

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.16

瞬变电磁法在煤矿不明采空区积水探测中的应用

题正义, 张小双, 乔 宁, 迟 磊, 潘 进, 陈 鹤, 张璐宇
(辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了减少煤矿透水事故的发生, 采用瞬变电磁法对不明采空区积水情况进行探测。瞬变电磁对低阻反映异常灵敏, 能够依据视电阻率的变化来判断采空区的积水性, 提高了对采空区及其积水情况的探测效果。在现场踏查以及资料分析的基础上推测早期矿井对各个煤层的开采情况; 根据瞬变电磁法工作原理以及采空积水区地球物理特征确定了对测试结果的解释方法, 然后对典型测线多测道电压剖面图、视电阻率拟断面图、典型测道等电压值平面图和等视电阻平面图进行分析, 确定 2# 和 6# 煤层的采空积水区的位置和范围。

关键词: 采空区; 积水区; 瞬变电磁法; 视电阻率

中图分类号: TD163+.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0102-06

Transient electromagnetic method applied to the detection of unknown goaf water in coal mine

TI Zhengyi, ZHANG Xiaoshuang, QIAO Ning, CHI Lei, PAN Jin, CHEN He, ZHANG Luyu
(Liaoning Technical University College of Mining Engineering, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to reduce the happening of water inrush accident in coal mine, the transient electromagnetic method is adopted to explore unknown goaf water situation. Transient electromagnetic was sensitized to low resistivity anomalies reflect, could determine goaf water accumulated areas according to change of apparent resistivity, improved the detection effect of goaf and water accumulated areas. Through reconnaissance survey and based on the analysis of the data to speculate the mining state in the early of each coal seam mining; According to the working principle of the transient electromagnetic method and the geophysical characteristics of goaf water determined the analysis method of test results, and then analyzed the voltage profile and apparent resistivity profile on the typical line of more tests and equal voltage planar graph and equal visual resistance planar graph on the typical test, determined 2# and 6# coal seam goaf water accumulated areas position and scope.

Keywords: goaf; water accumulated areas; transient electromagnetic method; apparent resistivity

0 引言

近年来,煤矿透水事故时有发生,严重威胁井下工作人员的生命安全。许多小煤矿和煤窑乱采乱掘,严重破坏了资源赋存状况,在采掘过程中没有保留下来采掘资料,形成了许多不明采空积水区,对矿井下采煤带来了极大的安全隐患。为了确保安全生产,采用先进的探

测手段探明不明采空区分布及积水情况是所需要解决的首要问题。目前常用的探测采空区的方法主要包括钻探法、物探法、微重力勘探法、采空区三维激光扫描法。物探法主要包括电法^[1-6]、地震法^[7-11]、电磁法^[12-15]。依据胜利矿的现状,在现场踏查以及资料分析的基础上推测早期矿井对各个煤层的开采情况,然后应用瞬变电磁法对不明采空区积水情况进行探测分析。

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-06-28

第一作者: 题正义(1957-),男,吉林舒兰人,教授,主要研究方向为煤矿“三下”开采、矿井灾害防治、矿业系统工程等。E-mail: 148178425@qq.com

通讯作者: 张小双(1990-),男,河南南阳人,主要研究方向为矿井灾害防治。E-mail: 1336538209@qq.com

研究成果将对矿井的防治水具有实际应用价值,同时也为开采其它具有类似情况的矿井带来借鉴意义。

1 矿井概况

胜利矿井田由龙达飞煤矿和西郭煤矿的一部分重组而成。井田及周边存在着开采年份和大小不等的小煤矿,井口数目高达45个之多。井田内主要可采煤层为2#、6#和10#煤层,其中2#煤层为全区发育、基本采空的薄-中厚煤层;6#煤层为井田内局部发育的薄煤层;10#煤层为全区发育的中厚-厚煤层,是矿井计划开采的煤层。为了保证矿井对10#煤层的安全开采,避免发生矿井透水事故,探测2#和6#煤层采空区的位置及积水情况显得尤为重要。

