doi: 10.11720/wtyht.2015.1.20

姚伟华,赵威,李貅,等.基于两层含水采空区瞬变电磁场数值模拟的拟地震偏移成像[J].物探与化探,2015,39(1):125-131,140.http://doi. org/10.11720/wtyht.2015.1.20

Yao W H, Zhao W, Li X, et al. Pseudo-siesmic migration imaging based on numerical simulation results of a two-layered water-bearing mined out goaf model [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1):125-131, 140. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.20

# 基于两层含水采空区瞬变电磁场数值模拟的 拟地震偏移成像

姚伟华1,赵威1,李貅1,杨增林1,戚志鹏1,孙怀凤2

(1.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;2.山东大学 岩土与结构工程研究中心,山东 济南 250061)

摘要:瞬变电磁法是探测煤田采空区的一种有效方法。瞬变电磁拟地震处理解释方法研究日渐成为电磁勘探领域的热点并且取得了突破性进展,所以可以把瞬变电磁拟地震处理解释运用到煤田采空区的探测中来提高勘探精度。文中在瞬变电磁三维时域有限差分数值模拟两层含水采空区模型的基础上,运用预条件正则化共轭梯度算法 实现了瞬变电磁扩散场到虚拟波场的稳定转化,并对虚拟波场进行了脉冲压缩处理;最后通过克希霍夫积分解,对 虚拟波场进行延拓成像,实现了两层含水采空区模型的三维解释。

**关键词:** 瞬变电磁法;煤田采空区;拟地震偏移成像;虚拟波场;数值模拟;三维解释 中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)01-0125-07

随着煤炭资源的大规模开采,产生了大量的采 空区造成次生灾害,所以探测煤田采空区至关重要。 瞬变电磁法具有装置灵活多样、定向性好、探测深度 大、发现异常能力强,对积水等低阻体敏感、对高阻 覆盖层的穿透力强等优点,是目前煤矿采空区探测 的首选方法之一<sup>[1-2]</sup>。由于瞬变电磁场理论的复杂 性,目前的解释技术主要局限在一维的基础上,对于 简单的煤田采空区探测尚可应用,对于含水构造较 复杂的煤田采空区的探测仍然是一个难题<sup>[3]</sup>,因此 有必要研究适合于多层含水构造的煤田采空区的探 测技术和解释方法。为了规避繁琐的瞬变电磁场三 维正演计算问题和不稳定的三维反演计算问题<sup>[4]</sup>, 可以借助成熟的地震勘探理论和成像技术的思想方 法,进行瞬变电磁场拟地震偏移成像处理,来实现两 层含水采空区模型的三维解释。

在电磁资料拟地震成像方面,国内外学者做了 较深入的研究。Lee 等人根据波场变换的关系,利 用 Claerbout 单程有限差分波动方程实现了对大地 电磁资料的偏移<sup>[5]</sup>。Levy 根据弹性波与大地电磁 场之间的类比性,利用线性规划方法获得了与反射 地震勘探类似的拟反射函数的脉冲响应时间断面 图<sup>[6]</sup>。Adrianus 通过研究和讨论,认为瞬变电磁场 反变换得到的虚拟波场与反射地震勘探中的波场具 有相似性<sup>[7]</sup>。Niels Boie Christensend 采用一种快速 的拟 Born 近似技术对瞬变电磁场进行了偏移成 像<sup>[8]</sup>。Hung-Wen Tseng 等提出了一种基于积分方 程和改进的 Born 近似技术的三维频域电磁数据解 释方法<sup>[9]</sup>。近年来, Zhdanov 等人借鉴地震勘探中 较成熟的逆时偏移的思想和方法,通过对时间域电 磁场和频率域大地电磁场的逆时偏移成像的深入研 究,提出了电磁场偏移的概念<sup>[10]</sup>。在国内,王家映 对大地电磁资料的拟地震解释做了深入研究,提出 了大地电磁拟地震解释的思路和方法111。陈本池采 用有限差分法实现了瞬变电磁场的拟波动方程的偏 移成像[12]。李貅教授团队在瞬变电磁拟地震解释 方面做了一系列研究:借鉴大地电磁拟地震解释的 思路和方法,对瞬变电磁中心回线装置的观测结果 进行了拟地震成像解释[13-14];利用波场转换公式采 用预条件正则化共轭梯度法实现了瞬变电磁扩散场 到虚拟波场的稳定转化<sup>[15-16]</sup>,通过 kirchhoff 积分实

