

赵越,牛心玉,齐晓磊,等. 水化-冻融耦合作用下大理岩蠕变长期强度. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 188 - 198. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230353.  
Zhao Yue, Niu Xinyu, Qi Xiaolei, et al. Creep Long-Term Strength of Marble Under the Coupling Effect of Hydration Freezing-Thaw. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2025, 55(1): 188 - 198. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230353.

# 水化-冻融耦合作用下大理岩蠕变长期强度

赵越<sup>1,2</sup>, 牛心玉<sup>1</sup>, 齐晓磊<sup>3</sup>, 华玉涵<sup>4</sup>

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. 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司, 辽宁 丹东 118008
4. 中国建筑材料工业地质勘查中心辽宁总队, 沈阳 110004

**摘要:**为合理确定大理岩在水化-冻融耦合作用下的蠕变长期强度 $\sigma_s$ ,以鄂西北地区某露天边坡为研究背景,以酸、中、碱三种溶液环境和不同冻融循环次数为试验控制因素,首先开展了大理岩单轴压缩试验和单轴压缩蠕变试验,然后采用过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法、强度-破坏时间关系法求取了大理石长期强度,最后提出了两种新方法——基于应力-应变曲线的长期强度预测方法和改进的稳态蠕变速率-应力关系法,并对各方法进行了对比。结果表明:1)在同一冻融循环次数下,酸性环境下的瞬时强度和长期强度均最小,碱性次之,中性最大。2)采用过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法、基于应力-应变曲线的长期强度预测方法、改进的稳态蠕变速率-应力关系法得到研究区大理岩在不同溶液环境和冻融循环次数下的长期强度平均值分别为46.70、41.21、39.74、43.92、43.67 MPa。3)本文提出的基于应力-应变曲线的长期强度预测方法无需开展耗时较长的蠕变试验,仅通过压缩试验确定的应力-应变曲线便可快速预测岩石长期强度;改进的稳态蠕变速率-应力关系法相比传统方法,杜绝了取拐点方式的较强主观性。

**关键词:**水化-冻融;大理岩;蠕变;长期强度;瞬时强度;单轴压缩试验;单轴压缩蠕变试验

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230353

中图分类号: TU452

文献标志码: A

## Creep Long-Term Strength of Marble Under Coupling Effect of Hydration Freezing-Thaw

Zhao Yue<sup>1,2</sup>, Niu Xinyu<sup>1</sup>, Qi Xiaolei<sup>3</sup>, Hua Yuhan<sup>4</sup>

收稿日期: 2023 - 12 - 27

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领域方面的研究, E-mail: zhaoyue9501@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704139); 中国科协青年托举工程项目(2023QNRC001); 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(2024lslqnrckt - 017, 2024lslbybwzkt - 002)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51704139), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2023QNRC001), the Basic Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (Youth Project) (JYTQN2023212) and the Economic and Social Development Research Project of Liaoning Province (2024lslqnrckt - 017, 2024lslbybwzkt - 002)

1. Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China
2. College of Innovation and Practice, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China
3. Liaoning Province Nonferrous Geology 103 Team Co., Ltd., Dandong 118008, Liaoning, China
4. Liaoning Team of Geological Survey Center of China Building Materials Industry, Shenyang 110004, China

**Abstract:** In order to reasonably determine the creep long-term strength  $\sigma_s$  of marble under the coupling effect of hydration freeze-thaw, uniaxial compression tests and uniaxial compression creep test were carried out with three solution environments of acid, medium and alkali and different freeze-thaw cycles as the experimental control factors in an open-pit slope in northwest Hubei Province. Then, the long-term strength of marble was compared and analyzed by combining transition creep method, isothermal stress-strain curve cluster method, steady-state creep rate stress relationship method, strength failure time relationship method, and two new methods (long-term strength prediction method based on stress-strain curve and improved steady-state creep rate stress relationship method). The results show as follows: 1) under the same number of freeze-thaw cycles, the instantaneous and long-term strength under acidic environment is the smallest, followed by alkaline environment, and the neutral environment is the largest. 2) By using transition creep method, isothermal stress-strain curve cluster method, steady-state creep rate stress relationship method, long-term strength prediction method based on stress-strain curve, and improved steady-state creep rate stress relationship method, the average long-term strength values of the marble under different solution environments and freeze-thaw cycles is 46.70, 41.21, 39.74, 43.92 and 43.67 MPa, respectively. 3) The long-term strength prediction method based on stress-strain curve does not require time-consuming creep test, and can quickly predict the long-term strength of rocks based solely on the stress-strain curve determined by compression tests. Compared with traditional methods, the improved steady-state creep rate stress relationship method eliminates the strong subjectivity of taking inflection points.

**Key words:** hydration freeze-thaw; marble; creep; long-term strength; instantaneous strength; uniaxial compression test; uniaxial compression creep test

## 0 引言

随着我国基础设施的大力推进,涉及寒区的岩土工程建设活动日益增多<sup>[1]</sup>。寒区岩石受多因素(地下水、冻融、应力、酸雨等)影响,蠕变效应显著<sup>[2]</sup>。岩石蠕变长期强度关系到岩土工程长期稳定性,合理确定长期强度对于研究工程的寿命和安全具有十分重要的意义<sup>[3]</sup>。

目前众多学者开展了岩石蠕变长期强度研究,取得了较多成果,如:Jiang等<sup>[4]</sup>、武东生等<sup>[5]</sup>、刘新喜等<sup>[6]</sup>、李安润等<sup>[7]</sup>、刘凯等<sup>[8]</sup>分别以水化学、高温、冻融循环、饱水-失水循环、温度梯度为控制因素开展了单一因素下的蠕变特性试验,研究岩石长期强度;刘东燕等<sup>[9]</sup>、孙彦峰等<sup>[10]</sup>、Yang等<sup>[11]</sup>、陈卫忠等<sup>[12]</sup>、万亿等<sup>[13]</sup>分别以围压和孔隙水压、含水率和围压、水化-冻融、热-水-力耦合、冻融后不同含水率为控制因素开展了两种及以上因素的蠕变特性试

验,并确定了岩石的长期强度。以上学者多是通过常用方法,如过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法来求取长期强度,此外部分学者对长期强度求取方法进行了创新,丰富了岩石流变力学研究,例如:崔旋等<sup>[14]</sup>提出了基于黏塑性应变率法的长期强度求取方法;袁靖周<sup>[15]</sup>通过蠕变损伤本构模型推导了长期强度预测公式;王军保等<sup>[16]</sup>在传统稳态蠕变速率-应力关系法的基础上,创新地取拟合曲线拐点作为长期强度;赵伦洋等<sup>[17]</sup>基于多尺度摩擦损伤耦合力学模型,建立了硬脆性岩石长期强度解析表达式。

