**文章编号**：1000－7598－(2008) 08－2137－07

# 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究

朱泽奇，盛 谦，张占荣

（中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，武汉 430071）

**摘 要**：进行了三峡花岗岩常规三轴压缩、保持轴向应变和保持轴向应力的卸围压试验，研究了脆性岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下的侧向变形特征，可见临界侧向应变均稳定在（–0.004±0.000 5）范围内。进一步进行三峡花岗岩的全过程应力-应变曲线和损伤力学分析，发现脆性岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下均以侧向损伤为主，且侧向损伤曲线的形态近似，达到临界破坏状态时损伤值稳定在 0.7~0.8 左右。最后以侧向损伤变量表征花岗岩脆性破坏过程，建立了基于应变空间的、可以考虑卸荷应力路径的损伤模型和应变型破坏准则。

**关 键 词**：三峡花岗岩；卸围压试验；侧向应变；破坏准则；损伤模型

**中图分类号**：TU 45 **文献标识码**：A

# Study on lateral deformational characteristics and damage mechanism of brittle rock

ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Zhan-rong

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** For the Three Gorges granite specimens, the conventional triaxial compression and the confining pressure reduction test under constant axial strain and stress are carried out. The lateral deformational characteristics of brittle rock under different stress paths or different loading control modes are studied; and it is found that the critical lateral strains are always in the range of –0.004 5 and –0.003 5. Based on the analysis of the complete stress-strain curves and the damage mechanism of the Three Gorges granite, it is put forward that the brittle rock mainly occurs lateral damage and exhibits the similar damage evolutionary rule under different stress paths and loading control modes; and the critical failure generally occurs at a damage variable level of 0.7 to 0.8. Finally, a damage model considering the unloading effect and a failure criterion in strain space are established, in which the lateral damage variable is seen as a critical variable.

**Key words:** Three Gorges granite; confining pressure reduction test; lateral strain; failure criteria; damage model

## 1 引 言

在轴向压缩破坏过程中，岩石侧向变形（或环向变形）从另一个角度反映了岩样的屈服、破坏特征，然而，由于试验及理论的限制，关于岩石侧向变形特征的研究还很不成熟。在试验研究方面，有关文献经常提到岩石在弹性阶段或峰值强度后的侧向变形曲线[1−6]，理论上，众多文献仅停留在利用广义虎克定律分析岩样弹性阶段的均匀侧向变形，文献[7]基于梯度塑性理论研究了岩石在应变软化阶段的侧向变形特征。在实际工程应用中研究岩土体侧向变形规律，对基坑工程侧向变形控制、巷道围岩注浆加固等也有一定的指导意义[8, 9]，但岩体破坏前经历的应力状态复杂多变，如大规模的边坡或地下硐室开挖就相当于岩体在轴向或侧向进行卸载，故对于卸荷应力路径下的侧向变形研究同样具有重要的工程意义，但目前为止有关这方面的报道主要集中在室内试验阶段[10, 11]。

本次进行了三峡花岗岩常规三轴压缩、保持轴向变形和保持轴向应力的卸围压试验，研究了脆性

收稿日期：2007-12-11
基金项目：国家自然科学基金重大研究计划重点项目（No.90715042）；国家自然科学基金面上项目（No.50579071）资助。
作者简介：朱泽奇，男，1980 年生，博士研究生，2002 年毕业于西安交通大学土木工程专业，主要从事数值岩石力学与工程方面研究。E-mail: zhuzeqi2005@tom.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下的侧向变形特征。以侧向损伤变量表征花岗岩脆性破坏过程，建立了基于应变空间的、考虑卸荷应力路径的损伤模型和应变型破坏准则。

## 2 试验设备和试样

常规三轴试验和卸围压试验在中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS815.03 电伺服岩石力学试验机上进行。岩样的轴向变形采用 LVDT 位移传感器量测，而侧向变形是通过卡套在其中部的环状链条伸长来量测。

花岗岩岩样取自三峡地下厂房区，其矿物组成为黑云母 20 %，石英 25 %，长石 45 %，透闪石 5 %。岩样按照国际岩石力学学会的建议方法和岩石力学试样规范，加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体标准试样。

## 3 临界侧向应变

### 3.1 常规三轴试验

试验采用应变控制方式施加轴向压力，加载速率为 $1.0\times10^{-5}$ s，围压为 0~40 MPa。图 1 为试验中得到的花岗岩三轴压缩应力-应变全过程曲线（曲线上数字为施加的围压）。

