

苏振坤, 刘平, 张峰华, 等. 卸荷与冻融损伤作用下砂岩力学特性及能量演化分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 240-253. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.019

SU Zhenkun, LIU Ping, ZHANG Fenghua, et al. Mechanical properties and energy evolution of sandstone under unloading and freeze-thaw damage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 240-253. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.019

卸荷与冻融损伤作用下砂岩力学特性 及能量演化分析

苏振坤¹, 刘平¹, 张峰华², 陈莉丽¹, 龚盛¹, 陈兴周¹, 李针汗¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司, 青海 西宁 810003)

摘要:【目的】为探究寒区冻融损伤与开挖卸荷损伤对岩体力学特性的影响,【方法】对砂岩开展了考虑卸荷与冻融损伤两个损伤因素以不同作用顺序下的室内力学试验,分析砂岩力学特性及能量演化规律。【结果】结果显示:岩样单轴抗压强度与弹性模量均在“卸荷-冻融”条件劣化最大,破裂形态随循环次数增大由剪切破坏逐渐向拉剪复合破坏演化且主破坏面及张拉裂纹易沿宏观冻融裂纹发展;损伤劣化使岩样耗散能及其占比增大,储能极限减小。【结论】结果表明:岩样冻融时的初始孔隙状态对劣化程度有较大影响,前期冻融损伤对卸荷损伤的反馈程度要低于前期卸荷损伤对冻融损伤的反馈程度;卸荷与冻融对岩样的损伤机制对岩样破坏形态、耗散能占比及弹性能储存释放有直接影响。

关键词: 砂岩; 卸荷损伤; 冻融损伤; 力学特性; 能量演化; 影响因素; 抗压强度

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0240-14



听语音,聊科研

Mechanical properties and energy evolution of sandstone under unloading and freeze-thaw damage

SU Zhenkun¹, LIU Ping¹, ZHANG Fenghua², CHEN Lili¹, GONG Sheng¹, CHEN Xingzhou¹, LI Zhenhan¹

(1. Architecture and Civil Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Engineering Construction Branch, Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development

Co., Ltd., Xining 810003, Qinghai, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of freeze-thaw damage and excavation unloading damage on the mechanical properties of rock masses in cold regions. [Methods] Indoor mechanical tests were conducted on sandstone considering unloading and freeze-thaw damage factors in different order of action, and the mechanical properties and energy evolution laws of sandstone were analyzed. [Results] The result showed that the degradation of uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock samples is most significant under the condition of “unloading freeze-thaw”. The fracture morphology gradually evolves from shear

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2024-11-13; 录用日期: 2024-11-20; 网络出版日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979218)

作者简介: 苏振坤(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工岩体力学方面的研究。E-mail: zksu1022@163.com

通信作者: 陈兴周(1980—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事水工岩体力学及工程渗流方面的研究。E-mail: xzchen0416@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

failure to tensile shear composite failure with increasing cycle times, and the main failure surface and tensile cracks are prone to develop along macroscopic freeze-thaw cracks. Damage increases the dissipated energy and its proportion during the process of rock sample failure, while reducing the energy storage limit. [Conclusion]The initial pore state of rock samples during freeze-thaw has a significant impact on the degree of degradation, and the feedback degree of early freeze-thaw damage to unloading damage is lower than that of early unloading damage to freeze-thaw damage. The damage mechanism of unloading and freeze-thaw on rock samples has a direct impact on the fracture morphology, proportion of dissipated energy, and storage and release of elastic energy of rock samples.

Keywords: sandstone; unloading damage; freeze-thaw damage; mechanical properties; energy evolution; influencing factors; compressive strength

0 引言

寒区水工岩质高边坡岩体力学特性与客观环境所引起的冻融循环劣化及工程开挖卸荷损伤息息相关。工程性岩质边坡开挖通常会产生卸荷损伤,使岩体应力环境发生改变,从而影响开挖面内一定深度岩体的结构特征与力学特性^[1];高寒地区客观存在的冻融循环使表层岩体反复经历冻结与消融,期间产生的冻胀力同样使寒区岩体结构产生劣化^[2]。寒区水工岩坡同时涉及卸荷与冻融两种损伤因素,因此,研究卸荷损伤与冻融损伤复合作用下寒区岩体力学特征与变形机制,对于评价寒区岩质边坡岩体参数具有重要的参考意义。

