

# 断层冲击地压的影响因素与震级分析

李忠华, 潘一山

(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 应用围岩-断层模型, 按突变理论, 分析了断层冲击地压的相关影响因素, 并对断层冲击地压的震级进行了预测。断层冲击地压是由于开采活动引起的断层突然相对错动、弹性应变能迅速释放的动力现象。其特点是释放能量多、震级高、破坏程度较大, 应进行重点防治, 以避免人员伤亡, 减少重大损失。断层冲击地压的震级随断层厚度增大而减小, 随断层软化指数增大而增加, 随断层初始剪切弹性模量增大而增加, 随围岩的初始剪切弹性模量增大而减小。结果表明, 应用突变理论对断层错动型冲击地压所做的解析分析结果与实际情况基本相符。

**关键词:** 采矿工程; 断层, 冲击地压, 震级, 突变理论

**中图分类号:** TD 324

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)增 1-5206-05

## INFLUENCING FACTORS AND MAGNITUDE ANALYSIS OF FAULT ROCKBURST

LI Zhong-hua, PAN Yi-shan

(Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The interrelated parameters of fault rockburst are analyzed according to the surrounding rock-fault model and the fold catastrophe. The magnitudes of fault rockburst are forecasted. The fault rockburst is a dynamic phenomenon due to mining activities leading to the fault dislocation abruptly and the elastic strain energy release rapidly. The more the energy releases, the higher the magnitude is, and the graver the destructiveness is. So, the prevention and cure must be emphasized to avoid personnel casualties and to decrease grave loss. Its magnitude increases with the increasing of initial shear modulus and soften index of fault, and decreases with the increasing of the fault's thickness and initial shear modulus of surrounding rock. The results show that the analysis of fault rockburst based on fold catastrophe theory is consonant with actual case.

**Key words:** mining engineering; fault; rockburst; magnitude; fold catastrophe

### 1 引言

矿井冲击地压按发生机理可分为 3 种基本类型<sup>[1, 2]</sup>: 煤体压缩型、顶板断裂型和断层错动型。断层冲击地压是由于开采活动引起的断层突然相对错动、弹性应变能迅速释放的动力现象。其特点是释放能量多、震级高。文[3]在分析断层等不连续面冲击地压现象的基础上, 用岩体振动与断层间刚体

错动的叠加来描述不连续面冲击地压发生过程, 指出了发生断层冲击地压的影响因素及原因, 但未考虑断层周围岩体的变形。文[4]把断层冲击地压看成是断层带与上、下盘围岩系统的变形失稳, 建立了由上、下盘完整岩体与断层构成的围岩-断层模型, 提出了扰动响应判别准则, 并对断层冲击地压的一个简单模型进行了解析分析。文[5]研究了断层冲击地压的发生机制及声发射特性。文[6]提出了用突变理论预测地下采场冲击地压发生的可能性。

**收稿日期:** 2004-10-24; **修回日期:** 2004-12-15

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(50490275)

**作者简介:** 李忠华(1964-), 男, 博士, 1985年毕业于阜新矿业学院工程力学专业, 现任辽宁工程技术大学教授, 主要从事煤矿灾害发生机理与防治方面的教学与研究工作。E-mail: lizhonghua123@263.net。

文[7~9]按突变理论对断层围岩系统的稳定性及断层冲击地压发生条件和过程进行了讨论,并按 Mises 增量理论,将提出的均匀围压下矿井断层冲击地压的突变理论分析推广到非均匀围压下的断层冲击地压分析,得到了断层失稳半错距和弹性能释放量表达式,并对由于断层失稳导致围岩产生的荷载、位移效应进行了分析。本文参考上述文献的结论,分析断层冲击地压的相关影响因素,并对断层冲击地压的震级进行预测。

## 2 断层冲击地压的突变模型<sup>[7]</sup>

### 2.1 围压作用下的围岩 - 断层系统

图 1 为带宽  $2b$  的围岩 - 断层系统,图中,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  为作用于断层围岩系统边界的 3 个应力分量,其中,  $\sigma_x = \sigma_y$ ;  $Q$  为围岩作用于断层的剪力;  $H$  为断层作用于围岩的剪力;  $u$  为断层的切向位移;  $u_H$  为围岩的切向位移;  $D$  为半带厚度;  $B$  为围岩边界到断层的距离。

