

文章编号:1000-1964(2004)05-0504-05

煤岩冲击破坏模型及声电前兆判据研究

窦林名, 何学秋

(中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 根据煤岩体变形破坏特征及其破坏过程中的声电效应规律分析, 提出了煤岩冲击破坏的弹塑脆性模型, 描述了煤岩材料受载变形的稳定破坏和冲击破坏、冲击矿压发生的突发性和延时性、变形破坏过程中的声发射和电磁辐射现象以及 Kaiser 效应, 给出了冲击矿压危险前兆预测的声电判据。结果表明, 采用声电前兆判据, 可对冲击矿压危险性进行判别和预测。

关键词: 煤岩; 弹塑脆性模型; 冲击矿压; 声发射; 电磁辐射; 预测

中图分类号: TD 324 **文献标识码:** A

Model for Rock Burst Failure and Its Critical Values of Acoustic and Electromagnetic Emission

DOU Lin-ming, HE Xue-qiu

(School of Mineral and Safety Engineering, CUMT, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Based on the characteristics of coal rock burst failure and the analysis of acoustic and electromagnetic emission the elastic-plastic-brittle model of rock burst failure was presented. By means of this model the rock failure and burst, sudden and delay rock burst, the acoustic emission (AE), electromagnetic emission (EME) as well as Kaiser effect were described, and acoustic and electromagnetic critical values of rock burst danger were obtained. The results indicate that the danger of rock burst can be forecasted by monitoring acoustic and electromagnetic emission in the coal face.

Key words: coal rock; elastic-plastic-brittle model; rock burst; AE; EME; forecasting

煤岩等材料为脆性材料。其破坏过程涉及到煤岩的岩石性质、结构及物理特征, 加载大小、速度和时间的。在一定的载荷和加载速度作用下, 煤岩将发生冲击型破坏。这种冲击型破坏在矿山开采等岩体工程中主要表现为冲击矿压、岩爆。我国的徐州、新汶、大同、抚顺等矿区都面临冲击矿压的威胁。而要防治冲击矿压, 首先要研究煤岩动态破坏的机理和冲击危险的预测。对于冲击危险前兆预测方面, 世界各国采用分析认识法, 地震法, 地音法, 钻屑法以及由中国矿业大学提出的电磁辐射法等^[1-9]。这些方法的应用, 为采取相应的治理措施打下基础。但是, 由于冲击矿压的复杂性, 还没有一个

较为完善的冲击危险预测的声发射和电磁辐射判断标准。本文将结合作者对煤岩破坏过程中所伴随的声发射和电磁辐射效应规律的研究成果^[1-3,7-9], 提出煤岩冲击破坏的弹塑脆性模型, 建立了声电预测冲击危险前兆的技术原理和基本准则, 并进行工程实践验证。

1 煤岩脆性材料变形破坏特征

煤岩等固体脆性材料在载荷作用下, 有自己的变形破坏特征。重要表现在脆性冲击破坏、冲击破坏的突发性和延时性、冲击破坏过程中的声发射和电磁辐射现象及其 Kaiser 记忆效应^[1]。

收稿日期: 2003-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(50074030); 国家自然科学基金重点项目(50134040); 教育部博士点基金项目(20030290017)

作者简介: 窦林名(1963-), 男, 青海省平安县人, 中国矿业大学教授, 博士生导师, 从事矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理等方面的研究。

1) 变形破坏类型

煤岩等脆性材料当其上作用的载荷达到强度极限后,发生脆性破坏.破坏分稳态破坏和冲击破坏两种.这种材料的冲击破坏在矿山及岩土工程中表现为冲击矿压、岩爆^[2-3].

2) 冲击破坏的突发性和延时性

煤岩脆性材料在发生冲击破坏时,存在突发性冲击破坏和延时性冲击破坏.这两种现象在煤矿发生的冲击矿压事故中表现尤为突出^[2-3].例如,在高冲击矿压危险区域采用卸压爆破措施进行解危.有时候在进行卸压爆破的同时就能引发冲击矿压,而有时是在卸压爆破一段时间后,才发生冲击矿压.而在这段时间内,没有进行任何采矿工序对围岩产生扰动,见图 1 所示,图 1 中,测点前后的隔线代表其 2 min 时间内的脉冲数(以下同).

