露天边坡软岩蠕变特性及非线性蠕变模型研究①

韦忠跟[1,2]

(1.中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2.露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘 要: 以内蒙古某露天矿边坡为研究背景,通过现场监测、室内试验和理论分析相结合的方法,对边坡软岩蠕变特性进行了研究。边坡雷达与 GNSS 实时监测系统发现,边坡北帮东侧蠕变变形较大,需重点防护。当轴向应力超过长期强度时,软岩表现出瞬时变形、衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变特征。软岩蠕变变形和蠕变速率与轴向应力呈正相关关系。将弹性元件、分数阶元件和非线性黏塑性体进行组合,建立了边坡软岩非线性蠕变模型,该模型能较好地描述边坡软岩的蠕变全过程,拟合度高于传统 Burgers 模型,适用性良好。

关键词: 露天边坡; 边坡稳定性; 边坡软岩; 雷达监测; 非线性黏塑性体; 蠕变特性; 蠕变模型; 分数阶微积分

中图分类号: TD854 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.006

文章编号: 0253-6099(2026)04-0046-08

Creep Characteristics and Nonlinear Creep Model of Soft Rock in Open-Pit Slopes

WEI Zhonggen[1,2]

(1.*China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute*, *Fushun* 113122, *Liaoning*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-Pit Coal Mines*, *Fushun* 113122, *Liaoning*, *China*)

Abstract: With the slopes of an open-pit mine in Inner Mongolia as the research background, the creep characteristics of soft rock in the slopes were investigated by means of field monitoring, laboratory test and theoretical analysis. Real-time monitoring results of the slopes from radar and GNSS found that the creep deformation is relatively larger on the eastern side of the northern slope, which requires key protection. When the axial stress exceeds the long-term strength, the soft rock goes through four deformation stages: instantaneous deformation, decelerating creep, steady-state creep and accelerated creep. Creep deformation and creep rate of soft rock are positively correlated with axial stress. A nonlinear creep model for slope soft rock is established by combining elastic elements, fractional-order element and nonlinear viscoplastic body (NVPB). This model can well describe the whole creep process of slope soft rock, with higher fitting accuracy than that of traditional Burgers model, and also demonstrate favorable applicability.

Key words: open-pit slope; slope stability; slope soft rock; radar monitoring; nonlinear viscoplastic body; creep characteristic; creep model; fractional-order calculus

随着经济的迅速发展,我国对矿产资源的需求量日益增加,各类露天矿边坡工程数量不断增多,边坡失稳风险显著加剧[1-2]。在我国蒙东地区,泥岩是构成露天边坡的主要软岩类型,具有强度低、遇水强度弱化、蠕变特性显著等复杂力学性质[3-5],受此影响,多座露天矿软岩边坡曾发生持续变形与滑坡现象,严重威胁矿山安全生产[6]。因此,开展露天矿边坡软岩蠕变特性的相关研究具有重要工程意义。

国内外学者围绕边坡软岩蠕变特性开展了广泛研究。在蠕变试验领域,通过多种工况与方法探究了软岩蠕变规律,进而揭示了不同影响因素作用对软岩蠕变变形量、长期强度及能量演化规律的影响机制[7-10]。在数值模拟方面,运用模拟软件构建边坡数值分析模型,模拟软岩蠕变过程中时间-应变曲线与裂纹扩展规

① **收稿日期**: 2026-02-18
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1306001);国家自然科学基金(52274084)
作者简介: 韦忠跟(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,副研究员,主要从事露天矿边坡监测及稳定性方面研究工作。E-mail:232354103@qq.com

律,探究边坡开挖时应力场、位移场及塑性区的演化进程[11-14]。在蠕变模型构建领域,以传统 Burgers、Nishihara 等模型为基础,通过引入塑性流动法则、分数阶积分理论、统计损伤理论等,开发非线性蠕变损伤模型,以刻画软岩在动力扰动、分数阶弹性黏性效应下的蠕变损伤演化规律[15-19]。

然而现有研究仍存在明显不足:一方面,研究多集中于室内试验与数值模拟层面,针对特定露天矿边坡软岩的研究较为缺乏;另一方面,多数蠕变模型仅重点描述稳态蠕变阶段,忽略了对工程安全至关重要的加速蠕变阶段,难以完整反映软岩蠕变全过程。基于此,本文以内蒙古某露天矿软岩边坡为研究对象,通过雷达与 GNSS 实时监测系统识别边坡蠕变变形重点区域,针对性开展软岩单轴分级加载蠕变试验,并引入分数阶元件与非线性黏塑性体(nonlinear viscoplastic body,NVPB),NVPB 构建非线性蠕变模型,结合试验数据与现场监测数据验证模型适用性,以期为露天矿边坡蠕变失稳预警及工程治理提供技术支撑。

1　露天矿边坡监测及分析

内蒙古某露天矿现已形成东西长 3.2 km、南北宽 3.6 km 的大型采场,最大相对高差 360 m,开采台阶按岩性设置高度,煤系硬岩、排弃台阶高度 15 m,第三系、第四系土质台阶高度 10 m。

