

文章编号:0253-9993(2012)12-2060-05

基于梯度塑性理论的断层活化机理

林远东¹,涂 敏^{2,3},刘文震¹,吴建强¹

(1. 安徽理工大学 理学院,安徽 淮南 232001;2. 安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001;3. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001)

摘 要:基于梯度塑性理论,将断层视为内部连续、有厚度的地质体,分析断层带应变软化及其应变局部化问题。将梯度塑性理论引入断层带模型,得到了断层带沿倾向相对错动位移的理论表达式,定义了“断层带等效剪切刚度”;通过对上盘岩体的下边缘界面处单元体应力分析,得到上盘岩体沿断层倾向的相对错动位移并定义了“两盘岩体等效剪切刚度”。根据“断层带等效剪切刚度”与“两盘岩体等效剪切刚度”的关系得到了断层活化的判据。结果表明:断层的活化不仅与断层内部地质体材料的性质(断层内部地质体材料的脆性、内部结构尺寸)有关,还与两盘岩石的特征参数(剪切弹性模量、泊松比)及包括断层倾向长度的最小岩层尺寸相关;断层内部地质体材料的内部参数越小、“两盘岩体等效剪切刚度”越小、断层内部地质体材料越脆及包括断层倾向长度的岩层最小尺寸越大,断层越易活化。

关键词:梯度塑性理论;断层活化;活化判据;力学分析;剪切位移;剪切刚度

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A

Faults activation mechanism based on gradient-dependent plasticity

LIN Yuan-dong¹, TU Min^{2,3}, LIU Wen-zhen¹, WU Jian-qiang¹

(1. College of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. The Key Lab of Safe and High-efficiency Mining of Ministry of Education, Huainan 232001, China)

Abstract: Analyzed the strain softening and consequent strain localization behavior for fault based on gradient-dependent plasticity. Regarded fault as continuous geological bodies with thickness. The gradient-dependent plasticity was introduced into the fault model. The theoretical expression of fault band displacement in direction of fault azimuth was presented, and ‘the equivalent shear stiffness of the fault band’ was defined. The displacement of fault hanging wall in direction of fault azimuth was presented and ‘the equivalent shear stiffness of the fault hanging-foot-wall’ was defined considering the stress conditions of element body in interface at the lower edge of fault hanging wall. The fault activation criterion was obtained according to comparing ‘the equivalent shear stiffness of the fault hanging-foot-wall’ with ‘the equivalent shear stiffness of the fault band’. The results show that fault activation is determined with the factors which not only include the material properties (such as brittleness, the internal structure size of geo-materials in fault), but also include fault hanging-foot-wall characteristic parameters (such as shear elastic modulus, Poisson’s ratio). Besides, fault activation is determined with the minimum width of the rock mass which include the integral fault. It is found that the lower internal parameter or ‘the shear equivalent stiffness of fault hanging-foot-wall’, and the higher brittleness of fault geo-materials or the minimum width of the rock mass which include the integral fault lead to increasing the possibility of fault activation.

Key words: gradient-dependent plasticity; fault activation; activation criterion; mechanical analysis; shear displacement; shear stiffness

收稿日期:2011-11-21 责任编辑:常 琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074004)

作者简介:林远东(1978—),男,贵州毕节人,讲师。E-mail: ydlin771010@163.com

在采场支承压力的作用下,采场断层的上、下盘可能会发生相互错动。将采场断层的上、下盘相互错动的过程称为采场断层活化过程。断层活化可起到两个重要作用:一是通过活化,断层面上胶结物被“剪开”,使得断层上、下盘之间由“粘接”状态转化为“断开”状态,从而为断层面成为水通道奠定了基础;另一方面,通过活化,断层两端扩展使得断层向含水层进一步延伸,从而增加了断层连接含水层的可能性。在矿山压力作用下,断层活化过程实际上是断层的开采盘沿断层面产生剪切运动,进而在断层的一端或两端产生新的断裂,使得断层得以扩展^[1]。断层活化还使顶底板变形的连续性遭到破坏而致岩层的整体失稳。统计表明,有约 80% 的煤与瓦斯突出和矿井突水淹井事故是由小断层引起的^[2]。采场断层活化是回采影响断层型突水的必要条件^[1]。断层活化的研究对于预防煤矿突水及矿山压力与岩层控制具有重要的理论和指导意义。

