

文章编号:1673-2049(2015)03-0046-06

# 基于统一强度理论的巴西圆盘劈裂强度分析

翟越<sup>1,2</sup>, 赵均海<sup>1</sup>, 艾晓芹<sup>1</sup>, 邓子辰<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**基于统一强度理论,构建了考虑 2 个较大主应力相互影响并适用于不同拉压比材料的巴西圆盘试验应力分析的统一劈裂破坏强度准则,通过参数变化得到常用的多种强度准则推导结果;为了验证理论公式,对 C35 商品混凝土试件进行了巴西圆盘劈裂试验,在试验研究基础上对统一强度准则演化出的多种强度准则计算结果进行对比分析。结果表明:材料的拉压比和中间切应力及相应作用面上正应力组合的加权参数对材料劈裂抗拉强度影响很大,最大拉应变强度理论和最大拉应力强度理论计算得到的劈裂强度分别为上、下限值,其他强度理论得到的值在两者之间,从而验证了统一强度理论对巴西圆盘劈裂试验分析的可靠性和适用性。

**关键词:**巴西圆盘试验;劈裂强度;统一强度理论;混凝土;强度准则;拉压比

**中图分类号:**TU313.1 **文献标志码:**A

## Analysis on Splitting Strength of Brazilian Disc Based on Unified Strength Theory

ZHAI Yue<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun-hai<sup>1</sup>, AI Xiao-qin<sup>1</sup>, DENG Zi-chen<sup>2</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the unified strength theory, unified splitting failure strength criterion which considering the interplay of two relatively large principal stress was built. The proposed failure criterion was suitable for all materials under different tension-compression ratios in Brazilian disc test. The derivation results of several strength criteria were got by changing parameters. In order to verify the theoretical formula, the Brazilian disc splitting test of specimen made of C35 concrete was carried out. Based on the test data, the calculation results of several strength criteria which developed from the unified strength criterion were compared. The results show that the tension-compression ratio of material and the weighted parameter which are combined intermediate shear stress and normal stress have great influence on the splitting tensile strength of material. Meanwhile, the splitting strength calculated by the maximum tensile strain strength theory and the maximum stress strength theory are the upper and lower limits of all strength theory. The results verify that the unified strength theory is reliable and suitable for Brazilian disc test.

**Key words:** Brazilian disc test; splitting strength; unified strength theory; concrete; strength criterion; tension-compression ratio

收稿日期:2014-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41272286,41172257);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2009JQ5003)

作者简介:翟越(1975-),男,陕西西安人,长安大学副教授,工学博士,博士后,E-mail:zy@chd.edu.cn。

## 0 引 言

抗拉强度是岩石力学研究和工程应用的重要参数之一。目前,测定岩石类材料抗拉强度的方法有直接拉伸试验、巴西劈裂法、对轴压模拉伸试验、正方形板对轴压裂试验等。巴西劈裂法对试样要求较低,容易操作,不仅适用于静荷载试验<sup>[1-2]</sup>,也适用于动荷载试验<sup>[3-7]</sup>。该方法在 1978 年被国际岩石力学学会(ISRM)推荐为测定岩石抗拉强度的方法<sup>[8]</sup>。

巴西圆盘试验有效性的标志是开裂从试件的中心处引发,并沿着加载方向扩展到上、下两端的加载处。由于巴西圆盘试验中试件各点处于复杂应力状态,试件将从等效应力最大的点首先破坏,而等效应力的大小不仅与该点的应力状态和大小有关,还与破坏准则的选择有关。一般情况下对于混凝土材料,研究者普遍采用最大拉应力准则、最大拉应变准则、Mohr 强度准则等。然而基于这些准则得到的复杂应力作用下不同拉压比的混凝土材料劈裂抗拉强度与直接拉伸试验得到的抗拉强度有较大差异,这已被大量试验所验证<sup>[9-12]</sup>。对于巴西圆盘试验应用最广泛的是 Griffith 强度准则,其在二维圆盘分析中得到很好验证,如尤明庆等<sup>[13]</sup>利用 ANSYS 软件和 Griffith 强度准则对平台圆盘中心的受力状态和岩石抗拉强度进行了分析。然而 Griffith 强度准则主要适合于压拉比为 8 的材料,一般混凝土材料的单轴抗压强度是抗拉强度的 10 倍以上,因此运用这个准则必然存在一定误差。本文中笔者将基于 Yu<sup>[14]</sup>提出的适用于复杂应力状态下不同拉压比材料的统一强度理论,对巴西圆盘试件中心起裂点进行复杂应力下的强度分析,并通过混凝土材料的巴西圆盘试验进行适用性验证。