矿区边坡以 997 m 水平为界划分为两类:997 m 水平以下为白垩系白音华组层状碎裂硬岩边坡,岩性为砂岩、泥岩、煤层互层,岩体胶结松散、风化裂隙发育;997 m 水平以上为第三系红黏土、第四系风积砂构成的软质土质边坡,坡内赋存 0.1 m 左右炭质泥岩软弱夹层,土体遇水软化、强度大幅衰减。北帮属于软硬复合工作帮边坡,是矿区变形最发育区域,多次出现大范围蠕动、张拉裂缝;东帮、西帮下部为硬岩边坡,南北排土场均为散体堆积土质边坡,全矿边坡失稳模式以沿层间弱层顺层剪切滑移为主,降水入渗、采掘卸荷、排土加载、断层切割是诱发边坡变形的核心因素。

1.1　监测系统布设

露天矿区现有真实孔径边坡雷达 4 台,其中 1 号 MSR 雷达布置在内排 975 平盘位置,2 号 MSR 雷达布置在东帮 1002 平盘位置,3 号 MSR 雷达布置在内排 995 平盘位置,IBIS 雷达布置在北帮地表,监测范围覆盖北帮、西帮、东帮及内排,如图 1 所示。另外矿内现有 GNSS 边坡监测系统,各监测区域点位分布情况为:北排土场及北帮西侧复合边坡区域 27 个点、北帮东侧监测区域 12 个点、北帮西侧北排土场监测区域 21 个点、南排监测区域 18 个点、西帮监测区域 3 个点、东帮监测区域 1 个点、内排监测区域 3 个点。GNSS 监测点平面图如图 2 所示。

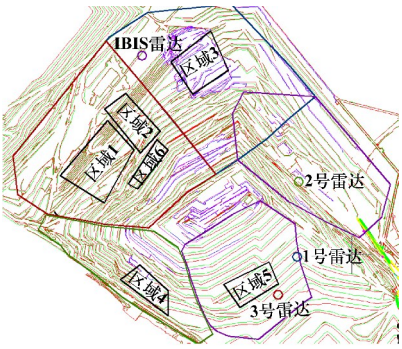


图 1　雷达监测平面图

Fig. 1　Plan view of radar monitoring

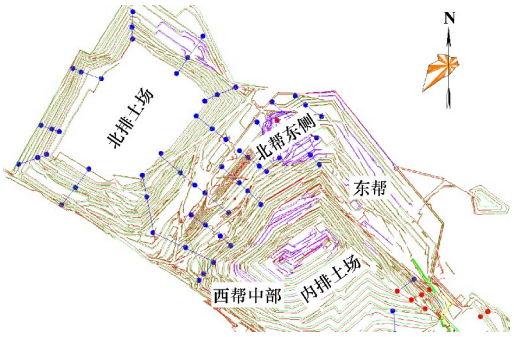


图 2　GNSS 监测点平面图

Fig. 2　Plan view of GNSS monitoring points

1.2　监测数据分析

选取 2023 年度监测数据开展分析,采用 MSR 雷达对北帮西侧、北帮东侧、西帮中部三处监测区域的边坡位移变化进行统计;同时采用 IBIS 雷达完成东帮北侧、北帮东侧、内排三处监测区域位移数据统计。各雷达监测区域位移变化如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知,北帮东侧(998 ~ 1050 水平)区域在 3—12月份的最大位移量达 4 419.13 mm,且每月的变

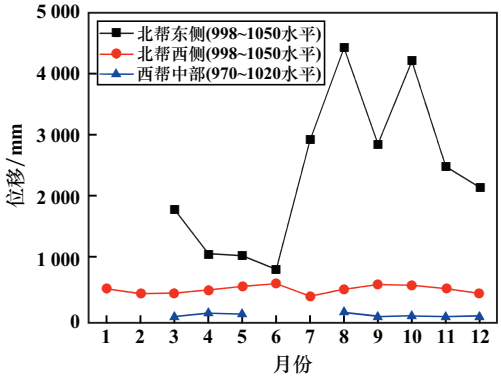


图 3　MSR 雷达监测区域位移变化

Fig. 3　Displacement variations in monitored area of MSR radar

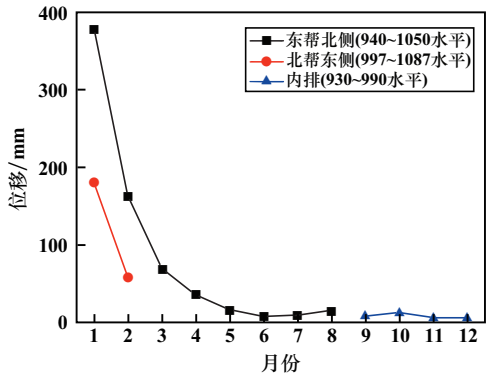


图 4 IBIS 雷达监测区域位移变化

Fig. 4 Displacement variations in monitored area of IBIS radar

化幅度较大,明显高于其他区域。分析认为该区域主要由第三、四系的土质软岩构成,这些软岩具有可塑性、膨胀性、崩解性、流变性以及易扰动性等多种特性,容易发生蠕动变形。由图 4 可知,北帮东侧(997~1087 水平)区域在 1—2 月位移较小,平均位移速度较缓,边坡处于稳定状态。

