

文章编号: 1001-4888(2020)04-0719-10

砂岩卸围压蠕变特性及非定常蠕变模型^{*}

张树光^{1,2}, 陈雷¹, 刘文博¹, 赵恩禄¹, 常剑¹

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西桂林 541000)

摘要: 为了研究在不同围压卸载条件下, 砂岩蠕变变形的变化规律以及蠕变参数劣化规律, 采用TAW-2000试验机对砂岩进行室内分级卸围压蠕变试验研究, 然后结合损伤力学理论将蠕变参数非定常化, 建立非定常参数西原蠕变模型, 最终将试验数据与模型曲线进行对比验证。试验结果表明: 对砂岩进行不同初始轴向应力的卸围压试验, 岩石的蠕变泊松比与蠕变变形一样, 都具有衰减、稳定和加速三个阶段, 蠕变泊松比是一个时间的函数, 在加载过程中蠕变泊松比都超过常规状态下的值, 甚至超过1; 建立非定常模型与试验数据具有良好拟合度, 它不仅准确地反映了衰减和稳定蠕变阶段蠕变特性, 也克服了传统西原体难以描述加速蠕变的缺点。

关键词: 蠕变参数劣化; 非定常; 蠕变泊松比; 分级卸围压

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-198

0 引言

地下煤矿和矿产资源的开采都是一个卸载过程, 在应力卸载过程中会导致地下围岩产生较大的变形, 如果对于围岩的支护不当, 就有可能导致塌方等安全事故^[1]。为了安全有效地开挖地下井巷和开采地下矿产资源, 有必要进行室内岩石蠕变试验。对于不同情况下岩石的蠕变特性进行深入研究, 对保证开采工程的长期稳定性和安全性具有重要意义^[2,3]。基于蠕变试验的研究成果可以发现, 现有试验研究和理论模型的建立大多是基于加载蠕变特性试验, 对于岩石卸载蠕变试验的研究甚少, 故本文基于试验结果分析岩石在卸载路径下破坏机制^[4]。

卢自立等^[5]通过室内蠕变试验研究变质砂岩的卸载蠕变特性, 试验得出在峰前卸载时变质岩会呈现出张剪性破坏形态, 其脆性随着围压的增大而减小。张黎明等^[6]对大理石卸围压破坏试验采用极点对称模态分解方法进行声发射数据去噪处理, 研究了大理岩在变形破坏过程中的声发射特性。李林峰^[7]通过对辉绿岩进行加卸载试验并结合强度准则分析了其在加载、卸载过程中的力学特性, 研究结果表明: 岩石在卸围压条件下, 具有应变软化特性和破裂膨胀特性。俞缙等^[8]采用江西红砂岩进行气体渗透三轴试验及声发射监测, 得出在不同卸载应力路径下, 岩石应力峰值随有效围压增大而增大, 在相同加载方式下围压的增大并不影响渗透率曲线发展趋势。张雪颖等^[9]基于试验结果, 研究了岩样卸围压的变形破坏及其能量特征, 得出孔隙水压力不仅加速了岩石的脆性破裂, 而且高围压情况下卸载比低围压卸载更容易破坏。

本文采用现场取样阜新恒大煤矿巷道围岩进行卸围压三轴蠕变试验, 研究砂岩在不同卸载路径下的应变-时间关系和参数变化情况, 并分析各种条件下的围岩损伤演化, 结合损伤力学理论建立黏弹型

^{*} 收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51274109), 辽宁省教育厅项目资助(LJCL004)

通讯作者: 张树光(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程及岩石力学方面的研究。Email: zhangshuguang168@163.com

性损伤蠕变方程,最后通过试验数据验证建立模型的合理性。

1 砂岩三轴蠕变试验

1.1 试验仪器与试验制备

本文采用 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机(如图 1(a))对砂岩进行蠕变试验,该试验机具有多个控制变换模式,对应的每种控制变换模式下有一种试验功能。试验机的刚度大致为 10GN/m ,在轴向加载的最大值为 2000kN ,轴向测力的精度为 20N ,围压最大可加载至 100MPa ,轴向和径向的加载误差大致在 $-2\%\sim+2\%$ 之间,加载的试样尺寸必须满足 $\phi 50\times 100$ 。加载过程中为了保证试样在各个方向上的受力均匀,本试验机采用了自平衡方式进行调节,且轴向压力和径向围压的加载系统属于独立的两个装置,即轴向压力的加载并不会影响围压的加载,采用相互独立的系统分别加载轴压和围压,对后期试验数据的分析和提取较为有利。同时,对于在加载过程中岩石变形的监测与提取,该设备也分别设置两个独立的引伸计(如图 1(b)),轴向引伸计和径向引伸计在测定变形时相互不干扰,使得测取数据的精确性得到保障,也增加了数据的可信度^[10,11]。



