

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004007

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

李安润, 邓 辉, 王红娟, 郑 瀚, 苟晓峰, 潘远阳

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 软岩遇水具有显著的劣化效应, 以往研究主要集中于软岩的流变特性, 对水-岩作用下软岩的含水损伤研究较少, 但水-岩作用下软岩的含水损伤效应对工程建设的指导至关重要。因此, 以滇中地区粉砂质泥岩为研究对象, 对干燥状态、天然含水率和饱水条件下的粉砂质泥岩试样进行三轴压缩蠕变试验。试验结果表明: (1) 不同含水率试样在初始加载阶段产生的应变均远大于后期逐级加载阶段的应变增加量, 且随着含水率的增加初始加载蠕变量逐渐增大; (2) 随着含水率的提升, 最终蠕变量逐渐增加, 试样进入加速蠕变阶段的应力阈值逐渐降低, 长期强度也显著降低。根据试验结果, 基于损伤理论, 引入一个非线性黏塑性体考虑含水情况对蠕变的影响, 提出基于经典 Burgers 模型并具有水-岩作用劣化特征的含水损伤蠕变本构模型。通过 1stopt 软件辨识参数, 并验证了模型的准确性和可适性。研究结果对于滇中红层软岩的含水损伤特性研究提供了一定的参考。

关键词: 粉砂质砂岩; 含水率; 三轴蠕变试验; 本构模型; 含水损伤效应

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0106-08

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, ZHENG Han, GOU Xiaofeng, PAN Yuanyang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Soft rocks have significant degradation effects when they encounter water. Previous studies focused mainly on the rheological properties of soft rocks. Water damage of soft rocks under water-rock reactions was seldom examined. The effects of water damage on soft rocks under water-rock reactions are important in the guidance of project constructions. Therefore, this article takes the silty mudstone in the central Yunnan area as the research object, and the triaxial compression creep test on the silty mudstone samples is performed under dry conditions, natural water content and saturated water conditions. The test results show that (1) the strain of the samples with different water content during the initial loading stage is much larger than the strain increase in the later stage of the stage loading, and the initial loading creep variable gradually increases with the increasing water content. (2) As the water content increases, the final creep variable gradually increases, and the stress threshold of the sample entering the accelerated creep stage gradually decreases, but the long-term strength is significantly reduced. Based on the test results and the damage theory, a nonlinear viscoplastic body is introduced to consider the effect of water content on creep, and a water damage constitutive model based on the classic Burgers model with water-rock degradation characteristics is proposed. The parameters are identified by the 1stopt software, and

收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272332)

第一作者: 李安润(1995-), 男, 博士, 主要从事于岩石力学与本构模型研究。E-mail: 497994633@qq.com

通讯作者: 邓辉(1969-), 男, 教授, 博士, 主要从事于岩石力学与遥感地质灾害研究。E-mail: 330744407@qq.com

the accuracy and adaptability of the model are also verified. The research results can provide a certain reference for the research on the water damage characteristics of the red rock in central Yunnan.

Keywords: silty sandstone; moisture content; triaxial creep test; constitutive model; the effects of water damage

滇中地区红层软岩主要形成于晚三叠世-古新世,以河流相和湖泊相沉积模式为主。其中湖泊相沉积主要以泥岩和粉砂质泥岩等岩性为主,受水-岩作用影响,滇中红层地区的岩体稳定性问题十分显著。现场调查发现,软岩具有明显的膨胀、崩解特性,甚至表现出显著的时效变形特性。

