

矿井物探技术新进展

[编者按] 矿井物探是煤矿地质构造、安全隐患探测的极其重要技术手段。目前,国内常用的井下物探技术方法包括直流电阻率法、瞬变电磁法、无线电波透视法、地震超前探测法等。随着煤矿采深增加,“三高一复杂”(高地温、高水压、高地应力、地质条件复杂)的问题愈发突出。煤矿高效安全开采对于超前查明隐蔽致灾因素的现实需求,推动了矿井地球物理探测技术与装备的迅速发展,但在隐伏陷落柱、老空水、冲击地压、瓦斯富集区的精细探测以及煤与瓦斯突出前兆监测预警等方面,矿井物探成果与生产应用结合尚存在不少差距,亟待开展协同攻关。基于此,本专题重点围绕煤矿井下掘进工作面水害隐患超前探测技术难题,集中报道了矿井瞬变电磁法、掘进工作面前方小断层的地震反射波超前探测、煤矿井下随采地震技术的试验研究等最新技术成果,以期煤矿安全高效开采提供有力的技术保障。在此特别感谢程建远研究员、于景邨教授、于师建教授、刘盛东教授、张平松教授等在本专题组稿撰稿中给予编辑部的大力支持和帮助!

老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究

于景邨¹, 常江浩¹, 苏本玉¹, 蒋宗霖², 周嗣辉¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为准确探测掘进工作面前方老空水赋存情况,采用三维时域有限差分法,对老空水的全空间瞬变电磁响应进行了数值模拟。结果表明:当发射回线法线与巷道掘进方向一致时,位于巷道掘进方向的老空水比两侧位置的磁场对时间导数曲线幅值更大,对应视电阻率曲线形态相同、极小值更低、响应时间更早;老空水距离巷道掘进工作面远近和体积大小不同,其磁场对时间导数曲线和对应视电阻率曲线特征与不同位置老空水响应特征相似,但前者视电阻率曲线极小值差异更明显。通过实际应用,其探测结果与后期钻探验证基本吻合,表明井下瞬变电磁法是探查老空水非常有效方法之一。

关键词: 老空水; 矿井瞬变电磁法; 三维; 数值模拟; 时域有限差分

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)01-0095-05

Study on whole space transient electromagnetic method prospect three dimensional numerical modeling of gob water

YU Jing-cun¹, CHANG Jiang-hao¹, SU Ben-yu¹, JIANG Zong-lin², ZHOU Si-hui¹

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to prospect gob water precisely, the authors studied the whole space transient electromagnetic response of gob water by numerical modeling using three dimensional finite difference time domain method. The numerical modeling results show that in the situation of normal direction of the transmitting loop being parallel with tunnel, the response curve amplitude of time derivative for gob water located in ahead of heading face is stronger than that located in the two sides of heading face. Moreover, curve minimum value of situation with gob water located in ahead of heading face is smaller than that gob water located in two sides of heading face as well as the response time of situation with gob water located in ahead of heading face is earlier than that gob water located in two sides of heading face. However, the shape of two curves are similar. In addition, for the gob water with different volumes and different distances from the heading face, the re-

收稿日期: 2014-07-25; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.01.023

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ03013307)

作者简介: 于景邨(1966—),男,安徽无为人,教授,博士生导师。Tel: 0516-83590988, E-mail: yujcun@163.com

引用格式: 于景邨,常江浩,苏本玉,等.老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2015,43(1):95-99,103.

YU Jing-cun, CHANG Jiang-hao, SU Ben-yu, et al. Study on whole space transient electromagnetic method prospect three dimensional numerical modeling of gob water[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 95-99, 103.

sponse curves are different. Finally the effectiveness of prospecting gob water of mining TEM is testified by drilling data, this shows that the mining TEM is one of very effective way to prospect gob water.

