



基于蠕变曲线对称的蠕变模型研究及参数敏感性分析

刘文博 张树光 黄翔 刘轶品

引用本文:

刘文博, 张树光, 黄翔, 等. 基于蠕变曲线对称的蠕变模型研究及参数敏感性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 48–56.
LIU Wenbo, ZHANG Shuguang, HUANG Xiang. Study on symmetric creep model based on creep curves and parametric sensitivity analysis[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 48–56.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巷道围岩蠕变特性及非定常蠕变模型研究

Study on creep characteristics and unsteady creep model of roadway surrounding rock

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 67–72 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b9a081c9-c2e0-4c0c-9fe3-ef304a619021>

高德煤矿花岗岩蠕变损伤模型研究

Study on creep damage model of granite in Gaode Coal Mine

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/992b8d8c-a498-414a-bf98-ee81e5076d80>

考虑弹性模量退化的砂岩非定常蠕变模型

Unsteady creep model of sandstone with elastic modulus degradation

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ed24d57e-abd1-4014-ac6e-78a3c9ab907e>

蠕变扰动效应下红砂岩强度极限邻域试验研究

Experimental study on range of strength limit neighborhood of red sandstone under effect of creep disturbance

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 54–60 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/544f63a9-f785-4657-99d4-035d147fef11>

基于卸荷量影响下巷道围岩变参数模型研究

Study on variable parameters model of roadway surrounding rock under influence of unloading

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f2d264de-f92a-490b-b5d3-008db2f2ab4a>

蠕变作用后裂隙类岩石单轴强度和裂纹扩展规律研究

Study on uniaxial strength and crack propagation law of cracked similar rock after creep

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a2a62f78-94b3-4ad4-a8e3-ac9b7b42ac26>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘文博, 张树光, 黄翔, 等. 基于蠕变曲线对称的蠕变模型研究及参数敏感性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 48–56.
LIU Wenbo, ZHANG Shuguang, HUANG Xiang, *et al.* Study on symmetric creep model based on creep curves and parametric sensitivity analysis[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 48–56.

基于蠕变曲线对称的蠕变模型研究及参数敏感性分析

刘文博^{1,2}, 张树光^{1,2}, 黄翔^{1,2}, 刘轶品³

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

3. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 北京 100176)

摘要: 为了获得滇中引水隧洞围岩的蠕变特性和研究隧洞围岩的长期稳定性, 采用中国科学院武汉岩土所自主研发的全自动三轴开展绿泥页岩的单轴蠕变试验, 获得了绿泥页岩的轴向蠕变曲线和等时应力-应变曲线, 并基于等时应力-应变曲线的特征确定出绿泥页岩的长期强度值。基于经典蠕变曲线特征与大量试验蠕变曲线, 发现描述衰减蠕变曲线的方程可以通过对称处理, 故假设加速曲线与衰减蠕变曲线是关于稳定蠕变曲线的中点对称的, 得到一种基于蠕变曲线对称的加速蠕变模型, 并基于蠕变试验曲线的特征提出一套确定蠕变模型参数的方法。最后, 将引入加速蠕变模型中的参数进行敏感性分析, 使得引入模型中的参数具有明确的物理意义。结果表明: 随着轴向应力的不断增大, 岩石的瞬时应变值和蠕变变形值不断增大, 而第一级荷载作用下岩石的瞬时应变占蠕变总变形比值最大。所建立的蠕变模型不仅可以很好地描述绿泥页岩的衰减蠕变和稳定蠕变变形规律, 也较好地弥补了西原模型无法描述加速蠕变的缺陷, 且该模型曲线与试验曲线的吻合度要远远高于西原模型与试验曲线的吻合度, 并且不同应力作用下模型曲线与试验曲线的相关性系数均在 0.90 以上; 同时, 通过不同类型试验曲线与模型曲线的验证也说明了该模型是可用于不同类型岩石蠕变曲线的预测。最终, 引入参数 j 值控制了加速蠕变的变形速率和进入加速蠕变的时间, 参数 k 值控制了蠕变时间和加速阶段的蠕变速率。

关键词: 深部岩体; 加速蠕变; 变形速率; 蠕变时间

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)07-0048-09

Study on symmetric creep model based on creep curves and parametric sensitivity analysis

LIU Wenbo^{1,2}, ZHANG Shuguang^{1,2}, HUANG Xiang^{1,2}, LIU Yipin³

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004; 2. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China; 3. China Railway 19th Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to obtain the creep characteristics of the surrounding rock of the Dianzhong water diversion tunnel and to study the long-term stability of the surrounding rock of the tunnel, a fully automated triaxial developed by Wuhan Institute of Geotechnics, Chinese Academy of Sciences, is used to carry out the uniaxial creep test of green mud shale. The axial creep curve and isochronous stress-strain curve of green mud shale are obtained. And the long-term strength value of green mud shale is determined based on the characteristics of isochronous stress-strain curve. Based on the classical creep curve characteristics and a large number of experimental creep curves, it is found that the equations describing the attenuation creep curve can be treated by symmetry. Therefore, it is assumed that the acceleration curve and the decay creep curve are symmetric about the midpoint of the stable creep curve. An accelerated creep model based on the symmetry of the creep curve is obtained. And a set of methods to determine the parameters of the creep model is proposed based on the characteristics of the creep test curve. Finally, the parameters introduced into the accelerated creep model for sensitivity analysis. The parameters

收稿日期: 2023-12-01 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1084

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42067041); 广西科学自然基金资助项目(2020GXNSFAA159125)