目前,已有长期强度确定方法还存在过于依赖主观性、误差偏大、操作性不强的缺陷,需进一步改进。本文以鄂西北地区某露天边坡大理岩为研究对象,以水化-冻融为控制因素,首先进行单轴压缩试验和单轴压缩蠕变试验,然后利用几种传统方法确定大理岩长期强度并进行对比分析,另外提出了两

种新的长期强度确定方式,以期为水化-冻融耦合作用下大理岩蠕变长期强度及岩体工程寿命研究提供一定参考。

## 1 试验设计及结果

### 1.1 试验设计

以鄂西北地区某露天边坡震旦系下统石门沟组大理岩作为试验对象,钻取岩样后密封运回试验室,制作直径 50 mm×高 100 mm 规格的圆柱试样。本文试验的控制工况为水化-冻融,其中:水化过程是将试样置于水化学(pH 分别为 3、7、11 的酸性、中性、碱性)溶液中浸泡 7 d 至饱和的过程;冻融过程以 0、25、50 和 75 次作为冻融循环次数,以-20~20 ℃为冻融温度范围,冻结、融解时间均设为 4 h。水化-冻融过程完成后,使用 RLW-2000 型压缩蠕变仪,分别进行单轴压缩试验和单轴压缩蠕变试验,蠕变试验轴向荷载初始值为 40 kN(20.37 MPa),增量为 20 kN(10.19 MPa),加载速率为 100 N/s,每级增量荷载持续时间不低于 60 h,待试样破坏后结束蠕变试验,具体试验设置详见文献[2]。

### 1.2 试验结果

大理岩试样单轴压缩试验的结果如图 1 所示。由图 1 可看出:大理岩应力-应变曲线的峰值点即为瞬时强度;在同一溶液环境下,瞬时强度随着冻融循环次数的增加而递减;在同一冻融循环次数下,中性溶液的瞬时强度最大,碱性次之,酸性最小。

大理岩试样在酸性溶液下单轴压缩蠕变试验的结果如图 2 所示。由图 2 可看出,大理岩首先在受荷瞬间表现出瞬时弹性变形,接着逐渐进入衰减、稳定蠕变阶段,当荷载超过某一阈值时,岩样还表现出加速蠕变行为。限于篇幅,本文仅以酸性溶液为例,中性、碱性溶液环境下的试验结果参见文献[2]。

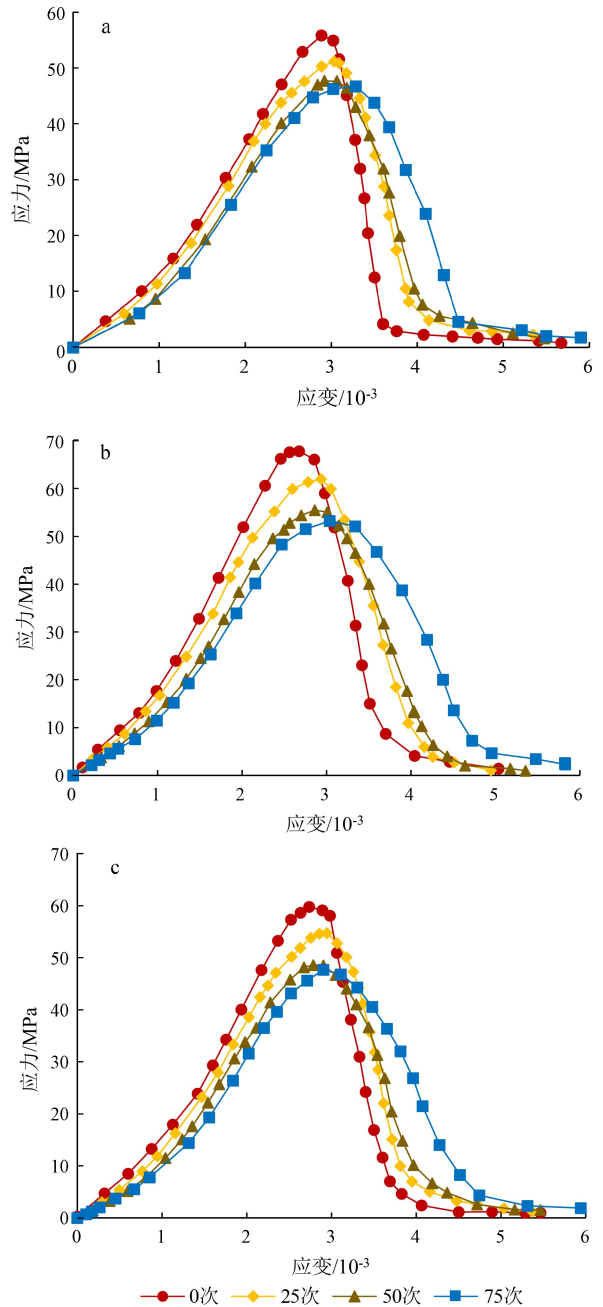
## 2 大理岩长期强度

岩石长期强度关系到岩土工程的长期稳定性,与工程寿命和安全紧密联系[4]。室内试验中有几种常用的求取岩石长期强度  $\sigma_s$  的方法,主要包括过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法和强度-破坏时间关系法。

### 2.1 过渡蠕变法

过渡蠕变法做出如下假定:当应力水平低于某一阈值时,岩石仅表现出衰减蠕变行为;而当荷载作

用超过阈值时,岩石还反映出稳态或加速蠕变行为。该方法将不发生稳态蠕变行为岩石所受最大荷载视为  $\sigma_s$ [5]。观察比较蠕变曲线斜率变化是过渡蠕变法判断长度强度的直接方式,对逐级加载蠕变曲线进行 Boltzmann 线性叠加处理[2,10],以冻融循环 50 次为例,得到分别加载蠕变曲线,如图 3 所示。



a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。

图 1 大理岩试样应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of marble sample

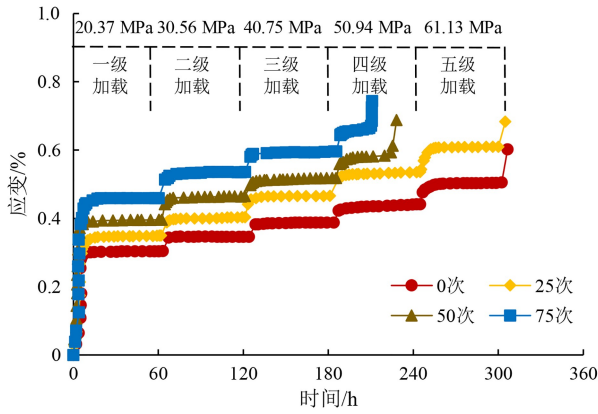


图 2 大理岩试样在酸性溶液下逐级加载蠕变曲线

Fig.2 Progressive loading creep curves of marble sample in acidic solution

由图 3 可看出,最后一级加载下的蠕变曲线较陡,其余加载条件下的蠕变曲线相对平缓。以酸性溶液工况为例(图 3a),1、2、3、4 级加载下蠕变曲线斜率分别为  $7 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-4}$  和  $17 \times 10^{-4}$ ,最后一级蠕变曲线斜率发生突变,按照过渡蠕变法的假定可以认为前三级未发生稳态蠕变;故而将 40.75 MPa 视为本文大理岩在酸性溶液冻融循环 50 次条件下的长期强度。同理可确定其他工况下的长期强度,如表 1 所示。

