

张春阳,胡凯兵,赵尔丞,等.基于XT-DIC的冻融裂隙砂岩裂纹扩展规律及损伤演化特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):293-302.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240301

ZHANG Chunyang,HU Kaibing,ZHAO Ercheng,et al.Crack propagation law and damage evolution characteristics of freeze-thaw fractured sandstone based on XT-DIC[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):293-302.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240301

# 基于XT-DIC的冻融裂隙砂岩裂纹扩展规律及损伤演化特征

张春阳<sup>1,2,3</sup>, 胡凯兵<sup>1</sup>, 赵尔丞<sup>4\*</sup>, 谭涛<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北武汉430070;

2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室,安徽马鞍山243000;3. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司,安徽马鞍山243000;4. 兰州有色冶金设计研究院有限公司,甘肃兰州730000)

**摘要:**针对冻融循环作用下寒区岩石易发生力学性能劣化问题,结合单轴压缩试验以及三维数字图像技术(XT-DIC),研究冻融损伤后完整和预制裂隙倾角分别为0°、45°、90°的砂岩试件的力学行为和破坏特征。研究表明:预制裂隙和冻融循环作用会显著劣化砂岩的力学性能,且冻融试件的损伤累积显著滞后于未冻融试件;峰值强度与冻融次数呈线性负相关,表观刚度与冻融次数呈指数负相关,裂纹扩展所需时间与冻融次数呈正相关;在单轴压缩下裂纹主应变的演化经历近似水平变化、缓慢增长、急剧增长3个阶段,试件最终破坏模式主要受预制裂隙倾角影响。研究结果可为寒区岩体工程设计提供参考。

**关键词:**冻融循环;单轴压缩;预制裂隙砂岩;数字图像技术;裂纹扩展规律;损伤演化特征

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)03-0293-10

## Crack propagation law and damage evolution characteristics of freeze-thaw fractured sandstone based on XT-DIC

ZHANG Chunyang<sup>1,2,3</sup>, HU Kaibing<sup>1</sup>, ZHAO Ercheng<sup>4\*</sup>, TAN Tao<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;2. State Key Laboratory of Safety and Health in Metal Mines, Maanshan 243000, China;3. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Company Limited, Maanshan 243000, China;4. Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Company Limited, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:**Aiming at the problem that rock mechanical properties in cold regions are prone to deterioration under freeze-thaw cycle, the intact sandstone specimens and the prefabricated sandstone specimens with crack inclination angles of 0°, 45° and 90°, respectively, were studied by combining uniaxial compression test and three-dimensional XT-digital image correlation (XT-DIC) to analyze their mechanical behaviors and failure characteristics after freeze-thaw damage. The research results indicate that prefabricated cracks and freeze-thaw cycles significantly degrade the mechanical properties of sandstone, and the cumulative damage of freeze-thaw specimens lags significantly behind that of unfrozen specimens. The peak strength is linearly negatively correlated with the number of freeze-thaw cycles, the apparent stiffness is exponentially negatively correlated with the number of freeze-thaw cycles, and the time required for crack propagation is positively correlated with the number of freeze-thaw cycles. The evolution of crack principal strain under uniaxial compression goes through three stages: approximate horizontal variation, slow growth, and rapid growth. The final failure mode of

收稿日期:2024-09-15 修回日期:2024-11-07 接受日期:2024-11-23 责任编辑:黄琦

基金项目:国家自然科学基金项目(52174088)

作者简介:张春阳(1981-),男,湖南怀化人,博士,副教授,主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: zc12722@163.com

通信作者:赵尔丞(1981-),男,甘肃会宁人,高级工程师,主要从事矿山生产设计方面的研究。E-mail: 5781110@qq.com

the specimen is mainly affected by the pre-crack inclination angle. The research results can provide reference for rock mass engineering design in cold regions.

**Keywords:** freeze-thaw cycle; uniaxial compression; pre-cracked sandstone; digital image correlation; crack propagation law; damage evolution mechanism

## 0 引言

中国冻土区域面积广阔且蕴藏丰富的矿产资源<sup>[1]</sup>。在寒区资源利用和地质环境保护过程中,必然面临各种冻融灾害问题<sup>[2]</sup>。岩体冻融灾害发生的根本原因是冻胀力反复作用于岩体内部缺陷,导致岩体产生疲劳损伤,随着微裂纹的萌生与扩展,岩体发生失稳破坏<sup>[3-4]</sup>。研究冻融后含缺陷岩石的裂纹扩展规律对于寒区岩体工程建设及灾害防治具有重要的现实意义。

学者们对常规环境下缺陷类岩石的裂纹扩展及损伤演化开展了大量研究<sup>[5-8]</sup>。赵国彦等<sup>[9]</sup>以单轴压缩下含孔洞状的红砂岩为研究对象,得到孔洞形状对岩石力学特性和损伤演化的影响规律。CAO等<sup>[10]</sup>研究了裂隙类岩石裂纹的萌生及扩展特征与裂隙长度和倾角之间的关系,结果表明岩石的不连续性和缺陷会显著影响其稳定性。谭皓等<sup>[11]</sup>研究了常规及冻融后砂岩试件的损伤特征,发现裂隙岩石的损伤累积集中在预制裂隙附近。程虹铭等<sup>[12]</sup>对含不同角度裂隙的砂岩开展单轴压缩试验,研究表明不同角度裂隙试件的变形过程均可划分为压密阶段、弹性变形阶段、新生裂纹稳定发展阶段、新生裂纹不稳定发展阶段和峰后破裂阶段。裂纹的萌生发育过程可直观地反映岩石的损伤演化规律,但传统的应变片监测等技术无法准确捕捉微裂纹的萌生位置,需借助光学和电子设备对岩石裂纹扩展和损伤破坏过程进行深入的细观试验研究<sup>[13]</sup>。王守光等<sup>[14]</sup>采用CT实时扫描技术得到煤岩裂隙的表面场分布规律,并重构了椭球模型。WANG等<sup>[15]</sup>利用电镜扫描仪观测到岩样具有暗斑块、愈合裂纹、环带、剪切纹和面状结构等微观结构。近年来,随着科技的发展,数字图像技术(DIC)逐渐在岩石力学领域得到广泛应用<sup>[16-19]</sup>。代树红等<sup>[20]</sup>通过DIC技术和有限元方法得到裂纹扩展区域的应变场分布规律,构建了岩石损伤变量模型。范杰等<sup>[21]</sup>通过3D-DIC技术,在单轴压缩条件下监测裂隙砂岩的裂纹扩展过程,研究表明预制裂隙会劣化岩石的力学性能。对于完整岩石的冻融损伤问题,杨国梁等<sup>[22]</sup>通过DIC技术

