

# 井上下立体综合探测技术在煤矿水害防治中的应用

李宏杰<sup>1,2,4</sup>, 董文敏<sup>3</sup>, 杨新亮<sup>3</sup>, 邱浩<sup>1,2,4</sup>, 牟义<sup>1,2,4</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 矿山安全技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;  
3. 山西晋煤集团资源环境局, 山西 晋城 048006; 4. 山西晋煤集团技术研究院有限责任公司, 山西 晋城 048006)

**[摘要]** 以某矿1310工作面为例, 通过三维地震勘探, 探测断层和陷落柱等隐蔽地质构造, 初步圈定了疑似断层和陷落柱异常区域; 为了进一步确定地质构造异常真实性及富水性, 采用井下瞬变电磁探测法, 根据视电阻率值的异常来判定地质构造异常体的富水性。通过井上下立体综合探测技术基本查明了异常区的位置、分布范围和富水情况, 为煤矿安全生产提供了保障。

**[关键词]** 井上下立体探测; 三维地震; 瞬变电磁法; 水害; 防治

**[中图分类号]** TD163.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2014) 01-0098-04

## Application of Surface and Underground 3-D Comprehensive Detection Technology in Water Disaster Prevention of Coal Mine

LI Hong-jie<sup>1,2,4</sup>, DONG Wen-min<sup>3</sup>, YANG Xin-liang<sup>3</sup>, QIU Hao<sup>1,2,4</sup>, MOU Yi<sup>1,2,4</sup>

(1. Mine Safety Technology Research Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;  
2. State Key Laboratory of Coal Resource High-efficiency Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;  
3. Resources Environment Bureau, Shanxi Jinmei Group, Jincheng 048006, China;  
4. Shanxi Jinmei Group Technology Research Institute Co., Ltd., Jincheng 048006, China)

**Abstract:** Taking 1310 mining face of a mine as an example, suspected fault and collapse column area was demarcated by 3-d seismic exploration. In order to further confirm truth and watery of geological tectonic, underground transient electromagnetic method was applied to obtaining watery of tectonic by apparent resistivity exception. Application of surface and underground comprehensive detection technology found tectonic location, distribution range and watery, which provided protection for safe mining.

**Keywords:** surface and underground 3-d detection; 3-d seismic; transient electromagnetic method; water disaster; prevention

煤矿水害事故破坏性大, 突发性强, 往往导致大量的人员伤亡, 给矿工生命和国家财产造成无法挽回的损失。在煤矿重特大事故中, 水害事故在死亡人数上仅次于瓦斯事故居第二位, 但从事故发生后抢险救援、恢复生产难度和事故造成的经济损失来看, 水害比瓦斯事故严重得多, 即使没有造成人员伤亡, 煤矿水害事故也具有抢救难度大、经济损失大、矿井恢复周期长、恢复期间安全隐患多等特点<sup>[1]</sup>。为了防止水害事故的发生, 在煤层开采之前, 需要对煤矿开采区域内进行水文地质勘探, 查明断层、陷落柱等隐蔽灾害的导水和含水情况, 以及煤层顶底板岩层的富水情况。目前, 国内外对煤田断层、陷落柱等构造的探测多采用地面地震物探技术<sup>[2-6]</sup>, 三维地震勘探可以探测构造异常的分布, 但对确定富水情况较为困难。因此, 仅依靠地面物探结果在复杂地质和开采条件下很难确定隐蔽构造的分布及其特点。

矿井瞬变电磁法是近年发展起来的在煤矿井下巷道内探测其周围空间不同位置、不同形态含水体的矿井物探方法之一, 由于其对低阻异常体反应灵敏、方向性强、横向分辨率高、工作效率高和成本低等优点, 在煤矿水害防治中取得很好的应用效果<sup>[7-10]</sup>, 但由于受体积效应的影响, 会产生多解性。单一的物探手段在复杂地质和开采条件下很难确定构造及富水的分布及其特点, 因此, 开展井上、下立体综合探测技术在煤矿水害防治中具有重要意义。

### 1 矿井概况

矿井主要含煤地层为石炭系上统太原组 (C<sub>3t</sub>) 和二迭系下统山西组 (P<sub>1s</sub>), 上覆地层有二叠系下统下石盒子组 (P<sub>1x</sub>)、二叠系上统上石盒子组 (P<sub>2s</sub>) 和第四系 (Q)。矿井全井田总体为一走向北东, 倾向北西, 倾角 5°左右的单斜构造, 在此

[收稿日期] 2013-09-01

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2014.01.028

[基金项目] 973 国家重点基础研究发展计划 (2012CB724208); 煤炭科学研究总院基础研究基金 (2012JC12)

[作者简介] 李宏杰 (1977-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副研究员, 主要从事矿井水文地质工程地质方面的设计与研究工作。

[引用格式] 李宏杰, 董文敏, 杨新亮, 等. 井上下立体综合探测技术在煤矿水害防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2014, 19(1): 98-101. 90.