2 早期煤矿开采范围推断

龙达飞矿井只在2#层和10#层有采掘活动;井田范围内的2#煤层基本开采完毕;井田范围内的6#煤层并未进行采掘;10#煤层只掘进了部分采准巷道,并未进行开采;2#煤层开采期间涌水量不大,形成积水的方式是逐渐积累,通道可能是断层和煤层顶板导水裂隙带,补给水源是刁底河与融雪,以及上部含水层;采空区是否积水,何处积水及其水量不详。

西郭煤矿主要开采10#煤层,且已开采完毕,井田范围内10#煤层都成为采空区;2#煤层基本未采;6#煤层可采边界位于井田西部边界附近,距离井田中央较远,单独为少量储量进行开拓布置不经济,因此,西郭矿应该没有开采6#煤层。基于以上信息,龙达飞煤矿和西郭煤矿对2#煤层的开采状态初步推断见图1。

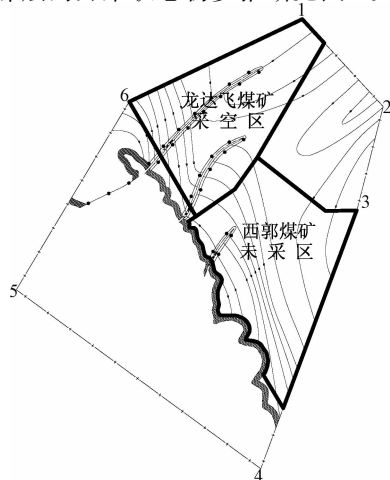


图1 龙达飞、西郭煤矿对2#煤层开采状态的推断

Fig.1 Inference on the mining state of 2# coal seam in Long Dafei and Xi Guo coal mine

3 瞬变电磁法原理及探测资料解释方法

3.1 瞬变电磁法原理

瞬变电磁法是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲电磁场,在一次脉冲电磁场间歇期间,利用不接地线圈或接地电极观测二次涡流场的方法^[16]。其原理是:在地面或井下设置一定的波形电流发射线圈,从而在其周围空间产生一次磁场,并在地下导电岩矿体中产生感应电流。断电后,感应电流由于热损耗而随时间衰减^[17]。衰减过程一般分为早、中和晚期。早期的电磁场相当于频率域中的高频成分,衰减快,趋肤深度小,而晚期成分则相当于频率域中的低频成分,衰减慢,趋肤深度大。通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律,可得到不同深度的地电特征。

在导电率为 σ 、导磁率为 μ_0 的均匀各向同性大地表面上铺设面积为 S 的矩形发射回线,在回线中供以阶跃脉冲电流 $I(t)$,其中:

$$I(t) = \begin{cases} I & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

在电流断开之前,发射电流在回线周围的大地和空间中建立起一个稳定的磁场。在 $t=0$ 时刻,将电流突然断开,由该电流产生的磁场也立即消失。一次磁场的这一剧烈变化通过空气和地下导电介质传至回线周围的大地中,并在大地中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间的磁场不即刻消失。由于介质的热损耗,直到将磁场能量消耗完毕为止^[17-18]。

根据已有的研究结果得出,任一时刻地下涡旋电流在地表产生的磁场可以等效为一个水平环状线电流的磁场。在发射电流刚关闭时,该环状线电流紧挨发射回线,与发射回线具有相同的形状。随着时间推移,该电流环向下、向外扩散,并逐渐变形为圆电流环。等效电流环像从发射回线中“吹”出来的一系列“烟圈”,因此,人们将地下涡旋电流向下、向外扩散的过程形象地称为“烟圈效应”^[18]。“烟圈”的半径为 r 、深度为 d 的表达式分别为:

$$r = \sqrt{8c_2 \cdot t / (\alpha \mu_0 + a^2)} \quad (2)$$

$$d = 4 \sqrt{t / \pi \alpha \mu_0} \quad (3)$$

式中: a 为发射线圈半径, $c_2 = 8/\pi - 2$ 。当发射线圈半径相对于“烟圈”半径很小时,可得 $\tan \theta = d/r \approx 1.07$, $\theta \approx 47^\circ$ 。故“烟圈”将沿 47° 倾斜锥面扩散,其向下传播的速度为:

$$v = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi \sigma \mu_0 t}} \quad (4)$$

