

# 矿井断层冲击地压的折迭突变模型\*

潘岳 刘英 顾善发

(青岛建筑工程学院 青岛 266520)

**摘要** 建立了矿井围岩-断层系统的准静态形变平衡方程, 将呈剪切破裂形式的断层失稳过程归结为折迭突变模型。模型可验证已有的岩体系统失稳破裂的临界条件, 还可给出系统恢复准静态形变的条件。用解析方式对断层失稳前兆阶段及失稳(震)后阶段系统的稳定性作出符合物理意义和实际观察的描述。给出断层失稳前后的错距和围岩弹性能释放量计算公式。从中看到系统刚度比是刻划矿震强度恰当的系统内禀参数。分析结果可全部从已有的试验结果中得到验证。

**关键词** 断层矿震, 折迭突变模型, 稳定性分析, 错距, 能量释放

**分类号** TD 324

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2001)01-0043-06

## 1 前言

矿井断层冲击地压, 又称矿震, 是由于采矿活动引起的断层突然相对错动而引起的地压动力现象。矿震发生时, 释放能量多, 震级高。国外矿震的最大震级超过5级, 而国内最大震级超过4级。对于矿震已有较多的工程实录发表。文[1~7]对矿震机理作了理论分析, 文[4]还同时对断层粘滑和断层冲击作了很好的模拟实验, 得到一系列有参考价值的研究结果。矿震中断层本构受到破损, 从稳定角度看, 断层冲击属于本构失稳。矿山断层冲击成因机制复杂, 作者拟仅对文[4]提出的由上、下盘完整岩体与断层构成的, 同时围岩周边还受有正应力和剪应力的围岩-断层模型, 按突变理论方法对该系统的稳定性及断层冲击地压发生的条件和过程进行讨论。

## 2 矿井断层冲击地压的分析模型

### 2.1 围压作用下岩石剪切破坏的应力-应变关系

受纯剪的岩石在考虑其损伤演化后, 可得其应力-应变关系为<sup>[8]</sup>

$$\tau = g \gamma \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $g$ ,  $\gamma_0$  分别是岩石受纯剪时的初始弹模和峰值剪应力时的剪应变;  $m$  为曲线同族指数。岩石坚

硬, 其  $g$ ,  $\gamma_0$  和  $m$  就大; 在渗水、温升条件下,  $g$ ,  $\gamma_0$  和  $m$  就小。图1中给出  $m = 1, 2, 3$  时的  $\tau$ - $\gamma$  曲线形式。

断层岩体是在围压作用下破裂的。不失一般性, 围压作用下考虑损伤演化的岩石剪应力-剪应变关系也可表示为

$$\tau = g' \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{m'} \right] \quad (2)$$

由于岩石内有众多微裂纹和罅隙, 故其单轴压缩应力-应变曲线的初始斜率, 要小于荷载增大而岩石内微裂纹和罅隙被压密阶段的斜率。对于预先施加围压的岩石受剪时, 其剪应力-剪应变曲线初始弹模  $g$

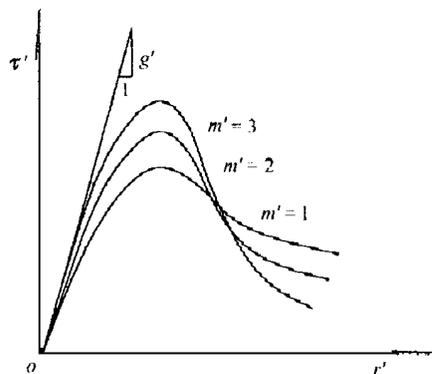


图1 不同  $m$  时的  $\tau$ - $\gamma$  曲线

Fig 1  $\tau$ - $\gamma$  curves under different values of  $m$

1999年6月24日收到初稿, 1999年10月7日收到修改稿。

\* 山东自然科学基金(Y98-A 08011)资助项目。

作者 潘岳 简介: 男, 1947年生, 现任青岛建筑工程学院教授, 主要从事岩土力学与结构稳定方面的教学与研究工作。

要大于受纯剪岩石的初始弹模  $g$ ,  $m$  也要大于  $m$ 。在一个限定范围内,  $g, m$  有着随预围压增大而增大的倾向。

对于平面形变问题(以压应力为正), 由莫尔-库仑准则

$$\tau_b = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

图2中当围压  $(\sigma_x + \sigma_y)/2$  增大时, 岩石的抗剪强度  $\tau_b$  相应增大。从图2中几何关系可得  $\tau_b = \tau_{\max} \cos \varphi$ ,  $c = (g \gamma_0/l \cos \varphi)$ ,  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y)/2 - \tau_{\max} \sin \varphi$  代入式(3)整理后可得