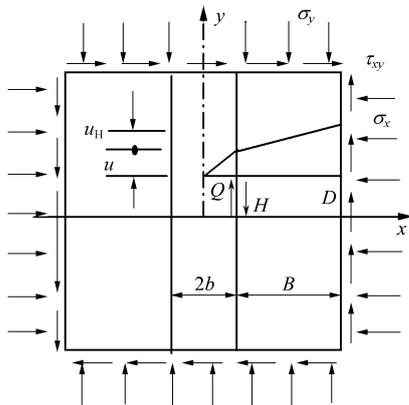


图 1 围岩 - 断层系统

Fig.1 Surrounding rock-fault system

取长为  $L$ 、厚为  $D$  的半条带作为研究对象。假设围岩发生弹性变形,则断层和围岩的剪力 - 切向位移关系(图 2)为

$$Q(u) = \lambda u \exp\left[-\left(u/u_0\right)^m\right] \quad (1)$$

$$P = H = k u_H = k(a - u) \quad (2)$$

式中:  $\lambda = gDL/b$ ,  $k = GDL/B$ ;  $g$ ,  $G$  分别为断层和围岩的初始剪切弹模;  $m$ ,  $u_0$  为断层的软化参数;  $u$ ,  $u_H$  分别为断层和围岩的相对切向位移;  $a$  为围岩边界绝对位移。图 2 中,  $u_c$ ,  $u_j$ ,  $u_t$ ,  $u_s$  分别为剪力达到最大时的位移、失稳时的位移、失点处

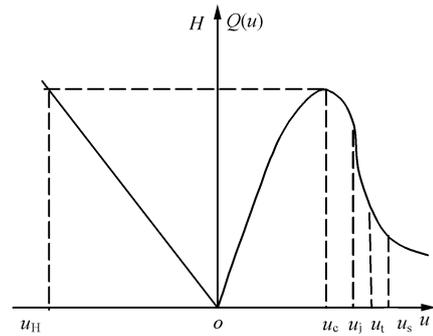


图 2 围压作用下断层岩体的本构关系

Fig.2 Constitutive relation of fault-rock mass under confined pressure

的位移及突跳后的位移。

### 2.2 断层冲击地压的发生条件

外力功为

$$W = \frac{1}{2} Pa = \frac{1}{2} ka(a - u) \quad (3)$$

围岩的弹性变形能  $\Pi^e$  为

$$\Pi^e = \frac{1}{2} k(a - u)^2 \quad (4)$$

断层的变形能  $\Pi^f$  为

$$\Pi^f = \int_0^u Q(u) du \quad (5)$$

总势函数<sup>[10]</sup>  $\Pi$  为

$$\Pi = \Pi^e + \Pi^f + W \quad (6)$$

系统的平衡状态方程为  $\Pi' = 0$ , 即

$$k\left(u - \frac{3}{2}a\right) + \lambda u \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] = 0 \quad (7)$$

由  $\Pi'' = 0$ , 得尖点  $u_g$  为

$$u_g = u_0(1 + 1/m)^{1/m} \quad (8)$$

围岩的弹性刚度  $k^e$  为

$$k^e = k \quad (9)$$

断层的刚度  $k^f$  为

$$k^f = \lambda \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \left[1 - m\left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1}\right] \quad (10)$$

在尖点  $u_g$  处有

$$k^f = -m\lambda \exp(-1 - 1/m) \quad (11)$$

刚度比:

$$K = \frac{k^e}{|k^f|} = \frac{k}{m\lambda} \exp\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (12)$$

将平衡状态方程在尖点处展开，得标准形式：

$$x^3 + px + q = 0 \tag{13}$$

其中，

$$x = (u - u_g) / u_g$$

$$p = \frac{6}{(m+1)^2} (K-1)$$

$$q = \frac{6}{(m+1)^2} \left\{ \frac{1}{m} + K \left[ 1 - \frac{2a}{3u_0} \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{1/m} \right] \right\}$$

