

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220816003

冻融作用下断续节理岩体损伤与力学特性研究*

龙士国, 徐继同, 李日进, 刘雪儿, 陈劲杰

(湘潭大学土木工程学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: 寒区断续节理岩体受冻融作用影响易发生失稳破坏。为探究冻融作用下节理特征对岩体损伤与力学特性的影响, 使用相似材料制备不同节理倾角、岩桥长度的断续节理试样, 并开展冻融循环试验。通过对冻融试样进行损伤分析与单轴压缩试验, 得到了各类试样的劣化损伤特性及其对抗压强度与破坏模式的影响规律。研究表明: 冻融作用下, 断续节理类岩石试样的劣化模式以片落模式为主, 裂纹模式为辅, 且不同节理特征试样间存在冻融损伤差异; 节理特征与片落损伤的关联较小, 但对裂纹扩展的影响显著, 节理倾角越大, 裂纹发育越不明显, 岩桥长度越短, 裂纹贯通越迅速, 裂纹扩展程度不同是造成试样间冻融损伤差异的主要原因; 在差异性冻融损伤的影响下, 各类试样的抗压强度普遍降低, 并随节理特征的变化表现出不同的强度损失规律; 试样破坏过程中延性增强, 节理尖端的拉伸裂纹减少、剪切裂纹增多, 部分类型试样的破坏模式与岩桥贯通模式发生改变。

关键词: 冻融循环; 断续节理; 损伤; 力学特性; 破坏模式

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0137-09

Study on Damage and Mechanical Properties of Intermittent Jointed Rock Mass under Freeze-thaw

LONG Shiguo, XU Jitong, LI Rijin, LIU Xueer, CHEN Jinjie

(College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The intermittent jointed rock mass in the cold region is prone to instability and failure under the influence of freezing and thawing. In order to investigate the influence of joint characteristics on the damage and mechanical properties of rock under freeze-thaw action, intermittent jointed samples with different joint dips and rock bridge lengths were prepared using similar materials, and freeze-thaw cycle tests were conducted. Through damage analysis and uniaxial compression test on the samples after freeze-thaw tests, the deterioration characteristics of various samples and their influence on the compressive strength and failure mode were obtained. The results show that the degradation modes of rock samples with intermittent joints are dominated by flake shedding, supplemented by sample cracking. There are differences in freeze-thaw damage between samples with different joint characteristics. The joint characteristics have little relationship with the shedding but significantly impact the crack propagation. The larger the joint inclination, the less the crack development, and the shorter the rock bridge

* 收稿日期: 2022-08-16; 修回日期: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908481)资助

作者简介: 龙士国(1972—), 男, 教授, 博导。主要从事土木工程质量安全评价技术与装备研发方面的研究。

E-mail: longsg@xtu.edu.cn

通讯作者: 徐继同(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土力学与防灾减灾工程研究。E-mail: 1248463799@qq.com

length, the faster the crack penetration. The different crack propagation degrees are the main reasons for the difference in freeze-thaw damage between samples. Under the influence of differential freeze-thaw damage, the compressive strength of all specimens generally decreases and shows different strength loss laws with the change of joint characteristics. In the process of specimen failure, the ductility is enhanced. The tensile cracks at the joint tip are reduced, and the shear cracks are increased. The failure mode of some types of specimens and the rock bridge penetration mode changes.

Keywords: freeze-thaw cycle; intermittent joint; damage; mechanical characteristics; failure mode

0 引言

我国寒区占地面积广阔,季节温差与昼夜温差大,寒区岩体长期受自然冻融循环作用,岩体内节理、裂隙等软弱结构面易加速扩展、贯通,导致岩体整体失稳,引发工程灾害^[1],因此开展冻融作用下节理裂隙岩体的损伤劣化研究显得尤其重要。

国内外学者针对冻融循环作用下完整岩石的损伤机理、影响因素、劣化模式以及物理力学性质已经进行了众多研究^[2-6],然而关于节理、裂隙岩体的冻融损伤研究仍处于探索阶段^[7-8]。秦世康等^[9]对岩石与岩体的物理力学性质、冻融损伤理论及裂隙扩展规律进行了系统性总结,指出了岩石与岩体冻融损伤机制的区别。D.T.Nicholson等^[10]对10种含缺陷岩石进行冻融循环实验,证明了岩石的岩性与原生缺陷是影响冻融损伤的重要因素,并归纳了四种岩石冻融劣化模式。刘泉声等^[11]认为裂隙岩体内水分的迁移与聚集冻胀是造成冻融损伤与裂隙扩展的主要原因,并根据岩体组织结构不同,分别用分凝冰理论和薄膜水迁移理论解释冻融循环作用下等效连续岩体与裂隙岩体中的水分迁移机制。乔国文等^[12]通过试验证明岩体的冻胀变形性质由裂隙特征决定,岩体的冻融破坏受裂隙水的相变及入渗作用直接影响。李新平等^[13-15]研究了冻融循环次数和裂隙特征对单裂隙岩体强度与破坏模式的影响,建立了单裂隙岩体在冻融荷载耦合作用下的损伤模型。申艳军等^[16]通过试验观测与理论分析,归纳并验证了冻融作用下单裂隙岩体的局部化损伤效应及其造成的端部断裂特性与扩展规律。刘红岩等^[17]研究了冻融作用下节理特征、饱和度、冻融次数等因素对岩体损伤破坏模式、抗压强度和弹性模量的影响。李平等^[18]研究了不同岩桥倾角的双裂隙类砂岩试样在冻融循环作用下的强度损失情况、裂纹扩展规律以及断裂破坏特征。

