

矿井巷道掘进电磁法超前探测技术研究现状

张平松 胡雄武

(安徽理工大学 地球与环境学院 安徽 淮南 232001)

摘要: 矿井巷道掘进前方地质条件预测是一项重要工作, 钻探和物探方法及其综合运用是目前超前探测的常用方法。以巷道掘进工作面电磁法超前探测技术为主, 对直流电法及瞬变电磁探查方法原理、技术装备改进和地质解释等方面所获得的进展进行了阐述, 其目标是提高单一方法技术对低电阻率异常的分辨能力, 并分析了电磁超前探测技术使用中存在的问题。结合方法技术、仪器设备、资料解释及定量评价等方面, 提出了今后煤矿井下电磁法综合超前探测技术发展的认识和思考。由单一方法探测到多参数监测, 由综合解释到多场数据联合反演, 由定性到定量地质解释, 不断提高探查的准确率是未来技术发展的方向。

关键词: 超前探测; 电磁方法; 巷道掘进; 矿井

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)01-0112-04

Research status on technology of advanced detection by electromagnetic methods in mine laneway

ZHANG Ping-song, HU Xiong-wu

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Forecasting geology conditions of laneway ahead is a key work in mine production. Now the drilling and geophysics methods, as well as comprehensive application are the common methods to do advanced detection during the driving period. In the article, taking the advanced detection technology by electromagnetic method in the driving working face of mine as the principal thing, the obtaining progress of direct current electric method and transient electromagnetic method is elaborated about the method principle, improvement of technical equipment and geological interpretation and so on. And the existing related issues for application of the electromagnetism advanced detection technology are analyzed. Combining with method and technique, instrument and equipment, data interpretation and quantitative evaluation, the understanding and thought for the future development of electromagnetic integration method and technology in mine are proposed technically. From single method detection to multi-parameter monitor, from comprehensive interpretation to joint inversion with multi-field data, from qualitative to quantitative geological interpretation and to improve continually the exploring precision of advanced detection are the technique developing direction in the future.

Key words: advanced detection; electromagnetism method; drivage; mine

0 引 言

随着煤矿开采深度不断增加, 水害事故逐渐增多。依据《煤矿防治水规定》要求, 矿井须采用直流电法、瞬变电磁法等物探方法进行掘进巷道的超前探查, 并采用钻探方法对物探结果进行验证。目前,

煤矿井下巷道水害隐患超前探测的电磁法主要包括直流电阻率法和瞬变电磁法^[1-7]。在直流电阻率法探测方面, 自20世纪90年代以来, 岳建华等^[8]针对煤矿井下电磁法测深原理、探查技术及干扰因素等进行了系列研究, 文献[9-10]分别对直流三点源超前探测技术进行试验研究, 刘盛东等^[11]提出并行电

收稿日期: 2014-11-03; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.01.027

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51134012)

作者简介: 张平松(1971—), 男, 安徽六安人, 教授, 博士。Tel: 13955433071, E-mail: pszhang@sohu.com

引用格式: 张平松, 胡雄武. 矿井巷道掘进电磁法超前探测技术研究现状[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 112-115, 119.

ZHANG Ping-song, HU Xiong-wu. Research status on technology of advanced detection by electromagnetic methods in mine laneway[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 112-115, 119.

法数据采集技术提升了井下数据采集效能,文献[12-19]对直流电法超前探测方法、数据处理技术等进行了深入研究,指出了各种探测技术的适用性。在瞬变电磁法探测方面,文献[20-30]围绕矿井巷道瞬变电磁法超前探测技术进行了不同程度的研究,使得瞬变电磁探测技术得以快速发展与应用。目前,上述2种方法或独立或同时采用,对巷道掘进前方地质条件进行探查分析与预报,为钻探及生产提供有效指导。但是,受井下条件及技术本身的限制,电磁类超前探测方法技术在应用过程中,还存在诸多问题,其探测分辨能力与掘进生产的安全要求存在一定差距,需要广大物探技术人员共同努力,不断推进矿井地球物理探查技术的发展。