北帮东侧边坡 GNSS 监测点矢量平面图如图 5 所示,剖面位移矢量图如图 6 所示。

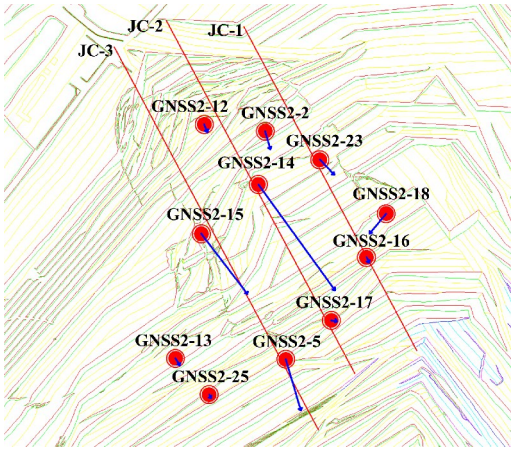
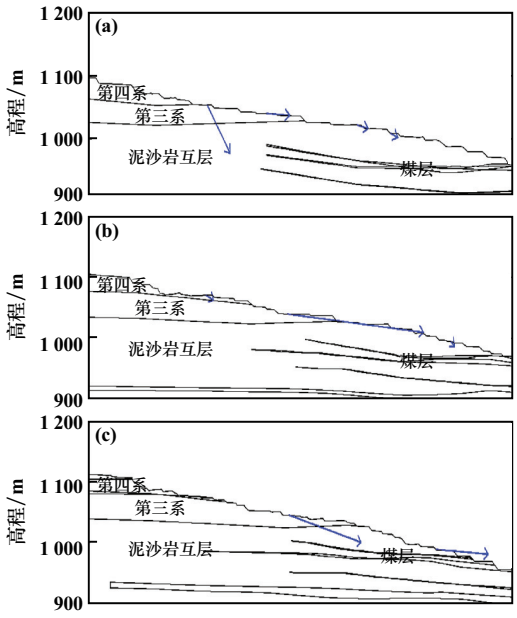


图 5 北帮东侧边坡 GNSS 监测点矢量平面图

Fig. 5 Vector plot of GNSS monitoring points in eastern zone of northern slope

由图 5 可知,北帮中部相对位移量较大,变形体内位移以指向坑底为主;其中中部监测点 GNSS2-12、GNSS2-15(1040 水平)位移量较大,且主要指向东南方向;GNSS2-17 水平位移方向为西南方向,表明东帮北部边坡曾发生变形,对北帮东侧位移存在一定约束作用。

由图 6 可知,1040~1050 水平位移及沉降量均最大;结合现场 997 水平观察到底鼓及剪出迹象,明确该边坡存在上部沉降、下部沿弱层剪出的变形破坏特征。



(a) JC-1; (b) JC-2; (c) JC-3

图 6 剖面位移矢量图

Fig. 6 Displacement vector plot of section

综上,当前北帮东侧变形区属于蠕变变形阶段,变形速率平稳,主要沉降位置在 1040~1050 水平,并延伸至地表;平面位移指向东南方向,受东帮北侧侧边约束作用,当前尚未与东帮北侧形成大面积变形;整体呈现上部沉降、下部沿弱层剪出变形破坏规律,有蠕变失稳的概率,亟须对此区域进行蠕变演化规律研究。

2 软岩分级加载蠕变试验

2.1 试件制备

在现场监测的基础上,确定试验岩样取自北帮东侧(1040~1050 水平)区域,岩性为泥质页岩,通过切割、取芯,按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013)[20] 相关规定,制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱形试样,如图 7 所示。

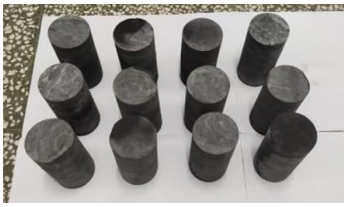


图 7 泥质页岩试样

Fig. 7 Argillaceous shale specimens

2.2 蠕变试验方案

采用岩石力学疲劳试验台进行岩石蠕变试验。岩石蠕变试验常用的加载方式包括分别加载法、分级加载法与分级加卸载法三类。与其余两种方式相比,分

级加载法可有效削弱岩石自身离散性对试验结果的干扰,结合本文试验需求,采用分级加载方式开展蠕变试验。在进行蠕变试验之前,对软岩进行了 4 组常规单轴压缩试验,得到其抗压强度平均值为 32.8 MPa。以抗压强度的 40%为第一级加载应力,后续每级应力增量为抗压强度的 10%。首先,以 0.2 MPa/s 的加载速率加载至第一级应力水平,保持应力不变持续 12 h,若试件变形速率稳定且未发生破坏,则施加下一级荷载,如此循环,直至试件破坏。蠕变试验加载方案如图 8 所示。

