

中文引用格式:门树臣. 露天煤矿软岩边坡泥岩非线性蠕变损伤模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增刊1):59-64.

英文引用格式: MEN Shuchen. Non-linear creep damage model of mudstone at soft rock slopes in open-pit coal mines[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):59-64.

# 露天煤矿软岩边坡泥岩非线性蠕变损伤模型研究\*

门树臣

(内蒙古锡林河煤化工有限责任公司, 内蒙古锡林郭勒盟 026321)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0027

**【摘要】** 为解决露天煤矿边坡工程因软岩强度低、蠕变特性显著导致的稳定性问题,开展软岩蠕变变形特征及本构模型研究。以蒙东地区某露天煤矿泥岩为研究对象,基于三轴蠕变试验结果,在分析传统 Burgers 蠕变模型的基础上,引入带应变触发的非线性黏壶,建立新型非线性5元件蠕变损伤模型,并根据最小二乘原理,辨别改进的蠕变损伤模型参数。结果表明:改进的 Burgers 蠕变损伤模型,与试验数据的拟合系数较高;所建模型可充分描述泥岩全阶段蠕变变形特征,尤其是加速蠕变损伤阶段;改进的蠕变损伤模型的拟合程度明显优于传统 Burgers 蠕变模型。

**【关键词】** 软岩; 非线性; 蠕变模型; 损伤; 黏壶

## Non-linear creep damage model of mudstone at soft rock slopes in open-pit coal mines

MEN Shuchen

(Inner Mongolia Xilinhe Coal Chemical Limited Liability Company,  
Xilingol League Inner Mongol 026321, China)

**Abstract:** In order to solve the stability problem caused by low strength and significant creep characteristics of soft rock in slope engineering of open-pit coal mines, the creep deformation characteristics and constitutive model of soft rock were studied. By taking the mudstone of an open-pit coal mine in eastern Inner Mongolia as the research object, based on the results of the triaxial creep test and the analysis of the traditional Burgers creep model, a new non-linear five-element creep damage model was established by introducing a strain-triggered non-linear dashpot. According to the principle of least squares, the parameters of the improved creep damage model were identified. The results show that the improved Burgers creep damage model has a fitting coefficient with the experimental data, which can fully describe the creep deformation characteristics of mudstone in the whole stage, especially in the accelerated creep damage stage. The fitting degree of the improved creep damage model is obviously better than that of the traditional Burgers creep model.

**Keywords:** soft rock; non-linear; creep model; damage; dashpot

## 0 引言

在我国蒙东地区,泥岩是构成露天煤矿边坡体

的主要岩层之一,其矿物成分复杂,且多数由高岭石、蒙脱石和伊利石等黏土类矿物组成,具有强度低、遇水强度弱化、蠕变特性等显著的复杂力学性

质<sup>[1-2]</sup>。在白音华、霍林河、胜利等煤田的多座露天煤矿,软岩边坡受泥岩蠕变特性的影响均发生过持续的变形和滑坡现象,严重影响了矿山的安全生产。因此,亟需开展泥岩非线性蠕变损伤模型研究。

蠕变模型作为岩石蠕变特性研究的核心<sup>[3]</sup>,国内外学者对其开展了大量研究。舒志乐等<sup>[5]</sup>在分析应力水平、孔隙水压对蠕变特性影响基础上,引入非线性黏滞系数牛顿元件,得到软岩非线性黏弹塑性蠕变模型,该模型具有可同时表征软岩蠕变的3个阶段的优点;刘晓燕等<sup>[6]</sup>将带应变启动的非线性黏滞阻尼器串联到西原模型上,构建了新的蠕变模型,并揭示了冻结褐色泥岩非线性加速蠕变特性的变化特征;刘新喜等<sup>[7]</sup>基于泥质粉砂岩的硬化、软化不同阶段的损伤演化特征,采用分数阶导数理论,构建了非线性蠕变损伤本构模型,用以描述其蠕变特性。FRENELUS等<sup>[8]</sup>基于软岩加卸载蠕变试验,建立了一种新的弹黏塑性本构模型,并用其描述软岩的时变特征,进一步揭示了蠕变参数对岩石的变形特征。目前,关于露天煤矿边坡体内低应力作用下泥岩的蠕变损伤模型研究相对较少,且多数研究仅考虑泥岩蠕变过程中的衰减蠕变阶段与等速蠕变阶段,忽略了其加速蠕变损伤阶段。

