

煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究

窦林名^{1,2,3} 李振雷^{1,2,3} 张敏^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 深部煤炭开采教育部重点实验室 江苏 徐州 221116)

摘要: 为合理选用监测预警方法以便进行高效的冲击地压防治,通过工程与文献调研、理论分析、现场实践等方法,分析总结了我国煤矿冲击地压发生特征、影响因素、发生机理、监测预警手段等。结果表明:冲击地压大多发生在巷道,破坏范围一般为90~150 m,且矿震能量越大、距离巷道及采场越近,其诱冲可能性越高;冲击地压发生机理一般为静载应力集中和矿震动载扰动叠加作用的结果;冲击地压的监测预警主要从静载应力场和震动场两方面,单一监测方法难以实现对冲击地压的精确预测,而联合多种方法涉及震动场和应力场的多参量综合监测预警技术较为科学。

关键词: 冲击地压; 监测预警; 冲击特征; 发生机理; 动静载; 互联网+

中图分类号: TD324; TD76 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)07-0041-06

Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster

Dou Linming^{1,2,3}, Li Zhenlei^{1,2,3}, Zhang Min^{1,2,3}

(1. State Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. MOE Key Lab of Deep Coal Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to rationally select the monitoring and early warning method to high efficiently prevention and control of the mine pressure bump with the engineering and literature investigation, theoretical analysis, site practices and other method, the paper analyzed and summarized the features, influence factors, occurrence mechanism, monitoring warning means and others of the mine pressure bump occurred in China. The results showed that the most pressure bumps occurred in the mine roadway within a failure scope of 90~150 m. The higher mine seismic energy value and the distance more closed to the mine roadway and mining face, the higher possibility of the pressure bump occurred would be. The occurrence mechanism of the mine pressure bump would generally be the results of the statistic stress concentration and mine seismic dynamic interference superposition role. The monitoring early warning of the mine pressure bump would be mainly based on the two aspects of the statistic stress field and the seismic dynamic field, a single monitoring method could be hard to realize an accurate prediction of the mine pressure bump and the combined multi methods and the multi parameter comprehensive monitoring early warning technology of the seismic dynamic field and stress field would be scientific.

Key words: mine pressure bump; monitoring early warning; pressure bump features; occurrence mechanism; dynamic and statistic loading; internet plus

0 引 言

我国煤矿发生冲击现象始于1933年抚顺胜利煤矿,1985年至2012年,我国冲击地压矿井由32座增长至142座^[1],近年来的冲击灾害更为严重。目前,

国内外已针对冲击地压发生机理^[2-6]、监测预警^[7-9]及防治方法^[10-12]开展广泛的研究,取得众多有益的成果,但仍然难以做到对冲击地压的精准预测及有效防治。主要原因是对冲击地压发生规律及特征缺乏广泛而深入的调研分析,冲击地压基础理论研究并不

收稿日期:2016-03-21;责任编辑:杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.007

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2015040);江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)

作者简介:窦林名(1963—),男,青海平安人,教授,博士生导师,博士。Tel:0516-83995904 E-mail: lmdou@cumt.edu.cn

引用格式:窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.

Dou Linming, Li Zhenlei, Zhang Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 41-46.

能十分有效的指导监测预警,且监测预警方法众多、手段各异,且各种方法的监测数据不完全一致,甚至相悖,导致煤矿无法正确选择监测预警方法。笔者通过对675次冲击事件的调研分析,总结冲击特征、划分冲击类型、归纳影响因素、得出冲击发生机理,并对目前监测预警原理进行分析,提出涉及震动场和应力场的多参量综合监测预警技术,并通过现场案例予以证实,以期为冲击地压监测预警提供技术支撑。

1 煤矿冲击地压显现特征

通过对华亭、义马、鹤岗、七台河等矿区的调研,如图1所示,统计分析共计675次冲击事件,总结出其冲击显现的主要特征。

1) 在空间上,91%的冲击地压事故发生在巷道内;在时间上,86%的冲击地压事故发生在采掘作业期间,其中1/4发生在掘进巷道,3/4发生在回采工作面的超前巷道,特别是沿空侧巷道。

