

岩石三维非线性黏弹塑性损伤蠕变模型研究

虎积元, 盛冬发*, 陈泰聪, 李子恒, 俞红全

(西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 为了准确描述岩石蠕变曲线的各阶段特征, 将 Kelvin 模型中黏壶元件的黏滞系数定义为与时间相关的函数, 并根据蠕变损伤理论构建了一个考虑蠕变参数随时间劣化的损伤黏弹塑性体, 进而将弹性体、非线性 Kelvin 体、黏性体和损伤黏弹塑性体进行串联, 提出了可以描述岩石蠕变全过程的非线性黏弹塑性损伤蠕变模型, 并合理推导了该模型在恒应力情况下的一维和三维蠕变方程。最后, 根据相关蠕变试验数据进行参数识别来验证损伤蠕变模型的有效性, 对比分析理论模型和试验数据的相关性, 结果表明该模型能很好地描述岩石蠕变全过程, 且相关系数均在 0.92 以上。

关键词: 岩石蠕变; 损伤; 非线性; 黏滞系数; 黏弹塑性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Study on 3D Nonlinear Viscoelastic-Plastic Damage Creep Model of Rock

HU Jiyuan, SHENG Dongfa*, CHEN Taicong, LI Ziheng, YU Hongquan

(School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: In order to accurately characterize the various stages of the rock creep curve, the viscous coefficient of the viscous pot element in the Kelvin model is defined as a time-dependent function and a damage viscoelastic body is constructed by considering the deterioration of creep parameters over time according to the creep damage theory. Then, the elastomers, nonlinear Kelvin body, viscous body and damage viscoelastic body are connected in series, and a nonlinear viscoelastic plastic damage creep model that can describe the entire process of rock creep is proposed. The one-dimensional and three-dimensional creep equations of the model under constant stress are reasonably derived. Finally, a parameter identification is performed based on relevant creep test data to verify the effectiveness of the damage creep model. A comparative analysis is conducted on the correlation between the theoretical model and experimental data, and the results show that the model can well describe the entire process of rock creep, with correlation coefficients above 0.92.

Key words: rock creep; damage; nonlinear; viscosity coefficient; viscoelastic plasticity

岩石蠕变特性是预测岩石变形, 即用于评定岩体结构长期稳定性的重要指标^[1]。随着国家深地工程的发展, 许多地下工程结构将面临着高地应力长期作用的问题, 实时监测隧洞开挖后围岩应力场与应变场随时间发展趋势, 对保证施工过程的合理性与安全性具有重要的指导作用, 因此对岩石蠕变特性的研究具有重要的理论意义和工程实用价值。由于岩石材料内部的矿物质成分和

孔隙分布规律具有很大的离散性, 导致其力学性能参数随时间变化的特征十分明显。传统元件组合模型通常将模型中涉及到的力学性能参数均假设为定常数, 因此其本构关系都是线性的^[2]。当前, 岩石蠕变模型在反映非线性蠕变特性方面的研究取得了很大的进展; 曹文贵等^[3-4]构建可以反映岩石非线性蠕变过程的弹塑性损伤体, 并将其与 Kelvin 模型串联, 进而构建可以描述岩石加速

收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11862023); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2024Y602)

作者简介: 虎积元(1997-), 男, 云南丽江人, 硕士, 主要从事岩石力学与数值模拟方面的研究。

* 通信作者: 盛冬发(1966-), 男, 江西南昌人, 博士, 教授, 主要从事黏弹性材料损伤与断裂方面的研究。

蠕变阶段特征的损伤蠕变模型。汪妍妍等^[5]将用于描述非线性加速蠕变阶段特征的非线性黏塑性体与 Burgers 模型串联,建立了一种新的非线性蠕变模型。王游等^[6]在西原模型中引入了一个非线性函数和关于蠕变破坏时间的损伤因子,提出了一个可以描述岩石蠕变各阶段特性的非线性损伤西原体模型。李忠君等^[7]在传统西原模型中引入由损伤弹性元件和时间触发性元件并联而成的非线性损伤体,得到改进的西原模型。Hou 等^[8]通过对含有不同初始损伤的砂岩蠕变试验结果进行分析,从而建立了一种考虑初始损伤效应的损伤蠕变模型。

