

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.022

冻融循环作用下红砂岩物理力学性质及冻融损伤特性研究

邹峰, 祁长青, 张爽, 祝世婕, 邓福起, 边心宇, 王世雄

(河海大学地球科学与工程学院)

摘要: 针对青藏高原高寒环境下红砂岩冻融损伤破坏严重的问题, 选取该区域东南部完整性良好的红砂岩为研究对象, 采用冻融循环试验、单轴压缩试验、核磁共振检测及表观裂隙定量化分析等多尺度试验方法, 揭示了冻融循环作用下红砂岩物理力学性质与孔隙-裂隙损伤的耦合演化规律。结果表明: 随着冻融循环次数的增加, 岩样表面出现颗粒剥落现象, 岩样干质量减小, 孔隙率呈线性上升、饱和纵波波速呈指数衰减趋势; 红砂岩单轴抗压强度与弹性模量随冻融循环次数增加而降低, 70 次冻融循环后岩石劣化速率加快; 红砂岩横向弛豫时间谱呈 3 峰分布, 随着冻融循环次数的增加, 红砂岩大孔($>4\text{ }\mu\text{m}$, 半径)占比呈线性增长, 小孔($>0.1\sim1\text{ }\mu\text{m}$)与中孔($>1\sim4\text{ }\mu\text{m}$)占比整体下降; 冻融循环作用下岩石损伤逐渐由微观向宏观演化, 30 次冻融循环之间主要表现为微观孔隙的扩展与连通, 30 次后可见宏观裂隙发育, 最终导致岩石开裂破坏; 提出了结合弹性模量、大孔体积占比及裂隙率的红砂岩总损伤变量, 实现了损伤变量的跨尺度定义, 可为进一步认识青藏高原高寒环境下红砂岩冻融劣化机理提供理论依据。

关键词: 冻融循环; 红砂岩; 核磁共振; 单轴压缩试验; 孔隙结构演化

Study on physical and mechanical properties and freeze-thaw damage characteristics of red sandstone under freeze-thaw action

Zou Feng, Qi Changqing, Zhang Shuang, Zhu Shijie, Deng Fuqi, Bian Xinyu, Wang Shixiong
(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University)

Abstract: In view of the severe freeze-thaw damage and destruction of red sandstone in the cold and high-altitude environment of the Qinghai-Xizang Plateau, red sandstone samples with good integrity from the southeastern part of the region were selected as the research object. Multi-scale experimental methods, including freeze-thaw cycling tests, uniaxial compression tests, nuclear magnetic resonance testing, and quantitative analysis of apparent cracks, were adopted to reveal the coupled evolution laws of the physical and mechanical properties and pore-fracture damage of red sandstone under freeze-thaw action. The results indicate that as the number of freeze-thaw cycles increases, the phenomenon of particle shedding occurs on the surface of rock samples; the dry mass of samples decreases; the porosity increases linearly, and the saturated longitudinal wave velocity shows an exponential attenuation trend. The uniaxial compressive strength and elastic modulus of red sandstone decrease with the increase in the number of freeze-thaw cycles, and the deterioration rate accelerates after 70 freeze-thaw cycles. The transverse relaxation time spectrum of red sandstone shows a three-peak distribution. With the increase in the number of freeze-thaw cycles, the proportion of large pores ($>4\text{ }\mu\text{m}$) in red sandstone increases linearly, while the proportions of small pores ($>0.1\sim1\text{ }\mu\text{m}$) and medium pores ($>1\sim4\text{ }\mu\text{m}$) decrease overall. Under freeze-thaw action, the rock damage gradually evolves from the microscale to the macroscale. Within the first 30 freeze-thaw cycles, the main manifestation is the expansion and connection of micro-pores, and after 30 cycles, the development of macroscopic cracks can be observed, eventually leading to rock cracking and failure. A total damage variable for sandstone is proposed by combining the elastic modulus, the volume proportion of large pores, and the fracture rate, achieving a cross-scale definition of the damage variable, which provides a theoretical basis for further understanding the freeze-thaw deterioration mechanism of sandstone in the cold and high-altitude environment of the Qinghai-Xizang Plateau.

Key words: freeze-thaw cycle; red sandstone; nuclear magnetic resonance; uniaxial compression test; pore structure evolution

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877212)

作者简介: 邹峰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩体力学与岩体稳定性研究。E-mail: zf001115@163.com

通信作者: 祁长青(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事地质工程和岩土工程研究。E-mail: qichangqing@hhu.edu.cn

随着青藏高原交通、水电等重大工程的推进,区域基础设施建设快速发展,但该地区恶劣的环境条件也给岩土工程安全带来了严峻挑战。由于长期受季节更替及昼夜温差的影响,青藏高原岩石经受了反复的冻融作用^[1]。低温条件下,岩石孔隙中水-冰相变产生的冻胀力会导致岩石结构劣化,严重威胁寒区岩土工程的安全与稳定^[2-4]。因此,研究冻融循环作用下寒区岩石的孔隙结构演化特征,明确其物理力学性质变化规律,对保障寒区工程的长期稳定性具有重要意义。