作者简介: 刘文博(1990—), 男, 甘肃兰州人, 博士。E-mail: 15393162288@163.com

通讯作者: 张树光(1974—), 男, 山东东营人, 教授, 博士。E-mail: zhangsg@glut.edu.cn

introduced into the model have a clear physical meaning. The results show that with the increasing axial stress, the instantaneous strain value and creep deformation value of the rock are also increasing, and the instantaneous strain of the rock under the first stage load accounts for the largest ratio of the total creep deformation. The established creep model can not only well describe the attenuation creep and stable creep deformation law of green mud shale, it also better make up for the defects of the Nishihara model that cannot describe the accelerated creep. The agreement between the model curve and the test curve is much higher than that between the model and the test curve, and the correlation coefficients between the model curve and the test curve under different stresses are all above 0.90. Meanwhile, the validation of different types of test curves and model curves also shows that the model can be applied to the prediction of creep curves of different types of rocks. Finally, the value of parameter j is introduced to control the deformation rate and the time to enter accelerated creep. The value of parameter k controls the creep time and the creep rate in the accelerated stage.

Key words: deep rock mass; accelerated creep; deformation rate; creep time

0 引 言

深部岩体通常处于高地应力、高温、高渗流场的环境中,它呈现出与低应力状态下不同的力学特性和强度特征;同时,深部围岩也具有明显的流变特性,例如花岗岩等坚硬岩石具有流变效应^[1-3]。岩石在低围压条件下,一般符合线性岩土材料的强度准则,而在高围压条件下岩石的变形规律具有明显的非线性特征^[4],且随着围压的增大,岩石的破坏状态由脆性破坏转变为延性破坏,以及深部围岩的力学强度参数和蠕变参数也不断劣化^[5]。因此,建立一个可以描述深部复杂地质环境下的岩石蠕变模型,来反映深部岩石的蠕变变化规律,进而可以为实际工程提供指导就显得十分有必要了。

国内外学者对深部岩石蠕变模型的研究取得了丰硕的成果。例如,李德建等^[6]构建非定常伯格模型,并将其代入到 Matlab/Simulink 数值计算平台中,开展与试验同等条件下的数值试验,结果表明了开发的流变模型可以很好地描述岩石的加卸载蠕变变形规律以及弹性后效变形规律。刘振等^[7]开展了加卸载蠕变试验,并采用试验曲线的特征将黏弹性蠕变和黏塑性蠕变分离,然后通过引入分数阶黏壶来构建可描述加速蠕变的黏塑性损伤模型,结果表明该模型很好地描述蠕变变形的全过程曲线。孙晓明等^[8]认为含水率对岩石的力学性能具有劣化影响,故构建关于含水率的加速蠕变黏壶以及提出了含水率影响作用下的岩石长期强度,建立的蠕变模型可以很好描述岩石的蠕变变形规律。崔阿能等^[9]建立了时间和应力双重影响的非线性蠕变模型,并结合试验曲线对模型进行了验证以及对新建立模型中的蠕变参数进行了敏感性分析,结果表明该模型可以很好描述岩石的蠕变变形规律,也弥补了传统模型无法描述加速蠕变变形的缺点。宋勇军等^[10]研究冻融循环作用对岩石蠕变性质的影响,并构建了考虑

冻融循环作用的三轴蠕变模型,结果表明该模型曲线与试验曲线的吻合度很好,也很好反映了冻融循环作用下岩石蠕变的变形规律。上述研究建立的蠕变模型都很好地描述岩石在不同条件下的蠕变变形规律,但是针对经典蠕变曲线的特征来构建模型的研究较少。

因此,笔者将描述稳定蠕变曲线的线段作为对称轴,将描述衰减蠕变曲线的方程沿着该对称轴翻转后得到描述加速蠕变曲线的方程,并将该曲线方程与传统西原模型通过串并联法则处理后,得到一种基于蠕变曲线对称的加速蠕变模型。为了验证该模型是否可以描述岩石蠕变全过程曲线以及是否描述加速蠕变曲线,根据提出一套确定蠕变模型参数的方法,进而通过试验数据和该确定参数的方法确定出不同应力作用下的模型参数值,以及通过模型曲线、试验曲线和西原模型曲线的对比验证本文所建立模型的合理性、正确性与优越性。最终,通过对引入参数进行敏感性分析,得到引入参数的物理意义。

1 基于蠕变曲线对称的加速蠕变模型建立

1.1 加速蠕变模型的建立

高应力作用下岩石蠕变全过程曲线如图 1 所示。

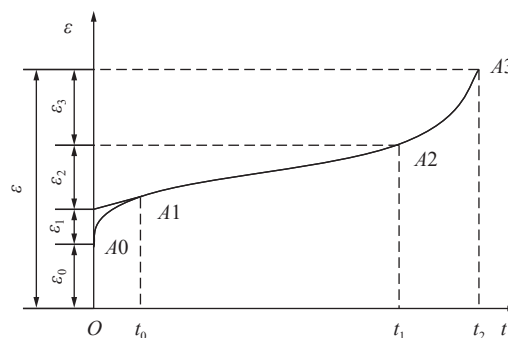


图 1 高应力作用下岩石的蠕变全过程曲线^[11-12]

Fig.1 Curve of the whole process of rock creep under high stress^[11-12]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (1)$$

式中: ε 为总应变; ε_0 为瞬时应变; ε_1 为衰减蠕变变形; ε_2 为稳定蠕变变形; ε_3 为加速蠕变变形。

在单向受力状态下, 瞬时应变 ε_0 可以表述为

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_0} \quad (2)$$

式中: ε_0 为瞬时应变值, E_0 为瞬时弹性模量; σ 为蠕变应力。

可以采用 Kelvin 体力学模型来描述岩石的衰减蠕变变形规律。衰减蠕变变形 ε_1 可以表示为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (3)$$

