

干湿循环对炭质泥岩蠕变及损伤特性的影响

王玮玮^{1†}, 刘新喜¹, 李盛南², 李玉¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南工程学院 建筑工程学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要:为揭示炭质泥岩库岸边坡的时效变形和损伤特性,对经历不同干湿循环次数的炭质泥岩试样进行低场核磁共振和三轴压缩流变试验,研究炭质泥岩孔隙演化特征和蠕变特性;在此基础上,基于损伤理论和Lemaitre应变等效原理,建立考虑干湿循环、轴压和时间因素耦合影响的蠕变损伤方程.结果表明:随干湿循环次数增加,炭质泥岩孔隙率增加,孔隙结构由小孔隙向大孔隙演变,瞬时应变和蠕变量增大.建立的损伤方程能较好地表征干湿循环次数、轴压和时间对炭质泥岩损伤演化的影响;随干湿循环次数增加,炭质泥岩损伤增大,损伤时间效应增强;轴压增大,损伤增长的速率加快,加速损伤的持续时间增长.

关键词:岩土工程;炭质泥岩;蠕变试验;干湿循环;损伤

中图分类号:TU452

文献标志码:A

Study on Effect of Wetting and Drying Cycles on Creep and Damage Characteristics of Carbonaceous Mudstone

WANG Weiwei^{1†}, LIU Xinxi¹, LI Shengnan², LI Yu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Architectural Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: To reveal the time-dependent deformation and damage characteristics of the carbonaceous mudstone reservoir bank slope, using a low-field nuclear magnetic resonance test and triaxial compression rheological test, the pore evolution law and creep characteristics of carbonaceous mudstone under wetting and drying cycles are studied. On this basis, based on the damage theory and the Lemaitre strain equivalence principle, a creep damage equation considering the coupling effects of wetting and drying cycles, axial pressure, and time is established. The results show that as the number of wetting and drying cycles increases, the porosity of the carbonaceous mudstone increases, the pore structure changes from small pores to large pores, and the instantaneous strain and creep strain of the carbonaceous mudstone increase. The established damage equation can better characterize the influence of the number of wetting and drying cycles, axial pressure, and time on the damage evolution of carbonaceous mudstone. With the increase in the number of wetting and drying cycles, the damage of carbonaceous mudstone is greater, and the damage time effect is more significant. As the axial pressure increases, the rate of damage growth is fastened, and the duration of the accelerated damage is prolonged.

Key words: geotechnical engineering; carbonaceous mudstone; creep testing; dry and wet cycles; damage

* 收稿日期:2021-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674041, 52108405), National Natural Science Foundation of China(51674041, 52108405); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40122), Hunan Provincial Natural Science Foundation Project(2022JJ40122); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200839), Research and Innovation Program for Postgraduates in Hunan Province(CX20200839)

作者简介:王玮玮(1986—),男,湖南益阳人,长沙理工大学讲师,博士研究生

† 通信联系人, E-mail: 12013032@hnust.edu.cn

受水库周期性排水、蓄水影响,炭质泥岩库岸边坡反复经历干湿循环,使得水库水位显著影响岩体风化、崩解^[1-2].随着干湿循环次数增加,岩体损伤演化由表及里,边坡长期稳定性随之下降,进而引发边坡浅层失稳、滑坡和崩塌等地质灾害^[3-7].为此,研究干湿循环作用下炭质泥岩的蠕变及损伤特性,对深入认识炭质泥岩库岸边坡灾害发生机制具有重要意义.

在水、温度和应力作用下,软岩物理力学性质随时间变化,表现出岩体损伤劣化^[8-10].目前,已有较多学者开展了相关研究.李克钢等^[11]对干湿循环作用下砂岩的强度、变形及破坏特征进行分析,认为干湿循环作用对砂岩力学性质具有显著影响.邓华锋等^[12]研究了饱水-风干循环作用下砂岩抗压强度、黏聚力和摩擦角的劣化规律,发现饱水-风干作用能促进岩石损伤累积.王伟等^[13]研究了干湿循环作用下大理石的强度及变形特性,指出干湿循环对岩体具有一定的软化作用.陈乐求等^[14]对干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土的动力稳定性进行研究,发现随着干湿循环作用次数增加,板岩粗粒土的最大动弹性模量和动强度均减小.杜彬等^[15]探讨了干湿循环对红砂岩动态拉伸强度的影响,认为干湿循环对岩石抗拉强度劣化作用明显.刘新荣等^[16]指出干湿循环作用下岩石微细观结构调整是岩石物理力学性质劣化的主要原因.李江腾等^[17]研究了不同含水状态下横观各向同性板岩的蠕变特性.上述研究主要揭示了干湿循环作用对岩石力学性能劣化损伤的现象,而对干湿循环次数与岩石损伤的定量关系研究不足.

对此,一些学者对干湿循环作用下岩石的损伤演化方程进行了研究.徐志华等^[18]通过研究干湿循环与红砂岩黏聚力的函数关系,以黏聚力为损伤变量,建立了干湿循环作用下红砂岩的损伤方程,量化了岩石受干湿循环作用的损伤.宋朝阳等^[19]利用声发射装置对不同干湿循环次数的弱胶结砂岩破坏过程进行监测,定量分析了干湿循环对岩石力学性能的影响.谢学斌等^[20]通过对不同干湿循环次数的砂岩进行单轴压缩试验,利用弹性模量定义损伤变量,建立了干湿循环作用下砂岩单轴压缩的损伤方程.安阳等^[21]基于概率统计理论建立了干湿循环作用下石膏岩的损伤方程,较好地揭示了岩石力学参数受干湿循环作用的劣化规律.袁璞等^[22]利用纵波波速定义干湿循环的初始损伤,并基于概率统计损伤理论建立了干湿循环与动载耦合作用的损伤方程,分

析了干湿循环和动荷载作用下岩石的损伤演化规律.宋勇军等^[23]基于核磁共振技术监测干湿循环作用下砂岩的孔隙变化规律,以孔隙率为损伤变量,建立了干湿循环作用下砂岩的损伤方程,分析了岩石损伤程度与干湿循环次数的关系.以往研究大多考虑干湿循环对常规力学性能的影响,而对干湿循环作用下软岩时效变形特性研究较少.尽管马芹永等^[24]和霍树义等^[25]研究了干湿循环作用下砂岩的蠕变特性,但缺乏对软岩蠕变损伤演化规律的研究,建立的蠕变损伤方程较少考虑干湿循环、应力和时间因素作用的影响.