### 2.2 等时应力-应变曲线簇法

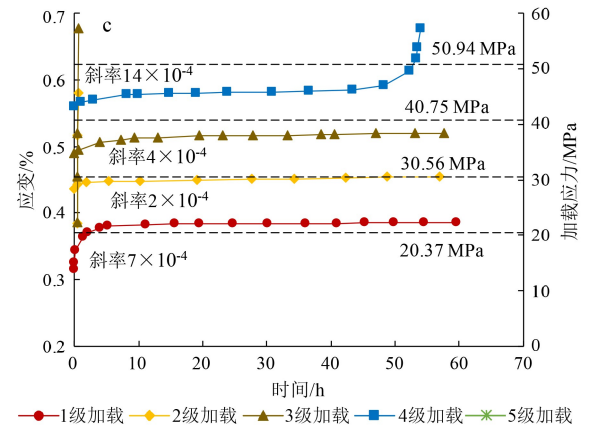
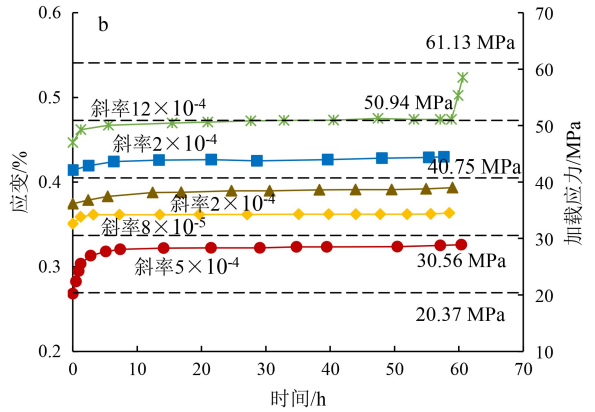
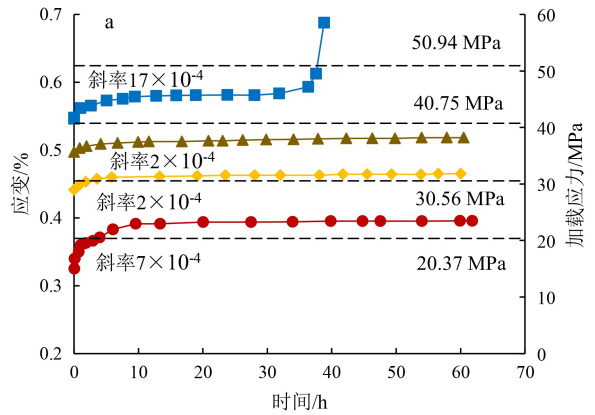
等时应力-应变曲线簇法是通过在曲线簇转折点处取拐点的方式确定长期强度,示意图见图 4。

在图 3 曲线基础上取 0.1、10.0、20.0、30.0、40.0、50.0、60.0 h 时刻点的蠕变数据,经处理后得到等时应力-应变簇曲线,如图 5 所示。限于篇幅,仅以三种溶液环境下冻融循环 50 次为例。

由图 5 可看出,等时应力-应变簇曲线由左侧的近线性段和右侧的非线性段组成,非线性段为不同曲线交织而成的曲线簇,表现出随着加载应力增长而逐渐偏于应变横轴的趋势。通过取拐点的方法确定大理岩在冻融循环 50 次时酸性、中性和碱性条件下的长期强度分别为 38.34、40.72 和 38.87 MPa。同理可得其他工况下的长期强度,见表 2。

### 2.3 稳态蠕变速率-应力关系法

当加载应力未超过岩石  $\sigma_s$  时,岩石绝大多数时期处于稳定蠕变阶段,发生速率几乎为 0 的稳态蠕变;当加载应力超过岩石  $\sigma_s$  时,稳态蠕变速率发生较快增长。拟合稳态蠕变速率与加载应力之间的关系(图 6),限于篇幅,图 6 仅以三种溶液环境下冻融循环 50 次为例。



a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。冻融循环 50 次。

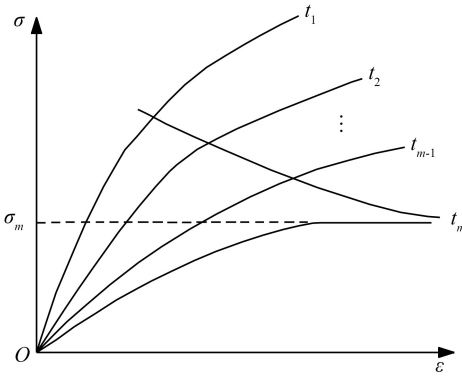
图 3 大理岩试样分别加载蠕变曲线

Fig.3 Separately loaded creep curves of marble sample

表 1 过渡蠕变法确定的大理岩长期强度

Table 1 Long term strength of marble determined by transitional creep method

溶液环境	不同冻融循环次数下的长期强度/MPa			
	0 次	25 次	50 次	75 次
酸性	50.94	50.94	40.75	40.75
中性	50.94	50.94	50.94	40.75
碱性	50.94	50.94	40.75	40.75



σ. 加载应力; ε. 应变;  $t_m$ . 拐点线末端对应时刻点;  $\sigma_m$ .  $t_m$  时刻对应的应力。

图 4 等时应力-应变曲线簇法示意图<sup>[18]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of isochronous stress-strain curves cluster method<sup>[18]</sup>

通过指数和幂函数拟合稳态蠕变速率与加载应力关系曲线,结果见图 6。由图 6 可见,指数函数具有较高的精度, $R^2$  均在 0.980 0 以上。取指数函数切线与应力横轴的交点作为  $\sigma_s$ ,得到冻融循环 50 次条件下酸性、中性、碱性溶液的长期强度分别为 36.38、40.29 和 37.32 MPa。同理可得其他工况下的长期强度,结果见表 3。

