

DOI: 10.11779/CJGE201608005

# 脆性岩石渐进及蠕变失效特性宏观力学模型研究

李晓照, 邵珠山

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 压应力作用脆性岩石渐进及蠕变失效特性是其力学性质研究的两个主要研究方向。其对于深部地下开挖围岩稳定性的判断有着重要的指导意义。岩石内部微裂纹扩展对脆性岩石的渐进及蠕变特性有着重要的影响。因此, 基于岩石的应力与裂纹扩展关系及裂纹扩张演化法则, 并结合宏观损伤定义之间的关系, 提出了一个新的宏观力学模型, 推出了岩石完整的应力-应变关系与蠕变理论表达式。分析了围压对岩石的应力-应变关系的影响。研究了岩石内部初始微裂纹尺寸及裂纹间摩擦系数对应力应变关系及岩石强度的影响。并给出了不同围压下岩石裂纹初始应力与峰值应力, 其对蠕变实验中的施加应力初始值选取提供了一定参考。然后, 研究了恒定围压、轴压分级加载应力路径下的岩石蠕变应变及应变率变化趋势。通过试验结果验证了理论模型的合理性。进而, 对压应力作用下细观裂纹扩展对岩石力学特性影响的理解提供了一定的理论参考。

**关键词:** 宏观力学模型; 应力-应变关系; 蠕变; 断裂; 损伤

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)08-1391-08

**作者简介:** 李晓照(1987-), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 从事岩石力学及岩石工程方面的研究。E-mail: lxz4167@126.com。

## Macro-micro mechanical model for progressive and creep failure of brittle rock

LI Xiao-zhao, SHAO Zhu-shan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The progressive and creep failure of brittle rock in compression plays an important role in the investigation of rock mechanics. It has great significance for judging the stability of surrounding rock in deep underground. Furthermore, growth of microcracks of brittle rock has great influence on creep properties. Based on the relation between stress and crack growth, and on the evolution law of crack growth, and considering the link of damage in micromechanical and macroscopic scales, a new macro-micro model is proposed. The theoretical expressions for stress-strain relationship and creep are derived. The effects of confining pressure on the relationship between stress and strain are analyzed. The effects of initial microcrack size and friction coefficient on stress-strain relationship and rock strength are also investigated. The crack initiation stress and the peak stress under different confining pressures are obtained, which provides a reference for applied stress under creep tests. The creep strain and strain rate under constant confining pressure and step axial loading are analyzed. Rationality of theoretical results is verified by these experimental results. It may provide the theoretical reference for understanding the effects of microcrack growth on the mechanical properties of brittle rock in compression.

**Key words:** macro-micro model; stress-strain relation; creep; fracture; damage

## 0 引言

随着深部地下能源开采及深部地下放射性废料处置空间建设需求的增加, 深大地下工程建设将面临更多的挑战。深部地下空间围岩中的岩石力学特性对地下结构稳定性的评价及设计有着重要的意义。脆性岩石(例如花岗岩, 大理岩)是深大地下工程围岩中主要的组成部分之一, 其在压应力作用下的力学特性研究, 是地下工程围岩岩石主要的受力特性。在地下工程的施工或长期服役过程中, 脆性岩石在承受小于其

抗压强度的荷载作用下, 就有可能产生蠕变演化失效。因此, 脆性岩石压应力作用下的应力-应变关系及蠕变失效特性的综合研究, 对于判断深部地下围岩的稳定性有着更为重要的意义。

许多学者通过压缩试验的方法, 研究了岩石的应力应变关系<sup>[1-4]</sup>, 并通过观测岩石压缩变形过程的声发

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375373); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCQ01-16)

收稿日期: 2015-08-07

射特性<sup>[5-6]</sup>,分析了脆性岩石压缩失效过程中,裂纹扩展损伤特征。并研究了应变率<sup>[7]</sup>、渗透特性<sup>[8]</sup>对岩石压缩过程中应力应变关系的影响。文献[9~12]结合连续强度理论和岩石内部缺陷随机分布统计理论,建立了岩石统计损伤本构模型。并通过试验验证了模型合理性。李夕兵等<sup>[13]</sup>将统计损伤模型和黏弹性模型进行组合,建立动荷载作用下岩石的本构模型,分析了应变率对应力应变关系的影响。

