

基于瞬变电磁法的整合矿井火区分布探测方法

朱红青^{1,2}, 杨成轶², 秦晓峰², 和超楠²

1. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要 针对资源整合矿井火区探测中普通探测技术耗时长、工程量大,且难以直接定位火区范围等问题,研究了基于瞬变电磁法的火区分布探测方法。以北祖矿为例,在井下全空间条件下,结合地质资料和现场地质情况,采用瞬变电磁仪对北祖矿9209风巷上覆煤层进行超前探测和剖面探测,反演计算形成超前、剖面视电阻率图,根据巷道上覆煤层在视电阻率图中的响应特征,通过定性分析确定巷道上覆煤层的自然发火区域。结果表明,基于瞬变电磁法的整合矿井火区分布探测方法能够准确定位火区分布范围,可为打钻探测及灌浆堵漏等矿井防灭火工程提供科学依据,明显提高工程效率及效果。

关键词 整合矿井;火区分布探测;瞬变电磁法;视电阻率

中图分类号 TD75².1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.25.001

Integrated Coal Mine Fire District Detecting Method Based on Transient Electromagnetic Method

ZHU Hongqing^{1,2}, YANG Chengyi², QIN Xiaofeng², HE Chaonan²

1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract Conventional detection technologies for fire areas in integrated coal mines are time-consuming with large volumes of work, and it is difficult to directly locate the fire areas. To improve the technology, the transient electromagnetic method was applied in detecting fire zone distribution. Taking the Beizu Mine for example, this study used the TEM to conduct advanced detection and profile detection of the overlying coal bed of 9209 roadway under the condition of full space in the coal mine. Combined with geological data and conditions at the site, the advanced and section map of apparent resistivity was obtained by inversion calculation. According to the characteristics of response of the overlying coal bed, the natural fire areas were located by qualitative analysis. Practical application shows that the detection method based on transient electromagnetic method is able to locate the distribution of fire areas accurately, providing scientific basis for mine fire prevention, such as drilling exploration and grouting leakage stoppage, significantly improving project efficiency and effects.

Keywords integrated coal mine; fire zone distribution detection; transient electromagnetic method; apparent

煤层开采过程中上覆煤层形成的塌坑及裂隙形成供氧通道,与空气接触后发生氧化作用,积热增温易发生煤自燃并发展为火区。中国资源整合矿井由于早期粗放式开采,机械化程度较低,回采率仅为20%~30%,采空区往往存有大量

残留煤炭,从而形成大规模自然发火危险区域,加之管理不规范,火区地质开采资料缺乏,整合矿井煤层中存在大量之前小煤窑余留老巷,连通情况不详,火区位置、范围及发展趋势都难以确定,给整合矿井火区治理工作造成巨大困难^[1-3]。

收稿日期:2014-04-23;修回日期:2014-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51074168)

作者简介:朱红青,教授,研究方向为矿井通风、火灾与瓦斯防治,电子信箱:zhq@cumt.edu.cn;杨成轶(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为矿井火灾,电子信箱:kjdbycy@163.com

引用格式:朱红青,杨成轶,秦晓峰,等.基于瞬变电磁法的整合矿井火区分布探测方法[J].科技导报,2014,32(25):15-19.

普通打钻探测技术耗时长、工程量大,且难以直接定位火区范围,因此应用地球物理探测技术探测井下火区、确定火区分布范围,显得尤为重要^[4]。本文以北祖矿的资源整合矿井为例,研究基于瞬变电磁法的矿井火区分布探测方法。

1 探测原理及方法

1.1 瞬变电磁法探测原理

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法^[5]。其基本原理是:在地面或空中设置通以一定电流的发射线圈,在其周围空间产生一次电磁场,并在地下导电岩矿体中产生感应电流,断电后,感应电流由于损耗而随时间衰减^[6];通过测量断电后介质二次场随时间的变化,得出其视电阻率,根据视电阻率对井下煤层富水区、裂隙及火区进行分析定位^[7]。

