

范 涛,李鸿泰,郭建磊,等. 钻孔瞬变电磁拟地震反演方法在露天煤矿采空区精细探测中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42 (6):759-766.  
FAN Tao, LI Hong-tai, GUO Jian-lei, et al. Application of Borehole Transient Electromagnetic Pseudo-seismic Inversion Method in Goaf Fine Detection of Open-pit Coal Mine[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6):759-766.

DOI:10. 19814/j. jese. 2020. 06007 · 电磁法勘探专辑 · 主持人:李 貅 薛国强

# 钻孔瞬变电磁拟地震反演方法在露天煤矿采空区精细探测中的应用

范 涛<sup>1,2</sup>, 李鸿泰<sup>3</sup>, 郭建磊<sup>1,2</sup>, 李博凡<sup>1</sup>, 赵 睿<sup>1</sup>, 王冰纯<sup>1</sup>,  
姚伟华<sup>1</sup>, 李宇腾<sup>1</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 长安大学 地球物理场多参数综合模拟实验室 (中国地球物理学会重点实验室), 陕西 西安 710054; 3. 四川省地质矿产勘查开发局物探队, 四川 成都 610072)

**摘 要:**露天开采煤矿地下存在大量小煤窑采空区, 严重威胁煤矿生产安全和人员生命安全。受露天煤矿地表工作环境影响, 常规物探手段探测采空区精度较差, 而钻孔瞬变电磁探测是一种精度较高的探测方法, 属于一种动源动接收的工作方法。为提高资料处理精度, 应用滑动时窗波场反变换算法对数据进行高精度波场转换, 采用共轭梯度法研究了针对瞬变电磁虚拟波场数据的拟声波介质全波形反演算法, 实现了钻孔瞬变电磁数据的拟地震反演, 计算了三维数值模型数据的反演结果, 并对钻孔径向的小规模低阻异常体取得了良好的成像效果。结合山西朔州地区某露天煤矿的工程实践, 对该方法精细探测积水采空巷道形态、性质和规模的实用性和有效性进行了检验。结果表明: 钻孔瞬变电磁探测方法是矿井物探与钻探的有机结合与相互补充, 拟地震反演方法能够有效应用于露天煤矿采空区的精细解释。

**关键词:**露天煤矿; 钻孔瞬变电磁法; 波场反变换; 全波形反演; 共轭梯度法; 拟地震反演; 三维数值模拟; 采空区

中图分类号: P631      文献标志码: A      文章编号: 1672-6561(2020)06-0759-08

## Application of Borehole Transient Electromagnetic Pseudo-seismic Inversion Method in Goaf Fine Detection of Open-pit Coal Mine

FAN Tao<sup>1,2</sup>, LI Hong-tai<sup>3</sup>, GUO Jian-lei<sup>1,2</sup>, LI Bo-fan<sup>1</sup>, ZHAO Rui<sup>1</sup>, WANG Bing-chun<sup>1</sup>,  
YAO Wei-hua<sup>1</sup>, LI Yu-teng<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>

(1. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, Shaanxi, China; 2. Integrated Geophysical Simulation Lab (Key Laboratory of Chinese Geophysical Society), Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. The Geological Prospecting Team of Sichuan Geological and Mineral Bureau, Chengdu 610072, Sichuan, China)

**Abstract:** There are numerous small colliery goafs under open-pit coal mine, which put great threats to safety of coal mine production and life. Affected by the surface environment of open-pit coal mine, conventional geophysical methods have poor accuracy in detecting goafs. Borehole transient electromagnetic method is a high-precision detection method, which belongs to a

收稿日期: 2020-06-08; 修回日期: 2020-08-18; 网络首发日期: 2020-10-12      投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>  
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807804-2); 陕西省自然科学基金项目(2020JQ-994);  
天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2020-TD-ZD003)  
作者简介: 范 涛(1983-), 男, 陕西白水人, 中煤科工集团西安研究院有限公司副研究员, 工学博士, E-mail: fantao4444@163.com.

dynamic source and dynamic reception operating procedure. In order to improve data processing accuracy, the wavefield inverse transformation algorithm of sliding time window was adopted to preforming data high precision wavefield conversion. The conjugate gradient method was used to study the quasi-acoustic medium full waveform inversion algorithm for transient electromagnetic virtual wavefield data, and the borehole transient electromagnetic data pseudo-seismic inversion was realized. The inversion results of three-dimensional numerical model data show that the favorable imaging effect for the small-scale anomalous body on the radial direction of the borehole can be acquired. In order to test the practicability and availability of the operating method in detecting shape, characteristics and scale of water-logged goaf roadway, the engineering practice of an open-pit coal mine in Shuozhou area of Shanxi was conducted. The results show that the borehole transient electromagnetic detection method is a great combination and complementary of mine geophysical exploration technology and drilling technology. The pseudo-seismic inversion method is an effective application in goaf fine detection data interpretation of open-pit coal mine.

