

# 断层夹持型不规则工作面冲击地压成因与防控

潘立友<sup>1</sup>, 李彩荣<sup>2</sup>, 陈理强<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 采矿工程研究院, 山东 泰安 271019;

2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)



扫码移动阅读

**摘要:**为有效防治断层夹持不规则工作面冲击地压,建立断层诱发冲击力学模型分析断层冲击地压成因,得到不规则工作面的侧向的支承压力表达式分析其冲击地压成因;采用数值模拟和理论分析原岩应力、构造应力、采动应力对冲击地压发生诱发机制,得到断层夹持与不规则双因素耦合工作面冲击地压成因和断层与工作面冲击地压显现特征。提出断层夹持型不规则工作面冲击地压耦合防控原理与技术体系。针对具体煤层地质和开采条件,采用以硐室为基础,以注水和爆破钻孔为主要措施形成连续缺陷体的整体防控技术,以断层区和不规则区和不规则煤柱区防控措施为主的局部防控技术的缺陷防控的整体防控技术进行了现场实践,验证了缺陷防控技术体系的有效性。

**关键词:**断层夹持型;不规则工作面;应力集中;冲击地压防控

**中图分类号:**TD324

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2018)10-0045-06

## Causes and prevention of rock burst from irregular face clamped with fault

PAN Liyou<sup>1</sup>, LI Cairong<sup>2</sup>, CHEN Liqiang<sup>1</sup>

(1. Mining Engineering of Research Institute, Shandong University of Science and Technology, Taian 271019, China;

2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to prevent and control the mine rock burst of the irregular face clamped with the fault, a mechanics model of the fault-induced rock burst was established and was applied to analyze the cause of the rock burst. An expression formula of the lateral support pressure of the irregular face was obtained and applied to analyze the causes of the rock burst. The numerical simulation and theory were applied to analyze the in-situ stress, structure stress and mining stress affected to the induction mechanism of the rock burst. The rock burst causes of the coupling face with the fault and irregular double factors as well as the rock burst behavior features were obtained. The rock burst coupling prevention principle and technical system of the fault clamped irregular face was provided. According to the geology and mining condition of the certain seam, based on the chamber, the water injection and blasting boreholes as the principal measures were applied to form the completed prevention and control technology of the continued defect mass. A site practices were conducted on the completed prevention technology of with the defect prevention and control of the local prevention technology with the fault zone and irregular zone as well as the irregular coal pillar zone as the principal prevention measures. The affectivity of the defect prevention and control technology system was approved.

**Key words:** clamped fault; irregular mining face; stress concentrated; rock burst prevention and control

## 0 引言

断层夹持、切割与不规则(含不规则煤柱)工作面的冲击地压危险性较常规条件下的冲击地压不仅难以预测,而且难以防治<sup>[1-4]</sup>。由于断层的夹持、切

割作用,破坏了煤岩层的连续性,且容易造成不规则的工作面;随着采深的增加,此类条件下的冲击地压呈现出增多、增强的趋势,尤其在断层群和牵引断层带的区域,当煤层具有强冲击倾向性时,发生冲击地压的可能性就越大<sup>[5-6]</sup>。姜福兴等<sup>[7-8]</sup>运用微震法

收稿日期:2018-05-31;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.10.007

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804201);国家自然科学基金资助项目(51674159,51804186)

作者简介:潘立友(1965—),男,山东昌乐人,教授,博士生导师。E-mail:panliyu7930@sina.com

引用格式:潘立友,李彩荣,陈理强.断层夹持型不规则工作面冲击地压成因与防控[J].煤炭科学技术,2018,46(10):45-50.

PAN Liyou, LI Cairong, CHEN Liqiang. Causes and prevention of rock burst from irregular face clamped with fault[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 45-50.