Key words: gob water; mining transient electromagnetic method; three domain numerical modeling; finite difference time domain method

0 引 言

矿井水害是煤矿生产和建设过程中的主要灾害之一,煤矿老空区分布状况极难掌握,充水的老空区一旦掘透,其危害性极大^[1-2]。目前,煤矿防治水常用的物探方法有矿井直流电法、无线电波透视法、音频电透视法和矿井瞬变电磁法等^[3],其中矿井瞬变电磁法具有施工方便快捷、对含水构造反应灵敏等优点,被广泛应用于掘进工作面超前探测中^[4-5]。瞬变电磁场的分布规律对于瞬变电磁法的资料解释十分重要,有限差分法是研究瞬变电磁场的一种重要方法^[6-10]。1993 年, Tsili Wang 等^[6]采用三维空间网格的有限差分法直接在时间域中求解瞬变电磁场响应; 闫述等^[9]利用二维有限差分法阐述了瞬变电磁场随时间扩散的全过程; 姜志海^[11]采用有限差分法研究了断层与陷落柱的瞬变电磁响应特征; 杨海燕等^[12]采用三维模型研究了巷道对全空间瞬变电磁法的影响。笔者旨在建立三维全空间地质-地球物理模型,采用时域有限差分法正演模拟方法,分析老空水的瞬变电磁响应特征,为探测老空水奠定理论基础。

1 矿井瞬变电磁法基本原理

矿井瞬变电磁法是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域电磁法。它利用不接地回线向巷道围岩发送一次脉冲磁场,在一次脉冲激励作用下,巷道周围地质体产生的感应电流又将会激励起随时间变化的感应电磁场,即二次场。在脉冲的间歇期间,利用回线接收全空间感应二次场,通过对接收信号的处理、分析和解释,从而达到探测巷道周围地质情况的目的。与地面瞬变电磁法不同,矿井瞬变电磁法的发射、接收均在井下巷道中进行,发射与接收均采用多匝小回线装置。小回线的优点在于发射与接收装置摆放灵活,可以实现多方向和多角度探测,与掘进工作面前方异常体易达到最佳耦合。

2 电磁场时域有限差分

2.1 电磁场时域有限差分方程及格式

在无源、各向同性、非磁性介质中,根据 Maxwell

微分方程组可推导出无源扩散方程:

$$\nabla^2 H = \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

其中: H 为电磁场强度; μ 为介电常数; σ 为介质电导率; t 为时间。在电磁场时域有限差分中,需要将地层模型离散化,一般采用非均匀网格将空间范围剖成长方体单元(图 1)。

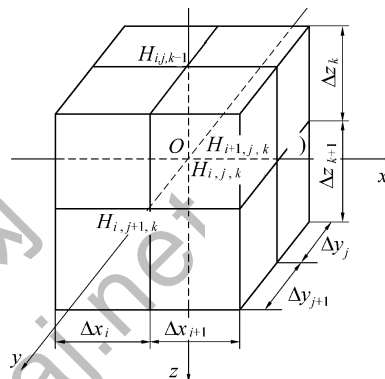


图 1 三维网格单元模型

网格中心节点处的电磁场强度为 $H_{i,j,k}$, 将式(1)在以点 (i,j,k) 为中心的体积元 $\Delta V_{i,j,k}$ 内积分, 得到

$$\iiint_{\Delta V} \nabla^2 H dv = \iiint_{\Delta V} \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} dv \quad (2)$$

由于 $\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$, 则式(2)可写为

$$\iiint_{\Delta V} \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right] dv = \iiint_{\Delta V} \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} dv \quad (3)$$

利用 Gauss 公式可将式(3)左边体积分化为面积分, 得到

$$\iint_S \left[\frac{\partial H}{\partial x} dydz + \frac{\partial H}{\partial y} dzdx + \frac{\partial H}{\partial z} dxdy \right] = \iiint_{\Delta V} \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} dv \quad (4)$$