**Key words:** open-pit coal mine; borehole transient electromagnetic method; wavefield inverse transformation; full waveform inversion; conjugate gradient method; pseudo-seismic inversion; three-dimensional numerical simulation; goaf

0 引 言

露天开采对煤炭资源利用率高,相比地下开采,该方式具有生产效率高、开采成本低、工人工作条件好等优势。露天煤矿边界往往由于小煤窑开采而遗留大量的采空区,易造成塌陷事故。地下采空洞穴坍塌一般没有预兆,如果出现顶板冒落,会使大型作业设备倾覆于采空区,造成人员伤亡和设备损坏,产生非常严重的后果。例如,采空区中出现积水泄露、有毒有害气体释放,地面沉陷导致地表建筑物破坏,甚至造成淹坑等重大事故<sup>[1-2]</sup>。这些小煤窑采空区的分布、形状、结构等特征往往表现为孤立且不连续,没有确定的地质规律可循,随着地面露天开采的施工和时间变化,采空区还会逐渐垮落,导致其实际情况更难掌握。因此,露天煤矿采空区探测成为一个技术难题,尤其对基于空洞物理性质差异的地球物理探测技术来说,在适应性和使用效果上存在较大差别<sup>[3-4]</sup>。

因露天煤矿采场内存在大型作业机械、车辆及爆破等强震干扰源,地震类方法一般很难取得较好的探测效果。地质雷达分辨能力强,但仅适用于浅层探测;采场内地表大多存在高阻屏蔽层,电极的接地条件也不易处理,高密度电法难有好的表现;小线框瞬变电磁方法施工便捷,具有一定的探测深度,但纵向分辨率较低,测量信号也容易受到矿区内作业机械等金属体和通电电缆的干扰<sup>[5]</sup>。基于钻孔孔内空间远离地面、靠近地质异常这一特性,在钻孔孔内

逐点发射瞬变电磁信号,同时进行逐点接收的工作方式(图 1),可有效减小地表各种因素的干扰程度,探测钻孔径向可能存在的采空区,并对其做出较为准确的地质解释,保障露天煤矿的安全生产。

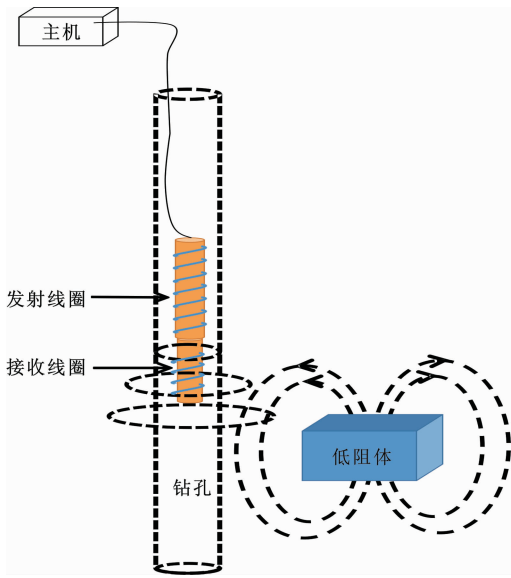


图 1 施工装置示意图

Fig. 1 Schematic View of Construction Device

小煤窑采空区体积很小,孔中测量数据采用常规处理手段得到的结果很难满足精度要求,因此,本文采用拟地震反演方法对其进行精细解释。由于瞬变电磁拟地震成像目前主要采用地震叠前偏移方法<sup>[6-10]</sup>,这样仅利用了瞬变电磁虚拟波形资料中的运动学特征,而且偏移一般要使用高频信息来勾画地下构造的边界,而瞬变电磁资料中以低频信息为

主,所以还需要研究新的拟地震反演方法。全波形反演是当前地震勘探资料处理领域的前沿研究方向之一,它既考虑了叠前地震波场的运动学特征,又考虑了其动力学特征,通过两方面特性可以准确建立地下地层构造,获得较复杂地质条件下的地下结构和物性<sup>[11-12]</sup>。

全波形反演需要提供足够的低频信息,构建良好的反演初始模型。常规地震勘探很难获得低频信息,但瞬变电磁探测则很容易。因此,用瞬变电磁虚拟波场进行全波形反演,既可以利用地震精细反演技术改善瞬变电磁反演的精度,又可以利用瞬变电磁场的特性消除全波形反演的应用瓶颈。基于此,本文把全波形反演技术引入钻孔瞬变电磁反演,通过拟地震反演成像精细探测钻孔径向存在的小规模地质异常,为保障露天煤矿安全生产提供技术支撑。

1 方法原理

1.1 波场反变换

为引入地震波全波形反演,将瞬变电磁数据通过反变换算法转换为虚拟波场数据。瞬变电磁场为低频电磁场,满足扩散方程。已知瞬变电磁场分量满足扩散方程,其表达式为

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{h}_z(r,t) + \mu\sigma \frac{\partial \boldsymbol{h}_z(r,t)}{\partial t} = 0 \\ \boldsymbol{h}_z(r,0) = 0 \\ \boldsymbol{h}_z|_{\Gamma} = \boldsymbol{h}_z(r_b,t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为介质磁导率; $\sigma$  为介质电导率; $\boldsymbol{h}_z(r,t)$  为空间坐标  $r$  处  $t$  时刻( $t>0$ )的  $z$  分量磁场; $r_b$  为已知边界位置。

引入函数  $U(r,\tau)$ ,其满足如下方程

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times U(r,\tau) + \mu\sigma \frac{\partial^2 U(r,\tau)}{\partial \tau^2} = 0 \\ U(r,0) = 0 \\ U|_{\Gamma} = U(r_b,\tau) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau$  为虚拟波场的虚拟时间, $\tau>0$ 。

