

文章编号:1672-9331(2018)04-0073-07

## 基于三轴压缩数值试验的岩石损伤特性

蒋中明<sup>1,2</sup>, 秦双专<sup>1</sup>, 唐 栋<sup>1</sup>, 胡 炜<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治  
湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为研究岩石的损伤特性, 基于连续损伤力学理论和岩石微元强度服从 Weibull 分布函数, 利用 FLAC3D 有限差分数值模拟软件, 在围压分别为 3, 6, 10 MPa 的情况下, 对岩石进行了不同变形参数( $E$  和  $\mu$ ) 和强度参数( $c$  和  $\varphi$ ) 的常规三轴压缩数值试验研究。数值试验结果表明, ①在加载初期, 岩石出现负损伤(压密强化效应), 随着轴向应力的增大, 割线模量减小, 泊松比增大; ②黏聚力或内摩擦角或围压越大, 岩石抗压强度越高, 岩石变形过程中的塑性变形阶段越长; ③损伤起点对应的轴向应变不随强度参数( $c$  和  $\varphi$ ) 的变化而变化, 但随计算初始弹性模量的增大而减小, 随围压的增大而增大; ④泊松比对岩石力学特性和损伤特性影响甚少, 可忽略不计。

**关键词:** 岩石; 损伤特性; FLAC3D 数值软件; 围压; 变形参数; 强度参数; 常规三轴压缩数值试验  
**中图分类号:** TU45 **文献标识码:** A

## Rock damage characteristic based on triaxial compression numerical experiment

JIANG Zhong-ming<sup>1,2</sup>, QIN Shuang-zhuan<sup>1</sup>, TANG Dong<sup>1</sup>, HU Wei<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology,  
Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and  
Water Disaster prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The study of rock whose the damage characteristic is carried out on the basis of the theory of continuum damage mechanics and rock infinitesimal strength obeys Weibull distribution function. The conventional triaxial numerical experiment under different deformation parameters ( $E, \mu$ ) and strength parameters ( $c, \varphi$ ) and confining pressure which is respectively 3/6/10 MPa are carried out for the rock by using FLAC3D finite different numerical simulation software. The results of numerical experiment show that: ①In the initial stage of loading, the rock shows negative damage(compaction reinforcement effect). With the increase of the axial stress, the cutting modulus decreases and Poisson's ratio increases. ②The higher the cohesion or internal friction angle or confining pressure is, the higher the compressive strength of rock is, and the longer the plastic deformation stage is during rock deformation. ③The axial strain corresponding to the starting point of damage does not change with the change of the intensity parameters ( $c, \varphi$ ), but decreases with the increase of the calculated initial elastic modulus and increases with the increase of confining pressure. ④Poisson's ratio has little influence on the mechanical properties and damage characteristics

收稿日期:2018-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778070)

通讯作者:蒋中明(1969—),男,重庆人,长沙理工大学教授,博士生导师,主要从事岩土工程稳定性理论与数值分析方面的研究。E-mail:zzmmjiang@163.com

of rocks, and is negligible.

**Key words:** rock; damage characteristic; FLAC3D numerical software; confining pressure; deformation parameters; strength parameters; conventional triaxial numerical experiment