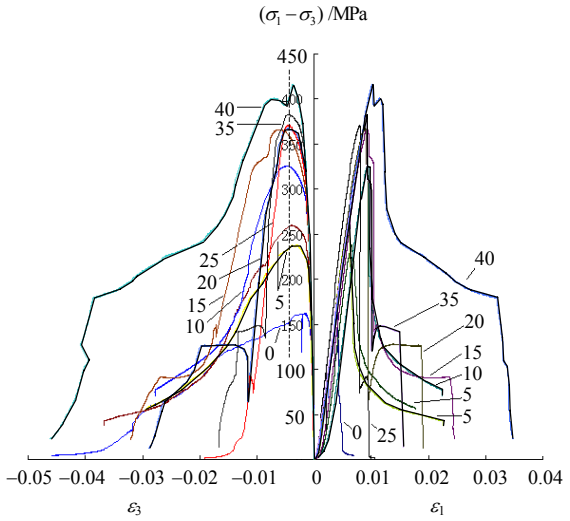



**图 1 常规三轴试验应力-应变全过程曲线（单位：MPa）**
**Fig.1 Conventional complete stress-strain curves in trixial test (unit: MPa)**

测试结果表明，岩样达到峰值应力后轴向应力陡峻跌落至稳定残余值，继后缓慢衰减，表现为典型的理想弹脆塑性。随着围压的升高，峰值强度和残余强度都有相应的提高，并且呈现一定的规律性。

将全过程应力-应变曲线中峰值应力处的应力状态视为一种临界状态，图 2 为围压与临界轴向应变和临界侧向应变的关系。图 1 中部分岩样的偏应力与轴向应变曲线存在明显的压密段，为了考察临界轴向应变与围压的关系，本文从这些岩样峰值应力对应的轴向变形中减去了相应压密段的轴向变形量，得到图 2 中的临界轴向应变。从图 2 可直观地看出，随围压升高，岩样的轴向变形呈线性增加，而临界侧向应变不受围压影响，对于三峡花岗岩其量值保持在（–0.00 4±0.000 5）范围内。

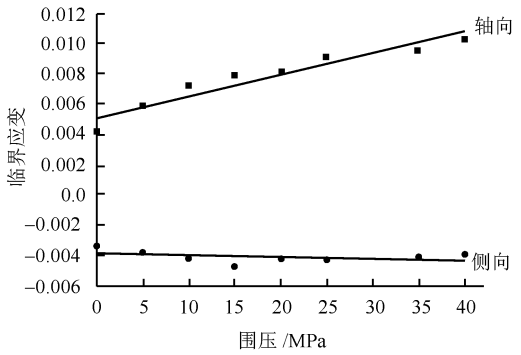



**图 2 临界应变与围压的关系**
**Fig.2 Relations between critical strains and confining pressures in trixial test**

### 3.2 保持轴向变形的卸围压试验

在卸围压试验中，有的是在保持轴向应力的同时降低围压[11, 12]，有的是在增加轴向应力的同时降低围压[13]，这类以应力作为控制参数的试验，试验机必须对岩样一直进行轴向压缩，不过保持轴向应力或增加轴向应力在岩样的破坏过程中是不可能实现的，岩样最终都会由于围压的降低而不能承受轴向载荷，发生崩溃式破坏，因此以应力作为控制参数的卸荷试验难以了解岩样峰后变形、破坏的全过程。另一方面，岩体工程中如果一个方向的应力降低，岩石产生屈服破坏后，通常应力状态会发生调整，建立新的平衡，也就是说，一个方向应力降低之后，其他方向的应力也会相应降低，而不是增加或者保持不变[6]。

鉴于此，为了考察卸荷应力路径下的侧向变形特征，在 MTS815.03 电伺服试验机上进行了保持轴向变形恒定的卸围压试验，共进行了 4 块岩样的测试。试验采用应变控制方式施加轴向压力，轴向加载速率为 $1.0\times10^{-5}$ s$^{-1}$，卸围压速率为 3 MPa/min。试验程序：先按静水压力条件施加轴压和围压，然后增加轴向应力至预定值（一般取同类岩样相同围压下抗压强度的 0.7~0.8），最后保持轴向变形降低围压至岩样破坏。图 3 为花岗岩轴向加载阶段和卸围压阶段应力-应变全过程曲线。可以看出，保持轴

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向变形的卸围压过程中，岩样变形表现为沿卸荷方向的强烈扩容或膨胀，其侧向变形曲线在卸围压的初始阶段有一个线性段，并且在不同围压下 $\varepsilon_3$ 的斜率基本上是相等的，这可以用广义虎克弹性理论来解释。经过弹性卸载阶段后轴压开始快速降低，直至岩样完全破坏。

