

赵越, 司运航, 张译丹, 等. 水化-冻融耦合条件下大理岩蠕变损伤本构模型. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 231-241. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230153.

Zhao Yue, Si Yunhang, Zhang Yidan, et al. Creep Damage Constitutive Model of Marble Under Hydration Freeze-Thaw Coupling. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 231-241. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230153.

水化-冻融耦合条件下大理岩蠕变损伤本构模型

赵越^{1,2}, 司运航¹, 张译丹³, 赵京禹³

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000

2. 辽宁工程技术大学创新实践学院, 辽宁 阜新 123000

3. 辽宁省化工地质勘查院有限责任公司, 辽宁 锦州 121000

摘要:为描述岩石在水化-冻融耦合条件下的蠕变特性,以大理岩为试验对象,分别开展酸性、碱性、中性溶液与不同冻融循环条件下的单轴压缩蠕变及核磁共振试验,分析 T_2 (弛豫时间)谱分布和蠕变试验结果,并进行耦合损伤演化,得到一个新的考虑水化-冻融与应力耦合的蠕变损伤本构模型。结果表明:1)大理岩 T_2 谱表现为三个谱峰,岩石以大孔径孔隙为主。2)冻融循环作用促进大理岩孔隙发育,不同溶液环境对孔隙发育影响从大到小的关系为酸性、碱性、中性。3)分别构建水化-冻融和受荷损伤变量,从而建立耦合损伤变量。基于大理岩蠕变特性,确定蠕变基础模型,进行耦合损伤演化,得到新的水化-冻融耦合条件下的大理岩蠕变损伤本构模型。4)新建模型模拟大理岩三种溶液冻融循环50次的平均 R^2 达0.9854,远高于基础模型平均 R^2 (0.9194),说明本文新建模型对三种岩石蠕变数据辨识效果更好。

关键词:水化-冻融;大理岩;核磁共振;蠕变;损伤;本构模型

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230153

中图分类号:TU452

文献标志码:A

Creep Damage Constitutive Model of Marble Under Hydration Freeze-Thaw Coupling

Zhao Yue^{1,2}, Si Yunhang¹, Zhang Yidan³, Zhao Jingyu³

1. Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

2. College of Innovation and Practice, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

3. Chemical Geological Prospecting Institute of Liaoning Province Co. Ltd., Jinzhou 121000, Liaoning, China

Abstract: To describe the creep characteristics of rocks under hydration freeze-thaw coupling

收稿日期:2023-06-23

作者简介:赵越(1995-),男,副教授,博士,主要从事地质资源与地质工程方面的研究,E-mail: zhaoyue9501@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51774165);中国科协青年托举工程项目(2023QNRC001);2023年度辽宁省教育厅基本科研项目(青年项目)(JYTQN2023212);辽宁省经济社会发展研究课题(2024slqnrcrkt-017, 2024slslybwzkt-002)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51774165), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2023QNRC001), the Basic Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education in 2023 (Youth Project) (JYTQN2023212) and the Economic and Social Development Research Project of Liaoning Province (2024slqnrcrkt-017, 2024slslybwzkt-002)

conditions, uniaxial compression creep and nuclear magnetic resonance tests were conducted on marble under acidic, alkaline, neutral solutions and different freeze-thaw cycle conditions. T_2 spectrum distribution and creep test results were analyzed, and coupled damage evolution was carried out. Finally, a new creep damage constitutive model considering the coupling of hydration freeze-thaw and stress was obtained. The results show that: 1) The T_2 spectrum of marble exhibits three peaks, and pore in the rock is mainly composed of large size pores. 2) The freeze-thaw cycle promotes the development of pores in marble, and the influence degree of different solution environments on pore development from high to lower is acidic, alkaline, and neutral. 3) The hydration freeze-thaw and load damage variables were constructed to establish a new creep damage constitutive model of marble under the coupling conditions of hydration freeze-thaw. 4) The average R^2 of 50 freeze-thaw cycles of three different solutions of marble simulated by a new model is 0.985 4, while the average R^2 of the basic model is only 0.919 4.

Key words: hydration freezing-thaw; marble; nuclear magnetic resonance; creep; injury; constitutive model

0 引言

随着我国基建开发速度的提升,实际工作中越来越多地涉及到寒区岩体的工程建设问题^[1]。寒区岩石受地下水、化学、冻融、应力等因素的综合作用,蠕变现象明显,影响到工程建设安全,严重时可导致质量事故^[2-4]。蠕变本构模型是描述岩石蠕变特征的重要途径之一,若能建立考虑多因素的蠕变本构模型,可为多因素耦合作用下岩石蠕变研究提供必要参考。

目前前人针对水化学、冻融、应力因素的岩石蠕变特性试验已有一定的研究成果,如:丁梧秀等^[5]、吴洋^[6]、张峰瑞等^[7]、冯学志等^[8]分别开展了岩石在水化学、冻融及应力综合作用下的蠕变特性研究,得到了不同水化学、冻融作用下的蠕变规律;童庆闯^[9]、Li 等^[10]、陈国庆等^[11]、宋勇军等^[12]、万亿等^[13]分别针对不同冻融、应力条件构建了岩石蠕变本构模型。目前针对水化学、冻融、应力因素已有相关岩石蠕变试验研究,但三者耦合蠕变模型研究则少见报道。

鉴于此,本文以大理岩为试验对象,进行水化-冻融耦合条件下蠕变损伤本构模型研究。首先开展酸性、碱性、中性溶液与不同冻融循环条件下的单轴压缩蠕变及核磁共振试验,分析 T_2 (弛豫时间) 谱分布和蠕变试验结果,建立水化-冻融与受荷耦合损伤变量;然后基于大理岩蠕变特性,择取蠕变基础模型,进行耦合损伤演化,得到一个新的考虑水化-冻融与应力耦合的蠕变损伤本构模型;最后给出模型参数求取方法,分析损伤参数敏感性及其损伤演化,并引入相关文献中石英岩和黄砂岩蠕变数据,采用所

