

华山花岗岩动力性质的三轴试验研究

王志亮^{1,2}, 卢志堂²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对华山花岗岩进行动三轴试验研究, 分析了其抗压强度、弹性模量、泊松比与应变率及围压间关系。结果表明: 围压不变时, 随应变率的增大抗压强度增大, 而弹性模量和泊松比变化不明显; 应变率相同时, 围压增大抗压强度也变大, 但弹性模量和泊松比变化较小。基于以上试验结果, 分别采用莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则, 定量地给出了华山花岗岩抗压强度与应变率以及围压间表达式。采用莫尔-库仑准则分析时, 强度的变化由黏聚力占主导; 采用霍克-布朗准则分析时, 应变率效应主要表现在单轴抗压强度的改变上, 而材料参数 m 变化很小。

关键词: 花岗岩; 动三轴试验; 应变率; 莫尔-库仑准则; 霍克-布朗准则

中图分类号: TU458⁺. 3

文献标志码: A

Experimental Study on Dynamic Properties of Huashan Granite Based on Dynamic Triaxial Apparatus

WANG Zhiliang^{1, 2}, LU Zhitang²

(1. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dynamic triaxial test of Huashan granite was conducted to analyze the relationship between the strain rate and the granite compressive strength, the elastic modulus and Poisson's ratio with different confining pressures. Test results show that with the same confining pressure, the compressive strength increases with the strain rate, but there are no apparent changes in the elastic modulus and the Poisson's ratio of the granite. The compressive strength also becomes larger with increasing confining pressure at the same strain rate, while the elastic modulus and Poisson's ratio changes little. Based on the above test results, Mohr-Coulomb

and Hoek-Brown criteria were adopted to quantitatively analyze the relationship among compressive strength, strain rate and confining pressure. As for the former, the change of strength is primarily due to the variation of cohesion with strain rate. Assessment of the Hoek-Brown criterion indicates that the uniaxial compressive strength increases with strain rate, but the parameter m changes very little.

Key words: granite; dynamic triaxial test; strain rate; Mohr-Coulomb criterion; Hoek-Brown criterion

地震、滑坡、岩爆等地质灾害防治, 包括岩石钻掘、爆破施工以及军事防护工程等领域, 均涉及到岩石的动力特性^[1-2]。岩石的动力特性是指岩石在各种动力荷载作用下所具有的应力、应变、变形模量、波速及强度等性质。对岩石动力特性的研究, 主要集中在探讨不同应变率(加载率)对岩石力学性质的影响, 而动力性质的研究较少^[3-18]。

Brace 等^[3]对花岗岩、辉绿岩等六种岩石分别进行了不同应变率的动三轴压缩试验, 结果表明岩石材料的抗压强度都随着应变率的增加明显提高。Friedman 等^[4]发现岩石的弹性模量和强度都随应变率的增大而增大。Janach^[5]对花岗岩和石灰岩进行的动态单轴抗压试验, 表明岩石的抗压强度远大于其静态强度, 同时随着应变率的增大, 岩石的破碎度也随之增大。Olsson^[10]研究了应变率为 $10^{-6} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 凝灰岩的单轴抗压强度, 试验结果表明当应变率低于 76 s^{-1} 时, 抗压强度随应变率的增大变化不大, 而应变率大于 76 s^{-1} 时, 抗压强度随应变率的增大而大幅增加。吴绵拔等^[12]通过对花岗岩和煌斑岩进行中等应变率下的单轴压缩试验, 指出随应变率的增加, 岩样的抗压强度和变形模量显著提高, 而泊松比对应变率依赖性不大。李永盛^[16]对红砂岩采用九

收稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51174145, 51379147); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110024); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 王志亮(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩石动力学。E-mail: cvewzL@tongji.edu.cn

级不同应变率分别进行单轴压缩试验,发现该岩石的抗压强度随应变率增大而相应提高,其变化规律可以用反三角-对数函数拟合.李海波等^[17]通过动三轴试验,发现花岗岩的抗压强度随应变率的增加有较明显的增加趋势,当应变率从 10^{-4} s^{-1} 增加到 10^0 s^{-1} 时,花岗岩的抗压强度约增加 15%,而弹性模量和泊松比随应变率的增加没有明显的变化趋势.以上的试验研究表明,岩石的力学行为表现出率相关的特性,主要体现在动态强度的提高和应力-应变曲线的变化.岩石抗压强度随着应变率的提高而增大,已逐渐成为一种共识.