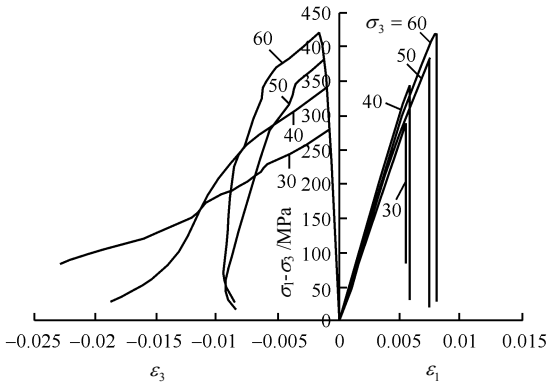



**图 3　保持轴向变形卸围压试验应力-应变全过程曲线（单位：MPa）**

**Fig.3　Complete stress-strain curves in confining pressure reduction test under constant axial strain (unit: MPa)**

为了确定卸围压过程的临界破坏状态，图 4 为三峡花岗岩卸围压过程中偏应力-围压关系曲线，由图可知，在卸围压初期轴压随围压降低而降低，二者近似呈线性关系。随着侧向变形的发展，岩石达到临界破坏状态，此时继续卸载围压，则岩石会快速进入破坏后区的应变软化或应力跌落阶段，应力跌落现象越明显，则说明岩石脆性破坏特征越明显。

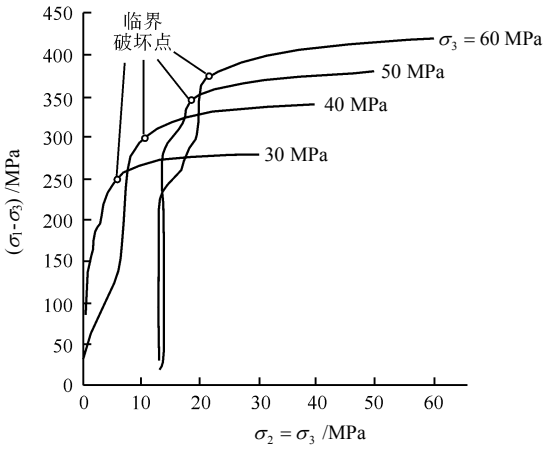



**图 4　卸围压过程轴向应力-围压关系**

**Fig.4　Differential stress-confining pressure curves in confining pressure reduction test under constant axial strain**

根据图 4 中轴压与围压关系曲线，将其弹性段和应力跌落段之间的拐点近似定义为临界破坏点。从图 3 的应力-应变曲线中找到临界破坏点对应的侧向应变，即花岗岩卸围压破坏的临界侧向应变。图 5 为临界侧向应变及相对应的轴向应变与破坏时围压的关系。当达到卸围压的临界破坏状态时，其侧向变形不受施加围压的影响，且在量值上与常规三轴试验的临界侧向应变非常一致，即保持在（–0.00 4±0.000 5）范围内。

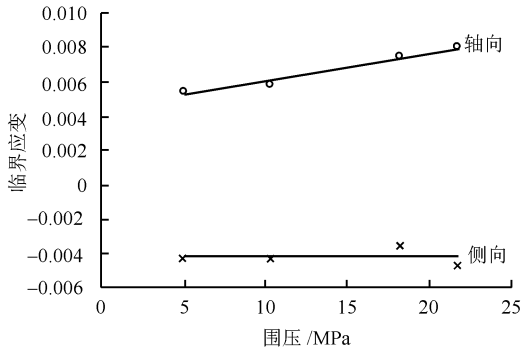



**图 5　临界应变与围压的关系**

**Fig.5　Relations between critical strains and confining pressure in confining pressure reduction test under constant axial strain**

### 3.3　保持轴向应力的卸围压试验

进一步研究以应力作为控制参数的卸围压试验，如前所述，岩体工程中一个方向应力降低之后，其他方向的应力也相应降低，所以这里的卸围压试验以应力差为控制参数，即在卸围压过程中总是保持最大与最小两个主方向上应力差（$\sigma_1-\sigma_3$）不变，那么，在卸围压过程中岩样上的轴向应力与围压是同步降低的。为了方便表述，本文称本次试验为保持轴向应力的卸围压试验。