监测,将构造区域附近的应力状态与微震事件变化规律进行了对应分析,研究构造控制型冲击地压的分类和预警办法。潘一山等<sup>[9]</sup>认为断层带与上下盘围岩系统的变形失稳的过程是诱发断层冲击地压的主因,开采形成的附加应力使的断层带岩石失稳,进而造成整个断层系统达到了极限平衡时,断层失稳产生冲击地压。总的来说,我国断层冲击地压等进行了大量的研究。但是,由于断层夹持、切割与不规则工作面周围存在采空区,采空区与巷道之间往往存在不规则煤柱,在不规则煤柱、不规则区域往往出现应力高度集中,极易引起不规则(煤柱)区域发生高能量冲击地压。但是,目前就断层切割与不规则(煤柱)工作面冲击地压机理研究还不够深入、系统,特别是对于多侧断层切割、一侧为不规则采空区边界的工作面冲击地压机理、显现特征与防治技术的研究还相对较少,由于此类工作面冲击地压具有隐蔽性和特殊性,再加上断层切割、夹持与其他多种因素的耦合作用,使冲击地压防治工作更加困难。

某矿北二 700 工作面断层发育、落差大、且多个断层交错切割,造成工作面呈现不规则形状,同时无断层一侧为采空区,阶段煤柱不等宽,属于不规则煤柱,埋深超过 600 m,容易在断层切割、夹持、不规则煤柱、不规则区域出现能量聚集与应力集中。本煤层、本区域相邻工作面开采时冲击地压显现明显,在断层切割、夹持、重力应力场及开采扰动等多因素作用下,存在发生冲击地压的可能性<sup>[5]</sup>。因此,笔者以某矿北二 700 工作面为研究背景,进行断层夹持与不规则(煤柱)工作面冲击地压成因及防治技术的研究。

## 1 冲击地压成因分析

### 1.1 断层夹持区冲击地压成因

1) 断层诱发冲击的力学模型。断层诱发冲击地压,主要原因是断层发生滑移变形,断层上下盘产生相互滑动摩擦,可将断层简化为一个弹簧和滑块串联组成的力学模型<sup>[10-11]</sup>。该模型具有弹塑性性质,能够代表断层产生滑移破坏的力学特性,其模型如图 1 所示。

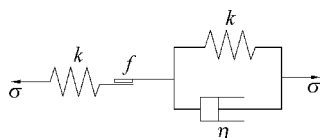


图 1 断层滑动力学模型

Fig. 1 Fault slip mechanics model

当模型两侧应力  $\sigma$  小于滑块的摩擦阻力  $f$  时,

整体结构发生的变形即为弹簧产生的变形,此时滑块没有发生变形;当模型两侧应力  $\sigma$  大于滑块的摩擦阻力  $f$  时,滑块将在应力  $\sigma$  作用下持续滑动,因此可得出其本构方程为

$$\begin{cases} \sigma < f (\varepsilon = \frac{\sigma}{k}) \\ \sigma > f (\varepsilon \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)说明断层型冲击地压<sup>[12-15]</sup>的发生是断层围岩的突然滑移错动造成的,滑移错动以附加应力的形式作用到具有冲击倾向性的煤岩体上,其实质是断层带应力场的应力分布发生变化而导致系统的突变失稳。煤层开采形成的动态应力场叠加了断层带应力场,在开采扰动作用下,断层区域积聚的变形能突然释放,发生冲击地压。

2) 数值模拟断层区冲击地压成因。数值模拟<sup>[16-17]</sup>研究采用 RFPA,该程序可用于研究岩体材料从微观损伤到宏观破坏的全过程。

模拟采用的力学参数的选取根据某矿北二 700 工作面实际地质柱状图通过反演和优化,并结合实际观测数值进行综合分析后确定。主要模拟随着工作面推采,距离断层越来越远条件下煤岩体变形破坏情况。

断层影响的主应力和声发射分别如图 2 和图 3 所示,当工作面距离断层较远时(75 m),工作面基本不受断层的影响,工作面断层侧煤帮和开切眼煤帮变形破坏基本一致,开切眼和煤壁声发射较少,且数量和能量基本相当;随着工作面的推采,工作面煤壁距离断层越来越近,工作面断层侧帮部逐渐受断层影响,变形破坏逐渐增大,煤壁处声发射逐渐增大,当工作面煤壁距离断层较近时(25 m),煤壁破坏和断层贯通,断层致使工作面煤壁发生严重破坏,冲击地压危险性变大。