2.4 强度-破坏时间关系法

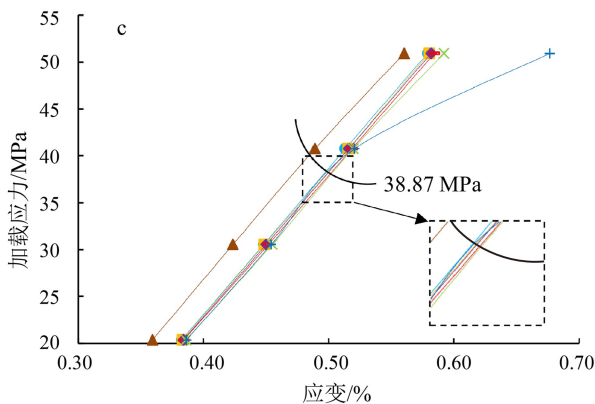
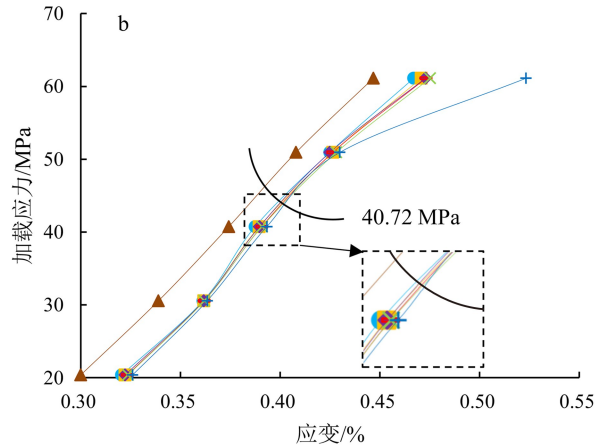
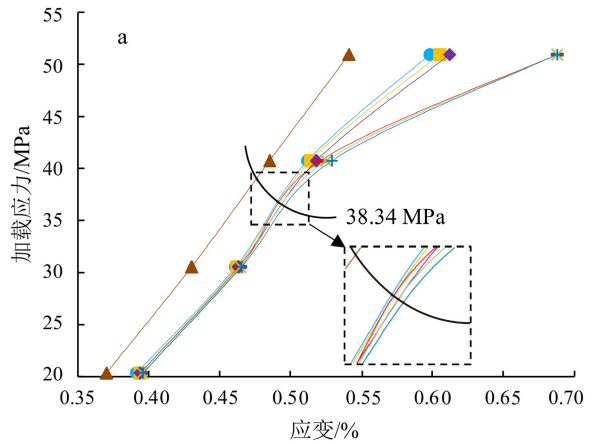
Aubertin<sup>[19]</sup> 基于提出的蠕变破坏时间  $t_f$  和加载应力关系式,类属于强度-破坏时间关系法。

$$t_f = \alpha \left( \frac{\delta_1 + \delta_2}{|\delta_1|} \right)^\beta \quad (1)$$

式中: $\delta_1$  为加载应力和损伤阈值之差; $\delta_2$  为加载应力和瞬时强度之差; $\alpha$  和  $\beta$  为与材料蠕变性能有关的参数。

以酸性溶液冻融循环 50 次条件为例,根据图 1a 和图 3a, 确定  $t_f$  为 38.8 h, 加载应力为 50.94 MPa, 瞬时强度为 47.69 MPa。损伤阈值是指岩石材料损伤快速积累的临界强度,即为  $\sigma_s$ <sup>[20]</sup>, 任取损伤阈值为 36.38 MPa, 将以上参数代入式(1)可得  $\alpha$  和  $\beta$  有无数组解。任意取其中三组解,如: $\alpha_1 = 24.128, \beta_1 = 2.358, \alpha_2 = 51.124, \beta_2 = -1.369, \alpha_3 = 38.956, \beta_3 = -0.019$ , 再以这三组解、 $\delta_2$  和  $\sigma$  为已知值,绘制  $\sigma_s$  与  $t_f$  的关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可看出,三组不同的  $\alpha$  和  $\beta$  取值下长期强度差异较大,长期强度随蠕变破坏时间表现出不同的变化规律,并且  $\alpha$  和  $\beta$  取值有无数组解,故不能得出合理的长期强度值。可见该种方案存在一定局限性。



a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。冻融循环 50 次。

图 5 等时应力-应变簇曲线

Fig.5 Isochronous stress-strain cluster curves

卡恰诺夫<sup>[21]</sup> 提出了材料在一维条件下的蠕变损伤方程,同样类属于强度-破坏时间关系法。

$$\dot{D}(t) = A \left[ \frac{\sigma}{1 - D(t)} \right]^\nu \quad (2)$$

式中: $D(t)$  为损伤变量,上标圆点表示对时间求一阶导; $A$  和  $\nu$  为材料参数。

表 2 等时应力-应变曲线簇法确定的长期强度

Table 2 Long-term strength determined by the isochronous stress-strain curves cluster method

溶液环境	不同冻融循环次数下的长期强度/MPa			
	0 次	25 次	50 次	75 次
酸性	42.53	40.17	38.34	37.94
中性	46.37	44.06	40.72	40.17
碱性	44.56	42.28	38.87	38.51

表 3 稳态蠕变速率-应力关系法确定的长期强度

Table 3 Long-term strength determined by the relationship between steady-state creep rate and stress method

溶液环境	不同冻融循环次数下的长期强度/MPa			
	0 次	25 次	50 次	75 次
酸性	40.39	38.12	36.38	35.96
中性	45.47	43.51	40.29	39.40
碱性	42.71	40.46	37.32	36.85