图 1 岩石三轴试验机和引伸计

Fig. 1 Rock triaxial testing machine and extensometer



图 2 砂岩岩样

Fig. 2 Sandstone rock sample

本文所用砂岩采自阜新市恒大煤矿,由砂粒胶结而成,成分主要有石英、长石及少量胶结物。由于所取砂岩体积过大,为了运输便捷,岩样在现场做简单切割处理,然后到实验室内进行精确加工;试样按照岩石相关试验规程要求进行精加工,制作成高为 100mm ,直径为 50mm 的标准圆柱形试件(如图 2)。

1.2 试验方案

卸围压蠕变试验方案如下:(1) 在静水压力条件下,通过试验机油压系统按照 200N/s 加载速率,将围压值加载至预定值;(2) 将轴向和径向变形清零;(3) 以 200N/s 加载速率施加轴向压应力至预定值;(4) 以 200N/s 卸载速率进行卸围压到预定值,保持此围压值进行蠕变试验;(5) 当岩石蠕变进入稳定蠕变阶段或者变形稳定(径向变形小于 $0.03\text{mm}/24\text{h}$)时,就可以进行下一级围压卸载;(6) 重复上述步骤直至岩石变形破坏为止;(7) 保存岩石的轴向和径向变形数据。由于本文选用的 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机是一种通过自平衡

方式调节轴压和围压的加载设备,为保证在蠕变试验过程中试验数据的准确性,轴压需一直保持预定值不变。在每次对围压进行卸载时,注意轴压的变化,如果轴压开始降低,立即按照原来的加载速率对轴压进行相应的补充,使其达到预定值即可,具体的应力加载、卸载路径如图 3 所示^[12]。

根据在实际巷道中测得围岩所受应力的大小,将试验的初始围压设定为 30MPa,轴向应力分别加载至 70MPa、80MPa 和 90MPa,保持加载稳定后首先将围压进行卸载(围压每次卸载 5MPa),并根据轴压的损失适当补充轴压到预定值,待到蠕变变形进入到稳定蠕变后,重复上述步骤直至岩石破坏。试验采用的偏差应力加载方案见表 1。

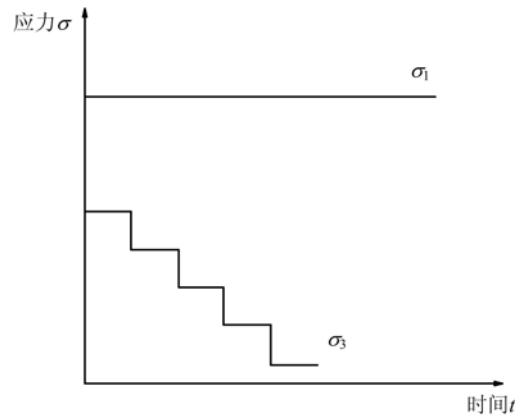


图 3 试验应力路径卸载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test stress path

表 1 试验方案
Tab. 1 Test plan

轴向水平应力/MPa	轴压 $\sigma_1=70$ MPa	轴压 $\sigma_1=80$ MPa	轴压 $\sigma_1=90$ MPa
第一级围压(偏应力)/MPa	30(40)	30(50)	30(60)
第二级围压(偏应力)/MPa	25(45)	25(55)	25(65)
第三级围压(偏应力)/MPa	20(50)	20(60)	20(70)
第四级围压(偏应力)/MPa	15(55)	15(65)	15(75)