岩质边坡开挖过程中岩体的力学状态为卸荷力学,多学者针对卸荷力学展开了大量研究,主要包含对不同组成成分及结构组成的岩样在受不同卸荷路径、不同卸荷速率作用下力学参数指标及破裂形态的影响。起初,李建林等^[3]分析了砂岩在卸荷力学状态下应力-应变关系及破坏特征,并将卸荷量作为重要参考推导了卸荷应力状态的力学模型。针对卸荷路径的影响,韩铁林等^[4]、赵国彦等^[5]分别对裂隙岩样和花岗岩进行定轴压卸围压、升轴压卸围压等不同应力路径下卸荷试验,发现定轴压卸围压条件下张裂隙发育显著,侧向应变在卸围压过程中与围压值呈先线性后非线性的规律,侧向扩容现象明显。对卸荷速率,孙浩等^[6]对硬岩开展三种非线性卸荷速率条件下室内试验,得出指数型卸荷对摩擦角有较大影响,直线型和余弦型对黏聚力影响较大的规律。针对损伤岩样,邓华锋等^[7]以卸荷损伤灰岩为对象开展再加载试验,发现了初始卸荷损伤对岩石的变形和承载性能影响显著,且随卸荷量增大,岩样抗压强度、变形模量等逐渐呈非线性突变。WANG等^[8]对前期循环加载损伤闪长岩进行多级卸围压和循环荷载试验,发现前期循环损伤使岩样塑性变形和能量损失提升较大。针对宏观破裂形态,胡宝文等^[9]以花岗岩为对

象,研究高围压卸荷下岩石破裂面特征,发现岩石破裂面张拉断裂占比越高时破裂面越粗糙,剪切占比越高,破裂面粗糙程度越低。

针对寒区岩体,早期有学者对岩样仅受冻融循环的影响做了大量研究^[10-14],通过单三轴压缩、声发射、核磁共振、CT扫描等试验手段对由不同矿物成分和裂隙结构组成的冻融损伤岩样进行了研究,分析评价了岩石几何特征、岩样浸泡环境、冻融循环次数等因素对岩样峰值强度、弹性模量、泊松比、孔隙分布、核磁共振图像及纵波波速等的影响。后续逐渐有学者综合寒区冻融环境与工程行为进行研究。俞缙等^[15]对冻融循环后砂岩进行单轴、三轴及峰前卸围压的力学试验,发现冻融损伤越大,径向变形和体应变对围压降低越敏感。汤明高等^[16]以川藏地区不同矿物成分及不同饱和度岩样为对象,在冻融损伤劣化基础上进行室内加、卸载试验,分析了岩样破坏模式、力学参数变化规律等,结果为寒区不同地质开挖工程提供参考。倪晓慧等^[17]对经历不同冻融循环次数的砂岩进行三轴卸围压试验,分析其过程中能量转化特性。朱珍德等^[18]以新疆某工程砂岩进行冻融循环,后在不同初始围压条件下进行三轴卸荷试验,发现随初始围压增大,岩样破坏形式由张拉破坏逐渐转为剪切破坏的现象。色麦尔江·麦麦提玉苏普等^[19]对冻融循环岩样进行卸荷破坏试验,通过断口电镜扫描,统计了初始围压与循环次数对裂纹长度、宽度的影响规律。

已有成果针对岩石加卸载、岩体受冻融劣化影响进行了系统研究,对冻融损伤后岩体加、卸载破坏进行了大量研究,但对寒区工程开挖面一定深度范围内工程可利用的卸荷损伤岩体及其受冻融循环影响的研究较少。为此,本文进一步考虑寒区边坡冻融范围与工程开挖范围差异形成的复杂损伤分区,通过开展卸荷与冻融两种损伤因素在不同作用顺序条件下对岩样的影响,研究其力学特性及能量演化规律,以期对寒区边坡在受客观环境及工程扰动后的变形及参数分析

提供借鉴。

1 试验概述

1.1 试件制备及仪器

试验依托 THMC 岩石多场耦合三轴流变仪测试系统、TMS-9012 高低温恒温试验箱等设备完成, 三轴流变测试仪可施加最大围压 100 MPa、最大出力 1 500 kN, 有流量和压力两种控制方式: 流量范围 0.01~60 mL/min, 压力控制精度小于 0.01 MPa; 高低温恒温试验箱温度范围为 $-40\sim+210\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度波动在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据《水利水电工程岩石试验规范》(SL/T 264—2020)中的试件制备标准, 将试件加工为直径 50 mm、高度 100 mm 标准圆柱形岩样, 岩样满足以下要求: 岩样高度、直径的允许偏差为 $\pm 0.3\text{ mm}$, 端面不平行度允许偏差为 $\pm 0.05\text{ mm}$, 端面垂直于岩样轴线, 允许偏差为 $\pm 0.25^{\circ}$, 试验装置及典型岩样如图 1 所示。

