

戴前伟,侯智超,柴新朝.瞬变电磁法及EH-4在钼矿采空区探测中的应用.地球物理学进展,2013,28(3):1541-1546,doi:10.6038/pg20130350.

DAI Qian-wei, HOU Zhi-chao, CHAI Xin-chao. Application of transient electromagnetic method and EH-4 to investigation of mined-out areas of molybdenum deposits. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2013, 28(3): 1541-1546, doi: 10. 6038/pg20130350.

瞬变电磁法及EH-4在钼矿采空区探测中的应用

戴前伟^{1,2}, 侯智超², 柴新朝³

(1. 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室,地球科学与信息物理学院,长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083;

3. 河南省煤田地质局物探测量队,郑州 450009)

摘要 地下采空区的存在严重威胁着人们正常的生产生活,选取有效的方法对采空区探测有着重大的现实意义.本文探讨了瞬变电磁法和EH-4电导率成像法的方法技术以及在某钼矿采空区的应用效果.瞬变电磁法观测的是纯二次场,所以分辨率高,特别是对低阻异常体反应灵敏.EH-4电导率成像系统探测深度大,适用于各种复杂地形,可以有效的减少地形的影响,因此结合这两种方法对采空区进行综合探测,可以相互补充,提高对采空区评价的准确性.

关键词 瞬变电磁法,EH-4,采空区

doi:10.6038/pg20130350

中图分类号 P631

文献标识码 A

Application of transient electromagnetic method and EH-4 to investigation of mined-out areas of molybdenum deposits

DAI Qian-wei^{1,2}, HOU Zhi-chao², CHAI Xin-chao³

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Geophysical Prospecting and Surveying Team, Coal Geology Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450009, China)

Abstract The exist of underground mined-out areas seriously threaten human production and life, so it has a real meaning to explored the mined-out areas by effective measures. The paper introduces the application of Transient electromagnetic method(TEM) and EH-4 to the exploration of the mined-out areas. Because TEM measures the secondary field signal, it has high resolution, especially in low resistivity bodies. EH-4, which possesses very strong adoptability for the site and lager detecting depth, is reducing topographic influence efficiently, combing the two techniques, we can make comprehensive exploration to mined-out areas, therefore, the combination of these two methods to detect the mined-out area, we can complement each other to improve the accuracy.

Keywords transient electromagnetic method, EH-4, mined-out area

0 引言

由于各种矿产资源在长期开采之后,在地下形

成了大量大小不等、形状不规则的采空区.特别是民间的滥采滥挖现象比较多,导致许多隐形采空区的存在,给矿山的开采和其它工作带来极大的安全隐

患和危险。因此,矿山迫切需要了解开采境界内采空区的详细信息、以便确定工作台阶内可能塌落的采空区方位与范围,采取有效措施进行空区处理,对开采中存在的危险与灾害提出警戒和预报,防止并最终消除开采中存在的危险,确保作业人员及设备安全,保证矿山生产持续稳定发展^[1,2]。目前对采空区的探测的方法很多,探地雷达和高密度电法^[3,4]精度高,应用比较多,但探测深度较浅;浅层地震法^[5]容易受到表层多次反射波的影响,而且受地形影响大;测氦法^[6]虽然能探测出采空区的范围和影响区域,但不能定量给出地下采空区的埋藏深度;瞬变电磁法^[7,8]具有施工效率高,纯二次场观测以及对低阻体敏感,受地形影响小等优点;EH-4 电导率成像系统^[9,10]轻便简单,对复杂地形适应性强,测量速度快,分辨率高,对确定采空区的边界效果好,精度高^[11,12]。因为测区采空区探测要求深度比较大,本文选用探测深度较大的瞬变电磁法^[13-15]和 EH-4 电导率成像系统^[16,17]进行探测,两种方法可做到相互验证、互为补充的目的,以达到查明中深部较大采空区目的。

1 探测方法与技术

1.1 方法原理

1.1.1 瞬变电磁法

瞬变电磁法(Transient electro-magnetic methods)是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法。其原理是向不接地回线或接地线源发送一个电流脉冲方波,产生一个向地下传播的一次脉冲磁场(又称作一次场),在其激发下,地下的地质体将产生涡流电流,在涡流电流衰减过程中,产生一个向地表传播的二次磁场,在地面由接收回线接收二次磁场,得到二次场随时间衰减的信号^[18,19],该二次磁场的变化将反映地下地质体的电性分布情况。由于是在没有一次场背景的情形下观测纯二次场异常,因而异常更直接、探测效果更明显^[20-22]、原始数据的保真度更高^[23-28]。