2 试验结果分析

运用 Boltzmann 叠加原理,将蠕变全过程曲线简化为各级轴径体向蠕变曲线如图 4 所示。

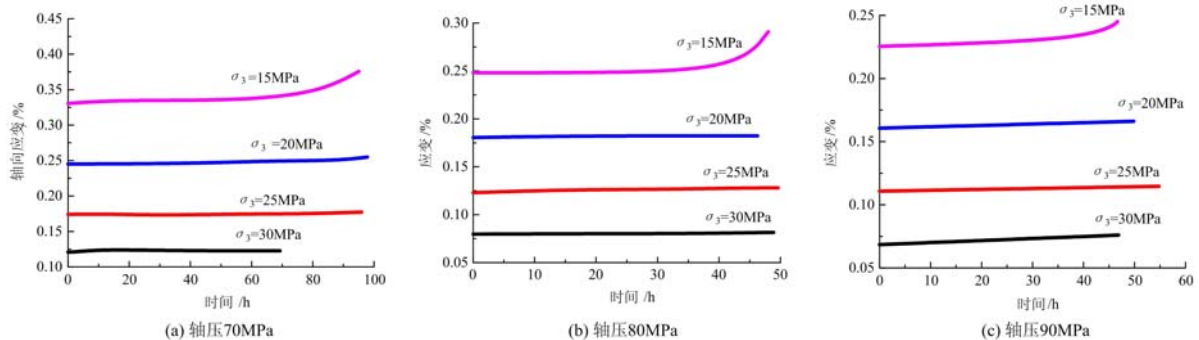


图 4 轴向蠕变曲线

Fig. 4 Axial creep curve

由图 4 可知,在同一初始围压条件下开展卸围压蠕变试验时,当试验初始轴向应力越大,岩石的初始瞬时变形量就越小。例如,当轴压为 80MPa 时,岩石的初始瞬时变形量为 0.07965%,当轴压为 90MPa 时,岩石的初始瞬时变形量为 0.06843%。轴向蠕变变形总体上随围压的降低而增加,蠕变变形占总变形的比例随围压的降低而增大,瞬时变形随围压的降低而增加,但占总变形的比例随围压的降低而降低。以轴压 70MPa 为例,当围压为 30MPa 时,岩石的瞬时变形为 0.1211%,蠕变变形为 0.017%,瞬时变形占总变形的比例为 87.69%,蠕变变形占总变形的比例为 12.31%;当围压为 25MPa 时,岩石的瞬时变形为 0.1723%,蠕变变形为 0.0334%,瞬时变形占总变形的比例为 83.88%,蠕变变形占总变形的比例为 16.24%。随着围压的降低,试样轴向变形逐渐由出现衰减蠕变形态向稳定蠕变、加速蠕变过渡,蠕变变形值逐渐增大,蠕变变形越来越明显。同时,相对于同等初始围压条件下的加载蠕变试验

而言,在卸围压蠕变试验中,围压对岩石做功产生的能量较少,故在最后一级荷载作用时,岩石经历较长时间的稳定蠕变变形。当积聚在试件内部的能量向卸载方向释放,以及在裂隙尖端拉应力超过该点的抗拉强度时,会造成岩石发生蠕变变形破坏。

在一般试验条件下,泊松比 μ 可以定义为岩石材料在压缩或者拉伸过程中,所产生轴向应变和径向应变的比值,即

$$\mu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (1)$$

式中, ϵ_x 为横向应变值; ϵ_y 为轴向应变值。

由于岩体的各向异性特征,岩石在外荷载作用下各向呈现的变形特性并非完全一致,对于圆柱体试样来说,轴向变形能力与径向变形之间的关系往往通过泊松比来确定。在描述岩石的基本力学性质时,一般将岩石的泊松比 μ 假定为一个常数值,然而岩石作为一种复杂的黏弹塑性材料,在外荷载作用下,伴随岩石内部结构的不断弱化与重组,岩石的基本物理力学性质也在不断地发生变化,因此分析泊松比与应力状态以及时间的关系,将泊松比看做随时间与应力的变化量更能反映岩石的本质属性^[13]。

根据试验测得的轴向和径向蠕变变形数据,计算出不同时刻作用下的蠕变泊松比数据,绘制出分级卸载条件下的蠕变泊松比变化规律曲线如图 5 所示。

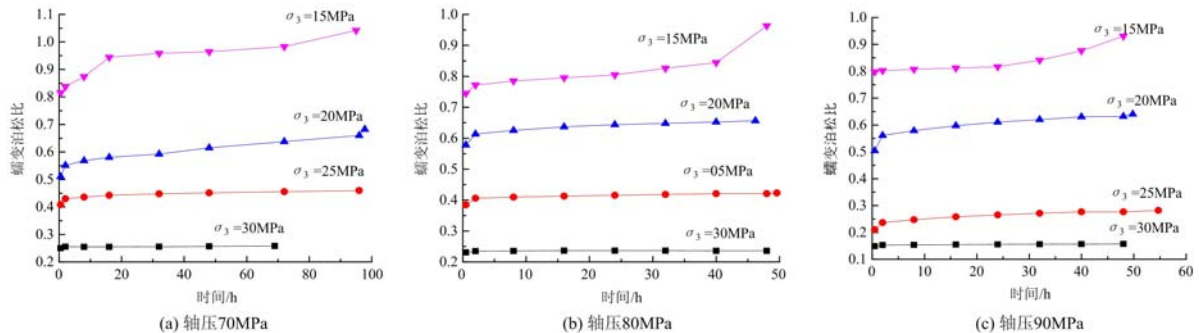


图 5 蠕变泊松比

Fig. 5 Creep Poisson's ratio

从图 5 中可知,在低应力作用下,岩石内部的缺陷和裂隙基本都是压缩裂隙状态,岩石的泊松比呈现出降低的趋势,这说明在应力作用下,岩石内部缺陷和裂隙先是逐渐闭合,再随着应力的增大逐渐开裂,最终造成了泊松比随着加载时间的推移而逐渐增大。蠕变泊松比总体上也与轴径体向蠕变曲线所呈现的规律基本一致,从低应力到高应力状态下分别经历了衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变三个阶段,最后蠕变泊松比都超过常规状态下的值(一般泊松比不超过 0.5),甚至超过 1。

