

不同含水率砂岩冻融力学特性及损伤模型研究

梁 勇

(中铁十九局集团第六工程有限公司,江苏 无锡 214000)

摘 要: 为研究冻融循环作用对砂岩物理力学特性的影响,针对不同含水质量分数的砂岩,开展不同冻融循环次数的冻融循环试验和单轴压缩试验。基于岩石损伤力学理论,构建砂岩冻融-载荷耦合损伤模型,并验证模型的可靠性。研究表明:随着冻融循环次数的增加,砂岩产生累积冻融损伤,导致其强度降低,变形量增加。冻融-载荷作用下岩石总损伤值的变化曲线整体呈“S”形,验证了该损伤模型对受载冻融砂岩力学特性的适配性。研究结论可为寒区隧道工程冻害灾变防治提供参考。

关键词: 冻融损伤; 冻融循环; 物理特性; 力学特性; 损伤模型; 寒区隧道

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0430-10

Study on freeze-thaw mechanical properties and damage model of sandstone with different water content

LIANG Yong

(China Railway 19th Bureau Group Sixth Engineering Company Limited, Wuxi 214000, China)

Abstract: To study the effects of freeze-thaw cycles on sandstone's physical and mechanical properties, freeze-thaw cycle tests and uniaxial compression tests with different numbers of freeze-thaw cycles were carried out on sandstone with different water content. Based on the theory of rock damage mechanics, a coupled frost-thaw-load damage model of sandstone was established, and the model's reliability was verified with experimental results. The results show that as the number of freeze-thaw cycles increases, sandstone produces cumulative freeze-thaw damage, decreasing sandstone strength and increasing deformation. The change in the total damage value of the freeze-thaw-loaded rock shows an overall “S” trend. This proves that this damage model can better describe the adaptability of the mechanical properties of the loaded freeze-thaw sandstone. The research results can provide a reference for preventing and controlling freezing disasters of tunnel engineering in cold areas.

Keywords: freeze-thaw damage; freeze-thaw cycles; physical property; mechanical properties; damage model; cold; regional tunnel

0 引言

季节性冻土区(简称季冻区)的岩石与土壤的力学性质、强度指标、变形特征和热稳定性等在冻结与融化两种状态下存在显著差异^[1-2]。由于季节性冻土具有冻胀特性,在该类地区进行工程施工时,围岩常因冻融循环作用而受到影响,进而引发工程病害和灾害^[3-4]。

近年来,学者针对岩石冻融损伤特性的影响因素开展了大量研究。TAN等^[5]通过不同裂隙倾角

岩石的冻融循环试验和单轴压缩试验,提出冻融循环作用下岩石的临界损伤模型。宋勇军等^[6]基于不同饱和度岩石的冻融循环试验,结合CT扫描和单轴压缩试验,分析砂岩的损伤演化特征。ZHANG等^[7]提出一种基于应力函数的弹黏塑性模型,并利用饱和红砂岩的冻融循环试验数据验证该模型的有效性。LIU等^[8]通过CT扫描研究砂岩冻融过程中的细观孔隙变化特征,并结合力学试验结果提出冻融损伤演化函数。刘杰等^[9]通过砂岩冻

收稿日期: 2024-09-28 修回日期: 2024-11-12 接受日期: 2024-11-23 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704144); 辽宁省教育厅科学技术研究重点项目(JYTZD2023077)

作者简介: 梁 勇(1981-),男,辽宁大连人,高级工程师,主要从事铁路工程及岩土工程方面的研究。E-mail: 691512420@qq.com

融循环试验、CT扫描及力学特性试验,提出层进式损伤的CT精准识别方法,并通过试验数据验证了该方法的可靠性。贾蓬等^[10]基于能量演化和分配规律,建立考虑压密阶段的冻融砂岩分段损伤本构模型,并用试验数据验证该模型的准确性。MENG等^[11]通过核磁共振试验、扫描电镜试验和动力特性试验,分析不同冻融循环次数下铜川砂岩的物理力学性能劣化特征,进而提出岩石动三轴损伤本构模型。SUN等^[12]通过核磁共振(NMR)和三维X射线显微镜(3D-XRM)技术,研究冻融循环条件下不同类型岩石的孔隙演化特征,并对岩石全尺寸范围内的裂缝进行了定量表征。贾蓬等^[13-14]为研究加载速率和冻融循环对砂岩动态劈裂特性的影响,对不同冻融次数的砂岩开展静态及不同加载速率的动态劈裂试验。刘享华等^[15]通过分析不同冻融循环次数下多裂隙试件和完整试件的能量转化特征,探讨岩石损伤特性与能量转化之间的相关性。肖鹏等^[16]以砂岩为研究对象,通过室内冻融循环试验、扫描电子显微镜观测和三轴压缩试验,分析砂岩的质量损失、微观结构变化及力学特性。谭皓等^[17]利用CT技术获取不同冻融次数与应力状态下的细观图像,分析不同冻融方式对完整及裂隙岩石细观损伤、应变集中及破坏模式的影响,并研究其损伤演化特征。陈国庆等^[18]对不同温差冻融作用后的石英砂岩、变质砂岩及红砂岩进行核磁共振检测和三轴蠕变试验,探讨各类砂岩在冻融温差作用下的孔隙结构发展规律及蠕变劣化特性。MENG等^[19]分析冻融循环后岩石物理力学性质的变化规律,建立考虑不同孔径大小的冻融损伤模型,并通过静态和动态试验验证该模型的可靠性。杨秀荣等^[20]通过冻融循环条件下的三轴蠕变试验,分析冻融循环作用对片麻岩蠕变特性的影响机制。张广泽等^[21]采用3种不同温降速率,对干燥与饱水岩石进行冻融循环应变试验,探究温降速率对岩石变形特征的影响。上述研究从冻融次数、温度、内部孔隙性等因素出发,较为全面地揭示了寒区岩体在冻融环境下的特性变化。然而,目前综合考虑冻融损伤与含水率共同影响的岩石动态力学性能研究仍较为缺乏。

