

利用瞬变电磁法探测程楼断层含(富)水性

赵彬¹, 马勇², 袁汝庆², 高丽华¹

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛266590; 2. 山东能源枣庄矿业集团公司柴里煤矿, 山东枣庄277519)

摘要:结合井下巷道的实际情况,利用瞬变电磁法对程楼断层的含(富)水性进行探测,并利用大型通用有限元软件 Ansys 进行室内资料处理解释。结果显示,程楼断层在正常区段含(富)水性弱,只有在与北北东向-近南北向断层的交汇部位有一定的含(富)水性。同时,以程楼断层为例,利用瞬变电磁对煤矿井下探放水试验,验证了瞬变电磁法在煤矿井下断层含(富)水性探测中的有效性,为查明井下过断层矿井水害的发育位置,安排井下探放水工作提供依据。

关键词:滕县煤田;瞬变电磁;视电阻率;程楼断层

中图分类号:P54

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)01-0009-07

Transient Electromagnetic Method in Search of Processing the Aquosity (Water Yield Property) of Chenglou Fault

Zhao Bin¹, Ma Yong², Yuan Ruqing², Gao Lihua¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Chaili Coal Mine, Shandong Energy Zaozhuang Mining Industry Group Company, Zaozhuang, Shandong 277519, China)

Abstract: Combined with the actual situation of mine roadway, the aquosity (water yield property) of Chenglou fault was detected through transient electromagnetic method using processing and interpretation data and large general-purpose finite element software Ansys. The results show that the low aquosity (water yield property) of Chenglou fault in the normal segment and some aquosity (water yield property) appear only at the intersection of the NEE and near the north-south trending faults. Chenglou fault was given coal mine drainage exploration test to verify the effectiveness of transient electromagnetic method in the detection of aquosity (water yield property) of the coal mine fault. This research helps the identification of coal mine water damage over the development of fault location and provides foundation of the arrangement of coal mine exploration and discharging work.

Key words: Teng county coalfield; transient electromagnetism; apparent resistivity; Chenglou fault

利用瞬变电磁法探测地质构造是一种简便、有效、应用前景广阔的探测方法,1951年 Wait^[1]开始瞬变电磁场的基础理论研究,1979年 Nabighian 提出“烟圈”理论,为瞬变电磁资料的反演与解释提供了理论依据^[2]。其后, Hohmann, Weidelt, Raiche, Spies, Knight, San Filippo, Lee 等^[3-10]在原有理论上,结合计算机和信息技术,在更为复杂的二维、三维正、反演瞬变电磁法理论研究等方面取得了大量成果,逐步完善利用瞬变电磁法探测地质构造的相关理论技术。

收稿日期:2014-11-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB723104);国家自然科学基金项目(41372108, 41372134);山东省科技发展计划项目(2013G0020403);青岛市重点科研项目发展计划(13-4-1-2-gx);山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地(MDPC2013KF18)

作者简介:赵彬(1987—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事构造地质专业方面的研究。

高丽华(1971—),女,山东蓬莱人,讲师,博士,主要从事构造地质方面的研究工作,本文通信作者。

E-mail: glhxx@163.com

我国对利用瞬变电磁法探测地质构造的相关研究实践起步较晚,但进步很快,尤其在地下(井下巷道)全空间瞬变电磁法应用方面取得了大量研究成果。20 世纪 70 年代,于景邨^[11-13]在《矿井瞬变电磁法勘探》一书中讨论了矿井瞬变电磁法的基本原理,并给出了井下实际探测的计算公式。白登海等^[14]对利用瞬变电磁法探测煤矿突水构造进行了大量研究和实践,并与加拿大 GEONICS 公司合作,开发出新型探测仪器和相关软件设备。郭纯等^[15]将地下全空间瞬变电磁技术应用在煤矿井下巷道掘进连续跟踪超前探测试验中。对超前探测煤矿井下巷道掘进工作面前方 30~50 m 范围的富水低阻异常时效果理想。岳建华等^[16-19]通过大量研究与实践,对矿井瞬变电磁法应用中出现的多距小回线间自互感及如何布置发射和接收天线方向以降低全空间效应的影响等问题进行了总结,为进一步完善瞬变电磁法在矿井探测中的应用指出了方向。然而,由于煤矿井下工作环境复杂,在巷道中布置探测装置,使瞬变电磁场在传播开始就遇到绝缘的空气介质,且存在由铁轨、风机、电缆、皮带运输机、刮板运输机、液压支架等金属设施产生的瞬变电磁噪声。如何通过合理布设天线、仪器设备,安排探测工作,提高信噪比,以尽可能减少井下自然环境对探测结果的影响等问题。