式中: E_1 为描述衰减蠕变变形规律模型的黏弹性模量; η_1 为描述衰减蠕变变形规律模型的黏滞性系数; t 为蠕变时间。

稳定蠕变阶段岩石的应变-时间变化规律基本呈现出线性变化关系, 则稳定蠕变变形 ε_2 可以表示为

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (4)$$

式中: η_2 为描述稳定蠕变变形规律模型的黏滞性系数。

一般情况下, 对于加速蠕变变形规律的描述采用非线性蠕变模型、分数阶模型、能量模型等^[13-14]。笔者基于经典蠕变曲线特征与大量试验研究曲线, 发现描述衰减蠕变曲线的方程可以通过对称处理, 就可以得到描述加速蠕变曲线的方程, 且对称后的曲线方程也可以较好地描述岩石的加速蠕变变形规律。现在, 需要确定出经典蠕变曲线上衰减蠕变曲线与加速蠕变曲线的对称形式。具体处理示意如图2所示。先确定出稳定蠕变中点的坐标, 再通过点的对称原理将衰减蠕变曲线方程进行中心对称, 得到加速蠕变曲线的方程。

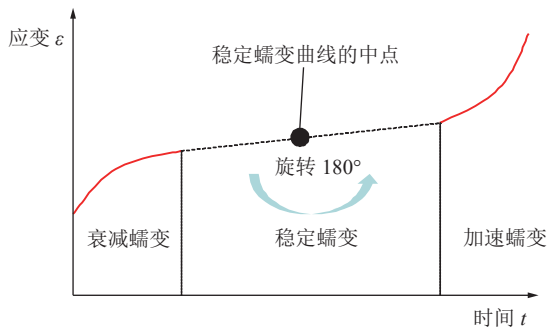


图2 曲线对称示意

Fig.2 The diagram of curve symmetry

假设加速曲线与衰减蠕变曲线是关于稳定蠕变曲线的中点 $[(t_0+t_1)/2, \varepsilon_{t_2}]$ 对称的, 曲线 $f(x)$ 关于点

(a, b) 的中心对称曲线可以表示为

$$2b - f(x) = f(2a - x) \quad (5)$$

通过曲线关于点对称的公式(5)和衰减蠕变方程式(3)可以得到加速蠕变曲线为

$$\varepsilon_3 = 2\varepsilon_{t_2} - \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} (t_0 + t_1 - t)\right) \right] \quad (6)$$

式中: ε_{t_2} 为稳定蠕变曲线中点对应的应变; t_0 和 t_1 分别为衰减蠕变与稳定蠕变分界点对应的时间和稳定蠕变和加速蠕变分界点对应的时间, 均可以通过试验曲线获得。

但是衰减蠕变和加速蠕变本质是有区别的, 不能通过衰减蠕变的参数来描述加速蠕变的变形规律, 故本文将式(6)进行了简化, 得到

$$\varepsilon_3 = 2\varepsilon_{t_2} - \frac{\sigma}{j} \left[1 - \exp\left(-\frac{j}{k} (t_0 + t_1 - t)\right) \right] \quad (7)$$

将式(2)~式(7)代入式(1)中, 得到可描述岩石蠕变全过程曲线的方程, 即

当 $t < t_0$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (8)$$

当 $t_0 \leq t < t_1$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (9)$$

当 $t \geq t_1$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_2} t + 2\varepsilon_{t_2} - \frac{\sigma}{j} \left[1 - \exp\left(-\frac{j}{k} (t_0 + t_1 - t)\right) \right] \quad (10)$$

为了进一步得到式(5)中模型蠕变参数的实际物理意义, 需要对模型参数进行确定, 以下将展开对模型蠕变参数确定的讨论。

1.2 岩石蠕变模型的确定方法

1) 瞬时弹性模量。在岩石蠕变试验中, 瞬时应变值 ε_0 只受到施加蠕变应力的影响, 不会受到蠕变时间的影响; 同时, 瞬时应变值可以直接从蠕变-时间曲线上获取, 故瞬时弹性模量 E_0 可以表示为

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (11)$$

2) 黏弹性模量 E_1 和黏滞性系数 η_1 。当蠕变时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(8)存在以下关系^[15]

$$\varepsilon(t \rightarrow \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \right\} = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \quad (12)$$

式(8)减去式(12)可以得到

$$\varepsilon(t \rightarrow \infty) - \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \quad (13)$$

对式(9)两边同时取对数可以得到

$$\ln[\varepsilon(t \rightarrow \infty) - \varepsilon] = -\frac{E_1}{\eta_1} t + \ln\left(\frac{\sigma}{E_1}\right) \quad (14)$$

将式(14)进行如下形式的转化,则

$$y = A + Bt \quad (15)$$

$$\begin{cases} y = \ln[\varepsilon(t \rightarrow \infty) - \varepsilon] \\ A = \ln\left(\frac{\sigma}{E_1}\right), B = -\frac{E_1}{\eta_1} t \end{cases} \quad (16)$$

通过对一系列试验数据 $(y(t), t)$ 拟合,可以得到拟合参数 A 和 B 。根据式(15)——(16)得到黏弹性模量 E_1 和为黏滞性系数 η_1 为

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\sigma}{\exp(A)} \\ \eta_1 = -\frac{\sigma}{B \exp(A)} \end{cases} \quad (17)$$