本文针对华山花岗岩的动三轴试验数据,研究了其抗压强度、弹性模量、泊松比与应变率以及围压的关系,并分别利用莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则定量地建立了其破坏准则,为系统分析此类岩石的动态力学特性奠定基础.

1 试验设备和试验条件

试验所采用的花岗岩试样均取自陕西华山,呈灰白色,具有块状构造,为黑云母花岗岩.该花岗岩的密度为 $2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,吸水率为 0.57%,单轴抗压强度为 138 MPa(试样尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$).其主要矿物成分主要有微斜长石(质量分数 40%)、斜长石(质量分数 25%)、石英(质量分数 20%)和黑云母(质量分数 8%)等.试验在武汉岩土力学研究所 RDT-10000 型高压动三轴仪(见图 1)上完成,有关试验系统的详细资料参阅文献^[19].试样尺寸为 $30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ (见图 2).结合高压动三轴仪的测试范围,加载应变率 $\dot{\epsilon}$ 分别取 $10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-1}, 10^0 \text{ s}^{-1}$,每级应变率下施加的围压 σ_3 分别为 20, 40, 60, 80, 100 MPa.试验总计 60 个试样,三个试样为一组,对测试结果取平均值,尽可能避免试样的离散性.试验过程中,由动态应变仪量测试样的轴向应力(σ_1)、轴向和横向应变.

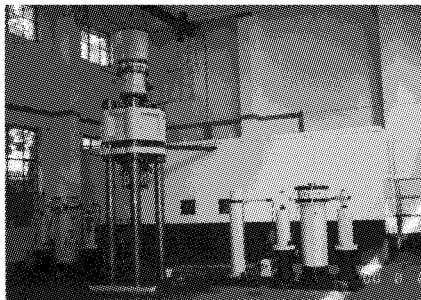


图 1 岩石高压动三轴系统

Fig.1 Rock dynamic triaxial test system

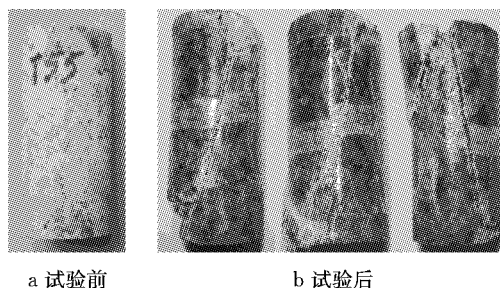


图 2 岩样照片

Fig.2 Photos of rock samples

2 数据分析

2.1 基本力学特性

典型的华山花岗岩动三轴应力($\sigma_1 - \sigma_3$)-应变(ϵ)曲线如图 3 所示,应变率分别为 10^{-4} 和 10^{-1} s^{-1} .由于试样的应变率和施加的围压均较大,难以测出峰值后应力-应变曲线.可以看出,当应变率相同时,随着围压的增大岩石强度变大;围压不变时,随着应变率提高,岩石的强度也随之增大.另外,随着围压的增加,岩石的轴向破坏应变明显增加,剪胀明显变弱,剪胀起始应力增大.这说明由于围压增大使得侧向约束变大,试样越难发生剪胀变形.

将动三轴试验得到的参数进行具体分析,其中给出的试验结果为平均值.图 4 显示随着应变率提高,华山花岗岩的抗压强度不断增大,但增大的幅度不断减小,其中应变率 $\dot{\epsilon}$ 从 10^{-1} s^{-1} 增大到 10^0 s^{-1} 时,抗压强度较其他应变率增大不明显;同一应变率下,随着围压增大,该花岗岩的抗压强度不断增大.

2.2 破坏准则分析

根据动三轴测试来确立花岗岩的动态破坏准则,此处利用已有的莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则进行分析.两者表达式分别为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi + \sigma_3 (1 + \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m \sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5}$$

式中: σ_c 为单轴抗压强度, m 为材料参数, c 和 φ 分别为黏聚力和内摩擦角.

图 4 给出根据莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则拟合得出的曲线,基本参数见表 1,相关系数见表 2.这里需要指出,对图 4b $\dot{\epsilon} = 10^0 \text{ s}^{-1}$,拟合时只利用了四组试验结果,将 $\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$ 的试验结果剔除.首先由图 4a 可以看出,拟合的直线斜率近似相同,即不同应变率条件下,华山花岗岩的内摩擦角基本不变,这说明应变率主要引起华山花岗岩黏聚力的

改变,而对其内摩擦角影响不大.同时也可看出,随着应变率提高该岩石抗压强度不断增大,但增大幅度在减小.