尽管上述研究已经取得了丰硕的成果,但现有的蠕变模型很少能够同时描述岩石衰减、加速蠕变阶段的非线性蠕变特征,且模型中所含的元件模型未能与岩石各阶段蠕变曲线相对应。基于此,本文根据岩石蠕变曲线各阶段的特征,提出能够反映岩石衰减蠕变阶段蠕变参数非线性特性的非线性 Kelvin 黏弹性体和考虑加速蠕变参数随时间劣化的损伤黏弹塑性体,并将二者与弹性体和黏性体进行串联,建立了能够描述岩石蠕变曲线各阶段特征的非线性损伤蠕变模型,并基于塑性力学理论将一维蠕变方程合理推广到三维情况。最后,引入相关文献的试验数据进行模型验证,分析了模型参数不同取值下的蠕变曲线变化特征。通过本文的研究工作,期望能够在岩石非线性蠕变模型研究中提供一种新的借鉴。

1 非线性黏弹塑性损伤蠕变模型

1.1 一维非线性黏弹塑性损伤蠕变模型

图 1 为岩石蠕变曲线示意图,对岩石蠕变曲线特征分析可知:在加载过程中,岩石试件会迅速产生一个弹性应变。但由于加载时间相对于整个蠕变试验时间来说,可以忽略不计,因此一般认为该弹性应变是瞬间发生的,故该阶段的本构关系可以用一个弹性体来描述^[9],即

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_0} \quad (1)$$

式中: σ 为加载应力,MPa; E_0 为弹性模量,MPa; ε_e 为瞬时弹性应变。

由于传统 Kelvin 模型中的蠕变参数是定常数,很难准确描述岩石衰减蠕变曲线特征。因此为了模拟岩石衰减蠕变阶段蠕变参数的非线性特性,本文将 Kelvin 模型中黏壶元件的黏滞系数定

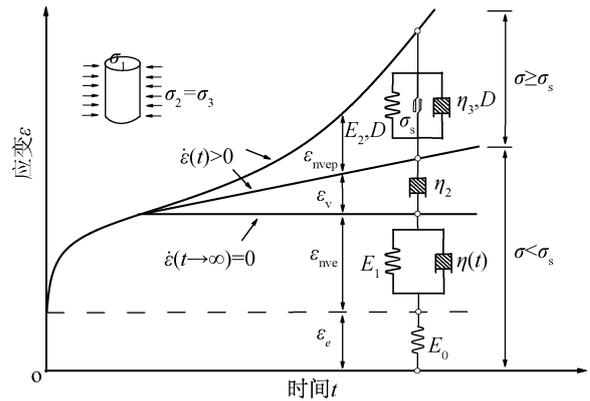


图 1 岩石蠕变曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock creep curve

义为与蠕变时间相关的函数^[6],不妨假定该黏滞系数与蠕变时间满足以下关系:

$$\eta(t) = \frac{t^{1-b}}{a + t^{1-b}} \eta_1 \quad (2)$$

式中: η_1 为 Kelvin 模型的初始黏滞系数,MPa · h; a 、 b 为模型参数,且 $a > 0, 0 < b < 1$ 。

式(2)对时间求一阶导数得

$$\dot{\eta}(t) = \frac{a(1-b)t^{-b}}{(a + t^{1-b})^2} \eta_1 \quad (3)$$

式中: $\dot{\eta}(t)$ 为该黏滞系数的变化率,MPa · h · t⁻¹, 且有 $\dot{\eta}(t) > 0$ 。

由式(2)(3)可知:当 $t = 0$ 时, $\dot{\eta}(t) \rightarrow \infty$, $\eta(t) = 0$;当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\dot{\eta}(t) = 0$, $\eta(t) \rightarrow \infty$,符合衰减蠕变阶段的参数变化规律,即黏滞系数随时间不断增加至某一定值,验证了上述假定是合理的。

