

# 自震式微震监测技术在煤矿动力灾害预警中的应用

邓志刚<sup>1,2,3</sup> 齐庆新<sup>2,3</sup> 赵善坤<sup>2,3</sup> 欧阳振华<sup>2,3</sup> 孔令海<sup>2,3</sup> 李少刚<sup>2,3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 辽宁 阜新 123000; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院 北京 100013;  
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 北京 100013)

**摘要:**为进一步提高微震监测系统定位精度,在传统微震监测技术基础上,提出一种新型自震式微震监测技术。通过自主研发自激震源,实现自动变频震动,实时计算煤岩体中纵波传播速度,优化微震系统参数,最终实现高精度、高可靠性监测微震事件。依托该技术自主研发的KJ768自震式微震监测系统已先后在跃进煤矿、石圪台煤矿、龟兹煤矿等多个现场进行了实际应用,结果表明:自震式微震监测技术在煤矿动压防治领域具有监测形式多样、监测精度高等特点,能够有效解决冲击地压灾害预警、浅埋煤层强动载矿压预警等问题。

**关键词:**自震式微震监测;冲击地压;动载矿压;上行开采

中图分类号:TD76 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)07-0092-05

## Initiative micro seismic monitoring technology applied to early warning of mine dynamic disaster

Deng Zhigang<sup>1,2,3</sup> Qi Qingxin<sup>2,3</sup> Zhao Shankun<sup>2,3</sup> Ouyang Zhenghua<sup>2,3</sup> Kong Linghai<sup>2,3</sup> Li Shaogang<sup>2,3</sup>

(1. Liaoning Technical University Fuxin 123000, China; 2. Mine Safety Branch, China Coal Research Institute Company Limited Beijing 100013, China;  
3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to further improve the positioning accuracy of the micro seismic monitoring system based on the conventional micro seismic monitoring technology, a new initiative micro seismic monitoring technology was provided. With a self researched and developed excited seismic source, an automatic frequency converted seismic could be realized and the longitudinal wave propagation speed in the coal and rock mass could be timely calculated. The parameters of the micro seismic system could be optimized and finally the high accuracy and high reliability monitoring could be realized for a micro seismic accident. The self researched and developed KJ768 initiative micro seismic monitoring system with the technology were applied to the actual applications in Yuejin Mine, Shigetai Mine, Qiuci Mine and other several sites. The results showed that the initiative micro seismic monitoring technology would have the multi type monitoring, high monitoring accuracy and other features in the mine dynamic pressure prevention and control area and could effectively solve the early warning of the mine strata pressure bump disaster, early warning of the mine powerful dynamic pressure from the shallow depth seam and other several problems.

**Key words:** initiative micro seismic monitoring; mine strata pressure bump; dynamic mine strata pressure; upward mining

## 0 引言

随着我国煤炭开采强度的增大和开采深度的增加,煤矿动力灾害发生强度和频度明显增加;从分布特点来看,具有动力灾害的矿井分布区域越来越大,在东部、中部、东北部等开采深度较大、地质条件复

杂的老矿区基本上以冲击地压灾害为主,在西部开采深度不大、开采强度较大的矿井则以开采导致的动载矿压灾害为主;从灾害成因来看,冲击地压灾害的成因非常复杂,通常是由多种因素共同作用导致的,而动载矿压灾害成因相对简单,一般情况主要是由开采造成的局部应力集中引起的<sup>[1-5]</sup>。因此,针

收稿日期:2016-03-01;责任编辑:朱拴成 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.07.016

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB226806);国家国际科技合作专项资助项目(2011DFA61790)

作者简介:邓志刚(1981—),男,吉林长春人,副研究员,博士研究生。Tel:010-84262753,E-mail:dengzhigang2004@163.com

引用格式:邓志刚,齐庆新,赵善坤,等.自震式微震监测技术在煤矿动力灾害预警应用研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):92-96.

Deng Zhigang, Qi Qingxin, Zhao Shankun, et al. Initiative micro seismic monitoring technology applied to early warning of mine dynamic disaster [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 92-96.