3) 黏滞性系数 η_2 。一般情况下,岩石的稳定蠕变速率都是恒定不变的,但是由于试验系统和岩石都不是理想系统和材料,进而导致了岩石的稳定蠕变速率是一个小范围波动的数据^[16-17]。为了更好地确定蠕变参数和表示岩石的稳定蠕变速率,可以采用式(18)的形式对岩石的蠕变速率进行拟合。

$$\varepsilon' = \frac{C}{t} + D + Ent^{n-1} \quad (18)$$

假设稳定蠕变速率为 m , 则

$$\frac{\sigma}{\eta_2} = m \quad (19)$$

由式(19)可以得到黏滞性系数 η_2 为

$$\eta_2 = \frac{\sigma}{m} \quad (20)$$

4) 加速蠕变阶段的参数 j 和 k 。根据文献 [11] 中的方法可知,参数 j 和 k 可以通过最小二乘法确定,即

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^M [\varepsilon_i - \varepsilon_i(t_i, j^0)]^2}{\partial j^0} = 0 \quad (21)$$

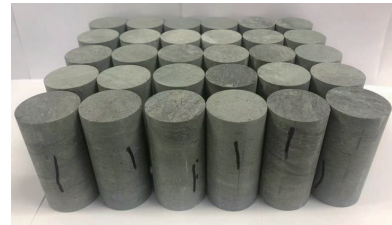
$$\frac{\partial \sum_{i=1}^M [\varepsilon_i - \varepsilon_i(t_i, k^0)]^2}{\partial k^0} = 0 \quad (22)$$

综上所述,式(11)、式(17)、式(20)、式(21)和式(22)为基于蠕变曲线对称的加速蠕变模型确定参数的方法。

2 岩石单轴蠕变试验

2.1 岩石单轴压缩试验

岩石试样取自丽江一标 2 号洞,桩号为 DLI BK0+057.2。经检测后该岩石类型为绿泥页岩,在现场将围岩进行简单切割后带回试验室精加工。按照国际岩石力学学会的标准和要求,将岩石试样加工成高度为 100 mm、半径为 25 mm 的标准圆柱体(图 3a)。试验设备采用桂林理工大学引进中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的实时高温常规三轴试验系统(图 3c)。该设备可以实现高温、高应力、高水压等深部复杂环境岩石孔的非线性多场耦合试验。



(a) 制备岩石试样



(b) 实时高温常规三轴试验系统

图 3 岩石试样和三轴试验系统

Fig.3 Rock specimen and triaxial test system

单轴压缩试验的试验步骤为:

- 1) 为了防止岩石发生突然的脆性破坏,需在施加轴向应力之前设置位移上限安全值。
- 2) 本试验机是以油量的进入速率来施加应力,以 1 mL/min 的加载速率(以油量计算)施加轴向应力直至测得岩石峰后应力-应变曲线。
- 3) 将测得数据进行保存后卸载轴向应力。
- 4) 升起压力舱取出已经破坏岩石试样,将试样进行标记后存放。
- 5) 根据试验数据绘制出岩石在单轴压缩条件下的轴向应力-应变曲线。

绘制出单轴压缩条件下岩石的应力-应变曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,岩石的应力-应变曲线具有明显的压密阶段变形。在达到峰值强度后,岩石的应力-应

变曲线呈现出断崖式下降,这主要是由于在无径向约束的条件下,施加在岩石端面的外部荷载超过其极限强度时,岩石在瞬时便会失去抵抗外部荷载的能力,导致了岩石发生严重的变形破坏。因此,在实际工程中应该注意隧洞围岩处于单向受力状态下的突然失稳破坏,避免给工程造成不可磨灭的损失。

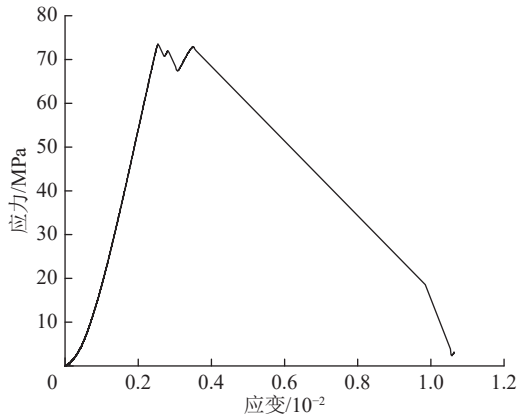


图4 单轴应力-应变曲线

Fig.4 Uniaxial stress-strain curve

2.2 岩石单轴蠕变试验

采用蠕变加载方式为单试件逐级加载的方式^[18-19],单轴蠕变试验步骤:

1)将岩石试样外部包裹好热塑膜,并将其放在加载平台上,保证岩石轴线与加载平台的轴线保持一致。

2)连接好位移传感器、放下加载仓,先施加一个很小轴向应力使加载台与试样顶部接触。

3)取岩石单轴强度的50%作为蠕变试验的第一级应力,以1 mL/min的加载速率施加轴向应力至第一级应力,保持轴向应力不变。

4)而每一级应力加载时间的判断条件为:当每两个小时测得岩石试样的轴向蠕变变形量不超过0.001 mm时,可以认为该应力水平下岩石的蠕变变形已经达到了稳定,则可以施加下一级应力值,以后每一级应力加8 MPa直至岩石试样发生蠕变破坏为止。

