

# 分级加载蠕变全过程岩石硬化及损伤机制

邹建超<sup>1,2</sup>, 赵同彬<sup>1,2</sup>, 房凯<sup>1,2</sup>, 刘晓明<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**基于红砂岩单轴分级加载蠕变试验,结合对试验数据的整理与分析,研究红砂岩蠕变特性,探讨岩石分级加载过程中的硬化-损伤机制。研究表明:低应力水平阶段,瞬时变形模量逐级增大,红砂岩出现硬化现象,瞬时应变由0.0372%减小到0.0307%,岩石力学性质以硬化为主;中等应力水平阶段,硬化效应增强的同时损伤也在发展,硬化和损伤相互竞争,不断发展;高应力水平阶段,粘滞系数减小,导致损伤扩散速率增大,蠕变应变由0.013%增加到0.0218%,岩石的力学性质以损伤软化为主。以此为基础,在广义 Kelvin 模型中引入硬化函数和损伤变量,建立能反映红砂岩硬化-损伤机制的模型,并与红砂岩的试验曲线进行拟合,两者吻合较好。

**关键词:**分级加载蠕变;硬化-损伤机制;应力水平;修正广义 Kelvin 模型

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)06-0058-10

## Rock Hardening and Damage Mechanism in Step Loading Creep Process

Zou Jianchao<sup>1,2</sup>, Zhao Tongbin<sup>1,2</sup>, Fang Kai<sup>1,2</sup>, Liu Xiaoming<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Based on the data analysis of the uniaxial step loading creep test of red sandstone, this paper studied the creep property of red sandstone and probed the rock hardening and damage mechanism in the process of step loading. The results show that at low stress level stage, the transient deformation modulus increases with stress levels and the transient strain reduces from 0.0372% to 0.0307%, causing the red sandstone's hardening, which is the dominant rock mechanical property of this period. At moderate stress level stage, damage develops with the reinforcement of hardening effect and both of hardening and damage keep developing while competing with each other. At high stress level stage, the decrease of viscous coefficient leads to an increased damage diffusion rate, and with the creep strain increasing from 0.013% to 0.0218%, damage softening becomes the dominant mechanical behavior. A model was then established by introducing the hardening function and damage variable into the generalized Kelvin model to describe the hardening-damage mechanism of red sandstone. After comparing the model results with the curve of red sandstone tests, it is found that they are perfectly fitted.

**Key words:** step loading creep; hardening-damage mechanism; stress level; modified generalized Kelvin model

收稿日期:2015-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51474136,51408345);矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放课题基金项目(MDPC2013KF06)

作者简介:邹建超(1988—),男,山东威海人,硕士研究生,主要从事矿山岩体力学方面的研究. E-mail:zjc3579@126.com

赵同彬(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,从事巷道支护与矿山岩体力学方面的研究,本文通信作者. E-mail:ztbwh2001@163.com

在工程实际中,岩体受到的围岩应力或荷载的改变一般是随施工进度逐级增加的,这种逐级加载条件下的岩石蠕变是工程岩体重要的物理力学特性和工程现象<sup>[1-3]</sup>。因此,要研究巷道围岩流变变形,就需要对分级加载蠕变条件下岩石的变形特性及规律进行深入研究。以往对岩石蠕变规律及特性的研究大多集中在表象规律性探索方面,随着采矿工程和岩土工程问题的日趋复杂,只有对能够反映深部岩体蠕变特性的蠕变机制及模型进行深入研究,才有可能较好地解决实际工程问题。

随着岩石蠕变特性研究的深入,岩石蠕变机制问题成为学者们关注的焦点。余寿文等<sup>[4]</sup>总结出蠕变加载过程中裂纹尖端的钝化使得裂纹的扩展延缓,同时裂纹尖端损伤演化对裂纹的扩展起到了促进作用。范庆忠等<sup>[5]</sup>认为岩石力学性质硬化导致衰减蠕变的产生,岩石损伤软化导致加速蠕变的产生;对蠕变过程的描述应考虑这两种机制。范秋雁<sup>[6]</sup>通过对泥岩进行单轴压缩有、无侧限蠕变试验,重点分析了泥岩蠕变过程中结构的变化并提出岩石蠕变机制,即岩石的蠕变机制是岩石的裂隙扩展与内部应力场不断发展与调整的过程。梁小勇等<sup>[7]</sup>采用应变等效原理,在蠕变方程中引入时间硬化,推导相应的岩石蠕变方程,利用该方程拟合了页岩蠕变实验数据,揭示了蠕变现象的非线性本质。

岩石蠕变是一个非线性变化过程,建立能全面反映蠕变规律及特性的岩石非线性模型和方程是岩石蠕变研究的重要课题<sup>[8-10]</sup>。于是,许多学者通过建立非线性模型来解决这个问题。宋勇军等<sup>[11]</sup>通过在蠕变稳定阶段引入硬化应力阈值和硬化函数,在蠕变加速阶段引入损伤门槛值和损伤变量,建立的非线性蠕变模型可以全面反映岩石加载过程中的蠕变机制。张强勇等<sup>[12]</sup>考虑岩体的流变损伤劣化效应,引入损伤因子,建立一个非定常变参数的蠕变损伤本构模型,认为岩体的损伤演化是流变参数随时间逐渐弱化,从而直观反映材料的损伤劣化过程。

