

文章编号:1007-9629(2026)01-0067-10

岩石-混凝土界面冻融损伤劣化特性及断裂机制

陆建友^{1,2,*}, 吴成森^{1,2}, 常旭³, 陈灯红^{1,2}

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:基于体积膨胀理论建立离散元数值模型,系统模拟岩石-混凝土界面在冻融循环与动态三点弯曲荷载耦合作用下的损伤破坏过程。结果表明:岩石-混凝土界面裂纹扩展经历缓慢增长、快速增长和失稳破坏3个阶段;断裂韧度对加载速率有明显依赖性,在低加载速率($v=0.5\sim 1.0$ m/s)下,断裂韧度呈“微增-骤降”特征,当加载速率提升至 $1.3\sim 1.7$ m/s时,断裂韧度表现出“激增-骤降”规律;应力强度因子的增长速率随冻融循环次数的增加总体上呈下降趋势。

关键词:冻融循环;岩石-混凝土界面;PFC^{2D}软件;三点弯曲;断裂韧度

中图分类号:TU528.53

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.01.007

Freeze-Thaw Damage Degradation Characteristics and Fracture Mechanism of Rock-Concrete Interface

LU Jianyou^{1,2,*}, WU Chengsen^{1,2}, CHANG Xu³, CHEN Denghong^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A discrete element numerical model was established based on the volume expansion theory, and the damage and failure process of the rock-concrete interface under the coupled action of freeze-thaw cycles and dynamic three-point bending load was systematically simulated. The results show that the crack propagation of the rock-concrete interface undergoes three stages: slow growth, rapid growth, and unstable failure; the fracture toughness has a significant dependence on the loading rate. At low loading rates ($v=0.5\sim 1.0$ m/s), the fracture toughness exhibits the characteristic of “slight increase-sharp decrease”. When the loading rate increases to $1.3\sim 1.7$ m/s, the fracture toughness exhibits a “sharp increase-sharp decrease” trend. The growth rate of the stress intensity factor shows a general downward trend with increasing number of freeze-thaw cycles.

Key words: freeze-thaw cycle; rock-concrete interface; PFC^{2D} software; three-point bending; fracture toughness

随着中国“一带一路”陆路通道、川藏铁路等寒区战略性基础设施建设的加速推进,提升极寒环境下岩土工程防护性能,已成为工程技术领域亟待攻克的关键课题。特别是在周期性冻融循环、施工爆破及地震等强动载作用下,岩石-混凝土界面结合区易发生微结构劣化。这不仅会降低复合结构的整体

承载性能,还会严重影响岩石-混凝土协同防护体系的耐久性与结构稳定性^[1]。因此,开展冻融循环与动态加载耦合作用下岩石-混凝土界面的断裂机制研究,具有重要的工程应用价值^[2]。

近年来,冻融损伤理论持续发展。早在 20 世纪中叶, Powers 等^[3-4]提出了渗透压与静水压双重作用

收稿日期:2025-04-10;修订日期:2025-07-03

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2024AFB286);宜昌市自然科学基金资助项目(A24-3-012);三峡大学人才科研启动基金资助项目(2023RCKJ0030)

第一作者(通讯作者):陆建友(1990—),男,河南信阳人,三峡大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail:jianyou.lu@ctgu.edu.cn

机制,为该领域研究奠定了基础。此后,诸多学者开展了深入探索:贾朝军等^[5]基于离散元构建岩石冻融损伤模型,揭示了冻融循环下裂纹的扩展规律;张继周等^[6]指出岩石损伤受孔隙率、温度梯度等多因素协同影响;宋勇军等^[7]耦合水-冰相变与膨胀效应,实现了岩石冻融损伤的细观力学表征;孙峤等^[8]通过多尺度试验发现,冻融作用会显著劣化砂岩的动态强度与微观结构。然而,上述研究均聚焦于单一材料,针对双材料岩石-混凝土在冻融循环与动态加载(简称冻融-动载)耦合条件下的相关研究则极为少见。

鉴于此,本文借助二维颗粒流分析软件PFC^{2D},模拟岩石-混凝土界面在冻融-动载耦合作用下的破坏过程,深入探究该界面的冻融损伤劣化特性及断裂机制。

1 PFC^{2D}软件冻融循环模拟

1.1 冻融循环模拟

采用PFC^{2D}软件构建了岩石-混凝土试样的二维数值模型,并基于体积膨胀理论模拟其冻融循环过程,具体机制为:当环境温度降至0℃以下时,试样内部的水颗粒发生冻结并产生体积膨胀,由此在颗粒间形成挤压力;若该挤压力超过岩石颗粒间的黏结强度阈值,则会导致颗粒间微裂纹萌生。值得注意的是,混凝土与岩石的裂纹萌生机制具有一致性,均由冻胀引起的挤压力超过材料内部黏结强度所触发。

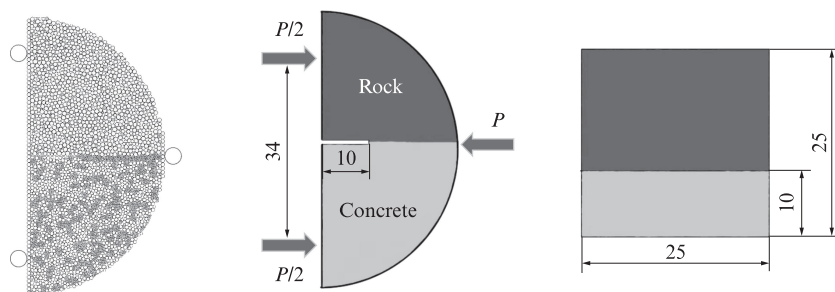


图1 动态加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic loading (size: mm)^[9]

表1 模型计算细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters for model calculation