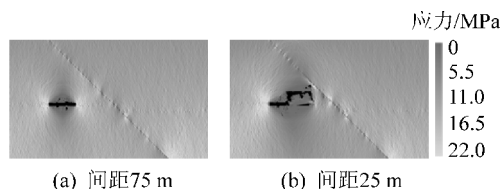


图 2 断层影响的主应力

Fig. 2 The main stress attempt of the fault

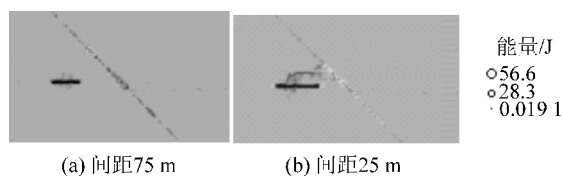


图 3 断层影响的声发射

Fig. 3 Acoustic emission map affected by fault

断层影响的垂直应力如图4所示,当工作面距离断层较远时(75 m),工作面超前支承压力与断层区应力基本不重叠,中间存在处于原始应力场的“平区”,工作面断层侧煤帮和开切眼煤帮应力分布基本一致,说明此时断层未对工作面产生影响;但是随着工作面推采,工作面煤壁距离断层近时(25 m),工作面超前支承压力逐渐和断层高应力向叠加,煤柱内部“平区”范围逐渐缩短,直至消失,煤壁和断层之间煤柱上部应力分布呈明显的高于原始应力场的“双驼峰”型;超前支承应力峰值和断层峰值逐渐增大,特别是超前支承应力峰值远高于常规区域,随着工作面推采,煤壁受断层影响越来越大,冲击危险性越来越高。

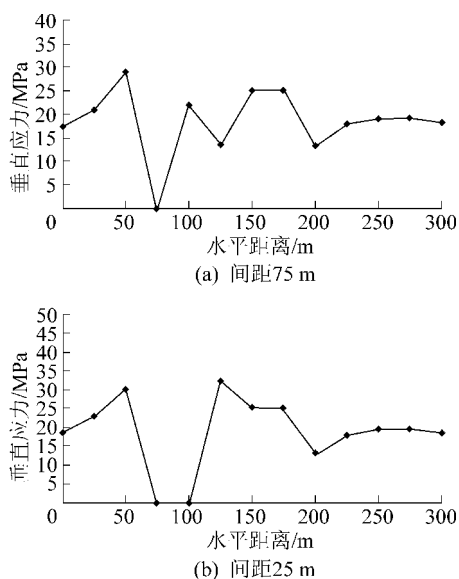


图4 断层影响的垂直应力

Fig. 4 Vertical stress stripe influenced by fault

## 1.2 不规则煤柱冲击地压成因

为方便进行力学分析,以不规则孤岛工作面为研究对象,主要研究工作面两侧采空条件下,不规则煤柱区域应力分布特征。不规则工作面支承压力分布情况如图5所示,不规则区域与规则区域相比应力分布发生了明显变化。

