

于美鲁, 马定, 左建平, 等. 冻融循环作用下青砂岩动态断裂特性与断裂过程区演化机制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023021.

YU Meilu, MA Ding, ZUO Jianping, et al. Study on dynamic fracture characteristics and fracture process zone evolution mechanism in sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023021.

冻融循环作用下青砂岩动态断裂特性与 断裂过程区演化机制研究

于美鲁^{1,2,3}, 马定¹, 左建平⁴, 徐颖¹, 刘怀谦¹, 李春元⁵, 李政岱⁶, 王春华^{2,3}

(1. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025; 4. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083; 5. 煤炭科学研究总院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013; 6. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211)

摘要: 以青藏高原季节性青砂岩为主要研究对象, 通过室内试验探究冻融循环(F-T)对青砂岩动态断裂特征的影响。采用20℃~20℃的冻融区间对岩样进行预处理, 结合SHPB试验装置开展冲击三点弯曲试验, 并利用高速摄像机和Ncorr软件分析断裂过程区(FPZ)的演化规律。研究结果表明: 青砂岩力学性能在经历冻融循环之后显著劣化, 并影响其动态断裂行为。随着F-T次数增加, 预制裂缝贯通时间延长, 相同时间内的裂纹张开宽度增加, 且达到相同宽度所需时间减少。在111 ms前, 裂纹张开速度受冻融循环次数的抑制, 之后影响减弱。由此可见, 冻融作用主要影响裂缝尖端初始扩展阶段。FPZ的发育规律可分为“扩展—收缩”两阶段, 初始阶段微裂纹在裂缝前端聚集, 随荷载增大FPZ范围扩展; 主裂纹贯通后, 因能量释放而收缩消失。岩石内部在冻融作用下形成了大量孔隙结构, 增强了能量吸收能力, 导致FPZ极值减小且峰值提前, 破坏模式由脆性向延性转变, 表现为裂缝贯通时间延长和初始张开速度降低。研究成果可为寒区工程岩体的动力灾害解危提供可参考的基础试验数据。

关键词: 冻融循环; 断裂特征; 三点弯曲试验; 断裂过程区; 岩石力学

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3021-16

Study on dynamic fracture characteristics and fracture process zone evolution mechanism in sandstone under freeze-thaw cycles

YU Meilu^{1,2,3}, MA Ding¹, ZUO Jianping⁴, XU Ying¹, LIU Huaiqian¹, LI Chunyuan⁵,
LI Zhengdai⁶, WANG Chunhua^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Guizhou Institute of Mine Safety Science Co., Ltd., Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 5. Deep Mining and Rock Burst Research Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 6. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Coal Mining, Beijing 102211, China)

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-08-21

责任编辑: 施红霞

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1175

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304118); 安徽理工大学引进人才基金资助项目(2023yjrc18); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金课题资助项目(SKLMRDPC23KF08); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金课题资助项目(NICE_RD_2025_112)

作者简介: 于美鲁(1992—), 男, 山东汶上人, 讲师, 博士。E-mail: meilu_yu@163.com

通信作者: 左建平(1978—), 男, 江西高安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zjp@cumtb.edu.cn

Abstract: This study, through laboratory experiments, investigates the effects of freeze-thaw (F-T) cycles on the fracture characteristics of sandstone under seasonal freezing conditions on the Qinghai-Tibet Plateau. Sandstone samples were first pretreated with F-T cycles in a temperature range of 20 °C to -20 °C and then subjected to impact three-point bending tests with the aid of a SHPB system. In the meantime, the evolution of the fracture process zone (FPZ) was analyzed via high-speed camera recordings and Ncorr digital image correlation software. The results demonstrate that F-T cycles induce mechanical property degradation in sandstone, which in turn affects its dynamic fracture behavior. As F-T cycles increase, the time required for pre-existing crack penetration extends, the crack opening width within the same time interval increases, and the time needed to achieve an equivalent opening width decreases. Crack opening velocity is significantly suppressed by F-T cycles before 111 ms, while this influence diminishes afterward, indicating that F-T effects predominantly govern the initial crack tip propagation stage. The evolution of the FPZ can be divided into two stages: expansion and contraction. To be specific, in the initial stage, microcracks cluster near the crack tip, and the FPZ expands with the increase in load. After main crack penetrates, the FPZ contracts and eventually dissipates due to energy release. F-T cycles promote the formation of a substantial number of pores within the sandstone, enhancing its energy absorption capacity. As a result, FPZ peak values are reduced and peak stresses occur earlier, accompanied by a transition in failure mode from brittle to ductile, characterized by prolonged crack propagation time and reduced initial opening velocity. The research results can provide basic experimental data reference for the dynamic disaster relief of engineering rock masses in cold regions.

Key words: freeze-thaw cycle; fracture characteristics; three-point bending test; fracture process zone; rock mechanics

自然界岩石的非匀质性主要由其内部存在的裂隙、节理、孔隙等不连续结构引起, 这些地质特征显著影响岩石的工程稳定性^[1-2]。特别是在高原寒区(如青藏高原、天山等)广泛分布的隧道、边坡、坝基等重大工程中, 岩体长期暴露于剧烈的冻融循环(F-T)环境。冻融循环作用下的岩体结构复杂、裂隙发育, 工程施工(如爆破、机械振动)和运营(如交通荷载、地震活动)不可避免地受到动荷载的扰动^[3]。这种动力扰动伴随着岩体卸荷会打破岩石内部原有的地应力平衡, 产生显著的回弹拉应力。该回弹拉应力与动力荷载叠加后, 增加了诱发原有裂纹张开、加速新裂纹形成并驱动其扩展的风险。同时, 冻胀效应也会导致工程岩体开裂变形^[4-5]。这些由冻融-动力耦合作用引发的断裂破坏过程具有极强的隐蔽性和突发性, 对寒区隧道围岩稳定、高陡边坡安全, 以及各类岩体基础工程的长期服役性能构成严重威胁, 是高原寒区工程灾害频发的重要诱因^[6]。因此, 深刻理解和掌握冻融循环作用与动力扰动共同作用下岩石裂纹的起裂与扩展机制, 对于保障寒区重大工程的安全施工、运营维护及灾害精

准防治, 具有极其重要的理论价值和迫切的工程需求^[7]。

目前, 国内外学者针对 F-T 循环作用下岩石力学特性劣化机制已开展了大量的试验研究。刘泉声等^[8]指出岩石冻融损伤的本质是冻胀力作用下的疲劳损伤; 杨更社^[9]、周科平^[10]、宋勇军^[11]及刘慧^[12]等通过 CT 扫描、核磁共振、扫描电镜等检测技术, 对冻融砂岩孔(裂)隙演化进行了定量表征, 研究发现随冻融循环次数的增加, 孔(裂)隙的数量和尺寸也会显著增加; 刘慧等^[12-13]认为, 随冻融次数的增加, 砂岩抗拉强度呈下降趋势, 岩样由脆性破坏转变为延性破坏, 破坏后以贯通性裂纹扩展为主体; 刘帅等^[14]构建了考虑冰楔挤出效应的裂隙冻胀模型, 分析了“三段式”岩质边坡后缘张拉裂隙的冻胀过程, 揭示了锁固段角度与后缘张拉裂隙冻胀开裂和灾变机制的相关性; WANG Z 等^[7]分析了岩石不同 F-T 次数的力学劣化特征, 结合 Lemaitre 等效应变假设推导了冻融-荷载耦合作用下考虑压密阶段的冻融-荷载岩石损伤本构模型; 张慧梅等^[15]通过单轴压缩试验分析了冻融循环岩石的强度、弹性模

量及应力-应变曲线变化规律; 王苗苗等^[16]以裂纹闭合应力为分段点建立了岩石损伤本构模型, 进一步描述了应力-冻融协同作用下青砂岩受荷载变形破坏过程; 孟凡东^[17]通过霍普金森压杆 (SHPB) 测试等技术手段对冻融青砂岩进行冲击压缩来揭示复杂冲击荷载作用下岩石的力学响应机制, 得到了冻融青砂岩动态劈裂抗拉强度与冻融循环次数成负相关。

上述研究通过多种手段对冻融循环作用下完整岩样的力学特性开展了深入的探索。但实际工况条件下的岩体十分复杂, 岩石内部不可避免地赋存有大量的微裂纹, 控制着岩石的力学行为, 因此有必要研究冻融循环作用下含裂隙岩石的破坏行为。刘享华等^[18]发现, 多裂隙加剧了岩体的冻融损伤, 且损伤值大于完整试样; 高维廷等^[19]总结了岩石中动态裂纹扩展的实验测试技术研究, 指出了不同应变率条件下岩石裂纹的起裂、扩展、止裂及动态断裂韧度等的演变规律; 刘成禹等^[20]认为, 温变速率越大, 冻融后岩石受载过程中的微裂纹、宏观裂纹扩展越快; 申艳军等^[21]通过不同倾角单裂隙砂岩的冻融循环试验, 研究了冻融与周期荷载联合作用下裂隙岩体的损伤特征及断裂演化规律; 姜亚成等^[22]基于岩石力学试验通过数值模拟分析了围岩内 I 型裂纹的动态起裂特性, 研究发现岩石的纵波、横波波速与弹性模量随 F-T 次数增加而减小, 泊松比则逐渐增大; 刘德俊等^[23]通过动态巴西圆盘试验发现冻融循环加剧了试样结构损伤和力学性能劣化, 动态抗拉强度随冻融循环次数的增加逐渐降低; YU S 等^[24]发现, 随着 F-T 次数的增加, 峰值应力、断裂韧性和断裂能均呈对数下降的趋势, 且 I 型断裂试样的力学参数小于 II 型断裂试样的力学参数; YU Meilu 等^[3]通过数字图像技术 (DIC) 从断裂过程区的角度分析了 F-T 次数对裂纹扩展的影响。上述研究通过参数变化及试验结果定性分析了冻融循环作用下岩石裂纹的发育机制, 为认识冻融作用下含裂隙岩体力学变形特性奠定了良好的基础。