对制备完成的试件进行遴选, 尽可能减小其离散性; 通过观察岩样表面剔除因钻孔取样或试件加工导致的表面含有裂纹或孔洞的岩样; 测量其在干燥与饱和状态的质量、波速, 计算其孔隙率和含水率等指标, 剔除离散性较大的岩样。

1.2 试验方案

试验背景: 寒区岩质高边坡因季节性冻融与岩体裂隙结构发育导致浅表部岩体出现冻融损伤, 工程性开挖通常会挖除部分因冻融而损伤的岩体, 但在开挖面顶部与底部仍存在冻融损伤岩体, 且开挖的同时会使岩体产生因应力释放出现的卸荷损伤区, 如图 2 所示, 因此会出现不同部位岩体经历不同时序的冻融或卸荷损伤现象, 主要表现为: 冻融损伤、卸荷损伤、先经历冻融损伤后经历卸荷损伤、先经历卸荷损伤后经历冻融损伤, 共计 4 种损伤区。

本次试验目标在于研究冻融与卸荷两种损伤因素

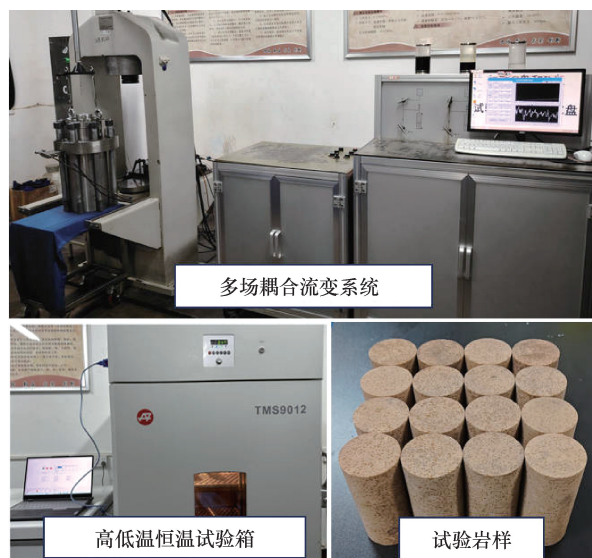


图 1 试验系统装置及试验岩样

Fig. 1 Test system equipments and test rock samples

在不同顺序作用下砂岩的力学特性及能量演化规律。岩样取自某水电站岩质边坡, 综合已开展试验结果及岩样性质, 选取 10 MPa 围压作为试验静水压力, 场区月平均高温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 月平均低温为 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端低温为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。观察到该种岩样经历 10 次冻融循环后, 岩样表面出现宏观裂纹, 考虑还存在因卸荷作用导致的岩样卸荷损伤, 因此试验冻融循环次数选用 3、6、9 三个批次。试验方案流程如图 3 所示, 具体试验方案如下所述。

开展常规单/三轴压缩试验。将饱和岩样以 2 MPa/min 的加载速率加至静水压力为 10 MPa, 保持围压不变, 以 4 MPa/min 加载速率加轴压至岩样破坏, 获取三轴峰值抗压强度 σ_c ; 单轴压缩试验将岩样以 4 MPa/min 加载速率加载至破坏。

开展卸荷破坏试验。静水压力阶段流程与三轴压缩试验一致, 静水压力加载完成后, 以 4 MPa/min

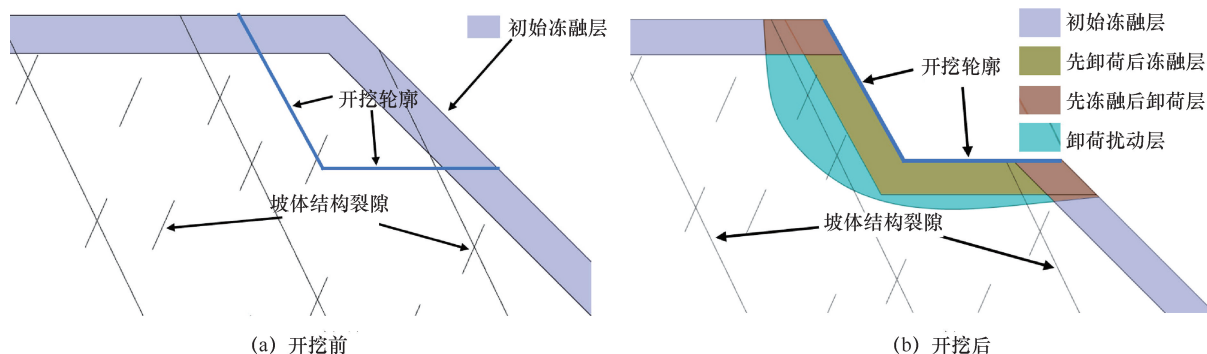


图 2 寒区岩质边坡开挖前-后损伤示意

Fig. 2 Schematic diagram of pre-post-excavation damage zone of rock slope in cold area