基于此,通过开展天然状态和饱和含水率条件下砂岩的不同冻融循环单轴压缩试验,研究冻融损伤与含水率对砂岩强度特性及破坏模式的影响规律。由试验结果建立考虑冻融损伤因子和含水率的强度拟合方程,提出冻融-荷载耦合作用下的砂岩损伤本构模型,并通过试验数据验证模型的可靠性。

1 试验方法

1.1 岩样制备

试验所用砂岩取自内蒙古自治区尚山隧道。现场岩块样品的加工处理遵循ISRM推荐标准^[22]。首先,采用高精度DJ-1型岩石切割机将岩心切割成长为100 mm的标准试件,并控制高径比为2.0~2.5。随后,使用SHM-200型双端面磨机对岩柱的上下顶面打磨至光滑,平整度误差小于0.005 mm,且两端面与圆柱轴线的垂直度偏差小于0.25°,见图1。



图1 部分标准试件成品

Fig.1 part of the finished standard specimen

参照《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》^[22]测定岩石试件基本物理参数。首先剔除表面有裂纹、有瑕疵的不合格岩石试件,称取试件烘干前质量,之后将试件置于烘箱中,在105℃~110℃的温度下烘干24 h,再将试件冷却至室温后称取试件的质量,获取试件天然含水率(质量分数),测定其干密度和纵波波速。之后将岩样在真空饱和装置中以负压0.1 MPa的气压抽气4 h,而后在标准大气压下静置4 h,取出测其饱和质量,得到岩石试件的饱和密度、饱和含水率和孔隙度等物理参数,岩石试件基本物理参数均值见表1。

表1 岩石试件物理参数均值

Tab.1 mean values of physical parameters of rock specimens

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/%	孔隙率/%
2 432	2.44	2.50	6.41	9.16

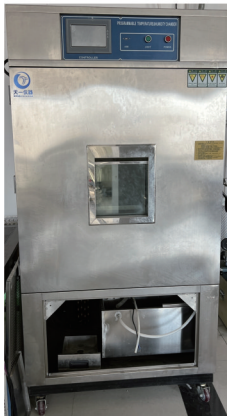
1.2 试验设备及方案

(1) 试验设备

冻融试验采用TAW-2000电液伺服试验机作为力学加载装置,该设备配备全数字伺服控制器和电液伺服阀,具有精度高、稳定性强等特点,能够确保加载过程的稳定性和可靠性。同时,采用程式恒温恒湿试验箱作为冻融试验装置,该设

备在 25℃ 室温空载运行时, 能够将温度控制在 -40℃~150℃、波动范围不超过 5℃, 每分钟升

温 2℃~3℃, 每分钟降温 0.7℃~1.0℃。试验装置见图 2。



(a) 冻融循环实验设备



(b) TAW-2000 电液伺服试验机控制系统



(c) TAW-2000 电液伺服试验机试验系统

图 2 实验设备

Fig.2 experimental equipment

(2) 试验方案

试验分为冻融循环试验和常规岩石单轴压缩试验两部分。首先, 设定 0 次、10 次、20 次、40 次、50 次共 5 组不同冻融循环次数作为试验工况, 分别对天然含水率和饱和含水率的现场砂岩试样进行冻融循环试验。每个冻融循环周期为 24 h, 试件先在 -20℃ 条件下冻结 12 h, 随后在 20℃ 条件下解冻 12 h。完成冻融循环试验的岩石试件浸没于恒温水浴箱中, 保持恒温直至进行单轴压缩试验。

选取不同冻融循环次数下的标准砂岩试样 (每组 3 个), 采用 TAW-2000 电液伺服试验机开展常规单轴压缩试验, 加载方式采用变形控制, 加载速率设置为 0.05 mm/min, 得到其峰值强度、弹性模量等力学参数。

2 试验结果分析

2.1 物理特性

(1) 孔隙率、饱和密度

对完成 0 次、10 次、20 次、40 次、50 次冻融循环试验的岩样进行岩石孔隙率 n 和岩石饱和密度 ρ_{sat} 测算, 分别为

$$\begin{cases} n = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100\% \\ \rho_{\text{sat}} = m_{\text{sat}} / V_{\text{sat}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: m_{sat} 为岩石试件冻融循环试验后的饱和质量, g; m_s 为岩石试件冻融循环试验后的干燥质量, g; V_{sat} 为岩石试件冻融循环试验后表观体积, cm^3 。

岩石参数随冻融循环次数的变化规律见图 3, 可知砂岩试件在天然含水状态下已具有较密集的

孔隙结构。在冻融循环作用下, 孔隙水发生冰相变, 产生的冻胀力促使砂岩内部裂隙扩展和新生, 导致试件经 50 次冻融循环后孔隙率升至 11.46%, 增幅达 25.11%。岩体饱和密度的变化表明, 冻融循环作用引起试件表面颗粒剥落, 孔隙水冰相变导致体积膨胀。50 次冻融循环后砂岩试件的饱和密度降至 2.40 g/cm^3 , 降幅为 4.05%。

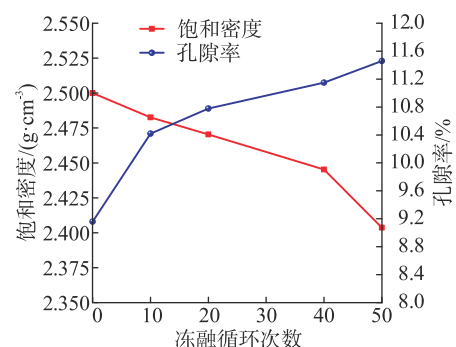


图 3 岩石参数随冻融循环次数变化规律

Fig.3 change rule of rock parameters with the number of freeze-thaw cycles

当环境温度降低时, 岩石孔隙中的水分发生相变, 形成冰晶体, 体积膨胀约 9%。这种膨胀产生的冻胀力对砂岩孔隙结构形成挤压作用, 导致孔隙率增大、饱和密度降低, 内部结构产生损伤, 变化幅度通常为 7%~10%。随着环境温度回升, 孔隙冰体逐渐融化为液态水。在此过程中, 融水对孔隙结构中的胶结物质和颗粒间结合面产生溶蚀作用, 进一步加剧岩石内部结构的损伤。

