

冻融作用下北石窟寺弱胶结砂岩结构损伤机制研究

陈佳仪^{1,2}, 张理想^{1,2,3*}, 张景科^{1,2,3}, 薛炳章^{1,2}, 张浩^{1,2}, 王彦武⁴

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 岩土质文物保护基础科学研究与人才培养甘肃省文物局重点科研基地, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘要: 开凿于弱胶结砂岩层上的北石窟寺因长期遭受冻融作用而诱发了严重的风化问题。为探究其结构损伤机制, 基于洞窟外部环境温度变化特征对饱和砂岩试样开展冻融循环试验。在 0, 5, 10, 15, 20 次循环后进行质量、弹性波速、干密度、相对密度、孔隙率、矿物成分 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和核磁共振 (NMR) 测试, 从宏观和微观 2 个维度共同阐释其损伤演化规律, 进而揭示其结构损伤机制。结果表明: (1) 砂岩宏观劣化初期表现为颗粒剥落与裂隙发育, 后期剥落加剧、裂隙贯通并诱发局部掉块。(2) 砂岩质量、波速和干密度随循环次数的增加而减小, 而相对密度与孔隙率增大。(3) 冻融作用促使不同尺寸孔隙的体积占比发生波动。与初始状态相比, 最终小孔和中孔的体积占比减小, 而大孔增加。(4) 砂岩冻结依次经历未冻结 - 过冷 - 快速冻结 - 稳定冻结四个阶段, 冻结过程中冻胀压力驱动颗粒破裂、孔隙发育与微裂纹扩展; 融化阶段依次为未融化 - 缓慢融化 - 快速融化, 融化后砂岩结构失去冰晶的支撑从而破坏。(5) 砂岩中的有效冻胀力随循环次数的增加而增大, 结晶压力与孔径大小呈显著的负相关关系。(6) 微观结构损伤的累积最终表现为宏观的破坏与物理性能的衰减。研究成果可为弱胶结砂岩石窟寺的保护提供参考依据。

关键词: 岩石力学; 北石窟寺; 弱胶结砂岩; 冻融循环; 核磁共振; 结构损伤机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)03 - 0750 - 14

第一作者: 陈佳仪 (2001 -), 现为硕士研究生, 主要从事岩土质不可移动文物保护方面的研究工作。E-mail: chjiayi2023@lzu.edu.cn

***通信作者:** 张理想 (1992 -), 现任实验师, 主要从事岩土质不可移动文物保护方面的研究工作。E-mail: zhanglixiang@lzu.edu.cn

Structural damage mechanism of weakly cemented sandstone from the North Grotto Temple under freeze-thaw action

CHEN Jiayi^{1,2}, ZHANG Lixiang^{1,2,3*}, ZHANG Jingke^{1,2,3}, XUE Bingzhang^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, WANG Yanwu⁴

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Key, Scientific Research Base of Basic Science of Rock-Earthen Relics Protection and Talents Cultivation, Cultural Heritage Bureau of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China)

收稿日期: 2025 - 07 - 28; **修回日期:** 2025 - 10 - 29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42402293); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (lzujbky - 2024 - 24); 甘肃省文物保护科学和技术研究课题 (GSWW202469)

Supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42402293), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. lzujbky - 2024 - 24) and Gansu Province Cultural Heritage Conservation Scientific and Technological Research Project (Grant No. GSWW202469)

Abstract: The North Grotto Temple, constructed on weakly cemented sandstone formations, has suffered from significant weathering due to prolonged freeze-thaw cycles. To explore the structural damage mechanisms, the saturated sandstone samples were used to simulate the external temperature variations endured by the grotto. After 0, 5, 10, 15, and 20 cycles, the mass, elastic wave velocity, dry density, relative density, porosity, X-ray diffraction (XRD) mineral analysis, scanning electron microscopy (SEM), and nuclear magnetic resonance (NMR) were tested. The evolution of damage was analyzed from both macro-scale and micro-scale perspectives, clarifying the structural damage mechanisms. The results indicate that: (1) The macroscopic deterioration of sandstone initially manifested as granular disintegration and the cracks development. In subsequent stages, the samples showed more severe disintegration, and local block detachment was attributed to the cracks coalesce. (2) The samples displayed a decrease of mass, wave velocity, and dry density with an increasing number of cycles, while relative density and porosity increased. (3) Freeze-thaw action induced fluctuations in the volume ratio of pores of different sizes. Compared to the initial state, the final volume ratio of small and medium pores decreased, whereas the ratio of large pores increased. (4) The freezing stages of sandstone progressed from the unfrozen stage to the supercooling stage, rapid freezing stage, and stable freezing stage. Freezing pressure promoted particle breakage, pore development, and crack propagation. The thawing stages followed a sequence from the unfrozen stage to the slow thawing stage and rapid thawing stage. Upon thawing, the sandstone structure lost support from ice crystals, leading to structural failure. (5) The effective frost heaving pressure in sandstone increased with the number of freeze-thaw cycles, while crystallization pressure showed a significant negative correlation with pore size. (6) The accumulation of microstructural damage ultimately resulted in macroscopic failure and the degradation of physical properties. These research findings can serve as a reference for the protection of weakly cemented sandstone grotto temples.

Key words: rock mechanics; North Grotto Temple; weakly cemented sandstone; freeze-thaw cycles; nuclear magnetic resonance (NMR); structural damage mechanism

First author: CHEN Jiayi(2001 -), postgraduate student, is engaged in immovable rock-earthen relics protection. E-mail: chjiayi2023@lzu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Lixiang(1992 -), lab assistant, is engaged in immovable rock-earthen relics protection. E-mail: zhanglixiang@lzu.edu.cn

1 引言

石窟寺是我国珍贵的文化遗产, 具有极高的文物价值^[1]。然而在我国西北地区(尤其是陇东地区), 砂岩石窟寺正面临着严峻的冻融破坏问题^[2]。该区域石窟寺岩体以弱胶结砂岩为主, 这种砂岩以石英和长石为骨架颗粒, 胶结物含量小于总含量的 30%, 具有孔隙疏松、胶结程度差等特点^[3-4]。同时, 该地区降雨充沛、昼夜温差大^[5], 为冻融病害的发育提供了有利条件。然而目前的研究对弱胶结砂岩冻融损伤机制的认识尚不充分, 这在很大程度上限制了石窟寺的有效保护, 因此有必要深入研究冻融作用下弱胶结砂岩的结构损伤机制。

近年来, 关于冻融对岩石损伤的研究已有较多成果。在宏观物理力学性质方面, 奚家米等^[6-7]通过设置 -30 °C 冻结 48 h, 20 °C 解冻 48 h 的循环条件, 结合吸水率和单轴压缩等测试, 研究了冻融后砂岩

的物理力学性能衰减规律。B. Liu 等^[8]对 -20 °C 冻结 24 h、20 °C 解冻 24 h 后的样品进行三轴渗流测试和声发射监测, 研究了冻融前后鄂尔多斯砂岩的渗透特性和内部裂纹演化特征。徐 杨等^[9]通过开展 -20 °C 冻结 4 h、20 °C 融化 4 h 的循环试验, 发现不同饱水度砂岩的波速与强度均随冻融循环次数的增加而呈衰减趋势。李栋伟等^[10]基于高压固结、低温冻结和加卸载试验, 构建了低温软岩黏弹塑非线性蠕变本构模型。魏 尧等^[11]在 -10 °C 的低温环境下开展三轴蠕变力学试验, 研究了砂岩的蠕变规律, 并建立了低温 - 应力蠕变损伤本构模型。在微观结构损伤方面, J. Lin 等^[12]利用 NMR 技术, 结合 T_2 分形理论和谱峰分析方法, 研究了砂岩的孔隙结构演变特征, 发现随着冻融作用的进行, 砂岩骨架约束逐渐减弱并伴随次生孔隙的产生, 试验后期连通性的增强导致冻胀效应弱化。张景科等^[13]利用红外热成像技术和 SEM 等手段研究了冻融作用下砂岩的水岩作用机制, 发现冻融前期水 - 岩化学作用强

烈, 随后物理作用增强。张理想^[14]从表观形貌、矿物成分和微观结构等多方面综合探究了砂岩冻融劣化机制, 研究表明冻融循环中的冻胀力与水岩化学作用等使得砂岩内部小孔径孔隙逐渐转变为大孔径孔隙。