建模型辨识三种岩石蠕变曲线,对比验证所建模型的可行性和适用性,以期为水化-冻融耦合条件下大理岩蠕变本构模型研究提供有益参考。

1 试验设置与结果

1.1 试验工况设置

以鄂西北地区某露天边坡大理岩作为试验对象,现场凿取岩样,运回实验室后制作直径 50 mm×高 100 mm 规格的岩石试样。在开展水化-冻融作用下的单轴蠕变试验前,水化学条件设为酸性、中性、碱性溶液(pH 分别为 3、7、11),冻融循环,循环次数分别为 0、25、50 和 75 次,冻结-融化温度设为 $-20\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,具体试验设置见文献^[2]。

1.2 蠕变试验结果

蠕变试验结果如图 1 所示,限于篇幅,以酸性溶液为例^[2]。

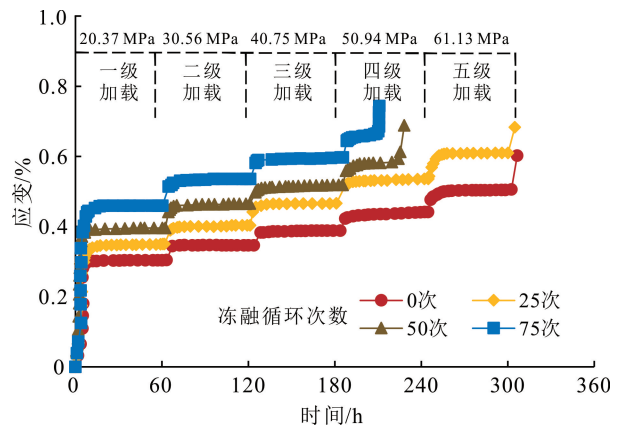


图 1 大理岩在酸性溶液下蠕变试验结果

Fig.1 Creep test results of acidic solution of marble

由图 1 可看出,大理岩在不同工况下均表现出明显的三阶段特征,即初始受荷和增量加载的瞬间产生瞬时变形(阶段 I),然后经历衰减、稳定蠕变阶段(阶段 II),最后一级加载表现出加速蠕变阶段(阶段 III),大理岩样发生破坏,应变量规律分析见文献[2]。

1.3 核磁共振试验

图 2 为采用核磁共振技术得到的大理岩在不同工况下的 T_2 谱分布图。

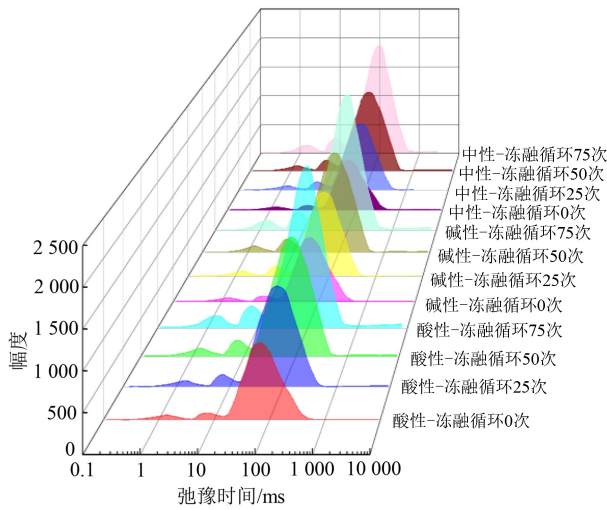


图 2 大理岩 T_2 谱分布图

Fig.2 T_2 spectrum distribution of marble

由图 2 可看出,大理岩 T_2 谱分为三个谱峰,但不同工况下的 T_2 谱分布均不同,主要差异体现在 T_2 值和峰面积。由于 T_2 谱峰值与孔径成正比,峰面积与孔隙数量成正比^[14];由此认为弛豫时间从小到大的三个谱峰分别对应小孔径、中孔径、大孔径的孔隙,且大理岩孔隙空间结构以大孔径孔隙为主。

在同一种溶液环境下,随着冻融循环次数的增大, T_2 谱三个谱峰的面积均递增,由此说明冻融循环作用对大理岩内部结构的孔隙发育起一定的促进作用。在同一冻融循环次数下,三种溶液环境下的第一峰、第二峰的峰面积差距不大,第三峰的峰面积从大到小为酸性、碱性、中性,这说明酸性溶液对孔隙发育的促进作用最强,碱性次之,中性最弱。

综合分析认为,大理岩在不同溶液环境、冻融循环次数下,孔隙发育表现出一定规律性,岩石内部结构发生损伤,导致岩石力学性能发生变化。

2 岩石蠕变损伤模型

2.1 损伤变量

大理岩是碳酸盐类岩石经变质而成的岩石,受温度、水、自然风化等外界影响,在荷载作用下致使岩石材料力学性能衰退,这种导致性能衰退的岩石内部变化即为损伤发展的过程^[15]。本研究中的大理岩首先经历了不同程度的水化-冻融作用,接着经受了不同应力作用,在水化-冻融及应力作用下,大理岩的内部微结构发生变化,损伤不断累积,蠕变效应增强,岩石力学性能衰退。利用蠕变损伤模型来描述大理岩的损伤和蠕变发展无疑是一条有效途径,在此之前,应先定义损伤变量,对大理岩损伤发展进行量化。

由于大理岩受水化-冻融及应力作用影响,岩石内部均产生了损伤,故应考虑不同因素共同作用下的耦合损伤。令岩石微单元总数量为 A , A 的组成为

$$A = A_1 + A_2 + A_3. \quad (1)$$

式中: A_1 为未受损单元数量; A_2 为受应力作用影响的受损单元数量; A_3 为受水化-冻融作用影响的受损单元数量。由于大理岩是先在水化学溶液浸泡,接着再进行冻融循环,受这两种作用影响的受损单元会有共同损伤部分,无法单独定义,故本文将水化-冻融简化为一种附加在岩石上的整体作用。

按照损伤单元数量占比,将不同因素作用下的耦合损伤变量 D 定义为

$$D = \frac{A_2 + A_3}{A}; 0 \leq D \leq 1. \quad (2)$$

假设岩石在水化-冻融作用下受损部位已损坏,该部位在应力作用下不再发生损伤,根据不同受损单元占总单元数量的比例,将 A_3 与 A 的比值定义为水化-冻融损伤变量 D_w ,将 A_2 与 $(A - A_3)$ 的比值定义为受荷损伤变量 D_s ,即

$$\begin{cases} D_w = A_3/A; \\ D_s = A_2/(A - A_3). \end{cases} \quad (3)$$

联合式(2)(3)得

$$D = D_w + D_s - D_w D_s. \quad (4)$$

式(4)即为本文建立的反映水化-冻融和应力共同作用的耦合损伤变量。水化-冻融和应力对岩石的损伤机理是不一样的,前者更偏向于“物理化学”范畴,后者偏向于“时效力学”范畴。由于本文已假定岩石内部已损部位不再重复受损,水化-冻融损伤和受荷损伤在未损区域持续反馈调整,使得岩石内部结构