对煤矿动力灾害的以上特点,一方面煤矿动力灾害的监测预警工作越来越重要,另一方面由于其成因复杂,实现高精度监测预警难度很大。

目前在我国煤矿动力灾害监测预警领域应用最广泛的技术是微震监测技术,其原理是通过监测煤岩体的破裂,分析破裂发生位置和破裂过程释放能量的规律,对可能出现的动力灾害进行预警;近10年来,以该技术为基础,先后有ARAMIS M/E、SOS、KJ820等国内外微震监测系统在国内进行了推广应用,为我国煤矿动力灾害的监测预警做出了较大贡献<sup>[6~9]</sup>。但传统的微震监测技术也存在着非常明显的缺陷,即在计算过程中最重要的煤岩体波速参数只能人为设定,导致系统整体定位和能量计算存在较大误差,直接影响到系统的整体预警精度。为此,笔者自主研发了KJ768自震式微震监测系统,首次实现了系统自动校准参数的功能,并在多种不同类型动力灾害矿井进行了成功应用。

## 1 自震式微震监测原理

煤岩体在采动影响作用下发生破裂、失稳过程中,会产生一定频率地震波向周围传播,释放聚集的能量,而地震波的振幅和频率又取决于煤岩体的强度、应力状态、破裂尺寸和变形速度等。传统微震监测原理是在监控区域布置若干拾震器,通过拾震器拾取煤岩体破裂而导致的震动波形。假设震源位置坐标为( $x_0, y_0, z_0$ ),震源发生时刻为 $t_0$ ,第*i*个拾震器的坐标为( $x_i, y_i, z_i$ )( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),微震波到达第*i*个拾震器的时间为 $t_i$ ,微震波的传播速度为 $V_i$ ,震源坐标和发生时刻的关系见式(1)。根据仪器监测得到的微震波信息,代入式(1)即可求解方程组,并最终得到震源的坐标和发生时刻,其中 $V_i$ 以往是根据现场的煤岩条件给出的经验值,通常误差较大,直接影响到系统的计算结果。

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}}{V_i} + t_0 \quad (1)$$

自震式微震监测原理则是在传统的微震监测原理基础上,增加了自激震动波速反演计算功能,在时间已知、位置已知的情况下,实现对监测区域煤岩体波速的自动反演计算;再将波速值作为已知参数应用到被动微震事件的定位计算中,提高微震监测系统的监测精度。自震式微震监测关键技术实现流程如图1所示。

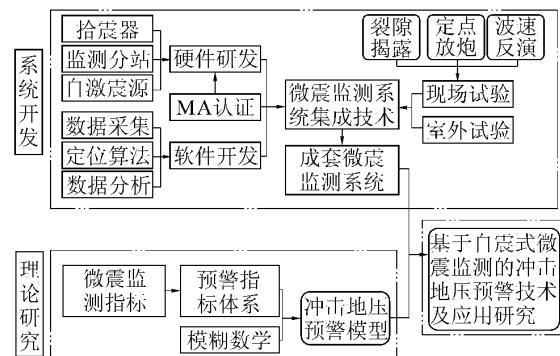


图1 自震式微震监测关键技术实现流程

Fig. 1 Key procedure of initiative microseismic monitoring technology

## 2 KJ768自震式微震监测系统设计

KJ768自震式微震监测系统是基于自震式微震监测技术自主研发的新一代微震监测系统,能够对矿井范围内发生的能量大于100 J、频率0~150 Hz、信噪比110 dB的煤岩体破坏现象进行实时在线监测。通过对数据进行有效分析,可实现对矿井煤岩动力灾害、回采工作面顶板大面积来压、导水断裂带破坏等灾害的防治;能够实现监测结果的二维、三维动态显示,直观展示监测区域应力分布云图和裂隙场演化趋势,提高了系统的智能化水平;系统配备了变频式自激震源,具有自主发射微震频段信号和自动校对系统参数的功能,大幅提高了系统整体监测精度。KJ768自震式微震监测系统结构如图2所示。

