

# 华山花岗岩动力学行为与破坏准则研究

陈 勇<sup>1</sup>, 王志亮<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 对华山花岗岩进行了应变率范围  $10^{-4} \sim 10^0/s$ 、围压范围 20 ~ 100MPa 的动三轴试验测试, 结果表明在不同围压下, 随着应变率增加, 花岗岩的抗压强度增长幅度呈减小趋势, 弹性模量和泊松比与应变率没有明确关系; 随着围压的增加, 弹性模量和泊松比与围压间也没有明确关系。接着, 作者分别判别了动态的莫尔-库伦强度准则、动态的霍克-布朗强度准则的适用性, 并对试验数据进行分析。研究结果表明, 在中等应变率下, 动态莫尔-库伦强度准则和动态霍克-布朗强度准则均适用, 当采用动态莫尔-库伦强度准则时, 花岗岩的内摩擦角随应变率增加变化幅度很小, 其抗压强度主要取决于花岗岩的粘聚力; 当采用动态霍克-布朗强度准则时, 参数  $m$  对应变率变化不敏感。

**关键词:** 花岗岩; 动三轴; 应变率; 围压; 强度准则

中图分类号: TU458+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)03-0066-04

华山花岗岩是燕山期第二幕(中白垩纪)地壳构造运动形成的深成侵入岩体, 东西长 15km、南北宽 10km、面积约 150km<sup>2</sup>, 其顶部是粗粒(粒径 5mm)斑状花岗岩; 一些大的长石晶体分布在较细的石英云母晶体中; 中部是中粒(粒径 2~5mm)花岗岩, 边部是细粒(粒径 2~0.2mm)花岗闪长岩及片麻状花岗岩<sup>[1]</sup>, 对其动力学性质的研究有助于华山花岗岩地区诸如泥石流等地质灾害的防治研究。本文基于岩石高压动三轴实验, 分析了华山花岗岩弹性模量、泊松比等随应变率以及围压之间的变化规律, 并分别验证了动态莫尔-库伦准则以及动态霍克-布朗准则在中等应变率下的适用性, 定量地给出了不同应变率下此类花岗岩的三轴抗压强度与围压间表达式, 为系统分析其动力学特性奠定基础。

## 1 试样制备与测试原理

所用岩样为黑云母花岗岩(图 1), 取自陕西华山, 灰白色, 块状构造, 密度为 2 600kg/cm<sup>3</sup>, 吸水率为 0.57%, 主要矿物成分有微斜长石(40%)、斜长石

(25%)、石英(20%)和黑云母(8%)等。试样尺寸为  $\phi 30\text{mm} \times 60\text{mm}$ , 试验参考《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[2]</sup>。仪器采用武汉岩土所岩石高压动三轴试验系统, 共采取了 5 种围压(20MPa、40MPa、60MPa、80MPa 和 100MPa)。对应每种围压, 分别施加 4 种不同应变率( $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-1}$  和  $10^0/s$ ), 共 20 组(每组 3 个)试样。试验中轴向压力通过标定的测力柱量测, 试样的纵向、横向变形通过应变片量测。试样的破坏强度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$  为应力-应变曲线中的峰值应力。弹性模量  $E$  定义为 50% 破坏强度所对应的应力应变之比; 泊松比  $\mu$  定义为 50% 破坏强度所对应的横向应变与纵向应变之比<sup>[3]</sup>。岩石剪胀起始应力定义为使岩石开始发生非线性的体积膨胀时所对应的偏应力, 由偏应力-体积应变曲线确定<sup>[4]</sup>。



图 1 实验试件照片

Fig. 1 Photos of rock samples

收稿日期: 2013-08-23; 修订日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51174145); 教育部博士点专项资金(20120072110024); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 陈勇(1990-), 男, 硕士研究生, 从事岩石动力学研究。

通讯作者: 王志亮(1969-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为岩石动力学与工程安全性。

E-mail: cvewzl@ tongji. edu. cn。

## 2 动三轴试验结果及分析

### 2.1 基本力学特性

在围压 40MPa 时, 花岗岩典型应力-应变曲线如

图2所示,可见在 $10^{-4} \sim 10^0/s$ 应变率范围内,随应变率的增加,岩石抗压强度显著提高。在应变率为 $10^{-4}/s$ 时,抗压强度为367.9MPa,破坏时轴向应变约为0.0064;而在应变率 $10^{-3}/s$ 时,抗压强度557.86MPa,破坏时轴向应变约为0.008。此外,从图中的偏应力与体积应变关系曲线上,可见随应变率的增大,剪胀起始应力变化不大:当 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}/s$ 时,剪胀起始应力为175MPa;当 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}/s$ 时为183MPa;当 $\dot{\epsilon} = 10^{-1}/s$ 时为186MPa。