上述研究论述了岩石在单轴压缩蠕变过程中存在硬化和损伤现象,但并未提及硬化和损伤这两种机制在分级加载条件下的演化机理;同时,只考虑粘滞系数的非线性或只对弹性模量引入硬化或损伤变量都不能合理地解析分级加载蠕变过程。因此,本研究通过对红砂岩在分级加载条件下进行蠕变试验研究,总结出岩石分级加载蠕变条件下硬化-损伤机制,并引入能反映变形强化的硬化函数和损伤软化的损伤变量,建立了能反映分级加载蠕变全过程硬化-损伤机制的修正广义 Kelvin 模型,并通过与试验曲线的拟合验证模型的正确性与合理性。

## 1 红砂岩单轴蠕变试验

### 1.1 蠕变试验方案

课题组前期采用 RLJW-2000 型微机控制试验机对红砂岩标准试样进行了一系列单轴分级加载蠕变试验。各级加载应力水平根据常规单轴抗压强度平均值  $\sigma_c$  确定,如表 1 所列<sup>[13]</sup>。在同一试件上由小到大逐级施加荷载,提升载荷过程均以力控制方式进行,每级荷载加载速率为 50 N/s,采样间隔为 1 min;各级荷载持续时间恒定为 24 h 左右,然后进行下一级加载,依次类推逐级进行,直到试验试件发生蠕变破坏<sup>[14]</sup>。

表 1 蠕变试验加载方案  
Tab.1 Loading scheme of creep tests

序 号	1	2	3
应力水平	低应力	中等应力	高应力
区间范围	$(0\sim 40\%)\sigma_c$	$(40\%\sim 70\%)\sigma_c$	$(70\%\sim 100\%)\sigma_c$
加载级别	$10\%\sigma_c$	$10\%\sigma_c$	$(5\%\sim 10\%)\sigma_c$

### 1.2 试验结果分析

本次共完成 3 组红砂岩试件单轴压缩蠕变试验,其分级加载蠕变试验结果见表 2,轴向应变-时间试验曲线如图 1 所示。

表 2 分级加载蠕变试验结果

Tab. 2 Results of step loading creep test

试件编号	分级加载次数	蠕变破坏应力水平	每一级试验时间/h	试验总时间/h
2-1	9	90% $\sigma_c$	24.0	215
2-2	8	80% $\sigma_c$	24.0	182
2-3	9	90% $\sigma_c$	24.0	206