近年来国内外学者对冻融岩体的力学性质研究主要集中在静态或准静态加载条件下, 而高原寒区工程实践 (如隧道爆破开挖、边坡落石冲击、冻胀压裂、地震作用) 中, 岩体失稳往往与冻融劣化后

的动态冲击荷载密切相关。关于冻融岩体在真实工程常见动态荷载 (如冲击、爆破) 作用下的力学响应, 特别是裂纹动态起裂、扩展速率、路径的研究成果尚显匮乏, 难以满足复杂恶劣环境下工程安全评估与灾害预警的实际需求。尤其是针对西部严寒地区 (如川藏铁路、青藏公路沿线) 隧道工程中普遍存在的冻融-动力耦合致裂问题, 相关研究更是屈指可数。笔者以青砂岩为原材料制备试样, 对其先后开展冻融循环试验和动态冲击试验, 并采用高速相机记录 I 型裂纹的动态起裂过程。分析 I 型裂纹的起裂、发育及扩展过程时, 引入数字图像技术 (DIC) 对冻融循环作用下的裂纹动态发育过程开展研究^[3, 25-26], 从断裂过程区的角度揭示动载作用下寒区裂隙岩体的断裂机制, 为相关工程灾害提供更贴近实际工况的理论依据和试验支撑。

1 试验方案及过程

1.1 试样的制备

试验采用的岩样取自青藏高原玉龙矿区边坡岩体的青砂岩, 呈均匀的青灰色, 天然节理少, 内部孔隙小, 密实性好。为便于在实验室内研究冻融作用对岩石力学性质的影响, 前期对青砂岩进行 XRD 衍射分析, 其主要矿物成分如图 1 所示, 初始物理力学参数见表 1^[4, 27]。为了更适合在 SHPB 系统中进行动态冲击试验, 并能有效模拟裂纹在动载下的起裂与扩展过程, 试验采用半圆盘弯曲 (Semi-Circular Bend Specimen, 简称 SCB) 青砂岩试样, 试样直径 50 mm, 厚度 25 mm, 预制裂缝长度 10 mm, 底部支撑间距 27.5 mm, 符合 ISRM 关于岩石动态断裂韧度测试的试验规范^[28]。SCB 试样的设计可精准模拟寒区岩体中张拉型裂纹的动态扩展过程, 便于通过冲击荷载试验分析冻融循环的影响。

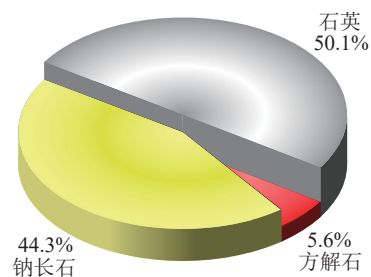


图 1 主要矿物成分及含量

Fig. 1 Main mineral composition and content

表 1 青砂岩的初始物理力学参数

Table 1 Initial physical and mechanical parameters of blue sandstone

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/%	含水饱和度系数	峰值应力/MPa
3 138.08	2.26	2.33	3.76	0.86	77.03

参照 ISRM 规范及冻融试验操作标准^[28-29], 根据青藏高原的实际工况及其他学者对冻融循环试验的参数设置经验, 设计本试验冻融循环参数为: 冻结温度为-20 ℃, 溶解温度为 20 ℃; 一个完整的冻融循环时间为 10 h, 其中, 冻结时间为 5 h, 融化时间为 5 h (图 2)。冻融循环次数 N 分别为 20、40、60、80, 根据冻融循环次数共设计 4 组试验, 每组 2 个试样。

1.2 试验流程

具体试验步骤为:

(1) 将青砂岩岩样放入烘箱内烘干 48 h, 冷却至室温作为干燥岩样并对其编号, 编号为 0-d1-1~0-d4-2, 如图 3(a) 和 (b) 所示。

(2) 根据 SL/T264—2020《水利水电工程岩石试验规程》, 通过真空饱和装置对干燥岩样进行真

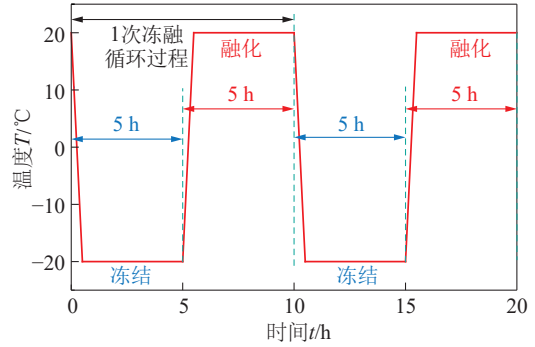


图 2 冻融循环温度曲线

Fig. 2 Temperature curve for freeze-thaw cycle

空饱水处理, 饱水时容器内的水面高出试件上表面, 真空压力表盘度数为 0.3 MPa, 饱水试样抽气时间为 24 h, 岩石试样置于水中进行 30 d 养护, 养护过程中保证水面高出岩石表面 2 cm^[30], 如图 3(c) 所示。

(3) 通过 BPHJ-120C 冻融循环试验箱对岩样进

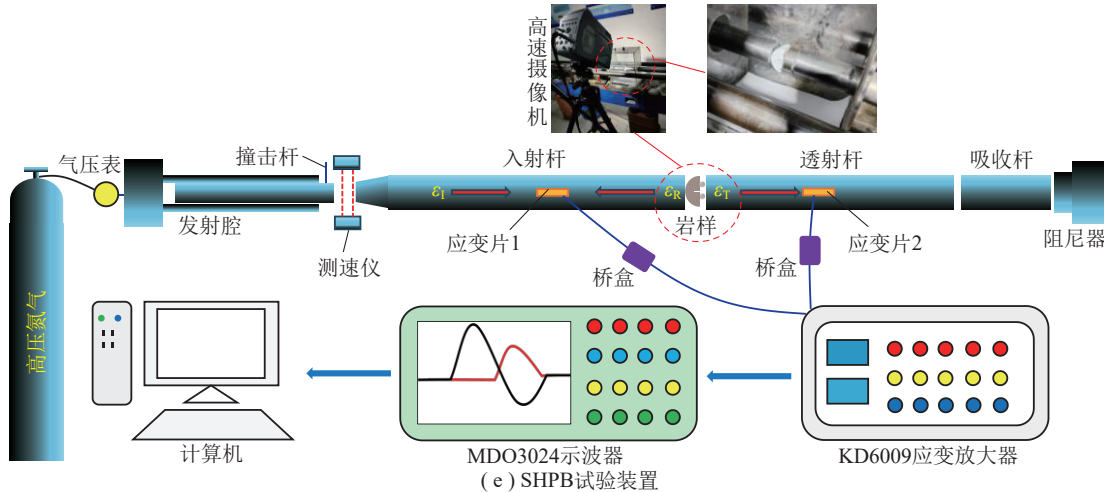
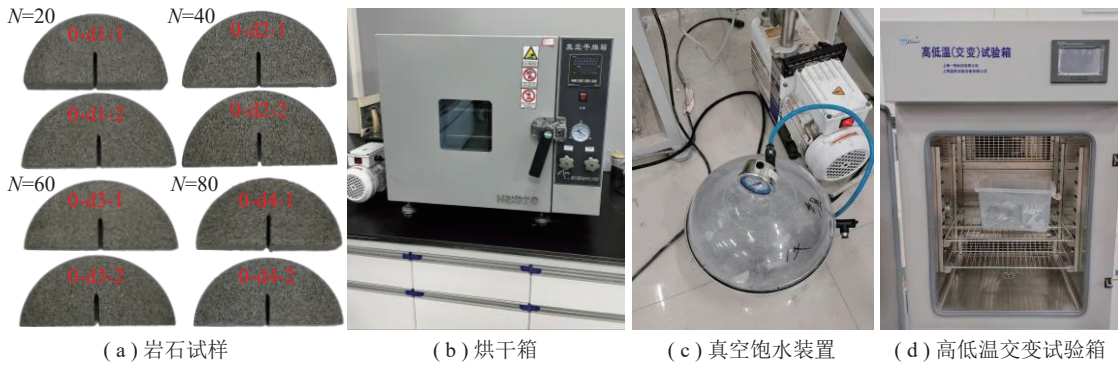


图 3 试验步骤及设备

Fig. 3 Experimental procedures and equipment

行冻融循环处理 (图 3(d)), 冻融循环温度变化曲线如图 2 所示。

(4) 试验加载装置为安徽理工大学直径 50 mm 的 SHPB 系统, 试验设置冲击气压为 0.3 MPa, 装置结构如图 3(e) 所示。

为保证试验数据的有效性, 需对每一次冲击数据进行动态平衡力的检测, 并满足应力波基本假定, 使力学参数更加符合理论情况。由试验数据得到冻融循环下的动态应力平衡曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 在加载过程中, 入射波与反射波叠加曲