3.2 探测资料解释方法

根据地面探测的各测线的多测道电压剖面图和拟视电阻率断面图,对 2#煤层和 6#煤层的赋存状态进行分析和推断。

本次解释分析的目的主要包括两个方面的内容,一是积水区的存在与否,二是积水区的范围,即各测线积水区的始点和终点位置。因此,基于对瞬变电磁法的理解,提出以下解释方法。

3.2.1 积水区的推断方法

在推断是否存在积水区时,同时对多测道电压剖面图和拟视电阻率断面图进行观察。

(1) 首先在拟视电阻率断面图上,沿煤层的一端向另一端搜索,寻找有无从高阻区向低阻区过渡,然后又从低阻区进入高阻区的现象;或者存在由低阻区向高阻区过渡,然后又进入低阻区的现象。若存在以上现象,则选择出处于低阻区的区段,在多测道电压剖面图上观察对应区段煤层所处位置的电压值,如果该处电压值明显高于两端,则此段应是积水区。

(2) 首先在多测道电压剖面图上,在煤层所在的位置(由测试结果可知,煤层位于 16#测道附近),从一端向另一端搜索,寻找有无电压升高段。如果存在,就在拟视电阻率断面图上观察对应煤层段的视电阻率值。如果该段处于低阻区,那么就应是积水区。

3.2.2 积水区边界(端点)的确定

由探测方法的工作原理可知,某一特征区域两端的电压和电阻率不会出现急剧的变化,而是存在一个长度不一的过渡区,这就给积水区边界的判断带来一定的困难。实际采空区积水的边界基本有两种情况,一是在有实体物阻隔时,边界清晰;二是水深逐渐变浅,直至无水,边界模糊。因此,边界判断通常与解释人的经验和对矿井相关资料掌握程度有关。在本次解释分析过程中,把过渡区内视电阻率的平均值作为边界判定的依据。

4 探测参数及探测结果分析

4.1 2#煤层探测参数及探测结果分析

4.1.1 2#煤层探测范围及参数的确定

根据首采区范围,确定勘探区为长 1 840 m,宽 700 m 的长方形,勘查面积为 1.288 km²(图 2)。

测线、测点以“由西向东,由南向北”的方向布置。测线和测点之间的间距皆为 20 m。由西向东排列设

置 93 条测线,测线长度为 700 m,各测线上布置由北向东排列的 36 个测点。总计布置测点 3 348 个,测线总长度为 65 100 m。

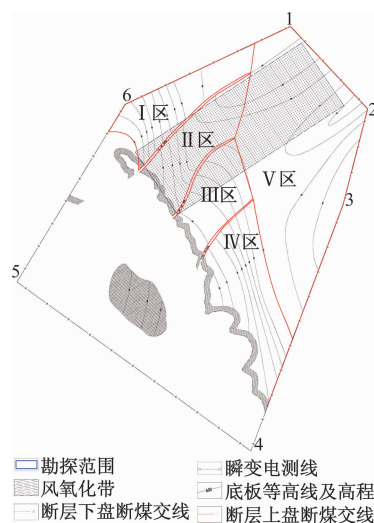


图 2 2#煤层测线测点工程布置图

Fig. 2 Engineering plan of measuring line and point in 2# Coal Seam

4.1.2 探测区 2#煤层采空积水区范围分析

探测仪器为地矿部廊坊物化探研究所生产的 IGGTEM-30B 型瞬变电磁仪。在经过探测参数试验、定点定线测量、工作量及其质量评价、根据采空积水区地球物理特征确定了测试结果解释方法、典型测线多测道电压剖面图和视电阻率拟断面图分析、典型测道等电压值平面图和等视电阻平面图分析、以及直流激电测富水性等工作之后,对探测区内 2#煤层的采空积水区的位置和范围进行了分析,分析结果见图 3。