通过以上的研究,可以更加准确的判断得到脆性岩石的抗压强度。然而,在岩石承受小于抗压强度的荷载作用下,多大的荷载将导致岩石产生蠕变失效,及一定的荷载下的蠕变演化过程将维持多久,这一直被广大学者所关注。目前岩石的蠕变理论众多是基于元件理论,也就是按着岩石的弹性、黏性、塑性特性设置基本元件,通过这些元件的串、并联组合出蠕变模型,然后通过与相关岩石试验结果拟合,推出蠕变模型相关参数,进而对特定岩石的蠕变特性进行研究分析。阎岩等<sup>[14]</sup>基于西原蠕变模型,分析了各蠕变参数与应力及时间的关系,进而得到了变参数的蠕变方程。宋勇军等<sup>[15]</sup>将含分数阶微积分的软体元件、弹簧元件及幂函数黏塑性体组合,提出一种非线性黏弹塑性蠕变模型,分析岩石不同应力条件下的蠕变曲线。余成学等<sup>[16]</sup>通过分级加载蠕变试验,研究了高孔隙水压作用下岩石蠕变行为,并通过提出非线性蠕变模型预测了孔隙水影响下岩石蠕变结果。以上研究成果通过岩石的宏观唯象学特性,分析了对岩石的蠕变特性。孙钧等<sup>[17]</sup>、张强勇等<sup>[18]</sup>通过观测电镜扫描试验下脆性岩石裂纹变化情况,研究了蠕变过程中脆性岩石裂纹扩机理。Grgic等<sup>[19]</sup>、Ohnaka等<sup>[20]</sup>基于声发射试验,通过分析岩石蠕变过程中由于裂纹扩展产生的声发射事件的累计数量,讨论了岩石的蠕变行为。任建喜<sup>[21]</sup>通过观测常应力作用下岩石的CT扫描图像,分析了脆性岩石蠕变过程中微裂纹扩展情况。孙金山等<sup>[22]</sup>利用二维颗粒流数值模拟方法对岩石的蠕变损伤和断裂过程中的细观力学机制进行了研究。

基于上述研究,可以看到基于岩石细观机理,综合分析岩石应力应变关系及蠕变演化关系的研究很少。而通过一个力学模型,能同时研究应力应变关系及蠕变之间联系的模型更是甚少。因此本文将提出一个新的宏细观力学模型,对岩石的应力应变关系及蠕变特性进行综合研究。进而对于深部地下开挖及运行过程中,脆性围岩的稳定性判断提供一定的理论基础。

## 1 理论模型

### 1.1 应力与裂纹扩展之间的关系

图1中给出了微裂纹扩展作用下的脆性岩石细观力学模型<sup>[23]</sup>,假设模型为各向同性弹性体,单个初始裂纹(半径为 $a$ )两端分别产生一个翼型裂纹(裂纹长度为 $l$ ),此外,初始裂纹与主应力 $\sigma_1$ 方向夹角设为 $\varphi$ 。岩石围压 $\sigma_3 = \sigma_2$ ,解析分析过程压力为负,为了便于观测,在图中压力以正值给出。岩石的初始损伤可定义为 $D_0 = 4\pi N_V (aa)^{3/3}$ <sup>[23]</sup>,  $N_V$ 是岩石单位体积裂纹数量,  $\alpha = \cos \varphi$ 。

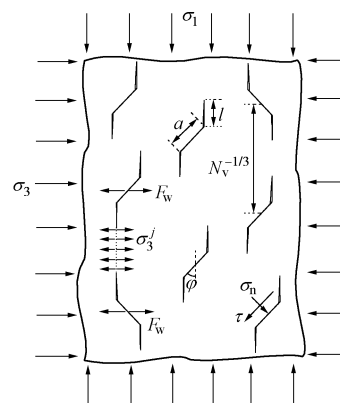


图1 压力作用下的裂纹扩展力学模型

Fig. 1 Model for microcrack growth under triaxial pressure

压应力作用下裂纹表面剪应力 $\tau$ 与正应力 $\sigma_n$ 为:

$$\tau = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \sin 2\varphi, \quad (1)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \cos 2\varphi. \quad (2)$$

在较低应力作用下,裂纹表面剪应力 $\tau$ 要低于正应力 $\sigma_n$ 作用下产生的摩擦力,初始裂纹不会滑动,翼型裂纹没有产生。当施加应力大于一个临界应力 $\sigma_{ic}$ 时,翼型裂纹则开始产生。这个临界应力 $\sigma_{ic}$ 可表达为<sup>[24]</sup>

$$\sigma_{ic} = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \sigma_3 - \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}, \quad (3)$$

式中, $\mu$ 是初始裂纹面摩擦系数, $K_{IC}$ 是关于岩石张开型裂纹断裂韧度。其中三轴压缩试验下裂纹初始扩展轴向应力与围压之间存在一个线性关系,因此,通过这个试验线性关系与式(3)对比分析,我们可以得到参数 $a$ 和 $\mu$ 的值。

脆性岩石中,翼型裂纹尖端张开型应力强度因子为<sup>[23]</sup>

$$K_I = \frac{F_w}{[\pi(l + \beta a)]^{3/2}} + \frac{2}{\pi} (\sigma_3 + \sigma_3^i) \sqrt{\pi l}, \quad (4)$$

$$\sigma_3^i = \frac{F_w}{\pi^{1/3} [3/(4N_V)]^{2/3} - \pi(l + \alpha a)^2}, \quad (5)$$

$$F_w = (\tau + \mu \sigma_n) \pi a^2 \sin \varphi = -(A_1 \sigma_1 - A_2 \sigma_3) a^2, \quad (6)$$

$$A_1 = \pi \sqrt{\beta/3} [\sqrt{1+\mu^2} - \mu], \quad (7)$$

$$A_2=A_1(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)/(\sqrt{1+\mu^2}-\mu) \quad , \quad (8)$$