当前, 大多数研究集中于致密性较好、孔隙率较低的岩体, 而针对高孔隙率、低强度的弱胶结砂岩冻融损伤研究则较少。关于弱胶结砂岩冻融损伤的研究, 主要依赖于室内冻融试验, 但试验设计上普遍采用极端温度循环, 忽略了实际环境中的温度梯度效应。此外, 现有研究侧重于宏观物理指标表征、力学性能的变化及本构模型的推导, 对微观结构损伤机制的探究不足。岩石冻融损伤的本质为水冰相变产生的冻胀力诱导内部孔隙发生膨胀变形^[15-17], 因此厘清弱胶结砂岩冻融过程中微观结构的变化特征对于阐述其损伤机制至关重要。然而现有微观研究多聚焦于冻融前后静态孔隙结构变化, 缺乏对孔隙水冻结-融化全过程相变行为的动态追踪。

基于以上不足, 本文以庆阳北石窟寺弱胶结饱和砂岩为研究对象, 以石窟寺实际环境温度作为试验加载条件进行冻融循环。在不同冻融循环次数后记录砂岩试样宏观劣化特征, 测量质量、弹性波速、干密度、相对密度、孔隙率及矿物成分等指标, 利用 SEM 技术探究砂岩微观结构损伤, 利用 NMR 技术查明砂岩冻融动态过程中孔隙水相变行为及冻融前后孔隙演化情况。同时, 基于已有的研究成果对砂岩中的有效冻胀力和不同孔径中的结晶压力进行了计算。此外, 对裂隙长度-孔隙率、剥落体积- T_2 谱面积等进行了宏微观指标的关联性分析。本文从多角度出发, 共同探究冻融作用下北石窟寺弱胶结砂岩损伤演化规律, 进而揭示其结构损伤机制。本研究旨在为石窟寺岩体冻融损伤评估及保护提供科学依据。

2 试验概况

2.1 区域地质概况

北石窟寺开凿于甘肃省庆阳市西峰区西南 25 km 处, 蒲河和茹河交汇之东岸的覆钟山崖壁上, 海拔高度 1 064~1 084 m^[14]。石窟所在崖体由上部马兰黄土(Q₃^{col})和下部白垩系罗汉洞组砂岩(K₁lh)组成。上覆黄土土质均匀而松散。窟区砂岩多呈平缓近似水平的产状, 部分层面可见波状波痕, 属河湖边缘相沉积, 局部区域发育斜层理^[18-19]。砂岩胶结

性差, 岩性软弱, 顺层理面裂隙发育。气候上属北温带大陆性季风气候, 冬冷夏热, 昼夜温差大, 太阳辐射强。降水量主要集中于夏、秋两季, 冬季偏少。域内含有潜水和基岩裂隙水, 主要接受地表径流和大气降水的补给^[5]。

2.2 试验样品

试验样品取自北石窟寺北侧同层直立崖面, 远离石窟寺本体区域, 但与本体具有相似的沉积环境和岩性特征。为确保试样的代表性和完整性, 取样时避开了表面风化严重及有裂隙发育的区域。参照标准^[20]将取回的砂岩制成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形岩样并将其烘干(见图 1(a))。为减少样品差异性带来的系统误差, 对干燥后的砂岩样品进行质量、波速和体积测试, 剔除与平均值偏差 10% 的样品(见图 1(b))。样品基本物理性质如表 1 所示。

2.3 试验方案及依据

(1) 冻融条件设置

为了更加贴近北石窟寺弱胶结砂岩的冻融环境, 基于北石窟寺 2013~2019 年洞窟外部温度监测数据, 设计室内冻融循环试验。监测数据表明, 北石窟外部环境温度极值分别为 42 °C 和 -18.5 °C, 最大温度变化梯度为 ± 8 °C/h, 因此试验中将冻融循环的融化和冻结温度分别设为 42 °C 和 -18.5 °C。试验中试样先以 -8 °C/h 的降温速率从 42 °C 降至 -18.5 °C, 到达 -18.5 °C 后持续冻结 4 h, 随后以 +8 °C/h 的升温速率从 -18.5 °C 升至 42 °C, 到达 42 °C 后持续融化 4 h, 以上全过程视为 1 次冻融循环, 历时 23.13 h(见图 1(c))。

(2) 试验过程

在测试前, 参照标准^[20]将所有样品真空饱和并采用保鲜膜密封, 防止水分散失(见图 1(d))。在程式冻融试验箱中(见图 1(e))完成 $N(N$ 为冻融循环次数, $N = 0, 5, 10, 15, 20$) 次循环后, 如图 1(f) 所示, 测试样品的质量和波速(样品数量: 9), 并对其进行相机拍摄。此外, 选取平行试样进行相对密度(数量: 3)、干密度(数量: 3)、XRD(数量: 3)及 SEM(数量: 1)的测试。同时开展如图 1(g) 所示的 NMR(数量: 1): 在样品常温成像(24 °C)后, 进行低温 T_2 谱图的测试, 为确保数据可靠性, 测试时将温度控制到目标温度后, 保持 30 min 再进行测量。将一次低温测试过程近似等效为一次冻融循环, 测试完成后与其他样品共同进行下一次冻融循环。为保证样品饱和状态, 每次循环前均进行重新饱和与密封处理。冻融进行至 20 循环时样品严重破坏, 停止试验。



图 1 北石窟寺试样制备及试验流程

Fig.1 Specimen preparation and test process of the North Grotto Temple

表 1 北石窟寺砂岩基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of sandstone of the North Grotto Temple

密度(density)/(g · cm ⁻³)			吸水率(water absorption)/%	
颗粒密度 (particle density)	干密度 (dry density)	饱和密度 (saturated density)	天然吸水率 (natural water absorption)	饱和吸水率 (saturated water absorption)
2.69	1.86	1.95	11.15	14.41

3 试验结果及分析

3.1 宏观劣化特征

试样正面和侧面劣化特征如图 2 所示。初始状态下(见图 2(a)), 试样结构保持完整, 水平沉积层理清晰可见。经历 5 次冻融循环后(见图 2(b)), 试样正面开始出现少量“团聚状”颗粒剥落 B_1 , 侧面沿层理方向萌发了一条浅表性裂隙 L_1 。随着循环的推进(见图 2(c)), L_1 逐渐扩展延伸至试样正面, 并伴随第二条层理裂隙 L_2 的发育, 两者将试样分割为 3 个区域: 区域 I 表面出现呈“弧形状”的颗粒剥落 B_2 , 区域 II 的颗粒剥落是 B_1 继续劣化的结果, 而区域

III 无明显劣化迹象。持续冻融 15 次后试样表面剥落加剧(见图 2(d)), B_1 , B_2 由于面积和深度的扩大形成明显凹陷, 新剥落区 B_3 , B_4 也逐渐发育形成; 原有裂隙 L_1 , L_2 进一步扩展, 其长度、深度和张开度均增加, 同时试样侧面发育了一条倾斜的裂隙 L_3 。20 次循环后(见图 2(e)), 受颗粒剥落及裂隙切割的影响, 局部出现了掉块 D_1 , 试样结构完整性显著降低。总体上, 试样的冻融劣化模式表现为颗粒状剥落、浅表性裂隙发育以及局部掉块, 其中浅表性裂隙沿层理面发育的趋势较为明显。

3.2 质量及波速变化

为评估砂岩在冻融作用下的劣化程度及其演变规律, 根据冻融前后质量、波速值的变化可得到相应损失率。质量损失率 L_m 和波速损失率 L_v 可分别表示为

$$L_m = \frac{m_0 - m_N}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$L_v = \frac{V_0 - V_N}{V_0} \times 100\% \tag{2}$$