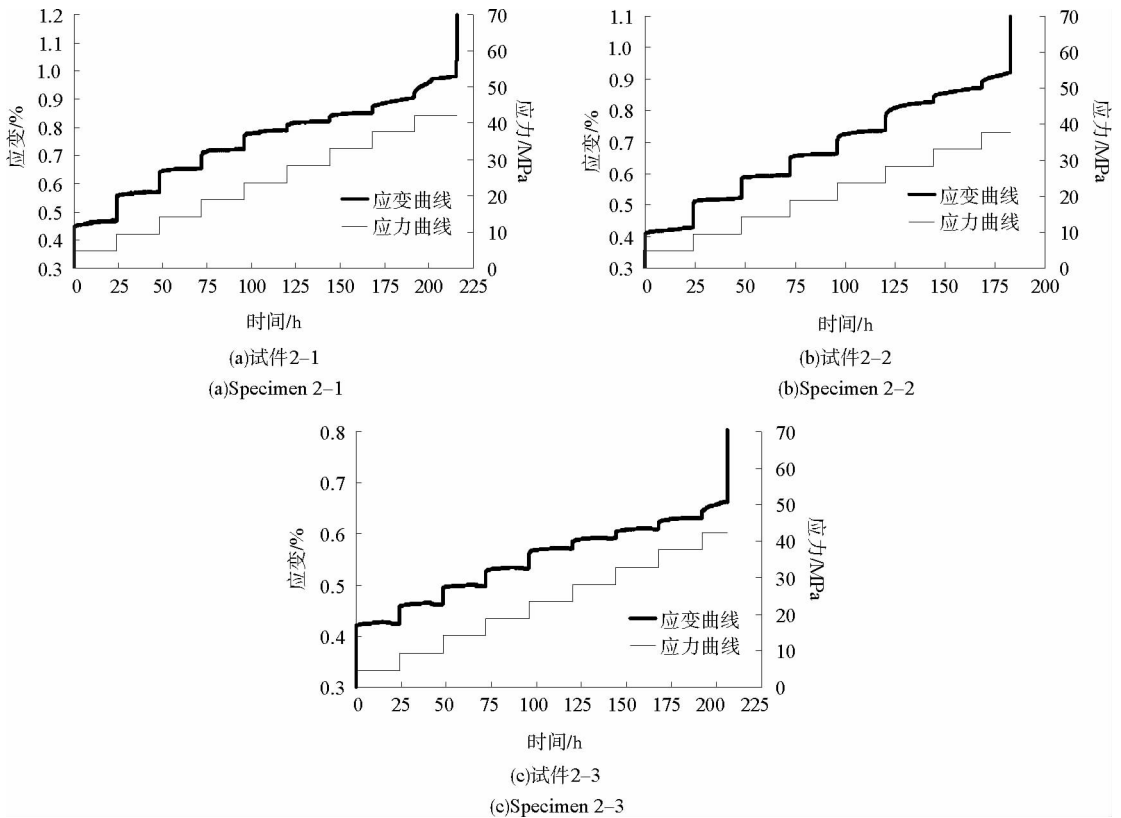


图 1 分级加载下红砂岩单轴压缩蠕变曲线

Fig. 1 Uniaxial compression creep curves of red sandstone under step loading

从整体来看,分级加载条件下,每一级应力加载初始,红砂岩发生瞬时弹性响应,产生瞬时变形,且瞬时变形较大,在总变形中占主要部分;荷载稳定之后红砂岩进入蠕变阶段,蠕变变形速率随时间延长而减小,变形增长缓慢,最后趋于稳定,此过程中蠕变变形量较小,不超过总变形量的 20%。

表 3 为红砂岩试件 2-3 各级加载应力、应变试验结果,根据表 3 各级应力与相对应产生的应变数据绘制出应力-应变关系曲线如图 2 所示。

从图 2(a)瞬时应变-应力曲线研究发现,低应力水平阶段,加载初始随着应力的逐级增大,轴向瞬时应变呈现下降趋势,由第二级的 0.037 2%减小到 0.030 7%,而径向瞬时应变则与轴向相反,呈现上升趋势,由第二级的 0.008 6%增大到 0.010 8%;当应力加载到 18.816 MPa 时,进入中等应力水平阶段,轴向瞬时应变依然呈下降状态,但径向瞬时应变表现为先增大后下降;在高应力水平阶段,在应力加载最后一级,轴向瞬时应变量相比于前一应力水平有所增加,达到了 0.021 5%,径向瞬时应变在高应力水平初期呈增大趋势,在应力最后一级则下降。

表 3 红砂岩试件 2-3 分级加载应力、应变统计表

Tab. 3 Stress and strain statistics of the red sandstone specimen 2-3 under step loading

应力水平/%	蠕变应力/MPa	红砂岩试件 2-3			
		轴向瞬时应变/%	轴向蠕变应变/%	径向瞬时应变/%	径向蠕变应变/%
10	4.704	0.422 9	0.017 9	0.072 8	0.001 9
20	9.408	0.037 2	0.015 4	0.008 6	0.002 5
30	14.112	0.032 4	0.014 5	0.010 3	0.004 5
40	18.816	0.030 7	0.013 5	0.010 8	0.004 5
50	23.520	0.027 9	0.014 8	0.012 1	0.004 1
60	28.224	0.020 4	0.015 6	0.004 2	0.004 5
70	32.928	0.015 3	0.013 0	0.004 8	0.003 7
80	37.632	0.013 6	0.017 3	0.006 0	0.003 4
90	42.336	0.021 5	0.021 8	0.005 2	0.009 0

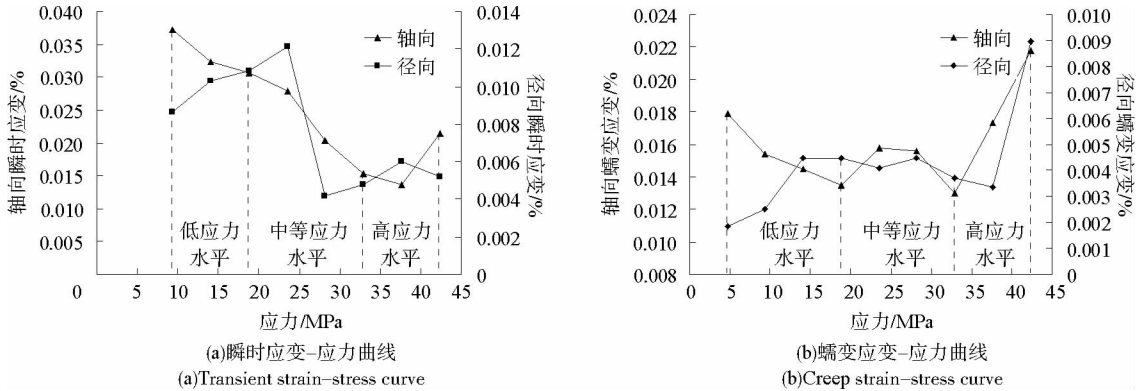


图 2 红砂岩试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of red sandstone

从图 2(b)蠕变应变-应力曲线可以看到,在低应力水平阶段,轴向、径向蠕变应变呈相反发展趋势,轴向蠕变应变由初始的 0.017 9% 下降到 0.013 5%,径向蠕变应变由初始的 0.001 9% 增加到 0.004 5%;在中等应力水平阶段和高应力水平初期,轴向、径向蠕变应变均表现为小范围的上下波动,应变值趋于稳定;而在高应力水平中后期,轴向、径向蠕变应变呈现相同的上升趋势,轴向蠕变应变增加显著,由 0.013% 增大到 0.021 8%,红砂岩试件发生失稳破坏。

