

doi: 10.11720/wtyht.2022.1243

张建智, 胡富杭, 刘海啸, 等. 煤矿老窑采空区地—井 TEM 响应特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 191–197. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1243>

Zhang J Z, Hu F H, Liu H X, et al. TEM response characteristics of borehole in goaves of old coal mines[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 191–197. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1243>

# 煤矿老窑采空区地—井 TEM 响应特征

张建智<sup>1</sup>, 胡富杭<sup>2</sup>, 刘海啸<sup>1</sup>, 邢国章<sup>3</sup>

(1. 中国煤炭地质总局 地球物理勘探研究院, 河北 涿州 072750; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

**摘要:** 瞬变电磁法在我国广泛应用于煤田水文地质勘探和采空区调查, 但由于方法本身的特点, 地面装置纵向分辨率低, 无法实现采空区精细探测。在山西某煤矿采空区探查项目中, 通过岩心、测井曲线, 结合以往电法勘探经验, 建立了简单的煤系地层采空区模型, 数值模拟了均匀半空间采空区含水、不含水时的地面瞬变电磁响应和三维水平薄板的地—井瞬变电磁响应, 并结合实际案例探讨了采空区的地面、地—井瞬变电磁特征, 证实了地—井瞬变电磁法具有较高的纵向分辨率, 为采空区精细探查提供了思路。

**关键词:** 地—井 TEM; 采空区; 数值模拟; 分辨率

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0191-07

## 0 引言

目前, 随着社会经济发展和“青山绿水就是金山银山”理念的贯彻, 对矿山环境的恢复治理工作持续推进, 对采空区的探查与治理提升到了新的高度, 特别是在基建项目以及公路、铁路穿越采空区时, 采空区的精细探测对合理规划采空区或开展针对性治理有着重要意义。采空区探测主要采用钻探和地球物理探测技术, 从成本考虑, 地球物理探测技术优势明显<sup>[1-5]</sup>。薛国强等<sup>[6]</sup>系统论述了地震法、高密度电阻率法、瞬变电磁法、探地雷达、微动、放射性方法等地球物理方法在煤矿采空区探测的效果和局限性, 采空区精细探测仍需深入研究。

20 世纪 80 年代瞬变电磁法引入我国, 广泛应用于金属矿勘查、煤田水文地质勘探和采空区调查, 取得了较好的应用效果。地—井瞬变电磁探测是将发射线圈布置在地面, 接收探头沿钻孔按固定间距测量, 接收探头与产生异常响应的深部导体更接近, 因而可获得比地面瞬变电磁更强的异常信息<sup>[7]</sup>, 有

利于深部矿体的探查。地—井瞬变电磁在国外开发得比较早, 20 世纪 80 年代, 澳大利亚 MCI 公司、加拿大 CRONE 公司和 Geonic 公司推出了商用地—井瞬变电磁系统。2018 年, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所推出了国产地—井 IG-GETEM4.0 三分量系统<sup>[8]</sup>。张杰等研究了井中瞬变电磁数据采集技术和从定性分析到半定量解释技术, 并实现了异常的矢量交汇快速定位技术<sup>[9]</sup>; 杨毅等实现了基于等效涡流的地—井瞬变电磁异常反演<sup>[10]</sup>; 武军杰等对电性源地—井瞬变电磁法三分量响应特征进行了分析<sup>[11]</sup>; 孟庆鑫等研究了大地介质影响下的地—井瞬变电磁的正演模拟特征<sup>[12]</sup>。目前, 地—井瞬变电磁勘探的数值模拟、处理方法尚处于开发阶段, 主要用于在矿体埋藏深度大或浅部电性干扰因素影响大的地区进行金属矿的定性勘查。由于采空区对公路、铁路特别是高铁潜在的危害较大, 在线路勘察时, 需对采空区进行详细勘察, 为选线、治理提供地质依据, 同时, 线路勘察时由于沿线路钻孔较密, 为地—井瞬变电磁提供了条件。