试验在 MTS815.03 电伺服试验机上完成，共进行了 4 块岩样的测试。为了方便比较，试验程序和岩样卸载时的应力水平与 3.2 节一样，不同的是采用应力差作为控制参数。图 6 为试验得到的花岗岩轴向加载阶段和卸围压阶段应力-应变全过程曲线。可以看出，保持应力差（$\sigma_1-\sigma_3$）不变开始卸围压，对岩样持续压缩，所引起的轴向变形很小，而侧向变形则发展迅速。当围压降低到某个范围时，轴向应力急剧下降，岩石迅速发生了脆断，表明保持轴向应力的卸围压试验使岩样更具脆性。曲线上的数据采集点也可以说明这种卸围压试验引起的破坏是非常强烈和突然的，属于典型的脆性破坏。因此，将脆性破坏前的应力状态视为临界破坏状态，图 7 为临界侧向应变及相对应的轴向应变与破坏时围压的关系。可以看出，当达到卸围压的临界破坏

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

状态时，其侧向变形基本上也不受施加围压的影响，且在量值上也与常规三轴试验的临界侧向应变保持一致，即保持在（–0.004±0.000 5）范围内。

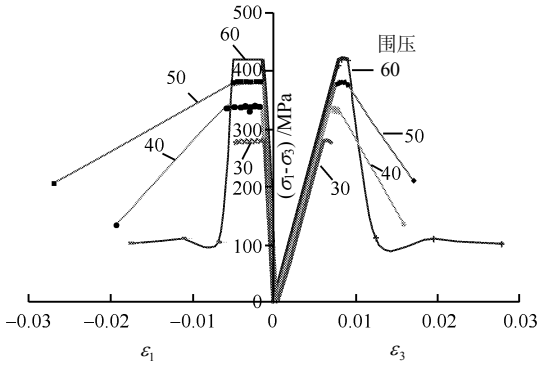



**图 6 保持轴向应力卸围压试验应力-应变全过程曲线**

**（单位：MPa）**

**Fig.6 Complete stress-strain curves in confining pressure reduction test under constant axial stress (unit: MPa)**

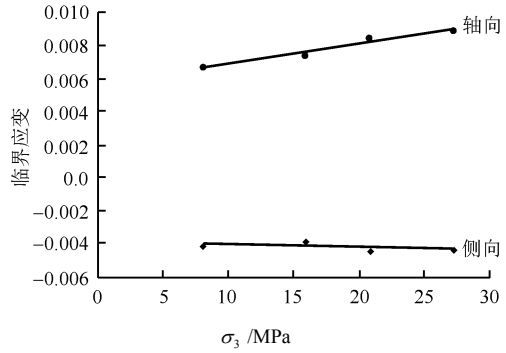



**图 7 临界应变与围压的关系**

**Fig.7 Relations between critical strains and confining pressures in confining pressure reduction test under constant axial stress**

另外，需要对本文中的临界破坏状态进行说明，对于脆性岩石，有时将轴向应力发生脆性跌落前的状态视为临界破坏状态，如常规加载试验（图 1）和保持轴向变形的卸围压试验（图 4）。有时又将岩石发生脆断前的状态视为临界破坏状态（图 6），这是因为岩石因加载路径和围压的不同，其破坏方式和性质也不同，提出临界破坏状态只是为了对岩石破坏过程进行简化，即认为临界破坏状态之前岩石处在弹性状态，之后岩石处于塑性屈服状态或直接发生脆性破坏。但是，这里的弹性状态是广义的，并不局限于线弹性，比如常规三轴试验应力-应变全过程曲线峰前的弯曲段（图 1）和卸围压试验偏应力-围压关系曲线中临界破坏点前的弯曲段（图 4）都可以视为非线性弹性状态。

### 3.4 其他岩石的临界侧向应变

文献[14]在真三轴试验机上，针对拉西瓦花岗岩在一种应力路径下进行了测试，其应力路径为：加载$\sigma_1$、$\sigma_2$、$\sigma_3$至初始地应力水平，然后保持$\sigma_1$、$\sigma_2$不变，卸载$\sigma_3$至 0，最后加载$\sigma_1$至试样破坏。共测试了 8 块岩样，本文对其破坏时的侧向应变（最小主应变）和轴向应变（最大主应变）进行了统计，发现除了 2#岩样，其他岩样的临界侧向应变均分布在（–0.003±0.000 5）之间，图 8 为文献[12]中临界应变与中间主应力$\sigma_2$的关系曲线。