由图 3 可以看出,勘探区内存在 5 处采空积水区,分别为 1 区、2 区、3 区、4 区和 5 区。1 区为 41~47 测线的 1~22#点,面积为 33 800 m²;2 区为 41~45 测线的 31~36#点,面积为 5 400 m²;3 区为 71~77 测线的 20~31#点,面积为 11 100 m²;4 区为 80~84 测线的 17~36#点,面积为 34 400 m²;5 区为 75~88 测线的 1~15#点,面积为 54 500 m²;其中,1 区和 2 区的解释可靠性高,3 区、4 区和 5 区的解释可靠性为中等。

4.2 6#煤层探测参数及探测结果分析

4.2.1 6#煤层探测范围及参数的确定

由于瞬变电磁法的反演深度最大可达 200 m,而 6#煤层埋深在 80~180 m 之间,6#煤层恰好为反演深度范围内,因此也可以对 6#煤层进行探测。从探测得到的各测线多测道电压剖面图和拟视电阻率断面图可以看出,6#煤层附近的电压和视电阻率变化仍能在一定

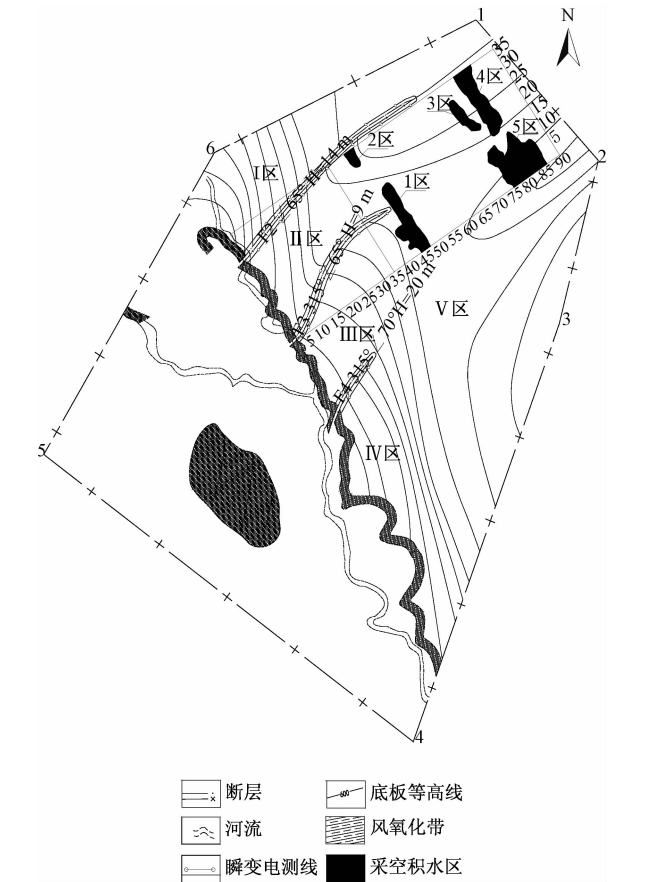


图 3 2#煤层瞬变电磁法物探采空积水区成果图

Fig.3 Results chart of geophysical prospecting in goaf water area through transient electromagnetic exploration method in 2# Coal seam

程度上反映 6#煤层的状态。因此,为充分利用本次探测结果,根据瞬变电磁法测试原理尝试对其采空积水区进行分析,为胜利矿在生产过程中提供参考。且 6#煤层距胜利矿开采的 10#煤层较近,若存在采空区积水,要大于 2#煤层积水对 10#煤层的安全开采威胁程度。各测线和测点在 6#煤层的分布见图 4。

4.2.2 6#煤层典型曲线分析

从位于 6#煤层可采范围内的 63 条测线中选出 3#测线进行分析。

多测道电压剖面图以测点为横坐标,归一化电压 $V(t)/I$ 值为纵坐标,将相同的 $V(t)/I$ 值相连成线。图中低值响应部分为高阻层,高值响应部分为低阻层。拟视电阻率断面图以测点为横坐标,深度为纵坐标,将各测点不同采样时间经反演所得到的视电阻率值,经网格化后绘制成图。