近年来,冻融环境下岩石的力学性质劣化以及破坏机理已成为研究热点。李勇等^[5-6]通过对岩样进行单轴压缩试验并监测其声发射信号,探讨了不同冻融条件对岩石力学性质的影响;Liu 等^[7]以红砂岩为研究对象,借助单轴压缩试验和纵波波速测试,研究了冻融环境下饱和度对岩石物理力学性质的影响;Momeni 等^[8]与 Ghobadi 等^[9]分别研究了冻融环境对不同类型岩石物理力学性质的影响,结果表明,纵波波速、单轴抗压强度和孔隙率是评估岩石强度衰减的重要参数;苏占东等^[10]对花岗岩开展冻融循环试验和力学试验,研究了花岗岩的声发射特性,对研究岩石冻融损伤机制具有重要意义。已有研究普遍认为,在冻融循环作用下,岩石力学性能会发生劣化,主要表现为饱和纵波波速、弹性模量(E)、峰值应力及抗冻系数降低,而孔隙率(n)、裂隙率增大。叶永芄等^[11]对红砂岩进行单轴和三轴压缩试验,分析了不同冻融循环次数下红砂岩的变形与强度特性,并通过扫描电子显微镜(SEM)技术从微观角度分析了冻融循环对红砂岩的影响机制;于超云等^[12]对红砂岩开展了单轴压缩试验和 SEM 检测,研究了不同冻融循环次数下饱和度对岩石力学性质的影响,分析了其冻融损伤演化特征;Qi 等^[13]采用单轴抗压强度、弹性模量和抗冻系数分段衰减模型描述砂岩的劣化特性,引入损伤力学理论,推导了冻融和荷载共同作用下的分段损伤应变方程,并对该模型进行了验证;廖明可等^[14]根据砂岩质量、体积和波速的劣化率定义了砂岩损伤累计程度,建立了损伤累计程度与冻融循环次数的非线性模型;肖鹏等^[15]通过分析砂岩微观结构和力学性质,建立了冻融与围压耦合作用下砂岩的细观损伤本构模型。宏观力学性质的劣化,本质是细、微观损伤累积的果^[16]。因此,加强对岩石冻融损伤微观结构的研究,才能更合理地解释其宏观破裂现象。

核磁共振作为一种无损检测技术,在探究冻融损伤岩石微观孔隙结构方面具有显著优势^[14]。李杰林等^[17-22]对冻融循环作用后不同岩样进行核磁共振检测,发现冻融循环作用会导致岩石微观结构劣化,并揭示了其孔隙结构的演化规律;秦庆词等^[23]对破坏前后的白云岩岩样进行核磁共振检测,分析其孔隙结构变化特征,并建立了可定量评价岩石损伤的数学模型;Yang 等^[24]对花岗岩、大理岩和红砂岩开展单轴压缩试验,采用红外热成像与核磁共振技术监测试验过程中裂隙扩展及循环过程中的孔隙率变化,得出了冻融循环作用下岩石的损伤机理。

红砂岩广泛分布于寒区,是寒区工程中最为常见的岩石类型^[11],因其初始孔隙率较大,极易受到冻融风化作用的影响。不同类型的岩石,乃至不同产地的同类岩石,对冻融作用的响应也可能存在差异。既有研究多集中于低海拔地区砂岩的冻融损伤特性^[7],而对青藏高原高寒环境下红砂岩的多尺度损伤机制尚缺乏系统性分析。基于此,本文以青藏高原地区实地取样的红砂岩为研究对象,结合核磁共振技术定量表征其孔隙结构演化规律,并构建融合弹性模量、孔隙率与裂隙率的综合损伤指标,揭示冻融初期孔隙扩展与后期裂隙加速扩展的耦合机制。

1 试验方案

1.1 岩样制备

岩样取自青藏高原东南部,选取完整性与均匀性较好的红砂岩块,采用水钻法取芯,钻芯方向与红砂岩沉积面方向平行。经对岩芯进行切割、打磨,制备成直径 50 mm、高径比 2 : 1 的圆柱形岩样,剔除存在明显裂隙的岩样。岩样制备过程符合国际岩石力学与岩石工程学会的相关规范要求。X 射线衍射(XRD)分析结果(图 1)表明,该红砂岩岩样主要矿物成分质量分数为:石英 77.9%、钠长石 11.3%、方解石 5.6%、伊利石 3.4%、绿泥石 1.8%。

将符合条件的 20 块红砂岩岩样分为 10 组,每组 2 个岩样,试样编号中,前一数字×10 表示冻融循环次数,后一数字用于区分同组试样,岩样示意图如图 2 所示。

将岩样放入 105℃烘箱中烘干 24 h,待其冷却后测得其干密度平均值为 2.17 g/cm³;再将干燥后的岩样进行抽真空饱和处理,测得其饱和质量,进而计算得到岩样的平均饱和密度为 2.33 g/cm³,孔隙率为

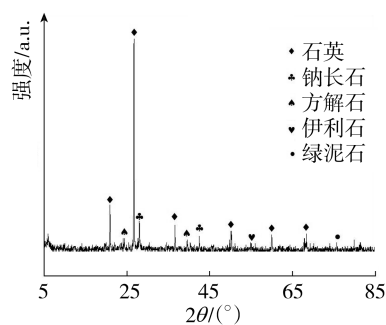


图 1 红砂岩 XRD 衍射图谱
Fig. 1 XRD pattern of red sandstone



图 2 红砂岩岩样
Fig. 2 Red sandstone samples

15.80%。采用 MUT 810 型非金属超声波检测仪测定每块岩样的饱和纵波波速,平均值为 2.45 km/s,所用岩样物理性质均匀性良好。

1.2 试验方案

1.2.1 冻融循环试验

冻融循环试验前,将全部红砂岩岩样置于烘箱中,在 105℃ 条件下烘干 24 h,随后在室温下冷却 12 h。将岩样放入真空饱和仪,使水面完全浸没岩样,开启真空泵抽气至无气泡产生,在大气压下静置 24 h,使岩样达到饱和状态。依据 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》,将饱和岩样放入 BPH120A 高低温试验箱,设定冻结温度为-20℃,融解温度为 20℃,冻结与融解时间均为 4 h。冻结过程采用梯度降温,温度变化速率为 15℃/h,依次开展冻融循环试验。

1.2.2 核磁共振检测

核磁共振检测采用纽迈 MicroMR12150HI 型大口径核磁共振分析与可视化系统,对饱和岩样进行核磁共振弛豫图谱测试,获取岩样横向弛豫时间(T_2)谱分布。检测前采用真空饱和装置对岩样进行强制饱水,饱水完成后用保鲜膜包裹,避免检测过程中岩样水分蒸发散失引起误差。单次核磁共振检测完成后,取出岩样继续开展下一轮冻融循环试验。参考卢汉青等^[22-23]的研究成果,分别选取经历 0、30、60、90 次冻融循环的岩样进行核磁共振检测。

1.2.3 单轴压缩试验

单轴压缩试验采用 YZW50SL 型室内岩石单轴抗压强度试验机,试验机最大法向压力为 500 kN,加载方式为电动液压应力控制。对经历不同冻融循环次数(N)的红砂岩岩样开展单轴压缩试验,采用应力加载控制,加载速率为 0.2 kN/s,岩样破坏后停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环过程中岩样物理性质变化规律

