



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2600003

引用格式:唐群佳,温韬,张勃成,等.冻融循环作用下寒区花岗岩细观损伤特征分析[J].科学技术与工程,2026,26(26):11185-11199.

Tang Qunjia, Wen Tao, Zhang Bocheng, et al. Analysis of micro-damage features in cold-region granite under freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(26): 11185-11199.

冻融循环作用下寒区花岗岩细观损伤特征分析

唐群佳¹, 温韬^{1,2*}, 张勃成¹, 赵萌³

(1. 长江大学地球科学学院, 山地多灾害防控与工程安全国际科技合作基地, 武汉 430100; 2. 长江大学南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室, 武汉 430100; 3. 武汉地铁集团有限公司, 武汉 430070)

摘 要 由于高寒地区岩石长期受到冻融循环作用,岩石强度下降,影响工程长期稳定性。以川藏铁路沿线花岗岩为研究对象,开展了不同冻融循环次数后花岗岩的三轴卸荷试验,基于离散元数值模拟,建立了考虑水颗粒膨胀效应的冻胀数值模型。通过系统分析冻融岩样三轴卸荷过程中应力-应变曲线演变、微裂隙扩展、力链场演化、位移云图分布以及能量转化特征,揭示了其损伤演化规律。结果表明:冻融作用导致岩样宏观力学参数同步下降,60次循环后试验测得黏聚力、峰值应力与弹性模量分别下降了56.15%、59.5%和60.2%;冻融损伤起源于微裂隙的萌生与扩展,破坏模式逐步由剪切主导演化为拉-剪复合型,颗粒位移由表及里加剧,最终引发宏观剥落;受载试样微裂隙演化呈现“慢-陡-缓”三阶段特征,冻融次数增至20、40、60次,拉张裂纹起裂应力依次下降49.9%、97%、97.9%,剪切裂纹起裂应力相应下降48.8%、96.6%、97.3%,新裂纹萌生受到抑制,能量更集中于既有裂隙的贯通与扩展;弹性应变能占比由初始状态的92.8%降至60次冻融后的76.47%,表明冻融作用显著削弱了岩石的储能能力,从能量机制层面揭示了其强度丧失的本质原因。

关键词 离散元; 冻融循环; 细观损伤; 颗粒流; 能量演化; 三轴卸荷

中图法分类号 P642.3;

文献标志码 A

Analysis of Micro-damage Features in Cold-region Granite under Freeze-Thaw Cycles

TANG Qun-jia¹, WEN Tao^{1,2*}, ZHANG Bo-cheng¹, ZHAO Meng³

(1. School of Geosciences, Yangtze University, International Cooperation Center for Mountain Multi-Disasters Prevention and Engineering Safety, Wuhan 430100, China; 2. Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

[Abstract] Due to long-term freeze-thaw cycling in high-altitude cold regions, rock strength deteriorates, thereby compromising the long-term stability of engineering structures. Granite along the Sichuan-Xizang Railway was selected as the research object, and triaxial unloading tests were conducted on granite specimens subjected to different numbers of freeze-thaw cycles. Based on discrete element numerical simulation, a frost heave numerical model that accounts for the swelling effect of water particles was established. By systematically analyzing the evolution of stress-strain curves, micro-crack propagation, force chain evolution, displacement cloud distribution, and energy transformation characteristics during the triaxial unloading process of freeze-thawed rock specimens, the damage evolution law was revealed. The results show as follows. Freeze-thaw action causes a synchronous decline in the macroscopic mechanical parameters of the rock specimens. After 60 cycles, the measured cohesion, peak stress, and elastic modulus decrease by 56.15%, 59.5%, and 60.2%, respectively. Freeze-thaw damage originates from the initiation and propagation of micro-cracks. The failure mode gradually evolves from shear-dominated to tensile-shear composite, with particle displacement intensifying from the surface inward, ultimately leading to macroscopic spalling. The micro-crack evolution in loaded specimens exhibits a three-stage characteristic of “slow-steep-gentle”. As the number of freeze-thaw cycles increases to 20, 40, and 60, the initiation stress of tensile cracks decreases by 49.9%, 97%, and 97.9%, respectively, while that of shear cracks decreases by 48.8%, 96.6%, and 97.3%, respectively. The initiation of new cracks is suppressed, and energy becomes more concentrated on the connection and propagation of existing cracks. The proportion of elastic strain energy decreases from the initial 92.8% to 76.47% after 60 freeze-thaw cycles, indicating that freeze-thaw action significantly weakens the energy storage capacity of the rock, thereby revealing the essential cause of its strength loss from the perspective of energy mechanism.

[Keywords] discrete element method; freeze-thaw cycles; meso-damage; particle flow; energy evolution; triaxial unloading

收稿日期: 2026-01-01; 修订日期: 2026-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(42477174); 西藏自治区科技项目(XZ202402ZD0001, XZ202502YD0003)

第一作者: 唐群佳(2002—),男,汉族,四川绵阳人,硕士研究生。研究方向:寒区岩土工程。E-mail:2024720553@yangtzeu.edu.cn。

*通信作者: 温韬(1990—),男,汉族,江西宜春人,博士,教授。研究方向:工程地质力学。E-mail:wentao200840@yangtzeu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

随着西部大开发向广阔的季节性高寒地区推进,各类岩石工程与资源开发项目日益增多,其建设与运营面临复杂冻融循环作用的严峻考验^[1]。寒区岩石工程往往面临长期冻融作用,冻融过程中水冰相变产生的冻胀力,通过拉剪作用促使微裂纹扩展贯通,最终导致宏观力学性能衰退,威胁工程安全^[2-5]。

围绕冻融条件下岩石力学特性的演化规律,近年来学界通过试验与理论分析开展了深入探讨。刘杰等^[6]开展不同条件下冻融循环及单轴试验,总结冻融循环下粉砂质泥岩裂纹演变及力学特征。祝榆峰等^[7]基于核磁共振与三轴试验,建立了冻融裂隙岩体疲劳荷载损伤本构模型。贾篷等^[8]同时考虑冻融损伤和受载损伤两种损伤因子,从能量演化角度构建了冻融砂岩的分段损伤本构模型。Zheng 等^[9]通过离散元方法模拟水-冰相变过程,从细观层面探讨砂岩疲劳断裂行为并最终建立砂岩的冻融-疲劳耦合损伤模型。谢昊天等^[10]则通过静态加载试验与电镜扫描,关联了冻融砂岩的细观结构损伤与宏观强度衰减,从而推演砂岩强度衰减预测模型。谭千千等^[11]基于 CT 图像灰度值定义冻融损伤变量,构建了考虑冻融损伤的本构模型。郭威等^[12]总结砂岩冻融循环下微裂隙发育状况,为寒区岩石力学特性劣化机理提供参考。张慧梅等^[13]通过核磁共振试验,结合多重分形理论,探讨冻融岩石孔隙演化规律。万亿等^[14]研究了不同含水率岩样冻融循环过程中孔隙生长情况及损伤演化规律。

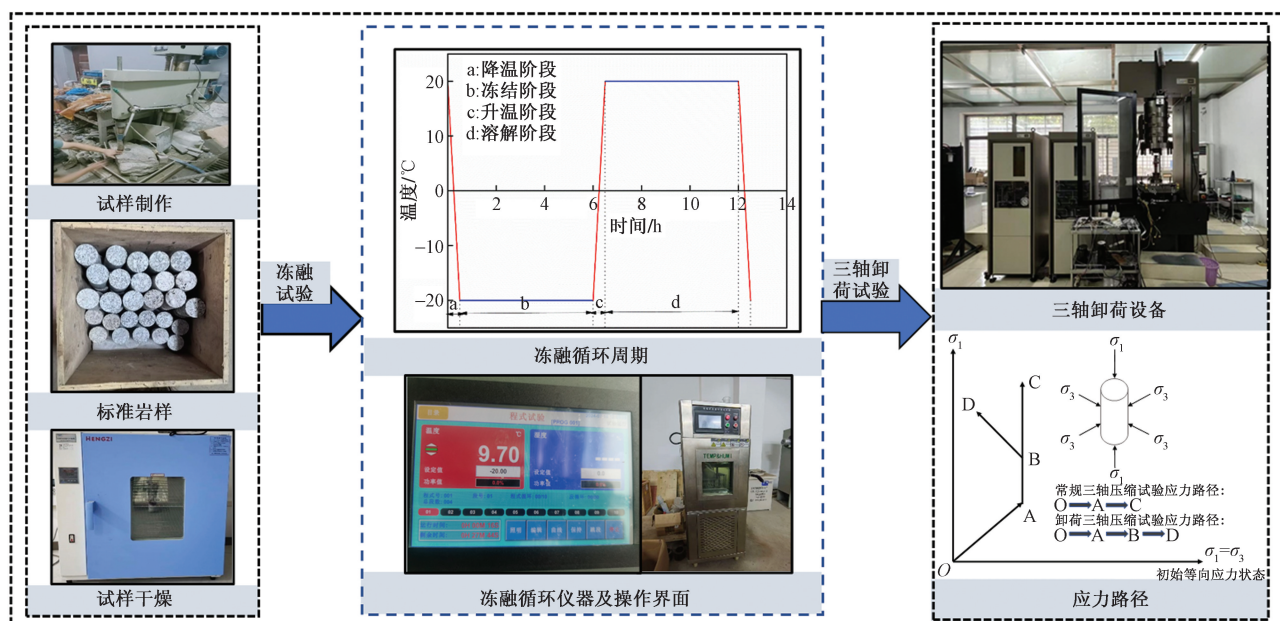
更有诸多学者基于颗粒流程序 (particle flow code, PFC) 使用水颗粒膨胀法模拟岩石冻融过程中水-冰相变过程,以探究冻融过程中岩石细观损伤^[15-17]。综上所述,现有研究在冻融岩石宏观损伤方面积累颇丰,但对冻融花岗岩细观损伤机制的揭示,仍是理解其宏观劣化行为的核心瓶颈,有必要开展针对性研究。