式中,  $\beta$  为常数。其中  $\sigma_3^i$  为裂纹之间垂直截面上的内应力,  $F_w$  为楔入力, 两者之间相互平衡 (图1)。

为了便于分析, 式 (4) 可以简化为

$$K_1=\sqrt{\pi a}\left[\sigma_3c_3-(A_1\sigma_1-A_2\sigma_3)(c_1+c_2)\right] \quad , \quad (9)$$

$$c_1=\pi^{-2}(l/a+\beta)^{-3/2} \quad , \quad (10)$$

$$c_2=2(\pi\alpha)^{-2}\sqrt{l/a}\left[D_0^{-2/3}-\left(1+\frac{l}{\alpha a}\right)^2\right] \quad , \quad (11)$$

$$c_3=2\pi^{-1}\sqrt{l/a} \quad . \quad (12)$$

基于断裂力学机理知道, 应力强度因子  $K_I$  达到岩石断裂韧度  $K_{IC}$ , 岩石裂纹开始扩展。在应力强度因子接近断裂韧度前, 裂纹会产生一个缓慢的稳定扩展, 其被称为亚临界裂纹扩展。假设忽略亚临界裂纹扩展, 通过式 (9), 压应力作用下的岩石裂纹扩展表达式为

$$\sigma_1(l)=\frac{\sigma_3(c_3+A_2(c_1+c_2))-K_{IC}/\sqrt{\pi a}}{A_1(c_1+c_2)} \quad , \quad (13)$$

其中轴向应力与裂纹长度关系曲线存在一个峰值  $\sigma_{lpeak}$ , 该值对应着岩石抗压强度, 且该曲线与应力应变关系曲线相对应<sup>[23, 25]</sup>。比较分析式 (13) 得到的裂纹初始开裂应力  $\sigma_1(l=0)$  与式 (3) 得到的裂纹扩展临界应力  $\sigma_{ic}$ , 推出参数  $\beta=0.32$ , 此值与文献[27]结果一致。

1.2 裂纹扩展法则

在考虑亚临界裂纹扩展作用下, 裂纹应力强度因子  $K_I$  小于裂纹断裂韧度  $K_{IC}$  时则产生扩展。岩石的张开型裂纹扩展速度表达式为<sup>[26]</sup>

$$dl/dt=v(K_I/K_{IC})^n \quad . \quad (14)$$

将式 (9) 带入式 (14), 裂纹扩展与时间关系为

$$dl/dt=v(\pi a)^{n/2}\left[\frac{(A_2\sigma_3-A_1\sigma_1)(c_1+c_2)+\sigma_3c_3}{K_{IC}}\right]^n \quad , \quad (15)$$

式中,  $v$  是特征裂纹速率,  $n$  是侵蚀指数, 其均可以通过亚临界裂纹扩展试验得到。当轴向应力  $\sigma_1(l)$  小于岩石抗压强度大于裂纹扩展初始应力时, 基于式 (13), 可以得到某常应力作用下的一个平衡裂纹长度  $l_0$ , 该值可以作为式 (15) 中常应力蠕变数值计算下的初始值, 进而得到时间依赖的裂纹扩展结果  $l(t)$ 。

1.3 细观裂纹扩展与宏观应变关系

对于深埋地下岩石工程中, 脆性岩石力学特性与其内部微缺陷导致的损伤有着密切联系。对于蠕变作用下, 岩石的损伤演化可以定义为<sup>[27]</sup>

$$D=1-e^{-m\varepsilon} \quad , \quad (16)$$

式中,  $D$  为损伤因子,  $m$  为试验常数,  $\varepsilon$  为轴向应变。

此外, 通过微裂纹尺寸及数量, 岩石损伤演化还可以定义为<sup>[23]</sup>

$$D=4\pi N_v(l+\alpha a)^3/3 \quad . \quad (17)$$

对于一个岩石试样, 其在应力作用下的损伤值, 无论是通过宏观定义还是细观定义, 其大小是一定的。因此, 通过联立式 (16)、(17), 压应力作用下, 细观裂纹长度与宏观轴向应变之间的联系为

$$\varepsilon=-\frac{\ln\left[1-\frac{4}{3}\pi N_v(l+\alpha a)^3\right]}{m} \quad . \quad (18)$$

1.4 应力 - 应变本构关系

将式 (18) 带入式 (13), 得到了一个新的应力 - 应变本构关系:

$$\sigma_1(\varepsilon)=\frac{\sigma_3[J_3+A_2(J_1+J_2)]-K_{IC}/\sqrt{\pi a}}{A_1(J_1+J_2)} \quad , \quad (19)$$

$$J_1=\pi^{-2}(\alpha J_4+\beta)^{-3/2} \quad , \quad (20)$$

$$J_2=2\pi^{-2}\alpha^{-3/2}J_4^{1/2}\left[D_0^{-2/3}-(J_4+1)^2\right] \quad , \quad (21)$$

$$J_3=2(\alpha J_4)^{1/2}/\pi \quad , \quad (22)$$

$$J_4=D_0^{-1/3}(1-1/e^{\varepsilon m})^{1/3}-1 \quad . \quad (23)$$

1.5 蠕变演化

将式 (15) 的裂纹长度时间依赖性结果带入式 (18), 可以得到一个新的岩石蠕变应变的演化结果。

$$\varepsilon(t)=-\frac{\ln\left[1-\frac{4}{3}\pi N_v(l(t)+\alpha a)^3\right]}{m} \quad . \quad (24)$$