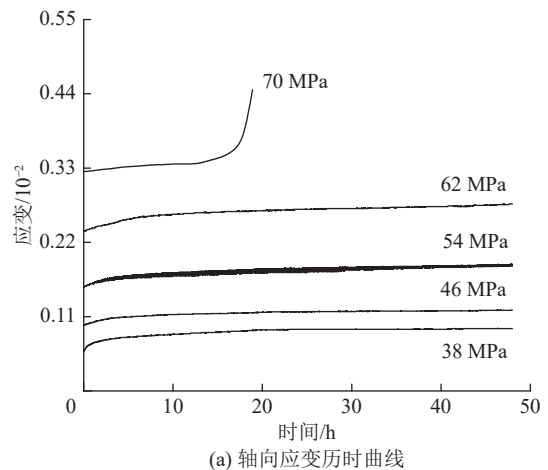
5)升起压力舱取出已经破坏岩石试样,将蠕变破坏后的试样进行标记后存放。

6)由于试验数据受到历时荷载的影响,故采用常用的陈氏加载法将数据进行叠加整理后^[20-22],得到了单轴压缩的轴向应力-应变曲线。

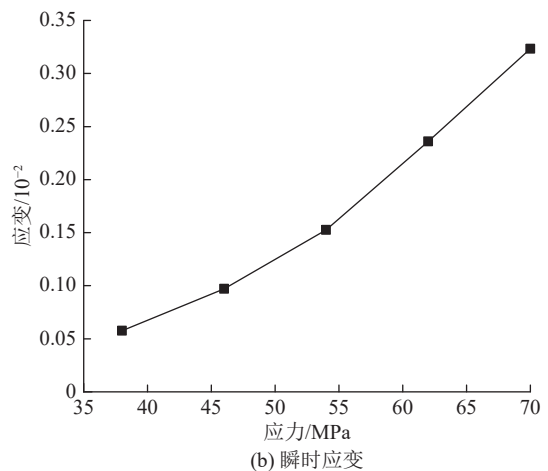
根据上述方法对试验数据处理后,绘制出岩石的蠕变历时曲线如图5所示。

由图5可知,岩石的轴向蠕变变形只经历了五

级荷载,且在前四级都无加速蠕变变形阶段,只在第五级应力作用下,岩石才具有完整的3个蠕变变形阶段和瞬时变形阶段。随着轴向应力的不断增大,岩石的瞬时应变和蠕变变形值也是不断增大的,而第一级荷载作用下岩石的瞬时应变占蠕变总变形比值最大,这主要是由于岩石自身就是多孔材料,在加载初始时期岩石内部含有大量的孔隙,岩石的瞬时应变也包括了这些孔隙在荷载作用下的压缩变形,且随着荷载不断增大孔隙压缩变形也越来越小。同时,蠕变变形在破坏荷载作用下的变形增量要大于其他荷载作用下的变形增量,这主要是由于在低应力作用下岩石内部的变形由孔隙压缩变形以及新生裂隙变形提供,而在高应力作用下随着裂隙不断发育和产生,在岩石内部逐渐形成了裂隙面,裂隙面在荷载作用下不断滑动和错位,导致了蠕变变形量增大。



(a) 轴向应变历时曲线



(b) 瞬时应变

图5 岩石的蠕变历时曲线

Fig.5 Creep duration curve of rock

绘制出岩石的等时应力-应变曲线如图6所示。

由图 6 可知, 等时应力-应变曲线是一组发散的折线, 在发散点之前等时应力-应变曲线基本重合, 此时岩石的主要呈现出线性的特性, 在发散点之后等时应力-应变曲线发散程度越来越大, 此时岩石的非线性特性也越来越明显, 故将发散点对应的应力值作为岩石的长期强度值^[23-26]。轴向等时应力-应变曲线转折点对应的应力值为 54 MPa, 故该岩石的长期强度值为 54 MPa。

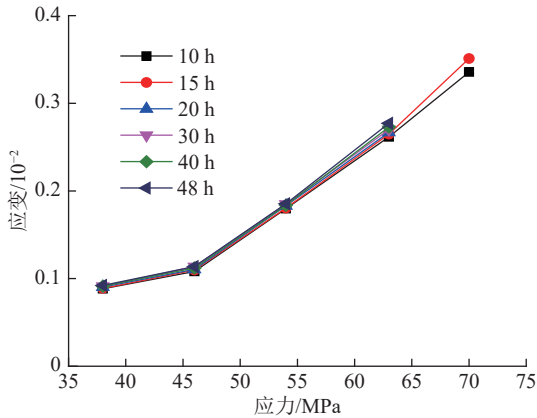


图 6 轴向等时应力-应变曲线
Fig.6 Axial isochronous stress-strain curve

3 蠕变模型参数的识别与模型验证

3.1 瞬时弹性模量

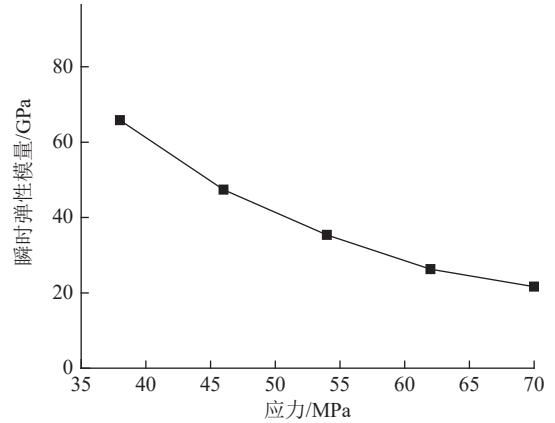
根据式(7)和图 6 中的瞬时应变值, 可计算得到岩石的瞬时弹性模量 E_0 。绘制出不同应力作用下岩石瞬时弹性模量 E_0 的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知, 应力与瞬时弹性模量的关系呈现出不断减小的趋势, 这说明了应力的增大有效地降低了岩石的瞬时弹性模量。同时, σ/E_0 与 σ 的关系呈现出不断增大的趋势, 这说明了随着应力的增大, 岩石的瞬时应变值是不断增大的。此时, σ/E_0 与 σ 的关系方程为