因此,现基于 PFC^{2D} 构建含水颗粒花岗岩数值模型,开展冻融-三轴卸荷模拟,结合室内试验验证模型合理性,系统分析冻融过程中岩体微裂隙拓展、力学特性与能量演化规律,阐明冻融循环作用下花岗岩细观结构演化及其损伤积累的内在机制。研究成果可为寒区岩体工程的稳定性评价与灾害防治提供理论依据。

1 试验材料及方案

1.1 试样制备及分析

本次试验使用试样为花岗岩,取自西藏自治区昌都市新建川藏铁路隧道边坡处,该地地处青藏高原东部,属于典型高寒气候区,季节性冻融作用显著,该地区岩石极易受冻胀循环影响导致力学性质劣化。所有试样均取自同一岩层单元以减少试样不均匀性对结果的干扰,加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体岩样,控制两端不平整度误差在 3% 以内,为保证试验结果的可比性与准确性,选用物理力学性质相近的岩样首先进行常三轴加载试验 (图1),获取岩样基本力学参数,随即进行冻融循



σ_1 和 σ_3 为初始等向应力状态

图1 试验设备及流程

Fig. 1 Test equipment and procedures

环处理,最后进行三轴卸荷试验,卸荷试验起始点设定为峰值应力的80%,以反映工程中岩体在临近破坏时的应力释放过程^[18]。

1.2 试验方案

依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)制备试样^[18],岩样置于105℃环境烘干24 h后真空饱水24 h,分4组进行0、20、40、60次冻融循环。根据岩石取样地冬季平均温度,本次试验温度设置为-20~20℃,单次循环共计12 h,一次冻融循环结束后将试样置于盛水容器中静置12 h进行补水,重复该过程直至达到预设循环次数。使用MTS-815型刚压试验机,为模拟实际隧道边坡下的地应力状态,在10、20、30 MPa围压下以0.1 mm/min速率进行三轴卸荷试验。

2 室内试验

2.1 应力应变分析

不同冻融次数下岩石三轴卸荷应力-应变曲线如图2所示。由图2可知,随着冻融次数的增加,试样峰值应力与弹性模量均降幅明显,观察峰后阶段发现应力下降速率加快,残余强度显著降低,这是因为反复冻融引发岩石内部裂隙贯通、胶结失效,损伤随循环次数积累,导致荷载作用下裂隙快速失稳扩展,宏观上表现为强度骤降与变形能力的劣化。围压从10 MPa提高到30 MPa,相同冻融次数下试样的峰值强度与残余强度都明显提升,峰后破坏模式逐步向脆性转变。原因是围压约束了冻融诱发的微裂隙扩展,提高岩体内部应力的传递效率,加强了岩体承载能力。

综上所述,花岗岩冻融劣化本质是微裂隙网络的萌生与扩展,围压通过约束裂隙演化调控其力学性能;冻融次数越多、围压越低,损伤累积导致的强度损失越显著,峰后破坏模式越趋近脆性^[19]。

2.2 破坏模式

表1为部分不同冻融次数下岩石破坏形态及裂纹演化,其中S为剪切裂纹,T为拉张裂纹,冻融作用下单轴压缩试样明显呈现碎块化,三轴卸荷试样完整度更高,破坏形态更趋近整体剪切错动。在围压作用下,三轴卸荷下试样抵抗能力加强,冻融循环通过弱化矿物胶结和颗粒接触降低岩石抗剪强度,岩样抗拉强度提高幅度高于抗剪强度,岩样向脆性破坏转化,最终呈现剪切破坏。

3 冻融损伤模拟

3.1 冻融模拟原理

为揭示冻融循环导致岩石劣化的微观机制,采

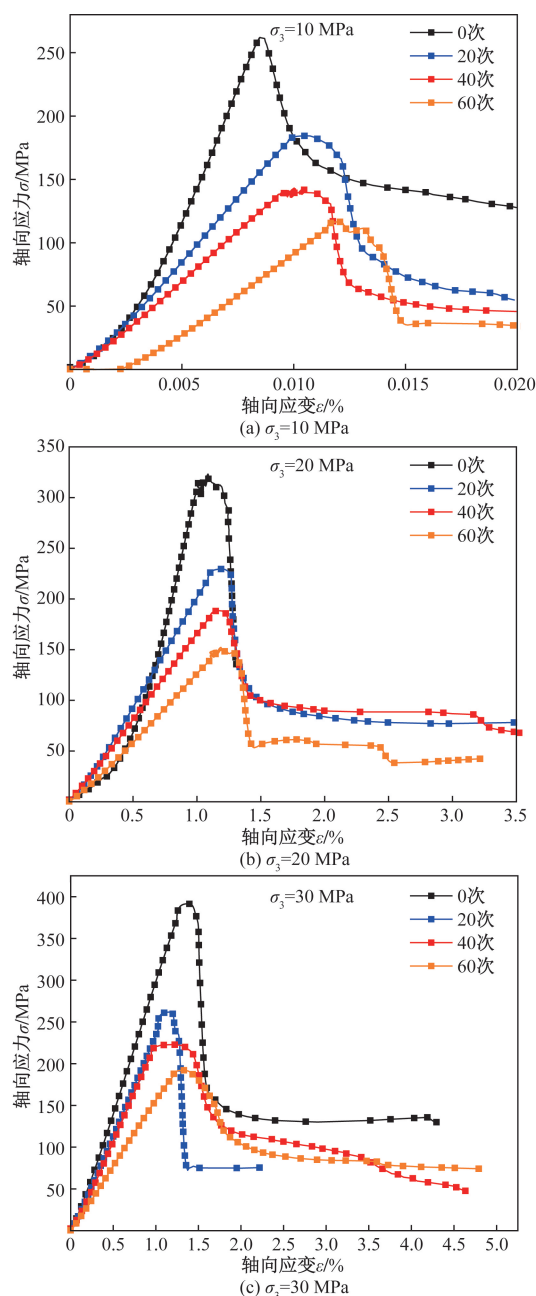


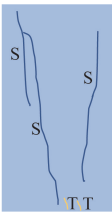
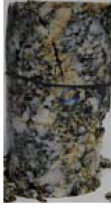
图2 不同围压下岩石应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rocks under different confining pressures

用离散元法模拟。冻融损伤核心机理是孔隙水相变膨胀产生的压力减弱颗粒间接触,诱发微裂隙发育与孔隙结构重组^[20]。伴随着冻融循环的持续进行,冻融损伤持续累积将导致岩石力学强度下降与渗透性改变,影响岩体工程性能。据此,模型建立基于以下假设:将花岗岩简化为岩石与孔隙水两种颗粒的集合体;忽略冻融中水分迁移过程与岩石颗粒体积变化,并将孔隙水温度场简化为均匀分布。

单次冻融循环中,单个孔隙水颗粒的初始面积 S_1 通过式(1)确定。

表 1 岩石破坏形态及裂纹演化
Table 1 Rock failure mode and crack evolution diagram

试样	破坏形态 (0 ~ 60 次循环)				裂纹演化				特征描述
单轴压缩									随冻融循环增加, 试样表面裂纹从零星分布发展为密集剪切网络, 并伴随少量拉张裂纹
三轴卸荷 (30 MPa)									破坏面平直光滑, 以整体剪切错动为主, 无明显碎块化; 仅局部可见短小拉张裂纹

$$S_1 = \pi r_1^2 \quad (1)$$

式(1)中: r_1 为孔隙水颗粒初始半径。

冻结阶段单个水颗粒面积 S_F 由式(2)确定。

$$S_F = \pi (r_1 + u_v)^2 = S_1 + \Delta S_w \quad (2)$$

式(2)中: ΔS_w 为孔隙水颗粒冻结后面积增量; u_v 为半径膨胀量。

基于刘泉声等^[21]的低温冻胀理论, 孔隙水颗粒的半径膨胀量 u_v 为

$$u_v = r_1 \frac{p_i}{E_m} \frac{1 + v_m + 2(1 - 2v_m)n}{2(1 - n)} \quad (3)$$

式(3)中: E_m 、 v_m 分别为岩石基质的弹性模量与泊松比; p_i 为孔隙冰压力; n 为岩石孔隙率。

基于 Dana 等^[22]的研究, 岩石孔隙冰的有效冻胀力 p_i 为

$$p_i = \frac{0.029}{\frac{1}{E_m} \frac{1 + 2n + (1 - 4n)v_m}{2(1 - n)} + 1.029 \frac{1 - 2v_i}{E_i}} \quad (4)$$

式(4)中: E_i 、 v_i 分别为孔隙冰的弹性模量及泊松比, 分别取值为 9 GPa、0.35。

同时考虑到冻融循环中水-冰相变是一个动态过程, 忽略不影响冻胀的未冻水, 模型只考虑孔隙完全冻结时冰压力对孔壁的膨胀作用。任意温度下孔隙水/冰面积公式为

$$S = \begin{cases} S_1 + \Delta S_F \left[1 + 0.139 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{1/3} \ln \frac{1 + e^{-0.268\Delta T}}{2} \right] \times \\ (1 - e^{-0.268\Delta T}), & T \leq 0 \\ S_1, & T > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: S 为冻融过程中水/冰颗粒面积; T 为当

