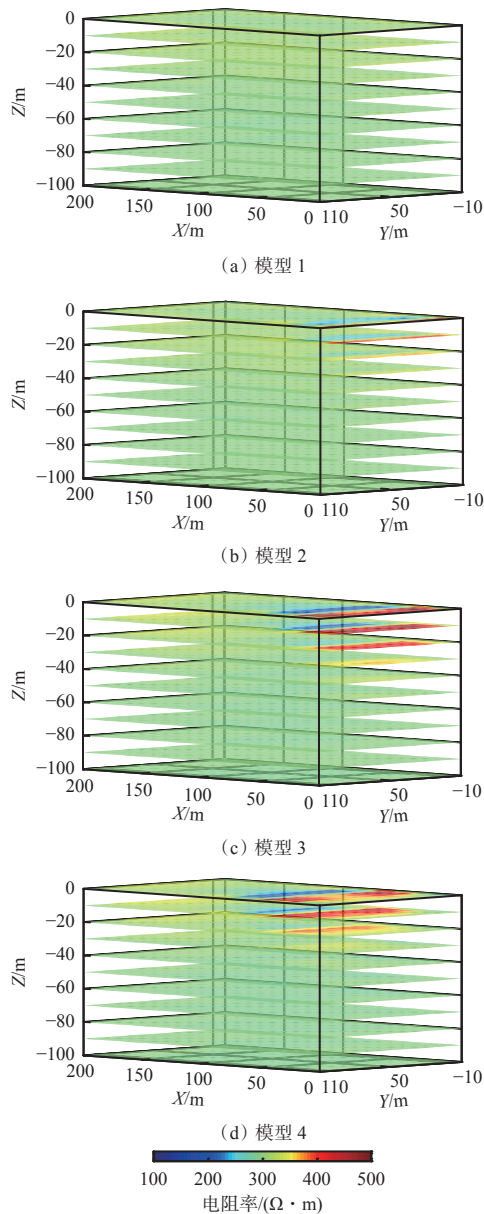


图 4 工作面采动破坏过程底板监测反演成像结果

Fig. 4 Floor monitoring and inversion imaging results for mining failure process in working face

监测还是底板监测, 采动破坏过程的电阻率异常响应特征基本一致。在初次来压前, 采动破坏过程造成的电阻率异常响应强度较弱; 初次来压后, 采动破坏范围增大, 其电阻率异常响应显著增强; 在超前支撑压力的作用范围内, 出现相对低阻异常; 在采空区内, 出现相对高阻异常; 随着回采工作面向前推进, 电阻率异常区向前移动; 采动破坏过程导致的电阻率变化主要集中在煤层顶板以上 20 m 和底板以下 20 m 以内。初次来压后, 顶板监测的高阻异常响应强于底板, 这主要是由于顶板在垂向上的采动破坏范围比底板大引起的。

进一步提取 $X=20$ m 处顶底板的垂向电阻率切片, 如图 5 所示。该位置在模型 1 中位于未受采动

破坏影响的区域内,在模型 2 中位于超前支撑压力的影响范围内,在模型 3 中位于离层区/卸压膨胀区内,在模型 4 中位于重新压实区内。根据图 5 可对比分析工作面固定位置的电阻率响应随回采工作面推进的变化情况。可看出随着回采工作面逐步推进,不管是顶板监测还是底板监测, $X=20\text{ m}$ 处的电阻率响应均经历了先降低、后升高、再降低的过程,该变化过程与工作面回采过程中顶底板经历的周期性应力变化和破坏过程基本一致。