为此,本文对不同干湿循环次数的炭质泥岩进行蠕变试验,探讨干湿循环对炭质泥岩蠕变特性的影响,并基于损伤理论和Lemaitre应变等效原理,建立炭质泥岩宏、细观复合蠕变损伤方程,研究干湿循环次数、轴压和时间对炭质泥岩蠕变损伤演化的影响,以期揭示炭质泥岩库岸边坡的蠕变损伤演化机制.

1 试样及试验方案

1.1 试样特征

炭质泥岩呈深灰色,中风化状,颗粒均匀,微裂隙发育.根据岩石试验规程将岩块加工成直径50 mm、高100 mm的圆柱体标准试件,经室内试验得到炭质泥岩试样的物理力学参数和矿物组分分别见表1和表2.

表1 炭质泥岩物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of carbonaceous mudstone

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	纵波波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
2.36~2.43	1.24	35.65	5.32	3 084~3 256

表2 炭质泥岩矿物组分(质量分数)

Tab.2 Mineral component of carbonaceous mudstone(mass fraction)

伊利石	高岭石	石英	长石	黄铁矿	方解石	白云石
18.8%	21.4%	41.5%	5.8%	2.1%	7.6%	2.8%

1.2 试验方案

1.2.1 干湿循环试验

将试样分为4组,分别进行0(未进行干湿循环)、3、6和9次干湿循环.将试样置于50℃恒温鼓

风箱中风干 24 h,取出试样放在保湿箱内冷却至室温,然后放入盛水容器中自然吸水 24 h,每次干湿循环总耗时 48 h,以此模拟库岸边坡自然风干和饱水过程.

1.2.2 核磁共振试验

将完成干湿循环的试样进行抽真空饱和 12 h,取出后用干毛巾擦拭表面水分,并用保鲜膜将试样包裹严密放进试样筒中,送入 MacroMR12-150H-I 核磁共振成像分析仪中进行测试,分析炭质泥岩的孔隙结构特征.

1.2.3 三轴流变试验

采用三轴流变试验仪 RLW-2000 对试样进行三轴压缩流变试验,设定围压为 2 MPa,采用分级增量加载方式.为模拟库岸边坡真实的蠕变状态,只研究炭质泥岩稳定蠕变阶段,设计蠕变试验第一级加载为单轴抗压强度的 40%,即为 14.26 MPa,分级加载增量为 3 MPa,即设计轴压分别为 14.26 MPa、17.26 MPa、20.26 MPa 和 23.26 MPa,每级加载应力持续 48 h,分级增量加载,如图 1 所示.

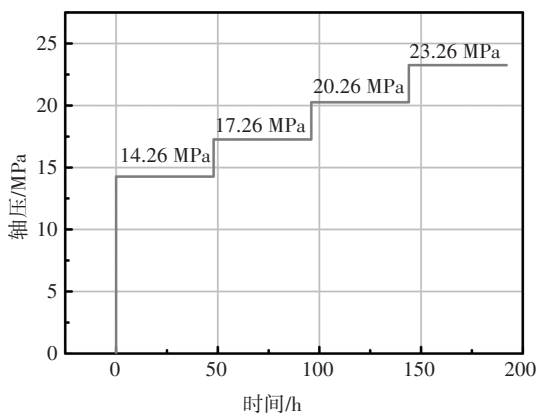


图 1 分级增量加载图

Fig.1 Hierarchical incremental loading graph

2 试验结果

2.1 核磁共振试验结果

不同干湿循环次数的炭质泥岩弛豫时间 T_2 谱见图 2. 图 2 中 T_2 谱存在 3 个峰,根据李杰林等^[26]研究的成果,第一峰、第二峰和第三峰的弛豫时间范围分别对应小孔、中孔和大孔区间,其中炭质泥岩第一峰面积占绝大部分,可见炭质泥岩试样内部孔隙以小孔隙为主.随着干湿循环次数增加,3 个峰的面积均增大.干湿循环 6 次后,第二峰面积增大明显;干湿循环 9 次后,第三峰面积迅速增大.这表明随干湿循环次数增加,炭质泥岩内部孔隙数量增加,且大孔隙

数量逐渐增多.干湿循环 6 次后,第二峰和第三峰面积增大速率大于第一峰,且 T_2 谱峰向右移,说明干湿循环加剧了炭质泥岩微结构损伤,这可能是干湿循环作用下炭质泥岩矿物溶蚀和膨胀挤压,导致小孔隙逐渐扩展、连通向大孔隙演变的结果.