通常情况下,视电阻率值以采空区(空洞)为最高,石灰岩、煤层次之,泥岩及冲水岩溶裂隙岩层为最低,视电阻率值大小依次为:采空区(空洞)、灰岩、煤层、砂岩、泥岩、含水裂隙岩层^[8]。上述视电阻率值仅是不同岩层的常规值,当岩层有各种松散的裂隙、孔隙存在,且含有地下水时,将会改变原来的物理特性,使其电阻率急剧下降^[9]。这种变化程度正比于松散的裂隙、孔隙中的含水强弱。煤层被采空后,在煤层上下岩层间形成一定的空隙,破坏了岩石的完整性、连续性,故该处电阻率明显高于周边完整岩石处的电阻率,表现出明显的局部高阻特性,当采空区的空隙被水充填,其电阻率呈低阻反应^[10]。地下火源的存在,由于其产生的高温与高压,在火源上方介质必将形成一定的电性差异,即视电阻率在着火区域比较高,而其上方视电阻率高低变化较大。一般来说,由于地下煤层燃烧,其顶部岩层的裂隙会不同程度增大,使得岩石孔隙中的水蒸气上升,并在火区煤层顶部某一层位富集,使火区上方介质湿度增大,火区煤层顶部一定区域内视电阻率变小^[11]。

1.2 瞬变电磁法探测方法

矿井瞬变电磁法在井下巷道内进行,与地面瞬变电磁法不同的是,矿井瞬变电磁法在井下巷道内产生的瞬变电磁场呈全空间分布(图1)。全空间效应成为矿井瞬变电磁法的固有问题,其接收线圈接收的信号来自发射线圈周围全空间岩石电性的综合反映^[12]。因而在判断异常体空间位置时,需根据线圈平面的探测方向(即法线方向)并结合地质资料剔除各种干扰因素加以综合分析^[13]。

矿井瞬变电磁法在煤矿井下巷道内探测时,分为超前探测和剖面探测,测点间距为2~20 m。根据多匝小线框发射电磁场的方向性,可认为线框平面法线方向即为瞬变探测方向^[14]。进行剖面探测时,将发射线框法线方向分别对准顶板煤层、底板或平行煤层方向,接受线框平面与发射线框平面重合,同时两线框中心点连线与水平线平行,由于探测过程

中感应电流的损耗,为保证探测精度,中心点连线距离应不超过5 m。剖面探测可反映顶板煤层、岩层、底板岩层或平行煤层内部的地质异常^[15],其线框所在平面与顶板、底板的夹角根据探测要求及煤层倾角而定(图2)。

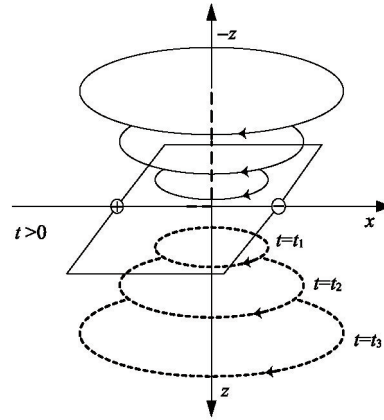


图1 全空间瞬变电磁场的传播

Fig. 1 Transient electromagnetic field in full space

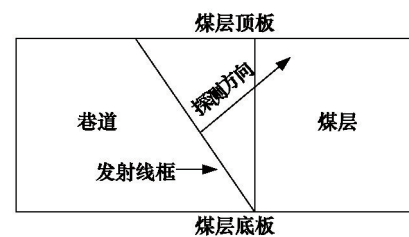


图2 瞬变电磁法剖面探测方向示意

Fig. 2 Cross-section detection direction in transient electromagnetic method

进行超前探测时,将发射线框与接收线框的平面法线重合对准巷道迎头进行,可反映迎头顶板煤层、底板岩层或平行煤层内部的地质异常。其线框所在平面与顶板、底板的夹角根据探测要求及煤层倾角而定。矿井瞬变电磁法迎头超前探测的方向为迎头斜上、顺层和迎头斜下,如图3所示,具体角度根据地质资料及现场勘探而定。每个方向7个角度呈扇形布设,与迎头平面法线夹角分别为 0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$,如图4所示。