2.1.1 质量变化

冻融循环前后红砂岩的质量变化,可在一定程度上反映冻融作用对岩样的损伤程度。图 3 为岩样干质量与饱和质量平均值变化。可见,岩样干质量平均值整体呈近似线性下降趋势,而饱和质量平均值在前 20 次冻融循环内变化不显著,20 次冻融循环后则呈近似线性上升趋势。冻融循环过程中,水-冰相变的周期性作用导致岩样表面颗粒剥落,干质量下降,但损失相对较小,损失率不足 1%。冻融循环初期,岩样孔隙连通性相对较弱,孔隙吸水增加的质量与干质量损失基本相当,因此饱和质量变化不明显;随着冻融循环次数的增加,岩样内部孔隙不断扩展并相互连通,水分持续渗入新孔隙,新孔隙水分增加质量大于表面颗粒剥落损失质量,最终使得饱和质量持续增大。

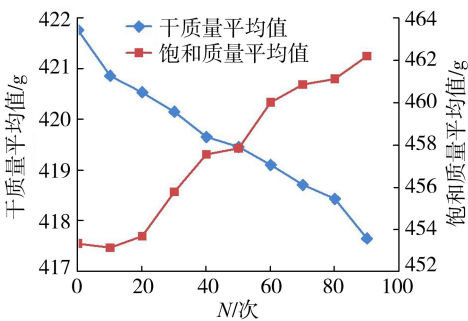


图 3 岩样干质量与饱和质量平均值变化
Fig. 3 Variation of average values of dry mass and saturated mass of rock sample

2.1.2 波速变化

岩石波速是反映岩石质量的重要参数,图4为红砂岩岩样饱和纵波波速及其平均值随冻融循环次数的变化规律,可以看出,随着冻融循环次数的增加,饱和纵波波速持续下降,呈指数衰减趋势,可将其分为快速降低与缓慢降低两个阶段。岩样经10次冻融循环后,饱和纵波波速无明显变化,表明初始10次冻融循环对岩样内部损伤较小;10~50次冻融循环过程中,随着岩体结构损伤加剧,饱和纵波波速快速下降,其平均值较未冻融岩样降低了43.5%。50次冻融循环后,饱和纵波波速下降速率趋缓,表明岩体损伤达到一定程度后,冻融循环对其结构的损伤效应逐渐减弱。

2.1.3 孔隙率变化

孔隙水在水-冰相变过程中产生的冻胀力会导致孔隙扩张与微裂隙的产生,同时水-冰相变对岩样的侵蚀作用会带走其表层细小颗粒,最终体现在岩样孔隙率的变化上。图5为经历90次冻融循环后红砂岩岩样的孔隙率变化规律,其孔隙率随着冻融循环次数的增加呈近似线性增长,分别由初始的15.9%和16.3%增加到90次冻融循环后的21.9%和22.2%,孔隙率较初始值分别增长37.7%、36.2%。

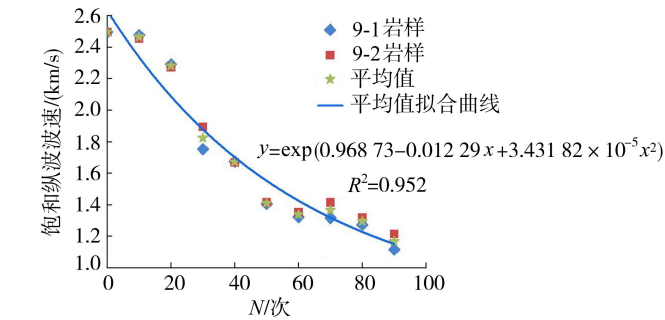


图4 饱和纵波波速及其平均值随冻融循环次数变化规律
Fig. 4 Variation law of saturated longitudinal wave velocity and its average value with number of freeze-thaw cycles

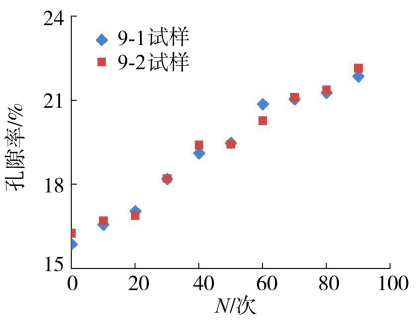


图5 孔隙率随冻融循环次数变化规律
Fig. 5 Variation law of porosity with number of freeze-thaw cycles

2.2 冻融循环过程中岩样力学性质变化规律及破坏模式

2.2.1 应力-应变曲线

岩体强度是岩体抵抗外力荷载的能力,其临界强度为峰值强度(σ)。不同冻融循环次数下红砂岩的单轴压缩应力-应变曲线如图6所示,可见不同冻融循环次数下的单轴压缩应力-应变曲线形态基本相同。冻融循环前后红砂岩的单轴压缩应力-应变曲线均包含孔隙压密阶段、线弹性阶段、塑性变形阶段及峰后破坏阶段。在冻融循环作用下,岩样峰值强度逐渐降低,峰值应变总体呈增大趋势。从曲线形态来看,随着冻融循环次数的增加,孔隙压密阶段不断延长,表明冻融循环促使岩样内部微观孔隙与裂隙不断增多,岩体结构损伤逐步加剧;曲线的线弹性阶段长度逐渐缩短、斜率逐渐降低,表明岩样抵抗变形的能力不断减弱;塑性变形阶段逐渐明显,岩样由初始脆性破坏特征逐渐转变为塑性破坏特征,这是冻融循环增加了岩石的缺陷,造成孔隙率增大(图5),岩样结构遭到破坏,导致其破坏前在应力作用下展现出明显的塑性变形特征。

2.2.2 力学指标变化规律

图7为红砂岩冻融循环次数与其峰值强度和弹性模量的关系曲线。经90次冻融循环后,岩石单轴抗压强度与弹性模量均显著降低:红砂岩峰值强度由31.49 MPa降至11.49 MPa,弹性模量由26.87 GPa降至12.48 GPa,降幅分别为63.5%和53.6%。峰值强度与弹性模量衰减率随冻融循环次数增加呈先缓慢降低、后快速降低的趋势。冻融循环60次前,岩样峰值强度与弹性模量整体呈线性下降;循环次数达70次后,二者均急剧下降。说明在长期冻融循环作用下,岩样内部损伤持续累积,结构性和整体性破坏显著,在荷载作