Bond type	Contact modulus/GPa	Stiffness ratio	Friction coefficient	Parallel bond tensile strength/MPa	Parallel bond cohesion/MPa	Friction angle/(°)
Rock-rock	3.80	3.5	0.2	7.55	18.87	30
Mortar-mortar	0.95	3.5	0.5	4.60	7.36	45
Rock-water	2.80	0.5	0	150.00	150.00	0
Water-water	2.80	0.5	0	150.00	150.00	0
Mortar-water	2.80	0.5	0	150.00	150.00	0
Aggregate-water	2.80	0.5	0	150.00	150.00	0
Aggregate-aggregate	4.75	3.5	0.5	23.00	36.80	45
Aggregate-mortar	0.76	3.5	0.5	3.68	5.89	45

1.2 冻融循环作用后动态加载过程模拟

采用PFC^{2D}软件对完成冻融循环模拟的试样开展动态加载试验,示意图见图1。具体操作如下:在试样左侧距界面17 mm处、右侧界面处分别设置固定圆形约束墙体与加载圆形墙体;通过右侧加载墙体以不同速率施加水平载荷 P ,同时实时监测加载过程中墙体与颗粒间的接触压力,进而精确记录试样的动态受力响应。

1.3 双材料半圆盘试样数值模型的构建

首先,生成多种类型的clump(颗粒簇)模板;随后,创建岩石、混凝土及水颗粒,构建尺寸为50 mm×25 mm的双材料长方体试样,并在材料界面处添加名为“ate”的颗粒,同时调整界面处颗粒的尺寸及接触参数;接着,将混凝土材料中的骨料颗粒转换为clump结构,并进一步将clump骨料转化为可破碎的cluster骨料(簇状滑料)^[10];最终,通过删除部分颗粒的方式,将试样制备为带有10.00 mm×0.05 mm长方形裂缝的半圆盘试样。

1.4 模型参数的校准与评估

采用PFC^{2D}软件中的线性平行黏结模型,对颗粒间的接触行为展开模拟。在模拟过程中,针对岩石-岩石、砂浆-砂浆、岩石-水、砂浆-水、骨料-水、水-水、骨料-骨料和骨料-砂浆等不同类型颗粒间的接触情况进行设置,具体参数如表1、2所示。

表2 试样颗粒参数
Table 2 Particle parameters of sample

Particle type	Minimum radius/mm	Maximum radius/mm	Density/(kg·m ⁻³)
Rock	0.250	0.415	2.70
Mortar	0.200	0.320	2.50
Water	0.100	0.120	0.98
Clump aggregate	0.500	0.800	2.50
Cluster aggregate	0.100	0.100	2.50
Ate	0.170	0.170	2.50
Interface water	0.075	0.090	0.98

根据岩石、混凝土的单轴抗压强度(f_c)及其弹性模量(E)室内试验^[7,9,11]结果,通过标定未冻融原状岩石和混凝土的单轴应力-应变曲线,获得参数标定曲线,发现试验结果与模拟结果相对误差的绝对值小于6%(表3)。鉴于实际加载过程中,试样结构的承载机制源于岩石-混凝土复合骨架的本征强度特性,单轴压缩参数标定采用以下处理策略:(1)移除自由水相颗粒,确保强度表征严格对应固体骨架的承载路径;(2)为将冻融循环损伤萌生与扩展路径严格限定于岩石-混凝土颗粒接触体系,将涉及水颗粒接触的强度参数设定为足够大的数值^[7]。Maji等^[12]研究表明,岩石-混凝土接触界面断裂能低于混凝土基体材料断裂能的50%。李哲等^[13]在岩石-混凝土界面三点弯曲试验研究中发现,该界面的断裂韧度和断裂能约为混凝土材料的1/2。Kishen等^[14]通过界面断裂力学试验揭示了砂岩-混凝土复合结构的力学特性差异,界面区域破坏荷载值仅为混凝土本体的60%,断裂能更是低至混凝土材料的20%。基于上述研究,将界面力学参数设定为混凝土参数的0.5。在温度为-20~20℃、冻融循环次数(N)为0次的条件下,该界面过渡区(ITZ)宽度设定为60 μm^[15]。结合模型特点,另在岩石-混凝土界面处设置宽度为1 mm的ITZ,并为其添加“ate”颗粒,以提高含水量。针对混凝土内部,需添加可破碎骨料,其中,骨料与砂浆的接触参数设为混凝土的0.8,骨料内部的接触参数设为混凝土的5倍。

表3 岩石和混凝土的单轴抗压强度及弹性模量试验结果与模拟结果的比较

Table 3 Comparison of experimental and simulated results of uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock and concrete

Material	Index	Experimental result	Simulated result	Deviation/%
Rock	f_c /MPa	25.16	25.74	2.31
	E /GPa	4.35	4.19	3.68
Concrete	f_c /MPa	25.40	25.20	0.79
	E /GPa	2.65	2.50	5.67

为验证上述模拟结果的可靠性,将冻融岩石-混凝土试样的室内试验照片^[15]与模拟图形进行对比(图2)。由图2可见,试样室内试验结果与模拟结果的破坏模式高度一致,裂纹均由界面处向混凝土部逐步分扩展。

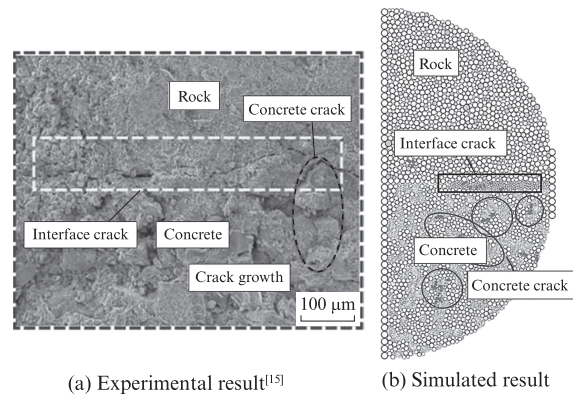


图2 试样室内试验结果与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of sample's experimental and simulated results