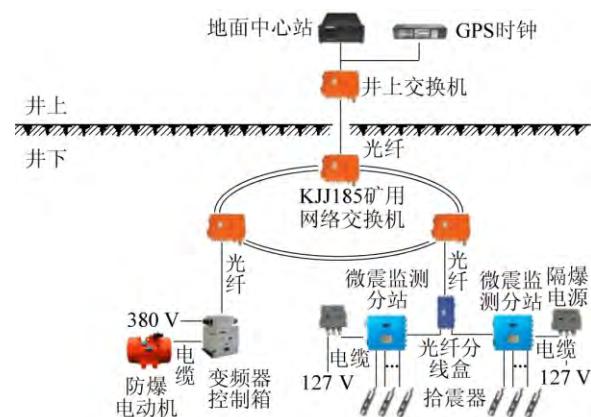


图2 KJ768自震式微震监测系统结构

Fig. 2 Structure of KJ768 initiative microseismic monitoring system

## 3 自震式微震监测技术应用

### 3.1 跃进煤矿冲击地压灾害预警应用

河南大有能源股份有限公司跃进煤矿是我国典

型的冲击地压矿井,先后发生过“6·19”、“8·6”、“12·27”等多起冲击地压事故,造成了巨大的经济损失和人员伤亡。该矿的23070工作面为孤岛工作面,在开采过程中面临着很大的冲击危险,因此回采过程中的冲击地压预警工作显得异常重要。

2014年8月下旬,KJ768自震式微震监测系统安装完毕,开始进行冲击地压灾害监测预警工作。系统运行一段时间后监测到的微震事件释放能量和频次的统计数据如图3所示。

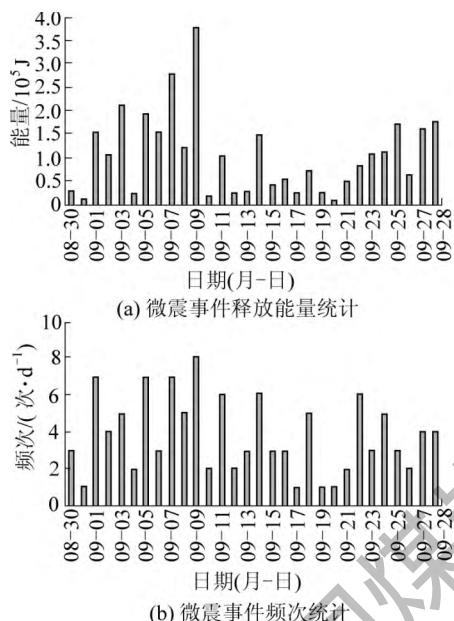


图3 跃进煤矿KJ768自震式微震监测系统监测结果统计

Fig. 3 Monitoring result statistics of KJ768 initiative microseismic monitoring system in Yuejin Coal Mine

在总结一段时间现场监测数据的基础上,建立了23070工作面冲击地压预警模型的因子集合和评价集合,分别统计微震频次时序变化、事件空间展布和能量大小3个方面信息。根据现场监测数据情况,同时考虑指标因子对预警结果的影响作用,选取微震频次N、震源集中度ξ和微震总能量E建立预警模型因子集合U,即 $U=(N, \xi, E)$ ;评价集合V代表各种可能的总评判结果,即冲击地压四类危险等级,故 $V=(\text{无冲击危险}, \text{弱冲击危险}, \text{中等冲击危险}, \text{强冲击危险})$ 。用I、II、III和IV分别代表无、弱、中、强4个危险等级,则 $V=(\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV})$ 。最终得到各评价因子不同危险等级的数据范围,见表1。

KJ768自震式微震监测系统在跃进煤矿23070工作面应用以来,先后26次做出了冲击地压灾害预警,其中3次强冲击危险预警,9次中等冲击危险预警,14次弱冲击危险预警,确保了该工作面的安全回采。

表1 跃进煤矿23070工作面冲击危险评价因子分级

Table 1 Rock-burst dangerous grade through evaluation factors of No.23070 working face in Yuejin Coal Mine

危险等级	微震频次 N/(次·d <sup>-1</sup> )	震源集中度 ξ	微震总能量 E/J
无冲击危险	0	12	$1\times 10^3$
弱冲击危险	5	10	$1\times 10^5$
中等冲击危险	10	8	$1\times 10^6$
强冲击危险	50	6	$1\times 10^8$