基础上伴有次级宽缓褶曲和小型断裂,断层附近地层倾向达 $15^{\circ}$ 左右。3煤和15煤为井田内全区发育的主要可采煤层,3煤层平均厚4.26m,结构简单,一般含1~2层夹矸,对比可靠,顶板岩性为砂质泥岩、粉砂岩,底板为黑色泥岩、砂质泥岩;15煤平均厚2.83m,结构较复杂,含0~3层夹矸,煤层顶板为泥灰岩、钙质泥岩或泥岩,底板为泥岩、砂质泥岩。

1310工作面长440m,宽160m,巷道断面宽4.0m,高3.2m,锚网支护。1310工作面煤层底板标高为+585~+640m,奥灰水位标高为+630m左右。各岩层沉积顺序都比较正常,未发现地层缺失或重复的现象。

## 2 地面三维地震勘探

为了查找断层和陷落柱等隐蔽地质构造,该矿在东盘区进行了三维地震勘探,1310工作面位于三维地震勘探区内。

### 2.1 断层的三维地震精细解释

断点解释是在时间剖面上识别断点的标志,反射波同相轴的错断、分叉合并、同相轴的扭曲以及产状突变等,其中主要标志是反射波同相轴的错断。三维地震数据处理为资料解释提供了 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 1\text{ms}$ 的三维偏移数据体、叠后时间偏移数据体、叠前时间偏移数据体,断层成像清晰。把性质相同、落差相近的相邻剖面上的断点按一定展布规律组合起来,根据其在等时切片上振幅、方差具有相同的差异性等规律,将相邻剖面的断点进行组合后,进行地质解释。

图1为F1和F2断层在时间剖面上的反应,通过断层产状解译,F1断层走向 $N63^{\circ}E$ ,倾向NW,倾角 $72^{\circ}$ 左右,延伸长度236m,错断3号、15号煤层,最大落差5m;F2断层走向 $N56^{\circ}E$ 转 $S82^{\circ}E$ ,倾向SE,倾角 $78^{\circ}$ 左右,区内控制长度1076m,错断3号、15号煤层,控制最大落差51m。F1,F2推断断层平面位置详见图3。

### 2.2 陷落柱的三维地震精细解释

在陷落柱内,煤(岩)层的连续性遭到破坏,陷落柱体内地层与正常地层相比在连续性、产状、岩性等方面存在很大的差异,为识别和判定陷落柱提供了依据。异常地震波通常表现为反射波同相轴中断、扭曲、极性转变、产状突变、振幅减弱等,伴随有绕射波、延迟绕射波、侧面波等出现,通过这些特征可识别和判定陷落柱范围及大小。

图2为X1,X2和X3陷落柱在时间剖面上的

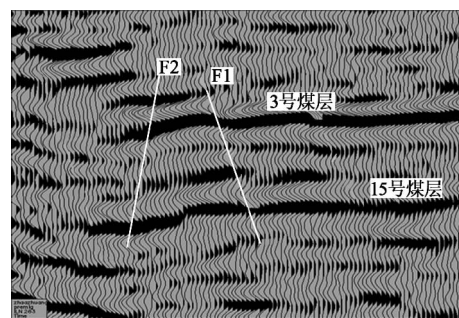
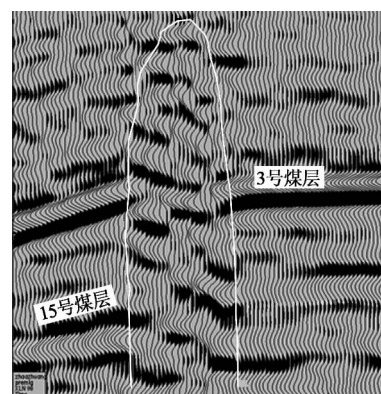
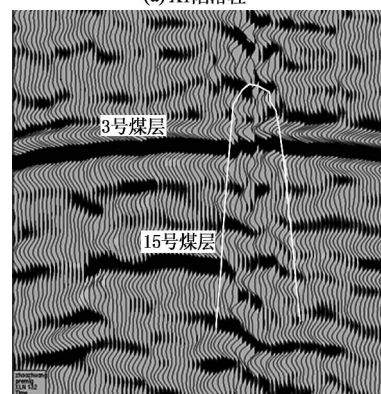


