



砂岩冻结/解冻过程蠕变特性研究

宋勇军, 操警辉, 程柯岩, 杨慧敏, 毕冉, 张琨

Creep characteristics of sandstone during freezing/thawing process

SONG Yongjun, CAO Jinghui, CHENG Keyan, YANG Huimin, BI Ran, and ZHANG Kun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309059>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing–thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96–104

滑带土蠕变过程及微观结构演化分析

Creep process and the microstructural evolution of sliding –zone soil

周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 祝艳波, 宋飞 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 115–121

红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71–71

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137–143

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing–thawing action

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57–65

高含水量冻粉黏土应力–应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress–strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116–124



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309059](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309059)

宋勇军, 操警辉, 程柯岩, 等. 砂岩冻结/解冻过程蠕变特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 93-103.
SONG Yongjun, CAO Jinghui, CHENG Keyan, et al. Creep characteristics of sandstone during freezing/thawing process[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 93-103.

砂岩冻结/解冻过程蠕变特性研究

宋勇军¹, 操警辉¹, 程柯岩², 杨慧敏¹, 毕冉¹, 张琨¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 中冶地集团西北岩土工程有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 寒区岩体长期经受荷载与冻融的共同作用, 若不考虑冻融过程对其长期力学行为的影响, 将会给寒区工程建设和安全运营带来重大的安全隐患。为此, 以寒区某边坡工程砂岩为研究对象, 通过开展不同冻结温度下的冻结/解冻过程单轴分级加载蠕变试验, 使岩石在同一应力状态下处于冻结和解冻过程, 真实再现寒区工程岩体长期力学响应特征。以此研究冻结/解冻过程对岩体长期力学特性的影响, 并对其蠕应变、稳态蠕变速率及长期强度等宏观力学指标进行量化分析。结果表明: (1)砂岩冻结过程先后经历冷缩阶段、冻胀阶段和稳态蠕变阶段, 解冻过程只经历融缩阶段和稳态蠕变阶段; 冷缩阶段和融缩阶段砂岩发生收缩变形, 冻胀阶段则发生膨胀变形; (2)冻结/解冻温度为-5 °C/25 °C、-10 °C/25 °C、-15 °C/25 °C时, 砂岩蠕应变较常温状态下蠕应变增幅范围分别为102%~193%、81%~126%、105%~194%, 解冻后稳态蠕变速率较冻结前最大增长3.65倍、4.31倍、5.56倍, 冻结/解冻过程蠕变砂岩的长期强度是常温状态下长期强度的96.33%、88.52%、75.44%; (3)应力对冷缩、冻胀变形的产生起抑制作用而对融缩变形的产生起促进作用; 冻结温度越低, 冻胀变形和解冻后融缩变形越明显。文章提出的将蠕变与冻融过程相结合的试验方法能较为真实地反映工程实际, 该方法为寒区岩体工程长期稳定性评价提供新途径。

关键词: 蠕变特性; 冻结/解冻过程; 冷缩应变; 冻胀应变; 融缩应变

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0093-11

Creep characteristics of sandstone during freezing/thawing process

SONG Yongjun¹, CAO Jinghui¹, CHENG Keyan², YANG Huimin¹, BI Ran¹, ZHANG Kun¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. China Metallurgical Group Northwest Geotechnical Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: The rock mass in cold regions is always subjected to the load and freeze-thaw. If the impact of long-term freeze-thaw mechanical behavior on sandstone mass is neglected, it would lead to significant hazards to the construction and safe operation of engineering in cold regions. This study focused on the sandstone from a slope engineering in the cold region. The realistic long-term mechanical response characteristics of engineering rocks in cold regions was presented by uniaxial graded loading creep tests for the freezing/thawing process at different freezing temperatures and the same stress state. Then the effect of the freezing/thawing process on the long-term

收稿日期: 2023-09-26; 修订日期: 2024-02-01

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11972283; 42277182)

第一作者: 宋勇军(1979—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。

E-mail: songyj79@xust.edu.cn

通讯作者: 操警辉(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: mprudence@163.com

mechanical properties of the rock mass was investigated, and the macroscopic mechanical indexes, such as creep strain, steady-state creep rate, and long-term strength, were analyzed quantitatively. The results indicate that sandstone undergoes the stages of cold shrinkage, frost heave, and steady-state creep during the freezing process, and the stages of thaw consolidation and steady-state creep during the thawing process. Sandstone shrinkage deformation occurs during the cold shrinkage and thawing stages, while expansion deformation occurs during the frost heave stage. At freezing/thawing temperatures of $-5^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$, $-10^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$, and $-15^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$, compared to the creep strains at room temperature, the creep strains of the sandstone are amplified by 102%–193%, 81%–126%, and 105%–194%, respectively. The steady-state creep rate after thawing increases by 3.65, 4.31, and 5.56 times compared to the steady-state creep rate at room temperature. The long-term strength of the sandstones in the frozen/thawed state are 96.33%, 88.52%, and 75.44% of the long-term strength at room temperature, respectively. Stress inhibits the generation of cold shrinkage and freezing deformations and promotes the generation of thawing deformations. The freezing temperature affects frost heave deformation and thaw shrinkage deformation after thawing. As the freezing temperature decreases, the deformation increases. A test method combining creep with freeze-thaw processes has been proposed in the study, which can characterize the real engineering condition. This study provides a new method to evaluate the long-term stability of rock mass engineering in cold regions.

Keywords: creep characteristics; freezing/thawing process; cold shrinkage strain; frost heave strain; melting shrinkage strain

寒区岩质边坡等岩体工程长期暴露于自然环境下受冻融循环、雨水侵蚀、开挖开采等作用的共同影响^[1], 极易发生各类地质灾害和工程事故^[2–3]。例如, 2013年3月29日, 我国西藏甲玛矿区内泽日山发生山体滑坡, 造成200多万方边坡塌方、83名现场作业人员被埋的特大工程事故。究其事故原因, 是长期冻融作用导致岩体强度劣化^[4], 加之事发当月多次降雪, 融雪渗透加剧了岩体稳定性降低^[5], 并在开挖开采作用下引发岩体失稳所致。事实上, 寒区岩体工程不仅遭受冻融循环作用导致力学性质劣化^[6], 而且还同时经受荷载长期作用引起的蠕变变形和强度降低等考验^[7]。因此探究冻结/解冻作用下岩石的时效力学特性对于寒区岩体工程的建设及安全运营具有重要价值^[8]。