和动态劈裂试验,发现冻融作用会导致岩石的裂纹扩展过程更加复杂。

尽管DIC等技术在裂纹监测方面的应用日益成熟,但对于裂隙岩石细观损伤与宏观破坏之间的关联性以及裂纹扩展规律、损伤演化特征方面的研究较少。本文以寒区砂岩为研究对象,对完整砂岩和预制裂隙砂岩进行冻融循环和单轴压缩试验。通过XT-DIC技术,提出一种确定裂纹主应变的新方法,并对岩石的损伤过程进行分析,揭示单轴压缩下冻融裂隙岩石的损伤机理。

## 1 试验方法

### 1.1 试件制备

试验砂岩取自内蒙古通辽市,其主要成分为石英和钠长石。根据《煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7—2009)<sup>[23]</sup>,制备标准圆柱形试件,直径为50 mm,高为100 mm。在试件几何中心处设置直径为1.00 mm的圆孔。采用金刚砂线切割,形成预制直裂隙,长为15 mm,宽为1.0 mm,裂隙倾角 $\beta$ 分别取 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ,见图1。



图1 预制裂隙砂岩试件

Fig.1 prefabricated fractured sandstone specimens

### 1.2 试验设备

试验系统以及流程示意见图2。试验系统包括冻融循环试验系统、单轴压缩试验系统和XT-DIC三维应变测量系统。采用HDM-10C型冻融循环试验机对饱水后的砂岩试件开展冻融循环试验。参考申艳军等<sup>[24]</sup>的研究方法,设置冻结和融解温度分别为 $-20^\circ\text{C}$ 和 $20^\circ\text{C}$ ,时间均为4 h,单次冻融循环周期为8 h。冻融循环次数 $N$ 分别取0、20、30、40和50。

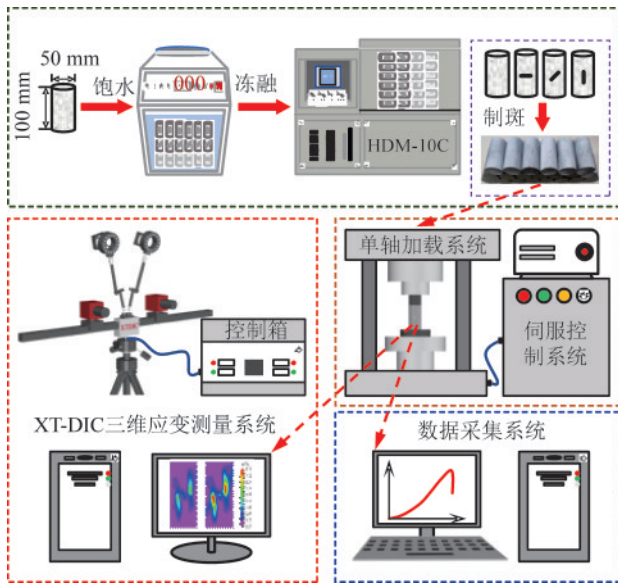


图2 试验系统和流程

Fig.2 test system and process

为保证XT-DIC观测的准确性,冻融试件干燥后选择一侧表面作为试验观测面,先均匀喷涂一层哑光白漆,待白漆干透后用哑光黑漆制作随机散斑,对制斑试件开展单轴压缩试验。试验开始时,先以50 N/s速率使试件与压盘充分接触,再采

用位移控制法以0.15 mm/min的速率施加轴向载荷,直至试件破坏。通过XT-DIC实时监测试件表面的应变场及裂纹扩展过程。为保证采集图片的清晰度,拍照时采用2台60 W的蓝光光源照亮试件表面,图片采集速率为每秒2张。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 微观结构

采用电镜扫描技术(SEM)500倍放大试件,得到不同冻融次数下砂岩试件的微观结构见图3。未冻融循环试件内部存在少量的微裂纹和孔隙,但岩石结构完整性较好,颗粒排列紧凑。随着冻融循环次数的增加,岩石颗粒间的孔隙数量明显增多,30次冻融循环试件的岩石颗粒之间已出现相互连通的微裂纹。50次冻融循环后,试件原生孔隙、裂隙的尺寸明显增大,岩石颗粒之间形成多条连通裂纹。产生这种现象有两方面原因:一是水溶解岩石颗粒之间的胶结物质,使岩石内部孔隙尺寸增大;二是冻胀力作用于岩石原生缺陷,促使岩石内部孔隙、裂隙结构高度发育。

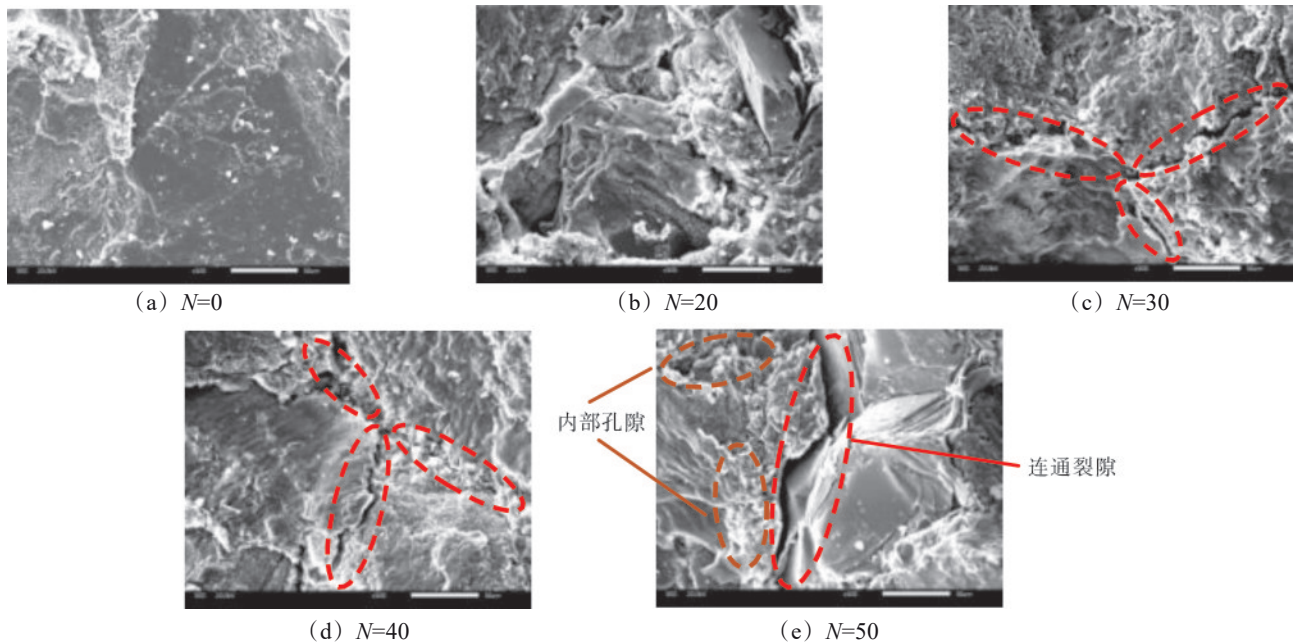


图3 不同冻融次数下砂岩试件的电镜扫描结果

Fig.3 SEM images of sandstone specimens under different freeze-thaw cycles

### 2.2 力学特性分析

施加1 kN预加载后正式开展单轴压缩试验,采用XT-DIC技术同步监测。试件的应力-应变曲线见图4。因试件预加载变形可忽略,为清晰反映试件表面的变

形特征,将正式加载的起点记为O,选取特征点A、B、C、D,特征点处应力分别为闭合应力 $\sigma_c$ 、起裂应力 $\sigma_{ci}$ 、屈服应力 $\sigma_{cd}$ 和峰值应力 $\sigma_{cp}$ 。OA段为初始压密阶段,AB段为缓慢弹性阶段,BC段为稳定弹性阶