2 冻融循环数值模拟损伤分析

图3为试样内部裂纹数量与冻融循环次数的关系。由图3可见:试样内部裂纹随着冻融循环次数的增加分为缓慢增长、快速增长和失稳破坏3个阶段。

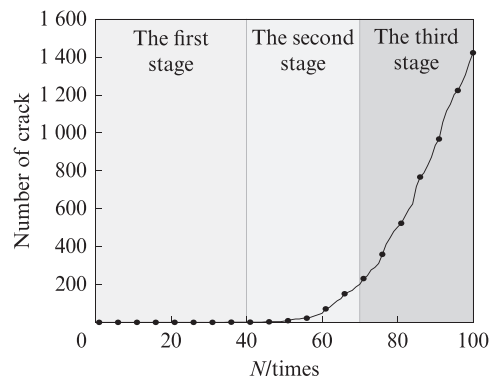


图3 试样内部裂纹数量与冻融循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between number of internal cracks in samples and number of freeze-thaw cycles

第1阶段($N \leq 40$ 次) 裂纹扩展速率较低,仅在材料界面区域形成少量微裂纹。此阶段冰晶生长引发的体积膨胀处于基质材料弹性变形范围内,当冰压力增量超过局部抗拉强度阈值时,动态平衡被打破,导致微裂纹萌生。该阶段损伤以界面弱结合区的水-力耦合作用为主。

第2阶段($40 \text{次} < N \leq 70 \text{次}$) 裂纹数量由初始值显著增至201个,呈现加速扩展趋势。微裂纹通过连接成核形成宏观裂纹,并持续向临界失稳阈值发展。此阶段冰晶压力场与材料抗拉强度间的相互作用增强,导致次生裂纹在基质材料内部持续萌生。

第3阶段($N > 70 \text{次}$) 裂纹数量呈指数级增长(达1 423个),细观损伤进入加速累积阶段。材料内部发生系统性结构失稳,主裂纹网络通过次级裂纹协同扩展实现贯通,最终形成具有空间连续性的贯

穿性损伤带。该阶段损伤演化由局部应力集中向整体结构失效转变。

图4为不同冻融循环次数下试样内部裂纹的分布。由图4可见:不同冻融循环次数下,试样内部裂纹的产生与分布呈现明显规律——当冻融循环次数达到40次时,混凝土区域的裂纹主要分布于骨料与砂浆之间^[16],原因是混凝土集料与水泥基体间存在ITZ,该区域为力学性能薄弱环节^[15]。此外,混凝土外侧受骨料分布影响,且外侧颗粒所受约束相较于内侧颗粒更少,导致外围颗粒位移最大,进而产生出微裂纹^[17];当冻融循环次数为60次时,岩石与混凝土的裂纹进一步发展,形成若干集中损伤区;当冻融循环次数达100次时,裂纹已遍布整个试样,混凝土区域的裂纹多分布于骨料周围^[18],且岩石-混凝土界面处的裂纹已贯穿整个界面。

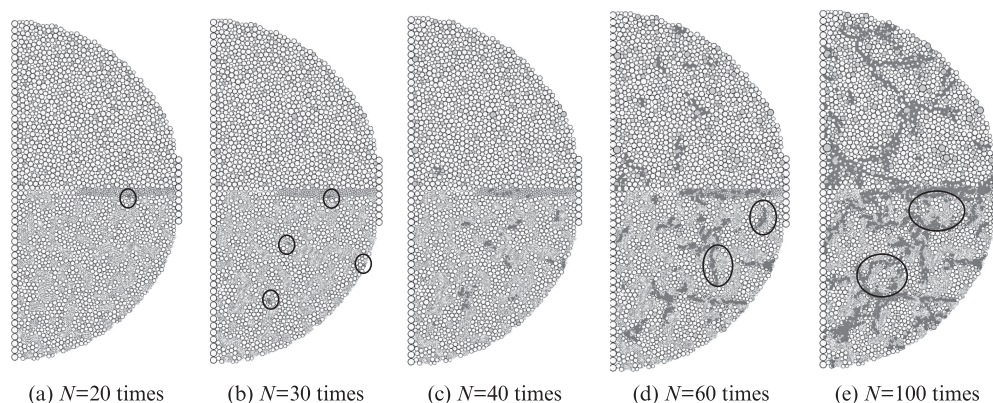


图4 不同冻融循环次数下试样内部裂纹的分布

Fig. 4 Internal crack distribution in samples under different freeze-thaw cycles

为评估冻融循环作用下试样裂纹的演变过程,对裂纹的数量与方向进行统计,结果绘于图5。由图5可见,当试样经历40~100次冻融循环时,其拉伸裂纹数量均远多于剪切裂纹,这表明冻融循环作用下,拉伸裂纹在裂纹中占主导地位。该结果与Winkler^[19]的试验结论一致,即岩石与混凝土在冻融循环作用下的破坏模式以拉伸破坏为主。

3 冻融循环作用下动态加载裂纹演化特征

3.1 动态加载后裂纹演化规律

图6为不同冻融循环次数下试样动态加载后的裂纹数量。由图6可见:(1)冻融循环显著加剧材料的脆性破坏,且破坏模式以拉伸裂纹为主导。在低加载速率($v=0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$)条件下,总裂纹数量随冻融循环次数增加而增多,且拉伸裂纹占比达90%以上。(2)裂纹数量与加载速率呈正相关。对于低冻融循环次数组($N=0 \sim 30 \text{次}$),当加载速率从 1.0 m/s