1 巷道超前探测技术

1.1 直流电法超前探测技术

1) 方法原理。依据单极—偶极电阻率法测量原理,利用单点电源 A 供电, B 极置于“无穷远”,点源 A 形成的等位面为球面。依据球壳理论,通过测量电极 M 、 N 之间的电位差,即 MN 所夹球壳内岩体的综合电性响应(图1)。在均匀介质中,用测量极距 MN 对任意一点 O 进行探测时,实际上是探测以 A 点为球心, AO 为半径,厚度为 MN 的球壳体积的介质电阻率。根据球对称原理,在 MON 处探测,等同于探测对称供电点前方的 $M'O'N'$ 处结构体的电性变化。因此,采集巷道后方多个供电测量对电位值,经过数据校正,依据测深电阻率进行几何交汇,可以确定低电阻率位置,为超前探放水提供靶区。

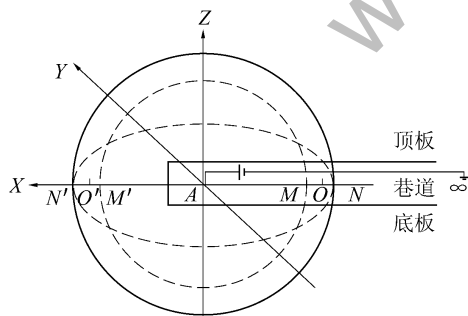


图1 点源超前探测示意

2) 研究进展。在前人研究基础上,经过对测试装置、仪器设备、数据处理方法进行改进,构建巷道掘进地质条件数值和物理模型进行试验研究,并对掘进工作面进行连续跟踪探测与分析,取得了一些新的认识^[30-33]。例如在测试装置中结合巷道特点,提出巷道有限空间内立体电阻率数据采集系统,

可以利用任意供电测量对观测;设计井下巷道煤岩壁快速耦合电极,采用并行电法仪器进行数据采集,能够提高数据采集质量及效率;通过巷道空腔、测量电极异常、层状空间等影响因素校正处理,实现三维空间偏移成像、电阻率比值处理等,能够获得前方地质条件高分辨成像结果。图2为三维偏移电阻率结果图像,图3为淮南某矿实际探测电性剖面,其中10~20 m处的相对低电阻率区,实际揭露时出现顶板严重淋水现象。

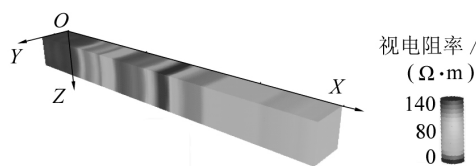


图2 三维偏移电阻率成像

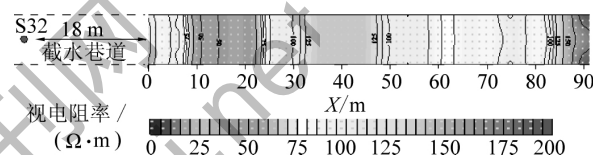


图3 2013年7月9日巷道超前探测结果

3) 存在问题。目前,直流电法超前探测技术可以对巷道掘进前方100 m内的含导水构造、破碎带、岩溶水、老空区水等进行探测,但对地质体含水异常特征判断的准确性有待进一步提高。在巷道全空间的探测条件下,以球壳理论为基础的超前测试方式需要改进,因为这种方式数据采集时,在掘进工作面后方供电时前方介质中超前电流线分布偏少,探测介质条件不满足球壳理论中均质条件,加上各种干扰因素多,造成真假异常识别难。孔-巷联合、聚焦式供电等方法将成为今后的发展方向。

1.2 瞬变电磁法超前探测技术

1) 方法原理。瞬变电磁法是通过在发送回线上供一个电流脉冲方波,在方波后沿下降的瞬间,产生一个向回线法线方向传播的一次磁场;在一次磁场激励下,探查介质将产生涡流,其大小取决于前方介质的导电程度;在一次场消失后,该涡流有一个过渡的衰减过程。该过程又产生一个衰减的二次磁场向掘进工作面传播,由接收回线接收二次磁场,该二次磁场的变化将反映前方介质的电性特征(图4)。如按不同的延迟时间测量和记录二次感应电动势 V ,得到二次磁场随时间衰减的特性曲线。前方无良导体时,曲线衰减较快,前方存在良导体时,所观测到的过渡过程衰变速度将变慢,据此进行电阻率计算,可以探测巷道前方的低电阻体。