段, CD段为裂隙加速扩展阶段。

由图 4 可知, 不同冻融次数下应力-应变曲线的总体趋势基本一致, 但随着冻融次数的增加, 试件初始压密阶段所占比例显著增大。50 次冻融循环后, 与未冻融时相比, 完整试件在压密阶段产生的应变增大了 0.003 3 (忽略试验预加载阶段), 这是由于未冻融试件内部微裂隙和孔隙的发育程度较低, 颗粒间孔隙尺寸较小, 岩石完整性较好。经过冻融循环后, 岩石原生裂隙、孔隙的形状和尺寸均发生变化, 孔隙率增大, 岩石的可压缩性增强, 因此, 初始压密阶段占比逐渐增大。

冻融循环后试件的力学性能显著劣化。裂隙倾角为 0° 时, 不同冻融次数下各试件的应力-应变曲线均有 2 个波峰, 这是单轴加载过程中岩石在缺陷处更易破坏、裂隙受压闭合的瞬间出现应力跌落所致。随着冻融次数的增加, 试件达到第 1 峰值

应力的应力跌落幅度逐渐减小, 表明冻融作用导致岩石颗粒之间的黏结强度减小。由于内部孔隙的发育, 砂岩的脆性减弱, 可压缩性增强。试件的峰值应力随冻融次数的增加逐渐减小, 峰值应变随冻融次数的增加逐渐增大, 原因是冻胀力促使试件内部微裂隙扩展, 孔隙高度发育, 使试件的承载力下降。预制裂隙的存在劣化了试件的力学性能, 且不同倾角产生的劣化效果存在显著差异。具体表现为: 随着倾角增大, 预制裂隙对试件强度的劣化效果减弱, 裂隙倾角为 90° 时, 各试件的峰值强度接近于完整试件。裂隙倾角为 0° 时, 冻融次数相同的条件下, 各试件的峰值强度约为完整试件的 1/2。整体来看, 各试件应力-应变曲线的变化趋势基本一致, 随着冻融次数的增加, 峰值应力、应变均逐渐减小, 初始压密阶段占比逐渐增大。

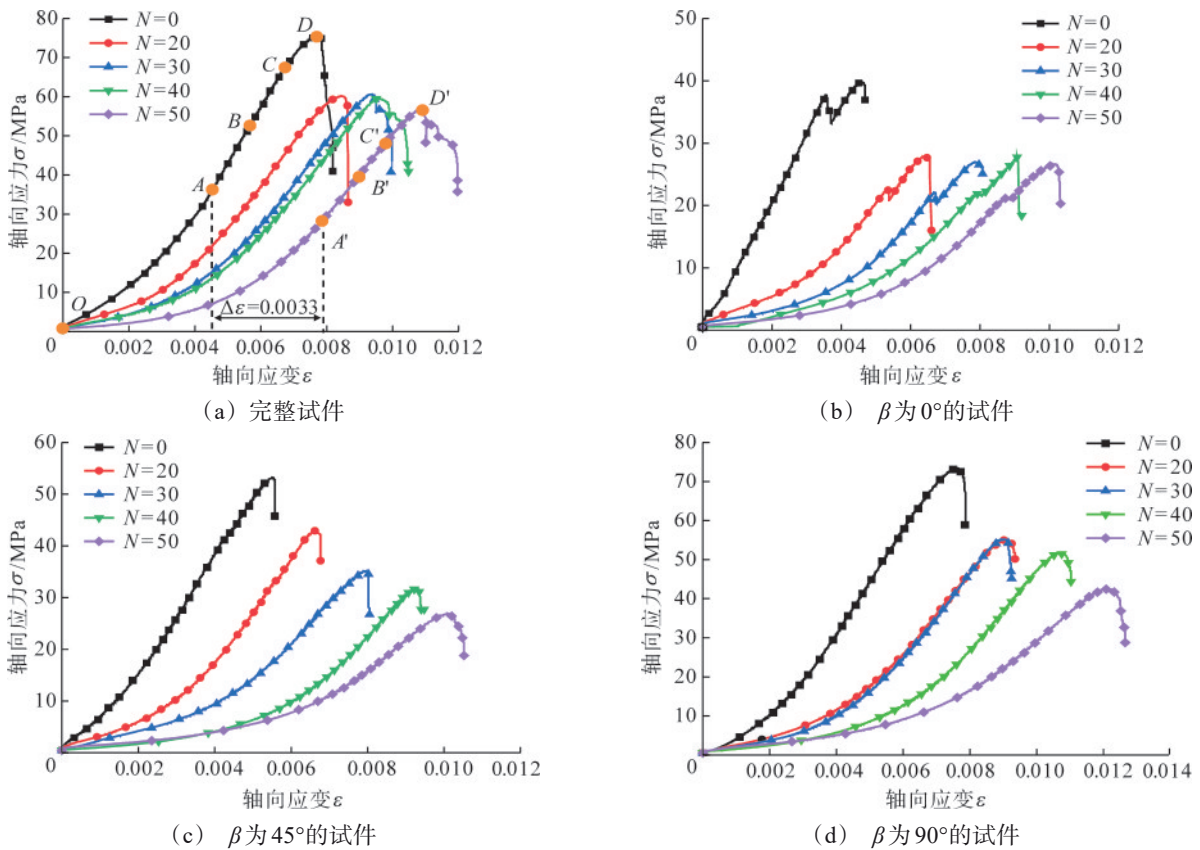


图 4 应力-应变曲线

Fig.4 stress-strain curves of typical specimens

提取不同冻融次数下, 完整试件和裂隙倾角分别为 0°、45°、90° 预制裂隙试件的峰值强度  $\sigma_{cp}$ , 并进行拟合, 拟合公式为

$$\begin{cases} \sigma_{cp} = a + \lambda N \\ E = a_1 e^{-\lambda_1 N} + E_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E$  为试件的表观刚度, GPa;  $E_0$  为将已知试件的表观刚度代入拟合公式所得常数;  $a$ 、 $\lambda$ 、 $a_1$ 、 $\lambda_1$  均为拟合系数。