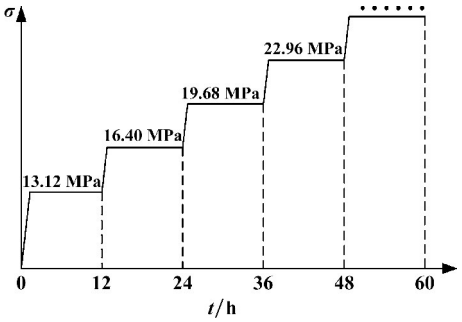


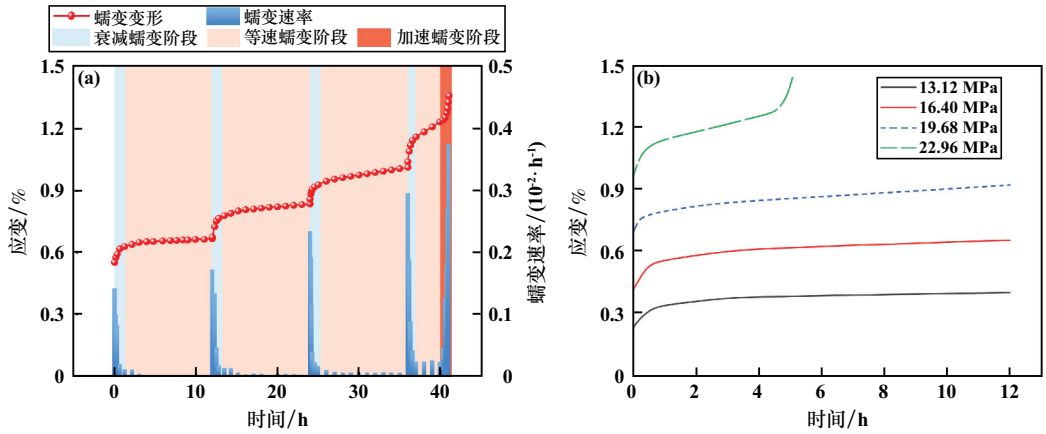
图 8　蠕变试验加载方案

Fig. 8　Loading scheme for creep tests

2.3　蠕变试验结果分析

选取 1 个典型试件的试验结果进行分析,不同轴向应力作用下软岩蠕变试验曲线如图 9 所示。由图 9 可知,在前三级应力水平条件下,软岩的蠕变过程相似,加载时先产生瞬时变形,随后进入衰减蠕变阶段,短时间后进入漫长的等速蠕变阶段。在第四级应力水平条件下,软岩在经历等速蠕变阶段后进入加速蠕变阶段,较短时间后发生破坏。随着轴向应力增大,软岩产生的变形量逐渐增大。由于加载瞬时产生的变形较大,初始蠕变速率较大;当进入衰减蠕变阶段后,蠕变速率逐渐降低;当进入等速蠕变阶段时,蠕变速率逐渐趋于稳定;进入加速蠕变阶段时,蠕变速率突增。因此,未发生加速蠕变阶段的蠕变速率曲线呈 L 形,发生加速蠕变阶段的蠕变速率曲线呈 U 形。

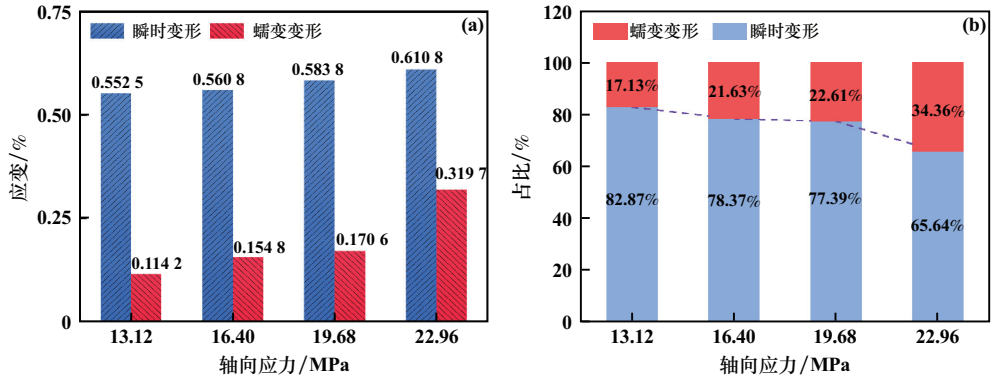
对变形数据进行处理,得到不同轴向应力作用下软岩的瞬时变形和蠕变变形及占比如图 10 所示。由图 10 可知,随着轴向应力增加,软岩产生的瞬时变形和蠕变变形均逐渐增大。通过比较可知,每级应力作



(a) 加载全程蠕变变形和蠕变速率曲线;(b) 不同加载应力水平下的蠕变变形曲线

图 9　不同轴向应力作用下软岩蠕变试验曲线

Fig. 9　Creep test curves of soft rock under different axial stresses



(a) 瞬时变形和蠕变变形量;(b) 瞬时变形和蠕变变形占比

图 10　不同轴向应力下软岩的瞬时变形和蠕变变形及占比

Fig. 10　Instantaneous deformation and creep deformation and their proportion in soft rock under different axial stresses