收稿日期:2013-12-18

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036002);国家自然科学基金项目(51139004、41174108);国家重大科学仪 器设备开发专项(2011YQ030133)

现了瞬变电磁虚拟波场三维延拓成像<sup>[4]</sup>;针对虚拟 波场有波形展宽效应<sup>[17]</sup>,提出了虚拟波场的脉冲压 缩技术<sup>[18]</sup>;在数字模拟和模型试验的基础上证明了 相邻位置上同一地质体的反射回波具有较好的相关 性,又提出了瞬变电磁虚拟波场的聚焦合成孔径技 术<sup>[19]</sup>。

此次在文献研究的基础上<sup>[4,15-16,19-20]</sup>,将瞬变 电磁拟地震成像技术运用到两层含水构造的煤田采 空区的探测中,以提高探测精度。首先设计了两层 含水构造的采空区三维模型,采用三维时域 FDTD 程序正演了观测数据,然后对观测数据进行波场反 变换、脉冲压缩、偏移成像处理,验证瞬变电磁拟地 震偏移成像技术在煤田采空区探测中的有效性。

1 瞬变电磁拟地震偏移成像原理

### 1.1 波场反变换

瞬变电磁场各个分量满足的扩散场与虚拟波场 具有数学上的对应关系<sup>[14]</sup>。现以磁场的垂直分量 为例,它们满足关系

$$H_{z}(x,y,z,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t^{3}}} \int_{0}^{\infty} \tau e^{-\tau^{2}/(4\pi)} U(x,y,z,t) d\tau,$$
(1)

其中,H<sub>z</sub>(x,y,z,t)为瞬变电磁满足的扩散场,U(x, y,z,t)为虚拟波场值,t为扩散场采样时间,τ为虚拟 波场的虚拟时间。现在已知瞬变电磁满足的扩散场 ,需要反求与其对应的虚拟波场。采用文献[15]的 求解方法,选取一系列合适的τ,采用梯形积分公式 对式(1)进行数值离散,将其转化成矩阵形式

$$AX = U ; \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{A} = [a_{ij}], a_{ij} = \frac{\tau_j}{2\sqrt{\pi t_i^3}} \cdot e^{-\tau_j^{2/(4\pi)}} \cdot \Delta \tau,$$

式中,**U**=[*u<sub>i</sub>*]为扩散场,**X**=[*x<sub>i</sub>*]为虚拟波场。由 于波场反变换问题的"病态性"和"不适定性",笔者 采用预条件正则化共轭梯度法<sup>[13]</sup>求解方程(2)。先 将方程(2)转化成

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U} , \qquad (3)$$

最后对式(3)采用预条件正则化共轭梯度法就可以 实现瞬变电磁扩散场到虚拟波场的稳定变换,求得 虚拟波场。具体的预条件正则化共轭梯度算法如 下。

(1)输入最大迭代次数 k<sub>max</sub>和正则化共轭梯度 法迭代终止条件 ε;

(2)输入最大的迭代次数  $l_{max}$ 和内层共轭梯度 迭代终止条件 $\xi$ ; (3)输入初始向量 **x**<sup>(0)</sup>、正则化参数 v 和确定预 条件矩阵 **M**;

 $(4) \diamondsuit k=0;$ 

(5) 计算残差  $r = f - Ax \rho^0 = ||r||_2^2 \pi \theta^0 = \sqrt{\rho^0}$ ;

(6) 如果 θ<sup>0</sup> ≤ ε || b || 2 或 k > k<sub>max</sub>, 转到步骤
 (16):

 $(7) \diamondsuit l = 1, y = x;$ 

(8) 如果  $\theta^{(i-1)} < \xi \theta^{(0)}$  或  $l > l_{max}$  时,转到步骤 (14);

(9)预条件处理  $z=r \cdot inv(M)$  (inv 函数功能为 求取逆矩阵), $\rho^{(l-2)} = \rho^{(l-1)}, \rho^{(l-1)} = z' \cdot r$ ;