岩石是一种含有节理、微裂隙和孔隙等缺陷的材料。在外在荷载及环境因素的作用下,会造成原有节理、微裂隙和孔隙的进一步扩大,并伴随新裂隙和裂纹的产生。裂隙的扩展及新裂隙的生成对岩石产生不同程度的损伤作用。岩石损伤特性的研究主要有理论分析、物理试验和数值试验等方法。许多学者对岩石的损伤特性开展了三轴压缩试验研究<sup>[1-5]</sup>,如:张治亮等<sup>[1]</sup>对向家坝水电站的砂岩进行了不同围压下的常规三轴压缩试验研究,并对岩石变形和破坏机制进行了研究,结果显示,随着偏应力的增加,岩石弹性模量减少,泊松比增大;Ma Lin-jian 等<sup>[2]</sup>和李鹏飞等<sup>[3]</sup>通过循环三轴试验分别对岩石的变形参数和强度参数随循环荷载的变化规律进行了研究;李鹏飞等<sup>[3]</sup>以塑性剪切应变为塑性参数,建立了北山花岗岩黏聚力、内摩擦角和剪胀角随塑性参数变化的数学模型;王者超等<sup>[4]</sup>对花岗岩进行了循环荷载试验,研究了花岗岩的疲劳力学特性,并提出了疲劳力学模型;冯春林等<sup>[5]</sup>通过对白砂岩进行不同加载水平下的循环三轴试验,研究了白砂岩疲劳破坏过程中的疲劳特性、轴向应变的累积规律,轴向不可逆变形的发展规律和应变速率与循环次数的关系。

在岩石损伤特性三轴压缩数值试验研究方面,贾善坡等<sup>[6]</sup>指出,通过三轴压缩试验并结合相应的数值模拟研究,可以模拟岩石在三轴应力状态下破损演化的全过程;王嵩等<sup>[7]</sup>基于 Lemaitre 的应变等效假说和 Mohr-Coulomb 强度理论,构建了岩石的变形模量、黏聚力和内摩擦角与损伤变量的数学表达式,并使用 FLAC3D 数值模拟了岩石力学参数及模型随累积应变的增加而逐渐劣化的动态损伤过程;邹璇等<sup>[8]</sup>采用 PFC 软件并基于离散单元法,对砂岩在周期性荷载作用下的力学特性展开了研究;梅昭蝶等<sup>[9]</sup>使用 RFPA2D 软件研究了不同围压对岩石材料强度、变形特性和破坏形式的影响规律;付宏渊等<sup>[10]</sup>采用 FLAC3D 软件对软岩边坡在施工过程中的变形和稳定性进行了数值研究。

现阶段关于岩石损伤特性的研究成果非常丰富,但大部分研究都基于室内试验得出损伤演化

方程及力学参数(变形参数、强度参数)劣化过程。由于物理试验存在费用高、无法直观地看到岩石内部从加载到破坏的整个过程等缺陷,导致对岩石力学特性和损伤特性的认识不足<sup>[8]</sup>。因此,作者采用有限差分数值模拟软件 FLAC3D,对岩石在强度和变形损伤特性的共同作用下开展数值试验研究,并对不同力学特性下的岩石损伤规律进行分析,以期进一步提升岩石的损伤特性认识。

## 1 数值试验基本原理及实现方法

### 1.1 基本原理

FLAC3D 是一种比较适合岩土工程数值计算的有限差分软件,该软件内置十多种本构模型以适用于不同的岩土工程问题需求。为能较好地模拟岩石峰后应力—应变曲线,本研究采用应变软化/硬化本构模型,弹性模量的演化方程采用曹文贵等<sup>[11]</sup>的基于 Weibull 分布的岩石软化模型:

$$E_d = E_0(1 - D) = E_0 \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^{m_0}\right] \quad (1)$$

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} E_0 \epsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (2)$$

$$\alpha = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi} \quad (3)$$

式中: $E_0$ 为数值计算中每个计算步开始时前一步的弹性模量; $E_d$ 为当前计算步的弹性模量; $I_1$ 为应力张量的第一不变量; $J_2$ 为应力偏量的第二不变量; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别为第一、第二和第三主应力; $\epsilon_1$ 为第一主应变; $\mu$ 为泊松比; $\varphi$ 为内摩擦角; $m_0$ 和 $F_0$ 为材料参数; $D$ 是损伤变量。