## 1 基于统一强度理论的破坏准则及劈裂强度分析

### 1.1 巴西圆盘试验应力分布

由于一般的巴西圆盘试件直径为其厚度 1 倍以上,因此可以将其视为平面应变问题。如果混凝土材料在试验过程中处于弹性变形范围内,则可以根据弹性理论得到巴西圆盘上应力分布的解析解。1959 年 Hondros 提出了精确描述巴西圆盘上应力分布的解析解。巴西圆盘劈裂试验试件受力分布如图 1 所示,其中, $r_1, r_2$  分别为巴西圆盘上任一点 A 到上、下端点 B, C 的距离, $\theta_1, \theta_2$  分别为线段 AB, AC 与竖向对称轴的夹角。直径为  $D$ 、厚度为  $h$  的

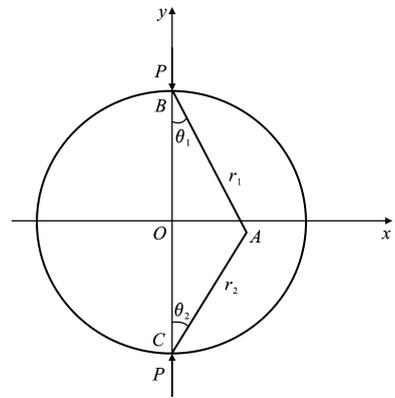


图 1 巴西圆盘劈裂试验试件受力分布  
Fig. 1 Stress Distribution of Specimen in Brazilian Disk Splitting Test

圆盘上、下端点 B, C 受到一对作用线过圆心的压力  $P$  作用,点 A 的正应力  $\sigma_x, \sigma_y$  和剪应力  $\tau_{xy}$  的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi h} \left[ \frac{\sin^2(\theta_1) \cos(\theta_1)}{r_1} + \frac{\sin^2(\theta_2) \cos(\theta_2)}{r_2} \right] - \frac{2P}{\pi Dh} \\ \sigma_y &= \frac{2P}{\pi h} \left[ \frac{\cos^3(\theta_1)}{r_1} + \frac{\cos^3(\theta_2)}{r_2} \right] - \frac{2P}{\pi Dh} \\ \tau_{xy} &= \frac{2P}{\pi h} \left[ \frac{\cos^2(\theta_1) \sin(\theta_1)}{r_1} + \frac{\cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2)}{r_2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据圣维南原理,应力集中的影响在远离作用点的位置可以忽略不计,因此,只要圆盘试件从中心处开始破坏,可以不考虑应力集中对拉伸强度的影响。当  $\theta_1 = \theta_2 = 0, r_1 = r_2 = D/2$  时,将其代入式(1),设定拉为正,压为负,得到圆盘中心处  $x, y$  方向的正应力  $\sigma_x, \sigma_y$  和剪应力  $\tau_{xy}$  如下式所示

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi Dh} \\ \sigma_y &= -\frac{6P}{\pi Dh} \\ \tau_{xy} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,圆盘中心处的压应力是拉应力的 3 倍。对于混凝土材料,抗压强度一般是抗拉强度的 10 倍以上,因此可以认为圆盘中心处是受拉破坏而不是受压破坏。国际岩石力学学会建议巴西拉伸试验的试样厚度约等于圆盘半径,即厚度与直径的比值  $h/D = 0.5$ 。

### 1.2 基于统一强度理论的劈裂强度准则

由上述分析可知,巴西圆盘中心起裂点的单元体受力为轴向受压、侧向受拉的两向应力状态,因此要确定混凝土材料巴西圆盘劈裂强度需应用能适应

复杂应力状态下不同拉压比的脆性材料强度理论。本文采用 Yu 等<sup>[15-18]</sup>提出的已广泛应用于混凝土材料强度研究的统一强度理论进行分析,该理论不仅可以充分考虑 2 个较大主应力及中间主应力的影响,而且引入了权重的概念来分析拉压比、剪切强度等因素对材料破坏所产生的不同作用,其主应力表达式如式(3)所示

$$\left. \begin{aligned} F &= \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' &= \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t & \sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{aligned} \right\} (3)$$

$$b = \frac{(1+\alpha)\tau_0 - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_0} \quad (4)$$