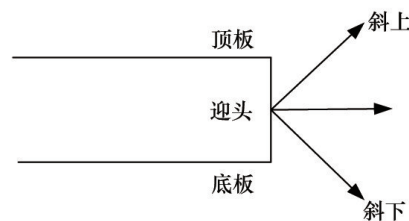


图3 迎头超前探测方向布置示意

Fig. 3 Layout of frontal advanced detection direction

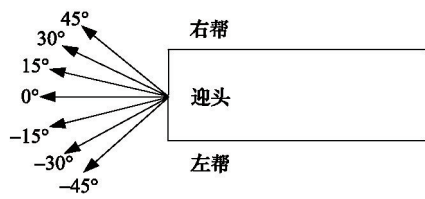


图4 迎头超前探测角度布置示意

Fig. 4 Layout of frontal advanced detection angle

2 实例探测及分析

2.1 实例概况及探测参数

以北祖矿 4+9 煤层为例进行探测分析。北祖矿系资源整合矿井,在开采初期,因技术相对落后,多采用巷采法。巷采过程中,一旦揭露煤层就开始采掘,如果遇到复杂地质构造或顶板冒落等问题,就转向其他区域进行采掘,煤炭开采缺乏基本的回采设计与规划,因此现存老巷错综复杂。北祖矿 4+9 煤层埋藏深度较浅,分布在其内部的老旧巷道通过上部裂隙与地面贯通的可能性较大,同时老旧巷道内的遗煤较多,如果这些老巷具有一定的蓄热条件,极易发生煤炭自燃,对下部煤层的开采危害很大。北祖矿资源整合后,在 9209 机巷掘进过程中发现了煤炭自燃的迹象,第 2 次揭露旧巷时,上部漏顶并有煤屑掉落,煤屑呈暗红色,温度高达 100℃ 左右,通过球胆取样化验,检测出 CO 严重超标。为此,北祖矿也采取了密闭、喷浆的治理措施,虽取得了一定的治理效果,但由于该矿资源整合前的基础资料(例如矿图以及矿井通风网络图等)缺失,无法确定老巷的分布状况,普通打钻探测无法准确定位高温区域。

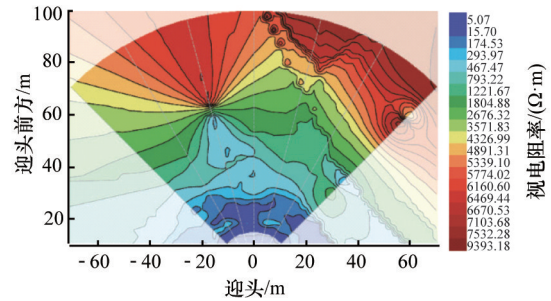
本次探测选用的瞬变电磁仪主要参数为:发射电流 2 A,频率 25 Hz,发射线圈 2×2 m×20 匝,线圈直径 0.6 m。要求发射线框、接收线框分别为匝数不等、且完全分离的 2 个独立线框,以便与煤层异常体产生最佳耦合响应^[16],从而准确探测出一定范围内煤岩视电阻率分布。

2.2 超前探测及结果分析

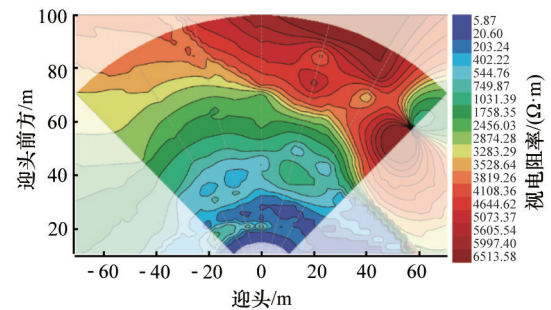
北祖矿 9209 风巷与 9211 机巷为相邻平行巷道,在 9209 风巷顶板煤层火区下方喷浆段对应的 9211 机巷 38 风筒处采用超前探测,并连续测量 3 次。9209 风巷与 9211 机巷的距离约 30 m,9211 机巷巷道高约 4 m,9209 风巷巷道顶板煤层厚度约 8 m,为更好地探测该煤层火区分布,考虑探测脉冲磁场尽可能通过煤层中部。经计算确定发射线圈、接收线圈与巷帮仰角为 15°。通过反演计算可形成超前探测视电阻率图,3 次超前探测的视电阻率图如图 5 所示。

观察 3 组超前探测数据,发现同一地点所测 3 组数据的图像变化较大,这与超前探测方式有关。由于探测线圈探测方向前后都有煤壁,接收信号为前后煤层中介质二次场的汇总,同时巷道底板上的铁轨、工字钢支护、锚杆支护及运输皮带支架等各种金属设施在瞬变电磁法探测中能产生很强的瞬变电磁响应^[17],因此超前探测适合于对巷道掘进迎头进行

