

文章编号:1673-9469(2026)04-0046-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.006

位移约束下裂隙砂岩冻融后单轴压缩力学行为

王乾云,朱谭谭*,盛可鑫,马福旺,廖道阳,杨易

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要: 为研究位移约束下裂隙砂岩冻融后的力学行为,采用定制约束装置对砂岩试样施加位移约束。通过冻融循环试验和单轴压缩试验,探究冻融循环过程中电阻率的变化规律,并基于单轴压缩试验结果,分析裂隙倾角、冻融循环次数及位移约束对岩体力学性质的影响。在压缩过程中实时监测裂隙扩展过程,揭示试样的裂隙扩展规律及破坏模式。结果表明:冻融循环降温时电阻率上升,升温时下降;位移约束条件下,试样峰值位移随裂隙倾角的增大先增后减;当从2个方向加载时,峰值位移均随冻融循环次数的增加先降后升;裂隙砂岩的单轴抗压强度和弹性模量随倾角的增大先减后增,倾角为 45° 时达到最小值;当冻融循环次数小于30次时,位移约束对裂隙冻融损伤具有抑制作用,超过30次后则加剧试样损伤;裂隙倾角越大,裂纹扩展速度越快,裂纹越趋向于水平扩展;根据试样裂纹断裂形状,可将破坏模式分为“X型”与“Y型”。

关键词: 裂隙砂岩;冻融循环;单轴压缩;力学特性;裂纹演化

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Uniaxial Compressive Mechanical Behavior of Fractured Sandstone After Freeze-Thaw Cycles Under Displacement Constraints

WANG Qianyun, ZHU Tantan*, SHENG Kexin, MA Fuwang, LIAO Daoyang, YANG Yi

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To study the mechanical behavior of fractured sandstone after freeze-thaw cycles under displacement constraints, a customized constraint device was used to apply displacement constraints to the sandstone specimens. Through the freeze-thaw cycle tests and uniaxial compression tests, the variation law of resistivity during the freeze-thaw cycles was investigated, and based on the results of uniaxial compression tests, the effects of fracture inclination, the number of freeze-thaw cycles and displacement constraints on the mechanical properties of the rock mass were analyzed. Real-time monitoring of the fracture propagation process during compression reveals the fracture propagation law and failure modes of the specimens. The results show that during the freeze-thaw cycles, the resistivity changes periodically: it increases when cooling down and decreases when warming up. Under the displacement constraints, the peak displacement of the specimen increases first and then decreases with the increase of the fracture inclination angle. When loading from both directions, the peak displacement decreases first and then increases with the increase of the number of freeze-thaw cycles. The uniaxial compressive strength and elastic modulus of the fractured sandstone decrease first and then increase with the increase of the inclination angle, and reach the minimum at 45° . Displacement constraints inhibit fracture freeze-thaw damage when the number of freeze-thaw cycles is less than 30 times, and exacerbate the specimen damage when it is greater than 30 times. The larger the fracture inclination angle is, the faster the crack extension speed is, and the more the crack tends to propagate horizontally. According to

收稿日期:2025-06-08 修回日期:2025-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42307222,52578460);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102214204)

第一作者:王乾云(2000—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事岩土与隧道工程方面的研究。

*通信作者:朱谭谭(1989—),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事隧道和地下工程方面的研究。

the crack fracture morphology of specimens, the failure modes can be divided into X-type and Y-type.

Key words: fractured sandstone; freeze-thaw cycles; uniaxial compression; mechanical properties; crack evolution

随着西部大开发战略与“一带一路”倡议的深入推进,我国西部寒区相继开展了大规模基础设施建设,涵盖矿产资源开发、油气管道铺设、交通路网建设及大型水利水电工程等重大工程^[1]。这些工程长期受冻融循环影响,岩体反复经历冰水相变,导致裂纹持续扩展、损伤不断累积,对工程安全构成严重威胁^[2-3]。

针对裂隙岩体的冻融损伤与破坏问题,国内外学者进行了大量试验与理论研究。在冻胀力特性方面,学者深入研究了冻胀力的演化规律。刘泉声等^[4-6]建立了裂隙岩体冻胀力演化理论模型,分析了冻胀作用下裂隙扩展过程与损伤劣化机制;黄诗冰等^[7]研究了岩体裂隙的冻胀力演化过程;Tan等^[8]基于体积膨胀理论、水迁移理论等,提出了岩体裂隙冻胀压力模型,准确模拟了冻胀压力;贾海梁等^[9-10]分别以单裂隙灰岩、饱和裂隙红砂岩为研究对象,监测冻融过程中裂隙内温度及冻胀力变化。在冻融损伤影响因素方面,学者聚焦裂隙形态、冻融循环次数和含水率等关键因素。邹孔毅等^[11]探讨了裂隙夹角和冻融循环次数对岩体质量、有效孔隙率、抗压强度及风化程度系数的影响;裴向军等^[12]开展了裂隙岩石冻融应变试验,发现饱水裂隙岩石在冻融过程中对温度高度敏感;Zhang等^[13]分析了裂隙倾角、温度与迹长等对岩体强度的影响,发现裂隙倾角的影响最为显著。在岩体裂隙扩展及破坏模式方面,学者在不同冻融循环条件与加载方式下,开展了岩体力学特性试验,分析了岩体裂隙演化规律和破坏模式^[14-18]。申艳军等^[19]分析了冻融循环下裂隙岩体的局部损伤效应,验证了裂隙端部断裂特性及其对扩展路径的影响;张慧梅等^[20]研究了不同冻融循环次数下岩石的损伤扩展规律;路亚妮等^[21-23]对冻融循环后的试样开展单轴压缩试验,探究了岩石在受压过程中的破坏模式及内部裂纹扩展过程;Kang等^[24]分析了冻融循环对裂缝扩展方向和速率的影响。