扩散方程转换到波动方程的表达式为

$$f(x,y,z,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t^3}} \int_0^\infty \tau e^{-\frac{t^2}{4\tau}} u(x,y,z,\tau) d\tau \quad (3)$$

对比扩散方程以及与之对应的波动方程可知,波场速度( $v$ )与介质电导率的平方根成反比,其表达式为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\sigma}} \quad (4)$$

关于式(3)波场反变换的实现,很多学者进行了深度研究并给出了具体算法<sup>[13-15]</sup>。本文利用滑动时

窗波场反变换算法实现瞬变电磁场分量到虚拟波场的稳定变换,具体的计算方法可以参考文献[16]和[17]。

图 2 是对应表 1 参数的 H 型地电模型采用滑动时窗波场反变换算法的计算结果。图 2 中,纵坐标为幅值,无量纲,横坐标为虚拟时间;黑色实线是理论上应得到的波场(理论波场),点状线是滑动时窗波场反变换算法计算得到的波场(计算波场)。由图 2 可以看出,波场反变换计算结果的幅值、位置、波形宽度均与理论波场吻合度较高,仅在波形两侧有少量震荡。

表 1 H 型地电模型参数

Tab. 1 Parameters of H Geoelectric Model		
地层层序	厚度/m	电阻率/(Ω·m)
表层	80	100
中间层	80	50
基底层	∞	125

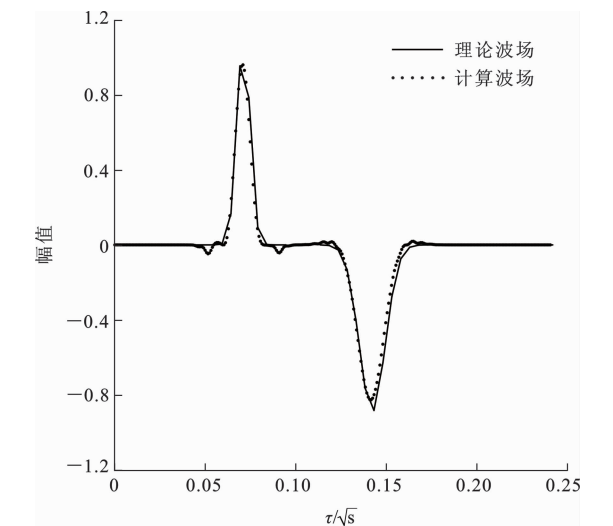


图 2 滑动时窗波场反变换算法的波场图像

Fig. 2 Diagram of Wavefield Inverse Transformation Algorithm of Sliding Time Window

1.2 全波形反演

考虑最简单的声波波动方程情况,此时地震地球物理参数集中仅有波场速度。可以将接收到的波场集合记为  $\boldsymbol{d}_{\text{obs}}(t, \boldsymbol{x}_r, \boldsymbol{x}_s)$ 。其中, $\boldsymbol{x}_s$  为激发点  $s$  的坐标; $\boldsymbol{x}_r$  为观测点的坐标。

如果使用  $\boldsymbol{L}$  标记地震波场的正传播过程,则可以通过正演模拟得到所有波场,其表达式为

$$\boldsymbol{u}(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}_s; \boldsymbol{v}) = \boldsymbol{L}(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_s) \quad (5)$$

实际地震勘探施工时,在表达式中需要对接收点位置进行限制,可以用算子  $\boldsymbol{R}$  来标记,其表达式为

$$\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}_s; \boldsymbol{v}) = \boldsymbol{u}(t, \boldsymbol{x}_r, \boldsymbol{x}_s; \boldsymbol{v}) \quad (6)$$

式(6)的残差( $\delta u$ )可表示为

$$\delta u = Ru(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}_s; \mathbf{v}) - d_{\text{obs}}(t, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) \quad (7)$$

忽略外在影响,噪声信号满足高斯分布,则可把误差泛函( $E(\mathbf{v})$ )<sup>[18]</sup>表示为

$$E(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \sum_{x_s} \sum_{x_r} \sum_t (Ru(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}_s; \mathbf{v}) - d_{\text{obs}}(t, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s))^2 \quad (8)$$

从而可得式(8)的变分( $\delta E(\mathbf{v})$ )为

$$\delta E(\mathbf{v}) = (R\delta u, Ru - d_{\text{obs}}) \quad (9)$$

那么,问题就转化为求取  $\delta u$ 。将地震波动场正传过程的变分写为

$$\delta u = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{u(\mathbf{v} + \epsilon \delta \mathbf{v}) - u(\mathbf{v})}{\epsilon} \quad (10)$$

式中: $\delta \mathbf{v}$  为速度场扰动; $u(\mathbf{v})$  表示满足波动方程的波场表达式; $u(\mathbf{v} + \epsilon \delta \mathbf{v})$  表示经过速度扰动后的波场表达式; $\epsilon$  为一个很小的数,如  $\epsilon = 0.0001$ 。