1.1.2 EH-4

EH-4 电磁仪的设计原理是基于大地电磁测深法,属于高频大地电磁测深法,是可控源与天然源相结合的一种大地电磁测深系统。一般情况下,把天然交变电磁场看作是垂直入射地面的,当交变电磁场以波的形式在地下介质中传播时,由于电磁感应作用,在地下介质中产生感应电磁场,地面上可以观测到正交的电磁场分量 E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y ,波阻抗 Z 定

义为地表电场和磁场水平分量的比值。在均匀大地的情况下,波阻抗只与介质的电阻率和电磁波频率有关:

$$Z(\omega, z) = E_x(z)/H_y(z) = (\pi\rho\mu f(1-i))^{1/2}, \quad (1)$$

由方程式(1)求得电阻率为

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2 = \frac{Z(\omega, z)^2}{\omega\mu}, \quad (2)$$

式中 μ 为真空磁导率, ρ 是电阻率,单位是 Ωm , E 是电场,单位是 mv/km , H 是磁场,单位是 nT , f 为电磁波频率,单位是 Hz 。

对于水平分层大地或更复杂的情况,所得的电阻率为地下所有介质的综合反映。随着地下介质的不同得到的电阻率也不同,通过研究这种电阻率差异,推断地层中的电性界面。

1.2 处理流程

1.2.1 瞬变电磁法

视电阻率的计算使用晚期视电阻率的公式为

$$\rho_r = \frac{\mu}{4\pi t} \left(\frac{2\mu Mq}{5tV(t)} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

式中 t 为测道时间, M 为发送磁距, q 为接收线圈的有效面积, $V(t)$ 为感应电压。实际观测的是归一化感应电压 $V(t)/I$, 因此上式的实际应用式为

$$S_r = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\mu_0 Aq}{5t(V(t)/I)} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

式中 A 为发送回线面积, $V(t)$ 为观测值。其数据处理的流程见图 1。

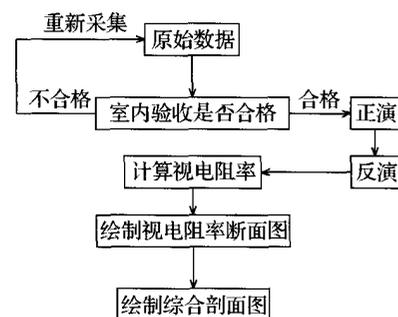


图 1 瞬变电磁处理流程图

Fig. 1 The flow chart of transient electromagnetic method

1.2.2 EH-4

高频电磁测深法的资料处理分为野外实时处理与室内处理,实时处理能显示单点的电阻率、振幅、相位及相关度曲线,三点及三点以上能做出二维 BOSTICK 反演电阻率断面图,对数据质量不可靠