图3为 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}/s$ 时应力-应变曲线,可看出随着围压的增大,岩石的抗压强度随之提高。

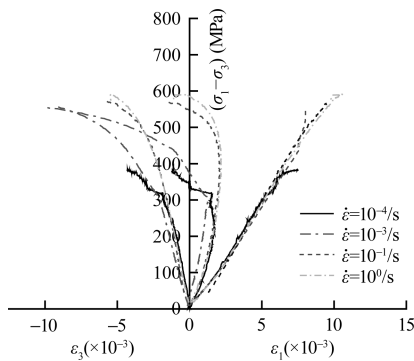


图2 不同应变率下花岗岩应力-应变曲线  
Fig.2  $\sigma$ - $\epsilon$  curves of the granite under different strain rates

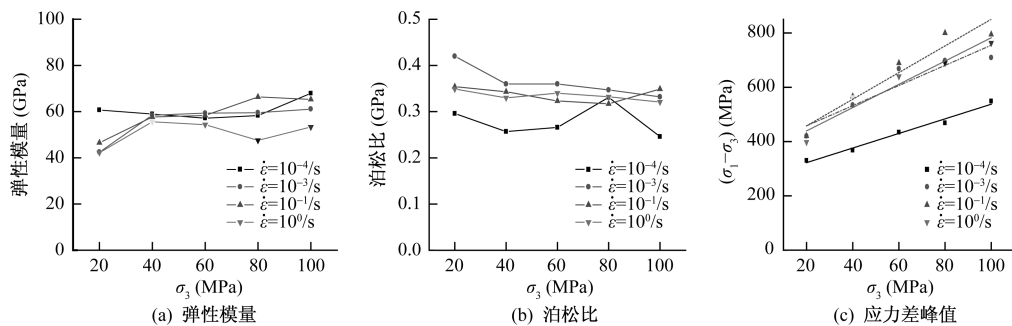


图4 不同应变率下花岗岩参数随围压关系  
Fig.4 Plots of rock parameters with confining pressure under different strain rates

$$c_d = \sigma_{cd} (1 - \sin \varphi) / 2 \cos \varphi \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{cd} + \sigma_3 (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (2)$$

式中: $C_d$ ——动态粘聚力;

$\sigma_{cd}, \sigma_1$ ——动态三轴和单轴压缩强度。

利用(2)式拟合室内压缩试验的数据(图5),可以看出本文给出的动态莫尔-库伦强度准则比较符合实际情况。结合文献[5]的研究结论,可以认为在围压较低时,动态莫尔-库伦强度准则可以用来估算岩石动态压缩强度。

由图5可见,在围压为 $0 \sim 100MPa$ 下内摩擦角值变化幅度很小(在应变率 $10^{-3} \sim 10^0/s$ 范围内),表现

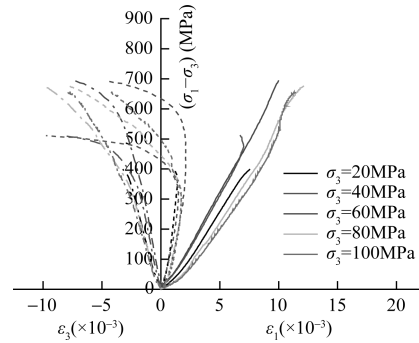


图3 不同围压下花岗岩应力-应变曲线  
Fig.3  $\sigma$ - $\epsilon$  curves of the granite under different  $\sigma_3$

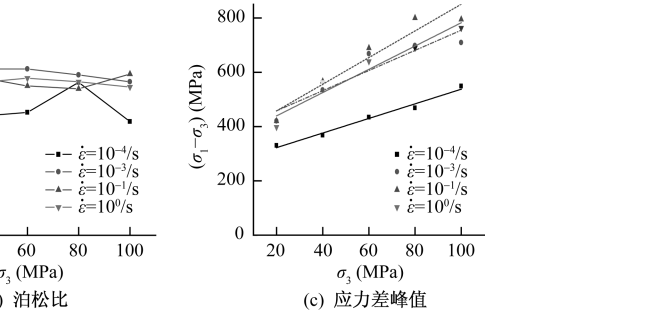
图4为不同应变率下花岗岩主要力学参数随围压的变化规律,据此可知花岗岩的弹性模量与泊松比与围压间没有明确的关系。图4c显示了花岗岩的抗压强度随着围压的增大而明显增大,表现出明显的围压效应,且在不同的应变率下花岗岩的抗压强度随围压的增加趋势基本相同。