综上,现有研究多侧重岩体自身力学特性,对环境约束效应关注不足。在实际工程中,周边岩体的约束作用会显著改变岩体的力学性能。为此,本文采用定制的约束装置对裂隙砂岩施加单向位移约束,探究冻融循环后裂隙砂岩的单轴压

缩力学响应。研究结果可为寒区工程安全建设提供参考。

1 试验方法

1.1 试样制备

为研究冻融循环次数、约束条件和加载方向对砂岩冻融后的力学行为与方向性特征的影响,本文开展了单向位移约束条件下的单轴压缩试验。如图1所示,将质地均匀的红砂岩切割、打磨,制备成尺寸为100 mm×100 mm×25 mm的板状试样。利用高压水射流切割机在试样中心预制长20 mm、宽2 mm的贯通裂隙,裂隙倾角 β (与水平方向的夹角)分别为30°、45°、60°、75°和90°。



图1 预制单裂隙砂岩试样

Fig. 1 Prefabricated single-fractured sandstone specimens

1.2 试验方案

试验时,先对试样进行冻融循环处理,再进行单轴压缩试验。参考现有研究^[25],冻融循环次数 N 取10、20、30、40、50次。为研究单向位移约束对冻融砂岩力学行为的影响,试验采用定制的约束装置对试样施加位移约束。单轴压缩试验的加载方向包括约束方向和非约束方向。单轴压缩加载方案见表1,部分设备见图2。

冻融循环在LK-225G型低温试验箱中进行,单轴压缩试验采用CMT5605电子万能试验机,试样电阻测试采用CXT2519多路电阻测试仪。根据我国寒区温度特点,将冻融循环温度范围设置为-20~20℃。参照现有研究^[25-26],将冻融循环周期设定为10 h,其中降温、冻结阶段和升温、融化阶段时长均为5 h,见图3。试验步骤如下:(1)将试样在蒸馏水中浸泡18 h,再用SRH真空饱水机处理48 h,取出试样并擦干表面水分;(2)需测试电

表 1 冻融循环后单轴压缩试验方案

Tab. 1 Test scheme for uniaxial compression after freeze-thaw cycles

分组	试样	倾角 $\beta/(^{\circ})$	冻融循环次数/次	是否约束	加载方向
A	1#	30	20	是	约束
	2#	45	20	是	约束
	8#	60	20	是	约束
	9#	75	20	是	约束
	10#	90	20	是	约束
B	11#	45	10	是	约束
	12#	45	30	是	约束
	13#	45	40	是	约束
	14#	45	50	是	约束
C	15#	45	10	是	非约束
	16#	45	20	是	非约束
	17#	45	30	是	非约束
	18#	45	40	是	非约束
	19#	45	50	是	非约束
D	20#	完整试样,不经冻融循环,仅开展单轴压缩试验			
	21#				
	22#				

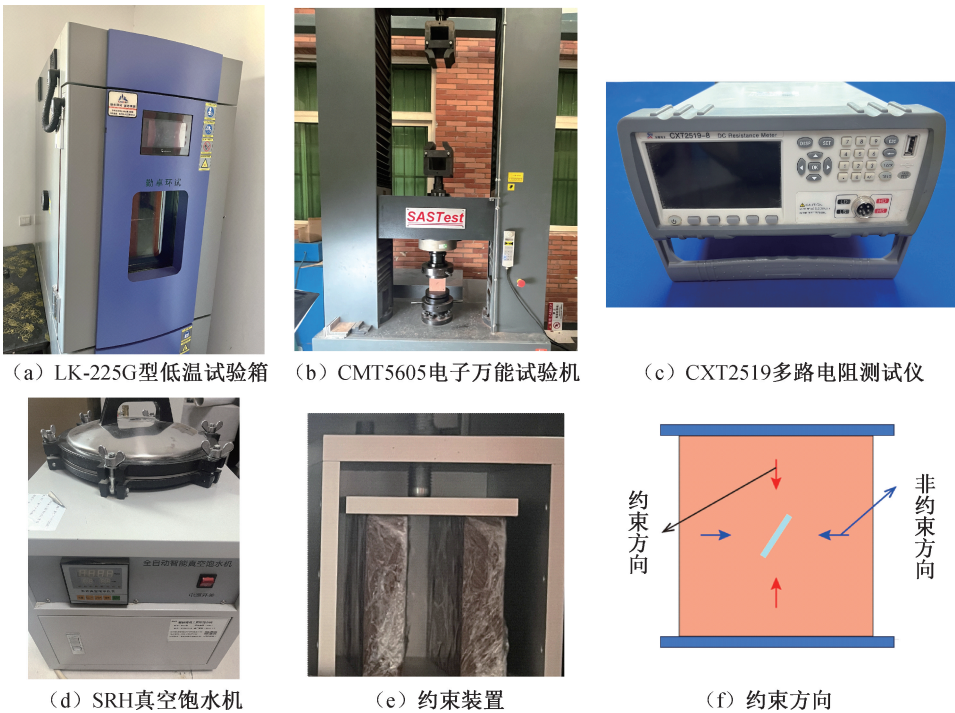


图 2 试验所需部分设备和装置

Fig. 2 Part of the equipment required for the tests

阻率的试样(A 组和 17#、18#、19#)两侧设置铜电极并用保鲜膜包裹,其他试样直接用保鲜膜包裹;(3)对需施加位移约束的试样进行约束装置组装,使用 25 N·m 扭矩扳手拧紧所有固定螺栓,确保各试样初始状态相同;(4)将试样放入低温试验箱,连接电阻测试仪监测试样电阻,开始冻融循环;(5)冻融循环结束后取出试样,开展单轴压缩