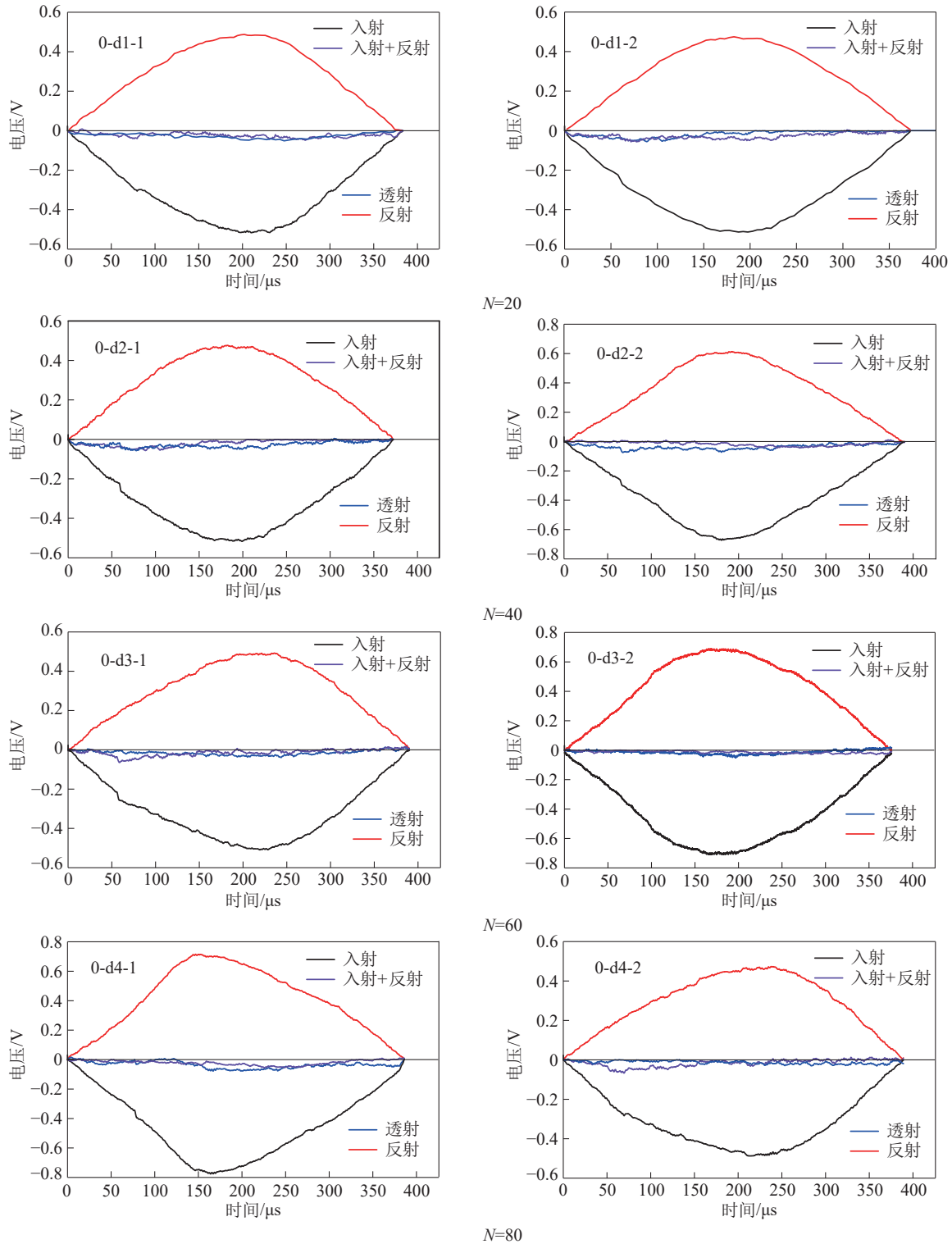


图 4 青砂岩试样 SHPB 动态平衡测试

Fig. 4 Dynamic balance test of SHPB for sandstone samples

线基本重合于透射波曲线, 这表明试样是满足应力平衡状态的, 试验所得数据有效可靠。为了保证试验过程中试样的加载率相同, 每次冲击后, 通过入射波和反射波计算加载率, 要求同一组试验中加载率波动 $\leq 3\%$, 否则重新调整气压或更换试样。

图 5 为动态冲击试验后的情况, 部分试样表现为“川”字形的裂纹分布, 这主要是预制裂缝贯通后所产生的二次损伤。试验预制裂缝贯通后, 入射杆仍在继续施加压力, 从而迫使试样在顶端处发生二次断裂, 由此导致试样出现裂纹传播—局部破坏—再传播—再破坏的现象。

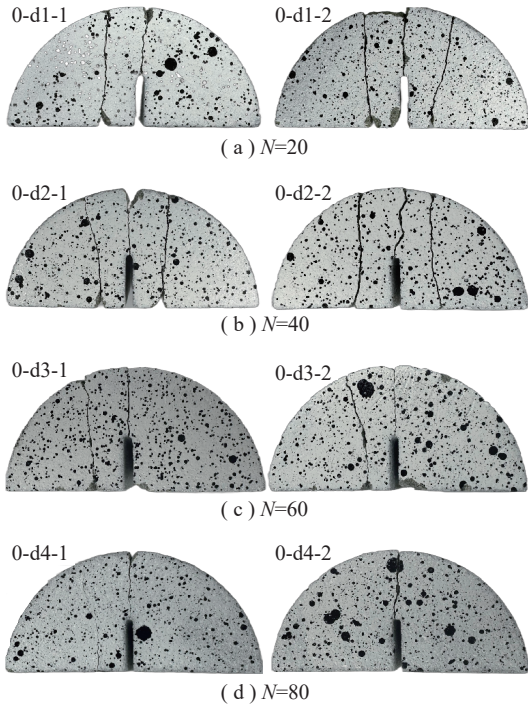


图 5 试验后的试样
Fig. 5 Sample after the experiment

2 I型裂纹动态起裂规律分析

冻融循环会弱化岩石的力学性质, 为直观体现弱化规律, 对一些关键指标进行分析, 主要包括: 峰值荷载 (P_{max})、I型断裂韧度 ($K_{I,d}$)、动态抗拉强度 (σ_d)、裂纹扩展速度、裂纹张开宽度、起裂时间以及断裂过程区 (FPZ), 核心目的是系统量化冻融循环对岩石动态断裂全过程关键力学参数与破坏特征的弱化规律。

2.1 断裂韧度劣化分析

从电压曲线转换到荷载—位移曲线需要结合材料的物理特性和试验设置, 可根据方程 (1)~(2) 进行

计算^[31-32]。其中电压转为力, 试验中使用了力传感器, 可以根据传感器的标定曲线, 将测量得到的电压值 V 转换为力 F 。

$$F = k(V - V_0) \quad (1)$$

式中, k 为传感器的灵敏度或标定系数; V_0 为零力时的基准电压。

基于位移传感器得到的试样长度变化 ΔL 及试样初始长度 L_0 , 即可得到应变值 ε 。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

式中, $\Delta L = CV_w$, 其中, C 为位移传感器的标定系数; V_w 为位移传感器输出的电压信号。

试验得到的位移—荷载曲线如图 6(a) 所示; 将峰值荷载进行统计并绘制成折线图, 如图 6(b) 所示。由图 6 可知, 随着 F-T 次数的增加, 峰值荷载逐渐减小。在位移—荷载曲线初始阶段, 在相同位移值的情况下, F-T 次数越多荷载越小, 即斜率越小。由此可见, 冻融循环劣化了岩石的力学性能。多次融化过程使得岩石内部的胶结物质被析出, 岩石内部形成了大量的裂(孔)隙。反复的冻结过程对原生裂(孔)隙产生了损伤, 进一步劣化了岩石的力学性

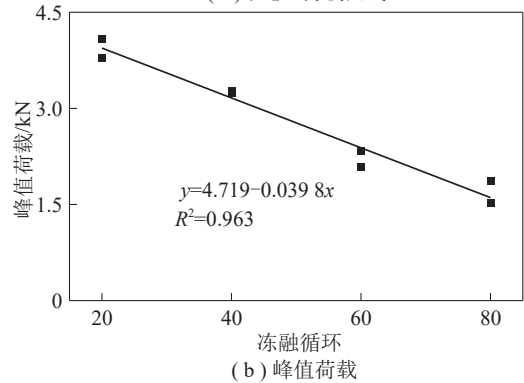
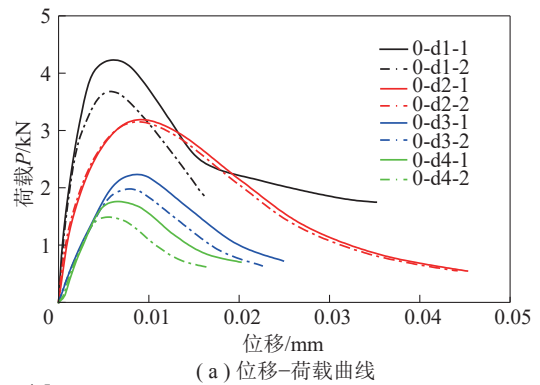


图 6 不同 F-T 循环下位移、峰值荷载曲线
Fig. 6 Displacement and peak stress curves under different F-T cycles