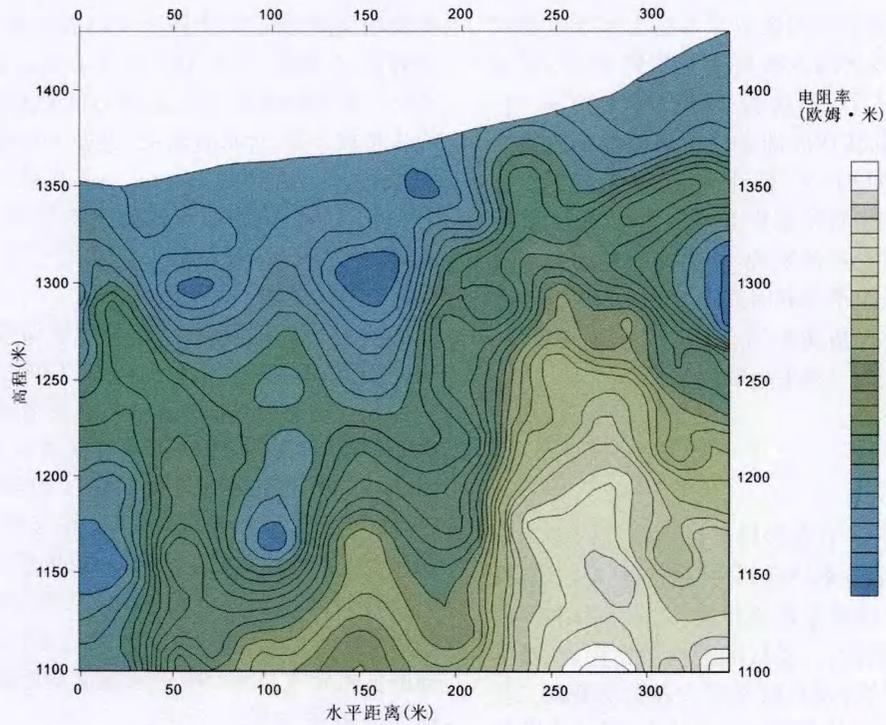


图 2 3号测线瞬变电磁法反演剖面图
Fig. 2 No. 3 survey line the inversion profile Figure of Transient electromagnetic method

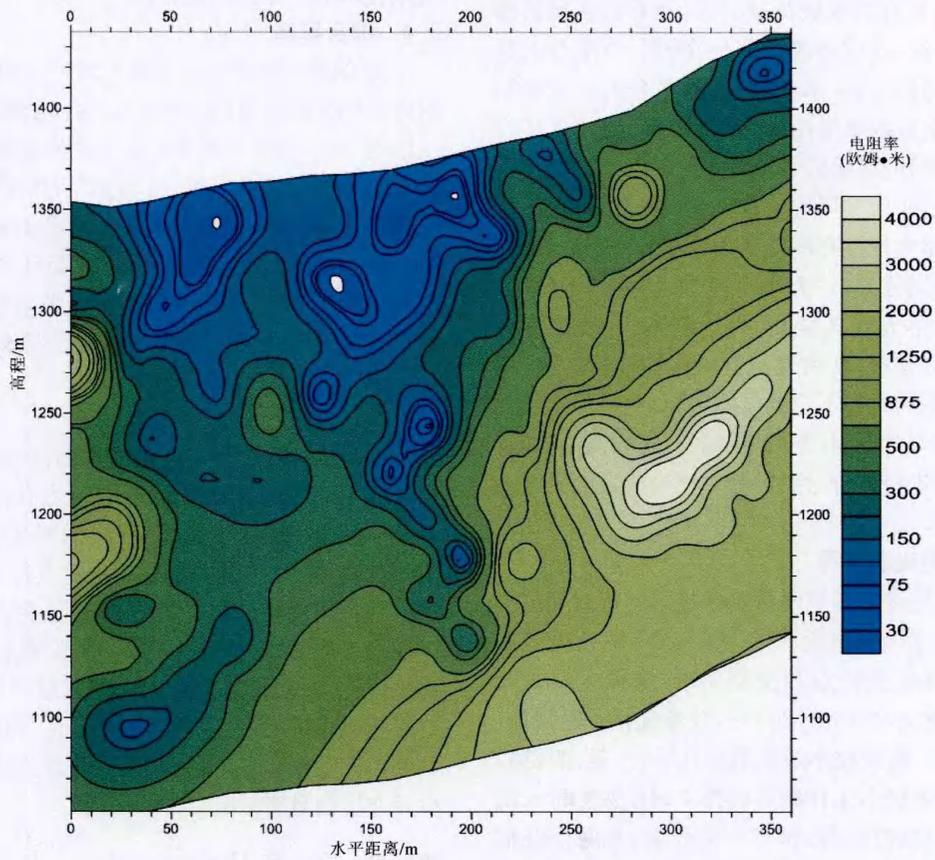


图 3 3号测线 EH-4 电导率成像系统反演剖面图
Fig. 3 No. 3 survey line the inversion profile Figure of EH-4

的点,可以采取增加叠加次数及其它措施来改善数据质量;在一维反演的基础上,室内资料处理中采用了 ROBUST 估计方法处理时间序列资料,ROBUST 估计的基本原理是使预测值与观测值之间的误差最小,ROBUST 估计不允许少数异常数据或“飞点”在阻抗函数估算中起控制作用,最大限度地压制了不相关噪声的影响,获得高质量的张量阻抗元素计算视电阻率再利用 EH-4 系统的二维成像软件进行快速自动成像并结合其它专业绘图软件,最终绘制出剖面的二维电阻率模型^[17]。