试验;(6)试验前在试样表面均匀涂抹凡士林,以减小端部效应的影响。试验采用位移控制方式加载轴向应力,加载速率为 0.15 mm/min。

2 试验结果分析

2.1 砂岩电阻率变化规律

冻融循环过程中砂岩试样电阻率变化如图 4

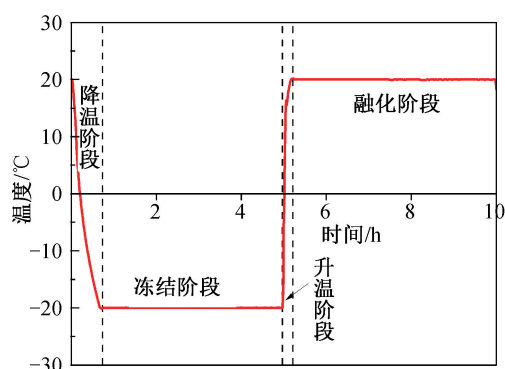


图3 单个冻融循环周期内温度变化

Fig. 3 Temperature variation within a single freeze-thaw cycle

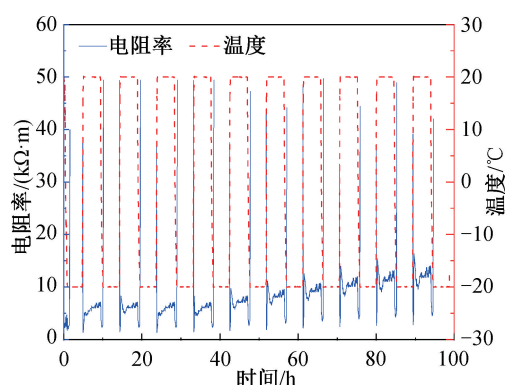


图4 冻融循环过程中砂岩试样电阻率变化

Fig. 4 Changes in resistivity of the sandstone specimen during freeze-thaw cycles

所示,部分数据因超出电阻测试仪量程($2.0 \text{ M}\Omega$)而缺失。试样电阻率随温度呈周期性变化,在降温阶段和冻结阶段,电阻率随时间的延长逐渐增大,直到超出测试仪量程,而在升温阶段和融化阶段则逐渐减小并趋于稳定。降温阶段电阻率增大,是因为温度降低后试样孔隙水中带电离子运动速度降低,导电性下降,电阻相应增大;孔隙水逐渐冻结成冰,而固态冰的导电性远低于液态水。在升温阶段和融化阶段,试样的电阻减小主要原因是温度升高使孔隙水中带电离子运动速度加快,导电性增强;孔隙中的冰逐渐融化,孔隙水比例升高。

在单次冻融循环过程中,砂岩试样电阻率变化可分为6个阶段(图5)。阶段Ⅰ(升温阶段和融化阶段初期):试样平均温度升高,液态水占比升高,电阻率减小。阶段Ⅱ(融化阶段前期):阶段Ⅰ末期试样平均温度接近 0°C ,后续升温虽能提高孔隙水中带电离子运动速度,但孔隙水体积减小(4°C 时水的密度最大),导电网络连通性降低,电阻率增大。阶段Ⅲ(融化阶段中后期):试样电阻率缓慢减小并逐渐趋于稳定,该阶段试样平均温

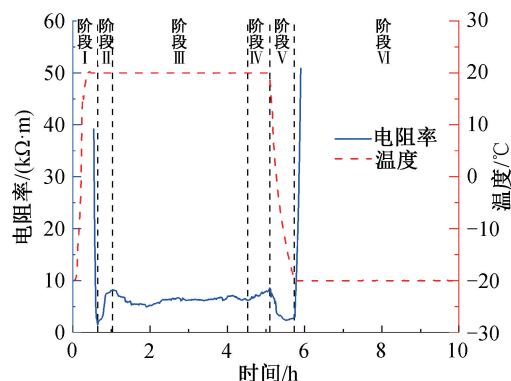


图5 单次冻融循环过程中砂岩试样电阻率典型变化

Fig. 5 Typical changes in resistivity of the sandstone specimen within a single freeze-thaw cycle

度高于 4°C ,升温使孔隙水体积增大,导电网络连通性增强。阶段Ⅳ(降温阶段):温度降低使孔隙水中带电离子运动速度下降,同时孔隙水体积逐渐减小,导电网络连通性降低,电阻率增大。阶段Ⅴ(降温阶段中后期):温度降低使孔隙水中带电离子运动速度下降,但试样平均温度低于 4°C ,孔隙水因冷胀效应体积增大,改善了导电网络的连通性,且该增强效应超过离子运动速度下降的影响,导致电阻率减小。阶段Ⅵ(降温阶段后期和冻结阶段):温度持续降低使孔隙水的带电离子运动速度下降,当温度降至 0°C 以下时,部分孔隙水冻结成冰,孔隙中的冰电阻率远大于水,电阻率快速增大。

本文选取阶段Ⅲ的平均电阻率为特征值,分析电阻率 ρ 随冻融循环次数的变化规律(图6)。电阻率随冻融循环次数增加基本呈线性增长,这是因为冻融循环次数增加使试样冻融损伤增强,试样微裂纹增多、储水空间增大,而孔隙水体积基本不变,导致部分裂隙充气,导电网络连通性降低。