由  $p \leq 0$ ，得刚度比：

$$K \leq 1 \tag{14}$$

上式即为冲击地压的发生条件。可见与断层冲击地压相关的因素为断层及围岩的力学性质。

图 3 为刚度比与  $m$  的关系曲线。图 4 为刚度比与  $k/\lambda$  的关系曲线。

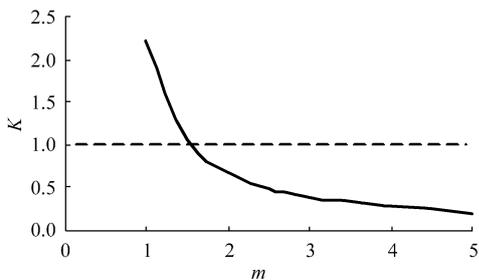


图 3 刚度比与  $m$  的关系曲线  
Fig.3 Curve of  $K-m(k/\lambda = 0.3)$

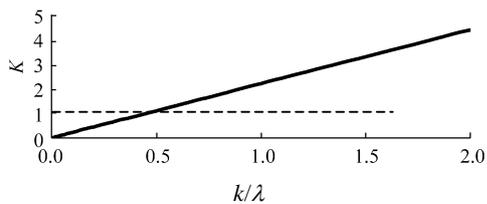


图 4 刚度比与  $k/\lambda$  的关系曲线  
Fig.4 Curve of  $K-k/\lambda (m = 2)$

由图 3, 4 可见，当  $k/\lambda$  小于一定值，且  $m$  大于一定值时，满足  $K \leq 1$ 。

由分叉集方程  $4p^3 + 27q^2 = 0$ ，得

$$(K-1)^3 + \frac{9}{8} \left\{ 1 + \frac{1}{m} + K(m+1) \left[ 1 - \frac{2a}{3u_0} \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{1/m} \right] \right\}^2 = 0 \tag{15}$$

由上式可确定临界状态围岩边界的位移  $a$ 。

由  $3x^2 + p = 0$ ，得冲击地压发生时断层的错动量  $u_1$  和冲击后断层的错动量  $u_2$

$$u_1 = u_g(1 - x_1) = u_g(1 - \sqrt{-p/3}) \tag{16}$$

$$u_2 = u_g(1 - x_2) = u_g(1 + \sqrt{-p/3}) \tag{17}$$

即冲击后断层错动的突跳值为

$$\Delta u = 2u_g \sqrt{-\frac{p}{3}} = 2u_0 \frac{\sqrt{2(1-K)}}{m+1} \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{m}} \tag{18}$$

单位长度断层冲击释放的能量为

$$\Delta \Pi = \Pi(x_2) - \Pi(x_1) \tag{19}$$

由文[2]可知，当系统的刚度参数满足下列条件：

$$K = \frac{k_s}{m\lambda} \exp\left(\frac{1+m}{m}\right) < 1 \tag{20}$$

平衡位置发生跳跃，即断层失稳破裂，发生断层冲击地压。跳跃前后的位移值分别为

$$\left. \begin{matrix} u_j \\ u_s \end{matrix} \right\} = u_t \left\{ 1 - \frac{1}{1+m} \left[ \frac{m(1-K)}{1+m} \pm \sqrt{\left[ \frac{m(1-K)}{1+m} \right]^2 + 2(1-K)} \right] \right\} \tag{21}$$

式中： $u_t = \frac{\tau_c DL}{\lambda} (m+m^2)^{1/m} \exp(m^{1/m})$ ，为拐点处的位移值。

### 3 断层冲击地压的震级

断层失稳破裂的能量由围岩所蓄弹性变形能大量释放所提供。由图 2 知，其计算公式为

$$E = \frac{1}{2k_s} (Q_j^2 - Q_s^2) - \int_{u_j}^{u_s} Q(u) du \tag{22}$$

将  $Q(u)$  在  $u_t$  附近展开：

$$Q(u) = Q(u_t) + Q'(u_t)(u - u_t) +$$

$$\frac{Q''(u_t)}{2} (u - u_t)^2 + \frac{Q'''(u_t)}{6} (u - u_t)^3 + \dots \tag{23}$$