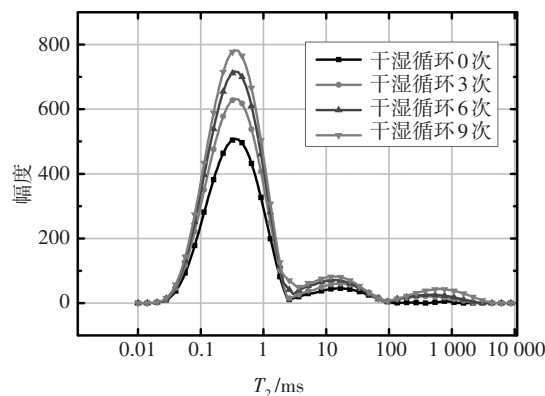


图 2 炭质泥岩的 T_2 谱

Fig. 2 T_2 spectrum of carbonaceous mudstones

通过对饱水样品测得的核磁信号,利用标准样品进行刻度,将信号强度转换为孔隙度见图 3. 由图 3 可知:随干湿循环次数增加,炭质泥岩孔隙率增大,但增加的速率逐渐减小.这是因为岩石经历多次干湿循环后孔隙表面可溶蚀物质被水溶蚀,使得水与可溶性物质接触几率减小,岩石受水-热-力作用减弱,矿物溶蚀和裂隙扩展的速率降低.通过最小二乘法拟合得到炭质泥岩的孔隙率与干湿循环次数的关系为:

$$\phi = A - B \exp(-C \cdot n) \tag{1}$$

式中: n 为干湿循环次数; ϕ 为岩石孔隙率(%); A 、 B 、 C 为材料参数,分别为 15.45%、7.99% 和 0.046. 当 $n = 0$ 时, $\phi_0 = A - B = 7.56%$; 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\phi = A = 15.54%$. 可见随干湿循环次数增加,炭质泥岩孔隙率逐渐增大,但增加速率减小,并逐渐趋于稳定.

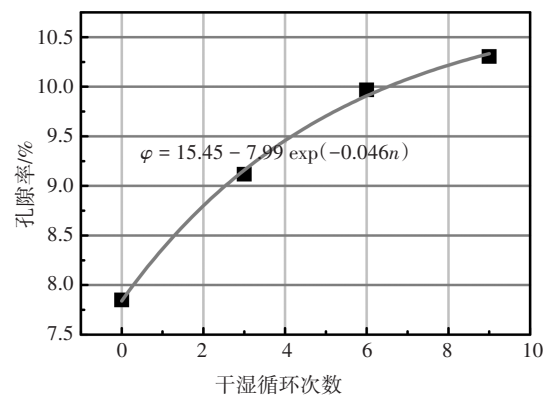
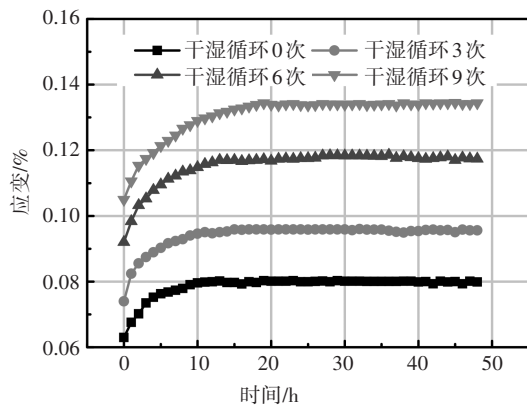


图 3 炭质泥岩的孔隙率变化曲线

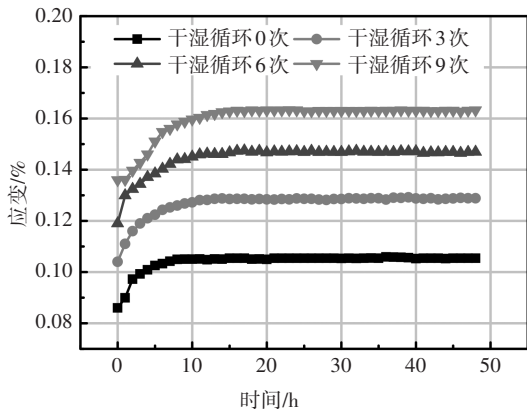
Fig.3 Porosity change curve of carbonaceous mudstone

2.2 蠕变试验结果

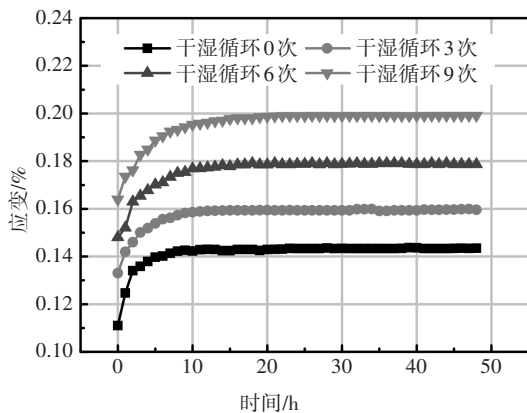
采用“陈氏法”^[27]对分级加载下的蠕变曲线进行非线性处理,得到经历不同干湿循环次数的炭质泥岩蠕变曲线见图4.从图4中可知:经历不同干湿循环次数的炭质泥岩蠕变曲线均在加载时发生瞬时应变,然后应变增加的速率逐渐减小,最终保持稳定.炭质泥岩瞬时应变和蠕变量均随干湿循环次数增加而增大,以轴压20.26 MPa为例,相比干湿循环0次,炭质泥岩干湿循环3、6、9次的瞬时应变分别增加 2.7×10^{-4} 、 5.6×10^{-4} 和 9.0×10^{-4} ,增加幅度为29.35%、60.87%和97.83%;蠕变量分别增加 2.0×10^{-5} 、 5.0×10^{-5} 和



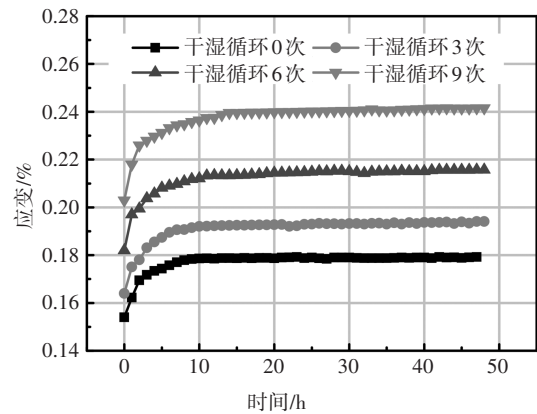
(a)轴压14.26 MPa



(b)轴压17.26 MPa



(c)轴压20.26 MPa



(d)轴压23.26 MPa

图4 炭质泥岩的三轴压缩蠕变曲线

Fig.4 Triaxial compression creep curve of carbonaceous mudstone

1.3×10^{-4} ,增加幅度为7.69%、19.23%和50.00%.可能的原因是干湿循环过程中水岩相互作用导致岩石细观结构劣化,随干湿循环次数增加,岩石内部结构损伤加剧,受荷后部分孔隙被压密,表现出瞬时应变增大;此外,细观结构受损后,岩石颗粒间的约束能力减弱,导致颗粒定向流动的蠕变增加.