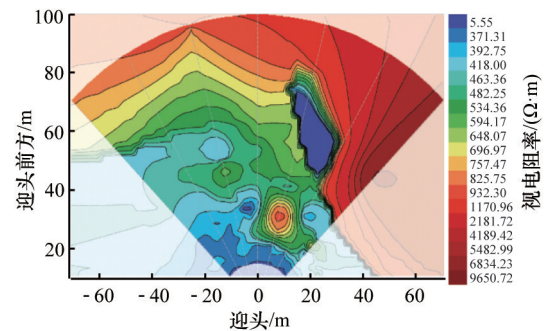
探测,若在巷道中对巷帮、底板和顶板进行探测,这些因素都会对探测准确度产生一定影响,对仪器干扰较大。



(a) 第 1 次探测



(b) 第 2 次探测



(c) 第 3 次探测

图5 超前探测视电阻率

Fig. 5 Apparent resistivity of advanced detection

观察 3 次连续超前探测形成的图像,发现扇形右部 60~100 m 范围视电阻率变化较大,在 80 m 附近出现明显的高、低视电阻率交界现象。这是由于地下火源的存在,火源产生的高温与高压使视电阻率在着火区域比较高,同时火源顶部岩层的裂隙会不同程度地增大,使得岩石孔隙中的水蒸气上升,并在火区煤层顶部某一层位富集,导致火区煤层上方介质湿度增大,形成一定的电性差异,使火区上方一定区域内视电阻率变小,因此在所呈现的视电阻率图中出现高、低视电阻率交界现象。

2.3 剖面探测及结果分析

2.3.1 剖面探测

结合超前探测结果,对 9211 机巷对应 9209 风巷喷浆段巷道区域及超前探测视电阻率分布扇形图右部区域采用剖面探测。为探测煤层火区分布,将剖面探测的探测方向确定

在9209风巷顶板煤层的顶部和底部,进行2次剖面探测,如图6所示。经计算2次剖面探测的探测线圈与巷壁夹角分别为9°及25°,角度布置局部如图7所示。火源区探测区域为9211机巷27风筒至36风筒,探测巷道长度为90 m;非火源区

探测区域为9211机巷38风筒至42风筒,探测巷道长度为40 m。通过反演计算形成剖面探测视电阻率图,夹角9°、25°时火源探测区域的视电阻率如图8所示;夹角9°、25°时非火源探测区域的视电阻率图如图9所示。

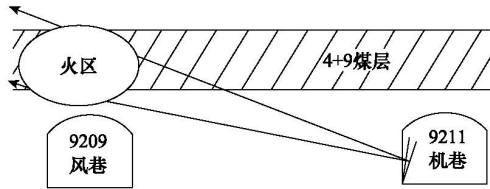


图6 剖面探测布置示意

Fig. 6 Layout of cross-section detection

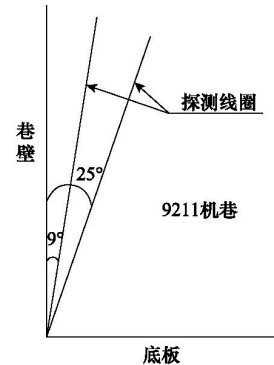
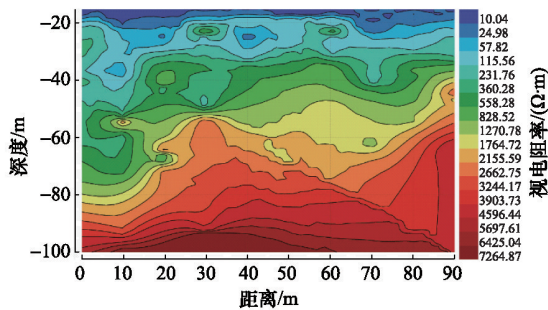
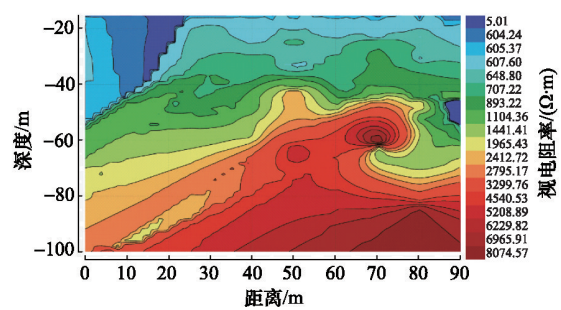


