

DOI: 10.11779/CJGE201902004

砂岩拉-剪力学特性试验研究

黄 达^{1, 2}, 张永发^{*1}, 朱谭谭¹, 陈洪凯³

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401;

3. 重庆交通大学岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要: 岩体工程开挖和河谷下切均将致使岩体应力沿一个或多个方向卸荷, 造成岩体应力场重分布。这种卸荷常造成岩体承受拉剪应力, 使得卸荷岩体的破坏呈现明显张性特征。然而由于试验技术的限制, 在法向拉应力作用下岩石剪切力学行为的试验研究仍非常困难。笔者研发了拉伸-双面剪切试验装置, 可直接在常规微机控制伺服直剪试验机上进行试验(将法向压应力转换成拉应力)。采用此装置, 开展了砂岩的拉剪试验, 结果表明: 拉-剪应力作用下岩石剪应力-剪位移曲线峰前仅出现初始非线性段和线性变形两个阶段(即没有峰前的屈服段); 砂岩抗剪强度和剪切刚度随法向拉应力的增大逐渐减小; Hoek-Brown准则比 Mohr-Coulomb 准则能更好的描述砂岩在拉剪应力下的强度特征; 随着法向拉应力的增大, 岩样破裂面张性特征越突出且形状更为平直。

关键词: 拉剪应力; 双面剪切; 抗剪强度; 刚度; 破裂

中图分类号: TU458.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)02-0272-05

作者简介: 黄 达(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩体力学及地质灾害方面的研究与教学工作。

E-mail: hdcqy@126.com。

Experimental study on tension-shear mechanical behavior of sandstone

HUANG Da^{1, 2}, ZHANG Yong-fa¹, ZHU Tan-tan¹, CHEN Hong-kai³

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Rock excavation and river incision result in stress unloading in one or more directions, which leads to the redistribution of stress fields of rock masses in the influenced zone. The rock masses in the unloading zone commonly bear tension-shear stress, making the failure of unloading rocks exhibit obvious tensile property. However, due to the limitation of test technology, it is still quite difficult to study the shear mechanical behavior of rock under the action of normal tensile stress. In this study, a tension double-shear test auxiliary device that can be used by conventional direct shear testing machine is designed to convert the normal compressive force to the tensile one. The direct shear tests on sandstone under tensile normal stress are carried out using this device. The results show that under the tension-shear stress, the curves of shear stress versus shear displacement before peak stress only show two deformation stages of initial nonlinear deformation and linear deformation (namely without yield stage before peak). The shear strength and shear stiffness of sandstone gradually decrease with the increase of the normal tensile stress. Compared with the Mohr-Coulomb criterion, the Hoek-Brown criterion is better in describing the strength characteristics of sandstone under tensile shear stress. Besides, as the normal tensile stress increases, the rupture surface of rock specimen has more obvious tension and is straighter in shape.

Key words: tension-shear stress; double-face shear; shear strength; stiffness; fracture

0 引言

工程岩体开挖过程中, 开挖面附近一定范围岩体向临空方向卸荷回弹, 由于岩石非均质性和各向异性, 卸荷将诱发岩体差异回弹变形(离开挖面越近, 卸荷变形越大), 部分围岩将承受拉剪应力^[1-2], 甚至会发生拉剪混合破坏或呈现张性劈裂破坏而使围岩失稳^[3-4]。

有关岩石拉伸及剪切力学性质的研究多集中于岩

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472245, 41672300); 重庆市研究生科研创新项目(CYB17043); 中央高校基本科研业务费项目(106112017CDJXSYY002)

收稿日期: 2017-12-21

*通讯作者(E-mail: zyfcqu@126.com)