## 2 蠕变全过程硬化-损伤演化机制

根据上述分析可以发现:红砂岩试件在分级加载条件下,随着应力水平的逐级提高和变形的增加,在低应力水平阶段,径向瞬时应变和蠕变应变逐级增加的同时,轴向瞬时应变和蠕变应变却在逐级减少。

从常规单轴压缩试验以及常应力下的蠕变试验等方面来看,岩石在加载受力后大都是以损伤软化为主,尤其是在高应力水平时岩石的力学性质是劣化的,因此相当一部分学者<sup>[11-12]</sup>认为岩石损伤出现在较高应力水平,且蠕变过程中损伤机制占主导地位。但上述对试验数据分析的结果却与此不同,这只能用一种机制来解释,即岩石在分级加载蠕变过程中,不仅仅存在损伤软化,还存在硬化,且两种机制在加载初始就同时存在;损伤软化可以解释分级加载过程蠕变应变的不断增长、低应力下横向蠕变的逐级增大以及高应力下加速蠕变的产生,硬化则可以解释分级加载过程衰减蠕变的产生以及各级瞬时应变逐级减小的现象,高延法

等<sup>[15-16]</sup>也论述过岩石在蠕变过程中存在硬化现象。对于上述现象,本研究将尝试进行一些探讨。

## 2.1 加载过程中红砂岩的硬化和损伤现象

本研究采用能够表征应力、应变以及时间三者之间相互关系的弹性模量、粘滞系数来分析岩石分级加载条件下的硬化-损伤机制。

弹性介质模型为虎克体,通常用一个具有一定刚度的弹簧来表示,其本构方程为:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

根据红砂岩分级加载蠕变曲线并结合式(1)可得瞬时变形模量

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (2)$$

其中: $E_m$ 为瞬时变形模量; $\sigma_a$ 为各级加载初始的应力; $\sigma_b$ 为各级加载稳定后的应力; $\epsilon_a$ 为应力为 $\sigma_a$ 时的轴向应变值; $\epsilon_b$ 为应力为 $\sigma_b$ 时的轴向应变值。

粘性介质模型为牛顿体,通常用粘壶来表征岩石的粘性,即流变性,岩石应变与时间的关系一般常用牛顿粘性定律来描述,其本构方程为:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (3)$$

粘壶的应变速率:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (4)$$

应力保持不变时,则有

$$\eta = \frac{\sigma_b}{\dot{\epsilon}} = \frac{\sigma_b \Delta t}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (5)$$

其中: $\eta$ 为蠕变粘滞系数; $\epsilon_1$ 为各级加载应力稳定后的初始蠕变应变; $\epsilon_2$ 为各级加载完成时的蠕变应变; $\Delta t$ 为每一级蠕变加载的时间。

根据上述应力-应变关系,结合式(2)、(5)整理得到红砂岩在瞬时加载下变形模量随应力变化曲线见图3,蠕变过程中粘滞系数随应力变化曲线见图4。

低应力水平下,在加载初始瞬时变形模量最小,仅为 1 GPa 左右,随着应力的增大,瞬时变形模量平缓增长;而蠕变粘滞系数受瞬时变形模量增大的影响也随应力的增大而逐级增大,且增长趋势较大。当应力达到 18.816 MPa 后,瞬时变形模量曲线的斜率增大,随应力近似呈线性关系增长,说明红砂岩抵抗瞬时塑性变形的能力逐渐增强,在分级加载过程中产生了硬化,表现出明显的硬化性质;而此时蠕变粘滞系数却开始减少,并在随后两级应力加载下,其值变化较小,原因是红砂岩在蠕变过程中产生了蠕变损伤,削弱了瞬时变形模量的增大对其的影响。当应力增加到 32.928 MPa 时,粘滞系数下降幅度增大,同时,瞬时变形模量增加的趋势减缓,受粘滞系数逐级减小的影响,在随后的应力加载下,瞬时变形模量大幅度下降,红砂岩内部损伤扩散速率增大,抵抗变形的能力逐渐减弱,表现出明显的蠕变软化性质。