前温度, K; $\Delta T = T_m - T$, T_m 标准大气压下的冰点温度 (273.15 K)。

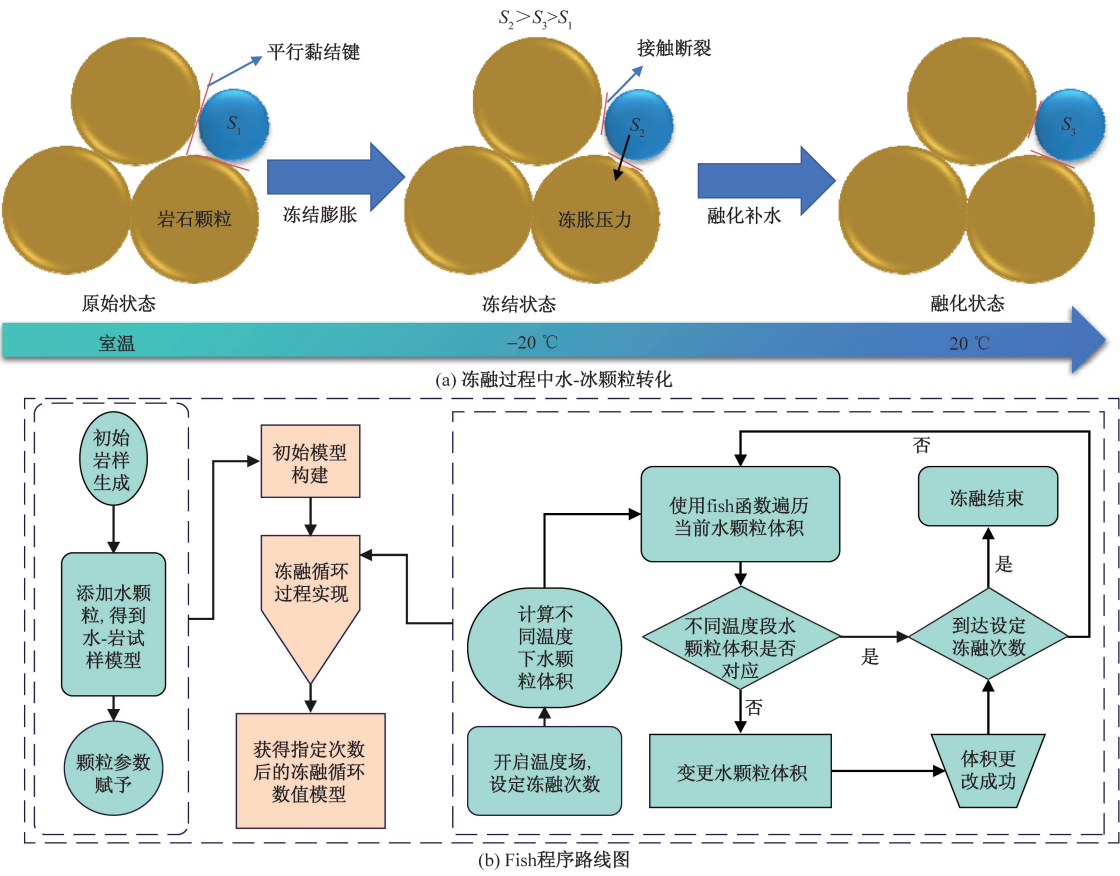
基于 PFC 内嵌的 Fish 函数实现试样冻融过程, 如图 3(a) 所示, 通过控制单个孔隙水颗粒的面积变化, 实现其随温度变化的水-冰相变与冻胀过程的耦合。为模拟试验中的补水效应, 每次冻融循环结束时将水颗粒面积设置为大于上一次循环结束时面积。

3.2 冻融模型构建

离散元颗粒流数值模拟的核心功能在于, 它能直观展示岩石破坏过程中的微细观结构变化, 因此被广泛用于分析岩石类材料的结构特性与力学响应。建立与室内花岗岩试样尺寸一致的数值试样 (图 4), 模型中包含岩石与水两类颗粒介质, 对生成颗粒提前预压压实, 后采用可模拟颗粒间黏结特性的平行黏结模型以同步表征岩石从细观裂隙演化至宏观破坏的全过程, 多次试验调整颗粒半径及孔隙率使得数值模拟结果贴合室内效果, 最终确定颗粒参数如表 2 所示。

3.3 细观参数标定

对未经冻融岩石试样进行单轴压缩, 为准确反映花岗岩骨架对强度的主导作用, 模型中去除水颗粒, 以确保试样强度由岩石颗粒骨架承担。为提升参数标定效率, 将颗粒模量与平行黏结模量、颗粒及接触模型刚度比设为一致^[23]。鉴于冻融损伤实际发生于岩石骨架, 将水颗粒间及其与岩石颗粒间黏结强度设置得足够大以消除力学影响。采用试错法获得模型细观参数 (表 3), 数值模拟与室内试验结果 (图 5) 在弹性模量、峰值强度、破坏形态高度一致, 验证该组参数用于后续冻融模拟的可行^[24]。



S_1 为未冻融初始面积; S_2 为冻结状态冰颗粒面积; S_3 为融化阶段水颗粒面积

图 3 冻融模拟原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the freeze-thaw simulation

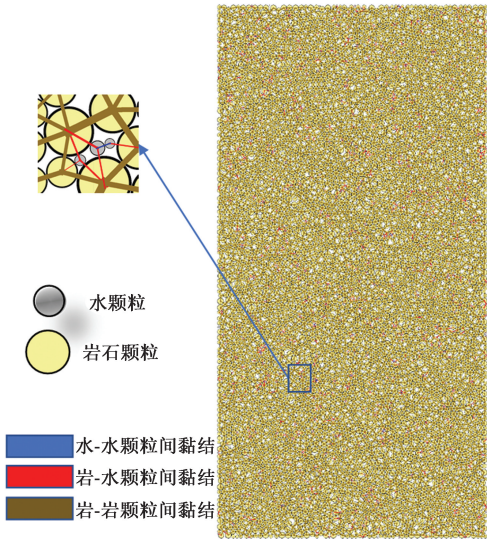


图 4 数值试样

Fig. 4 Numerical sample

表 2 模型颗粒基本参数

Table 2 Basic parameters of model particles

颗粒种类	颗粒半径/mm		颗粒密度/(kg·m ⁻³)
	最小值	最大值	
岩石颗粒	0.3	0.45	2 700
水颗粒	0.15	0.2	1 000

4 冻融模拟结果分析

4.1 模拟结果验证

对不同冻融次数后试样进行三轴卸荷模拟,采用伺服机制控制墙体位移以施加 10、20、30 MPa 围压。随后通过控制上下墙体相向运动实现轴向加载,设定加载速率为 0.1 mm/min,统计不同围压下轴向峰值应力,据此绘制其与围压 σ_3 关系曲线(图 5),并基于摩尔-库伦强度准则,按照式(6)和式(7)计算花岗岩内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。

$$c = \frac{\sigma_c(1 - \sin\varphi)}{2\cos\varphi}$$

(6)

$$\varphi = \arcsin \frac{k - 1}{k + 1}$$

(7)

式中: σ_c 为不同循环次数下围压-峰值应力曲线纵坐标上的截距; k 为该曲线斜率。

图 6 显示,随冻融循环进行,相同围压下岩样应力峰值逐步衰减,证实冻融损伤累积导致力学性能持续劣化。模拟与试验拟合效果呈现良好线性相关性,表明本次数值模拟可有效复现室内试验结果。

图7呈现了不同冻融次数下花岗岩黏聚力、内摩擦角、峰值应力与弹性模量等关键力学参数的演化规律。内摩擦角0~20次循环内降幅明显,推测为岩体内部颗粒结构因冻胀-融化循环快速劣化,后续冻融中岩样内摩擦角下降速率显著降低并趋于稳定,表明岩样内部损伤进入平稳发展阶段,黏聚力c的变化呈现“前期平缓,后期加速”特征,60次循环后模拟岩样黏聚力由39.72 MPa降至15.06 MPa,降低了24.66 MPa,整体降幅为62.08%,试验岩样黏聚力由39.72 MPa降至17.42 MPa,整体降幅为56.15%。模拟试样黏聚力下降更快可归因于两方面:①刚性圆球颗粒无法准确表征花岗岩细观缺陷演化,试验中花岗岩原生微裂隙会因冻胀力优先扩展,而PFC模型中均匀的颗粒接触使冻胀力分布均匀,引发协同失稳,加剧黏聚力损失^[25];②模型仅以固定摩擦系数模拟滑动摩擦,未考虑真实岩体中胶结物的蠕变行为,难以准确反映冻融后期微裂隙贯通后的摩擦特性^[26]。

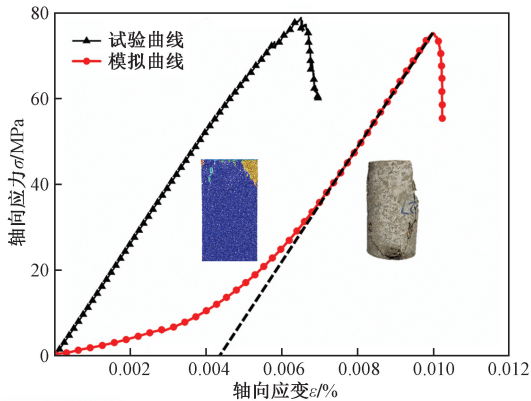


图5 应力-应变曲线及破坏形态对比
Fig. 5 Comparison of stress-strain curves and failure patterns

表3 模型计算细观参数

Table 3 Meso-parameters for numerical simulation								
黏结类型	颗粒接触 模量/GPa	颗粒刚 度比	摩擦 系数	平行黏结 模量/GPa	平行黏结法向与 切向刚度比	平行黏结法向 强度/MPa	平行黏结切向 强度/MPa	胶结内摩 擦角/(°)
岩-岩黏结	15.5	1.5	0.2	15.5	1.5	170.5	63.14	58.5
水-水黏结	15.5	3.5	0	15.5	3.5	1 500.0	1 500.0	0
岩-水黏结	15.5	3.5	0	15.5	3.5	1 500.0	1 500.0	0