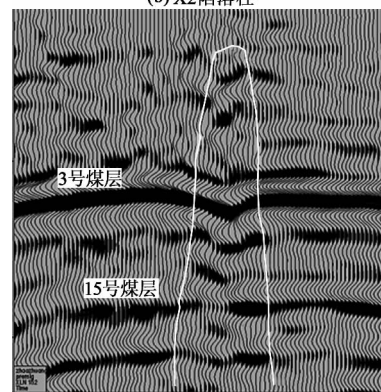
图1 F1,F2断层在时间剖面上的显示反应,均呈反漏斗状,在煤层底板平面图上呈椭圆形,陷落柱空间形态为不规则倒楔形。



(a) X1陷落柱



(b) X2陷落柱



(c) X3陷落柱

图2 陷落柱在时间剖面上的显示

X1陷落柱反射波有10个断陷点,X2陷落柱反射波有8个断陷点,X3陷落柱反射波有8个断陷点,均为控制可靠的陷落柱。通过断陷点解译,

X1 陷落柱长轴方向为 NS，长轴长度 180m 左右，短轴长度 130m 左右，陷落柱错断 3 号、15 号煤层；X2 陷落柱长轴方向为 N68°W，长轴长度 98m 左右，短轴长度 56m 左右，陷落柱错断 3 号、15 号煤层；X3 陷落柱长轴方向为 N15°W，长轴长度约 130m，短轴长度约 75m，陷落柱错断 3 号、15 号煤层。X1，X2 和 X3 等 3 个疑似陷落柱位置详见图 3。

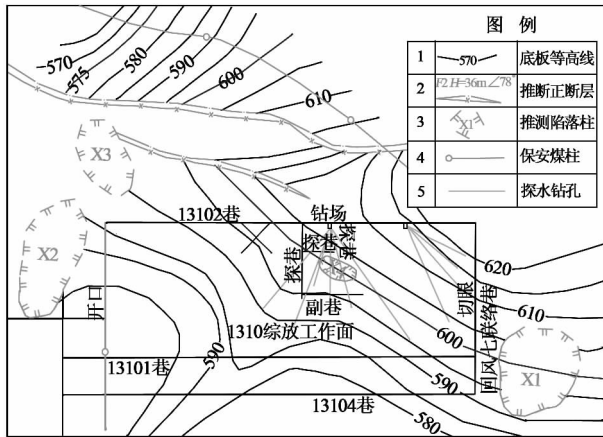


图 3 1310 回采工作面及物探异常位置示意

### 3 矿井瞬变电磁探测

#### 3.1 现场施工布置

瞬变电磁法探测采用专门用于井下的多匝矩形发射线框，边长为 2m × 2m，采用重叠回线装置进行探测。测线布置在工作面轨道巷、胶带巷内，测点间距为 10m，转换不同角度则可探测工作面内顶板或底板岩层一定范围的电阻率分布，根据电阻率分布情况推断异常目标的位置和特性。为了验证地震勘探圈定的疑似断层 (F1, F2) 和陷落柱 (X1, X3) 并进行富水性探测，根据 1310 工作面实际采掘条件，在 13102 巷及回风 7 联络巷外侧设计 4 个不同的探测方向：30°顶板方向、60°顶板方向、30°底板方向、60°底板方向 (图 4)。为了充分掌握 1310 工作面内部、顶底板区域的富水区分布情况，在 13101 巷、13102 巷布置测点，点距为 10m，探测方向为 30°顶板方向、60°顶板方向、90°顶板方向、30°底板方向、60°底板方向、90°底板方向 (图 4)。

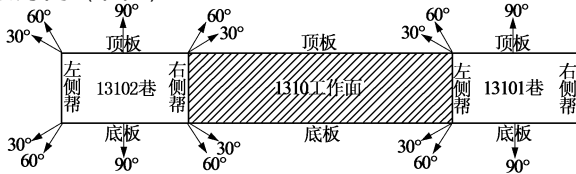


图 4 1310 工作面物探测线方向示意

#### 3.2 矿井瞬变电磁勘查结果分析

结合 1310 工作面回风巷和胶带巷掘进过程中实际揭露的地质情况，根据本次实测的岩层电性特征，结合实测电阻率分布特点，将相对视电阻率值为 50Ω · m 左右圈定为本次异常区域，推断富水性相对强或较强。成果图中视电阻率值为相对视电阻率值，为本区域周围地层相对视电阻率值的综合反映，其大小为相对值，仅在本次工作面探测成果图中具有比较意义。