另外, $u(\mathbf{v} + \epsilon \delta \mathbf{v})$  可以记为

$$u_\epsilon = u(\mathbf{v} + \epsilon \delta \mathbf{v}) \quad (11)$$

因此,在波动方程中引入式(10)和(11)可得

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \Delta u = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) f_s(t) \quad (12)$$

$$\frac{1}{(\mathbf{v} + \epsilon \delta \mathbf{v})^2} \frac{\partial^2 u_\epsilon}{\partial t^2} - \Delta u_\epsilon = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) f_s(t) \quad (13)$$

式中: $f_s(t)$  为波动方程中的一个非齐次项,表示震源信号。

通过线性化假设,在  $\mathbf{v}$  处对式(13)进行泰勒展开,只取结果的一阶项,然后与式(12)进行合并,则得到波动方程的表达式为

$$\left( \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) \delta u = \left( \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) \left( \frac{u_\epsilon - u}{\epsilon} \right) = \frac{2\delta \mathbf{v}}{v^3} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (14)$$

波场残差以等式右端项为震源的波场传播得到,可以表示为

$$\delta u = L \left( \frac{2\delta \mathbf{v}}{v^3} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (15)$$

因此

$$\begin{aligned} \delta E(\mathbf{v}) &= (R\delta u, Ru - d_{\text{obs}}) \\ &= (L \left( \frac{2\delta \mathbf{v}}{v^3} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right), R^* (Ru - d_{\text{obs}})) \\ &= \left( \frac{2\delta \mathbf{v}}{v^3} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, L^* (R^* (Ru - d_{\text{obs}})) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $L^* (R^* (Ru - d_{\text{obs}}))$  是模型空间中反传播剩余波场。

误差泛函对速度模型的梯度( $\mathbf{g}(\mathbf{v})$ )<sup>[19]</sup>为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{v}) &= \frac{\delta E(\mathbf{v})}{\delta \mathbf{v}} = \frac{2}{v^3} \sum_{x_s} \sum_t \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \cdot \\ &L^* (R^* (Ru - d_{\text{obs}})) \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可知,通过在时间上反传播的剩余波场和对正传播波场的时间二阶导数的内积,可以求得梯度方向的值。任意一个单炮的正传播波场和反传播波场都需要单独进行计算,计算结果的叠加就是每一个单炮最终要求的梯度,据此可得出梯度求取的计算流程。

首先,对所有单炮,①求取对应的正传播波场,并保存全部时间对应的场值;②求取测量点处的波场残差;③于模型空间中求取波场残差的反传播剩余波场,并记录该数据。然后,在时间上求取反传播剩余波场和对正传播波场时间二阶导数的内积,计算梯度方向的值;接着,叠加计算全部单炮的梯度值,最终得出全局梯度值。之后,可使用抛物插值法求取合适的迭代步长,该方法假定在设置模型附近的误差泛函表现为抛物线形态,先给一个适用于全局的初始步长( $\alpha_0$ ),根据这个步长对速度进行更新,以获得一个更新产生的新速度模型  $\mathbf{v}_\rho = \mathbf{v} - \alpha_0 \mathbf{g}(\mathbf{v})$ ,再根据这个模型进行正演模拟,求取它的误差泛函( $E_\rho(\mathbf{v}_\rho)$ )。其表达式为

$$E_\rho(\mathbf{v}_\rho) = \frac{1}{2} \sum_{x_s} \sum_{x_r} \sum_t (Ru(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}_s; \mathbf{v}_\rho) - d_{\text{obs}}(t, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s))^2 \quad (18)$$

在原速度  $\mathbf{v}$  模型附近把误差泛函进行二阶泰勒展开,得

$$E_\rho(\mathbf{v}_\rho) = E(\mathbf{v}) - \alpha_0 \|\mathbf{g}(\mathbf{v})\|^2 + \frac{\alpha_0^2}{2} \tau \quad (19)$$

式(19)中, $\tau$  与  $E_\rho(\mathbf{v}_\rho)$  对模型的二阶导数相关。根据初始步长,可由原误差泛函计算出新误差泛函,则由式(19)可推出

$$\tau = \frac{2(E_\rho(\mathbf{v}_\rho) - E(\mathbf{v}) + \alpha_0 \|\mathbf{g}(\mathbf{v})\|^2)}{\alpha_0^2} \quad (20)$$

设置最合适的步长为  $\alpha_{\text{opt}}$ ,根据前提假设, $\alpha_{\text{opt}}$  与  $\alpha_0$  得到的式(20)中的  $\tau$  应相等;而在  $\alpha_{\text{opt}}$  附近,必然有  $\nabla_\alpha E(\alpha) = 0$ ,因此可得

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{2 \|\mathbf{g}(\mathbf{v})\|^2}{\tau} \quad (21)$$

得到了作为方向导数的梯度和最合适的迭代步长后,就可以得出迭代后的波场速度( $\mathbf{v}_{\text{opt}}$ ),其表达式为

$$\mathbf{v}_{\text{opt}} = \mathbf{v} - \alpha_{\text{opt}} \mathbf{g}(\mathbf{v}) \quad (22)$$

这样就实现了共轭梯度法全波形反演的全部流程,完成了速度模型的更新,并规定停止条件为

$$\left| \frac{\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_{n-1}}{\mathbf{v}_{n-1}} \right| < \epsilon \quad (23)$$