3 蠕变损伤方程

根据岩石损伤产生原因的不同,可将岩石蠕变损伤分为初始损伤和时效损伤两个部分.初始损伤为岩石内部原生孔隙和因干湿循环作用而产生的次生孔隙所造成的结构损伤;时效损伤是由荷载作用下岩石颗粒体随时间定向流动引起的力学性能劣化.初始损伤和时效损伤耦合作用反映出干湿循环作用下炭质泥岩的损伤演化规律.

3.1 初始损伤方程

从细观角度以岩石受力面积定义岩石损伤则有:

$$D_0 = \frac{S'}{S} = \frac{\phi S}{S} = \phi \tag{2}$$

式中: D_0 为初始损伤; S 为总截面面积; S' 为孔隙面积; ϕ 为岩石孔隙率.将式(1)代入式(2)即可得到岩石的初始损伤方程.

3.2 时效损伤方程

假定岩石瞬时加载时为无损状态,随时间增长岩石损伤不断累积,从宏观力学角度定义岩石损伤为:

$$D_t = 1 - \frac{E_t}{E_0} \tag{3}$$

式中: E_t 为时效变形模量; E_0 为瞬时变形模量; D_t 为时效损伤.

不同干湿循环次数下的炭质泥岩瞬时变形模量可表示为:

$$E_{(0,i)}^n = \frac{\Delta\sigma_i^n}{\Delta\varepsilon_{(0,i)}^n} = \frac{\sigma_i^n - \sigma_{i-1}^n}{\Delta\varepsilon_{(0,i)}^n} \quad (4)$$

式中: $E_{(0,i)}^n$ 、 $\Delta\sigma_i^n$ 、 $\Delta\varepsilon_{(0,i)}^n$ 分别为炭质泥岩在第 i 级轴压 下干湿循环 n 次的瞬时变形模量、瞬时应力增量、瞬 时应变增量. 根据 Blatmann 叠加原理, 经式(4)计算 得到炭质泥岩的瞬时变形模量见图 5. 从图 5 中可 知: 相同轴压作用下, 炭质泥岩瞬时变形模量均随干 湿循环次数的增加呈对数减小; 相同干湿循环次数 下的炭质泥岩瞬时变形模量随轴压增大而增大.

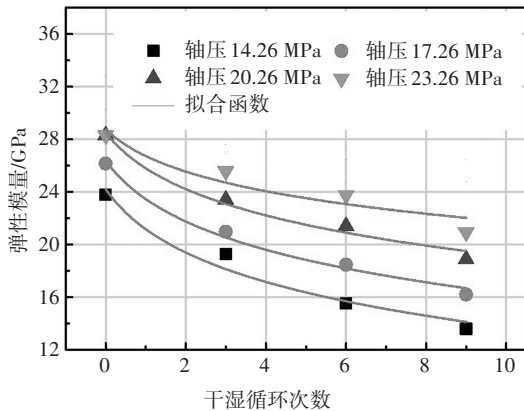


图 5 炭质泥岩的瞬时变形模量
Fig.5 Instantaneous deformation modulus of carbonaceous mudstone

通过最小二乘法对不同干湿循环次数的炭质泥 岩瞬时变形模量进行拟合, 其拟合方程见式(5), 拟 合参数见表 3.

$$E_{(0,i)}^n = a(\sigma) + b(\sigma) \cdot \ln(n + 1) \quad (5)$$

表 3 瞬时变形模量拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of instantaneous elastic modulus

轴压/MPa	$a(\sigma)$	$b(\sigma)$
14.26	24.19	-4.38
17.26	26.37	-4.21
20.26	28.50	-3.91
23.26	28.75	-2.92

建立参数 $a(\sigma)$ 、 $b(\sigma)$ 与轴压的函数关系为:

$$a(\sigma) = 32.147 - 33.349\exp(-0.102\sigma) \quad (6)$$

$$b(\sigma) = 2.426 - 10.012\exp(-0.025\sigma) \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5)中, 即可得到干湿循

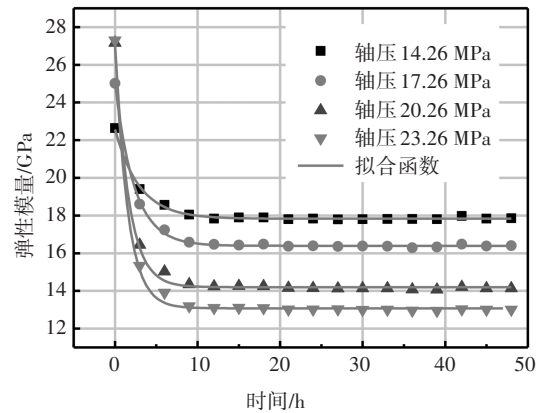
环作用下炭质泥岩的瞬时弹性模量的方程见式(8).

$$E_{(0,i)}^n = 32.147 - 33.349e^{-0.102\sigma} - (2.426 - 10.012e^{-0.025\sigma})\ln(n + 1) \quad (8)$$

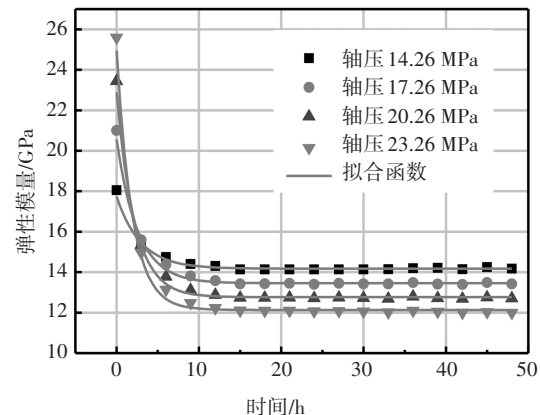
干湿循环作用下炭质泥岩前四级加载的变形模 量见图 6. 由图 6 可见: 变形模量随时间先快速减小, 15 h 后基本都保持稳定, 稳定时的弹性模量随轴压 和干湿循环次数增加而减小.