石在单轴拉伸应力和压剪力学行为研究^[5-6], 而对拉剪应力下岩石变形、强度及破裂行为的研究相对较少。目前, 室内拉剪试验主要通过预制裂隙、改变试样形状和自制拉剪试验系统来实现。李建林^[7]通过在试样内预制非对称切口, 单轴拉伸作用下裂隙间岩桥斜面为潜在的拉剪破裂面, 测试了岩石拉剪强度变化规律, 但这种方法难以保证拉剪面沿裂隙间岩桥贯通。Ramsey 等^[8]采用特制的狗骨形试样, 通过逐渐增大围压使试样中部发生拉剪混合断裂, 论证了岩石从张拉断裂至剪切断裂的过渡状态, 但此方面拉剪应力不能独立施加。周辉等^[9]利用自制拉伸-剪切试验系统开展了大理岩的室内拉剪试验, 建立了考虑拉剪破坏机制和应力状态影响的分段 Mohr-Coulomb 准则, 该系统实现了剪力与拉力的独立施加, 获得了比较完整的试验数据, 但试验加载受剪切力千斤顶和拉力千斤顶控制, 加载稳定性和测量精度不易控制, 受限于千斤顶的校正及其本身示值误差; Cen 等^[10]设计了一种可在微机控制伺服直剪试验机上实现岩石拉剪的新型试验装置, 该系统通过反力装置可将轴向压力荷载转换为拉力荷载, 并借此开展了不同法向拉力下砂岩剪切试验, 发现了岩样抗剪强度随法向拉应力增大而减小, 并呈现幂函数变化关系, 该装置可与试验机加载系统和测量系统结合, 提高了加载稳定性和测量精度, 但在剪力施加过程沿剪切面可能承受一定弯矩效应。

基于此, 本文设计了一种拉伸-双面剪切试验装置, 通过剪切块均匀施加剪力, 有效降低了单面剪切试验中剪切弯矩的影响, 并借此开展了砂岩在不同法向拉应力下的室内剪切试验, 分析砂岩在拉剪应力下的破坏强度和变形特性, 丰富了岩体力学基础理论。

1 试验准备与方法

1.1 试样准备

本文选用砂岩呈暗红色, 质地均匀, 无节理裂隙等缺陷, 平均密度为 2390 kg/m^3 。经过切割、打磨, 将采集到的岩石加工成 60(宽) $\text{mm} \times 60 \text{ mm}$ (厚) $\times 120 \text{ mm}$ (高) 的长方体试样。

1.2 试验装置

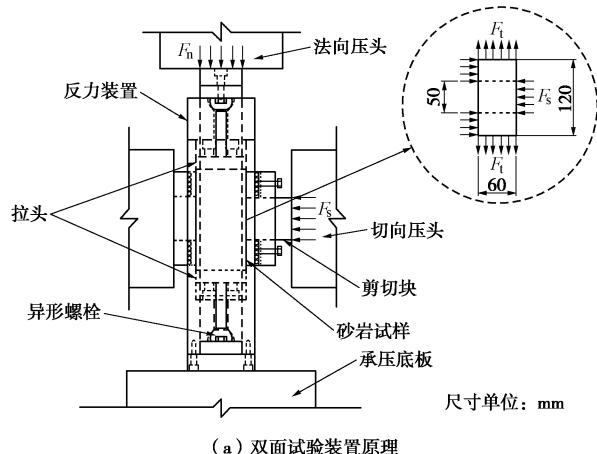
在岩石的剪切力学行为研究中, 双面剪切试验是一种常用的直剪方法, 并得到广泛应用^[11-12]。在双面剪切试验中, 试样有两个剪切面。剪切面上的法向应力和剪切应力表达式为