2) 冲击地压发生时均伴随有强烈矿震;中及厚煤层中发生冲击时的最小矿震能量等级为 1.0×10^4 J,最大达 1.0×10^8 J。

3) 矿震震源与冲击地点不在同一位置,水平方向上间距一般为150 m,最大达500 m,垂直方向上一般位于煤层顶板上方90 m和底板下方60 m范围内。

4) 冲击发生时,巷道破坏长度一般在90~150 m,最大达1 000 m。

冲击地压在如下情况容易发生:①工作面采空区单次见方、二次见方、三次见方等期间;②工作面上覆坚硬顶板大范围破碎时;③采掘相互扰动容易诱发冲击地压,采深越大,采掘扰动越强烈越容易诱发冲击地压;④坚硬煤层、坚硬顶底板条件、孤岛煤柱、褶曲等构造应力集中区和断层滑移易诱发冲击地压;⑤所有冲击事故均与矿震应力波有关,且冲击发生地点位于采掘形成的高应力集中区,矿震能量越大、距离采掘高应力区越近,则冲击越易发生。

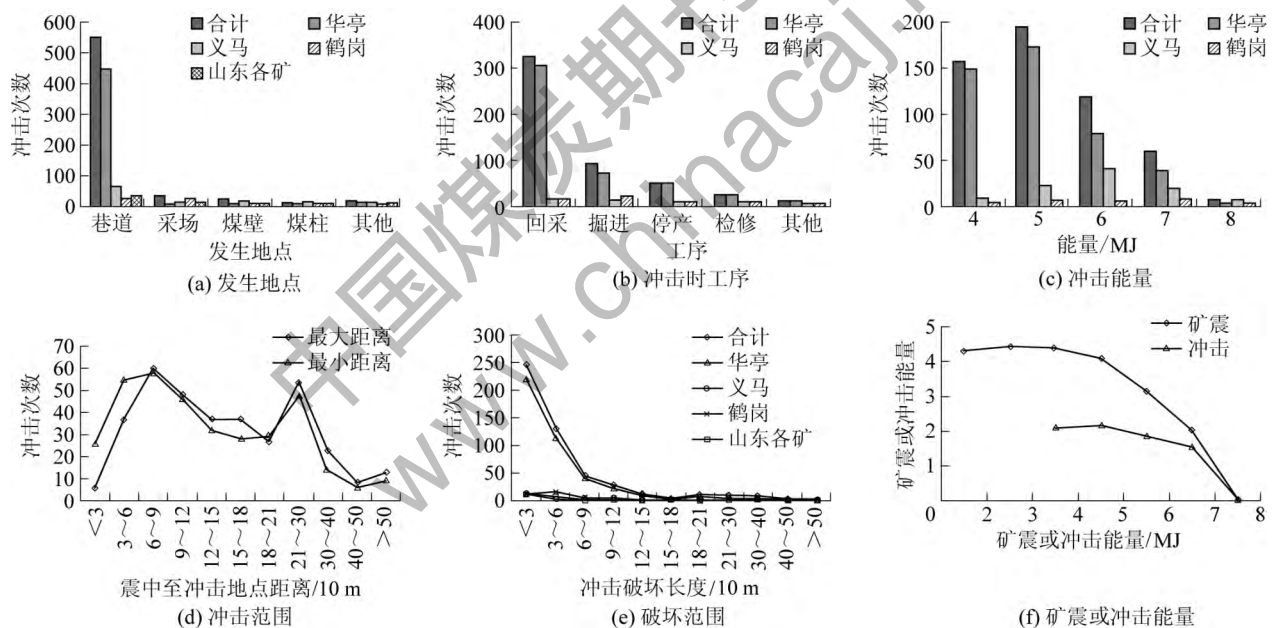


图1 冲击地压显现特征统计结果

Fig. 1 Statistic results of rockburst appearance characteristics

2 冲击地压类型与发生机理

根据调查及统计分析,按照冲击地压位置及影响因素的不同,冲击地压可分为4种类型,即煤柱型、坚硬顶板型、褶曲构造型和断层型^[7]。

1) 煤柱型冲击地压:破坏形式主要为煤柱的压破坏及底板的瞬间鼓起。冲击力源上,以煤柱集中静载应力为主体,附加矿震震动应力波扰动而诱发,

集中静载应力主要为垂直应力。巷道帮部煤体中主要受垂直应力作用,巷道底板主要受水平应力附加由帮部煤体的垂直应力在底板内转化的水平应力双重作用。

2) 褶曲构造型冲击地压:破坏形式主要为底板的瞬间鼓起及帮部破坏。冲击力源上,以煤体集中静载应力为主体,附加矿震震动应力波扰动而诱发,集中静载应力主要为水平应力。巷道底板主要受水

平应力作用,帮部煤体中主要受垂直应力及由底板水平应力在帮部煤体中转化的垂直应力作用。

3) 坚硬顶板型冲击地压: 破坏形式主要为煤岩体强烈震动、重型设备移动、底板瞬间底鼓、煤帮破坏及锚网索断裂。冲击力源上,以坚硬顶板破断滑移运动时形成的震动应力波为主体(矿震动载),附加煤体中集中静载应力。