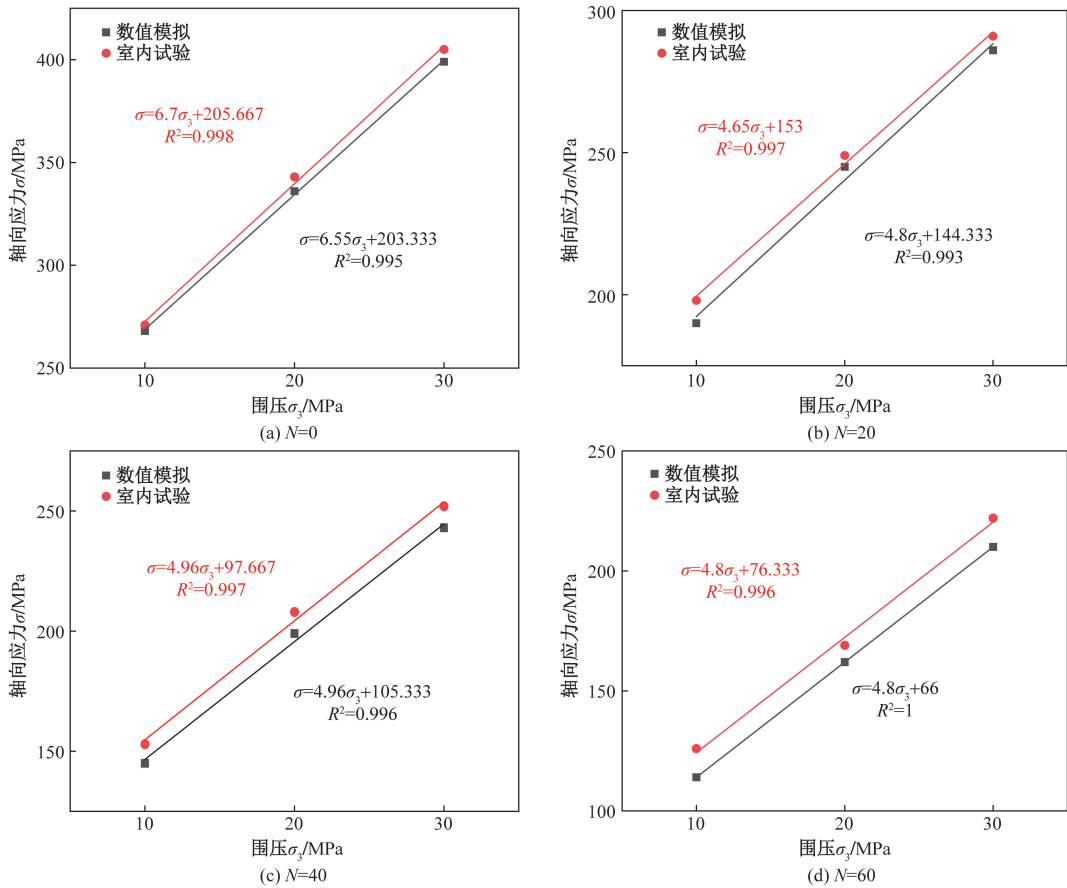
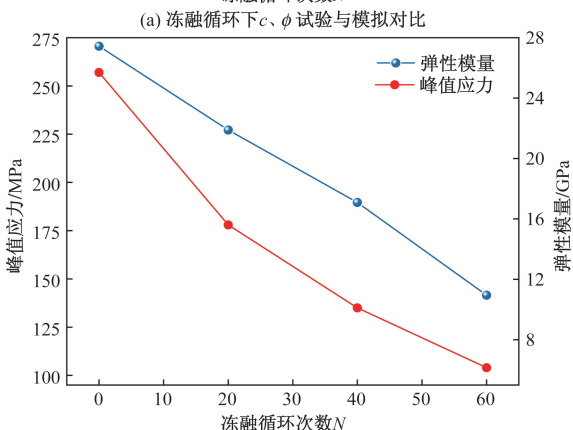
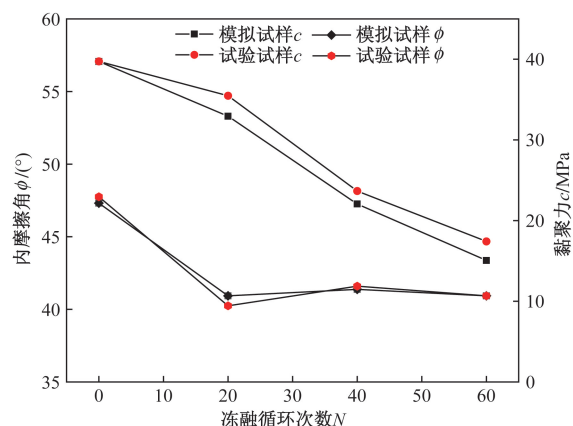


图6 不同循环次数下围压-峰值应力图
Fig. 6 Confining pressure-versus peak stress under different numbers of cycles



(b) 岩石抗压强度及弹性模量变化规律

图7 不同冻融次数下花岗岩劣化规律

Fig. 7 Granite deterioration under various freeze-thaw cycles

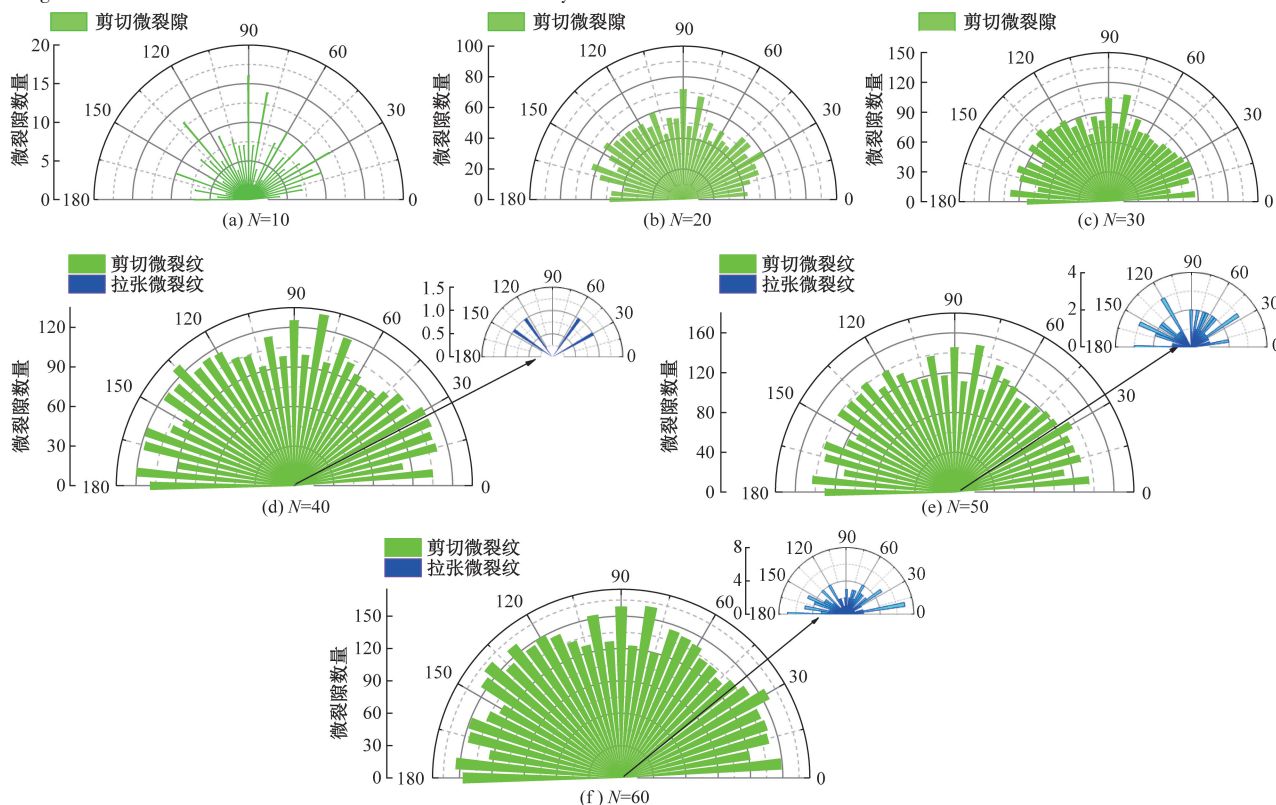


图8 不同冻融循环次数后微裂隙玫瑰花图

Fig. 8 Rose diagram of microcracks after different numbers of freeze-thaw cycles

根据图7(b)所示,随冻融次数增加,试样峰值应力由257 MPa降至104 MPa(降幅59.5%),弹性模量由27.4 GPa降至10.9 GPa(降幅60.2%),表明冻融循环降低了花岗岩抵抗破坏的能力。其本质为内部裂隙中水颗粒相变产生体积膨胀-收缩循环,冻结阶段产生膨胀引发的内应力持续损伤岩石骨架,导致微观结构产生不可逆累积损伤。

4.2 冻融循环下岩石微观损伤特征

为研究冻融过程中岩石损伤演化,对不同冻融次数下微裂隙的倾向与数量进行统计,绘制极坐标裂隙玫瑰花图(图8),结果表明:试样前期仅发育剪切微裂隙,后期剪切-拉张微裂隙共同发育,显示冻融循环下应力状态由剪切为主转向剪切+拉张耦合作用。剪切微裂隙数量持续增多且始终保持明显的优势发育方向,反映岩石各向异性对裂隙萌生的控制作用;拉张微裂隙在40次循环开始出现,其优势发育方向与剪切微裂隙存在一定空间关联性。结合微裂隙数量占比图(图9)分析可知,微裂隙数量从初始的265条增加至5202条,呈现出以剪切损伤为主导、裂隙数量持续增加的变化特征,且扩展方向明显受到岩石内部结构控制,反映损伤机制从单一剪切向拉-剪耦合破坏的演化趋势。通过试样冻融位移云图(图10)进一步观测,发现随冻融次数从10次至60次,颗粒最大位移值持续增大,反映