黏聚力和内摩擦角的软化方程为:

$$\frac{c}{c_0} = \begin{cases} 1; & \epsilon_1 \leq 0.001 \\ 1.2 - 200\epsilon_1; & 0.001 < \epsilon_1 < 0.004 \\ 0.4; & \epsilon_1 \geq 0.004 \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_0 - \varphi = \begin{cases} 0^\circ; & \epsilon_1 \leq 0.001 \\ 3^\circ \times (100\epsilon_1 - 1); & 0.001 < \epsilon_1 < 0.004 \\ 9^\circ; & \epsilon_1 \geq 0.004 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c$ 和 $c_0$ 分别为计算任意时刻的黏聚力和初始黏聚力,MPa; $\varphi$ 和 $\varphi_0$ 分别为计算任意时刻的内摩擦角和初始内摩擦角。

## 1.2 数值实现方法

建立如图 1 所示的岩石圆柱形试件有限元模型。

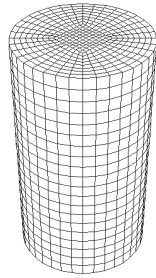


图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

圆柱形试件尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 划分为 7 380 个单元和 8 148 个节点。先在试件轴向(模型顶部和底部)与侧面施加围压, 求解平衡后, 以  $2.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  的速率对模型顶部和底部进行加载。

## 2 试验方案

为研究变形参数(弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ )和强度参数(黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ )对岩石损伤特性的影响, 拟定了如表 1 所示的 4 个试验方案。

表 1 数值试验方案

Table 1 Numerical experiment scheme

试验方案	围压/MPa	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(^{\circ})$
方案 1	3、6、10	12、14、16、18	0.205	10	48
方案 2	3、6、10	18	0.205、0.245、0.285、0.325	10	48
方案 3	3、6、10	18	0.205	1、4、7、10	48
方案 4	3、6、10	18	0.205	10	42、44、46、48

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 应力—应变及抗压强度的变化规律

在 FLAC3D 中, 岩石的轴向应力采用顶部和底部节点不平衡力之和的一半除以顶部的面积求得, 轴向应变( $\epsilon_1$ )通过顶部节点  $z$  向位移之和的平均值与底部节点  $z$  向位移之和的平均值之和除以数值模型的高度求得, 体应变( $\epsilon_v$ )取整个模型所有单元体应变之和的平均值, 侧向应变( $\epsilon_3$ )的计算公式为:

$$\epsilon_3 = (\epsilon_v - \epsilon_1) / 2. \quad (6)$$

图 2 为围压为 10 MPa 且力学参数  $E$ 、 $\mu$ 、 $c$ 、 $\varphi$  取值不同时的应力—应变曲线。据图 2 可知, 加载初期, 不同参数取值下的轴向应力—轴向应变曲线具有较好的线性关系, 且曲线相对较陡; 随后轴向应力—轴向应变曲线出现相对平缓的一个阶段, 表明此阶段岩石可能产生一定程度的损伤; 之后, 轴向应力—轴向应变曲线基本保持相同斜率直到应力达到峰值后, 岩石产生破坏;  $E$  或  $\mu$  值变化对抗压强度无影响, 但随着  $c$  或  $\varphi$  值的增加而增大。

由图 2[(a), (b)]可知, 在加载初期, 黏聚力或内摩擦角变化对轴向应力—轴向应变关系曲线形态基本没有影响; 随着输入计算强度参数黏聚力或内摩擦角的增大, 轴向应力的峰值逐渐增大, 即抗压强度也逐渐增大。图 2(c)表明, 输入不同的计算初始弹性模量对岩石的抗压强度影响甚微。图 2(d)表明, 输入泊松比变化对全过程应力—应变曲线形态影响很小, 抗压强度也基本相同, 说明泊松比对岩石抗压强度和变形特性影响甚小, 在以后的研究中可以不考虑泊松比变化对岩石抗压强度和变形特性的影响。