注:表中数据均为各因子危险等级下限。

以2014年9月5日冲击地压灾害预警为例进行说明,当天的微震频次N为7次/d,震源集中度ξ为9.87,微震总能量E为 $1.9\times 10^5 \text{ J}$ ,得到冲击地压预警的评价集合 $V=(0, 0.846, 0.159, 9, 0)$ ,判断该工作面于2014年9月5日的冲击危险等级为II级,即具有弱冲击危险性;同时分析钻屑法数据发现,当天的煤粉量为 $3.07 \text{ kg/m}^3$ ,达到了弱冲击危险预警范围(该工作面煤粉量 $2.91\sim 4.14 \text{ kg/m}^3$ 时为弱冲击危险预警)。因此,做出综合判断,发出了弱冲击危险预警,建议对23070工作面采取应急防冲解危措施,在实施了大孔径卸压、煤层卸载爆破卸压等措施后,降低了工作面的冲击危险,确保了安全生产<sup>[10]</sup>。

### 3.2 石圪台煤矿浅埋煤层强动载矿压预警应用

神东公司石圪台煤矿31201综采工作面倾向长311 m,所采用支架额定工作阻力为18 000 kN,初撑力为32.5 MPa。上方为2-2煤层房柱式采空区,平均间距38 m,平均埋深120 m,在开采过程中先后发生过多次动载矿压灾害,其中最严重的一次导致121台支架同时压死,因此,对31201工作面动载矿压进行监测预警显得至关重要。

石圪台煤矿31201工作面安装的KJ768自震式微震监测系统采用的是井-地联合监测方案,在地面施工钻孔安装了4个固定式拾震器,在井下31201工作面两巷安装了18个拾震器,随着工作面的推进不断向工作面前方移动。系统运行一段时间后,根据每天微震事件频次、能量及多次矿压监测结果,结合多次上覆岩层大范围运动的宏观观测结果,总结得出了工作面单日动载矿压预警指标,即微震事件频次超过31次/d,能量大于 $8.0\times 10^5 \text{ J/d}$ 。

自2014年3月至2014年10月,在石圪台煤矿累计准确预测了3次动载矿压,避免了压架事故的发生,确保了31201工作面的安全回采,取得很好的经济和安全效益。以2014年4月22日动载矿压预

警为例,石圪台煤矿31201工作面4月3—22日微震系统监测结果如图4所示,在4月20日,微震事件数达到73次,能量达到 $3.1 \times 10^6 \text{ J}$ ,2项指标均超过了动载矿压微震事件频次超过31次、能量大于 $8.0 \times 10^5 \text{ J}$ 的预警指标,因此根据监测结果,对工作面矿压实施了预警。采取解危措施后,微震事件和次数明显减小,但仍处于较为危险的状态。4月22日22时45分左右,工作面22煤层顶板岩层大范围断裂下沉,发生动载矿压,第58、67和68号支架下缩超过1000 mm,剩余行程不足300 mm,25—75号支架、95—113号支架压力很大,但因已提前采取了解危措施和人员防护措施,并未造成人员伤亡和支架压死情况,最大限度地降低了灾害带来的损失。动载矿压发生前后工作面支架阻力统计结果如图5所示,预测结果与自震式微震监测系统的预警情况非常吻合<sup>[11-14]</sup>。

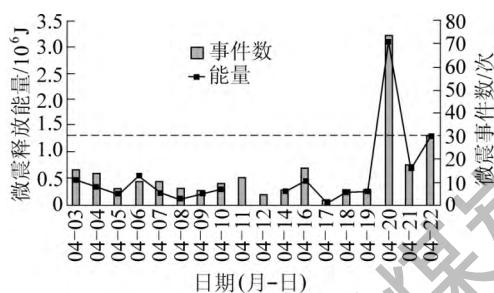


图4 石圪台煤矿KJ768自震式微震监测系统监测结果统计  
Fig. 4 Monitoring result statistics of KJ768 initiative microseismic monitoring system in Shigetai Coal Mine