增至 1.3 m/s 时,裂纹数量增幅随冻融循环次数增加呈非线性增长特征,其中0、10、20、30次冻融对应的增幅分别为128.12%、109.09%、176.00%、79.48%,对于高冻融循环次数组($N=40 \sim 60 \text{次}$),加载速率提升对裂纹数量的促进效应减弱,40、50、60次冻融对应的增幅分别降至20.10%、12.93%、7.29%,表明材料因损伤累积,对加载速率的敏感性降低。(3)当 $N=30 \text{次}$ 且 $v=1.3 \text{ m/s}$ 时,裂纹数量增长率出现显著突变(较 $v=1.0 \text{ m/s}$ 时增幅达176.00%),可认定为试样劣化破坏的临界拐点。

通过分析不同冻融循环次数和加载速率下试样动态加载裂纹的演化可知:(1)当冻融循环次数相同时,不同加载速率下试样的破坏方式基本一致,均从预制裂缝端部沿加载方向形成1条宏观裂纹。(2)当加载速率一定时,随冻融循环次数增加,裂缝依旧沿着预制裂缝扩展;但当 $N \geq 70 \text{次}$ 时,试样已不具备加载条件,无塑性变形阶段,呈脆性材料破坏模式,因

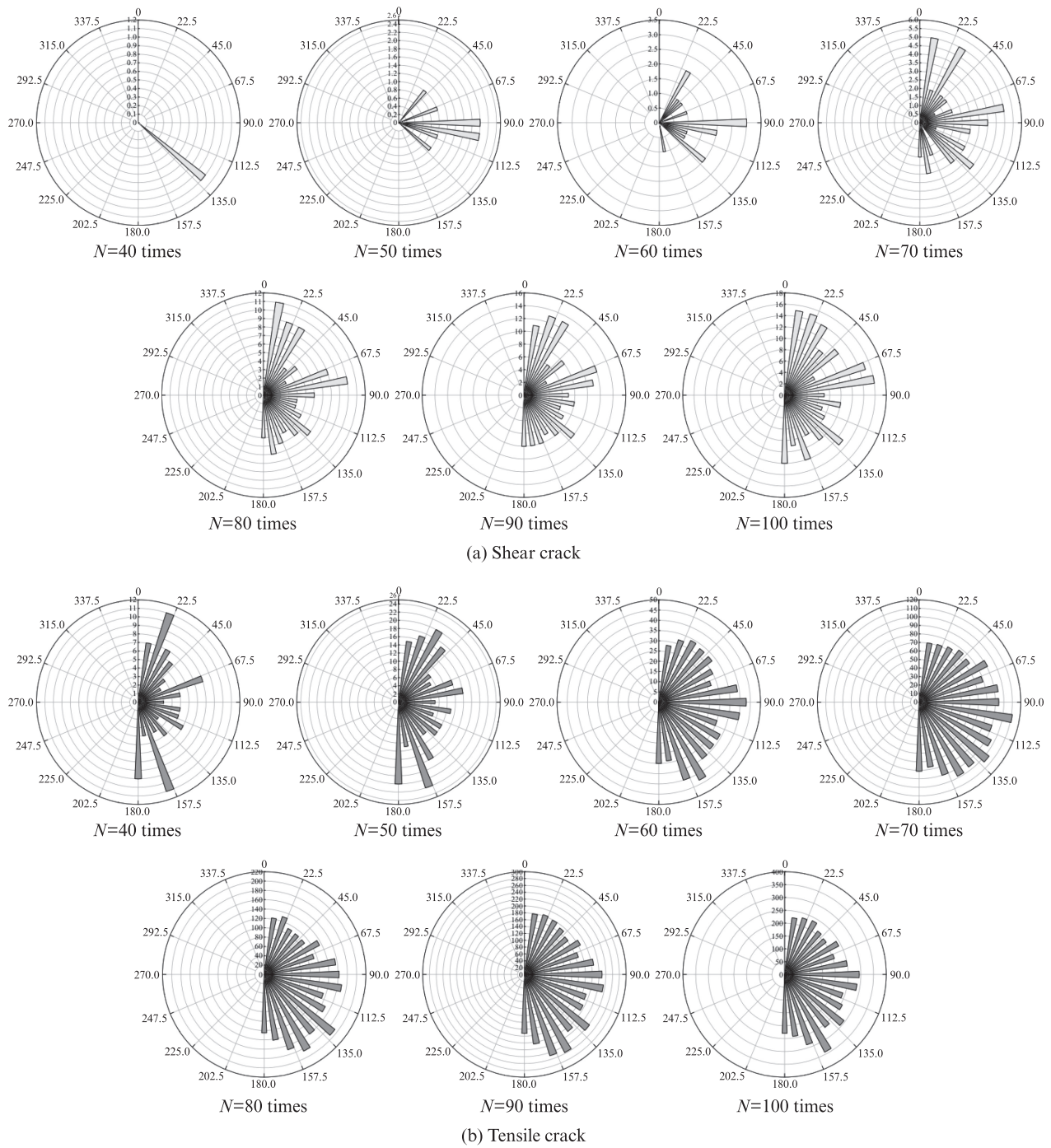


图5 不同冻融循环次数下试样裂纹的数量和方向
 Fig. 5 Number and developing direction of cracks in samples under different freeze-thaw cycles

此动态加载阶段仅考虑 $N=0\sim 60$ 次。(3) 当 $N=10$ 次时, 试样裂纹首先出现在加载点端部; 随着冻融循环次数的增加, 新裂纹通常在已有裂纹附近产生, 向四周持续扩展。

3.2 冻融-动载耦合作用下的峰值荷载

寒区岩石-混凝土材料常承受冻融循环与动态加载双重作用, 明确其力学特性具有重要意义。图7为冻融-动载耦合作用下试样的峰值荷载 (P_{peak}) 曲线。由图7可见: (1) 在冻融循环前期, 试