将 Kelvin 模型中的黏性元件用该非线性黏性元件替换,得到非线性 Kelvin 黏弹性体本构方程为

$$\sigma = E_1 \varepsilon_{nve} + \eta(t) \dot{\varepsilon}_{nve} \quad (4)$$

式中: E_1 为非线性 Kelvin 黏弹性体的弹性模量,MPa; ε_{nve} 、 $\dot{\varepsilon}_{nve}$ 为非线性黏弹性黏性应变和应变速率。

将(2)式代入(4)式中可得非线性 Kelvin 黏弹性体的蠕变本构方程为

$$\sigma = E_1 \varepsilon_{nve} + \frac{t^{1-b}}{a + t^{1-b}} \eta_1 \dot{\varepsilon}_{nve} \quad (5)$$

求解微分方程,并代入初始条件 $t = 0, \dot{\varepsilon}_{nve} = 0$, 可得非线性 Kelvin 黏弹性体的蠕变方程为

$$\varepsilon_{nve} = \frac{\sigma}{E_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} \quad (6)$$

随着加载应力的不断增加,岩石进入等速蠕变阶段。在此阶段,岩石的应变速率趋于某一恒定值,其应变-时间曲线近似成一次函数关系,故该阶段可用一个黏壶元件来描述,其蠕变方程为

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (7)$$

式中: σ 为黏性体的应力,MPa; η_2 为黏性体的黏滞系数,MPa·h; ε_v 为黏性体的黏性应变。

当加载应力大于长期强度时,岩石试件的轴向应变和应变速率随时间急剧增大,其应变-时间曲线呈现出幂函数与指数函数的双重特征^[10]。当岩石进入加速蠕变阶段后,其变形由黏弹性变形和不可逆的黏塑性变形两部分组成,故模型中应含有一个黏弹塑性元件。基于此,本文考虑岩石蠕变变形引起的损伤,将损伤变量引入黏弹塑性体(村山体)中,构建一个考虑蠕变参数随时间劣化的损伤黏弹塑性元件。

Kachanov 损伤演化方程被广泛用于模拟岩石加速蠕变阶段的蠕变损伤演化规律^[2],其表达式为

$$\frac{dD}{dt} = C \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^V \quad (8)$$

式中: D 为损伤因子; C 、 V 为与材料相关的系数。

对上式进行积分,并代入边界条件 $D = 1, t = t_F$ 得到岩石蠕变破坏时间为

$$t_F = \frac{1}{C(1+V)\sigma^V} \quad (9)$$

根据式(8)(9)可得到损伤演化方程为

$$D = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{\frac{1}{1+V}} \quad (10)$$

根据应变等效原理,将损伤变量引入黏弹塑性体中用以描述由于损伤累积引起的加速蠕变行为,从而得到黏弹塑性体的损伤蠕变本构方

程为

$$\sigma = (1-D)E_2\varepsilon_{nvep} + (1-D)\eta_3\dot{\varepsilon}_{nvep} + \sigma_s \quad (11)$$

式中: E_2 为损伤黏弹塑性体的弹性模量,MPa; η_3 为损伤黏弹塑性体的黏滞系数,MPa·h; ε_{nvep} 为非线性黏弹塑性应变, $\dot{\varepsilon}_{nvep}$ 为非线性黏弹塑性应变速率; σ_s 为岩石的长期强度,MPa。

将(10)式代入(11)式中可得损伤黏弹塑性体的蠕变本构方程为

$$\sigma = \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{\frac{1}{1+V}} [E_2\varepsilon_{nvep} + \eta_3\dot{\varepsilon}_{nvep}] + \sigma_s \quad (12)$$

求解微分方程,并代入初始条件 $t = 0, \dot{\varepsilon}_{nvep} = 0$,可得损伤黏弹塑性体的蠕变方程为

$$\varepsilon_{nvep} = \frac{\sigma - \sigma_s}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_3} \right) \right] \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{-\frac{1}{1+V}} \quad (13)$$