很多学者针对低温冻结状态下岩石长期力学特性开展了大量研究, 如, 宋勇军等^[9]研究了低温环境下红砂岩蠕变特性以及冻结温度对岩石蠕变特性的影响; 单仁亮等^[10]研究了低温状态下节理倾角对红砂岩蠕变特性的影响, 并建立了描述冻结层状红砂岩蠕变特性的理论模型; Yang等^[11]研究了不同含水率红砂岩低温环境下蠕变力学性能; Bai等^[12]对低温状态下含冰单裂隙红砂岩进行三轴蠕变试验, 建立了能够描述含冰单裂隙冻结红砂岩蠕变特性的损伤模型; 刘晓燕等^[13]研究了冻结状态下褐色泥岩加速蠕变特性, 并优化了更适用于描述冻结褐色泥岩非线性加速蠕

变特性的西元模型。

上述有关冻结岩石蠕变特性研究表明, 低温状态下岩石内部孔隙水冻结成冰导致其强度、弹性模量增大, 抵抗变形能力增强^[9]。而事实上, 寒区岩体工程不可能长期处于冻结状态, 恶劣的自然环境带来的巨大温差, 使岩体工程无法避免的要经历冻融循环作用^[14], 相对低温冻结作用而言, 开展冻融循环作用下岩体的长期力学特性研究对岩体工程建设及运营更有意义。

为揭示冻融后岩体的长期力学特性, 众多学者根据岩体受荷状态, 采用单轴^[15–16]、三轴^[17–18]、卸荷^[19]、剪切^[20]、加卸载^[21]等试验方法对冻融后岩石进行蠕变特性研究, 结果表明冻融作用对岩石长期力学性能影响显著: (1)冻结温度越低, 解冻后岩石蠕变量和蠕变速率增大; (2)冻融次数增加, 岩石破坏强度、长期强度等有明显降低趋势。

然而, 现有的研究都是将冻结/解冻作用与加载过程割裂开的, 先将岩石进行冻融处理而后开展力学试验。但实际寒区工程岩体是在经受荷载长期作用的同时受到冻结/解冻循环作用, 而冻结/解冻过程对岩石蠕变特性带来的影响是不可忽视的^[22–23]。然而有关该方面的研究尚显不足, 虽然有学者对岩石^[24–25]和受荷膨胀土^[26]经冻融循环作用时的变形规律进行研究, 但这并不能反映出岩石冻结/解冻过程中的蠕变特性。基于此, 本文开展砂岩冻结/解冻过程蠕变试验,

研究岩石在冻结/解冻过程中的蠕变特性,以期为寒区岩体工程的长期稳定性评价及灾害预测预报提供参考。

1 试验方法

1.1 岩样制备

试验所用砂岩取自我国寒区某岩石边坡工程,X射线衍射测试结果显示其主要成分为石英(50.0%)、斜长石(15.7%)、钾长石(11.8%)、蒙脱石(9.7%)、方解石(7.0%)和其他矿物(5.8%)。按国际岩石力学学会试验规程建议方法^[27],对工程现场取回的完整岩块进行钻孔取芯,加工成直径50 mm、高100 mm的标准圆柱体岩样,并对岩样两端进行打磨,保证两端面平行度<0.05 mm,如图1所示。



图1 砂岩岩样

Fig. 1 Rock samples of sandstone

参照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[28],首先剔除视觉上明显差异的岩样,然后将岩样放入烘箱,在恒温105 °C下烘24 h,待其冷却后测得干密度和纵波波速。将选取的岩样置于真空饱和装置中,以0.1 MPa的抽气压力抽气4 h,大气压力下静置4 h。得到岩样的饱和密度、饱和含水率和孔隙度等物理参数,岩样基本物理参数均值见表1。

表1 岩样物理参数均值

Table 1 Average values of physical parameters of sandstone

参数	纵波波速/(m·s ⁻¹)	干密度/(g·cm ⁻³)	饱和密度/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	孔隙度/%
均值	2.272	2.12	2.31	9.01	19.13

1.2 试验装置

力学试验装置采用TAW-1000型微机控制岩石蠕变试验机,该试验机提供最大1 000 kN轴向压力,可实时记录应力、应变等试验数据;轴向应变选用LVDT变形传感器进行监测,其测量范围为±2.5 mm,精度0.001 mm;采用TMS-8018型循环冷浴系统作为压力室温控装置,该系统以酒精作为冷源媒介,酒精温度可

达-40 °C,波动范围±0.2 °C。上述试验装置如图2所示。

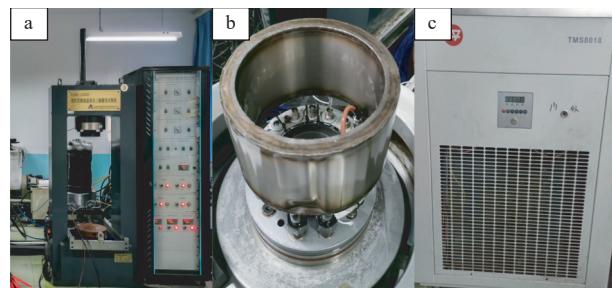


图2 试验装置

Fig. 2 Test equipment

1.3 试验方案

将选取的岩样分为A、B两组并编号,A组饱和岩样进行单轴压缩试验,B组饱和岩样进行常温状态下和冻结/解冻过程分级加载蠕变试验,岩样分组及用途详见表2。砂岩所在地冬季平均气温可达-14.9~-9.4 °C^[29],因此冻结/解冻过程蠕变试验时冻结温度(T_a)分别取-5,-10,-15 °C,解冻温度(T_n)统一设置为25 °C。

表2 岩样分组

Table 2 Rock samples grouping

组别	岩样编号	岩样用途简介	峰值强度/MPa	平均峰值强度/MPa	冻结(解冻)温度/°C
A	A-1		10.05		—
	A-2	单轴压缩	9.82	9.86	—
	A-3		9.72		—
B	B-0	常温蠕变	—		—
	B-1	冻结/解冻	—	—	-5(25)
	B-2	过程蠕变	—	—	-10(25)
	B-3		—		-15(25)

