

文章编号: 1000-1964(2007)06-0717-06

煤矿冲击矿压的分级预测研究

窦林名, 何学秋

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对煤矿冲击矿压灾害, 研究了冲击危险性的监测原理和冲击矿压危险的分级预测准则. 通过连续监测预警技术和系统集成, 应用综合指数法、微震法、电磁辐射法和钻屑法, 形成冲击矿压的时空分级预测技术体系, 即在时间上对冲击危险进行早期综合分析预测与即时预测相结合, 在空间上进行区域预测与局部监测、点预测相结合, 对冲击矿压的危险性根据危险指数的大小, 按无、弱、中等和强冲击危险 4 级进行预测. 根据预测的冲击矿压危险等级, 采取加强监测、解危、甚至撤人等防治对策. 工程实践表明, 采用该技术, 可大大提高冲击危险预测的准确性, 取得良好的应用效果.

关键词: 冲击矿压; 分级预测; 时间预测; 空间预测; 危险等级

中图分类号: TD 324 **文献标识码:** A

Technique of Classification Forecasting Rock Burst in Coal Mines

DOU Lin-ming, HE Xue-qiu

(State Key Laboratory of Resources and Mine Safety, School of Mining and Safety Engineering,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The monitoring principle and rule of classification forecasting rock burst have been studied aiming at the rock burst in coal mining. The system of classification forecasting rock burst in space and time was established by the forecasting technique of continuous monitoring and integration of the monitoring system and the application of methods with geological and mining factors, seismological, electromagnetic and drillings method. It was a combination method of early comprehensive analysis and real-time forecasting in time, and the region forecasting, the local and nod forecasting in space. The non, weak, middle and strong risk of rock burst have been classified by risk index of rock burst. The measurements of rock burst monitoring, risk control and even the workers withdraw from working face should be adopted based on the forecasting risk rating of rock burst. The practice in coal mine showed that the classification forecasting technique of rock burst can provide reliable and continuous forecasting of the risk in coal mine working face, and greatly increase the forecast accuracy and has got a effective results.

Key words: rock burst; classification forecasting; forecasting in time; forecasting in space; risk rating of the rock burst

收稿日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50490273, 50474068);“十一五”国家科技支撑计划(2006BAK04B02, 2006BAK03B06);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB221504)

作者简介: 窦林名(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事矿山压力、冲击矿压、岩爆、采矿地球物理等方面的研究.

E-mail: lmdou@126.com Tel: 0516-83995904

冲击矿压是聚积在矿井巷道和采场周围煤岩体中的能量突然释放, 动力将煤岩抛向巷道, 同时发出强烈声响, 造成煤岩体振动和煤岩体破坏, 支架与设备损坏, 人员伤亡, 部分巷道垮落破坏等. 冲击矿压还会引发或可能引发其它矿井灾害, 尤其是瓦斯、煤尘爆炸, 火灾以及水灾, 干扰通风系统, 严重时造成地面震动和建筑物破坏等. 因此, 冲击矿压是煤矿重大灾害之一^[1-7].

一般来说, 冲击矿压可分为由采矿活动引起的采矿型冲击矿压和由构造活动引起的构造型冲击矿压. 而采矿型冲击矿压又可分为压力型(煤柱型)、冲击型(顶板或底板型)和冲击压力型^[2,3,6]. 压力型冲击矿压是由于巷道周围煤体中的压力由亚稳态增加至极限值, 其聚集的能量突然释放. 冲击型冲击矿压是由于煤层顶底板厚岩层突然破断或位移引发的, 它与震动脉冲地点有关. 在某种程度上, 构造型冲击矿压也可看作为冲击型. 冲击压力型冲击矿压则介于上述两者之间, 当煤层受较大压力时, 来自围岩内不大的冲击脉冲作用下发生的冲击矿压. 因此, 不仅要预测煤柱区冲击矿压危险的高低, 而且要预测大范围顶板岩层或构造运动引起的冲击矿压的危险性.