规则工作面的侧向支承压力为

$$\sigma_y = K\gamma K(x)H \quad (2)$$

式中: $K$ 为规则工作面集中系数; $\gamma$ 为岩石容重; $x$ 为距采空区距离; $H$ 为采深。

对于不规则工作面开采时覆岩运动和应力分布,需要借鉴规则工作面的应力分布,增加一个与不规则尺寸有关的系数。不规则工作面的侧向的支承压力为

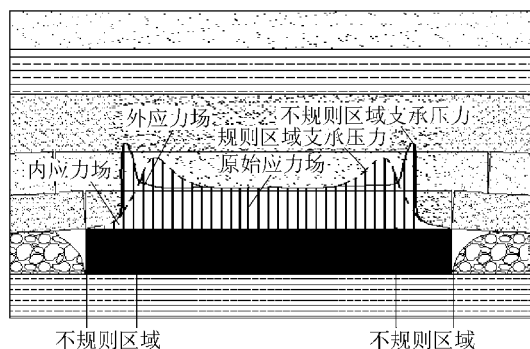


图5 不规则工作面支承压力分布

Fig. 5 Distribution diagram of support pressure in irregular working face

$$\sigma_{yb} = K_b K \gamma K(x) H \quad (3)$$

式中: $\sigma_{yb}$ 为不规则工作面支承压力; $K_b$ 为不规则工作面传递系数。

不规则区域冲击地压的发生主要是受采空侧压等高应力的影响,造成应力集中;不规则区域煤体呈现外凸结构,致使其比规则区域的应力集中度更高,积聚的能量更多,在开采扰动作用下,易诱发高能量的释放,挤出煤体,发生冲击地压。

## 1.3 双因素耦合的冲击地压成因

采用数值模拟研究某矿北二700工作面受采空区不规则煤柱和断层夹持情况下的工作面巷道变形破坏情况。断层和煤柱叠加影响的主应力、声发射分别如图6和图7所示。

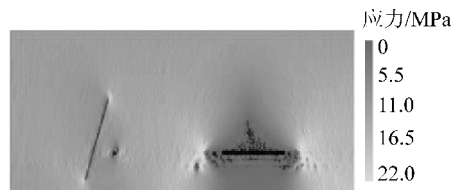


图6 断层和煤柱叠加影响的主应力

Fig. 6 Main stress attempt of the superposition of the fault and the coal pillar

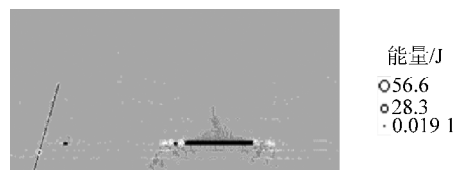


图7 断层和煤柱叠加影响的声发射

Fig. 7 Acoustic emission influenced by superposition of fault and coal pillar

一侧为不规则煤柱、一侧为大断层情况下,工作面巷道随着时间的推移逐渐发生变形破坏,但是变形破坏的程度不同,采空区巷道为小煤柱时,变形破

坏程度更大,声发射更多,属于破坏区,说明小煤柱出现了完全破坏;不规则煤柱超过 8~10 m 时,会受到侧向高应力作用;断层侧应力集中程度相对更高(图 8),并且随着时间推移,应力集中程度呈增大趋势,说明具有更高的冲击危险性。

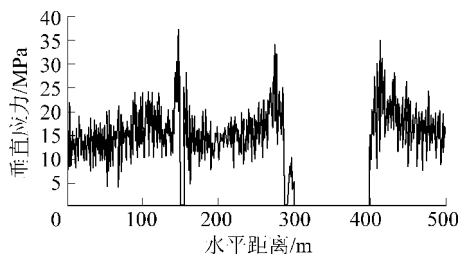


图 8 断层和煤柱叠加影响的垂直应力

Fig. 8 Vertical stress in the superposition of fault and pillar

## 2 冲击地压防控原理

工作面采掘期间由于断层夹持、切割、工作面不规则、采空煤柱高应力等多因素耦合作用,导致冲击危险性高,特别是不规则煤柱与断层夹持、切割区域集中的应力高、积聚的弹性能量大,采空区边缘侧压在采掘整个过程中始终保持加载作用。因此,采用常规的防控措施难以保证消除冲击危险性,需要对危险区域进行浅部与深部耦合释能技术,即深部保持持续释放能量<sup>[18-20]</sup>,浅部保持一定范围的缓

冲带。

卸压包括 2 个带,分别为工作面巷道近煤壁(8~10 m)裂隙软化带 A 区、距工作面巷道煤壁内部(>10 m)缓冲带 B 区。A 区采用强卸压措施,制造形成裂隙发育、强度低的裂隙软化带,起到释放能量,直接保护巷道的作用;B 区域采用注水等措施,制造裂隙、降低区域强度,起到缓冲、耗散作用。对于不规则煤柱、靠近夹持断层区域,A 区需要向工作面、断层一侧扩展,类似“凸”型,以耗散不规则煤柱区域的高弹性能。

