

三轴加卸载下花岗岩脆性破坏及应力跌落规律

黄 达^{1a,b,2}, 黄润秋², 张永兴^{1a,b}

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 教育部山地城市建设与新技术重点实验室, 重庆 400045;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要:基于2种卸荷应力路径和常规三轴压缩试验,研究了加卸载条件下花岗岩的变形破坏及应力脆性跌落特征。卸荷条件下岩石变形主要是向卸荷(主)方向回弹或拉伸变形为主,而非或次卸荷方向的塑性变形很小,峰后应力应变曲线呈现明显的脆性特征。而加载条件下岩石以轴向压缩变形为主,且压缩塑性变形随围压增大而增大;卸荷条件下破坏岩石各种级别的张拉裂缝较多,张裂面一般垂直于卸荷主方向,高初始围压时双向卸荷甚至在次卸荷方向也可产生环形张拉裂缝。破坏围压较高时破裂面剪性特征相对明显,但剪性裂面一般追踪张性破裂面发展而成,并在剪切面两侧发育较多微张裂缝。而相对较高围压下常规三轴压缩岩石一般为剪切破坏,张性裂缝很少;常规三轴压缩岩石的应力脆性跌落系数随围压的增大而增大,而在卸荷条件下却随初始围压的增大而减小。相同初始围压时,卸荷条件下比加载时的应力脆性跌落系数小得多,方案Ⅱ在初始围压达到30 MPa时甚至出现负值,应力脆性跌落系数 R 依次为: $R_{III} > R_I > R_{II}$ 。

关键词:岩石力学;花岗岩;三轴卸荷试验;变形破坏;应力脆性跌落系数

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)02-0001-06

Characteristics of Brittle Failure and Stress Drop Under Triaxial Loading and Unloading

HUANG Da^{1a,b}, HUANG Run-qiu², ZHANG Yong-xing^{1a,b}

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Lab. For Construction & New Technique of Upland City Ministry of Education, Chongqing university, Chongqing 400045, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

Abstract: The characteristics of deformation failure and stress brittle drop of granite under loading and unloading conditions are studied respectively based on two unloading stress path cases and conventional triaxial compression experiments. The experiments show that the primary deformation of rock is rebound or tension in the (main) unloading direction, but plastic deformation in the non- or sub-unloading direction is not significant. And the curves of stress-strain after peak strength present obvious brittle. Whilst the primary deformation of rock under loading is axial pressure deformation, and plastic deformation increases with the raise of confining pressure. The fracture is characterized by strong tensile, and all tensile cracks are fully developed. Furthermore, when the rock samples are unloaded in two directions, and even normal to unloading direction, sub-unloading annular tensile cracks are produced. The shear fractures is obvious comparatively when confining pressure becomes higher, and it develops following tensile cracks with more

收稿日期:2010-07-16

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(40902078);教育部博士点新教师基金(200806111012);中央高校基本科研业务(CDJZR11200007, CDJRC1020001);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(GZ2007-13)

作者简介:黄达(1976-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程和工程地质方面研究,(E-mail)hdcqy@yahoo.com.cn。

micro-tension cracks formed in two sides along shear plane. But the fracture is characterized by shear under conventional triaxial compression with little tensile cracks; the coefficients of brittle stress drop of granite is increased with the growth of confining pressure under conventional triaxial compression and reduced under unloading. When the initial confining pressure is the same, the coefficients of brittle stress drop under unloading is less than that under loading. In Scheme II, the coefficients of brittle stress drop reaches negative when initial confining pressure is up to 30 MPa, and the one (R) is $R_{\text{II}} > R_{\text{I}} > R_{\text{III}}$ in three test cases.