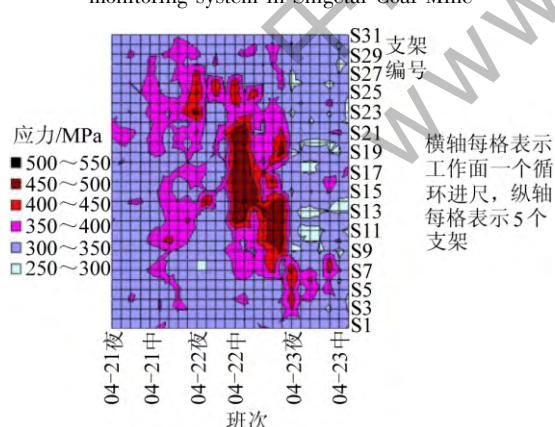


图5 石圪台煤矿支架阻力监测系统监测结果统计  
Fig. 5 Monitoring result statistics of support working resistance system in Shigetai Coal Mine

### 3.3 龟兹煤矿上行开采危险区域煤岩破裂预警应用

龟兹煤矿A6-103工作面开采条件复杂,下方为开采约2年的A603工作面采空区,南侧为刚开

采完毕的A6-102工作面采空区,类似条件下的周边矿井发生过顶板大面积突然垮落事故,因此,在A6-103工作面回采期间需要对采动空间的覆岩运动进行监测,对可能出现的危险区域煤岩集中破裂导致的动力灾害做出预警。

采用KJ768自震式微震监测系统对浅埋深综放A6-103工作面覆岩运动进行监测。在工作面进入下部邻近采空区附近的上、下平巷道共布置2个分站,两巷道各安装8个拾震器,间距30 m。研究发现,过下部采空区开切眼前后25~40 m监测结果如图6所示,2014年8月9日—31日,发生因煤岩集中破裂导致的动力灾害,主要有以下2个方面原因:①应力积聚原因。由于实体煤侧煤岩体结构完整,容易积聚弹性性能,采空区侧由于顶板结构整体性遭到破坏,顶板高位岩层产生的大量裂隙,很难形成大尺度的砌体梁结构,不能传递超前采动应力,导致应力在开切眼上方岩层积聚,导致煤岩体破裂;②应力叠加原因。由于受到开切眼后方实体煤后方支承应力和本煤层超前采动应力叠加的影响,也加剧了煤岩体结构的破坏程度,导致大量煤岩结构破坏。经过一段时间对微震数据的统计分析后,将该区域的预警指标确定为微震能量 $2.0 \times 10^5 \text{ J/d}$ ,微震频次5次/d<sup>[15]</sup>。

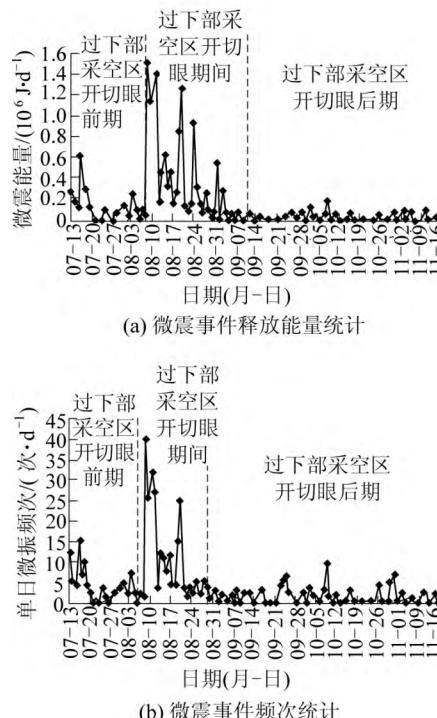


图6 龟兹煤矿KJ768自震式微震监测系统监测结果统计  
Fig. 6 Monitoring result statistics of KJ768 initiative microseismic monitoring system in Qiuci Coal Mine

根据2014年8月3日—17日开切眼期间每日微震能量和结果可以看出,单日能量和最大值为 $1.40 \times 10^5$  J,未达到预警值;单日微震频次最多为43次,超过预警值,说明煤岩体在此期间产生了大量破裂和位移,因此及时进行了预警,指导现场开展了顶板预裂爆破、工作面调协、下部采空区注浆加固和加强下巷支护等措施,最终确保了A6-103工作面的安全回采。

## 4 结 论

1) 自震式微震监测技术在传统被动式微震监测基础上,增加了自激震动波速反演计算功能,实现了对监测区域煤岩体波速的自动反演计算,提高了对微震事件的监测精度。

2) 基于自震式微震监测技术自主研发的KJ768自震式微震监测系统,具有自动校对系统参数的功能,大幅提高了系统整体的监测精度;同时具有监测区域应力分布云图和裂隙场演化趋势反演等功能,提高了系统的智能化水平。