忽略高次项，代入式(22)，得

$$E = \frac{gB\lambda}{2Gb} \left\{ u_j^2 \exp[-2(u_j/u_0)^m] - u_s^2 \exp[-2(u_s/u_0)^m] \right\} - \lambda \exp\left(-\frac{1+m}{m}\right) (u_s - u_j) \left[ u_t - \frac{m}{2} (u_j - 2u_t + u_s) \right] \tag{24}$$

式(24)表示断层失稳时围岩所释放而转变成系统动能的弹性应变能部分。其中，一部分消耗于断层岩体裂缝动力扩展，另一部分转变成动能，使得断层突然卸载而发生剧烈振动，从而发生断层冲击地压。

断层冲击地压的最大震级  $ML$  经验公式为

$$ML = \frac{\lg(E\eta) - 1.18}{1.5} \quad (25)$$

式中： $\eta$  为折算系数。

由式(18)可知，断层冲击地压震级的影响因素有断层和围岩的力学性能  $m, g, u_0, G$ ，断层和围岩的几何尺寸  $b, B, D, L$ 。

图 5 为震级与断层厚度的关系。由图 5 可见，震级随断层厚度增大而减小。说明断层较薄时，不易失稳，但是一旦失稳，震级将会较大；断层较厚时，容易破裂失稳，但震级相对较小。

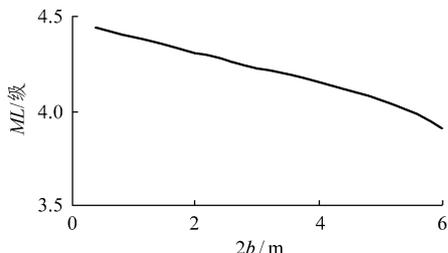


图 5 震级与断层厚度的关系

Fig.5 Curve of magnitude vs. thickness of fault

图 6 为震级与断层软化指数的关系。由图 6 可见，震级随断层软化指数增大而增加。当  $m < 2$  时，系统刚度参数  $K > 1$ ，断层冲击地压不会发生。

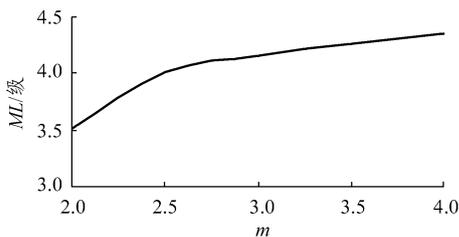


图 6 震级与断层软化指数的关系

Fig.6 Curve of magnitude vs. softening index of fault

图 7 为震级与断层初始剪切模量的关系。由图 7 可见，震级随断层初始剪切弹性模量增大而增加。当  $g < 4 \text{ MPa}$  时，系统刚度参数  $K > 1$ ，断层冲击地压不会发生，说明极软弱断层因抵抗剪切变形的能力很弱，围岩中不会积蓄大量的弹性变形能。当  $g > 15 \text{ MPa}$  后，因断层与围岩的抗剪强度比较接近，震级变化不大。

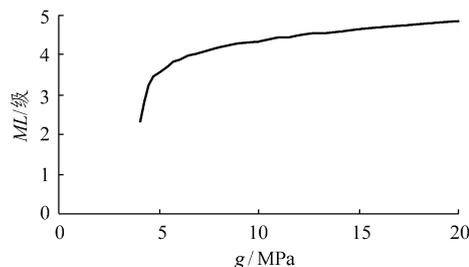


图 7 震级与断层初始剪切模量的关系

Fig.7 Curve of magnitude vs. initial shear modulus of fault

图 8 为震级与围岩剪切模量的关系。由图 8 可见，震级随围岩的初始剪切弹性模量增大而减小。当  $G > 150 \text{ MPa}$  时，系统刚度参数  $K > 1$ ，断层冲击地压不会发生，说明当围岩与断层的初始剪切弹性模量比大于 20 后，因断层抵抗剪切变形的能力很弱，围岩中不会积蓄大量的弹性变形能。