Key words: rock mechanics; granite; triaxial unloading experiment; deformation and failure; coefficients of brittle stress drop

脆性岩石的破坏后区一般处于非稳定状态,其力学响应难以用经典的应变软化模型来描述,而一般采用脆塑性模型。脆性体的基本特征是在其应力应变曲线上峰后存在一个突变的、不可控制的应力瞬间脆性跌落段,即岩石的应力状态达到峰值强度时,将发生突变而迅速跌落至残余强度,这一特性是由裂隙的迅速扩展、连通造成^[1-4]。

岩石的脆性破坏机理一直是国内外研究的热点和难点问题,较多学者在加载条件下岩石的脆性损伤断裂理论及试验方面做了较多的工作,如:应力脆性跌落方式^[2-4]及相关的应变软化理论^[5-6];脆性岩石的损伤断裂机理及强度特征^[7-12];脆性岩石及其工程的数值模拟理论与方法^[13-14]。岩体工程开挖从力学本质上说主要是卸荷行为,岩体在加载和卸荷条件下其力学特性有本质的区别^[15]。虽然现今在加载条件下岩石的脆性破坏特征及机理方面已取得较多的研究成果,但在卸荷条件下脆性岩石的变形破坏及应力跌落特征方面研究不多,特别是通过卸荷试验定量研究方面。论文基于三峡花岗岩三轴卸荷试验,通过对卸荷条件下岩石的应力应变曲线及破坏特征的定性和定量分析,并与常规三轴压缩试验成果进行对比,阐述了加卸载条件下岩石变形破坏及峰后应力脆性跌落的差异。

1 试验方案

试验在 MTS815 Teststar 程控伺服岩石刚性试验机上进行,试验中围压采用应力控制(force 控制),轴压采用位移(LDVT)控制。试件为三峡地下电站闪云斜长花岗岩,为典型的脆性高强度岩石材料。试件尺寸为 $\varphi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。试件风干密度约为 2700 kg/m^3 ,常规三轴试验测得的弹性模量约为 79.74 GPa ,泊松比约为 0.2 。

试验围压设计水平为:5,10,20,30 MPa 4 个应力水平。采用 3 种试验应力路径方案:方案 I,升轴压并同时降围压($\Delta \sigma_1 : \Delta \sigma_3 = 2 : 1, \Delta \sigma_3 = 0.1 \text{ MPa/s}$);方案 II,同时卸载轴压和围压($\Delta \sigma_1 : \Delta \sigma_3 = 1 : 2, \Delta \sigma_3 =$

0.2 MPa/s);方案 III,常规三轴压缩试验。2 种卸荷方案中当卸载至破坏点时保持此时围压不变进行残余强度测试,试验应力路径如图 1 所示。

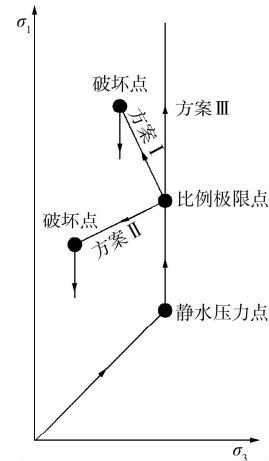


图 1 试验应力路径示意图

2 变形破坏特征

2.1 典型应力~应变曲线

图 2 为 3 种试验方案中花岗岩典型的应力应变全程曲线图。由图不难看出 3 种试验方案的应力应变全程曲线明显不同,特别是峰后阶段,具体说来:

1) 在相同初始围压条件下从比例极限至峰值强度的卸荷过程中轴向塑性变形明显较常规三轴压缩试验小得多,也就是说卸荷条件下岩石到达峰值破坏需要相对较小轴向压缩塑性变形就可以致使脆性岩石破坏,特别是双向卸荷方案 II,高初始围压条件下甚至出现明显的回弹变形环(图 3(b))。相同初始围压条件下峰值点的轴向塑性应变从大到小依次为:方案 III→方案 I→方案 II。

2) 由图 3(c)可知常规三轴压缩时岩石峰后要产生较大的塑性变形才达到残余强度,而且峰后至残余段的轴向塑性应变随围压的增大而增大,即岩石随围压升高由脆性逐渐向延性破坏发展。相同初始围压时卸荷条件下岩石峰后轴向塑性变形相对常