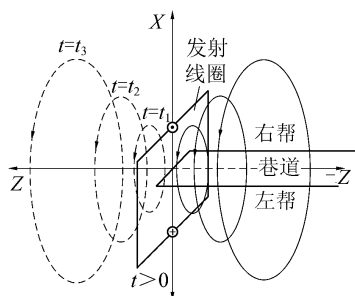
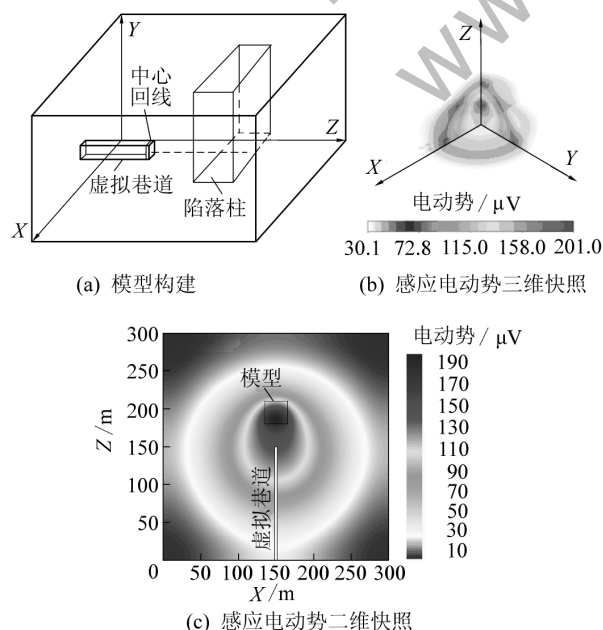


图 4 全空间瞬变电磁场电流扩散图

2) 研究进展。通过对巷道瞬变电磁探测常规理论及解释方法分析,推导了多匝方形小回线源瞬变场的阶跃响应公式;对 Maxwell 方程组利用时域有限差分算法,模拟了不同含水介质模型瞬变场的全空间扩散规律及回线中心异常场响应特征;在数据采集系统、处理与解释方法研究中,通过对仪器主机功能及参数、回线装置形式及阻尼状态进行优化与匹配,设计挂帘式、布毯式线框,降低互感,提高瞬变场数据采集精度,增强早、中延时段数据的采集质量。结合巷道测试条件,推出四断面超前探测布置方式,增强对现场数据的观测力度。推导全空间条件下全程视电阻率计算方法,并通过对扇形观测条件下,不同角度测点在巷道前方形成的烟圈交汇特征分析,完成视电阻率扩散叠加处理方法^[34-39]。同时,在淮南、淮北矿区完成多条煤巷、岩巷跟踪探测,对煤岩层含水特征电阻率判断进行总结。图 5 为构建的陷落柱模型及其正演模拟结果。图 6 为井下水仓测试的感应电动势变化曲线。可以看出,近距离

图 5 陷落柱模型及 $t=2\ 500\ \mu\text{s}$ 时感应电动势快照

含水体的瞬变场起始响应时间非常早且响应弱,实际探测时互感等已严重影响浅部弱含水体的分辨能力。随着水仓内水量 q 的减小,响应幅值速降,表明水量对瞬变场响应幅值具有决定的作用。