式中: $F, F'$  均为主应力强度理论函数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力; $\alpha$  为材料的拉压比,  $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ ,  $\sigma_t, \sigma_c$  分别为材料的单轴抗拉强度和单轴抗压强度; $b$  为反映中间切应力和相应作用面上正应力对材料破坏影响的加权参数,也是将统一强度理论变化为其他强度理论参数,其由材料的剪切强度  $\tau_0$  和单轴抗拉强度  $\sigma_t$  所决定,可以通过材料力学试验确定。

规定拉应力符号为正,且  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 由式(2)可知巴西圆盘中心点单元体的主应力  $\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \sigma_y$ , 将其代入式(3), 由于混凝土材料的  $\alpha$  取值在  $1/18 \sim 1/8$  之间, 且由式(2)可知  $3\sigma_1 = -\sigma_3$ , 因此可得

$$\frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \geq 0 = \sigma_2$$

采用式(3)作为计算公式, 将式(2)代入式(3), 合并同类项可得巴西圆盘中心拉伸强度  $\sigma_T$  的表达式为

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi Dh} \left(1 + \frac{3\alpha}{1+b}\right) \quad (5)$$

设参数  $k$  为

$$k = 1 + \frac{3\alpha}{1+b} \quad (6)$$

式中: $k$  为考虑拉压应力相互作用的劈裂抗拉强度修正系数, 其由试件材料的拉压比  $\alpha$  和加权参数  $b$  决定。

由式(5), (6)可得基于统一强度理论的破坏准则为

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi Dh} k \leq [\sigma_t] \quad (7)$$

式中: $[\sigma_t]$  为劈裂强度。

由此可见, 巴西圆盘试验的劈裂强度由试件尺寸和材料特性等因素决定。当  $\sigma_T$  超过抗拉强度允

许值时试件发生破坏。由于  $k$  值是大于 1 的, 说明当考虑径向压缩应力的影响时巴西圆盘试验所得到的劈裂强度极限值  $[\sigma_t]$  小于不考虑径向压缩应力时的极限值, 这与一向受拉、一向受压的两向受力分析结论一致。劈裂强度极限值  $[\sigma_t]$  的计算公式为

$$\frac{2P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t] = \frac{[\sigma_t]}{k} \quad (8)$$

由式(6)可得出修正系数  $k$  与  $\alpha, b$  的关系, 如图 2, 3 所示。由图 2, 3 可知: 拉压比对材料的劈裂强度修正系数有明显的影, 当  $b$  值一定时, 随着  $\alpha$  增加,  $k$  值随之增大, 且  $b$  值越小增加速率越大; 当  $\alpha$  一定时,  $b$  越大,  $k$  越小。

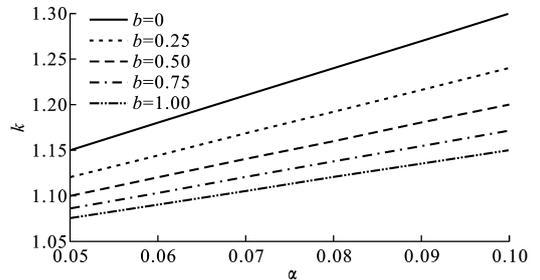


图 2  $k$  与  $\alpha$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship Curves Between  $k$  and  $\alpha$

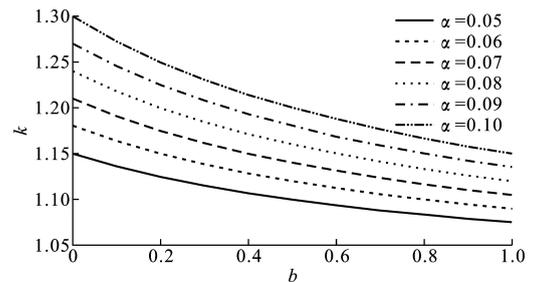


图 3  $k$  与  $b$  的关系曲线

Fig. 3 Relationship Curves Between  $k$  and  $b$

### 1.3 不同强度准则分析比较

由统一强度理论所得到的巴西圆盘劈裂强度准则通过拉压比和加权参数的改变可以演化为多种常用的强度准则, 或是线性逼近, 而且还可以产生一系列新的强度准则。

当  $b=0$  时, 式(7)将转化为基于 Mohr-Coulomb 理论的强度准则, 即

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi Dh} (1 + 3\alpha) \leq [\sigma_t] \quad (9)$$