综上,将上文中构建的弹性体、非线性 Kelvin 黏弹性体、黏性体和损伤黏弹塑性体进行串联,得到可以描述蠕变全过程的非线性黏弹塑性损伤蠕变模型,如图 2 所示。

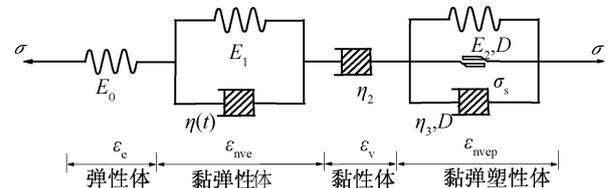


图 2 非线性黏弹塑性损伤蠕变模型

Fig. 2 Nonlinear viscoelastic plastic damage creep model

将长期强度 σ_s 和应变速率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 作为岩石蠕变各阶段的判别条件,由式(1)(6)(7)(13)并根据串联元件模型的应力、应变关系可得到一维应力状态下的非线性黏弹塑性损伤蠕变方程,见式(14):

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} & (\sigma < \sigma_s, \dot{\varepsilon}(t \rightarrow \infty) = 0) \\ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} + \frac{\sigma}{\eta_2} & (\sigma < \sigma_s, \dot{\varepsilon}(t) > 0) \\ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} + \frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{\sigma - \sigma_s}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_3} \right) \right] \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{\frac{1}{1+V}} & (\sigma \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (14)$$

1.2 三维非线性黏弹塑性损伤蠕变模型

在实际工程中,岩石处于复杂的三维应力状态下,因此利用三维蠕变模型描述岩石蠕变行为更加符合工程实际情况^[9],故应将上述一维蠕变方程推广到三维形式。

根据叠加原理,蠕变模型的总应变为

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{nve} + \varepsilon_{ij}^v + \varepsilon_{ij}^{nep} \quad (15)$$

式中: ε_{ij}^e 、 ε_{ij}^{nve} 、 ε_{ij}^v 、 ε_{ij}^{nep} 分别为弹性体、非线性 Kelvin 黏弹性体、黏性体以及黏弹塑性体的应变。

由弹塑性力学理论可知^[7]:材料内部任意一点的应力张量 σ_{ij} 可分解为偏应力张量 S_{ij} 和球应力张量 $\delta_{ij}\sigma_m$;同样地,应变张量 ε_{ij} 可分解为偏应变张量 e_{ij} 和球应变张量 $\delta_{ij}\varepsilon_m$,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= S_{ij} + \delta_{ij}\sigma_m \\ \varepsilon_{ij} &= e_{ij} + \delta_{ij}\varepsilon_m \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 张量, σ_m 为平均应力,MPa; ε_m 平均应变。

根据广义胡克定律有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= 3K\varepsilon_m \\ S_{ij} &= 2Ge_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: K 为体积模量,MPa; G 剪切模量,MPa。

则对于弹性体的应变可以表示为

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G_0}S_{ij} + \frac{1}{3K}\delta_{ij}\sigma_m \quad (18)$$

非线性 Kelvin 黏弹性模型的三维蠕变方程为

$$\varepsilon_{ij}^{nve} = \frac{S_{ij}}{2G_1} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2G_0}S_{ij} + \frac{1}{3K}\delta_{ij}\sigma_m + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} & (F < 0, \dot{\varepsilon}_{ij}(t \rightarrow \infty) = 0) \\ \frac{1}{2G_0}S_{ij} + \frac{1}{3K}\delta_{ij}\sigma_m + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} + \frac{S_{ij}}{2\eta_2}t & (F < 0, \dot{\varepsilon}_{ij}(t) > 0) \\ \frac{1}{2G_0}S_{ij} + \frac{1}{3K}\delta_{ij}\sigma_m + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1} \right] \right\} + \frac{S_{ij}}{2\eta_2}t + \left[\frac{1}{2\eta_3}F \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \left[1 - \exp \left(- \frac{G_2}{\eta_3}t \right) \right] \right] \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{1+v} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (25)$$