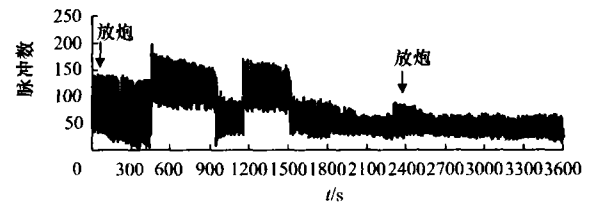


图 1 卸压爆破后 1 h 之内的电磁辐射变化规律
Fig. 1 EME covers after 1 h of shock in the coal seam

3) 破坏过程中的声发射和电磁辐射^[1-6]

煤岩脆性材料在载荷作用下的变形破坏过程中,均具有具有 Kaiser 记忆效应的声发射和电磁辐射现象存在.从总体上讲,电磁辐射基本上随着载荷的增大而增强,随着加载及变形速率的增加而增强.声发射的变化规律也基本上随着载荷的增大而增强,随着加载及变形速率的增加而增强,见图 2 所示.

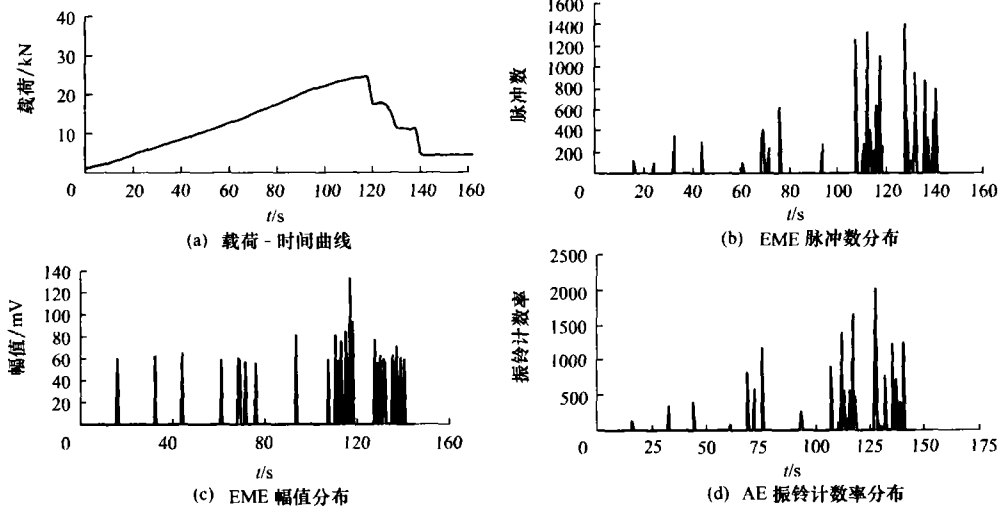


图 2 煤样破坏载荷-时间曲线,AE 和 EME 图
Fig. 2 P-t, AE, EME curves of coal samples

2 弹塑脆性体模型分析

为了对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,建立了煤岩等固体脆性材料变形破坏的弹塑脆性体模型^[2-4].

2.1 稳定破坏和冲击破坏

弹塑脆性体模型可采用 P-T (Poynting-Thomson)模型加两个脆性单元组成^[3,7],如图 3 所示,其中一个分支为 Hooke 单元+脆性单元组成,另一个分支为 Maxwell 单元+脆性单元组成.其中,脆性单元的强度临界值为 σ_l ,材料的破坏程度用损伤因子 D 来描述,即当 $D=0$ 时,材料没有破坏, $D=1$ 时,材料完全破坏,而 $\sigma_f = \frac{\sigma}{1-D}$ 称为有效应力.则其应变为

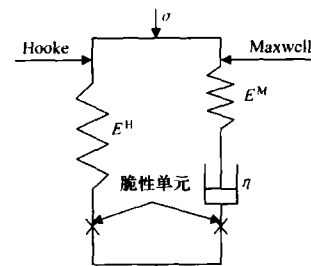


图 3 弹塑脆性体
Fig. 3 Elastic-plastic-brittle model

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (1)$$

故 D 是材料横截面上微裂隙的密度及应力集中效应的反映.

