

具有非线性强度包络线的双剪双参数统一强度 准则改进式及其特征分析

胡小荣

(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 通过应力莫尔圆分析证明现有的双剪双参数统一强度准则采用的强度包络线为线性包络线, 在此基础上对原有准则作了改进, 改进后的双剪双参数统一强度准则采用了抛物线和双曲线形强度包络线, 能够更好地表征岩石的强度特性, 特别是抗拉强度特性。对改进式所作的 π 平面极限线和子午线分析表明, 采用抛物线和双曲线形强度包络线基本上不会改变原准则在 π 平面上的极限线形状, 但子午线由直线改为曲线, 极限面在主应力空间内分别为抛物面和双曲面, 其锥顶距坐标原点也比采用线性强度包络线的要小。从锥形极限面的大小来看, 具有双曲线形和抛物线形强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式要小于直线形的, 且抛物线形的最小。

关键词: 岩石力学; 双剪双参数统一强度准则; 抛物线和双曲线形强度包络线; π 平面极限线; 子午线

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)22 - 4048 - 07

IMPROVED EXPRESSIONS OF TWO-PARAMETER DOUBLE SHEAR UNIFIED FAILURE CRITERION WITH NONLINEAR FAILURE ENVELOPES AND THEIR BEHAVIOR ANALYSIS

HU Xiao-rong

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Analysis of the Mohr circles proves that the original two-parameter double shear unified failure criterion has the linear type failure envelope, and the improved failure criteria with parabolic and hyperbolic type failure envelopes are given out in order to describe the rock failure properties, especially the rock tensile property better than the original one. Analyses of loci in the π plane and meridian lines show that the parabolic and hyperbolic type failure envelopes have no influences on the shape of the loci in the π plane, but the shape of the meridian lines are changed from straight lines to curved lines. The limit surfaces of the improved criteria are paraboloid or hyperboloid in the principal stress coordinates. Distances from the conic points to the original coordinate point are smaller than those using the linear type failure envelope. Cone sizes among the criteria using three different envelopes are the criteria with parabolic type failure envelope being the smallest, with hyperbolic type failure envelope being the second, and with linear type failure envelope being the largest.

Key words: rock mechanics; two-parameter double shear unified failure criterion; parabolic and hyperbolic type failure envelopes; loci in the π plane; meridian line

收稿日期: 2004 - 06 - 10; **修回日期:** 2004 - 12 - 20

基金项目: 福建省教育厅科技三项基金资助项目(K04009)

作者简介: 胡小荣(1964 -), 男, 博士, 1984年毕业于重庆大学采矿系采矿工程专业, 现为教授, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: jx_hxr@126.com。

1 引言

大量的岩石三轴试验已经证明, 岩石的强度和破坏不仅与最大和最小主应力有关, 还与中间主应力密切相关, 即存在所谓的中间主应力效应^[1~6]。与单剪类强度准则如 Mohr-Coulomb 强度准则、Hoek-Brown 强度准则等相比, 文[7~10]提出的双剪统一强度准则不仅较好地反映了岩石强度和破坏的中间主应力效应、拉压强度差效应及强度变化的区间性等三个基本特征, 而且形成了较为完整的双剪统一强度理论体系, 并在岩土工程中得到了一定的研究应用^[11~14]。其中, 具有线性表达式的双剪双参数统一强度准则应用最为广泛。本文通过将双剪双参数统一强度准则与 Mohr-Coulomb 强度准则在 σ - τ 平面上作比较后发现, 两者的差别只是 σ - τ 平面上破坏应力莫尔圆的作法有所不同, 而采用的强度包络线则是完全相同的, 均为直线形。因此, 现有的双剪双参数统一强度准则在形式上可认为是对具有直线形强度包络线的 Mohr-Coulomb 强度准则的改进。然而, 直线形强度包络线对岩石抗拉强度特性的解释并不符合实际, 不如双曲线形和抛物线形强度包络线。另外, 对于承受高压的硬岩和软岩, 通常都认为其强度包络线应该是抛物线形的, 否则计算会带来较大误差^[15]。虽然这两种强度包络线是非线性的, 但能更准确地反映岩石的强度特性。因此, 采用上述两种非线性强度包络线对现有的双剪双参数统一强度准则进行非线性化处理并建立相应的强度准则改进式是有意义的, 改进式将会同时具有两者的优点。本文对上述问题作了探讨, 并对改进式和原准则的 π 平面极限线及子午线特征作了分析比较。