基于此,笔者拟以蒙东地区某露天煤矿的泥岩为研究对象,基于三轴蠕变试验,建立新型的非线性5元件蠕变损伤模型,并借助 Matlab 软件,采用最小二乘原理,得到改进的蠕变损伤模型参数,以期为类似的岩石蠕变模型研究提供借鉴。

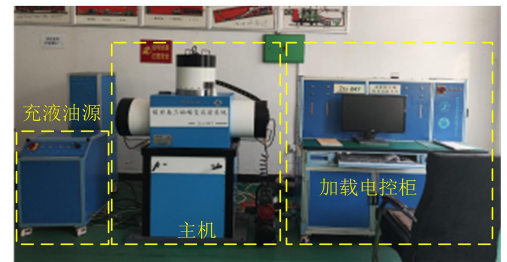
### 1 泥岩蠕变试验现象

蠕变试验试样取自蒙东地区某露天煤矿采场边坡 2-1 煤底板泥岩(图 1a),通过地质工程钻探获得,钻孔直径为 85 mm,岩石样品用双层塑料袋密封包装,并贴上标签。通过环切机将试样切成标准的试验试样,尺寸为:5 cm×5 cm×10 cm。试验设备为煤岩真三轴蠕变试验系统,如图 1b 所示。整体系统分为主机、加载电控柜和充液油源 3 个部分。泥岩在围压 1.00 MPa,轴向应力 1.85 MPa 条件下的蠕变全过程曲线如图 1c 所示。

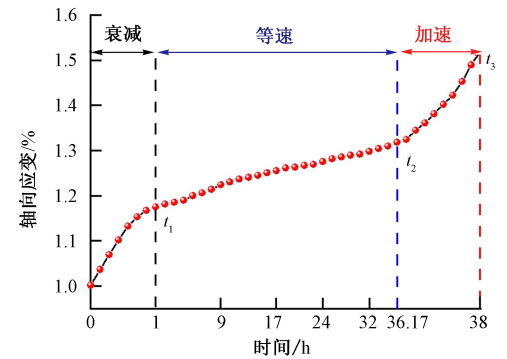
由图 1 可知:泥岩全阶段蠕变可分为 3 个阶段,当  $0 \leq t < t_1$  时,处于衰减蠕变阶段;当  $t_1 \leq t < t_2$  时,处于等速蠕变阶段;当  $t_2 \leq t < t_3$  时,处于加速蠕变阶段,其中,  $t_2 = t |_{\dot{\epsilon} = \epsilon_0} = 36.17$  h。因此,需要建立能够准确描述泥岩全阶段蠕变特性的模型。



(a) 泥岩试样



(b) 试验设备



(c) 泥岩蠕变试验曲线

图 1 泥岩蠕变全阶段曲线

Fig.1 Curve of mudstone creep in whole stage

### 2 Burgers 蠕变模型

传统 Burgers 蠕变模型是由 Maxwell 体(H-N 体)和 Kelvin 体(HIN 体)串联组成,为线性黏弹性蠕变模型<sup>[9]</sup>,其力学模型如图 2 所示。

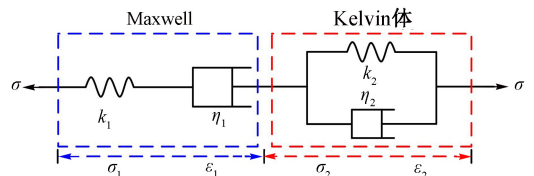


图 2 传统 Burgers 力学模型

Fig.2 Traditional Burgers mechanical model

对于 H-N 体,其本构方程为:

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{d\sigma_1}{k_1 dt} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \tag{1}$$

式中: $\sigma_1$  为 H-N 体的应力,MPa; $\epsilon_1$  为 H-N 体的应变,%; $k_1$  为 H-N 体的弹性模量,MPa; $\eta_1$  为 H-N 体的黏度,MPa·h; $t$  为时间,h。

对于 HIN 体,其本构方程为:

$$\sigma_2 = \eta_2 \frac{d\varepsilon_2}{dt} + k_2\varepsilon_2 \quad (2)$$

式中: $\sigma_2$  为 HIN 体的应力,MPa; $\varepsilon_2$  为 HIN 体的应变,%; $k_2$  为 HIN 体的弹性模量,MPa; $\eta_2$  为 HIN 体的黏度,MPa·h。

根据组合模型串联性质<sup>[10]</sup>可得:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 & \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \eta_2 \frac{d\varepsilon_2}{dt} + k_2\varepsilon_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$  为传统 Burgers 力学模型的应变,%; $\sigma$  为传统 Burgers 力学模型的应力,MPa。

将式(1)代入式(3)得:

$$\sigma = \eta_2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \eta_2 \left( \frac{d\sigma}{k_1 dt} + \frac{\sigma}{\eta_1} \right) + k_2(\varepsilon - \varepsilon_1) \quad (4)$$

等式两边进行微分,得:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \eta_2 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} - \eta_2 \left( \frac{d^2\sigma}{k_1 dt^2} + \frac{d\sigma}{\eta_1 dt} \right) + k_2 \left( \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\varepsilon_1}{dt} \right) \quad (5)$$

再次将式(1)代入式(5),化简得到传统 Burgers 蠕变模型的本构方程:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \left( \frac{k_1}{\eta_1} + \frac{k_1}{\eta_2} + \frac{k_2}{\eta_2} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{k_1 k_2}{\eta_1 \eta_2} \sigma = k_1 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{k_1 k_2}{\eta_2} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (6)$$

取应力条件为  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ , 初始条件为  $\varepsilon|_{t=t_0} = \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{k_1}$ , 经过拉普拉斯变换,可得到传统 Burgers 模型的蠕变方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{k_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (7)$$

由式(7)可知:当  $t=0$  时,  $\varepsilon_0 = \sigma_0/k_1$ , 由此可见,传统 Burgers 蠕变模型有瞬时弹性变形;随着时间  $t$  的增长,曲线的斜率趋近于  $\sigma_0/k_1 + \sigma_0/k_2$ , 传统 Burgers 蠕变模型曲线如图 3 所示。

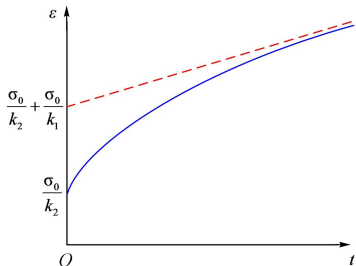


图 3 传统的 Burgers 蠕变模型曲线

Fig.3 Traditional Burgers creep model curve

由图 3 可知:传统 Burgers 蠕变模型可以较好地描述应力小于屈服应力时岩石的蠕变特性,但无法

描述岩石的加速蠕变阶段。因此,为准确描述泥岩非线性全阶段蠕变特性,需建立新的蠕变模型。

### 3 泥岩非线性蠕变损伤模型的建立

#### 3.1 泥岩一维蠕变损伤模型

岩石蠕变加载过程是一种不可逆的变形过程,考虑到岩石在衰减、等速阶段蠕变损伤较小(可忽略),在加速阶段蠕变损伤较大<sup>[11]</sup>。因此,兼顾岩石加速阶段的蠕变损伤,引入加速蠕变启动元件-带应变触发的非线性黏壶,并与传统 Burgers 蠕变模型串联,构建改进的 Burgers 蠕变损伤模型-新型非线性 5 元件蠕变损伤模型描述分析泥岩全阶段蠕变特性,蠕变模型如图 4 所示。