(2) 试件破坏特征

在单轴压缩条件下对不同含水率试件的破坏

特征进行观测。天然含水率试件和饱和含水率试件经冻融循环10次、20次、40次、50次的试验结

果分别见图4、图5。图中红色标记线表示砂岩试件在单轴压缩作用下的破坏轨迹。

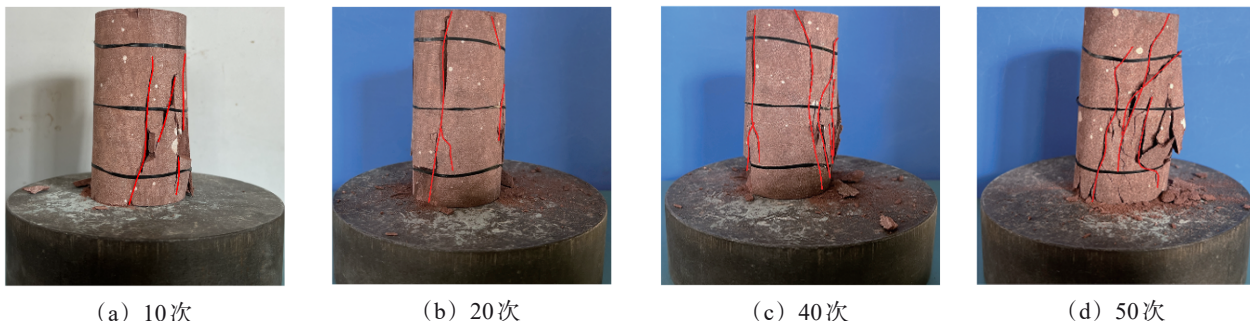


图4 天然含水率砂岩不同冻融循环下试件破坏形态

Fig. 4 damage pattern under different freeze-thaw cycle specimens of natural moisture content sandstone

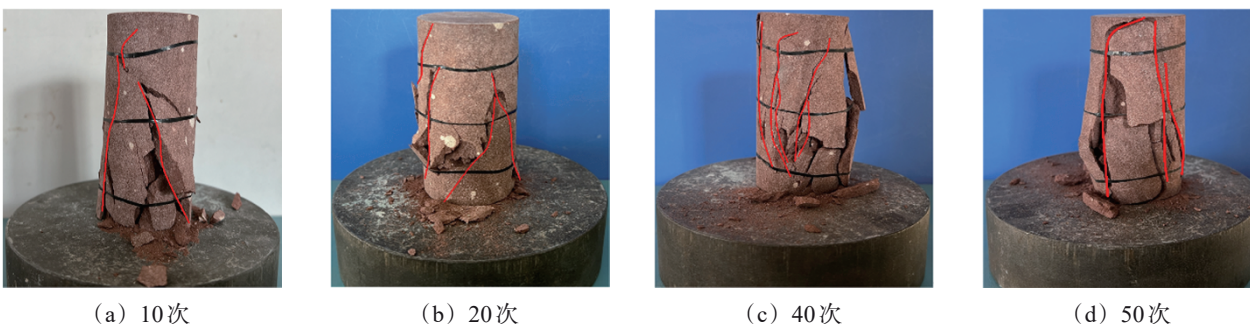


图5 饱和含水率砂岩不同冻融循环下试件破坏形态

Fig.5 damage pattern of sandstone specimens with saturated water content under different freeze-thaw cycles

天然含水率砂岩在未经冻融循环时表现为典型的轴向劈裂破坏,破坏过程伴随明显脆性特征和巨大声响,破碎程度较低且破裂面较少;而饱和含水率砂岩的破碎程度显著增加,并出现多个倾斜破裂面。

由图4(a)可见,经过10次冻融循环后,天然含水率砂岩仍以轴向劈裂为主,但在冻融裂纹处形成“Y”形剪切破坏,与未冻融试样相比,其破碎程度增加且新生破裂面增多,表现出一定的延性特征;饱和含水率砂岩则呈现单斜面劈裂破坏,破碎程度明显加剧,形成显著的主裂纹并伴随次生裂纹扩展。

由图4(b)可见,经过20次冻融循环后,天然含水率砂岩新生裂纹数量增加,但完全破坏时的破碎程度降低,破裂模式由倾斜破坏转变为竖向破裂,次生裂纹显著增多且呈扩展趋势;饱和含水率砂岩则沿多条主裂纹破坏,破碎程度明显加剧,破坏时产生碎块,且次生裂纹沿主裂纹快速扩展。

由图4(c)可见,经过40次冻融循环后,天然含水率砂岩破碎程度有所降低,新生裂纹促进了次生裂纹的形成与发展;饱和含水率砂岩沿多条主裂纹方向破坏,随着次生裂纹扩展,试件呈

现轴向倾斜断面破坏,破碎程度进一步增大,并伴随细小碎块剥落。

由图4(d)可见,50次冻融循环后,天然含水率砂岩表现为沿多条主裂纹的轴向劈裂破坏,新生裂纹持续增多和扩展,破裂模式由倾斜破坏发展为“X”形交叉破裂,次生裂纹沿轴向贯通,岩石完整性显著降低;饱和含水率砂岩则呈现轴向分块劈裂特征,次生裂纹发育为主裂纹,导致碎块完整性相对提高。

基于上述试件破坏特征分析,冻融循环作用下岩石的破坏模式可分为两类。裂纹扩展模式:岩石初始存在一定数量的原生裂纹和缺陷。在不同含水率条件下,冻融循环作用使水分在既有裂隙中迁移,温度降低导致水冰相变,冻胀力反复作用于裂隙和缺陷部位,促进裂纹扩展,从而降低岩石强度。颗粒剥落模式:冻融循环过程中岩石内部水分发生相变,导致矿物颗粒间胶结力减弱。宏观表现为冻融裂纹的扩展,并在后续破坏过程中出现明显的颗粒剥落现象。