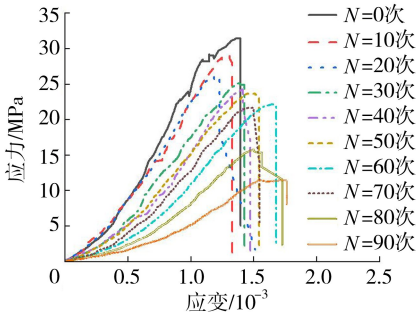


图6 冻融循环作用下红砂岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 6 Uniaxial compression stress-strain curves of red sandstone under freeze-thaw action

用下更易发生变形与破坏。

岩体力学性质的改变是其内部结构损伤的宏观体现。图 8 为红砂岩孔隙率与其峰值强度、弹性模量的关系。可见岩样峰值强度与弹性模量均与孔隙率呈负相关关系。孔隙的发育、扩展与连通削弱了岩石内部矿物胶结强度,加剧了内部损伤,是寒区岩石力学性质劣化的主要原因。

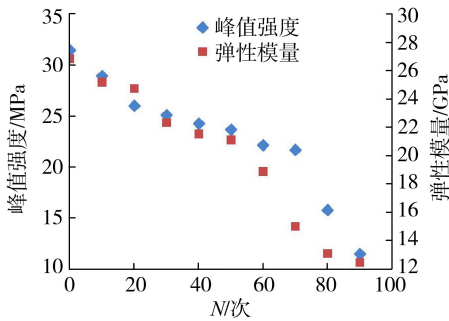


图 7 力学性质与冻融循环次数关系曲线

Fig. 7 Relationship between mechanical properties and number of freeze-thaw cycles

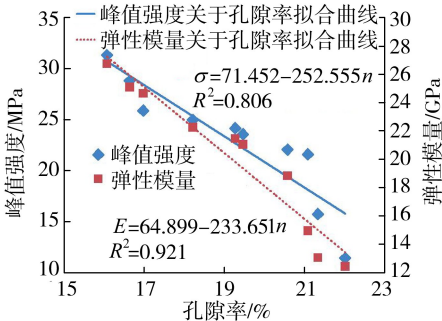


图 8 力学性质与孔隙率关系曲线

Fig. 8 Relationship between mechanical properties and porosity

2.2.3 破坏模式

红砂岩岩样在单轴压缩试验中主要表现为两种典型的破坏模式:轴向劈裂破坏和剪切破坏。图 9 为不同冻融循环次数下岩样的破坏形态,可以看出,冻融循环初期岩样以轴向劈裂破坏为主;随着冻融损伤的累积,当冻融循环次数达到 20 次时,岩样破坏模式逐渐转变为剪切破坏。岩样剪切破坏后的完整性显著下降,表层裂隙增多,碎块剥离现象加剧。表明冻融循环作用显著促进了岩样内部微裂隙的发育与扩展,且冻融循环次数越多,对岩样表层破坏形态的影响越显著。

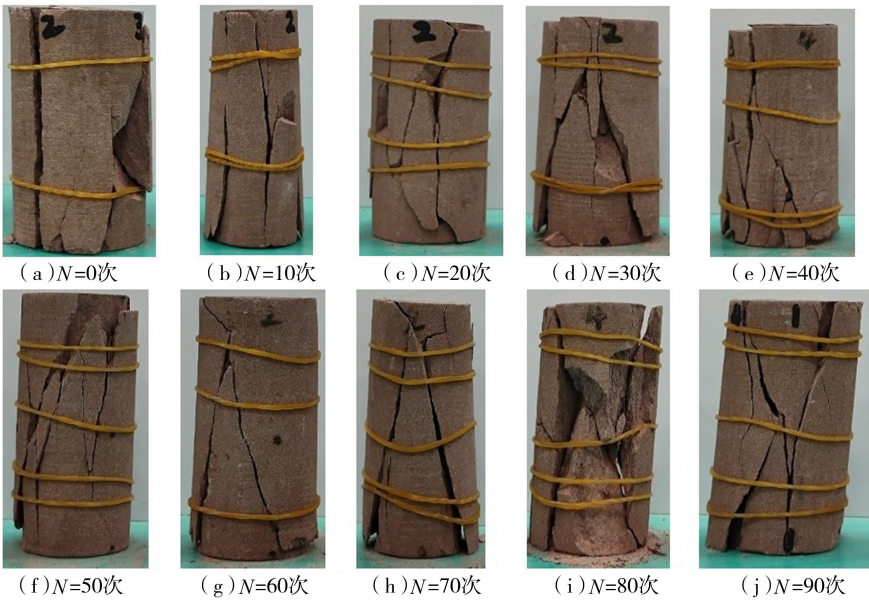


图 9 不同冻融循环次数红砂岩破坏形态

Fig. 9 Failure morphology of red sandstone under different numbers of freeze-thaw cycles

2.3 冻融循环过程中岩石宏、微观结构演化规律

2.3.1 核磁共振 T_2 谱分布

核磁共振技术通过测量岩石内部水分氢核在磁场中的响应,获取岩石孔隙结构与裂隙分布信息,进而分析其破坏状态。 T_2 反映孔隙尺寸信息,且与孔隙尺寸成正比; T_2 谱峰面积反映孔隙数量,面积越大则对应孔径的孔隙数量越多;通过分析 T_2 谱,可获得岩石内部孔隙水及孔隙分布情况。

根据测试结果,得到 9-1、9-2 岩样在不同冻融循环阶段的 T_2 谱分布,如图 10 所示。岩样 T_2 谱均表现为 3 个峰,随着冻融循环次数的增加, T_2 谱各波峰均向上偏移,峰面积均有所增大。经 30 次冻融循环后,第