由于 II、III 型裂纹应力强度因子对于压应力下的脆性岩石轴向应变的影响不大<sup>[25-28]</sup>, 因此本文理论分析中没将其考虑在内。

2 参数选取

基于上述理论模型, 选取锦屏水电站大理岩的力学试验参数, 对岩石的渐进失效及蠕变演化结果进行研究。具体参数详见表1。

表 1 锦屏大理岩的细观力学参数

Table 1 Micromechanical parameters of Jinping marble specimens

参数	取值
临界强度因子 $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}})$	1.61
应力侵蚀指数 $n$	57
特征裂纹速率 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.16
初始损伤 $D_0$	0.048
材料常数 $m$	68
裂纹间摩擦系数 $\mu$	0.51
初始裂纹尺寸 $a/\text{mm}$	3.1
裂纹角度 $\varphi/(^\circ)$	45
常数 $\beta$	0.32

表1中, 临界应力因子值为 $K_{IC}$ , 应力侵蚀指数, 特征裂纹速率 $v$ , 初始损伤值 $D_0$ 可以通过岩石的亚临界裂纹扩展及电镜扫描试验试验获得<sup>[29]</sup>。大理岩三轴试验中, 岩石的裂纹初始应力一般峰值应力的40%, 裂纹初始应力与围压关系为 $\sigma_{ic}=2.67\sigma_3+46$  MPa, 并通过与式(3)对比分析, 摩擦系数 $\mu$ , 初始微裂纹尺寸 $a$ 参数能够获取<sup>[1-2]</sup>。大理岩经验常数 $m$ 参考文献[27]获得。假设微裂纹角度为 $45^\circ$ , 此时岩石的受到最大的剪切应力<sup>[25-28]</sup>。虽然这些参数的选取均来自于锦屏大理岩试验结果, 但是由于试验来自于不同试样, 导致试验结果参数也存在一定差异性。只是在这些参数的合理范围内, 选取了一定的数值。主要针对宏观力学模型方法进行研究分析。并为脆性岩石宏观力学之间联系的研究提供一种理论参考。

### 3 渐进失效研究

#### 3.1 应力 - 应变关系

基于式(19), 得到了不同围压作用下, 大理岩的轴向应力与应变之间的关系(图2)。通过图2可以看到, 随着应变的增加, 轴向应力先增大, 达到一最大值, 然后逐渐降低。

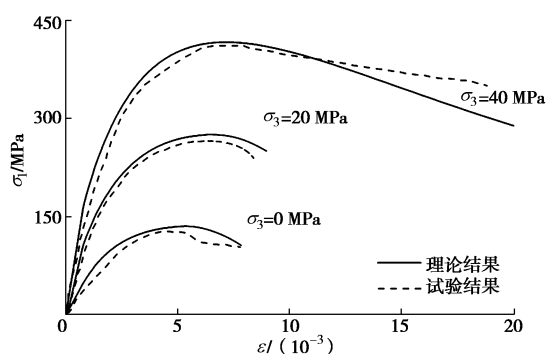


图2 不同围压下的轴向应力 - 应变关系

Fig. 2 Relationship between axial stress and strain under different confining pressures

图3给出了岩石裂纹初始应力、峰值应力与围压之间的关系。通过图3可以看到, 随着围压的提高, 裂纹初始应力、峰值应力, 及两者差值都在增加。而且, 理论结果与试验结果<sup>[2]</sup>很好的相协调, 因此验证了本文理论模型的合理性。

#### 3.2 细观裂纹参数对应力 - 应变关系影响

细观裂纹特性对岩石宏观力学特性有着重要的影响, 然而, 由于微裂纹位于岩石内部, 这个影响一般很难通过常规试验获取。因此, 下面基于本文提出的宏-细观力学模型, 先通过理论方法对细观裂纹特性对岩石宏观力学特性影响进行一定的探究。

图4给出了初始微裂纹尺寸对脆性岩石应力应变

关系影响曲线。通过图4可以看到, 在岩石内部微裂纹数量一定的情况下, 随着初始裂纹尺寸的增大, 在一定应变值时, 岩石承受的轴向应力降低。这说明了, 初始裂纹尺寸(即初始损伤)越大, 岩石的抗压强度(即峰值应力)越低。