现有关于软岩的研究主要集中于岩体结构特征分析和本构模型的推导。邓华锋、周翠英等^[1-3]进行实验研究,分析了红层软岩的宏、细、微观机制及能量耗散机制。另有诸多学者对软岩的蠕变效应展开了研究,首先对软岩进行蠕变试验,通过分析蠕变试验曲线特征,建立相应的本构模型。对此伯格和开尔文等在早前已经给出了经典模型。对于非线性变形阶段的研究却没有较为统一的模型可以适用。近年来随着损伤力学理论的引入,诸多学者开始通过损伤力学的角度建立岩石非线性蠕变本构模型。曹文贵等^[4-5]在 Lemaitre 创立的应变等效假说的基础上,研究了不同围压下岩石软化过程的损伤统计本构模型。吕爱钟等^[6]在 H-K 体的基础上,通过分析开尔文模型中弹簧元件的弹性模量,随时间的变化规律,提出黏弹性非定常的蠕变本构模型。王来贵等^[7]通过将非线性蠕变局部线性化,得到修正西原模型。陈卫忠等^[8]通过研究盐岩累积蠕变变形与蠕变速率的关系,引入累积蠕变变形作为损伤因子描述盐岩的非线性蠕变过程。范庆忠等^[9-10]通过同时考虑蠕变硬化和蠕变损伤,建立了非线性蠕变损伤本构模型。杨春和等^[11]通过损伤演化方程,建立了反映盐岩蠕变全过程的蠕变损伤本构模型。蒋昱州等^[12]以应力水平与时间为变量,建立了损伤演化方程。赵建军等^[13]对冻融循环作用下岩石蠕变损伤本构模型进行了探究。吴礼舟等^[14]通过结构面特性研究了结构面发育类型和密度等对泥岩蠕变效应的影响。

现有试验和理论研究已经对软岩流变特性及本构模型开展了较多研究,但是对于软岩在水-岩作用下的含水损伤本构模型研究较少。基于此,本文通过不同含水率粉砂质泥岩的三轴蠕变试验,深入分析粉砂质泥岩的蠕变特性及水-岩作用对粉砂质泥岩的损伤

机制,基于经典的 Burgers 模型引入非线性黏塑性体建立了含水损伤蠕变模型,并结合试验数据,通过 Istopt 软件辨识含水损伤蠕变模型参数。验证了提出模型的准确性和适用性,借此揭示含水损伤对粉砂质泥岩蠕变的影响规律。研究结果表明,水-岩作用改变了粉砂质泥岩蠕变过程的力学行为。

1 粉砂质泥岩蠕变试验

软岩的蠕变通常分为 3 个阶段:减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变。减速蠕变阶段为应变率逐渐减小的弹性变形阶段;等速蠕变阶段的应变率恒定,发生线性弹塑变形;加速蠕变阶段产生塑性变形,应变率迅速增加。已有研究表明^[15-17],水-岩作用对试样各个蠕变阶段的力学行为均有不同程度的影响,通过改变岩石内部的空隙结构对岩石造成损伤,从而影响蠕变特性,各蠕变阶段受水-岩作用的损伤效应均表现出不同力学特征。试验认为水-岩作用对于软岩的劣化影响主要是通过改变岩石空隙率达成,与岩石的矿物组成、矿物结合的紧密程度及岩石自身结构密切相关。为进一步说明水-岩作用对粉砂质泥岩的损伤效应,本文开展了不同含水率粉砂质泥岩三轴压缩蠕变试验。

1.1 矿物组成及微观结构

通过 X 射线衍射试验得到天然状态下的粉砂质泥岩全岩矿物含量,见表 1。

表 1 粉砂质泥岩全岩矿物含量

Table 1 Full rock mineral contents of the silty mudstone						
矿物	黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	赤铁矿
含量/%	36.6	16.9	4.1	18.3	19.7	4.4