注:—表示无数据;下表相同。

首先开展单轴压缩试验,获得岩样的峰值强度;而后开展单轴分级加载蠕变试验,最后开展冻结/解冻过程单轴分级加载蠕变试验。蠕变试验时,第1级应力水平为平均峰值强度的30%,之后每级应力水平增加15%。

(1) 单轴压缩试验

保持试验室温度为恒温25 °C,对饱和岩样开展单轴压缩试验以此获得岩样应力-应变曲线(图3),通过该批岩样平均峰值强度(σ_c)计算蠕变试验各应力水平下的轴向应力值。

(2) 单轴分级加载蠕变试验

将涂有密封漆的饱和岩样放置压力室,保持压力室温度恒定25 °C。以0.01 MPa/s的速率施加第1级

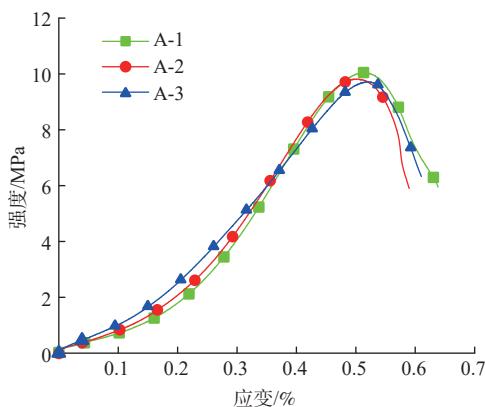


图3 应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves

应力水平进行单轴蠕变试验,当岩样轴向变形稳定或应变变化值小于 0.01 h^{-1} 后加载至下一级应力水平,以此类推逐级进行,直至岩样破坏。

(3) 冻结/解冻过程单轴分级加载蠕变试验

在单轴分级加载蠕变试验的基础上开展冻结/解冻过程蠕变试验。先将拟施加的第1级应力水平设定为峰值强度的30%,待岩样变形趋于稳定或应变变化值低于 0.01 h^{-1} 时,开启低温冷浴循环系统,进行冻结过程蠕变试验。温度降到设定值后,继续观察岩样变形趋于稳定后,关闭冷浴系统(岩样在常温条件下自然解冻),开始解冻过程的蠕变试验,待完全解冻后的岩样变形趋于稳定时,加载至下一级应力水平,变形稳定后再次开启冷浴系统,依此类推逐级进行,直至岩样破坏。冻结/解冻过程蠕变试验流程如图4所示。

2 试验结果

图5(a)为常温状态蠕变与不同冻结温度下的冻结/解冻过程蠕变曲线。通过对比发现,B组岩样在破坏前各应力水平下,其各自蠕变曲线具有相似的应变变化规律。为便于详细描述砂岩冻结/解冻过程蠕变变形特征,选取冻结温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的第1级冻结/解冻过程蠕变曲线绘制典型蠕变曲线图,见图5(b)。

由图5(b)可知,相较于常温状态,冻结/解冻过程对岩石蠕变变形产生显著的影响。文中蠕变曲线以应变压缩方向为正,定义冻结/解冻过程中轴向应变曲线向应变轴正方向发展的趋势为“缩”,向应变轴负方向发展的趋势为“胀”。冻结过程蠕变:初始降温,轴向应变曲线沿应变轴正方向增长但增幅较小,压力室温度达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近时应变急速增至最高点,这表明岩样遇冷产生收缩变形出现冷缩现象,称该阶段为冷缩阶段(A);温度继续降低,轴向应变曲线向应变轴负方

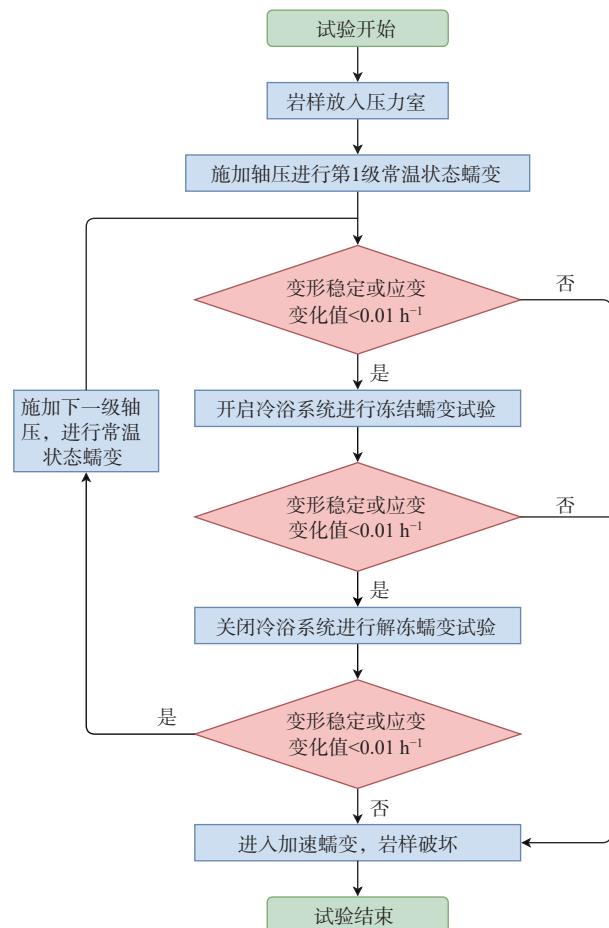


图4 冻结/解冻过程蠕变试验流程图
Fig. 4 Flow chart of creep test during the freezing/thawing process

向下降,继续降温至预定冻结温度后,轴向应变下降速率变缓,直至降至最低点,这表明岩样产生膨胀变形出现冻胀现象,称此阶段为冻胀阶段(B);保持冻结温度恒定,应变曲线沿应变轴正方向缓慢增长,冻结状态岩样出现稳态蠕变现象,称之为冻结稳态蠕变阶段(C)。解冻过程蠕变:升温过程,应变曲线随着温度上升向应变轴正方向快速增长,压力室温度升至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,应变曲线继续增长,但增长趋势在放缓,这表明解冻过程岩石产生了收缩变形出现融缩现象,称此阶段为融缩阶段(D);压力室保持温度恒定 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变曲线沿应变轴正方向缓慢增长,解冻后的岩样出现稳态蠕变现象,称之为解冻后稳态蠕变阶段(E)。