## 2.2 岩石的动态强度准则

通过探讨莫尔-库伦强度准则、霍克-布朗强度准则在岩石材料动态强度评估中的应用性和适用性,以找出强度准则中有关参数随应变率变化的规律。

### 2.2.1 动态莫尔-库伦强度准则

动态莫尔-库伦强度准则表达式为:



在图5中拟合曲线斜率比较接近,表1也显示随着应变率增加,花岗岩初始内摩擦角在此范围内变化较小。此外,分析表1发现所研究的华山花岗岩的抗压强度主要体现在粘聚力变化上( $10^{-4}/s$ 组数据异常由于试样离散性等导致,故作剔除处理)。

表1 动态莫尔-库伦强度指标

Table 1 Strength indexes of dynamic M-C criterion

应变率/s	$\varphi$	$c_d$ (MPa)
$10^{-4}$	3.87	311.39
$10^{-3}$	11.15	369.43
$10^{-1}$	11.89	358.40
$10^0$	11.00	376.29

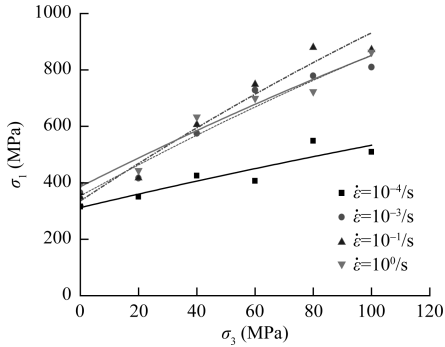


图 5 动态的 M-C 准则拟合曲线

Fig.5 Fitted curves for dynamic M-C criterion

2.2.2 动态霍克 - 布朗强度准则

利用霍克 - 布朗准则的表示形式和本文中等应变率下的实验数据进行拟合,发现实验结果可以由具有相同 *m* 值的一系列非线性  $\sigma_{3d} - \sigma_3$  曲线表示,说明霍克 - 布朗准则可以用于中等应变率下岩石动态强度的估算。动态霍克 - 布朗准则形式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{cd} \sqrt{m\sigma_3\sigma_{cd} + 1} \quad (3)$$

图 6 为动态霍克 - 布朗强度准则的拟合曲线(相关参数见表 2),可以看出随着应变率的增加,参数 *m* 在  $10^{-3} \sim 10^0/s$  范围内变化较小(由于  $10^{-4}/s$  组数据存在离散性,此处也不计入)。

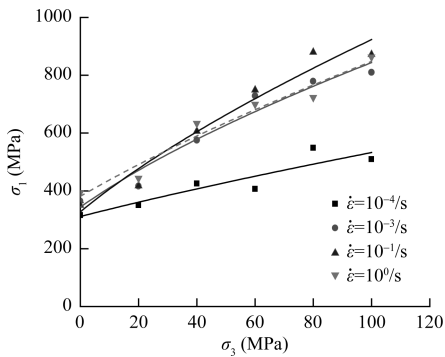


图 6 动态的 H - B 准则拟合曲线

Fig.6 Fitted curves for dynamic H-B criterion

表 2 动态霍克 - 布朗强度指标

Table 2 Strength indexes of dynamic Hoek-Brown criterion

应变率 (s)	<i>m</i>	$\sigma_{cd}$ (MPa)
$10^{-4}$	3.87	311.39
$10^{-3}$	11.15	369.43
$10^{-1}$	11.89	358.40
$10^0$	11.00	376.29

2.3 强度准则比较

变异系数是目前通用的评价岩土样本离散性的统计分析指标,是衡量各观测值变异程度的一个统计

量<sup>[6]</sup>,由统计推断的总体分布特征参数定义和计算:

$$\delta = s/\mu \quad (4)$$

式中: $\mu, s$ ——所选样本平均值和标准差。

相应的计算公式如下:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2} \quad (6)$$

式中:*n*——子样样本容量,即通俗意义上的样本数;