不断劣化,造成为力学性质衰减。

根据文献[16-17],岩石在水化-冻融作用下,弹性模量衰减较明显,而损伤力学理论中亦有基于弹性模量变化的损伤定义方式,故将 D_w 定义为

$$D_w = 1 - E_w/E_0 \quad (5)$$

式中, E_0 、 E_w 分别为岩石水化-冻融前后的弹性模量,通过单轴压缩试验确定。

根据文献[18],弹性模量随时间增长表现出指数型衰减规律,故将式(5)改写为

$$D_w = (E_0 - E_w)(1 - e^{-\delta t})/E_0 \quad (6)$$

式中: δ 为时效损伤相关参数; t 为时间。令 $E_0 = 15$ GPa, $E_w = 3$ GPa,代入式(6)得到 D_w 演化曲线,如图 3 所示。

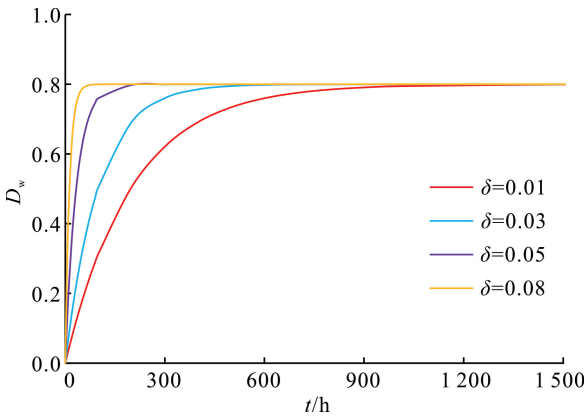


图 3 大理岩 D_w 演化曲线
Fig.3 D_w evolution curves of marble

由图 3 可看出:随着时间推移, D_w 先逐渐(或迅速)增长再趋于稳定; δ 决定 D_w 的增长速率, δ 值越小,损伤累积速率越慢。综合来看,式(6)较为灵活, D_w 取决于岩石水化-冻融前后的弹性模量, δ 控制损伤累积速率,利用式(6)描述水化-冻融损伤是可行的。

岩石在长期外界应力作用下,内部颗粒错位,裂隙发育甚至贯通,微结构在一定时间段内发生随机性变化,岩石内受荷损伤区域随机分布。基于这种时效损伤的随机性,引入概率分布的思路,假定岩石受荷损伤遵从 Weibull 概率密度分布,则时效损伤概率密度函数 $\varphi(t)$ 为

$$\varphi(t) = (m/\alpha) (t/\alpha)^{m-1} \exp[-(t/\alpha)^m] \quad (7)$$

式中, α 和 m 为与岩石性质有关的随机变量。对式(7)积分可得

$$D_s = \int_0^t \varphi(t) dt = 1 - \exp[-(t/\alpha)^m] \quad (8)$$

式(8)即为 D_s 的损伤演化表达式。

将式(6)(8)代入式(4)变形可得

$$D = 1 - (2E_0 - E_0 e^{-\delta t} - E_w - E_w e^{-\delta t}) \cdot (1/E_0) \exp[-(t/\alpha)^m] \quad (9)$$

式(9)即为耦合损伤变量 D 的损伤演化表达式。

2.2 蠕变模型建立

在图 1 对每一级加载 0.1~60.0 h 的过程中,其中第 0.1 h 时刻对应的是 0 h 的瞬时加载点,择取 7 个数据点绘制等时应力-应变曲线,通过取拐点确定长期强度 σ_p ,如图 4 所示,以酸性环境冻融循环 50 次为例[2]。

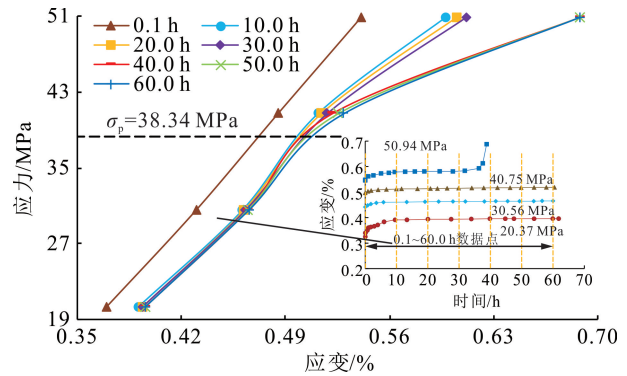
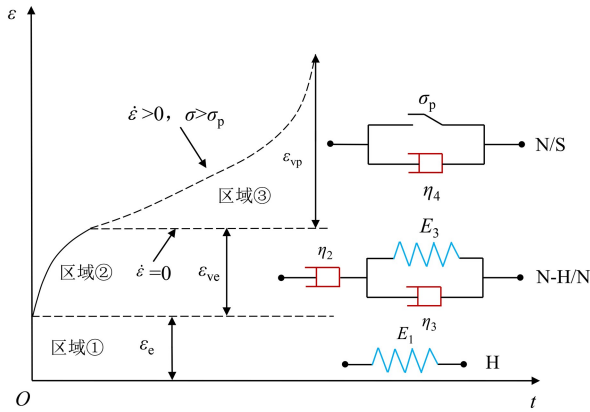