2 对现有双剪双参数统一强度准则的分析

现有双剪双参数统一强度准则^[10, 11]表达式为

$$\alpha\sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} = \sigma_t \quad \left(\sigma_2 \leq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1+\alpha} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\alpha}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_t \quad \left(\sigma_2 \geq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1+\alpha} \right) \quad (2)$$

式中: α 为材料单轴拉压强度比, $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$, σ_t 为

材料的单轴抗拉强度, σ_c 为材料的单轴抗压强度; b 为参数, 一般取 $[0, 1]$ 。对于岩石材料而言, 式(1)、(2)用粘聚力 c_0 和内摩擦角 φ 可分别表示为

$$\sigma_1(1 - \sin\varphi) - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b}(1 + \sin\varphi) = 2c_0 \cos\varphi \quad \left(\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin\varphi \right) \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b}(1 - \sin\varphi) - \sigma_3(1 + \sin\varphi) = 2c_0 \cos\varphi \quad \left(\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin\varphi \right) \quad (4)$$

对于式(3), (4), 令

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_1 &= \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} \\ \sigma'_3 &= \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则有

$$\sigma_1(1 - \sin\varphi) - \sigma'_3(1 + \sin\varphi) = 2c_0 \cos\varphi \quad \left(\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin\varphi \right) \quad (6)$$

$$\sigma'_1(1 - \sin\varphi) - \sigma_3(1 + \sin\varphi) = 2c_0 \cos\varphi \quad \left(\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin\varphi \right) \quad (7)$$

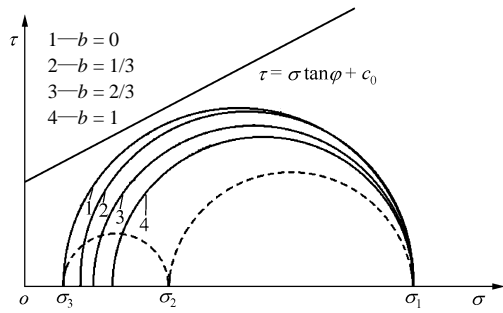
由于式(6), (7)都有类似于以下 Mohr-Coulomb 强度准则的表达式:

$$\sigma_1(1 - \sin\varphi) - \sigma_3(1 + \sin\varphi) = 2c_0 \cos\varphi \quad (8)$$

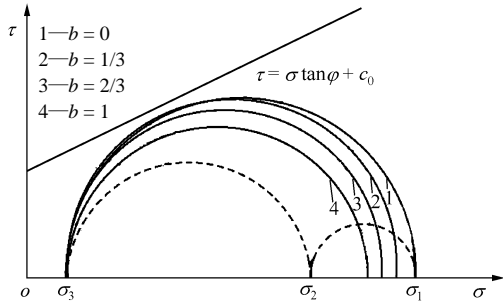
因此, 如果将式(8)中的 σ_1 , σ_3 分别换成式(6), (7)中的 σ'_1 , σ'_3 , 则可看出, 现有双剪双参数统一强度准则在形式上是具有直线形强度包络 Mohr-Coulomb 强度准则的改进, 其所采用的强度包络线完全相同且均为直线形, 不同的只是在 σ - τ 平面上作出的判断岩石是否发生破坏的应力莫尔圆有所不同, 如图 1 所示。