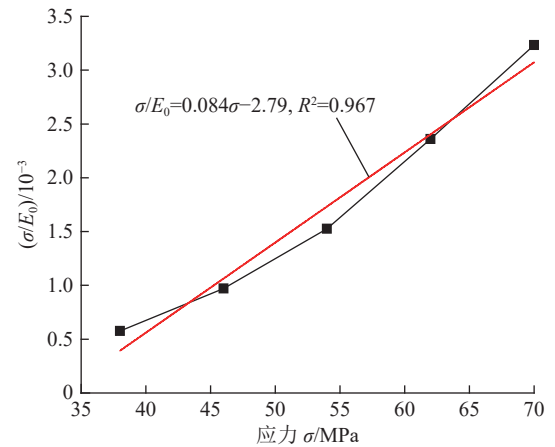
$$\frac{\sigma}{E_0} = 0.084\sigma - 2.790, R^2 = 0.967 \quad (23)$$

3.2 模型参数

根据式(8)–式(23)以及岩石的蠕变轴向-时间数据^[27-30], 计算得到黏弹性模量 E_1 和为黏滞性系数 η_1 、黏滞性系数 η_2 、加速蠕变阶段的参数 j 和 k 见表 1 所示。在对比分析 70 MPa 作用下的岩石模型曲线和试验曲线时, 需要根据蠕变曲线先确定出参数 t_0 , t_1 和 ε_2 , 此时衰减蠕变和稳定蠕变分界点对应的时间 $t_0=2.986\ 2$ h, 稳定蠕变和加速蠕变分界点对应的时间 $t_1=13.935\ 8$ h, 稳定蠕变中点对应的蠕变变形值 $\varepsilon_2=0.334\ 9\times 10^{-2}$ 。



(a) 应力与瞬时弹性模量的关系



(b) σ/E_0 与 σ 的关系

图 7 不同应力作用下岩石瞬时弹性模量的变化规律
Fig.7 Changes of instantaneous elastic modulus of rock under different stresses

表 1 蠕变模型参数值

Table 1 Parameter values of creep model

应力/MPa	38	46	54	63	70
E_0/GPa	65.846 5	47.408 0	35.377 4	26.271 2	0.213 0
E_1/GPa	114.220 4	218.358 9	177.022 3	277.524 2	3.5877×10^{23}
$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	578.086 6	1 420.735 1	1 869.924 1	1 659.555 8	4.4927×10^{24}
$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	—	—	—	3 318.786 5	64.012 4
j/GPa	—	—	—	—	6.990 0
$k/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	—	—	—	—	6.067 1
R^2	0.989	0.947	0.987	0.990	0.995

将表 1 中的模型参数值代入到式(8)–式(10)中, 得到了模型曲线与试验曲线的对比如图 8 所示。

由图 8 可知, 模型曲线与试验曲线趋势一致, 这说明了该模型较好地描述岩石蠕变全过程曲线, 它也较好地弥补了以往模型无法描述加速蠕变的缺陷。因此, 将稳定蠕变曲线作为对称轴, 通过将描述衰减蠕变曲线的方程沿着该对称轴翻转后得到加速蠕变方程的方法是合适可行的。该方法也进一步完善了岩

石蠕变模型理论,为后续数值计算也奠定了理论基础。

为了进一步验证所建立模型的优越性,现绘制出加速蠕变试验曲线、西原模型曲线与本文模型曲线的对比如图9所示。

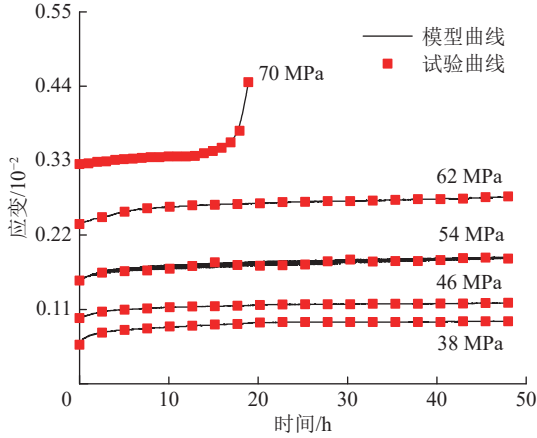


图8 模型曲线与试验曲线的对比

Fig.8 Comparison between model curve and test curve

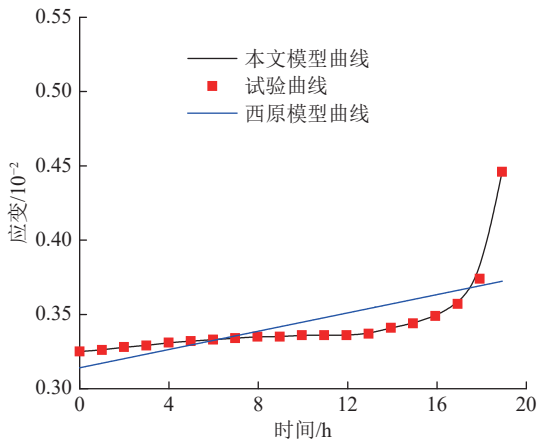


图9 加速蠕变试验曲线、西原模型曲线与本文模型曲线的对比

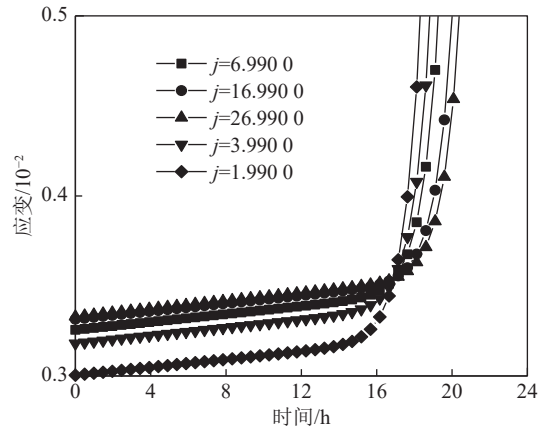
Fig.9 Comparison of accelerated creep test curve, Nishihara model curve and this paper model curve