图 4 大理岩等时应力-应变曲线
Fig.4 Isochronous stress-strain curves of marble

由图 4 可看出,第 0.1 h 时刻的曲线呈线性,10.0~60.0 h 的曲线簇呈非线性,且随着时间推移,曲线的非线性“偏转”增大;这说明大理岩在加载瞬间,应变对应力的瞬时响应是弹性的。根据蠕变元件模型理论[19-20],可通过一个弹簧体(H 体)来描述岩石瞬时弹性变形。通过图 4 中 10.0~60.0 h 呈非线性状态的曲线簇,可认为岩石蠕变三阶段均具有非线性特征:当岩石发生衰减蠕变行为,应变率 $\dot{\epsilon} > 0$ (ϵ 为应变,上标圆点表示 ϵ 对 t 的一阶导数);进入稳定蠕变阶段后 $\dot{\epsilon} = 0$,此时岩石应变表现出黏性和黏弹性,其中黏性性质可用一个牛顿体(N 体)描述,黏弹性可用 H 和 N 体并联的结构(H/N)来表征。通过取拐点的方法得到大理岩在酸性环境冻融循环 50 次下的长期强度为 38.34 MPa,低于第三级加载应力 40.75 MPa;这说明当应力超过长期强度后,存在岩石并未发生屈服的情况,此时岩石仍处于稳定蠕变阶段,但应变表现为黏塑性,故可采用具有开关功能的黏塑性体(N/S)。当岩石应力超过长期强度 σ_p 且达到一定水平时,岩石会发生加速蠕变,短时间

内岩石屈服,这里仍用黏塑性体进行描述。总结以上分析,得到大理岩蠕变模型选用示意图,如图 5 所示。



ϵ_e . 瞬时弹性应变; ϵ_{ve} . 黏性和黏弹性应变之和; ϵ_{vp} . 黏塑性应变; η . 黏滞系数,字母下标对应图 6 中的 4 个部分; E_1 . 瞬时弹性模量。

图 5 大理岩蠕变基础模型选用示意图

Fig. 5 Schematic diagram for selection of marble creep foundation model

由图 5 可看出,应变由三部分组成,其中:区域①中瞬时弹性应变 ϵ_e 服从 Hooke 定律;区域中②中黏性和黏弹性应变之和记为 ϵ_{ve} ,以 H-H/N 结构模型描述;区域③中黏塑性应变 ϵ_{vp} 通过 N/S 结构模型表征。值得注意的是,文献[4,15]中 σ_p 均低于倒数第二级加载应力,本文大理岩的 σ_p 亦低于倒数第二级加载应力,但大理岩属于硬岩,其倒数第二级稳态蠕变曲线的 $\dot{\epsilon}$ 近乎于 0,而一般软岩存在倒数第二级稳态蠕变曲线 $\dot{\epsilon} > 0$ 的情况,其蠕变曲线处于区域③内,这可能由于硬岩和软岩的结构性质差异,导致硬岩蠕变变形的黏塑性行为弱于软岩。

串联图 5 中元件,得到 H-N-H/N-N/S 结构,将其作为大理岩的基础蠕变模型,如图 6 所示。

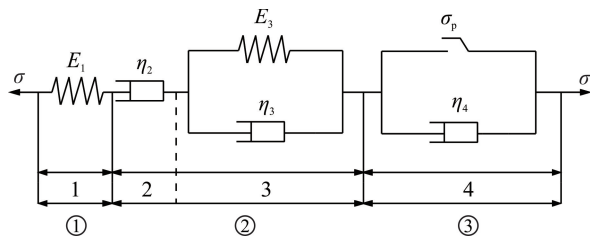


图 6 大理岩蠕变基础模型

Fig.6 Basic creep model of marble

为方便计算,在图 6 中将区域①—③分解为 4 个部分,根据元件模型理论,图 6 模型的状态方程为:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4; \\ \epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{ve} + \epsilon_{vp} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4; \\ \dot{\epsilon}_1 = \dot{\sigma}_1 / E_1; \\ \sigma_2 = \eta_2 \dot{\epsilon}_2; \\ \sigma_3 = E_3 \epsilon_3 + \eta_3 \dot{\epsilon}_3; \\ \sigma_4 = \sigma_p + \eta_4 \dot{\epsilon}_4. \end{cases} \quad (10)$$

式中, E 为弹性模量。

解析式(10)得

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_2} t + \frac{\sigma}{E_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_3}{\eta_3} t\right) \right] + \frac{\langle \sigma - \sigma_p \rangle}{\eta_4} t. \quad (11)$$

式(11)即为蠕变基础模型的一维本构方程,当 $\sigma \geq \sigma_p$ 时, $\langle \sigma - \sigma_p \rangle$ 变为 $(\sigma - \sigma_p)$; 当 $\sigma < \sigma_p$ 时, $\langle \sigma - \sigma_p \rangle$ 为 0。

假设大理岩经历各向同性损伤,其初始力学参数 M 经历发生损伤劣化,表示为

$$M(X) = M(\delta, \alpha, m, t) = M(1 - D). \quad (12)$$

式中, $M(X)$ 为损伤后的力学参数。式(9)中,影响 D 的参数为 δ, α, m 和 t ,为方便描述,由 X 表示损伤相关变量。

将式(12)和(9)同时代入式(11)得:

$$\begin{aligned} \epsilon = & \frac{\sigma}{E_1(1-D)} + \frac{\sigma}{\eta_2(1-D)} t + \frac{\langle \sigma - \sigma_p \rangle}{\eta_4(1-D)} t + \\ & \frac{\sigma}{E_3(1-D)} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_3}{\eta_3} t\right) \right]; \\ D = & 1 - \frac{1}{E_0} (2E_0 - E_0 e^{-\delta t} - E_w - E_w e^{-\delta t}) \cdot \\ & \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^m\right]. \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)即为本文水化-冻融耦合条件下的岩石一维蠕变损伤本构方程。

3 模型验证

3.1 参数求解

1) 参数 E_1

根据 Hooke 定律,结合蠕变曲线,计算应力与瞬时应变的比值即可得 E_1 。

2) 参数 E_0, E_w

E_0, E_w 通过单轴压缩试验确定。统计 E_0, E_w 绘制曲线,以酸性溶液工况为例,结果如图 7 所示。

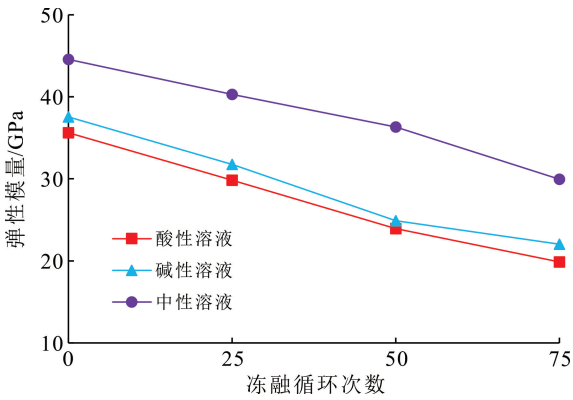


图 7 大理岩 E_0 、 E_w 变化曲线

Fig.7 E_0 , E_w change curves of marble

由图 7 可看出,在同样溶液环境下,弹性模量随着冻融循环次数 n 的增加而递减,在同一 n 值情况下,弹性模量从小到大关系为酸性、碱性、中性。取 $n=0$ 时的弹性模量作为 E_0 ,根据循环次数可确定 E_w 。当 $n=0$ 时, $E_w = E_0, D_w = 0$,参数 δ 无解,不影响损伤计算,此时 $D = D_s$ 。