程楼断层位于山东滕县煤田中南部(图 1),为走向北东东—近东西向正断层,向南倾斜,倾角 70°~75°,落差 45~320 m,被北北东—近南北向二龙岗断层、高庙断层和北北西向刘仙庄断层错断;穿过柴里、蒋庄、郭庄、田陈、滕东井田,控制该区域的井田界限,对程楼断层含(富)水性的探测研究,对矿井的安全生产起着决定作用。本研究以程楼断层为例,结合井下实际情况,在前人工作基础上,合理安排布设天线、仪器设备,以尽可能减少自然环境对探测结果造成的影响。利用大型通用有限元软件 Ansys,对巷道建立地电数值模型,进行反演,得出利用瞬变电磁法探测井下断层含(富)水性的经验,为煤矿的安全生产和防治水工作提供可靠的物探技术资料。

本次探测的柴里煤矿 2 采区 3_上 205 工作面位于程楼断层上盘,其工作面轨道巷沿程楼断层走向方向布置开拓。

1 瞬变电磁探测技术

1.1 理论基础

时间域电磁法(time-domain electromagnetic method)也称瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM),其工作原理是利用不接地回线(磁偶源)或接地线源(电偶源)向地下发送一次脉冲磁场或电场,在一次脉冲磁场或电场的间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场随时间的变化。美国地球物理学家 Nabighan^[20]指出,地层介质受激励而产生的感应涡流场在地表的电磁场值为地下各个涡流层的总效应,可以等效为一个简单的电流环,当发射电流中断时,周边介质受激励产生的环状电流紧挨发射回线,随后向上下及周边扩散。此过程即为“烟圈效应”。其扩散半径 r 、所在深度 d 和扩散速度 v 的表达式分别为:

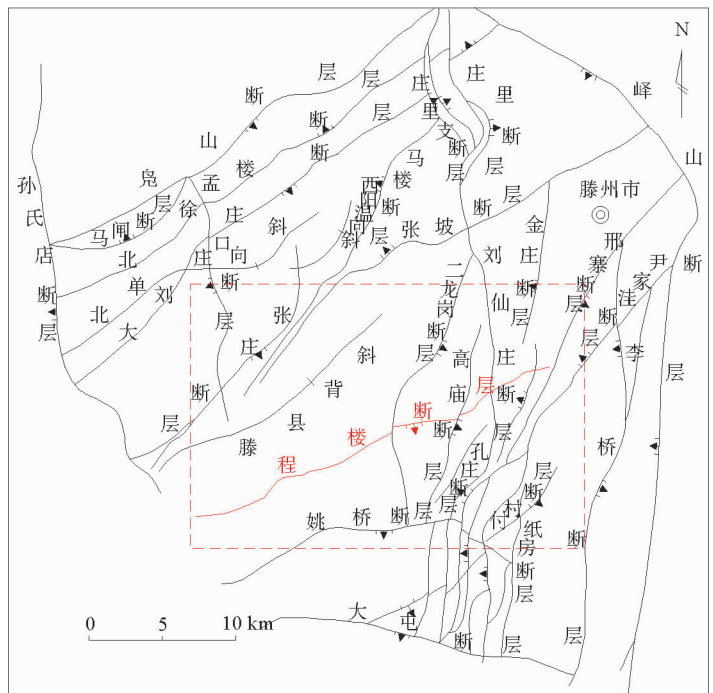


图 1 滕县煤田主要断层分布图

Fig. 1 The main distribution of Tengxian coalfield

$$r=2.09(t/\sigma\mu_0)^{1/2}; \quad (1)$$

$$d=2.257(t/\sigma\mu_0)^{1/2}; \quad (2)$$

$$v=1.129(t/\sigma\mu_0)^{1/2}. \quad (3)$$

其中: σ 为电导率,S/m; μ_0 为磁导率,H/m; t 为时间,s.