总体看来,国内外学者关于节理裂隙岩体冻融损伤方面的研究主要以单裂隙岩体和贯通节理岩体为研究对象,针对断续节理岩体的研究相对较少,然而,岩体露头调查表明,相比于单裂隙岩体和贯通节理岩体,断续节理岩体在岩土工程中更为常见^[19],且断续节理岩体的结构面多、产状复杂,冻融作用下,其结构面更易扩展贯通,造成岩体失稳破坏,危害工程安全。因此,研究冻融作用下断续节理岩体的损伤与力学特性对我国寒区工程建设与安全运营有重要意义。

本文使用相似材料制备了8类不同节理倾角、岩桥长度的断续节理试样,并开展冻融循环试验,通过对冻融0、20、40、50次的试样进行形态特征分析和扫描电镜(SEM)测试,探究了各类试样的劣化损伤特性,了解了试样微观结构的损伤演化规律;并通过单轴压缩试验,重点研究了冻融损伤对各类断续节理试样抗压强度和破坏模式的影响。

1 试验概况

1.1 试样制作

在天然岩石中预制具有不同几何特征的断续节理较为困难,且成本较高,因此根据相似原理和大量前人实践经验^[13-18],本文选用水泥砂浆作为相似材料制作含断续节理的类型岩石试样,经过多次试验,确定配合比为:水泥:石英砂:水=10:8:3.5。对完整类岩石试样进行物理力学参数测试,将所得参数的平均值与砂岩的相关参数做对比,见表1。可以看出,两者具有较好的相似性。

为制备尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的断续节理类岩石试样,选用内径50 mm、高110 mm的PVC直管作为模具主体,将 $\Phi 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 和 $\Phi 70\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的亚克力圆盘粘结在一起作为模具底座;用小型电磨机在模具预设节理位置切割裂缝;然后用聚乙烯薄膜包裹0.5 mm厚的铝片,将铝

表1 类岩石与砂岩的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock-like material and sandstone

| 材料类型 | 自然密度/ (g·cm ⁻³) | 抗压强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 弹性模量/ GPa | 泊松比 |
|------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| 类岩石 | 2.04 | 40.84 | 3.19 | 3.53 | 0.23 |
| 砂岩 | 2.20~2.71 | 20~170 | 2~25 | 3~35 | 0.1~0.3 |

片插入裂缝,并用热熔胶固定;最后在模具中浇筑水泥砂浆,振捣,静置24 h后脱模,并将试样放入养护箱中养护28 d。如图1所示,本文共制备了8类不同节理特征的断续节理试样,其中W为完整试样,A1~A5试样的节理倾角不同,分别为0°、30°、45°、60°、90°;A6、A3、A7试样的岩桥长度不同,分别为6、12、18 mm;所有试样的节理长度与厚度均保持不变,分别为12、0.5 mm。

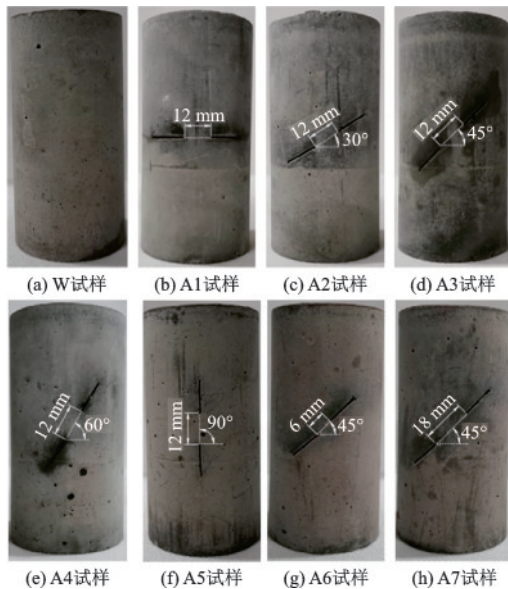


图1 完整及断续节理试样

Fig.1 Intact and intermittent jointed samples

1.2 试验方案

对养护完成的试样进行筛选,首先排除表面不平整、节理处有缺陷的试样,然后通过超声波检测,去除波速差异较大的个体。经筛选后,得到8类不同节理特征的断续节理试样共计96块,将其分为4组,每组24块试样(每类试样各3块),分别进行0、20、40、50次冻融循环试验。冻融循环设备使用TDR-V9型快速冻融试验机,冻融循环温度设置为-20~+20 °C,循环周期为8 h,其中冻4 h,融4 h。