规三轴压缩试验小得多,特别是方案 II。卸荷方案 I 中初始围压 20 MPa、30 MPa(图 3(a))和方案 II 初始围压 20 MPa(图 3(b))时,峰后应力应变曲线有明显的直线型转折段,说明岩石在峰后经历了多次张拉脆性破坏。卸荷方案 II 初始围压 30 MPa 时(图 3(b))应力从峰值强度近铅直线直接跌落至残余强度,几乎没有轴向塑性变形产生,具有近似理想脆性应力跌落特征。

3) 作者在文献[16]较详细地分析了 3 种试验方案下岩石变形破坏过程中的侧向应变特征。卸荷过程中侧向应变向外膨胀非常明显且随初始围压增高而增大,临近破坏点和峰后阶段更为剧烈,而且卸荷过程中岩石的扩容现象显著。

4) 卸荷过程中岩石的变形破坏主要是卸荷方向的强烈扩容所致,而非(主)卸荷的方向的变形相对较小。而常规三轴压缩条件下岩石的变形破坏主要是由加载方向的压缩变形所致,高围压时临近峰值点和峰后阶段甚至出现一定的塑性流动现象。

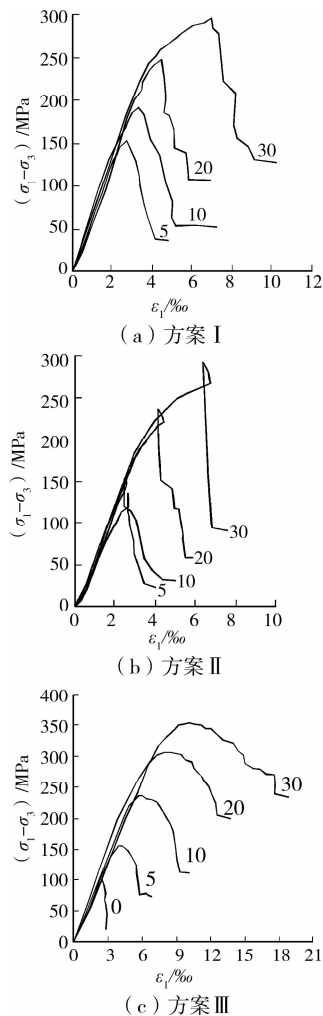


图 2 3 种试验方案中花岗岩典型应力-应变曲线

2.2 典型破裂特征

图 3 为 3 种试验方案中花岗岩样表面典型破裂体系素描展示图,由图可知:

1) 卸荷岩石破裂性质具有较强的张性破裂特征,剪性破裂面往往是追踪张性破裂面发展而成,并沿剪切破裂面发育有较多的近垂直于卸荷方向的轴向张性微裂缝;而在加载试验中,当围压达到一定程度时,岩石基本上表现为剪切破坏,而张性破裂成分很少或没有,张性破裂一般只是在单轴或低围压时才表现明显。

2) 卸荷岩石中往往同时并存有轴向张性裂面 T ,主共轭剪裂面 S_{1a} 和 S_{1b} 及次级共轭剪裂面 S_{2a} , S_{2b} (或剪张裂面 ST 或张剪裂面 TS 及其共轭组)和夹于剪切裂面间的微张性破裂面等。各种级别、各种力学机制的张性破裂十分发育,除轴向主张裂缝及微张性破裂面外,还有追踪张裂缝、顺阶步的滑移拉张裂缝等。与加载试验相比,卸荷岩石破裂特征复杂得多,不但各种级别的张裂隙发育,而且剪性破裂面基本是追随轴向张裂缝剪断岩桥而成,且岩桥处一般发育有一定数量的微小张裂隙,说明在剪断岩桥的过程中卸荷也起到了一定的促进作用。