(10)若 $l=1, 则 \beta=0, p=r, 否则, 计算<math>\beta=\rho^{(l-1)}/\rho^{(l-2)}, p=z+\beta p;$ 

(11) 计算  $\omega = vp + Ap, \alpha = \rho^{(l-1)} / p^{T} \omega, y = y + \alpha A, r$ = $r - \alpha \omega$ ;

(12)计算 $\rho^{(l)} = ||r||_2^2, \theta^{(l)} = \sqrt{\rho^{(l)}};$ (13)令l = l + 1;(14)继续; (15)令x = y, k = k + 1;(16)继续; (17)结束程序。

## 1.2 脉冲压缩

瞬变电磁波场反变换后的虚拟波场在晚期有波 形展宽现象<sup>[17-18]</sup>,但是虚拟波场的波动信号可以看 成是虚拟子波与地层滤波作用产生的,所以可以通 过反褶积消除大地滤波作用来实现脉冲压缩。假设 已知输入虚拟子波为 $b(t) = [b(0), b(1), \dots, b$ (n)],现在要求设计一个滤波器,其滤波因子为 a $(t) = [a(-m_0), a(-m_0+1)], a(-m_0+2)], \dots, a(-m_0+m)], 其中 a(t) 的起始时刻为-m_0, 其延续长度$ 为<math>m+1。设d(t)为期望输出,使得滤波后的实际输 出为

$$c(t) = a(t) * b(t) = \sum_{\tau = -m_0}^{-m_0 + m} a(\tau) b(t - \tau) \quad (4)$$

最小平方反滤波是使滤波器的实际输出与期望 输出的差的平方和为最小,即

$$Q = \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} [c(t) - d(t)]^2 =$$
$$\sum_{t=-m_0}^{m_0+m+n} \left[\sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau)b(t-\tau) - d(t)\right]^2$$

将 Q 对滤波因子求偏导,并令其为零,滤波因子 a (τ)满足

$$\frac{\partial Q}{\partial a(l)} = \sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} \frac{\partial}{\partial a(l)} \left[ \sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) b(t-\tau) - d(t) \right]^2 =$$

$$2\sum_{t=-m_{0}}^{-m_{0}+m+n} \left[\sum_{\tau=-m_{0}}^{-m_{0}+m} a(\tau)b(t-\tau) - d(t)\right]b(t-l) = 2\sum_{t=-m_{0}}^{-m_{0}+m+n} a(\tau)\sum_{t=-m_{0}}^{-m_{0}+m+n} b(t-\tau)b(t-l) - 2\sum_{t=-m_{0}}^{-m_{0}+m+n} d(t)b(t-l) = 0, \quad (5)$$

 $l = -m_0, -m_0 + 1, \dots, -m_0 + m_0$ 由自相关和互相关函数的定义可知:

$$\sum_{t=-m_0}^{m_0+m+n} b(t-\tau) b(t-l) = r_{bb}(l-\tau) ,$$

$$\sum_{t=-m_0}^{-m_0+m+n} d(t) b(t-l) = r_{db}(l) ,$$

故式(5)可以写成 $\sum_{\tau=-m_0}^{-m_0+m} a(\tau) r_{bb}(l-\tau) = r_{db}(l)$ ,其矩阵 形式为

$$\begin{bmatrix} r_{bb}(0) & r_{bb}(1) & \cdots & r_{bb}(m) \\ r_{bb}(1) & r_{bb}(0) & \cdots & r_{bb}(m-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{bb}(m) & r_{bb}(m-1) & \cdots & r_{bb}(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a(-m_0) \\ a(-m_0+1) \\ \cdots \\ a(-m_0+m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{bb}(-m_0) \\ r_{bb}(-m_0+1) \\ \cdots \\ r_{bb}(-m_0+m) \end{bmatrix} \circ (6)$$

根据目的将期望输出设置为零延迟尖脉冲,在 方程求反滤波因子过程中,如果确定了反滤波算子 的长度(以离散虚拟时间道数的两倍为宜)、求解方 程时的正则化因子(一般根据经验进行选择,可以 进行几次试算选择效果较好的因子),求解方程(6) 即可求出反滤波因子。最后,将滤波因子 *a*(*t*)代到 式(3)中,可得到虚拟子波。