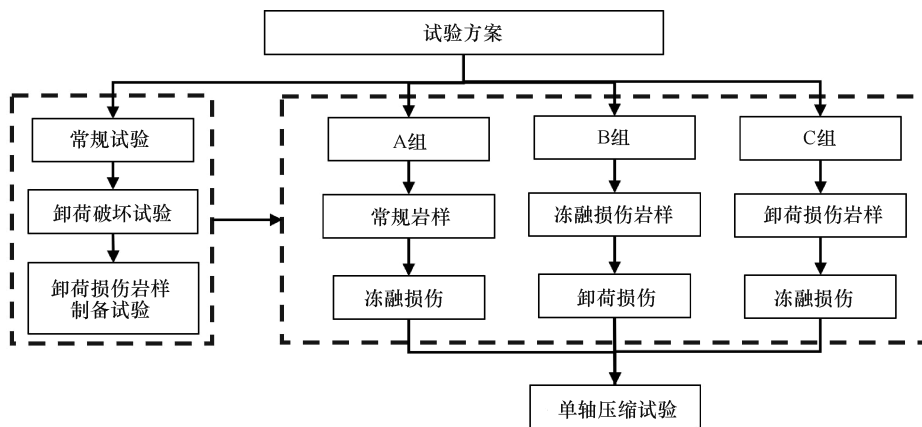


图3 试验方案流程示意

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental plan process

加载速率加轴压至 $0.7\sigma_c$ ，保证其在轴压加载过程中不会发生破坏，再以 1 MPa/min 速率卸围压至岩样破坏，获取卸荷破坏时的围压 σ_p 。

开展卸荷损伤岩样制备试验。静水压力、轴压加载阶段与上述卸荷破坏试验步骤相同，卸围压至目标卸荷量级对应的围压值 σ'_3 (速率仍为 1 MPa/min)。卸荷量级 K 按如下公式定义^[20]

$$K = \frac{\sigma_3 - \sigma'_3}{\sigma_3 - \sigma_p} \quad (1)$$

式中， σ_3 为静水压力加载完成后的围压(MPa)； σ_p 为卸荷破坏时围压(MPa)； σ'_3 为对应卸荷量级围压(MPa)。

卸荷过程中卸荷量达到 60% 时岩样存在一定程度损伤且应变随卸荷量增大变化趋势较缓，所得卸荷损伤岩样离散性小，因此本文选取 60% 卸荷量级制备卸荷损伤试件。

在上述基础试验条件下考虑冻融和卸荷损伤因素的影响，制定以下三组方案。

A 组试验方案：将常规无损伤岩样放入真空饱和缸进行真空抽气饱和，缸内水面高于试件，饱和时间大于 4 h，直至无气泡逸出，饱和结束取出并用湿毛巾擦拭岩样表面水分，放入 TMS-9012 高低温恒温试验箱，通过程序运行已设置好的温度-时间方程进行程控冻融循环，冻结温度考虑场区极端低温，消融温度考虑月平均高温。岩样在 $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 环境中冻结 6 h， $25\text{ }^\circ\text{C}$ 环境中消融 6 h 为一次冻融循环，当循环次数达到 3 次、6 次、9 次后进行单轴压缩试验，测定其经历“冻融”损伤后的力学参数。