用产生的瞬时变形均高于蠕变变形,这主要是由于轴向应力加载瞬时,软岩内部原生孔隙和裂隙被压密闭合,产生的瞬时变形较大。而在软岩蠕变阶段,岩石产生的变形主要受内部微裂纹萌生、扩展的影响,随着轴向应力增大,岩石内部微裂纹越来越多;至加速蠕变阶段,内部微裂纹加速扩展,形成贯通,导致岩石发生蠕变破坏,因此,相比于前三级轴向应力,试样在第四级轴向应力条件下产生的蠕变变形更大。随着轴向应力增大,蠕变变形的占比逐渐增大,瞬时变形的占比逐渐减小,说明软岩的变形主导机制从“低应力条件下以瞬时孔隙压密为主”逐步转变为“高应力条件下以时间依赖性微裂纹演化为主”,且应力越大,软岩的流变性越显著,也越容易进入加速蠕变阶段。

为了更加深入了解边坡软岩变形与应力和时间的非线性关系,从蠕变本构模型出发,基于岩石力学和分数阶微积分理论,构建能够表征边坡软岩蠕变特性的非线性蠕变模型。

3 非线性蠕变模型的建立

蠕变试验结果表明,边坡软岩经历了瞬时变形、衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变过程,为表述其蠕变全过程,需串、并联组合不同蠕变特性的元件,具体如下。

3.1 弹性元件

当元件受力时,材料的变形特性符合线性胡克定律,可对瞬时变形过程进行描述,其本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

式中:σ 为应力;E 为瞬时弹性模量;ε 为应变。

3.2 分数阶元件(Abel 黏壶)

假设有一种元件代表处于理想固体和理想流体之间的某种物体,应力与应变关系符合分数阶微分形式,则称这种元件为分数阶元件(模型见图 11)[21]。分数阶元件的本构方程为:

$$\sigma(t) = \xi \frac{\mathrm{d}^{\alpha}\varepsilon(t)}{\mathrm{d}t^{\alpha}}, 0 \leqslant \alpha \leqslant 1 \tag{2}$$

式中:α 是分数阶元件的分数阶阶数;ξ 是分数阶元件的黏性系数。

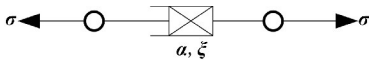


图 11 分数阶元件力学模型

Fig. 11 Mechanical model of fractional-order element

当 $\alpha=1$ 时,$\sigma(t)=\xi\cdot\dot{\varepsilon}(t)$,分数阶元件为黏性元件,代表理想流体;当 $\alpha=0$ 时,$\sigma(t)=\xi\cdot\varepsilon(t)$,分数阶元件为弹性元件,即代表理想固体。

当 $\sigma(t)$ 为定值时,即应力不变的情况下,分数阶元件描述流变特性的蠕变行为,对式(2)两侧进行分数阶积分,根据 Riemann-Liouville 型分数阶微积分算子理论,计算可得分数阶元件的蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\xi}\frac{t^{\alpha}}{\Gamma(1+\alpha)}, 0 < \alpha < 1 \tag{3}$$

式中 $\Gamma(x)$ 为 Gamma 函数。

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1}\mathrm{e}^{-t}\mathrm{d}t, \mathrm{Re}(z) > 0 \tag{4}$$

根据以上公式,得到不同 α 值的蠕变曲线,如图 12 所示,当接近某一时刻 t_0 时,曲线与衰减蠕变阶段变化趋势相近;随着时间慢慢增大,曲线与等速蠕变阶段变化趋势相近。由此可知,分数阶元件理论上可表征衰减蠕变和等速蠕变阶段。

3.3 NVPB 模型

NVPB 模型[22]可以充分反映岩石加速蠕变特性,其蠕变方程如式(5)所示。

$$\varepsilon = \frac{H(\sigma-\sigma_s)}{\eta}t^{m} \tag{5}$$

式中:m 为流变指数;σ_s 为长期强度;η 为黏塑性系数;H 为阶跃函数,如式(6)所示。

$$H(\sigma-\sigma_s) = \begin{cases} 0 & \sigma \leqslant \sigma_s \\ \sigma-\sigma_s, & \sigma > \sigma_s \end{cases} \tag{6}$$