上述模型有一对脆性单元,当其脆性单元的应力 $\sigma_k < \sigma_l$ 时,脆性单元为刚体,而当 $\sigma_k > \sigma_l$ 时,脆性

单元破坏. 在 P-T 模型中, 当应力为常数时, 即 $\sigma = \sigma_0 = C$ 时, Hooke 分支中 σ^H 逐渐增长, 而 Maxwell 分支中, σ^M 逐渐减小.

如果在 t 时刻, 两分支 σ^H 和 σ^M 中有一个压力跳跃, 即有应力增量 $\Delta\sigma$, 若其应力总和超过两个分支 σ_i , 弹塑性脆性体破坏.

如果 $\sigma = \sigma_0 = \text{常数}$, 而且两分支中的应力均小于 σ_i , 则该模型的特性表现为 P-T 模型的特性.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E^H} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E^H} \right) e^{-\frac{t}{\tau_\sigma}}, \quad (2)$$

$$\tau_\sigma = \frac{\eta}{E^M} \frac{(E^H + E^M)}{E^H}. \quad (3)$$

2.2 突发性与延时性

对于弹塑性脆性体模型, 最有讨论价值的情况是

$$\sigma_i < \sigma < \sigma_i \cdot G^H, \quad (4)$$

式中

$$G^H = 1 + \frac{E^M}{E^H}. \quad (5)$$

在这种情况下, 弹塑性脆性体经过时间 Δt_2 后破坏(称为流变-突变破坏). σ^H 值需从 t 时刻的 σ_i^H 增加到 $\sigma_i^H(t) = \sigma_i$ (因 σ^M 是衰减的, 则仅有 $\sigma_i^H(t)$, 使得 $\sigma_i^H(t) = \sigma_i$ 而破坏).

当 $\sigma_0 > \sigma_i$ 及 $\sigma_0 > E^H \varepsilon_0$ 时,

$$\Delta t_2 = \tau_\sigma \cdot \ln \frac{E^H \varepsilon_0 - \sigma_0}{\sigma_i - \sigma_0}. \quad (6)$$

这是当载荷 $\sigma = \sigma_0 = \text{常数}$, 而且满足公式(4)时弹塑性脆性体的破坏时间.

由此可知, 在 σ 等于常数的情况下, 弹塑性脆性体将出现两种强度特性, 即瞬时强度(载荷发生跳跃)和长时强度(常载荷作用), 对应的是两种破坏形式, 即突发性破坏和延时性破坏.

2.3 Kaiser 记忆效应

在弹塑性脆性体模型中, 弹脆性元素只须一个参量, 即临界强度 σ_i , 当 $\sigma < \sigma_i$ 时, 为线弹性, 当 $\sigma \geq \sigma_i$ 时, 则发生不可逆转的破裂.

在 Hooke 分支和 Maxwell 分支的弹性元素处, 模型为弹性, 因在截面积 ds 上, 弹模 E_0^H 均相同, 则可用 E_0^H 与 ds 表示. 不考虑 σ 在横向的影响, 则 Hooke 体内的应力可表示为积分形式

$$\sigma(t) = \int \varepsilon(t) dE_0^H, \quad (7)$$

对于初始的弹性场, 采用 E_0^H , 则

$$\sigma(t_0) = \varepsilon(t_0) E_0^H. \quad (8)$$

假设在每一时刻 t , 两个分支均满足下面的条

件

$$S_0 = S_z(t) + S_c(t), \quad (9)$$

式中: $S_z(t)$ 为已破坏的面积; $S_c(t)$ 为作用面积. 作用面积 $S_c(t)$ 的减小, 意味着破坏面积的增加, 弹模 E^H 的降低.

$$E^H(t) = E_0^H(1 - D(t)), \quad (10)$$

式中: $D(t) \leq 1$ 为损伤因子; $E^H(t)$ 是随时间变化的.