B 组试验方案：将达到指定冻融次数的试样取出，饱和后进行卸荷损伤，然后进行单轴压缩试验，测定其经历“冻融-卸荷”损伤后的力学参数。

C 组试验方案：在卸荷损伤试件基础上进行

3 次、6 次、9 次冻融循环，达到指定冻融次数后将岩样饱和，并进行单轴压缩试验，测定其经历“卸荷-冻融”损伤后的力学参数。

2 冻融及卸荷损伤作用下砂岩单轴力学特性

2.1 应力-轴向应变曲线分析

对常规、冻融循环、先冻融后卸荷、先卸荷后冻融条件下的砂岩试样进行单轴压缩试验，B 组冻融 0 次与 C 组冻融 0 次试验条件相同(均为卸荷损伤后进行单轴压缩)，应力-应变曲线如图 4 所示。在各条件下，应力-应变曲线均出现微裂隙因受力闭合的压密阶段，呈上凹形；随后进入呈直线形的弹性变形阶段；轴向应力继续增大，曲线进入微裂隙逐渐发育且连通的塑性屈服阶段，该阶段曲线呈下凹形；达到峰值强度后进入破坏阶段，主破坏面形成。随循环次数增多，峰后应力由迅速跌落逐渐转化为峰后先经历一定程度的缓慢减小再迅速跌落，破坏模式由脆性破坏逐渐转化为有一定程度的塑性破坏。

将压密阶段与弹性变形阶段交点称为压密点 B_0 ，并统计其轴向应变，结果如图 5 所示。A、B、C 三组岩样压密点轴向应变均随冻融次数增加而增大，冻融 9 次后的压密点轴向应变相较无损伤(常规单轴)岩样分别增大了 57.78%、93.33%、131.11%，压密段非线性特征逐渐明显的原因因为岩样内部微裂隙的连通与扩展并向宏观裂纹转变^[21]，次生微裂隙受冻融循环作用逐渐增多，结果表明 C 组条件下岩样内部裂隙发育程度较 A、B 两组更显著。

单轴抗压强度和弹性模量分别表征了岩样承受荷载的能力及抵抗弹性变形的能力，各试验条件下岩样单轴抗压强度、弹性模量及相应劣化度统计如表 1 所列，弹性模量取应力-应变曲线中弹性变形阶段直线斜率，

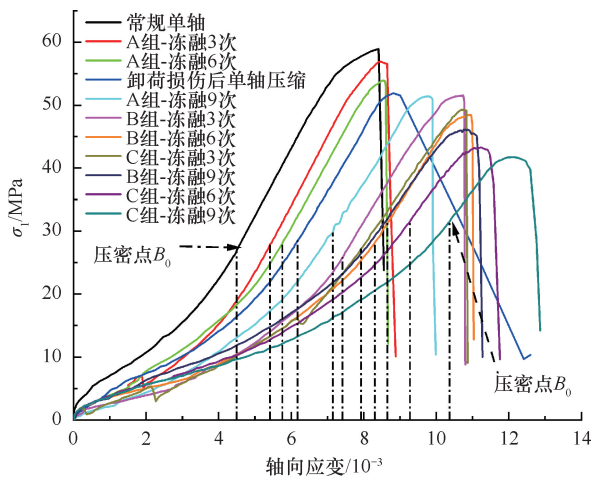


图4 单轴压缩应力-轴向应变曲线

Fig.4 Stress-axial strain curves of uniaxial compression test

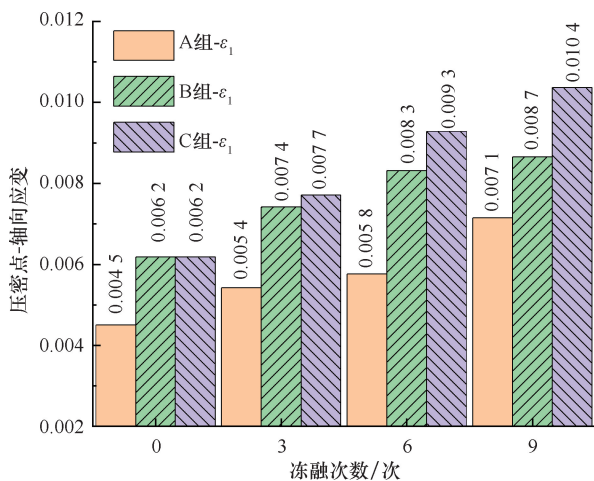


图5 压密点轴向应变

Fig.5 axial strain at the compression point

相应变化规律如图6和图7所示。劣化度表达式为^[22]

$$S_i = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, S_i 为岩样在各组试验条件下经历不同冻融循环次数后的总劣化度; T_0 为无损伤岩样的力学参数指标; T_i 为各组试验条件下经历不同冻融循环次数后的力学参数指标。

A、B、C 三组抗压强度劣化度最大分别为 12.78%、21.76%、29.14%; 分析可知, 岩样受一种因素损伤的抗压强度劣化度整体小于两种损伤因素; 相同循环次数条件, C 组抗压强度较 B 组小, C 组岩样在卸荷损伤基础上进行冻融循环, 而 B 组冻融循环是在无损伤岩样基础上进行, 表明岩样受冻融损伤时的初始状态很大程度影响了其劣化程度。同理表明, 前期冻融损伤对卸荷损伤的反馈程度要低于前期卸荷损伤对冻融损伤的反馈程度。