2 应用实例

2.1 工程概况

探测区位于河南省栾川县冷水镇境内某钼矿区,矿区位于地表分水岭脊部两侧斜坡地带,基岩裸露,沟谷发育,矿区褶皱断裂较发育,中部和北部褶皱开阔,南部断裂发育。矿区断裂构造发育,规模不等,矿区内出露的岩浆岩以变辉长岩类及斑状二长花岗岩—斑状黑云母花岗闪长岩为主,另有少数细粒(斑状)花岗岩脉及部分变质火山岩。

探测平台有的区域为基岩区,而有的区域为爆破后的碎石区,这就造成了即使在同一个平台上其基岩层并不处于同一水平面。探测平台的区域面积普遍较窄,电磁探测受山体(低阻影响)或较低平台(呈高阻影响)的影响较大。

多年来,矿区及周边一直存在私挖乱采、无序开采现象,遗留大量没有进行工程处理的采空区,采空区结构呈多层分布,且大小不等、形状极其不规则。采空区的异常表现各异,若为空腔体时,表现为高阻;若采空区充水,则表现为低阻;若采空区发生塌陷,充填物不同时有不同的电性差异,充填浮土或含水较多时表现为低阻,充填块状岩石时表现为高阻,因此对异常进行评价时要进行对比分析才能更好的预测采空区。

2.2 瞬变电磁法解释

本次采空区瞬变电磁法勘探投入的仪器为重庆奔腾数控技术研究所研制的 WTEM-1 瞬变电磁系统,结合瞬变电磁特点和探测要求,选择大回线装置,发射线框为 200 m×200 m,线圈选择 1 匝,供电电流大于 20 A;接收小线圈沿垂直于 T_x 框内观测,选用 4000 匝线圈,工作频率选择 4 Hz。探测时大线圈供电电流位置位于线框左下脚位置,且每个线框之间边框相互平行,使其探测位置相对统一;接受小线圈在大线圈内部接受信号。图 2 为 3 号测线瞬变

电磁法反演剖面图,由图中可以看出有明显的电阻率异常,在测线 60 m、160 m,中心深度 1300 m 左右有两个明显的低阻异常,结合测区的地势较高,地表原生植被丰富,含水量较大,又处于雨季,故推断为充水采空区。在测线 100 m,中心高程为 1175 m 处有一电阻率等值线形成的封闭圈呈相对高阻的异常,推断为高阻岩矿体或采空区。

2.3 EH-4 解释

本次工作采用 EH-4 电导率成像仪,该仪器是由美国 EMI 电磁仪器公司与 GEOMETRICS 公司联合开发的 STRATAGEM™ 电导率成像系统,根据先前试验,探测时取最低工作频率为 500 Hz 已满足设计要求,故本次工作频率取二、三共 2 个频段工作,频率范围 500 Hz~99 kHz。在有些复杂地形和信号不好的测点,增加 0~750 Hz 的低频率组。图 3 为 3 号测线 EH-4 电导率成像系统反演剖面图,在测线 50~80 m、140~200 m 的近地表处有两处明显的低阻异常和瞬变电磁法反演剖面图相对应,推断为低阻采空区。在测线 270~320 m,中心高程 1225 m 处有一明显高阻异常,推断该高阻圈闭可能为未充水采空区或高阻岩体。

2.4 综合解释

综合瞬变电磁法和 EH-4 两种方法可知,地表附近有明显的低电阻率异常,符合地表附近充水采空区的反映,这也与收集的已知资料相吻合,说明两种方法有很好的对应性,可以相互验证。瞬变电磁法反演的深部低阻异常和 EH-4 反演的深部高阻异常,经钻探验证为采空区。说明瞬变电磁法和 EH-4 电导率成像系统可以互相补充,特别是中深部区域。综合这两种方法,可以对采空区进行很好的评价。

3 结论

通过上述实例证明了瞬变电磁法和 EH-4 在采空区探测的应用上效果良好,是行之有效的方法。很多采空区由于充水呈低阻反映,而瞬变电磁法对低阻体反映灵敏,采用瞬变电磁法对其探测比其它方法有独特的优势;EH-4 电导率成像系统效率高,减少勘探工作量,降低勘探成本。两种方法探测深度相对来说比较大,所以在对中深部区域采空区探测时二者可以很好的相互补充、相互验证,再结合地质资料和后期钻探验证,提高对采空区评价的准确性,减少采空区的危害。

参 考 文 献 (References):

- [1] 刘爱华,郑鹏.影响采空区精确探测关键因素的分析研究[J].