3个波峰逐渐显著,表明红砂岩损伤逐步累积,大孔径的核磁信号幅度增大,孔隙不断扩展并相互连通,最终转变为大孔。冻融循环90次时,第3峰信号强度明显增强,表明冻融循环作用促使小孔、中孔扩展为大孔。大孔数量显著增加,说明岩石在长期冻融循环下发生明显劣化,冻融损伤主要表现为大孔的广泛发育。

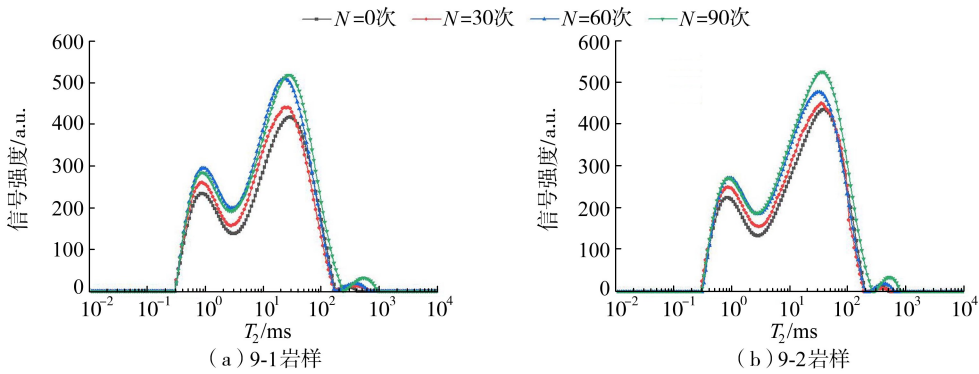


图 10 不同冻融循环次数 T_2 谱分布

Fig. 10 T_2 spectrum distribution under different numbers of freeze-thaw cycles

2.3.2 孔隙结构演化规律

核磁共振 T_2 谱可定量计算红砂岩孔隙分布情况。多孔介质 T_2 与孔隙半径(r)的关系可表示为:

$$\frac{1}{T_2}=\rho_2\frac{S}{V}=\rho_2\frac{F_s}{r}$$

(1)

式中: ρ_2 为颗粒表面弛豫强度,即表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S 为孔隙表面积, cm^2 ; V 为孔隙体积, cm^3 ; F_s 为孔隙形状因子,无量纲(球形孔隙 $F_s=3$; 管状孔隙 $F_s=2$)。

由式(1)变换可得:

$$r=\rho_2F_sT_2$$

(2)

本文默认红砂岩孔隙结构为管状孔隙。因此,通过测得红砂岩岩样的 T_2 ,便可得到其孔隙结构分布。红砂岩在不同冻融循环次数下的孔径分布如图 11 所示。

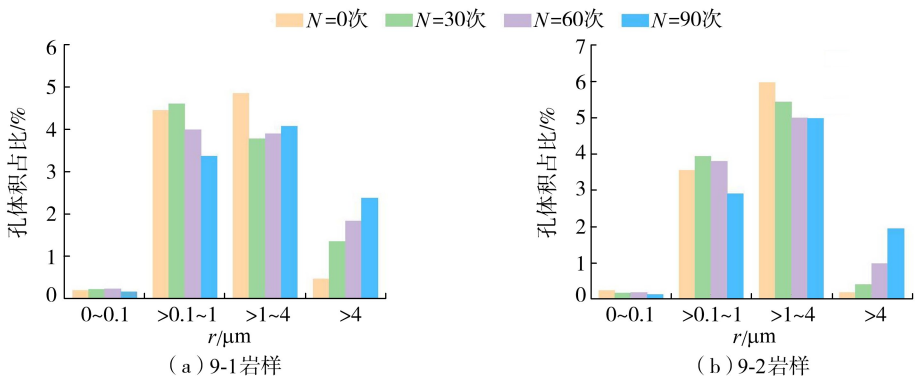


图 11 不同冻融循环次数红砂岩孔径分布

Fig. 11 Pore size distribution of red sandstone under different numbers of freeze-thaw cycles

岩石的孔径分布特征为研究岩石孔隙结构及其演变对力学性质劣化的影响等提供了重要依据。借鉴 Yan 等^[25]的研究成果,本文设定 $0\sim0.1\mu\text{m}$ 为微孔, $>0.1\sim1\mu\text{m}$ 为小孔, $>1\sim4\mu\text{m}$ 为中孔, $>4\mu\text{m}$ 为大孔。

由图 11 可知,在不同的冻融循环阶段,红砂岩的孔隙结构均以小孔和中孔为主。随着冻融循环次数的增加,红砂岩孔隙结构发生显著变化,整体表现为小孔、中孔占比减少,大孔占比升高,微孔占比最小且基本保持稳定。推测其原因可能为,小孔、中孔在水-冰相变产生的冻胀力作用下不断扩展并连通形成大孔,大孔产生的冻胀力对周围微孔产生挤压,限制了微孔发育。冻融劣化主要表现为大孔占比增大。

图 12 为不同冻融循环次数下大孔体积占比,可以看出,随着冻融循环次数的增加,两岩样的大孔体积占比均呈线性增长,经 90 次冻融循环后,9-1 岩样大孔体积占比由 4.7% 升至 23.8%,9-2 岩样由 2.0% 升至 19.5%。

2.3.3 表观裂隙发展规律

在冻融过程中,当孔隙冰冻胀力超过矿物颗粒抗拉强度时,颗粒间联结会发生断裂,产生微裂纹;冰融化过程中,孔隙水渗入微裂隙,在下一冻结过程将导致微裂隙的进一步扩展和延伸,逐步形成宏观裂隙。为了观察岩样在冻融循环过程中裂隙的形成过程,每 10 次冻融循环后对岩样表观形态进行拍照记录,将岩样四面图像拼接为完整图片,得到第 9 组两个经历 90 次冻融循环红砂岩岩样表面裂隙发育演化过程图像,如图 13 所示。