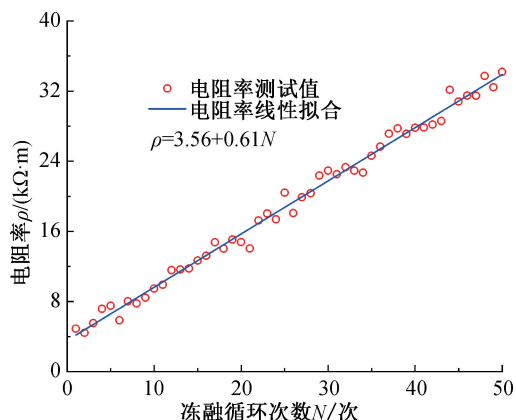


图6 电阻率随冻融循环次数的变化

Fig. 6 Variation of resistivity with the number of freeze-thaw cycles

2.2 单轴压缩变形特征

2.2.1 倾角对变形的影响

图7为位移约束条件下砂岩峰值位移随裂隙倾角的变化规律。由图7可知,砂岩峰值位移范围为1.44~1.63 mm,随裂隙倾角增大呈先增大后减小的趋势。该现象可归因于不同倾角下试样断裂裂纹扩展方向及破坏模式的差异,当裂隙倾角为30°、45°时,裂纹主要沿对角线方向扩展,破坏模式为以剪切裂纹为主的拉剪破坏;当倾角增至60°、75°、90°时,试样核心区压缩使两侧产生水平方向的张拉裂纹,剪切裂纹占比减少,破坏模式演变为以张拉裂纹为主的张拉破坏。破坏模式对比见图8,其中, F 为单轴压缩的轴向压力, τ 为剪切应力, σ 为张拉应力。在冻融循环过程中,位移约束导致约束方向上的岩石颗粒压密、孔隙体积减小,而张拉破坏的变形方向与试样约束方向平行。因此,倾角为60°、75°和90°的试样在变形方向上的微裂纹与孔隙较少,其峰值位移小于30°、45°倾角试样。45°倾角试样因预制裂隙与破坏裂纹走向一致,同等应力下更易变形,故其峰值位移最大。

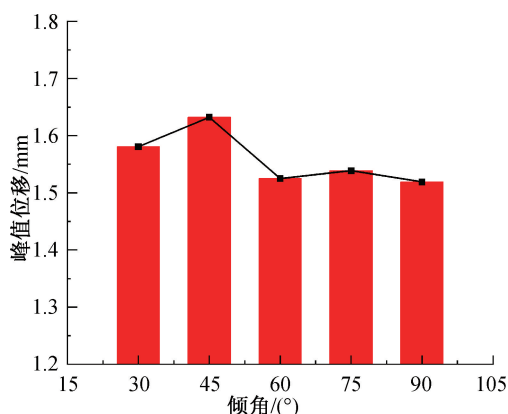


图7 位移约束条件下峰值位移随倾角的变化

Fig. 7 Changes of peak displacement with inclination angle under displacement constraints

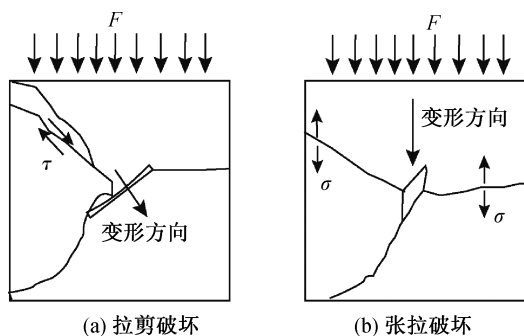


图8 破坏模式的变形方向对比

Fig. 8 Comparison of deformation directions for two failure modes

2.2.2 冻融循环次数对变形的影响

图9为不同加载方向下砂岩峰值位移随冻融循环次数的变化规律。约束方向和非约束方向加载时,峰值位移变化趋势相似,均随冻融循环次数的增加先减小后增大。原因在于:在冻融循环初期(0~30次),位移约束在一定范围内抑制了试样内部微裂纹扩展,使峰值位移减小;反复冻融循环(30~50次)作用导致试样内部损伤,微裂纹逐渐扩展,试样整体刚度降低,在压缩过程中产生更大的变形,从而使峰值位移增大。此外,当冻融循环次数不超过20次时,约束方向的峰值位移小于非约束方向,达到30次后则相反。分析其原因,冻融循环初期约束装置产生的约束反力使约束方向的颗粒压密程度高、变形小;而冻融循环次数达到30次后,约束反力增大反而促进了试样内微裂纹的扩展,导致约束方向产生更大的变形。

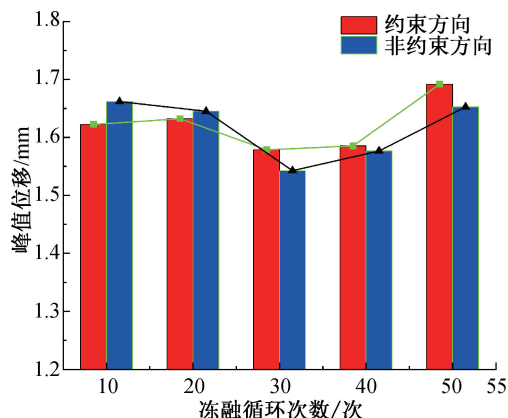


图9 不同加载方向上峰值位移与冻融循环次数的关系

Fig. 9 Relationship between peak displacement in different loading directions and the number of freeze-thaw cycles