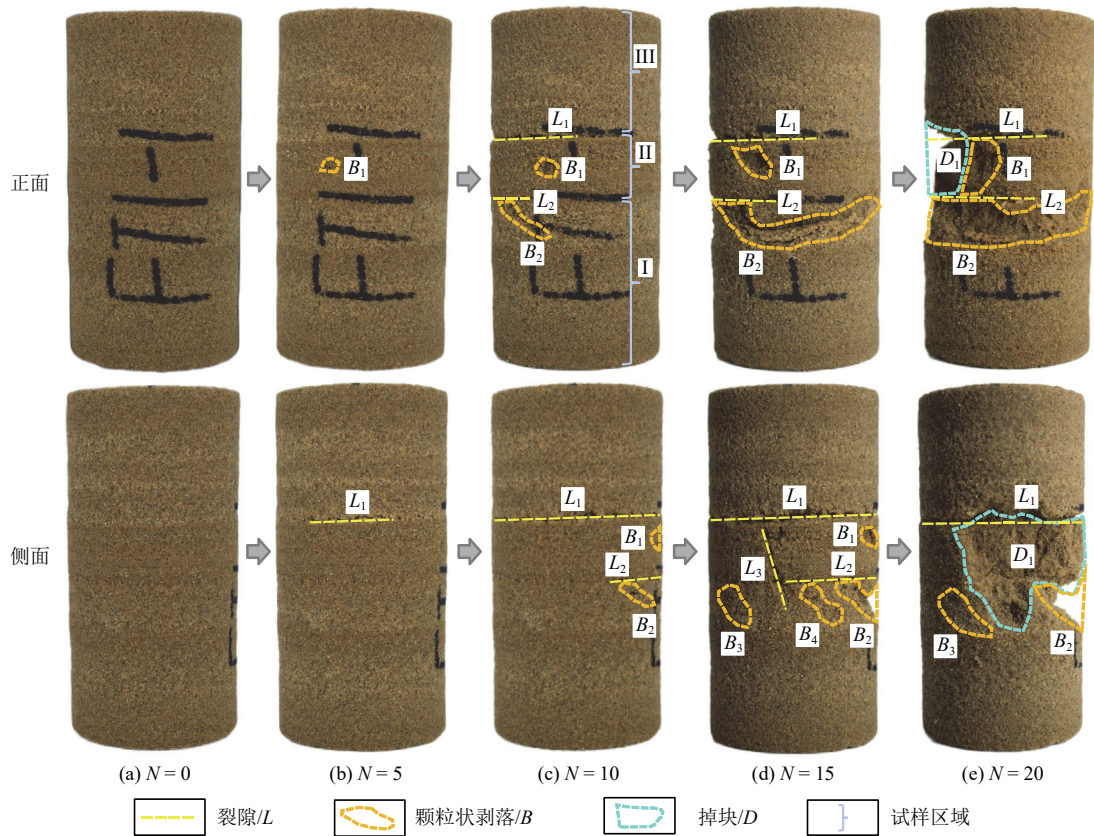


图 2 不同冻融循环次数下试样的宏观劣化特征

Fig.2 Macroscopic deterioration characteristics of specimens under different numbers of freeze-thaw cycles

式中： m_0 ， V_0 分别为初始饱和状态质量(g)和波速(m/s)； m_N ， V_N 分别为经过 N 次冻融循环后的质量(g)和波速(m/s)。

试样质量和波速损失率与循环次数的关系如图 3 所示，随着循环次数的增加，试样质量损失率呈现增加的趋势。在 0~10 循环，试样质量损失相对缓慢，前 5 次循环损失率仅为 0.25%，10 次循环后累计损失率为 2.52%。其原因为在试样劣化初期阶段，

其破坏形式主要表现为矿物颗粒小范围剥落和微裂隙萌生。随着试验的进行($N=15, 20$)，剥落区扩大并伴随局部掉块，质量损失速率明显加快，至 20 次循环时质量损失率增至 11.60%。

试样波速损失率随循环次数的增加同样呈现上升的趋势，由图 3 可知，在前 5 次循环中波速损失率达到 19.13%，损失幅度最为显著。这是由于冻融循环使孔隙扩张，饱和时大量水分进入试样内部，而波速在液态水中的传播速度低于在砂岩基质中的传播速度^[21]，同时新生裂隙也阻碍了波速的传播。至第 20 次循环时，波速损失率升至 49.81%，表明孔隙和裂隙的发育和扩展使得岩体内部结构劣化严重，波速随之降低。

3.3 干密度、相对密度及孔隙率变化

在岩土工程领域，干密度、相对密度和孔隙率是描述岩石物理性质的重要指标，其中孔隙率可直接表征岩石冻融损伤程度^[22]，三者存在以下定量关系：

$$n = \frac{1 - \rho_d}{G_s} \times 100\% \quad (3)$$

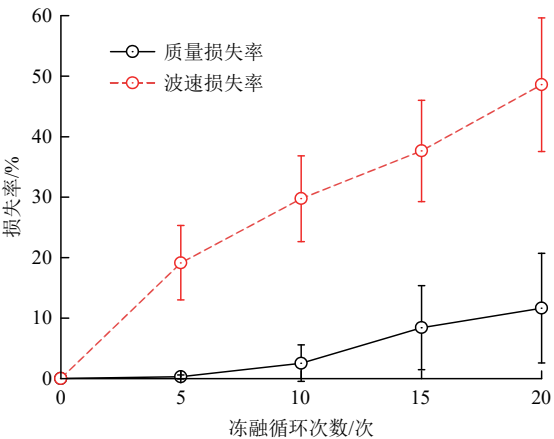


图 3 质量损失率和波速损失率与循环次数的关系

Fig.3 Relationships between the mass loss rate, the wave velocity loss rate and the number of cycles

式中: n 为孔隙率(%), ρ_d 为干密度(g/cm^3), G_s 为相对密度。

图4展示了试样干密度、相对密度和孔隙率与循环次数的关系。由图可知,随着循环的进行,试样干密度呈现减小的趋势,反映出试样内部结构逐渐疏松。试样相对密度呈现轻微增加趋势,而相对密度与矿物的平均密度呈正相关。图5展示了不同冻融循环次数下主要矿物的相对含量及其平均密度,可以发现密度较低的钾长石($2.54 \sim 2.59 \text{ g}/\text{cm}^3$)含量随循环次数增加而持续减少;与此同时,密度更高的石英(约 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$)与白云石($2.80 \sim 2.90 \text{ g}/\text{cm}^3$)含量则呈波动性增长。尽管密度较高的斜长石($2.61 \sim 2.76 \text{ g}/\text{cm}^3$)含量有所下降,但其降幅不足以抵消石英和白云母的增量,最终导致矿物的平均密度呈现上升趋势。试样的孔隙率呈现不同程度的增大,其变化过程具有明显的差异性:冻融 0~10 循环孔隙率增幅较大,单位循环增速为 0.58%; 10~

20 循环增幅相对平缓,单位循环增速降为 0.23%,表明冻融作用对内部孔隙的形成在前期更为明显。

3.4 核磁共振测试分析

(1) T_2 分布特征

在岩石孔隙中,根据核磁共振原理,流体的 T_2 弛豫时间与孔隙状态有如下关系^[23]:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} + \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (4)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间(ms), ρ_2 为横向弛豫强度($\mu\text{m}/\text{ms}$), S 为孔隙表面积(cm^2), V 为孔隙体积(cm^3), T_{2B} 为自由弛豫时间(ms), T_{2D} 为扩散弛豫时间(ms)。

若孔隙中只存在一种流体(水),体积弛豫比面积弛豫慢得多, T_{2B} 可以忽略。当磁场均匀且回波时间较短时, T_{2D} 也被忽略。 S/V 与孔隙的形状有关^[24],对于可理想化为球形或柱形的孔隙,式(4)可简化为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} = \rho_2 \frac{F_s}{R} \quad (5)$$

式中: R 为孔隙半径(μm), F_s 为孔隙形状因子。

由式(5)可知, T_2 弛豫时间与孔隙半径成正比,因此可根据 T_2 谱图分析孔隙的分布特征。

图6展示了试样经历不同冻融循环次数下的 T_2 谱图。基于 Y. Lin 等^[25-27]研究,以 10 和 100 ms 为 T_2 截止时间,将 T_2 谱图划分为 3 个区间:小孔($T_2 < 10 \text{ ms}$, $R < 1 \mu\text{m}$)、中孔($10 \text{ ms} < T_2 < 100 \text{ ms}$, $1 \mu\text{m} < R < 10 \mu\text{m}$)以及大孔($T_2 > 100 \text{ ms}$, $R > 10 \mu\text{m}$)。由图可知,试样的 T_2 谱图在不同循环次数下呈现相似的特征,即“优势主峰+多峰”形态,且曲线呈现左低右高的分布趋势,表明试样内部孔隙分

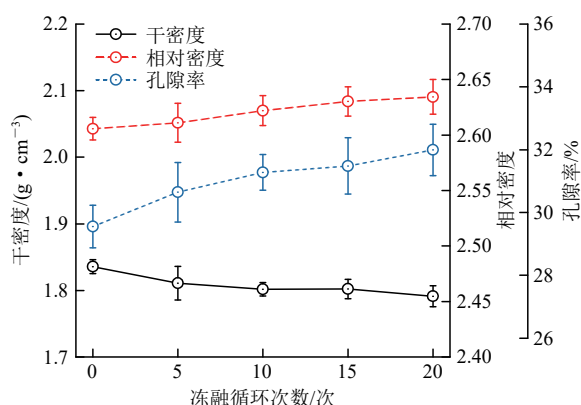


图4 干密度、相对密度及孔隙率与循环次数的关系

Fig.4 Relationships between dry density, relative density, porosity and number of cycles