Mohr-Coulomb 强度准则是建立在试验基础上的破坏判据, 其物理破坏机理是剪切破坏, 但岩体破坏过程中产生大量的微破裂都是张拉破坏, 因此 Mohr-Coulomb 强度理论并不太适合混凝土材料, 更适用于土质材料。

当  $b=1$  时, 式(7)转化为基于双剪强度理论的

强度准则,即

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi Dh} (1 + \frac{3\alpha}{2}) \leq [\sigma_t] \quad (10)$$

Mohr-Coulomb 强度理论实际上是单剪强度理论,是各种外凸强度理论的下限,而双剪强度理论是各种可能的外凸强度理论的上限,较单剪强度理论更能充分发挥材料的强度潜力。

当  $\alpha=1$  时,由式(7)可得

$$\sigma_T = \begin{cases} \frac{6P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t] & b=0.5 \\ \frac{5P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t] & b=1.0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)为 Tresca 屈服准则和 Mises 屈服准则的线性逼近,但  $\alpha=1$  对于混凝土材料显然不能适用。

当  $\alpha=0$  时,式(7)退化为最大拉应力强度准则,当拉压比等于泊松比  $\nu$ ,且  $b=1$  时,则为最大拉应变强度准则,即

$$\sigma_T = \begin{cases} \frac{2P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t] & \alpha=0 \\ \frac{(3\nu+2)P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t] & \alpha=\nu, b=1 \end{cases} \quad (12)$$

对于岩石类材料常用 Griffith 强度准则,以最大主应力  $\sigma_1$  和最小主应力  $\sigma_3$  的组合值表示为  $\sigma_G$ ,如下式所示

$$\sigma_G = \begin{cases} \sigma_1 \leq [\sigma_t] & 3\sigma_1 + \sigma_3 \leq 0 \\ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} \leq [\sigma_t] & 3\sigma_1 + \sigma_3 > 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(2)可知  $3\sigma_1 + \sigma_3 = 0$ ,则式(13)得出相同的结果,即

$$\sigma_G = \frac{2P}{\pi Dh} \leq [\sigma_t]$$

由此可见,Griffith 准则所得结论与最大拉应力强度准则一致。Griffith 强度理论的判据适合于拉压比为  $1/8$  的岩石类材料,但这一条件并不容易刚好满足,特别是对于强度较高的混凝土材料,因此计算结果与实际情况差别较大。

## 2 混凝土巴西圆盘试验验证

### 2.1 巴西圆盘试件制备及试验

对 C35 商品混凝土试件进行巴西圆盘试验,利用基于统一强度理论所得的混凝土劈裂拉伸强度公式进行对比分析,从而验证其适用性。试件所用的水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥,细骨料为中砂,粗骨料为粒径  $5 \sim 20$  mm 的石灰岩卵石,填充物为粉煤灰和矿粉等,混凝土添加剂为工业萘、聚羧酸等,

具体配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix Proportions of Concrete  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

材料	水泥	水	粉煤灰	矿粉	砂	石	添加剂
用量	250	155	90	60	670	1 165	10.2

将搅拌好的混凝土装入内径 100 mm、高度 50 mm 的不锈钢模具中,振捣均匀,在标准养护室养护 28 d。试验时为了减少加载处的应力集中效应,保证试件中心起裂的基本要求,在试件上、下端分别垫 4 mm 宽、2 mm 厚的钢制垫条<sup>[19-21]</sup>。试件加载时的固定方式如图 4 所示。



图 4 巴西圆盘试验试件固定方式

Fig. 4 Fixed Mode of Specimen in Brazilian Disc Test

试验中随着竖向荷载的增加,试件中心处首先出现劈裂拉伸裂纹,同时在试件与垫条接触端出现局部楔入破坏。裂缝沿加载方向的中轴线迅速扩展贯通,承载力丧失,开裂声音响亮,其断裂面如图 5 所示。试验过程符合巴西圆盘试验的有效性要求。