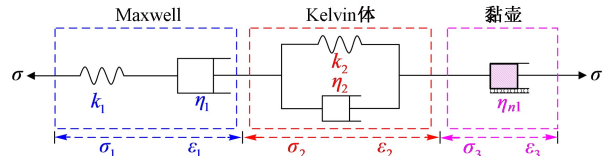


图 4 改进的 Burgers 蠕变损伤模型

Fig.4 Improved Burgers creep damage model

岩石在加速蠕变阶段,其损伤变量与时间呈指数函数,定义岩石的损伤变量为<sup>[12-15]</sup>:

$$D = 1 - \exp(-bt) \quad (8)$$

式中  $b$  为与岩石材料性质有关的参数。

应变触发的非线性黏壶的特性为:当蠕变损伤模型  $\varepsilon < \varepsilon_a$  时( $\varepsilon = \varepsilon_a$  时表明岩石进入加速蠕变阶段),黏壶不变形;当蠕变损伤模型  $\varepsilon \geq \varepsilon_a$  时,黏壶开始触发。定义该非线性黏壶的本构关系如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{n1} = 0, & \varepsilon < \varepsilon_a \\ \sigma = \eta_{n1}(1 - D) \frac{d^2\varepsilon_{n1}}{dt^2}, & \varepsilon \geq \varepsilon_a \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\eta_{n1}$  为非线性黏壶的黏度,MPa·h。

$\varepsilon \geq \varepsilon_a$  条件下,对式(8)进行拉普拉斯变换,可得:

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_3(s) &= \int_0^\infty \frac{\sigma \exp(bt)}{b^2 \eta_{n1}} \exp(-st) dt \\ &= \int_0^\infty \frac{\sigma}{b^2 \eta_{n1}} \exp((b-s)t) dt \\ &= \frac{1}{b-s} \exp((b-s)t) \Big|_0^\infty \\ &= \frac{\sigma}{b^2 \eta_{n1}(b-s)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}$  为  $\varepsilon$  的拉氏变换; $s$  为拉氏变换空间的复变量。

对式(9)做拉普拉斯逆变换,可得:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma}{b^2 \eta_{n1}} \exp(bg) \quad (11)$$

式中： $g=t-t|_{\varepsilon=\varepsilon_a}$ ， $t|_{\varepsilon=\varepsilon_a}$ 为岩石进入加速蠕变损伤的时刻。

当  $\varepsilon < \varepsilon_a$  时，该模型退化为传统的 Burgers 蠕变模型，其蠕变方程为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{k_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (12)$$

当  $\varepsilon \geq \varepsilon_a$  时，表明岩石开始进入加速蠕变损伤阶段，此时非线性黏壶开始触发，改进的 Burgers 蠕变损伤模型<sup>[16]</sup>的应变、应力为：

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \end{cases} \quad (13)$$

将式(10)、式(11)代入式(12)中，即可得到改进的 Burgers 模型的一维蠕变损伤方程：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{k_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma}{b^2 \eta_{n1}} \exp(bg) \quad (14)$$

### 3.2 泥岩三维蠕变损伤模型

边坡岩体一般处于双向或三向受力状态，很少出现单向受力状态，一维蠕变损伤模型难以在工程实践中推广应用。为使蠕变模型更加符合实际软岩边坡岩体的蠕变损伤特性，将蠕变损伤模型从一维空间扩展至三维空间分析。

三维应力下，改进的 Burgers 蠕变损伤模型的总应变表示为：

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{11} + \varepsilon_{ij}^{12} + \varepsilon_{ij}^2 + \varepsilon_{ij}^3 \quad (15)$$