## 1.3 瞬变电磁拟地震偏移成像

通过波场反变换,瞬变电磁满足的扩散场就转 化为与其对应的虚拟波场。虚拟波场类似于地震子 波,具有反射、绕射、折射等特性,所以,可以借助地 震勘探中比较成熟的 Kirchhoff 偏移成像技术来对 虚拟波场进行延拓。Kirchhoff 偏移成像技术是利用 Kirchhoff 积分公式把分散在地表各个测点上的同一 绕射点的能量汇聚向下反推,得到地下相应的物理 绕射点上<sup>[11]</sup>。满足波动方程的 Kirchhoff 积分解为

$$\varphi(x, y, z, t) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{Q} \left\{ \left[ \varphi \right] \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \frac{1}{vr} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right\} dQ + \frac{F}{r_{0}} , \qquad (7)$$

式中:[ $\varphi$ ]为延迟位;v为虚拟波场的速度; $F = \mu_0 \delta(t)$ 

-0),只有在t=0处, $F(0)=\mu_0$ ,若 $t\neq0$ ,则F(t)=0, 一般情况下 $t\neq0$ ,故不需要考虑此项;Q为包围波场 区域的外边界(地面 $Q_0$ 和无穷远半球面 $Q_1$ ); $r_0$ 为 源到参考点的距离。完全求解方程需要知道 $\varphi$ 的 初值和 $\partial \varphi / \partial n$ 以及虚拟波动速度值 $v_0$ 因为在式 (7)出现了 $\partial \varphi / \partial n$ ,这对于地震勘探来说是一个困难 的问题,因此在地震勘探中要消除它,即认为地表为 平面,则有 $\partial \varphi / \partial n = -\partial / \partial z_0$ 然而,对于瞬变电磁法来 说,这是方法的一种推进<sup>[11]</sup>,可以采用梯度测量方 式进行接收,从而实现真正的曲面偏移成像。

实际上虚拟波场偏移是获取记录的逆过程,现 在已知地面上观测点的电磁响应的虚拟波场记录, 需要确定反射面上作为二次虚拟辐射源的空间位 置<sup>[11]</sup>。对于 $\varphi(x,y,z,t)$ ,当把t改为–t做变量代 换,并令 $\varphi(x,y,z,t)=u(x,y,z,-t)$ ,则u(x,y,z,-t)仍然满足方程(7)。对于u(x,y,z,-t),则u(x,y,z,-t)仍然满足方程(7)。对于u(x,y,z,-t)就是时间的倒退, 即把反射界面等效为上行波源,将接受点信号逆时 间方向还原到二次波源,以寻找反射界面的波场函 数,确定反射界面位置。

令函数 *G*(*x*,*y*,*z*<sub>0</sub>,*t*)为自激自收的虚拟波动信 号,它是地下反射界面产生的二次源激发的波场 *g* (*x*,*y*,*z*,*t*)在地表 *z*<sub>0</sub>处的值,则

$$g(x, y, z, t) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{Q} \left\{ \left[ \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} - \frac{1}{vr} \frac{\partial}{\partial n} \frac{\partial}{\partial t} \right] G(\xi, \eta, \zeta_{0}, t + \frac{r}{v}) \right\} dQ , \qquad (8)$$

式中  $G(\xi, \eta, \zeta_0, t+r/v)$  中时间取 t+r/v 是考虑了波 动的逆过程。

采用边界元(BEM)技术对研究区域进行剖分, 将地表剖分为一系列三角单元,然后将延拓方程离 散为各个单元积分之和、求解,即可得地下各个点的 场值。这样就实现了瞬变电磁虚拟波场的延拓成 像。对于式(8)的边界元求解算法可参照文献[3]。