3) 长期强度 σ_p

通过图 4 中等时应力-应变曲线,通过取拐点确定长期强度 σ_p ,当 $\sigma \geq \sigma_p$ 时,岩石黏塑性应变累积,最后一级加载下发生加速蠕变。

4) 参数 $\eta_2, \eta_3, \eta_4, E_3, \delta, \alpha$ 和 m

当加载应力低于 σ_p 时,式(13)中开关无效。当加载应力超过 σ_p 时,式(13)中开关生效,采用数学软件 1stOpt,基于 BGFS (Broyden Fletcher Goldfarb Shanno) 算法进行非线性拟合,得到模型参数。值得注意的是,参数 δ, α 和 m 是耦合损伤变量的参数,由于损伤发展是一个持续过程,每一级加载均会导致损伤累加,故取不同应力水平下 δ, α 和 m 的平均值作为参数计算。

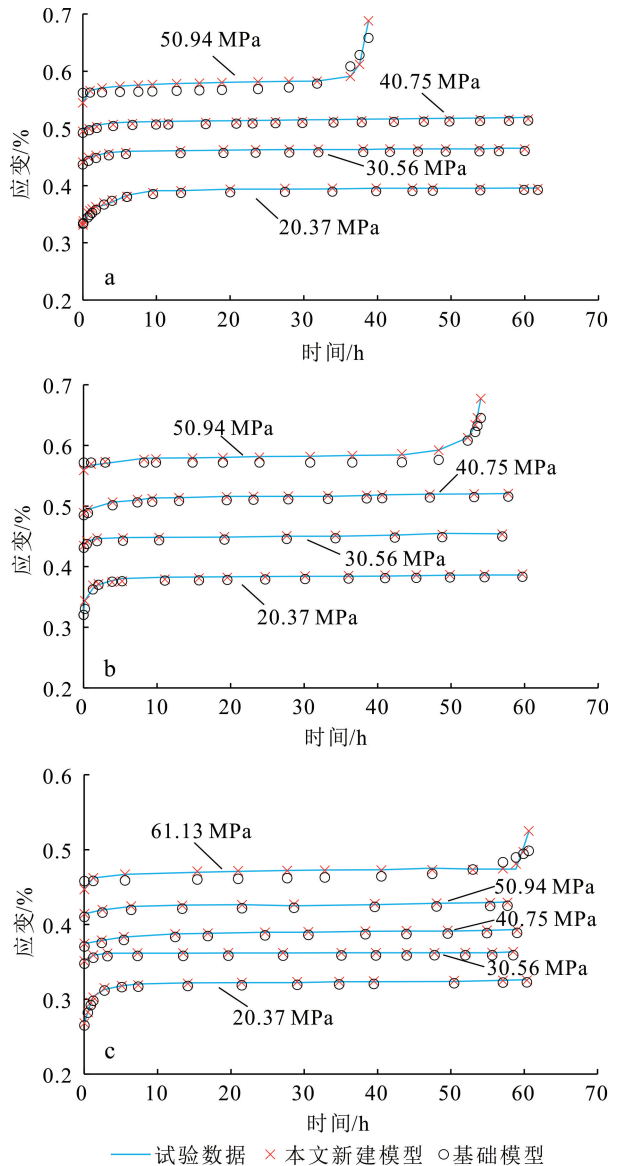
3.2 模型辨识

采用式(13)辨识大理岩不同工况下的蠕变曲线,同时选取图 6 基础模型作为验证对比,得到辨识对比曲线如图 8 所示,基础模型参数见表 1,新建模型参数见表 2。

限于篇幅,图 8 和表 1 仅以酸性、碱性和中性溶液环境下冻融循环 50 次为例。

根据数学软件 1stOpt 计算结果可知:基础模型对未发生加速蠕变的曲线辨识能力尚可,三种溶液冻融循环 50 次未发生加速蠕变的平均 R^2 为

0.959 3;基础模型对最后一级蠕变曲线辨识效果较差,平均 R^2 仅有 0.786 4;基础模型对三种溶液冻融循环 50 次全部蠕变曲线的平均 R^2 为 0.919 4(表 1)。由图 8 可看出,在三种溶液下,基础模型模拟应变值大多数情况下低于本文新建模型模拟值。本文新建模型对不同工况下大理岩蠕变曲线的辨识能力较强,由表 2 计算得知三种溶液冻融循环 50 次平均 R^2 达 0.985 4;说明新建模型克服了传统模型难以精确模拟加速蠕变行为的困难,能较为准确地描述大理岩在不同水化-冻融工况下的蠕变特性。



a. 酸性溶液; b. 碱性溶液; c. 中性溶液。

图 8 大理岩冻融循环 50 次时的辨识对比曲线

Fig. 8 Identification comparison curve for 50 freeze-thaw cycles of marble

表 1 基础模型参数
Table 1 Basic model parameters

溶液环境	应力/ MPa	E_1 / GPa	E_3 / GPa	η_2 / (GPa·h)	η_3 / (GPa·h)	η_4 / (GPa·h)	σ_p / MPa	R^2
酸性	20.37	6.268	14.026	42.404	3.174		38.34	0.965 0
	30.56	18.763	18.997	44.534	3.572		38.34	0.955 9
	40.75	22.479	25.516	46.705	5.386	81.160	38.34	0.953 0
	50.94	27.505	30.382	41.996	3.080	197.258	38.34	0.790 9
碱性	20.37	6.462	15.676	42.821	3.328		38.87	0.953 9
	30.56	19.930	20.595	45.624	3.971		38.87	0.961 7
	40.75	23.057	26.691	48.153	5.752	97.653	38.87	0.964 8
	50.94	28.344	34.616	42.655	3.250	258.127	38.87	0.783 2
中性	20.37	7.601	17.412	43.643	3.956		40.72	0.938 6
	30.56	21.363	23.349	46.273	4.529		40.72	0.965 9
	40.75	24.876	29.565	47.557	6.035		40.72	0.965 4
	50.94	30.219	35.640	49.878	6.633	133.559	40.72	0.968 3
	61.13	35.832	41.058	42.515	3.641	387.293	40.72	0.785 1