式中： $\varepsilon_{ij}^{11}$ 、 $\varepsilon_{ij}^{12}$ 、 $\varepsilon_{ij}^2$ 、 $\varepsilon_{ij}^3$ 分别为胡克体、黏性体、黏弹体和带应变触发的非线性黏壶的应变张量，%。

对于胡克体，由广义胡克定律可知胡克体的三维本构关系为：

$$\begin{cases} e_{ij} = \frac{1}{2G} S_{ij} \\ \varepsilon_{ij}^{11} = \frac{1}{3K} \sigma_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{3(1-2\nu)}{2k_1} S_{ij} + \frac{2(1+\nu)}{3k_1} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{t}{\eta_1} S_{ij} + \frac{3(1-2\nu)}{2k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{3(1-2\nu)\eta_2} t\right) \right] S_{ij}, & \varepsilon_z < \varepsilon_a \\ \frac{3(1-2\nu)}{2k_1} S_{ij} + \frac{2(1+\nu)}{3k_1} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{t}{\eta_1} S_{ij} + \frac{3(1-2\nu)}{2k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{3(1-2\nu)\eta_2} t\right) \right] S_{ij} + \frac{e^{bg}}{2b^2 \eta_{n1}} S_{ij}, & \varepsilon_z \geq \varepsilon_a \end{cases} \quad (23)$$

## 4 蠕变损伤模型参数辨识

参数识别是泥岩非线性蠕变损伤模型应用于工

程实践的关键。基于蠕变试验数据，借助 Matlab 软件，应用非线性最小二乘原理，拟合改进 Burgers 蠕变损伤模型和传统 Burgers 蠕变模型的参数，改进

程实践的关键。基于蠕变试验数据，借助 Matlab 软件，应用非线性最小二乘原理，拟合改进 Burgers 蠕变损伤模型和传统 Burgers 蠕变模型的参数，改进

式中的  $e_{ij}$ 、 $S_{ij}$  和  $\sigma_{ij}$  分别为应变张量、应力偏量和应力第 1 不变量的张量形式； $G$  和  $K$  分别为弹性剪切模量和弹性体积模量，MPa。

$G$  和  $K$  可用弹性模量  $k_1$  与泊松比  $\nu$  表示：

$$\begin{cases} K = \frac{k_1}{2(1+\nu)} \\ G = \frac{k_1}{3(1-2\nu)} \end{cases} \quad (17)$$

故可得胡克体的应变为：

$$\varepsilon_{ij}^{11} = \frac{3(1-2\nu)}{2k_1} S_{ij} + \frac{2(1+\nu)}{3k_1} \sigma_m \delta_{ij} \quad (18)$$

式中： $\sigma_m$  为平均应力，MPa； $\delta_{ij}$  为单位张量。

对于黏性体，单向应力状态下其蠕变方程为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_1} t \quad (19)$$

则三维应力状态下黏性体的应变可表示为：

$$\varepsilon_{ij}^{12} = \frac{t}{\eta_1} S_{ij} \quad (20)$$

当假设黏弹性体的体积变化是弹性的，则黏弹性体的蠕变主要体现在剪切变形上。因此，三维应力状态下其应变可表示为：

$$\varepsilon_{ij}^2 = \frac{3(1-2\nu)}{2k_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_2}{3(1-2\nu)\eta_2} t\right) \right] S_{ij} \quad (21)$$

可通过应变  $\varepsilon_z$  与屈服强度  $\varepsilon_a$  的关系来判断岩石试样是否处于加速蠕变阶段，其应变主要以轴向变形为主。针对文中引入的非线性黏壶，定义其当岩石试样未进入加速蠕变阶段，即  $\varepsilon_z < \varepsilon_a$  时，黏壶不触发；当岩石试样进入加速蠕变阶段，即  $\varepsilon_z \geq \varepsilon_a$  时，黏壶触发。因此，非线性黏壶的应变可表示为：

$$\varepsilon_{ij}^3 = \begin{cases} 0, & \varepsilon_z < \varepsilon_a \\ \frac{\exp(bg)}{2b^2 \eta_{n1}} S_{ij}, & \varepsilon_z \geq \varepsilon_a \end{cases} \quad (22)$$