4) 断层型冲击地压: 破坏形式主要为煤岩体强烈震动、重型设备移动、底板瞬间底鼓、煤帮破坏及锚网索断裂。冲击力源上,以断层活化运动时形成震动应力波为主体(矿震动载),附加煤体中集中静载应力。

上述4种类型的冲击地压都是煤岩体集中静载应力和矿震动载应力波双重作用的结果,不同点是静载应力和动载应力波在冲击地压发生时的贡献大小不同。因此,冲击地压是采掘空间周围煤体中静载荷与矿震形成的动载荷叠加,超过煤体冲击所需要的最小载荷(临界载荷)而诱发的^[5];动静叠加载荷超过临界载荷促使煤体破坏启动,此后聚集在煤岩体中的弹性能以及震动波输入的能量一部分用于煤体破裂耗散及克服围岩阻力,剩余能量使破坏的煤体获得动能形成冲击,称为“动静载叠加诱冲原理”,表现为高静载、高动载和低临界值3种情形。

3 监测预警技术与方法

冲击地压危险监测预警可采用早期危险评价分析与实时即时监测相结合的方法,根据动静载叠加诱冲原理,可分为:①动静载分析:综合指数法、应力分析法、数值模拟分析法、地质动力区划法等;②应力场监测:应力解除法、钻屑法、在线应力法、矿压观测法、弹性波和震动波CT法等;③震动场监测:微震法、声发射、电磁辐射等。

实践证明,由于冲击地压的复杂性,上述单一方法均难以做到对冲击地区的准确预警,而考虑多种方法的多参量综合监测预警技术更为科学;现场选择监测预警方法应基于动静载叠加诱冲原理,首先分析确定矿井冲击地压类型为静载为主型或动载为主型,然后合理选择监测方法进行应力场为主监测或震动场为主监测。

3.1 多参量监测预警技术

基于煤岩破坏的不同裂隙发展阶段与微震、应力、声电等参量响应的关系,对煤岩受载破坏过程中的“应力场-震动场”进行多参量归一化监测预警,

其预测和监测预警方法是综合指数与应力分析预测;钻屑、应力、弹性波和震动波CT进行应力即时监测预警;微震、地音和电磁辐射进行应力波监测预警^[7-8,13]。通过冲击危险性的统一判别准则,将冲击危险等级分为无冲击危险、弱冲击危险、中等冲击危险和强冲击危险,根据危险等级的不同,采用相应的防治对策。该技术在义马矿区、兖州矿区、华亭矿区、新疆宽沟煤矿等进行应用,综合预测准确率达到80%以上。