样的峰值荷载呈小幅增加趋势。依据 Powers^[3] 于 1945 年提出的静水压假说, 冻融过程中, 未结冰的液态水会向结冰区迁移, 致使混凝土孔隙内液态水结冰后体积膨胀, 进而压缩孔隙结构, 降低孔隙率。受此影响, 短期内材料的密度和强度会小幅提升。(2) 进入冻融循环中期后, 试样的峰值荷载开始快速下降。这是因为当孔隙率减小至一定程度时, 冰颗粒产生的膨胀力超过试样骨架间的接触力, 导致裂纹数量持续增多。

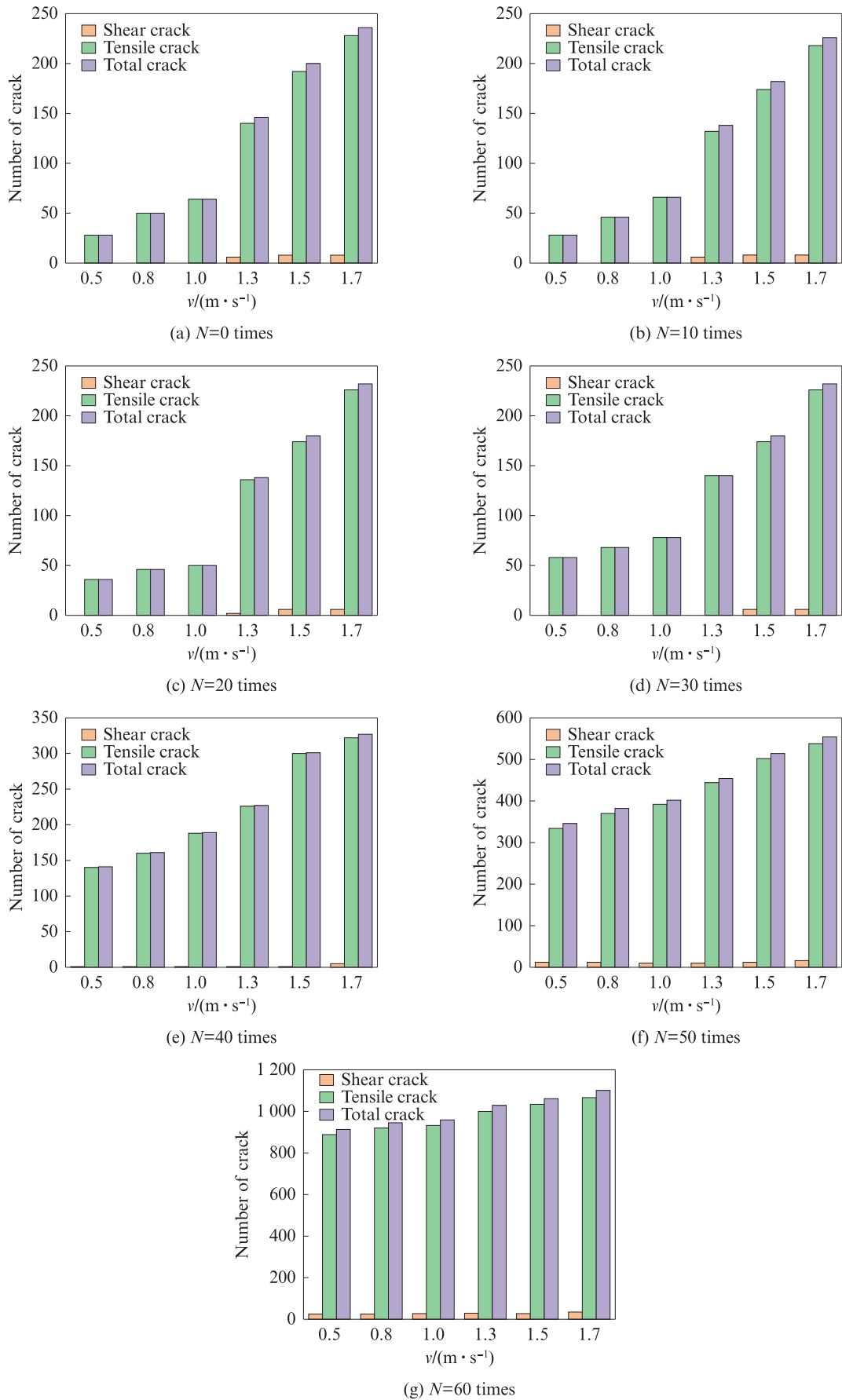


图6 不同冻融循环次数下试样动态加载后的裂纹数量

Fig. 6 Number of cracks in samples under dynamic loading and different freeze-thaw cycles

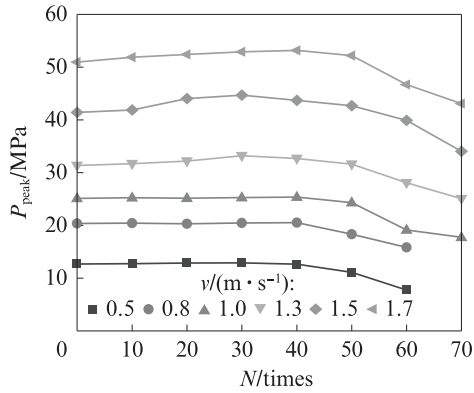


图7 冻融-动载耦合作用下试样的峰值荷载曲线
Fig. 7 Peak load curves of samples under coupling action of freeze-thaw and dynamic loading