图 5 混凝土试件劈裂破坏面

Fig. 5 Splitting Failure Plane of Concrete Specimen

巴西圆盘试验所得混凝土试件的径向压缩荷载与压缩位移曲线如图 6 所示。由图 6 可知,劈裂试验所测试件破坏时的极限压缩荷载为 27.44 kN,所对应的峰值位移约为 0.6 mm。

### 2.2 不同强度理论计算结果分析

取规范中给定的 C35 商品混凝土拉压比为

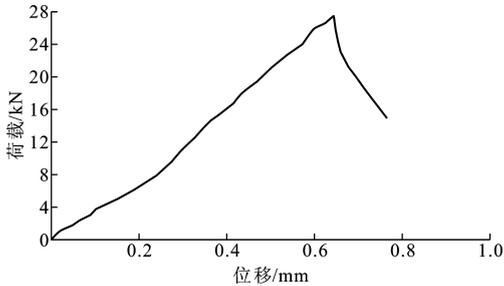


图6 混凝土试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curve of Concrete Specimen

0.094。由巴西圆盘试验统一强度表达式(7),可得到符合不同强度理论的混凝土劈裂强度,如表2所示。

表2 混凝土劈裂强度

Tab. 2 Splitting Strength of Concrete

强度理论	$\alpha$	$b$	$k$	最大等效应力/MPa
Mohr-Coulomb 理论的强度准则	0.094	0.0	1.28	4.07
双剪强度理论的强度准则	0.094	1.0	1.14	3.62
加权双剪强度理论的强度准则	0.094	0.5	1.19	3.78
最大拉应力强度准则和 Griffith 准则			1.00	3.18
最大拉应变强度准则	0.200	1.0	1.30	4.13

由表2可知,最大拉应变强度准则计算出来的劈裂强度最大,而最大拉应力强度准则计算的劈裂强度最小,可以看作劈裂强度的上、下限值,其他强度理论得到的值在两者之间。由此可见,通过基于统一强度理论建立的劈裂强度准则,可以建立起各单一强度准则的定量关系。

### 3 结语

(1)基于统一强度理论推导出巴西圆盘劈裂强度的统一解,通过参数变化分析了其对强度计算的影响规律。当 $b$ 值一定时,随着 $\alpha$ 增加, $k$ 值随之增大,所得强度值增大,而且 $b$ 值越小增加速率越大;当 $\alpha$ 一定时, $b$ 越大, $k$ 越小,所得强度值减小。

(2)对C35商品混凝土进行了巴西圆盘试验,利用所得统一劈裂强度计算公式的各种演化方程得到不同强度准则的劈裂强度。采用最大拉应变强度准则和最大拉应力强度准则计算得到的劈裂强度分别为上、下限值,其他强度理论得到的强度在两者之间,从而建立起各单一强度准则的定量关系。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 刘运思,傅鹤林,饶军应,等.不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):785-791.

LIU Yun-si, FU He-lin, RAO Jun-ying, et al. Research on Brazilian Disc Splitting Tests for Anisotropy of Slate Under Influence of Different Bedding Orientations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 785-791.

[2] 樊鸿,张盛,苟小平,等.岩石断裂韧度试样 CCNBD 临界应力强度因子的全新数值标定[J].应用力学学报,2011,28(4):416-422.

FAN Hong, ZHANG Sheng, GOU Xiao-ping, et al. A New Numerical Calibration of the Critical Stress Intensity Factor for the CCNBD Specimens Used in Rock Fracture Toughness Test[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(4): 416-422.

[3] 官凤强,李夕兵,董陇军.圆盘冲击劈裂试验中岩石拉伸弹性模量的求解算法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):705-713.

GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Algorithm to Estimate Tensile Modulus of Rock in Disk Impact Splitting Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 705-713.

[4] 赵毅鑫,肖汉,黄亚琼.霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘劈裂试验研究[J].煤炭学报,2014,39(2):286-291.

ZHAO Yi-xin, XIAO Han, HUANG Ya-qiong. Dynamic Split Tensile Test of Brazilian Disc of Coal with Split Hopkinson Pressure Bar Loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 286-291.