3 具有非线性强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式

根据强度包络线与破坏应力莫尔圆的关系, 可将文[15]中的抛物线和双曲线形强度包络线统一表达式改写为



(a) $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$



(b) $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$

图 1 现有双剪双参数统一强度准则所采用的强度包络线和破坏应力莫尔圆

Fig.1 Failure envelope and Mohr circles of the two-parameter double shear unified criterion used now

$$\left(\frac{\sigma_a - \sigma_b}{2}\right)^2 = a_1 \left(\frac{\sigma_a + \sigma_b}{2}\right)^2 + a_2 \left(\frac{\sigma_a + \sigma_b}{2}\right) + a_3 \quad (9)$$

式中： σ_a 、 σ_b 为破坏应力莫尔圆与 σ 轴的 2 个交点，且有 $\sigma_a > \sigma_b$ ； a_1 、 a_2 、 a_3 均为由不同强度包络线形式所确定的常数，其中，抛物线形强度包络线有

$$a_1 = 0$$

$$a_2 = \frac{\sigma_t}{2\alpha(1+2\alpha)}$$

$$a_3 = \frac{(16\alpha^2 + 8\alpha - 1)\sigma_t^2}{(8\alpha^2 + 4\alpha)^2}$$

双曲线形强度包络线有

$$a_1 = \frac{1-3\alpha}{1+\alpha}$$

$$a_2 = \frac{2(1-\alpha)\sigma_t}{1+\alpha}$$

$$a_3 = \frac{\sigma_t^2}{1+\alpha}$$

因此，强度包络线只与岩石自身的结构构造有关。

对于具有非线性强度包络线的 Mohr-Coulomb 强度准则改进式而言，有 $\sigma_1 = \sigma_a$ ， $\sigma_3 = \sigma_b$ 。若将式(9)中的 σ_a 、 σ_b 按式(6)、(7)中的替换方法分别令 $\sigma_a = \sigma_1$ ， $\sigma_b = \sigma_3'$ 和 $\sigma_a = \sigma_1'$ ， $\sigma_b = \sigma_3$ ，并利用双剪双参数统一强度准则中原有的限制条件，代入式(9)后则可以得到具有抛物线和双曲线形强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式为

$$\left[\frac{(1+b)\sigma_1 - b\sigma_2 - \sigma_3}{2(1+b)}\right]^2 = a_1 \left[\frac{(1+b)\sigma_1 + b\sigma_2 + \sigma_3}{2(1+b)}\right]^2 + 2a_2 \left[\frac{(1+b)\sigma_1 + b\sigma_2 + \sigma_3}{2(1+b)}\right] + a_3 \quad \left(\sigma_2 \leq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1+\alpha}\right) \quad (10)$$

$$\left[\frac{\sigma_1 + b\sigma_2 - (1+b)\sigma_3}{2(1+b)}\right]^2 = a_1 \left[\frac{\sigma_1 + b\sigma_2 + (1+b)\sigma_3}{2(1+b)}\right]^2 + 2a_2 \left[\frac{\sigma_1 + b\sigma_2 + (1+b)\sigma_3}{2(1+b)}\right] + a_3 \quad \left(\sigma_2 \geq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1+\alpha}\right) \quad (11)$$

4 两种双剪双参数统一强度准则改进式的特征分析

4.1 π 平面极限线分析

将主应力空间与 π 平面对应点间的坐标映射关系^[10]代入式(10)、(11)可得强度准则改进式在 π 平面上的极限线方程为

$$A_1x^2 + B_1xy + C_1y^2 + D_1x + E_1y + F_1 = 0 \quad \left(y \geq -\frac{2+\alpha}{\sqrt{3\alpha}}x\right) \quad (12)$$

$$A_2x^2 + B_2xy + C_2y^2 + D_2x + E_2y + F_2 = 0 \quad \left(y \leq -\frac{2+\alpha}{\sqrt{3\alpha}}x\right) \quad (13)$$