图 3 为数值试件( $E=18 \text{ GPa}$ ,  $\mu=0.205$ ,  $c=10 \text{ MPa}$ ,  $\varphi=48^{\circ}$ )在围压分别为 3、6、10 MPa 下的应力—应变曲线。由图 3 可见, 加载初期, 各个围压下的应力—应变曲线具有较好的线性特征; 随着轴向应力的增大, 曲线上凸并逐渐趋于水平, 斜率不断减小。这是因为随着轴向应力的增大, 数值模型的单元屈服数越来越多, 当数值模型的屈服单元上下贯通形成一个 X 型的剪切面(如图 4 所示, 黑色代表单元已屈服)时, 轴向应力达到峰值, 岩石破坏, 然后进入峰后软化阶段。从应力—

应变曲线可以看出,随着围压的增大,岩石抗压强度越大且塑性变形阶段延长,这与三轴试验的结

果一致,较好地说明了三轴数值模拟试验的适用性。

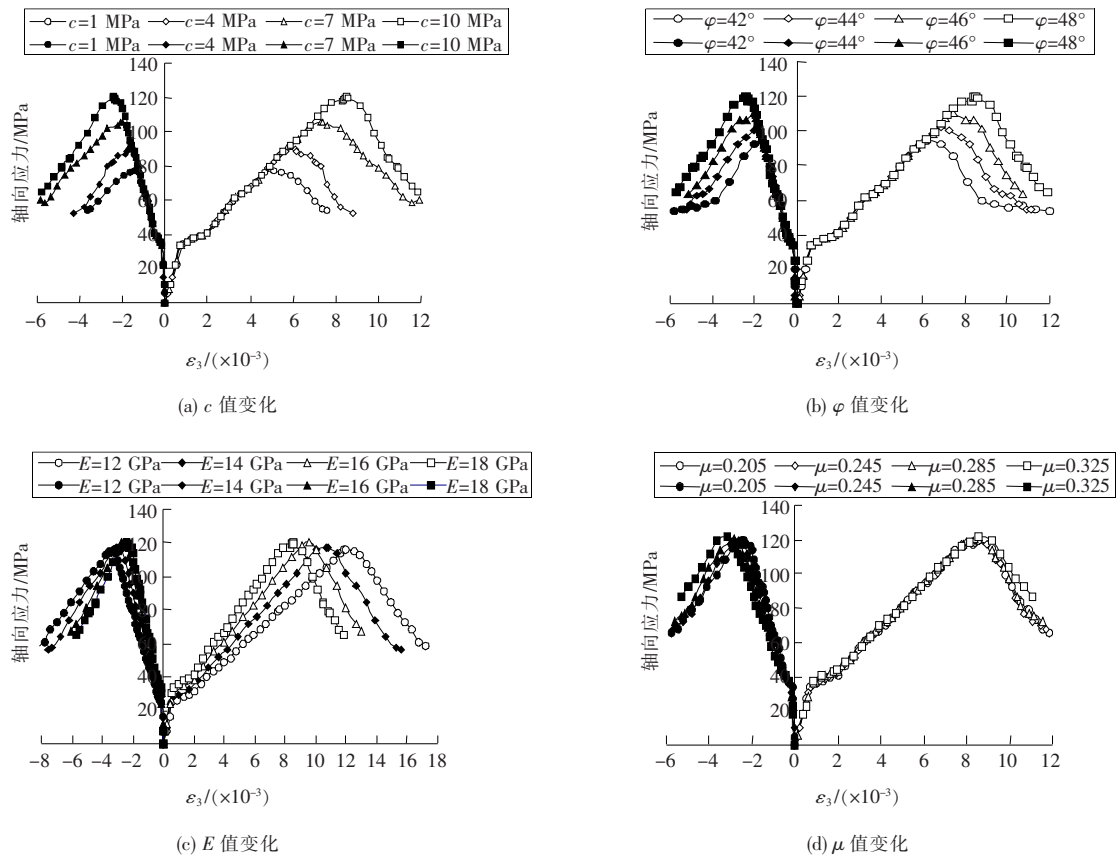


图2 应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve

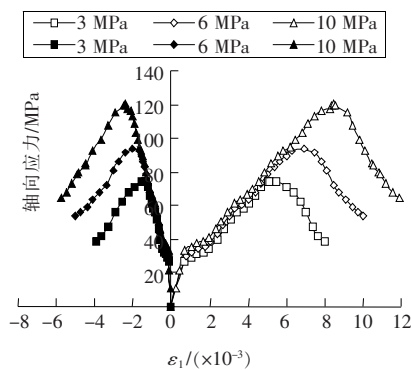


图3 不同围压下的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different confining pressures