对于断层的采动活化,许多专家学者已进行了较多的研究与探讨。于广明等应用数值方法模拟了地下开挖引起分形断层面活化的现象^[3];吴基文等研究了煤层回采过程中随断层煤柱减小断层活化而引发断层导水的规律^[4];李青峰等研究了次生垂直应力和水平应力不均衡变化与断层采动活化的关系,得到了采场断层活化的标志^[5-6];李晓昭等运用数值模拟研究了开挖过程中断面上的应力变化规律^[7-8];卜万奎等采用弹性理论结合软件编程分析了断层在支承压力的作用下断层面上法向应力和剪应力的分布规律^[9]。前人的研究成果对预防煤矿突水及矿山压力与岩层控制具有重要意义,但尚有一些理论问题待完善和发展。诸如应结合工程实际考虑断层厚度;断层在采动条件下活化的力学模型建立及对活化条件的分析不应以采场峰值压力来计算,由此导出的临界采深等问题有待探讨,断层并非承受采场峰值压力后才会活化!

本文以倾斜断层为研究对象,将断层上、下盘岩体和断层带视为“剪切带——带外弹性岩石系统”,应用梯度塑性理论研究了断层带变形规律,得到了断层活化判据。

1 一维二阶剪应变梯度

连续介质应变梯度模型可由连续介质非局部模型通过泰勒级数展开而获得。根据早期非局部模型^[10]:非局部塑性剪应变 $\bar{\gamma}^p$ 可以表达为其本身所对应的参数 γ^p 的加权平均,该计算在 y 周围长度为 L 的邻域内进行:

$$\bar{\gamma}^p = \frac{1}{L} \int_L g(\xi) \gamma^p(y + \xi) d\xi \quad (1)$$

式中, y 为描述微结构在坐标系中位置的坐标, $m; \xi$ 为从点 y 到其邻域内任一点的距离, $m; g(\xi)$ 为某一权函数,它随 ξ 至 y 距离的增加而单调下降; $\gamma^p(y+\xi)$ 为微结构的塑性剪应变。

将 $\gamma^p(y+\xi)$ 在 y 点采用泰勒级数展开并代入式(1),并考虑到各向同性假设,可以将各奇次项消去,仅保留前两项可得:

$$\bar{\gamma}^p = \sum_{n=0,2} \int_L \frac{g(\xi)}{n!} \frac{d^n \gamma^p(y)}{dy^n} \xi^n d\xi \quad (2)$$

取非局部权函数^[11]为

$$g(\xi) = e^{-\frac{\xi^2}{4l^2}} \quad (3)$$

其中, l 为材料内部长度参数, m ,其大小反映了材料非局部作用的尺度。对于粒状岩石, l 的大小和粒径尺寸相当;对于裂隙体岩石, l 的大小和裂隙尺寸相当^[12]。

将式(3)代入式(2)积分得

$$\bar{\gamma}^p = \gamma^p + l^2 \frac{d^2 \gamma^p}{dy^2} \quad (4)$$

将上式中 $\bar{\gamma}^p$ 替代传统本构模型中的 γ^p 即可在传统塑性理论框架下考虑应变梯度效应。

2 理论分析

2.1 基本假设

设断层的上、下盘为弹性岩体,将断层带视为有厚度的地质体,其厚度由组成断层带的材料内部长度参数 l 所决定,即断层带厚度^[12-17](m)为: $\omega = 2\pi l$;断层带和上、下盘岩体组成“剪切带-带外弹性岩石系统”;断层带两侧与岩体交界面为平面;断层带的活化是因断层带剪切应变局部化所致;断层活化的标志为上、下两盘产生剪切运动;断层活化视为上盘岩体(或下盘岩体)相对于断层的运动。剪切带内地质体切应力与切应变的本构关系为双线性应变软化,如图 1 所示。