$$\tau_{b\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sin \varphi + \frac{g \gamma_0}{l} \quad (4)$$

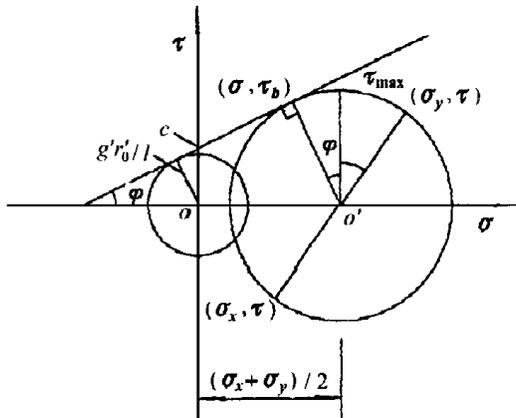


图2 莫尔-库仑准则

Fig 2 The Mohr-Coulomb criterion

由式(4), (2) 可得在围压  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  作用下与峰值剪应力  $\tau_{\max}$  对应的剪应变

$$\gamma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \frac{e}{g} \sin \varphi + \frac{g \gamma_0}{g} \quad (5)$$

式(1) 中的  $g, \gamma$  和  $m$  及式(2) 中  $g, m$  在一个限定范围内随预围压增大的取值可从实验数据获得, 这样岩石受预围压作用在平面内剪切破裂的应力-应变关系式(2) 便确定了。

### 2.2 分析模型

据文[4]取一围岩、断层分别为均质岩体构成的系统如图3所示。断层带宽  $2b$ , 围岩边界到断层的距离为  $B$ 。对于图示  $x, y$  方向, 设围岩外边界承受均布压应力  $\sigma_x, \sigma_y$  和剪应力  $\tau$

为明确和简便计先讨论  $\sigma_x = \sigma_y =$  常数, 而场内剪应力  $\tau$  是最大剪应力  $\tau_{\max}$  的情况。这样图3中  $xz$  面和  $yz$  面便是场内任一单元体的最大剪应力所在平面如图4。剪应力  $\tau$  做功使得断层、围岩在  $x$  轴两侧产生相反的切向位移。由于受力均匀, 图3中只需取出长为  $L$ , 厚为  $D$  而  $y = 0$  的半条带(阴影带) 来研究就可以了。为了保证断层冲击为破裂型, 在  $y = b$  处应力应满足连续条件:

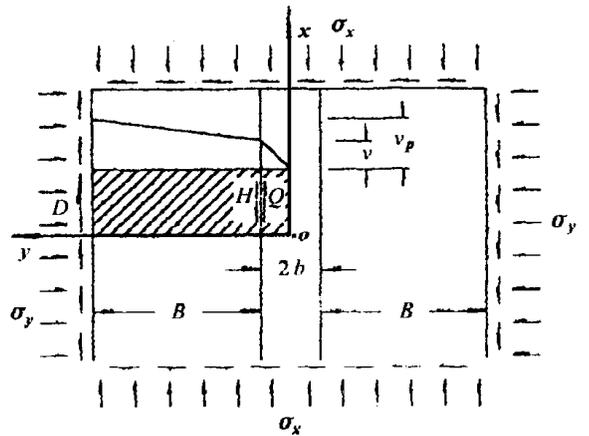


图3 简单的围岩-断层矿震模型

Fig 3 A analysis model of surrounding rock-fault system

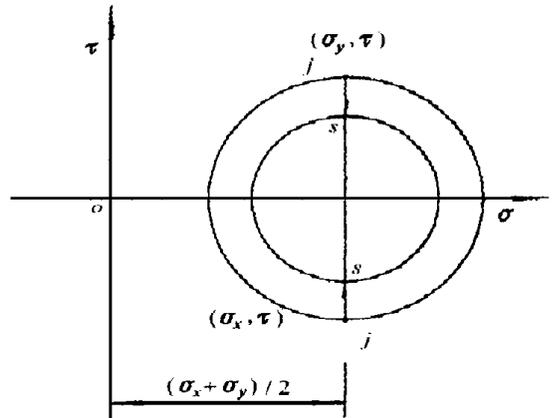


图4 围岩、断层中的应力状态

Fig 4 Stress state in fault and surrounding rock

$$\tau DL = \tau DL \quad (\text{或 } Q = H) \quad (6)$$

$$\sigma_y DL = \sigma_y DL = N \quad (7)$$

在  $y = b + B$  处的力边界条件为

$$\tau DL = P \quad \sigma_y DL = N \quad (8)$$

断层岩体破裂前已表现出软化性质。围压作用下断层岩体的剪应力-剪应变(本构)关系如式(2), (5)。围岩处于弹性阶段, 其剪应力-剪应变关系为

$$\tau = G \gamma \quad (9)$$

式中:  $G$  为弹模, 断层和围岩的形变都是均匀的, 它们的几何关系分别为

$$\gamma = \frac{v}{b} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{v_p - v}{B} = \frac{v_H}{B} \quad (11)$$

式中:  $v_H$  为围岩两端的相对侧向位移。

断层、远场分别有剪应变  $v/b$  和  $v_H/B$ ; 在断层弹性阶段或软化阶段, 由于  $\sigma_x = \sigma_y =$  常数,  $\sigma_x, \sigma_y$  不引起能量变化, 下文对系统作能量分析时不再述及其影响。将式(2), (9)~(11)代入式(6), (8)可得断层

和远场半条带部分的剪力-切向位移关系分别为

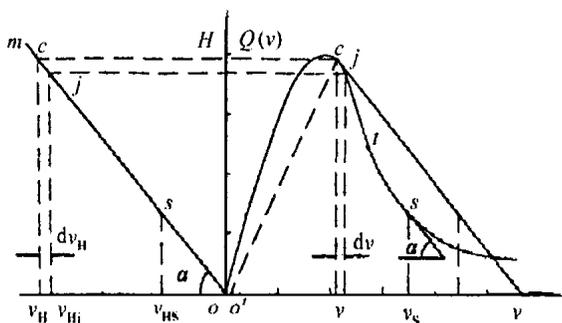
$$Q(v) = \frac{gDL}{b} v \exp[-(\frac{v}{v_0})^m] \quad (12)$$

$$P = H = \frac{GDL}{B} v_H \quad (13)$$

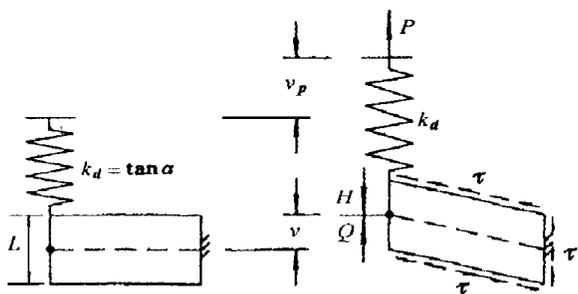
式(12)的图形为一峰值力  $Q(v_0)$  之后的软化段上具有拐点  $t$  的曲线。式(13)的图形为一斜率  $\tan\alpha = GDL/B$  的半直线  $om$  如图 5(a), 故围岩相当于一刚度  $k_s = GDL/B$  的弹簧如图 5(b)。作刚体平动的正应力  $\sigma_x, \sigma_y$  不做功, 图 5(b) 中已略去。弹簧  $k_s$  上的力  $P$  为作用在弹簧-断层系统上的外荷载。不失一般性可假设力  $P$  作用点位移  $v_P$  按准静态单调方式增大, 即可设  $dv_P/dt = c_1 > 0$ ,  $c_1$  为小常数。当断层位移  $v$  也以缓慢形式增加时, 由式(6)及式(12), (13) 可得关系式