在常温和低、中温条件下,偏应力张量在岩石蠕变过程中起主要作用,而球应力张量的影响较小^[8],因此屈服函数可以取如下形式:

$$F = \sqrt{J_2} - \sigma_s / \sqrt{3} \quad (26)$$

对于常规三轴压缩蠕变试验有

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3 \quad (27)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (28)$$

式中: G_1 为非线性 Kelvin 体的剪切模量,MPa; η_1 为非线性 Kelvin 体的剪切黏滞系数,MPa·h。

黏性体的蠕变方程为

$$\varepsilon_{ij}^v = \frac{S_{ij}}{2\eta_2}t \quad (20)$$

损伤黏弹塑性体的蠕变方程为

$$\varepsilon_{ij}^{nep} = \frac{1}{2\eta_3} \left\langle \phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \left[1 - \exp \left(- \frac{G_2}{\eta_3}t \right) \right] \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{1+v} \quad (21)$$

式中: Q 为塑性势函数; $\langle \cdot \rangle$ 为开关函数,即

$$\left\langle \phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ \phi \left(\frac{F}{F_0} \right) & (F \geq 0) \end{cases} \quad (22)$$

式中: F 为屈服函数, F_0 为屈服函数的初始参考值,通常为了简化计算,取 $F_0 = 1$ ^[11]; $\phi(\cdot)$ 一般取幂函数形式,且通常取幂指数 $n = 1$,即

$$\phi \left(\frac{F}{F_0} \right) = \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \quad (23)$$

当 $F \geq 0$ 时,岩石塑性流动法则采用相关流流动法则,即 $Q = F$,于是式(21)便可进一步简化为

$$\varepsilon_{ij}^{nep} = \frac{1}{2\eta_3}F \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \left[1 - \exp \left(- \frac{G_2}{\eta_3}t \right) \right] \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{1+v} \quad (24)$$

式中: G_2 为剪切模量,MPa; η_3 剪切黏滞系数,MPa·h。

将式(18)(19)(20)(24)代入式(15)中,可得三维应力状态下的黏弹塑性损伤蠕变方程,见式(25):

$$S_{11} = \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (29)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

式中: σ_1 为岩石所受轴压,MPa; σ_2 、 σ_3 为岩石所受围压,MPa; J_2 为第二偏应力不变量,MPa。

将式(26)–(30)代入式(25)得到三维应力状态下的非线性黏弹塑性损伤蠕变方程为

$$\varepsilon_{11}(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1}\right] \right\}, & (\sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_s, \dot{\varepsilon}_{11}(t \rightarrow \infty) = 0) \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1}\right] \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_2} t, & (\sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_s, \dot{\varepsilon}_{11}(t) > 0) \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G_1(t - at^b)}{\eta_1}\right] \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_2} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{6\eta_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_3} t\right) \right] \left(1 - \frac{t}{t_F}\right)^{1+\nu}, & (\sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (31)$$

2 模型验证与参数分析

2.1 模型验证

蠕变模型参数辨识是复杂函数的优化问题,在实际应用中合理给定拟合参数的初始值本来就是一件非常困难的事情,尤其在参数较多的情况下。引入页岩^[12]和软岩^[13]单轴压缩蠕变试验数据基于 Levenberg-Marquardt 算法采用非线性最小二乘法进行参数识别,得到模型参数如表 1 所示。将表 1 中的模型参数代入蠕变模型(式(14))中拟合曲线和试验结果对比情况如图 3 所示。

以页岩(图 3(a))的拟合曲线与试验结果对比情况为例,本文所建立的模型不仅可以准确描述页岩在低应力水平下的稳态蠕变曲线特征,而且能够反映页岩在高应力状态下的非稳态蠕变曲线特征。不同应力水平下拟合曲线和试验结果的相关系数 R^2 均在 0.98 以上,验证了该模型的有效性。