3 分析与讨论

3.1 冻结过程蠕变特性

为更加直观地分析冻结过程岩样冷缩阶段(A)、冻胀阶段(B)与冻结稳态蠕变阶段(C)的变形特性,将

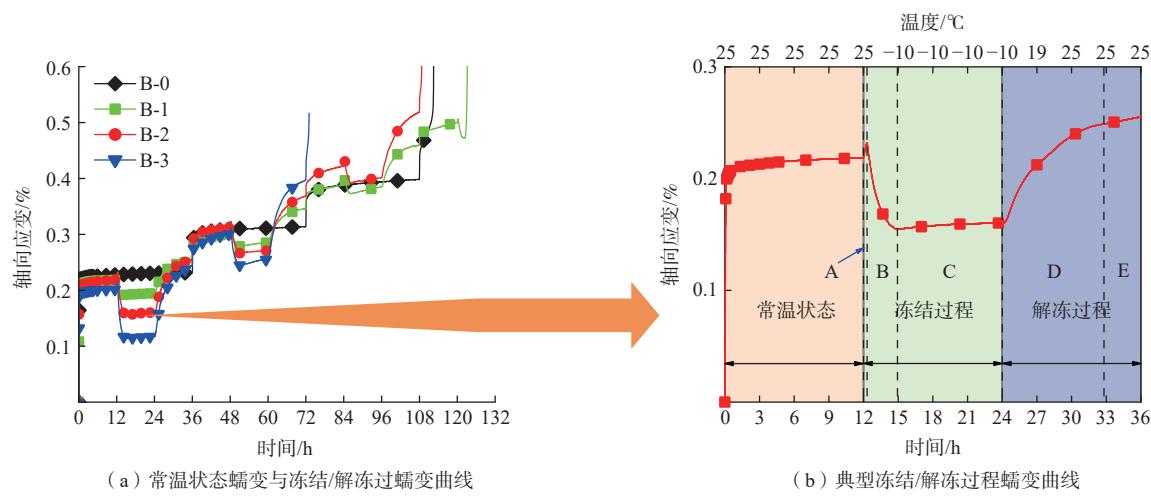


图 5 蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves

典型冻结/解冻过程蠕变曲线(冻结温度为-10 °C)局部放大,如图6所示。冻结过程,即压力室温度从25 °C降至-10 °C这段区间,岩样先产生冷缩现象,这是由于岩石骨架遇冷收缩产生冷缩应变(ε_{cs});而后发生冻胀现象,这是由于内部孔隙水产生水冰相变,导致岩石骨架在冰的挤压下产生冻胀应变(ε_{cd})^[25]。

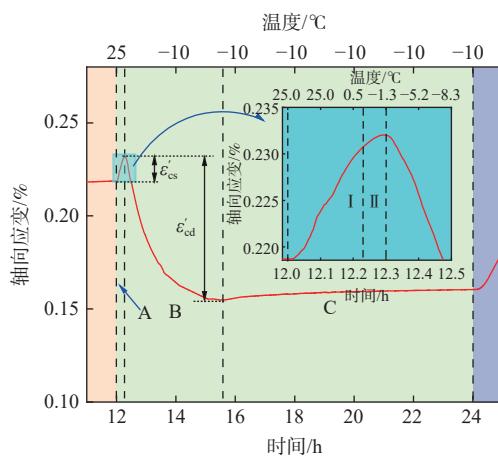


图 6 冻结过程蠕变曲线局部图

Fig. 6 Part of creep curve during freezing

注: ε'_{cs} 为冷缩阶段应变; ε'_{cd} 为冻胀阶段应变。

3.1.1 冷缩阶段

由图6可知,压力室环境温度从25 °C降到-0.1 °C这段温度区间(即图6中的I区间),岩样应变增长较快,这是因为该区间岩样应变形态由冷缩应变 ε_{cs} 主导;压力室环境温度从-0.1 °C到-1.3 °C这段温度区间(即图6中的II区间),岩样应变增长趋势放缓,-1.3 °C时应变达到峰值,这是因为当温度降至孔隙水冰点后岩样产生冻胀应变 ε_{cd} ,随着温度持续降

低,冻胀应变增长速率与冷缩应变增长速率趋于相等,这段降温区间岩样应变形态由 ε_{cs} 与 ε_{cd} 共同主导。

将冷缩阶段应变称为 ε'_{cs} ,如图6所示。图7为冷缩阶段应变变化趋势图,同一应力等级下,不同岩样 ε'_{cs} 不尽相同,除岩样之间孔隙率^[30]、矿物成分^[31]的差异外,还与冻胀应变增长速率有关。同一岩样, ε'_{cs} 随应力水平的增加整体呈下降趋势,这可能是由于在应力的作用下岩石微孔闭合和软弱相被压缩导致岩石可变形结构强度提高^[32],从而导致砂岩冷缩变形能力降低。而B-1试样冷缩阶段应变随应力等级增加先增大后减小这一“特殊现象”可能与岩石内部构造发生改变有关^[25],岩石内部原有的“平衡”被打破,矿物颗粒间的秩序重新排列。当矿物颗粒再次遇冷,岩样冷缩应变较之前增大。

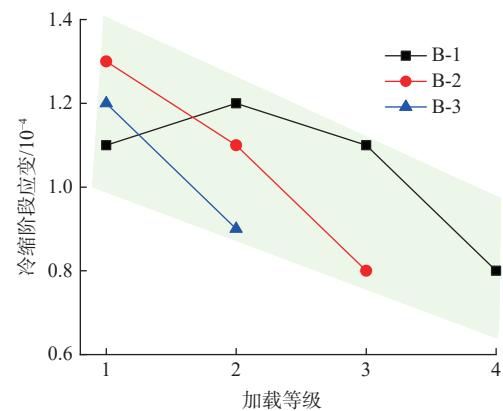


图 7 冷缩阶段应变

Fig. 7 Strain during the cold shrinkage stage

3.1.2 冻胀阶段

压力室环境温度从-1.3 °C降至-10 °C过程,应变

曲线急速下降; 压力室温度保持 -10°C 稳定后, 应变曲线下降速率变缓, 最终降至最低点。冻胀阶段液态孔隙水逐渐冻结为固态冰, 水冰相变体积发生膨胀, 冰体与岩石骨架相互挤压产生冻胀力, 致使岩石骨架产生体积膨胀^[33]。