文献[15]针对Kamisunagawa砂岩、Kimachi砂岩和Shinkomatsu andesite花岗岩、lnada花岗岩（图9）进行了一系列三轴测试，研究了不同岩样临界应变与围压的关系。结果表明，一般脆性岩石多具有与三峡花岗岩类似的临界破坏特征，只是由于岩性不同，侧向应变的临界值大小不同。

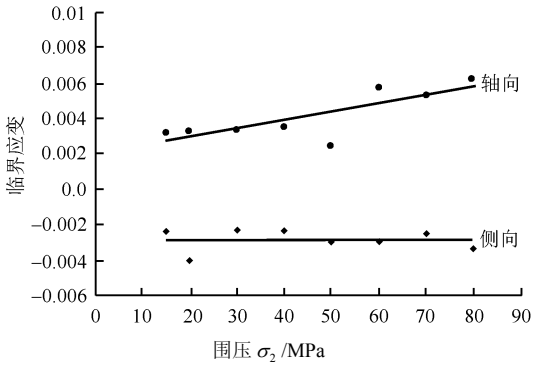



**图 8 临界应变与围压的关系[14]**

**Fig.8 Relations between critical strains and confining pressures in true triaxial experiment[14]**

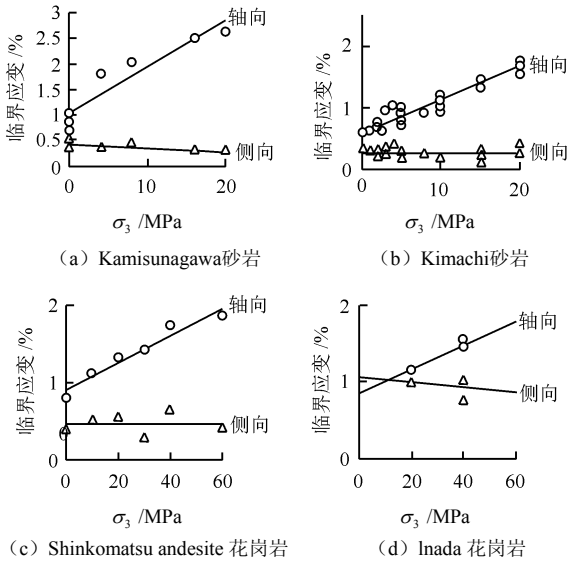



**图 9 临界应变与围压的关系[15]**

**Fig.9 Relations between critical strains and confining pressures in triaxial test[15]**

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

# 4　侧向变形特征的损伤分析

## 4.1　岩石损伤演化概念

损伤是指在外载和环境作用下，由于细观结构的缺陷（如微裂纹、微孔洞等）引起的材料或结构的劣化过程。以常规三轴试验（图1）为例，在达到临界破坏之前，其侧向应变并不总是满足虎克定理的。引入损伤力学的概念，岩石的侧向变形规律可这样描述：当侧向应变小于某个门槛值时，岩石的变形属线弹性，材料无损；当超过该门槛值时，材料受到损伤，其变形参数逐渐劣变；当侧向应变达到临界值，则岩石开始进入破坏后区，发生应变软化或应力跌落甚至脆断现象。

建立损伤变量与弹性模量之间的关系，有

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{I} - \boldsymbol{D}^{*}\boldsymbol{D}^{-1} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{\omega}$ 为三维损伤张量；$\mathbf{I}$ 为单位矩阵；$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{D}^{*}$ 分别为弹性阵和等效弹性阵。

$\omega_i$（$i=1$，2，3）代表主方向的损伤变量，量值范围在 0~1 之间，假定 3 个主方向的损伤变量相互独立，其损伤演化方程为[16]

$$\left.\begin{aligned} &\omega_i = 0, \quad \varepsilon_i \leqslant \varepsilon_0 \\ &\omega_i = f(\varepsilon_i), \quad \varepsilon_0 < \varepsilon_i \leqslant \varepsilon_{\mathrm{c}}, \ (i=1,2,3) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：$\varepsilon_i$ 为主方向的主应变；$\varepsilon_0$ 为初裂应变；$\varepsilon_{\mathrm{c}}$ 为临界应变。

## 4.2　损伤机理研究

为了研究脆性岩石内部损伤机理，本文引入裂纹应变的概念[16–18]，假设岩石的应变由两部分组成，分别为弹性应变和裂纹应变，即

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^{\mathrm{e}} + \varepsilon_1^{\mathrm{f}}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_3^{\mathrm{e}} + \varepsilon_3^{\mathrm{f}} \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_1$、$\varepsilon_3$ 分别为轴向应变和侧向应变；$\varepsilon_1^{\mathrm{e}}$、$\varepsilon_3^{\mathrm{e}}$ 分别为轴向和侧向的弹性应变；$\varepsilon_1^{\mathrm{f}}$、$\varepsilon_3^{\mathrm{f}}$ 分别为由于裂纹扩展在轴向和侧向引起的应变。