将式(18)、式(20)一式(22)代入式(14)中，即可获得三维蠕变损伤方程，其表达式如下：

程实践的关键。基于蠕变试验数据，借助 Matlab 软件，应用非线性最小二乘原理，拟合改进 Burgers 蠕变损伤模型和传统 Burgers 蠕变模型的参数，改进

Burgers 蠕变损伤模型对泥岩蠕变曲线辨识的所有参数见表 1, 基于传统 Burgers 蠕变模型与改进 Burgers 蠕变损伤模型的原始试验数据拟合结果如图 5 所示。

表 1 改进的三维 Burgers 蠕变损伤模型参数

Table 1 Parameters of improved 3D Burgers creep damage model

参数	$G/\text{MPa}$	$G_1/\text{MPa}$	$K/\text{MPa}$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$
值	1.021 0	1.109 0	1.522 0	150.434 8
参数	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	$\eta_{n1}/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	$b$	—
值	0.278 8	37.409 3	0.075 8	—

注:  $G=k_1/[3(1-2\nu)]$ ,  $G_1=k_2/[3(1-2\nu)]$ ,  $K=k_1/[2(1+\nu)]$ 。

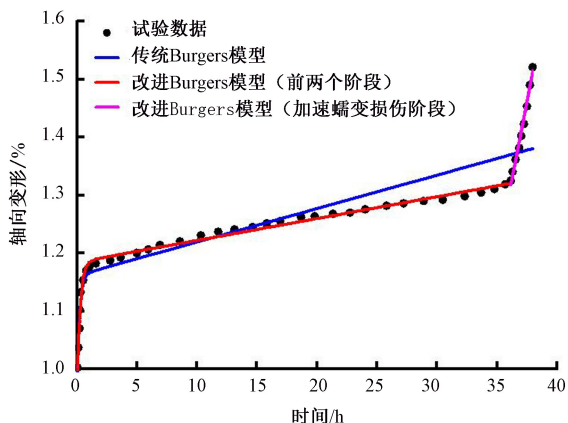


图 5 蠕变试验数据拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of creep test data

由图 5 可知:传统的 Burgers 蠕变模型拟合曲线能够描述泥岩的衰减及等速蠕变阶段,但无法描述泥岩的加速蠕变阶段,全过程拟合的相关系数为 0.935 0,吻合度一般;改进的 Burgers 蠕变损伤模型的拟合曲线能较好地描述泥岩非线性全阶段蠕变特性,衰减及等速蠕变阶段拟合的相关系数为 0.995 0,加速阶段拟合的相关系数为 0.991 8,吻合度较好。

综上,改进的 Burgers 蠕变损伤模型能够很好地描述泥岩全阶段蠕变变形特征,特别是加速阶段的蠕变损伤特性。加速蠕变损伤阶段是滑坡临滑预报的关键阶段,该模型的正确建立对科学分析软岩边坡的长期稳定性和滑坡临滑预警预报等方面有重要理论指导和实践意义。

## 5 结 论

1) 构建了一个新的改进 Burgers 蠕变损伤模型,并将其扩展为三维蠕变损伤方程。

2) 结合试验数据通过最小二乘法对其计算拟合得到,改进 Burgers 蠕变损伤模型非线性全阶段拟合相关系数较高,优于传统 Burgers 蠕变模型,能较好地描述泥岩非线性全阶段蠕变特性。