$$P = H = k_s v_H = Q(v) \quad (14)$$

式(18)是系统平衡位置在  $Q(v)$  曲线上且呈准静态方式变化时, 系统参量间的约束条件。



(a) 围岩、断层半条带的荷载-位移曲线



(b) 围岩-断层半条带的力学模型

图 5 围压作用下断层岩体的本构

Fig 5 Constitutive relation of fault-rock mass under confined pressure

应变能。曲边梯形  $ocv$  的面积为断层位移至  $v$  时所吸收的能量, 其中包括断层内微裂纹产生、扩展已耗散的能量和面积为三角形  $ocv$  的弹性能。试验和实际矿震观察都表明, 断层失稳破裂发生在其荷载-位移表达式即  $Q(v)$  曲线软化段上。在最大承载力  $Q(v_0)$  之后的软化段上断层有位移  $dv$  时, 围岩要沿半直线  $om$  卸载, 同时要释放弹性能  $-H dv_H$ 。由式(14)知, 当  $-dv_H < dv$  时,

$$-H dv_H < Q(v) dv$$

即围岩释放的弹性能小于使断层位移  $dv$  所提供的能量  $Q(v) dv$ 。故尚需外力  $P$  做功补充能量  $P dv_P$  断层才能发生位移。在  $Q(v_0)$  附近的软化段上围岩-断层系统处于准静态。在这样的区段上有

$$Q(v) dv + H dv_H - P dv_P = 0 \quad (15)$$

式(15)为以断层位移至  $v$  时的状为参考状态建立的, 断层有微位移  $dv (> 0)$  而系统和处于准静态时的能量平衡关系。式(15)两端除以  $dv$ , 利用约束条件式(14)并考虑到  $k_s$  为常数,  $H dv_H/dv = Q(v)Q'(v)/k_s$ 。可以从式(15)导得系统在相同情况下的平衡方程为

$$Q(v) + Q'(v)Q(v)/k_s - J = 0 \quad (16)$$

式中已记

$$P \frac{dv_P}{dv} = J \quad (17)$$

$J$  为使断层产生单位位移时系统所需外界输入的能量。可称之为能量输入率。从导得式(15)的过程知, 式(16)中  $J > 0$  时, 断层作准静态位移; 若式(16)中  $J = 0$ , 则表明无需外力做功, 仅凭系统内部的能量转移, 断层位移便自动加大, 这表明系统处于临界状态。故可用

$$J = 0 \quad (18)$$

来作为判定系统失去准静态或断层发生失稳破裂的临界条件。

式(12)表示的  $Q(v)$  曲线软化段上拐点  $t$  处的位移  $v_t$  满足方程

$$Q(v_t) = \frac{\lambda}{v_0} \exp[-(\frac{v_t}{v_0})^m] \cdot$$

$$[m^2 (\frac{v_t}{v_0})^{2m-1} - (m^2 + m) m^2 (\frac{v_t}{v_0})^{m-1}] = 0$$

式中已记  $\lambda = gDL/b_0$  于是可得  $v_t$  与  $v_0$  间的关系为

$$\frac{v_t}{v_0} = \frac{1+m}{m} \quad (19)$$

式(19)表明随岩体强度增高即  $m$  增大,  $v_t/v_0$  变小即  $Q(v)$  曲线软化段变陡,  $Q(v)$  曲线软化段拐点处的斜率最陡, 利用式(19)可得式(20)在  $v_t$  处的各阶导数为

$$\begin{cases} Q(v_t) = \alpha v_t & Q'(v_t) = -\alpha n \\ Q(v_t) = 0 & Q''(v_t) = \frac{\alpha}{v_t^2} m(1+m) \end{cases} \quad (20)$$

### 3 断层矿震的折迭突变模型

#### 3.1 断层矿震突变模型的建立

图 5 中三角形  $ocv_H$  的面积为围岩内所蓄的弹性

式中已记  $\alpha = \lambda \exp(-\frac{1+m}{m})$ 。利用式(19)，将式(20)中的  $Q(v)$  和  $Q(v)$  在  $v_i$  处展开可得

$$\frac{\alpha^2 m (1+m)^2}{2v_i} (v - v_i)^2 + \alpha^2 m^2 (1 - \frac{k_s}{\alpha n}) (v - v_i) + \alpha^2 m v_i (\frac{k_s}{\alpha n} - 1) - J + O(v - v_i)^3 = 0 \tag{21}$$