### 3.2 割线模量 $E_s$ 和泊松比 $\mu$ 的变化规律

割线模量  $E_s$  由轴向应力除以轴向应变获得,泊松比则等于侧向应变与轴向应变比值的相反数。

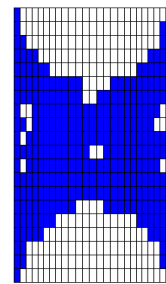


图4 直径方向截面塑性区分布图

Fig. 4 Layout of plastic division of diameter section

图5是围压为10 MPa的条件下割线模量和泊松比在强度参数  $c$  和  $\varphi$  变化情况下的变化过程图。由图5可知,在加载初始阶段,泊松比小于初始泊松比。这是因为当轴向应力较低时,岩石主要为轴向压缩,侧向变形不明显;随着轴向应力的增加,割线模量缓慢减少,泊松比趋于一定值;过了割线模量—轴向应变曲线和泊松比—轴向应变曲线拐

点之后,割线模量快速降低以及泊松比快速增加的原因是,此时岩石已进入峰后阶段,侧向变形急剧增加,岩石损伤程度加剧;当轴向应变 $\leq 5 \times 10^{-3}$ 时,割线模量—轴向应变曲线、泊松比—轴向

应变曲线基本重合;但当轴向应变 $> 5 \times 10^{-3}$ 时,随着  $c$  值或  $\varphi$  值的增大,割线模量急剧降低和泊松比快速增大对应的轴向应变值变大,表明  $c$  值或  $\varphi$  值的增加具有延缓岩石发生破坏的作用。

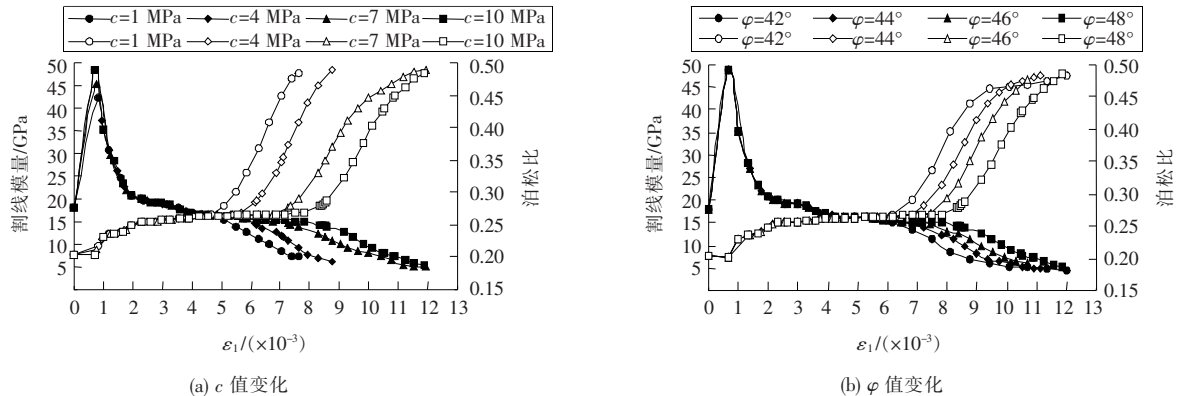


图 5 割线模量—泊松比—轴向应变曲线

Fig. 5 Secant modulus-poisson's ratio-axial strain curve

图 6 为数值试件 ( $E=18 \text{ GPa}$ ,  $\mu=0.205$ ,  $c=10 \text{ MPa}$ ,  $\varphi=48^\circ$ ) 在围压分别为 3, 6, 10 MPa 下岩石的割线模量—泊松比—轴向应变曲线。由图 6 可知,随着围压的增加,割线模量增加甚微,泊松