1.2 施工方法

1)由于井下空间有限,无法采用大线圈(边长大于10 m)进行测量,故采用边长2 m小线圈。采用20 m点距进行测量已满足小线圈测量要求,提高探测分辨率,尤其是横向分辨率。

2)由于井下干扰源多,采用贴近巷道两帮进行测量,尽量减小测量装置与异常体之间的距离,增加小线圈匝数,以加大发射磁距和有效接收面积,提高测量信号信噪比。同时采用大电流供电,以有效压制干扰。

3)为探测巷道侧帮程楼断层含(富)水性,将线圈竖立,贴近侧帮,采用小角度仰角调整线圈进行测量,可以有效增大探测范围,对工作面内、顶、底板一定范围内含水低阻异常体的发育规律进行超前探测。同时,由于瞬变电磁法存在关断时间的问题,无法有效探测到浅部(距探测装置约15 m)的低阻异常体,采用该方法可以减少探测死角,提高探测精度。

4)采用小线圈瞬变电磁法进行测量,相对于其他物探测量方式,具有测量装置小,易组装、易携带的特点,可以广泛应用于井下等空间较小、其他探测方式无法展开的情况。

1.3 资料处理及成果显示方式

运用瞬变电磁法在井下巷道中进行探测,井下巷道展布情况直接限制了测点的布置位置和数量,此外,巷道中电缆、皮带运输机等金属设备产生的瞬变电磁噪声也严重干扰着探测结果。因此,要在这种情况下实现真实地模拟,采用全空间反演就成为必然的渠道。

通常情况下,由于地层中节理的发育程度、含水性 and 断层等因素的影响,地层的电参数与原岩自身的地电参数存在差异。要获得正确的地电参数,就要结合井下实际工作测量环境分析。煤层顶板岩层多以砂岩为主,靠近断层带的部位易发生错动断裂,产生大量裂缝,含水量较为丰富,其他部位岩层较为稳定。由此,可将原围岩模型简化为只有岩石质量较好、不含水的砂岩和岩石较为破碎含水的岩石破碎带两部分。

本研究采用有限元数值分析方法,结合大型通用有限元软件 Ansys,对井下巷道电磁场进行二维、三维反演;建立井下相应探测巷道区段的地电数值模型。具体步骤如下:

①在巷道内合理布置测线对顶板岩层进行探测,得到电磁场原始数据,再利用软件进行全空间反演,得到顶板岩层的大致含(富)水性情况。

②根据顶板岩层的大致含(富)水性情况,并赋予地电参数,利用大型通用有限元软件 Ansys 建立模型。反复进行多次计算,并不断修改相应的地电参数,再将计算所得的接收线圈数据曲线与实测曲线进行比较,使其结果吻合。

③再次修改前次地电参数,进行数据综合比较,直到实测曲线与数值模拟曲线一致,此时的地电参数即为所探测区域的真实地电参数。

2 现场工作方法及资料分析、解释

2.1 现场观测方式设计

本次电法勘探的任务是确定程楼断层的含(富)水性,结合井下的实际情况,瞬变电磁的现场测量工作沿2采区3_上205工作面轨道巷布置测线,测量线圈平行于巷道两帮放置,并以5°为单位,进行小角度仰角调整(图2),测量线圈发射回线0.8 m×0.8 m,接收回线1 m×1 m(图3)。

3_上205工作面12测线:以轨道巷第一个躲避间0点为起点,到轨道巷与切眼交叉点30号点为终点,测量点距为20 m(图4),通过多次读数取平均值来减少测量误差,以精确探测研究区内程楼断层各区段含(富)水性变化情况。