#### 1.4 瞬变电磁虚拟波场速度分析

为了完成偏移成像,必须确定波场速度参数。 由波动方程可知瞬变电磁虚拟波场速度公式为 v= $1/\sqrt{\mu\sigma(r)}$ ,一般认为均匀大地介质中 $\mu=\mu_0$ ,因此 虚拟波场的速度只与大地介质的电导率有关。能否 准确获得地下介质的电导率,成为速度分析准确与 否的关键。目前较为成熟的解释方法都是以水平层 状模型为基础建立起来的,原则上只要能求得准确 的地层电导率,便能实现精确的速度分析。可采用 浮动薄板法求得地下近似的电导率来实现连续速度 分析。 由浮动薄板法可知,地下地电断面总的纵向电导为 $S(H) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i h_i$ , S 为地层总的纵向电导,H 为深度, $h_i$ 、 $\sigma_i$  分别为第i 层地层的厚度和电导率。所以,由相邻的地层的纵向电导就可以求得第i 层的电导率值: $S(H) = (S_i - S_{i-1})/(H_i - H_{i-1})$ 。求得每一层的电导率值后,就可以求得地层的虚拟波场的速度。

## 2 模型及其视电阻率分析

以实际煤矿真实地层为基础,设计了含有两层 含水采空区的三维模型。两层采空区分别位于两个 煤层中,表现为低阻电性特征,两层煤层之间是砂质 页岩,上层煤层顶部为细砂岩,下层煤层底部为石英 砂岩,模型如图1所示,表1为模型参数。俯视图中 每个网格的边长为10m,第一层含水采空区在100 ~110m之间,第二层含水采空区在150~160m之 间;(148,147)、(154,147)、(151,151)、(148,155)、 (154,155)为观测区域的部分测点,整个观测区域 共有225个测点,点距10m;X147、X151、X155、 Y148、Y151、Y154为观测区域的部分测线,中心测 点(151,151)位于坐标系原点上。



地层	尺寸(长×宽×高)/m	$\rho/(\Omega \cdot m)$
细砂岩	3000×3000×100	100
上层煤	510×510×10	500
上层采空区	160×100×10	10
砂质页岩	3000×3000×40	150
下层煤	810×810×10	500
下层采空区	200×110×10	10
石英砂岩	3000×3000×800	800

三维两层含水采空区模型的正演采用回线源激发瞬变场的方式,采用文献[16]的三维时域有限差分正演程序取得正演数据,回线发射框为150 m×150 m,发射电流为5 A。

通过三维时域有限差分正演模拟出两层含水采 空区模型的数值结果后,采用回线源瞬变电磁晚期 视电阻率公式对回线框内数据进行视电阻率计算 (图2)。从图2中可以清晰地判断地下电性层的变 化规律,从上往下视电阻率变化规律依次为高— 低—高—低—高,分别对应模型的细砂岩、第一层煤 层采空区、砂质页岩、第二层煤层采空区、石英砂岩, 与实际模型电阻率的变化规律相符合。

图 3 给出了 6 条测线的视电阻率剖面。视电阻 率的纵向变化规律与图 2 相同,两个低阻异常清晰 可见,第一层低阻异常位于 105 m 左右,视电阻率异



图 1 两层采空区复杂模型立体图(左)和俯视图(右)





图 3 6 条测线的视电阻率剖面

常形态表现为不对称闭合椭圆,第二层低阻异常位 于160 m 左右,也表现为不对称闭合椭圆,这种不对 称性在第二个低阻异常区表现的尤为明显;在170 m 以后视电阻率逐渐变大,说明勘探深度已经达到 了模型设计的石英砂岩层。

3 波场延拓

## 3.1 虚拟波场分析

运用预条件正则化共轭梯度算法先将回线框内 的扩散场数据转化为与其对应的虚拟波场值。图 4 为三维波场 x、y 方向的切片图。图中显示,虚拟波 场值随着虚拟时间的增大出现 4 个场值分界面。比 较两个低场值区可以看出,第二个低场值的延伸范 围较第一个低场值的延伸范围大,这是因为随着勘 探深度的加大,第二个低场值区的波形有展宽现象, 这种波形展宽效应会降低瞬变电磁虚拟波场的解释 精度<sup>[17-18]</sup>。

为了研究虚拟波场沿 x、y 方向的波形变化,选择了 x 向主测线 X151 和 y 向主测线 Y151,两条测 线的波形见图 5。图中第二个负向波峰沿 x 向或者 y 向变化较明显,在距离采空区中心较近的位置波 峰较大。在 Y151 线中测点-70~-60 m 下方为高阻 煤层,但是虚拟子波仍然表现为负向波峰,只是波峰 幅度有所减小,这是因为观测的是瞬变电磁场的体 积效应。