式(4)左边采用差分形式可写为

$$\begin{aligned} & \iint_S \left[\frac{\partial H}{\partial x} dydz + \frac{\partial H}{\partial y} dzdx + \frac{\partial H}{\partial z} dxdy \right] = \\ & \frac{H_{i+1,j,k}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n)}}{\Delta x_{i+1}} \frac{(\Delta y_j + \Delta y_{j+1})(\Delta z_k + \Delta z_{k+1})}{4} + \\ & \frac{H_{i-1,j,k}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n)}}{\Delta x_i} \frac{(\Delta y_j + \Delta y_{j+1})(\Delta z_k + \Delta z_{k+1})}{4} + \\ & \frac{H_{i,j+1,k}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n)}}{\Delta y_{j+1}} \frac{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})(\Delta z_k + \Delta z_{k+1})}{4} + \end{aligned}$$

$$\frac{H_{i,j,k}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n-1)} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) (\Delta z_k + \Delta z_{k+1})}{\Delta y_j} + \frac{H_{i,j,k+1}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n)} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) (\Delta y_j + \Delta y_{j+1})}{\Delta z_{k+1}} + \frac{H_{i,j,k-1}^{(n)} - H_{i,j,k}^{(n)} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) (\Delta y_j + \Delta y_{j+1})}{\Delta z_k} \quad (5)$$

式中上标 n 为第 n 个时间步长,式(4)右边可离散为

$$\iiint_{\Delta V} \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} dv = \mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \frac{\partial H_{i,j,k}^{(n)}}{\partial t} \quad (6)$$

其中 $\bar{\sigma}_{i,j,k}$ 是以点 (i,j,k) 为中心的体积元 $\Delta V_{i,j,k}$ 内电导率的平均值,即

$$\bar{\sigma}_{i,j,k} = (\sigma_{i,j,k} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k + \sigma_{i+1,j,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_k + \sigma_{i,j+1,k} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i+1,j+1,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i,j,k+1} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \sigma_{i,j+1,k+1} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j+1,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1}) / [(\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) (\Delta y_j + \Delta y_{j+1}) (\Delta z_k + \Delta z_{k+1})] \quad (7)$$

对时间导数采用中心差分形式:

$$\partial H_{i,j,k}^{(n)} / \partial t = (H_{i,j,k}^{(n+1)} - H_{i,j,k}^{(n-1)}) / (2\Delta t) \quad (8)$$

同时对式(5)中的 $H_{i,j,k}^{(n)}$ 利用线性插值运算:

$$H_{i,j,k}^{(n)} = (H_{i,j,k}^{(n+1)} + H_{i,j,k}^{(n-1)}) / 2 \quad (9)$$

将式(5)一式(9)代入式(4)中,整理可得到三维有限差分方程:

$$H_{i,j,k}^{(n+1)} = H_{i,j,k}^{(n-1)} (1 - 6\bar{r}_{i,j,k}) / (1 + 6\bar{r}_{i,j,k}) + \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^x}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} H_{i-1,j,k}^{(n)} + \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i+1}} H_{i+1,j,k}^{(n)} \right] + \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^y}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta y_{j+1}}{\Delta y_j} H_{i,j-1,k}^{(n)} + \frac{\Delta y_j}{\Delta y_{j+1}} H_{i,j+1,k}^{(n)} \right] + \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^z}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta z_{k+1}}{\Delta z_k} H_{i,j,k-1}^{(n)} + \frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k+1}} H_{i,j,k+1}^{(n)} \right] \quad (10)$$

其中: $\Delta x_i = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / 2$, $\Delta y_j = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1}) / 2$, $\Delta z_k = (\Delta z_k + \Delta z_{k+1}) / 2$, $\bar{r}_{i,j,k}^x = \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta x_i \Delta x_{i+1})$, $\bar{r}_{i,j,k}^{(y)} = \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta y_j \Delta y_{j+1})$, $\bar{r}_{i,j,k}^{(z)} = \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta z_k \Delta z_{k+1})$, $\bar{r}_{i,j,k} = (\bar{r}_{i,j,k}^{(x)} + \bar{r}_{i,j,k}^{(y)} + \bar{r}_{i,j,k}^{(z)}) / 3$ 。