本文通过提取钻孔资料, 建立了煤矿采空区地

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-08-24

第一作者: 张建智(1978-), 男, 正高级工程师, 2002 年毕业于石家庄经济学院水文地质与工程地质专业, 长期从事地质、地球物理研究工作。

Email: 3224827@qq.com

球物理模型,模拟了地面、地—井观测方式下板状体的瞬变电磁响应,并绘制了响应多测道曲线,定量计算异常的位置和大小,为地—井瞬变电磁进行采空区勘探提供理论依据。

## 1 正演模拟

瞬变电磁的数值模拟技术相对比较成熟,商用正演模拟软件有澳大利亚的 EM vision、Maxwell 和加拿大的 Emigma,二维正演模拟以有限差分法和积分方程为主。Oristaglio 和 Hohmann 提出以无源扩散方程为基础方程的有限差分法<sup>[13]</sup>,国内闫述等用类似二维线源的瞬变电磁场进行了模拟<sup>[14]</sup>,阮百尧等则选择了从积分方程出发求解方程组来模拟二维线源的时域电磁响应<sup>[15]</sup>。本文的数据模拟采用了二维有限差分方法<sup>[16]</sup>。

### 1.1 理论基础

有限差分法通常用来解决二维问题,场源为浅源,在感应区内,电场  $E$  仅有  $y$  分量,除场源所在点外,电场满足如下偏微分方程:

$$\mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2}, \quad (1)$$

式中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为磁导率和电导率。对求解空间和方程进行离散化,可将式(1)转换为线性方程。为简单起见取正方网格,式(1)可写为:

$$\partial E_{ij}^n = \frac{E_{(i+1)j}^n + E_{(i-1)j}^n + E_{i(j+1)}^n - 4E_{ij}^n}{\mu\sigma_{ij}\Delta^2}, \quad (2)$$

式中:上角标  $n$  表示第  $n$  时刻,  $\Delta$  是网格的步长。式(2)是对时间的微分,时间步长一般取  $10^{-8}$  s 数量级才能保证稳定收敛,所以计算量非常大。应用 Dufort-Frankel 法,取

$$\frac{\partial E_{ij}^n}{\partial t} = \frac{E_{ij}^{n+1} - E_{ij}^{n-1}}{2\Delta t}, \quad (3)$$

$$E_{ij}^n = \frac{E_{ij}^{n+1} + E_{ij}^{n-1}}{2}; \quad (4)$$

式中  $\Delta t$  为时间步长。将它们代入式(2)处理后得

$$E_{ij}^{n+1} = \frac{1 - 4r_{ij}}{1 + 4r_{ij}} \cdot E_{ij}^{n-1} + \frac{2r_{ij}}{1 + 4r_{ij}} \cdot$$

$$(E_{(i+1)j}^n + E_{(i-1)j}^n + E_{i(j+1)}^n + E_{i(j-1)}^n)。 \quad (5)$$

式中  $r_{ij} = \Delta t / \mu\sigma_{ij}\Delta^2$ , 这个方程是无条件稳定的。可以看出,要想知道某一时刻场的分布必须要知道前面各时刻的分布。利用初始条件  $E(t=0) = E^0$ , 就可从早期到晚期逐步往后算。通常在早期取较小的时间步长,随着延时的加大,步长可以相应加大。基于此公式以及对场源和边界条件的处理,就可以解决

用有限差分法计算二维瞬变电磁响应的问题。

### 1.2 模型计算

根据实验区的岩心、测井曲线,结合以往电法勘探经验,建立了简单的煤系地层采空区模型。模型设置第四系电阻率为  $60 \Omega \cdot m$ , 煤系地层砂泥岩电阻率  $110 \Omega \cdot m$ , 煤层电阻率  $260 \Omega \cdot m$ , 煤系地层基底奥灰电阻率  $400 \Omega \cdot m$ , 含水采空区电阻率  $40 \Omega \cdot m$ , 不含水采空区电阻率  $800 \Omega \cdot m$ 。为了检验地面、地—井瞬变电磁对采空区的探测效果,针对均匀半空间和三维空间水平薄板模型进行了正演模拟。