表 2 本文新建模型参数
Table 2 Model parameters corresponding in this paper

溶液环境	应力/ MPa	E_1 / GPa	E_3 / GPa	η_2 / (GPa·h)	η_3 / (GPa·h)	δ	α	m	η_4 / (GPa·h)	σ_p / MPa	R^2
酸性	20.37	6.268	17.549	50.265	3.763	0.26	49.62	4.61		38.34	0.992 4
	30.56	18.763	22.186	53.976	4.353	0.26	49.62	4.61		38.34	0.991 5
	40.75	22.479	29.753	55.364	6.384	0.26	49.62	4.61	120.367	38.34	0.989 4
	50.94	27.505	35.482	49.782	3.651	0.26	49.62	4.61	389.462	38.34	0.985 7
碱性	20.37	6.462	18.308	50.760	3.945	0.29	51.78	4.83		38.87	0.990 4
	30.56	19.930	24.052	54.082	4.707	0.29	51.78	4.83		38.87	0.991 3
	40.75	23.057	31.172	55.895	6.818	0.29	51.78	4.83	143.601	38.87	0.988 1
	50.94	28.344	40.427	50.563	3.852	0.29	51.78	4.83	405.974	38.87	0.989 6
中性	20.37	7.601	20.335	51.734	4.689	0.37	57.13	5.59		40.72	0.933 5
	30.56	21.363	27.269	54.852	5.369	0.37	57.13	5.59		40.72	0.989 3
	40.75	24.876	34.528	56.374	7.154	0.37	57.13	5.59		40.72	0.989 7
	50.94	30.219	41.623	59.125	7.863	0.37	57.13	5.59	235.753	40.72	0.990 3
	61.13	35.832	47.951	50.397	4.316	0.37	57.13	5.59	654.289	40.72	0.988 9

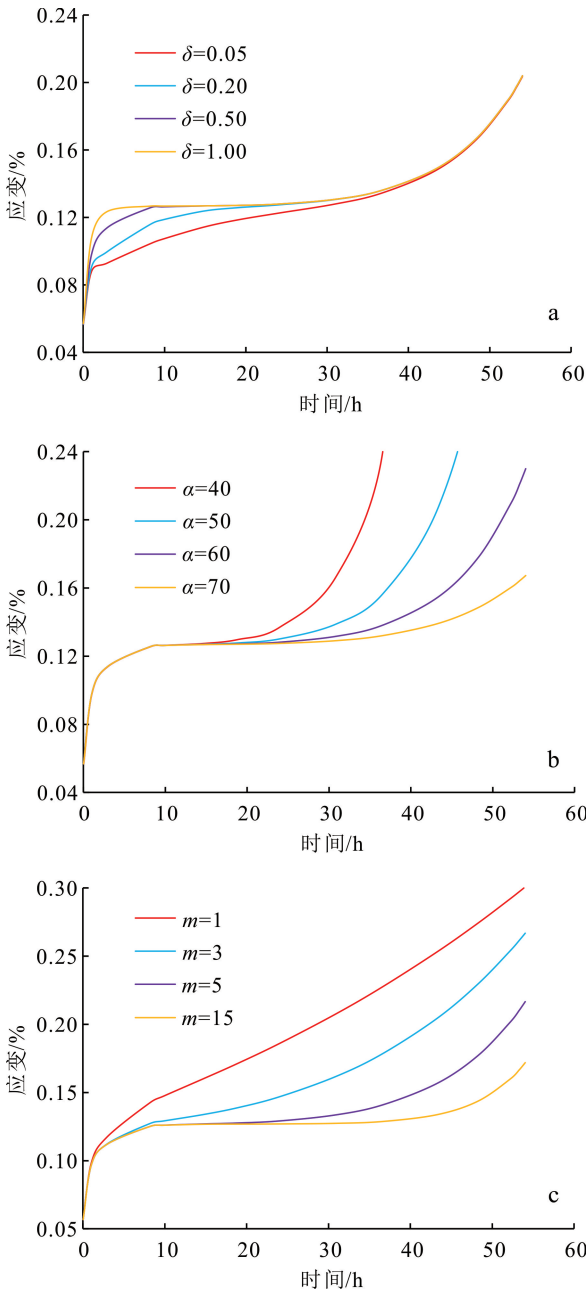
3.3 损伤参数敏感性

损伤参数 δ 、 α 和 m 决定了大理岩耦合损伤累积,分别取不同的 δ 、 α 和 m 值,将表 1 中除该值以外其余参数代入式(13),可绘制不同 δ 、 α 和 m 值的蠕变曲线,如图 9 所示,以酸性溶液冻融循环 50 次的最后一组加载为例。

由图 9a 可看出,参数 δ 主要影响蠕变曲线的衰

减、稳定阶段的曲线形态,不影响加速蠕变阶段的应变率和应变值。 δ 值越大,衰减蠕变阶段的应变率越高。

由图 9b 可看出,参数 α 主要影响进入稳定蠕变阶段的持续时间和加速蠕变阶段的时间及应变率,不影响衰减蠕变阶段。 α 值越大,稳定蠕变阶段持续时间越长,岩石越慢地进入加速蠕变阶段,该阶段应变率递减越小。



a. 不同 δ 值; b. 不同 α 值; c. 不同 m 值。

图 9 大理岩在酸性溶液冻融循环 50 次不同损伤参数下的蠕变曲线

Fig.9 Creep curves of acidic solution under 50 freeze-thaw cycles and different damage parameters of marble