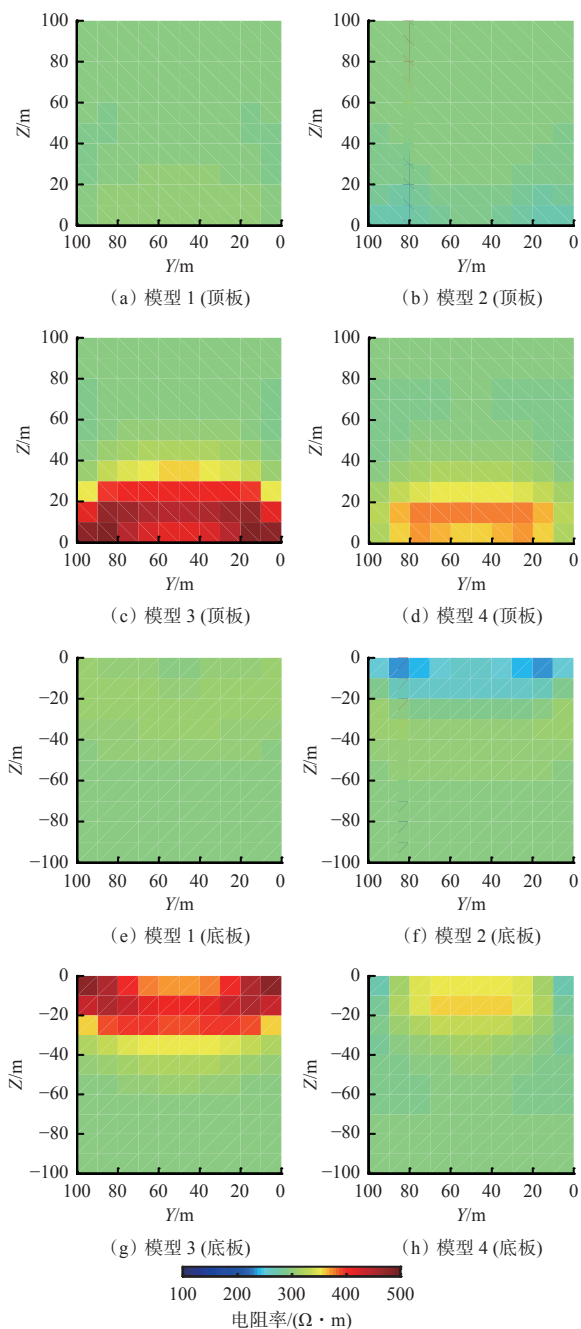


图 5 $X=20\text{ m}$ 位置电阻率切片

Fig. 5 Resistivity slice at $X=20\text{ m}$

3.2 底板水害隐患电阻率响应特征

根据表 1,用模型 5 模拟在回采工作面后方采空

区范围内存在底板水害隐患的情况;用模型 6 模拟在回采工作面下方存在底板水害隐患的情况,该模型展布范围一半与采空区范围重合,一半与超前支撑压力影响范围重合;用模型 7 模拟在回采工作面前方超前支撑压力影响区域内存在底板水害隐患的情况;用模型 8 模拟在回采工作面前方尚未受到采动影响区域内存在底板水害隐患的情况。各模型顶底板监测反演成像结果分别如图 6、图 7 所示。

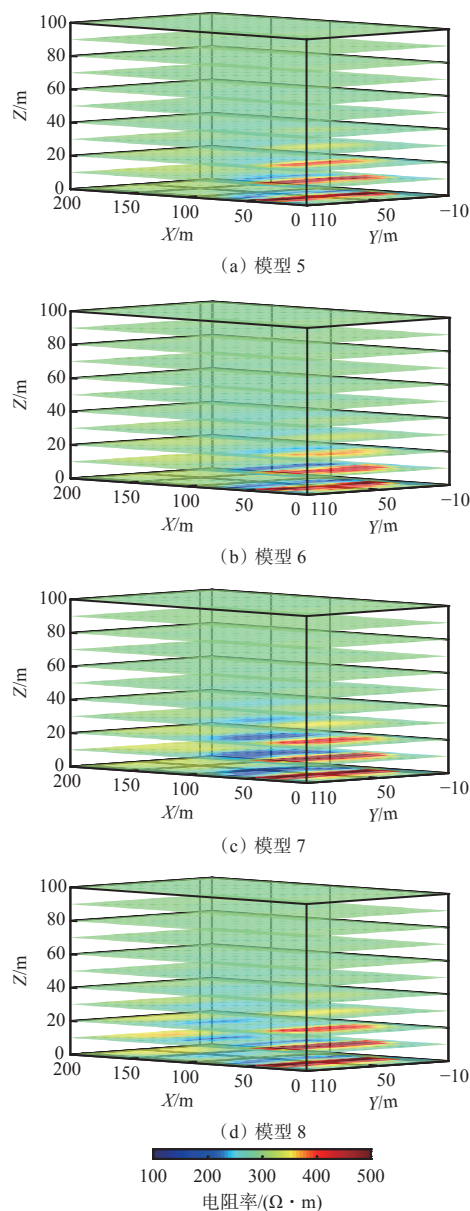


图 6 底板水害隐患顶板监测反演成像结果

Fig. 6 Roof monitoring and inversion imaging results for floor hidden water hazards