颗粒整体位移显著提升。同时,位移分布不均匀性增强:冻融初期低位移区占比较大,位移分布相对均

匀;而随循环增加,高位移区范围扩大,局部高位移现象突出。该结果表明冻融导致的裂隙扩展与颗粒胶结弱化不断累积,削弱颗粒间约束,相对运动加剧,从而降低岩样力学稳定性。

综上所述,颗粒位移场呈现出由内向外递增的分布规律,表明试样边界颗粒更易脱落。这主要是孔隙水冻结产生冻胀力所致,与前文机理分析一致。同时试样中心位置的岩石颗粒由于长期受到围压作用,孔隙率更低,颗粒间胶结更加紧凑,颗粒间黏结力与摩擦力也就更强,而表面颗粒因结构疏松,受到约束较少,更易发生位移与产生微裂纹。

4.3 卸载作用下岩石破裂演化特征

鉴于目前冻融花岗岩受载后内部结构劣化影响其破坏特征尚未明确。基于室内试验结果,绘制了相同围压下不同冻融次数试样受载后微裂隙数量与应力-应变曲线(图 11),结果显示,剪切裂纹在

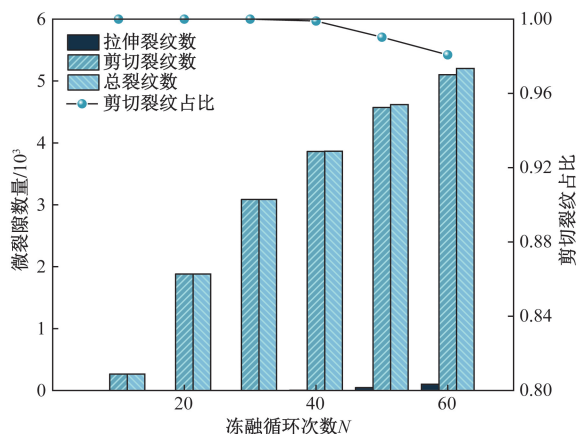


图 9 不同冻融次数后微裂隙数量占比

Fig. 9 Proportion of microcrack quantities after different numbers of freeze-thaw cycles

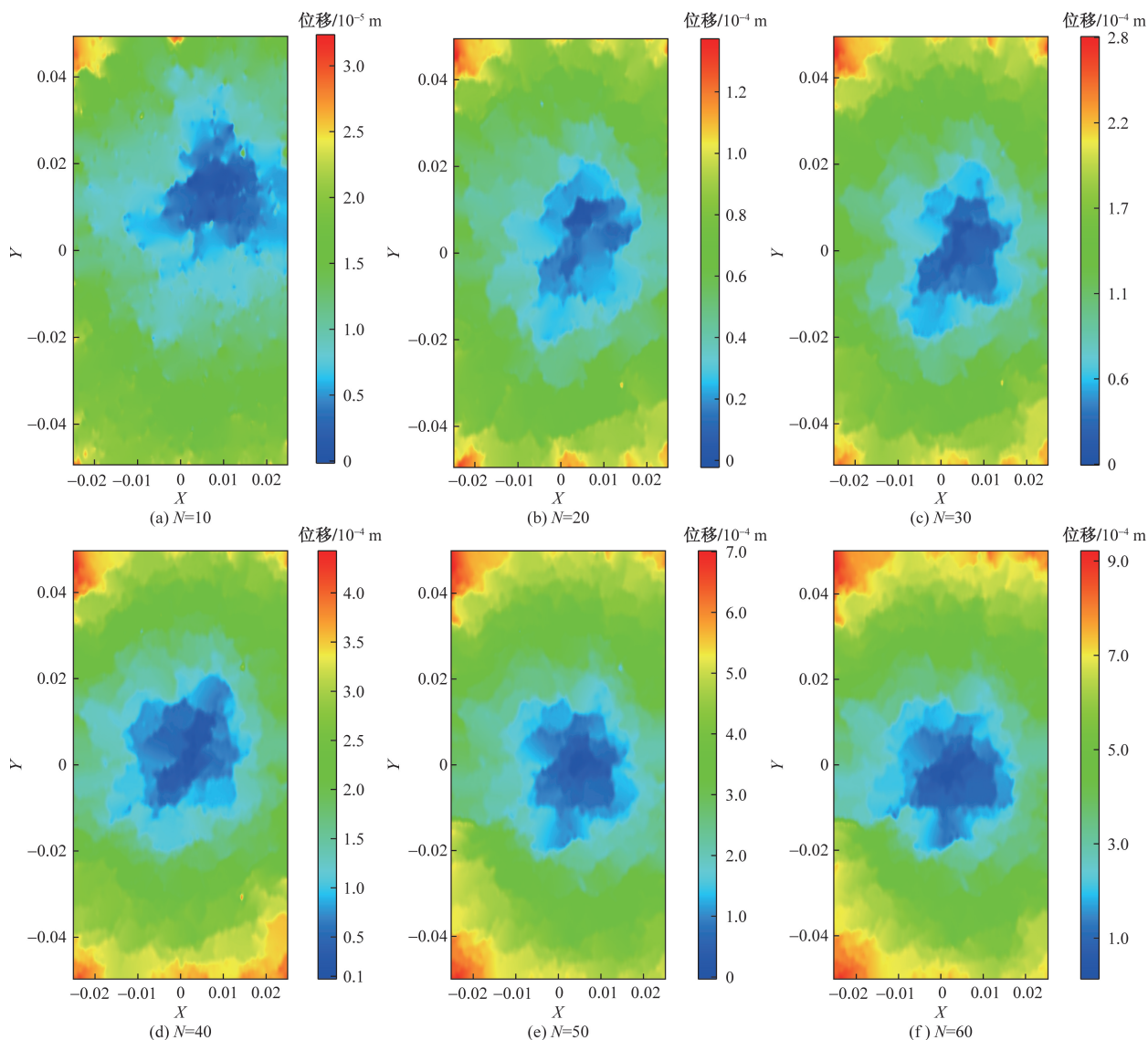


图 10 不同冻融次数下试样位移云图

Fig. 10 Displacement nephograms of specimens under different freeze-thaw cycles

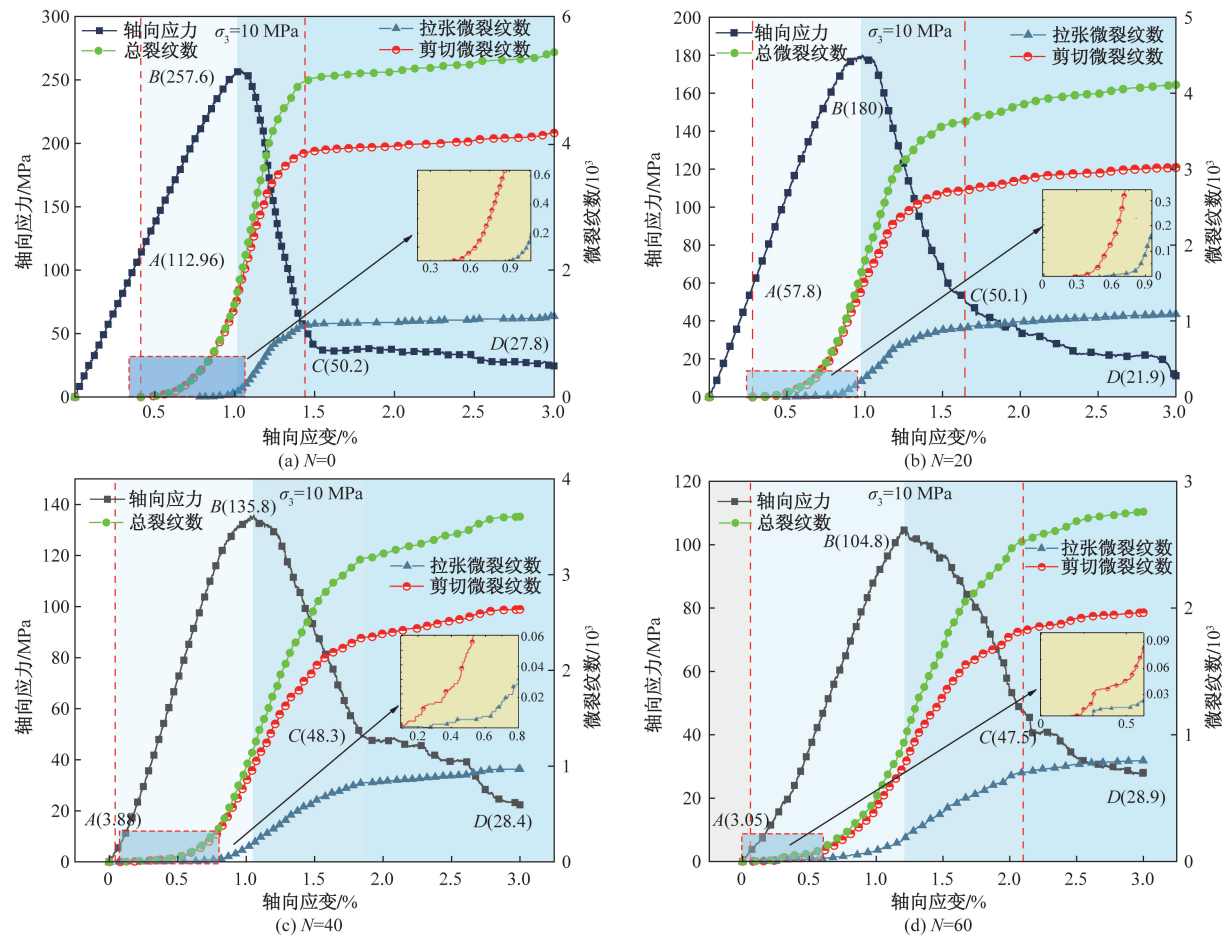


图 11 冻融循环下应力-应变与微裂纹关系曲线

Fig. 11 Stress-strain curves versus microcrack evolution under freeze-thaw cycles