式中:  $-\frac{1}{\alpha n} = \frac{1}{Q(v_i)}$ ; 记

$$K = \frac{k_s}{\alpha n} = \frac{Gb}{gBm} \exp(\frac{1+m}{m}) \tag{22}$$

式中:  $K$  为围岩-断层共同作用系统的刚度参数。以下讨论  $K$  在 1 附近取值的情况。这样  $v - v_i$  的 2 次项是式(21)系数不为零的最低项次。在突变理论中式(21)对应的是折迭突变模型的平衡方程, 故可去  $(v - v_i)^3$  以上的项来讨论系论系统的稳定性。利用式(19), 可将式(21)化为无量纲形式

$$[\frac{v - v_i}{v_i} + \frac{m}{(1+m)^2} (1-K)]^2 - \frac{m^2}{(1+m)^4} (1-K)^2 - \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_i)(1+m)^2} = 0 \tag{23}$$

作变量代换

$$w = \begin{cases} \frac{v - v_i}{v_i} - \frac{m}{(1+m)^2} (1-K) \\ \alpha = -\frac{m^2}{(1+m)^4} (1-K) - \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_i)(1+m)^2} \end{cases} \tag{24}$$

可将式(23)化成折迭突变平衡方程的正则形式

$$w^2 + a = 0 \tag{25}$$

式中:  $w$  是状态变量;  $a$  是控制变量,  $a > 0$  时系统为空状态,  $a = 0$  时式(25)图形为一抛物线,  $a = 0$  是个分枝点。式(24)将  $Q(v)$  曲线上  $\frac{v - v_i}{v_i} = \frac{m}{(1+m)^2} (K - 1)$  的点映射到图 6 中的原点  $w = 0, a = 0$ 。由约束条件式(14)可得

$$J = P \frac{dv_p}{dv} = P \frac{dv + dv_H}{dv} = P \frac{Q(v) + k_s}{k_s} \tag{26}$$

图 5  $Q(v)$  曲线软化段上  $v$  增大时,  $Q(v)$  从  $Q(v_0) = 0$  起负向增大, 在拐点处达到负值  $Q(v_i)$ 。拐点以下  $Q(v)$  由极负值向零变化。故在软化段的某些区段上能量输入率  $J$  为正值。在这样的区段上式(23)可写为

$$\frac{v - v_i}{v_i} + \frac{m}{(1+m)^2} (1-K) = w_1 = -\frac{1}{m} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K) + 2(1-K) + \frac{2KJ}{Q(v_i)}} \tag{27}$$

$$\frac{v - v_i}{v_i} + \frac{m}{(1+m)^2} (1-K) = w_2 = -\frac{1}{m} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K) + 2(1-K) + \frac{2KJ}{Q(v_i)}} \tag{28}$$

式(27), (28)是系统准静态平衡路径的两个分枝, 它们分别对应于软化段拐点以上和以下的某个区段。实际问题使得平衡位置最终是要到达分枝 2 的。由于对于不为零的  $a$  值, 系统总有 2 个平衡位置, 当  $K$  值给定而  $J$  按式(26)变化时, 平衡位置由分枝 1 经原点过渡分枝 2, 断层将以缓慢形式破裂。否则, 平衡位置将发生跳跃, 断层将呈脆性失稳破裂。

### 3.2 折迭突变模型对断层矿震的描述

$K$  固定时由式(24), (26)和(27)知, 当  $\frac{v - v_i}{v_i} < \frac{m}{(1+m)^2} (1-K)$  且  $v$  增大时,  $Q(v)$  及  $J$  减小, 故  $a$  与  $w_1$  由负向零变化, 即平衡位置  $(a, w_1)$  沿分枝 1 右行; 由式(24), (26)和(28)知, 当  $\frac{v - v_i}{v_i} > \frac{m}{(1+m)^2} (1-K)$  且  $v$  增大时,  $Q(v)$  及  $J$  增大, 故  $a$  负向增大而  $w_2$  正向增大, 即平衡位置  $(a, w_2)$  沿分枝 2 左行。由此看到图 5 和图 6 中加载参数和位移的变化趋势完全一致。下面来看不同的  $K$  值下,  $\frac{v - v_i}{v_i}$  趋近和离开  $\frac{m}{(1+m)^2} (1-K)$  时的情况。