2.2 力学特性

因篇幅所限,只给出每组冻融循环试验岩样所测结果中的一组单轴压缩应力-应变曲线,见图6。

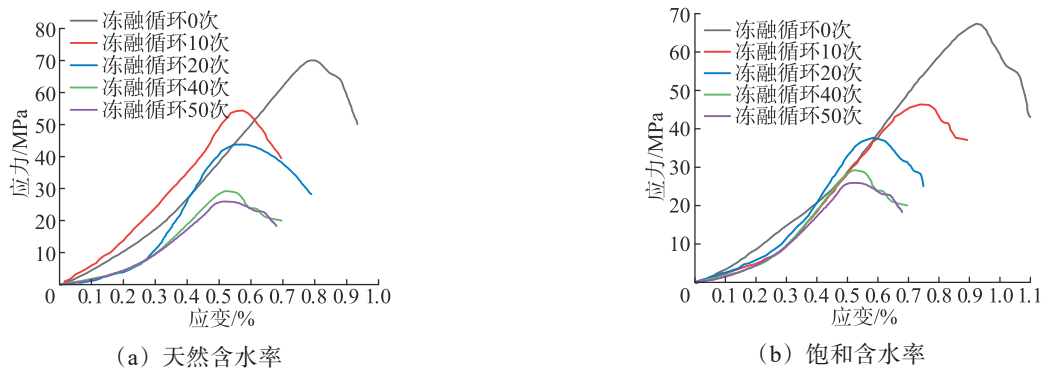


图6 砂岩不同冻融循环次数下单轴压缩应力-应变曲线

Fig.6 uniaxial compressive stress-strain curves of sandstone under different freeze-thaw cycles

由图6可见,不同冻融循环次数下岩样的应力-应变曲线变化趋势相似,从加载至破坏可分为4个典型阶段:压密阶段、弹性阶段、塑性发展阶段和破坏阶段。各阶段试件的应力-应变关系和泊松比特征存在明显差异。从压密阶段到破坏阶段,冻融循环试件的单轴压缩总应变逐渐增大,峰值应力相应提高,而泊松比呈现波动变化特征。结合图7分析表明,随着冻融循环次数的增加,长期冻融作用导致岩石内部损伤不断累积,天然含水率和饱和含水率试件的强度和变形特性均呈现衰减趋势。

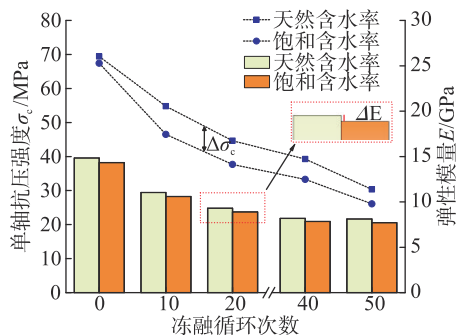
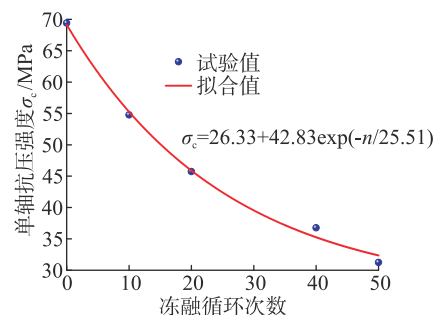


图7 冻融砂岩力学特性衰减规律

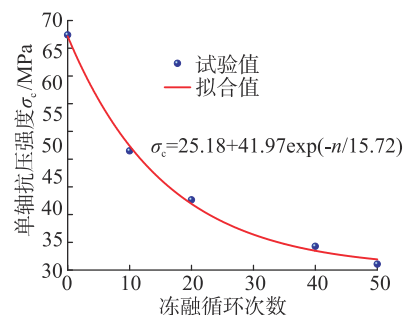
Fig.7 decay pattern of mechanical properties of freeze-thawed sandstone

(1) 强度特性

单轴抗压强度随冻融循环次数变化情况见图8,在相同含水率条件下,砂岩单轴抗压强度随冻融循环次数的增加而降低。经50次冻融循环后,天然含水率试件的单轴抗压强度下降56.30%,饱和含水率试件下降61.34%。单轴抗压强度与冻融循环次数呈显著负相关($R^2 > 0.98$)。



(a) 天然含水率



(b) 饱和含水率

图8 单轴抗压强度随冻融循环次数变化曲线

Fig.8 variation curve of uniaxial compressive strength with the number of freeze-thaw cycles

引入单轴抗压强度损伤变量 D_σ , 表征砂岩的强度参数在不同冻融循环次数下的变化规律。 D_σ 越大,砂岩抗冻能力越弱; D_σ 越小,则抗冻能力越强,计算公式为

$$D_\sigma = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_0}, \quad (2)$$

式中: σ_n 为损伤后的砂岩单轴抗压强度; σ_0 为初始砂岩单轴抗压强度。单轴抗压强度损伤变量见表2。

表2 单轴抗压强度损伤变量

Tab.2 uniaxial compressive strength damage variables

砂岩状态	不同冻融循环次数下的 D_σ				
	0次	10次	20次	40次	50次
天然含水率	0	0.211	0.357	0.521	0.563
饱和含水率	0	0.310	0.471	0.598	0.613

由表2可知, 损伤变量 D_σ 随冻融循环次数的增加而增大。从冻融循环对砂岩的影响程度来看, 50次循环时, 饱和含水率砂岩的损伤最小, 40次循环时天然含水率砂岩的损伤最大, 表明砂岩在冻融初期具有较好的抗冻性能。经过10次冻融循环后, 砂岩的 D_σ 均能维持在0.35以下, 说明冻融前期砂岩的劣化程度较低; 而经过50次循环后, D_σ 均超过0.5, 表明随着冻融循环次数的增加, 砂