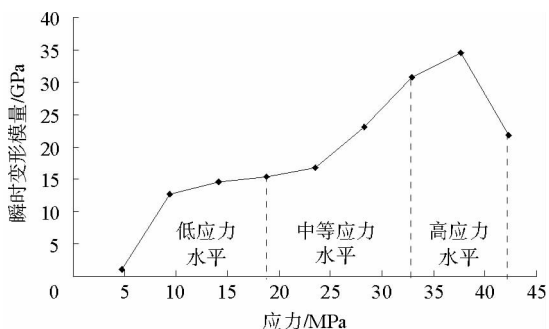


图 3 瞬时变形模量变化曲线

Fig. 3 Curves of transient deformation modulus

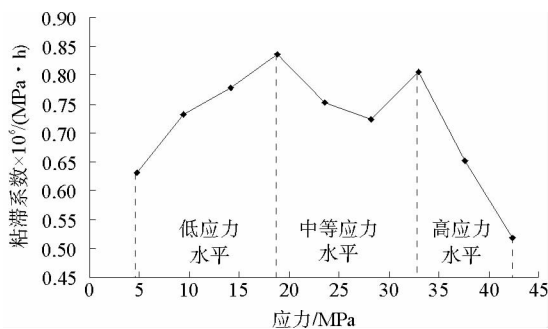


图 4 蠕变粘滞系数变化曲线

Fig. 4 Curves of creep viscous coefficient

## 2.2 硬化-损伤演化机制

根据上述试验结果分析,可将轴向总应变  $\epsilon$  分解成两部分:一部分为瞬时应变  $\epsilon_m$ ;另一部分为蠕变应变  $\epsilon_c$ ,即

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_c ; \tag{6}$$

体应变  $\theta$  指单位体积的改变量,公式为

$$\theta = \epsilon_x + \epsilon_y . \tag{7}$$

其中: $\epsilon_y$  为轴向应变, $\epsilon_x$  为径向应变。

根据式(6)和(7),并结合表 3 的试验数据,整理得到红砂岩轴向总应变-应力关系曲线见图 5、体应变随应力变化曲线见图 6。

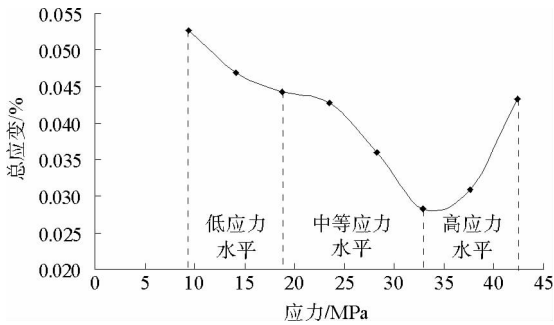


图 5 轴向总应变-应力曲线

Fig. 5 Curves of axial total strain-stress

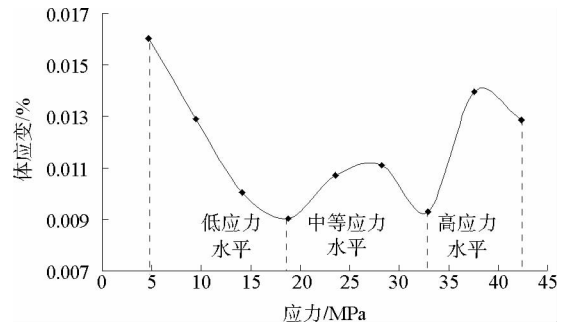


图 6 体应变-应力曲线

Fig. 6 Curves of bulk strain-stress

分析发现,加载初期低应力、中等应力阶段,受瞬时变形模量和粘滞系数共同作用,轴向总应变随着应力的增大而逐级减少,由 0.052 6%降到了 0.028 3%;而体应变在低应力水平阶段,呈逐级减少的趋势,而在中等应力水平阶段,则呈现高低起伏状态,表现为:体应变值由 0.009%增加到 0.011 1%,随后又降到 0.009 3%。当应力达到 32.928 MPa,进入高应力水平阶段后,轴向总应变开始呈现逐级增加趋势,由 32.928 MPa 时的 0.028 3%增加到 42.336 MPa 时的 0.043 3%;当应力达到 37.632 MPa 时,体应变值增大到 0.013 9%,在最后一级,其值又减小到 0.012 8%。

通过上述的研究分析,总结出在分级加载蠕变全过程中红砂岩硬化-损伤演化机制:瞬时加载过程中,由于变形模量的增大,加载过程硬化效应较强,产生明显的硬化现象;蠕变加载过程中,受瞬时加载的影响,粘滞系数呈现波动性,但总体以损伤软化为主方向。结合整个分级加载蠕变过程,低应力水平阶段,以硬化为主方向;中等应力水平阶段,在硬化效应增强的同时损伤也在发展,两种机制此消彼长,相互竞争,共同发展;高应力水平阶段初期,岩石在破坏前,必将经历内部能量积聚和损伤累积过程<sup>[17-18]</sup>,这一过程中,岩石经过多级压缩变形以及微裂纹端面间的摩擦,导致内部能量积聚得不到释放,硬化效应短暂增强,随后岩石内部不断劣化,损伤效应的累积与扩散不平衡,损伤扩散速率增大,不足以承载外界应力而发生蠕变破坏,损伤软化效应占主导。

## 3 岩石非线性蠕变模型

### 3.1 蠕变模型的建立

修正的广义 Kelvin 模型如图 7 所示。结合文献[12]和[19]的建模思路,在广义 Kelvin 模型的基础上通过引入非线性硬化的弹簧代替模型 A 区的弹簧,引入非线性软化的粘壶代替模型 B 区的粘壶,从而组成带有硬化函数和损伤软化变量的非线性模型来对岩石分级加载蠕变条件下的硬化-损伤机制进行分析。