针对瞬变电磁虚拟波场的波形展宽问题,对经 过波场反变换后的虚拟波场采用脉冲压缩技术进行 处理,为了与图4、图5相比较,绘制了与其相对应



图 4 二层模型三维波场 x 方向(左)、y 方向(右)切片





图 5 X151 线(左)、Y151 线(右)波形



图 6 压缩后的三维波场 x 方向(左)、y 方向(右)的切片





的虚拟波场脉冲压缩后的效果图(图6、图7)。压 缩后的虚拟波场较压缩前的波形得到锐化,把虚拟 子波汇聚到相对较窄的区域,消除了虚拟波场的波 形展宽效应,特别对于勘探深度较大的区域,提高了 瞬变电磁拟地震解释的精度。

## 3.2 虚拟波场的三维偏移成像

在进行瞬变电磁三维克希霍夫曲面延拓成像之前,必须知道瞬变电磁虚拟波场的波速。但是由于 实际测量的数据量不足,从实际中得到的虚拟波场 速度在空间分布上较为稀疏,而且虚拟波场速度只 分布在有限的测深点上,会严重影响瞬变电磁波场 延拓成像的分辨率。为解决此问题,采用了三维空 间近点线性插值方法迅速扩大了数据量并且保证了 虚拟波场速度的准确性。

完成了虚拟波场速度的连续分析,将研究区域 剖分成一系列三角单元,按逆时针方向编号、求解。 图 8显示了三维偏移成像 x、y 方向的切片效果。纵 向上看,图中有红、蓝4个明显的界面,在深度110





m 和 160 m 左右有两个明显的负值区域,和模型中的两个含水低阻采空区相对应,与理论设计模型基本吻合。这说明虚拟波场的三维偏移成像达到了瞬变电磁拟地震解释的目的。

4 结论

(1)瞬变电磁拟地震偏移成像技术有效规避了时间域电磁场庞大的三维计算难题,而使三维反演成像能得到很好地解决,丰富了电磁处理解释方法。瞬变电磁三维拟地震偏移成像技术获得的三维偏移成像效果图与常用的瞬变电磁解释方法获得视电阻率等值线图进行对比,瞬变电磁三维成像技术处理解释的结果信息量更丰富、更直观,解释更加全面。

(2)经过波场反变换后的虚拟波场和扩散场一样,同样存在随勘探深度加大、精度降低的问题。不同的是,在扩散场中分辨率降低,是因为随着时间的衰减,电磁波在晚期低频电磁波占主要成分所致,而虚拟波场在晚期有波形展宽效应。

(3)瞬变电磁法拟地震偏移成像同样也存在许 多问题,如像速度分析不准确,波场反变换存在不稳 定性以及虚拟波场的激发机理等,这些问题将是下 一步瞬变电磁拟地震偏移成像研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 薛国强,宋建平,闫述,等.瞬变电磁探测底下洞体的可行性分析[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(5):135-138.
- [2] 于景邨,胡兵,刘振庆,等.矿井瞬变电磁探测技术的应用[J]. 物探与化探,2011,35(4):532-535.
- [3] 李成友,刘洪福.多层采空区调查中瞬变电磁法的应用[J].物 探与化探,2007,31(增):108-110.
- [4] 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.
- [5] Lee S, McMechan G A, Aiken C L V.Phase-field imaging: The electromagnetic equivalent of seismic migration [J]. Geophysics,

1987, 52(5):678-693.