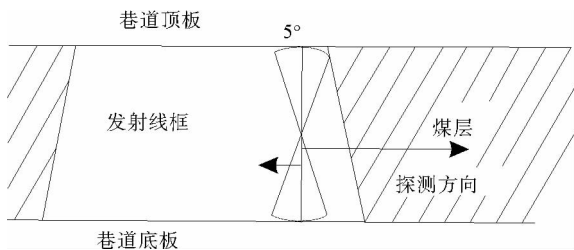


图 2 测量线圈巷道内布置示意图

Fig. 2 Sketch map of the arrangement of the measuring coil in roadway

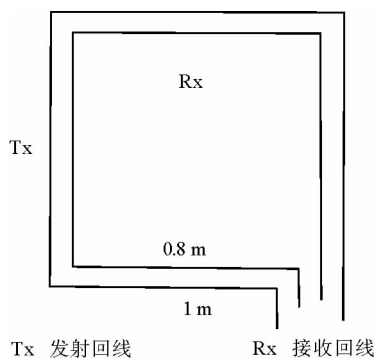


图 3 测量线圈示意图

Fig. 3 Sketch map of the measuring coil schematic

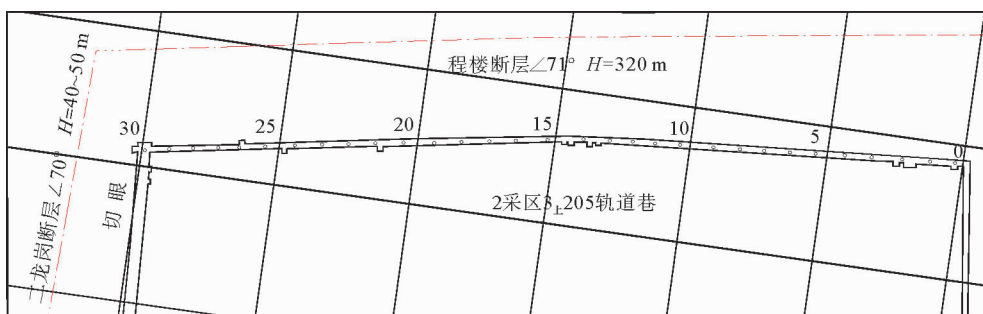


图 4 3_上 205 工作面利用瞬变电磁法探测顶板富水性测量点位置

Fig. 4 Using TEM to probe the Hydrous content of roof at No. 3U coal 205 working face

2.2 技术参数选择

发射频率 32 Hz, 采样间隔 1.0 μ s, 起始时间 4.0 μ s, 终止时间 2.243 ms, 时窗个数 31, 时窗宽度 1.0 μ s, 控制延时 0.2 μ s, 关断时间 0.7 μ s, 供电电流 4.2 A, 供电电压 24.0 V, 阻尼电阻 1 000 Ω , 发射线圈 0.8 m \times 0.8 m, 125 匝, 接收线圈 1 m \times 1 m, 5 匝, 叠加次数 8 次, 前放增益 8 倍, 主放增益 1 倍, 接收机天线延时 1.0 μ s。

2.3 实测资料分析、解释

2.3.1 多测道剖面曲线图解释

多测道剖面曲线图中, 横坐标为测点号(算术坐标), 纵坐标为 $V(t)/I$ 值(对数坐标), 将每个测点的 31 个 $V(t)/I$ 值, 按 1~31 道的次序, 依次展布在坐标系中, 最后将 $V(t)/I$ 值相同的点连接起来, 即得到该 3_上 205 工作面 12 测线的多测道电压剖面曲线图(图 5)。

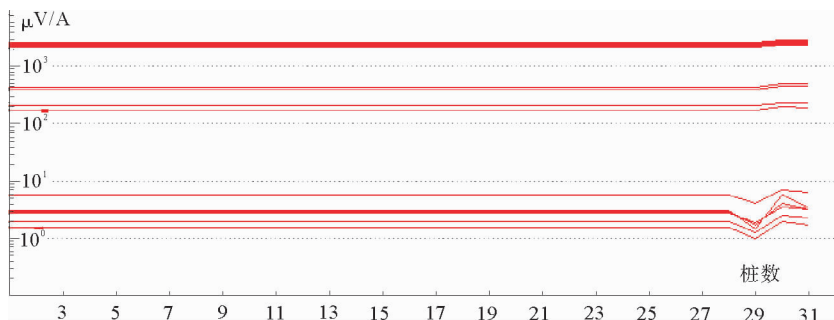


图 5 多测道电压剖面曲线图

Fig. 5 Multi-channel voltage measurement profile graph

3_上 205 工作面 12 测线,沿轨道巷布置,曲线在 28 号点以前,总体较为平缓(在桩数 28~31 处略有变化),电性反映为中、低电压,反映地层的正常沉积特征;而在 28 号点以后曲线明显呈高电压反映,且曲线呈锯齿状波动,表现为异常的地电反映。这些异常点处于程楼断层与北北东向二龙岗断层(落差 20~70 m,倾角 70°)的交汇部位,反映该段具有一定的含(富)水性。