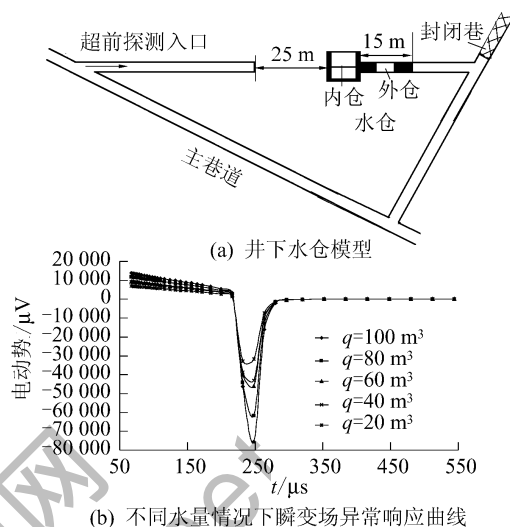


图 6 井下水仓模型试验

3) 存在的问题。瞬变电磁数据采集为非接触,井下操作便捷,但其极易受到金属物干扰。由于采集精度及参数不同,不同厂家生产的仪器对水体的捕捉能力有差别。受方法本身所限,根据感应电动势进行视电阻率计算方法不完善,对探查深度控制不准确,具有一定的经验性;岩层含水类型不同,总的水体感应电动势相对较弱,分辨能力差,其定性与定量解释难度大。

2 电磁法综合超前探测

巷道掘进工作面后方探查的场地有限,所要解决的多灾源地质问题多,且具有复杂性、危害性和隐蔽性,处于三维空间作业,目标体的定位难度大;电磁、环境等干扰因素多,信噪比变化大;这些探测的制约因素会长期存在,这一切都会影响探查效果。目前,利用电磁综合超前探水取得了长足的进步。从综合探测实践分析,认为电磁法技术理论是基础,数据采集装备是关键,解释验证阶段必不可少。在进行多属性参数综合分析、定量评价、探测监测方式转变等方面也需要探讨,逐步提高超前预报的准确率和控制力。

1) 在方法技术方面,针对直流电法超前探测球壳理论中均质条件、超前深度确定、地电场空间数据获取以及电阻率异常判断标准等方面存在不足;瞬变电磁法从地面应用到井下,改由多匝数小边长线

框进行信号发射和接收,其在技术原理层面、数据采集系统、电阻率计算、深度校正、异常判定、地质对应等方面仍需要继续深入研究。巷道掘进工作面前方含水异常体类型多,空洞集中储水型、导水断层带型、导水陷落柱型或是砂岩裂隙含水型等各不相同,需要利用数值、物理模型,以及井下实际含水介质条件进行试验研究,这一切对完善方法至关重要。

2) 在仪器设备方面,井下瞬变电磁法仪器受矿井条件限制,其多干扰、小线框、小功率要达到长距离的探测目标,仪器必须能够在高噪声条件下拾取不同距离水体的弱感应信号,否则后续视电阻率计算及反演均是无用的。直流电法如果能与掘进设备一起,如 TBM 钻机嵌入聚焦电流技术,由单次探测转变为连续监测,不追求单次探测距离,提高对近距离地质条件的分辨率,将增强对前方地质条件的实时性^[40-41]。

3) 在资料解释或反演方面,采用电磁法进行综合超前探测时,目前主要是依据单一方法结果进行解释,取二者共同低阻异常区段,但两者通常不能有效统一。考虑两者均为介质电性特征反应,因此由联合解释到两类数据的联合反演,可进一步提高对目标体解释与判断的准确率。

4) 在定量评价方面,目前还处于探索初期,这其中最主要的是地质条件的多样化、不确定性、电阻率判断的体积效应影响等。试图构建岩层电阻率值与含水量之间的对应关系难度大,通用性差,更难实现按钻孔单位涌水量,来划分异常体富水性的级别。但是,通过对某矿区多次测试与探采对比分析,可以根据经验总结地电参数,摸索利用电阻率预报富水区域的阈值,这需要软件开发与地质条件结合,增强辅助判别能力。