$\varepsilon_1^{\mathrm{e}}$、$\varepsilon_3^{\mathrm{e}}$ 可利用广义虎克定理求得，即从实测应变中减去弹性应变即可得到裂纹应变，由损伤变量的定义：

$$\omega_1 = \mathrm{d}\varepsilon_1^{\mathrm{f}} / \mathrm{d}\varepsilon_1; \quad \omega_3 = \mathrm{d}\varepsilon_3^{\mathrm{f}} / \mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{4}$$

图 10 为常规三轴测试中 $\omega_1$-$\varepsilon_1$ 和 $\omega_3$-$\varepsilon_3$ 的关系曲线，为了方便比较，图中仅给出围压为 20 MPa 下的损伤过程曲线。由图可以看出，裂纹应变主要向侧向发生，达到临界破坏状态时，其损伤变量值达到 0.7~0.8，与侧向相比，岩石在轴向的损伤程度很低，其损伤变量值最大只有 0.1 左右，说明造成脆性岩石破坏的主要原因是裂纹扩展引起的侧向损伤。

根据对图 10 的分析，本文假设 $\varepsilon_1$ 方向仅产生弹性应变，即忽略不计岩石轴向的脆性损伤。图 11 为三轴测试中不同围压下的 $\omega_3$-$\varepsilon_3$ 曲线（图中数字为加载阶段施加的围压），发现其损伤曲线形态，损伤的门槛值和临界值几乎都不受围压影响，这就提示：如果从应变空间来描述脆性岩石的损伤破坏，其损伤演化方程、初裂准则和破坏准则根据图 11 很容易就确定下来，并且这样建立的损伤模型物理意义简单明了，又可以体现脆性岩石的侧向变形特征。

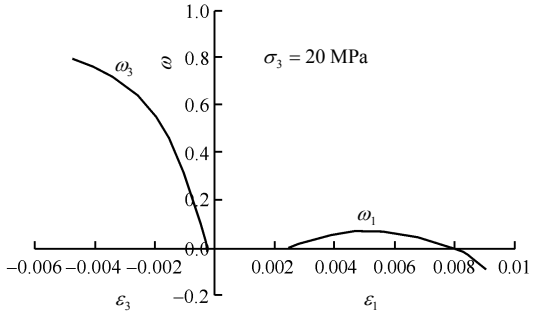



**图10　三轴试验损伤过程曲线**
**Fig.10　Damage curves under confining pressure 20 MPa in trixial test**

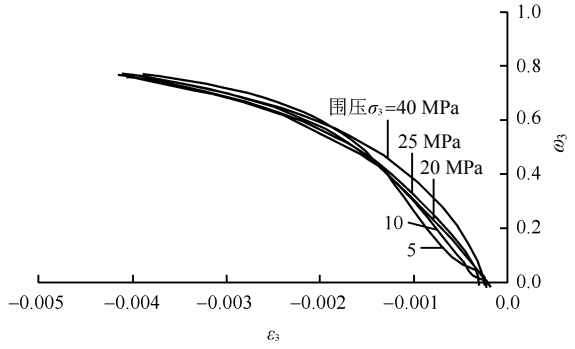



**图 11　$\omega_3$-$\varepsilon_3$ 关系曲线（单位：MPa）**
**Fig.11　Damage variable vs. lateral strain under various confining pressures in trixial test (unit: MPa)**

在拟合损伤演化方程时，实际上根据前面针对临界侧向应变的分析，可以确定岩石的应变型破坏准则，由于临界侧向应变对于加载条件的不敏感性，所以建立如下的破坏准则（式（5））既简单，又有很强的实用性。同时应该指出，这里的破坏准则主要针对临界破坏状态，并不涉及岩石狭义的破坏：

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{\mathrm{c}} = -4\times10^{-3} \tag{5}$$