## 3 工程应用与效果分析

### 3.1 工程概况

某矿北二 700 工作面埋深为 570~620 m,煤层厚度平均为 5.78 m,近水平煤层;工作面东部为 F4 号断层,为采区边界;北部为 F43 号采区边界断层;西部为北二 701 工作面采空区;南部为采区巷道保护煤柱(图 9)。工作面基本顶为一般厚度 10.38 m 粗砂岩,直接顶为厚度 8.60 m 的泥岩、粉砂岩为主,底板岩性为厚度 3~5 m 的粉砂岩、细砂岩。顶板厚度较大、强度较高。工作面被 F4 和 F43 大断层所夹持,且工作面掘进过程中揭露多条断层,见表 1。

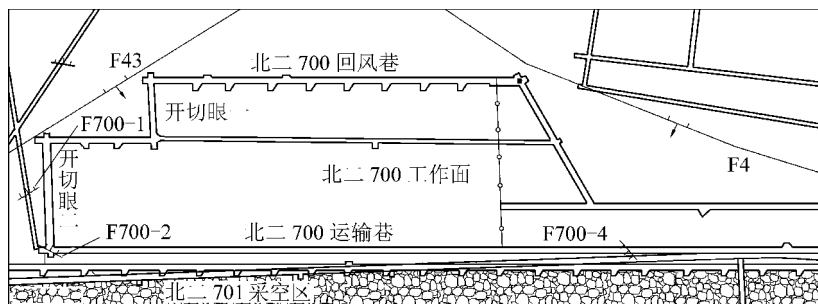


图 9 工作面位置示意

Fig. 9 Working face position

### 3.2 工作面冲击地压防控技术

#### 3.2.1 整体防控技术

常规解危、卸压方法对断层切割、夹持、不规则工作面不够充分,针对这种多种高危险因素耦合作用的危险区域,根据冲击地压防控原理,本工作面采取预卸压技术。

在北二 700 工作面掘进期间施工卸压硐室,再在硐室进行注水卸压和爆破卸压,形成多个大面积缺陷体<sup>[21-22]</sup>,在缺陷体之间的巷道实施爆破钻孔卸压,形成贯通的缺陷结构体,该结构体起到了将应力

和能量进行消除和隔断的作用,将较大集中度的应力和能量由缺陷体进行了分割降低了其集中度,消除了动力灾害的危险,能够在采掘时空上耗散煤体内弹性能量。

北二 700 工作面实施的缺陷结构体示意图 10 所示。在硐室内进行高压注水,然后进行硐室内钻孔爆破处理。以硐室为基础,以注水和爆破钻孔为主要措施,形成了一个缺陷体,在缺陷体之间的巷道实施爆破钻孔卸压,形成耦合防控技术。



表 1 工作面掘进过程中揭露的断层

**Table 1** Faults revealed during workingface excavation

断层	揭露地点	断层性质	落差/m	倾角/(°)
F4	回风巷	正	2.3	70
	回风巷联络巷	正	31.0	52
F4-1	回风巷	正	31.0	52
F43	开切眼一	正	11.0~15.0	62
	开切眼二	正	20.0	63
F700-1	开切眼一	正	1.0	—
F700-2	运输巷	正	1.0	50
F700-3	运输巷	正	1.0	47
F700-4	运输巷	正	1.9	52