对天然状态下的粉砂质泥岩进行显微镜观测,发现主要颗粒物为长英质等,含量大于 50%,填隙物多为泥质、铁质和钙质混杂等,见图 1。

1.2 蠕变试验过程

1.2.1 试样制备

由于岩石的不均匀性会导致试验结果出现较大差异,所以本次试验选用的粉砂质泥岩试样均取自同

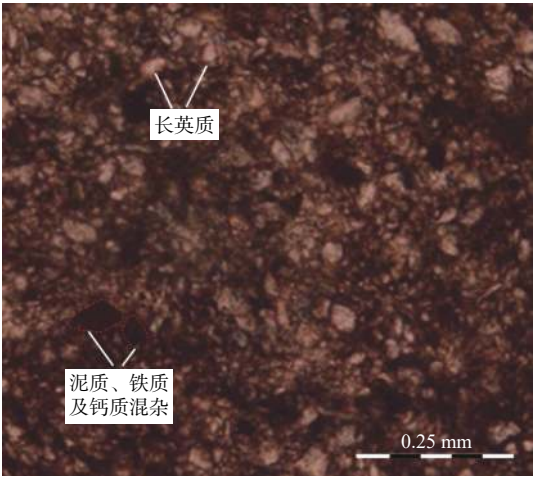


图 1 粉砂质泥岩微观结构

Fig. 1 Microstructure of the silty mudstone

一地层。风化状态为微风化,并严格按照规范要求处理岩样,处理后的岩样表面均无明显节理,为高 100 mm、直径 50 mm 的标准岩样。将加工好的所有岩样进行声波测试,共筛选出 9 个岩样,分为 3 组,每组 3 个。

1.2.2 岩样处理

本文采用烘干法测定岩样含水率,试样干燥含水率本文认为 0。

(1)天然含水率的测定

室温下称取天然状态的带烘干盒的 3 块岩样质量。将装有岩石的烘干盒放入 105 °的烘箱,24 h 后取出,称量岩样及烘干盒的总质量。

(2)饱和含水率的测定

将天然状态的 3 块岩样烘干处理,采用真空抽气法让岩样饱水。由于岩样在饱水时容易发生膨胀崩解破坏,故先用纱布将岩样包裹,用橡皮筋绑扎,再进行真空饱水处理,降低岩样剧烈浸水对岩样结构产生的影响(图 2)。饱和含水率测定结果见表 2。



图 2 试样饱水处理

Fig. 2 Sample saturated with water

表 2 饱和含水率试验结果

Table 2 Saturated water content test result

含水状态	岩样编号	烘干前 质量/g	烘干后 质量/g	含水率/ (%)	平均含水率/ %
天然含水率	A1	52.2	51.2	1.92	1.67
	A2	54.2	53.4	1.48	
	A3	49.9	49.1	1.60	
饱和含水率	B1	48.7	47.3	2.95	3.02
	B2	53.1	51.6	2.90	
	B3	54.3	52.6	3.23	

1.3 加载条件

不同含水率状态下粉砂质泥岩抗剪强度,由直剪试验得到,见表 3。

表 3 不同含水率抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of different water content

含水状态	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	黏聚力 C/MPa
干燥状态(0%)	43.52	4.64
天然状态(1.67%)	39.37	4.18
饱水状态(3.02%)	36.48	3.70

根据岩样所处深度及地应力状态,设定围压 3 MPa,试验仪器选用成都理工大学多功能电液伺服控制刚性试验机,蠕变加载方法采用陈氏分级加载法,法向施加荷载根据单轴抗压强度确定。为方便试验过程中准确加压,对每级施加荷载均取整数,加载方案见表 4。加载过程中,利用计算机自动数据采集系统连续采集应力、应变和时间数据,当蠕变速率增量低于 $5 \times 10^{-4} \text{ mm/d}$ 时,施加下一级荷载,直至试样破坏。

表 4 不同含水率加载方案

Table 4 Loading schemes with different moisture content

含水状态	分级荷载/MPa						
干燥状态(0%)	7	14	21	28	35	42	—
天然状态(1.67%)	4	8	12	16	20	24	28
饱水状态(3.02%)	2	4	6	8	10	—	—

1.4 试验结果分析

通过不同含水率粉砂质泥岩的蠕变试验数据分析,建立了轴向应变、加速蠕变阶段蠕变速率及长期强度与时间的关系曲线,反映了水-岩作用下岩石蠕变的宏观损伤特征。

通过不同含水率粉砂质泥岩蠕变全过程应力—应变—时间关系曲线可知,初始荷载施加后均产生了较大应变量,干燥、天然和饱和试样蠕变量分别为 0.21, 0.28, 0.39 mm。每级荷载施加完成后,试样均产生短暂变形,并在较短时间内达到稳定,主要表现为