图7 剖面探测角度布置局部示意

Fig. 7 Partial layout of cross-section detection angle



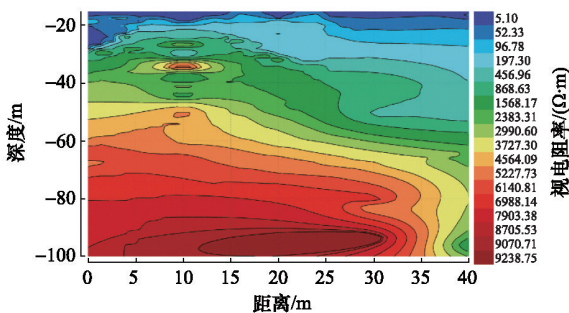
(a) 夹角9°



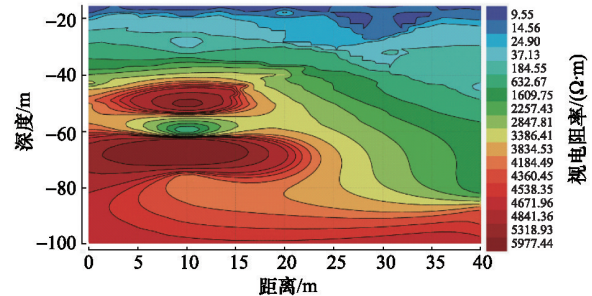
(b) 夹角25°

图8 火源区剖面探测视电阻率

Fig. 8 Apparent resistivity in cross-section detection at the fine source area



(a) 夹角9°



(b) 夹角25°

图9 非火源区剖面探测视电阻率

Fig. 9 Apparent resistivity in cross-section detection outside the fire source area

2.3.2 火源区探测图像分析

观察夹角9°和夹角25°的两组火源区图像。夹角9°,横向距离70~90 m范围内,整体视电阻率值由横向距离70 m处向90 m处递增。在横向距离90 m,深度40 m处,分布有明显高阻区域,视电阻率最高值达5697.61 Ω·m,表明该区域有火源存在。由于火源产生的高温、高压影响,火源周围介质形成一定的电性差异,使该区域的视电阻率明显增高。

夹角25°,横向距离0~20 m,深度20~40 m范围显示异常

低阻现象,视电阻率最低仅为5.01 Ω·m。该低阻现象与富水区域或含水采动裂隙有关,这与9211机巷25~28风筒处巷道顶板潮湿、底板有积水的实际情况相符。

夹角25°,横向距离60~80 m,深度40~70 m范围,有明显的高、低视电阻率交界现象,交界处的高、低视电阻率值相差6633.16 Ω·m,表明该范围有地下火源存在。由于火源产生的高温、高压影响,火源周围介质形成一定的电性差异,使该区域的视电阻率明显增高;同时火源顶部的岩层裂隙受高

温、高压影响也不同程度增大,岩石孔隙中的水蒸气上升,并在上方煤层某一层位富集,使水蒸气富集处介质湿度增大、从而使火源上方一定区域内视电阻率变小,因此火源区的视电阻率呈现高、低阻交界现象。

2.3.3 非火源区探测图像分析

为考虑9209风巷顶板上腹煤层火源区对附近煤层的影响,选择与火源区相隔30 m处区域进行非火源区探测。观察夹角 9° 、夹角 25° 两组非火源区图像,发现9211机巷40~43风筒对应斜上方非火源区煤层有较明显的异常现象。

夹角 9° ,横向距离5~15 m,深度30~50 m范围,视电阻率呈现高阻、低阻交界现象,视电阻率最高值为 $4564.09 \Omega \cdot m$,最低值为 $1568.17 \Omega \cdot m$,交界处高、低视电阻率值相差 $2159.13 \Omega \cdot m$ 。观察图像发现,非火源区高阻区域的视电阻率明显低于火源区。

夹角 25° ,横向距离0~25 m,深度40~80 m范围,视电阻率也呈现高阻、低阻交界现象,视电阻率最高值为 $5977.44 \Omega \cdot m$,最低值为 $632.67 \Omega \cdot m$,交界处高、低视电阻率值相差 $1927.06 \Omega \cdot m$ 。观察图像发现,非火源区高、低阻交界处的视电阻率差值明显小于火源区。

探测结果表明,火源区煤层燃烧时对附近非火源煤层也有较大影响,因此在探测的非火源区视电阻率图像中同样出现异常高阻区域和高、低阻交界现象,但其高阻值明显小于火源区。

3 结论

1) 采用发射线框、接收线框分别为匝数不等的2个独立回线,与顶板煤层火区异常体产生最佳耦合响应,提高信噪比,有利于异常体的识别。该装置与其他矿井物探方法相比具有轻便、快速、探测深度大和对低阻体反映灵敏等特点。