冻融完成后,观测并记录各类试样的表面形态特征变化,然后使用CMT5105型微机控制电子万能试验机对冻融试样进行单轴压缩试验,试验采用轴向位移控制,位移速率为0.15 mm/min,最后采集完整试样的单轴压缩碎片进行SEM测试。

2 损伤演化规律

2.1 宏观——形态特征变化

经历50次冻融后,各类断续节理试样的典型形态特征如图2所示。由图2可知:

(1)断续节理类岩石试样的劣化模式以片落模式为主、裂纹模式为辅^[7]。冻融50次后,各类试样表面均能观察到明显的片落损伤和“起酥皮”现象,片落范围覆盖试样表层全部区域且有向内部层层加深的发育趋势;试样节理处损伤最为严重,节理周边因发生环绕节理的层状片落,形成椭圆形凹陷,节理尖端则在冻胀拉应力作用下,出现裂纹扩展现象^[16, 18],且节理处的层状片落与冻胀裂纹均随试样节理特征的变化呈现出不同的损伤形态。整体看来,不同节理特征试样间存在明显的冻融损伤差异,考虑到各类试样的片落损伤程度较为接近,且节理处的层状片落损伤仅存在于试样表面较浅范围内,因此,节理尖端裂纹扩展程度的不同是造成试样间冻融损伤差异的主要原因。

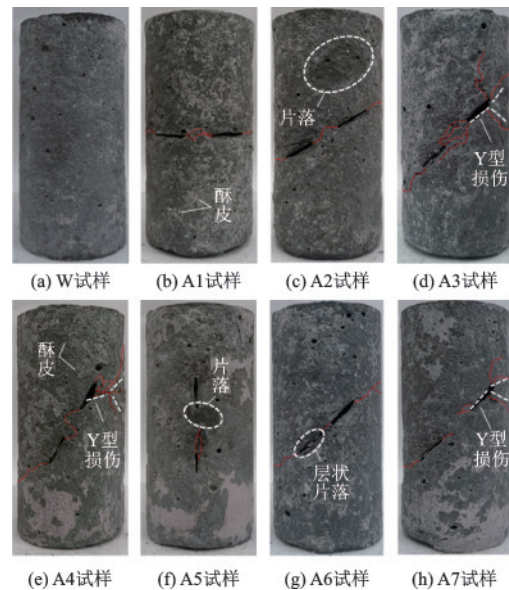


图2 50次冻融试样的形态特征

Fig.2 Morphological characteristics of samples after 50 freeze-thaw cycles

(2)对节理倾角不同的断续节理试样,节理倾角越大,节理尖端的冻胀裂纹发育越不明显^[16]。冻融50次后,节理倾角为0°、30°的试样岩桥均已被裂纹贯通,部分试样沿裂纹发生断裂破坏,然而90°试样的岩桥普遍未贯通;节理倾角为45°、60°的试样损伤特征较为相似,节理内外端裂纹沿节理方向发育过程中均有向水平方向偏转的趋势,且有次生裂纹发育,在节理外部岩桥引起“Y”型损伤。

(3)对岩桥长度不同的断续节理试样,岩桥长度越短,节理尖端的冻融裂纹贯通越迅速。冻融50次后,岩桥长度为6 mm的试样,中部岩桥被裂纹轻松贯通,同时受节理周边层状片落的影响出现内陷现象;岩桥长度为18 mm的试样,中部岩桥较长,其上虽有裂纹发育,但始终未被贯通,外部岩桥较短,有多条裂纹自节理尖端发育并贯通岩桥。

2.2 微观——SEM 图像分析

为研究冻融过程中类岩石试样的微观结构变化^[20-21],取0、20、40、50次冻融后完整试样的单轴压缩碎片进行SEM测试,得到SEM图像如图3所示。分析可知,未冻融试样的石英砂颗粒被胶结材料均匀包裹,颗粒间联系紧密,孔隙较少且未见明显连通;随着冻融次数的增加,石英砂颗粒由光滑变得粗糙并出现破碎趋势,颗粒间的胶结作用减弱,孔隙逐渐增多并相互连通,试样的微观结构越来越稀疏。由图3(d)可知,经历50次冻融后,石英砂颗粒出现明显破碎现象,颗粒间联系松散、孔隙密布,呈蜂窝状,试样的微观结构损伤十分严重。