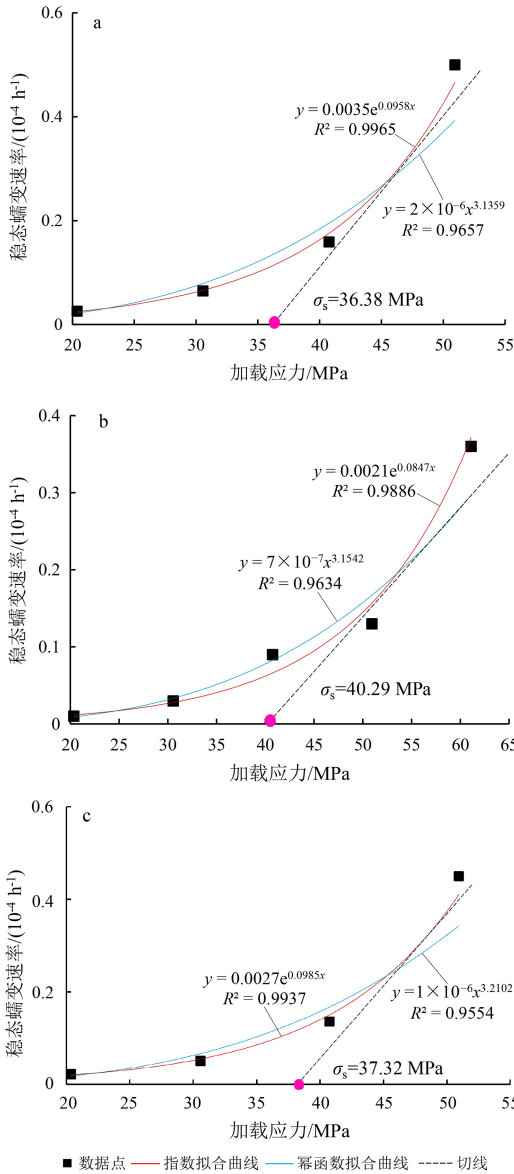


图 6 稳态蠕变速率-加载应力关系曲线

Fig.6 Steady state creep rate versus loading stress curves

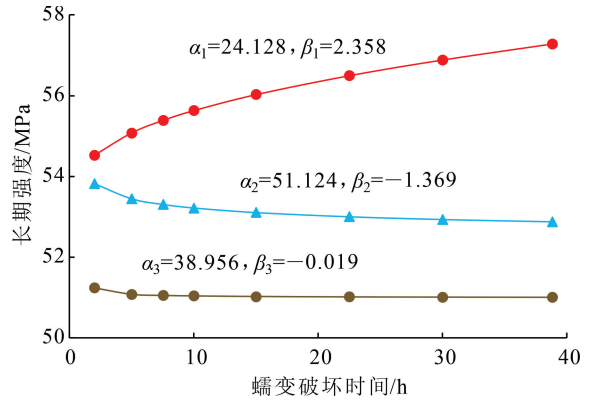


图 7 长期强度-蠕变破坏时间的关系曲线

Fig.7 Relationship curves between long-term strength and creep failure time

对式(2)积分可得

$$t_f = [A(\nu + 1)\sigma^\nu]^{-1} \quad (3)$$

以酸性溶液冻融循环 50 次条件为例,最后一级加载应力为 50.94 MPa,  $t_f$  为 38.8 h, 可求得  $A$  和  $\nu$  有无数组解。实际上,这里与 Aubertin 等<sup>[19]</sup>提出的方法存在同样的问题,无数组解会有不同的情况,说明该方法不适用于本文。

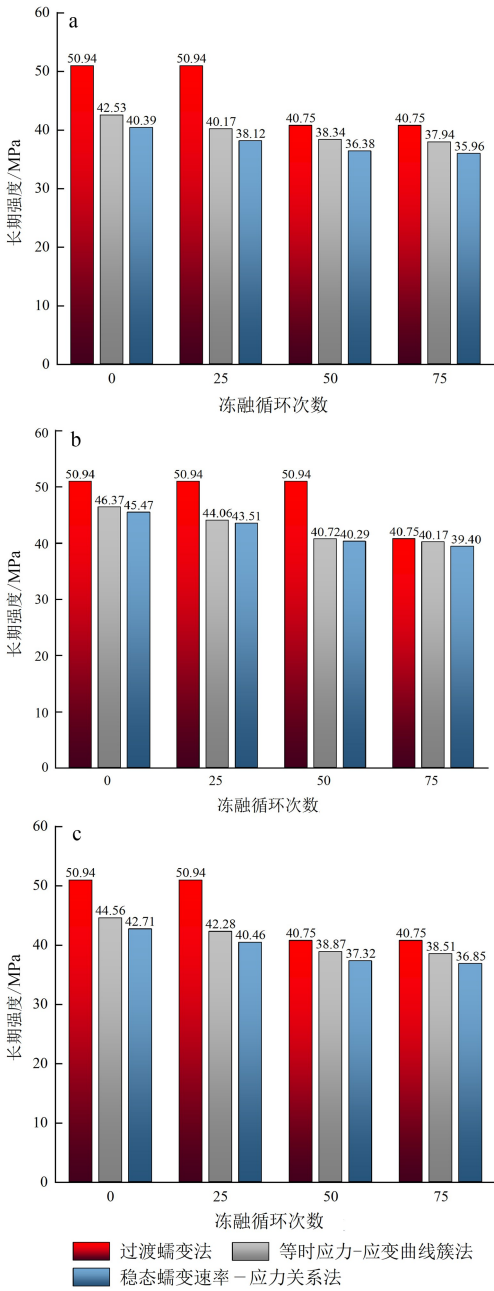
尽管通过 Aubertin 等<sup>[19]</sup>、卡恰诺夫<sup>[21]</sup>提出的方法未得到长期强度确切值,但该方法为认识岩石材料强度与破坏时间之间的关系提供了一定参考。

### 2.5 不同方法确定的长期强度对比

通过过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法得到了大理岩在不同工况下的长期强度(表 1—3),对比结果如图 8 所示。

由图 8 可看出:过渡蠕变法确定的  $\sigma_s$  最大,另外两种方法确定的  $\sigma_s$  较小且较为接近;这三种方法确定  $\sigma_s$  从大到小依次为过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法。

分别以酸性溶液(四种冻融循环次数)、冻融循环 50 次(三种溶液)为基准,将某种对比情形下的长



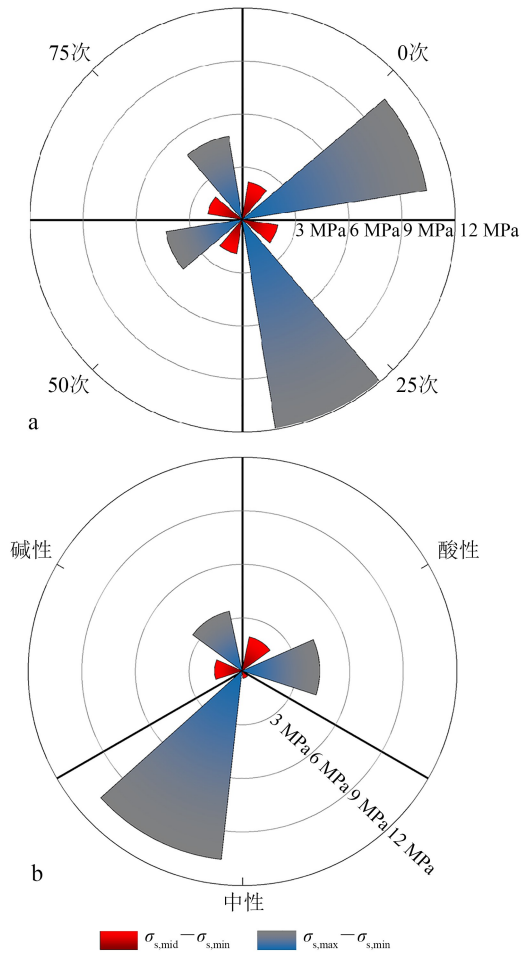
a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。