$$\sigma_n = F_t / S, \quad (1)$$

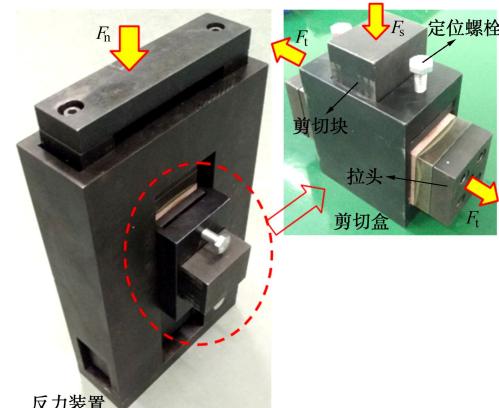
$$\tau = F_s / S, \quad (2)$$

式中, σ_n 为法向应力, τ 为剪切应力, F_t 为法向荷载, F_s 为剪切荷载, S 为试样横截面积。

如图 1(a) 所示, 本文设计了一种在法向拉应力作用下岩石拉伸-双面剪切试验装置。该装置主要由两个 U型槽构成的反力装置和剪切盒组成(如图 1(b))。反力装置和剪切盒能够分别将试验机的压力转化为试样的法向拉应力和切向剪应力。试验中, 岩样的上下端部由高强度结构胶与拉头黏结, 拉头由异形螺栓与反力装置相连。剪切盒经两个定位螺栓固定在试样中间位置, 并通过切向加载剪切块在试样内部形成两个剪切面。



(a) 双面试验装置原理



(b) 拉伸-双面剪切装置实物图

图 1 拉伸-双面剪切装置原理和实物图

Fig. 1 Schematic and photos of devices for double-face tension-shear tests

通过此装置, 可以将常规直剪试验机法向应力转换成拉应力, 从而在压剪试验机上实现岩石拉剪试验。并且试验采用双剪形式可有效地减小潜在破裂面受剪应力作用下的附加弯矩效应。

1.3 试验方案

拉剪试验在双向荷载容量均为 600 kN 的直剪试验机上进行, 试验过程主要分为两步: ①施加法向应力至设计值, 加载速度为 0.05 kN/s; ②施加剪应力直至试样破坏, 加载速度为 0.2 mm/min。试验主要考察恒定法向拉应力下岩石的剪切力学特征, 共设置 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 MPa (正号代表

拉应力) 7 组法向应力水平 (每组应力水平下试验 2 个试件)。

2 试验结果

2.1 剪应力 - 剪位移曲线

不同法向拉应力下试样的剪应力 - 剪位移曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出, 剪应力 - 剪位移曲线主要可以分为 3 个阶段(以法向应力为 0.5 MPa 时为例, 如图 3):

(1) 初始非线性段: 在剪应力施加的初始阶段, 剪应力 - 剪位移曲线呈现的呈“上凹”型非线性段。这是由于岩石材料内部存在许多微裂纹和孔隙等缺陷, 在法向拉应力和剪应力的作用下, 这些缺陷产生闭合或者张开, 从而使岩石在加载初期表现出非线性特征。

(2) 线弹性段: 随着剪应力进一步增大, 曲线逐渐进入线弹性段。在该阶段, 剪应力随剪位移的增大基本为线性增大, 且峰值前未出现明显的屈服。

(3) 峰后段: 剪应力达到峰值后, 迅速跌落为零, 无残余应力, 试样表现出明显的脆性破坏特征。

如图 2 所示, 法向拉应力越大, 剪应力 - 剪位移曲线初始阶段的非线性越不明显。例如当法向应力大于 0.75 MPa 时, 峰前剪应力 - 剪位移曲线已近线性。

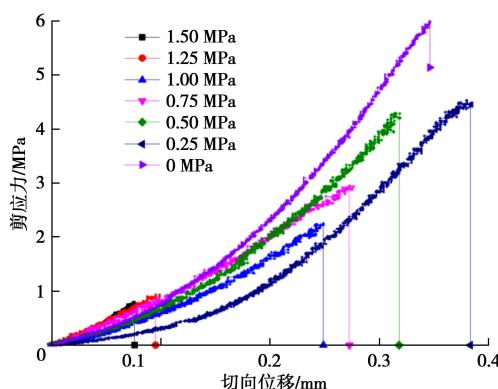


图 2 不同法向拉应力下剪应力 - 剪位移曲线

Fig. 2 Shear stress-shear displacement curves under different normal tensile stresses