- 采矿与安全工程学报,2008,25(2):132-138.
- LIU Ai-hua, ZHENG Peng. Analysis of Key Factors Affecting the Precision of Goaf Detection [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008,25(2):132-138.
- [2] 吴成平,胡祥云. 采空区的物探勘查方法[J]. 地质找矿论丛, 2007,22(1):19-23.
- WU Cheng ping, HU Xiang yun. Geophysical methods on survey of mined-out area [J]. Contributions to geology and Mineral Resources Research,2007,22(1):19-23.
- [3] 戴前伟,余凯,冯德山,等. 探地雷达及 EH4 对钼矿采空区的综合探测[J]. 地球物理学进展,2010,25(5): 1763-1768.
- DAI Qian-wei, Yu Kai, FENG De-shan, *et al.* The application of ground penetrating radar and EH4 in goaf exploration[J]. Progress in Geophys,2010,25(5):1763-1768.
- [4] 祁民,张宝林,梁光河,等. 高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):256-262.
- QI Min, ZHANG Bao-lin, LIANG Guang-he, *et al.* High-resolution prediction of space distribution characteristics of complicated underground cavities——Preliminary application of high-density electrical technique in an area of Yangquan, Shanxi[J]. Progress in Geophys,2006,21(1):256-262.
- [5] 陈相府,安西峰,王高伟. 浅层高分辨地震勘探在采空区勘测中的应用[J]. 地球物理学进展,2005,20(2): 437-439.
- CHEN Xiang-fu, AN Xi-feng, WANG Gao-wei. Application of high-resolution seismic detecting for undermined shallow strata[J]. Progress in Geophys, 2005,20(2): 437-439.
- [6] 杨建军,申燕,刘鸿福. 测氡法和瞬变电磁法在探测煤矿采空区的应用[J]. 物探与化探,2008,32(6):0661-0664.
- YANG Jian-jun, SHEN Yan, LIU Hong-fu. The application of radon measurement and transient electromagnetic methods in detection of coal mine goaf[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008,32(6):0661-0664.
- [7] 范亮,钱荣毅. 瞬变电磁法在煤矿采空区的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2011,08(1):029-033.
- Fan Liang, Qian Rong-yi. Application of Transient Electromagnetic Method to Coal Mine Gobs [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2011,08(1):029-033.
- [8] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社,2007.
- Niu Zhi-lian. The Theory of Time-Domain Electromagnetic Methods[M]. Changsha: The Central South University Press, 2007.
- [9] 詹少全,沈云发,杨正刚. EH-4 成像技术在广西某危机矿山外围深部找矿中的应用[J]. 工程地球物理学报,2009,06(4): 470-474.
- Zhan Shaoquan, Shen Yun-fa, Yang Zheng-gang. Application of EH4 System to Deep Ore-Prospecting in Periphery of One Dangerous Mine of Guangxi [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2009,6(4): 470-474.
- [10] 李金锁,齐文,许文鼎. 探找热水的有效方法——以 EH-4 电导率成像系统在西藏尼玛县找热水为例[J]. 地球物理学进展, 2012,27(3):1243-1253.
- LI Jin-suo, QI Wen, XU Wen-ding. Effective method for exploring hot water-For example EH4 conductivity imaging system finding hot water in Nima county of Tibet [J]. Progress in Geophys, 2012,27(3):1243-1253.
- [11] 段圣龙. EH-4 高频大地电磁测深勘查采空区的效果分析[J]. 工程地球物理学报,2011,8(1):024-028.
- Duan Sheng long. Analysis of the EH-4 High-Frequency MT Sounding Method in Gob Exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2011,8(1):024-028.
- [12] 徐白山,王恩德,陈庆凯,等. 利用 EH-4 确定煤矿采空区的边界[J]. 东北大学学报(自然科学版),2006,27(7):810-813.
- XU Bai-shan, WANG En-de, CHEN Qing-kai, *et al.* Determination of Coal Mine Gob Edges by EH-4 System[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2006, 27(7):810-813.
- [13] 安润莲,姚精选,杨引申. 瞬变电磁勘探技术在探测采空区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):116-118.
- AN Run-lian, YAO Jing-xua, YANG Yin-chuan. Application of TEM on exploration of subsurface mined areas[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2006,17 (4):116-118.
- [14] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
- Piao H R. The Theory of Electromagnetic Sounding. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [15] 闫述,石显新,陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. 地球物理学报,2009,52(6):1583-1591.
- YAN Shu; SHI Xian-Xin; CHEN Ming-Sheng. The probing depth of transient electromagnetic field Method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(6):1583-1591.
- [16] 赵光荣,等. 基于 EH4 电磁成像系统的煤矿采空区探测技术[J]. 煤炭科学技术,2009,37(11):110-112.
- ZHAO Guang-rong. Mine Goaf Survey Technology Based on EH4 Electromagnetic Image System[J]. Coal Science and Technology, ,2009,37(11):110-112.
- [17] 陈庆凯,席振铎. EH4 电磁成像系统的数据处理研究[J]. 有色矿冶,2005,21(5):007-009.
- CHEN Qing-kai, XI Zhen-zhu. Study of Data Processing Procedure of EH4 Electromagnetic Imaging System[J]. Non-ferrousmining and metallurgy, 2005,21(5):007-009.
- [18] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
- LI Xiu. The Theory and Application of Transient Electromagnetic Sounding[M]. Xi'an: Shaanxi science and Technology Press,2002.
- [19] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社,1995.
- LI Jin-ming. Geoelectric Field and Electrical Exploration. Beijing: Geological Publishing House,2005.
- [20] 薛国强. 回线源瞬变电磁法对地成像方法研究[D]. 博士学位论文:西安交通大学,2005.
- Xue Guo-Qiang. The study of loop-source TEM imaging to earth[D]. Xi'an jiao tong university, 2005.
- [21] 薛国强,李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理