比不变,并且割线模量急剧下降和泊松比快速增加对应的轴向应变有所增加;过了泊松比—轴向应变曲线拐点之后,泊松比快速增加的原因是,此时岩石已进入峰后阶段,侧向变形急剧增加。

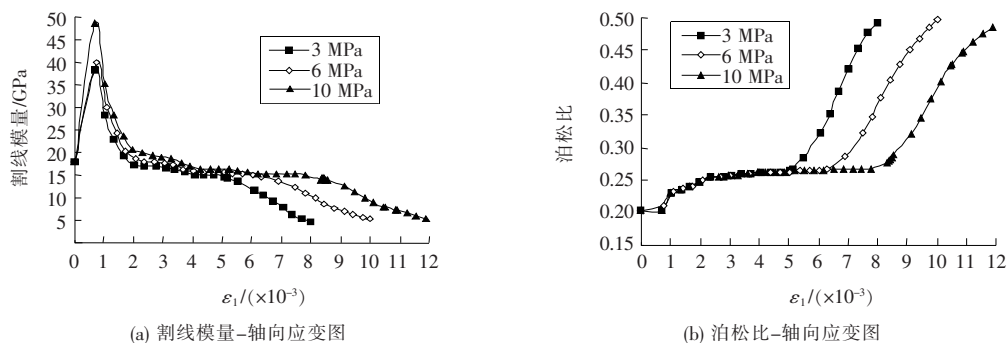


图 6 不同围压下的割线模量—泊松比—轴向应变曲线

Fig. 6 Secant modulus-poisson's ratio-axial strain curve under different confining pressures

### 3.3 损伤变量 $D$ 的变化规律

模型整体损伤变量的定义采用范华林等<sup>[12]</sup>提出的割线模量计算方法:

$$D = 1 - \frac{E_s}{E} \quad (7)$$

式中:  $E_s$  为计算任意时刻的割线模量;  $E$  为初始弹性模量。

图 7 是围压为 10 MPa 的情况下损伤变量随  $E$ 、 $\mu$ 、 $c$ 、 $\varphi$  变化而变化的过程图。图 7 表明:①在加载初期,损伤变量为负值,表明岩石处在强化状态,这与物理试验得到的结果相似<sup>[1]</sup>;②损伤

变量为零时,对应的轴向应变不随着  $c$ 、 $\varphi$  的变化而发生改变,但随计算初始弹性模量的增大而减小;③损伤变量为正时,随着轴向应变的增加,损伤变量缓慢增大,当轴向应变增加到某一数值时,损伤变量快速增加,因为岩石破坏后还具有一定的承载能力,故损伤变量不会达到 1;④损伤变量曲线的拐点对应的轴向应变随着  $c$  值或  $\varphi$  值的增大而增大;⑤损伤变量曲线的拐点对应的轴向应变随着计算初始弹性模量  $E$  的增大而减小;⑥泊松比的变化对损伤变量的影响很小,可忽略不计。