表 1 蠕变模型参数

Tab. 1 Creep model parameters

岩性	σ /MPa	E_0 /MPa	E_1 /MPa	a	b	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	E_2 /MPa	η_3 /(MPa·h)	t_F /h	ν	σ_s /MPa	R^2
页岩	35	97.493	122.378	-0.504	3.567	585.541	—	—	—	—	—	—	0.989
	38	76.768	88.167	0.012	2.254	773.395	—	—	—	—	—	—	0.991
	41	73.847	16.921	14.755	0.661	3384.200	—	—	—	—	—	—	0.998
	55	51.402	27.541	0.060	1.300	1147.542	10377.358	829.016	39476.952	182	-5.505	39.00	0.999
软岩	2.0	3.730	3.617	4.893	0.757	66.489	—	—	—	—	—	—	0.987
	2.4	3.315	3.941	3.636	0.805	78.820	—	—	—	—	—	—	0.982
	3.2	2.855	1.812	40.581	0.531	421.395	—	—	—	—	—	—	0.998
	4.5	1.099	13.235	17.851	-0.076	123.692	125.000	0.291	0.887	69	-5.538	3.24	0.999

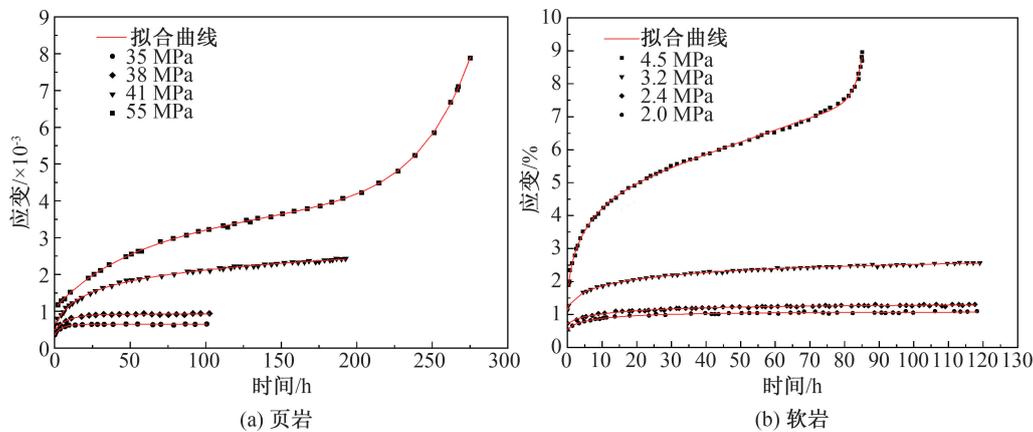


图 3 拟合曲线与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of fitted curves with experimental results

表 2 蠕变模型参数

Tab. 2 Creep model parameters

σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	G_0 /GPa	K /GPa	G_1 /GPa	a	b	$\eta_1 /$ (GPa · h)	$\eta_2 /$ (GPa · h)	$\eta_3 /$ (GPa · h)	G_2 /GPa	V	t_F /h	R^2
10	55	0.258	0.306	3.261	2.041	1.012	19.763	—	—	—	—	—	0.951
10	60	0.097	0.238	8.333	0.207	2.022	208.333	—	—	—	—	—	0.927
10	65	0.377	0.221	1.002	1.041	6.677	14.733	18.333	1.667	0.172	0.051	64.63	0.999
10	70	0.144	0.245	2.008	4.895	0.037	8.846	24.661	0.758	0.561	1.108	33.02	0.999
15	70	0.436	0.279	4.955	0.160	1.363	23.595	—	—	—	—	—	0.962
15	75	0.351	0.225	3.509	4.346	0.716	11.854	—	—	—	—	—	0.936
15	80	0.299	0.192	1.444	0.063	2.288	80.247	—	—	—	—	—	0.999
15	85	0.367	0.221	1.341	4.760	1.980	20.631	17.284	0.430	0.193	-5.541	56.74	0.999
15	90	0.165	0.137	0.253	0.311	1.369	10.522	1.634	0.259	0.582	-0.846	24.00	0.999