其中，

$$A_1 = 3(a_1 - 1)(1 - b)^2$$

$$B_1 = 2\sqrt{3}(1-b^2)(3+a_1)$$

$$C_1 = (a_1 - 9)(1+b)^2$$

$$D_1 = 6\sqrt{2}(1-b^2)a_2$$

$$E_1 = 2\sqrt{6}(1+b)^2 a_2$$

$$F_1 = 24(1+b)^2 a_3$$

$$A_2 = 3a_1 - 3(1+2b)^2$$

$$B_2 = 6\sqrt{3}(1+2b) + 2\sqrt{3}(1-2b)a_1$$

$$C_2 = a_1(1-2b)^2 - 9$$

$$D_2 = 6\sqrt{2}(1+b)a_2$$

$$E_2 = 2\sqrt{6}(1-b-2b^2)a_2$$

$$F_2 = 24(1+b)^2 a_3$$

图 2(a), (b) 为 $\alpha = 0.3$ 时分别采用抛物线和双曲线形强度包络线由式(12), (13)作出的 π 平面极限线。从图中可以看出, 两种强度准则改进式在 π 平面上的极限线形状与原准则的基本相同。

4.2 子午线分析

将主应力与应力不变量间的关系^[10]代入式(10), (11), 可得强度准则改进式的子午线方程为

$$A_3 I_1^2 + B_3 I_1 \sqrt{J_2} + C_3 J_2 + D_3 I_1 + E_3 \sqrt{J_2} + F_3 = 0 \quad (14)$$

$(0 \leq \varphi \leq \varphi_b)$

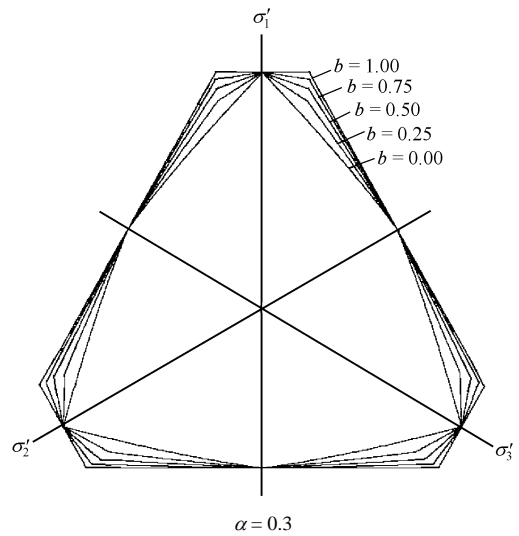
$$A_4 I_1^2 + B_4 I_1 \sqrt{J_2} + C_4 J_2 + D_4 I_1 + E_4 \sqrt{J_2} + F_4 = 0 \quad (15)$$

$\left(\varphi_b \leq \varphi \leq \frac{\pi}{3} \right)$

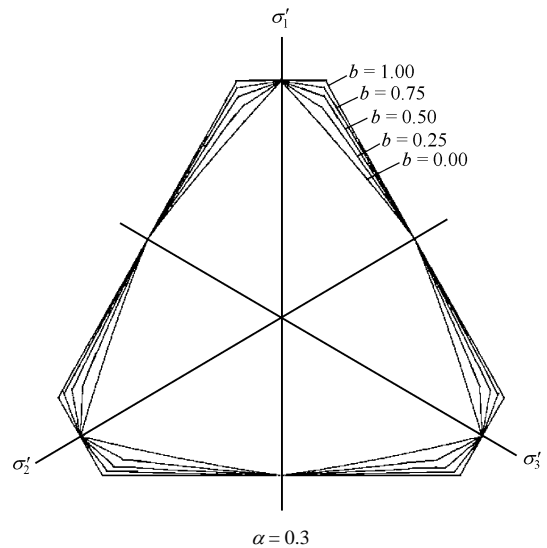
其中,

$$\varphi_b = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2+\alpha} \right)$$

$$A_3 = \frac{a_1}{9}$$



(a) 采用抛物线形强度包络线



(b) 采用双曲线形强度包络线

图 2 两种强度准则改进式在 π 平面上的极限线
Fig.2 Loci on the π plane of the improved failure criteria with parabolic and hyperbolic type envelopes

$$B_3 = \frac{2a_1}{3\sqrt{3}(1+b)} \left[\cos \left(\varphi + \frac{\pi}{3} \right) + b \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) \right]$$