2.2 初始源及边界条件

有限差分法是利用电磁场扩散方程来模拟空间中电磁场随时间的变化规律,需要给出初始时刻空间各点的磁场值。可用均匀全空间中磁偶源在初始时刻的瞬变磁场作为初始源。全空间条件下磁偶源

中电流被突然切断所产生的瞬变磁场为^[12]:

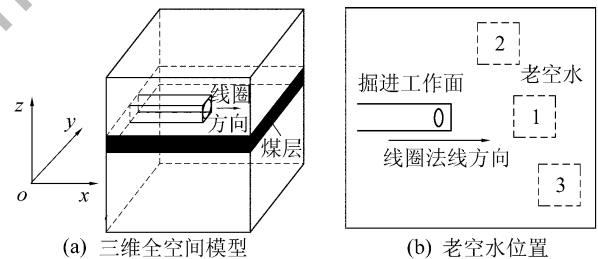
$$H = \frac{IS}{4\pi r^3} \left\{ 3\text{erf}(\theta r) - \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \theta^3 r^3 + \frac{6}{\sqrt{\pi}} \theta r \right) e^{-\theta^2 r^2} \right\} \left(\frac{xz}{r^2} u_x + \frac{yz}{r^2} u_y + \frac{z^2}{r^2} u_z \right) - \left\{ \text{erf}(\theta r) - \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \theta^3 r^3 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta r \right) e^{-\theta^2 r^2} \right\} u_z \quad (11)$$

其中: I 为发射电流; S 为电流环的面积; r 为接收点与发射点之间距离 $\theta = \sqrt{\mu \sigma / (4t)}$ 。

对于边界条件的选取,采用了足够大的网格空间,网格边界距离发射源与异常体较远,可采用 Dirichlet 边界条件,即将边界上场值设为零。

3 老空水的瞬变电磁响应特征

在掘进工作面前方设置一个三维低阻体,模拟充水采空区。全空间三维地质模型如图 2a 所示,发射线框平行于掘进工作面断面,法线方向指向掘进方向。巷道宽度设为 6 m,电阻率设为 20 000 $\Omega \cdot \text{m}$,煤层厚度为 10 m,煤层电阻率设为 100 $\Omega \cdot \text{m}$,煤层顶板电阻率为 50 $\Omega \cdot \text{m}$,煤层底板电阻率为 150 $\Omega \cdot \text{m}$ 。老空水位于煤层中,其电阻率设为 1 $\Omega \cdot \text{m}$,具体平面分布如图 2b 所示。



1—3 为老空水位置编号

图 2 三维全空间模型与老空水位置

当老空水位于掘进工作面正前方时(图 2b 中的老空水 1,距离掘进工作面 30 m,大小为 20 m×20 m×10 m),不同时刻 xoy 平面磁场强度在发射线圈法线方向分量的分布如图 3 所示。图 3 中磁场强度为扩大 10^7 之后的值,单位为 A/m。

当 $t = 2.0 \mu\text{s}$ 时,在掘进面到异常体之间的磁场受到低阻影响,发生畸变,等值线受低阻体吸引,开始在低阻体附近聚集,但在低阻体附近远离巷道一侧等值线影响较小;在 $t = 12.0 \mu\text{s}$ 时,等值线极大值点已经扩散至低阻体内部,在低阻体及其附近变密集,磁场等值线梯度变大;在 $t = 80.4 \mu\text{s}$ 时,磁场等值线极大值位置已经移至低阻体中心,磁场在低阻