由图 13 可见,两岩样的裂隙扩展规律基本一致。在前 20 次冻融循环过程中,岩样表面粗糙程度增大,但未观察到宏观裂隙的产生,该过程为孔隙连通与损伤累积阶段。冻融循环次数达 30 次时,9-1 岩样表面出现一条长度约 4 mm、近垂直于岩样轴线的裂隙。在冻融循环 40 次时,9-1 岩样表面裂隙扩展至约 1.2 cm,而 9-2 岩样表面出现类似的水平裂隙,且在裂隙中部发现沿轴向扩展。随着冻融循环次数的增加,两岩样均以横向裂隙发育为主,并伴有次生的轴向裂隙发育,裂隙的张开程度、数量与长度均不断增大,反映了冻融的累积效应加剧了岩样的结构损伤。经过 90 次冻融循环,9-1 岩样表面已经形成连通的环向裂隙,9-2 岩样表面裂隙也趋于连通,轴向裂隙持续扩展、张开程度增大,表现出由外向内扩展的趋势。可以推断,进一步增加冻融循环次数,裂隙将贯通岩样,最终导致岩石的断裂和破碎。

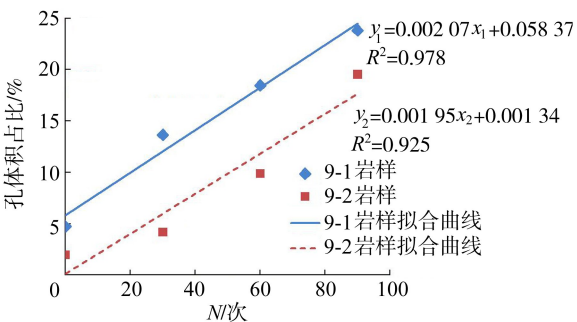


图 12 不同冻融循环次数下大孔体积占比
Fig. 12 Volume proportion of large pores under different numbers of freeze-thaw cycles

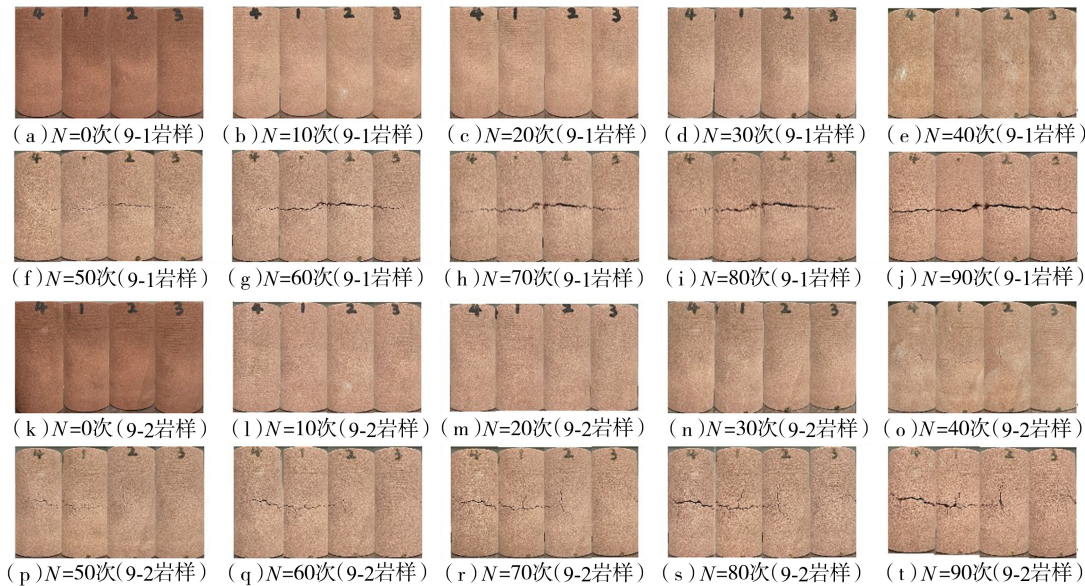


图 13 不同冻融循环次数下红砂岩表面裂隙发育过程

Fig. 13 Development process of surface cracks in red sandstone under different numbers of freeze-thaw cycles

采用 Matlab 与 Photoshop 软件对表观裂隙发育图进行二值化处理,即岩样二值化图像,再利用 Matlab 软件统计黑白像素点数量,其中黑色像素点代表表面裂隙区域,白色像素点代表无裂隙区域。

对岩样的二维图像采用面裂隙率表示,裂隙率是衡量岩体完整性的重要指标。面裂隙率是指裂隙面积与岩石表面积的比值,本文可表示为黑色像素点数量与黑、白像素点数量之和的比值,以百分数计。

在二值化图像中,裂隙总长度以黑色像素点总数表征;对于存在多条裂隙分叉的情况,先在交叉点处将复合裂隙分割为多条单一裂隙,再将各单一裂隙长度相加,即可得到裂隙总长度。

图 14 为红砂岩裂隙量化指标随冻融循环次数的变化曲线。由图 14 可知,随着冻融循环次数的增加,红砂岩的面裂隙率、裂隙总长度均逐渐增大。冻融循环至 30 次时,两岩样的面裂隙率、裂隙总长度均无明显变化,原因为该阶段岩样正处于微观损伤累积阶段,尚未形成显著宏观损伤。40 次冻融循环后,两岩样的面裂隙率分别从上一冻融循环阶段的 0.09% 和 0.25% 增至 0.32%,裂隙总长度也呈指数级增长,表明微观损

伤已达到阈值,并开始转化为宏观裂隙,表现为宏观裂隙的发育与延伸。随着冻融循环次数的增加,面裂隙率和裂隙总长度均缓慢增长;至80次冻融循环时,两岩样的面裂隙率较上一冻融循环阶段增长了37.0%~48.4%;90次冻融循环后,岩样的面裂隙率分别为1.75%和1.90%,裂隙总长度分别为226.8 mm和219.63 mm。