由图9可知,所建立模型曲线与于试验曲线的拟合度要优于西原模型曲线与试验曲线的拟合度,且在破坏应力作用下试验曲线与模型曲线的相关性系数在0.95以上,说明本文模型较西原模型具有很好模拟加速蠕变曲线的性能。

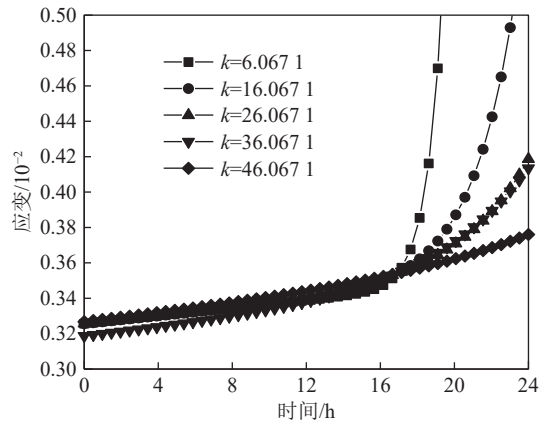
为了进一步得到引入参数 k 和参数 j 对蠕变试验曲线的影响,绘制出破坏应力作用下不同参数 k 和参数 j 的蠕变曲线如图10所示。

由图10可知,在参数 k 值保持不变的条件下,随着参数 j 值不断增大,岩石加速蠕变阶段的曲线越来越陡且进入加速蠕变时间越晚,这说明了参数 j 值控制了加速蠕变的变形速率和进入加速蠕变的时间。在参数 j 值保持不变的条件下,随着参数 k 值不断增

大,岩石蠕变曲线越来越陡且蠕变时间越来越长,说明参数 k 值控制了蠕变时间和加速阶段的蠕变速率。



(a) 不同参数值 j 作用下岩石的蠕变曲线



(b) 不同参数值 k 作用下岩石的蠕变曲线

图10 加速蠕变参数的敏感性分析

Fig.10 Sensitivity analysis of accelerated creep parameters

为了验证其他类型的岩石也可以采用本文的模型来描述蠕变变形的全过程曲线,现采用砂岩(该岩石取自辽宁阜新恒大煤矿)蠕变曲线对该模型进行验证(图11)。

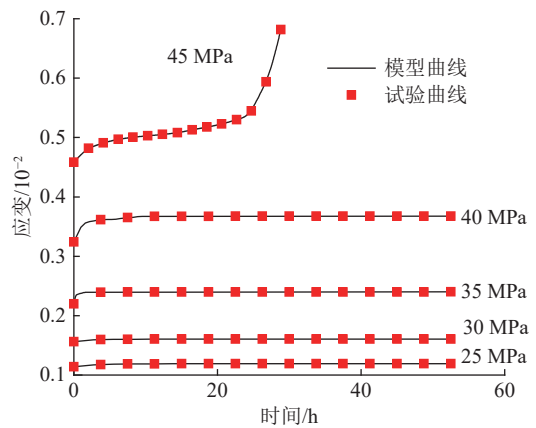


图11 砂岩的模型曲线与试验曲线的对比

Fig.11 Comparison of model curve and test curve of sandstone

由图 11 可知, 试验的模型曲线与试验曲线的吻合度也很高, 决定系数在 0.90 以上。这也说明了本文建立模型的合理性与正确性, 该模型是可以运用于不同类型岩石蠕变曲线的预测。

4 结 论

1) 通过对称原理将稳定蠕变曲线作为对称轴, 进而将衰减蠕变方程通过该对称轴进行对称处理, 得到能描述加速蠕变曲线的方程; 同时, 经过试验曲线和模型曲线对比后发现对称后的曲线方程可以较好地描述岩石的加速蠕变变形规律。

2) 该模型较好地描述岩石蠕变全过程曲线, 也较好地弥补了以往模型无法描述加速蠕变的缺陷, 将稳定蠕变曲线作为对称轴, 通过将描述衰减蠕变曲线的方程沿着该对称轴翻转后得到加速蠕变方程的方法是合适可行的, 该方法也进一步完善了岩石蠕变模型理论以及为后续数值计算也奠定了理论基础。

3) 参数 j 值控制了稳定蠕变和加速蠕变的变形速率; 参数 k 值控制了蠕变时间和加速阶段的蠕变速率。

参考文献(References):