2) 瞬变电磁仪接收线圈接收的信号来自发射线圈周围全空间岩石电性的综合反映,在判断异常体空间位置时,需根据线圈平面的探测方向结合地质资料剔除各种干扰因素加以综合分析。

3) 通过瞬变电磁仪探测矿井巷道顶板煤层火区,反演计算形成超前和剖面视电阻率图,可以准确定位地下煤层火区范围,为后续的打钻探测及灌浆堵漏等矿井防灭火工程提供了科学依据。

参考文献(References)

- [1] 杨旭. 资源整合矿井封闭区域内自然发火危险区域探测与控制技术研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2012.
Yang Xu. The detection and control technology research of spontaneous combustion dangerous region of enclosed area of resources integration mine[D]. Liaoning: Liaoning Project Technology University, 2012.
- [2] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
Xu Jingcai. Coal spontaneous combustion dangerous area decision theory[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2001.
- [3] 苗润田, 周松江. 煤炭资源整合矿井的安全管理的探讨与对策[J]. 煤矿安全, 2010, 41(4): 142-144.
Miao Runtian, Zhou Songjiang. Discuss on coal resource integration of

- mine safety management and counter measures[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(4): 142-144.
- [4] 牟义. 矿井超前精细探测技术方法与应用[J]. 煤矿安全, 2012, 43(11): 88-91.
Mou Yi. Advanced precise detection method and application of mine[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(11): 88-91.
- [5] 于景邨, 刘志新, 刘树才, 等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 818-821.
Yu Jingcun, Liu Zhixin, Liu Shucai, et al. Theoretical analysis of mine transient electromagnetic method and its application in detecting water burst structures in deep coal stope[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 818-821.
- [6] Pantzer A, Vakahy A, Eliyahou Z, et al. Dopant mapping in thin FIB prepared silicon samples by off-axis electron holography[J]. Ultramicroscopy, 2014, 138(1): 36-45.
- [7] 李富, 廖国忠, 刘鑫明. 矿井瞬变电磁法在煤矿陷落区探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2013, 44(4): 155-158.
Li Fu, Liao Guozhong, Liu Xinming. The mine transient electromagnetic method in the application in the detection of coal mining subsidence area[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(4): 155-158.
- [8] Pirttijärvi M. Numerical modeling and inversion of geophysical electromagnetic measurements using a thin plate model[D]. Oulu: University of Oulu, 2003.
- [9] 程久龙, 邱浩, 叶云涛, 等. 矿井瞬变电磁法波场变换与数据处理方法研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1646-1650.
Cheng Jiulong, Qiu Hao, Ye Yuntao, et al. Research on wave-field transformation and data processing of the mine transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1646-1650.
- [10] 徐玉增. 瞬变电磁超前探测技术在葛泉矿掘进中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(7): 108-111.
Xu Yuzeng. Application of transient electromagnetic pilot exploration technology to mine heading in Gequan mine[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(7): 108-111.
- [11] 姜志海, 焦险峰. 矿井瞬变电磁超前探测物理实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1852-1857.
Jiang Zhihai, Jiao Xianfeng. Physical experiment of mine transient electromagnetic advanced detection[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1852-1857.
- [12] Kozhevnikov N O, Antonov E Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies[J]. Geophysical Prospecting, 2006, 54(4): 383-397.
- [13] 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.
Jiang Zonglin, Yu Jingcun, Sun Weitao. Study on mine transient electromagnetic method affected to full space response of low resistance body[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 107-110.
- [14] Filizadeh S, Heidari M, Mehrizi Sani A, et al. Techniques for interfacing electromagnetic transient simulation programs with general mathematical tools ieee taskforce on interfacing techniques for simulation tools[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2610-2622.
- [15] 任晓鹏. 煤矿多层采空区隐蔽火区精确定位技术研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(5): 135-138.
Ren Xiaopeng. Study of fire zone detecting techniques in gob areas of multiple-seam mines[J]. Coal Technology, 2013, 32(5): 135-138.
- [16] 余东俊. 瞬变电磁法(TEM)在隧道超前预报中的应用和效果研究[D]. 成都理工大学, 2010.
Yu Dongjun. The application of transient electromagnetic methods (TEM) in the tunnel advanced forecast and its effect research[D]. Chengdu University of Technology, 2010.
- [17] Abo Seleim A A S. Electromagnetic field of transient signals above a dielectric layer[J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 160(1): 261-267.

(责任编辑 韩星明)