2.3 单轴抗压强度特征

2.3.1 倾角对抗压强度的影响

图10显示,含裂隙试样冻融后的抗压强度显著低于完整试样,且随着裂隙倾角的增大,抗压强度呈先减小后增大的趋势,90°倾角试样的抗压强度最接近完整试样。分析发现,抗压强度变化规律与试样破坏模式的转变密切相关。倾角较小(30°、45°)时,剪切裂纹主导试样破坏,剪切应力是试样破坏的主要驱动力,试样的抗压强度较低;45°倾角试样预制裂隙与断裂裂纹的走向基本一致,削弱了试样的力学性能,抗压强度最低;倾角较大(60°、75°和90°)时,张拉裂纹成为主要破坏裂纹,剪切破坏占比逐渐减小,压缩应力引起的张拉破坏占比增加,从而显著提高了试样的单轴抗压强度。

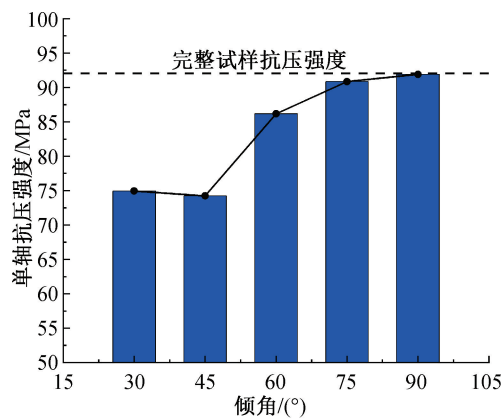


图10 位移约束条件下单轴抗压强度与裂隙倾角的关系

Fig. 10 Relationship between uniaxial compressive strength and fracture inclination angle under displacement constraints

2.3.2 冻融循环次数对抗压强度的影响

图11显示,冻融循环后试样抗压强度显著低于完整试样,且整体随冻融循环次数的增加呈下降趋势。这一现象表明,冻融过程加剧了试样内部的冻胀损伤。在位移约束条件下,抗压强度在20次冻融循环时小幅上升,这是因为冻融循环初期约束反力与约束方向平行(图12),相当于对试样提前施加了单轴压力,约束反力较小时使微裂隙闭合,从而减少了冻融循环过程中的损伤累积,提高了试样抗压强度。然而,约束反力继续增大导致试样裂隙进一步扩展,加剧了冻胀损伤,加速了抗压强度的劣化过程。由图11可知,冻融循环30次前,约束方向单轴抗压强度高于非约束方向;30次后则相反,且约束方向的变化幅度大于非约束方向。

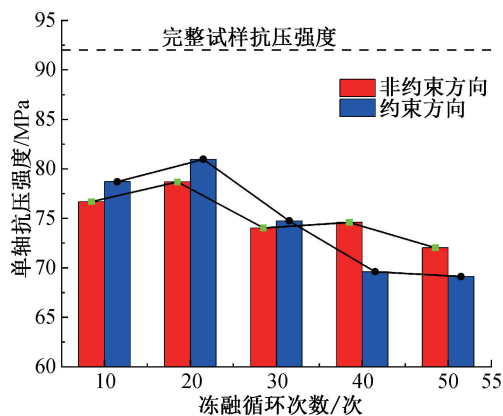
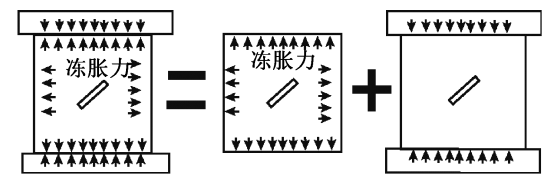


图11 不同加载方向上单轴抗压强度随冻融循环次数的变化规律

Fig. 11 Relationship between uniaxial compressive strength in different loading directions and the number of freeze-thaw cycles



(a) 位移约束冻融 (b) 无约束条件冻融 (c) 约束反力

图12 约束反力示意

Fig. 12 Schematic diagrams of the constraint reaction force

2.3.3 倾角对弹性模量的影响

由图13可知,位移约束条件下弹性模量随倾角增大呈先减小后增大的趋势。这是因为不同倾角试样的破坏模式存在差异。30°、45°倾角试样以剪切破坏为主,岩体抗剪强度较低,相同应力下变形更大,弹性模量较小,其中,45°倾角试样抗压强度最低,因此弹性模量最小;60°、75°、90°倾角试样均以核心区压缩引起的张拉破坏为主,且由张拉裂纹主导,岩石抗压强度显著高于抗剪强度,同等应力下变形量较小,因而弹性模量较高。

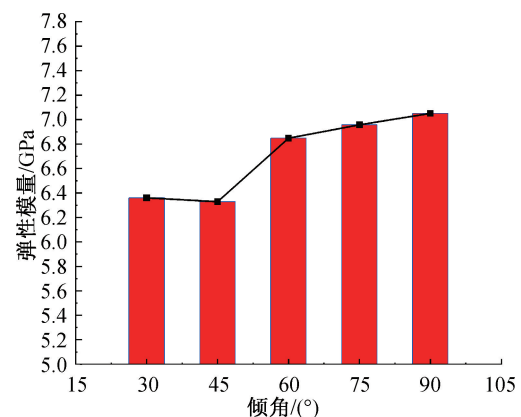


图13 位移约束条件下弹性模量与裂隙倾角的关系

Fig. 13 Relationship between elastic modulus and fracture inclination under displacement constraints