减速蠕变及等速蠕变的特征,说明含水率越高,初始加载时产生的蠕变量越大。干燥试样在第6级荷载加载过程中破坏,最终蠕变量为0.92 mm;天然试样在第7级加载过程中破坏,最终蠕变量为1.28 mm;饱和试样在第5级加载过程中破坏,最终蠕变量为1.63 mm(图3)。干燥、天然和饱和试样在进入加速蠕变阶段的应力值分别为42, 28, 10 MPa。随着含水率升高,相同荷载下蠕变量相应增加,试样的屈服应力阈值显著降低,且最终蠕变量逐渐增加,水-岩作用显著降低了粉砂质泥岩的强度,改变了其力学性能,对粉砂质泥岩具有明显的劣化效应。

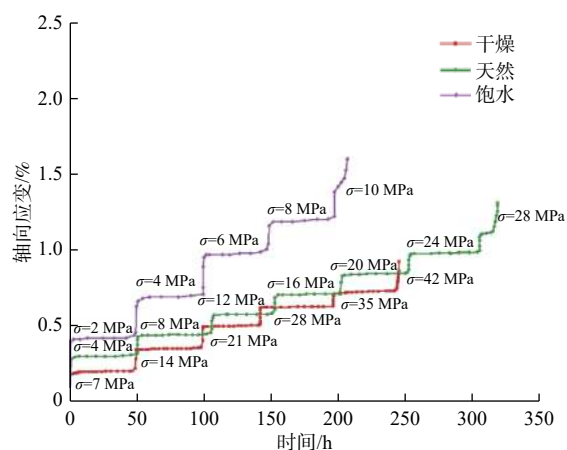


图3 粉砂质泥岩蠕变全过程曲线
Fig. 3 Creep process of the silty mudstone

由加速蠕变阶段蠕变速率-时间关系曲线可知(图4),不同含水率试样在最后一级加载破坏时,蠕变速率均会急剧增加,陡然升高,表现出极大的蠕变速率,其蠕变速率曲线接近于平行Y轴,此时试样所受荷载已超出其峰值强度产生破坏。

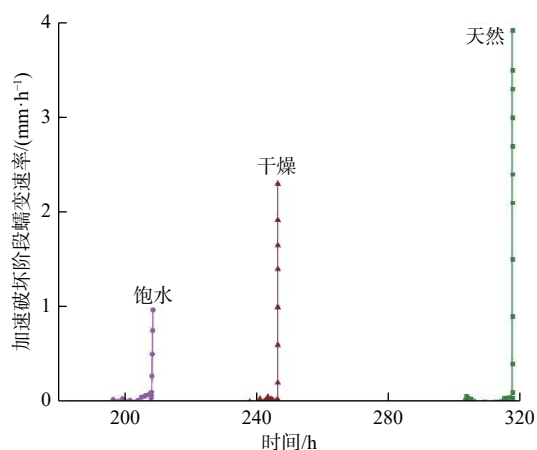


图4 加速蠕变阶段蠕变速率曲线
Fig. 4 Creep rate during the accelerated creep

通过等时应力-应变曲线可知(图5),干燥、天然和饱和试样曲线均表现为开始近似线性上升,之后趋向于偏向X轴弯曲,转折点即为粉砂质泥岩的长期强度,干燥、天然和饱和试样长期强度分别约为12.3, 10.2, 6.5 MPa。随含水率的增加,长期强度逐渐降低,说明水-岩作用对试样的长期强度有明显影响。