能, 最终导致峰值荷载线性下降。由于裂(孔)隙的增多和发育, 在动载加载的瞬间, 预制裂缝尖端扩展迅速。因而在加载初期出现随 F-T 次数增加而斜率降低的现象。

根据 ISRM 的建议, SCB 试样 I 型断裂韧度 K_{Id} 计算公式^[28, 33] 为

$$K_{Id} = \frac{Y' P_{max} S}{BR^{3/2}} \quad (3)$$

$$Y' = 0.444 4 + 4.219 8\alpha_a - 9.110 1\alpha_a^2 + 16.952\alpha_a^3 \quad (4)$$

式中, K_{Id} 为断裂韧度, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; P_{max} 为峰值荷载, kN; a 为预制裂缝长度, 为 10 mm; R 为 SCB 试样半径, 为 25 mm; B 为 SCB 试样厚度, 为 25 mm; Y' 为应力强度因子; S 为试样底部支撑间距, 为 27.5 mm; α_a 为量纲一的切槽深度, $\alpha_a = a/2R = 0.2$ 。

抗拉强度是衡量岩石材料抵抗拉伸载荷而不发生破坏的一个重要力学性能指标。岩石抗拉强度可由方程 (5)~(7) 进行计算。

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$W = \frac{1}{2} E A c_0 \int_0^t (\varepsilon_1^2 - \varepsilon_R^2 - \varepsilon_T^2) dt \quad (6)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\Pi E W}{2 A c_0 \int_0^t (\varepsilon_1^2 - \varepsilon_R^2 - \varepsilon_T^2) dt}} \quad (7)$$

式中, σ_d 为砂岩的动态抗拉强度, MPa; W 为试样吸收的能量, J; E 为杆材料的弹性模量, GPa; c_0 为应力波在杆中的传播速度, m/s; ρ 为青砂岩的材料密度, g/cm^3 ; ε_1 为入射波应变; ε_R 为反射波应变; ε_T 为透射波应变; t 为时间, ms; A 为杆的横截面积, cm^2 。

将得到的断裂韧度和抗拉强度统计, 见表 2。为了直观反映冻融循环对力学性能的影响, 将表 2 中的数据绘制曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 断裂韧度和抗拉强度均随 F-T 次数的增加而减小, 其中, 动态抗拉强度呈线性下降, 拟合函数为 $y = 0.830 54 - 0.006 85x$, 拟合系数 $R^2 = 0.964$, 拟合可靠性较高, 平均每增加 20 次冻融循环, 抗拉强度下降约 1.5~1.6 MPa, 衰减速率稳定。断裂韧度呈非线性下降的趋势, 拟合函数为 $y = 6.742 82x^{-0.541 71}$, 拟合系数 $R^2 = 0.912$, 拟合可靠性较高, 表明衰减速率随冻融次数增加而加快, 呈现损伤累积加速效应。由于微裂纹作为应力集中源, 降低了试样整体承载能力, 使抗拉强度随裂纹扩展而

线性下降。随着冻融循环增加导致微裂纹增多使裂纹扩展阻力降低, 致使断裂韧度显著下降。以 $N=20$ 的试验结果为基础进行分析, 当 $N=40$ 时, 断裂韧度的下降幅度为 17.23%; 当 $N=60$ 时, 断裂韧度的下降幅度为 43.85%; 当 $N=80$ 时, 断裂韧度的下降幅度为 56.95%。由此可见, 冻融循环作用对岩石力学性能的劣化作用极为明显, 尤其是在 $N=60$ 时, 下降趋势最为显著。

表 2 断裂韧度与抗拉强度统计结果

Table 2 Statistics of fracture toughness and tensile strength

试样编号	$K_{Id}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	σ_d/MPa
0-d1-1	1.283	0.719 5
0-d1-2	1.188	0.666 3
均值	1.236	0.692 9
0-d2-1	1.029	0.576 9
0-d2-2	1.017	0.569 9
均值	1.023	0.573 4
0-d3-1	0.733	0.410 3
0-d3-2	0.655	0.366 6
均值	0.694	0.388 5
0-d4-1	0.584	0.327 2
0-d4-2	0.480	0.269 1
均值	0.532	0.298 2

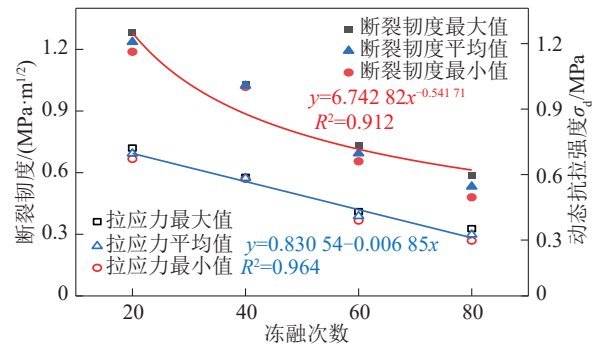


图 7 不同冻融循环下的断裂韧度和抗拉强度

Fig. 7 Peak force and fracture toughness under different freeze-thaw cycles

2.2 裂纹动态扩展特征分析

通过高速摄像机对试样预制裂纹扩展及破坏过程进行记录, 每组试样选取 1 个进行分析, 裂纹动态扩展过程如图 8 所示。为了进一步对试样裂纹扩展情况进行定量描述, 利用 Ncorr 图像分析软件对裂纹扩展过程的完整路径进行提取, 然后对裂纹张开宽度与速度进行分析计算, 提取的裂纹扩展

过程如图 9 所示。分析图 8 和图 9 可知, 当时间为 0 ms 时, 4 组试件均处于未断裂状态; 37 ms 时, 4 组预制裂缝均发生断裂, 74 ms 时, $N=20$ 试件裂纹已完全贯通 (图 8(a) 和图 9(a)), 其余 3 组试样未完全贯通; 111 ms 时, $N=40$ (图 8(b) 和图 9(b)) 试件裂纹贯通; 148 ms 时, $N=60$ (图 8(c) 和图 9(c)) 试件裂纹贯通; 259 ms 时, $N=80$ (图 8(d) 和图 9(d)) 试件裂纹贯通。由此可见, 首先观察到裂纹完全贯通的是 $N=20$ 的试样, 其次是 $N=40$, 然后是 $N=60$, 最后是

$N=80$, 裂纹贯通的顺序与 F-T 次数具有显著的相关性, 即 F-T 次数越多, 裂纹贯通的越慢。试件裂缝起裂位置均在尖端处, 随着动载作用时间的增加, 裂缝尖端向前扩展, 但由于冻融循环的作用, 不同冻融次数的裂纹扩展程度表现出显著的差异性。随着 F-T 次数的增加, 裂纹扩展所需要的时间越长, 说明随着 F-T 次数的增加试样的延性也随之增加。F-T 次数较少时, 试样的原有结构相对完整, 其内部微裂纹较少, 此时, 试样主要表现为脆性, 受到外力