引入文献[14]关于阜新恒大煤矿开采过程中围岩的蠕变特性及其模型研究的相关蠕变试验数据对该模型在三维应力状态下的合理性与准确性进一步进行验证,该试验采用 MTS 815.02 试验机对砂岩进行围压为 10 MPa 和 15 MPa 的常规三轴压缩蠕变试验。按上述方法采用非线性最小二乘法进行模型参数识别,得到模型参数如表 2 所示。并将表 2 中的模型参数代入蠕变模型(式(31))中,得到砂岩稳态蠕变、非稳态蠕变拟合曲线和试验结果对比情况如图 4 所示。

图 4 给出了三维应力状态下,围压为 10 MPa 和 15 MPa 时砂岩稳态蠕变与非稳态蠕变试验数据和拟合曲线的对比情况,由图可知,本文建立的蠕变模型在不同加载情况下其拟合曲线与试验结果高度吻合,弥补了传统元件组合模型不能描述蠕变全过程的不足。

2.2 模型参数分析

为了研究模型参数 a, b 对蠕变规律的影响,以加载应力为 3.2 MPa 时的软岩蠕变模型为例,分别

改变参数 a, b 的取值,并绘制蠕变曲线如图 5 所示。

图 5 给出了模型参数 a, b 不同取值时的蠕变曲线对比情况,从图中可以看出,参数 a, b 越大,岩石衰减蠕变阶段的非线性特征越不明显,进入等速蠕变阶段的时间越短,而且等速蠕变速率也相应地减小。由岩石蠕变的微观机理可知,岩石衰减蠕变的实质是由于岩石材料内部原生微观裂隙逐渐被压密而产生蠕变硬化效应导致的,所以参数 a, b 越大,表明岩石越致密,即参数 a, b 可以代表岩石材料内部微观裂隙的初始分布状况。

3 结论

1) 为了表征岩石衰减蠕变阶段蠕变参数的非线性特性和准确描述加速蠕变阶段特征,考虑 Kelvin 模型中黏壶元件的黏滞系数随时间的变化规律和加速蠕变变形引起的损伤,建立了一种新的能够描述岩石蠕变曲线各阶段特征的非线性黏弹塑性损伤蠕变模型,并合理推导了该模型在恒应力情况下的一维和三维蠕变方程。

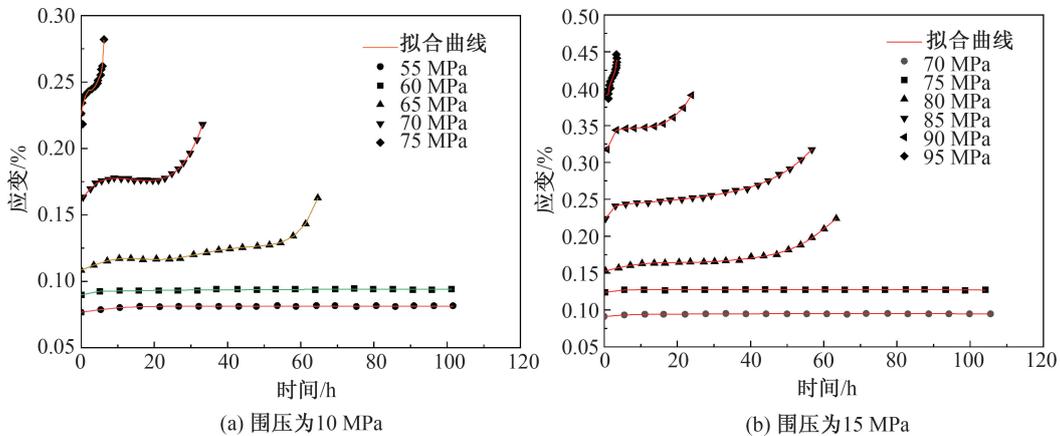


图 4 不同围压作用下砂岩拟合曲线与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of fitted curves and experimental results for sandstone under different surrounding pressures