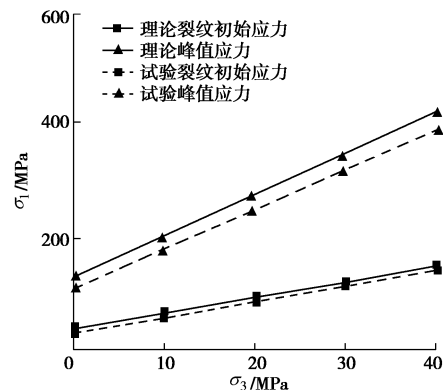


图3 裂纹初始应力, 峰值应力与围压之间的关系

Fig. 3 Relationship among crack initiation stress, peak stress and confining pressures

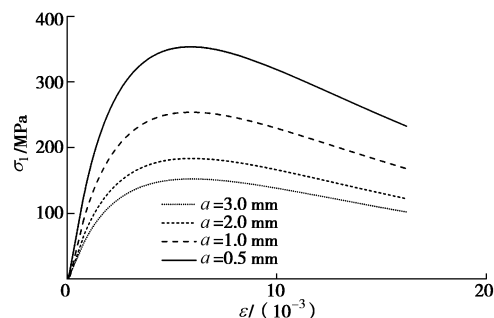


图4 初始微裂纹尺寸对应力 - 应变关系影响

Fig. 4 Effects of initial crack size on stress-strain relationship

图5给出了裂纹间摩擦系数对岩石应力应变关系影响的曲线。通过图5可以看到, 随着摩擦系数的增加, 在一定应变值时, 岩石的轴向应力也在增大。这也说明了裂纹间摩擦系数的增加, 提高了岩石的抗压强度。针对细观裂纹参数对岩石宏观应力应变关系的影响进行了研究, 可以更为深刻的理解了细观力学特性对岩石宏观渐进失效过程的影响变化。

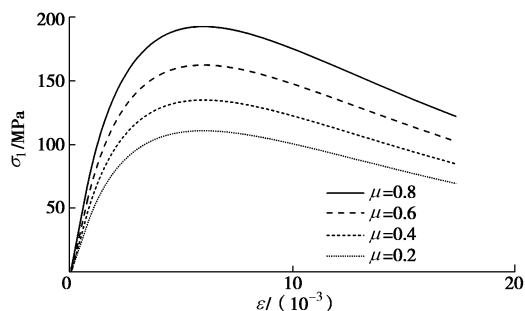


图5 裂纹间摩擦系数对应力 - 应变关系影响

Fig. 5 Effects of friction coefficient on stress-strain relationship

## 4 蠕变失效研究

### 4.1 恒定轴压蠕变演化

基于本文提出的宏细观力学模型, 根据式 (24) 可以得到在常应力作用下的脆性岩石蠕变结果。

图6给出了围压10 MPa时, 不同常轴向压应力作用下岩石的三级蠕变演化结果。可以看到, 在轴压175 MPa时, 蠕变失效时间大约为6240 s, 在165 MPa时, 蠕变失效时间约为 $1.85 \times 10^6$  s, 而当轴压为135 MPa时, 蠕变失效时间约为 $4.7 \times 10^{15} \approx 1.5 \times 10^8$  a。可以看到, 在轴压135 MPa时, 对于工程意义来说, 岩石处于稳定状态, 可以满足施工设计要求。还可以看到, 轴压的改变对岩石的蠕变失效时间影响很大, 轴压改变10 MPa, 导致了蠕变失效时间的3个数量级的改变。因此, 为了能够将所有曲线同时给出, 更好的对比分析数据结果, 我们给出了不同轴压作用下的时间横坐标轴。

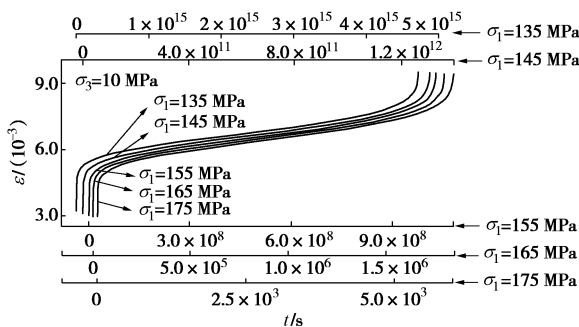


图6 围压10 MPa时, 不同轴向应力下的蠕变演化曲线

Fig. 6 Evolution of creep strain under different axial constant stresses at confining pressure of 10 MPa

基于图6得到结果, 将不同应力状态下的蠕变失效时间及稳态蠕变率一一提取, 然而得到了图7中的蠕变失效时间及稳态蠕变率和轴向应力的关系, 并给出了蠕变失效时间及稳态蠕变率和轴向应力关系的拟合数值公式。这个拟合公式对于判断特定应力状态下岩石蠕变失效时间提供了一定的指导帮助。通过图7, 可以看到, 随着轴压的增大蠕变失效时间减小, 稳态蠕变率增大。