岩的抗冻融能力逐渐降低。

(2) 变形特性

在相同含水率条件下, 岩石弹性模量随冻融循环次数的增加呈衰减趋势。经50次冻融循环后, 天然含水率试件的弹性模量下降45.28%, 饱和含水率试件下降46.22%, 见图9。冻融循环过程中, 水分的冻结膨胀和融化收缩导致岩石内部产生应力并形成微裂纹。这些微裂纹的发展破坏岩石结构的完整性, 表现为弹性模量降低和力学性能劣化。基于此, 建立冻融作用下岩石弹性模量损伤变量 D_E 为

$$D_E = 1 - \frac{E_n}{E_0}, \quad (3)$$

式中: E_n 为损伤后的弹性模量; E_0 为初始弹性模量。

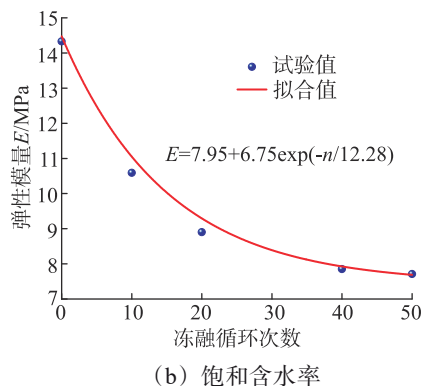
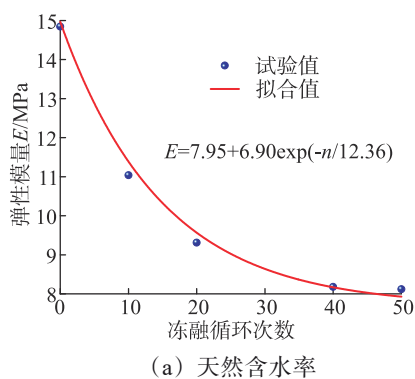


图9 弹性模量随冻融循环次数变化曲线

Fig.9 variation curve of modulus of elasticity with the number of freeze-thaw cycles

冻融循环作用下砂岩内部结构发生变化, 冻融循环次数增加, 损伤加剧, 其力学性质和抵抗变形能力降低。不同含水率砂岩弹性模量降幅不同, 体现了含水率对岩石冻融损伤的影响程度不同。

泊松比总体试验结果见图10, 可知天然含水率岩体和饱和含水率岩体的泊松比均随冻融循环次数的增加而增大。与未冻融岩体相比, 天然含

水率岩体经10次、20次、40次50次冻融循环后, 其泊松比上升幅度分别为6.45%、3.03%、2.94%、2.86%; 饱和含水率岩体泊松比的变化幅度较小, 泊松比的上升幅度为6.06%、5.71%、2.7%、2.63%。这是由于冻融循环作用促使砂岩内部孔隙和微裂纹发育, 单轴压缩试验中径向变形增大, 泊松比升高。

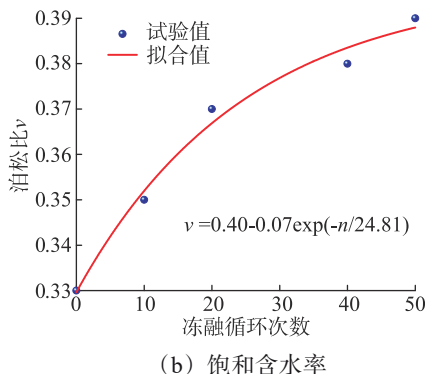
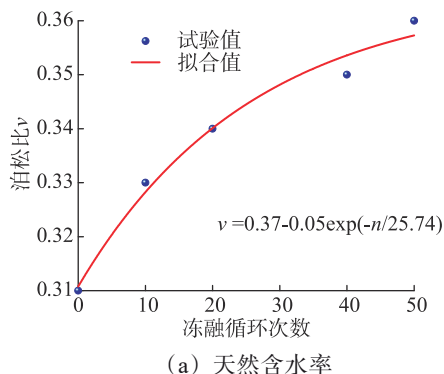


图10 泊松比随冻融循环次数变化曲线

Fig.10 variation curve of Poisson's ratio with the number of freeze-thaw cycles

3 冻融损伤模型

3.1 冻融损伤模型建立

冻融岩石的力学损伤包含两部分:冻融循环损伤和加载力学损伤。由2.2节中冻融砂岩力学特性可知,随着冻融循环次数的增加,不同含水率岩样的力学特性差异较大。基于岩石损伤力学理论,可将围岩视为由大量微单元构成的连续介质,各微单元承受不同程度的损伤,具有明显的随机分布特征。为表征季冻区隧道围岩的内部损伤状态,采用Weibull分布函数进行描述。其关键表征参数为

$$P(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^m \right], \quad (4)$$

式中: x 为微元强度统计分布变量; m 为统计分布参数,与岩石力学性质相关; x_0 为统计分布参数,与岩石力学性质相关。

基于上述假设,岩石材料的破坏过程可视为大量微元强度损伤的累积结果。定义载荷作用下的岩石损伤变量为受损微元数与总微元数的比值。由于岩石损伤演化是一个不可逆的连锁反应过程,最终表现为宏观力学参数的波动性变化。通过对式(4)进行积分,可得到岩石材料微元破坏的损伤变量为

$$D = \int_0^x P(x) dx = 1 - \exp \left[- \left(x/x_0 \right)^m \right]. \quad (5)$$

在季冻区隧道工程中,围岩的总损伤效应可等效为冻融循环损伤与载荷损伤的耦合作用。基于这两种损伤机制的差异性,建立冻融-载荷耦合作用下岩石总损伤变量的表达式为

$$D_m = D + D_n + DD_n, \quad (6)$$

式中: D_m 为冻融-载荷岩石总损伤变量; DD_n 为冻融-载荷岩石的耦合项。

联立式(3)~式(6),得到岩石冻融-载荷耦合总损伤变量为

$$D_m = 1 - \left(E_n/E_0 \right) \exp \left[- \left(x/x_0 \right)^m \right]. \quad (7)$$

基于LEMAITRE应变等价理论,损伤参数可表征岩石的损伤状态。该参数随着加载过程中裂纹扩展和岩石破坏的发展而增大。综合考虑岩石力学行为、力学特性与损伤参数之间的相互作用,建立损伤演化方程描述这一参数的演变过程,表达式为

$$\sigma = \sigma^*(1-D) = C\varepsilon(1-D), \quad (8)$$

式中: σ 为应力矩阵; σ^* 为有效应力矩阵; C 为弹性矩阵; ε 为应变矩阵; D 为损伤变量。

假设岩石微元强度服从最大拉应变准则

$$F = F(\varepsilon) = \varepsilon_0. \quad (9)$$

通过联立式(7)~式(9),得到季冻区隧道围岩单轴压缩试验在冻融循环作用下的岩石损伤模型为

$$\sigma_1 = E_0(1-D_m)\varepsilon_u = E_n\varepsilon_u \exp \left[- \left(\varepsilon_u/\varepsilon_{u0} \right)^m \right], \quad (10)$$