称冻胀阶段应变为 ε'_{cd} , 如图 6 局部图标注所示。表 3 为不同冻结温度下各加载等级下的 ε'_{cd} , 由表可知: 同一应力水平下, ε'_{cd} 随冻结温度的降低而增大, 如第 1 级轴向应力下, 相对 -5°C , 冻结温度 -10°C 和 -15°C 下的应变分别增长 87.80%、143.90%, 这是因为冻结温度越低, 内部孔隙水冻结程度越高, 导致冻胀现象越明显; 同一冻结温度下, ε'_{cd} 随应力水平增加而减小, 如 -5°C 时, 相对第 1 级轴向应力水平, 第 2 级、第 3 级应力水平下应变分别减小 17.07%、39.02%, 这是因为加载应力水平限制了冻胀变形。

表 3 冻胀阶段应变

Table 3 Strain during the frost heave stage

岩样编号	冻结温度/°C	加载等级		
		1	2	3
B-1	-5	0.041×10^{-2}	0.034×10^{-2}	0.025×10^{-2}
B-2	-10	0.077×10^{-2}	0.057×10^{-2}	0.039×10^{-2}
B-3	-15	0.100×10^{-2}	0.066×10^{-2}	—

3.1.3 冻结稳态蠕变阶段

冻结稳态蠕变阶段(C), 岩样呈现稳态蠕变, 其蠕变变形能力较冻结前降低。因篇幅限制, 仅以冻结温度为 -10°C 、第 1 级加载应力水平下的稳态蠕变速率为例。常温状态下稳态蠕变速率为 $3.76 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 冻结状态下稳态蠕变速率为 $2.58 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 这表明低温冻结作用导致岩石抵御变形能力增强。

3.2 解冻过程蠕变特性

3.2.1 融缩阶段

解冻过程蠕变局部图如图 8(a)所示, 记融缩阶段(D)产生的应变为融缩应变 ε_t 。各应力水平下, 岩样融缩应变见图 8(b), 冻结温度相同, 解冻过程融缩应变随着应力水平增加呈增长趋势, 以 B-1 岩样(冻结温度 -5°C)为例, 第 1 级蠕变时融缩应变为 0.050%, 相对第 1 级应力水平, 第 2、3 级应力水平下产生的融缩应变增幅分别为 14.00%、42.00%; 应力水平相同, 解冻过程融缩应变随冻结温度降低呈增长趋势, 如第 2 级应力水平下, 冻结温度为 -5°C 时, 解冻过程融缩应变为 0.057%; 相对 -5°C , 冻结温度为 -10°C 、 -15°C 时, 解冻过程融缩应变增幅为 50.88%、136.84%。

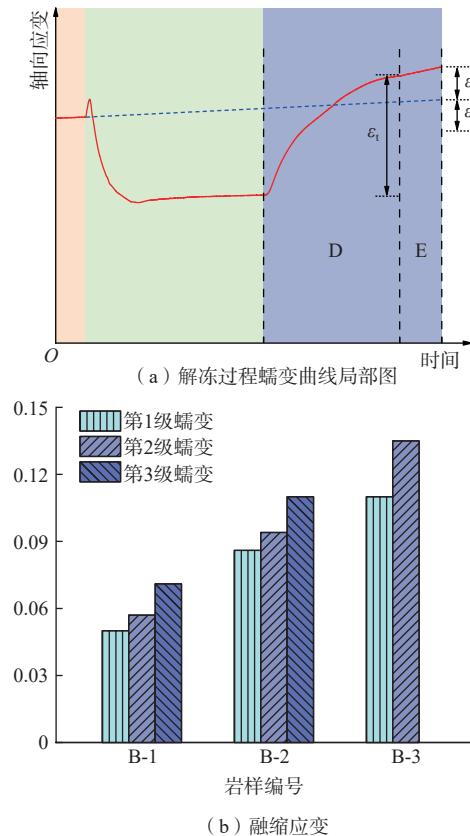


图 8 解冻过程蠕变曲线局部图与融缩应变
Fig. 8 Creep during thawing and melting shrinkage strain

注: (a)图中 ε_{tc} 为融缩蠕应变; ε_c 为常温状态下的蠕应变。

造成上述现象的原因有两方面: 1)冻结过程中冻胀应变随着孔隙冰融解而消失; 2)冻结/解冻作用导致岩石的力学性能发生变化, 其抵御变形能力降低。

3.2.2 解冻后稳态蠕变阶段

各加载等级下解冻后稳态蠕变速率与冻结温度的关系如图 9 所示, 冻结温度对解冻后稳态蠕变速率影响较为明显, 同一应力水平下, 解冻后稳态蠕变速率随冻结温度降低呈增长趋势。如冻结温度为 -5°C , 第 1 级蠕变解冻后稳态蠕变速率为 $4.32 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。相对 -5°C , 冻结温度为 -10°C 和 -15°C 时解冻后稳态蠕变速率增幅分别为 350.93%、481.94%。

3.3 冻结/解冻作用对蠕变特性的影响

3.3.1 冻结/解冻作用对蠕应变的影响

冻结/解冻作用导致岩石力学性能劣化, 相对常温状态, 其蠕变量会不同程度的增加, 增加的这部分蠕变称为融缩蠕应变 ε_{tc} 。融缩蠕应变在蠕变曲线上无明显特征, 但可通过如下方法对融缩蠕应变进行量化。常温状态下, 稳态蠕变阶段岩样蠕变速率在恒定值附近上下微动^[34-35], 若无冻结/解冻作用, 岩样蠕变

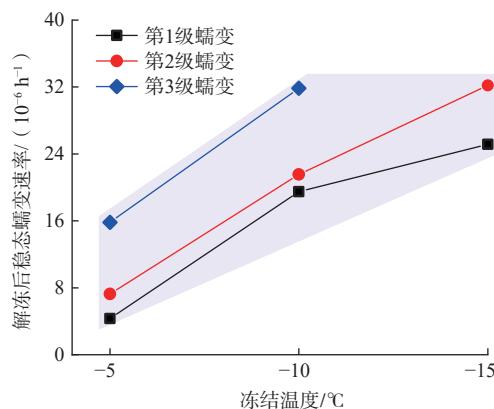


图 9 解冻后稳态蠕变速率与冻结温度的关系

Fig. 9 Relationship between steady-state creep rate after thawing and freezing temperature

曲线以常温状态下稳态蠕变速率进行,如图8(a)中虚线所示。冻结/解冻过程蠕变曲线与常温蠕变曲线的差值即为 ε_{tc} ,见图8(a)标注。表4为各加载等级下的融缩蠕应变 ε_{tc} 和常温状态下的蠕应变 ε_c 。