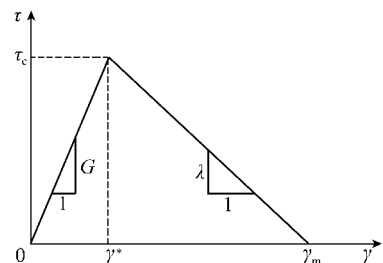


图 1 应力-应变本构关系

Fig. 1 The constitutive relation between stress and strain

图 1 中, τ_c 为断层内部地质体剪应力峰值强度, MPa; G 为断层部地质体的剪切弹性模量, MPa; λ 为应变软化阶段直线斜率的绝对值, MPa, 其物理意义为断层带内部地质体在应变软化阶段的降模量。降模量越大材料所允许的塑性变形量越小, 即材料越脆。

2.2 断层带内部剪切应变

当断层带内剪应力超过断层带内部地质体剪切峰值强度时, 断层带将发生剪切变形局部化, 断层带内形成强烈的不均匀剪切变形条带。力学模型如图 2 所示。

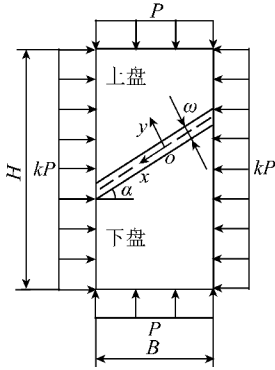


图 2 断层力学模型

Fig. 2 The mechanical model of fault

图 2 中, B 为包含整个断层带岩层的最小宽度, m ; ω 为断层带厚度, m ; α 为断层带倾角, rad ; P 为包含整个断层带的岩层在铅垂方向所受的矿山压力, MPa; k 为侧压系数, 其由断层带所在岩层具体地质条件和采动作用共同决定, 反映了地质因素和采动因素。

将该问题简化为沿剪切带法向的一维问题, 以断层带在厚度方向和倾向方向的中点 o 为原点建立 oxy 坐标系。根据传统塑性理论可得流动剪应力与局部塑性应变的关系为

$$\tau = \tau_c - C\gamma^p \tag{5}$$

式中, τ 为断层带内部切应力, MPa; τ_c 为断层带内部切应力峰值强度, MPa; γ^p 为断层带内部局部塑性剪切应变; C 为比例常数, MPa, 其由断层部地质体的剪切弹性模量和应变软化阶段的降模量共同决定^[12-17];

$$C = G\lambda / (G + \lambda) \tag{6}$$

将式(5)中 γ^p 替代为式(4)中的 $\bar{\gamma}^p$ 得应变局部化带内剪应力为

$$\tau = \tau_c - C\left(\gamma^p + l^2 \frac{d^2\gamma^p}{dy^2}\right) \tag{7}$$

当断层带内剪应力未超过断层带内部地质体的

峰值强度时局部化尚未启动, 应力应变关系为

$$\tau = G\gamma \tag{8}$$

式(7), (8)表明: 断层带内部剪应力在局部化启动前与剪应变成正比关系; 在采动影响下, 断层带内剪应力首先有个增大的过程, 而当断层带局部化启动后, 剪应力呈减小态势。这与文献[9]的结果非常吻合! 由此可见, 当断层内部切应力达到峰值强度后应用梯度塑性理论研究断层带内部局部化的正确性。

式(7)为非齐次常系数微分方程, 考虑 γ^p 是坐标 y 的偶函数及边界条件 ($y = \pm\omega/2$ 时 $\gamma^p = 0$) 可解得^[12-16]:

$$\gamma^p = \frac{\tau_c - \tau}{C} \left(1 + \cos \frac{y}{l}\right) \tag{9}$$

局部化带弹性剪切应变 γ^e 为

$$\gamma^e = \frac{\tau}{G} \tag{10}$$

则局部带剪切应变 γ 为

$$\gamma = \gamma^e + \gamma^p = \frac{\tau}{G} + \frac{\tau_c - \tau}{C} \left(1 + \cos \frac{y}{l}\right) \tag{11}$$