3.2 应力监测技术

基于“当量钻屑量原理”和“多因素耦合”的冲击地压危险性确定方法。其基本原理是岩层运动、支承压力、钻屑量与钻孔围岩应力之间的正相关关系。通过实时在线监测工作面前方采动应力场的变化规律,找到高应力区及其变化趋势,实现冲击地压危险区和危险程度的实时监测预警和预报^[14-15]。

3.3 弹性波和震动波CT探测技术

该技术即地震层析成像技术^[16-18],其工作原理是利用地震波射线对工作面的煤岩体进行透视,通过观测地震波走时和能量衰减,对工作面的煤岩体进行成像。地震波传播通过工作面煤岩体时,煤岩体上所受的应力越高,震动传播的速度就越快。通过震动波速的反演,可以确定工作面范围内的震动波速度场的分布规律,根据波速与应力的正相关性,可确定工作面范围内应力场的大小,从而划分出高应力区和高冲击地压危险区域。根据震源不同分为主动CT(弹性波CT,震源位置由人工激发,位置已知)和被动CT(震动波CT,基于微震监测系统,利用煤矿开采诱发的矿震,其震源位置未知且不可控)。

3.4 电磁辐射监测技术

煤岩体在载荷作用下变形破坏产生电磁辐射,是由应力作用下非均质性煤岩体中产生非均匀变速形变而引起的,电磁辐射强度和脉冲随着加载及变形速率的增加而增强,煤岩试样在发生冲击性破坏以前,电磁辐射强度一般在某个值以下,而在冲击破坏时,电磁辐射强度突然增加。依据电磁学理论和实验室试验,得出煤体变形破坏电磁辐射与煤体的应力状态存在的耦合关系,建立了电磁辐射监测冲击危险评价和分级预测预报的技术^[19-20]。

3.5 电荷监测技术

煤岩变形破坏过程的电荷感应信号是煤岩微破裂导致裂隙尖端的电荷分离和摩擦作用产生的。电荷感应强度与煤岩体所受的载荷有一定的相关性,

随着载荷增加,电荷感应信号逐渐增加,在煤岩体破坏失稳时刻前后,电荷感应信号强度达到最大值,随后电荷感应信号强度减小^[21-22]。煤岩电荷监测技术的理论基础是冲击地压“失稳机制”,测试的电荷感应信号越强,表明越有可能发生冲击地压。

3.6 地质动力区划技术

地质动力区划基于板块构造学说,根据地形地貌的基本形态和主要特征决定于地质构造形式的原理,通过对地形地貌的分析,查明区域断裂的形成与发展,确定研究区域的各级断块图(活动性断裂图)及断块间的相互作用方式;综合应用地应力测量,以断块图为计算模型,进行构造应力计算,确定构造应力场的大小和方向,为人类的工程活动提供地质环境信息和预测工程活动可能产生的地质动力效应^[23]。它必须遵循板块构造学说的基本原理并结合实际工程问题来完成。

3.7 微震监测技术

利用微震监测系统监测煤岩体破裂信号,通过波形分析确定震源位置和能量大小,还可对微震信号深入挖掘,如矩张量反演、震动波CT、冲击变形能等^[9,24-25]。微震法监测范围一般覆盖整个煤矿并能针对某工作面重点监测。一般,掘进时出现能量为10 kJ的矿震,回采时出现能量为100 kJ的矿震,表明具有较强的冲击危险。

3.8 分区分级监测预警技术

它是采用综合指数法、多因素耦合法、微震法、电磁辐射法和钻屑法等相结合,在时间上从早期冲击危险预测到即时预测,在空间上从区域预测到局部、点预测,逐级排除和确认冲击危险,划分出不同的危险区域并给出其危险程度,实现分区分级预测^[26]。冲击危险程度量化分为4级进行预测,分别为无冲击危险、弱冲击危险、中等冲击危险和强冲击危险。根据冲击危险程度,采取相应的防治对策。