通过试验结果可知,水-岩作用对试样整个蠕变过

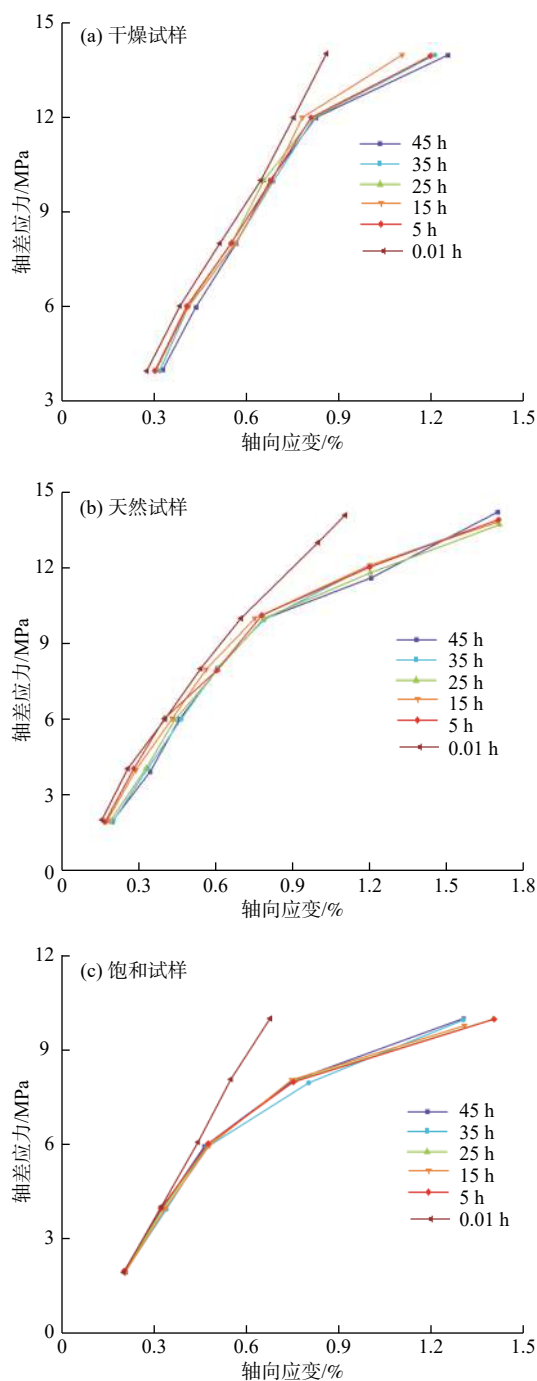


图5 粉砂质泥岩蠕变过程等时应力-应变曲线
Fig. 5 Isochronous stress-strain curve of the silty mudstone

程的各个阶段均产生了明显影响。随着含水率的升高,最终蠕变量增加,进入加速破坏阶段的应力阈值和试样的长期强度显著降低。水-岩作用对各蠕变阶段均产生了不同程度的劣化效应,对试样各蠕变阶段均有损伤。因此,为了更加深入研究水-岩作用对粉砂质泥岩的损伤效应,从试样自身的蠕变本构模型出发,通过构建含水损伤蠕变模型,进一步深入研究水-岩作用下粉砂质泥岩的定量蠕变特性。

2 岩体损伤本构模型

2.1 含水损伤及长期受荷载损伤变量

由图 3 可知,试样在承受荷载初期产生了瞬时弹性应变;等速蠕变阶段,试样的应变随着荷载的增加而逐渐增大;当超过试样的屈服应力极限后,产生非线性加速蠕变。为较好地描述不同蠕变阶段的蠕变特性,对 3 个不同蠕变阶段分别选用 Hooke 体、Newton 体和引入的非线性黏塑性体表征整个蠕变过程。非线性黏塑性体见图 6 模型中的 B 部分,其蠕变量为:

$$\varepsilon_A = \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n \quad (1)$$

式中: ε_A ——黏塑性体对应的应变;

σ_s ——岩石长期强度;

σ ——法向应力;

t ——加载时间;

n ——蠕变指数;

η_3 ——黏塑性体中的黏滞系数。

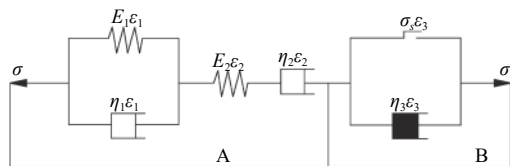


图 6 粉砂质泥岩蠕变力学模型

Fig. 6 Creep mechanical model of the silty mudstone

根据蠕变全过程曲线加速蠕变阶段的变化特征,在考虑含水率的情况下,选择负指数形式的损伤变量描述加速蠕变阶段的含水损伤,并根据应力等效理论,建立长期荷载作用下岩石受荷损伤与含水损伤耦合:

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n \cdot (1 - e^{(\alpha w t)}) \quad (2)$$

式中: ε_B ——黏塑性体受荷损伤对应的应变;

α ——材料系数;

w ——含水率。

2.2 考虑含水损伤的 Burgers 模型

经典的 Burgers 模型由麦克斯维尔体和 Kelvin 体串联组成,麦克斯维尔体又由 Hooke 体和 Newton 体串联而成, Kelvin 体由 Hooke 体和 Newton 体并联而成, Hooke 体的本构关系满足 Hooke 定律:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Newton 体满足黏性定律:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

式中: η ——黏性系数。

因此线弹性结构组成可表示为(H|N)-H-N。新引入的非线性黏塑性体可视为圣维南体,圣维南体可看作一种开关装置,当岩样蠕变所受应力小于屈服强度时,只有 A 部分起作用,当岩样蠕变所受应力大于屈服强度时, A 和 B 部分共同生效。

由于串联原件之间应力相等,且总应变总是等于各原件应变之和;并联原件之间应变相等,且总应力等于各元件应力之和;同时考虑将长期受荷损伤和含水损伤变量引入,描述加速蠕变阶段的非线性黏塑性体中,基于此建立蠕变损伤本构方程:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (6)$$

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 + \eta_1 \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \sigma_s + \eta_3 \frac{d\varepsilon_3}{dt} (\sigma \geq \sigma_s) \quad (9)$$

式中: σ_1 、 ε_1 ——kelvin 体对应的应力、应变;

σ_2 、 ε_2 ——麦克斯维尔体对应的应力、应变;

σ_3 、 ε_3 ——黏塑性体对应的应力、应变;

E_1 ——kelvin 体中弹簧体的弹性模量;

η_1 ——kelvin 体中 Newton 体的黏滞系数;

E_2 ——麦克斯维尔体中弹簧体的弹性模量。

通过联立式(5)~(9)求解以上关于应变-时间的一阶线性微分方程,可解得基于损伤理论和经典 Burgers 模型建立的考虑含水损伤蠕变模型:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{\eta_2} t, & \sigma < \sigma_s \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n \cdot \left[1 - e^{(\alpha w t)} \right], & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (10)$$

式中: ε ——变形总量;

η_2 ——麦克斯韦尔体中的黏滞系数。

3 参数辨识及模型验证

3.1 参数辨识

对不同含水率粉砂质泥岩的蠕变试验数据,借助 Istopt 优化软件采用麦夸特算法求解弹性模量、黏滞系数、材料系数等参数,结果见表 5。

3.2 模型验证

根据模型辨识参数结果,建立全过程蠕变理论曲

线,与试验曲线对比,结果见图 7。通过对比分析,发现理论曲线与试验曲线具有相同变化特征:(1)理论曲线也可分为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变 3 个阶段;(2)初始加载后产生了较大的瞬时弹性应变;(3)随着含水率的提升,初始加载的蠕变量增大,最终蠕变量也增大,进入加速蠕变阶段的屈服应力阈值显著降低,表明水-岩作用对试样在长期受荷下的力学性能具有显著的劣化效应。