#### 1.2.1 均匀半空间模型响应

均匀半空间模型电阻率  $200 \Omega \cdot m$ , 采用边长  $100 m$  的方形重叠回线装置,正演模拟了采空区含水和不含水时的响应。

图 1 是含水采空区瞬变电磁多测道响应曲线。含水采空区为低阻,在多测道上表现为感应电压升高,异常特征明显,这也反映了瞬变电磁对低阻异常体探测更加灵敏。

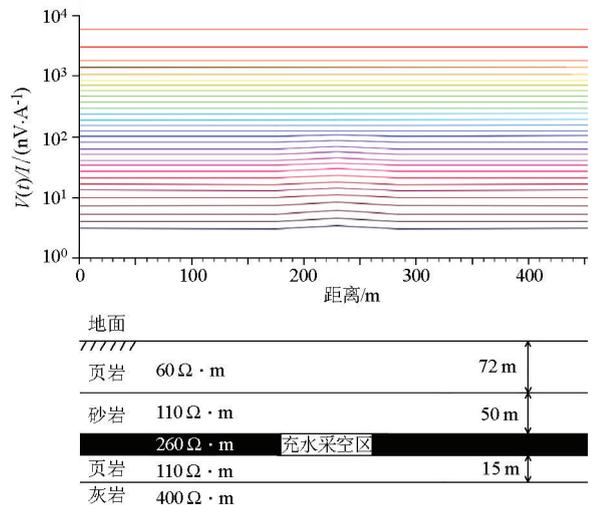


图 1 含水采空区瞬变电磁多测道响应

Fig.1 TEM multi channel response of water bearing goaf

图 2 是不含水采空区的瞬变电磁多测道响应曲线。不含水采空区为高阻,在多测道曲线上表现为感应电压降低,异常幅度较小,特征不明显。这也证实了瞬变电磁法对高阻岩层有较强的穿透能力,但不利于采空区的识别。

#### 1.2.2 三维水平薄板模型响应

根据实验区煤层赋存状况和钻孔揭露,三维模型选择均匀半空间中的水平薄板模型,发射采用  $100 m$  正方形回线,接收探头轴向线圈的等效面积为  $10000 m^2$ ; 径向线圈的等效面积为  $2500 m^2$ ; 模拟钻孔深度  $200 m$ , 钻孔为直孔,接收点沿钻孔测量,

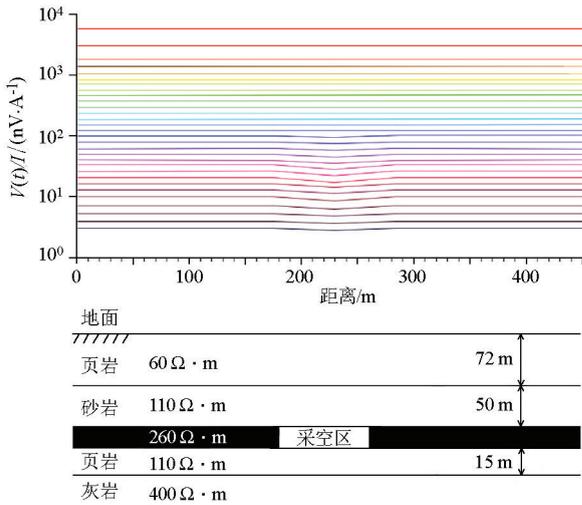


图 2 不含水采空区瞬变电磁多测道响应

Fig.2 TEM multi channel response in water bearing goaf

测量点距 1 m。水平薄板尺寸为 50 m×50 m×10 m, 含水采空区电阻率为 10 Ω·m, 不含水采空区电阻率为 800 Ω·m, 水平薄板埋深 130 m, 均匀半空间电阻率为 100 Ω·m。图 3 为磁性源地—井 TEM 装置示意。

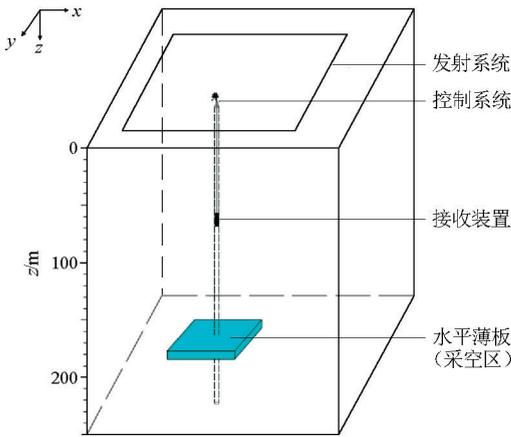


图 3 磁性源地—井 TEM 装置示意

Fig.3 Schematic diagram of magnetic source well TEM device

图 4 是低阻薄板的三分量瞬变电磁响应曲线, 钻孔穿过水平薄板中心。3 个分量曲线在薄板位置受集流效应作用, 二次场感应电压明显增大; 受薄板平面尺寸与回线场耦合等因素影响, x、y 方向上的感应电压形态基本一致, 正、负值最大点间的距离与薄板厚度一致, z 方向响应曲线整体为正, 在薄板位置出现较强的负值异常。整体上低阻薄板的瞬变电磁响应特征较明显, 识别度较高。