由于发生冲击矿压的时间、地点、区域、震源等的复杂多样性和突发性, 使得冲击矿压的预测工作变得极为困难复杂, 是急待解决的世界性难题^[1-6]. 目前普遍采用的预测方法单一、适用范围有限, 存在漏报的问题, 可靠性低. 为了解决上述问题, 本文建立了冲击矿压的分级预测准则, 通过冲击矿压连续监测预警技术, 形成了冲击矿压分级预测技术体系, 即: 时间上从早期预测到即时预测、空间上从区域预测到局部、点预测, 逐级排除和确认冲击矿压危险.

1 煤岩冲击破坏的监测原理

大量的实验室试验、现场测试、模拟研究均表明, 煤岩等固体脆性材料在载荷作用下, 其变形破坏特征为脆性冲击破坏; 冲击破坏具有突发性和延时性; 冲击破坏过程中内部将产生塑性变形或裂纹, 当裂纹形成和扩展时, 将瞬态释放应变能而产生弹性波. 伴随着这种现象, 将会有声发射产生; 同样当煤岩体等材料受载变形破裂时, 将会产生向外以电磁能的形式释放弹性能的现象. 伴随着这种现象, 将会有电磁辐射产生^[2,3].

因此可建立煤岩等固体脆性材料变形破坏的弹塑性脆性体模型来描述上述煤岩等固体脆性材料

变形破坏特征以及在其变形破坏过程中声发射和电磁辐射耦合规律. 而煤岩体的变形破坏程度可采用岩石的损伤因子来描述.

岩石的损伤因子 $D(t)$ 的增长过程与声发射和电磁辐射的能量释放紧密相关.

一般情况下, 煤岩体在受载条件下, 变形破坏时能量的变化 ΔU 可由下式来确定

$$\Delta U = \sigma \cdot \Delta \epsilon = \sigma(\epsilon_2 - \epsilon_1), \quad (1)$$

而且设破坏程度的损坏因子与变形呈线性关系

$$\epsilon = C_1 D - C_0, \quad (2)$$

$$\text{则 } \Delta U = q [C_1 D_2 - C_0] - [C_1 D_1 - C_0]. \quad (3)$$

由此, 得 ΔU 与损伤因子的增量 $D(t) = D(t_2) - D(t_1)$ 成正比, 也即

$$D(t) \propto U' \propto u(t) \propto \epsilon', \quad (4)$$

即如果 σ 为常数, 而且 $D \propto \epsilon$, 则在弹性场中出现破坏时, 破坏速率表现在瞬间能量 $u(t)$ 的释放中. 煤岩体的破坏情况可通过瞬间能量的释放表现出来, 即产生声发射和电磁辐射.

对于煤矿井下的煤岩体, 其冲击破坏是能量的聚积和快速释放的结果. 但在生产实践中, 确定冲击破坏的发生是非常困难的, 必须首先建立煤岩冲击破坏预测准则^[2,3].

根据弹塑性脆性模型, 当煤岩体上所受的应力超过了其强度极限, 或者当煤岩体的变形超过了最大变形时, 煤岩体就破坏. 如果 $\epsilon(t)$ 是观测到的实际变形值, 则危险程度 $W_\epsilon(t)$ 将由下式确定

$$\begin{cases} W_\epsilon(t) = 0, & \epsilon(t) < \epsilon^0, \\ 0 \leq W_\epsilon(t) = \frac{\epsilon(t) - \epsilon^0}{\epsilon_p - \epsilon^0} \leq 1, & \epsilon(t) \geq \epsilon^0. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)即为煤岩体冲击破坏的判别准则.

由煤岩损伤、变形破坏即能量释放的分析可知, 煤岩变形破坏的变化率与声发射、电磁辐射的能量释放率成正比. 因此声发射或电磁辐射确定煤岩破坏的危险程度可采用同样的方式. 即

$$0 \leq W_n(t) = \frac{N(t) - N^0}{N_p - N^0} \leq 1, \quad N(t) \geq N^0, \quad (6)$$

式中 $N^0, N_1, N(t)$ 分别表示初始、极限和 t 时刻的矿震或电磁辐射事件数(脉冲数).