通过拟合得到干湿循环作用下炭质泥岩时效弹 性模量关系式为:

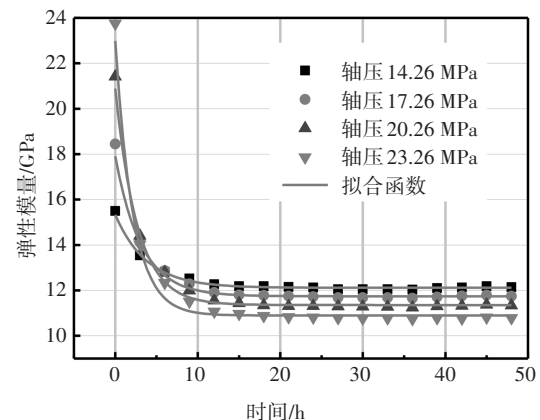
$$E_{(n,i)}^n = a_n(\sigma) + b_n(\sigma) \cdot \exp[-t/m_n(\sigma)] \quad (9)$$



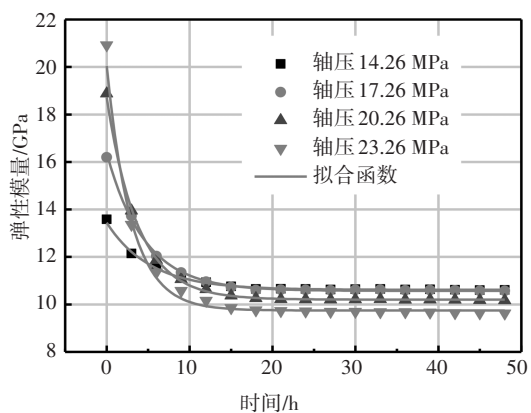
(a) 干湿循环 0 次



(b) 干湿循环 3 次



(c) 干湿循环 6 次



(d) 干湿循环9次

图6 炭质泥岩的变形模量

Fig. 6 Deformation modulus of carbonaceous mudstone

参数 $a_n(\sigma)$ 、 $b_n(\sigma)$ 和 $m_n(\sigma)$ 是与干湿循环次数和轴压有关的函数. 通过参数拟合得到:

$$a_n(\sigma) = [-0.356\exp(-0.234n) - 0.059]\sigma + 13.889\exp(-0.174n) + 9.314 \quad (10)$$

$$m_n(\sigma) = \frac{0.100n^2 - 2.142n + 23.171}{\sigma} + (0.006n^2 - 0.056n + 0.125)\sigma - 0.279n^2 + 2.422n - 5.307 \quad (11)$$

对式(9)进行分析, 当 $t = 0$ 时:

$$E_{(0,i)}^n = a_n(\sigma) + b_n(\sigma) \quad (12)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时:

$$E_{(t,i)}^n = E_{(\infty,i)}^n = a_n(\sigma) \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(9)得:

$$E_{(t,i)}^n = E_{(\infty,i)}^n + [E_{(0,i)}^n - E_{(\infty,i)}^n] \cdot \exp\left[-\frac{t}{m_n(\sigma)}\right] \quad (14)$$

将式(5)和式(14)代入式(3)即可得到干湿循环作用下炭质泥岩的蠕变时效损伤方程:

$$D_t = \frac{E_{(0,i)}^n - E_{(\infty,i)}^n}{E_{(0,i)}^n} [1 - e^{-\frac{t}{m_n(\sigma)}}] \quad (15)$$

3.3 蠕变损伤方程

根据损伤理论有:

$$\sigma = E_0(1 - D_0)\varepsilon \quad (16)$$

将初始损伤作为第一类损伤状态, 时效损伤作为第二类损伤状态, 根据损伤定义及 Lemaitre 应变等效方程得:

$$\sigma = E_t(1 - D_t)(1 - D_0)\varepsilon \quad (17)$$

由式(16)和式(17)可得:

$$D_1 = D_0 + D_t - D_0D_t \quad (18)$$

由式(2)、式(15)和式(18)可得干湿循环作用下

炭质泥岩宏、细观耦合损伤方程为:

$$D_1 = 1 - \left\{ 1 - \frac{E_{(0,i)}^n - E_{(\infty,i)}^n}{E_{(0,i)}^n} [1 - e^{-\frac{t}{m_n(\sigma)}}] \right\} \cdot (0.8555 + 0.0799e^{-0.046n}) \quad (19)$$

从式(19)中可知: 炭质泥岩蠕变损伤是与干湿循环次数、轴压和时间有关的函数. 当 $t = 0$ 时, 岩石尚未受荷, 岩石的损伤 $\phi = 0.1545 - 0.0799 \times e^{-0.046n}$, 即岩石的损伤为初始损伤; 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 则

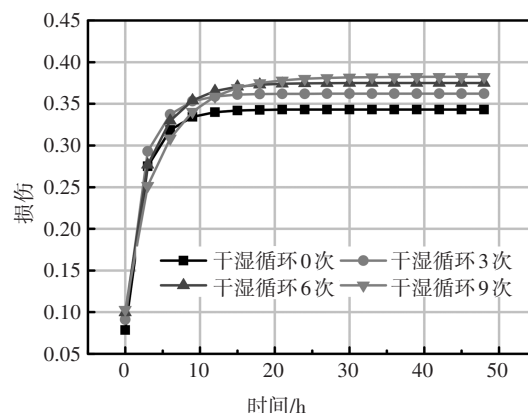
$$D_1 = 1 - \left\{ 1 - \frac{E_{(0,i)}^n - E_{(\infty,i)}^n}{E_{(0,i)}^n} \right\} \cdot (0.8555 + 0.0799e^{-0.046n}) \quad (20)$$

即岩石损伤为初始损伤与时效损伤的耦合效应, 反映了干湿循环次数、时间和应力耦合作用对岩石损伤的影响.