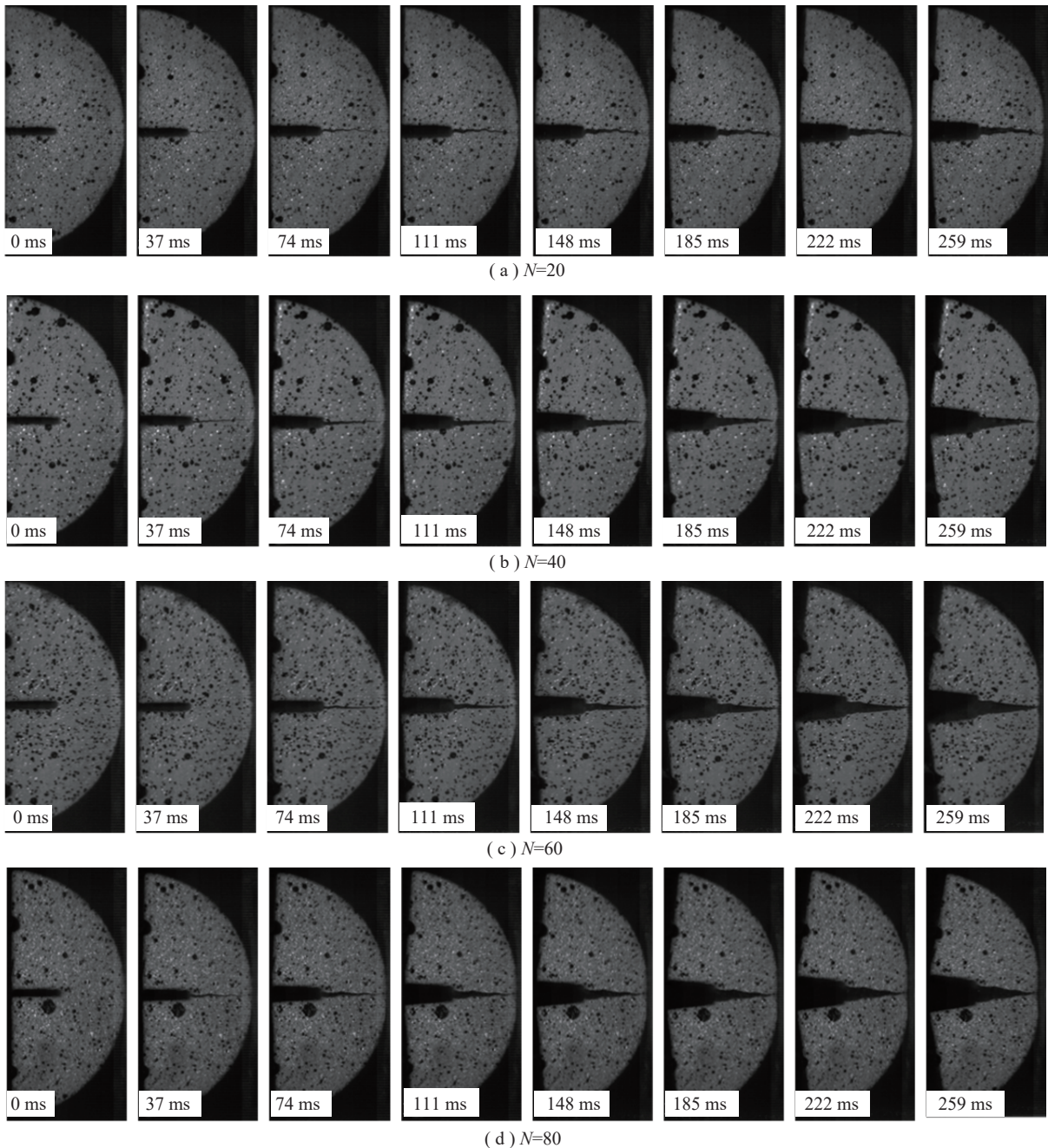


图 8 试样裂纹形态

Fig. 8 Sample crack morphology

作用时, 裂纹会迅速扩展, 几乎无明显的塑性变形。这是因为试样的矿物晶体结构和胶结物限制了位错运动等塑性变形机制。但是随着 F-T 次数的增加, 试样内部的微裂纹逐渐增多并且相互连接。此时, 试样在受力时, 裂纹尖端的应力集中会因为微裂纹的存在而得到部分缓解。同时, 试样内部的一

些矿物颗粒也可能会在应力作用下发生微小的位移和转动, 这类类似于塑性变形的起始。当 F-T 次数足够多时, 裂(孔)隙中的胶结物质被完全析出后, 裂(孔)隙在冰的冻胀作用下进一步被损伤, 试样结构将会变得非常松散, 矿物颗粒之间的联系被严重削弱。

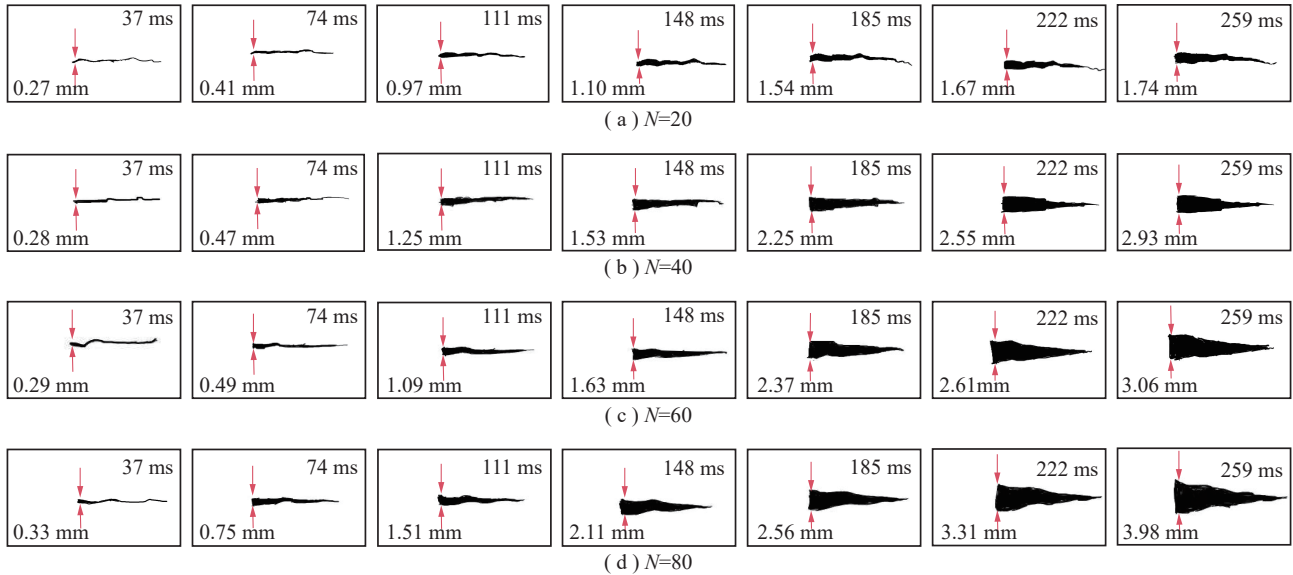


图9 冲击荷载作用下试件裂纹萌生及发育过程

Fig. 9 Crack initiation and development process under impact load

根据图9得到的瞬时裂纹张开宽度, 结合断裂时间计算得到裂缝张开速度, 如图10所示。由图10可知, 试样裂纹的张开宽度随着时间增加而增加, 在同一时间内, 裂纹张开的宽度随着冻融次数的增加而增加; 当试样张开宽度相同时, 冻融循环的增加导致裂纹扩展所消耗的时间减少(图10(a))。在111 ms时, 裂纹的瞬时张开速度达到了峰值, 处于高速区。随着时间的增加, 在222 ms时, 试样裂纹的瞬时张开速度相对于峰值速度明显下降。此后裂纹的张开速度较为平缓, 并且裂纹的瞬时张开速度处于低速区(图10(b))。基于图9和图10得到的统计数据, 可以进一步计算得到冻融循环次数为20、40、60和80时试样裂纹张开平均速度分别为3.514 9、3.753 4、3.124 4、1.404 1 mm/ms, 整体上来看, 随F-T次数的增加, 裂纹平均张开速度呈先上升后下降的趋势。由图10(b)可以看出, 在111 ms之前, 时间相同时, F-T次数的增加导致裂纹张开速度显著降低; 在111 ms之后, 裂纹张开速度与F-T次数相关性不大。由此可知, 在裂缝尖端发育初期

的张开规律受制于冻融循环的次数, 这说明, 冻融循环作用对裂缝尖端处的影响更为明显。

2.3 断裂过程区演化规律分析

断裂过程区(Fracture Process Zone, FPZ)是裂纹前端元胞群体进入到开裂状态(Decohesive State)的区域, 是准脆性材料发生非线性断裂的关键原因, 深入研究裂纹尖端断裂过程区对合理预测及评估结构响应具有重要意义。笔者引入LIANG Weiguo^[26]、YU Meilu^[3-4, 34]等提出的计算方法来分析断裂过程区的演化规律。首先, 将FPZ假想为1条虚拟裂纹, 以虚拟裂纹的形变及软化来描述断裂过程区的孕育过程, 并以临界张开位移判定断裂过程区的最大孕育程度, 如图11(a)所示。然后, 基于某一时刻的水平应变云图建立坐标系, 如图11(b)所示, 图中设置了6条水平测线(a_1 ~ a_6)和2条竖直测线(b_1 , b_2)。水平测线坐标分别为 $y_1=10.5$ mm (a_1)、 $y_2=11.6$ mm (a_2)、 $y_3=12.7$ mm (a_3)、 $y_4=13.8$ mm (a_4)、 $y_5=14.9$ mm (a_5)、 $y_6=16.0$ mm (a_6); 竖直测线坐标分别为 $x_1=-1.5$ mm (b_1)、 $x_2=1.5$ mm (b_2)。通过设

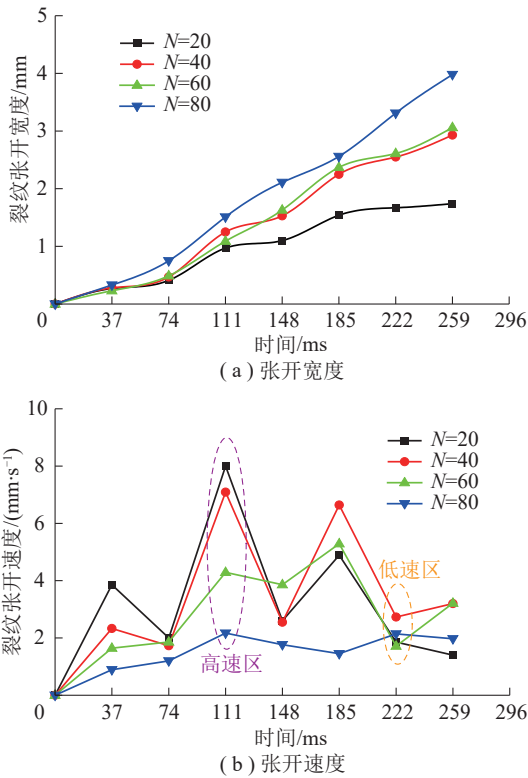


图 10 冻融试件裂纹张开宽度及张开速度

Fig. 10 Crack opening width and opening speed of freeze-thaw specimens

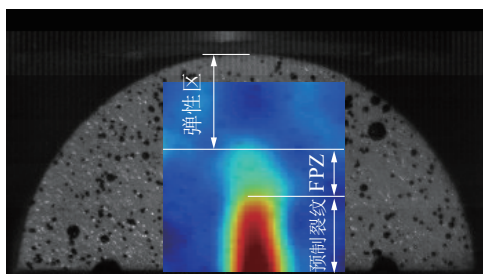
置水平测线的方式可采集试样在某时刻的应变特

征, 如图 11(c) 和 (d) 所示。

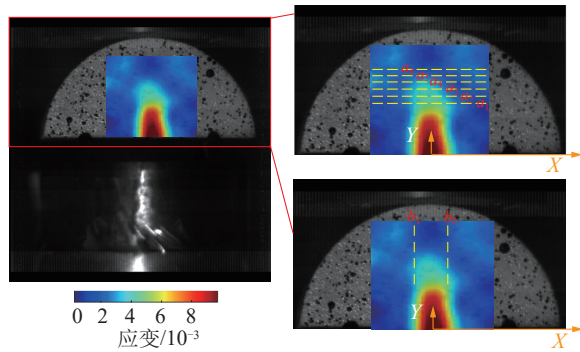
由图 11(c) 可知, 水平测线存在 2 个明显的跳跃点 S 和 F 。越靠近预制裂缝尖端附近, 水平测线跳跃越明显, 尤其是测线 a_3 、 a_4 和 a_5 。测线 a_1 基本无明显跳跃, 这表明该测线所在的位置可能处于试样的弹性区域。由此可见, 断裂过程区长度可能在区间 $[10.5 \text{ mm}, 16.0 \text{ mm}]$ 内, 且极有可能在区间 $[11.6 \text{ mm}, 16.0 \text{ mm}]$ 内。