- 学报, 2008, 51(3): 894-900.
- Xue Guo-Qiang, LI Xiu. The technology of TEM tunnel prediction imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894-900.
- [22] 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(6): 1400-1405.
- GUO Wen-Bo, LI Xiu, Xue Guo-Qiang, *et al.* A study of the interpretation system for TEM tomography [J]. Chinese Journal of Geophysics 2005, 48(6): 1400-1405.
- [23] 薛国强, 李貅, 郭文波, 等. 大回线源瞬变电磁场响应特性[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 586-590.
- Xue Guo-Qiang, LI Xiu, Guo wen-bo. Character of response of large-loop transient electro-magnetic field [J]. Oil geophysical prospecting, 2007, 42(5): 586-590.
- [24] 王华军, 罗延钟. 中心回线瞬变电磁法 2.5 维有限单元算法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 855-862.
- Wang H J, Luo Y Z. Algorithm of a 2.5 dimensional finite element method for transient electromagnetic with a central loop[J]. Chinese Journal of geophysics, 2003, 46(6): 855-862.
- [25] 李耀华, 杨进, 李世峰. 瞬变电磁与电阻率测深在沙午铁路采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2011, 35(2): 274-279.
- LI Yao-hua, YANG Jin, LI Shi-feng. The application of TEM and resistivity sounding to the investigation of gob areas near shawu railway [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 274-279.
- [26] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.
- XUE Guo-Qiang, LI Xiu, DI Qing-Yun. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophys, 2007, 22(4): 1195-1200.
- [27] 熊彬, 罗延钟. 电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 590-597.
- XIONG Bin; LUO Yan_Zhong. Finite element modeling of 2.5_D TEM with block homogeneous conductivity [J]. Chinese Journal of geophysics, 2006, 49(2): 590-597.
- [28] 嵇艳鞠, 林君, 朱凯光, 等. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 828-833.
- Ji Yan-jun, LIN Jun, ZHU Kai-guang, *et al.* Underground water prospecting by Transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophys, 2005, 20(3): 828-833.