图 5 是高阻板体的三分量瞬变电磁响应曲线。

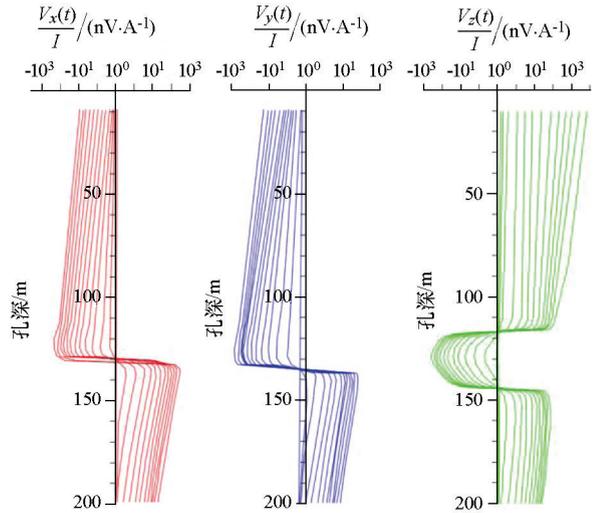


图 4 低阻薄板的三分量瞬变电磁响应

Fig.4 Three component TEM response of low resistance thin plate

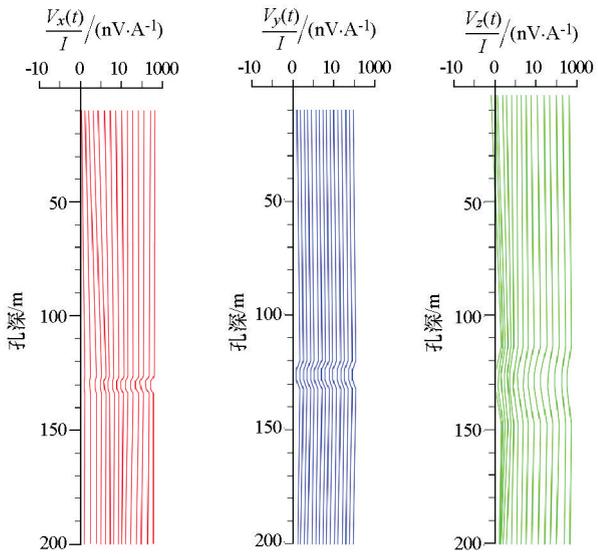


图 5 高阻薄板的三分量瞬变电磁响应

Fig.5 Three component TEM response of high resistance thin plate

沿钻孔在高阻异常附近畸变特征比较明显, x、y、z 多测道在高阻板体附近均为低值异常, 但异常幅度较小, 说明高阻异常在钻孔 TEM 测量中有一定的识别度。

### 1.3 正演模拟结论

通过地面均匀半空间和三维水平薄板模型响应的正演模拟形成如下结论: 对一定规模的采空区, 在充水状态下, 地面和钻孔 TEM 对采空区均有很好的识别度; 采空区表现为高阻异常时, 地面瞬变电磁多测道探测基本上不能分辨出采空区, 钻孔 TEM 对采空区有一定的识别度。

## 2 实测案例

在晋北某矿区进行矿井基建时,采用瞬变电磁法对矿区采空范围进行了调查。调查区位于大同矿区中部,属于黄土半掩盖区,揭露地层由老到新为:奥陶系、石炭系、二叠系、第四系,可采煤层为太原组5、8号煤层;采空区位于5煤层,埋深120~160 m。在调查区按照20 m×40 m网格布置了12条测线,使

用 Geonic 公司的 PROTEM57 系统,数据采集用定源回线装置,发射用 100 m×100 m 方形回线,接收用等效面积 31.4 m<sup>2</sup> 的中频线圈,数据经专业软件反演处理后,制作了反演电阻率断面图和顺 5 煤层电阻率切片图。