表 5 含水损伤蠕变模型参数
Table 5 Parameters used in the water damage creep model

含水状态	加载应力/MPa	E_1/GPa	E_2/GPa	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_3/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	α	R^2
干燥状态	7	1.68	0.95	82.58	138.21		0.13	0.951
	14	1.65	0.93	73.22	120.07		0.15	0.984
	21	1.60	0.89	71.85	88.15		0.15	0.932
	28	1.58	0.84	68.43	62.49		0.17	0.911
	35	1.56	0.82	52.71	49.75		0.12	0.956
	42	1.53	0.77	33.58	30.16	2.95	0.16	0.973
天然状态	4	1.4	0.82	71.0	112.4	—	0.12	0.965
	8	1.36	0.83	63.5	103.6	—	0.11	0.976
	12	1.27	0.75	63.3	79.3	—	0.13	0.987
	16	1.25	0.68	56.7	50.7	—	0.16	0.988
	20	1.18	0.64	46.2	46.1	—	0.17	0.981
	24	1.10	0.60	33.5	32.3	—	0.17	0.963
	28	1.13	0.51	27.8	20.5	2.78	0.18	0.950
饱水状态	2	1.21	0.72	63.44	88.2		0.14	0.955
	4	1.18	0.71	60.13	85.3		0.15	0.981
	6	1.15	0.68	45.12	62.6		0.12	0.962
	8	1.10	0.62	33.98	33.4		0.14	0.938
	10	1.08	0.59	25.79	19.1	2.63	0.16	0.986

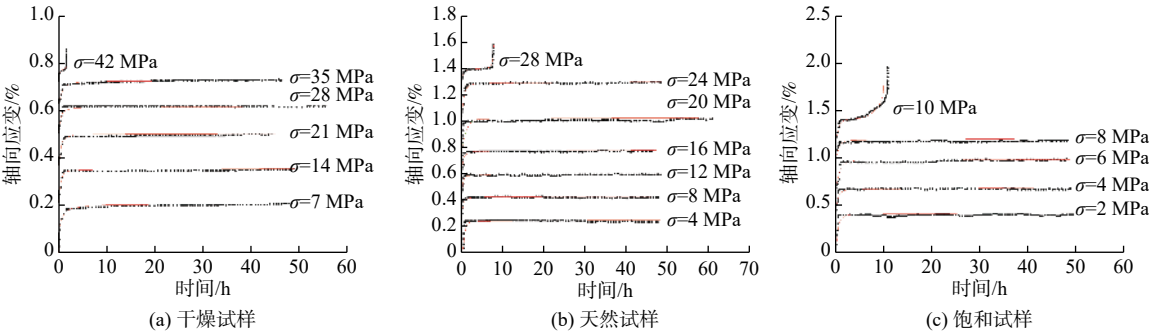


图 7 拟合曲线与试验数据对比
Fig. 7 Comparison of the fitted curve and the experimental data

通过理论曲线与试验曲线对比可知(图 7),基于 Burgers 模型改进的含水损伤蠕变模型所得蠕变曲线数据与试验数据具有较高拟合度。表明含水损伤模型不仅能较好地描述减速蠕变和等速蠕变阶段力学行为,也能较好地描述加速蠕变阶段的非线性黏塑性

特性。通过对比传统的 Burgers 模型发现,改进的含水损伤蠕变模型弥补了传统的 Burgers 模型不能较好地描述加速蠕变阶段非线性黏塑性变形特征的缺点。

由此认为,在不同含水率及不同荷载条件下,含水损伤蠕变模型均能较好地吻合试验所得数据,证明

了含水损伤蠕变模型的正确性和可适性。

4 结论

(1)不同含水率粉砂质泥岩三轴蠕变试验结果表明,水-岩作用对粉砂质泥岩各蠕变阶段均有明显的劣化效应。初始加载后会产生瞬时弹性应变,含水率越高的试样瞬时弹性应变变量越大,大于后续等速蠕变阶段每级加载产生的蠕变量。

(2)随着含水率的升高,由等速蠕变阶段进入加速蠕变阶段的应力降低,水-岩作用降低了屈服应力阈值。含水率的增加降低了试样的长期强度,干燥试样长期强度为 12.3 MPa,饱和试样长期强度为 6.5 MPa。含水率的提升使最终蠕变量升高,天然试样最终蠕变量为 0.92 mm,饱和试样的最终蠕变量为 1.63 mm。

(3)通过含水损伤蠕变模型理论曲线数据与三轴蠕变试验数据对比分析,认为含水损伤蠕变模型能够很好地描述各阶段的蠕变特征,尤其是加速蠕变阶段,考虑含水损伤的蠕变模型相比于传统的 Burgers 模型,可以很好地拟合加速蠕变阶段的非线性黏塑性变形特征,说明基于 Burgers 模型改进的含水损伤蠕变模型对于粉砂质泥岩的蠕变力学行为描述具有良好的可适性。