这样, 在 t_1 时刻弹脆性场的损伤因子 $D(t_1)$ 为

$$0 \leq D(t_1) = \frac{S_z(t_1)}{S_0} \leq 1. \quad (11)$$

因为破坏的不可逆性, D 值是非减的, 则弹脆性场表现为 Kaiser 效应.

2.4 煤岩变形破坏与声电耦合

尽管在弹性场中没有考虑任何阻尼元素, 但可以说, 岩石的损伤因子 D 的增长过程可以与声发射和电磁辐射的能量释放紧密相关. 损伤速度 D' 在某些情况下不是一个光滑的函数. 当损伤因子 D 上升到 $D + \sum \Delta D_i$ 时, 声发射事件数和电磁辐射脉冲数与其变化一样. 如果 N 表示这些事件的总和, 即在 $t_2 > t_1$ 时刻

$$D(t_2) - D(t_1) = \sum \Delta D_i = C \cdot N, \quad (12)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时

$$D'(t) \propto n(t), \quad (13)$$

式中 $n(t)$ 是 t 时刻的声发射事件数或电磁辐射脉冲数.

式(13)说明, 如果破坏过程与声发射事件(电磁辐射脉冲数)一模一样, 则损伤速度 D' 与岩体活动性(声发射事件数或电磁辐射脉冲数)成正比. 如果与损伤因子增量 ΔD_i 不是一样的, 而 $D(t_2) - D(t_1)$ 之差却仍然等于增量 ΔD_i 之和, 但这个增量 ΔD_i 之和与 N (事件数或脉冲数)不成正比. 这时, 可用能量来表示. 能量的变化 ΔW 可由下式来确定

$$\Delta W = \sigma \cdot \Delta \varepsilon = \sigma(\varepsilon_2 - \varepsilon_1). \quad (14)$$

设破坏程度的损坏因子与变形呈线性关系

$$\varepsilon = C_1 D - C_0, \quad (15)$$

则

$$\Delta W = \sigma[(C_1 D_2 - C_2) - (C_1 D_1 - C_0)]. \quad (16)$$

由此, 得 ΔW 与 ΔD 成正比, 也即

$$D' \propto W' \propto w(t) \propto \varepsilon'. \quad (17)$$

这是一个非常重要的结果, 即如果 σ 为常数,

而且 $D \propto \epsilon$, 在弹脆性场中出现破坏, 破坏速率表现在瞬间能量 $w(t)$ 的释放中。

3 冲击破坏危险及声电判据

对于煤岩脆性材料, 其变形破坏是能量聚积和释放的结果, 是时间的函数。但在工程实际中, 确定变形, 破坏何时发生的这个时间问题是非常困难。

假设满足破坏的条件

$$\sigma^H(t) \geq \sigma_m^H(t) \geq \sigma^{mn},$$

或
$$\epsilon(t) \geq \epsilon_m(t) \geq \epsilon^0,$$

式中 $\epsilon^0 = \frac{\sigma_l}{E^H + E^M} < \epsilon_l$, 当出现 $\sigma = \sigma_l$, 或者当 $\epsilon(t) =$

$\frac{\sigma_l}{E^N} = \epsilon_l$, 脆性单元破坏。如果 $\epsilon(t)$ 是观测到的实际变化值, 则危险程度 $Z(t)$ 将由下式确定

$$Z_c(t) = 0 \quad \text{当 } \epsilon(t) < \epsilon^0, \quad (18a)$$

$$0 \leq Z_c(t) = \frac{\epsilon(t) - \epsilon^0}{\epsilon_l - \epsilon^0} \leq 1 \quad \text{当 } \epsilon(t) \geq \epsilon^0, \quad (18b)$$