NVPB 模型图见图 13,模型蠕变曲线见图 14。

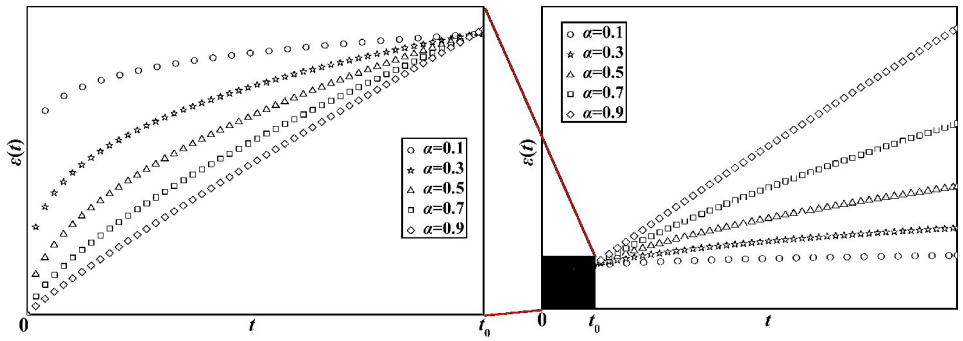


图 12 不同 α 值的蠕变曲线

Fig. 12 Creep curves for different α values

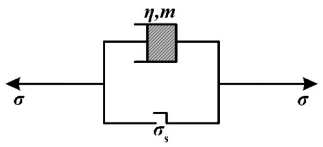


图 13　NVPB 模型

Fig. 13　NVPB model

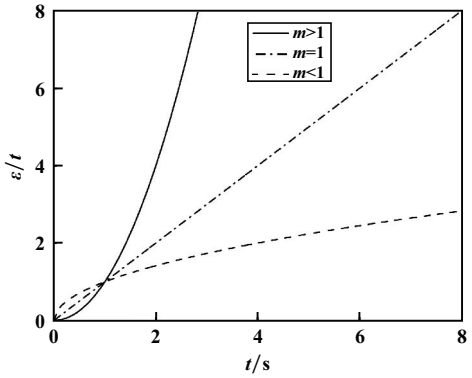


图 14　NVPB 模型蠕变曲线

Fig. 14　Creep curve of NVPB model

3.4　非线性蠕变模型

以上分析表明,弹性元件可对岩石瞬时变形进行描述,分数阶元件可对岩石衰减蠕变和等速蠕变进行描述,NVPB 模型可对岩石加速蠕变进行描述。因此,将上述元件进行串联组合,得到非线性蠕变模型,如图 15 所示。

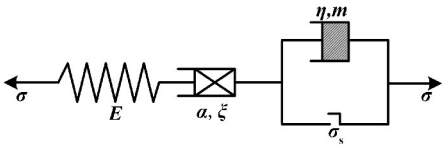


图 15　边坡软岩非线性蠕变模型

Fig. 15　Nonlinear creep model for slope soft rock

蠕变模型本构方程的推导,遵循元件串、并联原则和叠加原理。非线性蠕变模型满足以下条件。

1) 当 $\sigma<\sigma_s$ 时,岩石未进入加速蠕变阶段,模型相当于弹性元件与分数阶元件串联,此时蠕变模型的本构方程为:

$$\begin{cases}\sigma = E\varepsilon_e \\ \sigma = \xi \dfrac{\mathrm{d}^\alpha \varepsilon_{ve}}{\mathrm{d}t^\alpha} \\ \varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve}\end{cases} \tag{7}$$

式中:ε_e 为弹性应变;ε_{ve} 为黏弹性应变。

2) 当 $\sigma\geqslant\sigma_s$ 时,岩石进入加速蠕变阶段,模型相当于弹性元件、分数阶元件和 NVPB 体串联,此时蠕变模型的本构方程为:

$$\begin{cases}\sigma = E\varepsilon_e \\ \sigma = \xi \dfrac{\mathrm{d}^\alpha \varepsilon_{ve}}{\mathrm{d}t^\alpha} \\ \sigma_0 - \sigma_s = \dfrac{\eta \varepsilon_{vp}}{t^n} \\ \varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp}\end{cases} \tag{8}$$

式中 ε_{vp} 为黏塑性应变。

综上所述,得到非线性蠕变模型的蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases}\dfrac{\sigma}{E} + \dfrac{\sigma}{\xi}\dfrac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} & \sigma < \sigma_s \\ \dfrac{\sigma}{E} + \dfrac{\sigma}{\xi}\dfrac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} + \dfrac{\sigma-\sigma_s}{\eta}t^m & \sigma \geqslant \sigma_s\end{cases} \tag{9}$$

4　模型验证

模型的参数 E 通过试验中的瞬时变形数据确定;参数 α、ξ、η、m 通过自定义函数拟合,采用 Levenberg-Marquardt 法进行迭代计算得到;长期强度 σ_s 根据稳态蠕变速率法计算得到,为 19.30 MPa,如图 16 所示。

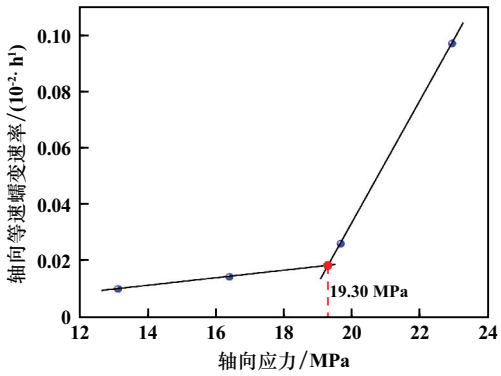


图 16　长期强度计算示意图

Fig. 16　Schematic for long-term strength calculation

为了说明本文建立模型的有效性,对软岩蠕变试验数据进行参数辨识,得到蠕变模型参数,如表 1 所示。

表 1　蠕变模型参数

Table 1　Creep model parameters

E/MPa	α	ξ/(MPa·h$^\alpha$)	η/(GPa·h)	m	σ_s/MPa
22.07	0.175	93.07	9.135	16.58	19.30

蠕变模型验证结果如图 17 所示。由图 17 可知,试验曲线和理论曲线的吻合程度较高,相关系数在 0.95以上。同时也可看出,本文建立的非线性蠕变模型不仅可以描述不同低应力水平条件下边坡软岩的瞬时变形、衰减蠕变和等速蠕变特性,而且能够描述高应