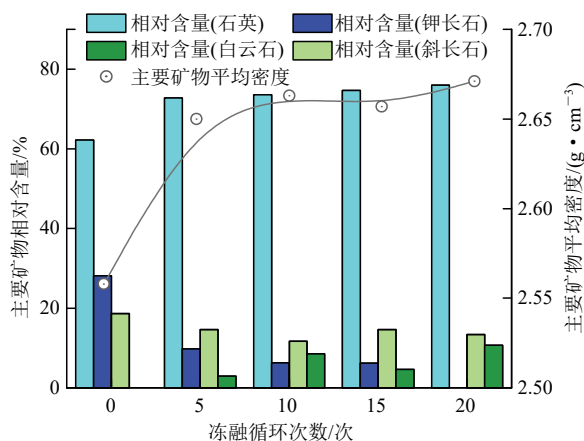


图5 不同冻融循环次数下主要矿物相对含量及其平均密度

Fig.5 Relative content and average density of major minerals under different numbers of freeze-thaw cycles

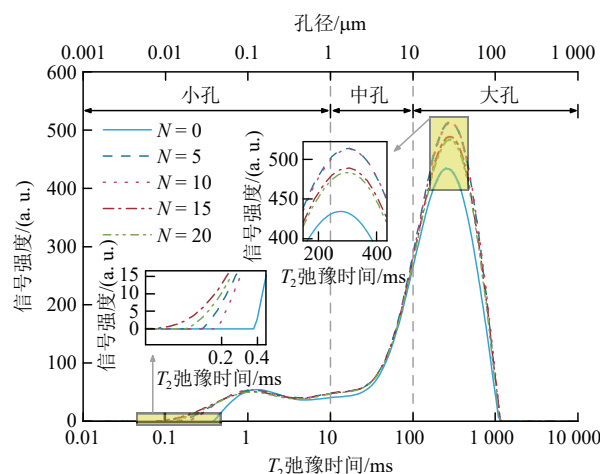


图6 不同冻融循环次数下砂岩的 T_2 谱图

Fig.6 T_2 spectrum of sandstone under different numbers of freeze-thaw cycles

布不均匀,以大孔为主,同时存在一定比例的中孔和小孔。 T_2 谱图随着循环次数的增加呈现2种演化趋势:其一,曲线在横向上左端“向左”移动,反映出砂岩小孔孔径的减小,表明循环过程中有更小的次生孔隙生成;其二,曲线在纵向上“先上后下”移动,尤其是峰值点的变化极为显著,前期上升是由于冻融作用促进了砂岩中孔隙数量的增加,后期下降则是受试样颗粒剥落和掉块缺失的影响,信号幅值整体降低。

(2) T_2 谱面积

T_2 谱面积大小与试样所含流体的多少成正比,能够反映砂岩内部孔隙的体积^[28],将数据归一化处理后得到不同冻融循环次数下试样内部各类型孔隙的体积比例(见图7)。由图7可知,随着循环的推进,各类型孔隙体积所占比例出现波动。与初始状态($N=0$)相比,20循环后小孔和中孔比例降低,降幅分别为8.28%,9.84%;而大孔比例增加,增幅为0.45%。在冻融前中期($N=5, 10$),小孔和中孔的比例迅速减小,大孔迅速增加,特别是前5次循环变化最为显著。然而冻融中后期($N=15, 20$),小孔和中孔比例逐渐升高,而大孔比例逐渐降低,但变化幅度较前期更小。上述现象表明冻融前中期原生大孔扩展的同时,小孔和中孔也在不断扩展成为大孔,进而造成大孔比例不断升高,后期可能由于周期性冻胀应力使砂岩内部颗粒发生破碎^[29],破碎颗粒暂时填充大孔径的孔隙空间,导致大孔体积出现轻微减小,而小孔和中孔比例小幅增加。

(3) 核磁共振成像

核磁共振成像可对砂岩内部孔隙演化过程进行可视化观测。本试验沿着平行于砂岩层理方向的同一位置进行核磁共振成像,切片厚度为10 mm(见图8),不同冻融循环次数下的成像结果如图9所示。图像边缘的蓝色为背景色,图中亮色为孔隙中

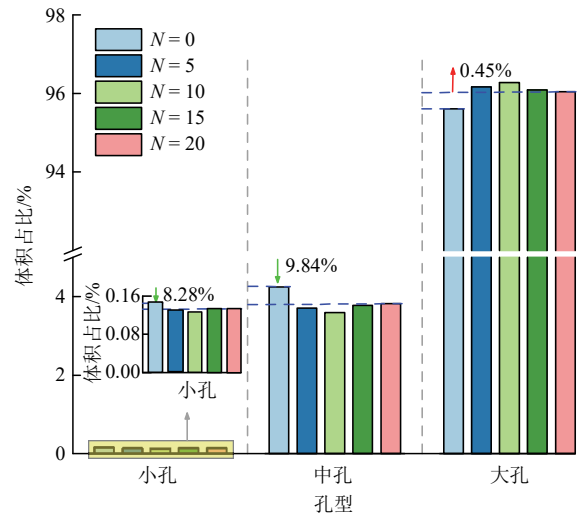


图7 不同冻融循环次数下各类型孔隙的体积占比

Fig.7 Volume ratio of different types of pores under different numbers of freeze-thaw cycles

填充的液态水。像素点越暗红,代表孔隙含水量越高;像素点分布越密集,代表孔隙发育越密集。初始状态下(见图9(a)),砂岩试样内部的原始孔隙数量较少,尺寸较小,且分布较为零散。经过5次循环后(见图9(b)),孔隙数量明显增多,且出现了较大的孔隙,孔隙含水量显著增加。随着循环的进行(见图9(c)),孔隙不仅增多增大,而且开始局部积聚并相互连通;连通范围随循环的进行不断扩大(见图9(d)),最终在20次循环时(见图9(e)),试样内部大量孔隙密集分布,局部区域孔隙贯通,损伤程度加深。

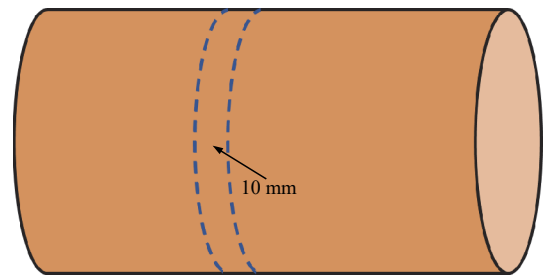


图8 砂岩核磁共振成像位置

Fig.8 Position of NMR imaging of sandstone

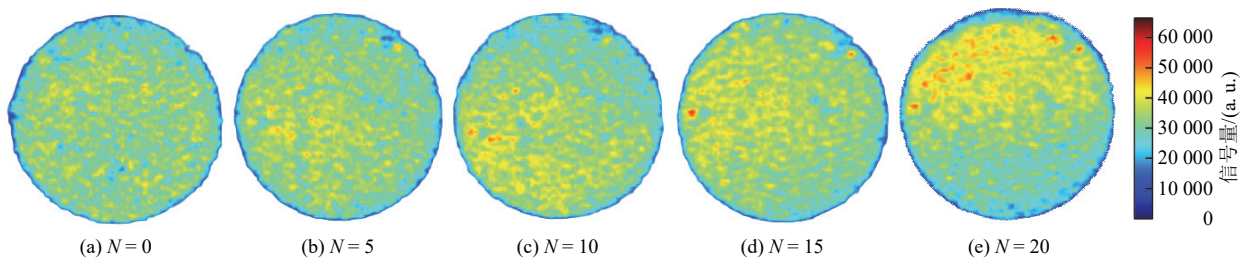


图9 不同冻融循环次数下砂岩的核磁共振成像结果

Fig.9 Results of NMR imaging of sandstone under different freeze-thaw cycle times

4 分析与讨论

4.1 孔隙水冻结-融化过程分析

(1) 冻结过程

在多孔岩石中孔隙水可大致分为 3 种类型: 重力水、毛细水和结合水^[30]。为进一步探讨饱和砂岩孔隙水的冻结和融化过程, 基于核磁共振信号定量分析了砂岩未冻水含量的变化特征^[31-32]。

如图 10 所示, 饱和砂岩中的水分主要为重力水, 少部分为毛细水和结合水。随着温度的降低, 砂岩冻结过程呈现明显的阶段性特征, 可将其划分为 4 个阶段: ① 未冻结阶段($10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 此时温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 含水量曲线无明显变化, 所有孔隙水均保持液态; ② 过冷阶段($0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 虽然温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但曲线无明显下降趋势, 孔隙水仍维持液态, 表现出典型的“过冷”现象; ③ 快速冻结阶段($-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 孔隙水迅速发生冻结, 重力水显著减少, 毛细水和弱结合水也依次减少; ④ 稳定冻结阶段($-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 孔隙水持续冻结但冻结速率显著降低, 未冻水含量趋于稳定。