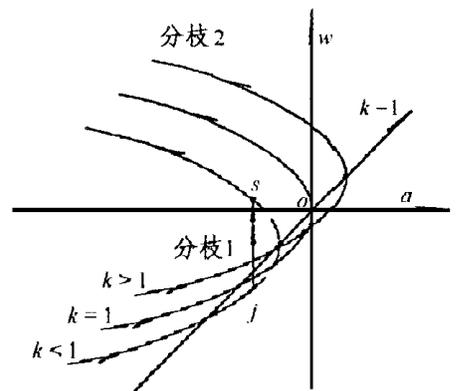


图 6 折迭突变的平衡曲面

Fig 6 Equilibrium surface of fold catastrophe model

(1)  $k_s < -Q(v_i)$  即  $K$  取小于 1 的值  
平衡位置沿分枝 1 右行, 存在某点  $w_j < 0$  即  $\frac{v_i - v_i}{v_i} < \frac{m}{(1+m)^2} (1-K)$  的某点处, 有  $-Q(v_i) < -Q\{[1 + \frac{m}{(1+m)^2} (K - 1)]v_i\} < -Q(v_i)$ , 这会使

$$Q(v_i) + k_s = 0 \tag{29}$$

这时式(26)中

$$\frac{dv_p}{dv} = 0 \quad (30)$$

或  $J = 0$ , 即式(18)得到满足, 系统处于临界状态。由前文知  $dv_p/dt = c_1$ ,  $dv_p$  是微量, 但并不为零。系统位置在不包括原点的准静态平衡路径 1 上变化时,  $dv_p$  与  $dv$  是同阶量。式(30)中  $dv_p/dv = 0$  或  $dv/dv_p$

表明, 在  $v_j$  处移  $v$  将有一个突然的(有限)改变量而使平衡位置脱离分枝 1。由于除  $a = 0$  之外, 同一  $a$  值  $w$  有两个状态与之对应, 故平衡置将从分枝 1 上的  $w_j$  点跳到分枝 2 上  $w_s$  点, 需要指出, 由式(26), (18)知, 在分枝 2 的  $w_s$  处有与式(29) 相同的关系式

$$Q(v_s) + k_s = 0 \quad (31)$$

成立。由式(29), (31), (27) 及(28)得  $w$  的跳跃幅值

$$\Delta w = \frac{v_s - v_j}{v_t} = \frac{2}{1+m} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2}(1-K)^2 + 2(1-K)} \quad (32)$$

而跳跃前后的位移值为

$$\left\{ \begin{aligned} v_j &= \left\{ 1 - \frac{1}{1+m} \left[ \frac{m}{1+m} + \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2}(1-K)^2 + 2(1-K)} \right] \right\} v_t \\ v_s &= \left\{ 1 - \frac{1}{1+m} \left[ \frac{m}{1+m} - \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2}(1-K)^2 + 2(1-K)} \right] \right\} v_t \end{aligned} \right. \quad (33)$$

平衡位置跳跃表示断层失稳破裂, 而跳跃幅值  $\Delta w$  或  $\Delta v = v - v_j$  便是断层失稳前后的半错距。从式(33)看到,  $m$  固定时,  $K$  值越小, 断层失稳后的半错距越大。断层失稳的起始点由式(29)确定, 它与 Cook (1965)、陈颀(1984)<sup>[10]</sup>得到的结果一致。关于断层失稳破裂的终止点, 以前从未给出过明确的表达式。本节分析表明, 断层失稳终止点的置应由式(31)来确定。