力状态下的加速蠕变特征,验证了模型的有效性。同时,在加速蠕变阶段,相对于经典 Burgers 模型,本文模型的拟合度更高。

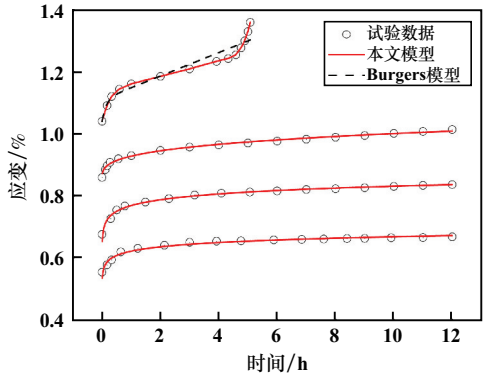


图 17 蠕变模型验证结果

Fig. 17 Verification results of creep model

为了进一步验证模型的适用性,选取 2023 年 9 月份的现场监测数据对模型进行检验,结果如图 18 所示。

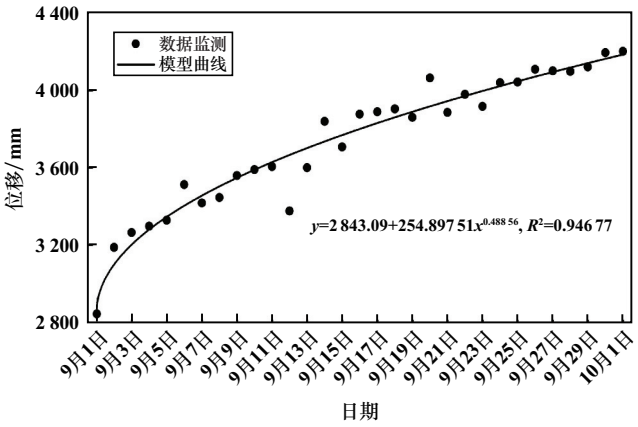


图 18 现场监测数据验证结果

Fig. 18 Verification results of field monitoring data

由图 18 可知,模型曲线呈现衰减蠕变-等速蠕变的典型特征:9 月 1—5 日期间,位移增长速率逐渐放缓;9 月 5 日之后,位移呈近似线性增长,进入等速蠕变阶段。从拟合效果来看,模型预测曲线与现场监测数据的吻合度较高,验证了非线性蠕变模型对露天矿边坡软岩实际蠕变过程的描述能力。图 19 为蠕变模型的实际应用流程图,后续可通过本构模型二次开发,

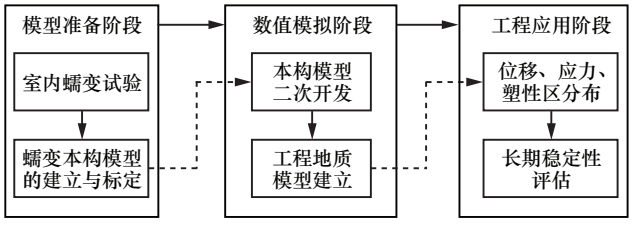


图 19 蠕变模型的实际应用流程图

Fig. 19 Flowchart for practical application of creep model

可有效应用于露天矿边坡软岩的实际蠕变变形预测,为边坡蠕变失稳预警、支护时机选择等工程治理措施提供借鉴。

5 结论

1) 边坡雷达与 GNSS 实时监测系统监测结果表明,北帮东侧变形区蠕变变形较大,有蠕变失稳的概率,亟须对此区域进行蠕变演化规律研究。

2) 蠕变试验结果表明,低应力水平条件下,边坡软岩表现出稳态蠕变特性;高应力水平条件下,边坡软岩表现出完整的蠕变阶段,即瞬时变形、衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变阶段。

3) 随着轴向应力增加,软岩产生的瞬时变形和蠕变变形均逐渐增大。发生加速蠕变阶段的蠕变速率曲线呈 U 形,未发生加速蠕变阶段的蠕变速率曲线呈 L 形。

4) 将弹性元件、分数阶元件和 NVPB 进行组合,建立了边坡软岩非线性蠕变模型,推导了模型的蠕变方程。结合试验数据和现场数据验证,该模型能够较好地描述边坡软岩蠕变全过程,相比 Burgers 模型,本文建立模型的拟合度更高,具有一定的适用性。

参考文献(References):

[1] 周晴晴,穆琳,王雷. 基于 FMM-SVR 模型的深凹露天矿边坡稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):41-46.
Zhou Qingqing, Mu Lin, Wang Lei. Stability analysis of concave open-pit slope based on FMM-SVR model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):41-46.

[2] 李浩荡,佘长超,周永利,等. 我国露天煤矿开采技术综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019,47(10):24-35.
Li Haodang, She Changchao, Zhou Yongli, et al. Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2019,47(10):24-35.

[3] 李金典,韩晓极,韩猛,等. 蒙东地区露天矿风成砂边坡滑坡模式及变形机理研究[J]. 露天采矿技术, 2023,38(2):38-41.
Li Jindian, Han Xiaoji, Han Meng, et al. Study on landslide mode and deformation mechanism of aeolian sand slope landslide in open-pit coal mine of eastern Inner Mongolia[J]. Opencast Mining Technology, 2023,38(2):38-41.