在多测道电压剖面图上(图 5a),中、晚期测道无明显“高电压异常”,同时拟视电阻率断面图上(图 5b),

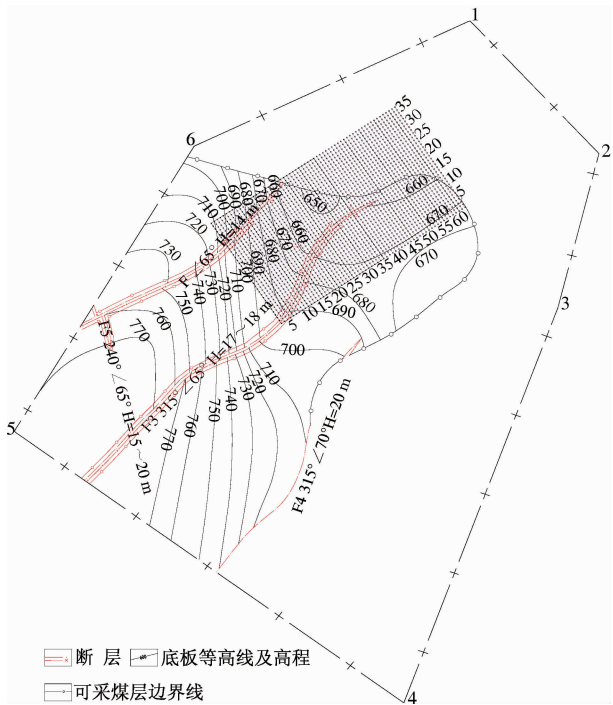


图 4 6#煤层测线测点工程布置图

Fig.4 Engineering plan of measuring line and point in 6# coal seam

视电阻率由浅到深逐渐升高,等值线呈近水平层状分布,并随着地层的起伏而表现出高低变化,标高 690 m (6#煤层大致位置)左右时,无明显的低阻异常,结合调查的煤矿采空区资料综合分析认为,该测线无采空积水反映。图中加粗黑线和红线表示煤层所在大致位置。

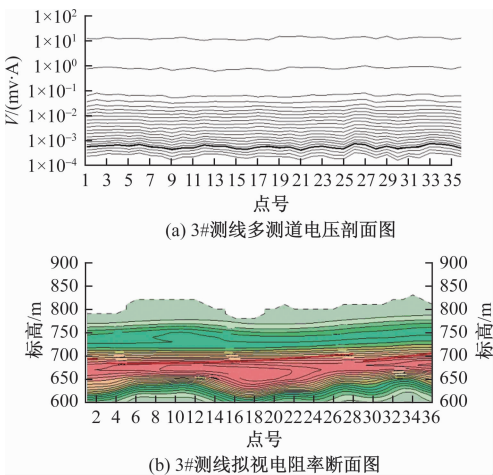


图 5 3#测线瞬变电磁法探测成果图

Fig.5 Detection results chart of transient electromagnetic method of 3# measuring line

4.2.3 探测区 6#煤层采空积水区范围分析

在逐一分析 63 条测线之后,把各测线上判定的属

于采空积水区的煤层与测线剖面相交的线段按其相应的位置绘制到 6#煤层底板等高线图,并将连成一片的线段端点用封闭的圆滑曲线连接起来,形成的各自独立的区域即为探测到的采空积水区范围。6#煤层采空积水区分布见图 6。

在 6#煤层勘探区中,蓝色区域代表采空积水区。共计探测到三处积水区,1 区位于 7~12 测线的 31~36#测点之间,积水面积 7 800 m²;2 区位于 13~17 测线的 9~19#测点之间,积水面积 11 800 m²;3 区位于 37~42 测线的 1~16#测点之间,积水面积 25 600 m²。