$$C_3 = \frac{1}{6(1+b)^2} \left[(1+b^2)(a_1 - 3) - b(a_1 + 3) + \right.$$

$$(a_1 + 3) \cos \left(2\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) + 2b(a_1 - 3) \cos 2\varphi +$$

$$\left. b^2(a_1 + 3) \cos \left(2\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$D_3 = \frac{a_2}{3}$$

$$E_3 = \frac{a_2}{\sqrt{3}(1+b)} \left[\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) + b \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right) \right]$$

$$F_3 = a_3$$

$$A_4 = \frac{1}{9} a_1$$

$$B_4 = \frac{2a_1}{3\sqrt{3}(1+b)} \left[\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) - b \cos\varphi \right]$$

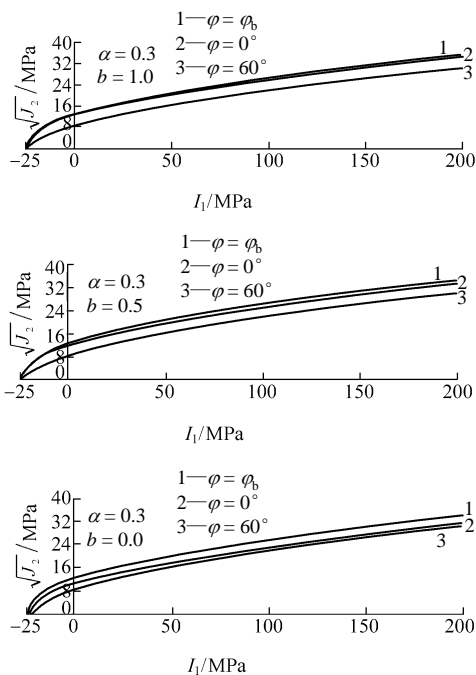
$$C_4 = \frac{1}{6(1+b)^2} \left[(1+b^2)(a_1 - 3) - b(a_1 + 3) + (a_1 + 3) \cos\left(2\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - 2b(a_1 - 3) \cos\left(2\varphi + \frac{\pi}{3}\right) + b^2(a_1 + 3) \cos 2\varphi \right]$$

$$D_4 = \frac{a_2}{3}$$

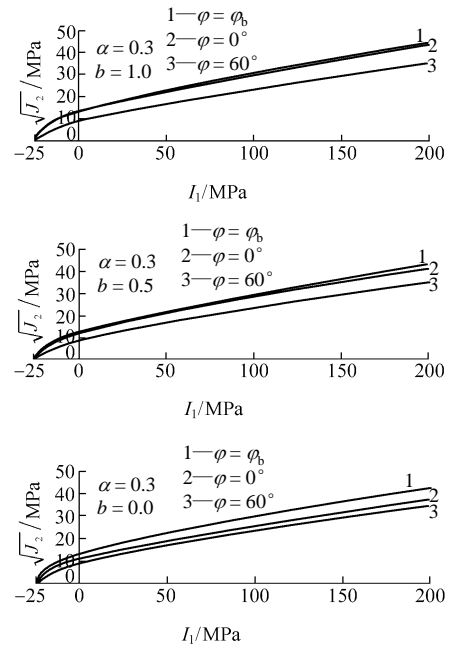
$$E_4 = \frac{a_2}{\sqrt{3}(1+b)} \left[\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) - b \cos\varphi \right]$$

$$F_4 = a_3$$

图 3(a), (b)为 $\sigma_t = 10 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.3$ 时分别采用抛物线形和双曲线形强度包络线由式(14), (15)作出的 $(I_1, \sqrt{J_2})$ 平面内的子午线图。从图 3 中可以看出, 两种强度准则改进式的子午线都是曲线, 其