冻融次数与试件峰值强度、表观刚度的关系曲线见图 5。

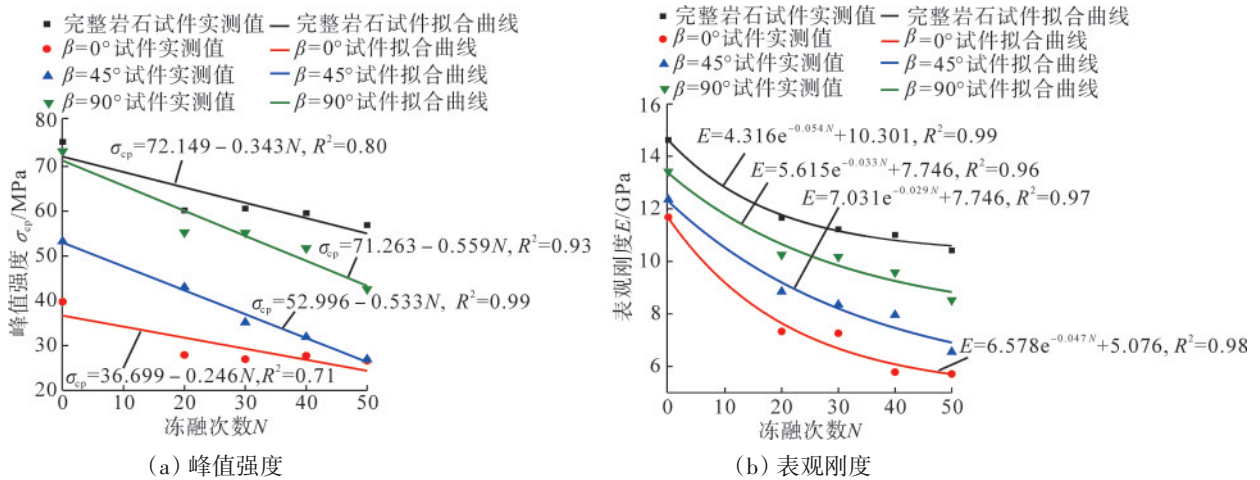


图5 冻融次数对试件峰值强度和表观刚度的影响

Fig.5 effects of freeze-thaw cycles on the peak strength and apparent stiffness of the specimens were studied

图5中各拟合曲线的相关系数 $R^2$ 整体上大于0.90,表明用式(1)来描述砂岩试件冻融次数与峰值强度、表观刚度之间的关系较为合理。由图5可知,各试件的峰值强度和表观刚度均随冻融次数的增加而减小。不同冻融次数下,完整试件的峰值强度和表观刚度均大于裂隙试件。冻融50次后,与未冻融时相比,完整试件和裂隙倾角为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 预制裂隙试件的抗压强度分别降低了24.6%、33.1%、49.4%和41.8%,且预制裂隙试件

强度的降幅均高于完整试件,表观刚度的变化幅度基本一致。试件力学性能的降低,表明冻融作用下试件的内部结构发生劣化,在冻胀和融解力的反复作用下,试件内部孔隙相互联通、扩展,导致试件抵抗变形的能力下降,力学性能劣化。

### 2.3 破坏模式

试件的破坏模式见图6。为便于对比分析,在图中用红色虚线描绘各试件破坏后产生的裂纹。

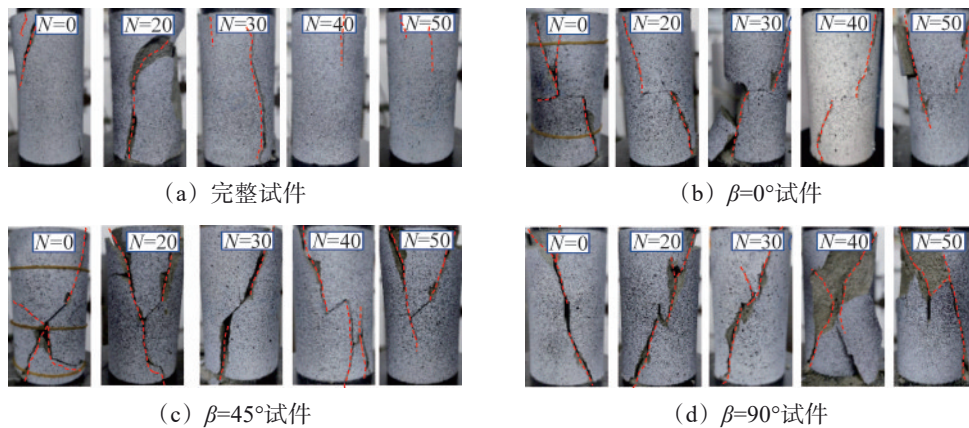


图6 试件的破坏模式

Fig.6 failure mode of each specimen

由图6可知,完整试件的起裂位置位于端部,发生垂直劈裂破坏。预裂试件在预制裂隙尖端处萌生裂纹。裂隙倾角为 $0^\circ$ 时,裂纹由裂隙尖端向试件两端扩展,试件发生剪切破坏。裂隙倾角为 $45^\circ$ 时,在裂隙尖端处产生两组裂纹,一组平行于轴向加载方向,属于张拉裂纹;另一组平行于裂隙倾角方向,属于剪切裂纹。裂隙倾角为 $90^\circ$ 时,随着加载应力的增大,裂纹向试件两端扩展的同时,在预制裂隙周围出现岩块剥落现象,试件发