由图 9c 可看出,参数 m 同时影响蠕变三阶段,不同的 m 值对应不同的曲线形态, m 值越大,曲线逐渐向应变轴靠拢,应变值越小。

综合图 9 可看出,损伤参数 δ 、 α 和 m 的取值对岩石蠕变三阶段曲线模拟影响明显,使得蠕变曲线更为灵活,对于描述岩石蠕变曲线这种非线性曲线

具有一定优越性。

3.4 损伤演化分析

取 t 为某一种工况的试验总历时(图 1),同时将表 1 中损伤参数 δ 、 α 和 m 代入式(9),得到耦合损伤变量 D 随 t 的累积曲线,如图 10 所示。以不同溶液冻融循环 50 次为例。

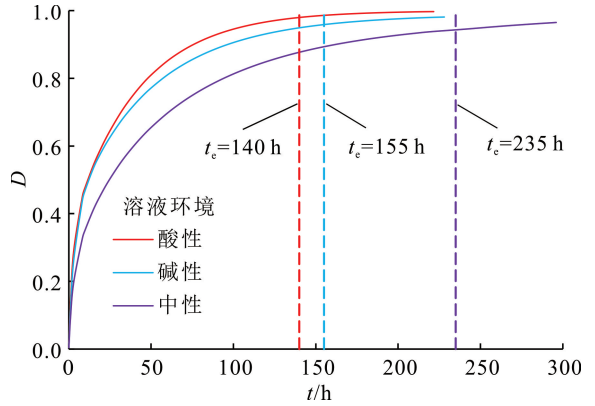


图 10 大理岩在三种溶液冻融循环 50 次条件下 D 随 t 的累积曲线

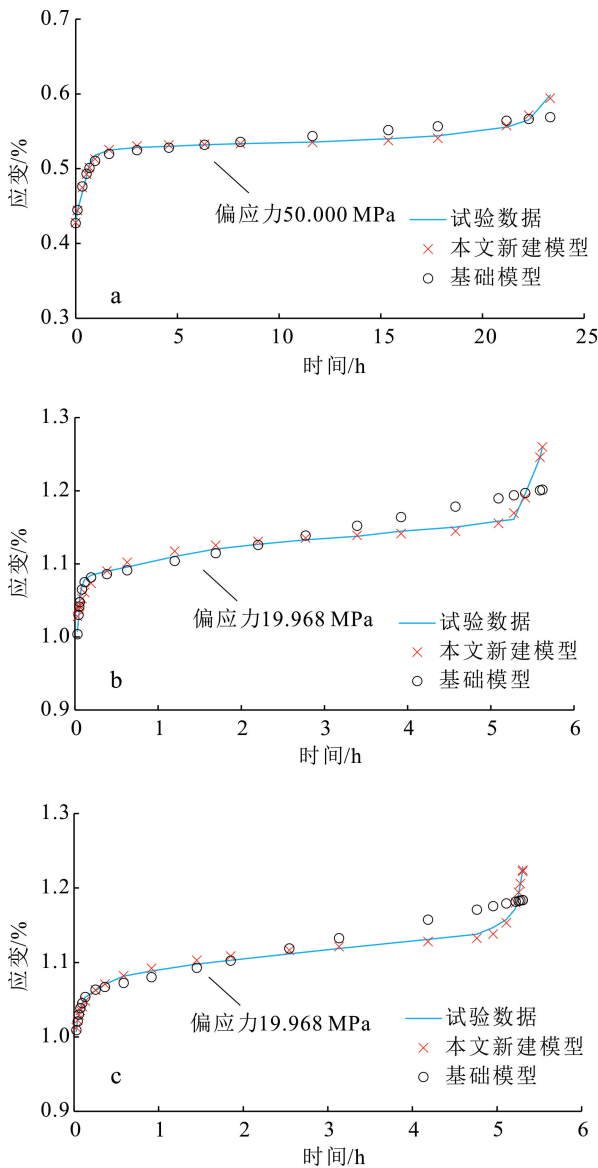
Fig.10 Cumulative curves of condition D with t for 50 freeze-thaw cycles of three solutions of marble

由图 10 可看出, D 随 t 的增长而递增,当 t 增长到某一阈值点 t_c 时, D 趋于平衡,大致判断酸性、碱性和中性溶液的 t_c 分别为 140、155 和 235 h。同样时刻点下,不同溶液下的 D 值从大到小表现为酸性、碱性、中性, t_c 值从小到大表现为酸性、碱性、中性;这说明酸性溶液环境下岩石损伤累积更快,碱性次之,中性最慢。值得一提的是, t_c 在岩石倒数第二级加载时间范围内,该级加载的应力刚好超过长期强度 σ_p ;这表明此时岩石内部微缺陷大量发育、扩展甚至局部贯通,接着在最后一级加载下便发生屈服破坏。

3.5 模型适用性

为验证本文模型适用性,引用文献[7-8]中石英岩、黄砂岩在不同溶液环境不同冻融循环条件下的蠕变数据,采用本文新建及图 6 中模型进行对比辨识,得到模拟曲线,如图 11 所示,由于文献[7-8]为三轴压缩蠕变试验,模型辨识时,将偏应力替换式(13)中的 σ 。

由图 11 中的模型值与试验数据吻合程度来看,图 6 模型难以描述岩石不同工况下的加速蠕变行为,平均 R^2 仅有 0.735 2,而本文新建模型能较精准辨识不同形态的蠕变曲线,平均 R^2 达 0.891 4;这说



a. 石英岩在 HCl 溶液下冻融循环 30 次; b. 黄砂岩在 H₂SO₄ 溶液下冻融循环 30 次; c. 黄砂岩在 NaOH 溶液下冻融循环 30 次。石英岩和黄砂岩数据来自文献[7-8]。

图 11 不同岩石的蠕变模拟曲线

Fig.11 Creep simulation curves of different rocks

明本文新建模型对不同水化-冻融条件下的岩石蠕变模拟具有一定的适用性。

4 结论

1)大理岩 T_2 谱表现为三个谱峰,岩石以大孔径孔隙为主。冻融循环作用的增强促进孔隙发育,化学溶液对孔隙发育影响从大到小为酸性、碱性、中性。

2)分别构建水化-冻融和受荷损伤变量,从而建

立耦合损伤变量。基于大理岩蠕变特性,确定蠕变基础模型,进行耦合损伤演化,得到新的水化-冻融耦合条件下的大理岩蠕变损伤本构模型。

3)给出模型参数求取方法,进行损伤参数敏感性分析及损伤演化分析,采用所建模型辨识三种岩石蠕变曲线,发现所建模型模拟值与试验数据吻合较好,证明所建模型的可行性。

参考文献 (References):

[1] 徐新木,张耀平,付玉华,等. 冻融循环下含节理类岩石试样剪切破坏特性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 483-494.
 Xu Xinmu, Zhang Yaoping, Fu Yuhua, et al. Shear Failure Characteristics of Jointed Rock Samples Under Freeze-Thaw Cycles [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 483-494.