图 6 是 24 线和 28 线瞬变电磁反演电阻率断面,24 线 5 煤层附近在 130~170 m 处有明显的低阻异常,28 线在 110~200 m 处有明显的低阻异常,分析为充水采空区。

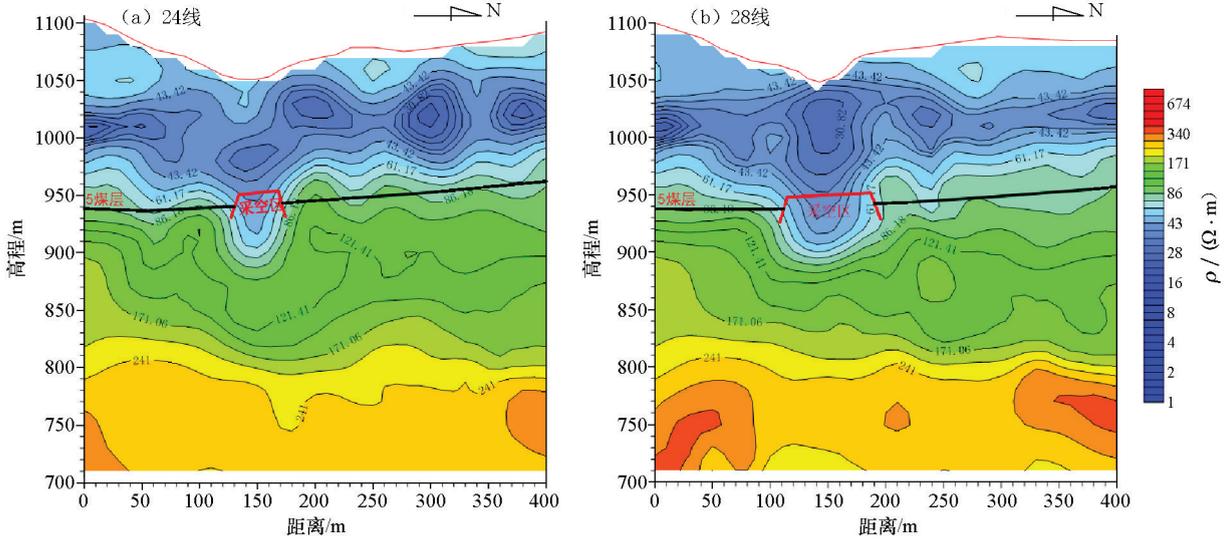


图 6 瞬变电磁反演电阻率断面

Fig.6 TEM inversion resistivity section

图 7 是沿 5 煤层的顺层电阻率切片,图中 24 线、28 线 140~200 m 之间有低阻异常,结合瞬变电磁反演电阻率断面,综合分析认为该位置为老窑采空区(红色圈闭范围)。

根据地面瞬变电磁成果结合工勘要求,在基建范围内布置了 5 个勘查孔(见图 7),其中 J-1、J-4、J-5 孔见实体煤,J-2 和 J-3 孔见采空区。在 J-2 和 J-3 孔煤层顶底板 20 m 内进行了钻孔 TEM 测量,测量使用了 ProTEM 钻孔系统,地表装置为 100 m×100 m 方形不接地回线,中心位于钻孔处,探头为 BH43,孔内测量间距 1 m。

图 8 是钻孔 J-2 中经简单滤波的瞬变电磁三分量响应曲线,在煤层 940~945 m 段采空区内  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分量均有明显的感应电压低的畸变,采空区钻孔电视未见积水,与正演高阻薄板的异常特征一致(见图 6)

图 9 是钻孔 J-3 中经简单滤波的瞬变电磁三分量响应曲线,在煤层 940~950 m 段采空区内  $z$  分量均有明显的感应电压负值的畸变, $x$ 、 $y$  分量在 945 m 附近出现“0”值分界点,左侧呈负值,右侧呈正值,