式中: ε_u 为单个微元体应变; ε_{u0} 为统计分布参数,与岩石材料力学性质相关。

在单轴压缩试验过程中,岩体内部部分微元体会发生损伤。然而,这些受损微元体仍保留一定的承载能力,能够在岩体内传递部分剪应力和压应力。为考虑受损微元体的残余承载作用,引入修正参数 a ($a \in [0,1]$) 对损伤变量 D_m 进行修正,修正后的岩石损伤模型为

$$\sigma_1 = E_0(1-aD_m)\varepsilon_u = E_0 - aE_0\varepsilon_u + aE_n\varepsilon_u \exp \left[- \left(\varepsilon_u/\varepsilon_{u0} \right)^m \right], \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} a = \frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{uc}} & 0 < \varepsilon_{ui} < \varepsilon_{uc} \\ a = 1 & \varepsilon_{uc} \leq \varepsilon_{ui} \end{cases}. \quad (12)$$

由式(12)可见,砂岩冻融损伤模型的建立基于损伤微元强度服从最大拉应变准则。该模型中,围岩的冻融损伤与岩石参数、弹性模量、冻融循环次数及修正参数相关。为确定模型参数 m 、 ε_{u0} , 设定如下约束条件:峰值点处应力-应变曲线斜率为0;峰值应力状态满足所建立的砂岩冻融损伤模型。基于此,可得到参数表达式为

$$\begin{aligned} m &= -\sigma_p \left[\sigma_p - (1-a)E_0\varepsilon_{uc} \right]^{-1} \times \\ &\quad \left\{ \ln(aE_n\varepsilon_{uc}) - \ln[\varepsilon_{uc} - (1-a)E_0\varepsilon_{uc}] \right\}^{-1}, \\ \varepsilon_{u0} &= \frac{\sigma_c}{m \left\{ \ln(aE_n\varepsilon_{uc}) - \ln[\sigma_c - (1-a)E_0\varepsilon_{uc}] \right\}}. \end{aligned}$$

3.2 冻融损伤模型验证

采用数据拟合方法确定冻融损伤模型中的参数 m 、 ε_{u0} , 见表3。在天然含水率条件下,参数 m 、 ε_{u0} 的取值范围分别为2.874~3.149和9.493 9~13.991 5,波动范围较小,说明天然含水率对 m 、 ε_{u0} 影响较弱;而在饱和含水率条件下, m 、 ε_{u0} 的取值范围分别为2.791 6~3.088 3和9.246 8~14.159 3,变化范围相对较大,说明饱和含水率对模型参数的影响更为显著。

表 3 砂岩冻融损伤模型参数
Tab.3 parameters list of sandstone freeze-thaw damage model

含水率	冻融次数	峰值应力/MPa	峰值应变/%	弹性模量/GPa	参数 m	参数 ε_{u0}
天然含水率	0	69.41	0.80	14.84	3.149 2	9.493 9
	10	54.76	0.58	11.35	3.588 4	10.762 0
	20	44.63	0.57	9.12	3.157 3	11.663 5
	40	33.27	0.53	8.17	2.987 1	13.337 8
	50	30.33	0.53	8.11	2.874 3	13.991 5
饱和含水率	0	69.41	0.94	14.33	3.088 3	9.246 8
	10	46.51	0.73	10.89	3.497 7	10.997 0
	20	37.66	0.57	8.68	3.025 7	11.874 9
	40	39.27	0.53	7.81	2.815 3	13.480 3
	50	26.06	0.51	7.69	2.791 6	14.159 3

将表 3 参数代入式 (11)，计算得到冻融砂岩的单轴压缩应力-应变理论曲线，并与试验曲线对比，见图 11 和图 12，冻融砂岩的峰值轴向应力见表 4 和表 5。由图 11、图 12 和表 4、表 5 可知，天然含水率和饱和含水率岩石的单轴抗压强度计算值与试验值吻合度较高。在压密变形阶段，围岩室内试验曲线与损伤模型模拟曲线存在较小的偏

差；在弹性变形阶段，损伤模型模拟曲线形态与围岩室内试验曲线一致，且斜率相差不大。在塑性扩展阶段，损伤模型峰值轴向应力存在微小偏差；在破坏变形阶段，围岩冻融损伤模型曲线表现出岩石受载破坏后仍具备一定的承载力。上述分析表明，本文所建立的冻融损伤模型能够准确描述受载冻融砂岩的力学特性。

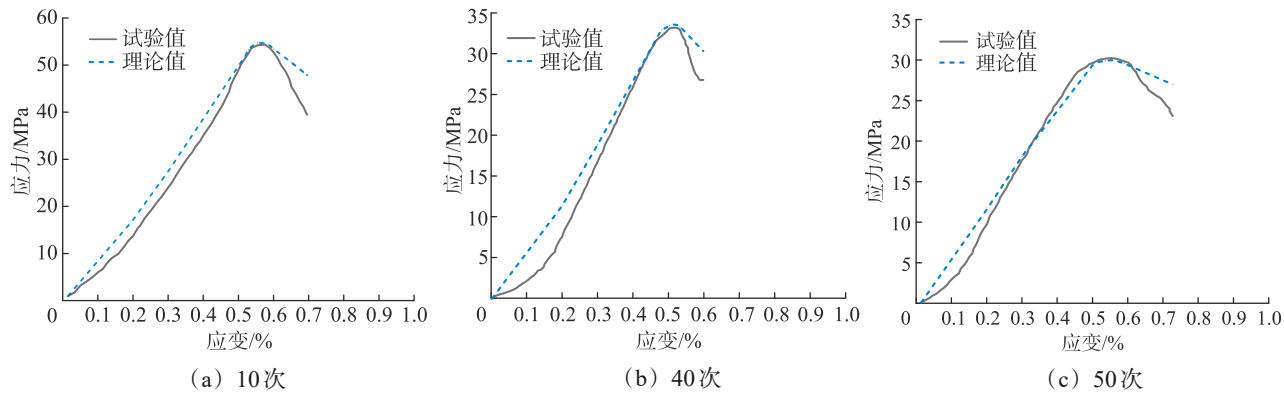


图 11 不同冻融循环次数下天然含水率岩石的应力-应变
Fig.11 stress-strain variations of rocks with natural moisture content under different freeze-thaw cycle times