图 8 不同方法、不同工况下长期强度对比

Fig. 8 Comparison of long-term strength under different methods and operating conditions

期强度最大值、中间值和最小值分别命名为  $\sigma_{s,max}$ 、 $\sigma_{s,mid}$  和  $\sigma_{s,min}$ ，与过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法分别对应，进行差值分析对比不同长期强度确定方法，结果如图 9 所示。

由图 9a 可看出：在酸性溶液环境下，冻融循环 0 次和 25 次时， $\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}$  较大，超过了 9 MPa，冻融循环 50 次和 75 次时， $\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}$  相对较小，低



a. 酸性溶液; b. 冻融循环 50 次。

图 9 不同长期强度确定方法对比

Fig. 9 Comparison of different methods for determining long-term strength

于 6 MPa；酸性溶液下四种冻融环境次数下  $\sigma_{s,mid} - \sigma_{s,min}$  相差不大，均低于 3 MPa。

由图 9b 可看出：在冻融循环 50 次条件下，中性溶液  $\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}$  最大，达 10.65 MPa，酸性溶液  $\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}$  次之，为 4.37 MPa，碱性溶液  $\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}$  最小，为 3.43 MPa；冻融循环 50 次条件下三种溶液环境下的  $\sigma_{s,mid} - \sigma_{s,min}$  相差不大，均低于 3 MPa，其中在中性溶液下该值最小。

过渡蠕变法完全依靠加载应力梯度设计，若设置的加载等级少，会导致  $\sigma_s$  误差较大；本文蠕变试验加载等级为 4—5 级，利用该方法确定的  $\sigma_s$  误差较大，理论上最大误差可能达到一个加载梯度 10.19 MPa。结合图 8 分析，过渡蠕变法与另两种方法差异甚大，完全受加载梯度控制，在本文及类似试

验中不适用,但可作为辅助判断依据。

等时应力-应变曲线簇法需先根据分别加载蠕变曲线择取不同时刻蠕变数据点,再绘制出等时应力-应变曲线簇,在曲线簇取拐点确定  $\sigma_s$ 。不同类型岩石在不同外界因素下等时应力-应变曲线簇的拐点可能不明显,例如图 5c 的拐点便不明显,因取拐点的过程实际上具有一定主观臆测性,多依赖经验,可能造成较大误差,这是该方法的弊端。

稳态蠕变速率-应力关系法优点是操作较简单,但若岩石最后一级加载下稳态蠕变持续时间较短或发展不明显,可能会影响到稳态蠕变速率的确定,导致拟合曲线切点与横轴截距偏小,造成  $\sigma_s$  偏小。

### 3 大理岩长期强度求取方法改进

#### 3.1 基于应力-应变曲线的长期强度预测方法

Martin 等<sup>[22]</sup> 研究发现,硬脆性岩石承受压缩荷载后,其应力-应变关系可分为裂纹闭合、线弹性、稳定裂纹扩展、不稳定裂纹扩展四个阶段,这四阶段分别对应裂纹闭合应力  $\sigma_{cc}$ 、裂纹初始应力  $\sigma_{ci}$ 、裂纹损伤应力  $\sigma_{cd}$  和峰值强度  $\sigma_f$ ,其中  $\sigma_{cd}$  可视为硬脆性岩石的长期强度  $\sigma_s$ 。

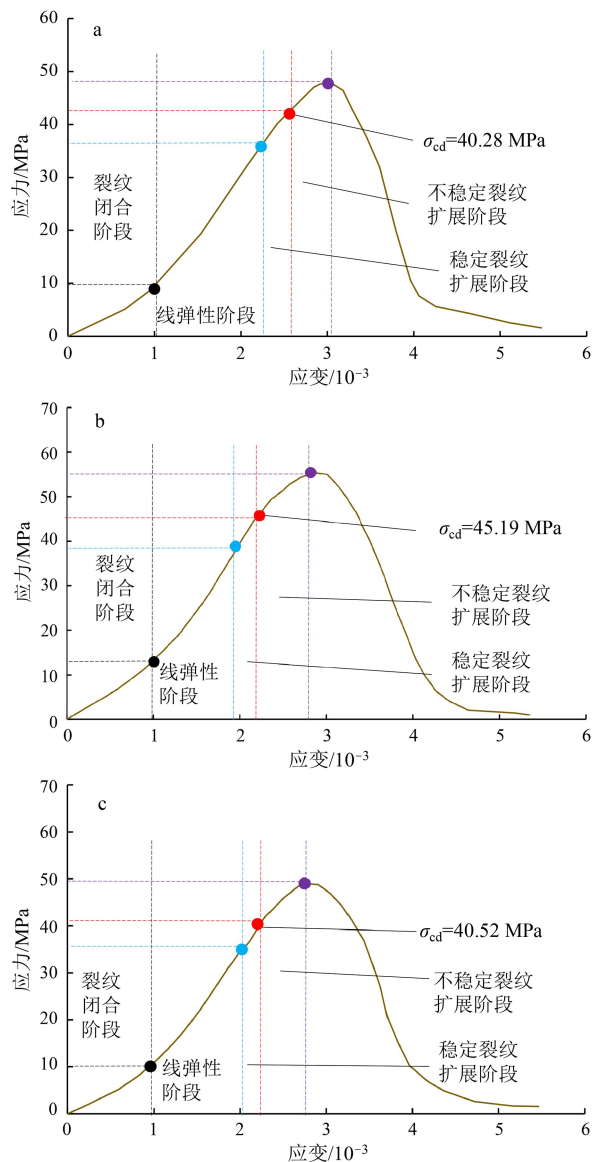
基于 Martin 等<sup>[22]</sup> 研究成果,本文提出直接在大理岩应力-应变曲线中根据曲线形态划分阶段,以此确定长期强度,称之为基于应力-应变曲线的长期强度预测方法。以冻融循环 50 次为例,结果见图 10。

由图 10 可看出,采用基于应力-应变曲线的长期强度预测方法,可确定冻融循环 50 次酸性、中性、碱性溶液条件下大理岩  $\sigma_s$  分别为 40.28、45.19 和 40.52 MPa,结果介于改进稳态蠕变速率-应力关系法和过渡蠕变法之间。该方法的优点是无需开展耗时较长的蠕变试验,仅通过压缩试验确定的应力-应变曲线便可快速预测岩石长期强度,缺点是应力-应变曲线阶段划分依赖经验,具有一定主观性。