通过预制裂缝尖端附近的竖直测线监测位移应变特征, 可进一步确定断裂过程区的长度, 由图 11(d) 可知, 测线 b_1 和 b_2 均有 1 个显著的跳跃点, 分别为 C 点和 D 点, 跳跃点处位移应变的斜率变化较大, C 点和 D 点之后, 2 条测线的位移应变逐渐靠近并重合于 E 点, 裂纹发育中止。结合图 11(c) 和 (d) 的测量线结果可知, 选取曲线峰值对应的 Y 轴较小值 C 点 ($y=14.2 \text{ mm}$) 再减去 FPZ 长度可能的区间最小值 ($y=11.6 \text{ mm}$), 得到 FPZ 长度为 2.6 mm 。同时这也表明, 断裂过程区是从预制裂缝尖端开始逐渐向加载端扩展的。FPZ 尖端形状为圆弧形。

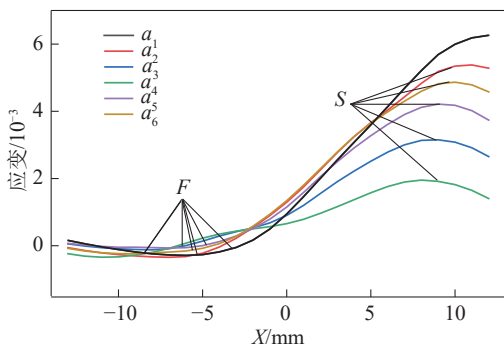
上述仅仅分析了试样在某时刻的 FPZ 大小。然而, 许多研究表明, 断裂过程区长度与试样所受



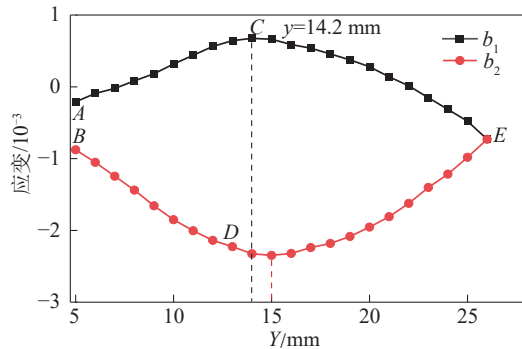
(a) 断裂过程区



(b) 坐标系和检测线位置



(c) 水平测线的应变特性



(d) 垂直测线的应变特性

图 11 FPZ 长度的计算方法示意

Fig. 11 The schematic diagram of the calculation method of the FPZ length

载荷密切相关,且断裂过程区的孕育过程一般在试样峰值荷载附近,同时受尺寸效应显著^[35]。由于研究所用的试样尺寸较小,因此统一研究峰值荷载前 25 ms 内的 FPZ 发育规律。每隔 5 ms 取 1 张图进行计算,每个试样取 5 张图,通过 Matlab 中 Ncorr 开源软件进行二维 DIC 分析试件断裂前的应变云图。图 12 显示了不同冻融循环次数下断裂前的应变云图,基于上述方法可进一步计算其他情况下的断裂过程区长度。由图 12 可知,应变云图很好地反映了预制裂缝尖端断裂过程区的孕育过程。然而,断裂过程区并非一直存在的,而是在荷载达到某个临界值时才出现。随着荷载的增加,预制裂缝

前端区域内的微裂隙开始萌生、集聚,进而产生断裂过程区。当断裂发生后,断裂过程区便消失。随着荷载的增加,FPZ 的长度呈先增加后减小的趋势,即表现为“扩展—收缩”2 个阶段的规律。这可能是因为当裂缝尖端出现应力集中现象时,预制裂缝尖端成为高应变区,因此会出现断裂过程区增加的趋势。然而,随着荷载的持续增加,试样内部的断裂开始出现并不断扩展,从而引起断裂过程区的长度逐渐减小。

以图 12(c) 为例进行说明。由图 12(c) 可知,FPZ 的长度以峰值荷载前 15 ms 为分界点。在 15 ms 之前,FPZ 长度随荷载增加而增加;在 15 ms 时达到最

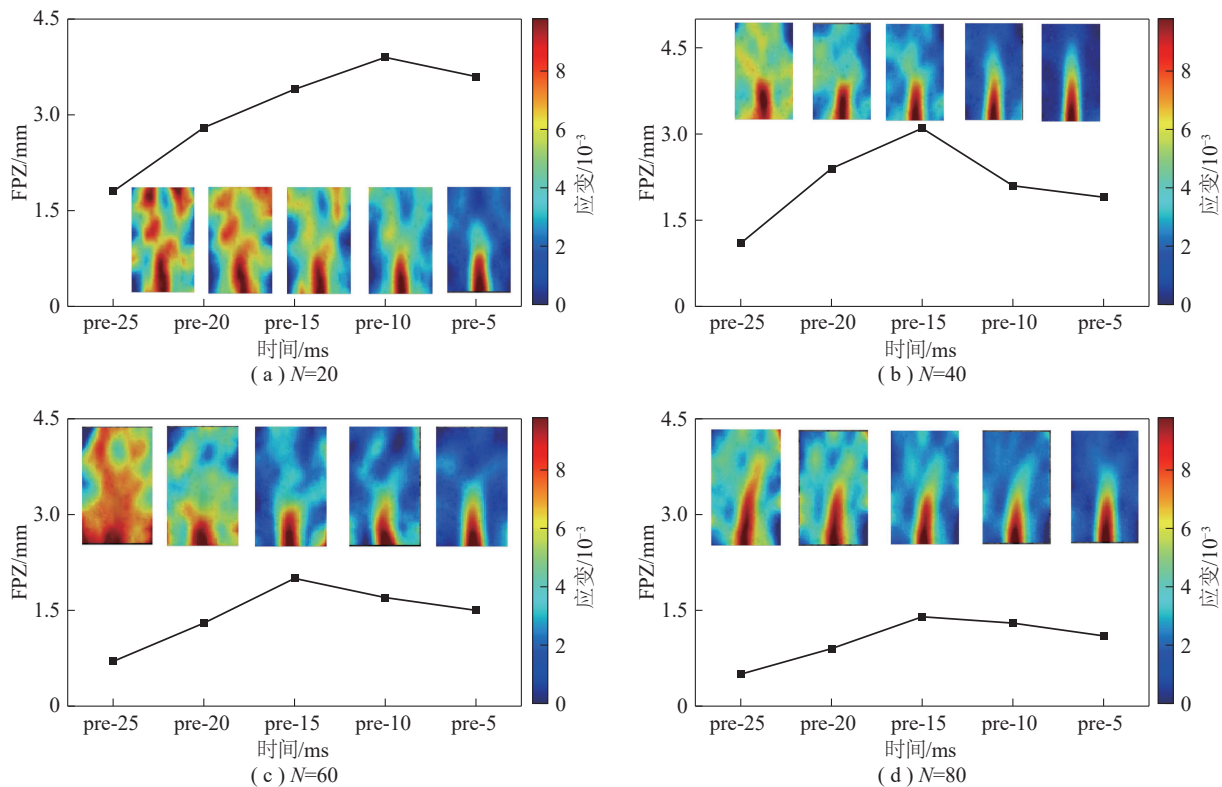


图 12 峰值荷载前 25 ms 内的 FPZ 发育规律

Fig. 12 The development pattern of FPZ within 25 ms before the peak load

大值 (2 mm); 在 15 ms 之后, 预制裂缝尖端区域内部出现裂纹, FPZ 长度随荷载增加而减小。另外, 随着冻融次数的增加, FPZ 最大值出现的时间呈越来越早的趋势。这有可能是, 随着冻融循环次数的增加, 试样内部裂隙数量也随之增加, 载荷作用下预制裂缝尖端更容易发生破坏而引起, 该现象与之前的研究有相似之处^[3]。