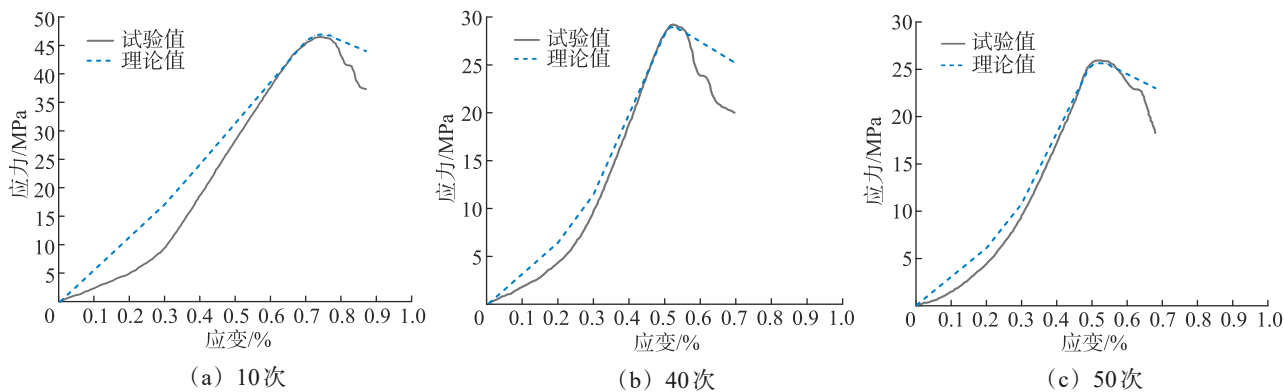


图 12 不同冻融循环次数下饱和含水率岩石的应力-应变
Fig.12 stress-strain variation of rocks with saturated moisture content under different freeze-thaw cycle times

表 4 不同冻融循环次数下天然含水率岩石的峰值轴向应力

Tab.4 peak axial stress of natural water content rock under different freeze-thaw cycles

循环次数	试验峰值 轴向应力/MPa	计算峰值 轴向应力/MPa	差值 百分比/%
10次	54.76	55.31	1.09
20次	33.27	33.60	1.01
40次	30.33	30.12	-0.96

表 5 不同冻融循环次数下饱和含水率岩石的峰值轴向应力

Tab.5 peak axial stress of saturated water content rock under different freeze-thaw cycles

循环次数	试验峰值轴向 应力/MPa	计算峰值轴向 应力/MPa	差值百分比/%
10次	46.51	46.88	0.91
20次	39.27	38.92	-0.15
40次	26.06	25.77	-1.01

基于单轴压缩试验获得的力学参数,结合冻融-载荷耦合岩石总损伤变量理论和岩石微元强度服从最大拉应变准则,对比分析不同含水率条件下岩石总损伤变量随冻融循环次数的演化规律,结果见图 13。

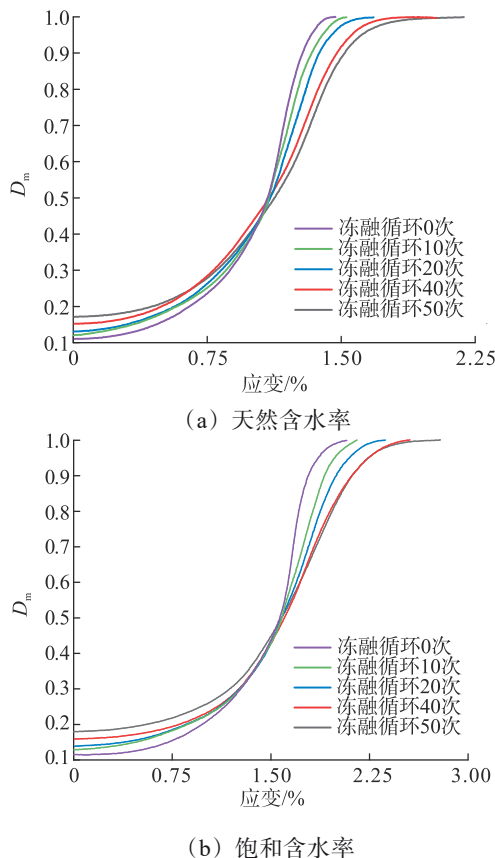


图 13 不同含水率冻融-载荷岩石总损伤变量

Fig.13 total damage variables for freeze-thaw-loaded rocks with different water contents

由图 13 可知,随着含水率和冻融循环次数的增加,季冻区隧道围岩的初始总损伤量逐渐增大。对比可知含水率越高,砂岩在冻融循环过程中受水分冻胀作用的影响越显著,这是由于冻胀力对岩石的损伤效应随循环次数增加而增强。此外,曲线整体呈“S”形,这是由于在循环初始阶段,外部载荷的作用使岩石原生裂隙、冻融新生微裂隙及孔隙结构受压闭合,孔隙率降低且无新裂纹产生,故总损伤值变化平缓。随着冻融循环的进行,冻胀作用逐渐显现,损伤进入快速发展阶段。最终当冻融损伤累积到一定程度后趋于稳定。

在岩石弹性变形阶段,持续稳定的外部载荷作用于试件表面,使岩石内部孔隙结构进一步压缩并产生新生表面裂纹,导致冻融-载荷耦合作用下的总损伤值快速增大后趋于稳定。然而,随着冻融循环次数的增加,该阶段的损伤增速呈现减缓趋势。这是由于前期冻融循环已通过水冰相变作用对岩石造成显著损伤,使后续外部载荷作用产生的附加损伤相对减小。在持续载荷作用下,冻融-载荷耦合岩石的应变持续发展,总损伤值随之递增并最终趋近于 1。