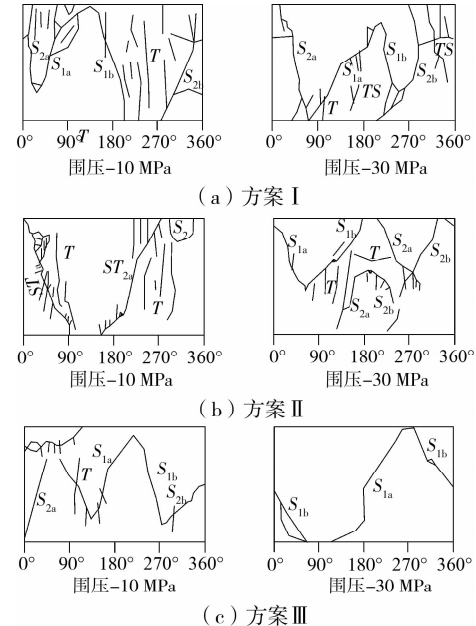


图 3 3 种试验方案中花岗岩典型破裂体系素描展示图

3) 在较低初始围压时,方案 I 中试件张性破裂面较方案 II 多且强烈,正好与较高初始围压时相反,这说明在低初始围压时,方案 I 中试件破坏还是轴向压致拉裂占主导地位。当初始围压较高时,方案 II 岩样在围压 30 MPa 时(图 3(b))出现了环形张拉裂缝,因此当双向卸荷时,岩石在次卸荷方向上也可出现张拉裂隙。

3 应力脆性跌落系数

3.1 试验确定方法

根据文献[2-4]对岩石脆性破坏的相关理论分析,本文在试验研究的基础上,参照文献[2]的相关公式(本文公式(1)和(2))计算应力脆性跌落系数。

下面结合如图 4 所示的脆性比较明显的岩石典型三轴压缩试验全过程应力-应变曲线示意图,对这一方法作简要介绍。应力脆性跌落系数 R 可通过一些特征应变参数确定,

$$R = \frac{b}{a} \quad (1)$$

式中, a 、 b 均为跟应变相关的参数,其中 $a = \epsilon_P - \epsilon_M$ 、 $b = \epsilon_B - \epsilon_P$, ϵ_P 为峰值强度点轴向应变、 ϵ_B 为残余强度点轴向应变、 ϵ_M 为残余强度应力状态值(应力差)所对应的初始弹性加载段应变。理想脆塑性模型即为 $b=0$ 的特殊情形。式(1)表明 R 越小岩石的脆性破坏特征愈强烈。

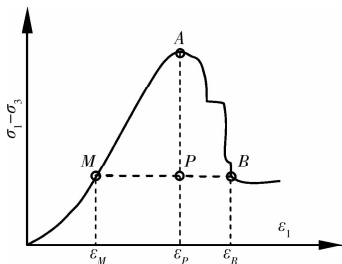


图 4 三轴压缩下脆性岩石的典型应力-应变曲线示意图

在常规三轴压缩试验中,岩石的脆性随围压的升高而逐渐向延性转化。同样在卸荷实验中,岩石的脆性跟初始围压及卸荷方式同样相关。故在相同的应力路径时,岩石的应力脆性跌落系数应该是围压的函数,则式(1)可表示为,

$$R(\sigma_c) = \frac{\epsilon_B(\sigma_c) - \epsilon_P(\sigma_c)}{\epsilon_P(\sigma_c) - \frac{\sigma_r(\sigma_c)}{E}} \quad (2)$$

式中: σ_c 为平均围压,且有 $\sigma_c = (\sigma_2 + \sigma_3)/2$,在常规三轴试验中有 $\sigma_c = \sigma_2 = \sigma_3$,卸荷试验中为初始卸荷围压 $\sigma_c = \sigma_3^0$, $\sigma_r(\sigma_c)$ 为残余强度; E 为弹性阶段的弹性模量。