生剪切破坏。

通过以上分析可知,裂隙倾角对试件的破坏模式影响显著。与完整试件相比,在冻融循环作用下,加载过程中部分预制裂隙试件表面出现岩块剥落现象,最终呈现的破坏模式更复杂。

## 3 裂纹损伤演化分析

### 3.1 主应变场演化

XT-DIC 图像后处理过程见图7。首先,在采

集的图像上创建一个散斑域,用网格节点划分试件表面的观测区域。然后,利用软件计算系统进行散斑匹配,自动识别节点坐标的变化并计算应变大小,绘制主应变云图。

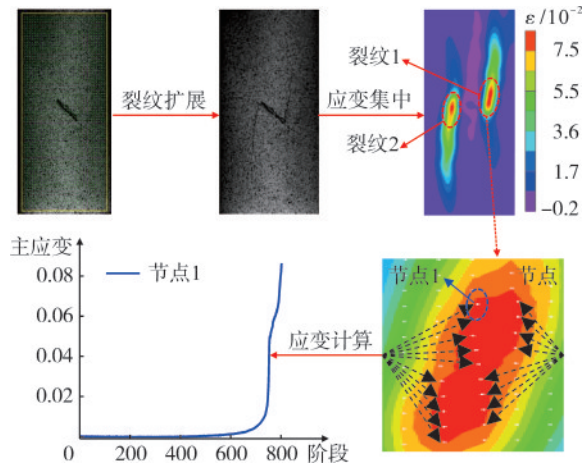


图7 XT-DIC图像后处理过程

Fig.7 XT-DIC image post-processing process

各试件特征点A、B、C、D处的主应变云图见图8~图11。在压密阶段,当应力达到点A处的闭合应力时,未冻融预制裂隙试件表面应变场的分布较为均匀,主应变均小于0.003,几乎无应变集中现象。当应力达到点B处的起裂应力时,预制裂隙试件在裂隙尖端处出现应变集中现象,表明试件的裂纹最先在预制裂隙尖端处萌生,且预制裂隙倾角越大,裂纹萌生越困难。随着冻融次数的增加,裂纹扩展显著。当应力达到点C处的屈服应力时,预制裂隙尖端处产生的微裂纹加速扩展,局部有大应变聚集并产生宏观裂纹,试件处于临近失稳状态。当应力达到点D处的峰值应力时,裂纹应变场贯通试件表面,试件发生破坏。由图11可知,完整试件的裂纹起裂位置不固定,且大部分微裂纹均在试件上下端处萌生,并迅速贯通试件表面,导致试件发生劈裂破坏。与预制裂隙试件相比,完整试件的起裂较困难,但裂纹扩展和汇合过程却更为迅速。

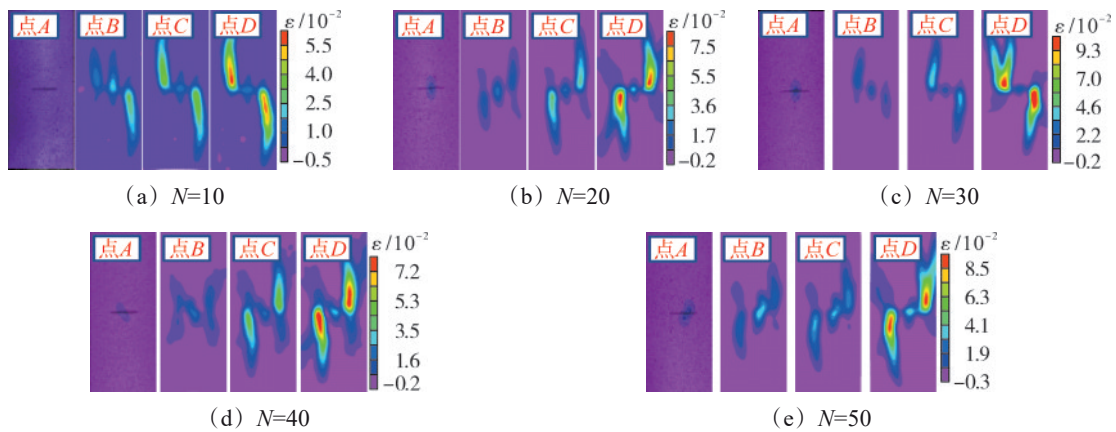


图8 不同冻融次数下 $\beta=0^\circ$ 试件的主应变云图

Fig.8 contour of principal strain for specimens with  $\beta=0^\circ$  under different freezing and thawing times

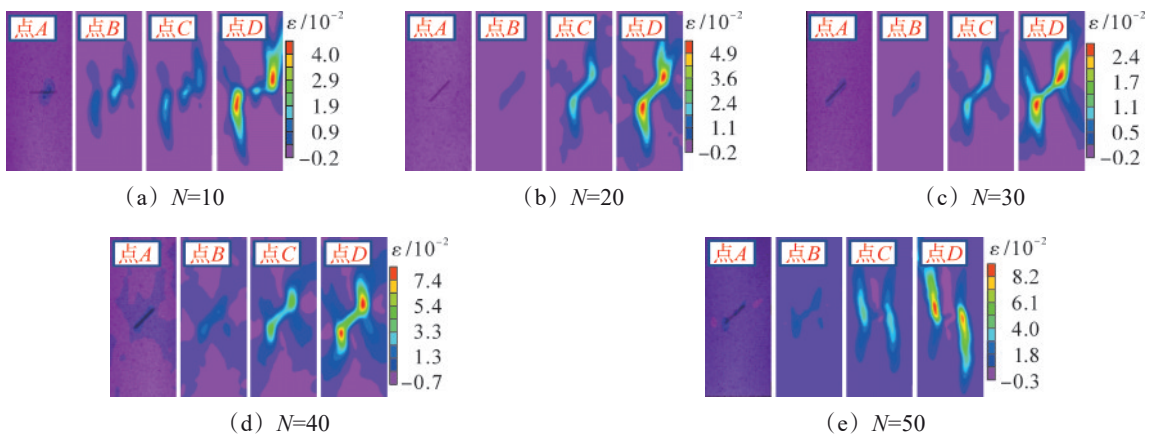


图9 不同冻融次数下 $\beta=45^\circ$ 试件的主应变云图

Fig.9 contour of principal strain for specimens with  $\beta=45^\circ$  under different freezing and thawing times

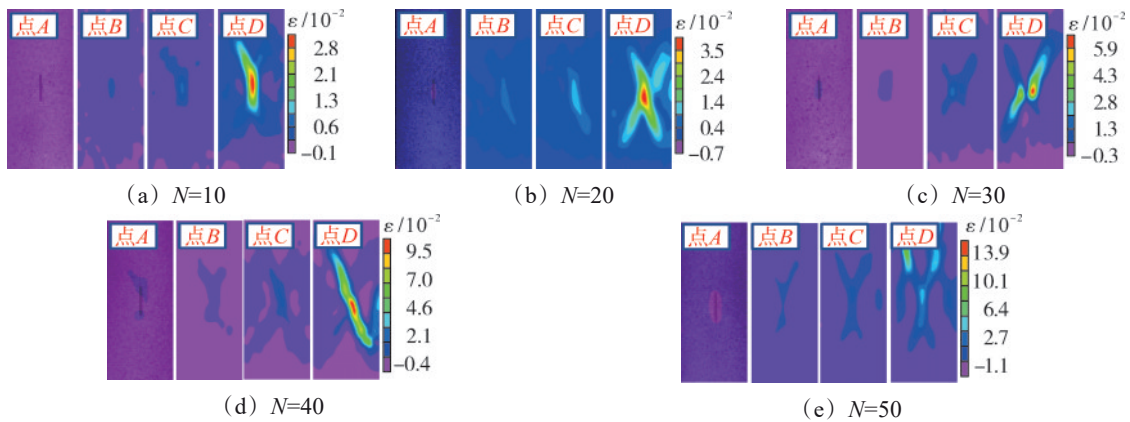


图10 不同冻融次数下 $\beta=90^\circ$ 试件的主应变云图

Fig.10 contour of principal strain for specimens with  $\beta=90^\circ$  under different freezing and thawing times