2.3.4 冻融循环次数对弹性模量的影响

图14显示,不同加载方向上弹性模量随冻融循环次数的增加总体呈下降趋势,但变化速率不同。非约束方向的弹性模量降幅较小,冻融循环50次后的累积降幅低于约束方向;约束方向的弹性模量在冻融循环30次前降幅较小,30次后加速下降,其中40~50次降幅较大,达8.05%。分析其原因,冻融循环30~50次的约束反力不断增大,对试样产生明显的预损伤,加剧了冻融循环的损伤累积,导致试样抗压强度和弹性模量显著降低。值得注意的是,冻融循环30次前,约束方向的弹性模量高于非约束方向;而30次后则相反。这表明冻融循环30次后持续增长的约束反力在试样内

(特别是约束方向)造成了一定程度的破坏,显著降低了弹性模量。

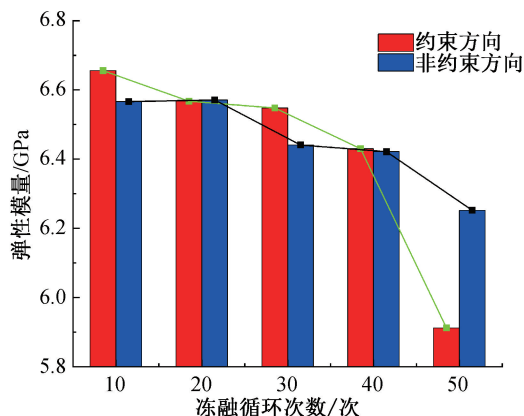


图 14 不同加载方向上弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig. 14 Relationship between elastic modulus in different loading directions and the number of freeze-thaw cycles

2.4 破裂演化规律与破坏模式

根据单轴压缩试验中试样破裂形态,分析裂隙扩展过程及破坏模式。单轴压缩下,裂隙砂岩的主要破坏形式为剪切和拉伸破坏。预制裂隙端部通常会萌生次生裂纹和翼裂纹,分别对应剪切作用和拉伸作用。2 种裂纹单独或共同作用使岩

体形成贯通裂隙并最终破坏^[27]。为研究不同裂隙倾角下断裂裂纹的扩展过程,本文选取位移约束条件下 A 组试样的破裂过程进行分析(图 15),不同倾角下裂纹扩展路径和破坏模式差异显著。

(1) 30°倾角试样

预制裂隙两端首先形成翼裂纹(裂纹 1、2)。随着荷载的增加,裂纹 1 向左上方扩展,裂纹 2 向右侧扩展。进一步加载后,试样顶部出现少量裂纹,裂纹扩展时局部碎块脱落,顶部裂隙明显扩展。随后,裂纹扩展速度加快,并逐渐转变为剪切裂纹。在裂纹 2 路径上形成向上的次生裂纹 3。最终,裂纹 1 下方局部岩石被压碎、挤出,并与顶部裂隙贯通;裂纹 2 在左侧破碎产生的张力作用下迅速延伸至试样边缘;裂纹 3 延伸至试样顶端,试样发生拉剪复合破坏。

(2) 45°倾角试样

预制裂隙端部首先形成裂纹 3、4,扩展路径与 30°倾角试样类似。随着荷载的增加,裂纹逐渐扩展,试样右侧顶部出现少量裂纹,在裂纹 3、4 扩展路径上出现碎块脱落。在裂纹 4 路径上形成次生裂纹 5,扩展方向几乎平行于裂纹 4。最终,裂纹 4