##### 3.2.1 13102 巷及回风 7 联络巷外侧

根据地层的电性特征，设计了表示视电阻率的色谱，形成了视电阻率色谱断面图，反映了勘查剖面的电阻率分布特征，并根据其分布特征进行解释。限于篇幅，只对其中的 30°顶板测线进行解释。图 5 为 13102 巷向外侧 30°顶板探测结果，共有 4 处低阻异常，其中在距 13102 巷开口 0 ~ 270m 区域深处发现一处大片低阻异常，结合地震勘探资料分析，推断低阻异常为 F1 和 F2 断层及 X3 陷落柱等构造富水，富水性相对较强。图 6 为回风 7 联络巷 30°顶板和 30°底板探测结果，在回风 7 联络巷 0 ~ 50m 区域发现一处大片低阻异常，推断低阻异常为 X1 陷落柱富水。

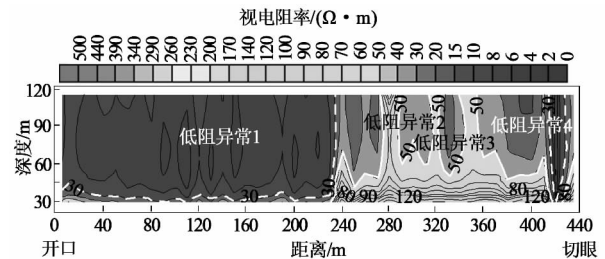


图 5 13102 巷外侧 30°顶板方向视电阻率等值线断面

##### 3.2.2 工作面顶底板

通过对不同方向剖面成果数据整理及归一化等过程的处理，可得到各低阻异常区域在顶板不同高度层位的水平分布情况。图 7、图 8 分别为 1310 工作面顶板方向 20m 处和底板方向 20m 处电阻率平面图，从探测结果中发现 2 处低阻异常，低阻异常 1 位于开口方向 260 ~ 280m 处，低阻异常 2 位于开口方向 360 ~ 440m 处。根据探测结果，结合巷道已经揭露的地质情况，推断低阻异常 1 局部富水性较强，由于低阻异常 1 和低阻异常 2 在垂直方向顶底板对应较好，推测异常为含水陷落柱。

### 4 井上下立体综合探测及验证结果分析

通过地面三维地震勘探，初步确定了断层、陷落柱等构造异常体的位置，其中在 1310 工作面周

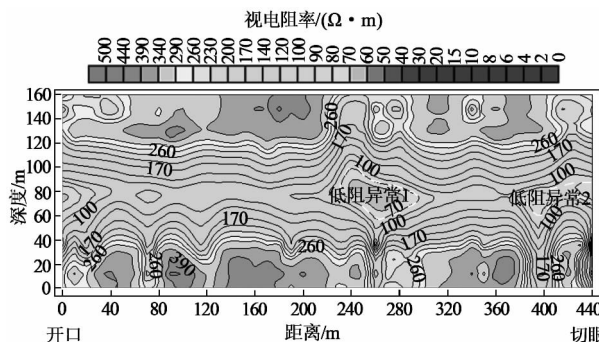
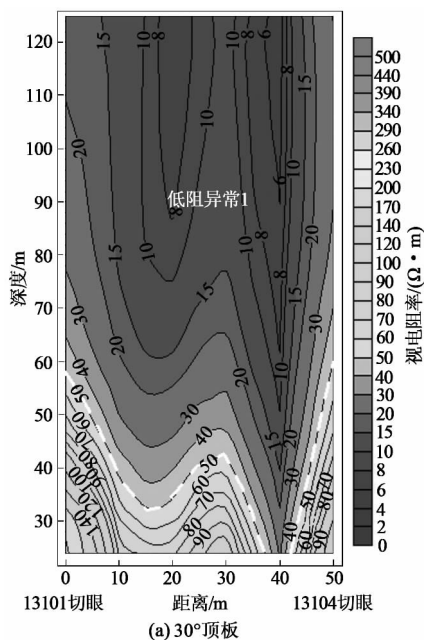