在分级加载条件下瞬时加载过程中变形模量产生了硬化现象,因此,对于模型 A 区的弹簧:  $\sigma = E_1(\sigma, t)\epsilon_1$ 。

引入硬化函数<sup>[20]</sup>:

$$E_1(\sigma, t) = E_1 \sigma^\gamma t^{1-\alpha} \quad (8)$$

其中:  $\gamma, \alpha$  为材料常数,且  $0 < \alpha < 1, 0 < \gamma < 1$ 。

$$\sigma = E_1 \sigma^\gamma t^{1-\alpha} \epsilon_1 \quad (9)$$

所以,模型 A 区的蠕变方程为:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma^{1-\gamma}}{E_1 t^{1-\alpha}} \quad (10)$$

在分级加载条件下蠕变加载过程中粘滞系数产生了软化现象,因此,对于模型 B 区的粘壶:  $\sigma_1 = \eta \dot{\epsilon}_2$ 。

按照损伤的定义,引入损伤变量<sup>[21]</sup>:

$$D = 1 - \eta(\sigma, t) / \eta_0 \quad (11)$$

其中:  $\eta_0$  为初始粘滞系数;  $\eta(\sigma, t)$  为有效粘滞系数。

根据 Kachanov 蠕变损伤律:

$$\dot{D} = A \sigma^k (1 - D)^{-k} \quad (12)$$

其中:  $A, k$  为材料常数,  $D$  为损伤变量,  $\dot{D}$  为损伤率。

对式(12)积分得损伤临界破坏时间:

$$t_R = [A(1+k)\sigma^k]^{-1} \quad (13)$$

则由(12)、(13)两式可得损伤变量  $D$  演化规律为:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{k+1}} \quad (14)$$

将式(14)带入式(11)可得有效模量:

$$\eta(\sigma, t) = \eta_0 \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{k+1}} \quad (15)$$

因此, B 区粘壶的本构方程为:

$$\sigma_1 = \eta_0 \dot{\epsilon}_2 \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{k+1}} \quad (16)$$

对于模型 B 区的弹簧:  $\sigma_2 = E_2 \epsilon_2$ 。则 B 区应力表达式变为:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \eta_0 \dot{\epsilon}_2 \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{k+1}} + E_2 \epsilon_2 \quad (17)$$

式(17)可变为

$$\sigma - E_2 \epsilon_2 = \eta_0 \frac{d\epsilon_2}{dt} \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{k+1}} \quad (18)$$

对式(18)进行积分可得其解为:

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-h \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^n\right]}\right) \quad (19)$$

其中:  $h = \frac{(k+1)E_2 t_R}{k\eta_0}$ ,  $n = k/(k+1)$ 。

根据两个力学模型串联的基本力学特性,当外力作用于模型的两端时,模型两端的应力是相等的,而其应变为两模型的应变之和,因此,修正的广义 Kelvin 模型的本构方程为:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 = \frac{\sigma^{1-\gamma}}{E_1 t^{1-\alpha}} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-h \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t_R}\right)^n\right]}\right) \quad (20)$$

式(20)能够描述岩石在分级加载过程中的蠕变全过程曲线,同时能够反映岩石分级加载蠕变全过程的硬化-损伤机制。

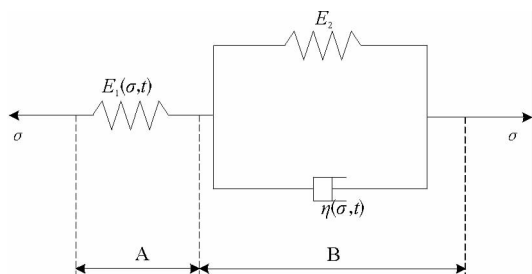


图 7 修正的广义 Kelvin 模型

Fig. 7 Modified generalized Kelvin model



### 3.2 模型验证及参数确定

对红砂岩试件 2-3 试验曲线中 3 个典型的应力水平的蠕变试验数据进行拟合与参数识别,从而通过模型和方程来验证本文提出的岩石分级加载蠕变条件下硬化-损伤演化机制的正确性与合理性。选取的应力水平分别为 4.704, 23.52 和 42.336 MPa。当  $\sigma=4.704$  MPa 时,红砂岩试件处于低应力水平加载阶段;当  $\sigma=23.52$  MPa 时,红砂岩试件处于中等应力水平加载阶段;当  $\sigma=42.336$  MPa 时,红砂岩试件处于高应力水平加载阶段,采用公式(20)进行曲线拟合和参数的识别。得到的拟合曲线与试验曲线对比如图 8 所示,蠕变参数见表 4。

表 4 蠕变模型参数

Tab. 4 Parameter identification of creep model

$\sigma$ / MPa	$E_1$ / MPa	$E_2$ / MPa	$h$	$t_R$ / h	$\gamma$	$\alpha$	$n$	$R^2$
4.704	7.11	835.0	$1.2 \times 10^7$	$9.4 \times 10^6$	0.30	0.370	0.664	0.961 3
23.520	17.40	558.0	89 120	1 720	0.47	0.420	0.652	0.974 7
42.336	14.63	120.3	1 500	18	0.61	0.344	0.679	0.985 8