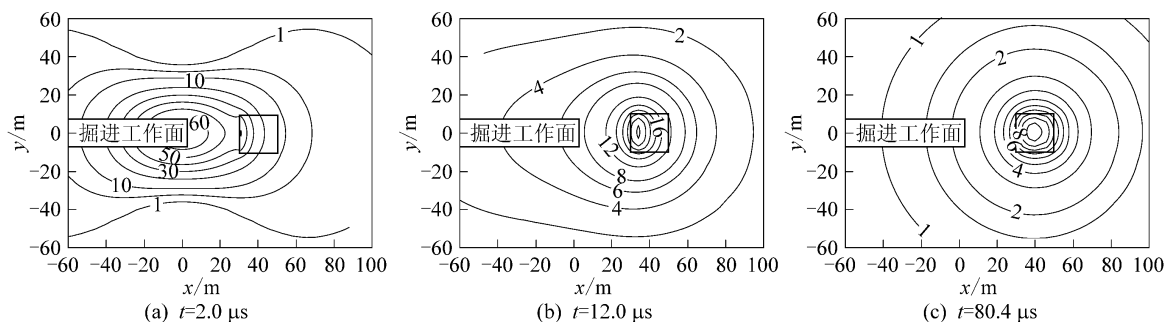


图 3 含老空水时不同时刻瞬变磁场等值线

体内部形成“烟圈”。此时,低阻体成为一个“二次源”向空间辐射电磁场,观测到的信号主要反映瞬变电磁场在低阻体影响下的衰减信息。

4 老空水全空间瞬变电磁探测模拟分析

4.1 不同方位老空水的瞬变电磁探测模拟

分析如图 2b 所示三维低阻体模拟的充水采空区情况,其电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 。低阻体体积均为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,分别位于掘进面正前方 30 m 处(老空水 1)、掘进面前方 20 m 偏左侧帮 20 m 处(老空水 2)、掘进面前方 40 m 处偏右侧帮 20 m 处(老空水 3)。图 4 为不同方位低阻体影响下的磁场强度在发射线圈法线方向分量对时间导数随时间的变化曲线,观测点位于掘进工作面位置。

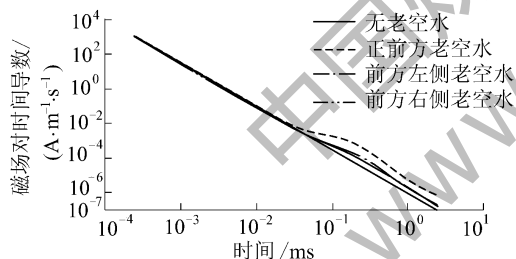


图 4 不同方位老空水的磁场对时间导数随时间变化曲线

图 4 中含有老空水时的磁场对时间导数曲线与不含老空水曲线在某一时刻出现分离,含有老空水时的响应曲线幅值高于不含老空水时的曲线,其中老空水位于掘进面正前方时的响应曲线幅值最大,通过改变发射回线法线方向,准确定位掘进工作面前方及两侧老空水的位置。图 4 中各曲线对应视电阻率随时间变化曲线如图 5 所示,其计算方法参考文献[4]。图 5 中 4 条曲线在时间 0.004 ms 之前完全重合,老空水位于掘进工作面正前方的视电阻率曲线在 0.004 ms 开始与不含老空水的曲线分离,说明位于掘进面正前方的老空水的响应最早;老空水位于巷道左侧帮的视电阻率曲线在 0.006 ms 开始

与不含老空水的曲线分离;老空水位于巷道右侧帮的曲线在 0.01 ms 开始与不含老空水的曲线分离。含有老空水时的 3 条曲线均出现幅度不大的极大值,这是由于在瞬变耦合早期,感应电流都集中在发射点附近,在低阻体中感应电流激发较为缓慢,因此在感应电流刚刚到达低阻体边界时有减小的倾向,这种影响使视电阻率曲线上出现一个极大值。