3.3 冻融-动载耦合作用下的断裂韧度

图8为不同冻融循环次数下加载速率对试样断裂韧度(K_{Ic})的影响。由图8可见:(1)当加载速率处于0.5~1.0 m/s区间时,随着冻融循环次数的增加,试样断裂韧度呈小幅增长趋势。加载速率为0.5、0.8、1.0 m/s时,试样断裂韧度相较未冻融时分别增大3.19、2.31、3.45 $\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。(2)当加载速率处于1.3~1.7 m/s区间时,断裂韧度增长更为明显,加载速率为1.3、1.5、1.7 m/s时,分别增大28.09、49.65、33.72 $\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。(3)当冻融循环次数超过一定次数后,试样的断裂韧度开始急剧降低。具体表现为:加载速率为0.5、1.3、1.5 m/s时,冻融循环次数超过30

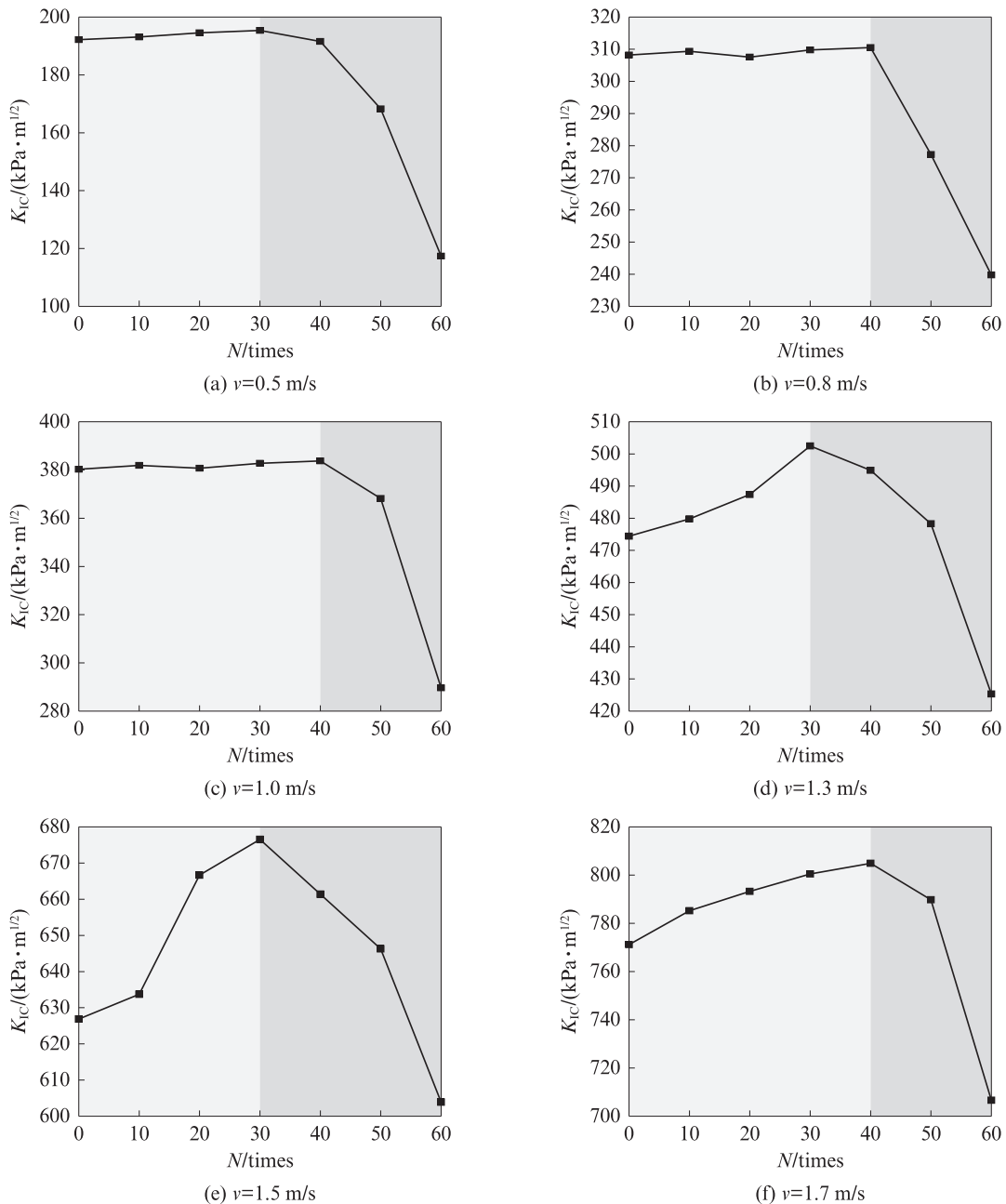


图8 不同冻融循环次数下加载速率对试样断裂韧度的影响

Fig. 8 Effect of loading rate on fracture toughness of samples under different freeze-thaw cycles

次后,断裂韧度分别降低 78.03、77.19、72.65 $\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$;加载速率为 0.8、1.0、1.7 m/s 时,冻融循环次数超过 40 次后,分别降低 70.74、94.17、98.25 $\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。(4)冻融初期,试样断裂韧度显著提升,源于孔隙水结冰膨胀引发的岩石-混凝土界面处致密化效应。孔隙冰的填充作用分担了外部荷载,同时通过增强颗粒间胶结强度和界面摩擦阻力,改善了试样的力学性能^[20]。(5)当冻融循环次数超过 30、40 次后,试样断裂韧度急剧降低。这是因为 ITZ 的孔隙率大于岩石和混凝土,冻结过程中膨胀力对界面的劣化影响存在滞后性。随着冻融循环次数的增加,内部冻胀力不断增强,当超过临界值时,孔隙萌生裂纹并扩展,导致试样内部损伤累积^[20]。