上式表明断层带内最大切应变不受断层带厚度影响, 其仅与剪切弹模、降模有关, 弹模、降模量越大, 断层在应变软化阶段表现出的脆性越大, 其所允许的塑性变形越小, 断层越容易失稳。

2.3 断层带单元体应力分析

分别以断层上盘岩层及断层(将其放大来看)为研究对象, 受力分析如图 3 所示。

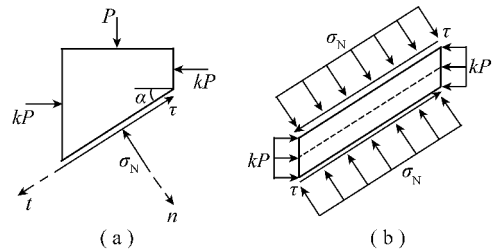


图 3 断层活化力学模型

Fig. 3 The mechanical model of fault activation

图 3 中, τ 为断层带上下面与岩体交界面上所受的剪切应力, MPa; σ_N 为断层带与上下两盘岩体相互的挤压应力, MPa。

对于断层上盘, 利用平衡条件 $\sum F_t = 0$ 及 $\sum F_n = 0$ 得:

$$\sigma_N = P\cos^2\alpha + kP\sin^2\alpha \tag{12}$$

$$\tau = (1 + k)P\sin^2\alpha \tag{13}$$

断层相对于上、下盘的运动是个相对概念, 分析断层相对于上盘或下盘均可。本文分析上盘相对断层的运动。断层上盘岩体下边界面上的边缘单元体

及内部单元体应力分析如图 4 所示。

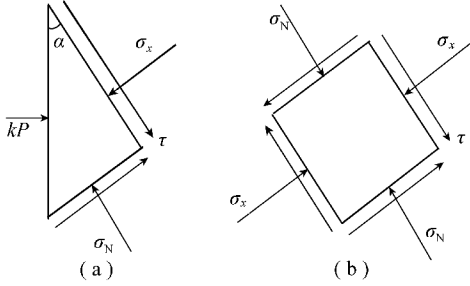


图 4 上盘岩体与断层交界位置的单元体应力分析

Fig. 4 Stress analysis of external and internal element body

图 4 中 σ_x 为断层上盘岩体下边界面上沿断层倾向单元体所受正应力。由平衡条件 $\sum F_x = 0$ 可得

$$\sigma_x = kP \cos^2 \alpha + P \sin^2 \alpha \quad (14)$$

2.4 断层活化判据

断层带自身沿倾向的相对错动位移 S_1 (m) 可表示为

$$S_1 = \int_{-\omega/2}^{\omega/2} \gamma dy = \left(\frac{\tau_c}{G} + \frac{\tau_c - \tau}{\lambda} \right) \omega \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\frac{d\tau}{dS_1} = -\frac{\lambda}{\omega} \quad (16)$$

令

$$A_1 = \left| \frac{d\tau}{dS_1} \right| = \frac{\lambda}{\omega} \quad (17)$$

A_1 的物理意义相当于断层带“抗剪刚度”(MN/m³), 本文称其为“断层带等效剪切刚度”。

由广义胡克定律知, 断层带上、下两盘岩体与断层交界面上的单元体在岩层走向方向(与纸面相垂直, 视为 z 向)所受应力值 σ_z (MPa) 为

$$\sigma_z = \nu P(1 + k) \quad (18)$$

其中, ν 为两盘岩体横向变形系数。则断层上盘下边缘岩体沿断层倾向方向的线应变为

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_z + \sigma_N)] \quad (19)$$

断层带上、下两盘岩体沿断层倾向的相对错动位移 S_2 为

$$S_2 = \frac{B\varepsilon_x}{\cos \alpha} \quad (20)$$

令 A_2 为上盘“岩体等效剪切刚度”(MN/m³), 则上盘岩体边缘沿断层倾向所受切应力与上盘岩体沿断层倾向的位移应满足:

$$\tau = A_2 S_2 \quad (21)$$

将式(12)~(14), (18)~(20)代入式(21)得“岩体等效剪切刚度”为

$$A_2 = \frac{E(1+k)\sin^2 \alpha \cos \alpha}{B[(k-\nu)\cos^2 \alpha + (1-k\nu)\sin^2 \alpha - \nu^2(1+k)]} \quad (22)$$