数量全程多于拉张裂隙,表明试样破坏以剪切为主导,各冻融次数下微裂隙发育均呈现“慢-陡-缓”趋势。冻融后试样内部预存裂隙增多,导致外部荷载能量优先集中于既有裂隙尖端并促进其扩展,进而抑制新生裂纹的形成。因此,伴随冻融次数增大,新生裂纹总体数量呈现逐渐减少的趋势。

结合局部放大图分析,剪切微裂纹萌生早于拉张微裂纹,二者均经历低速扩展、快速发展和稳定 3 个阶段。定义裂纹首次应力点为 A 点,将其作为起裂应力阈值^[27],取试样峰值点为 B 点,裂隙扩展转折点为 C 点,定义应变值 2.75% 为 D 点,此时应力基本趋于稳定。由表 4 可知, N 从 0 次增加到 20 次、40 次、60 次,拉张微裂纹起裂应力 σ_{ti} 依次下降了 49.9%、97%、97.9%,剪切微裂纹起裂应力 σ_{si} 依次下降了 48.8%、96.6%、97.3%,峰值应力依次下降了 30.1%、47.3%、59.3%。三者持续降低说明冻融弱化了岩石骨架胶结性能,显著削弱其抵抗裂纹启裂与宏观破坏的能力。冻融后岩样微裂隙演化可分为 4 个阶段:OA 阶段初次出现裂纹并缓慢发育;AB 阶段裂纹快速扩展;BC 阶段主裂纹贯通,承

表 4 不同冻融次数下试样三轴卸荷微裂纹起裂指标及峰值应力统计

Table 4 Statistics of microcrack initiation indices and peak stresses in triaxial compression tests of specimens under different freeze-thaw cycles

冻融次数 N	拉张微裂纹起裂 应力 σ_{ti} /MPa	剪切微裂纹起裂 应力 σ_{si} /MPa	峰值应力 σ_t /MPa
0	210.0	113.0	257.6
20	105.2	57.9	180.0
40	6.4	3.9	135.8
60	4.5	3.1	104.8

载力骤降并软化;CD 阶段试样处于残余强度状态,裂纹扩展基本停止。

以冻融 0 次与 60 次的两个岩样为研究对象,在围压 $\sigma_3 = 10$ MPa 条件下分析其岩样受载破裂演化全过程(图 12 和图 13),结合图 11(a) 和图 11(d) 中四阶段特征分析,揭示冻融作用对破坏演化的影响如下。

(1)OA 阶段:两试样初始均无裂隙,但冻融 60 次试样起裂应力显著提前,反映冻融作用削弱岩石

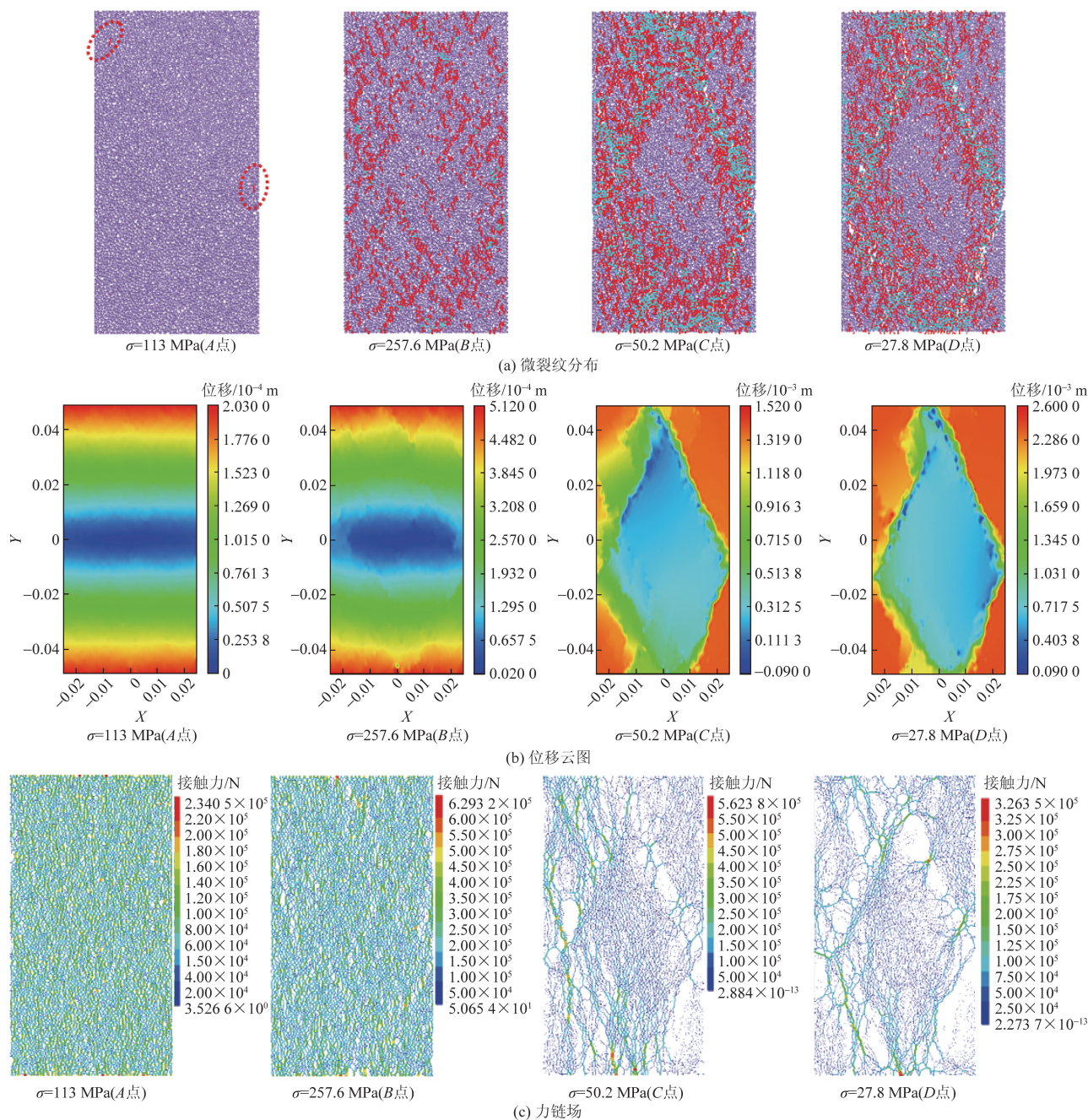


图 12 0 次冻融试样破裂演化过程

Fig. 12 Fracture evolution process of unfrozen-thawed specimens

强度,使其更易产生微裂纹。位移云图显示,0 次冻融试样位移梯度明显,60 次试样则分布均匀但缺乏塑性流动特征,表明冻融使岩石承载机制由胶结主导转向摩擦主导。力链分布由集中高强度传递转为分散均衡传递。

(2)AB 阶段:微裂纹稳定发展,以剪切裂纹为主。60 次冻融后试样上下边界变形不规则,显示颗粒胶结部分失效,边缘更易发生剥落。此时 0 次与 60 次试样最大力链值分别为 629.3 kN 与 446.9 kN,证明冻融作用显著降低岩样承载能力,促

进低荷载下岩样破坏发生。

(3)BC 阶段:微裂纹迅速发展,伴随着主裂纹贯通出现应力骤降现象。0 次冻融试样最大位移为 1.52×10^{-3} m,变形集中于完整区域;60 次试样最大位移达 1.805×10^{-3} ,增幅为 18.7%,高位移环带占比显著提高。冻融预损伤重塑裂纹扩展路径,峰后软化效应加剧。