2.3.2 视电阻率地断面图分析

横坐标为测点点距(算术坐标),纵标为 ρ_r (算术坐标),将各测点不同采样时间经初步反演得到的 ρ_r 值,按 1~31 道的顺序依次展布在坐标系中,即得到 3_上 205 工作面 12 测线的视电阻率地断面图(图 6)。

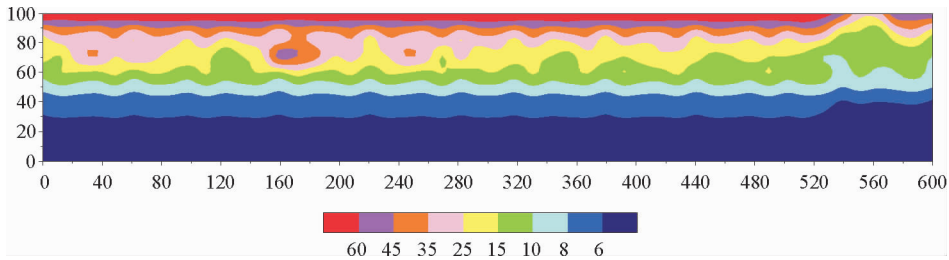


图 6 3_上 205 工作面 12 测线视电阻率地断面图

Fig. 6 Section of apparent resistivity graph of the 12 measuring line at No. 3U coal 205 working face

3_上 205 工作面 12 测线,沿轨道巷布置,曲线在 520 m 之前,总体较为平缓、近水平展布(个别区段略有变化),视电阻率反映为中、高异常,表现为正常的地层沉积特征;而在 520 m 以后,曲线呈视电阻率低异常,特别是在 560 m 附近曲线为无规律的波浪形跳跃,表现为低视电阻率异常,为不正常地层的反映。这些异常点位于程楼断层与北北东向的二龙岗断层的交汇部位,反映该段具有一定的含(富)水性。

2.3.3 视电阻率断面图分析

通过井下瞬变电磁法测得视电阻率数值是一个全空间立体的概念,生产中需要探测前方视电阻率异常值,因此,在资料应用前就必须进行全空间资料校正处理。根据煤层顶、底板岩石的视电阻率情况(图 7)加权进行资料处理,得出视电阻率校正地断面图。该图件基本上反映煤层顶板岩石的视电阻率变化情况。

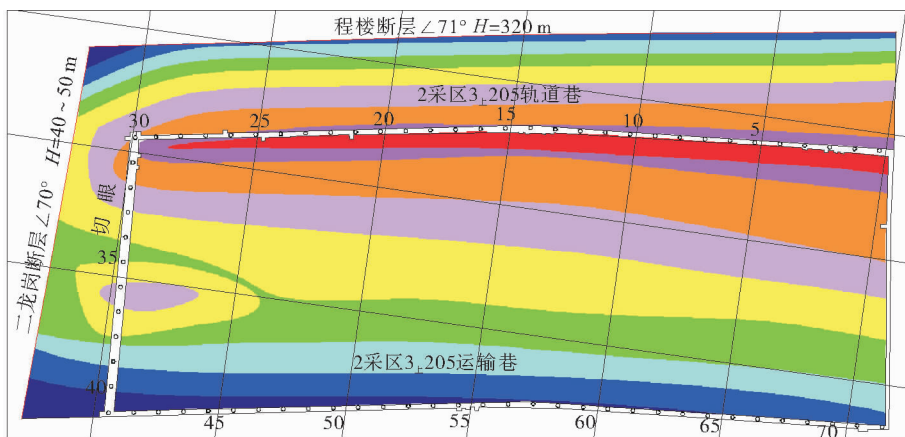


图 7 3_上 205 工作面顶板上演 20 m 岩石视电阻率色块图

Fig. 7 Apparent resistivity color chart of 20 m up roof rock at No. 3U coal 205 working face