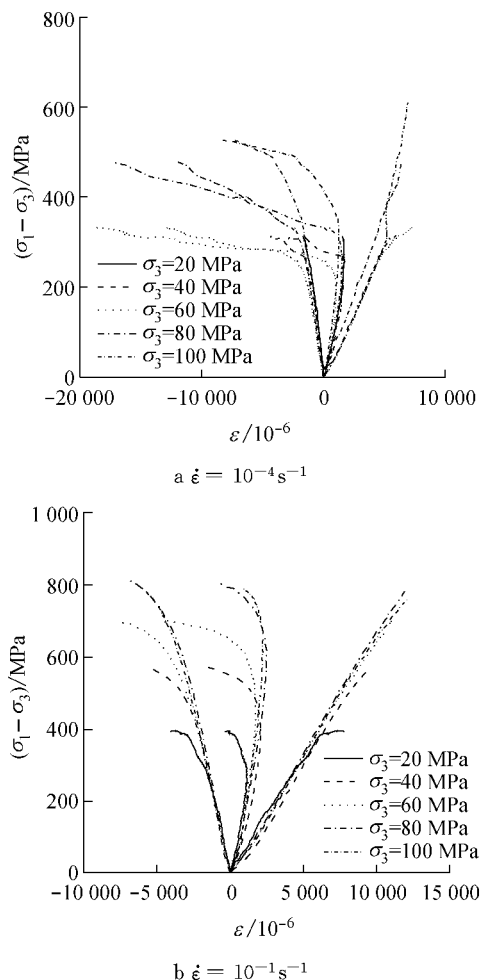


图3 不同应变率下花岗岩典型应力-应变曲线
Fig.3 Typical stress-strain curves of the granite at different strain rates

霍克-布朗准则作为一种经验公式,可以很好地描述脆性岩石的破坏行为^[20].根据图4b所拟合出的霍克-布朗强度包络线,反映出华山花岗岩的强度随应变率提高而增大.值得注意的是,由表1可知,在不同应变率下,材料参数 m 基本不变,即 m 对应变率不敏感.对比图4a和b,莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则都能用来表示动三轴试验的围压效应.同时可见,随着应变率提高,华山花岗岩强度增大.根据表1,由莫尔-库仑准则分析可知,不同应变率下花岗岩的抗压强度的改变,主要体现在黏聚力的变化,而内摩擦角基本不变. Li等^[21]基于微观力学模型的理论分析为此提供了支持, Zhao^[22]的试验研究也得出相同的结论.由霍克-布朗准则分析来看,应变率增大时,材料参数 m 变化较小,而单轴抗压强度 σ_c 变

大.但是两准则得到的单轴抗压强度有所不同,根据莫尔-库仑准则对应的单轴抗压强度偏大.考虑到工程的安全性,数值模拟时应选择霍克-布朗准则分析计算.

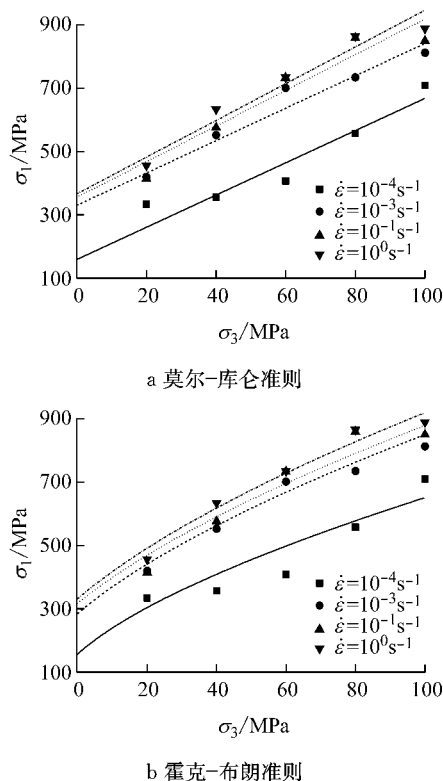


图4 不同应变率下轴向应力-围压曲线
Fig.4 Curves of the axial stress and the confining pressure at different strain rates

表1 华山花岗岩的物理参数

应变率/ s^{-1}	莫尔-库仑准则参数		霍克-布朗准则参数	
	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	σ_c/MPa	m
10^{-4}	35.4	42.2	155	17
10^{-3}	73.2	42.3	283	17
10^{-1}	77.1	44.3	316	16
10^0	78.3	44.9	330	17