2.2 剪切刚度

拉剪应力条件下岩石剪切刚度(剪应力 - 剪位移曲线线弹性段斜率)随法向拉应力的变化如图 4 所示。随拉应力的增大砂岩剪切刚度逐渐减小(拉应力为 0.75~1.00 MPa 时, 略有增大)。拉应力由 0 增大到 1.5 MPa, 剪切刚度由 12.901 MPa/mm 减小到 4.243 MPa/mm, 降低幅度为 67.11%。剪切刚度随法向应力的变化可用线性方程描述:

$$K = a\sigma_n + b \quad (\sigma_n < \sigma_t) \quad (3)$$

式中 a 和 b 为与材料性质有关的常数; σ_t 为单轴抗拉强度; σ_n 为法向应力。采用式(3)对剪切刚度进行拟合; 参数 a 和 b 分别为 -6.18 和 13.21, 拟合系数 R^2 为 0.892。

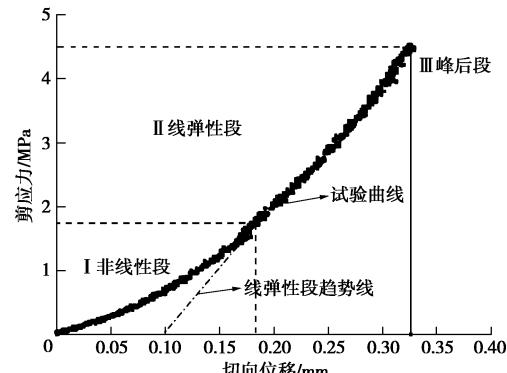


图 3 法向拉应力为 0.5 MPa 时剪应力 - 剪位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves under the normal tensile stress of 0.5 MPa

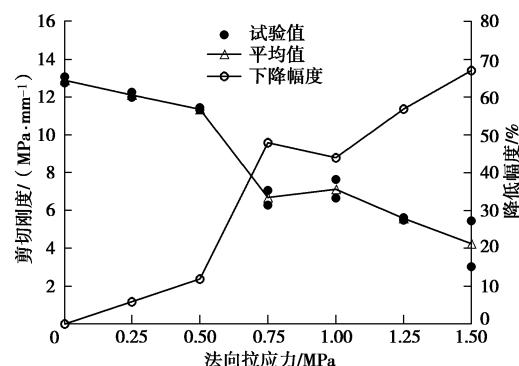


图 4 剪切刚度及其降低幅度随法向拉应力变化曲线

Fig. 4 Curves of shear stiffness and percentage of its decrease with normal tensile stress

2.3 拉剪强度

试样抗剪强度随法向拉应力的变化如图 5 所示。为了保证曲线的完整性, 图 5 中假定单轴拉伸条件下, 试样的抗剪强度为零(即不需要施加剪应力, 岩石试件将破坏)。随着法向拉应力的增大, 试样抗剪强度逐渐减小。目前常用的岩石强度准则有 Mohr-Coulomb 准则和 Hoek-Brown 准则^[13-15], 其表达式分别为

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c \quad , \quad (4)$$

$$\tau_f = A(\sigma_n - \sigma_t)^B \quad . \quad (5)$$

式中, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角, A 和 B 为与材料特性有关的参数。分别采用 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度准则对试验测得抗剪强度进行拟合, 拟合曲线如图 5 所示。试验数据在曲线两侧均匀分布, 拟合系数 R^2 分别为 0.927, 0.958。因此 Hoek-Brown 准则比 Mohr-Coulomb 准则能更好地反映岩石拉剪强度变化特征。

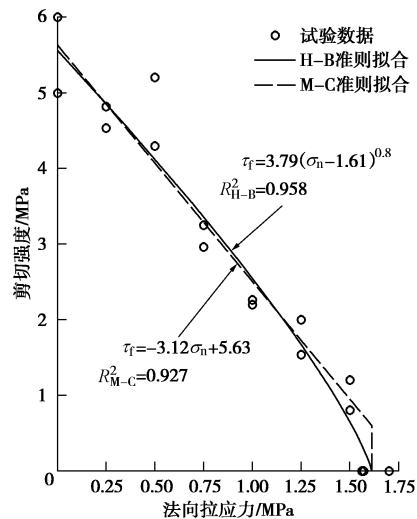


图5 不同法向拉应力下抗剪强度包络线

Fig. 5 Shear strength envelopes under different normal tensile stresses

根据周辉等^[16]基于试验数据点的分段线性平均斜率来求 c , φ 值的方法, 得到图 6 所示的剪切强度参数随法向拉应力的变化特征。岩石内摩擦角和黏聚力随法向拉应力变化呈现一定的波动性, 表明破坏强度包络线具有较强的非线性, 也说明拉-剪应力条件下岩石的强度准则应采用非线性强度准则描述更为合适。