式中: $\mathbf{v}_n$  为第  $n$  次的速度改正量; $\mathbf{v}_{n-1}$  为第  $n-1$  次

的速度改正量。

1.3 异常定位

钻孔瞬变电磁场垂直分量经过拟地震反演后,可对钻孔径向异常体进行精细成像,但孔中瞬变电磁场接收到的垂直分量包含了三维空间中各个方向的信号,单一使用垂直分量进行反演成像,仅能得到电阻率和探测半径信息,无法对异常体方位做出解释。

以钻孔孔口为坐标系原点,钻孔延伸方向为  $z$  轴正方向,水平向右为  $x$  轴正方向,水平向下为  $y$  轴正方向,可依据如下原则利用水平分量实现钻孔旁异常体定位。

(1)所有水平分量异常响应形态均为正弦或反正弦形态。当  $x$  分量与  $y$  分量异常场均为反正弦形态时,异常体在第一象限;当  $x$  分量异常场为正弦形态, $y$  分量异常场为反正弦形态时,异常体在第二象限;当  $x$  分量与  $y$  分量异常场均为正弦形态时,异常体在第三象限;当  $x$  分量异常场为反正弦形态, $y$  分量异常场为正弦形态时,异常体在第四象限。

(2)异常体在其所处象限中的偏转角  $\theta$  为

$$\theta=\arcsin\left(\frac{|V_y|}{\sqrt{V_x^2+V_y^2}}\right)$$
 (24)

式中: $V_x$ 、 $V_y$  为两个水平分量的观测值。

此外,根据范涛的研究结果<sup>[20]</sup>可知,本文应用的钻孔瞬变电磁装置径向探测距离为 15~30 m。

2 数值模拟

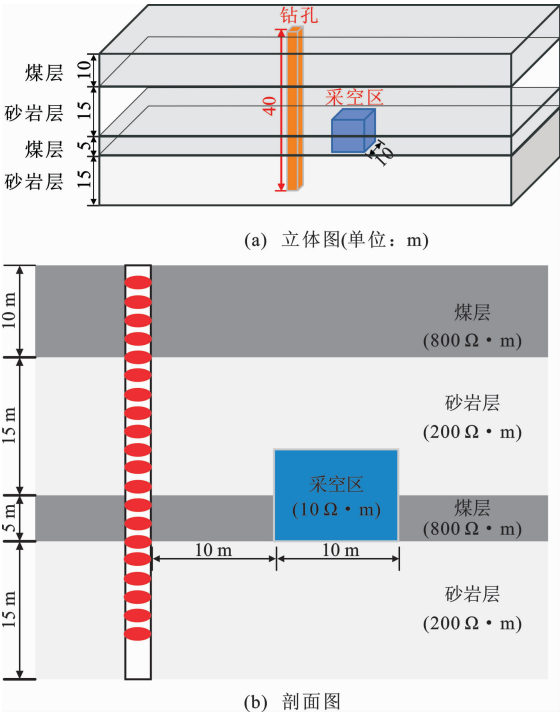
为验证钻孔瞬变电磁拟地震反演探测露天煤矿采空区效果,设计如图 3 所示的三维模型,采用时域有限差分方法进行数值模拟<sup>[20-24]</sup>。在地表布设一口 40 m 深的钻孔,含水采空区异常体中心位于钻孔孔深 25 m 处右侧 15 m,采空区为边长 10 m 的立方体,模型参数如表 2 所示。钻孔中测线上有 20 个测点,测点间距为 2 m。

表 2 模型参数

Tab. 2 Parameters of Model

地层	尺寸	电阻率/(Ω·m)
上覆煤层	1 000 m×1 000 m×10 m	800
中部砂岩层	1 000 m×1 000 m×15 m	200
下伏煤层	1 000 m×1 000 m×5 m	800
底部砂岩层	1 000 m×1 000 m×15 m	200
含水采空区	10 m×10 m×10 m	10

对正演数据进行波场反变换后,可得到如图 4 所示的波形图,黑色为波场正峰。由图 4 可以清晰



图(b)括号中数据为不同地层对应的电阻率  
图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic Views of Model