式中 $Z_c(t)$ 称之为某时刻煤岩破坏的危险性, 它确定了在 ϵ 轴上某时刻的变形 $\epsilon(t)$ 与破坏点之间的距离。

由上述分析可知, 煤岩变形破坏的 $\epsilon(t), w(t)$ 与电磁辐射的幅值、脉冲数或声发射的事件数成正比, 则采用电磁辐射或声发射方法确定煤岩破坏的危险性同样可采用式(18)的方式, 其中 N_l 为临界值, N^0 为初始值。

$$0 \leq Z_n(t) = \frac{N(t) - N^0}{N_l - N^0} \leq 1, \quad N(t) \geq N^0. \quad (19)$$

4 现场试验研究

研究表明^[7-9], 受载煤岩体在其变形破坏过程中将产生电磁辐射, 电磁辐射的强弱与煤岩体受力大小、变形破裂过程紧密相关。其主要参数是电磁辐射强度和脉冲数。电磁辐射强度主要反映了煤岩体的受载程度及变形破裂强度, 脉冲数主要反映了煤岩体变形及微破裂的频次。因此, 电磁辐射可用

来预测冲击矿压、煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象。

由于煤岩体的破坏过程是一个动态过程, 是工作面和巷道周围应力重新分布的表现。而所测的煤岩变形破坏释放的电磁辐射也是一个动态过程。正常情况下, 这个过程的变化相对来说是稳定的。但当动态过程有了较大的变化时, 电磁辐射也有较大的变化和较长的持续时间, 说明冲击矿压危险性有了增加或降低。

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偏差值确定冲击矿压的危险程度和进行预测预报

$$\begin{cases} \mu_{E_1}(E_1) = 0 & E_1 < a, \\ \mu_{E_1}(E_1) = \frac{E_1 - a}{b - a} & a \leq E_1 < b, \\ \mu_{E_1}(E_1) = 1 & E_1 \geq b, \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\mu_{E_1}(E_1)$ 为所测观测点的冲击矿压危险指数; E_1 为本班电磁辐射幅值或脉冲数与幅值平均值或脉冲数平均值的偏差值; a, b 为系数。

某矿 3406(1)工作面是一个强冲击矿压危险工作面。在 2001 年 3 月 6 日和 8 日分别发生了一次里氏震级 M_L 为 1.3 级和 1.7 级的矿震。而在 3 月 10 日 17 时 38 分工作面上出口 20~40 m 范围内发生了一次震级 1.7 级冲击矿压, 在 3 月 14 日 16 时 06 分工作面上出口 10~30 m 范围内同样也发生了一次 1.7 级冲击矿压。此外, 在 7 月 5 日 4 时 6 分在工作面下端头 40 m 范围内发生了 1.7 级冲击矿压。在矿震和冲击矿压发生前后, 采用电磁辐射进行了观测, 并进行了相应的预报, 避免了人员的伤亡。图 4 为 3 月 2 日至 16 日 3406(1)工作面中部电磁辐射观测结果。图 5 为电磁辐射 3 个参数偏差值的变化规律。从图 5 中可以看出, 在煤岩体动态破坏的矿震和冲击矿压发生之前, 电磁辐射偏差值都有较好的反映。

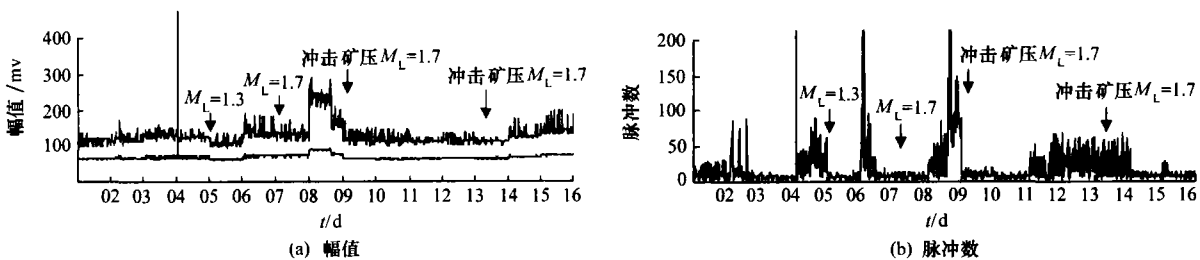


图 4 冲击矿压前后电磁辐射值的变化规律
Fig. 4 The regularity of the EME value before and after Rock Burst