蠕变速率就是各个应变数据值对于时间求一阶导数所得的数值,可以较好地反映在掩饰蠕变过程中变形的基本规律,而在处理数据进行求解蠕变速率时,基于以往学者们对于岩石蠕变速率的试验数据可知,由于各个试件的差异性和内部微小缺陷的影响,使得所得到数据非均匀以及整体上具有较大的波动。本文采用软件 Origin 对不利数据进行剔除,并根据以往蠕变速率经验公式对其进行非线性拟合,得出轴压为 90 MPa 的轴向和径向蠕变速率如图 6 所示。

本文采用下式对轴压为 90 MPa 卸载时的轴径向蠕变速率数据进行非线性拟合

$$\epsilon_s = a \exp(-\frac{t}{b}) + c \exp(-\frac{t}{d}) + e \quad (2)$$

式中, a, b, c, d, e 为拟合参数。

由图 6 可知,在前三级荷载作用下,轴向蠕变速率曲线都在初始加载瞬间具有一个较大的蠕变速率,随着时间的推移逐渐减小,加载到一定时间后,岩石在低应力作用下的蠕变速率逐渐趋于零,此时岩石试样只经历了衰减蠕变阶段;而在较高应力作用下蠕变速率则会趋于一个稳定的数值,此时岩石试样不仅经历了衰减蠕变阶段,而且还经历了稳定蠕变阶段;在最后一级荷载作用下,经历衰减蠕变和稳定蠕变阶段之后,应变值急剧增大,即蠕变速率突然变大,导致最后一级轴径向蠕变速率曲线在初始很长

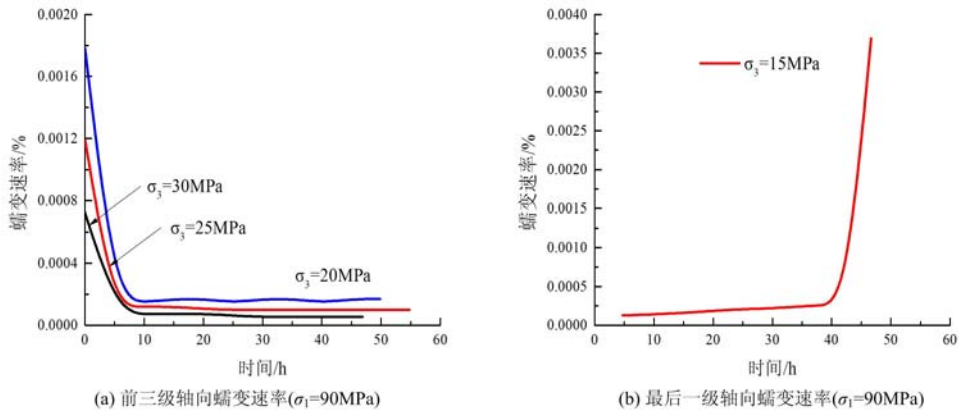


图6 蠕变速率

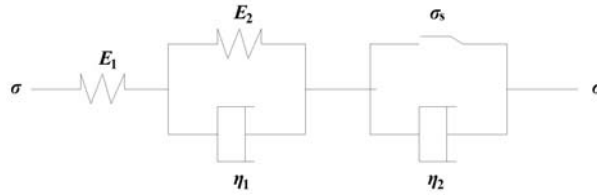
Fig. 6 Creep strain rate

一段时间内基本为直线,在进入加速蠕变阶段后,便近乎直线上升直至试样失稳破坏。

3 非定常蠕变模型的建立与参数识别

3.1 模型建立

对于蠕变过程的描述,通常采用传统模型可以进行较好地描述,其中西原体模型可以较好地描述岩石的衰减蠕变和稳定蠕变^[14,15],它的力学模型由一个开尔文模型和宾汉姆模型串联组合而成,示意图如图7所示。

图7 西原体力学模型^[15]Fig. 7 Nishihara mechanics model^[15]

根据岩石流变模型理论中的串并联法则得出,在一维应力状态下西原模型的蠕变方程为^[16]

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta_1} t)), & \sigma \leq \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta_1} t)) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t, & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_0 为瞬时弹性模量; E_1 为黏弹性模量; η_1 、 η_2 分别为黏滞系数; σ_s 为屈服应力。

岩石在外力、水力、温度、地址特征及施工扰动等因素作用下,岩石的力学特性呈现出明显的时效性,根据文献^[17]可知,岩石的弹性模量 E 、黏滞性系数 η 与时间 t 存在函数关系,即

$$\eta(t) = \eta(1 - D), E(t) = E(1 - D) \quad (4)$$

式中, D 为损伤变量。

假定损伤变量与时间的乘积的变化规律满足负指数函数^[18],即

$$D = 1 - \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

式中, α 为损伤影响系数。

非定常的黏滞性系数 E_1 、 η_1 、 η_2 分别为

$$E_1(t) = E_1 \exp(-\alpha_1 t) \quad (6)$$

$$\eta_1(t) = \eta_1 \exp(-\alpha_2 t) \quad (7)$$

$$\eta_2(t) = \eta_2 \exp(-\alpha_3 t) \quad (8)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 为非定常参数。