$x_i$ ——由动三轴试验所得的破坏强度;

*X*——拟合曲线上的破坏强度数值。

通过式(4)可以看出,变异系数的本质是所推断的总体散度特征参数 *s* 相对于自身分布位置特征参数  $\mu$  的比值。显然,变异系数越小,表示拟合曲线对实验数据的偏差越小。

表 3 为在不同应变率下,由动三轴试验所测得的破坏强度点偏离各拟合曲线的变异系数,可知在应变率  $10^{-4} \sim 10^0/s$  范围内,动态 H-B 强度准则拟合曲线的变异系数最小,动态 M-C 准则略微次之。由此可知,在中高围压和中高应变率下,数值模拟计算时采用动态 M-C 或动态 H-B 强度准则对此花岗岩均比较合适,二者无明显的优劣之分。

表 3 两个准则变异系数

Table 3 Coefficients of variation for two criteria

应变率 (/s)	动态 M-C 准则	动态 H-B 准则
$10^{-4}$	0.092	0.092
$10^{-3}$	0.073	0.072
$10^{-1}$	0.080	0.080
$10^0$	0.066	0.065

3 结论

(1) 随着应变率的增加,花岗岩的抗压强度增长幅度呈减小趋势,弹性模量和泊松比与应变率没有明确关系,剪胀起始应力变化不大。

(2) 随着围压增大,不同应变率下花岗岩的抗压强度随围压的增加趋势基本相同。花岗岩的弹性模量和泊松比与围压没有明确关系,花岗岩的泊松比绝大部分大于 0.3,最高值达到 0.42。

(3) 研究发现动态 M-C 或动态 H-B 准则对中等应变率下华山花岗岩均比较合适。采用动态 M-C 准则时,随着应变率增加,岩石强度主要取决于粘聚力;采用动态 H-B 准则时,参数 *m* 对应变率增减不敏感。

参考文献:

[1] 熊绍华. 花岗岩山区与泥石流灾害问题——兼谈

- 1988.7.15 华山泥石流[J]. 地域研究与开发, 1990,9(2):44-45. [XIONG S H. The problems of Granite mountain and debris flow disaster—Discussion on the debris flow of Huashan in July 15th, 1988[J]. Research and Development of the Region, 1990,9(2):44-45. (in Chinese)]
- [2] SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001. [SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press,2001. (in Chinese)]
- [3] 汪辉平,曹文贵,王江营,等. 模拟岩石应变软化变形全过程的统计损伤本构模型研究[J]. 水文地质工程地质,2013,40(4):44-49. [WANG H P, CAO W G, WANG J Y, et al. Statistical damage constitutive model research on the simulation of the whole process of rock strain softening deformation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4):44-49. (in Chinese)]
- [4] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社,2006. [SHEN M R. Rock Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press,2006. (in Chinese)]
- [5] Zhao J. Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(6):1115-1121.
- [6] 高连华,孙伟. 变异系数在可靠性中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报,2004,18(4):5-8. [GAO L W, SUN W. Application of the coefficient of variation in reliability[J]. Journal of the Academy of Armored Forces Engineering, 2004, 18(4):5-8. (in Chinese)]

## A study of the dynamic behavior and failure criterion of the granite in Huashan

CHEN Yong<sup>1</sup>, WANG Zhi-liang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Dynamic triaxial tests for the granite in Huashan are conducted with strain rate ranging from  $10^{-4}$  to  $10^0$ /s and confining pressures from 20 to 100 MPa. The results show that under different confining pressures, with the increase of strain rate, the growth rate of compressive strength of the granite shows a decreasing trend. The elastic modulus and Poisson's ratio seem to have no clear relationship with the strain rate. As the confining pressure rises, the strain rate exerts little influence on the elastic modulus and Poisson's ratio. By identifying the dynamic Mohr-Coulomb criterion and the dynamic Hoek-Brown criterion respectively, the test results are analyzed. The results indicate that under the moderate strain rates, with the dynamic Mohr-Coulomb strength criterion used, the internal friction angle changes slightly with the increase of strain rate, and the compressive strength of the granite mainly depends on its cohesion. As for the dynamic Hoek-Brown strength criterion, the parameter  $m$  is not sensitive to strain rate.

**Key words:** granite; dynamic triaxial test; strain rate; confining pressure; strength criterion

责任编辑:张明霞