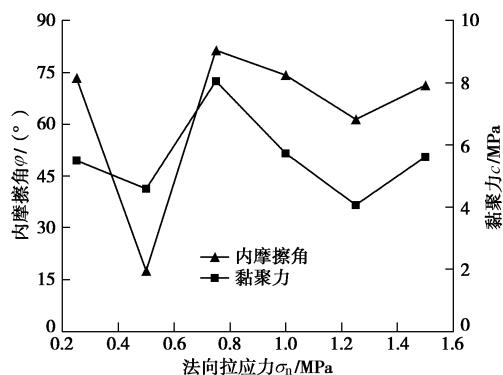


图6 黏聚力和内摩擦角随法向拉应力变化

Fig. 6 Variation of cohesion and friction angle with normal tensile stress

2.4 破坏特征

拉剪应力下试样的破坏形态如图 7 所示(双面剪切试验试样破坏后形成两个破裂面)。当法向应力较小时(0.50, 1.00 MPa, 图 7(a)、(b)), 在剪切位移的作用下, 试样表面裂隙存在一些较明显的剪切迹象(虚线圈部分)。当法向应力为 1.5 MPa 时(图 7(c)), 只在裂隙的端部形成微小的剪切裂缝, 整体相对较为平直, 且与单轴拉伸形成的拉伸裂纹(图 7(d))较为相似。故可认为随着法向拉应力的减小, 试样的断裂由拉伸断裂逐渐转化为拉剪混合断裂。另外, 单轴

拉伸试验中, 试样形成的拉伸裂纹最平直, 而拉剪试验中形成的裂纹常表现为曲线扩展, 因此裂纹的扩展形态与应力状态密切相关。法向拉应力越大, 破裂剪性特性越弱而张性特征越强, 破裂越趋向于平直。

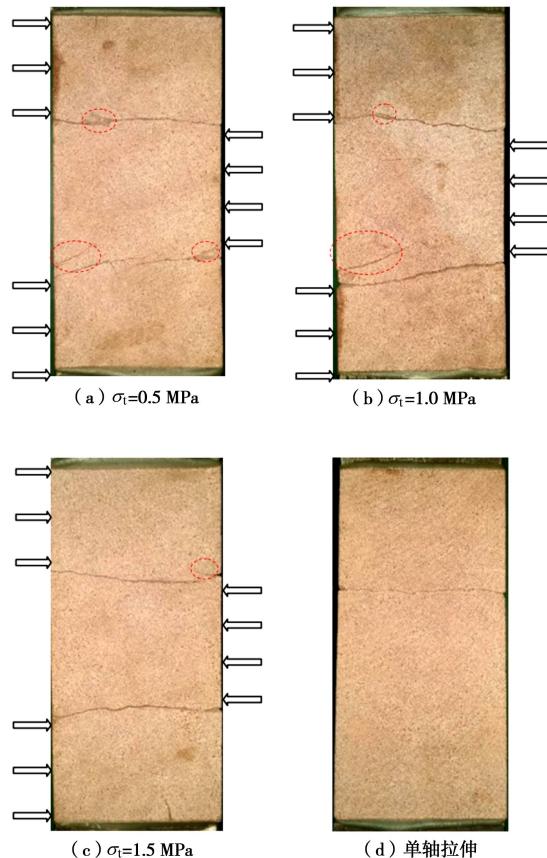


图7 拉剪和单轴拉伸试验中试样破坏形态

Fig. 7 Failure patterns of rock specimens under tension-shear and uniaxial tensile tests