弹性模量 E_0 是与应力有关的变量,故可将式(5)改为应力与损伤变量的关系,得出非定常参数为

$$E(t) = E_0 \exp(-\alpha_0 \sigma) \quad (9)$$

式中, α_0 为非定常参数。

综上所述,将式(6)~(9)代入到式(3)中可以得到一维状态下岩石非定常蠕变模型,即

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0(\sigma)} + \frac{\sigma}{E_1(t)}(1 - \exp(-\frac{E_1(t)}{\eta_1(t)}t)), & \sigma \leq \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_0(\sigma)} + \frac{\sigma}{E_1(t)}(1 - \exp(-\frac{E_1(t)}{\eta_1(t)}t)) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2(t)}t, & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (10)$$

在实际巷道开挖过程中,岩体都是出于一个复杂的二向或者三向受力状态,不再是简单的单向受力,上述推导的一维流变模型在实际工程中适用性较差。为了更好地模拟深部复杂地质环境下岩石的受力状态,在室内实验室一般采用三轴压缩试验机对工程岩体进行三轴流变试验,来揭示岩石在复杂条件下的流变特性,从而为建立一个科学合理的三轴流变模型打下基础,同时为模拟实际工程开挖状态的数值模型提供相关的数值参数。因此,将一维模型推广到三维模型后,可以更好地为实际工程提供指导^[19,20]。

一般在三向受力状态下,岩石流变模型中的弹性应变和黏弹性应变模型均可以通过类比法,将其由一维模型转化为三维模型,但是三维状态下的黏塑性应变模型的应变特性,难以用现有的物理元件进行描述,为了建立三维蠕变本构方程,可以通过考虑屈服函数和塑性势函数对黏塑性应变的影响,建立黏弹塑性模型,故黏弹塑性模型的总应变可表示为^[21,22]

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^v + \epsilon_{ij}^p \quad (11)$$

式中, ϵ_{ij}^e 为弹性变形张量; ϵ_{ij}^v 为黏弹性变形张量; ϵ_{ij}^p 为黏塑性变形张量。

一维模型转化为三维模型的参数一般满足以下条件

$$K = \frac{E_0}{2(1+\mu)}, \quad G_0 = \frac{E_0}{3(1-2\mu)} \quad (12)$$

式中, G_0 为剪切模量; K_0 为体积模量; μ 为泊松比。

根据文献[23]可知,由于体积模量在不同应力状态时,会有体积压缩和体积膨胀两种状态,则体积模量 K 对应的表达式会有所不同,但是在同一应力水平作用下,随着时间的变化,可假设体积模量与时间之间的关系满足负指数变化规律,则砂岩三维状态下弹性应变满足(试验为假三轴 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0 \exp[-(-\alpha_0(\sigma_1 - \sigma_3))]} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K \exp[-(-\alpha_0 t)]} \quad (13)$$

而砂岩三维状态下黏弹性应变满足

$$\epsilon_{ve} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1 \exp(-\alpha_1 t)} \left[1 - \exp(-\frac{G_1 \exp(-\alpha_1 t)}{\eta_1 \exp(-\alpha_2 t)}t) \right] \quad (14)$$

式中, ϵ_{ve} 为黏弹性应变。

对于黏塑性体,其三维本构关系由屈服函数和塑性势函数表示^[24],即

$$\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\eta \exp(-\alpha_3 t)} \left\{ \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \right\} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (15)$$

式中, F 为屈服函数; F_0 为屈服函数的初始值; Q 为塑性势函数。通常取 $n=1$, $F_0=1$ 。

屈服函数 F 取德鲁克普拉格屈服函数,具体表达式如下:

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sqrt{3} - \alpha(\sigma_1 + 2\sigma_3) - k \quad (16)$$

式中, I_1 为应力第一不变量; J_2 为应力偏量第二不变量; α, k 为关于强度参数的试验常数。

试验常数 α, k 分别可以表示为 $\alpha = \sin \varphi / (\sqrt{3} \times \sqrt{3 + \sin^2 \varphi})$; $k = \sqrt{3} c \cos \varphi / \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}$; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

根据式(4)~(9)岩石蠕变参数的劣化形式,可以将强度参数劣化程度也通过引入损伤变量来表示,假设强度参数劣化程度一致,得出岩石劣化的强度参数为

$$\begin{cases} c(t) = c \exp(-\alpha_1 t) \\ \varphi(t) = \varphi \exp(-\alpha_1 t) \end{cases} \quad (17)$$