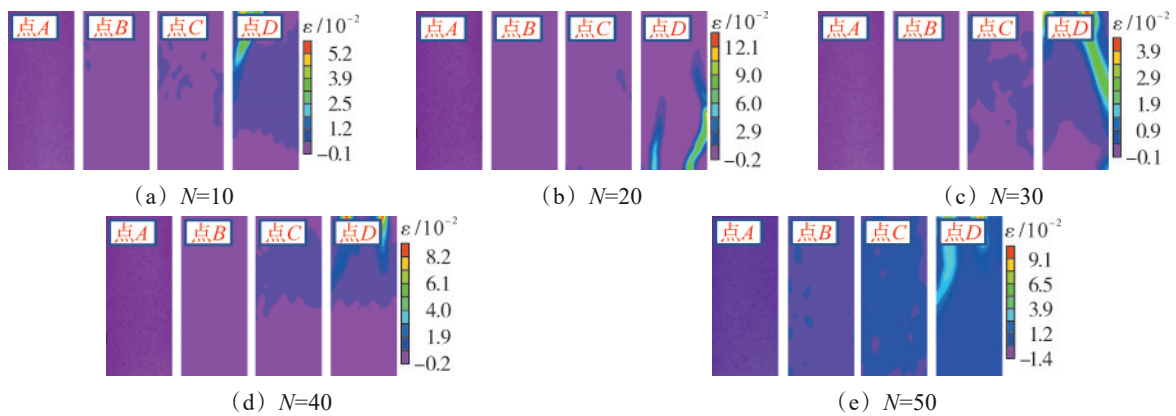


图11 不同冻融次数下完整试件的主应变云图

Fig.11 contour of principal strain for intact specimens under different freezing and thawing times

### 3.2 裂纹最大主应变的演化特征

裂纹萌生与扩展会导致周边区域的应变快速累积, 将应变突增后对应区域的应变平均值视为裂纹的最大主应变<sup>[21]</sup>。单轴压缩下, 大部分试件在达到峰值应力后会发生剧烈的脆性破坏, 结构稳定性完全丧失。由于试件表层脱离和崩落, 大量散斑丢失, 使XT-DIC技术难以采集完整的数字散斑图像, 影响应变计算的精度。鉴于此, 本文仅考虑各试件达到峰值应力之前的裂纹扩展规律, 且将同一应变集中区域视为单条裂纹, 以裂隙倾角为 $45^\circ$ 的试件为例, 结合XT-DIC应变云图, 获取单轴压缩下裂纹最大主应变的演化特征, 见图12。由图12可知, 裂纹最大主应变随时间的变化曲线可分为3个阶段。阶段I对应初始压密阶段, 该阶段岩石内部几乎无微裂纹产生, 裂纹主应变始终较小。阶段II对应弹性变形和裂纹稳定扩展阶段, 该阶段岩石内部主要发生弹性变形, 微裂纹轻微扩展, 裂纹最大主应

变呈缓慢增长的变化趋势。阶段III对应裂隙加速扩展阶段, 该阶段岩石表面裂纹快速延伸扩展, 宏观裂纹已形成且趋于贯通。常见的岩石特征应力计算方法包括声发射法<sup>[25]</sup>、裂纹体积应变法<sup>[26]</sup>、耗散能率法<sup>[27]</sup>等, 这几种方法本质上均通过区分不同阶段的弹性与塑性变形特征来计算岩石的特征应力。裂纹最大主应变的连续变化过程与试件的弹塑性变形之间具有一定的对应关系。裂纹主应变在阶段III的急剧增长意味着试件开始进入塑性破坏阶段, 因此, 可以将阶段III初始时刻对应的应力 $\sigma_3$ 作为岩石的损伤应力。

整体来看, 随着冻融次数的增加, 岩石内部孔隙数量不断增多, 试件初始压密阶段持续时间变长, 裂纹最大主应变均在阶段III急剧增长, 试件迅速破坏。因此, 在寒区工程建设和灾害防治中, 为确保岩体所受应力在安全应力范围内, 建议将损伤应力作为岩体的极限安全阈值, 保障施工安全。

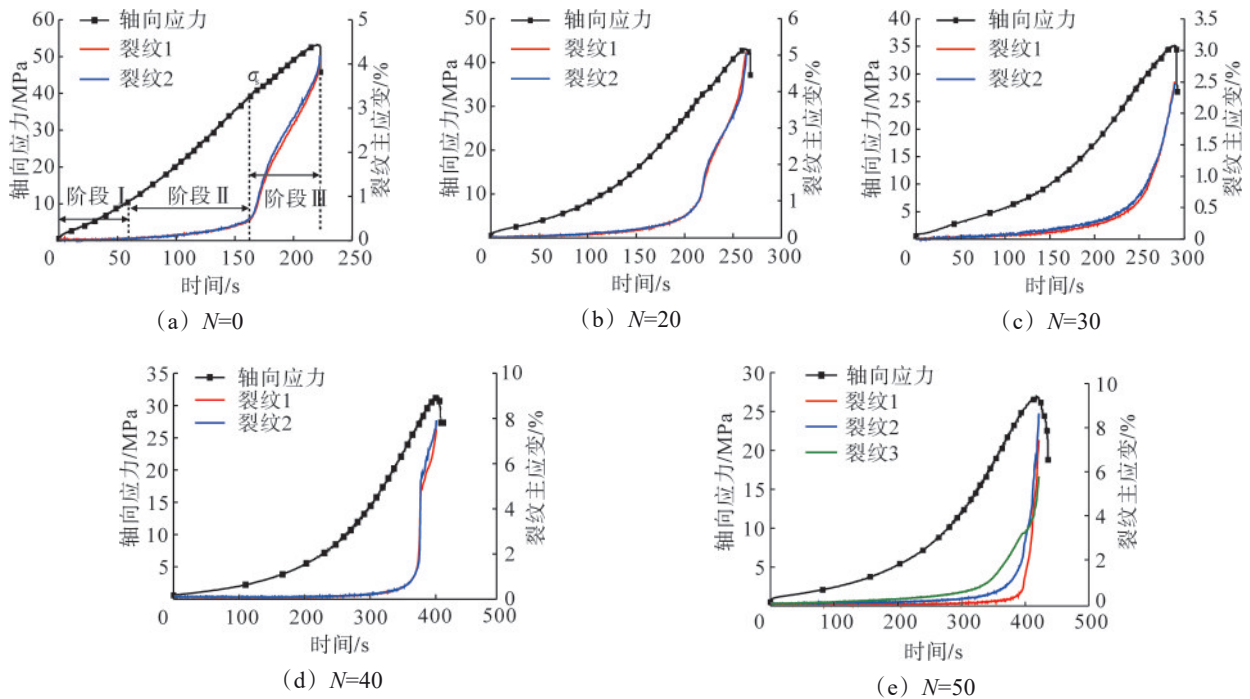


图 12 不同冻融次数下  $\beta=45^\circ$  试件裂纹最大主应变的演化特征

Fig.12 evolution characteristics of maximum principal strain of cracks in specimens at  $\beta=45^\circ$  under different freezing and thawing times