- [6] Levv S, Oldenburg D, Wang J.Subsurface imaging using magnetotelluric data[J].Geophysics, 1988,53(1):104-117.
- [7] Hoop A T. Transient electromagnetic vs. seismic prospecting—a correspondence principle [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44 (6):987-995.
- [8] Christensen N B.A generic 1D imaging method for transient electromagnetic data[J].Geophysics, 2002, 67(2):438-447.
- [9] Tseng H W, Lee K H, Becker A.3D interpretation of electromagnetic data using a modified extended Born approximation [J]. Geophysics, 2003, 61: 127-137.
- [10] Zhdanov M S, Portniaguine O. Time-domain electro-magnetic migration in the solution of inverse problems. Geophys.J.Int., 1997, 131:293-309.
- [11] 王家映.我国大地电磁测深研究新进展[J].地球物理学报, 1997,40(S1):206-216.
- [12] 陈本池,李金铭,周凤桐.瞬变电磁场拟波动方程偏移成像[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(05):546-554.
- [13] 刘继东.TEM 拟地震解释中的反射系数确定[J].煤田地质与勘 探,2004, 32(06):54-57.
- [14] 郭文波,李貅,薛国强,等.瞬变电磁快速成像解释系统研究[J].地球物理学报,2005,48(06):187-192.
- [15] 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.
- [16] 威志鹏,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):2-15.
- [17] 华军, 蒋延生, 汪文秉.瞬变电磁测深波场变换中的波形展宽 原因探讨[J].煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 52-56.
- [18] 薛国强,李貅,戚志鹏,等.瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究[J].地球物理报,2011,54(5):1-7.
- [19] 李貅,薛国强,全红娟.多孔径瞬变电磁场物理模拟[J].地球物 理学进展,2009,24(3):1088-1094.
- [20] 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.

# A comparison of advanced detection effect between the network parallel electrical method and the traditional method

WU Chao-Fan<sup>1</sup>, QIU Zhan-Lin<sup>1</sup>, YANG Sheng-Lun<sup>2</sup>, CHEN Yi-Xing<sup>3</sup>

(1. School of Resource Engineering, Longyan University, Longyan 364012, China; 2. Huizhou Institute of Subterranean Calamity of Anhui Province, Hefei 230088, China; 3. Production Department of Fujian Coal and Electricity Co., Ltd., Longyan 364102, China)

**Abstract**: The network parallel electrical method is a direct current method with the "distributed parallel intelligent electrode potential difference signal acquisition method" as the core technological support. Its data acquisition simulates the style of seismic exploration. Different from the traditional electrical method in which every time of power supply can only pick out data of one measuring point, the network parallel electrical method can simultaneously obtain data of quite a few measuring points for every time of power supply, thus being a fully electric field observation. The authors used the two kinds of methods for the comparative study of advanced detection test in the Dawan coal mine and Wuping fluorite mine in Xinluo District of Longyan City, and conducted the actual tunnel drivage verification. The results show that the network parallel electrical method technology is better and more efficient than the traditional method.

Key words: network parallel electrical method; advanced detection; effective detection range; coal mine; fluorite deposit; low resistance anomaly; underground exploration

作者简介:吴超凡(1964-),男,福建仙游人,硕士,副教授,主要从事工程地质、工程物探与地质灾害防治的教学与研究工作, 公开发表学术论文数篇。

\*\*\*\*\*

### 上接 131 页

## Pseudo-siesmic migration imaging based on numerical simulation results of a two-layered water-bearing mined out goaf model

#### YAO Wei-Hua<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, LI Xiu<sup>1</sup>, YANG Zeng-Lin<sup>1</sup>, QI Zhi-Peng<sup>1</sup>, SUN Huai-Feng<sup>2</sup>

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The transient electromagnetic method is an effective exploration method for the coalfield mined-out area. The pseudo-seismic processing and interpreting of TEM have gradually become a hot research spot of EM exploration and made some breakthroughs. In this study. The authors employed the pseudo-seismic processing and interpreting method in coal mine goaf detection for higher detecting accuracy. With 3D finite difference time domain method of TEM, a model with two water bearing gobs was simulated. Pre-condition regularized conjugate gradient algorithm was used to realize stable transform from the diffusion field to the virtual wave field. And pulse compression was applied to virtual wave field. Finally, three-dimensional interpretation of the model was realized through the Kirchhoff integral equation downward migration imaging of the fictitious wave field data.

Key words: transient electromagnetic method; coal mined-out area; seismic migration imaging; fictitious wave field; digital simulation

作者简介:姚伟华(1989-),男,长安大学硕士研究生,专业为瞬变电磁探测。Email:yaoweihua890724@126.com。 通讯作者:李貅(1958-),男,长安大学教授、博士生导师,主要从事瞬变电磁勘探理论研究与教学工作。