(2)  $k_s = -Q(v_t)$  即  $K$  取大于或等于 1 的值  $k_s = -Q(v_t)$  或  $K = 1$  时, 式(27), (28)成为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{v - v_t}{v_t} = w_1 &= -\frac{1}{1+m} \sqrt{\frac{2KJ}{Q(v_t)}} \\ \frac{v - v_t}{v_t} = w_2 &= -\frac{1}{1+m} \sqrt{\frac{2KJ}{Q(v_t)}} \end{aligned} \right. \quad (34)$$

平衡位置沿分枝 1 右行,  $J$  由正而减小, 当  $v = v_t$  时, 据条件  $k_s = -Q(v_t)$ , 由式(26)知, 式(18), (30)也得到满足。但由于这时式(34)中  $a = 0$ ,  $w_1 = w_2 = 0$ , 分枝 1, 2 在原点相连。平衡位置平稳(无跳跃)地

过渡到分枝 2。

$k_s > -Q(v_t)$  或  $K$  取大于 1 的值时, 同样可以证明,  $J$  变化时, 平衡位置将从分枝 1 经原点平稳地过渡到分枝 2。限于篇幅, 详细请参见文[11]。

### 3.3 围岩-断层系统的稳定性分析

式(23)对  $v$  求导可得

$$\frac{dL}{dv} = \frac{Q(v_t)(1+m)^2}{K v_t} \left[ \frac{v - v_t}{v_t} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) \right] \quad (35)$$

在分枝 1 上由式(27),  $\frac{v - v_t}{v_t} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) < 0$ , 故式(35)中

$$\frac{dL}{dv} < 0 \quad (36)$$

这表明使断层增加单位位移时加载参数或外界对系统的能量输入在连续减小, 故平衡路径分枝 1 或断层承载强度  $Q(v_0)$  之后至破裂的前兆阶段, 围岩-断层系统虽处在准静态, 但系统状态是不稳定的。

在分枝 2 上由式(28),  $\frac{v - v_t}{v_t} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) > 0$ , 故式(35)中

$$\frac{dL}{dv} > 0 \quad (37)$$

这是因为在分枝 2, 虽然式(26)中作用在系统上的外力  $P$  在减小, 但由于  $Q(v)$  增大得更快, 从而使断层产生单位位移所需外界输入的能量要不断增大, 所以平衡路径分枝 2 或震后的围岩-断层系统处于稳定状态。

### 3.4 断层失稳时围岩弹性能释放计算公式

跳跃在瞬间完成。从式(32)看到, 对于给定的  $m$  值, 平衡位置产跳跃幅值  $\Delta w$  或  $\Delta v = v_s - v_j$  随  $K = k_s / [-Q(v_t)]$  值的减小而增大。由于外力  $P$  的作用速度  $c_1$  是微小常数, 它远远低于平衡位置的跳跃速度, 故促成系统平衡位置跳跃或断层失稳破裂的能量完全由围岩所蓄的弹性应变能瞬间大量释放所提供。图 5 中梯形  $jv_{Hj}v_{Hs}$  的面积为

$$\frac{1}{2} k_s (v_{Hj}^2 - v_{Hs}^2) = \frac{1}{2k_s} (Q_j^2 - Q_s^2)$$

即为系统失稳期间围岩释放的弹性应变能。而曲边梯形  $jv_jv_s$  的面积为

$$\int_{v_j}^{v_m} Q(v) dv$$

为失稳期间断层破裂所要耗去的能量, 将图 5 中半直线  $om$  向右平移  $v_{pj} = v_{Hj} + v_j$  后得到的曲边五边形  $jsv_s v_{Hs}$  的面积

$$E_T = \frac{1}{2k_s} (Q_j^2 - Q_s^2) - \int_{v_j}^{v_m} Q(v) dv \quad (38)$$

即为厚 $D$ ，长 $L$ ，宽分别为 $B$ 和 $b$ 的围岩、断层构成的共同作用系统失稳时，围岩所释放而转变成系统动能的弹性应变能部分。其中一小部分消耗于断层岩体裂缝动力扩展，大部分将转变成围岩自身的动能。从而使得在围岩与断层交界面上，因 $H$ 于瞬间从 $H_j$ 降到 $H_s$ 的突然卸载而发生剧烈振动，此振动将以剪切波的形式向远方传播，引起矿井破坏。式(38)表明， $k_s$ 越小， $Q(v)$ 曲线软化段下降越迅速，即 $m$ 越大，上述矿震效应将越剧烈。由式(38)不难得到图3中断层失稳时整个围岩所释放的弹性能。