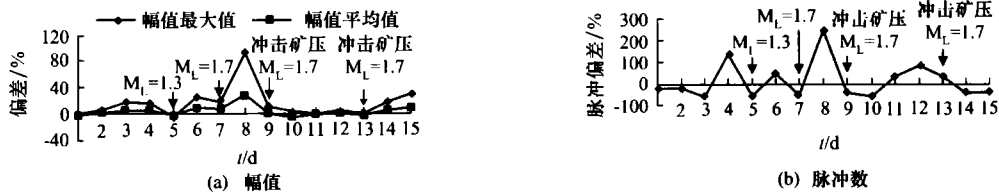


图 5 工作面电磁辐射偏差变化图

Fig. 5 The changes of EME deviation of the working face

表 1 为该矿 3406(1)工作面 2001 年 3 月 10 日 1.7 级, 3 月 14 日 1.7 级和 7 月 5 日 1.7 级 3 次冲击矿压前后电磁辐射偏差的最大值. 根据观测结构的统计分析, 可以确定相应的冲击矿压危险预报模型和模型的各系数值. 对于幅值最大值的偏差值, $a=0, b=61\%$; 对于幅值平均值的偏差值, $a=0, b=21\%$; 对于脉冲数的偏差值, $a=0, b=201\%$.

表 1 冲击矿压前后电磁辐射偏差值
Table 1 The EME deviation value before and after rock burst

日期	幅值最大值 偏差/%	幅值平均值 偏差/%	脉冲数偏差/ 偏差/%
3 月 10 日	89	29	248
3 月 14 日	41	13	81
7 月 05 日	10	5	125
平均	46	16	151

根据上述确定的电磁辐射指标, 对 3406(1)工作面各观测点进行冲击矿压危险性判断. 如果以中等冲击危险作为标准, 则采用电磁辐射对 1.0 级以上矿震及冲击矿压危险能够 100% 的反映, 如果以强冲击矿压危险作为标准, 则能够反映 73% 的矿震和冲击矿压.

5 结 论

1) 由 P-T 模型加两个脆性单元组成的弹塑脆性模型, 可描述煤岩等材料的稳态破坏和冲击型破坏、冲击破坏的突发性和延时性、破坏过程中的声发射和电磁辐射现象等.

2) 通过对弹塑脆性模型的分析, 可建立煤岩冲击破坏的声电前兆危险判据, 该判据反映了煤岩冲击破坏的危险程度.

3) 现场试验研究表明, 采用煤岩冲击破坏的电磁辐射判据, 可对冲击矿压危险性进行预测预报, 而且预测的准确率较高.

参考文献:

[1] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M]. 徐

州: 中国矿业大学出版社, 1995.

[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.

[3] 窦林名. 煤岩突变的声电效应规律及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学能源与安全工程学院, 2001.

[4] Kornowski J. Podstawy aktywnych sejsmoakustycznych metod oceny zagrożenia lokalnym zniszczeniem górotworu[J]. Praca Naukowe w GIGu, 1994(793): 35-46.

[5] 窦林名, 何学秋, Drzeźla 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 L M, He X Q, Drzeźla B. AE method of evaluating the danger of rock burst [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(1): 85-88.

[6] Dou L M, Drzeźla B. Zmodyfikowana kompleksowa metoda oceny stanu zagrożenia tapaniami w kopalniach węgla kamiennego[J]. Przegląd Gorniczy, 1998, 54(11): 20-25.

[7] 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.

Dou L M, Cao Q W, He X Q, et al. EME monitoring technique of rock burst [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(4): 89-91.

[8] 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 由煤岩变形破坏所产生的电磁辐射[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12): 86-88.

Dou L M, He X Q, Wang E Y, et al. Research on the electromagnetic emission in the rock and coal burst failure [J]. Journal of Tsinghua University 2001, 41(12): 86-88.

[9] Dou L M, He X Q, Wang E Y, et al. Experimental research on the electromagnetic emission of rock & coal burst failure [J]. Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej, 2000(246): 371-376.

(责任编辑 王玉浚)