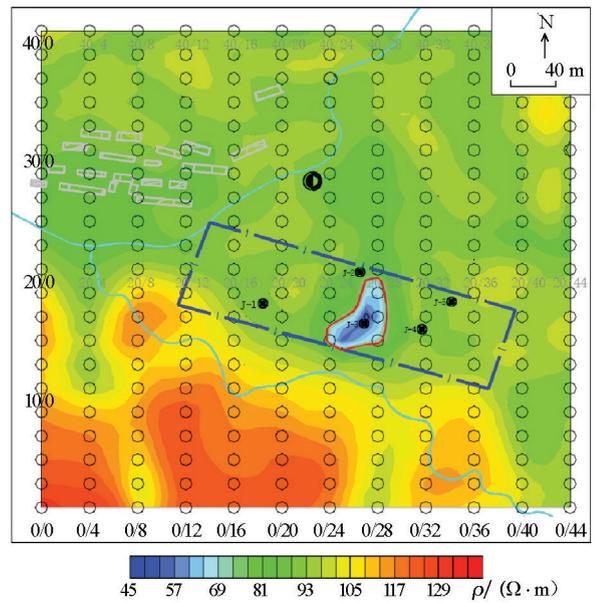


图 7 顺 5 煤层电阻率切片综合成果

Fig.7 Comprehensive diagram of resistivity slice along No.5 coal seam

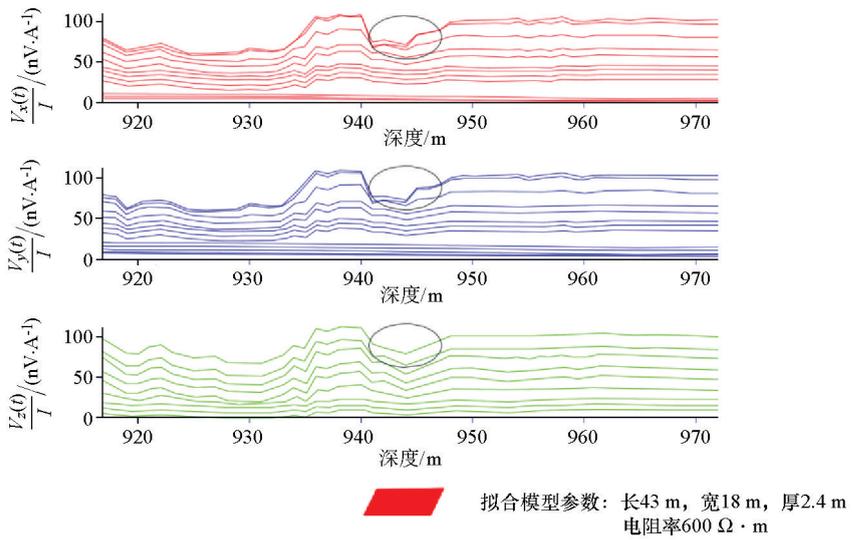


图 8 钻孔 J-2 中三分量瞬变电磁响应曲线

Fig.8 Three component TEM response curve in borehole J-2

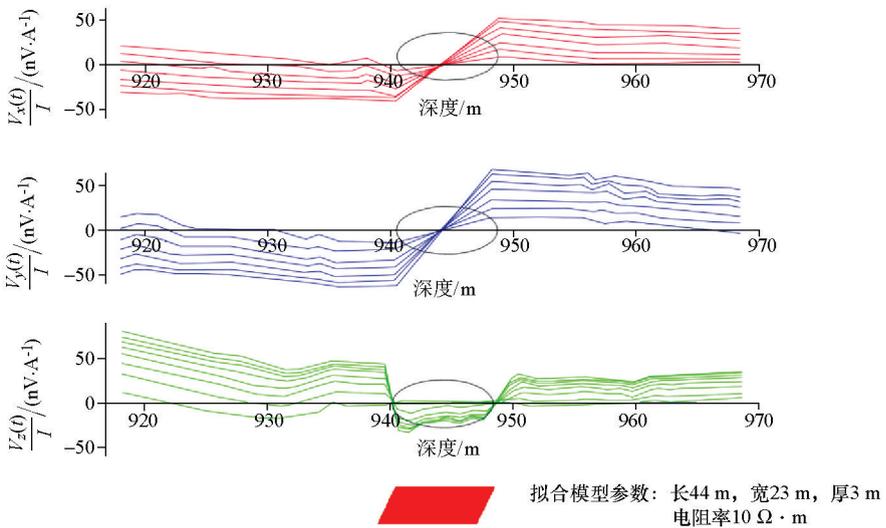


图 9 钻孔 J-3 中三分量瞬变电磁响应曲线

Fig.9 Three component TEM response curve in borehole J-3

为典型采空区充水特征,与正演低阻薄板的异常特征一致(见图 4),采空区钻孔电视见积水。

通过对钻孔三分量瞬变电磁响应反演拟合,结合地面瞬变电磁成果,获得了最终勘探区采空区分布图(图 10),为采空区治理提供了准确的地质依据。

### 3 结论与建议

采空区勘探在今后相当长时间内是煤矿安全生产、矿山恢复治理的基础工作,通过对大量工作经验的总结,认为采用瞬变电磁法探测采空区仍是最经

济、效果较好的方法。

1) 大量实例证实,对房柱式、放顶式采煤的老窑采空区,如采空区埋设较大且无积水,地面瞬变电磁法对采空区的识别度很低。本文通过正演模拟也证实了高阻薄板的地面装置响应值较低,不利于采空区识别。

2) 针对三维水平薄板地—井瞬变电磁响应进行数值模拟极具实用意义。含水采空区和不含水采空区的地—井瞬变电磁响应都具有较高的纵向分辨率,为今后小范围采空区精查提供了技术支撑。

3) 瞬变电磁法作为一种地球物理勘探方法,其多解性影响着解释精度,因此在实践中应采用综合

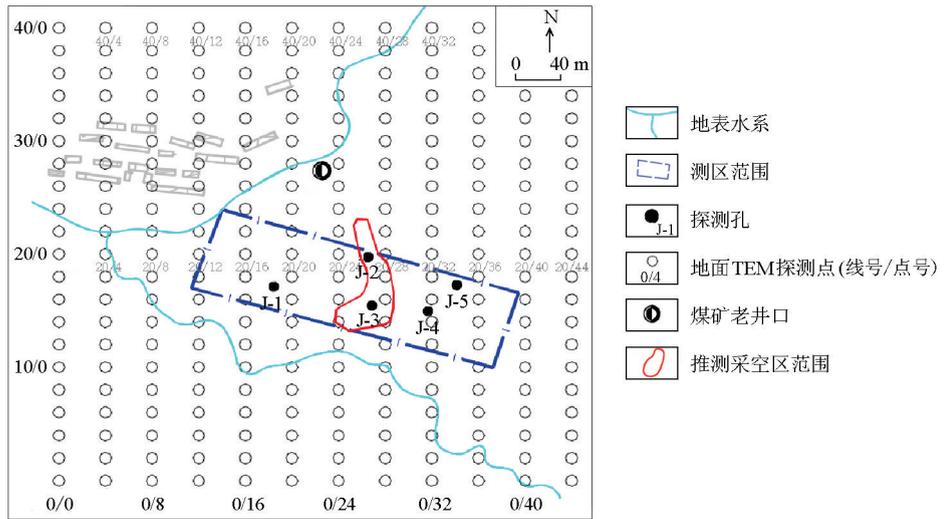


图 10 采空区综合解释成果

Fig.10 Comprehensive interpretation map of goaf