(a) 采用抛物线形强度包络线

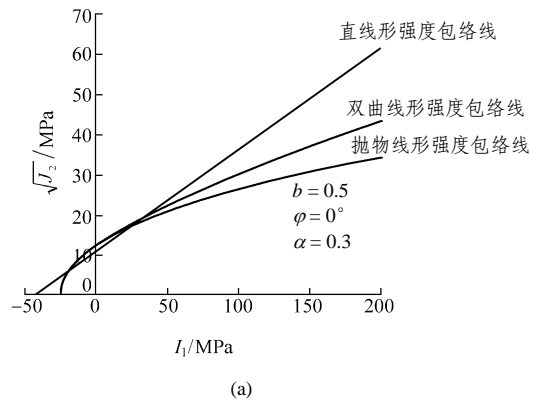


(b) 采用双曲线形强度包络线

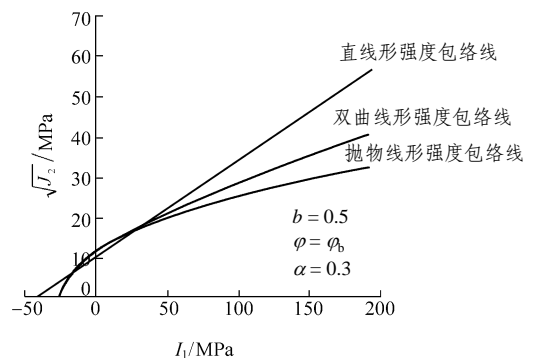
图 3 两种强度准则改进式在 $(I_1, \sqrt{J_2})$ 平面内的子午线
Fig.3 Meridian lines on the $(I_1, \sqrt{J_2})$ plane of the improved failure criteria with parabolic and hyperbolic type envelopes

在主应力空间内的极限面分别为抛物面和双曲面, 且具有相同的锥点。

图 4 为 $\sigma_t = 10 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.3$ 时由原准则和两



(a)



(b)

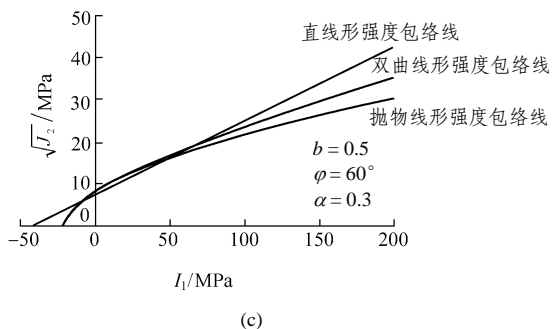
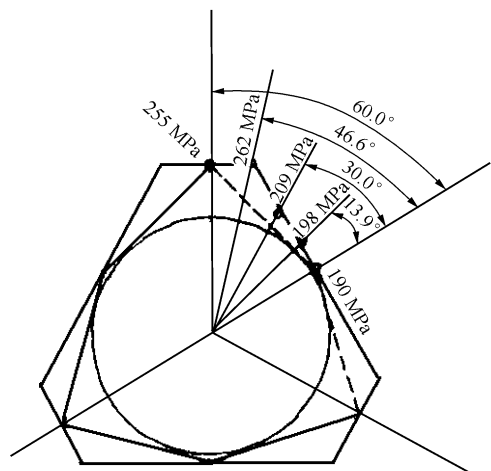


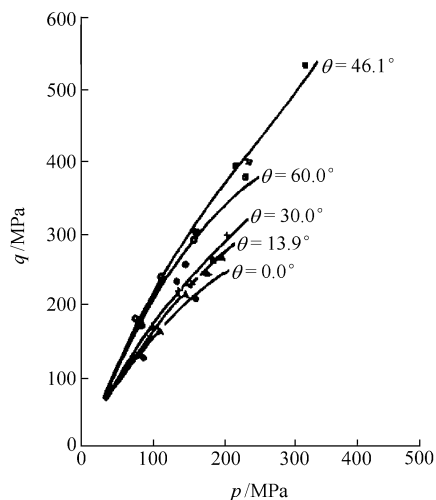
图 4 具有不同强度包络线的双剪双参数统一强度准则在 $(I_1, \sqrt{J_2})$ 平面内的子午线对比