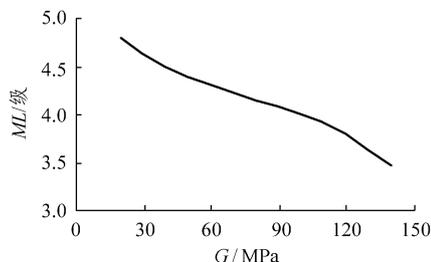


图 8 震级与围岩剪切模量的关系

Fig.8 Curve of magnitude vs. shear modulus of surrounding rock

通过以上分析可知，断层冲击地压的震级一般较大。断层冲击地压一旦发生，其破坏程度将会较大，应加强监测，进行重点防治，以避免人员伤亡，减少重大损失。

### 4 结 论

应用突变理论对断层错动型冲击地压所作的解析分析结果与实际情况基本相符。

断层冲击地压的震级随断层厚度增大而减小，随断层软化指数增大而增加，随断层初始剪切弹性模量增大而增加，随围岩的初始剪切弹性模量增大而减小。

断层冲击地压的破坏程度较大，应进行重点防治，以避免人员伤亡，减少重大损失。

### 参考文献(References):

[1] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防

- 治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 844 - 1 851.(Pan Yishan, Li Zhonghua, Zhang Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 844 - 1 851.(in Chinese))
- [2] 邵英楼, 王来贵, 章梦涛. 冲击地压的分类研究[J]. 煤矿开采, 1998, (1): 27 - 28.(Tai Yinglou, Wang Laigui, Zhang Mengtao. Classified research on the rockburst[J]. Coal Mining Technology, 1998, (1): 27 - 28.(in Chinese))
- [3] 傅鹤林, 桑玉发. 用突变理论预测地下采场冲击地压发生的可能性[J]. 金属矿山, 1996, (1): 19 - 21.(Fu Helin, Sang Yufa. Possibility for forecasting shock bump of underground stope by mutation theory[J]. Metal Mine, 1996, (1): 19 - 21.(in Chinese))
- [4] 王来贵, 潘一山, 梁冰, 等. 矿井不连续面冲击地压发生过程分析[J]. 中国矿业, 1996, 5(3): 62 - 64.(Wang Laigui, Pan Yishan, Liang Bing, et al. Analysis of rockburst process for noncontinuous area in mines[J]. China Mining Magazine, 1996, 5(3): 62 - 64.(in Chinese))
- [5] 潘一山, 王来贵, 章梦涛, 等. 断层冲击地压发生的理论与实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642 - 649.(Pan Yishan, Wang Laigui, Zhang Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642 - 649.(in Chinese))
- [6] 徐东强. 断层冲击地压发生机制及声发射特性[J]. 黄金, 2000, 21(6): 25 - 27.(Xu Dongqiang. The occurrence mechanism of pressure bump and the character of acoustic emission (AE)[J]. Gold, 2000, 21(6): 25 - 27.(in Chinese))
- [7] 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): 43 - 48.(Pan Yue, Liu Ying, Gu Shanfa. Fold catastrophe model of mining fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 43 - 48.(in Chinese))
- [8] 潘岳. 岩石破裂过程的折迭突变模型[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 299 - 303.(Pan Yue. Fold catastrophe model of damaging process in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 299 - 303.(in Chinese))
- [9] 潘岳, 解金玉, 顾善发. 非均匀围压下矿井断层冲击地压的突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 21(3): 310 - 314.(Pan Yue, Xie Jinyu, Gu Shanfa. Catastrophe theory analysis of mining fault rockburst under nonuniform surrounding pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 21(3): 310 - 314.(in Chinese))
- [10] 王克杰, 李永明, 李仕明, 等. 能量分析在冲击地压发生过程中的应用[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2004, 23(5): 334 - 337.(Wang Kejie, Li Yongming, Li Shiming, et al. The application of energy analysis during the course of pressure bump generation[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2004, 23(5): 334 - 337.(in Chinese))