参考文献 (References):

- [1] 周翠英,梁宁,刘镇.红层软岩遇水作用的孔隙结构多重分形特征[J].工程地质学报,2020,28(1):1-9. [ZHOU Cuiying, LIANG Ning, LIU Zhen. Multifractal characteristics of pore structure of red beds soft rock at different saturations[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邓华锋,张恒宾,李建林,等.水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J].岩土力学,2018,39(7):2344-2352. [DENG Huafeng, ZHANG Henbin, LI Jianlin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2344-2352. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周翠英,李伟科,向中明,等.水-应力作用下软岩细观结构摩擦接触分析[J].岩土力学,2015,36(9):2458-2466. [ZHOU Cuiying, LI Weike, XIANG Zhongming, et al. Analysis of mesoscopic frictional contacts in soft rocks under water-stress interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2458-2466. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 曹文贵,李翔.岩石损伤软化统计本构模型及参数确定方法的新探讨[J].岩土力学,2008,29(11):2952-2956. [CAO Wengui, LI Xing. A new discussion on damage softening statistical constitutive model for rocks and method for determining its parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2952-2956. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曹文贵,戴笠,张超.深部岩石统计损伤本构模型研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):60-65. [CAO Wengui, DAI Li, ZHANG Chao. A study of statistical damage constitutive models for deep earth rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 60-65. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕爱钟,丁志坤,焦春茂,等.岩石非定常蠕变模型辨识[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):16-21. [LU Aizhong, DING Zhikun, JIAO Chunmao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 16-21. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王来贵,赵娜,何峰,等.岩石蠕变损伤模型及其稳定性分析[J].煤炭学报,2009,34(1):64-68. [WANG Laigui, ZHAO Na, HE Feng, et al. Rock creep damage model and its stability analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 64-68. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈卫忠,王者超,伍国军,等.盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):467-472. [CHEN Weizhong, WANG Zhechao, WU Guojun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 467-472. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 范庆忠,李术才,高延法.软岩三轴蠕变特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1381-1385. [FAN Qingzhong, LI Shucai, GAO Yanfa. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1381-1385.

- (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨春和, 马洪岭, 刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3562 – 3568. [YANG Chunhe, MA Hongling, LIU Jianfeng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3562 – 3568. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蒋昱州, 王瑞红, 朱杰兵, 等. 砂岩的蠕变与弹性后效特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10): 2010 – 2017. [JIANG Yizhou, WANG Ruihong, ZHU Jiebing, et al. Experimental study of creep and elastic aftereffect of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(10): 2010 – 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵建军, 解明礼, 余建乐, 等. 冻融作用下含裂隙岩石力学特性及损伤演化规律试验研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1199 – 1207. [ZHAO Jianjun, XIE Mingli, YU Jianle, et al. Experimental study on mechanical properties and damage evolution of fractured rock under freezing-thawing action[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1199 – 1207. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴礼舟, 李部, 孙萍. 甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(6): 923 – 934. [WU Lizhou, LI Bu, SUN Ping. Study on shear creep behavior of mudstone and its correction model of Gangu fissure in Gansu[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(6): 923 – 934. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 汪辉平, 曹文贵, 王江营, 等. 模拟岩石应变软化变形全过程的统计损伤本构模型研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(4): 44 – 49. [WANG Huiping, CAO Wengui, WANG Jianying, et al. A study of the statistical damage constitutive model of rocks considering a full deformation process[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(4): 44 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 周峙, 张家铭, 刘宇航, 等. 巴东组紫红色泥质粉砂岩损伤特性三轴试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2): 56 – 60. [ZHOU Zhi, ZHANG Jiaming, LIU Yuhang, et al. A triaxial testing study of the damage characteristics of purple argillaceous siltstone of the Badong formation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 56 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 朱俊杰. 滇中红层软岩水-岩作用机理及时效性变形特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [ZHU Junjie. Study on water-rock interaction mechanism and time-dependent deformation characteristics of red beds soft rock in central Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