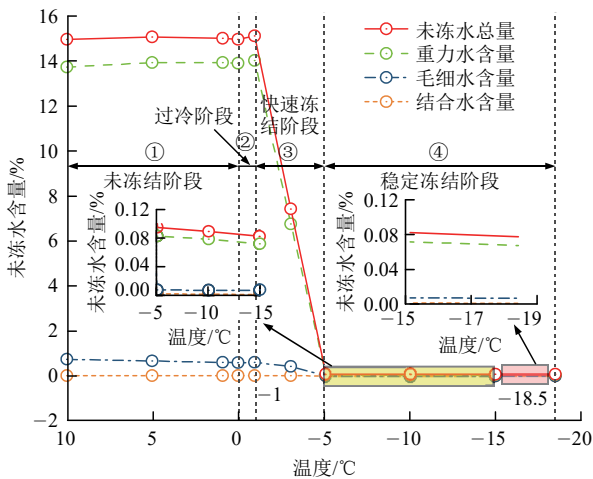


图 10 砂岩冻结过程中未冻水含量的变化

Fig.10 Variations in unfrozen water content during the freezing process of sandstone

(2) 融化过程

随着温度的升高, 饱和砂岩融化过程中并未出现“过热”现象(见图 11), 根据未冻水含量曲线的变化特征, 可将融化过程划分为 3 个阶段: ① 未融化阶段($-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 含水量曲线无明显升高趋势, 砂岩中绝大部分水保持较稳定的固态; ② 缓慢融化阶段($-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 含水量曲线轻微上升, 固态冰开始缓慢解冻; ③ 快速融化阶段($0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 固态冰进入快速融化期, 液态孔隙水量显著增加。

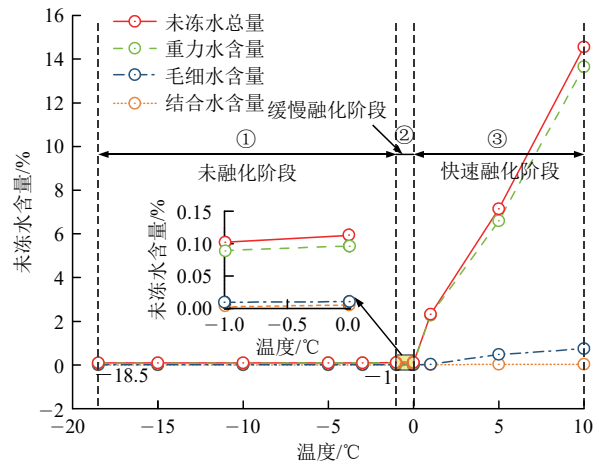


图 11 砂岩融化过程中未冻水含量的变化

Fig.11 Variations in unfrozen water content during the thawing process of sandstone

4.2 结构演化特征分析

不同冻融循环次数下的 SEM 结果如图 12 所示。试验前(见图 12(a)), 试样表层骨架颗粒接触较为紧密, 形成较稳定的胶结结构。经历 5 次循环后(见图 12(b)), 颗粒表面变得粗糙, 部分接触面呈现分离趋势。持续的冻融作用促使颗粒间耦合程度降低(见图 12(c)), 粒间孔隙发育并逐渐连通, 部分颗粒间接模式由最初的胶结接触向点接触转变。至 15 次循环时(见图 12(d)), 孔隙扩展且连通性增强, 部分颗粒甚至发生破裂, 在其表面形成裂纹。最终经过 20 循环后(见图 12(e)), 孔隙加宽、加深, 颗粒间距增大, 砂岩结构变得疏松。

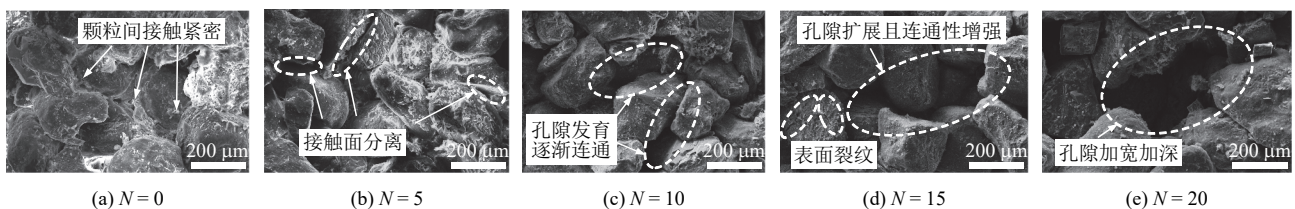
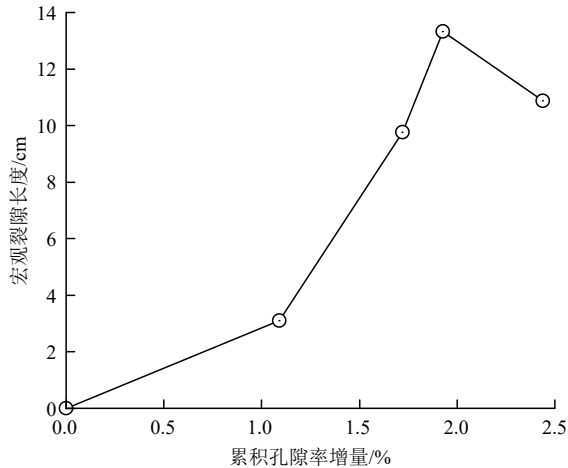


图 12 不同冻融循环次数下的 SEM 结果

Fig.12 SEM results under different numbers of freeze-thaw cycles

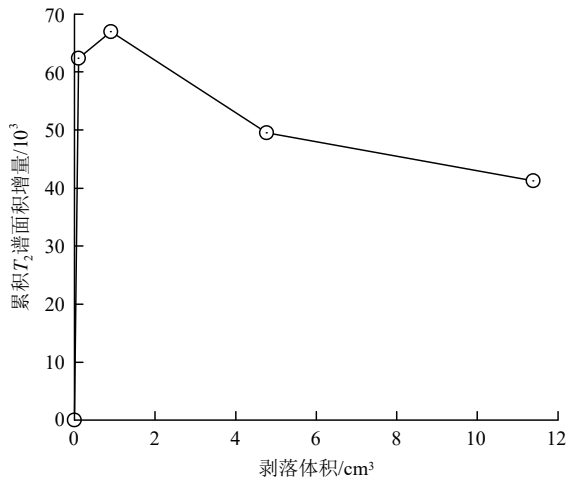
4.3 宏观指标关联性分析

为深入理解冻融作用下砂岩损伤演化情况,本研究对宏观与微观 2 个维度的试验结果进行进一步分析。图 13(a)展示了宏观裂隙长度与累积孔隙率增量之间的非线性关系。由图可知,砂岩孔隙发育的同时,外部裂隙也在不断延伸。累积孔隙率增量在 0%~2.0% 范围时,宏观裂隙长度由 0 cm 逐渐增至 13.33 cm。然而当累积孔隙率增量达到 2.44% 时,裂隙长度反而有所减小,产生该现象的原因在于,随



(a) 宏观裂隙长度与累积孔隙率增量的关系

(a) Relationship between macroscopic crack length and cumulative porosity increment



(b) 累积 T_2 谱面积增量与剥落体积的关系

(b) Relationship between cumulative T_2 spectral area increment and exfoliated volume

图 13 宏观指标与微观指标之间的相关性

Fig.13 The correlation between macroscopic indicators and microscopic indicators

着损伤的累积,岩体多条裂隙交切导致部分岩块脱落,使得部分原有裂隙在统计中消失(见图 2),其长度损失大于裂隙的延伸长度,故总长减小。

此外,累积 T_2 谱面积增量与砂岩的体积损失表现出显著的关联性(见图 13(b))。在冻融前中期($N = 5, 10$),内部孔隙的发育速度远超外部剥落造成的孔隙损失,导致累积 T_2 谱面积增量逐渐增大,即孔隙体积逐渐增大,尤其是前 5 次循环增长幅度最为明显。进入中后期($N = 15, 20$),砂岩体积损失加剧,因颗粒剥落及块体脱落致使高孔隙部分的缺失,其损失超过剩余岩体内部孔隙的增量,导致累积 T_2 谱面积增量回落。