3_上 205 工作面 12 测线,沿轨道巷布置,由该测线视电阻率校正参数(表 1)导出该测线视电阻率校正地断面图,在探测深度 500 m 之前,曲线总体较平缓、近于水平(个别区段略有变化),视电阻率反映为中、高异常(大于 25 $\Omega \cdot m$),表现为正常的地层沉积特征;只在探测深度 500 m 附近,视电阻率反映为低异常带(小于 8 $\Omega \cdot m$),在 520 m 以后该低视电阻率异常带呈加宽趋势(图 8)。这些异常点处于程楼断层与北北东向

的二龙岗断层的交汇部位,反映该段具有一定的含(富)水性。

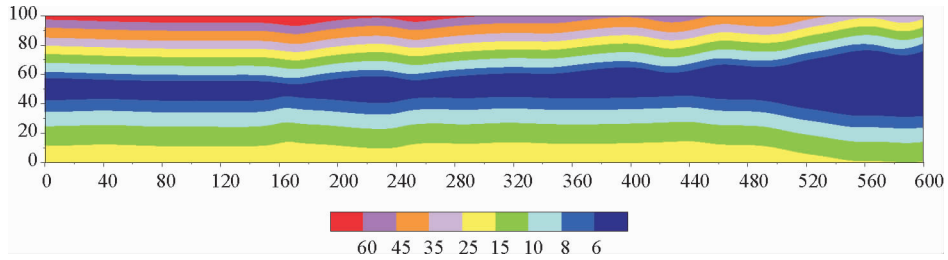


图 8 3_上 205 工作面 12 测线视电阻率校正断面图

Fig. 8 Apparent resistivity correction to a sectional view of the 12 measuring line at No. 3U coal 205 working face

表 1 3_上 205 工作面 12 测线视电阻率部分校正参数

Tab. 1 Part parameters of apparent resistivity correction to a sectional view of the 12 measuring line at No. 3U coal 205 working face

视深度/m	测点号	100	300	500	600
9.570	05	5.198 956	5.198 956	5.198 956	4.171 181
13.111	45	5.278 523	5.278 523	5.278 523	4.239 641
32.256	95	5.374 350	5.374 350	5.374 350	4.322 090
41.019	85	6.151 225	6.151 225	6.441 815	5.240 541
50.634	90	15.624 730	15.624 730	15.624 730	13.140 770
60.444	60	19.979 030	19.979 030	19.979 030	16.888 670
71.524	00	67.972 290	67.972 290	67.972 290	54.536 950
81.572	05	21.803 900	21.803 900	21.803 900	18.456 090
91.439	60	27.650 060	27.650 060	27.650 060	23.488 430
97.058	20	31.476 040	31.476 040	31.476 040	26.779 040
102.452	90	37.237 270	37.237 270	37.237 270	31.739 250

2.4 探测成果及验证情况分析

综上所述,程楼断层在正常区段视电阻率低阻带较为狭窄,只在与北北东向二龙岗断层交汇部位低阻带宽大。说明程楼断层在正常区段含(富)水性弱,只在与北北东向一近南北向断层的交汇部位有一定的含(富)水性。

柴里煤矿在 3_上 205 工作面轨道巷对程楼断层进行了探放水试验。分别在 100,300,500,600 m 处施工探放水孔各一个,孔深 80 m。其结果是在 100,300,500 m 处探放水孔为干孔,没有水放出,在 600 m 处探放水孔有水放出,其涌水量为 2.2 m³/h。与本次利用瞬变电磁法探测程楼断层含(富)水探测所得出的结论相一致。

3 结论与建议

1)结合井下巷道探测的实际工作环境,采用非接触式、多匝数、小回线(边长 0.8 m)且发射线框和接收线框分别为匝数不等、完全分离的两个独立回线,使其与断层附近突水构造产生最佳耦合效果,提高信噪比,有利于异常的识别。

2)由瞬变电磁场的“烟圈效应”,基于实际测量数据,通过推导、计算得出全空间瞬变电磁视电阻率,并由视电阻率-时间曲线计算视电阻率-深度曲线,可确定过断层附近工作面突水构造的空间分布位置,为布置验证钻孔提供依据。