利用图 11 的 $\omega_3$-$\varepsilon_3$ 曲线进行回归拟和分析，可近似确定岩石三轴压缩条件下的损伤演化方程：

当 $\varepsilon_3 \geqslant -2.5\times10^{-4}$，有

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\omega_3 = 0 \qquad (6)$$

当 $-2.5\times10^{-4} > \varepsilon_3 \geqslant -4\times10^{-3}$，有

$$\omega_3 = 0.645\lg(-\varepsilon_3) + 2.32 \qquad (7)$$

继续考察卸围压试验的损伤规律，同样以式（4）建立的轴向和侧向损伤变量来研究轴向加载-卸围压全过程的损伤规律。图 12 和图 13 分别为保持轴向变形和保持轴向应力卸围压试验的 $\omega_1$-$\varepsilon_1$ 和 $\omega_3$-$\varepsilon_3$ 的关系曲线，为了方便比较，图中仅给出部分围压下的损伤过程曲线。由图 12 和图 13 可以看出，临界破坏状态时侧向损伤变量值达到 0.7～0.8 左右，与侧向相比，岩石在轴向的损伤程度较低，其损伤变量值在 0.1~0.3 范围内。综合分析图 10 图 12 及图 13 可以发现，不同应力路径和不同加载控制方式下的侧向损伤曲线形态近似，与常规三轴试验不同的是卸围压试验的轴向损伤较大，且轴向损伤演化规律也各不相同，但一般不超过侧向损伤的 1/3，这就说明卸围压试验同样以侧向损伤为主，如果忽略轴向损伤，则脆性岩石的加载破坏和卸围压破坏的微观机理是一致的，统一于裂纹扩展引起的侧向膨胀（损伤）。

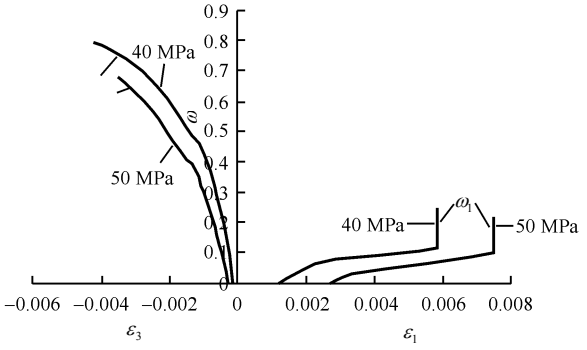



**图 12 保持轴向变形卸围压试验损伤过程曲线**

**Fig.12 Damage curves in confining pressure reduction test under constant axial strain**

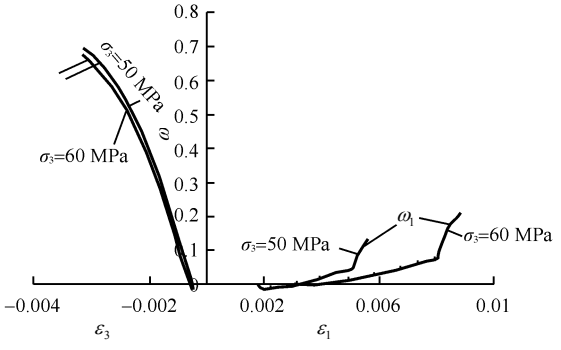



**图 13 保持轴向应力卸围压试验损伤过程曲线**

**Fig.13 Damage curves in confining pressure reduction test under constant axial stress**

为了方便比较，图 14 为 3 种试验的全过程损伤曲线，且这 3 条曲线在加载阶段所施加的围压均为 40 MPa。从图 14 可以清楚看出，基于同种加载控制方式的不同应力路径试验，其侧向损伤曲线非常接近，尽管保持轴向变形的卸围压损伤曲线在加载段和卸围压段有较为明显的过渡段存在，但并不影响其整体的曲线形态，其门槛值、临界值和损伤演化规律都比较符合式（5）~（7）建立的起裂准则、临界破坏准则和损伤演化方程。比较不同加载控制方式下的损伤曲线可以发现，以应力作为控制参数的损伤曲线与前述两条差别较大，这种差别在加载阶段就已经显示出来。

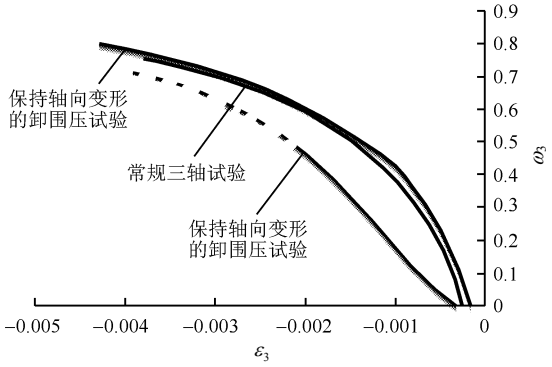



**图 14 损伤过程曲线对比**

**Fig.14 Comparison of damage curves from different tests**

## 5 结 论

本文以三峡花岗岩为例，通过不同的测试手段，研究了脆性岩石侧向变形特征，得到以下结论：

（1）比较常规三轴试验与卸围压试验发现，两种试验中临界侧向应变的量值非常一致，说明临界侧向应变表征脆性岩石破坏可以适用于不同应力路径。

（2）通过分析三峡花岗岩的全过程应力-应变曲线和损伤力学发现，脆性岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下均以侧向损伤为主，达到临界破坏时损伤值稳定在 0.7～0.8 左右，说明了裂纹应变在侧向的发展是导致脆性岩石破坏的主要原因。相对来说轴向损伤较小，但轴向损伤演化规律的不同却是造成不同变形破坏形式的主要原因。