损伤应力  $\sigma_3$  与冻融次数  $N$ 、峰值应力  $\sigma_{cp}$  的关系见图 13。分析表明,  $\sigma_3$  与  $N$  负相关,  $\sigma_3/\sigma_{cp}$  为 0.7~0.8。实际工程中, 为确保施工安全, 通常会将损伤应力对应位置的岩体抗压强度作为安全阈值, 由 XT-DIC 技术得到的岩石损伤应力为 0.7~0.8 倍的峰值应力, 符合工程经验, 表明借助 XT-DIC 技术得到裂纹最大主应变, 并用来确定岩石的损伤应力是合理的, 可为寒区工程的安全建设提供参考。

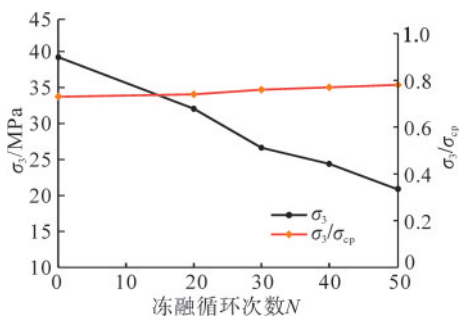


图 13 损伤应力与冻融次数、峰值应力的关系

Fig.13 relationship between damage stress and freeze-thaw times, peak stress

### 3.3 归一化损伤变量

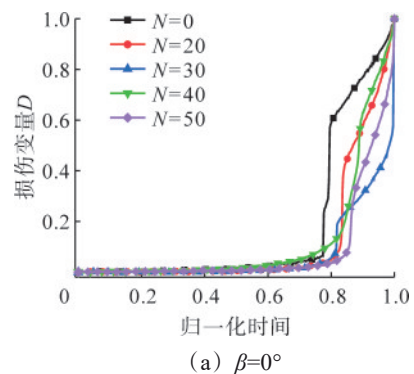
岩石损伤演化本质上是微裂纹的萌生扩展过程, 可根据裂纹主应变来量化岩石损伤<sup>[21]</sup>。将岩石的归一化损伤变量定义为

$$D = \frac{S_i}{S}, \quad (2)$$

式中:  $S$  为试件达到峰值应力时, 全部裂纹最大主应变的平均值;  $S_i$  为试件达到峰值应力之前, 某加载时刻所对应的裂纹最大主应变的平均值。

与预制裂隙试件相比, 完整试件起裂后裂隙扩展非常迅速, 且起裂位置不固定, 因此, 本文仅讨论预制裂隙试件的损伤演化过程, 见图 14。

由图 14 可知, 冻融次数和裂隙倾角均会影响试件的损伤产生过程。与未冻融时相比, 冻融试件的起始损伤累积明显滞后, 且随着冻融次数的增加, 滞后愈加显著。随着裂隙倾角的增大, 试件变形后期损伤变量迅速增大, 表明试件的脆性显著增大, 更易发生破坏。



(a)  $\beta=0^\circ$

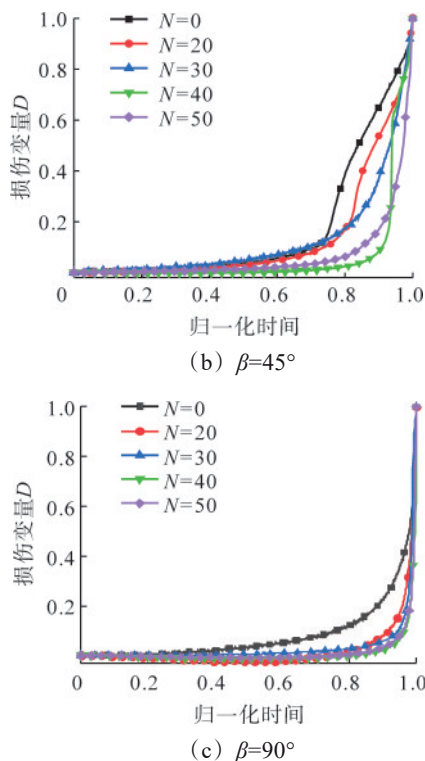


图14 不同预制裂隙倾角下试件的损伤演化过程

Fig.14 damage evolution process of specimens under different prefabricated crack inclination angles

## 4 结论

在现有研究的基础上,考虑冻融循环作用,通过XT-DIC图像识别技术,对完整砂岩、预制裂隙砂岩的裂纹扩展规律及损伤演化特征进行试验研究,得出如下结论。

(1) 与完整试件相比,预制裂隙试件的峰值强度发生劣化,且随着预制裂隙倾角的增大,峰值强度的劣化程度逐渐减小。冻融试件的峰值强度和弹性模量均随冻融次数的增加而减小。

(2) 完整试件的微裂纹在试件端部最先萌生,并逐渐向试件中部扩展延伸。预制裂隙试件的微裂纹最先在裂隙尖端萌生,并向试件两端扩展,临近破坏时,迅速贯通试件表面。试件最终破坏模式与预制倾角有关,与冻融循环次数几乎无关。

(3) 冻融后试件微裂纹压密阶段产生的变形增大,承压能力减弱,导致裂纹的萌生时间随冻融次数的增加逐渐延长,但裂纹扩展破坏更剧烈。预制裂隙倾角越大,试件裂纹萌生与起裂越困难。

(4) 通过XT-DIC技术获取裂纹主应变,并提出一种确定损伤变量的新方法,可用于研究试件加载过程中裂纹随时间的扩展尺度,定量表征试件的损伤累积过程。但该方法仅适用于寒区简单

混凝土构筑物和浅部岩层的损伤分析,对于受力情况复杂的大型建筑或深部岩体,其强度受多种因素影响,该方法尚无法准确反映其损伤演化特征。在未来的研究中,可考虑将XT-DIC技术与声发射等技术相结合,进一步监测岩石内部裂隙的贯通情况。