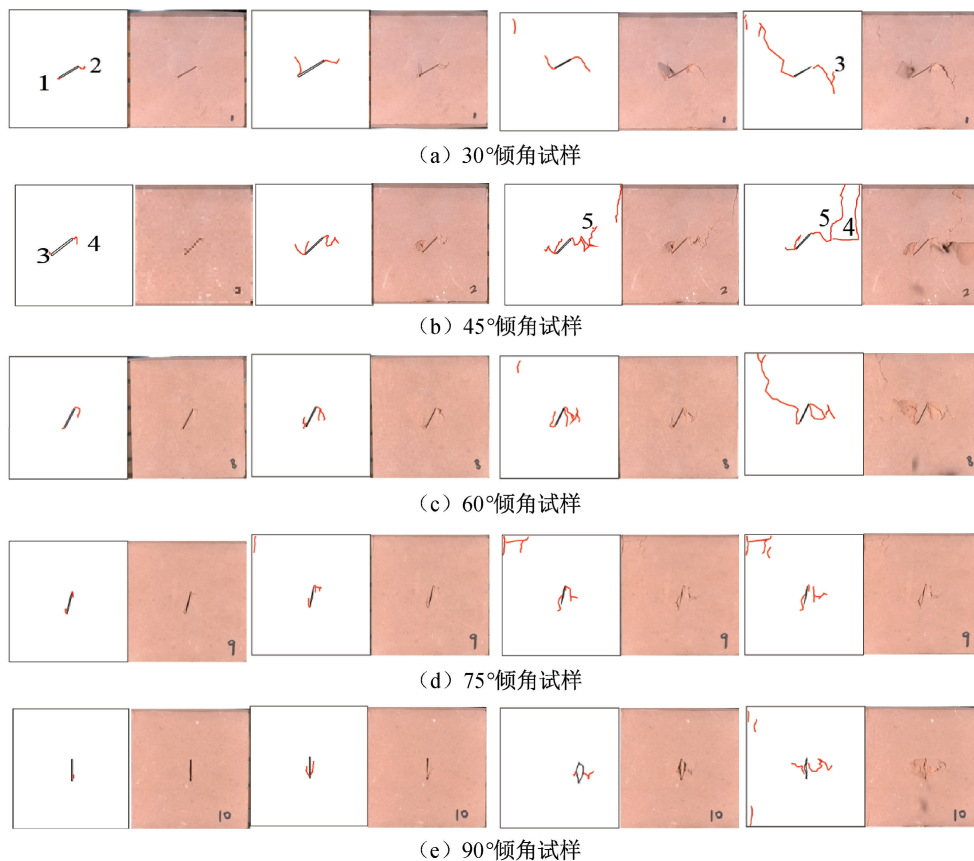


图 15 裂隙演化规律

Fig. 15 Fracture evolution

与顶部裂纹贯通,试样右侧局部区域被压碎,裂纹3和5贯通,试样破坏。

(3) 60°、75°倾角试样

60°、75°倾角试样相似,区别在于75°倾角试样脆性特征更明显。预制裂隙边缘首先产生多条裂纹,裂纹与预制裂隙的夹角明显减小。上部裂纹向右下方扩展,下部裂纹向左上方扩展。随着荷载的增加,裂纹与预制裂隙之间的块体被压碎、脱落,试样左上方顶部区域形成部分裂纹。最终,向左上方扩展的裂纹延伸至试样边缘,试样核心区域被压碎,右侧裂纹在张拉作用下瞬间贯通破坏。

(4) 90°倾角试样

预制裂隙上端、下端各形成2条裂纹,两两相交形成一个菱形区域。随着荷载的增加,菱形区域内试样破碎、脱落,裂纹在张拉力的作用下沿水平方向快速贯通,试样破坏。从裂纹出现到贯通极为短暂,表现出典型的脆性破坏特征。

对比发现,预制裂隙倾角对裂纹扩展方向和破坏过程具有显著影响。当倾角为60°、75°、90°时,裂纹的起裂角较小,扩展方向趋近于水平方向;当倾角为30°、45°时,裂纹的起裂角增大,沿试样对角线扩展。随着裂隙倾角的增加,裂纹扩展的阶段性特征逐渐弱化,破坏过程更接近脆性破坏。

将单轴压缩后的试样碎块拼接重组,得到试样的最终破坏形态(图16)。根据破坏形态,将试样破坏模式分为“Y型”和“X型”。“Y型”破坏

通常有3条主裂纹,其中1条裂纹率先扩展至试样边缘,与相邻裂纹围成的区域内形成多条次生裂纹,导致该区域压碎并挤出。同时,第3条裂纹在相对方向受到瞬时增大的张拉应力作用,快速扩展并贯通试样,最终形成“Y型”破坏特征。“X型”破坏模式在“Y型”基础上发展而成,是主要破坏形式。“X型”同样存在2条主裂纹围成的区域,同时在预制裂隙端部形成1条新的贯穿裂纹,其扩展速率显著提高,在极短时间内快速贯通试样。根据次生裂纹产生位置,将“X型”破坏分为2类:Ⅰ类次生裂纹产生于预制裂隙端部或边缘,扩展方向与之前3条裂纹皆不平行,将试样均匀分为4部分;Ⅱ类次生裂纹产生于裂纹扩展路径中,与之前的3条裂纹中的1条同向,破坏形态呈一侧破碎、另一侧较完整。

3 结论

本文通过制备含有预制裂隙的红砂岩试样,开展了冻融循环试验。基于试样电阻变化,分析了冻融循环过程中试样的损伤演化规律。冻融试验结束后,对试样进行了单轴压缩试验,研究了试样变形规律、强度特征及破裂过程,得到如下结论:

1)在冻融循环过程中,试样电阻率呈周期性变化:冻结阶段电阻率显著增加,融化阶段迅速恢复。随着冻融循环次数增加,试样内部导电性下降、电阻率增大。

2)在位移约束条件下,试样峰值位移随裂隙倾角的增大先增大后减小,在倾角为45°时达到最大值。在约束方向和非约束方向加载时,峰值位移变化趋势相似,总体上随冻融循环次数的增加先下降后上升。

3)在位移约束条件下,单轴抗压强度、弹性模量随倾角的增大先减小后增大,在倾角为45°时达到最小值。随冻融循环次数的增加,弹性模量逐渐降低,单轴抗压强度先升高后降低。当冻融次数不超过30次时,约束方向的单轴抗压强度和弹性模量均高于非约束方向;30次后则相反。

4)不同倾角的裂纹扩展方向不同,倾角越大破裂周期越短,扩展速度越快,脆性破坏特征越明显,试样越倾向于张拉破坏。根据最终破坏形态,可将试样破坏模式分为“X型”和“Y型”,其中“X型”是主要破坏模式。

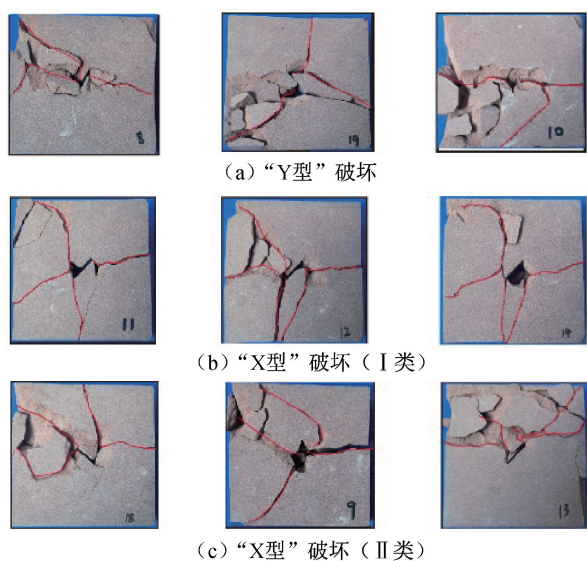


图16 破坏模式

Fig. 16 Failure modes

参考文献:

- [1] Zhu Jiebing, Xu Dongdong, Wang Bin, et al. A study on the freeze-thaw damage and deterioration mechanism of slope rock mass based on model testing and numerical simulation[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6545.
- [2] Liu Hongyan, Yuan Xiaoping, Xie Tiancheng, et al. A damage model for frost heaving pressure in circular rock tunnel under freezing-thawing cycles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 401-408.
- [3] 裴子豪, 谢勇, 沙琳川, 等. 冻融循环条件下覆盖型边坡破坏形式机理分析及冻融界面与滑动面位置关系研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2026, 43(2): 28-35+73.
Pei Zihao, Xie Yong, Sha Linchuan, et al. Failure mechanism analysis of covered slopes under freeze-thaw cycles and relationship between freeze-thaw interface and sliding surface [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2026, 43(2): 28-35+73.
- [4] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1530-1542.
Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Preliminary study of frost heave pressure and its influence on crack and deterioration mechanisms of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1530-1542.
- [5] 刘泉声, 康永水, 黄兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971-978.
Liu Quansheng, Kang Yongshui, Huang Xing, et al. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 971-978.
- [6] 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): 2000-2012.
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): 2000-2012.
- [7] 黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 78-84.
Huang Shibing, Liu Quansheng, Cheng Aiping, et al. Preliminary experimental study of frost heaving pressure in crack and frost heaving propagation in rock mass under low temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 78-84.
- [8] Tan Xianjun, Chen Weizhong, Liu Hongyuan, et al. A unified model for frost heave pressure in the rock with a penny-shaped fracture during freezing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 1-9.
- [9] 贾海梁, 赵思琪, 丁顺, 等. 含水裂隙冻融过程中冻胀力演化及影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1832-1845.
Jia Hailiang, Zhao Siqi, Ding Shun, et al. Study on the evolution and influencing factors of frost heaving force of water-bearing cracks during freezing-thawing process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1832-1845.
- [10] 田镇, 李银平, 王贵宾, 等. 饱水红砂岩裂隙冻胀力与变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2857-2868.
Tian Zhen, Li Yinping, Wang Guibin, et al. Experimental study on frost heaving force and deformation of water saturated red sandstone fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2857-2868.
- [11] 邹孔毅, 毛权生, 王恒, 等. 冻融作用下不同裂隙形态岩体损伤特性研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(12): 124-127+132.
Zou Kongyi, Mao Quansheng, Wang Heng, et al. Study on damage characteristics of rock mass with different cracks morphology under freeze-thaw action[J]. Modern Mining, 2023, 39(12): 124-127+132.
- [12] 裴向军, 蒙明辉, 袁进科, 等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1999-2006.
Pei Xiangjun, Meng Minghui, Yuan Jinke, et al. Freezing-thawing characteristics of fractured rockmass under dry and saturated conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1999-2006.
- [13] Zhang Guangze, Chen Guoqing, Xu Zhengxuan, et al. Crack failure characteristics of different rocks under the action of frost heaving of fissure water[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 13.
- [14] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076-3082.
Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082.

- [15] 田森,赵映,司鹄,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 of surface mine slope in cold region[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12):4687-4700.
- [16] 单仁亮,白瑶,孙鹏飞,等. 裂隙红砂岩冻胀力特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2019,44(6):1742-1752.
- Shan Renliang, Bai Yao, Sun Pengfei, et al. Experimental study on frost heaving pressure properties in fractured red sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6):1742-1752.
- [17] Lu Hanqing, Bao Weixing, Yin Yan, et al. Experimental study on multi-scale damage and deterioration mechanism of carbonaceous slate under freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023,82(12):458.
- [18] Haeri H, Shahriar K, Marji M F, et al. On the strength and crack propagation process of the pre-cracked rock-like specimens under uniaxial compression[J]. Strength of Materials, 2014,46(1):140-152.
- [19] 申艳军,杨更社,荣腾龙,等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(3):562-570.
- Shen Yanjun, Yang Gengshe, Rong Tenglong, et al. Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(3):562-570.
- [20] 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.
- [21] 路亚妮,李新平,肖桃李. 三向应力下裂隙岩石力学特性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013,35(9):91-95+106.
- Lu Yani, Li Xinping, Xiao Taoli. Mechanical characters and failure mechanism of fracture rock under triaxial loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(9):91-95+106.
- [22] 路亚妮,李新平,吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2014,35(6):1579-1584.
- Lu Yani, Li Xinping, Wu Xinghong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(6):1579-1584.
- [23] 朱昌星,安烨明,李伟东. 单轴压缩下透明类岩石损伤演化特征研究[J]. 实验力学, 2022,37(5):701-710.
- Zhu Changxing, An Yeming, Li Weidong. Research on damage evolution characteristics of transparent rock under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022,37(5):701-710.
- [24] Kang Zhiqiang, Wang Zhilei, Shao Luhang, et al. Surface crack evolution patterns in freeze-thaw damage of fissured rock bodies [J]. Journal of Mountain Science, 2024,21(9):3094-3107.
- [25] 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.
- [26] 陈海东. 冻融循环作用下裂隙灰岩物理力学特性及劣化机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
- Chen Haidong. Study on the physical and mechanical characteristics and deterioration mechanism of fractured limestone under freeze-thaw cycle [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [27] 赵娜,卫帅,王来贵,等. 含不同倾角单裂隙岩石单轴压缩破裂演化过程分析[J]. 实验力学, 2024,39(4):518-528.
- Zhao Na, Wei Shuai, Wang Laigui, et al. Analysis of fracture evolution process of single fractured rock mass based on uniaxial compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2024,39(4):518-528.

(责任编辑 张爱丽)