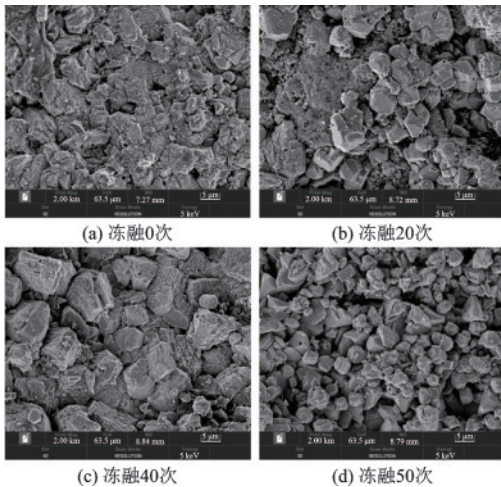


图3 不同冻融次数下试样电镜扫描图

Fig.3 SEM images of samples after different freeze-thaw cycles

3 力学特性分析

3.1 应力—应变曲线

图4给出了各类试样经过0、20、40、50次冻融后的应力—应变曲线。试样编号,如W-3-20,W代表试样类型,3代表该试样在同类型试样中的编号,20代表该试样经历过的冻融循环次数。

由图4可以看出:随着冻融次数的增加,各类试样的应力—应变曲线表现出相似的演化规律,具体表现为压密阶段变长,达到相同应力时的应变增大;弹性变形阶段由陡变缓,应力增长速度减慢;裂纹发展阶段由平滑变得紊乱,应力跌落现象频发;破坏阶段峰值减小,应力由骤降变为阶梯式降低。由此可以得知:冻融过程中,试样的密实度、弹性模量和抗压强度均不断降低,延性逐渐增强。

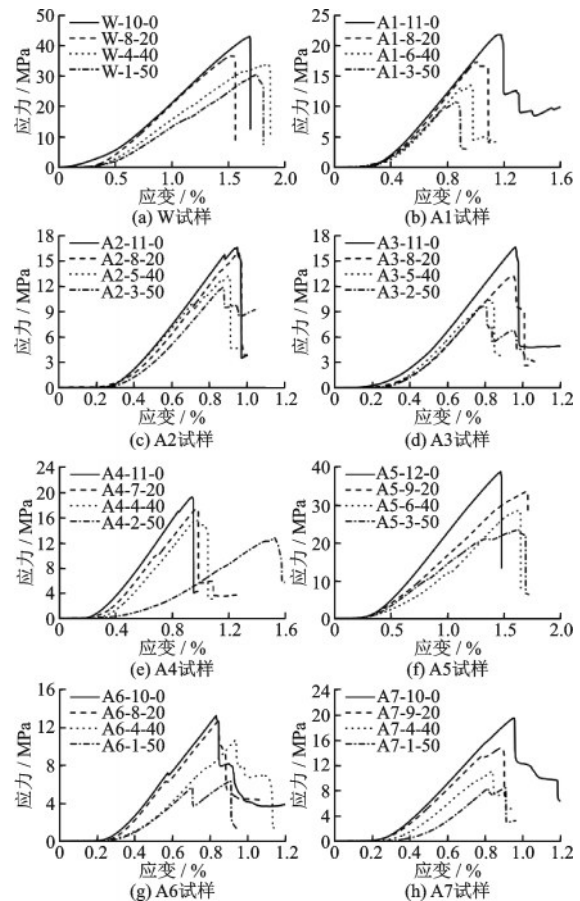


图4 不同冻融次数下试样的应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of intact specimens after different freeze-thaw cycles

3.2 抗压强度

图5和表2分别给出了不同冻融循环次数下各类试样的单轴抗压强度和抗压强度损失率。抗压强度损失率按下式计算：

$$C_f = \frac{\sigma_c - \sigma_{cf}}{\sigma_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_f 为抗压强度损失率; σ_c 为冻融前试样的单轴抗压强度; σ_{cf} 为冻融后试样的单轴抗压强度。

由图5(a)可知,冻融过程中,断续节理试样的抗压强度随节理倾角的变化规律基本保持不变,节理倾角从 0° 增大到 45° 的过程中,抗压强度小幅降低,减少了3.06~6.6 MPa,从 45° 增大到 90° 的过程中,抗压强度大幅提升,增加了11.19~19.49 MPa,在整体上呈现出近似“√”型的变化规律;试样的抗压强度分别在节理倾角为 90° 和 45° 时取得最大值和最小值,最小值不足最大值的1/2,两者相差可达19.49 MPa,可见在节理倾角影响下,试样的抗压强度表现出明显的差异性;随着冻融次数的增加,试样的抗压强度普遍降低,其中节理倾角为 0° 和 90° 的试样强度降低最为明显。