(4)CD 阶段:宏观裂隙贯通,应力依靠残余强度维持。未冻融试样保持整体结构性变形特征,而 60 次冻融试样呈现局部化变形模式,形成明显滑动

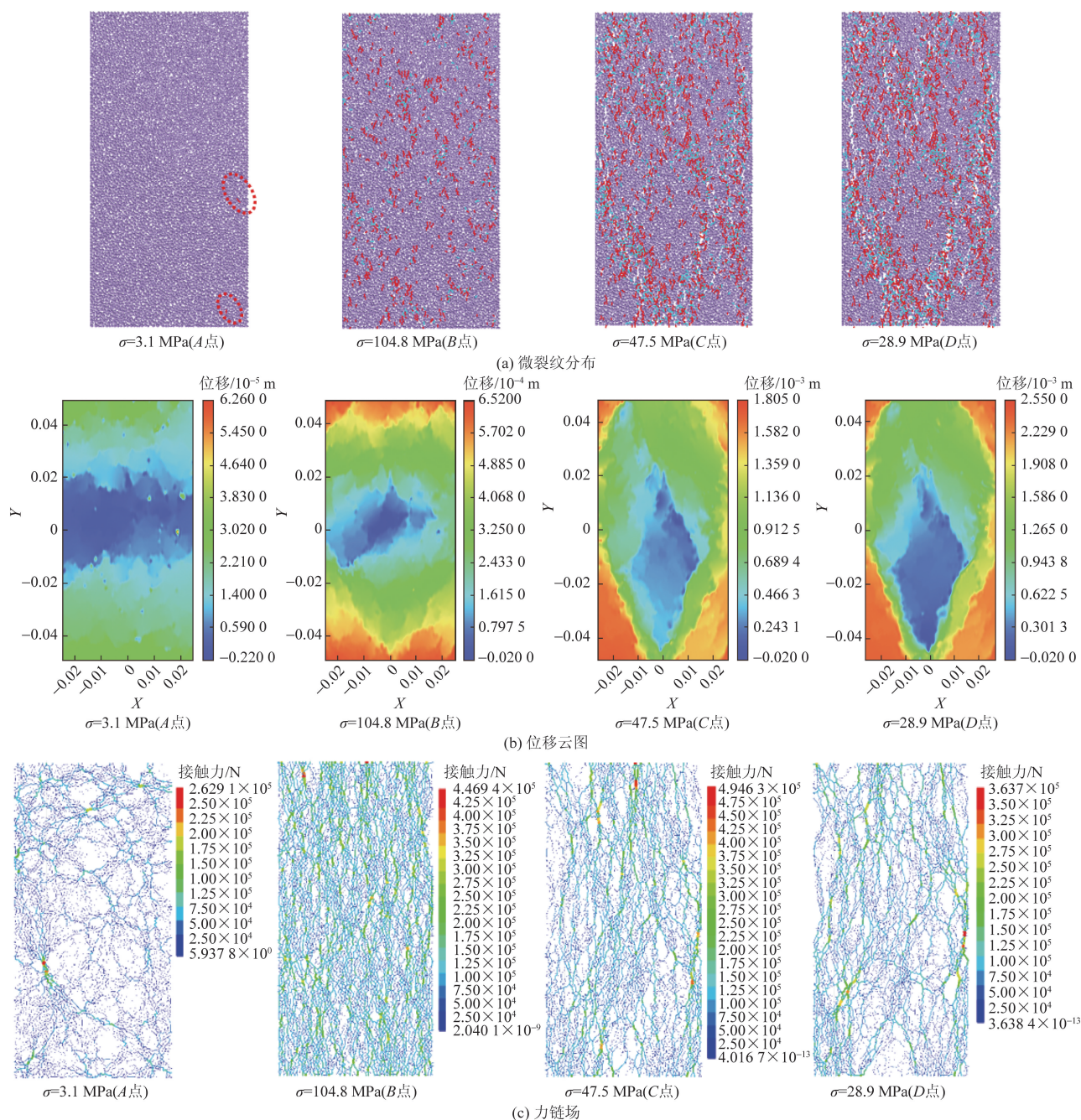


图 13 60 次冻融试样破裂演化过程

Fig. 13 Fracture evolution process of 60-cycle freeze-thawed specimens

带,表明其力学性能经冻融作用已发生退化。

冻融循环通过预置微裂纹、重塑变形路径等方式,促使岩石损伤累计过程加速。其预损伤作用导致新裂纹萌生减少,加速主裂纹贯通,最终通过“预损伤-裂纹贯通-摩擦主导”机制,显著降低岩石力学参数。

表 5 对比了 10 MPa 下室内试验与数值模拟试样受载破坏形态,未冻融试样破坏呈红蓝交织的拉-剪裂隙,属于拉-剪混合破坏模式,颗粒破碎集中于裂隙交汇区,整体损伤以广泛裂隙扩展为主;冻融

后裂隙数量减少且分布集中,反映预存微裂纹优先扩展贯通,新裂隙生成受限,颗粒破碎分散,损伤更集中于薄弱区域。

4.4 岩石的能量演化规律

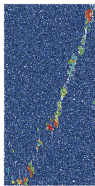
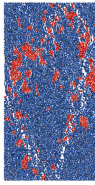
岩石的破坏过程实质上是内部弹性能与耗散能互相转化的过程^[28],该过程可通过力与位移的乘积量化表征,因此能量分析能有效揭示其破坏机制。假设为绝热环境,根据能量守恒定律,压力机对岩石所做的功全部转化为储存能与耗散能^[29]。

统计不同冻融次数下花岗岩总能量、弹性能、耗散能,并绘制各能量随应变变化过程(图14),随着冻融次数 N 的增加,各能量峰值持续降低,曲线整体下移,反映岩石储能与耗能能力不断减弱,具体表现为:总应变能由0次时的9.67 kJ降至60次时的5.83 kJ;弹性应变能由6.86 kJ降至2.38 kJ,归因于结构劣化与弹性模量下降;耗散能峰值亦随冻融增加而降低,初始损伤促使非弹性变形更易发生,但可耗散总能量减少。整体表明,冻融循环通过破坏岩石内部结构,削弱岩石能量存储与转化能力,从而在能量层面揭示了力学性能劣化的本质机制。

为分析冻融循环对岩石能量转换影响,引入弹性应变能占比 α 与耗散能占比 β 来辅助分析,图15显示,随冻融循环次数增加, α 的峰值呈递减趋势, β 则呈相反趋势,进一步验证了这一能量分配劣化规律。从能量机制与冻融损伤内在联系分析:冻融通过冰劈效应、矿物溶蚀等作用诱发微裂

表5 不同冻融次数试样受载破坏形态对比

Table 5 Comparison of loaded failure modes of specimens subjected to different numbers of freeze-thaw cycles

冻融次数 N	室内试样	数值试样
0		
60		

隙扩展与孔隙率升高,导致骨架刚度退化^[30]。未经历冻融时试样结构更加完整,能量多以弹性应变能储存;随冻融进行,损伤加剧使不可逆变形机制增强,能量更多用于裂隙摩擦与塑性变形,弹性储能能力被削弱,最终表现为 α 持续衰减而 β 相应上升。

5 结论

(1)三轴卸荷压缩条件下,冻融循环通过引发岩石内部裂隙水的相变与体积循环变化,导致微裂隙扩展与贯通,最终体现为60次循环后黏聚力、峰值应力与弹性模量等宏观力学参数分别下降了56.15%、59.5%和60.2%。

(2)冻融作用下花岗岩损伤始于微裂隙萌生与扩展,破坏模式由剪切主导逐渐转为拉-剪耦合,反映内部应力的重分布。微观损伤持续积累引发颗粒位移不均与整体位移增大,宏观表现为表面剥落加速。该过程呈现由表及里劣化特征:冻胀力作用下外部疏松区优先破坏,内部颗粒因围压约束作用损伤较轻。

(3)冻融预损伤使得岩石起裂应力与峰值应力显著降低,微裂隙“慢-陡-缓”扩展阶段特征明显,新生裂纹减少,能量集中于预存裂隙贯通。力链分布由集中高强度传递转为分散低强度,位移场由整体渐变转为局部滑移集中。冻融通过预制裂隙、弱化胶结与重塑变形路径,促进峰后软化及稳定性下降,致使岩石宏观力学性能降低。

(4)能量分析结果表明,随冻融次数增加,岩石总应变能、弹性能与耗散能峰值均显著降低,整体储能与耗能能力减弱。弹性应变能占比不断减小而耗散能占比相应增大,反映冻融损伤削弱了弹性储能能力,促使更多能量分配给不可逆的损伤耗散。这一能量分配转变从热力学角度揭示了冻融引发岩石刚度与强度劣化的内在机理。