图 8 1310 工作面底板 20m 水平切片

层位于 1310 工作面东南部。针对地面三维地震圈定的异常，采用矿井瞬变电磁法进行了探测，在推断 X1 陷落柱、X3 陷落柱及 F1 和 F2 断层周围发现了大片低阻异常，井上下探测结果较为一致，综合探测结果表明为富水性较强的陷落柱和断层。1310 工作面内部顶底板区域有 2 处低阻异常，在垂直方向对应较好，推测异常为含水陷落柱。

为了进一步确认 1310 工作面内部顶底板区域 2 处低阻异常的真实性，在异常 1 位置附近施工了 6 个钻探验证孔（图 3），其中有 4 个孔出水，其中 1 个钻孔的最大涌水量达到 23.5m<sup>3</sup>/h，根据钻探结果在异常 1 附近施工了 3 条探巷和 1 条副巷（图 3），结果表明异常 1 为含水陷落柱（X4 陷落柱），长轴 50m，短轴 25m。在异常 2 附近施工了 4 个钻孔，均无水，推断异常 2 为切眼里的单体支柱引起。

5 结束语

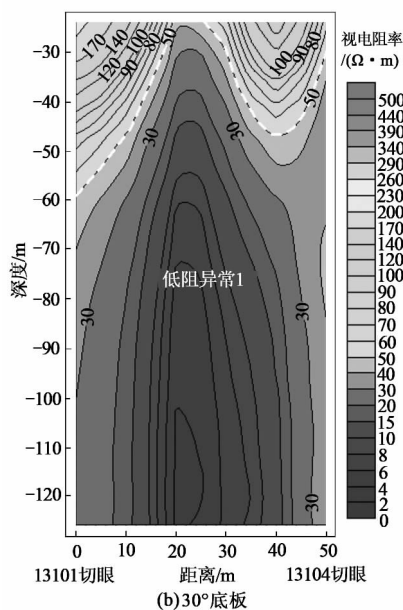
通过地面三维地震勘探，初步确定地质构造异常的分布及其性质，然后针对初步圈定的物探异常，采用井下瞬变电磁超前探测，对地质构造异常的真实性、富水性及导水性进行判定，增加探测结果的可信度和准确性，可为矿井水害防治提供超前预防依据。

[参考文献]

[1] 赵铁锤. 坚持“十六字”原则 落实“五项”措施努力构建煤矿水害防治长效机制 [J]. 当代矿工, 2006, 7 (6): 6-8.  
 [2] 孙升林, 宁书年, 李育芳, 等. 地震勘探在煤矿防治水工程中的应用 [J]. 煤炭工程, 2002 (11): 45-47.  
 [3] 崔若飞, 孙学凯, 崔大尉. 三维地震动态解释技术在防治煤矿突水中的应 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26 (2): 150-157.  
 [4] 朱国维, 王怀秀, 韩堂惠, 等. 地面-井下联合地震勘探确定岩溶陷落柱空间分布 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 36 (5): 83-86.

(下转 90 页)

(a) 30°顶板



(b) 30°底板

图 6 回风 7 联络巷视电阻率等值线断面

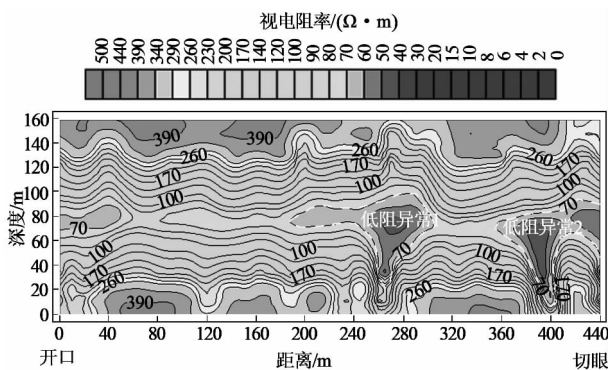


图 7 1310 工作面顶板 20m 水平切片

围附近发现疑似陷落柱 3 个，疑似断层 2 条。X1 陷落柱位于切眼西北角，X2 陷落柱位于停采线东北部，X3 陷落柱位于停采线东南部，F1 和 F2 断

到指标随样本而变化的综合权重  $W_i$ 。

$$W_i = \frac{[W'_i W''_i]^{0.5}}{\sum_{i=1}^n [W'_i W''_i]^{0.5}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中,  $n$  为指标个数。