解释手段,结合已有地质、钻井等资料,按由“定性到定量,已知推未知”的原则进行精细解释,提高瞬变电磁探测的准确率,为地质灾害治理和工程建设提供精细地质成果。

参考文献 (References) :

[1] 张胤彬,张华,杨海燕,等.瞬变电磁法在煤矿水文地质灾害调查中的应用[J].物探与化探,2012,36(2):283-286.  
Zhang Y B, Zhang H, Yang H Y, et al. The application of TEM to the investigation of hydrogeological disaster in the coal mine [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(2): 283-286.

[2] 蒋邦远.使用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.  
Jiang B Y. Applid near zone magnetic source transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Ggeological Publishing House, 1998.

[3] 张建智,易才华,李娜.煤矿浅埋老窑采空区多梯度剖面装置探测研究[J].中国煤炭地质,2012,24(5):60-65.  
Zhang J Z, Yi C H, Li N. A study on multi-gradient profiling array in detection of coalmine shallow gob area [J]. Coal Geology of China, 2012, 24(5): 60-65.

[4] 张建智.瞬变电磁法在沉积型铁矿采空区探测中的应用[J].土工基础,2019,33(4):525-527,532.  
Zhang J Z. Application of TEM to determine the dimensions of the abandoned mine voids[J]. Soil Eng. and Foundation, 2019, 33(4): 525-527,532.