Fig.4 Comparisons of the meridian lines on the $(I_1, \sqrt{J_2})$ plane among the two-parameter double shear failure criteria with three different envelopes

种改进式作出的 $(I_1, \sqrt{J_2})$ 平面子午线对比图。图 5 为引自文[10]中的一个较为完整的拉西瓦花岗岩强度试验结果图。



(a) 拉西瓦花岗岩在 $p = 100$ MPa 时的 π 平面极限线



(b) 拉西瓦花岗岩的 5 条子午线

图 5 拉西瓦花岗岩的一个较为完整的岩石强度试验

Fig.5 A perfect strength experiments on Laxiwa granite

从图 4 可以看出, 原准则极限面锥点与主应力空间坐标原点间的距离要大于两种改进式的, 这说明直线形强度包络线不能像抛物线和双曲线形强度包络线那样能很好地反映岩石的抗拉强度特性。另外, 从锥体的大小来看, 直线形的最大、双曲线形的次之、抛物线形的最小。

图 5 中参数 $p = I_1/3$, $q = \sqrt{3J_2}$, 从图中可以看出, 子午线并非直线而是曲线。

5 结 语

现有的双剪双参数统一强度准则采用的强度包络线是直线形的。与直线形强度包络线相比, 双曲线和抛物线形强度包络线能更好地表征岩石的强度特性, 特别是抗拉强度特性。本文通过对原准则作非线性化处理建立了具有上述两种非线性强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式, 并将改进式和原准则作了 π 平面极限线及子午线分析比较。结果表明, 具有双曲线和抛物线形强度包络线的强度准则改进式其在 π 平面上的极限线形状与原准则基本相同, 但改进式的子午线形状却是非线性的, 极限面形状为曲锥形且锥顶距主应力空间坐标原点的距离要小, 极限面能更好地反映岩石的强度特性, 特别是抗拉特性。另外, 从锥形极限面的大小来看, 具有双曲线和抛物线强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式要小于直线形的, 且抛物线形的最小。

参考文献(References):

- [1] Mogi K. Effect of intermediate principal stress on rock failure[J]. J. Geophys. Res., 1967, 72: 5 117 - 5 131.
- [2] Mogi K. Failure and flow of rocks under high triaxial compression[J]. J. Geophys. Res., 1971, 76: 1 255 - 1 269.
- [3] Michelis P. Polyaxial yielding of granular rock[J]. J. Eng. Mech., ASCE, 1985, 111(18): 1 049 - 1 066.
- [4] 张金涛, 林天健. 三轴试验中岩石的应力状态和破坏性质[J]. 力学学报, 1979, (2): 99 - 105.(Zhang Jintao, Lin Tianjian. Stress conditions and variations of rupture characteristics of a rock as shown by tri-axial test[J]. Acta Mechanica Sinica, 1979, (2): 99 - 105.(in Chinese))
- [5] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力的变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72 - 80.(Xu Dongjun, Geng Naiguang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1985, 6(1): 72 - 80.(in Chinese))