表2 相关系数

应变率/ s^{-1}	Tab.2 Correlation coefficients	
	由莫尔-库仑准则所得相关系数	由霍克-布朗准则所得相关系数
10^{-4}	0.95	—
10^{-3}	0.97	0.96
10^{-1}	0.96	0.94
10^0	0.97	0.97

2.3 应变率效应

由于采用莫尔-库仑准则分析时,在 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 坐标中不同应变率下的强度线近似平行(见图4b),因此各级围压 σ_3 下,抗压强度随应变率的增大,其增幅近似相同.因此,以单轴抗压强度的变化为例,来

分析应变率效应(拟合曲线见图5)。

通过拟合分析发现,华山花岗岩的抗压强度与应变率的关系式可近似表示为

$$\sigma_1 = \sigma_0 + A \left(\log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{0.17}$$

式中: $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; σ_0 为该应变率对应的单轴抗压强度,为 160 MPa; A 为系数,此处为 171 MPa。

由于霍克-布朗破坏准则对应的包络线是曲线,故这里只以单轴抗压强度的应变率效应作为代表。图5给出了霍克-布朗准则对应的单轴抗压强度及拟合的曲线,得出的单轴抗压强度随应变率变化如下式所示:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + B \left(\log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{0.22}$$

式中: $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; σ_{c0} 为该应变率对应的单轴抗压强度,为 155 MPa; B 为系数,此处为 128 MPa。

图5显示莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则反演分析得出的单轴抗压强度有明显的差别,其目的在于阐明应变率对抗压强度的影响,即反映随应变率提高抗压强度增大的规律。需要说明的是,由于试验没有进行动单轴测试,造成了单轴抗压强度的差别较大。

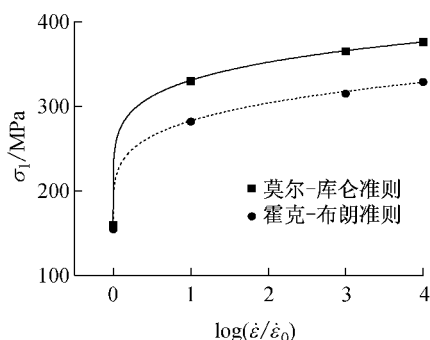


图5 抗压强度随应变率的变化

Fig.5 Variation of the compressive strength with strain rates

试验获得的弹性模量和泊松比结果分别如图6和7所示。三轴压缩试验中弹性模量 E 和泊松比 μ 的计算公式^[23]为

$$E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)\epsilon_1 - 2\sigma_3\epsilon_3}$$

$$\mu = \frac{\sigma_3\epsilon_1 - \sigma_1\epsilon_3}{(\sigma_1 + \sigma_3)\epsilon_1 - 2\sigma_3\epsilon_3}$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_3 分别为轴向应变和侧向应变,这些参数根据测得的应力-应变曲线的弹性段部分确定。

如图6所示,在应变率为 10^{-3} 和 10^0 s^{-1} 时,华山花岗岩的弹性模量随围压增大先变大后变小再增

大。应变率为 10^{-4} s^{-1} 时,弹性模量随围压增大先变小后增大,而应变率为 10^{-2} s^{-1} 时,弹性模量随围压增大而变大。综上可知,围压对弹性模量的影响无明显规律。同时,可看出应变率对弹性模量的影响也没有明显的规律。另外,对于不同加载率,低围压条件下泊松比随应变率变化较大,但无明显的规律可循;围压较高时,泊松比相对稳定,基本上保持在 0.31 附近。应注意到,华山花岗岩的泊松比偏大,大部分在 0.30 以上。

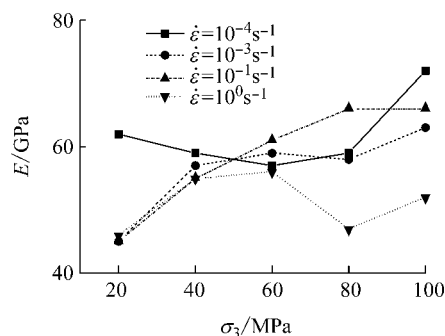


图6 不同应变率条件下弹性模量-围压曲线

Fig.6 Curves of E and σ_3 at different strain rates

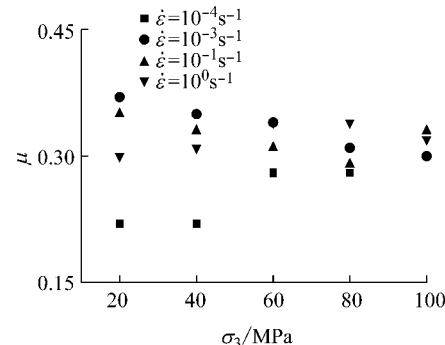


图7 不同应变率条件下泊松比-围压曲线

Fig.7 Curves of μ and σ_3 at different strain rates

3 结论

(1) 华山花岗岩的抗压强度在一定范围内随着围压的增大而增大,随应变率的提高也有增大趋势,但增大的幅度变小。加载应变率对此类岩石弹性模量的影响不明显,且泊松比与应变率没有明确的变化规律。