- [1] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 138-146.
LIU Xinxu, LI Shengnan, ZHOU Yanming, *et al.* Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 138-146.
- [2] 张亮亮, 王晓健, 周瑞鹤. 一种新的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 力学季刊, 2020, 41(1): 116-124.
ZHANG Liangliang, WANG Xiaojian, ZHOU Ruihe. A new nonlinear viscoelastic-plastic creep model for rocks[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2020, 41(1): 116-124.
- [3] 韩阳, 谭跃虎, 李二兵, 等. 岩石非定常 Burgers 蠕变模型及其参数识别[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 210-217.
HAN Yang, TAN Yuehu, LI Erbing, *et al.* Non-stationary Burgers creep model of rock and its parameter identification[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 210-217.
- [4] HU B, YANG S Q, XU P. A nonlinear rheological damage model of hard rock[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(7): 1665-1677.
- [5] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, *et al.* Separation of elastoviscoplastic strains of rock and a nonlinear creep model[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(1): 04017129.
- [6] 李德建, 饶远昊, 张鸣原, 等. 岩石蠕变试验非定常参数流变模型及计算机仿真[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(6): 1522-1533.
LI Dejian, RAO Yuanhao, ZHANG Mingyuan, *et al.* Rheological model with non-constant parameters and computer simulation of creep experiment of rock[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(6): 1522-1533.
- [7] 刘振, 杨圣奇, 柏正林, 等. 循环加卸载下闪长玢岩蠕变特性及损伤本构模型[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 143-151.
LIU Zhen, YANG Shengqi, BAI Zhenglin, *et al.* Creep property and damage constitutive model of dioritic porphyrite under cyclic loading-unloading[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 143-151.
- [8] 孙晓明, 缪澄宇, 姜铭, 等. 基于改进西原模型的不同含水率砂岩蠕变实验及理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2411-2420.
SUN Xiaoming, MIAO Chengyu, JIANG Ming, *et al.* Experimental and theoretical study on creep behaviors of sandstone with different moisture contents based on modified Nishihara model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2411-2420.
- [9] 崔阿能, 胡斌, 崔凯, 等. 基于应力-时间双阈值条件的岩石黏弹塑性蠕变模型[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 125-132.
CUI Aneng, HU Bin, CUI Kai, *et al.* A model of rock viscoelastoplastic creep based on double stress-time thresholds[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(2): 125-132.
- [10] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 冻融环境下红砂岩三轴蠕变特性及其模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 841-849.
SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, *et al.* Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 841-849.
- [11] 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.
ZHANG Liangliang, WANG Xiaojian. Viscoelastic-plastic damage creep model for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1085-1092.
- [12] 张亮亮, 王晓健. 一种新的岩石非线性损伤蠕变模型[J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 372-377, 494.
ZHANG Liangliang, WANG Xiaojian. A new nonlinear damage creep model of rocks[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 372-377, 494.
- [13] 姜鹏, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于应变能的岩石黏弹塑性损伤耦合蠕变本构模型及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2967-2979.
JIANG Peng, PAN Pengzhi, ZHAO Shankun, *et al.* A coupled elasto-viscoplastic damage model based on strain energy theory of rock and application[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 2967-2979.
- [14] ABU AL-RUB R K, DARABI M K, KIM S M, *et al.* Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging-susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 439-454.
- [15] YANG S Q, JING H W, CHENG L. Influences of pore pressure

- on short-term and creep mechanical behavior of red sandstone[J]. *Engineering Geology*, 2014, 179: 10–23.
- [16] 陈有亮, 陈奇键, 肖鹏, 等. 考虑水化学损伤的岩石真三轴蠕变本构模型[J]. *力学学报*, 2023, 55(1): 159–168.
CHEN Youliang, CHEN Qijian, XIAO Peng, *et al.* A true triaxial creep constitutive model for rock considering hydrochemical damage[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(1): 159–168.
- [17] 冯晓伟, 王伟, 王如宾, 等. 考虑水化学损伤的砂岩流变损伤本构模型[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3340–3346, 3354.
FENG Xiaowei, WANG Wei, WANG Rubin, *et al.* A rheological damage model of sandstone under water-rock chemical interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3340–3346, 3354.
- [18] WANG You, LU Xiaoyu, ZHAI Guoliang. Non-stationary creep model for rock based on Nishihara model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 676–682.
- [19] 薛东杰, 路乐乐, 易海洋, 等. 考虑温度和体积应力的分数阶蠕变损伤 Burgers 模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(2): 315–329.
XUE Dongjie, LU Lele, YI Haiyang, *et al.* A fractional Burgers model for uniaxial and triaxial creep of damaged salt-rock considering temperature and volume-stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 315–329.
- [20] 刘德峰, 刘鹏涛, 张臻悦, 等. 轴压水压耦合作用下裂隙砂岩蠕变特性[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(1): 94–103.
LIU Defeng, LIU Pengtao, ZHANG Zhenyue, *et al.* Creep characteristics of fractured sandstone under the coupling action of axial compression and hydraulic pressure[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(1): 94–103.
- [21] 杨逾, 孙博一, 孙艺丹, 等. 考虑弹性模量退化的砂岩非定常蠕变模型[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(5): 110–119.
YANG Yu, SUN Boyi, SUN Yidan, *et al.* Unsteady creep model of sandstone with elastic modulus degradation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 110–119.
- [22] 赵伦洋, 赖远明, 牛富俊, 等. 硬脆性岩石多尺度损伤蠕变模型及长期强度研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(8): 3071–3080.
ZHAO Lunyang, LAI Yuanming, NIU Fujun, *et al.* Multi-scale damage creep model and long-term strength for hard brittle rocks[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(8): 3071–3080.
- [23] 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.
- [24] LIU W B, ZHANG S G, SUN B Y, *et al.* Creep characteristics and time-dependent creep model of tunnel lining structure concrete[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2021, 25(3): 365–382.
- [25] LIU W B, ZHOU H, ZHANG S G, *et al.* Constitutive model of concrete creep damage considering the deterioration of creep parameters[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 308: 125047.
- [26] 王兆会, 孙文超, 王雪冰, 等. 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 72–82.
WANG Zhaohui, SUN Wenchao, WANG Xuebing, *et al.* Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 72–82.
- [27] LIANG X, FU B, LIANG Z Z, *et al.* A novel structural model for strainburst hazard considering the surrounding rock-burst volume interaction and its use to obtain a strength criterion for strainbursts[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(7): 200.
- [28] LIU W B, ZHANG S G. An improved unsteady creep model based on the time dependent mechanical parameters[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 28: 1838–1848.
- [29] 范庆忠, 高延法, 崔希海, 等. 软岩非线性蠕变模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(4): 505–509.
FAN Qingzhong, GAO Yanfa, CUI Xihai, *et al.* Study on nonlinear creep model of soft rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(4): 505–509.
- [30] 石多奇, 杨晓光. 时间硬化蠕变本构方程耦合损伤的应用研究[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(1): 12–16.
SHI Duoqi, YANG Xiaoguang. Application of the time-hardening creep law coupling damage[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(1): 12–16.