将断层活化过程视为上、下盘岩体相对断层产生剪切运动, 故断层带活化表现为“断层带等效剪切刚度”大于“岩体等效剪切刚度”, 即:

$$A_2 < A_1 \quad (23)$$

岩体视为各向同性的, 则:

$$E = 2G(1+\nu) \quad (24)$$

式中, E 为上、下盘岩体弹性模量。

将式(17), (22), (24)代入式(23)得断层活化判据为

$$\frac{\lambda}{\omega} > \frac{2G(1+\nu)(1+k)\sin^2 \alpha \cos \alpha}{B[(k-\nu)\cos^2 \alpha + (1-k\nu)\sin^2 \alpha - \nu^2(1+k)]} \quad (25)$$

令:

$$G_0 = \frac{2G(1+\nu)(1+k)\sin^2 \alpha \cos \alpha}{[(k-\nu)\cos^2 \alpha + (1-k\nu)\sin^2 \alpha - \nu^2(1+k)]} \quad (26)$$

称 G_0 为“剪切带-带外弹性岩石系统”的“剪切刚度当量”(MPa), 其与岩石剪切弹性模量、泊松比、断层倾角及矿山压力的分布等因素有关。则断层活化判据可改写为

$$\lambda B > \omega G_0 \quad (27)$$

3 讨 论

式(27)的形式与文献[12-16]所描述相应系统的失稳判据形式相同, 因而断层的活化可等同于剪切带-带外弹性岩石系统的失稳问题。

由式(27)可以看到, 该判据能较好地体现出与断层活化现象相关的诸多因素。断层内部地质体材料内部参数越小、上下盘岩石剪切当量越小、断层内部地质体材料越脆、包括断层倾向长度的岩层最小尺寸越大, 断层越易活化。两盘“岩体的剪切刚度当量”不仅与岩石特征参数(剪切弹性模量、泊松比)有关, 且还由断层倾角及矿山压力的状态等因素决定。因此, 本文通过以剪切带-带外弹性岩石为系统得到的断层活化判据较文献[1, 5, 6, 9]等采用莫尔-库仑准则建立的活化准则有显著优势。

4 结 论

(1) 本文将断层带视为具有一定厚度的地质体, 断层带和上、下盘岩体组成“剪切带-带外弹性岩石系统”, 该系统在“断层带等效剪切刚度”大于“岩体等效剪切刚度”时, 断层带便发生活化现象。断层带

的活化与剪切带-带外弹性岩石系统的失稳是等价的。

(2)基于梯度塑性理论分析断层的活化具有显著的优势,能较好地体现与断层活化现象相关诸多因素的关系。断层的活化不仅与断层带内部地质体材料的脆性、内部参数有关,还与断层倾角、两盘岩石的剪切弹性模量、泊松比及包括断层倾向长度的最小岩层尺寸相关。断层内部地质体材料的内部参数越小、“剪切带-带外弹性岩石系统”的“剪切刚度当量”越小、断层内部地质体材料越脆、包括断层倾向长度的岩层最小尺寸越大,断层越易活化。

参考文献:

- [1] 施龙青,韩进.底板突水机理及预测预报[M].徐州:中国矿业大学出版社,2004:40-43.
Shi Longqing, Han Jin. Floor water-inrush mechanism and prediction [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004:40-43.
- [2] 王恩营.煤层断层形成的岩性结构分析[J].煤炭学报,2005,30(3):319-321.
Wang Enying. Lithologic structure analysis in coal-seam fault formation[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3):319-321.
- [3] 于广明,谢和平,杨伦,等.采动断层活化分形界面效应的数值模拟研究[J].煤炭学报,1998,23(4):396-400.
Yu Guangming, Xie Heping, Yang Lun, et al. Numerical simulation of fractal effect induced by activation of fault after coal extraction [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4):396-400.
- [4] 吴基文,童宏树,童世杰,等.断层带岩体采动效应的相似材料模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S2):4170-4175.
Wu Jiwen, Tong Hongshu, Tong Shijie, et al. Study of similar material for simulation of mining effect of rock mass at fault zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2):4170-4175.
- [5] 李青锋,王卫军,朱川曲,等.基于隔水关键层原理的断层突水机理分析[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):87-90.
Li Qingfeng, Wang Weijun, Zhu Chuanqu, et al. Analysis of fault water-inrush mechanism based on the principle of water resistant key strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1):87-90.
- [6] 李青锋,王卫军,彭文庆,等.断层采动活化对南方煤矿岩溶突水影响分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3417-3424.
Li Qingfeng, Wang Weijun, Peng Wenqing, et al. Influence of activation fault after coal extraction on coal mine karst water inrush [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):3417-3424.
- [7] 李晓昭,罗国焯,陈忠胜.地下结构工程突水的断裂变形活化导水机制[J].岩土工程学报,2002,24(6):695-700.
Li Xiaozhao, Luo Guoyu, Chen Zhongsheng. The mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6):695-700.
- [8] 赵海军,马凤山,李国庆,等.断层上下盘开挖引起岩移的断层效应[J].岩土工程学报,2008,30(9):1372-1375.
Zhao Haijun, Ma Fengshan, Li Guoqing, et al. Fault effect due to underground excavation in hanging walls and footwalls of faults [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9):1372-1375.
- [9] 卜万奎,徐慧.某矿区带压开采逆断层活化及突水性分析[J].煤炭学报,2011,36(7):1177-1183.
Bu Wankui, Xu Hui. Analysis on reverse fault activation and water inrush possibility for coal mining above confined aquifer in a mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7):1177-1183.
- [10] Ellen K, Ekkehard R, De Borst R. An anisotropic gradient damage model for quasi-brittle materials [J]. Comput. Methods Appl. Engrg., 2000, 183:87-103.
- [11] Askes H, Pamin J. Dispersion analysis and element-free Galerkin solutions of second and fourth order gradient enhanced damage models [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 49:811-832.
- [12] 潘一山,徐秉业,王明洋.岩石塑性应变梯度与Ⅱ类岩石变形行为研究[J].岩土工程学报,1999,21(4):472-474.
Pan Yishan, Xu Bingye, Wang Mingyang. The study of plastic strain gradient and class II behavior of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4):472-474.
- [13] 王学滨,潘一山,海龙.基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):588-591.
Wang Xuebin, Pan Yishan, Hai Long. Instability criterion of fault rock burst based on gradient-dependent plasticity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4):588-591.
- [14] 王学滨,潘一山,任伟杰.基于应变梯度理论的岩石试件剪切破坏失稳判据[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):747-750.
Wang Xuebin, Pan Yishan, Ren Weijie. Instability of shear failure for rock specimen based on gradient-oriented plasticity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5):747-750.
- [15] 王学滨,张智慧,潘一山.基于梯度塑性理论的岩样拉压剪破坏统一失稳判据[J].岩土力学,2003,24(S):138-142.
Wang Xuebin, Zhang Zhihui, Pan Yishan. Unified formula for instability criterion under uniaxial tension direct shear and uniaxial compression subjected to shear failure based on gradient-dependent plasticity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S):138-142.
- [16] 王学滨.基于能量原理的岩样单轴压缩剪切失稳判据[J].工程力学,2007,24(1):153-161.
Wang Xuebin. Unstable criterion of rock specimen subjected to shear failure in uniaxial compression based on energy principle [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1):153-161.
- [17] 王学滨,潘一山,马瑾.剪切带内部应变(率)分析及基于能量准则的失稳判据[J].工程力学,2003,20(2):111-115.
Wang Xuebin, Pan Yishan, Ma Jin. Analysis of strain (or strain rate) in the shear band and a criterion on instability based on the energy criterion [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2):111-115.