[2] 赵越,李磊,闫晗,等. 水化-冻融耦合作用下大理岩单轴蠕变力学特性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4):1195-1203.
 Zhao Yue, Li Lei, Yan Han, et al. Uniaxial Creep Mechanical Properties of Marble Under Hydration Freeze-Thaw Coupling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (4):1195-1203.

[3] 赵建磊,王涛,梁昌玉,等. 基于风化红层泥岩蠕变特性的滑坡时效变形分析:以天水雒堡村滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34 (1): 30-39.
 Zhao Jianlei, Wang Tao, Liang Changyu, et al. Analysis of Landslide Time-Dependent Deformation Based on the Creep Characteristics of Weathered Red Mudstone: Taking The Luobao Village Landslide in Tianshui as an Example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34 (1): 30-39.

[4] 宋勇军,孟凡栋,毕冉,等. 冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50 (6): 69-79.
 Song Yongjun, Meng Fandong, Bi Ran, et al. Research on Creep Characteristics and Pore Structure Evolution Characteristics of Freezing and Thawing Rocks [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 69-79.

[5] 丁梧秀,徐桃,王鸿毅,等.水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):979-985.
 Ding Wuxiu, Xu Tao, Wang Hongyi, et al. Experimental Study of Mechanical Property of Limestone Under Coupled Chemical Solution and

- Freezing-Thawing Process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5):979-985.
- [6] 吴洋.冻融循环下类岩石材料强度、损伤及蠕变特性研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
Wu Yang. Study on Strength, Damage and Creep Characteristics of Rock Like Materials Under Freeze-Thaw Cycle [J]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [7] 张峰瑞,姜谔男,江宗斌,等.化学腐蚀-冻融综合作用下岩石损伤蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3879-3888.
Zhang Fengrui, Jiang Annan, Jiang Zongbin, et al. Experimental Study on Damage and Creep Characteristics of Rock Under the Combined Action of Chemical Corrosion, Freezing and Thawing[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(10):3879-3888.
- [8] 冯学志,秦楠,崔立桩,等.水化学-冻融循环作用下砂岩三轴蠕变及细观损伤试验研究[J].应用力学学报,2021,38(4):1383-1391.
Feng Xuezhi, Qin Nan, Cui Lizhuang, et al. Experimental Study on Triaxial Creep Behavior of Yellow Sandstone Under the Coupling of Chemical Solution and Freeze-Thaw Cycle[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2021,38(4):1383-1391.
- [9] 童庆闯.冻融循环作用下炭质页岩蠕变损伤特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
Tong Qingchuang. Study on Creep Damage Characteristics of Carbon Shale Under Freeze-Thaw Cycle [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2017.
- [10] Li J, Zhu L, Zhou K, et al. Experimental Investigation on the Effects of Ambient Freeze - Thaw Cycling on Creep Mechanical Properties of Sandstone Under Step Loading [J]. IEEE Access, 2019, 7:108513-108520.
- [11] 陈国庆,万亿,孙祥,等.不同温差冻融后砂岩蠕变特性及分数阶损伤模型研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1962-1975.
Chen Guoqing, Wan Yi, Sun Xiang, et al. Research on Creep Behaviors and Fractional Order Damage Model of Sandstone Subjected to Freeze-Thaw Cycles in Different Temperature Ranges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(10):1962-1975.
- [12] 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. Study on Triaxial Creep Characteristics and Model of Red Sandstone Under Freeze-Thaw Environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5):841-849.
- [13] 万亿,陈国庆,孙祥,等.冻融后不同含水率红砂岩三轴蠕变特性及损伤模型研究[J].岩土工程学报,2021,43(8):1463-1472.
Wan Yi, Chen Guoqing, Sun Xiang, et al. Triaxial Creep Characteristics and Damage Model for Red Sandstone Subjected to Freeze-Thaw Cycles Under Different Water Contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021,43(8):1463-1472.
- [14] 许玉娟,周科平,李杰林,等.冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J].岩土力学,2012,33(10):3001-3005,3102.
Xu Yujuan, Zhou Keping, Li Jieli, et al. Study of Rock NMR Experiment and Damage Mechanism Analysis Under Freeze-Thaw Condition[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(10):3001-3005,3102.
- [15] 黄海峰,巨能攀,黄敏,等.软岩非线性蠕变损伤模型及其试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):49-54,60.
Huang Haifeng, Ju Nengpan, Huang Min, et al. Nonlinear Creep Damage Model of Soft Rock and Its Experimental Study [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2017,44(3):49-54,60.
- [16] 徐光苗,刘泉声.岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3076-3082.
Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of Mechanism of Rock Failure Due to Freeze-Thaw Cycling and Mechanical Testing Study on Frozen-Thawed Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(17):3076-3082.
- [17] 田维刚.多因素耦合作用下岩石冻融损伤机理试验研究[D].长沙:中南大学,2014.
Tian Weigang. Experimental Study on Freeze-Thaw Damage Mechanism of Rock Under Multi Factor Coupling Action [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [18] 许宏发.软岩强度和弹模的时间效应研究[J].岩石力学与工程学报,1997,16(3):47-52.
Xu Hongfa. Time Dependent Behaviours of Strength and Elasticity Modulus of Weak Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3):47-52.

- [19] 孙钧.岩土材料流变及其工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
Sun Jun. Rheology of Geotechnical Materials and Its Engineering Application [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1999.
- [20] 宋洋,杨辉,李永启,等.深部锚固节理岩体蠕变-疲劳破坏能量演化规律分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):98-105.
Song Yang, Yang Hui, Li Yongqi, et al. Analysis of Energy Evolution Law of Creep Fatigue Failure in Deep Anchored Joint Rock Mass [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33 (4): 98 - 105.