4 结论

(1) 岩石孔隙率随着冻融循环次数的增加而增加,试件表面出现明显的冻融剥落现象。岩石的受载破裂程度随冻融次数的增加而加剧,除破裂主裂纹外出现较多的新生冻融受载裂纹,加深了岩石的冻融后受载破裂程度。饱和含水率砂岩相比于天然含水率砂岩,沿轴向分块劈裂现象明显,在这种情况下,次生裂纹会逐渐演变成主裂纹,碎块的完整性有所增加。

(2) 在相同的冻融循环条件下,岩石的物理力学参数随着含水率的增加而逐渐减小;在相同的含水率条件下,岩石强度参数和变形参数均随冻融循环次数的增加而降低,其中天然含水率试件在 50 次冻融循环后强度降幅为 56.30%,饱和含水率试件强度降幅为 61.34%。天然含水率试件在 50 次冻融循环周期后弹性模量降幅为 45.28%,饱和含水率试件弹性模量降幅为 46.22%。

(3) 通过冻融损伤模型理论计算与室内试验结果的对比分析,证实了该模型的合理性。冻融-载荷岩石总损伤值变化整体呈“S”形,其中在弹性变形阶段损伤速率减小,在达到峰值点应变后损伤速率也逐渐减小。因此,该模型可有效描述冻融-载荷条件下岩石的损伤演化过程,为工程实践提供了理论支持和参考依据。

参考文献(References):

- [1] 王亮亮,王照腾,田建胜,等. 不同压实状态浅季冻区膨胀土力学特性的冻融演化规律[J]. 铁道学报, 2023, 45(11): 146-153.
WANG Liangliang, WANG Zhaoteng, TIAN Jiansheng, et al. Freezing-thawing evolution of mechanical properties of expansive soil in weak seasonal frozen region under different compaction states [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(11): 146-153.
- [2] 张慧梅,王焕,张嘉凡,等. CT尺度下冻融岩石细观损伤特性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 51-56.
ZHANG Huimei, WANG Huan, ZHANG Jiafan, et al. Analysis of meso-damage characteristics of freeze-thaw rock on CT scale[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(1): 51-56.
- [3] 谭忆秋,徐慧宁,赵春丽,等. 冻融循环下沥青混合料损伤特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 778-788.
TAN Yiqiu, XU Huining, ZHAO Chunli, et al. Research on asphalt damage characteristics under freeze-thaw cycling[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2024, 40(5): 778-788.
- [4] 李卓,孙屹,姜鑫,等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 90-96.
LI Zhuo, SUN Yi, JIANG Xin, et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 90-96.
- [5] TAN T, ZHANG C Y, LI W R, et al. Evolution of freeze-thaw damage characteristics and corresponding models of intact and fractured rocks under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(10): 8013-8033.
- [6] 宋勇军,杨慧敏,谭皓,等. 冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1513-1524.
SONG Yongjun, YANG Huimin, TAN Hao, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1513-1524.
- [7] ZHANG C Y, ZOU P, WANG Y X, et al. An elasto-visco-plastic model based on stress functions for deformation and damage of water-saturated rocks during the freeze-thaw process[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118862.
- [8] LIU M M, DING Y N, LIU Y, et al. Macro-mesoscopic correlation investigation on damage evolution of sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(1): 887-903.
- [9] 刘杰,张瀚,王瑞红,等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394.
LIU Jie, ZHANG Han, WANG Ruihong, et al. Investigation of progressive damage and deterioration of sandstone under freezing-thawing cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1381-1394.
- [10] 贾蓬,毛松泽,孙占阳,等. 冻融损伤砂岩的能量演化及分段本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 908-919.
JIA Peng, MAO Songze, SUN Zhanyang, et al. Energy evolution and piecewise constitutive model of freeze-thaw damaged sandstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 908-919.
- [11] MENG F D, ZHAI Y, LI Y B, et al. Research on deterioration mechanism and dynamic triaxial compression characteristics of freeze-thaw sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(3): 2333-2355.
- [12] SUN Y, ZHAI C, XU J Z, et al. Characterisation and evolution of the full size range of pores and fractures in rocks under freeze-thaw conditions using nuclear magnetic resonance and three-dimensional X-ray microscopy[J]. Engineering Geology, 2020, 271: 105616.
- [13] 贾蓬,毛松泽,钱一锦,等. 不同加载速率下冻融砂岩的动态劈裂特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 111-119.
JIA Peng, MAO Songze, QIAN Yijin, et al. Dynamic splitting characteristics of freeze-thawed sandstone at different loading rates [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45 (1): 111-119.
- [14] 贾蓬,毛松泽,卢佳亮,等. 冻融循环对绿砂岩动态抗压性能影响的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(8): 841-851.
JIA Peng, MAO Songze, LU Jialiang, et al. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristics of green sandstone[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(8): 841-851.
- [15] 刘享华,张科,刘文连. 荷载与冻融共同作用对多裂隙砂岩能量转化与损伤特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31 (3): 715-730.
LIU Xianghua, ZHANG Ke, LIU Wenlian. Influence of coupling action of loading and freeze-thaw cycles on the energy conversion and damage characteristics of sandstone containing multiple flaws [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 715-730.
- [16] 肖鹏,陈有亮,杜曦,等. 冻融循环作用下砂岩的力学特性及细观损伤本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 805-815.
XIAO Peng, CHEN Youliang, DU Xi, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles and studies on meso-damage constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 805-815.
- [17] 谭皓,宋勇军,郭玺玺,等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局域化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2485-2496.
TAN Hao, SONG Yongjun, GUO Xixi, et al. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2485-2496.
- [18] 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.
- [19] MENG F D, ZHAI Y, LI Y B, et al. Research on the effect of pore characteristics on the compressive properties of sandstone after freezing and thawing[J]. Engineering Geology, 2021, 286: 106088.
- [20] 杨秀荣,姜谔男,王善勇,等. 冻融循环条件下片麻岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4331-4340.
YANG Xiurong, JIANG Annan, WANG Shanyong, et al. Experimental study on creep characteristics of gneiss under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4331-4340.
- [21] 张广泽,陈国庆,简大华,等. 不同降温速率下岩石冻融特征研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 19-23, 78.
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, 78.
- [22] 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 determining complete stress-strain curve of intact rock by uniaxial compression test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 802-808.