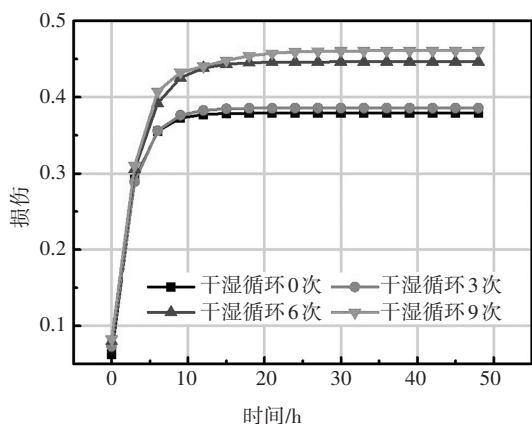
4 蠕变损伤演化分析

4.1 干湿循环对蠕变损伤的影响

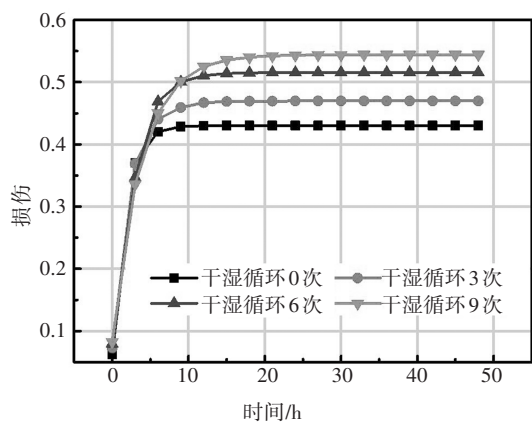
不同干湿循环次数下的炭质泥岩蠕变损伤曲线见图7. 从图7中可知: 炭质泥岩的蠕变损伤随时间增加呈非线性增大, 但增加的速率逐渐减小, 最终蠕变损伤趋于稳定. 将岩石损伤稳定前经历的时间定义为损伤劣化时间, 则随干湿循环次数增加, 炭质泥岩蠕变损伤增大, 损伤劣化时间增长. 例如在轴压 20.26 MPa 作用下, 干湿循环 3、6 和 9 次的蠕变损伤分别比 0 次干湿循环时增加 6.51%、21.02% 和 24.07%, 平均每次干湿循环炭质泥岩蠕变损伤增加 2.78%; 损伤劣化时间分别增长 3.667 h、5.333 h 和 9.667 h. 这可能是因干湿循环使岩石细观结构劣化, 颗粒间的粘结力减弱, 微元体的强度降低, 相同轴压下岩石破坏的数量增大, 表现出岩石损伤增大, 蠕变损伤劣化时间增长.



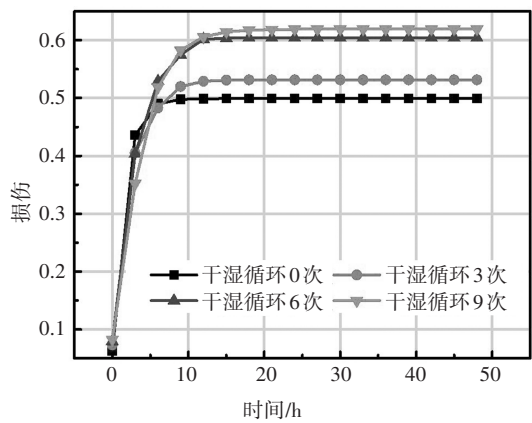
(a) 轴压 14.26 MPa



(b)轴压 17.26 MPa



(c)轴压 20.26 MPa



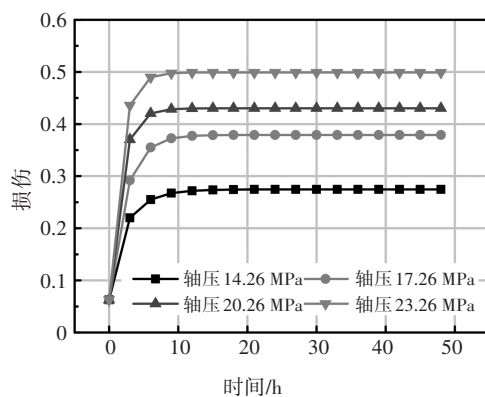
(d)轴压 23.26 MPa

图 7 不同干湿循环次数下的炭质泥岩蠕变损伤演化曲线

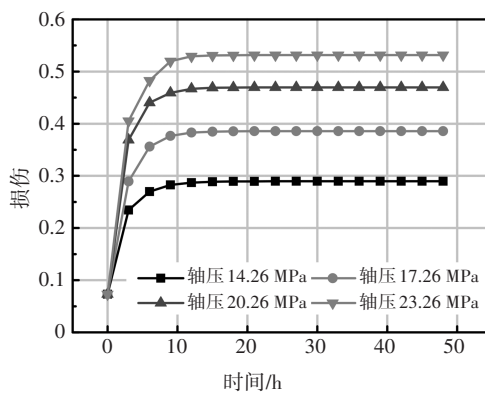
Fig.7 Evolution curve of creep damage of carbonaceous mudstone under wetting and drying cycles