4 多参量综合监测预警技术应用

跃进煤矿是典型的冲击矿井,采用多参量综合监测预警技术,包括微震、钻屑、应力在线、电磁辐射等,实现对震动场和应力场的有效监测。其中,25110工作面采深约1 000 m,主采2-1煤层平均厚11.5 m,综放开采,回采期间发生多起冲击地压。

2012年4月22日,跃进煤矿25110下平巷超前工作面34~44 m处发生冲击地压,破坏范围为10 m,“O”型棚约滑移200 mm,冲击震源距离冲击位置

约60 m,释放能量 1.06×10^7 J。“4·22”冲击发生前的矿震分布和震动波CT反演得到的波速分布如图2所示。

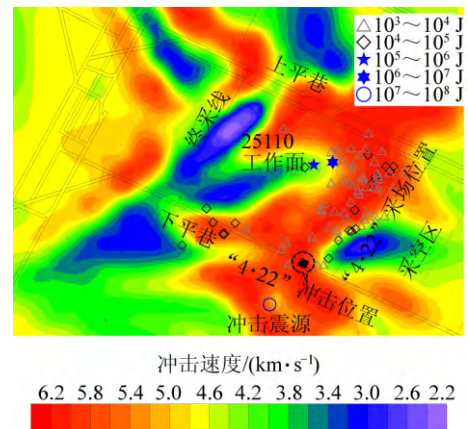


图2 “4·22”冲击发生前的矿震分布和波速分布
Fig. 2 Distribution of mining tremors and P-wave velocity before the “4·22” rockburst

“4·22”冲击位置的波速显著高于平均波速,由波速与应力的正相关性^[27-28]可知,该位置的应力集中程度较高;该位置附近发生多起大能量(> 10 kJ)矿震,表明该位置曾频繁受到矿震动载扰动影响,该位置的极限平衡状态被逐渐打破,当4月22日 1.06×10^7 J能量的矿震发生时,该位置满足了动静载叠加诱冲条件而发生冲击破坏。可见利用微震和震动波CT对震动场和应力场进行监测,对这次冲击事件起到很好的预警效果。

下平巷超前采场段存在较大范围的高波速区,即应力集中区,为降低下平巷的应力集中程度,避免冲击地压再次发生,25110下平巷密集实施了大直径钻孔、煤体爆破、断顶爆破、断底爆破等措施,之后并未再次发生冲击。2012年5月8日至6月7日实施的卸压措施,该时间段的各项监测结果如图3所示。

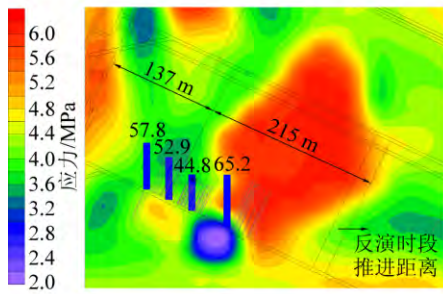
卸压措施实施后,下平巷大部分高波速区变为低波速区,且高波速区对应的钻屑量较大,低波速区对应的钻屑量较小,表明大部分卸压措施的卸压效果很好,但少部分卸压效果不理想,主要位于采场超前90 m范围内。对比震动波CT、钻屑、电磁辐射和应力在线监测可发现,各监测数据虽存在细微差异,但总体一致。

1) 钻屑量监测的为下平巷上帮至煤体数米范围,高波速区的钻屑量较高,低波速区的钻屑量较低,如距终采线约80 m处为高波速区,钻屑量为65.2 kg/m,低波速区钻屑量为44.8、52.9、57.8 kg/m。