将图 12 中不同冻融循环次数下的最大 FPZ 长度进行统计并绘制成图, 如图 13 所示。由图 13 可

知, 随着冻融循环次数的增加, 试样的断裂过程区最大长度呈下降趋势, 冻融 40 次和 60 次的试样断裂过程区最大长度的下降幅度较大。冻融次数由 20 次增加至 40 次时, 断裂过程区最大长度由 3.9 mm 下降至 3.1 mm, 下降幅度为 20.51%; 冻融次数由 40 次增加至 60 次时, 断裂过程区最大长度由 3.1 mm 下降至 2.0 mm, 下降幅度为 35.48%; 冻融次数由 60 次增加至 80 次时, 断裂过程区最大长度由 2.0 mm 下降至 1.4 mm, 下降幅度为 30.00%。

将不同冻融循环次数下的最大 FPZ 长度的统计值进行线性拟合, 拟合曲线为 $y=4.2e^{-0.015N}$, 拟合系数 $R^2=0.97$, 拟合可靠性较高, 表明最大 FPZ 长度随冻融循环次数的增加呈指数衰减, 每增加 20 次冻融, FPZ 最大长度平均减少 0.8~1.0 mm。究其原因, 在冻融循环作用下, 冻胀力造成矿物颗粒的膨胀和收缩, 导致预制裂缝尖端处的微裂纹或裂(孔)隙形成并逐渐贯通, 故试样在受到加载前就出现了不同程度的损伤。随着冻融循环次数的增加, 微裂纹及裂(孔)隙的数量也随之增加, 试样预制裂缝尖端处的损伤加剧, 抵抗变形的能力降低, 由此而引发断裂过程区的长度逐渐减小。

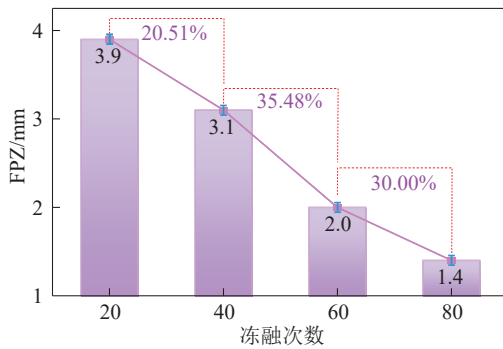


图 13 不同冻融循环下的 FPZ 最大值

Fig. 13 The maximum value of FPZ under different freeze-thaw cycles

综上所述, 可将岩石在冻融循环作用下的损伤过程分为饱水、冻结和融化 3 个阶段。饱水阶段会使水充满青砂岩内部的裂隙, 造成岩石内部胶结物的水解或软化, 这将导致矿物颗粒间的黏结性能降低。冻结过程中, 冰的冻胀作用会诱发微裂纹和裂(孔)隙闭合或扩张, 进而引发岩石损伤, 弱化其力学性能。在解冻阶段, 微裂纹和裂(孔)隙中的冰融化而流失, 并带走岩石内部的部分胶结物, 进一步弱化岩石的力学性能。细观上的损伤随着 F-T 次数的增加在宏观上表现为岩石力学性能的逐渐下降。由此可见, 冻融作用显著影响了岩石抵抗裂纹扩展能力, F-T 次数越多, 裂纹张开宽度相对越大, 而初期张开速度相对较小。在试样张开相同宽度的条件下, 冻融循环次数的增加导致裂纹扩展所消耗的时间减少。

3 讨论

许多学者针对 FPZ 的发展和定位进行了广泛

的研究^[36-38], 不仅在试验方法上, 更在理论上取得了突破。笔者主要通过 DIC 对 FPZ 的动态发育过程进行了分析, 但取值方法仍存在一定的主观因素。因此, 考虑通过理论计算来验证试验分析结果的可靠性。

目前, 广义 Dugdale 模型 (Generalized Dugdale model, 简称 GDM, 又称内聚裂纹模型) 是著名的虚拟或内聚裂纹方法, 也是被广泛采用的模型之一。根据 Dugdale 模型, 当 FPZ 中裂纹闭合应力恒定时, FPZ 的尺寸在破坏前保持不变。而在 Barenblatt 模型中, FPZ 的尺寸被认为小于诱导宏观裂纹的长度^[36-37]。同时, 许多研究表明, FPZ 区域中的微裂纹逐步扩展, 最终贯通形成可见裂纹。大量的试验和数值计算结果显示, 冻融循环后的青砂岩等非均质材料中原始裂纹是形成 FPZ 的原因, 新的应力诱导裂纹随后在 FPZ 内发展, 形成宏观裂纹, 最终导致材料破坏^[38-44]。

基于上述研究进展可知, 试样内部产生的局部应力和原始微裂纹导致了裂纹尖端前的闭合力向张开力的转变。当最大主应力 σ_1 等于最大拉应力 σ_d 时, FPZ 的半径尺寸计算公式^[45]为

$$r_{FPZ}(\theta) \Big|_{\theta \neq 0} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Id}}{\sigma_d} \right)^2 \cos^2 \left(1 + \left| \sin \theta \frac{\pi}{2} \right| \right)^2 \quad (8)$$

式中, r_{FPZ} 为 FPZ 的半径; r_θ 为塑性断裂过程区的半径; θ 为切槽裂纹倾角。

最大 FPZ 长度的计算公式为

$$\begin{aligned} \text{Max}(r_{FPZ})(\theta) = & \\ & \frac{\left[2\cos\left(\frac{1}{2}\theta\right)\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) + 3\cos\left(\frac{1}{2}\theta\right)^2 - 2\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) - 2 \right] \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right) K_{Id}^2}{2\sigma_d^2} \quad (9) \end{aligned}$$

根据式 (8) 和 (9) 可得到理论上的断裂过程区长度, 计算结果见表 3。为了更直观地反映冻融循环后 FPZ 的长度, 将 FPZ 的试验值和理论值绘制成折线图, 如图 14 所示。同时, 将理论值与试验值进行比较, 并取绝对值与理论值作比得到误差 (表 3), 试验值与理论值的最大误差为 7.99%, 在可接受范围之内, 因此, 试验结果可用于进一步分析。

由图 14 和表 3 可知, FPZ 理论最大值均略小于试验最大值, 这是由于许多标准并未考虑 FPZ 之外的应力再分布, 所以青砂岩中 FPZ 的实际范围应该更大。宏观裂纹是由裂纹尖端后面的无牵引长

表 3 FPZ 理论值与试验值比较
Table 3 FPZ theoretical and experimental values comparison

冻融循环次数	理论值/mm	试验值/mm	误差/%
20	3.769 7	3.9	3.46
40	2.870 6	3.1	7.99
60	1.869 4	2.0	6.99
80	1.319 2	1.4	6.12

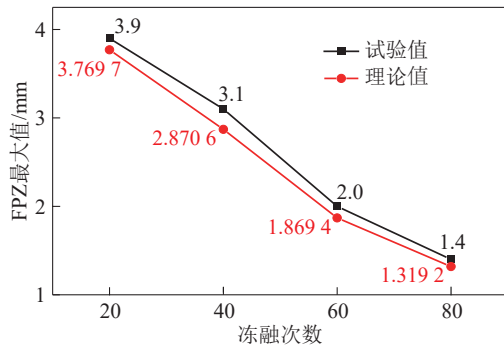


图 14 不同冻融循环下 FPZ 最大值的比较

Fig. 14 Comparison of FPZ maximums under different freeze-thaw cycles

度加上 FPZ 组成, 该区域的闭合力代表了尚未断裂或接触的阻力, 并且与裂纹张开力有关。因此, 未断裂的微裂纹在裂纹尖端后方很常见, 这表明裂纹必须进一步张开才能克服这些闭合力。从物理角度讲, FPZ 区域可能是颗粒间局部应力的变化以及原本存在的微裂纹造成的, 所以区分这两个区域存在较大的困难^[46]。

此外, 在不同的冻融循环次数下, 冻融损伤对 FPZ 细观结构的影响也有所不同。低次数冻融循环主要通过诱导岩石内部孔隙促使裂隙发育, 由于青砂岩原生孔隙较少且分布离散, 冻融循环造成的冻融损伤轻微, 在冲击荷载作用下, 预制裂缝尖端的应力集中仅能激活有限的原生微裂纹, FPZ 扩展的微裂纹主要集中在裂缝前端狭小区域, 形成狭长的高应变带(图 11(c) 中测线 $a_3 \sim a_5$ 的显著跳跃)。高次数冻融循环使岩石内部形成连通孔隙网络, 这些孔隙成为微裂纹萌生源, 在冲击荷载下, 微裂纹从多个孔隙同时起裂并相互串联, 致使青砂岩的破坏模式发生改变, 由脆性破坏转化为延性破坏, FPZ 的最大长度缩短至 2.0 mm($N=60$) 和 1.4 mm($N=80$)。

4 结论

基于青藏高原青砂岩的季节性变化规律, 采用

20℃~20℃ 的冻融区间对岩样进行了不同冻融循环次数的预处理。通过 SHPB 进行了冲击三点弯曲试验, 采用高速摄像机记录预制裂缝的动态发育过程, 基于 Ncorr 图像分析软件对不同 F-T 次数下的断裂过程区演化规律开展分析。主要结论如下:

(1) 冻融循环造成青砂岩内部损伤, 致使原生微裂纹和裂(孔)隙进一步发育和扩展, 在力学参数上表现为断裂韧度、峰值荷载、抗拉强度与 F-T 次数呈负相关。冻融循环显著劣化青砂岩动态力学性能, 当冻融循环次数由 20 次增加至 80 次时, 试样的断裂韧度降幅达 56.95%, 断裂韧度呈非线性衰减; 试样的动态抗拉强度呈线性下降, 当冻融循环次数由 20 次增加至 80 次时, 平均每增加 20 次冻融循环, 抗拉强度下降约 1.5~1.6 MPa, 衰减速率稳定。