## 参考文献(References):

- [1] 杨志全,甘进,樊详珑,等. 岩石冻融损伤机理研究进展及展望[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(1):176-188.  
YANG Zhiqian, GAN Jin, FAN Xianglong, et al. Research progress and prospect on freeze-thaw damage mechanism of rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 176-188.
- [2] SHI L H, LI S Y, WANG C, et al. Heat-moisture-deformation coupled processes of a canal with a berm in seasonally frozen regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 207: 103773.
- [3] 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): 2103-2114.  
ZHANG Huimei, WANG Yunfei. Multi-scale analysis of damage evolution of freezing-thawing red sandstones[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2103-2114.
- [4] HU X Y, HUANG S B, YU S Y, et al. Investigations on the fracture mechanisms of Z-shaped fissured rock-like specimens[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 134: 104748.
- [5] 王磊,秦越,赵涛,等. 单轴冲击冻结砂岩损伤机理[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(5): 886-894.  
WANG Lei, QIN Yue, ZHAO Tao, et al. Damage mechanism of frozen sandstone under uniaxial impact[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(5): 886-894.
- [6] 赵涛,乔煜哲,冯云枫. 裂隙几何形态对冻结岩体压缩破坏特征的影响[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(2): 342-351.  
ZHAO Tao, QIAO Yuzhe, FENG Yunfeng. Influence of fracture geometry on the compressional damage characteristics of frozen rock masses[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 342-351.
- [7] WANG Y, SONG Z Y, MAO T Q, et al. Macro - meso fracture and instability behaviors of hollow-cylinder granite containing fissures subjected to freeze-thaw-fatigue loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 4051-4071.
- [8] PAN W D, LIANG S Y, GAO P, et al. Study on mechanical properties of fractured sandy mudstone based on triaxial compression experiment[J]. Applied Sciences, 2024, 14: 7204.
- [9] 赵国彦,王恩杰,吴浩,等. 单轴压缩下孔洞砂岩微观破裂演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1891-1900.  
ZHAO Guoyan, WANG Enjie, WU Hao, et al. Micro-fracture evolution rule of sandstone specimens with a single hole under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1891-1900.
- [10] CAO R H, CAO P, FAN X, et al. An experimental and numerical study on mechanical behavior of ubiquitous-joint brittle rock-like

- specimens under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2016,49:4319-4338.
- [11] 谭皓,宋勇军,郭玺玺,等.冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(12):2485-2496.  
TAN Hao, SONG Yongjun, GUO Xixi, et al. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2022, 41(12):2485-2496.
- [12] 程虹铭,杨小彬,张成,等.裂隙砂岩非均匀变形特征及损伤不稳定发展状态判识模型[J].*采矿与安全工程学报*,2023,40(6):1290-1300.  
CHENG Hongming, YANG Xiaobin, ZHANG Cheng, et al. Characteristics of heterogeneous deformation and identification model of unstable damage state in pre-existing crack sandstone[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*,2023,40(6):1290-1300.
- [13] 刘燕,杨小彬,汪洋,等.基于裂纹的岩石摩擦滑移演化实验研究[J].*矿业科学学报*,2021,6(4):438-444.  
LIU Yan, YANG Xiaobin, WANG Yang, et al. Experimental study on the displacement evolution of rock interface friction slip based on crack[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(4): 438-444.
- [14] 王守光,穆鹏宇,王嘉敏,等.CT扫描的煤岩面裂隙椭球模型重构与张量表征及其应用[J].*煤炭学报*,2022,47(7):2593-2608.  
WANG Shouguang, MU Pengyu, WANG Jiamin, et al. Ellipsoid reconstruction and tensor characterization of planar fractures in coal obtained by CT-scanning and the applications[J]. *Journal of China Coal Society*,2022,47(7):2593-2608.
- [15] WANG Y B, LUO L, CHEN J L, et al. Dynamic mechanical behavior and macroscopic and microscopic characteristics of granites subject to heating treatment[J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2023,16:112.
- [16] 张春阳,张宇超,李小双.基于3D-DIC系统的白砂岩单轴压缩应变率效应的力学性能试验研究[J].*矿冶工程*,2023,43(1):21-25,31.  
ZHANG Chunyang, ZHANG Yuchao, LI Xiaoshuang, et al. Experimental study on mechanical properties of white sandstone under uniaxial compression with different strain rate based on 3D-DIC system[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*,2023,43(1): 21-25,31.
- [17] 邢灏喆,王明洋,范鹏贤,等.基于高速3D-DIC技术的砂岩动力特性粒径效应研究[J].*爆炸与冲击*,2021,41(11):46-57.  
XING Haozhe, WANG Mingyang, FAN Pengxian, et al. Grain-size effect on dynamic behavior of sandstone based on high-speed 3D-DIC technique[J]. *Explosion and Shock Waves*,2021,41(11):46-57.
- [18] SOLAV D, MOERMAN K M, JAEGER A M, et al. MultiDIC: an open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation [J].*IEEE Access*,2018,6:30520-30535.
- [19] CHAI J, LIU Y L, OUYANG Y B, et al. Application of digital image correlation technique for the damage characteristic of rock-like specimens under uniaxial compression[J]. *Advances in Civil Engineering*,2020,2020:8857494.
- [20] 代树红,徐涛,黄华森,等.基于DIC-FEM的岩石I型裂纹损伤扩展研究[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2023,42(4): 385-390.  
DAI Shuhong, XU Tao, HUANG Huasen, et al. Damage propagation research of rock mode I crack based on DIC-FEM[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2023, 42(4): 385-39.
- [21] 范杰,朱星,胡桔维,等.基于3D-DIC的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J].*岩土力学*,2022,43(4):1009-1019.  
FAN Jie, ZHU Xing, HU Juwei, et al. Experimental study on crack propagation and damage monitoring of sandstone using three-dimensional digital image correlation technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022,43(4):1009-1019.
- [22] 杨国梁,尚卓,邹泽华,等.冻融循环下砂岩的动态劈裂特性与应变演变机理[J].*矿业科学学报*,2024,9(2):199-208.  
YANG Guoliang, SHANG Zhuo, ZOU Zehua, et al. Study on dynamic splitting and evolution mechanism of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024,9(2):199-208.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法:GB/T 23561.7—2009[S].北京:中国标准出版社,2009:2.
- [24] 申艳军,杨更社,荣腾龙,等.岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J].*岩土工程学报*,2016,38(10):1775-1782.  
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2016,38(10):1775-1782.
- [25] WU C, GONG F Q, LUO Y. A new quantitative method to identify the crack damage stress of rock using AE detection parameters[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2021, 80: 519-531.
- [26] CUI Y, XUE L, ZHAI M Y, et al. Experimental investigation on the influence on mechanical properties and acoustic emission characteristics of granite after heating and water-cooling cycles[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*,2023,9:88.
- [27] 刘新喜,李玉,范子坚,等.干湿循环作用下单裂隙炭质页岩能量演化与破坏特征研究[J].*岩土力学*,2022,43(7):1761-1771.  
LIU Xinxi, LI Yu, FAN Zijian, et al. Energy evolution and failure characteristics of single fissure carbonaceous shale under drying-wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2022,43(7):1761-1771.