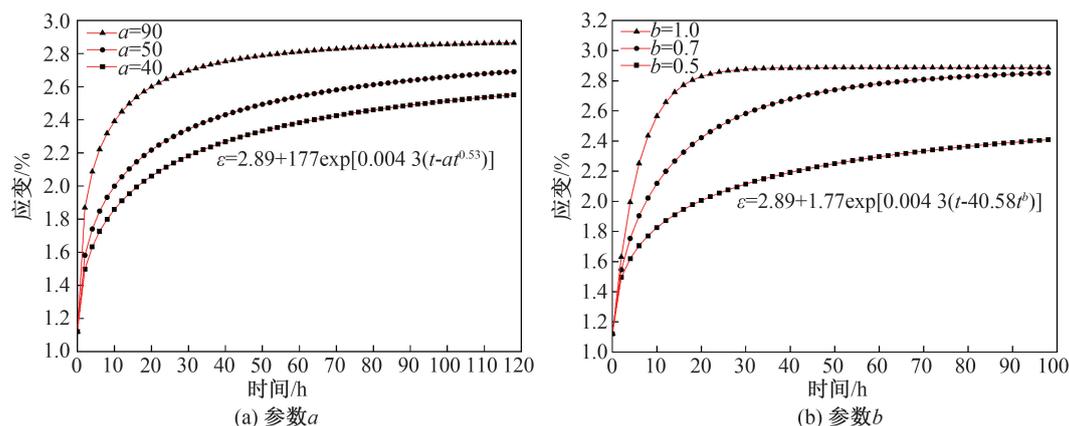


图5 不同参数取值下的蠕变曲线对比

Fig. 5 Comparison of creep curves with different values of parameters

2)引入相关的蠕变试验数据,对该模型的合理性与准确性进行验证,结果表明该模型能够准确地描述岩石蠕变过程中的瞬时弹性应变、非线性黏弹性应变、黏性应变以及非线性黏弹塑性应变,不同加载条件下拟合曲线与试验结果高度吻合。

3)模型参数敏感性分析结果表明,参数 a 、 b 越大,岩石衰减蠕变阶段的非线性特征越不明显且进入等速蠕变阶段的时间越短。采用非线性黏性元件来表征岩石衰减蠕变参数的非线性特性是合理的,且符合岩石衰减蠕变的微观机理。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张胜利, 梁卫国, 肖宁, 等. 考虑温度的盐岩分数阶黏弹塑性蠕变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3198-3209.
- [3] 曹文贵, 袁靖周, 王江营, 等. 考虑加速蠕变的岩石蠕变过程损伤模拟方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 15-21.
- [4] LIU H Z, XIE H Q, HE J D, et al. Nonlinear creep damage constitutive model for soft rocks[J]. Mechanics of Time-dependent Materials, 2017, 21: 73-96.
- [5] 汪妍妍, 盛冬发. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(02): 227-232.
- [6] 王游, 卢小雨, 翟国良. 基于西原体模型的非正常岩石蠕变模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 676-682.
- [7] 李忠君, 盛冬发, 程旭, 等. 考虑时效损伤的岩石非线性蠕变模型研究[J]. 力学季刊, 2022, 43(04): 835-843.
- [8] HOU R, ZHANG K, TAO J, et al. A nonlinear creep damage coupled model for rock considering the effect of initial damage[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 1275-1285.
- [9] 张亮亮, 王晓健. 岩石黏弹塑性损伤蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1085-1092.
- [10] 刘东燕, 谢林杰, 庾晓峰, 等. 不同围压作用下砂岩蠕变特性及非线性黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3705-3712.
- [11] 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.
- [12] 杨彩虹, 毛君, 李剑光. 改进的蠕变模型及其稳定性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(1): 92-96.
- [13] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 398-403.
- [14] 张树光, 刘文博, 陈雷, 等. 基于力学参数时效性的非正常蠕变模型[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 993-1002.

(责任编辑 周雪梅)