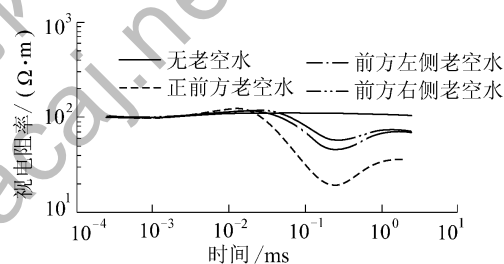


图 5 不同方位老空水的视电阻率随时间变化曲线

在图 5 中,含有老空水时的视电阻率在后期均低于不含老空水时的值,且老空水位于正前方时的视电阻率最低(最低点小于 $20 \Omega \cdot \text{m}$),说明了正前方老空水位于发射回线法线上,耦合最佳,低阻异常最明显。与位于前方右侧的老空水相比,前方左侧的老空水距离巷道掘进工作面较近,其视电阻率异常较明显。因此,在掘进工作面老空水超前探测中,可以采用多方向和多角度探测结果的对比,依据此结论可对老空水的空间位置进行定位。

4.2 不同距离老空水的瞬变电磁模拟分析

当老空水位于掘进工作面正前方不同距离处,其瞬变电磁响应曲线如图 6 所示。图 6 中巷道掘进面前方不同距离老空水的响应曲线具有较大差异,距离巷道掘进面越近,其响应越强,响应时间越早。对应视电阻率曲线如图 7 所示,老空水位于巷道掘进面正前方 20 m 处时,视电阻率曲线在 0.002 ms 时就开始与不含老空水的曲线分离;而当老空水位于巷道掘进面正前方 40 m 时,视电阻率在 0.006 ms 时才会有反应。老空水距离巷道掘进面较远时,其视

电阻率曲线低阻异常出现的时间较晚,异常明显较弱。

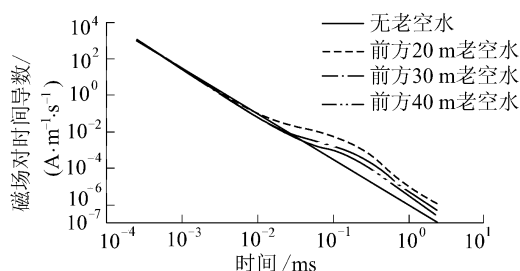


图6 掘进面正前方老空水磁场对时间导数响应曲线

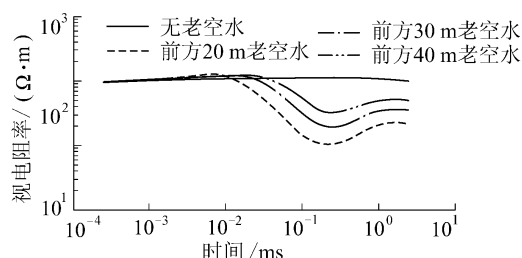


图7 掘进面正前方不同距离老空水的视电阻率曲线

4.3 不同规模老空水的瞬变电磁模拟分析

图2b模型中掘进工作面正前方20 m处的低阻体(即老空水1—3)大小分别为10 m×10 m×10 m、20 m×20 m×20 m和30 m×30 m×30 m时,其电阻率为1 Ω·m,图8为该低阻体不同大小时的磁场对时间导数响应曲线。由图8可知:低阻体体积越大,其曲线与不含低阻体的曲线分离越早,曲线幅值越大。不同大小低阻体的磁场对时间导数响应曲线均有相同的规律。因此,在矿井瞬变电磁法超前探测掘进工作面前方老空水时,通过与已验证的老空水探测曲线对比,结合矿井水文地质资料综合分析,可以初步确定巷道掘进工作面前方老空水发育位置和范围,为钻探验证提供依据。