2 冲击矿压分级预测技术

2.1 时空预测

在时间上, 冲击矿压的预测分早期综合分析预测和即时预测. 早期综合分析预测主要采用综合指数的方法, 而即时预测则采用电磁辐射、微震和钻

屑等方法进行^[7-12]。

在空间上, 冲击矿压的预测分区域预测、局部预测和点预测。区域预测主要采用综合指数法和微震监测方法, 而局部预测采用综合指数方法、微震法和电磁辐射法, 点预测则采用钻屑方法。

也就是采用综合指数法、微震法、电磁辐射法和钻屑法相结合, 在时间上从早期预测到即时预测, 在空间上从区域预测到局部、点预测, 逐级排除和确认冲击矿压危险, 实现分级预测, 见图1。

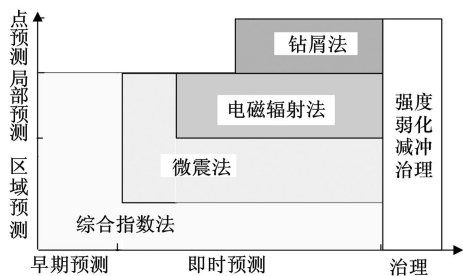


图1 冲击矿压危险的时空预测

Fig.1 Spacing-time forecast on rock burst

1) 早期与区域局部预测的综合指数法

综合指数法就是通过对影响冲击矿压发生的地质及开采因素的分析, 以及100多次已发生冲击矿压事故的分析, 确定出采掘工作面周围地质条件和开采条件的每个因素对冲击矿压的影响程度, 以及各个因素对冲击矿压危险影响的指数。通过综合分析, 形成了冲击矿压危险状态等级评定的综合指数法。综合指数法既是一种早期综合评价的方法, 又是一种区域和局部预测的方法。

这种综合指数法分地质因素确定的冲击矿压危险程度和开采因素确定的冲击矿压危险程度。地质因素确定冲击危险主要考虑了冲击矿压发生的情况、开采深度、地质构造、坚硬顶板、顶板厚度特征参数、煤的冲击倾向性、煤的强度等7个因素。开采因素确定冲击危险主要考虑了开采技术条件、开采历史、煤柱、停采线、采空区、工作面接近煤层的变化带、工作面接近断层皱曲等12个开采因素对冲击矿压发生的影响。

对于一个矿井的采区和工作面, 首先分析矿井的地质与开采因素对冲击矿压的影响, 然后采用综合指数法, 分析确定矿井的水平、采区、工作面各部分的冲击矿压危险指数, 划分出冲击矿压的危险区域和重点防治区域。

2) 即时与区域预测的微震法

微震法就是记录采矿震动的能量, 确定和分析震动的方向, 对震中进行定位。在此基础上, 提出了冲击矿压危险性的微震分级预测技术。

微震预测冲击矿压危险时, 主要采用矿震时释放能量的大小来确定冲击矿压发生的危险程度。当矿井的某个区域监测到矿震释放的能量大于发生冲击矿压的所需的最小能量时, 则该区域的当前时间内有发生冲击矿压的危险性。如果在矿井的某个区域内, 在一定的时间内, 已进行了微震监测, 根据观测到的微震能量水平, 就可以捕捉到冲击矿压危险信息, 并进行预测。

3) 即时与局部预测的电磁辐射法

根据大量的实验室试验研究、现场实测分析研究、理论分析表明, 煤岩冲击变形破坏的损伤速度、能量与电磁辐射的幅值、脉冲数成正比。

在工作面采掘过程中, 围岩发生破裂时, 均有电磁辐射信号产生。电磁辐射信号的强度随着围岩受载程度的增大而增强, 随变形速率的增加而增强。与此同时, 煤岩体电磁辐射的脉冲数随着载荷的增大及变形破裂过程的增强而增大。载荷越大, 加载速率越大, 煤体的变形破裂越强烈, 电磁辐射信号也越强。

根据上述理论及电磁辐射观测规律, 可采用电磁辐射的幅值和脉冲数变化率确定冲击矿压的危险前兆信息和进行预测预报。

4) 即时与点预测的钻屑法

钻屑法是通过在煤层中打直径42~50 mm的钻孔, 根据排出的煤粉量及其变化规律和有关动力效应, 鉴别冲击危险的一种方法。该方法的基本理论和最初试验始于20世纪60年代, 其理论基础是钻出煤粉量与煤体应力状态具有定量的关系, 即其他条件相同的煤体, 当应力状态不同时, 其钻孔的煤粉量也不同。当单位长度的排粉率增大或超过标定值时, 表示应力集中程度增加和冲击危险性提高。