由图5(b)可知,相同冻融次数下,断续节理试样的抗压强度随着岩桥长度的增大而增大,且增量不断提高,岩桥长度从6 mm增大到12 mm的过程中,抗压强度增加了0.16~1.33 MPa,增量较小,从12 mm增大到18 mm的过程中,抗压强度增加了2.26~5.99 MPa,增量较大;随着冻融次数的增加,试样的抗压强度不断降低,岩桥长度为18 mm的试样强度降低最为明显,经历50次冻融后,其抗压强度减少了8.00 MPa。

由表2可知,随着冻融次数的增加,各类断续节理试样的抗压强度损失率逐渐增大。经历20次冻融后,各类试样的抗压强度较未冻融时略有降低,强度损失率均在10%以下,为3.85%~9.79%;经历40次冻融后,各类试样的强度损失开始展现出差异性,W试样的强度损失率最小,仅为10.60%,A2、A4和A5试样的强度损失率较小,在14.8%~15.78%,A1、A3和A7试样的强度损失则较为明显,损失率均在24%左右;经历50次冻融后,除W试样强度损失率仍较小外,其余断续节理试样的抗压强度损失率均超过1/4,在25.73%~41.24%。

归纳可知:断续节理的存在会大幅降低冻融试样的抗压强度;冻融次数越多,断续节理造成的强度损失越明显;不同节理特征的断续节理试样,强

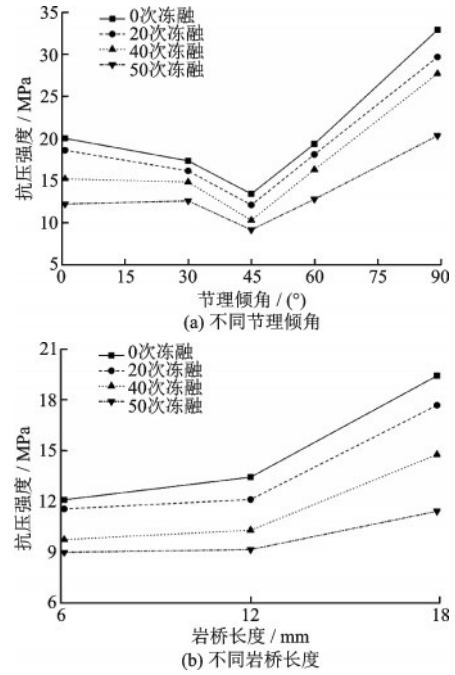


图5 不同冻融次数下试样的抗压强度

Fig.5 Compressive strength of samples after different freeze-thaw cycles

表2 冻融作用下试样抗压强度损失率

Table 2 Compressive strength loss rate of samples after freezing and thawing tests

| 试样类型 | 抗压强度损失率 C_f / % | | | 试样类型 | 抗压强度损失率 C_f / % | | |
|------|-------------------|-------|-------|------|-------------------|-------|-------|
| | 20次 | 40次 | 50次 | | 20次 | 40次 | 50次 |
| W | 3.85 | 10.60 | 17.80 | A4 | 6.36 | 15.77 | 33.92 |
| A1 | 7.05 | 24.04 | 39.03 | A5 | 9.79 | 15.78 | 38.21 |
| A2 | 6.92 | 14.48 | 27.39 | A6 | 4.47 | 19.47 | 25.73 |
| A3 | 9.77 | 23.34 | 31.84 | A7 | 8.97 | 24.00 | 41.24 |

度损失规律不同。导致这些现象的原因是:断续节理的存在为受荷作用下试样的裂纹扩展提供了薄弱路径,从而大幅降低试样抗压强度;冻融作用不仅使试样出现了诸如颗粒间胶结减弱,孔隙率增大等在内受冻融次数影响的整体损伤,还在断续节理处引起了局部化损伤,如层状片落和冻胀裂纹,节理处冻胀裂纹的扩展受节理特征控制,因此断续节理试样的抗压强度随冻融次数的增加而减小,不同节理特征的断续节理试样,强度损失规律不同。

3.3 弹性模量

表3给出了不同冻融次数下各类试样的弹性模量,由表3可知,弹性模量随节理特征的变化规律与抗压强度随节理特征的变化规律基本一致,但弹性

模量对试样局部化损伤的敏感度更高,因此其数据离散性较大,规律性相对较差;冻融过程中,各类试样的弹性模量均不断减小,但完整试样的弹性模量始终高于断续节理试样,可见断续节理的存在对试样的弹性模量有明显的削弱作用;经历50次冻融后,受断续节理试样间的冻融损伤差异影响,各类试样的弹性模量损失也表现出明显差异,损失量在0.29~0.59 GPa,节理倾角为90°的试样弹性模量损失最小,岩桥长度为18 mm的试样弹性模量损失最大。