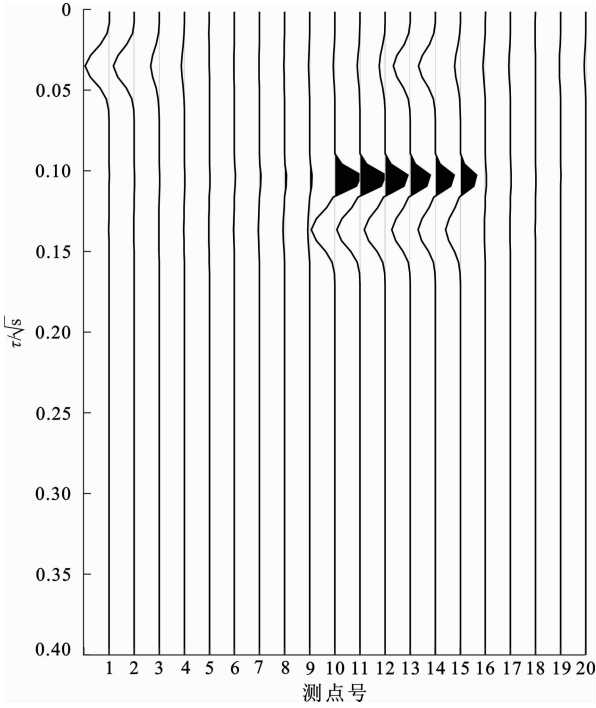


图 4 模型数据虚拟波场波形图

Fig. 4 Waveform Diagram of Virtual Wavefield for Model Data

看出,虚拟波场对采空区异常体前、后两个地电界面的响应,且沿测点增大方向对不同层位也有明显反映。

对虚拟波场波形进行反演,可得如图 5 所示的



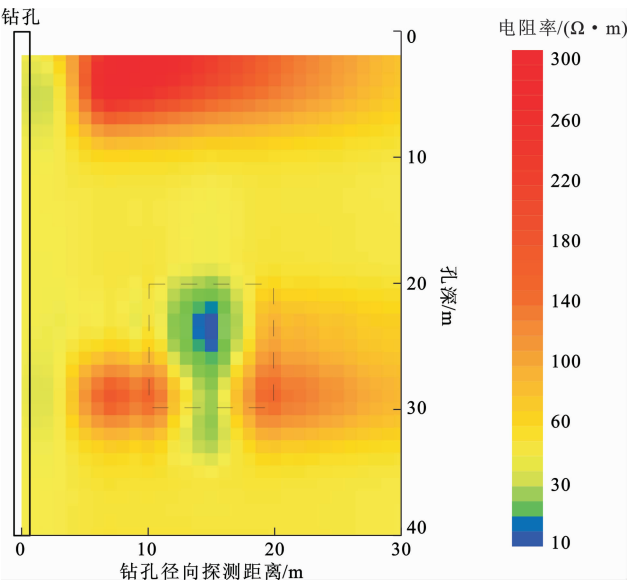


图 5 模型数据反演结果

Fig. 5 Inversion Result of Model Data

反演结果。从图 5 可以看出,在孔深 20~30 m 和钻孔径向 10~20 m 内有一明显低阻异常,异常体形状接近正方形,边长约为 10 m,这一低阻异常的厚度、位置均与模型设置吻合较好,解释精度较高。同时,反演结果对 4 个层位也有良好反映,电性分层厚度与模型设置层厚基本一致。

3 探测实例

山西朔州地区某露天煤矿矿界内存在大量已关闭的小煤窑,剥采过程中揭露多处小煤窑采空巷道,并存在大量积水,严重影响生产安全。由于露天采矿矿区环境复杂,常规探测方法受到局限。为解决此特殊条件下的探测问题,准确确定小煤窑采空区的分布,采用巷道-钻孔瞬变电磁法对矿区内一处钻孔进行了探测。

因小煤窑所采为地下埋深 30 m 左右的煤层,矿方在怀疑存在采空巷道的位置打一深为 28 m 的钻孔,钻孔未揭露采空区,故在该钻孔中设计了钻孔瞬变电磁探测工作,钻孔为裸孔,无套管,使用 PVC 杆人工将探头送入钻孔,钻孔中施工点距为 1 m。

钻孔观测数据的波场反变换结果如图 6 所示,黑色锥形为波场正峰。由图 6 可以清晰看出,探测区域内存在一组从浅至深稳定存在的正负波形。自 12 号测点开始出现波形幅值的明显增强,在 15 号测点处达到最强,正负波形的时间差异较小,符合采空巷道宽度较小的特征,考虑到采空区上方必然伴随有地层塌陷,容易形成一个从上至下的破碎条带

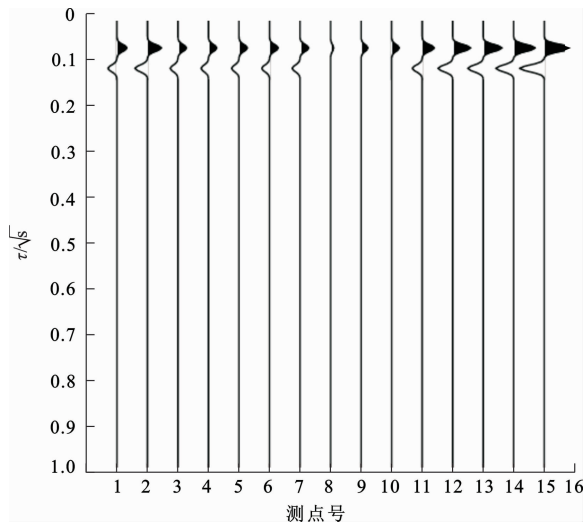


图 6 钻孔数据虚拟波场波形图

Fig. 6 Waveform Diagram of Virtual Wavefield for Borehole Data

区域,因此,可认为该组波形为小煤窑采空巷道及其上方破碎带的反映。

对施工钻孔波形进行反演,可得如图 7 所示的反演结果。由图 7 可以看出,其中存在一条明显的从浅到深的条带状低阻异常,异常沿钻孔半径方向约 5 m 宽,与小煤窑采空巷道规模吻合较好。但在 26 m 深度以上电阻率与背景介质差异不大,说明只是存在一定的破碎;26 m 深度以下电阻率明显降低,应是采空巷道积水产生的强低阻异常的反映。