### 4.2 轴压分级加载蠕变演化

以上得到了常应力状态下脆性岩石的蠕变演化结果。一般, 根据岩石的抗压强度, 选取低于其抗压强度的值通过试验来判断岩石的蠕变特性。然而通过理论结果可以看到, 岩石的蠕变失效时间很长, 想通过短期试验来获取岩石蠕变特性结果是不现实的。因此, 许多学者往往通过分级加载试验来研究岩石蠕变失效特性<sup>[14,16]</sup>。这样节省了大量的时间, 提高了效率, 也为判断岩石蠕变特性提供了很好的参考。

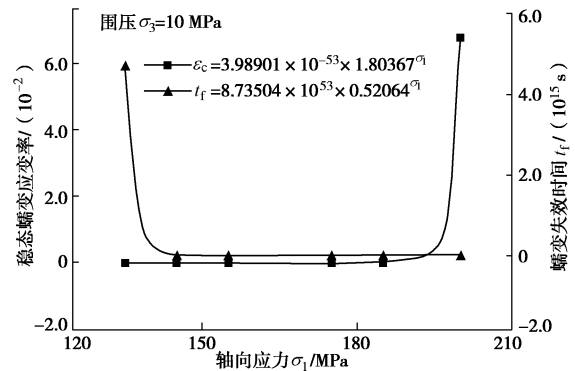


图7 蠕变失效时间及稳态蠕变率和轴向应力的关系

Fig. 7 Relationship among creep failure time, steady-state creep rate and axial stress

因此, 在式 (15) 的基础上, 引入一个轴向应力-时间加载函数  $\sigma_1(t)$ 。则不同应力路径对岩石裂纹扩展影响的理论表达式为

$$\frac{dl}{dt} = v(\pi a)^{\frac{n}{2}} \left[ \frac{(A_2 \sigma_3 - A_1 \sigma_1(t))(c_1 + c_2) + \sigma_3 c_3}{K_{IC}} \right]^n. \quad (25)$$

然后基于式 (24)、(25), 就得到了不同应力路径作用下的蠕变应变演化结果。

选取轴向应力分级加载函数形式为  $\sigma_1(t) = a_1 + b_1[t/T]$  ( $a_1, b_1$  均为正值),  $[t/T]$  表示取整 (例如  $t/T=0.2$ , 则  $[t/T]=0$ ;  $t/T=7.7$ , 则  $[t/T]=7$ ),  $T$  是加载周期。通过该函数的定义, 下面我们来通过本文提出的宏细观力学模型, 来研究岩石的轴压分级加载蠕变演化特性。

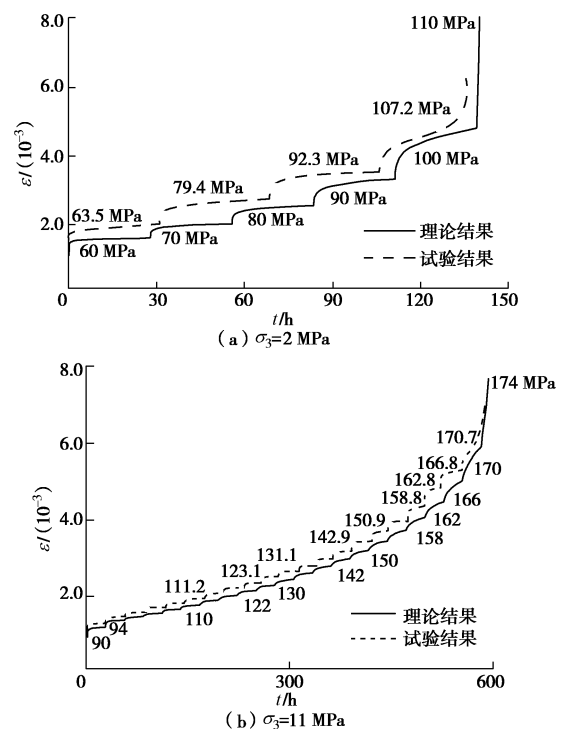


图8 分级加载蠕变理论及试验结果

Fig. 8 Theoretical and experimental results of creep under step loading

分别选择围压 2, 11 MPa 时的轴向应力初始加载值为 60, 90 MPa。通过图 3 可以看到, 这个初始加载值分别大于围压为 2, 11 MPa 的裂纹初始应力。因为, 依据本文提出的理论, 只有施加的初始轴向应力大于裂纹初始应力值时, 才可能根据式 (24)、(25) 的数值计算, 获得岩石蠕变演化过程。基于式 (24)、(25), 并结合轴向应力加载函数形式为  $\sigma_1 = 60 \text{ MPa} + 10 \text{ MPa} [t/100000s]$ ,  $\sigma_1 = 90 \text{ MPa} + 4 \text{ MPa} [t/100000s]$ , 得到分级加载下的岩石蠕变失效过程。