[5] WONG L N Y, ZOU C, CHENG Y. Fracturing and Failure Behavior of Carrara Marble in Quasistatic and Dynamic Brazilian Disc Tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1117-1133.

[6] TAVALLALI A, VERVOORT A. Behaviour of Layered Sandstone Under Brazilian Test Conditions: Layer Orientation and Shape Effects[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 366-377.

[7] YANG S Q, HUANG Y H. Particle Flow Study on Strength and Meso-mechanism of Brazilian Splitting Test for Jointed Rock Mass[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(4): 547-558.

[8] ISRM Testing Commission. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3): 99-103.

[9] 叶明亮,续建科,牟宏,等.岩石抗拉强度试验方法的探讨[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2001,30(6):19-25.

- YE Ming-liang, XU Jian-ke, MOU Hong, et al. Approach to Test Method of Rock Strength in Uniaxial Tension[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2001, 30(6): 19-25.
- [10] 喻勇, 徐跃良. 采用平台巴西圆盘试样测试岩石抗拉强度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1457-1462.
- YU Yong, XU Yue-liang. Method to Determine Tensile Strength of Rock Using Flattened Brazilian Disk[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1457-1462.
- [11] 李春光, 郑宏, 王水林, 等. 复杂应力条件下脆性材料的受拉破坏准则[J]. 力学与实践, 2006, 28(2): 57-61.
- LI Chun-guang, ZHENG Hong, WANG Shui-lin, et al. Discussion on Tensile Failure Criterion of Brittle Material Under Complex Stress State[J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(2): 57-61.
- [12] 汤安民, 韩星明. 脆性材料破坏与莫尔理论存在的问题[J]. 力学与实践, 2004, 26(2): 47-49.
- TANG An-min, HAN Xing-ming. Brittle Material Damage and Mohr's Theory[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(2): 47-49.
- [13] 尤明庆, 苏承东. 平台巴西圆盘劈裂和岩石抗拉强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3106-3112.
- YOU Ming-qing, SU Cheng-dong. Experimental Study on Split Test with Flattened Disk and Tensile Strength of Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3106-3112.
- [14] YU M H. Unified Strength Theory and Its Applications[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [15] YU M H, KOLUPAEV V A, LI Y M, et al. Advances in Unified Strength Theory and Its Generalization[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2508-2513.
- [16] 赵均海, 梁文彪, 张常光, 等. 非饱和土库仑主动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 609-614.
- ZHAO Jun-hai, LIANG Wen-biao, ZHANG Chang-guang, et al. Unified Solution of Coulomb's Active Earth Pressure for Unsaturated Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 609-614.
- [17] 吴鹏, 赵均海, 张常光, 等. 钢管混凝土轴压短柱界限套箍系数[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 83-89.
- WU Peng, ZHAO Jun-hai, ZHANG Chang-guang, et al. Boundary Casing Hoop Coefficient for Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 83-89.
- [18] 陈宗平, 张士前, 王妮, 等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 107-114.
- CHEN Zong-ping, ZHANG Shi-qian, WANG Ni, et al. Experimental Study and Theoretical Analysis on Axial Compress Capacity of Recycled Aggregate Concrete-filled Circle Steel Tube Short Column[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 107-114.
- [19] 杨同, 王宝学, 孙林, 等. 垫条方式对岩石劈裂试验的影响分析[J]. 勘察科学技术, 2002(1): 3-7.
- YANG Tong, WANG Bao-xue, SUN Lin, et al. Effects of Various Spacer Methods for Rock Split Tests[J]. Site Investigation Science and Technology, 2002(1): 3-7.
- [20] 孟京京, 曹平, 张科, 等. 基于颗粒流的平台圆盘巴西劈裂和岩石抗拉强度[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2449-2454.
- MENG Jing-jing, CAO Ping, ZHANG Ke, et al. Brazil Split Test of Flattened Disk and Rock Tensile Strength Using Particle Flow Code[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2449-2454.
- [21] 熊威, 林杭, 钟文文, 等. 考虑垫条比与泊松比影响的立方体劈裂强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1806-1811.
- XIONG Wei, LIN Hang, ZHONG Wen-wen, et al. Analysis of Cubic Splitting Strength Considering Effects of Cushion-side Ratio and Poisson's Ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1806-1811.