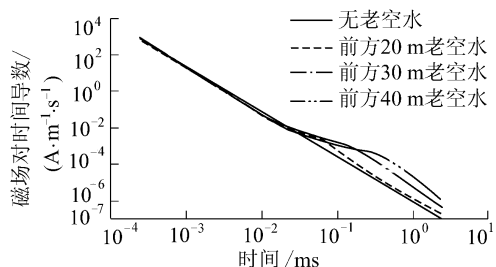


图8 不同大小老空水的磁场对时间导数响应曲线

5 应用实例

某煤矿区由于资料缺失,井下生产中已揭露多处充水采空区,严重威胁矿井的安全生产。为确保巷道的安全掘进,采用矿井瞬变电磁法在巷道掘进

过程中进行跟踪超前探测。图9为巷道掘进到某位置顺煤层方向视电阻率等值线图切片。分析图9中等值线变化特征可以看出:巷道掘进面位置左前方30~70 m,视电阻率等值线值小于15 Ω·m,该范围的视电阻率值明显低于巷道掘进面正前方和右侧帮探测范围等值线值,为明显低阻异常反映。对比以往探测结果,结合矿井水文地质资料综合分析,解释此处为老空水区。矿方布置钻孔验证,证实该位置确实为充水采空区,之后采取了探放水措施,保证巷道的安全掘进。

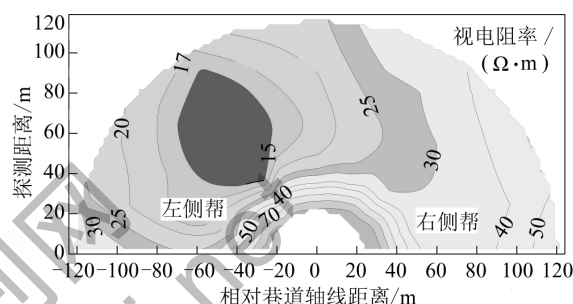


图9 瞬变电磁法掘进工作面超前探测视电阻率等值线

6 结论

1) 有老空水时的磁场对时间导数响应曲线均高于无老空水时的曲线,且视电阻率曲线能明显反映出低阻异常。不同位置老空水的感应曲线与视电阻率曲线明显不同,位于巷道掘进面正前方老空水的响应曲线最强,视电阻率异常最明显,说明了矿井瞬变电磁对线圈法线方向发育的低阻体最为灵敏。

2) 老空水距离巷道掘进面越近,其响应越早,磁场对时间导数曲线幅值越高;老空水范围越大,磁场对时间导数响应越强,说明了矿井瞬变电磁法能够分辨不同大小的低阻体,为矿井瞬变电磁法确定老空水大小提供了依据。

3) 矿井瞬变电磁法在实际应用中确定了老空水的位置以及发育范围,并得到后期验证,表明矿井瞬变电磁法是探查老空水的一种有效方法。

参考文献:

- [1] 靳德武,刘英锋,刘再斌,等.煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J].煤炭科学技术,2013,41(1):25-29.
- [2] 武强,赵苏启,孙文浩,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J].煤炭学报,2013,38(6):901-905.
- [3] 刘树才,岳建华,刘志新.煤矿水文物探技术与应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.

(下转第103页)

水含水层、断层破碎带等地质构造为地下水的赋存、运移提供了良好的空间。为确保 21 煤试采区回风巷的安全掘进, 采用地震反射波超前探测技术对掘进巷道前方地层进行连续追踪探测, 以及时查明巷道前方断层情况。图 7a、图 7b 为实测数据提取反射横波分别用 2 种偏移成像方法得到的结果, 图 7c 为验证的实测剖面图。对比可见: 动态极化偏移成像方法比叠前绕射偏移方法成像收敛, 异常界面少, 具有更高的空间分辨率; 另外, 叠前绕射偏移结果存在对称异常假象, 无法进行异常界面产状描述, 而动态极化偏移结果指示的 R1、R2、R3 三个异常界面探测倾向与揭露资料吻合。