将图 6 不同模型的顶板监测结果与图 3(d)模型 4 的顶板监测结果进行对比可以看出,模型 5 和模型 6 的顶板监测结果与模型 4 的顶板监测结果较接近,电阻率异常主要集中在顶板上 20 m 以内,低阻异常响应相对较弱,底板水害隐患的异常响应难

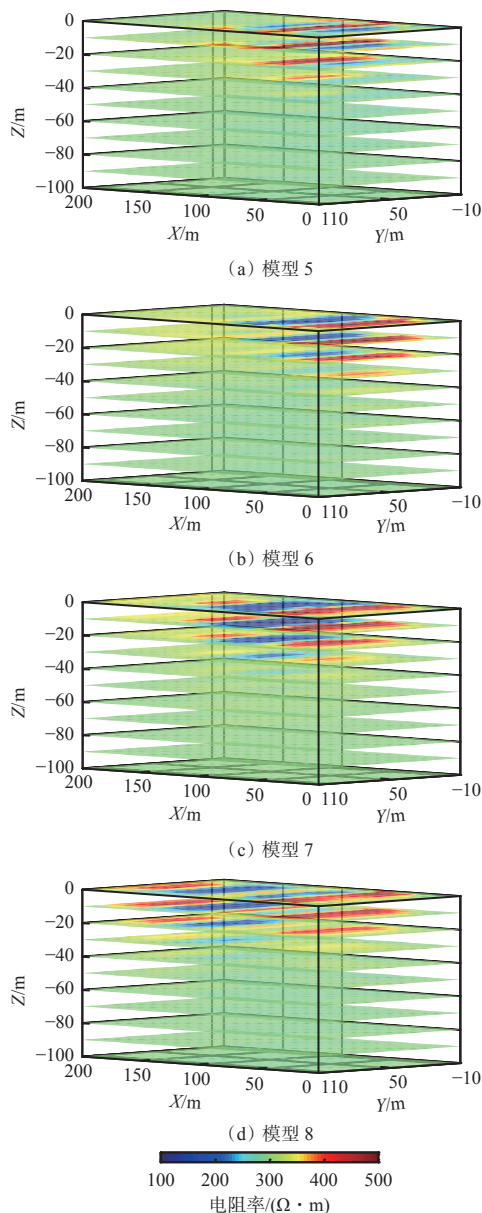


图7 底板水害隐患底板监测成像结果

Fig. 7 Floor monitoring and imaging results for floor hidden water hazards

以识别;模型7的顶板监测结果相对模型4的顶板监测结果而言,低阻异常有所增强,其垂向影响范围增大到顶板上方30 m,这主要是由于底板水害隐患的低阻异常响应与超前支撑压力影响区的低阻异常响应叠加在一起导致的;模型8顶板监测结果中,在底板水害隐患的镜像位置出现一个与采动破坏影响区相互独立的低阻异常,该低阻异常强度较弱。上述结果显示,存在底板水害隐患时,顶板监测得到的电阻率异常响应以采动破坏影响为主;底板水害隐患的存在对顶板监测结果也会产生一定影响,特别是当底板水害隐患位于回采工作面前方时,在顶板监测结果中底板水害隐患的镜像位置会出现强度较弱的低阻异常,或导致该位置原有的低阻异常响应

得到一定幅度的增强。

将图7不同模型的底板监测结果与图4(d)模型4的底板监测结果进行对比可以看出,模型5的底板监测结果中,在原本表现为高阻的采空区内出现明显的低阻异常,低阻异常的位置与底板水害隐患的位置基本一致;模型6和模型7的底板监测结果中,原有的低阻异常显著增强;模型8的底板监测结果中,在底板水害隐患位置出现一个与采动破坏影响区相互独立的低阻异常,该低阻异常显著强于超前支撑压力影响区的低阻异常响应。此外,图7中模型5和模型6底板水害隐患的低阻异常响应强度相对较弱,其垂向影响范围不超过底板以下20 m;模型7和模型8底板水害隐患的低阻异常响应强度相对较强,其垂向影响范围达到底板以下30 m。上述结果显示,底板监测得到的电阻率异常响应中既包含了采动破坏的影响,也包含了底板水害隐患的影响。底板水害隐患的低阻异常响应强度与其相对回采工作面的位置有关:当底板水害隐患所处的位置与采空区有所重合时,采空区的高阻异常响应会削弱底板水害隐患的低阻异常响应,导致底板水害隐患的低阻异常响应难以识别;当底板水害隐患所处的位置与超前支撑压力影响区有所重合时,二者的低阻异常响应会叠加在一起,低阻异常响应会得到一定幅度的增强,导致难以区分该低阻异常究竟是由底板水害隐患引起,还是由超前支撑压力作用引起。