3)利用瞬变电磁法探查煤矿井下工作面过断层含(富)水性,可以超前探测突水构造位置,为进行矿井防治水工作,提前采取有效应对措施提供了依据。

4)利用瞬变电磁法在井下巷道进行探测工作,空间效应和巷道内铁轨、风机、电缆、皮带运输机、刮板运输机、液压支架等金属设施产生的瞬变电磁噪声对探测资料的解释结果也会产生一定的影响。在今后的探测工作中需要解决的问题是,如何降低其对探测结果的影响,提高探测结果的可靠性。

参考文献:

- [1]Wait J R. Transient EM propagation in a conducting medium[J]. Geophysics,1951,16(12):213-221.
- [2]Nabighian M N. Quasi-static transient response of a conducting half-space: An approximate representation[J]. Geophysics, 1979,44(10):1700-1705.
- [3]Oristaglio M L, Hohmann G W. Diffusion of electromagnetic fields in a two-dimensional earth: A finite-difference approach [J]. Geophysics,1984(49):870-894.
- [4]Newman G A, Hohmann G W. Transient electromagnetic response of a three dimensional body in layered earth[J]. Geophysics,1986,51(8):1608-1627.
- [5]Wang T, Hohmann G W. A finite difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics,1993,58(6):797-817.
- [6]Raiche A P, Spies B R. Coincident loop transient electromagnetic master curves for interpretation of two-layer earth[J]. Geophysics,1981,46(1):53-64.
- [7]Knight J H, Raiche A P. Transient electromagnetic calculations using the gaver-stehfest inverse laplace transform method [J]. Geophysics,1982,47(1):47-51.
- [8]San Filippo W A, Eaton P A, Hohmann G W. The transient EM response of a prism in a conductive half-space[C]//54th Annual International SEG Meeting, Atlanta; The Leading Edge,1984:64-67.
- [9]Lee J F. A finite element time-domain approach for solving Maxwell's equations[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters,1994,4(1):11-13.
- [10]Weidelt P. Guided waves in marine CSEM[J]. Geophysical Journal International,2007,171:153-176.
- [11]于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007:60-68.
- [12]于景邨. 矿井瞬变电磁法理论与应用技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2000:13-19.
- [13]刘志新,于景邨,郭栋. 矿井瞬变电磁法在水文钻孔探测中的应用[J]. 物探与化探,2006,30(1):59-61.
Liu Zhixin, Yu Jingcun, Guo Dong. The application of the mining transient electromagnetic method to the exploration of hydrological borehole[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2006,30(1):59-61.
- [14]白登海,何兆海,卢健,等. 地下全空间瞬变电磁法在煤矿水害预防中的应用[C]//第六届中国国际地球电磁学术讨论会论文集. 北京:地质出版社,2003:383-384.
- [15]郭纯,刘白宙,白登海. 地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测[J]. 地震地质,2006,28(3):456-462.
Guo chun, Liu Baizhou, Bai Denghai. Whole-space underground coal mine transient electromagnetic technology in driving head of continuous tracking of advanced detection[J]. Seismology and Geology,2006,28(3):456-462.
- [16]张良,王心义,贾宏昭,等. 瞬变电磁技术在顶板砂砾岩富水区探测中的应用[J]. 矿业安全与环保,2011,38(1):27-33.
Zhang Liang, Wang Xinyi, Jia Hongzhao, et al. Transient electromagnetic technology in the water-rich region roof glutenite detection[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2011,2,38(1):27-33.
- [17]岳建华,杨海燕,胡博. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学报进展,2007,22(6):1904-1909.
Yue Jianhua, Yang Haiyan, Hu Bo. 3D finite difference time domain numerical simulation for TEM in-mine[J]. Progress in Geophysics,2007,22(6):1904-1909.
- [18]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,2008,38(1):129-134.
Yang Haiyan, Yue Jianhua. Response characteristics of the 3D whole-space TEM disturbed by roadway[J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology,2008,38(1):129-134.
- [19]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,2006:3-5.
- [20]姜志海,岳建华,刘志新. 矿井瞬变电磁法在老窑水超前探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2007,4(4):291-294.
Jiang Zhihai, Yue Jianhua, Liu Zhixin. Application of mine transient electromagnetic method in forecasting goaf water[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2007,4(4):291-294.