3.2 特征参数与围压的关系

由式(2)可知,要求得应力脆性跌落系数,应得出 ϵ_P 、 ϵ_B 、 σ_r 与围压 σ_c 的关系。弹性阶段的弹性模量随围压变化会有所不同,但其在全程曲线的初始弹性阶段变化应该不是太大,因此,我们把弹性模量 E 看作一个常量。

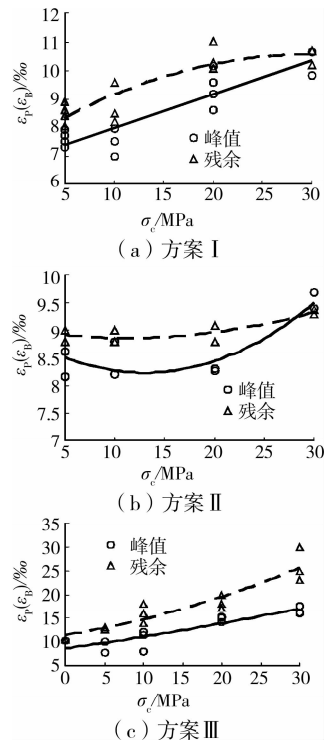


图 5 峰值及残余应变与初始围压关系曲线

根据试验结果,可统计回归特征参数峰值应变 ϵ_P 、残余应变 ϵ_B 及残余强度 σ_r 与围压 σ_c 的关系式,统计回归曲线分别如图 5 和图 6 所示。相应的方案 I—方案 III 的拟合关系式分别如式(3)–(6)所示。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_P &= 0.1186\sigma_c + 6.7968 & R^2 &\approx 0.81 \\ \epsilon_B &= -0.0037\sigma_c^2 + 0.2191\sigma_c + 7.3302 & R^2 &\approx 0.79 \\ \sigma_r &= 0.0345\sigma_c^2 + 3.9465\sigma_c + 27.71 & R^2 &\approx 0.73 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_P &= 0.0044\sigma_c^2 - 0.1143\sigma_c + 8.9723 & R^2 &\approx 0.78 \\ \epsilon_B &= 0.0013\sigma_c^2 - 0.0298\sigma_c + 9.0332 & R^2 &\approx 0.75 \\ \sigma_r &= -0.0302\sigma_c^2 + 2.8925\sigma_c + 16.095 & R^2 &\approx 0.93 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_P &= 0.0015\sigma_c^2 + 0.2361\sigma_c + 8.6045 & R^2 &\approx 0.81 \\ \epsilon_B &= 0.0069\sigma_c^2 + 0.2675\sigma_c + 11.443 & R^2 &\approx 0.87 \\ \sigma_r &= 0.0353\sigma_c^2 + 4.8407\sigma_c + 7.875 & R^2 &\approx 0.94 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从图 5 可发现:1)3 种实验方案的峰值及残余应变基本随(初始)围压的增高而增大;2)方案 II 在围压从 5~10 MPa 间有下降趋势(特别是峰值应变),这是由于在围压 5 MPa 时,围压卸荷至 0 时岩样还没破坏,进行后续为单轴压缩变形,故其轴向应变相对较大;3)卸荷条件下峰值及残余应变与卸荷前累积压缩变形相关,因为从比例极限点开始卸荷前已经产生了较大的轴向压缩变形,而且这种变形随围压增大而增大(见图 2);4)加载试验方案 III 峰值及残余应变随围压增大趋势相对明显,围压从 5~30 MPa,应变增大约 1 倍,而卸荷方案 I 增大约