4.2 轴压对蠕变损伤的影响

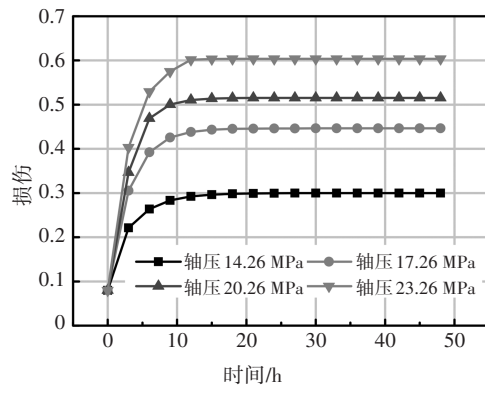
不同轴压下的炭质泥岩蠕变损伤曲线见图 8。从图 8 中可知:随轴压增大,炭质泥岩损伤增大,损伤增长的速率也增大。以干湿循环 6 次为例,轴压 14.26 MPa、17.26 MPa、20.26 MPa 和 23.26 MPa 作用下蠕变 15 h 的损伤分别为 0.30、0.40、0.49 和 0.57,损伤平均增长速率分别为 $2.02 \times 10^{-2}/h$ 、 $2.69 \times 10^{-2}/h$ 、



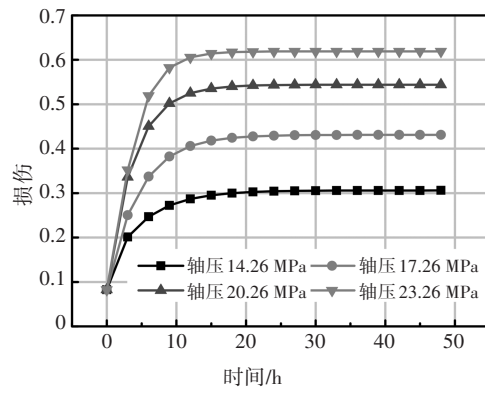
(a)干湿循环 0 次



(b)干湿循环 3 次



(c)干湿循环 6 次



(d)干湿循环 9 次

图 8 不同轴压下的炭质泥岩蠕变损伤演化曲线

Fig.8 Evolution curve of creep damage of carbonaceous mudstone under different axial pressures

$3.28 \times 10^{-2}/h$ 和 $3.81 \times 10^{-2}/h$ 。相比轴压 14.26 MPa, 轴压 17.26 MPa、20.26 MPa 和 23.26 MPa 的损伤分别增大 33.27%、62.38% 和 88.27%, 损伤平均增长速率分别增大 33.17%、62.38% 和 88.61%。这是因为随轴压增大, 岩石内部微元体被破坏的数量增多, 导致岩石损伤增大; 同时, 轴压增大, 颗粒体克服颗粒间约束的能力增强, 定向流动速率加快, 使得损伤增长速率增大。

5 讨论

利用本文蠕变损伤方程计算得到轴压 20.26 MPa 下的炭质泥岩蠕变损伤与文献[24]的计算结果对比见图 9。结果发现: 利用文献[24]的方法计算炭质泥岩蠕变损伤明显小于本文计算的结果。这是因为文献[24]计算岩石损伤时, 假定岩石干湿循环 0 次时为无损状态, 忽略了岩石内部客观存在的细观孔隙; 此外文献[24]计算损伤时仅考虑干湿循环对瞬时弹性模量的弱化效应, 并未考虑岩石细观结构随时间的劣化效应, 所以导致计算的蠕变损伤较小。由此可见, 本文建立的蠕变损伤方程将更为准确地计算炭质泥岩的损伤。

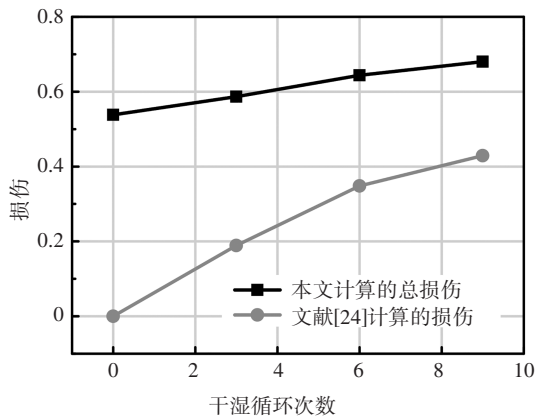


图9 轴压 20.26 MPa 下的炭质泥岩蠕变损伤

Fig.9 Creep damage of carbonaceous mudstone under axial pressure of 20.26 MPa

6 结论

1) 受干湿循环作用影响, 炭质泥岩细观孔隙数量增多、小孔隙逐渐向大孔隙演变, 其瞬时应变和蠕变量增加。可见, 干湿循环作用下炭质泥岩细观结构损伤是导致其蠕变加剧的重要原因。

2) 以细观孔隙率和宏观变形模量为损伤变量, 建立了炭质泥岩的宏、细观复合蠕变损伤方程, 该损伤方程能较好地揭示炭质泥岩损伤随干湿循环次

数、轴压和时间的变化规律, 为定量表征炭质泥岩库岸边坡蠕变损伤奠定了基础。

3) 炭质泥岩损伤具有明显的时效特性, 随干湿循环次数和轴压增加, 炭质泥岩损伤增大, 损伤的时间效应增强。为此, 对炭质泥岩库岸边坡稳定性的评价应考虑时效损伤的影响。