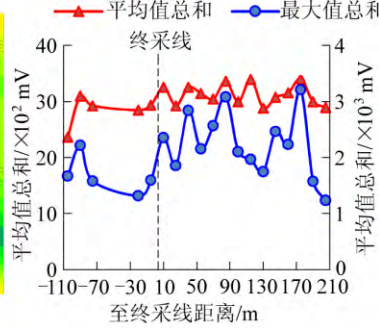
2) 电磁辐射监测的为下平巷上帮至煤体内 7~22 m,高波速区的电磁辐射强度值较高,低波速区的电磁辐射强度值较低,如终采线与采场之间大部分为高波速区,对应的电磁辐射最大值之和达到 3 215 mV,终采线与上山巷道之间大部分为低波速区,对

应的电磁辐射最大值之和较小,最小为 1 322 mV。

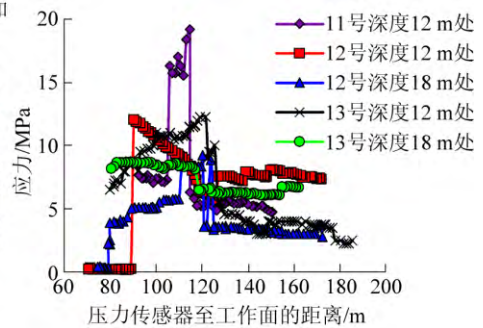
3) 压力传感器监测的下平巷上帮至煤体内 12~18 m,工作面推进距传感器平均 125 m 时,各传感器压力值急剧升高,最大压力值位置距采场一般 90~120 m,高压力值与高波速区的对应性较好。



(a) 卸压措施和震波CT与钻屑监测



(b) 电磁辐射监测



(c) 应力在线监测

图3 卸压措施及多参量监测预警结果

Fig. 3 Stress-relief measures and results of multiple monitoring

上述各监测方法从不同方面监测采场周边震动场和应力场,其监测范围、精度和分辨率各异,如电磁辐射、应力在线和钻屑对局部或点范围的分辨率高,但监测范围相对有限,微震和震动波CT可监测整个煤矿和重点工作面,但分辨率相对较低。因此,仅依靠一种监测手段难以准确确定高应力集中区及矿震扰动区,而联合各监测方法的多参量综合监测预警技术,对冲击地压能起到很好的监测预警效果。

5 结论

1) 冲击地压大多发生在巷道,破坏范围一般在 90~150 m,矿震能量越大、距离巷道及采场越近,其诱冲可能性越高。

2) 冲击地压一般可分为煤柱型、坚硬顶板型、褶曲构造型和断层型,其发生机理都是静载应力集中和矿震动载扰动叠加作用的结果,冲击地压容易发生在高应力集中区和强矿震扰动区。

3) 冲击地压的监测预警主要从静载应力场和震动场两方面,单一监测方法难以实现对冲击地压的准确预警,而联合多种方法涉及震动场和应力场的多参量综合监测预警技术能显著提高冲击地压预警效果。

参考文献(References):

[1] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25. A1. Pan Junfeng, Mao Debing, Lan Han, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China [J].

Coal Science and Technology 2013, 41(6): 21-25. A1.

[2] Cook N C G. A note on rockbursts considered as a problem of stability [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65: 437-446.

[3] Petukhov I M, Linkov A M. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16: 57-76.

[4] Dou Linming, Mu Zonglong, Li Zhenlei, et al. Research progress of monitoring, forecasting and prevention of rockburst in underground coal mining in China [J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2014, 1(3): 278-288.

[5] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476. Dou Linming, He Jiang, Cao Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.

[6] 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. Pan Junfeng, Ning Yu, Mao Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586-596.

[7] 窦林名.煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究:深部煤岩动力灾害的前兆信息特征与监测预警理论[R].徐州:中国矿业大学,2014.

[8] 赵善坤,李宏艳,刘军,等.深部冲击危险矿井多参量预测预报及解危技术研究[J].煤炭学报,2011,36(S2):339-345. Zhao Shankun, Li Hongyan, Liu Jun, et al. The research of deep rock burst dangerous mine prediction with multi-parameter and danger rescission technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 339-345.