3.4 应力强度因子的率效应

应力强度因子(K)是断裂力学中的核心概念。在岩石-混凝土界面处,外力作用可能引发界面裂纹产生与扩展,而应力强度因子的大小决定了裂纹是否会发生扩展。具体而言,当 $K=K_{IC}$ 时,裂纹将发生失稳扩展,进而导致结构破坏。图 9 展示了应力强度因子随加载时间的变化曲线。基于前人对岩石动态断裂试验的研究方法,本研究将应力强度因子曲线峰值前线性段的斜率定义为应力强度因子率(\dot{K}_{SIF}),并将曲线峰值确定为动态有效断裂韧度^[21]。

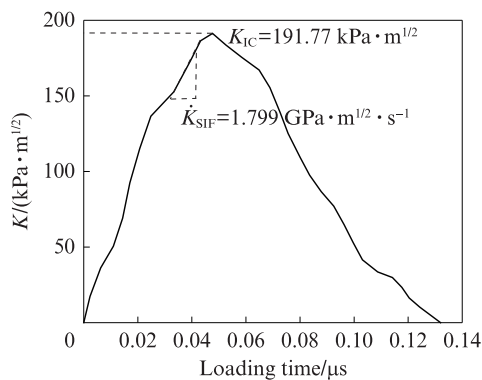


图 9 试样应力强度因子随加载时间的变化曲线
Fig. 9 Changed stress intensity factor along with the varied loading time

图 10 为冻融-动载耦合作用下试样的应力强度因子率散点图。由图 10 可见,当加载速率处于 0.5~1.0 m/s 区间时,试样的应力强度因子率随着冻融循环次数的增加呈非显著性降低趋势;而当加载速率提升至 1.0~1.7 m/s 区间时,该参数随冻融循环次数增加呈显著下降特征。

试样的断裂韧度与应力强度因子率的关系如图 11 所示。由图 11 可见,试样的应力强度因子率与断裂韧度呈近似线性正相关,即断裂韧度随应力强度

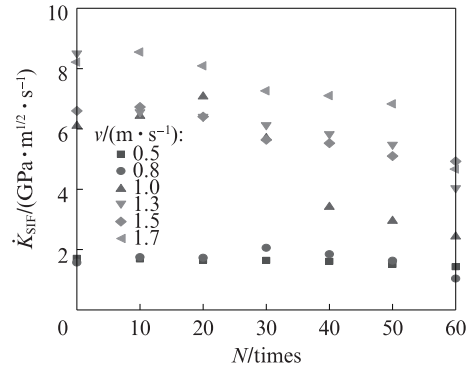


图 10 冻融-动载耦合作用下试样的应力强度因子率散点图
Fig. 10 Scatter diagram of \dot{K}_{SIF} for samples under coupling action of freeze-thaw and dynamic load

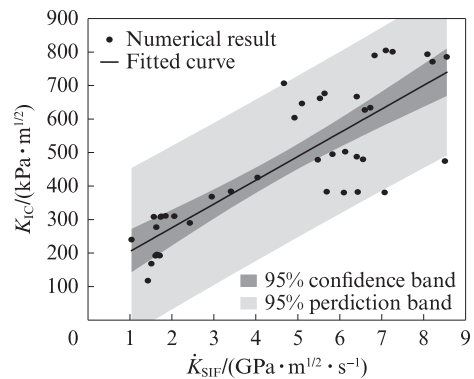


图 11 试样的断裂韧度与应力强度因子率的关系
Fig. 11 Relationship between the sample's fracture toughness and its \dot{K}_{SIF}

因子率的增大而持续提高。这表明试样的断裂韧度与应力强度因子率具有显著依赖性,与 Cui 等^[22]的研究结果完全一致。

3.5 断裂区长度

图 12 为冻融-动载耦合作用下试样的断裂区长度(r_c)。由图 12 可见:(1)试样的断裂区长度约为 4.2 mm 。这是因为加载前,冻融循环已在界面处形成裂纹,对界面造成了一定损伤。(2)在加载速率为

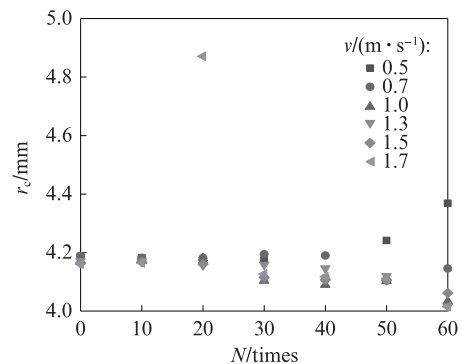


图 12 冻融-动载耦合作用下试样的断裂区长度
Fig. 12 Length of fracture process zone of samples under the coupled action of freeze-thaw and dynamic loading

0.5 m/s的条件下,随着冻融循环次数的增加,断裂区长度持续增大。这表明在较低加载速率下,经冻融作用的试样断裂区长度会增大;而当加载速率提高后,随着冻融循环次数的增加,断裂区长度由平稳状态逐渐减小,这与Cui等^[22]的研究结果一致。(2)当加载速率提升至1.7 m/s时,断裂区长度呈现不稳定特征。

4 结论

(1)岩石-混凝土试样内部裂纹的发育过程分为3个阶段,且冻融过程中拉伸裂纹占主导地位。

(2)动态加载阶段,岩石-混凝土试样内部裂纹仍以拉伸裂纹为主导;对应的峰值荷载在冻融前期呈小幅度增大趋势,进入循环中期则持续减小。

(3)岩石-混凝土试样的断裂韧度对加载速率有明显依赖性:低加载速率($v=0.5\sim 1.0$ m/s)下,断裂韧度呈“微增-骤降”特征;当加载速率提升至1.3~1.7 m/s时,断裂韧度表现出“激增-骤降”规律。