然后将式(13)~(17)代入到式(12)可得到砂岩非定常参数蠕变方程：

当 $\sigma < \sigma_s$ 时，

$$\epsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0 \exp[-(\alpha_0(\sigma_1 - \sigma_3))]} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K \exp[-(\alpha_0 t)]} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1 \exp(-\alpha_1 t)} \left(1 - \exp\left(\frac{G_1 \exp(-\alpha_1 t)}{\eta_1 \exp(-\alpha_2 t)} t\right) \right) \quad (18)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时，

$$\begin{aligned} \epsilon = & \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0 \exp[-(\alpha_0(\sigma_1 - \sigma_3))]} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K \exp[-(\alpha_0 t)]} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1 \exp(-\alpha_1 t)} \left(1 - \exp\left(\frac{G_1 \exp(-\alpha_1 t)}{\eta_1 \exp(-\alpha_2 t)} t\right) \right) \\ & + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}} - \frac{\sin[\varphi \exp(-\alpha_1 t)]}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2[\varphi \exp(-\alpha_1 t)]}} - \frac{\sqrt{3} \cos[\varphi \exp(-\alpha_1 t)]}{\sqrt{3 + \sin^2[\varphi \exp(-\alpha_1 t)]}} c \exp(-\alpha_1 t) \end{aligned} \quad (19)$$

3.2 模型参数识别

当 $t \rightarrow 0$ 时,瞬时弹性应变为 $\epsilon_0 = \frac{\sigma_m}{3K_0} + \frac{S_{ij}}{2G_0}$,而试验得出的瞬时变形不仅包含弹性变形,而且包含塑性变形。为方便分析,假定瞬时变形均为弹性变形,可通过试验曲线的瞬时体积应变值确定各级应力状态下的初始体积模量 $K_0 = \sigma_m / (3\epsilon_m) = \sigma_m / \epsilon_v$,而后求出瞬时剪切模量 G_0 ,针对砂岩卸围压蠕变试验数据,运用 Origin 软件基于最小二乘法原理对蠕变参数进行识别,本文以围压 30MPa、轴压 80MPa 为例进行参数识别,得到其模型参数及相关系数见表 2,其中长期强度由等时应力曲线进行确定^[25],轴压 80MPa 等时应力应变曲线如图 8,其长期强度为 55MPa。

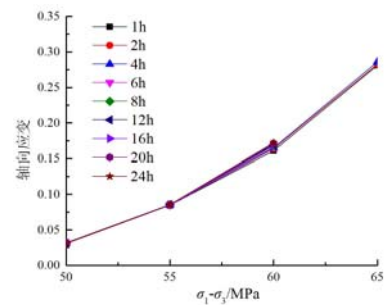


图 8 等时应力应变曲线

Fig. 8 Isochronous relation of stress-volume strain

表 2 三轴蠕变模型参数

Tab. 2 Parameters of model the under triaxial creep

围压 /MPa	G_0 /GPa	K /GPa	G_1 /GPa	η /(GPa · h)	η_p /(GPa · h)	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
30	17.13	25.96	365.81	2160.64						
25	18.14	31.06	746.25	4486.50	287.52	2.33	2.91	1.01	1.20	1.79
20	18.94	36.21	2228.62	3166.13	586.55	2.14	2.68	0.93	1.10	1.65
15	7.37	30.91	15.13	151.88	214.77	1.72	2.15	0.75	0.88	1.32

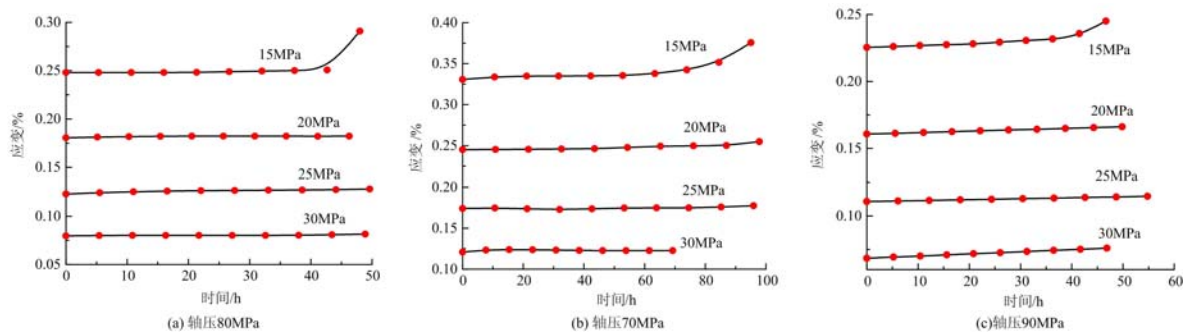


图 9 试验结果与计算值对比

Fig. 9 Experimental results contrast calculated values

将反演参数代入到非定常模型中,绘制出非定常模型曲线和试验曲线的对比结果见图 9(b),同理可得轴压为 70MPa 和 90MPa 的对比曲线如图 9(a)、(c)所示。由图 9 可知,推导出的非线性蠕变损伤