（3）以应变作为控制参数的损伤曲线几乎不受加载路径的影响，轴向加载破坏与卸围压破坏可以建立统一的损伤演化方程；以应力作为控制参数的损伤曲线与前者差别较大，这种差别在加载阶段就已经显示出来。

（4）以侧向损伤变量表征花岗岩脆性破坏过

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程，可以建立基于应变空间的，考虑卸荷应力路径的损伤模型和应变型破坏准则。

## 参 考 文 献


[1] 陈颙. 地壳岩石力学的性能[M]. 北京：地震出版社，1988: 158－160.

[2] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36: 279－289.

[3] JANSEN D C, SHAH S P, ROSSOW E C. Stress-strain results of concrete from circumferential strain feedback control testing[J]. **ACI Materials Journal**, 1995, 92(4): 419－428.

[4] LEE Y H, WILLAM K. Mechanical properties of concrete in uniaxial compression[J]. **ACI Materials Journal**, 1997, 94(6): 457－471.

[5] 徐志伟，殷宗泽. 粉砂侧向变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19（5）：626－629.
XU Zhi-wei, YIN Zhong-ze. Study on deformation characteristic of silt by true triaxial test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 626－629.

[6] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京：地质出版社，2000.

[7] 王学滨，马剑，刘杰，等. 基于梯度塑性本构理论的岩样侧向变形分析（I）：基本理论及本构参数对侧向变形的影响[J]. 岩土力学，2004，25（6）：904－908.
WANG Xue-bin, MA Jian, LIU Jie, et al. Analysis of lateral deformation of rock specimen based on gradient-dependent plasticity(I): basic theory and effect of constitutive parameters on lateral deformation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 904－908.

[8] 刘兴旺，施祖元，益德清. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报，1999，21（4）：456－460.
LIU Xing-wang, SHI Zu-yuan, YI De-qing. Deformation characteristics analysis of braced excavation on soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(4): 456－460.

[9] 张农，侯朝炯，陈庆敏. 岩石破坏后的注浆固结体的力学性能[J]. 岩土力学，1998，19（3）：49－53.
ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, CHEN Qin-min. Mechanical properties of broken rock after grouting reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(3): 49－53.

[10] 陶履彬，夏才初，陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报，1998，26（3）：330－334.
TAO Lu-bing, XIA Cai-chu, LU Yi-ming. Experimental studies on the total course behaviour of unloading of granite on Three Gorges Project of the Yangtze River[J]. **Journal of Tongji University**, 1998, 26(3): 330－334.

[11] 高春玉，徐进. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24（3）：456－460.
GAO Chun-yu, XU Jin. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456－460.

[12] 沈明荣，石振明，张雷. 不同加载路径对岩石变形特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22（8）：1 234－1 238.
SHEN Ming-rong, SHI Zhen-ming, ZHANG Lei. Deformation properties of samples under different loading paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(8): 1 234－1 238.

[13] 李天斌，王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，1993，12（4）：321－327.
LI Tian-bin, WANG Lan-sheng. An experimental study on deformation and failure features of a basalt under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(4): 321－327.

[14] 陈景涛，冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25（8）：1 537－1 543.
CHEN Jing-tao, FENG Xia-ting. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1 537－1 543.

[15] FUJII Y, KIYAMA T, ISHIJIMA Y. ‘Condition insensitive damage indicator’ for brittle rock[J] **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34: 3－4.

[16] 谢红强，何江达，徐进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报，2003，25（3）：336－338.
XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, XU Jin. Deformation characterstics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 336－338.

[17] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet Granite[J]. **International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 643－659.

[18] 赵明阶，许锡宾，徐蓉. 岩石在三轴加卸载过程中的一种本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21（5）：626－631.
ZHAO Ming-jie, XU Xi-bin, XU Rong. Constitutive model of rock under triaxial loading and unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 626－631.


© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net