- [6] 李小春, 许东俊. 双剪应力强度理论的试验验证——拉西瓦花岗岩强度特性的真三轴试验研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1990.(Li Xiaochun, Xu Dongjun. Experimental verification of the twin shear theory—true triaxial test research of strength of Lawaxi granite[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1990.(in Chinese))
- [7] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪强度理论及其推广[J]. 中国科学(A辑), 1985, 28(12): 1 113 - 1 120.(Yu Maohong, He Linan, Song Lingyu. Twin shear theory and its generalization[J]. Science China(Series A), 1985, 28(12): 1 113 - 1 120.(in Chinese))
- [8] 俞茂宏, 刘凤羽. 一个新的普遍形式的强度理论[J]. 土木工程学报, 1990, 23(1): 34 - 40.(Yu Maohong, Liu Fengyu. A new general strength theory[J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(1): 34 - 40.(in Chinese))
- [9] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1 - 10.(Yu Maohong. Unified strength and its application for rock and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1 - 10.(in Chinese))
- [10] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.(Yu Maohong. Twin Shear Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1998.(in Chinese))
- [11] 胡小荣, 俞茂宏. 统一强度理论及其在巷道围岩弹塑性分析中的应用研究[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 1 021 - 1 026.(Hu Xiaorong, Yu Maohong. Unified strength theory and its application in elsto-plastic analysis of tunnel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 1 021 - 1 026.(in Chinese))
- [12] 徐栓强, 俞茂宏, 胡小荣. 基于双剪统一强度理论的地下圆形洞室稳定性的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 522 - 526.(Xu Shuanqiang, Yu Maohong, Hu Xiaorong. The stability analysis of circular tunnel based on twin shear unified strength theory[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 522 - 526.(in Chinese))
- [13] 高江平, 俞茂宏, 李四平. 太沙基地基极限承载力的双剪统一解[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 736 - 2 740.(Gao Jiangping, Yu Maohong, Li Siping. Double-shear unified solution of Terzaghi ultimate bearing capacity of foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 736 - 2 740(in Chinese))
- [14] 蒋明镜, 沈珠江. 考虑剪胀的线性软化柱形孔扩张问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 550 - 557.(Jiang Mingjing, Shen Zhujiang. On expansion of cylindrical cavity with linear softening and shear dilatation behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(6): 550 - 557.(in Chinese))
- [15] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1995.(Zhao Pengnian. Mechanics of Loose Medium[M]. Beijing: Earthquake Press, 1995.(in Chinese))

《岩石力学与工程学报》2005 年增 1 被 EI 收录论文(119 篇)题录(I)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	模糊可变集合与模型及在岩爆分级预测中的应用	陈守煜 郭 瑜	4 603 - 4 609
2	锚固类结构第二交结面剪应力演化规律、衰减特性与计算方法探讨	曾宪明 杜云鹤 范俊奇等	4 610 - 4 626
3	地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析	李海波 马行东 邵 蔚等	4 627 - 4 634
4	断裂构造对爆炸地震波传播规律的影响	王明洋 唐 廷 周泽平	4 635 - 4 641
5	三峡工程卸荷岩体声波测试及其参数研究	李建林 周济芳	4 642 - 4 646
6	应力波法锚杆加固无损检测的数值模拟分析研究	李新平 江 杰 鲁志鹏等	4 647 - 4 652
7	节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究	卢文波 金 李 陈 明等	4 653 - 4 657
8	云驾岭煤矿无烟煤的动态本构特性试验研究	单仁亮 程瑞强 徐慧玲等	4 658 - 4 662
9	采区准备巷道层状复合顶板的离层和机理	陆庭侃 刘玉洲 于海勇	4 663 - 4 669
10	冻结裂隙砂岩单轴压缩损伤特性 CT 试验	任建喜	4 670 - 4 673
11	核电站基岩爆破开挖损伤区研究	李俊如 夏 祥 李海波等	4 674 - 4 678
12	岩体的构造层次粘性及动力强度	戚承志 钱七虎 王明洋	4 679 - 4 687
13	Mathematica 代数系统与岩土工程理论演绎推导	罗仁安 宋喜艳 黄理兴等	4 688 - 4 693
14	短脉冲激光与岩石相互作用机理初探	徐松林 席道瑛 唐志平等	4 694 - 4 699
15	复杂地下洞室群爆破地震波传播的现场试验研究	李新平 张成良 陈先仿等	4 700 - 4 704
16	重叠隧道爆破振动对相邻结构的影响	高 峰 严松宏	4 705 - 4 710
17	多通道微震监测技术在大爆破余震监测中的应用	李庶林 尹贤刚 李爱兵	4 711 - 4 714
18	石灰土填料在动载作用下弹性模量的试验研究	李继祥 贺建清 张家生	4 715 - 4 719
19	地层各向异性对套管受力的影响	李 军 陈 勉 柳贡慧	4 720 - 4 723
20	基于压水试验数据的渗透系数应力敏感性研究	刘建军 何 翔 冯夏庭	4 724 - 4 727