模型在卸围压轴压为 70MPa 和 90MPa 下都符合曲线规律,从以上不同围压、不同应力下砂岩蠕变试验曲线与模型曲线的对比图中可以看出用该非定常模型来反映岩石蠕变全过程变形规律是合适可行的,它不仅准确地反映了衰减和稳定蠕变阶段的蠕变特性,也克服了传统西原体难以描述加速蠕变的缺点,总体上该模型具有更高的拟合度,对三轴蠕变试验数据具有一个良好的预测分析。

4 结 论

本文以阜新恒大煤矿巷道围岩(砂岩)为研究对象,利用 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机,对卸围压蠕变变化规律展开研究,通过将蠕变参数非定常化来研究围岩在卸载过程中蠕变和参数的劣化特性,得出以下主要结论:

(1) 蠕变泊松比总体上也与轴径体向蠕变曲线所呈现的规律基本一致,从低应力到高应力状态下分别经历了衰减、稳定和加速蠕变三个阶段,最后蠕变泊松比都超过常规状态下的值(一般泊松比不超过 0.5),甚至超过 1。

(2) 在最后一级荷载作用下,在经历了衰减蠕变和稳定蠕变阶段之后,应变值急剧增大,即蠕变速率突然变大,导致最后一级轴径向蠕变速率曲线在初始很长一段时间内基本为直线,在进入加速蠕变阶段后,试样迅速失稳破坏。

(3) 假设参数满足负指数变化规律,建立了损伤积累条件下的非定常三维蠕变模型。

(4) 用该非定常模型来反映岩石蠕变全过程变形规律是合适可行的,它不仅准确地反映了衰减和稳定蠕变阶段的蠕变特性,也克服了传统西原体难以描述加速蠕变的缺点,总体上该模型具有更高的拟合度,对三轴蠕变试验数据具有一个良好的预测分析。

参考文献:

- [1] 王俊光,刘文峰,梁冰,等. 软弱破碎油页岩蠕变特性相似材料实验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(2): 263—268 (WANG Junguang, LIU Wenfeng, LIANG Bin, et al. On the similar material for creep characteristic study of weak and broken oil shale[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(2):263—268 (in Chinese))
- [2] 胡波,王宗林,梁冰,等. 岩石蠕变特性试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):438—446 (HU Bo, WANG Zonglin, LIANG Bing, et al. Experimental study of rock creep properties[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):438—446 (in Chinese))
- [3] 许小凯,陈亮,张玉贵,等. 广义有效应力在煤岩多相耦合渗流评价中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 30—34 (XU Xiaokai, CHEN Liang, ZAHNG Yugui, et al. Generalized effective stress applied to evaluation on multiphase coupling seepage of coal-rock[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7):30—34 (in Chinese))
- [4] 陈亮,刘建锋,王春萍,等. 不同温度计应力状态下北山花岗岩蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6):1228—1235 (CHEN Liang, LIU Jianfeng, WANG Chunping, et al. Creeping behavior of Beishan granite under different temperatures and stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6):1228—1235 (in Chinese))
- [5] 卢自立,邓拓,刘文浩,等. 变质砂岩卸围压破坏特征试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(4):29—32, 54 (LU Zili, DENG Tuo, LIU Wenhao, et al. Testing on unloading confining pressure for characteristics of the metamorphic sandstone[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 31(4):29—32, 54 (in Chinese))
- [6] 张黎明,任明远,马绍琼,等. 大理岩卸围压破坏全过程的声发射及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):2862—2867 (ZHANG Liming, REN Mingyuan, MA Shaoqun, et al. Acoustic emission and fractal characteristics of marble during unloading process of confining pressure failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2862—2867 (in Chinese))
- [7] 李林峰. 加载和卸围压条件下岩石力学特性的对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1):55—60 (LI Lingfeng. Comparison of mechanical properties of rock under loading and unloading confining pressure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1):55—60 (in Chinese))
- [8] 俞缙,李宏,陈旭,等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33