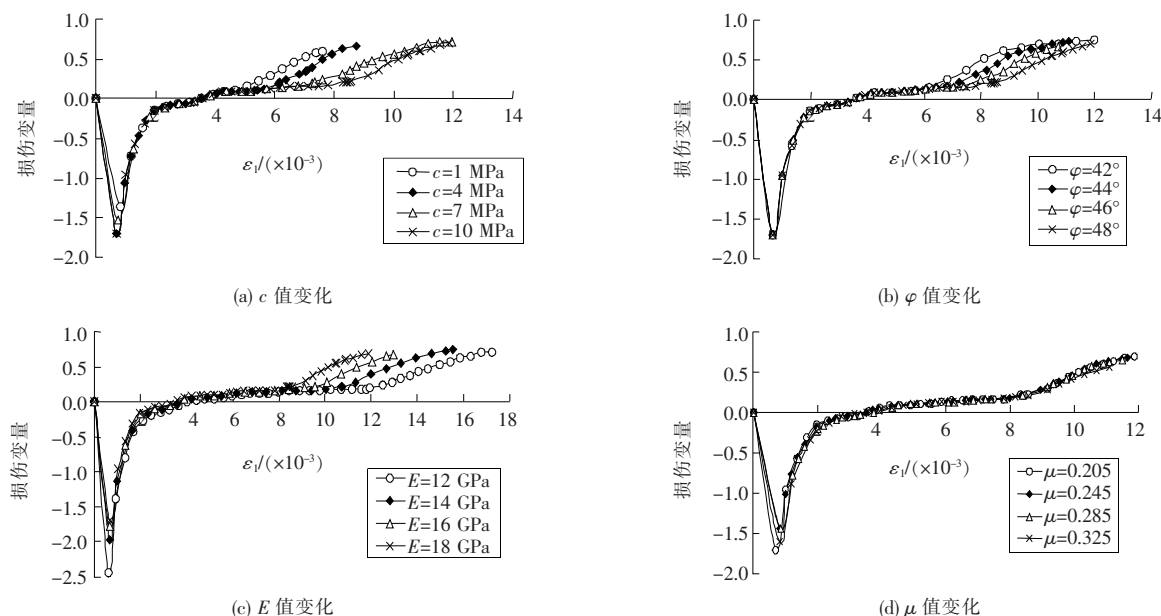


图7 损伤变量-轴向应变曲线

Fig. 7 Damage variable-axial strain curve

图8为数值试件( $E=18$  GPa,  $\mu=0.205$ ,  $c=10$  MPa,  $\varphi=48^\circ$ )在围压分别为3, 6, 10 MPa下岩石的损伤变量-轴向应变曲线。由图8可知, 损伤变量开始出现正值后, 所对应的轴向应变随着围压的增大而增大, 损伤变量曲线拐点所对应的轴向应变也随着围压的增大而增大, 这与围压的增大能提高岩石抵抗变形能力的结论一致。

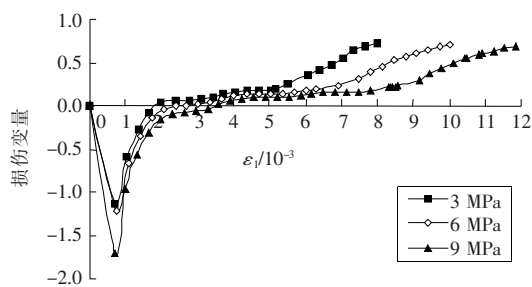


图8 不同围压下的损伤变量-轴向应变曲线

Fig. 8 Damage variable-axial strain curve under different confining pressures

#### 4 结论

作者利用FLAC3D有限差分数值模拟软件, 在围压分别为3, 6, 10 MPa下, 对岩石进行了不同变形参数( $E$ 和 $\mu$ )和强度参数( $c$ 和 $\varphi$ )的常规三轴压缩数值试验, 以对其进行损伤特性研究, 得到如下结论。

1) 轴向应力-轴向应变曲线在加载初期较陡, 求得的损伤变量为负值, 岩石产生了压密强化现象。数值仿真得到的轴向应力-轴向应变曲线和变化规律与物理试验得到的结果一致, 表明数值试验方法可以较好地模拟岩石物理试验应力应变关系。

2) 抗压强度随着黏聚力或内摩擦角或围压的增大而增大, 对应的轴向应变和侧向应变也逐渐增大; 割线模量曲线、泊松比曲线和损伤变量曲线的拐点所对应的轴向应变随着黏聚力或内摩擦角或围压的增大而增大; 随着轴向应力的增大, 割线模量减小, 泊松比增大; 损伤起点所对应的轴向应变与强度参数( $c$ 和 $\varphi$ )关系不大, 但随着围压的增加而增大, 随着计算初始弹性模量的增大而减小。