#### 3.2 改进的稳态蠕变速率-应力关系法

长期强度的合理确定关系到工程岩体的长期稳定性,是工程实践中不可忽视的环节。王军保等<sup>[16]</sup> 在稳态蠕变速率-应力关系法的基础上,将拟合曲线切线与应力横轴取交点改为拟合曲线取拐点,但这样取拐点的方式无法规避主观性太强的缺陷。

本文在稳态蠕变速率-应力关系法的基础上,首先选择高拟合精度曲线,然后在曲线两侧取切线,将



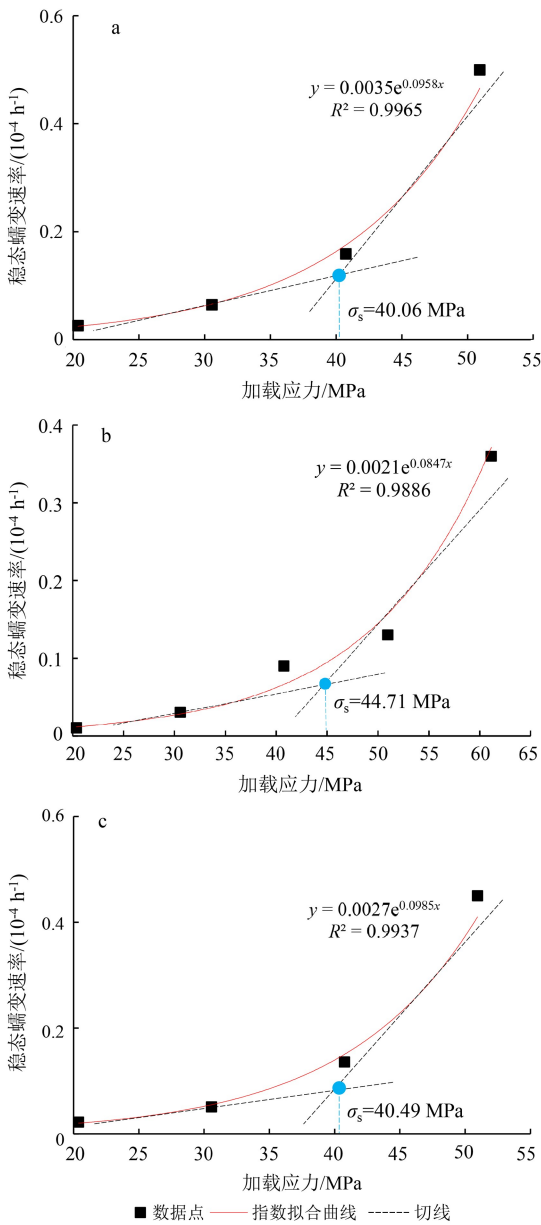
a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。冻融循环 50 次。

图 10 大理岩应力-应变曲线阶段划分

Fig.10 Stage division of stress-strain curves for marble

两条切线的交点在应力横轴的投影点作为  $\sigma_s$ , 如图 11 所示。该方法即为改进的稳态蠕变速率-应力关系法。限于篇幅,图 11 仅以三种溶液环境下冻融循环 50 次为例。

由图 11 可看出,通过改进的稳态蠕变速率-加载应力关系法确定冻融循环 50 次酸性、中性、碱性溶液条件下大理岩  $\sigma_s$  分别为 40.06、44.71 和 40.49 MPa,结果介于过渡蠕变法和等时应力-应变曲线簇法所求取的  $\sigma_s$  值之间,同理可得其他工况下的  $\sigma_s$ 。该方法的优点是操作简单,杜绝了取拐点方式的较强主观性。



a. 酸性溶液; b. 中性溶液; c. 碱性溶液。冻融循环 50 次。

图 11 改进的稳态蠕变速率-加载应力关系法

Fig.11 Improved method for the relationship between steady-state creep rate and loading stress

### 3.3 推荐长期强度求取方法及与瞬时强度对比

鉴于改进的稳态蠕变速率-加载应力关系法操作简单,且克服了过渡蠕变法依赖加载梯度、等时应力-应变曲线簇法取拐点主观性强、传统稳态蠕变速率-应力关系法确定  $\sigma_s$  偏小的缺陷,本文推荐改进的稳态蠕变速率-加载应力关系法作为求取大理岩  $\sigma_s$  的方法,此外,推荐本文提出的基于应力-应变曲线的预测方法用于岩石  $\sigma_s$  快速预测方法。

综合三种常规方法和两种改进后方法得到的  $\sigma_s$ ,发现在同一溶液环境下大理岩的  $\sigma_s$ 随着冻融循环次数的增大而递减,在同一冻融循环次数下, $\sigma_s$ 从大小依次为中性、碱性、酸性。

统计改进的稳态蠕变速率-加载应力关系法得到的  $\sigma_s$ ,绘制长期强度和长期强度与瞬时强度对比(强度比值)曲线,如图 12 所示。由图 12 可看出:当大理岩处于同一溶液环境中,长期强度随着冻融循环次数的增加而递减,强度比值表现出相反的规律;碱性溶液冻融循环 50 次、75 次的长期强度与酸性溶液较为接近,这说明冻融循环作用的加强使得碱性溶液对大理岩的损伤效应愈发接近于酸性溶液。化学溶液、冻融循环作用均会使大理岩力学性能衰减,二者耦合作用加剧了衰减程度。

大理岩在酸性、中性、碱性环境中,强度比值范围分别为 0.795~0.851、0.719~0.830 和 0.770~0.832;这说明水化-冻融耦合作用下,大理岩长期强度折减较大,工程实践中须引起重视。

综合分析,通过过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法、基于应力-应变曲线的长期强度预测方法、改进的稳态蠕变速率-应力关系法得到大理岩在不同溶液环境和冻融循环次数下的长期强度平均值分别为 46.70、41.21、39.74、43.92、43.67 MPa。