3) 分别介绍了自震式微震监测技术在回采工作面冲击地压灾害预警、大区域浅埋煤层强动载矿压预警、上行开采集中危险区域煤岩破裂监测预警3个方面的应用情况,总结发现,该技术在煤矿动力灾害预警领域具有监测形式多样、监测精度高等特点,有广泛的推广应用前景。

## 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [2] 姜耀东,潘一山,姜福兴等.我国煤炭开采中的冲击地压机制和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [3] 姜福兴,苗小虎,王存文等.构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(6):900-904.  
Jiang Fuxing, Miao Xiaohu, Wang Cunwen, et al. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 900-904.
- [4] 窦林名,牟宗龙,李振雷等.煤矿冲击矿压监测预警与防治研究进展[J].煤矿支护,2015(2):17-26.  
Dou Linming, Mou Zonglong, Li Zhenlei, et al. Research progress of monitoring and early warning and prevention of coal bump [J]. Journal of China Coal Society, 2015(2): 17-26.
- [5] 黄庆享,钱鸣高,石平五.浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J].煤炭学报,1999,24(6):581-585.  
Huang Qingxiang, Qian Minggao, Shi Pingwu. Analysis of main roof structure during the periodic weighting in shallow buried working face [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 581-585.
- [6] 邓志刚.基于ARAMIS M/E微震监测系统的冲击地压监测技术[J].煤矿安全,2013,44(5):105-107.  
Deng Zhigang. Rock-burst forecast research based on ARAMIS M/E seismic system [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(5): 105-107.
- [7] 邓志刚,李国宏,盛继权等.基于微震分析法的特厚煤层导水裂隙带高度研究[J].煤矿开采,2012,17(6):86-88.  
Deng Zhigang, Li Guohong, Sheng Jiquan, et al. The height of diversion fissure zone in thick coal seam research based on seismic method [J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(6): 86-88.
- [8] 夏永学,康立军,齐庆新等.基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J].煤炭学报,2010,35(12):2011-2015.  
Xia Yongxue, Kang Lijun, Qi Qingxin, et al. Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecasting [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011-2015.
- [9] 陆彩平,窦林名,王耀峰等.坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J].地球物理学报,2010,53(2):450-456.  
Lu Caiping, Dou Linming, Wang Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal material rockburst failure induced by hard roof [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 450-456.
- [10] 任艳芳,宁宇.浅埋煤层长壁开采超前支承压力变化特征[J].煤炭学报,2014,39(S1):38-42.  
Ren Yanfang, Ning Yu. Changing feature of advancing abutment pressure in shallow long wall working face [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 38-42.
- [11] 欧阳振华,齐庆新,赵善坤等.深孔预裂爆破在冲击地压预防中的应用[J].振动与冲击,2015,21(5):1-7.  
Ouyang Zhenhua, Qi Qingxin, Zhao Shankun, et al. The mechanism and application of deep-hole precracking blasting on rockburst prevention [J]. Shock and Vibration, 2015, 21(5): 1-7.
- [12] 魏力克.强层行为在浅埋煤层开采中的应用[J].第13届国际岩石力学会议论文集[C]//The 13th International ISRM Congress 2015 in conjunction with the CIM Convention, Los Angeles, USA, 2015.
- [13] 魏力克,齐庆新,李红艳等.浅埋煤层大型顶板垮落的能量分析及预警[J].振动与冲击,2015(2):1-9.  
Wei Like, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. A case study of damage energy analysis and an early warning by microseismic monitoring for large area roof caving in shallow depth seams [J]. Shock and Vibration, 2015(2): 1-9.
- [14] 孔令海.煤矿采场围岩微震事件与支承压力分布关系[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):525-531.  
Kong Linghai. Relationship between microseismic events and abutment pressure distribution in coal mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 525-531.
- [15] 季成,孔令海,高凯.微震监测技术在煤矿上行开采中的应用[J].煤矿安全,2015,46(9):134-140.  
Ji Cheng, Kong Linghai, Gao Kai. Application of microseismic monitoring technology in ascending mining of coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(9): 134-140.