表3 冻融作用下试样弹性模量

Table 3 Elastic modulus of samples after freezing and thawing tests

| 试样 类型 | 弹性模量/GPa | | | |
|----------|----------|------|------|------|
| | 0次 | 20次 | 40次 | 50次 |
| W | 3.31 | 3.13 | 2.91 | 2.72 |
| A1 | 2.81 | 2.75 | 2.55 | 2.35 |
| A2 | 2.92 | 2.72 | 2.66 | 2.49 |
| A3 | 2.65 | 2.48 | 2.41 | 2.23 |
| A4 | 2.86 | 2.80 | 2.74 | 2.34 |
| A5 | 2.89 | 2.79 | 2.80 | 2.60 |
| A6 | 2.29 | 2.25 | 2.15 | 1.76 |
| A7 | 2.90 | 2.76 | 2.59 | 2.31 |

3.4 破坏模式

冻融前后各类断续节理试样的破坏模式如图6所示,用T-1、S-2等标记表示裂纹的类型以及发育顺序,其中字母T、S分别代表拉伸裂纹与剪切裂纹,数字1、2代表裂纹的发育顺序,数字越小代表裂纹越先发育,数字相同代表裂纹发育时间较为接近。由图6可以看出:

(1)W试样的破坏模式为劈裂破坏,如图6(a)所示,拉伸裂纹沿主应力方向迅速贯通、破坏试样。随着冻融次数的增加,竖向拉伸裂纹的数量增多,贯通速度减慢,试样由脆性破坏向延性破坏转变,部分试样局部出现剪切裂纹,但试样破坏的主要原因仍是竖向拉伸裂纹的贯通,破坏模式并未改变。

(2)A1试样的破坏模式为劈裂破坏,如图6(b)所示,拉伸裂纹自节理尖端或中部发育向试样底部与顶部贯通,造成试件劈裂破坏。随着冻融次数的增加,节理内端拉伸裂纹数目减少,延性增强。

(3)A2试样的破坏模式为张拉剪切破坏,岩桥贯通模式为间接拉剪贯通,如图6(c)所示:拉伸裂

纹自节理中部或尖端依次萌发,沿垂直于节理的方向发展,向试件顶部、底部贯通,随后次生剪切裂纹自节理内外端同时发育,外端裂纹迅速贯通试块,内端裂纹与垂直于节理的拉伸裂纹搭接,使中部岩桥间接贯通,试样在张拉与剪切裂纹共同作用下贯通破坏。随着冻融次数的增加,节理内端拉伸裂纹数目减少,延性增强。

(4)A3试样的破坏模式为张拉剪切破坏,岩桥贯通模式随冻融次数的增加由间接拉剪贯通变为直接剪切贯通,如图6(d)所示:拉伸裂纹自节理尖端依次萌发,沿垂直于节理的方向发育并逐渐向最大主应力方向偏转,随后次生剪切裂纹自节理内外端萌发,外端裂纹有所发育但并未贯通,内端裂纹在冻融0次时与垂直于节理的拉伸裂纹搭接贯通,在冻融50次时,与节理直接贯通,岩桥贯通模式发生改变,岩桥贯通后,拉伸裂纹迅速贯通至试样顶部与底部,造成试样破坏。

(5)A4试样的破坏模式随冻融次数的增加由张拉剪切破坏变为剪切破坏,岩桥贯通模式为直接剪切贯通,如图6(e)所示:在冻融0次时,拉伸裂纹自节理尖端萌发,随后,与节理共面的剪切裂纹自节理尖端发育,拉伸裂纹与剪切裂纹分别贯通试样顶部、底部及中部岩桥,导致试样破坏;在冻融50次时,拉伸裂纹自节理尖端萌发,但延伸距离较短,开度较小,随后,与节理共面的剪切裂纹自节理尖端发育分别贯穿试样的顶部、底部与中部岩桥,试样受剪破坏。

(6)A5试样的破坏模式为劈裂破坏,如图6(f)所示,拉伸裂纹沿主应力方向自上而下经过节理与中部岩桥贯通试样,但贯通裂纹并未沿节理面将节理与中部岩桥全部贯通、将试样一分为二,而是与完整试样类似,破碎后仍保持较好的一体性。随着冻融循环次数的增加,裂纹数目增多,扩展速度变慢,试样脆性减弱、延性增强。

(7)A6试样的破坏模式为张拉剪切破坏,岩桥贯通模式为直接剪切贯通,如图6(g)所示:拉伸裂纹自节理尖端萌发,沿垂直于节理的方向向上下底面贯通,随后与节理共面的次生剪切裂纹自节理内外端发育,拉伸裂纹与剪切裂纹分别贯通试样上部区域以及中部和左侧岩桥,造成试样破坏。随着冻融循环次数的增加,节理尖端拉伸裂纹的发育程度逐渐降低。