3 结 语

利用电磁方法进行巷道掘进工作面超前探测工作,目前已在矿井安全生产中发挥着重要作用,瞬变电磁法作为非接触式探测其推广速度快,应用面较广。但是,受井下探测环境条件所限,电磁方法对掘进工作面前方地质条件探查与预报的准确性仍有待提高。今后的探测工作中各方技术人员需加强合作,在提高地球物理场数据采集、处理能力的基础上,资料解释需要与地测防治水人员紧密结合,力争实现对掘进工作面前方的实时观测,这样就可为巷道安全掘进提供可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 董书宁. 对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 66-71.
- [2] 程建远, 李浙龙, 张广忠, 等. 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(2): 96-111.
- [3] 韩德品, 赵 锴, 李 丹. 矿井物探技术应用现状与发展展望[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1839-1841.
- [4] 陆其鹤, 吴天彪, 林 君. 地球物理仪器学科发展研究报告[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 750-758.
- [5] 刘盛东, 刘 静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 19-25.
- [6] 程久龙, 李 飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742-1750.
- [7] 李术才, 刘 斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [8] 岳建华, 刘树才, 刘志新. 巷道直流电测深在探测陷落柱中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 479-481.
- [9] 程久龙, 王玉和, 于师建. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4): 60-62.
- [10] 刘青雯. 井下电法超前探测方法及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 60-62.
- [11] 刘盛东, 张平松. 分布式并行智能电极电位差信号采集方法. 中国: ZL200410014020.0[P]. 2006-04-20.
- [12] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1529-1538.
- [13] 高致宏, 闫 述, 王秀臣. 巷道超前(电法)探测的应用现状与存在的问题[J]. 煤炭技术, 2006, 25(5): 120-121.
- [14] 韩德品. “地质-电法-测温”多参数综合超前探测技术及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1549-1506.
- [15] 张平松, 刘盛东, 曹 煜. 坑道掘进立体电法超前预报技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(2): 50-53.
- [16] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3093-3101.
- [17] 韩德品, 李 丹, 程久龙. 超前探测灾害性含水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.
- [18] 牟 义, 丰 莉, 姜国庆. 基于矿井电法的矿井水害超前探测技术研究[J]. 煤炭工程, 2013(5): 109-111.
- [19] 杨德鹏, 翟培合, 邢子浩, 等. 井下三维高密度电法超前探测技术在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 71-73.
- [20] 薛国强, 宋建平. 线性规划法在瞬变电磁成像中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(12): 1315-1316.
- [21] 刘树才, 刘志新, 姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414-417.
- [22] 岳建华, 姜志海. 矿井瞬变电磁探测技术与应用[J]. 能源技术与管理, 2006(5): 72-75.
- [23] 于景邨, 刘志新, 刘树才. 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.

(下转第 119 页)

通过偏移成像技术进行能量汇聚后,可在图 4 中观察到掘进机震动信号关于此断层形成的虚震源 2 与虚震源 3,这表明以掘进机为震源的随采地震技术有潜力探测到煤层中的断层。

5 结 语

在本次试验中,用掘进机作为震源进行井下地震反射波勘探,对巷道的成像结果非常清晰,这表明随采地震技术有潜力用采煤机的工作震动替代炸药震源,实现采掘与探测同步、探测保障采掘的技术构想。但文中对断层反射波的成像尚不够清晰明确,不能直接辨识出来自断层的反射波。这一方面与断层面的倾角复杂、反射面平整度不够好、反射系数相对较弱有关,另一方面也需要在处理与成像技术上开展进一步的研究与摸索。

参考文献:

- [1] Buchanan D J, Mason I M, Davis R. The coal cutter as a seismic source in channel wave exploration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, 18(4): 318-320.
- [2] Westman E C, Harnay K Y, Rock A D. Seismic tomography for longwall stress analysis[C]//In Proc 2nd North Am Rock Mech Symp, Montreal, QC, 1996: 397-403.
- [3] Westman E C, Peterson S C, Heasley K A *et al.* A correlation between seismic tomography, seismic events and support pressure [C]//In Proc 38th Rock Mech Symp, Washington DC, 2001: 319-326.
- [4] Luo X, King A, Van de Werken M. Sensing roof conditions ahead of a longwall mining using the shearer as a seismic source[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 17-20.
- [5] King A, Luo X. Methodology for tomographic imaging ahead of mining using the shearer as a seismic source[J]. Geophysics, 2009, 74(2): 1-8.
- [6] Luo X, King A, Van de Werken M. Tomographic imaging of rock conditions ahead of mining using the shearer as a seismic source - a feasibility study[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(11): 3671-3678.
- [7] 陆 斌,程建远,胡继武,等. 采煤机震源有效信号提取及初步应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2202-2207.
- [8] Lu B, Cheng J Y, Hu J W *et al.* Seismic features of vibration induced by mining machines and feasibility to be seismic sources [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011(3): 76-85.
- [9] Taylor N, Merriam J, Gendzwil D *et al.* The mining machine as a seismic source for in-seam reflection mapping [C]//Proc 71st SEG Annu Meeting, Expanded Abstract, San Antonio, TX, 2001: 1365-1368.
- [10] Ashida Y. Seismic imaging ahead of a tunnel face with three component geophones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 823-831.
- [11] 陆 斌. 以掘进机为震源对煤矿断层进行超前探测[C]//中国地球物理 2013-第二十四分会论文集. 昆明: 中国地球物理学会, 2013.
- [12] 张平松,刘盛东,吴健生. 坑道掘进空间反射波超前探测技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1331-1335.
- [13] 张平松,李永盛. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 135-140.
- [14] 张平松,刘盛东,李培根. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1107-1114.
- [15] 张平松,李永盛. 坑道掘进瞬变电磁超前探水技术应用分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2749-2753.
- [16] 张平松,程 桦. 巷道掘进瞬变电磁法跟踪超前预报分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 919-923.
- [17] 胡雄武,张平松,程 桦,等. 井下瞬变电磁法超前探测中锚杆干扰定量评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 3275-3282.
- [18] 胡雄武,张平松,严家平,等. 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 654-661.
- [19] 胡雄武,张平松,严家平,等. 矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 925-931.
- [20] 周 丽,阮百尧,宁绍球. 聚焦电流法隧道超前探测模型实验[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 40-42.
- [21] 何 磊,张连恒,张彦科,等. 中关铁矿掘进巷道综合防治水技术研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(2): 133-136.
- [22] 刘志新. 矿井瞬变电磁场分布规律与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [23] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机制与技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [24] 杜庆丰. 瞬变电磁法工作装置、数据预处理及反演解释系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [25] 杨海燕. 矿用多匝小回线源瞬变电磁场数值模拟与分布规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [26] 谭代明. 隧道超前探水全空间瞬变电磁理论及其应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [27] 胡 博. 矿井瞬变电磁场数值模拟的边界元法[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [28] 杨海燕,邓居智,吴信民. 瞬变电磁法超前预报全空间解释技术研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36(2): 199-203.
- [29] 胡雄武,张平松. 矿井多极供电电阻率法超前探测技术研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1709-1715.
- [30] 胡雄武,张平松. 深部矿井电阻率法超前探测多极偏移处理与应用[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 21-24.

(上接第 115 页)

- [24] 刘志新. 矿井瞬变电磁场分布规律与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [25] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机制与技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [26] 杜庆丰. 瞬变电磁法工作装置、数据预处理及反演解释系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [27] 杨海燕. 矿用多匝小回线源瞬变电磁场数值模拟与分布规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [28] 谭代明. 隧道超前探水全空间瞬变电磁理论及其应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [29] 胡 博. 矿井瞬变电磁场数值模拟的边界元法[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [30] 杨海燕,邓居智,吴信民. 瞬变电磁法超前预报全空间解释技术研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36(2): 199-203.
- [31] 胡雄武,张平松. 矿井多极供电电阻率法超前探测技术研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1709-1715.
- [32] 胡雄武,张平松. 深部矿井电阻率法超前探测多极偏移处理与应用[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 21-24.

- [33] 张平松,李永盛. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 135-140.
- [34] 张平松,刘盛东,李培根. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1107-1114.
- [35] 张平松,李永盛. 坑道掘进瞬变电磁超前探水技术应用分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2749-2753.
- [36] 张平松,程 桦. 巷道掘进瞬变电磁法跟踪超前预报分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 919-923.
- [37] 胡雄武,张平松,程 桦,等. 井下瞬变电磁法超前探测中锚杆干扰定量评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 3275-3282.
- [38] 胡雄武,张平松,严家平,等. 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 654-661.
- [39] 胡雄武,张平松,严家平,等. 矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 925-931.
- [40] 周 丽,阮百尧,宁绍球. 聚焦电流法隧道超前探测模型实验[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 40-42.
- [41] 何 磊,张连恒,张彦科,等. 中关铁矿掘进巷道综合防治水技术研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(2): 133-136.