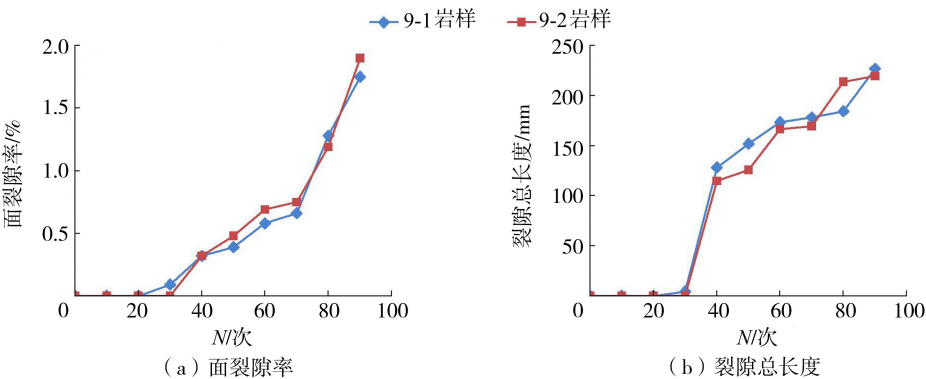


图 14 红砂岩裂隙量化指标随冻融循环次数的变化曲线

Fig. 14 Variation of quantitative indicators of cracks in red sandstone with number of freeze-thaw cycles

3 冻融红砂岩的损伤特性

3.1 总损伤变量演化方程

在岩石损伤理论研究中,选择合适的损伤变量至关重要。以往多采用宏观力学参数(如波速、弹性模量等)表征岩石的损伤,但该类参数仅能反映岩石的宏观力学行为,而岩石力学性质劣化的本质在于其微观结构的损伤。以经历冻融循环的红砂岩为例,其宏观力学性质的变化主要源于孔隙率的改变,尤其是大孔体积占比的变化;同时,裂隙率的变化也对岩样的宏观力学性质具有重要影响。基于此,本文采用大孔体积占比和裂隙率定义损伤变量,以准确反映岩样在不同冻融循环次数下的损伤程度:

$$D_p = (v_N - v_0) / (v_{\max} - v_0) \tag{3}$$

$$D_c = (C_N - C_0) / (C_{\max} - C_0) \tag{4}$$

式中: D_p 为细观孔隙损伤变量; v_N 为冻融循环 N 次后大孔体积占比; v_0 为未冻融岩石的大孔体积占比; $v_{\max}$ 为大孔体积占比极限值,设 $v_{\max} = 25\%$; D_c 为裂隙率损伤变量; C_N 为冻融循环 N 次后岩石的裂隙率; C_0 为未冻融岩石的裂隙率,设 $C_0 = 0.05\%$; $C_{\max}$ 为裂隙率极限值,设 $C_{\max} = 2.0\%$ 。

冻融损伤会导致岩石力学性质劣化,并在力学参数上有所体现,因此可采用弹性模量定义岩石的冻融损伤变量,即

$$D_N = 1 - E_N / E_0 \tag{5}$$

式中: D_N 为冻融循环 N 次后岩石弹性模量损伤变量; E_N 为冻融循环 N 次后岩石的弹性模量; E_0 为未冻融岩石的弹性模量。

假设总损伤 D 为弹性模量损伤、细观孔隙损伤及裂隙率损伤的线性组合,可得红砂岩冻融总损伤量为:

$$D = \alpha D_N + \beta D_p + \gamma D_c \tag{6}$$

式中: α, β, γ 为权重,满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。为体现冻融损伤与孔隙-裂隙损伤的耦合作用,引入协同修正项:

$$D = \alpha D_N + \beta D_p + \gamma D_c + \lambda D_N (D_p + D_c) \tag{7}$$

式中: λ 为协同修正系数。为计算最小化预测值 D_d 与假设总损伤 D_e 的均方误差,定义假设总损伤表达式为:

$$D_e = N_i / 90 \tag{8}$$

式中: N_i 为第 i 个冻融循环次数。

则最小化预测值与假设总损伤表达式为:

$$J(\alpha, \beta, \gamma, \lambda) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(D_d(N_i) - \frac{N_i}{90} \right)^2 \tag{9}$$

式中: J 为均方误差函数; m 为样本数量。

采用带约束的最小二乘算法进行参数优化,求解得到最优参数如下: $\alpha = 0.42, \beta = 0.35, \gamma = 0.23, \lambda = 0.05; R^2 = 0.976$;均方误差为 0.012。

将参数代入式(7),可得冻融砂岩总损伤变量演化方程为
$$D = 0.42D_N + 0.35D_p + 0.23D_c + 0.05D_N(D_p + D_c) \quad (10)$$

3.2 冻融红砂岩损伤演化

图 15 为冻融循环次数与总损伤值变化规律,可以看出, D_d 与 D_e 在冻融循环初期 ($N \leq 30$ 次) 呈现高度一致性,预测误差小于 6.3%;随着冻融循环次数的增加,预测值逐渐偏离线性假设,冻融循环次数达 90 次时绝对误差达 7.9%。该偏差表明,总损伤变量演化方程虽能较好地表征冻融初期以大孔隙扩展为主导的渐进损伤,但对后期孔隙-裂隙加速扩展与力学性质骤降的耦合效应存在低估。

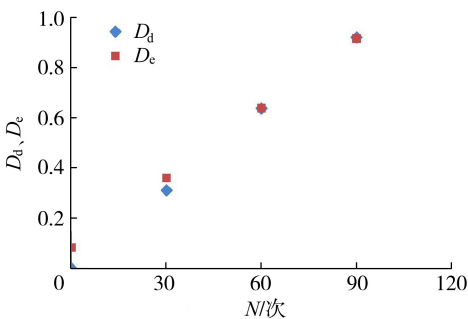


图 15 总损伤值随冻融循环次数变化规律
Fig. 15 Variation law of total damage value with unnumber of freeze-thaw cycles

4 结 论

- a. 冻融循环导致红砂岩孔隙率线性增长、波速指数衰减及力学性质显著劣化。经 90 次冻融循环后,红砂岩的峰值强度由初始的 31.49 MPa 显著降低至 11.49 MPa,降幅达 63.5%;弹性模量由 26.87 GPa 降至 12.48 GPa,降幅为 53.6%。冻融循环超过 70 次后,红砂岩整体性破坏明显加剧,表明岩样已进入加速损伤阶段。
- b. 核磁共振测试结果表明,冻融循环作用促使小、中孔扩展并连通为大孔。经 90 次冻融循环后,红砂岩的大孔占比由初始的 4.7% 和 2.0% 分别升至 23.8% 和 19.5%,孔隙结构劣化是岩石力学性质下降的关键因素。
- c. 裂隙演化具有明显阶段特征:30 次冻融循环前以微观孔隙扩展为主,30 次冻融循环后宏观裂隙加速发育,90 次冻融循环后面裂隙率达 1.75%~1.90%,裂隙总长度超 200 mm,最终导致岩石开裂破碎。
- d. 建立了冻融条件下红砂岩总损伤变量演化方程,可较好表征冻融初期损伤特征,但对孔隙-裂隙与力学性质的耦合效应需进一步优化。

参考文献:

[1] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.