从图 8 的对比曲线来看,曲线吻合较好。因此,本文所建立修正的广义 Kelvin 模型可以较好地反映岩石分级加载蠕变全过程的硬化-损伤机制。

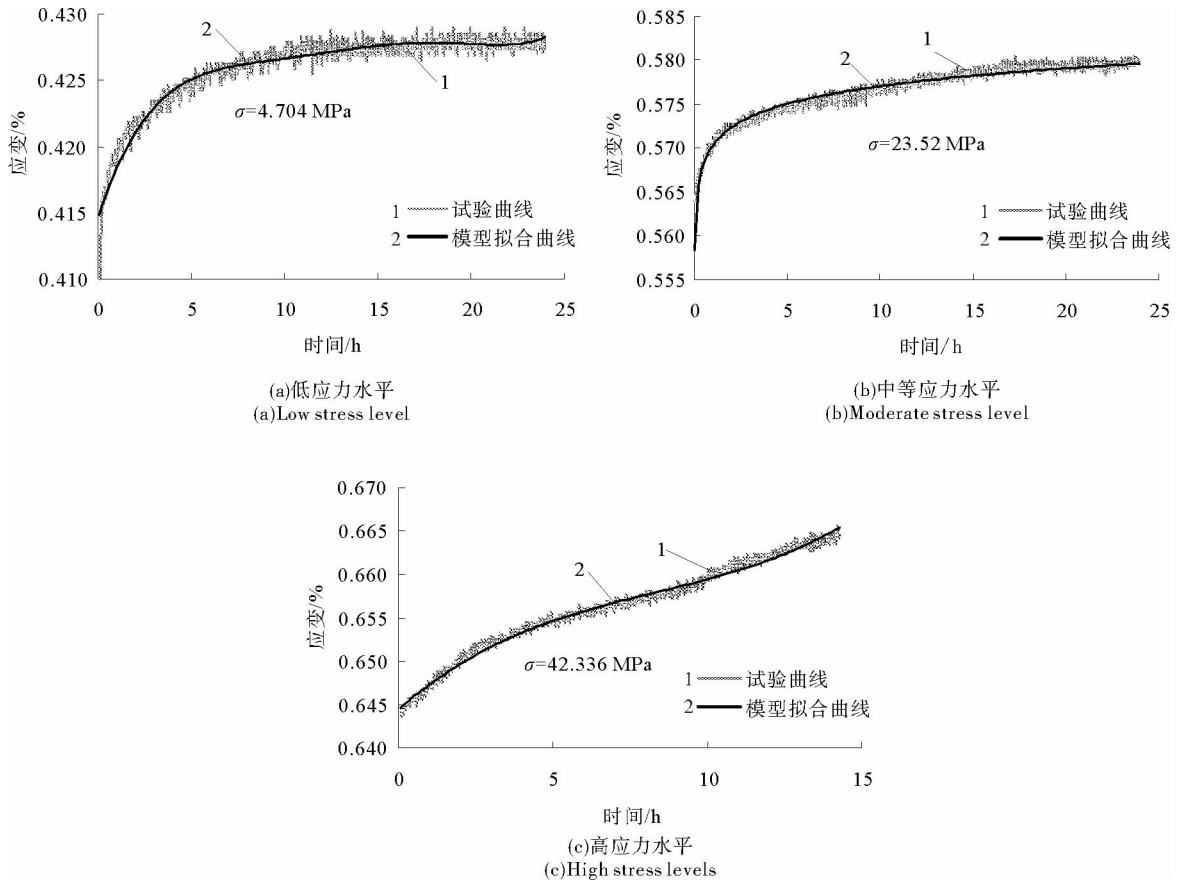


图 8 试验结果与模型拟合曲线

Fig. 8 Results of test and fitting curve of model



## 4 结论

1) 低应力水平阶段, 受瞬时加载过程中变形模量增大、红砂岩力学性质发生硬化的影响, 蠕变加载过程中粘滞系数也随应力的增大而增大; 中等应力水平阶段, 在瞬时变形模量增大的同时, 蠕变粘滞系数却开始减少, 其原因是红砂岩在蠕变过程中产生了损伤, 削弱了瞬时变形模量的增大对其的影响; 高应力水平阶段, 瞬时变形模量增加的趋势减缓并在最后一级大幅度下降, 粘滞系数逐级减小, 表现出明显的软化性质。

2) 根据分级加载蠕变试验结果, 岩石分级加载的整个过程中, 硬化-损伤两种机制始终存在, 可将分级加载蠕变过程看成是硬化、软化共同作用, 相互竞争的结果。在不同应力水平和不同时间阶段、不同的机制占主导地位; 同时, 硬化和损伤具有逐级传递性和累积性。

3) 结合硬化、损伤理论从基本的元件流变模型入手, 在广义 Kelvin 模型中引入硬化函数和损伤变量来描述岩石微观结构的变化引起力学性质的硬化和软化, 验证了分级加载蠕变条件下红砂岩硬化及损伤机制演化规律。