25%, 方案 II 仅增大约 10%。

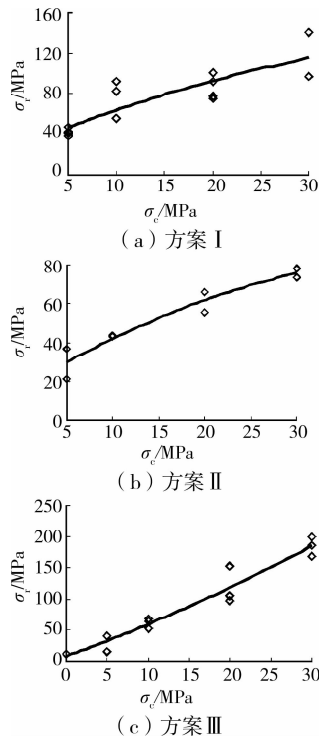


图 6 残余强度与初始围压关系曲线

由图 6 可知: 3 种试验方案残余强度均随初始围压的增大而增大, 特别是加载试验方案 III; 对于卸荷试验, 由于从比例极限开始卸荷, 卸荷破坏点的围压一般是随初始围压增大而增大, 而卸荷终止点围压越高残余强度也相应越高。

3.3 应力脆性跌落系数

将上面回归得到的特征参数与围压的关系式(式(3)~式(5))分别代入式(2), 可以得到 3 种方案下应力脆性跌落系数与围压的关系式:

$$R_I(\sigma_c) = \frac{-37\sigma_c^2 + 1\,005\sigma_c + 533.4}{4.33\sigma_c^2 + 691.08\sigma_c + 64\,492.96} \quad (6)$$

$$R_{II}(\sigma_c) = \frac{-31\sigma_c^2 + 845\sigma_c + 609}{47.79\sigma_c^2 - 1\,505.74\sigma_c + 87\,704.57} \quad (7)$$

$$R_{III}(\sigma_c) = \frac{54\sigma_c^2 + 314\sigma_c + 28\,385}{10.57\sigma_c^2 + 1\,753.94\sigma_c + 85\,057.42} \quad (8)$$

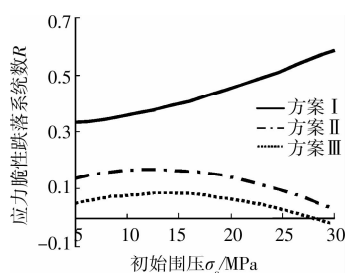


图 7 应力脆性跌落系数 R 随初始围压变化曲线

按回归关系式(6)~(8), 可以画出应力脆性跌落系数与初始围压的关系曲线如图 7 所示, 由图可知: 在常规三轴压缩试验中应力脆性跌落系数随围压的增大而增大, 岩石由脆性逐渐向延性变形转化; 而在卸荷试验中应力脆性跌落系数随初始围压的增大而减小(在初始围压较低时有小量的增加趋势, 这是因为当初始围压较低时, 围压卸荷至 0 时试件可能还没有破坏, 此时试件破坏时实际上仅仅受轴向应力作用的近单轴压缩破坏, 大约在初始围压为 15 MPa 时脆性应力跌落系数减小趋势变得比较明显), 初始围压越高, 脆性破坏愈明显, 岩石的突发性破坏更为显著; 相同初始围压时, 卸荷条件下比加载时的跌落系数小得多, 方案 II 在初始围压达到 30 MPa 时甚至出现负值, 应力脆性跌落系数依次为: $R_{III} > R_I > R_{II}$ 。

4 结 论

1) 当相同初始围压时脆性岩石无论峰前还是峰后的轴向塑性变形, 卸荷条件下均较常规压缩时要小得多, 特别是峰后应力跌落段(高围压条件下卸荷方案 II 峰后应力甚至近似铅垂线下跌), 双向卸荷时峰前轴向应变甚至出现回弹。常规压缩条件下脆性岩石的轴向压缩塑性变形随围压的增大而增大, 由脆性破坏逐渐向延性发展。因此加载条件下岩石的破坏是轴向压缩变形所致, 而卸荷条件下是(主)卸荷的张拉变形或扩容所致。