(4)岩石-混凝土试样的应力强度因子率随冻融循环次数的增加总体上呈下降趋势。

(5)当加载速率为0.5 m/s时,岩石-混凝土试样的断裂区长度出现一定程度的增长;随着加载速率的增大,断裂区长度随冻融循环次数增大而减小;当加载速率达到1.7 m/s时,断裂区长度呈现不稳定特征。

参考文献:

- [1] 崔圣爱,李江渭,叶跃忠,等.高地温隧道干热环境中喷射混凝土与岩石黏结强度[J].建筑材料学报,2013,16(4):663-666,682. CUI Sheng'ai, LI Jiangwei, YE Yuezhong, et al. Bond strength of shotcrete with rock in dry and hot environment of high ground temperature tunnel[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4):663-666, 682. (in Chinese)
- [2] 申艳军,魏欣,杨更社,等.岩石-混凝土界面黏结强度冻融劣化模型及试验分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):480-490. SHEN Yanjun, WEI Xin, YANG Gengshe, et al. Freeze-thaw degradation model and experimental analysis of rock-concrete interface bond strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3):480-490. (in Chinese)
- [3] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. ACI Journal Proceedings, 1945, 41: 245-272.
- [4] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[J]. Highway Research Board Proceedings, 1953, 32:285-297.
- [5] 贾朝军,庞锐锋,俞隽,等.基于离散元的岩石冻融损伤劣化机制研究[J].岩土力学,2024,45(2):588-600. JIA Chaojun, PANG Ruifeng, YU Jun, et al. Investigation on freeze-thaw damage mechanism of porous rock with discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 588-600. (in Chinese)
- [6] 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 Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. 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)
- [7] 宋勇军,孙银伟,李晨婧,等.基于离散元法模拟的冻融砂岩微观破裂演化特征研究[J].岩土力学,2023,44(12):3602-3616. SONG Yongjun, SUN Yinwei, LI Chenjing, et al. Meso-fracture evolution characteristics of freeze-thawed sandstone based on discrete element method simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12):3602-3616. (in Chinese)
- [8] 孙峤,孙路平,叶泽晖,等.冻融循环作用下砂岩的动态冲击特性试验研究[J/OL].地质科技通报,2024-06-20[2025-04-10]. https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240103. SUN Qiao, SUN Luping, YE Zehui, et al. Experimental study on dynamic impact characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles[J/OL]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024-06-20[2025-04-10]. https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240103. (in Chinese)
- [9] 陆建友.冲击荷载下岩石-混凝土界面力学响应及断裂规律研究[D].长沙:中南大学,2023. LU Jianyou. Study on mechanical response and fracture law of rock-concrete interface under impact load[D]. Shanghai: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [10] 陈明真,何世钦,王辉,等.考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观建模方法[J].建筑材料学报,2025,28(2):168-175. CHEN Mingzhen, HE Shiqin, WANG Hui, et al. Three-dimensional mesoscopic modeling method of rock-filled concrete considering skeleton effect[J]. Journal of Building Materials, 2019, 28(2):168-175. (in Chinese)
- [11] 李守龙.含水率对混凝土强度影响初步研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014. LI Shoulong. Preliminary study on the effect of water content and pore water pressure on the concrete strength[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [12] MAJI A K, WANG J. Nonlinear model for fracture at the concrete-rock interface[C]//The 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics. Santa Fe, New Mexico: A A Balkema, 1992.
- [13] 李哲,杨水成,张浩博,等.岩石与混凝土界面裂缝的断裂能及断裂韧度[J].西北水资源与水工程,1998(1):44-47. LI Zhe, YANG Shuicheng, ZHANG Haobo, et al. Fracture energy and fracture toughness of rock-concrete interface crack[J]. Water Resources & Water Engineering, 1998(1): 44-47. (in Chinese)
- [14] KISHEN C J, KUMAR A. Finite element analysis for fracture behavior of cracked beam-columns[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2004, 40(13):1773-1789.

- [15] 张欢. 冻融对砂岩-混凝土界面过渡区损伤及脱粘演化微观机制分析[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
ZHANG Huan. Sandstone-concrete interface transition zone (ITZ) damage and debonding micro mechanism analysis under freeze-thaw [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.(in Chinese)
- [16] 吴仪,党发宁,NIMBALKAR Sanjay,等. 不同循环模式下透水混凝土性能演变规律及损伤机制[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(1):9-18.
WU Yi, DANG Fanning, NIMBALKAR Sanjay, et al. Property evolution law and damage mechanism of pervious concrete under different cycle modes[J]. Journal of Building Materials, 2019, 28(1):9-18. (in Chinese)
- [17] 闫启耀,吕恒林,韩启航,等. 复合工业废料-混合砂混凝土耐久性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(7) :655-661.
YAN Qiyao, LÜ Henglin, HAN Qihang, et al. Experimental study on durability of composite industrial waste-mixed sand concrete[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(7) :655-661. (in Chinese)
- [18] 颜学渊,罗福斌,金贤洪,等. 玄武岩和聚乙烯纤维混凝土静动态力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(9) :825-833.
YAN Xueyuan, LUO Fubin, JIN Xianhong, et al. Static and dynamic mechanical properties of basalt and polyethylene fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(9) :825-833.(in Chinese)
- [19] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: Geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, 2(5):315-323.
- [20] 孙颜顶. 不同含水率冻结砂岩和泥岩强度特征及裂纹起裂特性研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2021.
SUN Yanding. Study on strength and crack initiation characteristics of frozen sandstone and mudstone with different water content [D]. Beijing : China University of Mining and Technology-Beijing, 2021.(in Chinese)
- [21] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 49,105-112.
- [22] CUI Z H, DAI F, LIU Y, et al. Dynamic fracture properties and criterion of cyclic freeze-thaw treated granite subjected to mixed-mode loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(12):4971-4989.