#### 4 结束语

(1) 图3中 $\sigma_x = \sigma_y =$ 常量，在剪应力 $\tau$ 作用下发生反对称切向位移的条件下，断层、围岩的荷载-位移关系可表示为式(12)，(13)，其图形如图5所示。此力学系统的本构失稳过程可归结为折迭突变模型式(24)。式(24)除了可以验证已有的岩体系统失稳条件式(29) $Q(v_j) + k_s = 0$ ，还可给出围岩-断层系统恢复准静态的条件式(31) $Q(v_s) + k_s = 0$ 。对此系统给出了失稳前后断层错距以及围岩所释放的转变成系统动能部分的应变能表达式(38)。由于建立了平衡方程式(23)，故可用解析方式对断层失稳的前兆阶段和失稳(震)后阶段的系统稳定性作出符合物理意义和实际矿震观察的描述。

(2) 如第2节所述，围岩、断层岩体的强度因渗水与温升会影响其应力-应变曲线同族数 $m$ 和初始弹模 $G$ 和 $g$ 的取值，因而也将影响系统刚度比参数 $K = k_s / [-Q(v_i)] = Gb \exp(\frac{1+m}{m}) / (gBm)$ 。 $K$ 值越小，即断层薄( $b$ 较小)，较坚硬，围压较大( $g, m$

较大)且远场弹模 $G$ 不很大时，则失稳前后断层错距 $\Delta v$ 和围岩弹性性能释放量 $E_T$ 越大。因此表征矿震强度的 $\Delta v$ 和 $E_T$ 仅由断层和围岩的本构关系和几何尺寸决定，与围岩扰动特性无关。而刚度比 $K$ 则是刻画矿震强度十分恰当的系统内禀参数。

上述(1)，(2)中的理论分析的结果可全部从已有的试验结果中得到验证<sup>[4]</sup>。

(3) 对于图3，4中 $\sigma_x > \sigma_y$ 且 $\sigma_x, \sigma_y$ 有所变化的情况，可按塑性力学中的增量理论来对问题作定量分析，限于篇幅，作者拟另文撰述。

#### 参 考 文 献

- 1 章梦涛 冲击地压失稳理论与数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197~ 204
- 2 徐世杰 矿震诱发机制的探讨[J]. 地震, 1987, 9(5): 9~ 13
- 3 王淑坤 冲击地压机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增): 500~ 503
- 4 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
- 5 缪协兴, 孙海, 吴志刚 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 428~ 431
- 6 潘一山, 杜广林, 张永利等 煤体振动方法防治冲击地压的机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 432~ 436
- 7 李廷芥, 王耀辉, 张梅英等 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 6~ 10
- 8 Karcinovic D. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. Int. J. Solis Structure, 1982, 18(7): 551~ 562
- 9 Sauners P T. 灾变理论入门[M]. 凌复华译 上海: 上海科学技术文献出版社, 1983, 46
- 10 陈颀 地壳岩石的力学性质[M]. 北京: 地震出版社, 1988, 170~ 176
- 11 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

### FOLD CATASTROPHE MODEL OF MINING FAULT ROCKBURST

Pan Yue, Liu Ying, Gu Shanfa

(Qingdao Architectural and Engineering Institute, Qingdao 266520 China)

**Abstract** The equilibrium equation of surrounding rock-mining fault system is established. The fault destabilizing process with shear failure pattern belongs to fold catastrophe model. The model can be used to verify the known critical condition for rock system to destabilize and give the condition for rock system to resume quasi-statical state. The omen and post stages of rock burst of the surrounding rock-fault system can be described by analytic way. The calculation formulae of fault offset and energy release of surrounding rocks are obtained. The obtained analysis results can be verified totally by the test results.

**Key words** fault rockburst, fold catastrophe, stability analysis, energy release, fault offset