- [9] 蔡武, 龚林名, 李振雷, 等. 微震多维信息识别与冲击矿压时空预测: 以河南义马跃进煤矿为例[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2687-2700.
Cai Wu, Dou Linming, Li Zhenlei, et al. Microseismic multidimensional information identification and spatio-temporal forecasting of rock burst: A case study of Yima Yuejin coal mine, Henan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2687-2700.
- [10] 龚林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, 40(6): 690-694.
Dou Linming, Lu Caiping, Mu Zonglong, et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 40(6): 690-694.
- [11] 高明仕, 龚林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.
Gao Mingshi, Dou Linming, Zhang Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-364.
- [12] He Hu, Dou Linming, Fan Jun, et al. Deep-hole directional fracturing of thick hard roof for rockburst prevention [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, 32: 34-43.
- [13] 姜福兴, 曲效成, 于正兴, 等. 冲击地压实时监测预警技术及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 59-64.
Jiang Fuxing, Qu Xiaocheng, Yu Zhengxing, et al. Real time monitoring and measuring early warning technology and development of mine pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 59-64.
- [14] 姜福兴, 冯宇, 刘晔. 采场回采前冲击危险性动态评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2101-2106.
Jiang Fuxing, Feng Yu, Liu Ye. Dynamic evaluation method for rockburst risk before stopping [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2101-2106.
- [15] 王进强, 姜福兴, 吕文生, 等. 冲击危险性及其实时预警云图技术[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(1): 21-26.
Wang Jinqiang, Jiang Fuxing, Lyu Wensheng, et al. Rock burst risk and its real-time warning cloud picture technique [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(1): 21-26.
- [16] Dou Linming, Chen Tongjun, Gong Siyuan, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace [J]. Safety Science, 2011, 50(4): 736-740.
- [17] 龚林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动波CT技术研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 238-244.
Dou Linming, Cai Wu, Gong Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [18] Cai W, Dou L M, Gong S Y, et al. Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2453-2465.
- [19] 龚林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 396-399.
Dou Linming, He Xueqiu, Wang Enyuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 396-399.
- [20] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 电磁辐射技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 642-645.
Wang Enyuan, Liu Xiaofei, Li Zhonghui, et al. Application of electromagnetic radiation technology in monitoring and warning on coal and rock dynamic disasters [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2012, 31(5): 642-645.
- [21] 潘一山, 赵扬锋, 李国臻. 冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 30(S2): 3988-3993.
Pan Yishan, Zhao Yangfeng, Li Guozhen. Charge-induced technique of rockburst prediction and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 30(S2): 3988-3993.
- [22] 潘一山, 罗浩, 赵扬锋. 电荷感应监测技术在矿山动力灾害中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 29-33, 78.
Pan Yishan, Luo Hao, Zhao Yangfeng. Application of charge induction monitoring technology of mine dynamic disasters [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 29-33, 78.
- [23] 温彦良. 地质动力区划和分形理论在煤与瓦斯突出区域预测中的应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [24] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微小地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511-1516.
Jiang Fuxing, Yang Shuhua, Cheng Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [25] Cai Wu, Dou Linming, Gong Siyuan, et al. Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2453-2465.
- [26] 龚林名, 何学秋. 煤矿冲击矿压的分级预测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 717-722.
Dou Linming, He Xueqiu. Technique of classification forecasting rock burst in coal mines [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(6): 717-722.
- [27] 巩思园, 龚林名, 徐晓菊, 等. 冲击倾向煤岩纵波波速与应力关系试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 67-71.
Gong Siyuan, Dou Linming, Xu Xiaojie, et al. Experimental study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(1): 67-71.
- [28] 巩思园, 龚林名, 何江, 等. 深部冲击倾向煤岩循环加卸载的纵波波速与应力关系试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 41-47.
Gong Siyuan, Dou Linming, He Jiang, et al. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 41-47.