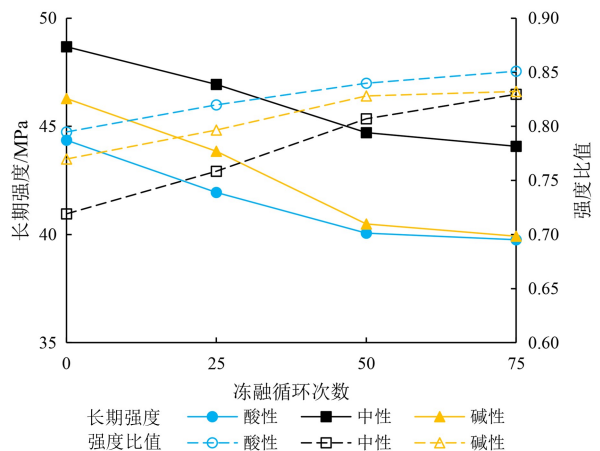


图 12 长期强度与瞬时强度对比曲线

Fig.12 Comparison curves between long-term strength and instantaneous strength

## 4 结论

1)大理岩在同一溶液环境下瞬时及长期强度均

随着冻融循环次数的增大而递减,在同一冻融循环次数下,瞬时及长期强度大小关系均表现为中性、碱性、酸性依次变弱。

2)传统方法中,过渡蠕变法依赖加载应力梯度设计,等时应力-应变曲线簇法取拐点方式的主观性较强,稳态蠕变速率-应力关系法得到的长期强度偏小,而强度-破坏时间关系法难以得到确定的长期强度值。

3)提出两种新方法:基于应力-应变曲线的长期强度预测方法,先根据曲线形态划分阶段,再取稳定裂纹扩展对应的裂纹损伤应力作为长期强度,无需开展耗时较长的蠕变试验即可确定;改进的稳态蠕变速率-应力关系法,改进为在曲线两侧取切线,将两条切线的交点在应力横轴的投影点作为长期强度,相比传统方法杜绝了取拐点方式的较强主观性。

4)通过过渡蠕变法、等时应力-应变曲线簇法、稳态蠕变速率-应力关系法、基于应力-应变曲线的长期强度预测方法,改进的稳态蠕变速率-应力关系法得到大理岩长期强度平均值分别为46.70、41.21、39.74、43.92、43.67 MPa。

#### 参考文献(References):

[1] 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.

[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] 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.

[4] Jiang A N, Shu A J. Study on Limestone Uniaxial Compression Creep Test with Chemistry-Mechanics Coupling Action[J]. Advanced Materials Research, 2011, 37(8):453-456.

[5] 武东生,孟陆波,李天斌,等.灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):183-191.  
Wu Dongsheng, Meng Lubo, Li Tianbin, et al. Study on Rheological Characteristics and Long Term Strength of Limestone After Triaxial High Temperature Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup.1): 183-191.

[6] 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 Xinxi, Li Shengnan, Xu Zepei, et al. Study on Creep Model of Carbonaceous Shale Under Freeze-Thaw Cycle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 137-145.

[7] 李安润,邓辉,王小雪,等.饱水-失水循环条件下红层泥岩蠕变特性及本构模型研究[J].工程地质学报,2021,29(3):843-850.  
Li Anrun, Deng Hui, Wang Xiaoxue, et al. Study on Creep Characteristics and Constitutive Model of Red Mudstone Under Saturation Loss Cycle Conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 843-850.

[8] 刘凯,余宏波,王焱,等.热-力耦合作用下花岗岩蠕变损伤模型[J].科学技术与工程,2021,21(22):9526-9532.  
Liu Kai, Yu Hongbo, Wang Yan, et al. Creep Damage Model of Granite Under Thermal Mechanical Coupling[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9526-9532.

[9] 刘东燕,蒋海飞,李东升,等.高围压高孔隙水压作用下岩石蠕变特性[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):1916-1923.  
Liu Dongyan, Jiang Haifei, Li Dongsheng, et al. Creep Characteristics of Rocks Under High Confining Pressure and High Pore Water Pressure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 1916-1923.

[10] 孙彦峰,李永辉.含水率及围压对砂岩蠕变特性影响的试验研究[J].实验力学,2018,33(1):159-166.  
Sun Yanfeng, Li Yonghui. Experimental Study on the Influence of Water Content and Confining Pressure on the Creep Characteristics of Sandstone[J]. Journal of

- Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 159 - 166.
- [11] Yang X, Jiang A, Li M. Experimental Investigation of the Time-Dependent Behavior of Quartz Sandstone and Quartzite Under the Combined Effects of Chemical Erosion and Freeze-Thaw Cycles[J]. Cold Regions Science & Technology, 2019, 161:51 - 62.
- [12] 陈卫忠, 李翻翻, 雷江, 等. 热-水-力耦合条件下黏土岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 379 - 388.
- Chen Weizhong, Li Fanfan, Lei Jiang, et al. Study on Creep Characteristics of Clay Rock Under Thermal Hydromechanical Coupling Conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 379 - 388.
- [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. Study on Triaxial Creep Characteristics and Damage Model of Red Sandstone with Different Water Contents After Freeze-Thaw [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1463 - 1472.
- [14] 崔旋, 余成学. 推断岩石长期强度的黏塑性应变率法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3899 - 3904.
- Cui Xuan, She Chengxue. Study on Viscoplastic Strain Rate Method for Inferring Long Term Strength of Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup.2): 3899 - 3904.
- [15] 袁靖周. 一种新的岩石长期强度确定方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(3): 74 - 78.
- Yuan Jingzhou. A New Method for Determining Long-Term Rock Strength[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(3): 74 - 78.
- [16] 王军保, 刘新荣, 宋战平, 等. 基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2446 - 2459.
- Wang Junbao, Liu Xinrong, Song Zhanping, et al. A Whole Process Creep Model of Salt Rock Under Uniaxial Compression Based on Inverse S-Function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2446 - 2459.
- [17] 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. Multiscale Damage Creep Model and Long-Term Strength Study of Hard Brittle Rocks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3071 - 3080.
- [18] 陈宗基. 对我国土力学、岩体力学中若干重要问题的看法[J]. 土木工程学报, 1963(5): 24 - 30.
- Chen Zhongji. Opinions on Several Important Issues in China's Land Mechanics and Rock Mass Mechanics [J]. China Civil Engineering Journal, 1963(5): 24 - 30.
- [19] Aubertin M, Li L, Simon R. A Multiaxial Stress Criterion for Short- and Long-Term Strength of Isotropic Rock Media [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(8): 1169 - 1193.
- [20] 赵娜. 岩石蠕变破裂多尺度演化机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- Zhao Na. Research on Multiscale Evolution Mechanism of Rock Creep Rupture [D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2019.
- [21] 卡恰诺夫 JIM. 塑性理论基础[M]. 2 版. 北京: 人民教育出版社, 1982.
- Kachanov JI M. Fundamentals of Plastic Theory [M]. 2nd ed. Beijing: People's Education Press, 1982.
- [22] Martin C D, Chandler N A. The Progressive Fracture of Lacdu Bonnet Granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 643 - 659.