4) 本文提出的蠕变损伤方程是基于炭质泥岩蠕变试验结果建立的, 能否推广应用于其他软岩的蠕变损伤演化描述, 还需进一步验证, 后续将进行深入研究。

参考文献

- [1] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4173-4179.
WU D X, LIU H J, WANG G Q. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4173-4179. (In Chinese)
- [2] 郭永春, 谢强, 文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 69-73.
GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 69-73. (In Chinese)
- [3] 刘新喜, 李盛南, 徐泽佩, 等. 高应力泥质粉砂岩黏弹塑性蠕变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1210-1220.
LIU X X, LI S N, XU Z P, et al. Viscoelastic-plastic creep model of high stress argillaceous siltstone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1210-1220. (In Chinese)
- [4] 邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2629-2638.
DENG H F, XIAO Y, FANG J C, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2629-2638. (In Chinese)
- [5] 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990-1998.
SHEN P W, TANG H M, WANG D J, et al. Disintegration characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1990-1998. (In Chinese)
- [6] 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 X X, LI S N, ZHOU Y M, 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. (In Chinese)
- [7] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 77-82.
LIU X R, FU Y, ZHENG Y R, et al. A review on deterioration of rock caused by water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 77-82. (In Chinese)
- [8] 许宝田, 张莉萍, 燕晓莹, 等. 空隙特征对砂岩水致劣化规律的

- 影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 561-569.
XU B T, ZHANG L P, YAN X Y, *et al.* Effect of void characteristics on deteriorating rules of sandstone due to water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 561-569. (In Chinese)
- [9] 李连崇, 李少华, 李宏. 基于岩石长期强度特征的岩质边坡时效变形过程分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 47-56.
LI L C, LI S H, LI H. Time-dependent deformation of rock slopes based on long-term strength characteristics of rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(1): 47-56. (In Chinese)
- [10] 刘新喜, 李盛南, 徐泽沛, 等. 冻融循环作用下炭质页岩蠕变模型研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 137-145.
LIU X X, LI S N, XU Z P, *et al.* Research on creep model of carbonaceous shale under freeze-thaw cycle[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 137-145. (In Chinese)
- [11] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 168-173.
LI K G, ZHENG D P, HUANG W H. Mechanical behavior of sandstone and its neural network simulation of constitutive model considering cyclic drying-wetting effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S2): 168-173. (In Chinese)
- [12] 邓华锋, 肖志勇, 李建林, 等. 水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2690-2698.
DENG H F, XIAO Z Y, LI J L, *et al.* Deteriorating change rule test research of damage sandstone strength under water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2690-2698. (In Chinese)
- [13] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 等. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1175-1184.
WANG W, GONG C G, ZHU P H, *et al.* Experimental study on mechanical properties of marble under hydraulic weathering coupling[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(10): 1175-1184. (In Chinese)
- [14] 陈乐求, 陈俊桦, 张家生. 干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土动力特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9): 107-113.
CHEN L Q, CHEN J H, ZHANG J S. Dynamic properties of cement-improved argillite-slate coarse-grained soil under drying-wetting cycles[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9): 107-113. (In Chinese)
- [15] 杜彬, 白海波, 马占国, 等. 干湿循环作用下红砂岩动态拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1671-1679.
DU B, BAI H B, MA Z G, *et al.* Experimental study on the dynamic tensile properties of red-sandstone after cyclic wetting and drying[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1671-1679. (In Chinese)
- [16] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 527-532.
LIU X R, YUAN W, FU Y, *et al.* Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 527-532. (In Chinese)
- [17] 李江腾, 常瑞芹, 黄曼鹏. 饱水与干燥状态下横观各向同性板岩蠕变特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 143-148.
LI J T, CHANG R Q, HUANG M P. Creep properties of transversely isotropic slate under water-saturated and dry conditions[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(5): 143-148. (In Chinese)
- [18] 徐志华, 张国栋, 孙钱程, 等. 干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 226-233.
XU Z H, ZHANG G D, SUN Q C, *et al.* Experimental research on strength degradation of red sandstone under dry-wet cycle conditions[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(2): 226-233. (In Chinese)
- [19] 宋朝阳, 纪洪广, 蒋华, 等. 干湿循环作用下弱胶结砂岩声发射特征及其细观劣化机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 96-103.
SONG Z Y, JI H G, JIANG H, *et al.* Influence of wetting-drying cycles on acoustic emission characteristics and micro-structure deterioration of weak cementation stratum[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 96-103. (In Chinese)
- [20] 谢学斌, 周瀚, 向天元. 砂岩单轴压缩与干湿循环耦合损伤试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 66-71.
XIE X B, ZHOU H, XIANG T Y. An experimental study and simulation of damage of the single shaft compression and drying-wetting cycle in sandstone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 66-71. (In Chinese)
- [21] 安阳, 晏鄂川, 李兴明, 等. 石膏岩干湿循环细观模拟及损伤本构模型[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 240-246.
AN Y, YAN E C, LI X M, *et al.* Microscopic simulation and damage constitutive model of gypsum under dry-wet cycle conditions[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 240-246. (In Chinese)
- [22] 袁璞, 马冬冬. 干湿循环与动载耦合作用下煤矿砂岩损伤演化及本构模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 119-124.
YUAN P, MA D D. Damage evolution and constitutive model of coalmine sandstone under coupling wetting-drying cycles and dynamic loading[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 119-124. (In Chinese)
- [23] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 825-831.
SONG Y J, ZHANG L T, REN J X, *et al.* Study on damage characteristics of weak cementation sandstone under drying-wetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 825-831. (In Chinese)
- [24] 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600.
MA Q Y, YU P Y, YUAN P. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 593-600. (In Chinese)
- [25] 霍树义, 金坎辉, 杨涛, 等. 干湿循环作用下砂岩蠕变损伤及本构模型[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(2): 163-169.
HUO S Y, JIN K H, YANG T, *et al.* Creep damage and constitutive model of sandstone under dry-wet cycles[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, 37(2): 163-169. (In Chinese)
- [26] 李杰林, 刘汉文, 周科平, 等. 冻融作用下岩石细观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 266-272.
LI J L, LIU H W, ZHOU K P, *et al.* An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 266-272. (In Chinese)
- [27] 沈明荣, 湛洪菊, 张清照. 基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 1-7.
SHEN M R, CHEN H J, ZHANG Q Z. Method for determining long-term strength of discontinuity using shear creep test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 1-7. (In Chinese)