[2] de Kock T, Boone M A, de Schryver T, et al. A pore-scale study of fracture dynamics in rock using X-ray micro-CT under ambient freeze-thaw cycling[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(5): 2867-2874.

[3] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468. (Xue Yiguo, Kong Fanmeng, Yang Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Xizang railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468. (in Chinese))

[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. (in Chinese))

[5] 李勇,桂辉高,陈结,等. 不同冻融条件下砂岩损伤力学特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 813-823. (Li Yong, Gui Huigao, Chen Jie, et al. Damage mechanical properties of sandstone under different freeze-thaw conditions[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2024, 41(4): 813-823. (in Chinese))

[6] 杨有贞,林青青,冯海燕,等. 冻融循环作用下贺兰山遗址区岩石损伤特征研究[J]. 地基处理, 2022, 4(5): 372-379. (Yang Youzhen, Lin Qingqing, Feng Haiyan, et al. Study on damage characteristics of rock in Helan Mountain site under freeze-thaw cycle treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(5): 372-379. (in Chinese))

[7] Liu Yanzhang, Cai Yuantian, Huang Shibing, et al. Effect of water saturation on uniaxial compressive strength and damage degree of clay-bearing sandstone under freeze-thaw[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 79: 2021-2036.

[8] Momeni A, Abdilor Y, Khanlari G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1649-1656.

[9] Ghobadi M H,Babazadeh R. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing,salt crystallization,and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(3): 1001-1016.

[10] 苏占东,孙进忠,夏京,等. 冻融循环对花岗岩声发射特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(5):865-874. (Su Zhandong,Sun Jinzhong,Xia Jing,et al. Experimental research of the effect of freezing-thawing cycles on acoustic emission characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):865-874. (in Chinese))

[11] 叶永芃,杨圣奇,孙博文. 红砂岩冻融循环三轴力学特性及损伤机制[J]. 实验力学,2023,38(6):751-761. (Ye Yongpeng, Yang Shengqi,Sun Bowen. Triaxial mechanical properties and damage mechanism of the freeze-thaw cycle of red sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics,2023,38(6):751-761. (in Chinese))

[12] 于超云,黄生辉,吴祥业,等. 冻融循环对不同饱和度红砂岩力学特性和破坏特征的影响[J]. 矿业研究与开发,2025,45(2):162-170. (Yu Chaoyun,Huang Shenghui,Wu Xiangye,et al. The influence of freeze-thaw cycles on the mechanical properties and failure characteristics of red sandstone with different saturation levels[J]. Mining Research and Development, 2025,45(2):162-170. (in Chinese))

[13] Qi Changqing,Guo Weichao,Li Qingpeng,et al. Decay function and damage strain model of fresh sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2023,82(5):181.

[14] 廖明可,崔德山,刘煜,等. 冻融循环下须弥山石窟红砂岩劣化试验研究[J]. 安全与环境工程,2024,31(4):142-150. (Liao Mingke,Cui Deshan,Liu Yu,et al. Experimental study on the deterioration of red sandstone in Xumishan Grottoes under freeze-thaw cycles[J]. Safety and Environmental Engineering,2024,31(4):142-150. (in Chinese))

[15] 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. (in Chinese))

[16] 杨更社,申艳军,贾海梁,等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3): 545-563. (Yang Gengshe,Shen Yanjun,Jia Hailiang,et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(3):545-563. (in Chinese))

[17] 李杰林,周科平,张亚民,等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1208-1214. (Li Jielin,Zhou Keping,Zhang Yamin,et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(6):1208-1214. (in Chinese))

[18] Liu Chuanju,Deng Junren,Yu Songtao,et al. Effect of freezing and thawing on microstructure damage and dynamic flexural tension of granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(4):3853-3858.

[19] 夏飞,赵文奎,廖勋. 冻融循环作用下岩石的拉压强度劣化模型[J]. 矿业研究与开发,2022,42(8):146-152. (Xia Fei, Zhao Wenkui,Liao Xun. Strength degradation model of rock in tension and compression under freeze-thaw cycles[J]. Mining Research and Development,2022,42(8):146-152. (in Chinese))

[20] Qi Changqing,Li Qingpeng,Ma Xiaofan,et al. Deterioration of fresh sandstone caused by experimental freeze-thaw weathering [J]. Cold Regions Science and Technology,2023,214:103956.

[21] Wang Fei,Cao Ping,Wang Yixian,et al. Combined effects of cyclic load and temperature fluctuation on the mechanical behavior of porous sandstones[J]. Engineering Geology,2020,266:105466.

[22] 卢汉青,包卫星,陈锐,等. 基于核磁共振技术的冻融板岩损伤特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2025,21(1):78-86. (Lu Hanqing,Bao Weixing,Chen Rui,et al. Experimental study on damage characteristics of freeze-thaw slate based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2025,21(1):78-86. (in Chinese))

[23] 秦庆词,李克钢,李明亮,等. 基于核磁共振技术的白云岩微观损伤致劣机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(增刊 1):2944-2954. (Qin Qingci,Li Kegang,Li Mingliang,et al. Study on the deterioration mechanism of dolomite microscopic damage based on NMR technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(S1):2944-2954. (in Chinese))

[24] Yang Chun,Zhou Keping,Xiong Xin,et al. Experimental investigation on rock mechanical properties and infrared radiation characteristics with freeze-thaw cycle treatment[J]. Cold Regions Science and Technology,2021,183(6):103232.

[25] Yan Jianping,Wen Danni,Li Zunzhi,et al. A quantitative evaluation method of low permeable sandstone pore structure based on nuclear magnetic resonance (NMR) logging:a case study of Es4 formation in the south slope of Dongying sag[J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(3):313-322.