2) 卸荷条件下脆性岩石的破坏裂缝发育更为复杂, 破裂面具有较强的张性特征, 双向卸荷时, 甚至在次卸荷方向产生环形张拉裂缝, 当破坏围压较高时破裂面剪性特征相对明显, 但剪性裂面一般追踪张性破裂面发展而成, 并沿剪切破裂面发育有较多的轴向张性微裂缝。当围压达到一定程度时常规压缩试验下岩石基本上表现为剪切破坏, 而张性破裂成分很少或没有, 张性破裂一般只是在单轴或低围压时才表现明显。

3) 常规三轴压缩试验时岩石的应力脆性跌落系数随围压的增大而增大, 而在卸荷试验中应力脆性跌落系数随初始围压的增大而减小, 初始围压越高, 脆性破坏愈明显。相同初始围压时, 卸荷条件下比加载时的跌落系数小得多, 方案 II 在初始围压达到 30 MPa 时甚至出现负值, 应力脆性跌落系数依次为: $R_{III} > R_I > R_{II}$ 。

参考文献:

[1] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Fracture

- toughness study for a brittle rock subjected to mixed mode I/II loading [J]. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 2007, 44(4): 617-624.
- [2] 史贵才, 葛修润, 卢允德. 大理岩应力脆性跌落系数的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1625-1631.
SHI GUI-CAI, GE XIU-RUN, LU YUN-DE. Experimental Study on Coefficients of Brittle Stress Drop of Marble [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1625-1631.
- [3] GE XIU-RUN. Post failure behavior and a brittle-plastic model of brittle rock [C]//In: *Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Rotterdam; A. A. Balkema, 1997, 151-160.
- [4] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(1): 8-21.
ZHENG HONG, GE XIU-RUN, LI C F. Analysis principle for rock mass with brittle-plasticity and its applications [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(1): 8-12.
- [5] 潘一山, 魏建明. 岩石材料应变软化尺寸效应的试验和理论研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2): 215-218.
PAN YI-SHAN, WEI JIAN-MING. Experimental and theoretical studies on size effect on strain softening of rock materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 215-218.
- [6] 王学滨, 潘一山, 杨小彬. 准脆性材料试件应变软化尺度效应理论研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 188-191.
WANG XUE-BIN, PAN YI-SHAN, YANG XIAO-BIN. Size effect analysis of strain softening of quasi-brittle materials considering strain gradient effect [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 188-191.
- [7] 朱珍德, 徐卫亚, 张爱军. 脆性岩石损伤断裂机理分析与试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1411-1416.
ZHU ZHEN-DE, XU WEI-YA, ZHANG AI-JUN. Mechanism analysis and testing study on damage and fracture of brittle rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1411-1416.
- [8] ZHOU X P, YANG H Q. Micromechanical modeling of dynamic compressive responses of mesoscopic heterogenous brittle rock [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2007, 48(1): 1-20.
- [9] P GANNE, A VERVOORT, M WEVERS. Quantification of pre-peak brittle damage: Correlation between acoustic emission and observed micro-fracturing [J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, 4(5): 720-729
- [10] V HAJIABDOLMAJID, P K KAISER, C D MARTIN. Modelling brittle failure of rock [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39(6): 731-741.
- [11] RAOUL COSTAMAGNA, JÖRG RENNER, OTTO T BRUHNS. Relationship between fracture and friction for brittle rocks [J]. *Mechanics of Materials*, 2007, 39(4): 291-301
- [12] NOËL CHALLAMEL, CHRISTOPHE LANOS, CHARLES CASANDJIAN. Creep damage modelling for quasi-brittle materials [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2005, 24(4): 593-613
- [13] A GOLSHANI, M ODA, Y OKUI, et al. Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2007, 44(6): 835-845
- [14] WANG ZHI-LIANG, LI YONG-CHI, SHEN R F. Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion [J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, 44(5): 730-738
- [15] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 114.
HA QIU-LING. Loading and unloading rock masses mechanics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 114.
- [16] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2205-2213.
HUANG RUN-QIU, HUANG DA. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2205-2213.

(编辑 王秀玲)