表 4 蠕应变
Table 4 Creep strain

岩样编号	冻结(解冻)温度/°C	加载等级	$\varepsilon_{tc}/\%$	$\varepsilon_c/\%$
B-1	-5(25)	1	0.029	0.015
		2	0.035	0.028
		3	0.045	0.044
B-2	-10(25)	1	0.029	0.023
		2	0.039	0.041
		3	0.058	0.072
B-3	-15(25)	1	0.033	0.017
		2	0.064	0.061
		3	—	—

ε_{tc} 与 ε_c 的比值(%)表示蠕变过程受冻结/解冻作用后蠕应变的增长率。冻结/解冻温度为-5 °C/25 °C时,第1、2、3级蠕应变相对常温状态下分别增长193%、125%、102%;冻结/解冻温度为-10 °C/25 °C时,蠕应变分别增长126%、95%、81%;冻结/解冻温度为-15 °C/25 °C时,蠕应变分别增长194%、105%。综上所述,岩样蠕变过程受冻结/解冻作用后蠕应变均不同程度大幅增长,冻结/解冻作用促进了岩石的蠕变变形。

3.3.2 冻结/解冻作用对稳态蠕变速率的影响

B-2岩样(冻结温度为-10 °C)第1级应力水平下常温状态、解冻过程蠕变速率如图10所示,由图可知解冻后稳态蠕变速率相对冻结前明显增大。称冻结前稳态蠕变速率为 ε'_c ,解冻后稳态蠕变速率为 $\varepsilon'_{c(F-T)}$,冻结前与解冻后稳态蠕变速率见表5。

岩样解冻后稳态蠕变速率较冻结前稳态蠕变速

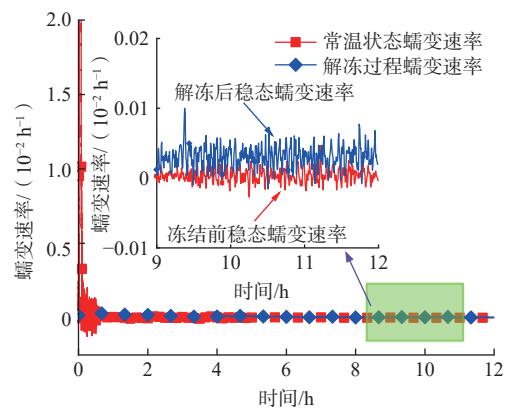


图 10 蠕变速率

Fig. 10 Creep rate

表 5 稳态蠕变速率

Table 5 Creep rate of steady state

岩样编号	冻结(解冻)温度/°C	加载等级	$\varepsilon'_c/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$	$\varepsilon'_{c(F-T)}/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$
B-1	-5(25)	1	0.93	4.32
		2	4.61	7.26
		3	10.93	15.82
B-2	-10(25)	1	3.67	19.48
		2	8.08	21.54
		3	16.10	31.84
B-3	-15(25)	1	3.83	25.14
		2	13.04	32.19
		3	—	—

率不同程度增长,冻结温度为-5 °C,解冻后稳态蠕变速率较冻结前的稳态蠕变速率最大增加3.65倍,最小增加0.45倍;冻结温度为-10 °C,解冻后稳态蠕变速率较冻结前的稳态蠕变速率最大增加4.31倍,最小增加0.98倍;冻结温度为-15 °C,解冻后稳态蠕变速率较冻结前的稳态蠕变速率最大增加5.56倍,最小增加1.47倍。由此可知,蠕变过程受冻结/解冻作用后,岩石稳态蠕变速率不同程度的增加,冻结/解冻作用使岩石的流变特性更加显著。

通过上述分析可知,砂岩蠕变过程经冻融作用后蠕应变和稳态蠕变速率大幅增加,产生这种现象的原因是岩石受冻融循环作用时产生损伤^[36],导致其抵抗变形的能力降低。图11为蠕应变比(冻融作用下蠕应变/常温状态下蠕应变)和稳态蠕变速率比(冻结前稳态蠕变速率/解冻后稳态蠕变速率)与应力水平的变化关系,两者比值随着应力水平的增加而减小。这是因为当岩石受冻融循环作用相当于受轴向拉伸的低周疲劳荷载作用^[37],而轴向应力的存在削弱了冻胀力对岩石骨架的作用^[38],导致岩石骨架因冻融作用产生的损伤减小。

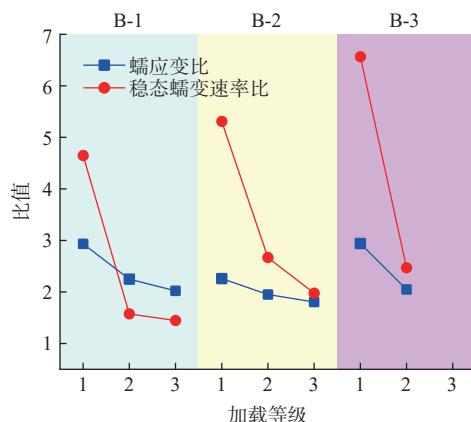


图 11 蠕应变比和稳态蠕变速率比

Fig. 11 Ratio of creep strain and ratio of steady-state creep rate

3.3.3 冻结/解冻作用对长期强度的影响

本文采用等时曲线法^[39]确定岩石的长期强度, 即采用 Boltzmann 原理将蠕变曲线处理成应力-应变等时曲线簇, 则曲线簇由密集变疏松处所对应的应力值即为该岩石的长期强度。以 B-0 岩样为例, 绘制应力-应变等时曲线簇如图 12 所示, 图中曲线簇由密集变疏松处所对应的应力值即为该岩样长期强度(σ_∞)。