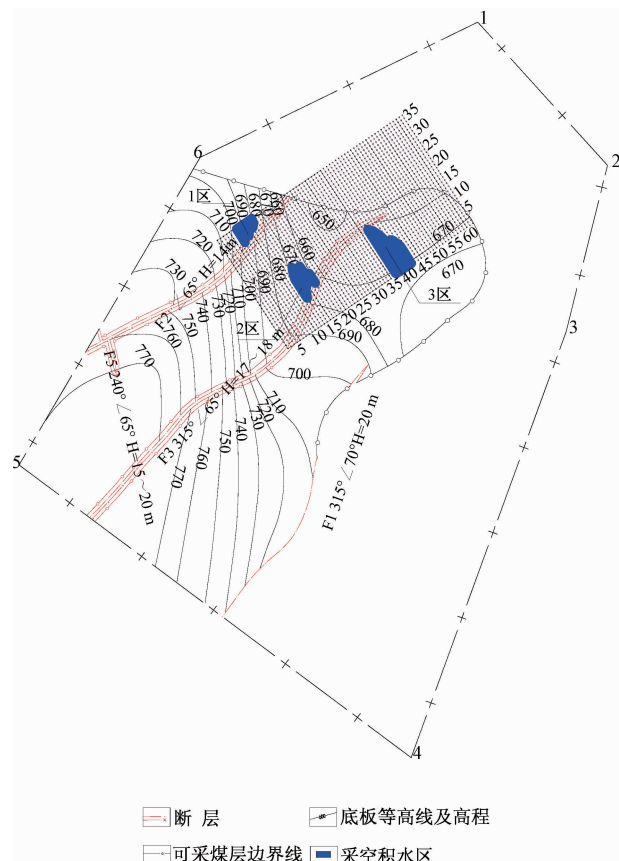


图 6 6#煤层采空积水区分布

Fig. 6 Distribution of goaf water in 6# coal seam

5 结论

(1)在现场踏查与资料分析的基础上,推测到了早期煤矿各煤层的开采范围。

(2)根据瞬变电磁法工作原理,分别获得了视电阻率和电压值在未开采煤层、采空区、采空积水区的大小不同值,确定了对测试结果的解释方法,然后对典型测线多测道电压剖面、视电阻率拟断面图、典型测道等电压值平面图和等视电阻平面图进行分析,确定 2#和 6#煤层的采空积水区的位置和范围。

参考文献:

- [1] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探,2012,36(4):576-584.
YAN Jiayong, MENG Guixiang, LYU Qingtian, et al. Progress and prospect of high density resistivity method [J]. Journal of Geophysical and Geochemical Exploration,2012,36(4):576-584.
- [2] 杨镜明,魏周政,高晓伟. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J]. 地球物理学进展,2014,29(1):362-369.
YANG Jingming, WEI Zhouzheng, GAO Xiaowei. High density resistivity method and transient electromagnetic method in coal mined-out area prospecting and the application of the grouting detection [J]. Progress in Geophysics,2014,29(1):362-369.
- [3] 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 Baolin, LIANG Guanghe, et al. High resolution predict underground complex spatial distribution characteristics of the mined-out area, high density electrical method in the initial application research of a certain complex goaf Shanxi Yangquan [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21 (1): 256-262.
- [4] 张光保. 高密度电法在复杂岩溶地区路基勘测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2010,7(3):344-347.
ZHANG Guangbao. High-density electrical method in the application of subgrade survey in complex karst region [J]. Journal of Engineering Geophysics,2010,7(3):344-347.
- [5] 梁哲. 高密度电法技术在煤矿井下应用的探索性研究[J]. 煤炭与化工,2016,39(1):41-43+47.
LIANG Zhe. High density resistivity method and technology in the application of the coal mine exploratory research [J]. Journal of Coal and Chemical Industry,2016,39(1):41-43+47.
- [6] 肖敏,陈昌彦,白朝旭,等. 北京地区浅层采空区高密度电法探测应用分析[J]. 工程地球物理学报,2014(1):29-35.
XIAO Min, CHEN Changyan, BAI Chaoxu, et al. In the Beijing area of shallow mined-out area high density resistivity method detection application analysis [J].