然而,无论是裂隙长度的减小还是累积 T_2 谱面积增量的回落,均不意味着损伤的减小,而是损伤累积造成的砂岩结构完整性逐渐丧失的结果。

4.4 有效冻胀力和结晶压力

刘泉声等^[17]利用水冰介质与岩石孔隙间的膨胀耦合关系,基于弹性力学理论给出了岩石中有效冻胀力的表达式:

$$\sigma_e = -\frac{0.029n(1-w_u)}{\frac{1}{E_m} \frac{1+2n+(1-4n)\nu_m}{2(1-n)} + 1.029 \frac{1-2\nu_i}{E_i}} \quad (6)$$

式中: σ_e 为岩石中的有效冻胀力; w_u 为未冻水体积分数; E_m , ν_m 分别为岩石基质的弹性模量与泊松比; E_i , ν_i 分别为孔隙冰的弹性模量与泊松比。具体的参数取值见表 2^[17, 33]。

考虑到在最低试验温度(-18.5°C)时,孔隙水的冻结相变最为完全,因此选取该温度下的未冻水体积分数($w_u = 0.57\%$)进行计算。表 3 显示,随着冻融循环次数从 0 次增至 20 次,有效冻胀力呈现出轻微的增长趋势。

然而式(6)并未量化冻胀对不同孔径的影响。因此,本文进一步基于圆柱孔中单晶的热力学方法,对不同孔径中的结晶压力进行计算^[33]:

$$P_c = \frac{\gamma_{cl}}{r_p - \delta} \quad (7)$$

式中: P_c 为结晶压力, γ_{cl} 为冰-水界面自由能, r_p 为孔径, δ 为未冻水膜的厚度。

表 2 砂岩主要物理力学参数取值^[17, 33]

Table 2 Main physical and mechanical parameters of sandstone^[17, 33]

冰弹性模量(elastic modulus of ice)/GPa	冰泊松比(Poisson's ratio of ice)	砂岩弹性模量(elastic modulus of sandstone)/GPa	砂岩泊松比(Poisson's ratio of sandstone)	冰-水界面自由能(free energy of ice-water interface)/(J·m ⁻²)	单位体积聚变熵(fusion entropy per unit volume)/(J·cm ⁻³ ·K ⁻¹)	重力水冻结温度(freezing temperature of bulk water)/K	冰密度(ice density)/(kg·m ⁻³)	Hamaker 系数(Hamaker coefficient)/J	相变潜热(latent heat of phase change)/(J·kg ⁻¹)
9	0.35	0.811	0.20	40.9×10 ⁻³	1.2	273.15	917	6.4×10 ⁻¹⁸	334×10 ³

表 3 砂岩中有效冻胀力及结晶压力计算结果($T = -18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table 3 Calculation results of effective frost heave force and crystallization pressure of sandstone($T = -18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

有效冻胀力(effective frost heave force)/MPa					结晶压力(crystallization pressure)/MPa		
$N = 0$	$N = 5$	$N = 10$	$N = 15$	$N = 20$	小孔(<1 μm)	中孔(1~10 μm)	大孔(>10 μm)
6.11	6.19	6.23	6.24	6.27	>0.041	0.004~0.041	<0.004

根据 A. Döppenschmidt 等^[34-35]的研究, 未冻水膜的厚度与液体性质、几何形状及化学势等因素有关, 其表达式为

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{A_{\text{svl}}T_{\text{m}}}{6\pi\rho_{\text{s}}L\Delta T}}$$
 (8)

式中: A_{svl} 为 Hamaker 系数, T_{m} 为重力水冻结温度, ρ_{s} 为冰的密度, L 为释放的潜热, ΔT 为冻结过程中测试温度和 T_{m} 的差值。

结合图 6 的曲线分布特征, 砂岩孔隙被划分为小孔(<1 μm)、中孔(1~10 μm)和大孔(>10 μm)三类。表 3 表明, 结晶压力与孔径大小呈显著的负相关关系: 大孔中的结晶压力极低, 中孔次之, 而小孔中的结晶压力最高。

4.5 冻融损伤机制分析

砂岩在孔隙水反复冻结和融化的过程中, 其内部结构会因多种因素而发生损伤, 如体积膨胀、冰透镜体形成及结晶压等^[36]。由于本文试验条件下砂

岩的冻结速率较快($-8\text{ }^{\circ}\text{C/h}$), 这抑制了结晶压力的作用^[36]。同时砂岩中的孔隙水于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时已发生大量冻结(见图 10), 在分凝冰作用的理想温度区间内($-2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -6\text{ }^{\circ}\text{C}$), 砂岩冻结时间较短且可供迁移的未冻水含量有限, 这也弱化了冰分凝作用^[37]。因此, 由体积膨胀引起的冻胀压力在整个冻结过程中起到主导作用。图 14 展示了砂岩冻融过程结构损伤机制的简化示意图, 而图 15 展示了不同冻融循环次数下样品的微观图像, 该图像为损伤机制的分析提供了较为直观的证据。

初始状态下, 砂岩内部孔隙中的水处于饱和状态(见图 14(a), (d))。根据图 10 的试验结果, 当温度降低至 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 孔隙中的液态水开始发生相变。由于孔隙尺寸差异, 大孔隙中的水优先发生冻结(见图 14(e)), 随着温度的进一步降低, 中、小孔隙中的水也相继进入冻结状态(见图 14(f))。在冻结过程中(见图 14(b)), 水结冰发生体积膨胀从而对孔隙

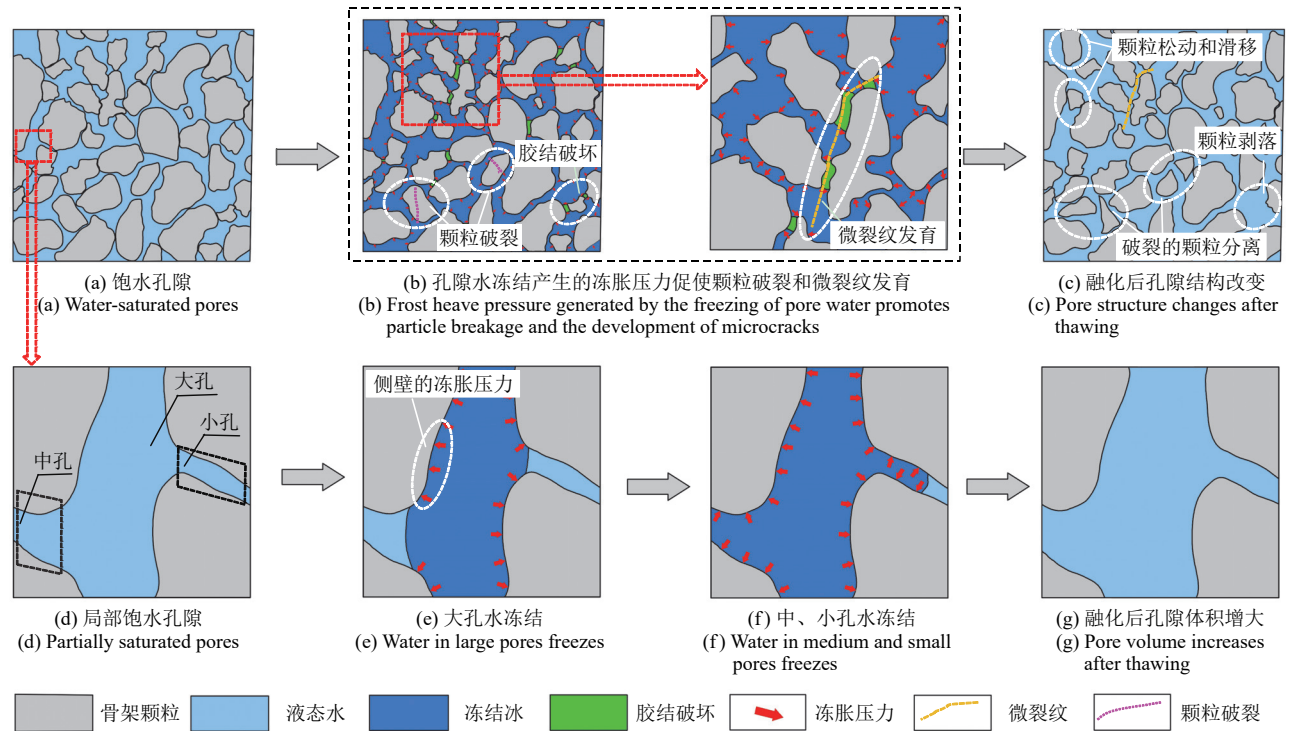


图 14 冻融过程结构损伤机制的简化示意图

Fig.14 Simplified diagram of the structural damage mechanisms during the freeze-thaw process