(8)A7试样的破坏模式为剪切破坏,岩桥贯通

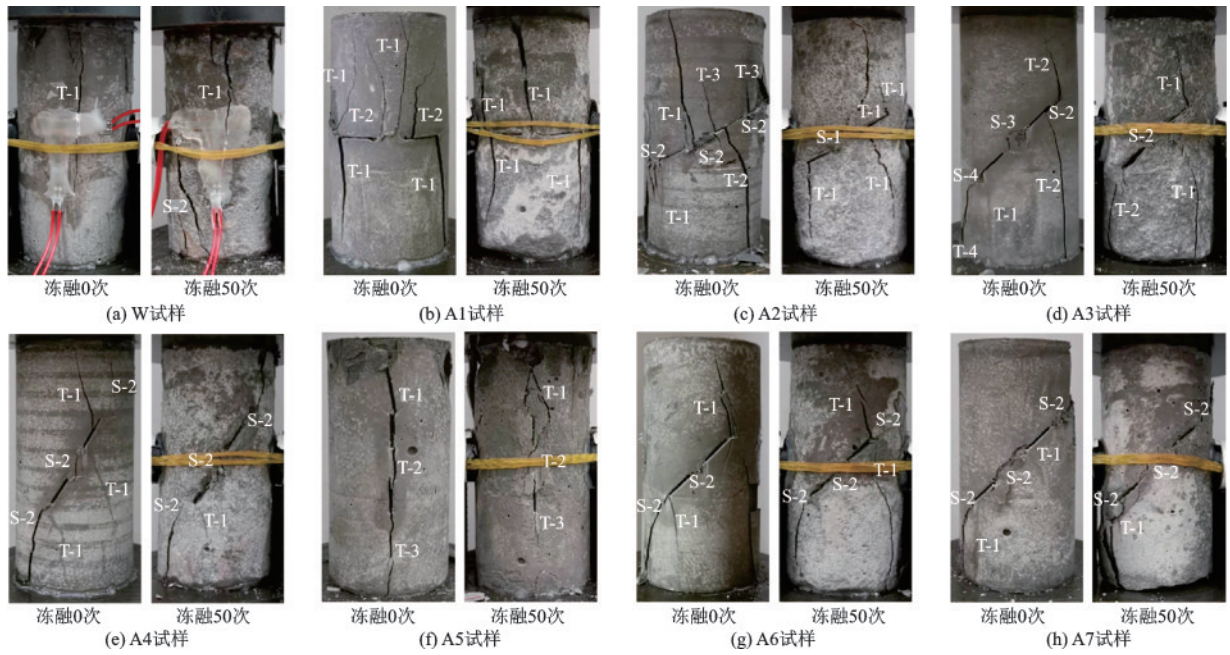


图6 冻融前后试样的破坏模式

Fig.6 Failure mode of samples before and after freeze-thaw tests

模式为直接剪切贯通,如图6(h)所示:拉伸裂纹自节理尖端萌发,但尚未充分发育,与节理共面的次生剪切裂纹便直接沿节理面贯通试样。随着冻融循环次数的增加,节理尖端拉伸裂纹的发育程度逐渐降低。

综上所述:冻融过程中,节理特征始终是断续节理试样破坏模式的主导控制因素;随着冻融次数的增加,试样颗粒间胶结强度减弱、孔隙率增大,试样的破坏过程由脆性向延性转变;受节理处片落损伤与冻胀裂纹的影响,节理尖端在受荷作用下的应力集中效应减弱,因此破坏过程中节理尖端产生的拉伸裂纹数目逐渐减少、发育程度逐渐降低;同时受冻胀裂纹在试样节理间扩展与贯通的影响,试样破坏过程中剪切裂纹增多,部分类型断续节理试样的破坏模式与岩桥贯通模式发生改变。

4 结论

(1)冻融作用下,断续节理类岩石试样的劣化模式以片落模式为主,裂纹模式为辅,不同节理特征试样间存在冻融损伤差异。

(2)冻胀裂纹扩展受节理特征影响,节理倾角越大,裂纹发育越不明显;岩桥长度越短,裂纹贯通越迅速,裂纹扩展程度不同是造成试样间冻融损伤差异的主要原因。

(3)差异性冻融损伤作用下,各类试样的抗压强度普遍降低,并随节理特征的变化表现出不同的强度损失规律;试样破坏过程中延性增强,节理尖端的拉伸裂纹减少、剪切裂纹增多,部分类型试样的破坏模式与岩桥贯通模式发生改变。