对比图6和图7不同模型的顶底板监测结果可知,由于电法勘探的体积效应,顶板监测的成像结果中存在底板水害隐患的异常响应,但与底板监测结果相比,顶板监测结果中底板水害隐患造成的异常响应强度较弱。

3.3 底板水害隐患纯异常响应特征

为了准确识别底板水害隐患的低阻异常响应,以模型4的监测结果为背景电阻率,用模型5—模型8的监测结果减去背景电阻率,获得底板水害隐患的纯异常响应。按照上述方法对模型5—模型8的底板监测结果进行纯异常提取,成像结果如图8所示。可看出经纯异常提取后,消除了采动破坏过程的影响,位于不同位置的底板水害隐患,其纯异常响应强度基本一致,其垂向影响范围均可达到底板以下40 m。

4 结论

(1) 建立了同步考虑覆岩变形破坏和底板破坏影响的采动破坏过程动态地电模型,对该模型进行三维数值模拟和反演成像,得到了采动破坏过程的

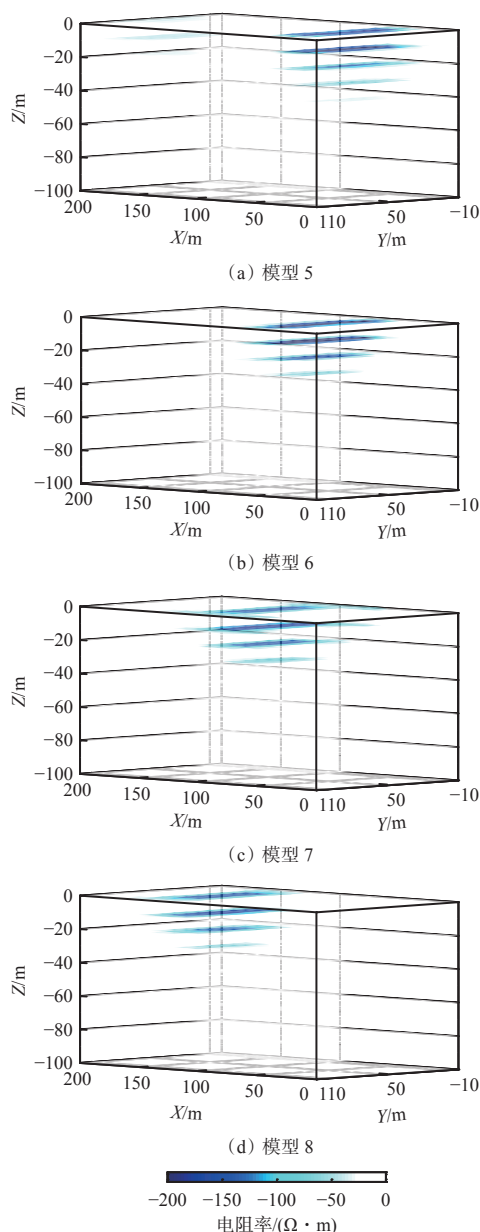


图 8 底板水害隐患纯异常响应提取结果

Fig. 8 Extraction results of pure abnormal response of floor hidden water hazards

电阻率动态响应特征。该响应特征与前人研究结论基本一致,验证了所建立地电模型的合理性。

(2) 工作面固定位置的电阻率响应在回采过程中会经历先降低、后升高、再降低的过程,该电阻率响应变化过程与工作面回采过程中顶底板经历的周期性应力变化和破坏过程基本一致。

(3) 当底板水害隐患所处的位置与采空区有所重合时,采空区的高阻异常响应会削弱底板水害隐患的低阻异常响应;当底板水害隐患所处的位置与超前支撑压力影响区有所重合时,二者的低阻异常响应会叠加在一起,使低阻异常响应得到一定幅度的增强。