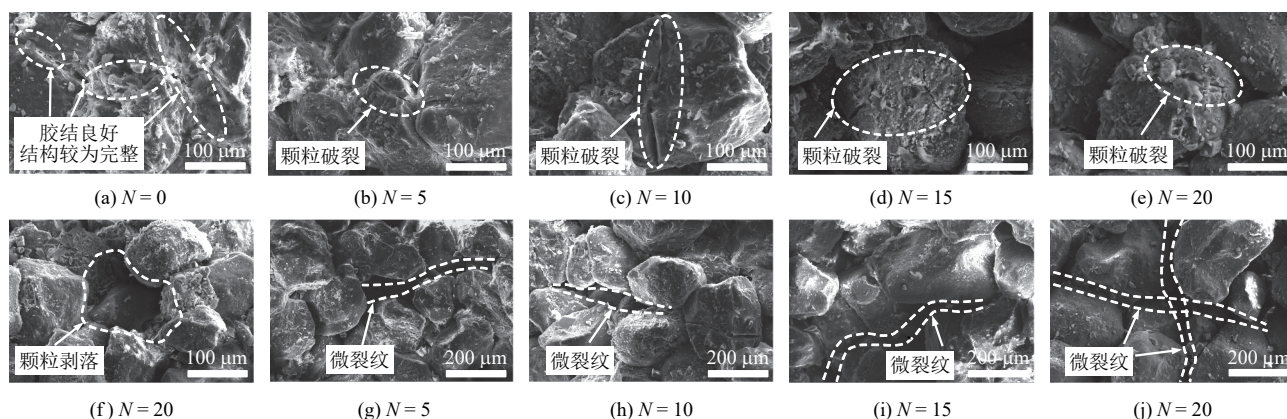


图 15 不同冻融循环次数下样品的微观图像

Fig.15 Microscopic images of samples under different numbers of freeze-thaw cycles

壁产生冻胀压力,这种冻胀压力会持续削弱矿物颗粒间的胶结作用。此外,由于冻胀压力频繁施加在颗粒表面,还会诱发颗粒的破裂(见图 15(b)~(e))。当温度升高时,冻结冰开始融化(见图 14(c)和(g)),矿物颗粒因失去冰晶的支撑而发生松动与相对滑移,胶结破坏严重的颗粒会发生剥落(见图 15(f)),同时早期因冻胀而破裂的颗粒也可能发生分离。尽管冻胀压力随温度升高而逐渐消失,但冻结过程中造成的塑性损伤变形是不可逆的^[38],最终导致孔隙体积的增大。

随着冻融循环次数的增加,砂岩的孔隙逐渐扩展使得一部分孔隙相互连通,初步形成了微裂纹。随着冻融损伤的加剧,早期出现的微裂纹进一步扩展并贯通更多孔隙,其长度与宽度也随之增加(见图 15(g)~(j)),最终发育为宏观裂隙。与此同时,新的裂隙不断萌生。最终这些裂隙相互交错、贯通,导致砂岩块体出现断裂、缺失等宏观破坏,从而显著降低其物理性能。

在赋存环境与固有岩体特征的双重影响下,冻融病害已成为威胁石窟寺安全的普遍问题。其破坏源于水与温度变化的协同作用。水作为冻融的物质前提,通过多种途径如大气降水、地表径流及地下水等侵入岩体,需采用止水措施减少外部水源的进入^[39];而温度变化作为冻融循环的驱动力,虽宏观气候难以干预,但可通过科学设置遮阳设施减小太阳辐射的影响,一定程度上减小岩体表面的温度波动^[40]。对于已产生的剥落、裂隙等病害,则需在具备修复依据前提下开展表层防护与裂隙修复工作,阻断病害的进一步发育^[41],以期实现石窟寺这一珍贵文化遗产的长效保护。

5 结 论

本文针对北石窟寺弱胶结砂岩进行了饱和条件下的冻融循环试验,从宏观和微观两个尺度综合研究其结构损伤机制,主要结论如下:

(1) 北石窟寺弱胶结砂岩在冻融作用下前期表现为颗粒小范围剥落和浅表性裂隙萌生,其中裂隙沿砂岩层理方向的发育较为显著;后期颗粒剥落程度加剧、裂隙逐渐扩展并连通,局部受多条裂隙切割的影响发生掉块。

(2) 随着冻融循环次数的增加,砂岩质量、波速、干密度均呈衰减趋势,而相对密度和孔隙率呈上升趋势。在宏观指标中,质量损失表现出“前期慢,后期加快”的特征,其余指标则呈现“前期快,后期减缓”的变化规律。

(3) 北石窟寺弱胶结砂岩内部孔隙以大孔为主,中孔次之,小孔最少。随着冻融循环的进行,不同孔径孔隙体积的占比发生波动:小孔和中孔的体积占比呈现先减后增的变化趋势,而大孔先增后减。但相较于初始状态,20次循环后小孔和中孔的体积占比减小,大孔的占比增大。

(4) 砂岩内部孔隙水相变过程呈现显著的阶段性。冻结过程包括未冻结-过冷-快速冻结-稳定冻结4个阶段,冻结过程中产生的冻胀压力引起颗粒破裂、孔隙发育、裂纹生成及扩展;融化过程包括未融化-缓慢融化-快速融化3个阶段,融化后冻胀压力虽然消失,但冻结时产生的结构损伤不可逆。随着冻融损伤不断累积,最终造成砂岩宏观破坏以及物理性能衰减。

(5) 砂岩中的有效冻胀力随着循环次数的增加呈现出轻微增长的趋势。结晶压力与孔径大小呈显著的负相关关系,其中小孔中的结晶压力最高,中孔次之,而大孔中的结晶压力最小。

冻融损伤是石窟寺保护的重大威胁,在实际文物保护工程中既要通过阻水、减缓温变来减小损伤,又要对已产生的病害进行科学修复,从而实现文物的长效保护。

参考文献(References):

- [1] 王金华,陈嘉琦.我国石窟寺保护现状及发展探析[J].东南文化,2018,(1):6-14.(WANG Jinhua, CHEN Jiaqi. Current status and future development of cave temples protection in China[J]. Southeast Culture, 2018, (1): 6-14.(in Chinese))
- [2] ZHANG L, ZHANG J, GUO Q, et al. Quantitative assessment of weathering of cretaceous sandstone relics in Longdong area from the surface to the interior[J]. Sedimentary Geology, 2022, 441: 106265.
- [3] 李回贵,李化敏,汪华君,等.弱胶结砂岩的物理力学特征及定义[J].煤炭科学技术,2017,45(10):1-7.(LI Huigui, LI Huamin, WANG Huajun, et al. Physical and mechanical characteristics and definition of weakly cemented sandstone[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 1-7.(in Chinese))
- [4] 孙利辉,纪洪广,杨本生.西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J].煤炭学报,2019,44(3):865-873.(SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in Western representative mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 865-873.(in Chinese))
- [5] 王彦武,韩增阳,郭青林,等.甘肃庆阳北石窟寺水环境特征研究[J].西北大学学报:自然科学版,2021,51(3):360-369.(WANG Yanwu, HAN Zengyang, GUO Qinglin, et al. Research on the characteristics of water environment in Beishiku Temple, Qingyang City, Gansu Province[J]. Journal of Northwest University: Natural Science, 2021, 51(3): 360-369.(in Chinese))
- [6] 奚家米,付垒,贾晓峰,等.不同冻融状态下白垩系常见岩层物理力学特性对比分析[J].西安科技大学学报,2018,38(2):253-259.(XI Jiami, FU Lei, JIA Xiaofeng, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of Cretaceous rock under freezing-thawing action[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 253-259.(in Chinese))
- [7] 赵涛,杨更社,奚家米,等.白垩系砂岩宏观冻融损伤特性试验研究[J].西安科技大学学报,2019,39(2):241-248.(ZHAO Tao, YANG Gengshe, XI Jiami, et al. Experimental study of the macro and micro-scopic damage of Cretaceous sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(2): 241-248.(in Chinese))
- [8] LIU B, MA Y, ZHANG G, et al. Acoustic emission investigation of hydraulic and mechanical characteristics of muddy sandstone experienced one freeze-thaw cycle[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 151: 335-344.
- [9] 徐杨,张理想,张景科,等.北石窟寺白垩系砂岩冻融损伤机制研究[J].石窟与土遗址保护研究,2023,2(2):49-58.(XU Yang, ZHANG Lixiang, ZHANG Jingke, et al. A study on the freeze-thaw damage mechanism of cretaceous sandstone in the Beishikusi Grottoes[J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023, 2(2): 49-58.(in Chinese))
- [10] 李栋伟,汪仁和,范菊红.白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(3):398-403.(LI Dongwei, WANG Renhe, FAN Juhong. Nonlinear rheological model for frozen soft rock during Cretaceous period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 398-403.(in Chinese))
- [11] 魏尧,杨更社,申艳军,等.白垩系饱和冻结砂岩蠕变试验及本构模型研究[J].岩土力学,2020,41(8):2636-2646.(WEI Yao, YANG Gengshe, SHEN Yanjun, et al. Creep test and constitutive model of cretaceous saturated frozen sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2636-2646.(in Chinese))
- [12] LIN J, YANG Y, YIN J, et al. Study on pore structure evolution characteristics of weakly cemented sandstone under freeze-thaw based on NMR[J]. Water, 2023, 15(2): 281-281.
- [13] 张景科,刘盾,马雨君,等.弱胶结砂岩水岩作用机制——以庆阳北石窟为例[J].东北大学学报:自然科学版,2022,43(7):1019-1032.(ZHANG Jingke, LIU Dun, MA Yujun, et al. Water-rock mechanism of weakly consolidated sandstone: a case study of Qingyang North Grottoes[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2022, 43(7): 1019-1032.(in Chinese))
- [14] 张理想.甘肃陇东地区石窟寺砂岩表层风化机制研究[博士学位论文][D].兰州:兰州大学,2023.(ZHANG Lixiang. Surface weathering mechanism of sandstone of grottoes in Longdong Area, Gansu Province: A case study of North Grotto Temple[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.(in Chinese))
- [15] 朱谭谭,李昂,黄达,等.应力-冻融耦合作用下砂岩变形与损伤特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(2):342-351.(ZHU Tantan, LI Ang, HUANG Da, et al. Deformation and damage characteristics of sandstone under the combined action of stress and

- freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 342 – 351.(in Chinese))
- [16] XIAO Y, DENG H, TIAN G, et al. Analysis of microscopic pore characteristics and macroscopic energy evolution of rock materials under freeze-thaw cycle conditions[J]. Mathematics, 2023, 11(3): 710.
- [17] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2 000 – 2 012. (LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2 000 – 2 012.(in Chinese))
- [18] 庞军刚, 李文厚, 国吉安, 等. 鄂尔多斯盆地白垩纪沉积体系及古地理演化[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2021, 51(2): 314 – 324.(PANG Jungang, LI Wenhui, GUO Ji'an, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the cretaceous of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science, 2021, 51(2): 314 – 324.(in Chinese))
- [19] 张景科, 张理想, 郭青林, 等. 庆阳北石窟寺砂岩表层风化特征与地层岩性的关系研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2021, 51(3): 344 – 352.(ZHANG Jingke, ZHANG Lixiang, GUO Qinglin, et al. The relationship between weathering characteristics of the sandstone surface and lithology of the North Grottoes at Qingyang[J]. Journal of Northwest University: Natural Science, 2021, 51(3): 344 – 352.(in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. GBT 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GBT 50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese))
- [21] 张慧梅, 夏浩峻, 杨更社, 等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 441 – 448.(ZHANG Huimei, XIA Haojun, YANG Gengshe, et al. Experimental research of influences of freeze-thaw cycles and confining pressure on physical-mechanical characteristics of rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 441 – 448.(in Chinese))
- [22] 卢 鑫, 杨更社, 叶万军, 等. 冻融循环作用下不同粒径砂岩强度劣化规律与机制研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 2 198 – 2 209. (LU Xin, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Study on the strength deterioration law and mechanism of sandstone with different grain sizes under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 2 198 – 2 209.(in Chinese))
- [23] ZHANG J, DENG H, DENG J, et al. Fractal analysis of pore structure development of sandstone: A nuclear magnetic resonance investigation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 47 282 – 47 293.
- [24] SHEN Y, WANG Y, WEI X, et al. Investigation on meso-debonding process of the sandstone-concrete interface induced by freeze-thaw cycles using NMR technology[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 118962.
- [25] LIN Y, ZHOU K, GAO F, et al. Experimental investigations on pore structure and mechanical properties of sandstone subjected to chemical corrosion[J]. IEEE Access, 2019, (7): 116 706 – 116 721.
- [26] LIU T, ZHANG C, LI J, et al. Detecting freeze-thaw damage degradation of sandstone with initial damage using NMR technology[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4 529 – 4 545.
- [27] LI J, KAUNDA R B, ZHOU K. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 133 – 141.
- [28] 姜德义, 张水林, 陈 结, 等. 砂岩循环冻融损伤的低场核磁共振与声发射概率密度研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 436 – 444. (JIANG Deyi, ZHANG Shuilin, CHEN Jie, et al. Low field NMR and acoustic emission probability density study of freezing and thawing cycles damage for sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 436 – 444.(in Chinese))
- [29] 刘 慧, 杨更社, 申艳军, 等. 冻融 - 受荷协同作用下砂岩微观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1 136 – 1 149.(LIU Hui, YANG Gengshe, SHEN Yanjun, et al. CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1 136 – 1 149.(in Chinese))
- [30] WANG T, SUN Q, JIA H, et al. Linking the mechanical properties of frozen sandstone to phase composition of pore water measured by LF-NMR at sub-zero temperatures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4 501 – 4 513.
- [31] ZHENG S, LI X, ZHAO Y, et al. Comparative study of unfrozen water content measurement principles and calculation methods based on NMR[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 226: 104255.
- [32] SU Z, TAN X, CHEN W, et al. A model of unfrozen water content in rock during freezing and thawing with experimental validation by nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1 545 – 1 555.

- [33] WENG L, ZHANG H, WU Z, et al. Heterogeneous frost deformation of partially saturated sandstones due to the freeze-thaw cycle[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(1): 61 – 77.
- [34] DÖPPENSCHMIDT A, BUTT H J. Measuring the thickness of the liquid-like layer on ice surfaces with atomic force microscopy[J]. *Langmuir*, 2000, 16(16): 6 709 – 6 714.
- [35] SU Z, TAN X, CHEN W, et al. A model of unfrozen water content in rock during freezing and thawing with experimental validation by nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(5): 1 545 – 1 555.
- [36] 申艳军, 杨更社, 王 婷, 等. 岩石内孔隙/裂隙冻胀力模型及其适用性评价[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 117 – 128.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ting, et al. Evaluation of frost heave force models of pore/fissure in rock and their applicability[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 117 – 128.(in Chinese))
- [37] 贾海梁, 项 伟, 谭 龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 879 – 895.(JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 879 – 895.(in Chinese))
- [38] 张慧梅, 王云飞. 冻融红砂岩损伤演化多尺度分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2 103 – 2 114.(ZHANG Huimei, WANG Yunfei. Multi-scale analysis of damage evolution of freezing-thawing red sandstones[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2 103 – 2 114.(in Chinese))
- [39] 张中俭. 平遥古城古砖风化机制和防风化方法研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(3): 619 – 629.(ZHANG Zhongjian. Weathering mechanism and prevention methods of ancient brick in Pingyao City, Shanxi Province, China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 619 – 629.(in Chinese))
- [40] LI Y, HU X, XIE H, et al. The impact of cave opening and closure on murals hydrothermal behavior in Cave 98 of Mogao Caves, China[J]. *Building and Environment*, 2024, 256: 111502.
- [41] 戴仕炳, 陈卉丽, 冯太彬, 等. 从防风化到维稳——严重劣化石窟寺砂岩表层预防性干预技术策略初探[J]. *石窟与土遗址保护研究*, 2023, 2(2): 103 – 112.(DAI Shibing, CHEN Huili, FENG Taibin, et al. From anti-weathering conservation to maintaining stability—A preliminary study on the preventive measures used to stabilize heavily deteriorated sandstone surfaces in cave temples[J]. *Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites*, 2023, 2(2): 103 – 112.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

- (1) 高地温隧道热害链生机制与风险防控 I——热害效应与孕育地质特征；
- (2) 基于数字岩心的礁灰岩力学尺寸效应机制研究；
- (3) 水力耦合作用下岩石动态强度疲劳劣化特性研究；
- (4) 加载速率与含水状态对岩石破坏磁场响应机制的研究；
- (5) 基于岩石破坏模式和畸 - 体变能关系的岩爆判据研究；

数值模拟和人工智能

- (6) 基于 AttRes-UNet 模型的煤岩裂隙识别技术研究；
- (7) 基于自动化参数建模与迭代优化的隧洞智能支护设计平台研发与应用；
- (8) 基于 Mask R-CNN 与 DDA 的岩石细观非均质性高保真建模及力学特性研究。

土工基础