[4] 刘小平. 蒙东地区露天矿边坡稳定性影响因子与敏感度分析[J]. 煤田地质与勘探, 2014,42(3):74-77.
Liu Xiaoping. Analysis on influencing factors and their sensitivity for slope stability in opencast coal mine of eastern Inner Mongolia[J]. Coal Geology & Exploration, 2014,42(3):74-77.

[5] 何云勇,李蜀南,向波,等. 结构面特征对顺层边坡开挖卸荷影响分析[J]. 公路, 2022,67(6):1-7.
He Yunyong, Li Shunan, Xiang Bo, et al. Analysis on the influence of structural surface characteristics on excavation unloading of layered

slope [J]. Highway, 2022,67(6):1-7.

[6] 赵玉国,吉莉,董霁红,等. 蒙东典型大型露天矿生态储存指标体系及过程分析:以宝矿、敏矿、胜利矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2022,50(5):271-280.
Zhao Yuguo, Ji Li, Dong Jihong, et al. Analysis of index system and state of ecological storage of typical large open-pit mines in eastern Inner Mongolia: taking Baorixile, Yinmin and Shengli No.1 open-pit coal mine as examples[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5):271-280.

[7] 杨启帆,胡斌,王泽祺,等. 周期扰动作用下软弱夹层剪切蠕变特性研究[J]. 金属矿山, 2024(11):62-69.
Yang Qifan, Hu Bin, Wang Zeqi, et al. Study on shear creep characteristics of soft interlayer under periodic disturbance[J]. Metal Mine, 2024(11):62-69.

[8] 郭超,徐晨,杜思宏. 抚顺西露天矿泥岩蠕变特性试验及介观模型研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024,43(2):156-162.
Guo Chao, Xu Chen, Du Sihong. Study on the creep properties test and mesoscale model of mudstone from Fushun west open-pit mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024,43(2):156-162.

[9] Zhong Z X, Sheng J L, Hu B, et al. Investigation of shear creep experiments and modelling of mud-shale under dry-wet cycles of rainfall[J]. Physica Scripta, 2024,99(2):025010.

[10] Liu Y D, Zhang H J, Qin Z, et al. Energy evolution and deformation features of re-loading creep failure in yellow sandstone after cyclic water intrusion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025,186:106019.

[11] Zhang F, Yang T H, Li S H. Investigation on stability of large bedding slope affected by weak interlayer creep deformation[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2023,27(2):227-250.

[12] 王振伟,成智强,夏宇飞. 基于 FLAC^{3D}不同含水工况下软岩边坡蠕变变形分析[J]. 北方工业大学学报, 2024,36(5):49-56.
Wang Zhenwei, Cheng Zhiqiang, Xia Yufei. Analysis of creep deformation of soft rock slope under different moisture content conditions based on FLAC^{3D}[J]. Journal of North China University of Technology, 2024,36(5):49-56.

[13] 韦成耀,庄文宇,王涛,等. 锦屏一级水电站近坝边坡深部裂缝成因及对边坡长期变形的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024,64(11):1944-1954.
Wei Chengyao, Zhuang Wenyu, Wang Tao, et al. Formation mechanism of deep fractures in near-dam slope of Jinping I Hydropower Station and their influence on long-term slope deformation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(11):1944-1954.

[14] 杨志斌. 基于蠕变试验下高边坡稳定性模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2023,43(5):988-999.
Yang Zhibin. Simulation study on stability of high slopes based on creep test[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023,43(5):988-999.

[15] 李胜前,李启航. 非线性分级荷载下饱和千枚岩的蠕变损伤本构模型研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):39-46.
Li Shengqian, Li Qihang. Investigation on damage constitutive model of phyllite under nonlinear step loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):39-46.

[16] 王泽祺,胡斌,李京,等. 动力扰动效应影响下软岩蠕变损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(增刊 1):3229-3242.
Wang Zeqi, Hu Bin, Li Jing, et al. Study on creep damage model of soft rock under the influence of dynamic disturbance effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(S1): 3229-3242.

[17] 曹建军,胡斌,王泽祺,等. 基于分数阶积分的软弱夹层蠕变损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2024,45(2):454-464.
Cao Jianjun, Hu Bin, Wang Zeqi, et al. Creep damage model of weak interlayer based on fractional order integral[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(2):454-464.

[18] Yu M Y, Liu B G, Sun J L, et al. Study on improved nonlinear viscoelastic-plastic creep model based on the Nishihara model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020,38(3):3203-3214.

[19] Wang P, Ren P, Zhang H. A nonlinear creep model for clay based on fractional-order elastic and viscous effect elements[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022,15(7):562.

[20] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S].
GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S].

[21] 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.

[22] 徐卫亚,杨圣奇,谢守益,等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(Ⅱ):模型分析[J]. 岩土力学, 2005,26(5):693-698.
Xu Weiya, Yang Shengqi, Xie Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (Ⅱ): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(5):693-698.

引用本文:韦忠跟. 露天边坡软岩蠕变特性及非线性蠕变模型研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):46-53.

Wei Zhonggen. Creep characteristics and nonlinear creep model of soft rock in open-pit slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4): 46-53.