(4) 针对底板水害隐患进行纯异常提取后,可以消除采动破坏的影响,不同位置底板水害隐患的纯异常响应强度基本一致,其垂向影响范围大于采动破坏的垂向影响范围。

(5) 煤层厚度不超过 5 m 时,底板水害隐患会导致顶板监测结果中出现假异常。因此,还需针对顶板水害发育过程的电阻率响应特征展开进一步的研究分析。

参考文献(References):

- [1] 张培森,朱慧聪,李复兴,等. 2008—2019 年我国煤矿水害事故统计及演变趋势分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 194-200, 207.
ZHANG Peisen, ZHU Huicong, LI Fuxing, et al. Evolution trend and statistical analysis of coal mine water disaster accidents in China from 2008 to 2019[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 194-200, 207.
- [2] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [3] 董书宁,刘再斌,程建远,等. 煤炭智能开采地质保障技术及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 21-31.
DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, et al. Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 21-31.
- [4] 靳德武,乔伟,李鹏,等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10-17.
JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10-17.
- [5] 吴泱序,陈平,李波. 基于 3D 双流网络的地下岩层破裂微震震源定位[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-9[2022-10-03]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0395.
WU Yangxu, CHEN Ping, LI Bo. Location of underground microseismic source based on 3D two-stream network[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-9[2022-10-03]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0395.
- [6] 鲁晶津,王冰纯,李德山,等. 矿井电阻率法监测系统在采煤工作面水害防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 36-44.
LU Jingjin, WANG Bingchun, LI Deshan, et al. Application of mine-used resistivity monitoring system in working face water disaster control[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 36-44.
- [7] 孙斌杨,张平松. 基于 DFOS 的采场围岩变形破坏监测研究进展与展望[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4):

- 985-1001.
SUN Binyang, ZHANG Pingsong. Research progress and prospect of surrounding rock deformation and failure monitoring in stope based on DFOS[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 985-1001.
- [8] 鲁晶津, 王冰纯, 颜羽. 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 18-26.
LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 18-26.
- [9] 于师建, 程久龙, 王玉和. 覆岩破坏视电阻率变化特征研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 457-460.
YU Shijian, CHENG Jiulong, WANG Yuhe. The study on apparent resistivity change feature of overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 457-460.
- [10] 程久龙, 于师建. 覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 699-706.
CHENG Jiulong, YU Shijian. Simulation experiment on the response of resistivity to deformation and failure of overburden[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 699-706.
- [11] 程久龙. 矿山采动裂隙岩体地球物理场特征研究及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 877-879.
CHENG Jiulong. Study on geophysical field characteristics of mining-induced fracture rock mass in mine and its applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 877-879.
- [12] 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.
- [13] 张平松, 胡雄武, 刘盛东. 采煤面覆岩破坏动态测试模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 78-83.
ZHANG Pingsong, HU Xiongwu, LIU Shengdong. Study of dynamic detection simulation of overburden failure in model workface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 78-83.
- [14] 张平松, 胡雄武, 吴荣新. 岩层变形与破坏电法测试系统研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 952-956.
ZHANG Pingsong, HU Xiongwu, WU Rongxin. Study of detection system of distortion and collapsing of top rock by resistivity method in working face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 952-956.
- [15] 王莹, 梁德贤, 翟培合. 采动影响下煤层覆岩电性变化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 122-125, 105.
WANG Ying, LIANG Dexian, ZHAI Peihe. Study on electrical property variation law of overburden strata above seam under mining influences[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 122-125, 105.
- [16] 吴荣新, 张卫, 张平松. 并行电法监测工作面“垮落带”岩层动态变化[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 571-577.
WU Rongxin, ZHANG Wei, ZHANG Pingsong. Exploration of parallel electrical technology for the dynamic variation of caving zone strata in coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 571-577.
- [17] 吴荣新, 吴茂林, 曹建富, 等. 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 239-245.
WU Rongxin, WU Maolin, CAO Jianfu, et al. Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 239-245.
- [18] 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.
- [19] 张朋, 王一, 刘盛东, 等. 工作面底板变形与破坏电阻率特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1): 64-67.
ZHANG Peng, WANG Yi, LIU Shengdong, et al. Resistivity characteristic of deformation and failure of floor in workface[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 64-67.
- [20] 孙希奎, 许进鹏, 杨圣伦, 等. 电阻率法动态监测煤层底板破坏变形规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 113-115, 59.
SUN Xikui, XU Jinpeng, YANG Shenglun, et al. Study on electric resistivity method applied to dynamically monitor and measure failure deformation law of seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 113-115, 59.
- [21] 吴基文, 翟晓荣, 张海潮, 等. 注浆加固与含水层改造底板采动效应孔巷电阻率CT探测研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 920-927.
WU Jiwen, ZHAI Xiaorong, ZHANG Haichao, et al. The electronic resistivity CT detection and research of holes and roadways on the mining effect of floors after grouting reinforcement and reconstruction of aquifers[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 920-927.