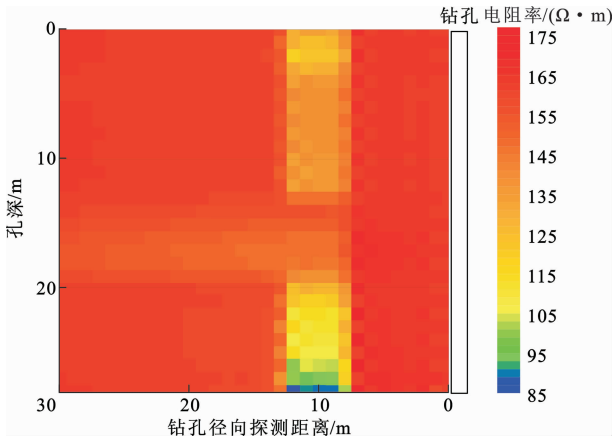


图 7 钻孔实测数据反演结果

Fig. 7 Inversion Result of Measured Borehole Data

结合水平分量异常场的定位结果,可基本确定低阻异常体中心位置在钻孔西北方向,矿方根据处理结果布置了多个验证钻孔,最终在施工钻孔西侧约 10 m 和北侧 16 m 的两个钻孔中打到积水采空区,钻孔径向探测距离、采空区规模与解释结果吻合较好,具体验证情况如图 8 所示。

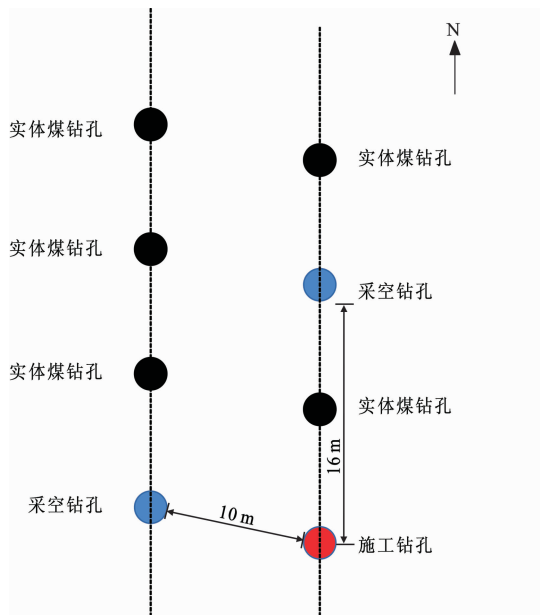


图 8 探测结果打钻验证示意图

Fig. 8 Schematic View of Drilling Verification for Detection Results

本次物探工作结果提交后,矿方邀请专家召开会议讨论,认为物探成果可靠,并立即采取了治理措施。综上所述,钻孔瞬变电磁拟地震反演方法为矿方安全采煤提供了技术支撑,也为下一步工作的决策提供了可靠依据。

4 结 语

(1)使用钻孔瞬变电磁方法可有效提高探测成果的纵向分辨能力,并能够利用地层屏蔽大部分地表的金属和电磁信号干扰。

(2)通过滑动时窗波场反变换算法将瞬变电磁场转换为虚拟波场,再引入地震勘探全波形反演方法实现了钻孔瞬变电磁拟地震反演,采用时域有限差分三维数值模拟数据对该方法进行检验,反演结果与模型吻合度较高,说明钻孔瞬变电磁虚拟波场全波形反演方法能够突出钻孔周围异常特征,突破“一孔之见”并实现“一孔多用”。

(3)山西朔州地区某露天煤矿的实例通过对钻孔径向的探测,精细解释了一条威胁安全生产的积水采空巷道,经过钻探验证,证明钻孔瞬变电磁拟地震反演方法能提高采空巷道这类小目标体的探测准确率,对煤矿安全生产决策具有重要意义。

参考文献:

References:

[1] 白羽. 元宝山露天煤矿采空区治理方案[J]. 露天采

矿技术,2018,33(2):83-85.  
BAI Yu. Governance Plan of Goaf in Yuanbaoshan Open-pit Coal Mine[J]. Opencast Mining Technology,2018,33(2):83-85.  
[2] 衣方,李泽华,李孝林,等. 露天矿采空区综合治理爆破技术方案[J]. 露天采矿技术,2018,33(3):65-68.  
YI Fang,LI Ze-hua,LI Xiao-lin, et al. Comprehensive Controlling Blasting Technology Scheme in the Goaf of Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology,2018,33(3):65-68.  
[3] 薛国强,潘冬明,于景邗. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展,2018,33(5):2187-2192.  
XUE Guo-qiang, PAN Dong-ming, YU Jing-cun. Review the Applications of Geophysical Methods for Mapping Coal-mine Voids[J]. Progress in Geophysics,2018,33(5):2187-2192.  
[4] 金磊,张周爱,鞠兴军. 井地地震技术在宝日希勒露天矿采空区探测中的应用[J]. 煤炭工程,2017,49(8):91-93.  
JIN Lei, ZHANG Zhou-ai, JU Xing-jun. Application of Well-ground Seismic Technology in Goaf Detection of Baorixile Open-pit Coal Mine[J]. Coal Engineering,2017,49(8):91-93.  
[5] 刘宪权. 露天煤矿地下采空区勘查与治理技术研究[J]. 露天采矿技术,2017,32(1):1-3,8.  
LIU Xian-quan. Research of Exploration and Treatment Technology in the Open-pit Coal Mine Goaf[J]. Opencast Mining Technology,2017,32(1):1-3,8.  
[6] 范涛. TEM 虚拟波场三维连续速度分析及其在隧道超前预报中的应用[J]. 物探与化探,2011,35(2):243-247.  
FAN Tao. A 3D Continuous Velocity Analysis of TEM Fictitious Wave-field and Its Application to Tunnel Advanced Prediction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2011,35(2):243-247.  
[7] 范涛,程建远,王保利,等. 应用瞬变电磁虚拟波场成像方法检测井下煤层气水力压裂效果的试验研究[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1762-1768.  
FAN Tao, CHENG Jian-yuan, WANG Bao-li, et al. Experimental Study on Imaging Method of TEM Pseudo Wave-field to Detect the Effect of Underground Coal-bed Gas Hydraulic Fracturing[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(7):1762-1768.  
[8] LEE T J, SUH J H, KIM H J, et al. Electromagnetic Traveltime Tomography Using an Approximate Wave-field Transform[J]. Geophysics,2002,67(1):68-76.