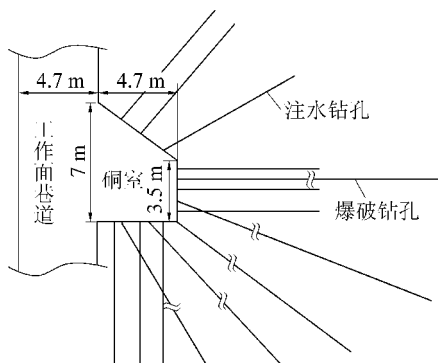


图 10 缺陷硐室及注水示意

Fig. 10 Defect chamber and water injection diagram

### 3.2.2 局部防控技术

1) 断层区卸压技术。巷道进入断层危险区域,对巷道掘进工作面及后路区域采取密集深孔爆破技术,改变应力分布、释放断层区域积聚的高能量,属于充分卸压区。由于断层切割范围大,应力分布出现异常,从有利于开采期间释放能量考虑,在断层区域布置超深大直径钻孔,该钻孔对断层高应力区域能量起到导向作用,起到提前释放断层区冲击能量的作用,属于导向卸压区。A 区域是采用爆破和大直径钻孔卸压制造的巷道充分卸压区,B 区域是采用大直径钻孔卸压制造的导向卸压区,显然 B 区从巷道掘进到开采期间,对断层区域的应力与能量始终起到转化、卸压、疏导作用。

2) 不规则区防控技术。不规则区域受到应力叠加作用,需要从应力控制角度进行防控。从有利于应力转移角度考虑首先是破坏高应力区域的煤体,从应力最高的凸角到两侧布置密度不同的爆破深孔。A 区域是高密度爆破区,B 区域是相对低密度爆破区。

### 3) 不规则煤柱区防控技术。工作面运输巷采

空煤柱宽度 7~12 m 不等,由于为不规则煤柱区域,在煤柱较宽区域会出现应力高度叠加现象。从应力降低、能量释放考虑,冲击危险煤层需要实现长期连续释放能量,整个掘进巷道超前到后路进行软化处理,采取了超前深孔注水技术,保证掘进工作面 60 m 为软化缓冲区实施 80 m 长注水孔,掘进 20 m 后继续施工 80 m 长注水孔,循环进行,始终保持了超前 60 m 的卸压释放带,如图 11 所示。

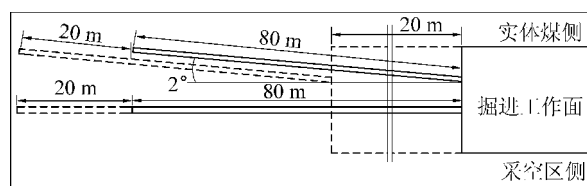


图 11 煤柱区运输巷掘进期间工作面卸压示意

Fig. 11 A sketch map of head-on and pressure unloading during the driving of coal pillar area

回采期间,回风巷受断层影响,运输巷受煤柱影响,军存在较高冲击危险,因此采用煤层硐室内高压注水和煤层巷道爆破泄卸压相结合的缺陷法耦合防控技术进行冲击地压的防控。在工作面巷道每隔 35 m 布置的硐室内进行煤层注水和爆破卸压,回风巷布置 8 个,运输巷布置 6 个。在回风巷向煤帮两侧煤体布置爆破钻孔,在运输巷工作面侧煤帮布置爆破钻孔,钻孔间距均为 5 m。