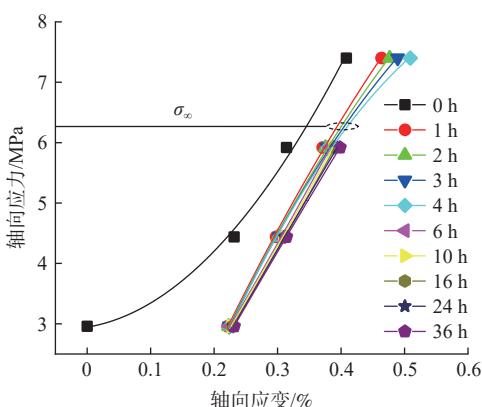


图 12 B-0 岩样的等时曲线簇

Fig. 12 Cluster of isochronous curves of sample B-0

据上述方法, 采用冻结/解冻作用下砂岩(B-1、B-2、B-3)常温阶段蠕变曲线作出应力-应变等时曲线簇, 以此确定冻结/解冻作用下砂岩长期强度, 结果见表 6。其中, σ_∞/σ_c 为长期强度与峰值强度的比值。经温度 $-5\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 冻融作用后, B-1、B-2、B-3 岩样的 σ_∞/σ_c 分别为 0.613、0.563、0.480。另一方面, 经冻融作用后, B-1、B-2、B-3 岩样长期强度是常温状态长期强度的 96.33%、88.52%、75.44%。

上述表明受荷岩体经冻融作用时冻结温度越低, 解冻后的岩体越容易发生失稳破坏, 对工程的长期稳

表 6 长期强度

Table 6 Long term strength

岩样标号	σ_∞/MPa	σ_∞/σ_c
B-0	6.27	0.636
B-1	6.04	0.613
B-2	5.55	0.563
B-3	4.73	0.480

定性更加不利^[40]。冻融循环过程冻结温度降低造成岩石损伤程度增大, 导致长期强度降低。究其原因, 冻结温度降低, 岩石内部孔隙水相变程度增加, 导致砂岩孔隙度增大、颗粒间黏聚力降低, 在较低恒定荷载作用下岩石内部颗粒不断发生变形, 最终发生宏观破坏^[41]。

4 结论

(1) 冻结/解冻过程对岩石蠕变变形产生显著的影响。冻结/解冻过程砂岩先后经历 5 个阶段, 分别为冷缩阶段、冻胀阶段、冻结稳态蠕变阶段、融缩阶段和解冻后稳态蠕变阶段。冷缩阶段与融缩阶段岩样发生收缩变形; 冻胀阶段岩样发生膨胀变形。

(2) 冻结温度和轴向应力是影响冷缩、冻胀和融缩现象的重要因素。同一冻结温度下, 冷缩与冻胀变形随应力水平增加而减小; 同一应力水平下, 冻胀阶段变形随冻结温度的降低而增大。解冻过程蠕变, 融缩变形随冻结温度的降低而增大、随应力水平增大而增大。

(3) 砂岩蠕变过程经 $-5\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}/25\text{ }^\circ\text{C}$ 冻融作用后, 其蠕应变较常温状态下增长范围分别为 102%~193%、81%~126%、105%~194%; 解冻后, 稳态蠕变速率较冻结前最大增加 3.65, 4.31, 5.56 倍, 最小增加 0.45, 0.98, 1.47 倍; 其长期强度与峰值强度比值分别为 0.613, 0.563, 0.480, 是常温状态长期强度的 96.33%、88.52%、75.44%。

参考文献 (References) :

- [1] 谭贤君, 陈卫忠, 伍国军, 等. 低温冻融条件下岩体温度-渗流-应力-损伤(THMD)耦合模型研究及其在寒区隧道中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 239~250. [TAN Xianjun, CHEN Weizhong, WU Guojun, et al. Study of thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) coupled model in the condition of freeze-thaw cycles and its application to cold region tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 239~250. (in Chinese with English abstract)]

English abstract)]

- [2] 铁永波,徐伟,梁京涛,等.川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策 [J].水文地质工程地质,2021, 48(5): 129 – 136. [TIE Yongbo, XU Wei, LIANG Jingtao, et al. Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 129 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘兵,郑坤,王超林,等.冻融环境下基于声发射的砂岩各向异性劣化机理分析 [J].中国地质灾害与防治学报,2024, 35(1): 132 – 142. [LIU Bing, ZHENG Kun, WANG Chaolin, et al. Mechanism analysis on anisotropic degradation of sandstone in freeze thaw environment based acoustic emission[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 132 – 142. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张继周,缪林昌,杨振峰.冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究 [J].[岩石力学与工程学报](#),2008, 27(8): 1688 – 1694. [ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2008, 27(8): 1688 – 1694. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SONG Zhangping, WANG Tong, WANG Junbao, et al. Uniaxial compression mechanical properties and damage constitutive model of limestone under osmotic pressure[J]. [International Journal of Damage Mechanics](#), 2022, 31(4): 557 – 581.
- [6] LUO Xuedong, JIANG Nan, FAN Xinyu, et al. Effects of freeze-thaw on the determination and application of parameters of slope rock mass in cold regions[J]. [Cold Regions Science and Technology](#), 2015, 110: 32 – 37.
- [7] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展 [J].[岩石力学与工程学报](#),2007, 26(6): 1081 – 1106. [SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2007, 26(6): 1081 – 1106. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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-thawing rocks[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2023, 50(6): 69 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等.低温环境下红砂岩蠕变特性及其模型 [J].煤炭学报,2020, 45(8): 2795 – 2803. [SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Creep property and model of red sandstone under low temperature environment[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2020, 45(8): 2795 – 2803. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 单仁亮,白瑶,孙鹏飞,等.冻结层状红砂岩三轴蠕变特性及本构模型研究 [J].中国矿业大学学报,2019, 48(1): 12 – 22. [SHAN Renliang, BAI Yao, SUN Pengfei, et al. Study of triaxial creep mechanical properties and constitutive model of frozen stratified red sandstone[J]. [Journal of China University of Mining & Technology](#), 2019, 48(1): 12 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [11] YANG Xiurong, JIANG Annan, GUO Xinping. Effects of water content and temperature on creep properties of frozen red sandstone: An experimental study[J]. [Bulletin of Engineering Geology and the Environment](#), 2022, 81(1): 51.
- [12] BAI Yao, SHAN Renliang, HAN Tianyu, et al. Study on triaxial creep behavior and the damage constitutive model of red sandstone containing a single ice-filled flaw[J]. [International Journal of Damage Mechanics](#), 2021, 30(3): 349 – 373.
- [13] 刘晓燕,刘路路,闫坤岱.冻结褐色泥岩非线性加速蠕变西原模型优化 [J].[长江科学院院报](#),2017, 34(12): 101 – 105. [LIU Xiaoyan, LIU Lulu, YAN Kunfa. An optimized nishihara model for nonlinear accelerating creep of frozen brown mudstone[J]. [Journal of Yangtze River Scientific Research Institute](#), 2017, 34(12): 101 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [14] GAO Feng, XIONG Xin, XU Chaoshui, et al. Mechanical property deterioration characteristics and a new constitutive model for rocks subjected to freeze-thaw weathering process[J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2021, 140: 104642.
- [15] 任建喜,易归,陈旭,等.人工冻结斜井洛河组砂岩解冻后蠕变模型试验研究 [J].煤矿安全,2022, 53(7): 74 – 81. [REN Jianxi, YI Gui, CHEN Xu, et al. Experimental study on creep failure mechanism of artificially frozen sandstone of Luohe Formation after thawing[J]. [Safety in Coal Mines](#), 2022, 53(7): 74 – 81. (in Chinese with English abstract)]