A、B、C 组弹性模量劣化度最大分别为 14.83%、25.56%、33.50%。A 组岩样循环次数少时, 岩样矿物颗粒胶结性较好, 内部孔隙受冻胀影响贯通范围小, 岩样抵抗变形的能力损失不大; 循环次数增多, 水分子逐渐向未损伤孔隙及微裂隙迁移冻胀, 导致局部损伤逐渐贯通, 岩样抵抗变形的能力会出现较大幅度减弱, 弹性模量呈先缓后陡的劣化趋势。卸荷损伤岩样弹性模量为 9.61 GPa, 较常规无损伤岩样降低了 13.19%。

对比 B、C 两组结果可知, C 组岩样在卸荷作用下微裂隙已较常规岩样发育, 孔隙率增大, 饱和含水量提高, 水分子在冻结过程中与矿物颗粒接触面积更多, 冻结过程中产生的冻胀力对岩样的损伤较 B 组更明显。C 组岩样在冻融 6 次后弹性模量劣化幅度变缓, 其原因为水冰相变过程中因体积膨胀对矿物颗粒产生的冻胀力及消融后的水分子均会向更易扩散的方向发展, 最终在岩样表面形成宏观裂纹(见图 8), 宏观裂纹的产生导致冻胀力有较大的空间可以释放^[23],

表 1 单轴抗压强度和弹性模量指标及对应劣化度

Table 1 Uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock and corresponding deterioration degree

试验条件		抗压强度/MPa	劣化度/%	弹性模量/GPa	劣化度/%
A 组“冻融”损伤	冻融循环 0 次	58.92	0.00	11.07	0.00
	冻融循环 3 次	56.90	3.43	11.03	0.36
	冻融循环 6 次	53.92	8.49	10.60	4.25
	冻融循环 9 次	51.39	12.78	9.43	14.81
B 组“冻融-卸荷”损伤	冻融循环 0 次	51.90	11.91	9.61	13.19
	冻融循环 3 次	51.54	12.53	9.60	13.28
	冻融循环 6 次	48.44	17.79	9.32	15.81
	冻融循环 9 次	46.10	21.76	8.24	25.56
C 组“卸荷-冻融”损伤	冻融循环 0 次	51.90	11.91	9.61	13.19
	冻融循环 3 次	49.25	16.41	8.83	20.23
	冻融循环 6 次	43.30	26.51	7.80	29.54
	冻融循环 9 次	41.75	29.14	7.36	33.51