图 8 分别给出了岩石的在围压 2, 11 MPa 下, 轴向应力分级加载下的蠕变应变过程。我们可以看到, 随着时间增加, 在前面的几个加载过程中, 应变均是先减速增大, 然后趋于常速率增加, 直到最后轴向应力分别达到 110, 174 MPa 时, 岩石应变加速增加直到岩石失效。对比图 8 中理论结果与试验结果, 虽然数值上存在一定的差异, 但是理论结果与试验结果<sup>[16]</sup>的趋势相似, 而且具有一定的可比性, 这进一步验证了本文提出的宏-细观模型理论的合理性。图 9 分别给出了围压  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$  及  $\sigma_3 = 11 \text{ MPa}$  下, 分级加载蠕变过程中, 蠕变应变率的演化趋势。我们还看到, 随着时间增加, 每一级加载过程中的最小蠕变速率不断增加。这也反映了图 8 中, 随着加载级数的增大, 在一个相同周期内应变改变量也不断增大的现象。

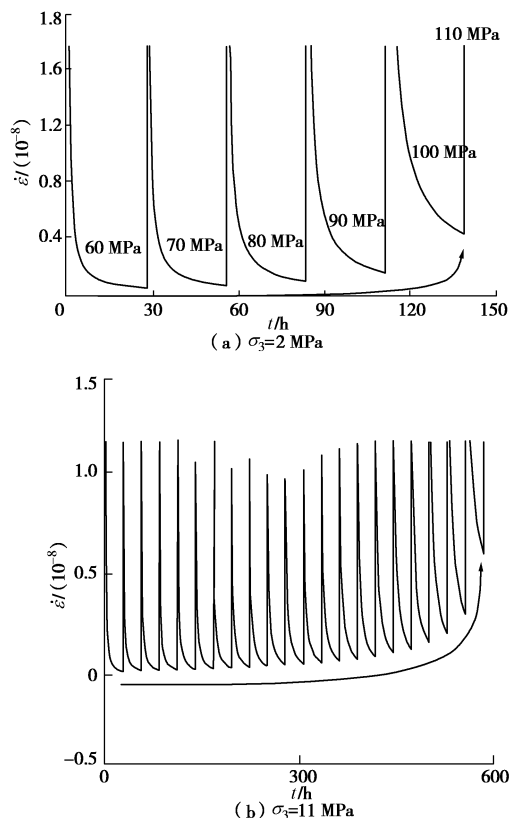


图 9 轴向压力分级加载下的轴向应变率演化曲线

Fig. 9 Evolution of axial strain rate under step axial loading

## 5 结 论

本文提出了一个宏细观力学模型, 综合研究了脆性岩石的渐进蠕变失效行为, 并通过已有试验结果验证了模型的合理性, 对深部地下脆性围岩力学行为的研究提供了一个理论方法。具体结论如下:

(1) 基于岩石细观裂纹扩展模型及裂纹扩展演化规律, 同时结合全由宏细观损伤联系建立的细观裂纹扩展与宏观应变之间的关系, 提出了一个新的宏细观力学模型, 建立了岩石完整的应力-应变关系及蠕变应变演化理论表达式。

(2) 以锦屏大理岩试验数据为依据, 研究了大理岩的应力应变关系。研究表明: 随着应变的增加, 轴向应力先增大, 接近一峰值, 然后降低; 裂纹初始应力、峰值应力随着围压的增加而增加, 而且两者差值随着围压的增加也在增大。理论结果均与试验结果相一致。

(3) 研究了初始裂纹尺寸及裂纹间摩擦系数对应力应变关系的影响。结果表明初始裂纹尺寸越小、裂纹间摩擦系数越大, 岩石的强度越高。

(4) 研究了恒定轴压及围压对岩石蠕变失效特性的影响, 并通过对岩石进行分级加载, 研究了恒定围压、轴压分级加载的蠕变应变及应变率变化规律, 理论与试验结果具有一定的可比性。

## 参考文献:

- [1] 刘 宁, 张春生, 褚卫江. 锦屏深埋大理岩破裂扩展的时间效应试验及特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2437 - 2450. (LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang. Experimental research on time-dependent behavior of crack propagation in Jinping deep marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2437 - 2450. (in Chinese))
- [2] 汪 斌, 朱杰兵, 鄢爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2138 - 2145. (WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2138 - 2145. (in Chinese))
- [3] 唐 浩, 李天斌, 陈国庆, 等. 水力作用下砂岩三轴卸荷试验及破裂特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 519 - 525. (TANG Hao, LI Tian-bin, CHEN Guo-qing. Triaxial unloading tests on rupture characteristics of sandstone under hydro-mechanical coupling conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 519 - 525. (in Chinese))