- [16] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈国庆, 郭帆, 王剑超, 等. 冻融后石英砂岩三轴蠕变特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 203 – 210. [CHEN Guoqing, GUO Fan, WANG Jianchao, et al. Experimental study on triaxial creep characteristics of Shi Ying sandstone after freezing and thawing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup 1): 203 – 210. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蒋婷婷, 潘华利, 艾一帆, 等. 冻融循环及含水率对冰碛土力学特性影响 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 238 – 252. [JIANG Tingting, PAN Huali, AI Yifan, et al. Effect of freeze-thaw cycles and water content on the mechanical properties of moraine soil [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 238 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [19] ZHOU Zhijun, ZHAN Haochen, HU Jiangyang, et al. Characteristics of unloading creep of tuffaceous sandstone in east tianshan tunnel under freeze-thaw cycles [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 7547564.
- [20] 张峰瑞, 姜谙男, 杨秀荣, 等. 冻融循环下花岗岩剪切蠕变试验与模型研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 509 – 519. [ZHANG Fengrui, JIANG Annan, YANG Xiurong, et al. Experimental and model research on shear creep of granite under freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 509 – 519. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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. Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 841 – 849. (in Chinese with English abstract)]
- [22] KANG Yongshui, HOU Congcong, LIU Bin et al. Frost deformation and a quasi-elastic-plastic-creep constitutive model for isotropic freezing rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8): 04020119.
- [23] 李祖勇, 杨更社, 魏尧. 白垩系冻结砂岩解冻过程中蠕变力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1777 – 1788. [LI Zuyong, YANG Gengshe, WEI Yao. Study on creep mechanical properties of frozen Cretaceous sandstone during thawing process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1777 – 1788. (in Chinese with English abstract)]
- [24] PRICK A. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles [J]. CATENA, 1995, 25(1/2/3/4): 7 – 20.
- [25] 王来贵, 高晗, 郭子钰, 等. 受冻融循环作用的砂岩宏观变形特征研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(6): 1113 – 1120. [WANG Laigui, GAO Han, GUO Ziyu, et al. Study on macroscopic deformation characteristics of sandstone subjected to freeze-thaw cycle [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6): 1113 – 1120. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LI Tianguo, KONG lingwei, GUO Aiguo. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 192: 103393.
- [27] FAIRHURST C E, HUDSON J A. 单轴压缩试验测定完整岩石应力-应变全曲线 ISRM 建议方法草案 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 802 – 808. [FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM recommended method for the determination of intact rock stress-strain full curve by uniaxial compression test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 802 – 808. (in Chinese)]
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)]
- [29] 呼枭. 寒区运营隧道冻害防治监测系统及应用 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60(7): 107 – 111. [HU Xiao. The monitoring system for tunnel frost damage prevention and treatment in cold region and its application [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7): 107 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 裴向军, 蒙明辉, 袁进科, 等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1999 – 2006. [PEI Xiangjun, MENG Minghui, YUAN Jinke, et al. Freezing-thawing characteristics of fractured rockmass

- under dry and saturated conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1999 – 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 李高山, 贺义兴, 严寿鹤, 等. 矿物并不都是热胀冷缩[J]. *矿物岩石*, 1983, 3(2): 62 – 70. [LI Gaoshan, HE Yixing, YAN Shouhe, et al. Not all minerals expand on heating and contract on cooling[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1983, 3(2): 62 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 范秋雁, 阳克青, 王渭明. 泥质软岩蠕变机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(8): 1555 – 1561. [FAN Qiuyan, YANG Keqing, WANG Weiming. Study of creep mechanism of argillaceous soft rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(8): 1555 – 1561. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 张广泽, 陈国庆, 简大华, 等. 不同温降速率下岩石冻融特征研究 [J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(8): 19 – 23. [ZHANG Guangze, CHEN Guoqing, JIAN Dahua, et al. Research on the freeze-thaw characteristics of rock at different temperature drop rates[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(8): 19 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 梁冰, 张涛, 王俊光, 等. 片麻岩蠕变特性试验研究 [J]. *实验力学*, 2018, 33(3): 451 – 460. [LIANG Bing, ZHANG Tao, WANG Junguang, et al. Experimental study of gneiss creep properties[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3): 451 – 460. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 赵龙, 甘海啸, 唐维, 等. 陈氏法在TATB基PBX蠕变特性研究中的适用性分析 [J]. *含能材料*, 2018, 26(7): 608 – 613. [ZHAO Long, GAN Haixiao, TANG Wei, et al. Applicability analysis of Chen's method in the research of TATB-based PBX creep behavior[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(7): 608 – 613. (in Chinese with English abstract)]
- [36] LI Bo, ZHANG Guanghua, MA Wei, et al. Damage mechanism of sandstones subject to cyclic freeze-thaw (FT) actions based on high-resolution computed tomography (CT) [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(9): 374.
- [37] 贾海梁, 刘清秉, 项伟, 等. 冻融循环作用下饱和砂岩损伤扩展模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊2): 3049 – 3055. [JIA Hailiang, LIU Qingbing, XIANG Wei, et al. Damage evolution model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Sup 2): 3049 – 3055. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性 [J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(1): 140 – 145. [ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(1): 140 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 沈明荣, 谌洪菊. 红砂岩长期强度特性的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3301 – 3305. [SHEN Mingrong, CHEN Hongju. Testing study of long-term strength characteristics of red sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3301 – 3305. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 郭长宝, 王磊, 李任杰, 等. 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 54 – 64. [GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, et al. Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 54 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [41] LI Jielin, ZHU Longyin, ZHOU Kepin, 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.

编辑: 刘真真