(4)断续节理岩体的节理特征复杂,本文仅讨论了节理倾角和岩桥长度两个特征参数,有必要考虑节理的含水率、厚度和填充物等其他特征参数,对断续节理岩体裂纹扩展和强度损失机制的影响,总结危险节理类型,为寒区工程建设与安全运营提供参考依据。

参考文献:

- [1] 姚青,郑达,王宇,等.高寒山区深切河谷碎裂松动岩体成因机制分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):706-713.
Yao Q, Zheng D, Wang Y, et al. Genetic mechanism of cataclastic loose rock mass in the alpine mountain regions and deep valley[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 706-713. (in Chinese)
- [2] 廖浩浩,陈有亮,李诗铭,等.化学溶蚀及冻融循环作用下砂岩的力学特性研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):1009-1017.
Liao H H, Chen Y L, Li S M, et al. Mechanical prop-

- erties of sandstone under freeze thaw cycling and chemical corrosion[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1009-1017. (in Chinese)
- [3] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 140-145, 151. Zhang H M, Yang G S. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2011, 40(1): 140-145, 151. (in Chinese)
- [4] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688-1694. Zhang J Z, Miao L C, Yang Z F. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1694. (in Chinese)
- [5] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2433-2442. Fang Y, Qiao L, Chen X, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottos [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2433-2442. (in Chinese)
- [6] 汤明高, 许强, 邓文锋, 等. 冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1917-1931. Tang M G, Xu Q, Deng W F, et al. Degradation law of mechanical properties of typical rock in Sichuan-Tibet traffic corridor under freeze-thaw and unloading conditions[J]. Earth Science, 2022, 47(6): 1917-1931. (in Chinese)
- [7] 杨志全, 甘进, 樊祥珑, 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 Z Q, Gan J, Fan X L, 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. (in Chinese)
- [8] 宋杰, 孟凡震, 岳祝凤, 等. 节理裂隙岩体力学特性的研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(5): 140-150, 154. Song J, Meng F Z, Yue Z F, et al. Research progress in mechanical properties of jointed and fractured rock mass[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(5): 140-150, 154. (in Chinese)
- [9] 秦世康, 陈庆发, 尹庭昌. 岩石与岩体冻融损伤内涵区别及研究进展[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(3): 385-397. Qin S K, Chen Q F, Yin T C. Connotation differences and research progress of the freeze-thaw damages of rock and rock mass[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(3): 385-397. (in Chinese)
- [10] Nicholson D T, Nicholson F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze - thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12): 1295-1307.
- [11] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 452-471. Liu Q S, Huang S B, Kang Y S, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 452-471. (in Chinese)
- [12] 乔国文, 王运生, 储飞, 等. 冻融风化边坡岩体破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 469-476. Qiao G W, Wang Y S, Chu F, et al. Failure mechanism of slope rock mass due to freeze-thaw weathering [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 469-476. (in Chinese)
- [13] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2307-2315. Li X P, Lu Y N, Wang Y J. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013, 32(11): 2307-2315. (in Chinese)
- [14] 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 Y N, Li X P, Wu X H. 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. (in Chinese)
- [15] 路亚妮, 李新平, 肖家双. 单裂隙岩体冻融力学特性试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 593-598, 649. Lu Y N, Li X P, Xiao J S. Experimental analysis on mechanical characteristic of single cracked rock mass under freeze-thaw condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 593-598, 649. (in Chinese)
- [16] 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 Y J, Yang G S, Rong T L, et al. Localized dam-

- age 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. (in Chinese)
- [17] 刘红岩, 刘冶, 邢闯锋, 等. 循环冻融条件下节理岩体损伤破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1547-1554.
Liu H Y, Liu Y, Xing C F, et al. Test study of damage failure of jointed rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1547-1554. (in Chinese)
- [18] 李平, 唐旭海, 刘泉声, 等. 双裂隙类砂岩冻胀断裂特征与强度损失研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 115-125.
Li P, Tang X H, Liu Q S, et al. Experimental study on fracture characteristics and strength loss of intermittent fractured quasi-sandstone under freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 115-125. (in Chinese)
- [19] 赵修成, 赵晓彦, 郭佳奇. 断续节理岩体声学力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1408-1419.
Zhao X C, Zhao X Y, Guo J Q. Experimental study on acoustic and mechanical properties of intermittent jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1408-1419. (in Chinese)
- [20] 杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 545-563.
Yang G S, Shen Y J, Jia H L, et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 545-563. (in Chinese)
- [21] 张娜, 赵伟征, 罗水亮, 等. 基于单轴压缩与扫描电镜实验的冻融红砂岩损伤特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 153-162.
Zhang N, Zhao W Z, Luo S L, et al. Research on damage characteristics of freeze-thawed red sandstone based on uniaxial compression and scanning electron microscopy experiments[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 153-162. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)