(2) 冻融循环对预制裂缝动态扩展的影响具有显著的时间依赖性, 反复的冻融增强了岩石吸收能量的能力, 促使岩样破坏模式发生根本性转变(由脆性转变为延性), 进而导致裂缝贯通时间延长, 初始张开速度减小。

(3) 随着荷载增加, FPZ 范围逐渐扩展。当主裂纹快速贯通后, FPZ 范围因能量释放而收缩直至消失。FPZ 从裂缝尖端向加载端延伸, 呈现圆弧状形, 其演化规律可分为“扩展—收缩”2 个阶段。

(4) 基于研究结果, 拟根据冻融损伤程度将寒区边坡岩体分为低冻融区和高冻融区, 并通过限制爆破单段药量以控制地震波峰值加速度, 进而实现定量控制裂纹起裂速度、避免裂纹瞬间贯通。结合现场分布式光纤监测, 进一步定量表征裂纹初始张开速度, 寻求冻融损伤预警阈值。

参考文献 (References):

- [1] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471-476.
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research of damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471-476.
- [2] 谢和平, 张茹, 任利, 等. 川藏铁路深埋隧道围岩灾变分析与思考[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 1-20.
XIE Heping, ZHANG Ru, REN Li, et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels along Sichuan-Tibet railway[J]. Advanced

- Engineering Sciences, 2022, 54(2): 1–20.
- [3] YU Meilu, WANG Zhongwen, MA Ding, et al. Fracture characteristics and process zone evolution in sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Research in Cold and Arid Regions, 2025, 17(4): 217–228.
- [4] WANG Zhongwen, YU Meilu, WANG Luyu, et al. Study on the evolution and formation mechanism of hysteretic deformation in frozen-thawed rock under cyclic loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2026, 143: 105527.
- [5] YU M, WANG Z, XU Y, et al. Study on mechanical properties and energy evolution characteristics of excavation unloading rock under freeze-thaw temperature range[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 325: 111293.
- [6] 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.
- [7] WANG Z, YU M, WANG L, et al. Strength degradation characteristics and damage constitutive model of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 22674.
- [8] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 岩体冻融疲劳损伤模型与评价指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1116–1127.
LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Fatigue damage model and evaluation index for rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1116–1127.
- [9] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻融条件下岩石损伤扩展特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 838–842.
YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibing. A study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 838–842.
- [10] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 731–737.
ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 731–737.
- [11] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 825–831.
SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Study on damage characteristics of weak cementation sandstone under drying-wetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 825–831.
- [12] 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): 1136–1149.
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): 1136–1149.
- [13] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 830–839.
LIU Hui, LIN Jianghao, YANG Gengshe, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 830–839.
- [14] 刘帅, 杨更社, 潘振兴. 冻融环境下“三段式”岩质边坡锁固段损伤破坏及灾变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2781–2795.
LIU Shuai, YANG Gengshe, PAN Zhenxing. Study on damage and catastrophic mechanisms of the locked section of a "three-stage" rock slope in a freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2781–2795.
- [15] 张慧梅, 杨更社. 冻融环境下红砂岩力学特性试验及损伤分析[J]. 力学与实践, 2013, 35(3): 57–61.
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Mechanical property experiment and damage analysis of red sandstone under freeze-thaw environment[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(3): 57–61.
- [16] 王苗苗, 任玉波, 韩静, 等. 应力-冻融协同作用后砂岩力学特性与损伤模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(4): 1148–1161.
WANG Miaomiao, REN Yubo, HAN Jing, et al. Mechanical properties and damage model of sandstone after the synergistic action of stress and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025, 33(4): 1148–1161.
- [17] 孟凡东. 砂岩冻融损伤劣化机制及冲击荷载作用下的力学响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2860.
MENG Fandong. Study on freeze-thaw damage degradation mechanism of sandstone and its mechanical response characteristics under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2860.
- [18] 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.
- [19] 高维廷, 朱哲明, 朱伟, 等. 动荷载下岩石裂纹动态扩展行为实验研究综述[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 3–29.
GAO Weiting, ZHU Zheming, ZHU Wei, et al. Experimental studies on crack propagation behaviors of rock materials under dynamic loads: a review[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 43(8): 3–29.
- [20] 刘成禹, 郑道哲, 张向向, 等. 冻融温变速率对岩石受载特性的影响规律[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2071–2082, 2175.
LIU Chenyu, ZHENG Daozhe, ZHANG Xiangxiang, et al. Influence of freeze-thaw temperature change rate on mechanics feature of rock during loading process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2071–2082, 2175.
- [21] 申艳军, 杨更社, 王铭, 等. 冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 709–717.
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ming, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 709–717.
- [22] 姜亚成, 周磊, 朱哲明, 等. 冻融循环对含纯 I 型裂隙围岩的动态起裂特性影响规律[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 118–128.
JIANG Yachen, ZHOU Lei, ZHU Zheming, et al. Effects of freeze-thaw cycles on dynamic fracture initiation characteristics of surrounding rock with pure I type fracture under impact loads[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 118–128.
- [23] 刘德俊, 浦海, 沙子恒, 等. 冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 60–67.
LIU Dejun, PU Hai, SHA Ziheng, et al. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 60–67.
- [24] YU S, GUAN H, KANG Q, et al. Effect of cyclic freeze-thaw treatment on mode I and mode II fracture characteristics of sandstone[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138747.
- [25] 黄心畏, 单晓锋, 高红俐, 等. 基于边缘检测和数字图像相关法的疲劳裂纹长度测量方法[J]. *兵工学报*, 2022, 43(4): 940–951.
HUANG Xinwei, SHAN Xiaofeng, GAO Hongli, et al. Fatigue crack length measurement method based on edge detection and DIC[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(4): 940–951.
- [26] WANG Zaiyong, LIANG Weigu, LIAN Haojie, et al. Study on the effect of bedding plane and loading style on fracture process zone in coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57: 3863–3883.
- [27] 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微观结构特征[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(12): 84–93.
XIE Haotian, XU Ying, ZHENG Qiangqiang, et al. Experimental study on strength degradation and meso-structural characteristics of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(12): 84–93.
- [28] SPRINGER. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007—2014*[S]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [29] HUANG S, HE Y, YU S, et al. Experimental investigation and prediction model for UCS loss of unsaturated sandstones under freeze-thaw action[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(1): 41–49.
- [30] MA Q, MA D, YAO Z. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 10–17.
- [31] 陈辰, 王海龙, 曲广雷, 等. 基于 DIC 聚丙烯腈纤维的混凝土断裂性能研究与数值分析[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(34): 14796–14805.
CEHN Chen, WANG Hailong, QU Guanglei, et al. Study and numerical analysis of fracture properties of polyacrylonitrile fiber concrete based on DIC[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(34): 14796–14805.
- [32] 解北京, 蔺淑蓉, 汪泉, 等. 冲击荷载下饱水红砂岩力学响应与破碎特征[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(7): 2582–2592.
XIE Beijing, LIN Shurong, WANG Quan, et al. Mechanical response and fragmentation characteristics of water-saturated red sandstone under impact loading[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(7): 2582–2592.
- [33] 王浩, 宗琦, 汪海波, 等. 冲击荷载下饱水凝灰岩断裂韧性及裂纹扩展分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(7): 1709–1719.
WANG Hao, ZONG Qi, WANG Haibo, et al. Fractal characteristics of fracture toughness and crack propagation of saturated tuff under impact loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1709–1719.
- [34] WANG Zhongwen, YU Meilu, ZUO Jianping, et al. Fracture characteristics and evolution mechanism of freeze-thaw rock under mixed mode I/II loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2025, 139: 105105.

- [35] 林勋, 赵梦佳, 陈璨, 等. 裂后超高性能混凝土在冻融循环下拉伸性能演化[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(5): 1236–1246.
LIN Xun, ZHAO Mengjia, CHEN Can, et al. Tensile performance evolution of cracked ultra-high-performance concrete under freeze-thaw conditions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(5): 1236–1246.
- [36] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55–129.
- [37] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100–104.
- [38] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773–781.
- [39] HU Xiaozhi, DUAN Kai. Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1321–1330.
- [40] BAŽANT ZDENĚK P, CEDOLIN L. Blunt crack band propagation in finite element analysis[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1979, 105(2): 297–315.
- [41] CARLSSON J, ISAKSSON P. Crack dynamics and crack tip shielding in a material containing pores analysed by a phase field method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 206: 526–40.
- [42] RITCHIE R O. Mechanisms of fatigue crack propagation in metals, ceramics and composites: role of crack tip shielding[J]. Materials Science and Engineering: A, 1988, 103(1): 15–28.
- [43] LABUZ Joseph F, CATTANEO Sara, CHEN Li Hsien. Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5): 225–233.
- [44] RILEM Technical Committee (Masayasu Ohtsu). Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete: measurement method for acoustic emission signals in concrete[J]. Materials and structures, 2010, 43(9): 1177–1181.
- [45] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N. Experimental and numerical studies on development of fracture process zone(FPZ) in rocks under cyclic and static loadings[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 893–908.
- [46] LABUZ J F, SHAH S P, DOWDING C H. The fracture process zone in granite: evidence and effect[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1987, 24(4): 235–46.