3) 改进 Burgers 蠕变损伤模型,可为分析露天煤矿软岩边坡全阶段蠕变变形特征,尤其是加速蠕变损伤阶段提供理论支撑。

## 参 考 文 献

- [1] QI Yun, WANG Wei, GE Jiaqi, et al. Development characteristics of the rock fracture field in strata overlying a mined coal seam group[J]. PLoS One, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0268955.
- [2] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 138-154. LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuan Tian, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 138-154.
- [3] 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.
- [4] 肖欣宏, 王静, 谢小帅, 等. 水岩作用下红层泥岩蠕变特性[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 96-101, 109. XIAO Xinhong, WANG Jing, XIE Xiaoshuai, et al. Creep characteristics of red mudstone under water-rock interaction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(9): 96-101, 109.
- [5] 舒志乐, 刘保县, 黄山, 等. 软岩非线性黏弹塑性蠕变模型及参数识别[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 803-809. SHU Zhile, LIU Baoxian, HUANG Shan, et al. Nonlinear viscoelasto-plastic creep model of soft rock and its parameters identification[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 803-809.
- [6] 刘晓燕, 刘路路, 闫坤伐. 冻结褐色泥岩非线性加速蠕变西原模型优化[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 101-105. LIU Xiaoyan, LIU Lulu, YAN Kunfa. An optimized nishihara model for nonlinear accelerating creep of frozen brown mudstone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 101-105.
- [7] 刘新喜, 童庆闯, 侯勇, 等. 高应力泥质粉砂岩非线性蠕变损伤模型研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 280-288.

- LIU Xinxi, TONG Qingchuang, HOU Yong, et al. Research on nonlinear creep damage model of high stress argillaceous siltstone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,31(2):280-288.
- [8] WADSLIN F, HUI Peng. Evaluating the time-dependent behavior of deeply buried tunnels in soft rock environments and relevant measures guaranteeing their long-term stability [J]. Applied. Sciences. 2023, 13 ( 18 ): DOI: 10.3390/app131810542.
- [9] 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(2):689-694,936.  
WANG Yanyan, SHENG Dongfa. Investigation on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rocks[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020,37(2):689-694,936.
- [10] 孟庆彬,韩立军,乔卫国,等.深部高应力软岩巷道围岩流变数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6):762-769.  
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Study on the rheology of soft rock with high stress by numerical simulation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012,29(6):762-769.
- [11] 汪妍妍,盛冬发.基于 Burgers 模型考虑损伤的岩石蠕变全过程研究[J]. 力学季刊, 2019,40(1):143-148.  
WANG Yanyan, SHENG Dongfa. Study on the whole process of rock creep considering damage based on burgers model[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2019,40(1):143-148.
- [12] 蔡煜,曹平.基于 Burgers 模型考虑损伤的非定常岩石蠕变模型[J]. 岩土力学, 2016,37(增2):369-374.  
CAI Yu, CAO Ping. A non-stationary model for rock creep considering damage based on Burgers model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(S2):369-374.
- [13] 张佳.考虑强度参数劣化的砂岩非定常蠕变模型研究[J]. 应用力学学报, 2021,38(3):1 144-1 151.  
ZHANG Jia. Research on unsteady creep model of sandstone considering strength parameter deterioration[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021,38(3):1 144-1 151.
- [14] CHEN Liang, WANG Cuiping, LIU Jianfeng, et al. A damage-mechanism-based creep model considering temperature effect in granite[J]. Mechanics Research Communications, 2014,56:76-82.
- [15] 张树光,陈雷.冲击地压巷道塑性区本构模型及影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2019,29(11):141-148.  
ZHANG Shuguang, CHEN Lie. Research on constitutive model and influencing factors of plastic zone of rockburst roadway[J]. China Safety Science Journal, 2019,29(11):141-148.
- [16] 李波波,吴学海,任崇鸿,等.瓦斯气体劣化-荷载作用下煤岩损伤本构模型[J]. 中国安全科学学报, 2021,31(7): 76-81.  
LI Bobo, WU Xuehai, REN Chonghong, et al. Constitutive model of coal and rock damage under gas degradation and load[J]. China Safety Science Journal, 2021,31(7):76-81.

作者简介: 门树臣 (1969—),男,内蒙古哲里木人,本科,高级工程师,主要从事采矿工程相关方向的研究。  
E-mail:1461821173@qq.com。