- dynamic range infrared image enhancement algorithm based on guided image filter[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(12): 1092-1097.
- [15] 汪伟, 许德海, 任明艺. 一种改进的红外图像自适应增强方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 419-427.
WANG Wei, XU Dehai, REN Mingyi. An improved infrared image adaptive enhancement method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 419-427.
- [16] 魏亮, 王炎, 胡文浩, 等. 基于双域分解的夜间车辆红外图像研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(11): 1538-1544.
WEI Liang, WANG Yan, HU Wenhao, et al. Research on infrared image of vehicle at night based on dual domain decomposition[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(11): 1538-1544.
- [17] 孙继平, 孙雁宇, 范伟强. 基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(5): 1-5, 21.
SUN Jiping, SUN Yanyu, FAN Weiqiang. Mine exogenous fire identification method based on visible light and infrared image[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(5): 1-5, 21.
- [18] UMRI B K, UTAMI E, KURNIAWAN M P. Comparative analysis of CLAHE and AHE on application of CNN algorithm in the detection of Covid-19 patients[C]. 4th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), Yogyakarta, 2021: 203-208.
- [19] 黄勇. 基于双边滤波和改进CLAHE算法的低照度图像增强研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- HUANG Yong. Low illumination image enhancement based on bilateral filtering and improved CLAHE algorithm[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [20] YU Yongbin, YANG Nijing, YANG Chenyu, et al. Memristor bridge-based low pass filter for image processing[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(3): 448-455.
- [21] VENETIS J. An analytic exact form of the unit step function[J]. *Mathematics and Statistics*, 2014, 2(7): 235-237.
- [22] FAN Weiqiang, HUO Yuehua, LI Xiaoyu. Degraded image enhancement using dual-domain-adaptive wavelet and improved fuzzy transform[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(3): 1-12.
- [23] BRANCHITTA F, DIANI M, CORSINI G, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(9): 096401.DOI: 10.1117/1.3216575.
- [24] 范伟强, 刘毅. 基于自适应小波变换的煤矿降质图像模糊增强算法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(12): 4248-4260.
FAN Weiqiang, LIU Yi. Fuzzy enhancement algorithm of coal mine degradation image based on adaptive wavelet transform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4248-4260.
- [25] AMANDEEP K, CHANDAN S. Contrast enhancement for cephalometric images using wavelet-based modified adaptive histogram equalization[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 51(2): 180-191.
- ~~~~~
- (上接第 45 页)
- [22] 张平松, 刘畅, 欧元超, 等. 准格尔煤田特厚煤层开采底板破坏特征综合测试研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 263-269.
ZHANG Pingsong, LIU Chang, OU Yuanchao, et al. Comprehensive testing research on floor damage characteristics of mining extra-thick seam in Jungar Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 263-269.
- [23] 杨海平, 刘盛东, 杨彩, 等. 煤层顶底板采动破坏同步动态监测电性特征分析[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1002-1009.
YANG Haiping, LIU Shengdong, YANG Cai, et al. Analysis of electrical characteristics of mining destruction on coal seam roof and floor with simultaneous dynamic monitoring method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1002-1009.
- [24] LU Jingjin, WU Xiaoping, KLAUS S. Algebraic multigrid method for 3D DC resistivity modeling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(3): 700-707.
- [25] PIDLISECKY A, HABER E, KNIGHT R. RESINVM3D: a 3D resistivity inversion package[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): H1-H10.
- [26] 徐永圻. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
XU Yongqi. Mining science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.