- Journal of Engineering Geophysics, 2014(1): 29 - 35.
- [7] 唐汉平. 复杂地震地质条件下煤矿采空区三维地震勘探技术[J]. 中国煤炭, 2013, 39(12): 35 - 37 + 87.
- TANG Hanping. Complex seismic geological conditions of coal mine goaf three-dimensional seismic exploration technology [J]. Journal of China Coal, 2013, 39(12): 35 - 37 + 87.
- [8] 王建文, 孙秀容, 王宏科, 等. 综合地震勘探方法在陕北煤田采空区探测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(9): 48 - 54.
- WANG Jianwen, SUN Xiurong, WANG Hongke, et al. Comprehensive seismic exploration method in the application in the detection of northern shaanxi coalfield mined-out area [J]. Journal of China Coal Geology, 2010, 22(9): 48 - 54.
- [9] 申有义, 刘海平. 地震属性方法在煤矿采空区解释上的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 65 - 69.
- SHEN Youyi, LIU Haiping. In coal mine goaf explain the application of seismic attribute method [J]. Journal of Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(1): 65 - 69.
- [10] 刘国辉, 温来福, 郝海强, 等. 地震勘探在山西某煤田采空区探测中的有效性研究[J]. 勘察科学技术, 2014(1): 58 - 61.
- LIU Guohui, WEN Laifu, HAO Haiqiang, et al. Seismic exploration in a certain coal field in shanxi in the goaf detection effectiveness research [J]. Journal of Surveying Science and Technology, 2014(1): 58 - 61.
- [11] 叶红星. 基于地震属性分析的红柳林煤矿采空区解释[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 87 - 91.
- YE Hongxing. Mined-out area of coal mine based on the seismic attribute analysis of red graham to explain [J]. Journal of Coal Geology and Exploration, 2014, 42(3): 87 - 91.
- [12] 赵文曙, 王俊奇, 牟义. 矿井瞬变电磁法在探测顶板老空区中的应用[J]. 山西焦煤科技, 2012, 36(7): 30 - 33 + 37.
- ZHAO Wenshu, WANG Junqi, MOU Yi. The mine transient electromagnetic method in detection of roof application [J]. Journal of Old Mined-out Area of Shanxi Coking Coal Science and Technology, 2012, 36(7): 30 - 33 + 37.
- [13] 姜志海, 杨光. 浅埋特厚煤层小窑采空区瞬变电磁探测技术研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 769 - 774.
- JIANG Zhihai, YANG Guang. Shallow thick coal seam small kiln goaf transient electromagnetic detection technology research and application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(5): 769 - 774.
- [14] 占文锋, 王强, 牛学超. 采空区矿井瞬变电磁法探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(8): 115 - 117.
- ZHAN Wenfeng, WANG Qiang, NIU Xuechao. Goaf of mine transient electromagnetic method to detect technology [J]. Journal of Coal Science and Technology, 2010, 38(8): 115 - 117.
- [15] 程建远, 孙洪星, 赵庆彪, 等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报, 2008(3): 251 - 255.
- CHENG Jianyuan, SUN Hongxing, ZHAO Qingbiao, et al. Old kiln goaf detection technology and case study [J]. Journal of Coal, 2008(3): 251 - 255.
- [16] 谢海军. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2009.
- XIE Haijun. Water of coal mine goaf transient electromagnetic method to detect technology research [D]. PhD Thesis of China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [17] 牛之琰. 脉冲瞬变电磁法及其应用[M]. 湖南长沙, 中南工业大学出版社, 2008.
- NIU Zhilian. Pulse transient electromagnetic method and its application [M]. Changsha of Hunan Province, Central South University of Technology Press, 2008.
- [18] 王宗林, 牟铁超, 陶永文, 等. 瞬变电磁法探水在新裕煤矿中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 76 - 82.
- WANG Zonglin, MOU Tiechao, TAO Yongwen, et al. Transient electromagnetic method in the water in new yulin coal mine of applications [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2014, 25(2): 76 - 82.