[5] 吴德胜,吴丰收,苏有财,等.隧道煤层采空区的探测技术[J].物探与化探,2012,36(s1):16-19.  
Wu D S, Wu F S, Su Y C, et al. A tentative discussion on detection technology of coal seam goaf in a tunnel [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(s1): 16-19.

[6] 薛国强,潘东明,于景邨.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 G Q, Pan D M, Yu J C. Review the application of geophysical methods for mapping coal-mine void [J]. Progress in geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.

[7] 张杰,邓晓红,谭捍东,等.地—井瞬变电磁资料矢量交会解释方法[J].物探与化探,2015,39(3):572-579.  
Zhang J, Deng X H, Tan H D, et al. A study of vector intersection for borehole transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 572-579.

[8] 杜庆丰,冯晓兰,黄跃.地—井瞬变电磁关键技术问题研究[J].物探与化探,2019,43(1):143-147.  
Du Q F, Feng X L, Huang Y. Research on key technical problems of surface-borehole TEM [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 143-147.

[9] 张杰,王兴春,邓晓红,等.地—井瞬变电磁井旁板状导体异常响应特征分析[J].物探化探计算技术,2014,36(6):641-648.  
Zhang J, Wang X C, Deng X H, et al. Borehole TEM response characteristics of the borehole-side plate-like conductor [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Explotation, 2014, 36(6): 641-648.

[10] 杨毅,邓晓红,张杰,等.一种井中瞬变电磁异常反演方法[J].物探与化探,2014,38(4):855-859.  
Yang Y, Deng X H, Zhang J, et al. Aborehole TEM anomaly inversion method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 855-859.

[11] 武军杰,李貅,智庆全,等.电性源地—井瞬变电磁法三分量响应特征分析[J].地球物理学进展,2017,32(3):1273-1278.  
Wu J J, Li X, Zhi Q Q, et al. Analysis of three component TEM response characteristic of electric source dill hole TEM [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1273-1278.

[12] 孟庆鑫,潘和平.地—井瞬变电磁响应特征数值模拟分析[J].地球物理学报,2012,55(3):1046-1053.  
Meng Q X, Pan H P. Numerical simulation analysis of surface-hole TEM responses [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1046-1053.

- [13] Oristaglio M L, Homann C W. Diffusion of electromagnetic fields into a two-dimensional Earth: A finite-difference approach [J]. *Geophysics*, 1984, 49(7): 870–894.
- [14] 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): 275–284.  
Yan S, Chen M S, Fu J M. Direct time-domain numerical analysis of transient electromagnetic fields [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(2): 275–284.
- [15] 阮百尧. 均匀水平大地上频率域垂直磁偶源电磁场数值滤波解法[J]. *桂林工学院学报*, 2005, 25(1): 14–18.  
Ruan B Y. Digital filter method of evaluating electromagnetic field from a vertical magnetic dipole above the homogeneous earth [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2005, 25(1): 14–18.
- [16] 辛会翠. 瞬变电磁法 2.5 维有限差分正演模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Xin H C. Research on transient electromagnetic 2.5-D FDTD forward modeling [D]. Changsha: Central South University, 2013.

## TEM response characteristics of borehole in goaves of old coal mines

ZHANG Jian-Zhi<sup>1</sup>, HU Fu-Hang<sup>2</sup>, LIU Hai-Xiao<sup>1</sup>, XING Guo-Zhang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Coal Geophysical Exploration, China National Administration of Coal Geology, Zhuozhou 072750, China; 2. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The transient electromagnetic (TEM) method is widely used in coalfield hydrogeological exploration and goaf investigation in China. However, due to the characteristics of the method itself, the vertical resolution of the ground device is low, and thus it is impossible to realize the fine detection of goaves. In a goaf exploration project of a coal mine in Shanxi Province, a simple goaf model of coal measure strata was established according to the study on cores and logging curves, as well as previous experience of electrical exploration. Based on this, numerical simulation was conducted for the ground TEM response of goaves with and without water in a homogeneous half-space and the ground-well TEM response of three-dimensional horizontal thin plates. As confirmed by the characteristics of the ground and ground-well TEM response of goaves in some practical cases, the ground-well TEM has high vertical resolution, which provides an idea for fine exploration of goaves.

**Key words:** ground-well TEM; Goaf; Numerical simulation; resolution

(本文编辑:沈效群)