- (1):69—79 (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):69—79 (in Chinese))
- [9] 张雪颖, 阮怀宁, 贾彩虹, 等. 高围压大理岩卸荷变形破坏与能量特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(6): 13—16 (ZHANG Xueying, RUAN Huaining, JIA Caihong, et al. Study on unloading deformation, fracture and energy properties of marble under high confining pressure[J]. Mining Research and Development, 2009, 29(6):13—16 (in Chinese))
- [10] 刘佳琦. 阜新东梁矿非饱和砂岩蠕变试验及模型研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014 (LIU Jiaqi. Creep experiment and model research on unsaturated sandstone of Dongliang Coal in Fuxin[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014 (in Chinese))
- [11] 朱杰兵, 汪斌, 邹爱清. 锦屏水电站绿砂岩三轴卸荷流变试验及非线性损伤蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 528—534 (ZHU Jiebing, WANG Bin, WU Aiqing. Study of unloading triaxial rheological tests and its nonlinear damage constitutive model of Jinping hydropower station green sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3):528—534 (in Chinese))
- [12] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009 (ZHU Jiebing. Study on unloading mechanics and its rheological properties of rock under high stress[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese))
- [13] 刘光廷, 胡昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8):1237—1241 (LIU Guangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8):1237—1241 (in Chinese))
- [14] 吴刚, 孙钧, 吴中如. 复杂应力状态下完整岩体卸荷破坏的损伤力学分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997, 25(3):46—51 (WU Gang, SUN Jun, WU Zhongru. Damage mechanical analysis of unloading failure of intact rock mass under complex stress state[J]. Journal of Hohai University(Science and Technology), 1997, 25(3):46—51 (in Chinese))
- [15] 刘志勇, 肖明砾, 卓莉, 等. 石英云母片岩加卸荷力学特性及其卸荷本构研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2):85—91 (LIU Zhiyong, XIAO Mingzhi, ZHOU Li, et al. Study of loading and unloading characteristics and its unloading constitutive model of mica-quartz schist[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2):85—91 (in Chinese))
- [16] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7):1248—1256 (JINAG Haifei, LIU Dongyan, HUANG Wei, et al. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7):1248—1256 (in Chinese))
- [17] 何利军, 孔令伟, 吴文军, 等. 采用分数阶导数描述软黏土蠕变的模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2):239—243 (HE Lijun, KONG Lingwei, WU Wenjun, et al. A description of creep model for soft soil with fractional derivative[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2):239—243 (in Chinese))
- [18] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9):1899—1903 (YIN Deshun, REN Junjuan, HE Chengliang, et al. A new rheological model element for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9):1899—1903 (in Chinese))
- [19] 宋勇军. 干燥和饱水状态下炭质板岩流变力学特性与模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2013 (SONG Yongjun. Study on rheological mechanical properties and models of carbonaceous slates under dry and saturated states[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013 (in Chinese))
- [20] 宇晓龙. 花岗岩三轴蠕变过程特征分析及本构模型研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013 (YU Xiaolong. Research on triaxial creep characteristics of granites and its constitutive models[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013 (in Chinese))
- [21] 齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):347—355 (QI Yajing, JIANG Qinghui, WANG Zhijian, et al. 3D creep constitutive equation of modified Nishihara model and its parameters identification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2012, 31(2):347—355 (in Chinese))
- [22] 张树光, 刘文博, 王有涛. 花岗岩非定常蠕变及其参数确定[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3):435—441 (ZHANG Shugang, LIU Wenbo, WANG Youtao. Study on non-stationary creep and parameter determination of granite[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3):435—441 (in Chinese))
- [23] 周美玲. 考虑水—岩作用的三峡库区红层软岩蠕变特性研究[J]. 宜昌: 三峡大学, 2016 (ZHOU Meiling. The creep mechanism of red-layer soft rock under water-rock interaction at three gorges reservoir area[J]. Yichang: China Three Gorges University, 2016 (in Chinese))
- [24] 张树光, 孙成鑫, 王有涛, 等. 海棠山隧道砂岩变参数蠕变特性研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(10):105—110 (ZHANG Shuguang, SUN Chengxin, WANG Youtao, et al. Study on variable parameter creep characteristics of sandstone in Haitangshan tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(10):105—110 (in Chinese))
- [25] 沈明荣, 谌洪菊. 红砂岩长期强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11):3301—3305 (SHEN Mingrong, CHEN Hongju. Testing study of long-term strength characteristics of red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3301—3305 (in Chinese))

Creep characteristics and unsteady creep model of sandstone under unloading confining pressure

ZHANG Shu-guang^{1,2}, CHEN Lei¹, LIU Wen-bo¹, ZHAO En-lu¹, CHANG Jian¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the creep deformation, time variation law and creep parameter deterioration law of sandstone under different confining pressure unloading conditions, the test of sandstone staged unloading confining creep was carried out by using TAW-2000 test machine. Then the creep parameters were denormalized by the theory of damage mechanics, and the unsteady parameter Nishihara creep model was established. Finally, the test data was compared with the model curve. The test results showed that the sandstone was subjected to different unloading confining pressure tests of initial axial stress. The creep Poisson's ratio of rock had the same three stages of attenuation, stability and acceleration as creep deformation. Creep Poisson's ratio was a function of time. During the loading process, the creep Poisson's ratio exceeded the value in the normal state, and even exceeded 1. The establishment of the unsteady model had good fitting degree with the experimental data. It accurately reflected the creep characteristics of the attenuation and stable creep stage. The difficulty of describing the accelerated creep of traditional Nishihara model has been overcome. It had practical guiding significance.

Keywords: creep parameter deterioration; unsteady; creep Poisson's ratio; grading unloading confining pressure