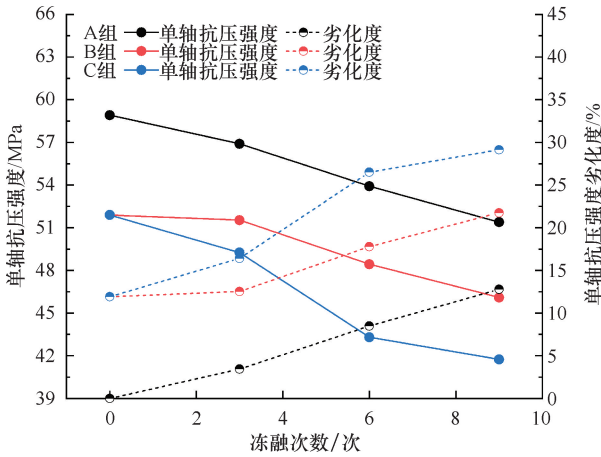


图6 单轴抗压强度及其劣化度

Fig. 6 Uniaxial compressive strength and its degree of deterioration

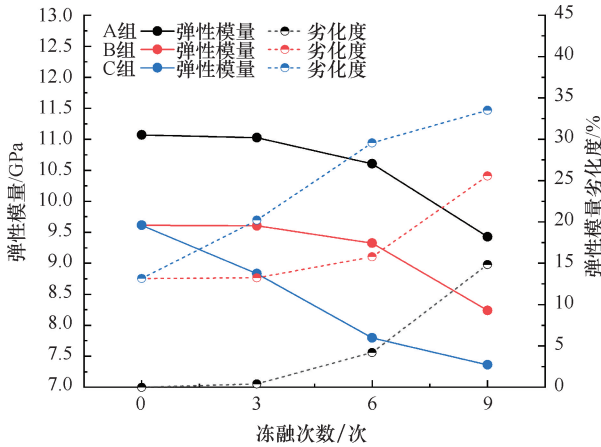


图7 弹性模量及其劣化度

Fig. 7 Elastic modulus and its degree of deterioration

对矿物颗粒损伤减小, 弹性模量劣化趋势减缓。

以上分析表明: 由卸荷作用引起的微裂纹及孔隙发育使冻融损伤对岩样劣化更加显著, 对涉及寒区卸荷效应的工程处理时, 要重点考虑卸荷岩体的冻融劣化影响。

2.2 砂岩宏观破裂形态分析

冻融损伤示意如图8所示, 随着循环次数的增多, 触摸岩样表面会出现明显的细颗粒感, 冻胀使不同矿物成分颗粒之间产生不均匀变形, 反复作用后颗粒之间的胶结力逐渐降低, 出现更细小的矿物颗粒; 继续冻融, 岩样表面出现因冻胀力引起的局部鼓起的内鼓现象; 矿物颗粒之间完全失去黏结力时出现裂隙且逐渐演化为宏观裂纹, 与文献[2]相同。试验过程中岩样宏观裂纹长度范围0~4 cm, 通常有一条较大而深的主裂纹, 且其尖端易衍生出较小而浅的次生裂纹, 裂纹周边岩样表面颗粒表现出明显的细化。宏观裂纹形态有平行于岩样轴向、环轴向及交叉裂纹等。

图9为岩样单轴压缩破裂形态。综合文献[24], 将岩样裂纹划分为剪切(黑色)、张拉(蓝色)、局部剪切(绿色)、次生(棕色)、宏观冻融裂纹(红色)。常规单轴压缩岩样主破坏面为贯穿岩样的剪切滑移破坏面, 存在较少未贯通岩样两侧的局部张拉、剪切裂纹且与主破坏面相接; 卸荷损伤岩样除存在一条剪切裂纹外还存在一条靠近岩样边缘处且几乎贯通的张拉裂缝, 两缝存在贯通区; A、B、C三组主破坏面均为剪切滑移破坏面, 但B、C两组拉剪复合破坏特征更加明显。

张拉裂纹产生的原因为岩样单元出现剪切滑移后出现垂直于轴向的拉应力^[25]。卸荷损伤岩样出现几乎贯通轴向的张拉裂纹; A、B、C三组冻融损伤后张拉裂纹数量明显增加, 综合宏观冻融裂纹产生的位置以及向内发育的深度, 推测冻融损伤对岩样靠近外侧的岩体抗剪强度劣化较岩样中心处明显, 在拉应力作用下更易出现张拉裂纹。从整体分析, C组拉伸裂纹发育深度最深, B组次之, A组最浅; 宏观冻融裂纹生成后, 剪切滑移面和张拉裂纹易与冻融裂纹连通且沿其方向发展, 张拉裂纹数量减少。