3 结 论

(1) 研发了一种可用在常规直剪试验机上的法向拉应力作用下岩石材料双面剪切试验装置(即拉伸-双面剪切试验装置)。

(2) 拉-剪应力作用下剪应力-剪位移曲线峰前无明显屈服, 曲线在经过初始非线性变形阶段短暂调整后进入线弹性段直至破坏, 且峰后不存在残余应力。并且法向拉应力越大, 初始非线性段越不明显。

(3) 拉-剪应力作用下剪切刚度和拉剪强度随法向拉应力的增大均逐渐减小。本文试验数据表明 Hoek-Brown 强度准则较 Mohr-Coulomb 强度准则能更好的描述岩石拉剪强度特征。

(4) 拉-剪应力作用下岩样破坏模式随法向拉应力的增大逐渐由拉剪复合破坏转变为拉伸破坏, 破裂越趋向于平直。

参考文献:

- [1] 张倬元, 王仕天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng, et al. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [2] HUANG R Q, HUANG D. Evolution of rock cracks under unloading condition[J]. Rock mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(2): 453 – 466.
- [3] ETHERIDGE M A. Differential stress magnitudes during regional deformation and metamorphism: upper bound imposed by tensile fracturing[J]. Geology, 1983, **11**(4): 231 – 234.
- [4] 黄润秋, 黄 达, 段绍辉, 等. 锦屏 I 级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 23 – 35. (HUANG Run-qiu, HUANG Da, DUAN Shao-hui, et al. Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass deformation failure in construction phase for underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, (in Chinese))
- [5] 赵宝云, 刘东燕, 朱可善, 等. 重庆红砂岩单轴直接拉伸蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 2): 3960 – 3965. (ZHAO Bao-yun, LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan, et al. Experimental research on creep characteristics of Chongqing red sandstone under direct tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3960 – 3965. (in Chinese))
- [6] 许 江, 刘 靖, 吴 慧, 等. 压剪应力条件下砂岩开裂扩展过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3042 – 3048. (XU Jiang, LIU Jing, WU Hui, et al. Test study of sandstone cracking and propagation process under compressive-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3042 – 3048. (in Chinese))
- [7] 李建林. 岩石拉剪流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 299 – 303. (LI Jian-lin. A test study on tension shear creep of rock[J]. Chinses Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 299 – 303. (in Chinese))
- [8] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. Nature, 2004, **428**(6978): 63.
- [9] 周 辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 硬脆性大理岩拉剪破坏特征与屈服准则研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 305 – 314. (ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, et al. Research on tension-shear failure characteristics and yield criterion of hard brittle marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 305 – 314. (in Chinese))
- [10] CEN D, HUANG D. Direct shear tests of sandstone under constant normal tensile stress condition using a simple auxiliary device[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2017, **50**(6): 1425 – 1438.
- [11] 李守定, 李 晓, 郭静芸, 等. 岩石拉伸剪切破裂试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(4): 655 – 666. (LI Shou-ding, LI Xiao, GUO Jing-yun, et al. Research of rock failure testing under combined shear and tension[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(4): 655 – 666. (in Chinese))
- [12] 许 江, 刘 靖, 程立朝, 等. 压剪应力条件下砂岩双面剪切细观开裂扩展演化特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(4): 649 – 657. (XU Jiang, LIU Jing, CHEN Li-chao, et al. Mesoscopic cracking and expansion of double sheared sandstone under compressive-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(4): 649 – 657. (in Chinese))
- [13] YANG X L, YIN J H. Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek–Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, **42**(4): 550 – 560.
- [14] GALINDO R A, SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of rock masses based on modified Mohr-Coulomb strength criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2017, **93**: 215 – 225.
- [15] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, **106**: 1013 – 1035.
- [16] 周 辉, 李 震, 杨艳霜, 等. 岩石统一能量屈服准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2170 – 2184. (ZHOU Hui, LI Zhen, YANG Yan-shuang, et al. Unified energy yield criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2170 – 2184. (in Chinese))