(2) 采用莫尔-库仑准则分析时,应变率的效应主要体现在黏聚力随着应变率的增大而增大,而内摩擦角变化不大;利用霍克-布朗准则分析时,应变率效应表现在对单轴抗压强度的变化,而对材料参数 m 影响不大。

(3) 鉴于霍克-布朗准则能够描述岩石的动态强度变化规律,综合考虑工程的安全性,故本文推荐利用该准则进行后续的动力模拟计算与分析。

参考文献:

- [1] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881.
HUANG Lixing, CHEN Yibai. Rock dynamics in China: past, present and future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1881.
- [2] Zhao J, Zhou Y X, Hefny A M, et al. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage[J]. Tunnelling and Underground Space Technology 1999, 14(4): 513.
- [3] Brace W F, Martin R J. A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1968, 5(5): 415.
- [4] Friedman M, Perkins R D, Green S J. Observation of brittle-deformation features at the maximum stress of westerly granite and Solnhofen limestone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1970, 7(3): 297.
- [5] Janach W. The role of bulking in brittle failure of rock under rapid compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1976, 13(6): 177.
- [6] Blanton T L. Effect of strain rate from 10^{-2} to 10 sec^{-1} in triaxial compression tests on three rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1981, 18(1): 47.
- [7] Grady D E. The mechanics of fracture under high-rate stress loading. mechanics of geomaterials[M]. Albuquerque: Sandra National Labs, 1985.
- [8] Masuda K, Mizutani H, Yamada I. Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite[J]. Journal of Physics of the Earth, 1987, 35: 37.
- [9] Swan G, Cook J, Bruce S, et al. Strain rate effect in Kimmeridge Bay Shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1989, 26(2): 135.
- [10] Olsson W A. The compressive strength of Tuff as a function of strain rate from 10^{-6} to $10/\text{sec}^{-3}$ [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1991, 28(1): 115.
- [11] Zhao J, Li H B, Wu M B, et al. Dynamic uniaxial compression tests on a granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 273.
- [12] 吴绵拔, 刘远惠. 中等应变速率对岩石力学特性的影响[J]. 岩土力学, 1980(1): 51.
WU Mianba, LIU Yuanhui. The effect of intermediate strain rates on mechanical properties of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1980(1): 51.
- [13] 朱瑞庚, 吴绵拔. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 3.
ZHU Ruigeng, WU Mianba. Failure criterion of granite at different loading rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1984, 4(1): 3.
- [14] 鞠庆海, 吴绵拔. 岩石材料三轴压缩动力特性的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 72.
JU Qinghai, WU Mianba. Experimental studies of dynamic characteristic of rocks under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 72.
- [15] 杨仕教, 曾晟, 王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 786.
YANG Shijiao, ZENG Sheng, WANG Helong. Experimental analysis on mechanical effects of loading rates on limestone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 786.
- [16] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1995, 23(3): 265.
LI Yongsheng. Experimental analysis of the mechanical effects of loading rates on red sandstone[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1995, 23(3): 265.
- [17] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 三轴情况下花岗岩动态力学特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 470.
LI Haibo, ZHAO Jian, LI Junru, et al. Triaxial compression tests of a granite[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 470.
- [18] 刘博, 李海波, 李俊如. 不同风化程度花岗岩动力特性实验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2640.
LIU Bo, LI Haibo, LI Junru. Experimental analysis of mechanical effects of loading rates on weathered granite rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2640.
- [19] 王武林, 刘远惠, 陆以璐, 等. RDT-10000 型岩石高压动力三轴仪的研制[J]. 岩土力学, 1989, 10(2): 69.
WANG Wulin, LIU Yuanhui, LU Yilu, et al. Introduction of RDT-10000 dynamic triaxial compression system[J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(2): 69.
- [20] Hoek E, Brown E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [21] Li H B, Zhao J, Li T J. Micromechanical modelling of mechanical properties of granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 923.
- [22] Zhao J. Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1115.
- [23] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
TAO Zhenyu. Theory and practice of rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1981.