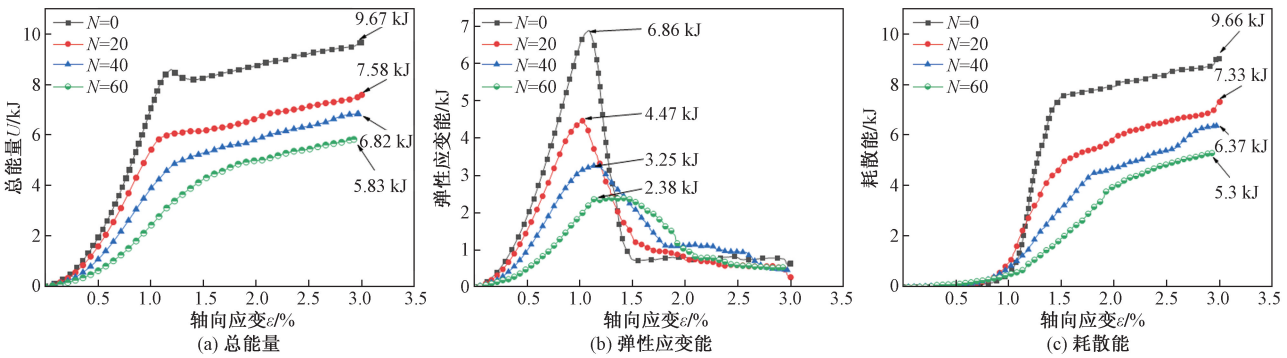


图14 不同冻融次数下花岗岩能量演化规律

Fig. 14 Energy evolution in granite under different freeze-thaw cycles

投稿网址:www.stae.com.cn

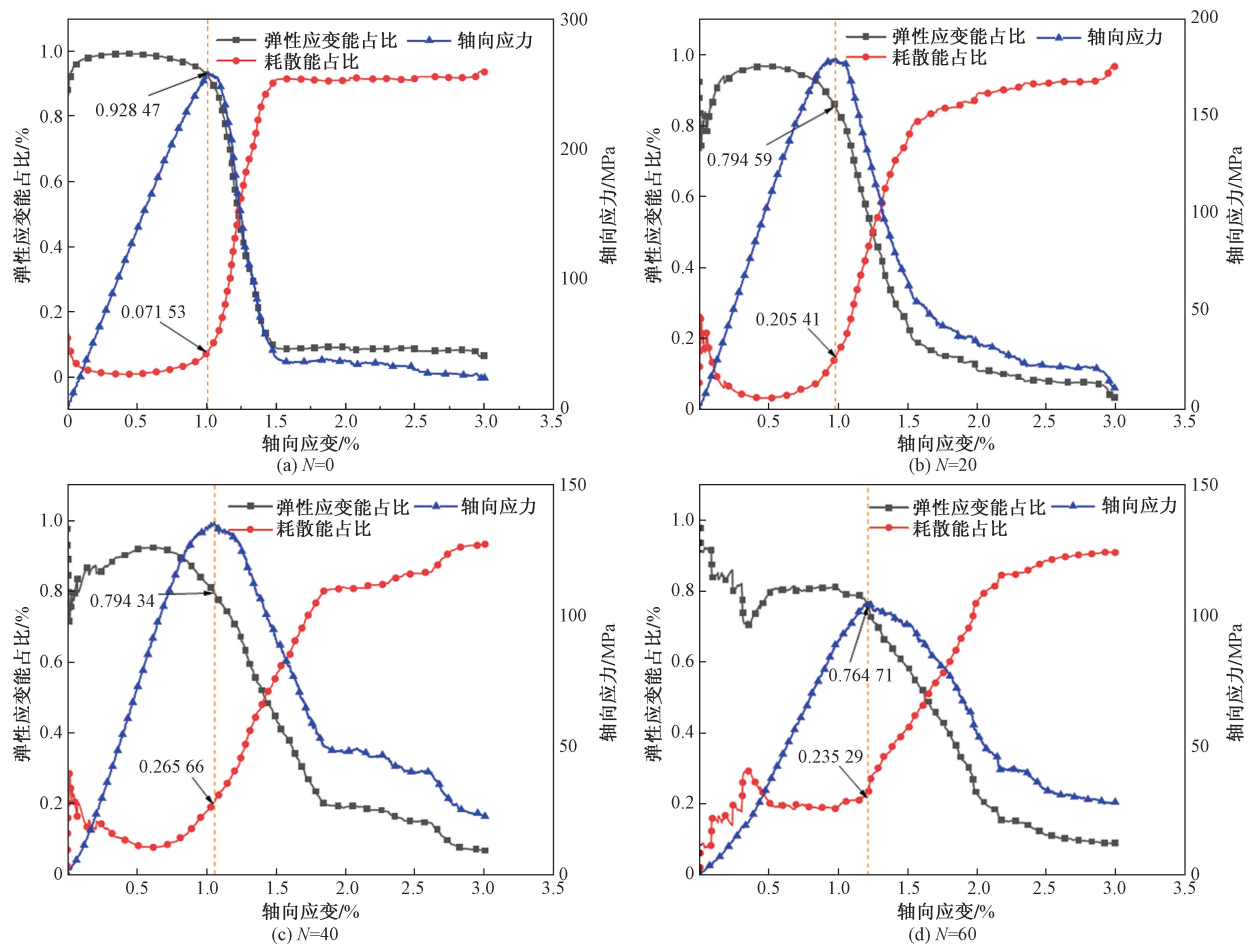


图 15 不同冻融循环次数下花岗岩试样能量分布曲线

Fig. 15 Energy distribution curves of granite specimens under different freeze-thaw cycles

参 考 文 献

- [1] 邓友生, 刘俊聪, 彭程谱, 等. 铁路路基冻害防治方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 1-8.
Deng Yousheng, Liu Juncong, Peng Chengpu, et al. Study on prevention methods for railway subgrade frost damage[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 1-8.
- [2] Sun Y, Zhai C, Xu J, 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.
- [3] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报. 2020, 39(12): 2377-2389.
Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges of engineering geology posed by the Sichuan-Xizang Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [4] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏观损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1124-1135.
Lü Siqing, Zhu Jiebing, Wang Bin, et al. Macro-meso damage model of sandstone with open fissures under freeze-thaw and loading coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1124-1135.
- [5] 田森, 赵映, 司鸽, 等. 寒区露天矿岩质边坡裂隙岩体冻融损伤特征及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4687-4700.
Tian Sen, Zhao Ying, Si Hu, et al. Experimental study on freeze-thaw damage characteristics and mechanical properties of fractured rock mass in rock slopes of open-pit mines in cold regions[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4687-4700.
- [6] 刘杰, 任毅哲, 刘赛, 等. 冰融循环作用下粉砂质泥岩力学特性及损伤机制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(12): 2532-2543.
Liu Jie, Ren Yizhe, Liu Sai, et al. Mechanical properties and damage mechanism of silty mudstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(12): 2532-2543.
- [7] 祝榆峰, 任建喜, 云梦晨, 等. 冻融裂隙大理岩三轴压缩疲劳损伤特性及本构模型[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(11): 4733-4742.
Zhu Yufeng, Ren Jianxi, Yun Mengchen, et al. Fatigue damage characteristics and constitutive model of freeze-thaw fractured marble under triaxial compression[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4733-4742.
- [8] 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 segmented constitutive model of freeze-thaw damaged sandstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2023, 54(3): 908-919.
- [9] Zheng Z, Shi Z, Wang M, et al. Fatigue fracture and energy evolution characteristics of sandstone under water-ice phase transitions via the discrete element method [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 185: 107343.
- [10] 谢昊天, 徐颖, 郑强强, 等. 冻融循环作用下饱水砂岩强度衰减及细观结构特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 84-93.
- Xie Haotian, Xu Ying, Zheng Qiangqiang, et al. Strength deterioration and meso-structural characteristics of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 84-93.
- [11] 谭千千, 温韬, 王艳昆, 等. 冻融作用下裂隙砾岩宏微观损伤及本构模型研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 7(6): 1-18.
- Tan Qianqian, Wen Tao, Wang Yankun, et al. Macro-micro damage and constitutive model of fractured conglomerate under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 7(6): 1-18.
- [12] 郭威, 温韬, 贾文君, 等. 冻融作用下寒区砂岩力学特性劣化规律及数值分析[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(11): 144-154.
- Guo Wei, Wen Tao, Jia Wenjun, et al. Deterioration law and numerical analysis of mechanical properties of cold-region sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(11): 144-154.
- [13] 张慧梅, 成瑞, 陈世官, 等. 冻融红砂岩孔隙结构演化规律及多重分形特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10901-10909.
- Zhang Huimei, Cheng Rui, Chen Shiguan, et al. Pore structure evolution law and multifractal characteristics of freeze-thaw red sandstone[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10901-10909.
- [14] 万亿, 陈国庆, 孙祥, 等. 冻融后不同含水率红砂岩三轴蠕变特性及损伤模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1463-1472.
- Wan Yi, Chen Guoqing, Sun Xiang, et al. Triaxial creep characteristics and damage model of red sandstone with different moisture contents after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1463-1472.
- [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 stress-freeze-thaw coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 342-351.
- [16] 王中文, 徐颖, 谢守冬, 等. 岩石冻融损伤细观特征数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(11): 143-149.
- Wang Zhongwen, Xu Ying, Xie Shoudong, et al. Numerical simulation study on mesoscopic characteristics of rock freeze-thaw damage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(11): 143-149.
- [17] 周超. 冻融循环作用下砂岩能量演化规律及PFC数值模拟研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(3): 540-553.
- Zhou Chao. Energy evolution law and PFC numerical simulation study of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(3): 540-553.
- [18] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 水电水利规划设计总院, 中国电力企业联合会. 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.
- Chengdu Engineering Corporation Limited, HydroChina Beijing Engineering Corporation, China Electricity Council. Standard for test methods of engineering rock masses: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [19] 玉达变, 张海, 刘先林, 等. 基于三轴压缩过程能量演化的花岗岩损伤应力预测[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(2): 745-753.
- Yu Dabian, Zhang Hai, Liu Xianlin, et al. Damage stress prediction of granite based on energy evolution during triaxial compression[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(2): 745-753.
- [20] Zhao Y, Zhao Q B, Yang T H, et al. Investigation of crack propagation and acoustic emission characteristics in jointed rock under freeze-thaw cycles based on DEM [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2025, 35: 1171-1195.
- [21] 刘泉声, 潘玉丛, 黄诗冰, 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): 2000-2012.
- Liu Quansheng, Pan Yucong, Huang Shibing, et al. Unfrozen water content and frost heave deformation model of low-temperature saturated rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2000-2012.
- [22] Dana E S F. Gas relative permeability and pore structure of sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(5): 613-625.
- [23] 张志伟, 左银辉, 常晁瑜, 等. 基于力链变化的直剪试验数值分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10874-10883.
- Zhang Zhiwei, Zuo Yinhui, Chang Chaoyu, et al. Numerical analysis of direct shear test based on force chain evolution[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10874-10883.
- [24] 周传涛, 田文岭, 杨圣奇, 等. 高温后花岗岩循环加卸载力学行为数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11768-11777.
- Zhou Chuantao, Tian Wenling, Yang Shengqi, et al. Numerical simulation of mechanical behavior of granite after high temperature under cyclic loading and unloading[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11768-11777.
- [25] 张学朋, 王刚, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J]. 岩土力学, 2014(S1): 99-105.
- Zhang Xuepeng, Wang Gang, Jiang Yujing, et al. Simulation of granite compression test using particle discrete element model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(S1): 99-105.
- [26] 闻磊, 李夕兵, 唐海燕, 等. 变温度区间冻融作用下岩石物理力学性质研究及工程应用[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 120-128.

- Wen Lei, Li Xibing, Tang Haiyan, et al. Study on physical and mechanical properties of rock under freeze-thaw cycles with variable temperature ranges and its engineering application[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 120-128.
- [27] Zhang L, Ren T, Li X, et al. Acoustic emission, damage and cracking evolution of intact coal under compressive loads: experimental and discrete element modelling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 252: 107690.
- [28] 温韬, 张馨, 孙金山, 等. 基于峰前和峰后能量演化特征的岩石脆性评价[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3385-3396.
- Wen Tao, Zhang Xin, Sun Jinshan, et al. Brittleness evaluation of rock based on energy evolution characteristics before and after peak [J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3385-3396.
- [29] Gao F, Cao S, Zhou K, et al. Damage characteristics and energy-dissipation mechanism of frozen-thawed sandstone subjected to loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102920.
- [30] Lai R, Zhang Z, Zhu J, et al. Deterioration mechanisms of tuff with surface fractures under freeze-thaw cycles[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 13402.