3) 计算初始弹性模量变化对岩石抗压强度无影响, 但能提高岩石抵抗变形的能力; 割线模量曲线、泊松比曲线和损伤变量曲线的拐点所对应的轴向应变随着初始弹性模量的增大而减小。

4) 泊松比对应力-应变曲线、抗压强度、割线模量和损伤变量的影响甚少, 所以在以后的研究中可以忽略泊松比变化的影响。

#### 〔参考文献〕

- [1] 张治亮, 徐卫亚, 王伟, 等. 韧性岩石常规三轴压缩试验及变形与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程

- 学报,2011,30(S2):3857-3862.
- ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Investigation on conventional triaxial compression tests of ductile rock and law of deformation and damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3857-3862.
- [2] Ma L J, Liu X Y, Wang M Y, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62(9): 34-41.
- [3] 李鹏飞, 赵星光, 郭政, 等. 北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1599-1610.
- LI Peng-fei, ZHAO Xing-guang, GUO Zheng, et al. Variation of strength parameters of Beishan granite under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1599-1610.
- [4] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888-1900.
- WANG Zhe-chao, ZHAO Jian-gang, LI Shu-cai, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888-1900.
- [5] 冯春林, 吴献强, 丁德馨, 等. 周期荷载作用下白砂岩的疲劳特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2749-2754.
- FENG Chun-lin, WU Xian-qiang, DING De-xin, et al. Investigation on fatigue characteristics of white sandstone under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2749-2754.
- [6] 贾善坡, 高敏, 龚俊. 数值模拟在常规三轴实验教学中的应用: 以岩石应力—应变全过程实验为例[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2015, 12(7): 78-81, 5.
- JIA Shan-po, GAO Min, GONG Jun. Application of numerical simulation in conventional triaxial experiment teaching-taking the whole process of rock stress-strain experiment as an example[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science, 2015, 12(7): 78-81, 5.
- [7] 王嵩, 左双英, 贾杰南, 等. 基于声发射的岩石动态损伤数值模拟试验[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(5): 66-71.
- WANG Song, ZUO Shuang-ying, JIA Jie-nan, et al. Numerical simulation test on dynamic rock damage based on acoustic emission[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(5): 66-71.
- [8] 邹璇, 漆文邦, 陈瑜, 等. 周期性荷载作用下岩石力学特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 91-94, 114.
- ZOU Xuan, QI Wen-bang, CHEN Yu, et al. Numerical study of mechanical behavior of sandstone under periodic loading[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 91-94, 114.
- [9] 梅昭蝶, 胡云进, 包春燕. 不同围压作用下的力学和岩石声发射特性数值实验研究[J]. 绍兴文理学院学报: 自然科学版, 2017, 37(2): 14-19.
- MEI Zhao-die, HU Yun-jin, BAO Chun-yan. Numerical simulation of mechanical and acoustic emission characteristics in rock compression under different confining pressures[J]. Journal of Shaoxing University: Natural Science, 2017, 37(2): 14-19.
- [10] 付宏渊, 李怀玉, 蒋中明. 软岩路堑高边坡开挖支护过程的三维数值分析[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2010, 7(2): 1-5.
- FU Hong-yuan, LI Huai-yu, JIANG Zhong-ming. 3-D numerical analysis of high slope of soft rock mass during excavation and supporting process[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 7(2): 1-5.
- [11] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(6): 628-633.
- CAO Wen-gui, FANG Zu-lie, TANG Xue-jun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(6): 628-633.
- [12] 范华林, 金丰年. 岩石损伤定义中的有效模量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(4): 432-435.
- FAN Hua-lin, JIN Feng-nian. Effective modulus method in damage mechanics of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(4): 432-435.