4)卸压效果。通过耦合卸压后,应力计读书和钻屑量均出现了较大降低,冲击地压危险性得到大幅降低和消除,工作面得以安全回采。

## 4 结 论

1)建立了断层冲击地压力学模型,分析了断层发生冲击的力学准则;研究了断层与工作面冲击地压显现特征;分析了不规则煤柱应力分布变化规律。

2)数值模拟研究了断层与工作面夹持状态下的煤岩应力场与能量演化过程,随着工作面开采的推进,断层侧出现应力集中、能量快速积聚,采空区一侧出现相同规律。

3)建立了断层夹持型不规则工作面冲击地压耦合防控原理与技术体系,采用分割与连续释放体方法进行整体防控。

4) 针对具体煤层条件,提出了缺陷防控的整体防控技术,进行了现场工程试验研究,实现了整个采掘期间的安全生产。

## 参考文献 (References):

- [1] 窦林名,何 焯,张卫东.孤岛工作面冲击矿压危险及其控制[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1866-1869.  
DOU Linming, HE Ye, ZHANG Weidong. The risk of rock burst and its control in the working face of the isolated island [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (11): 1866-1869.
- [2] 潘立友,张若祥,孔繁鹏.基于缺陷法孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(6):14-16, 45.  
PAN Liyou, ZHANG Ruoxiang, KONG Fanpeng. Research on prevention and control of rock burst in isolated working face based on defect method [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41 (6): 14-16, 45.
- [3] 张宁博.断层冲击地压发生机制与工程实践[D].北京:煤炭科学研究总院,2014.
- [4] LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, *et al.* Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 70: 192-200.
- [5] 李佃平.煤矿边角孤岛工作面诱冲机理及其控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2012:32-40.
- [6] 陈 颖,刘福祥.孤岛工作面冲击危险性分析及防治研究[J].山东煤炭科技,2011(4):220-221.  
CHEN Ying, LIU Fuxiang. Risk analysis and Prevention Study on impact of isolated working face [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2011(4):220-221.
- [7] 姜福兴.微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J].岩土工程学报,2002(2):147-149.  
JIANG Fuxing. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002(2):147-149.
- [8] 姜福兴,杨淑华,成云海,等.煤矿冲击地压的微地震监测研究[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.
- [9] 潘一山,王来贵,章梦涛,等.断层冲击地压发生的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):642-649.  
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, *et al.* Theoretical and experimental study on the occurrence of fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (6): 642-649.
- [10] 窦林名,何学秋.煤岩混凝土冲击破坏的弹塑脆性模型[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集.北京:中国科学技术出版社,2002:158-160.
- [11] 曹树刚,鲜学福.煤岩的广义弹粘塑性模型分析[J].煤炭学报,2001,26(4):365-369.  
CAO Shugang, XIAN Xuefu. Analysis of the generalized viscoplastic model of coal and rock [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(4): 365-369.
- [12] 潘 岳,刘 英,顾善发.矿井断层冲击地压的折迭突变模型[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):45-48.  
PAN Yue, LIU Ying, GU Shanfa. A folding catastrophe model of mine fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001. 20(1): 45-48.
- [13] 毛德兵,陈法兵.采动影响下断层活化规律及其诱发冲击地压的防治[J].煤矿开采,2013,18(1):73-76,65.  
MAO Debing, CHEN Fabing. The law of fault activation and the control of induced rockburst under mining influence [J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(1): 73-76, 65.
- [14] 杨建飞,徐明武,宋兆国.断层区域能量聚积对冲击地压影响分析[J].山东煤炭科技,2011(5):188-189.  
YANG Jianfei, XU Mingwu, SONG Zhaoguo. Influence of energy accumulation in fault area on rock burst [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2011(5): 188-189.
- [15] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等.断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):812-817.  
SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, *et al.* Experimental study on transient process of rock burst instability by faults [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (4): 812-817.
- [16] 顾永强,田志超,刘业娇.边角煤柱断层冲击地压的数值模拟[J].现代矿业,2016(7):27-29.  
GU Yingqiang, TIAN Zhichao, LIU Yejiao. Numerical simulation of rock burst in edge angle coal pillar [J]. Modern Mining, 2016 (7): 27-29.
- [17] 兰 兵.断层组应力分布的数值模拟及巷道组支护技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2012:39-56.
- [18] 张绪言,冯国瑞,康立勋,等.用剩余能量释放速度判定煤岩冲击倾向性[J].煤炭学报,2009,34(9):1165-1168.  
ZHANG Xuyan, FENG Guoeui, KANG Lixun, *et al.* Determination of coal rock impact tendency by remaining energy release velocity [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1165-1168.
- [19] 邹德蕴,姜福兴.煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J].煤炭学报,2004,29(2):159-163.  
ZHOU Deyun, JIANG Fuxing. Study on the mechanism of energy storage and rockburst inoculation in coal and rock mass and its prediction method [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (2): 159-163.
- [20] 宋大钊.冲击地压演化过程及能量耗散特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2012:45-58.
- [21] 潘立友.工程缺陷防治冲击地压创新研究[M].天津:天津科学技术出版社,2013:40-96.
- [22] 潘立友,张若祥,孔繁鹏.基于缺陷法孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(6):14-16,45.  
PAN Liyou, ZHANG Ruoxiang, KONG Fanpeng. Research on prevention and control of rock burst in isolated working face based on defect method [J]. Coal science and technology, 2013, 41 (6): 14-16, 45.