对于一定条件的煤体, 在正常应力作用下, 不同钻孔深度的煤体的应力状态是不同的, 此时钻孔的煤粉量也不相同。当煤层的应力集中程度增加或应力状态异常时, 钻孔的煤粉量将发生改变。根据煤粉量的变化, 即可预测煤体的受力状态, 并进一步预测冲击危险性。

2.2 冲击矿压危险性的分级预测

上述时空预测的综合指数法、微震法、电磁辐射法和钻屑法分别确定了冲击矿压的危险性程度。综合指数法分析的是早期的、区域和局部的冲击矿压危险性程度; 微震法确定的是顶板等震动引发冲击等的即时与区域性的冲击矿压危险性程度, 电磁辐射法确定的是监测点20 m范围内即时与局部

的冲击矿压危险性程度,而钻屑法确定的则是打钻孔点的即时冲击矿压危险性。冲击矿压危险性预测的方法不同,确定的冲击矿压危险性的时间和区域不同。由于冲击矿压的发生有煤层型和顶板型,为了提高冲击矿压预测的可靠性和准确性,需要综合考虑冲击矿压危险性的预测技术。

表 1 冲击矿压危险状态的分级
Table 1 Ranks of the danger of rock burst

危险等级	危险状态	危险指数	防治对策
A	无	< 0.25	所有的采掘工作可正常进行
B	弱	$0.25 \sim 0.5$	采掘工作过程中,加强冲击矿压危险的监测预报
C	中等	$0.5 \sim 0.75$	进行采掘工作的同时,采取强度弱化减冲治理措施,消除冲击危险
D	强	> 0.75	停止采掘作业,人员撤离危险地点,采取强度弱化减冲治理措施,采取措施后,通过监测检验,冲击危险消除后,方可进行下一步作业

2.3 危险分级预测实施方案

对于一个有冲击矿压危险的矿井和采区,首先根据综合指数法分析地质和开采条件,划分出冲击矿压危险区域及重点监测区域,实现冲击矿压的早期预测。在早期预测的基础上,采用微震法,对矿井冲击矿压的危险性进行区域监测和预测;对于有危险的区域,采用微震法和电磁辐射法,进行局部监测和预测;对于局部预测有危险的区域,采用钻屑法进行预测验证。综合确定冲击矿压危险等级,并对危险区域和地点采用强度弱化减冲技术进行治理。

具有冲击矿压危险的区域,分级预测及治理的工作流程为

- 早期综合预测(综合指数法确定重点监测区域)
- 即时预测
 - 区域预测(微震法连续监测、即时预测工作面区域冲击危险性)
 - 局部预测(微震法、电磁辐射法连续监测、即时预测工作面局部冲击危险性)
 - 点预测(钻屑法验证区域局部监测的准确性,并进行点预测)
- 逐级排除、确认危险等级
- 解危处理(煤岩体的强度弱化减冲治理,消除冲击危险)
- 治理效果检验(微震、电磁、钻屑检验解危效果)

因此,对于冲击矿压危险的矿井,在分析冲击矿压发生机理的基础上,采用时间上早期综合分析预测与即时预测相结合,空间上区域预测与局部监测、点预测相结合,构成可靠性高、简单易行、行之有效的冲击矿压危险性预测技术体系,见图 2。

根据理论分析、实验室试验和大量的现场试验,按照冲击矿压的危险性程度,我们将冲击矿压的危险程度量化分为 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。根据冲击矿压危险性的不同,采取相应的防治对策,如表 1 所示。