### 参考文献:

- [1] 袁海平, 曹平, 王文, 等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1576-1581.  
Yuan Haiping, Cao Ping, Wan Wen, et al. Study on creep rules of soft and intricate ore-rock under step load and unload[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1576-1581.
- [2] 陶振宇, 王宏, 余启华. 分级加载下大理岩的流变特性试验研究[J]. 四川水利发电, 1991(1): 23-29.  
Tao Zhenyu, Wang Hong, Yu Qihua. Experimental study on rheological properties of marble under step loading[J]. Sichuan Water Power, 1991(1): 23-29.
- [3] 张忠亭, 陶振宇. 洞室围岩收敛变形的时间效应特性研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1992, 25(4): 429-436.  
Zhang Zhongting, Tao Zhenyu. A study on the time-dependent convergence behavior of the underground opening surrounding rock[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1992, 25(4): 429-436.
- [4] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 237-242.
- [5] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 391-396.  
Fan Qingzhong, Gao Yanfa. Study of creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391-396.
- [6] 范秋雁, 阳克青, 王渭明. 泥质软岩蠕变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1555-1561.  
Fan Qiuyan, Yang Keqing, Wang Weiming. Study of creep mechanism of argillaceous soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1555-1561.
- [7] 梁小勇, 薛晓辉, 王虎妹, 等. 岩石时间硬化损伤蠕变特性[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2013, 32(4): 509-512.  
Liang Xiaoyong, Xue Xiaohui, Wang Humei, et al. Damage creep characteristics of rock time-hardening[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2013, 32(4): 509-512.
- [8] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.  
Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [9] 郑榕明, 陆浩亮, 孙均. 软土工程中的非线性流变分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 1-13.  
Zheng Rongming, Lu Haoliang, Sun Jun. Nonlinear creep analysis, for soft soil engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 1-13.
- [10] 王思敬, 傅冰俊, 杨志法, 等. 中国岩石力学与工程: 世纪成就[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 123-146.
- [11] 宋勇军, 雷胜友, 刘向科. 基于硬化和损伤效应的岩石非线性蠕变模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增 2): 287-292.  
Song Yongjun, Lei Shengyou, Liu Xiangke. Non-linear rock creep model based on hardening and damage effect[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 287-292.
- [12] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 732-739.  
Zhang Qiangyong, Yang Wendong, Zhang Jianguo, et al. Variable parameters-based creep damage constitutive model and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 732-739.
- [13] 赵同彬, 谭云亮, 刘珊珊, 等. 加锚岩体流变特性及锚固控制机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1730-1734.

- Zhao Tongbin, Tan Yunliang, Liu Shanshan, et al. Analysis of rheological properties and control mechanism of anchored rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(6):1730-1734.
- [14] 赵同彬. 深部岩石蠕变特性试验及锚固围岩变形机理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009:10-30.
- [15] 高延法, 范庆忠, 崔希海, 等. 岩石流变及其扰动效应试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007:29-41.
- [16] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 岩石弹黏塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3):477-486.
- Zhao Yanlin, Cao Ping, Wen Youdao, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3):477-486.
- [17] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 基于颗粒流理论的煤岩冲击倾向性细观模拟试验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(2):280-285.
- Zhao Tongbin, Yin Yanchun, Tan Yunliang, et al. Bursting liability of coal research of heterogeneous coal based on particle flow microscopic test[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2):280-285.
- [18] 高赛红, 曹平, 汪胜莲, 等. 改进的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型及其硬化黏滞系数的修正[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(6):936-943.
- Gao Saihong, Cao Ping, Wang Shenglian, et al. Improved nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of rock and its correction of hardening coefficient of viscosity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(6):936-943.
- [19] 张忠亭, 罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(2):218-222.
- Zhang Zhongting, Luo Jujian. Study on creep properties of rock under step load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2):218-222.
- [20] 金尧, 孙训方, 孙亚方, 等. 考虑加载历史影响的蠕变律[J]. *机械强度*, 2001, 23(2):206-208.
- Jin Yao, Sun Xunfang, Sun Yafang, et al. Creep law with effect of loading history[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(2):206-208.
- [21] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999:15-42.

(责任编辑: 吕海亮)

---

### (上接第 51 页)

- [4] 曹庆贵, 张广宇, 张建. 基于神经网络和证据理论的煤矿风险预警模型[J]. *矿业安全与环保*, 2011, 38(1):81-83.
- Cao Qinggui, Zhang Guangyu, Zhang Jian. Research on coal mine early-warning model based on BP neural network and Dempster-Shafer theory of evidence[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2011, 38(1):81-83.
- [5] 陈玉玉. 我国煤炭企业的流动性风险评价实证研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2014:20-21.
- [6] 崔海雪. 基于煤炭企业社会责任的因子分析绩效评价模型和实证分析[D]. 合肥: 安徽大学, 2014:18-19.
- [7] 贺亚平. 智能自动管控系统研究[J]. *科技视界*, 2015(6):178.
- [8] 张红霞. 农业产业化龙头企业全面风险管理体系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012:149-150.

(责任编辑: 吕海亮)