- Chinese))
- [4] 刘泉声, 胡云华, 刘 滨. 基于试验的花岗岩渐进破坏本构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 289 - 296. (LIU Quan-sheng, HU Yun-hua, LIU Bin. Progressive damage constitutive models of granite based on experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 289 - 296. (in Chinese))
- [5] 姜永东, 鲜学福, 尹光志, 等. 岩石应力应变全过程的声发射及分形与混沌特征[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2413 - 2418. (JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, YIN Guang-zhi, et al. Acoustic emission, fractal and chaos characters in rock stress-strain procedure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2413 - 2418. (in Chinese))
- [6] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1915 - 1923. (LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang, et al. Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1915 - 1923. (in Chinese))
- [7] 梁昌玉, 李 晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力 - 应变特征的率相关性 & 能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1830 - 1838. (LIANG Chang-yu, LI Xiao, WANG Sheng-xing, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1830 - 1838. (in Chinese))
- [8] 朱珍德, 刘立民. 脆性岩石动态渗流特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, **28**(6): 588 - 592. (ZHU Zhen-de, LIU Li-min. Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock[J]. Journal of China Coal Society, 2003, **28**(6): 588 - 592. (in Chinese))
- [9] 张黎明, 王在泉, 孙 辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型[J]. 煤炭学报, 2009, **12**: 1626 - 1631. (ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **12**: 1626 - 1631. (in Chinese))
- [10] 刘齐建, 杨林德, 曹文贵. 岩石统计损伤本构模型及其参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(4): 616 - 621. (LIU Qi-jian, YANG Lin-de, CAO Wen-gui. Statistical damage constitutive model for rock and back analysis of its parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(4): 616 - 621. (in Chinese))
- [11] 曹文贵, 张 升, 赵明华. 基于新型损伤定义的岩石损伤统计本构模型探讨[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 41 - 46. (CAO Wen-gui, ZHANG Sheng, ZHAO Ming-hua. Study on statistical damage constitutive model of rock based on new definition of damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 41 - 46. (in Chinese))
- [12] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 基于 Drucker-Prager 准则的岩石弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1103 - 1108. (YUAN Xiao-ping, LIU Hong-yan, WANG Zhi-qiao. Study of elastoplastic damage constitutive model of rocks based on Drucker-Prager criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1103 - 1108. (in Chinese))
- [13] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 865 - 874. (LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 865 - 874. (in Chinese))
- [14] 阎 岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方程[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3025 - 3035. (YAN Yan, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Creep equation of variable parameters based on Nishihara model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3025 - 3035. (in Chinese))
- [15] 宋勇军, 雷胜友, 韩铁林. 一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 2076 - 2080. (SONG Yong-jun, LEI Sheng-you, HAN Tie-lin. A new nonlinear viscoelasto-plastic rheological model for rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 2076 - 2080. (in Chinese))
- [16] 余成学, 崔 旋. 高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1603 - 1609. (SHE Cheng-xue, CUI Xuan. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1603 - 1609. (in Chinese))
- [17] 孙 钧, 凌建明. 三峡船闸高边坡岩体的细观损伤及长期稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(1): 1 - 7. (SUN Jun, LING Jian-ming. On meso damage behaviour and long-term stability of high slope rock of the Three Gorges shiplocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, **16**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [18] 张强勇, 杨文东, 陈 芳, 等. 硬脆性岩石的流变长期强度及细观破裂机制分析研究[J]. 岩土工程学报, 2011,

- 33(12): 1910 - 1918. (ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, CHEN Fang, et al. Long-term strength and microscopic failure mechanism of hard brittle rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1910 - 1918. (in Chinese))
- [19] GRGIC D, AMITRANO D. Creep of a porous rock and associated acoustic emission under different hydrous conditions[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: B10201.
- [20] OHNAKA M. Acoustic emission during creep of brittle rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(3): 121 - 134.
- [21] 任建喜. 单轴压缩岩石蠕变损伤扩展细观机理 CT 实时试验[J]. 水利学报, 2002, 1: 10 - 15. (REN Jian-xi. CT real-time testing on meso-mechanism of creep damage propagation in rock under uniaxial compression[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 1: 10 - 15. (in Chinese))
- [22] 孙金山, 陈明, 姜清辉, 等. 锦屏大理岩蠕变损伤演化细观力学特征的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3601 - 3608. (SUN Jin-shan, CHEN Ming, JIANG Qing-hui, et al. Numerical simulation of mesomechanical characteristics of creep damage evolution for Jingping marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3601 - 3608. (in Chinese))
- [23] ASHBY M F, SAMMIS C G. The damage mechanics of brittle solids in compression[J]. Pure And Applied Geophysics, 1990, 133(3): 489 - 521.
- [24] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. Acta Metall, 1986, 34(3): 497 - 510.
- [25] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B6): 4077 - 4114.
- [26] BRANTUT N, BAUD P, HEAP M J, et al. Micromechanics of brittle creep in rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: B08412.
- [27] BHAT H S, SAMMIS C G, ROSAKIS A J. The micromechanics of Westerly granite at large compressive loads[J]. Pure and Applied Geophysics, 2011, 168(12): 1 - 18.
- [28] 伍国军, 陈卫忠, 曹俊杰, 等. 工程岩体非线性蠕变损伤力学模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1184 - 1191. (WU Guo-jun, CHEN Wei-zhong, CAO Jun-jie, et al. Nonlinear creep damage model of engineered rock and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1184 - 1191. (in Chinese))
- [29] 万琳辉, 曹平, 黄永恒, 等. 水对岩石亚临界裂纹扩展及门槛值的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2737 - 2742. (WAN Lin-hui, CAO Ping, HUANG Yong-heng, et al. Study of subcritical crack growth of rocks and threshold values in different environments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2737 - 2742. (in Chinese))