由公式 (5) 求得各指标的综合权重如下:

$$W_{\text{自然}} = [0.120 \ 0.204 \ 0.158 \ 0.147 \ 0.142 \ 0.109 \ 0.119], W_{\text{开采}} = [0.165 \ 0.142 \ 0.244 \ 0.237 \ 0.212]$$

### 4.3 评价结果计算

根据模糊综合评判方法, 将隶属矩阵与权重进行加权相乘, 得到冲击危险的评判结果  $B$ 。

$$B = W \cdot R \quad (6)$$

由此求得两类因素的冲击危险隶属结果:

$$B_{\text{自然}} = [0 \ 0.525 \ 0.111 \ 0.364]$$

$$B_{\text{开采}} = [0.051 \ 0.735 \ 0 \ 0.214]$$

对地质因素和开采因素的评价结果进行模糊加权计算, 两者权重各取 0.5。计算结果为:

$$B_{\text{综合}} = [0.025 \ 0.630 \ 0.055 \ 0.290]$$

按照置信度识别原则分析所得结果, 设置信度  $\lambda = 0.6$ , 计算公式如下:

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k b_i > \lambda, k = 1, 2, 3, 4 \right\} \quad (8)$$

计算得  $k_0 = 2$ , 由此得到 2310 工作面的冲击危险性评价等级结果为 II 级, 为弱冲击危险等级。

### 4.4 工作面冲击危险区域划分

根据 2310 工作面冲击危险因素的分析及工作面的冲击危险评价结果, 针对工作面回采过程中的顶板、构造及煤柱等多因素影响区域进行了耦合叠加, 确定 2310 工作面存在 16 个危险区域, 其中一般危险区域 4 个, 中度危险区域 5 个和高度危险区 7 个, 具体位置如图 4 所示。当工作面推进至危险区域时, 应针对危险区域内的所有巷道及采场加强



图 4 工作面冲击危险区域划分

监测, 并及时做好卸压解危措施。

### 5 结束语

(1) 根据冲击启动理论, 确定了集中静载荷和集中动载荷的影响因素, 根据 2310 沿空工作面地质及开采情况, 分析并判断 2310 工作面中冲击地压的发生以集中静载荷为主要影响因素。

(2) 利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 对 2310 工作面邻近采空区的开采环境进行了模拟, 并对该工作面沿空开采时媒体内的应力分布情况进行了分析, 工作面前方媒体受到邻近采空区侧向支承压力及采动超前支承压力的影响, 下端头区域应力集中明显, 冲击危险性较大。

(3) 采用动态权重评价方法, 避免了危险指标被其他指标中和的现象; 对评价结果采用置信度识别原则, 使得评价结果更具客观性。通过该方法评价, 得到 2310 工作面冲击危险性为弱冲击危险。目前, 2310 工作面回采过程中, 除发生较小煤炮外, 并未发生冲击显现情况, 所监测到的微震事件能量均低于 10<sup>4</sup>J, 因此评价结果与现场情况基本一致, 具有较高的准确性。

### 【参考文献】

[1] 齐庆新, 龚林名. 冲击地压理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.

[2] 秦子晗, 彭永伟. 基于动态权重的区域冲击危险性评价方法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (10): 18-21.

[3] 金佩剑, 王恩元, 刘晓斐, 等. 冲击地压危险性综合评价的突变级数法研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30 (2): 256-260.

[4] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (3): 586-596.

[5] 姜福兴, 魏全德, 姚顺利, 等. 冲击地压防治关键理论与技术分析 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (6): 6-9.

[6] 张小康, 何峰. 近距离下煤层综采工作面侧向支承压力分布研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (6): 37-40.

[7] 张开智, 夏均民. 冲击危险性综合评价的变权识别模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (20): 3480-3483.

[责任编辑: 潘俊锋]

(上接 101 页)

[5] 赵庆彪, 程建远, 杜丙申, 等. 东庞矿突水陷落柱综合探查技术 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (8): 96-100.

[6] 于景邨, 刘振庆, 廖俊杰, 等. 全空间瞬变电磁法在煤矿防治水中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (8): 110-103.

[7] 于景邨, 刘志新, 汤金云, 等. 用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36

(4): 542-546.

[8] 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.

[9] 李宏杰. 瞬变电磁探测技术在煤矿防治水中的应用 [J]. 煤矿安全, 2013 (4): 159-161.

[10] 张军, 赵莹, 李萍. 矿井瞬变电磁法在超前探测中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9 (4): 49-53.

[责任编辑: 施红霞]