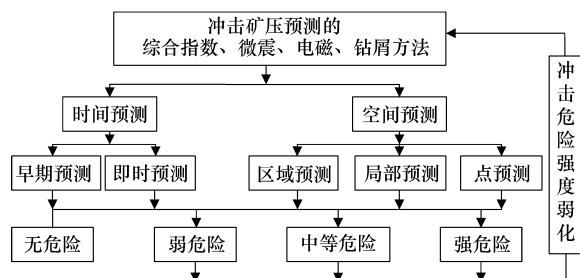


图 2 冲击矿压的分级预测技术体系

Fig. 2 System of classification for forecasting rock burst

3 现场应用实施效果

本技术已经在徐州矿务集团三河尖矿、新汶矿业集团华丰矿、兖矿集团东滩煤矿、济宁二号煤矿、济宁三号煤矿、平煤集团十一矿、大屯煤电公司孔庄矿、波兰卡托维兹(Katowice)矿等推广应用于预防冲击矿压灾害,取得了良好的经济效益和社会效益,并显示出广泛的应用前景。

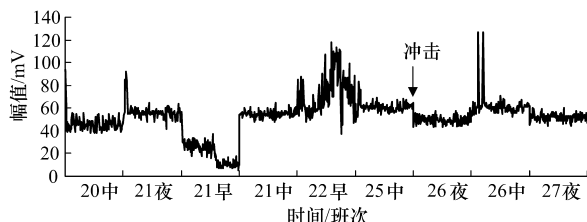
徐州矿务集团公司三河尖煤矿冲击矿压危险最大的 7204、9112 和 9202 工作面,为此进行了冲击危险的监测预报的研究工作。该工作在分析三河尖煤矿冲击矿压危险的基础上,采用综合指数法、电磁辐射法和钻屑法等相结合的方法,对冲击矿压危险的前兆信息进行了及时的捕捉和及时预报,并对采取的冲击矿压治理措施实施效果进行检测。

三河尖矿 7204 工作面位于三河尖井田的西翼,浅部为 7202 工作面,已回采完毕,深部为实体煤。地面标高为 35.8 ~ 36.0 m,工作面标高为 -771.2 ~ -825.5 m。7 煤层厚度平均 2.25 m,煤层倾角平均 29°。煤层顶板直接顶为中砂岩,平均厚 12.97 m,底板为粉砂岩,平均厚 4.30 m。

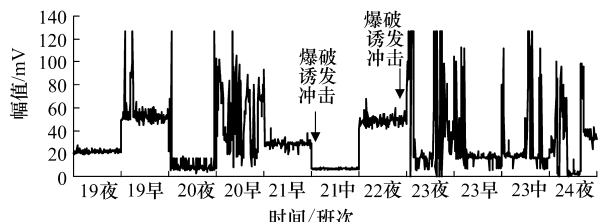
1) 综合指数法确定的冲击危险前兆信息

根据综合指数法确定的 7204 工作面的各地质

因素对冲击矿压危险的影响程度及指数为 0.76, 属于强冲击危险。而 7204 工作面的各开采技术条件对冲击矿压危险程度的影响及危险指数为, 降低材料道超前支承压区, 危险指数为 0.46; 降低材料道超前支承压区外, 危险指数为 0.46; 材料道超前支承压区, 危险指数为 0.38; 材料道超前支承压区外, 危险指数为 0.38; 运输道, 危险指数为 0; 工作面上部, 危险指数为 0.46; 工作面上部降低材料道以下, 危险指数为 0.46; 工作面下部, 危险指数为 0.38。因此, 由工作面开采技术条件确定的工作面及巷道各点的冲击矿压危险前兆等级为中等冲击危险性。



(a) 冲击矿压前后



(b) 卸压爆破诱冲前后

图3 冲击矿压前后电磁辐射信息的变化规律

Fig. 3 Variation process of electromagnetic emissions before and after rock burst

3) 钻屑法确定的冲击危险信息

在 7204 工作面回采过程中, 共进行了 395 次的煤粉检测。除了钻屑量以外, 在检测过程中发现, 冲击矿压的发生与钻孔过程中的动力现象关系非常密切。在工作面推进期间, 凡出现孔内动力现象时, 如不及时进行卸压, 或防治力度不够均会发生冲击矿压现象。

7204 工作面回采过程中, 采面及巷道共发生冲击矿压现象 38 次, 其中 34 次为卸压爆破诱发, 4 次虽进行了卸压爆破, 但由于爆破力度不够, 在落煤时诱发了冲击矿压现象。对于卸压爆破诱发冲击矿压和 4 次落煤诱发冲击矿压, 在此之前, 均进行了预测预报。