- [9] 李 貅, 戚志鹏, 薛国强, 等. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 3005-3011.  
LI Xiu, QI Zhi-peng, XUE Guo-qiang, et al. Three Dimensional Curved Surface Continuation Image Based on TEM Pseudo Wave-field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 3005-3011.
- [10] 李 貅, 薛国强, 刘银爱, 等. 瞬变电磁合成孔径成像方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 333-340.  
LI Xiu, XUE Guo-qiang, LIU Yin-ai, et al. A Research on TEM Imaging Method Based on Synthetic-aperture Technology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 333-340.
- [11] TARANTOLA A. Inversion of Seismic Reflection Data in the Acoustic Approximation[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259-1266.
- [12] TARANTOLA A. A Strategy for Nonlinear Elastic Inversion of Seismic Reflection Data[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1893-1903.
- [13] LEE K H, XIE G. A New Approach to Imaging with Low-frequency Electromagnetic Fields[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 780-796.
- [14] 李 貅, 薛国强, 宋建平, 等. 从瞬变电磁场到波场的优化算法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1185-1190.  
LI Xiu, XUE Guo-qiang, SONG Jian-ping, et al. An Optimize Method for Transient Electromagnetic Field-wave Field Conversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1185-1190.
- [15] 戚志鹏, 李 貅, 吴 琼, 等. 从瞬变电磁扩散场到拟地震波场的全时域反变换算法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3581-3595.  
QI Zhi-peng, LI Xiu, WU Qiong, et al. A New Algorithm for Full-time-domain Wave-field Transformation Based on Transient Electromagnetic Method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3581-3595.
- [16] LI X, XUE G Q, ZHI Q Q, et al. TEM Pseudo-wave Field Extractions Using a Modified Algorithm[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 33-45.
- [17] 范 涛. 矿井巷道-钻孔瞬变电磁二维拟地震反演方法及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1804-1816.  
FAN Tao. Method and Application on 2D Pseudo-seismic Inversion of Roadway-borehole Transient Electromagnetic Detection in Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1804-1816.
- [18] 杨积忠, 刘玉柱, 董良国. 变密度声波方程多参数全波形反演策略[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 628-643.  
YANG Ji-zhong, LIU Yu-zhu, DONG Liang-guo. A Multi-parameter Full Waveform Inversion Strategy for Acoustic Media with Variable Density[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 628-643.
- [19] 慎国强, 王玉梅, 王希萍. 基于声波波动方程的全波形反演方法及应用[J]. 油气地球物理, 2020, 18(1): 2-8.  
SHEN Guo-qiang, WANG Yu-mei, WANG Xi-ping. Full Waveform Inversion Method Based on Acoustic Wave Equation and Its Application[J]. Petroleum Geophysics, 2020, 18(1): 2-8.
- [20] 范 涛. 矿井极小线圈单钻孔瞬变电磁方法检测煤层气水力压裂效果[J]. 煤炭学报, 2019, DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0827.  
FAN Tao. Coalbed Methane Hydraulic Fracturing Effectiveness Test Using Minimal Coil Single Bore-hole Transient Electromagnetic Method[J]. Journal of China Coal Society, 2019, DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0827.
- [21] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
SUN Huai-feng. Three-dimensional Transient Electromagnetic Responses of Water Bearing Structures in Tunnels and Prediction of Water Inrush Sources[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [22] 孙怀凤, 李 貅, 李术才, 等. 考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1049-1064.  
SUN Huai-feng, LI Xiu, LI Shu-cai, et al. Three-dimensional FDTD Modeling of TEM Excited by a Loop Source Considering Ramp Time[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1049-1064.
- [23] 赵 睿, 范 涛, 李宇腾, 等. 钻孔瞬变电磁探测在水力压裂效果检测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 41-45.  
ZHAO Rui, FAN Tao, LI Yu-teng, et al. Application of Borehole Transient Electromagnetic Detection in the Test of Hydraulic Fracturing Effect[J]. Coal Geology and Exploration, 2020, 48(4): 41-45.
- [24] 孙怀凤, 程 铭, 宿传玺, 等. 隧(巷)道掘进工作面-钻孔瞬变电磁超前探测方法物理模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2111-2116.  
SUN Huai-feng, CHENG Ming, SU Chuan-xi, et al. Tunnel Face-borehole Transient Electromagnetic Method and Its Physical Experimental Studies[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2111-2116.