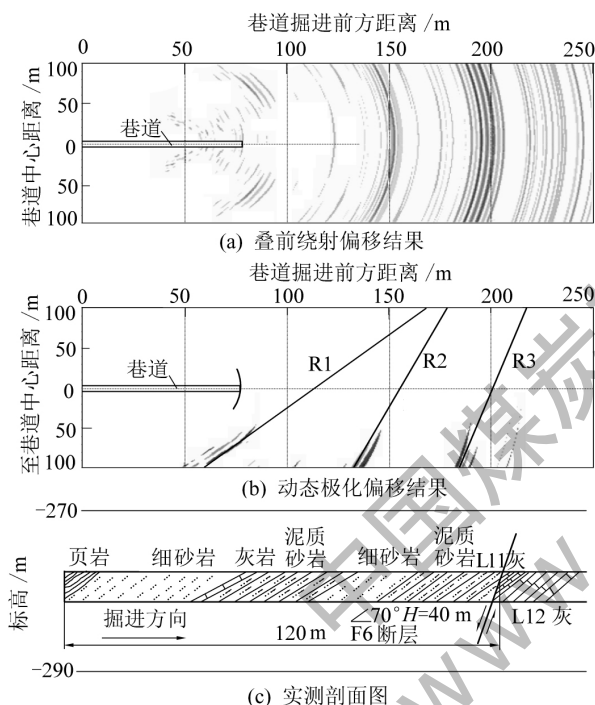


图 7 2 种偏移方法成像效果对比

5 结 语

以巷道三分量地震信号为基础, 进行实时偏振分析, 基于地震波极化参数差异, 结合 τ - p 滤波、 F - K 域滤波进行巷道前方反射地震波场分离与特征波场提取, 采用动态极化偏移成像技术, 可在巷道有限空间条件下消除了对称异常假象; 同时, 在偏移归位过程中完成了有效波与干扰波的波场分离, 解决了巷道近场探测复杂波场多异常界面问题, 有效提高了空间分辨率及探测精度。

参考文献:

- [1] 刘盛东, 张平松. 地下工程震波探测技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [2] 张平松, 吴健生. 中国隧道及井巷地震波法超前探测技术研究分析 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1033-1038.
- [3] Essen K, Bohlen T, Friederich W. Modelling of rayleigh-type seam waves in disturbed coal seams and around a coal mine roadway. *Geophysical Journal International* 2007, 170(2): 511-526.
- [4] Ashida Y. Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2001, 38(6): 823-831.
- [5] Hanson D R, Vandergrift T L, DeMarco M J. Advanced techniques in site characterization and mining hazard detection for the underground coal industry [J]. *International journal of coal geology*, 2002, 50(1): 275-301.
- [6] Praeg D. Seismic imaging of mid-Pleistocene tunnel-valleys in the North Sea Basin-high resolution from low frequencies [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2003, 53(4): 273-298.
- [7] 周治国. 隧道工程超前地质预报技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [8] Lüth S, Giese R, Otto P, Krüger K. Seismic investigations of the Piora Basin using S-wave conversions at the tunnel face of the Piora adit (Gotthard Base Tunnel) [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2008, 45(1): 86-93.
- [9] 王齐仁. 隧道地质灾害超前探测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [10] Tzavaras J, Buske S, Groß K. Three-dimensional seismic imaging of tunnels [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2012, 49: 12-20.
- [11] 王 勃. 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [12] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [13] 刘盛东, 刘 静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题 [J]. *煤炭学报* 2014, 39(1): 19-25.
- [14] Tsili Wang, Gerald W Hohmann. A finite-difference time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling [J]. *Geophysics* 1993, 58(6): 797-809.
- [15] Tsili Wang, Alan C Tripp. FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media [J]. *Geophysics* 1996, 61(1): 110-120.
- [16] 李建慧, 胡祥云, 曾思红, 等. 基于电场 Helmholtz 方程的回线源瞬变电磁法三维正演 [J]. *地球物理学报* 2013, 56(12): 4256-4267.
- [17] 闫 述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析 [J]. *地球物理学报* 2002, 45(2): 275-282.
- [18] 蒋宗霖, 于景邨, 孙伟涛. 矿井瞬变电磁法低阻体的全空间响应影响研究 [J]. *煤炭科学技术* 2012, 40(8): 107-110.
- [19] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机理与技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [20] 杨海燕, 岳建华. 巷道影响下三维全空间瞬变电磁法响应特征 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版* 2008, 38(1): 129-134.

(上接第 99 页)