三河尖煤矿从 1999 年 11 月开始应用冲击矿压的分级预测技术, 采取了相应的治理措施对冲击矿压危险进行防治, 取得了良好大效果。到目前为止, 已先后安全回采了 7204, 9112, 9112_外, 7139, 7111, 7109, 9202 等具有高冲击危险的工作面, 产生经济效益累计达到 19 314.4 万元, 取得了巨大的社会效应和经济效益。

4 结论

1) 弹塑性体模型可描述煤岩等固体脆性材料变形破坏特征以及在其变形破坏过程中产生的电磁辐射现象, 得出煤岩变形破坏的变化率与电磁

2) 电磁辐射法确定的冲击危险前兆信息

从冲击矿压的形成发展过程看, 在冲击矿压危险性高的区域, 电磁辐射的幅值变化不大, 但整体水平高。冲击矿压发生前的一段时间, 电磁辐射连续增长或先增长, 然后下降, 之后又呈增长趋势。但这段时间内, 其电磁辐射均值均达到、接近或超过临界值, 之后发生冲击矿压。图 3a 为 7204 工作面于 10 月 26 日冲击矿压发生前后记录的电磁辐射前兆信息变化规律。图 3b 反映了 7204 工作面进行卸压爆破过程中电磁辐射强度信息的变化情况, 这几次爆破均相应地诱发了冲击矿压。

辐射的能量释放率成正比, 从而可建立煤岩体冲击破坏的判别准则。

2) 按照冲击矿压的危险性程度, 可将其危险性量化分为 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。根据冲击矿压危险性的不同, 采取相应的防治对策。

3) 基于冲击矿压的分级预测准则, 以及冲击矿压的连续监测预警技术, 可形成冲击矿压的时空危险性分级预测技术体系, 即: 采用综合指数法、微震法、电磁辐射法和钻屑法相结合, 在时间上从早期预测到即时预测、空间上从区域预测到局部、点预测, 逐级排除和确认冲击矿压危险, 实现分级预测。

4) 三河尖煤矿采用冲击矿压的时空分级预测技术, 在 7204 工作面成功地进行了 38 次冲击矿压危险的预测, 保证了工作面的安全生产, 取得了良好的社会效益。

参考文献:

- [1] 陈炎光, 钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 165-166.
- [2] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 1-96.
- [3] 窦林名, 赵从国, 杨思光, 等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 1-109.

- [4] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 294-330.
- [5] 闵长江, 卜凡启, 周廷振, 等. 煤矿冲击矿压及防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 1-10.
- [6] DUBINSKI J, KONOPKO W. Tapnia-ocena, prognoza, zwalczanie[M]. Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 2000: 1-20.
- [7] KONOPKO W. Doswiadczone podstawy kwalifikowania wyrobisk górnictwa w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tapaniami [J]. Prace Naukowe GIG, 1994, 795: 81-93.
- [8] 窦林名, 何学秋, DRZEZLA B. 冲击矿压危险性评价的地音法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 85-88.
DOU Lin-ming, HE Xue-qiu, DRZEZLA B. AE Method of evaluating the danger of rock burst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 85-88.
- [9] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压与震动的机理及预报研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 16(3/4): 215-218.
DOU Lin-ming, HE Xue-qiu, WANG En-yuan. Study on the mechanism and forecast of rock burst and tremor[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3/4): 215-218.
- [10] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1473-1477.
WANG En-yuan, HE Xue-qiu, LIU Zhen-tang. Study on electromagnetic emission characteristics of loaded rock and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1473-1477.
- [11] 窦林名, 何学秋. 由煤岩变化破坏引起的电磁辐射[J]. 清华大学学报, 2001, 41(12): 86-88.
DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Electromagnetic emission in rock and coal burst failures[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(12): 86-88.
- [12] 窦林名, 曹其伟, 何学秋, 等. 冲击矿压危险的电磁辐射监测技术[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(4): 89-91, 98.
DOU Lin-ming, CAO Qi-wei, HE Xue-qiu, et al. Monitoring technique of electromagnetic emission on rock burst danger[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(4): 89-91, 98.

(责任编辑 王继红)