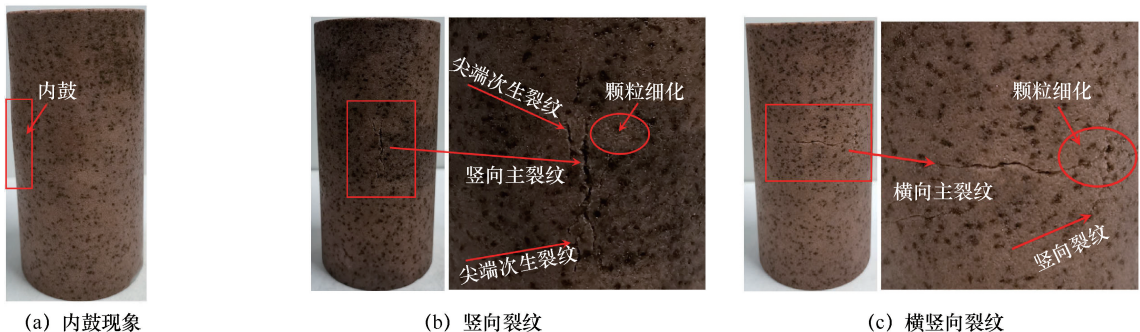


图8 冻融损伤示意

Fig. 8 Schematic diagram of freeze-thaw damage

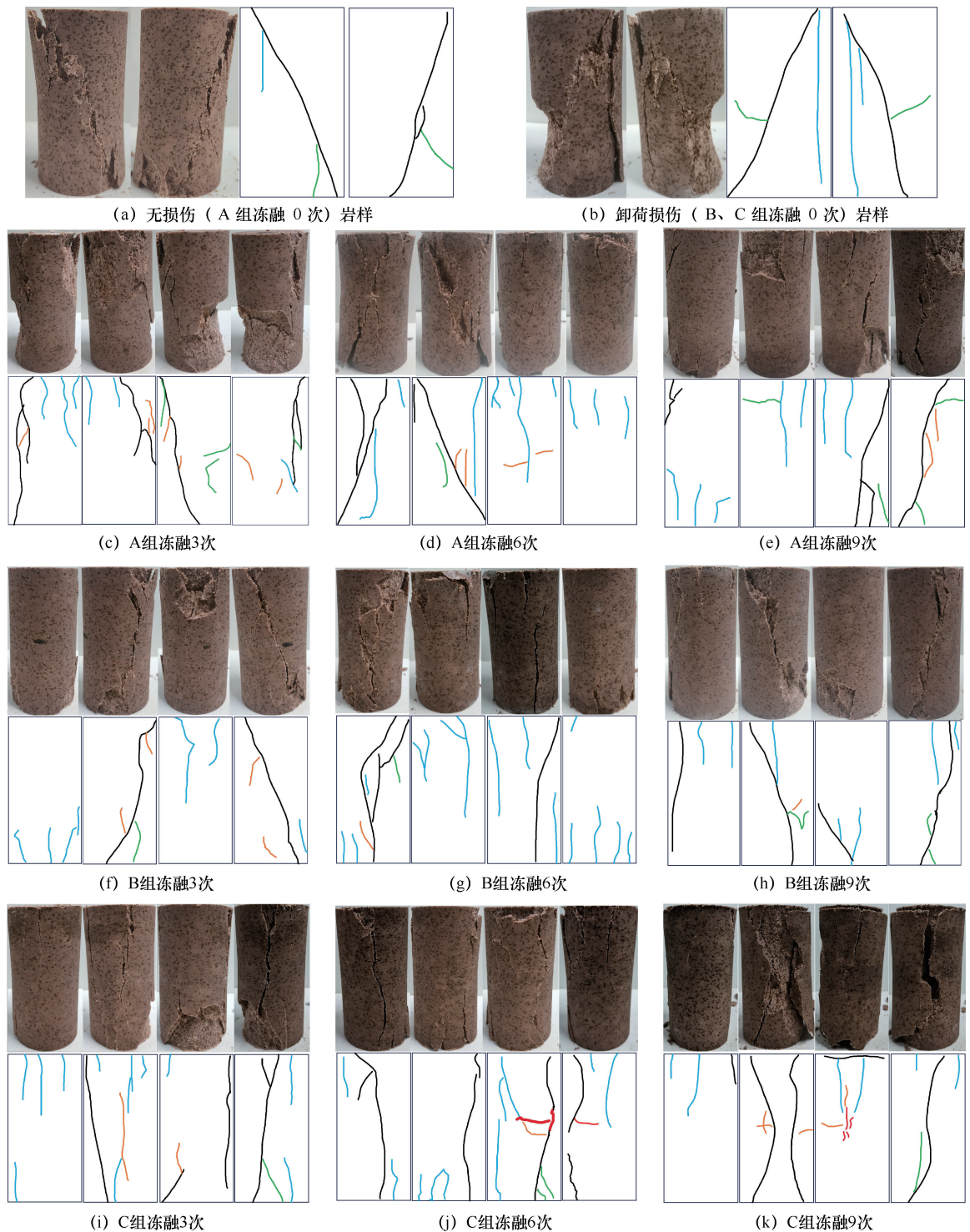


图9 不同试验条件下岩样单轴压缩破裂形态

Fig. 9 Uniaxial compression fracture morphology of rock samples under different experimental conditions

3 冻融及卸荷损伤作用下砂岩能量演化规律

3.1 岩体变形能量机制

从能量角度分析, 岩石破坏过程是外界能量的输入, 部分能量为使岩样内部损伤发展、强度弱化的耗散能; 另一部分能量被单元吸收作为可释放的弹性能

储存。假定岩样在压缩过程中与试验机为封闭系统, 即与其他外部没有热量交换, 则有^[26]

$$U = U_d + U_e \quad (3)$$

$$U = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + \int \sigma_2 d\epsilon_2 + \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (4)$$

$$U_e = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1^e + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2^e + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3^e =$$

$$\frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

式中, U 为试验机对岩石的总输入能 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$); U_d 、 U_e 分别为单元耗散能 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$) 与单元可释放弹性能 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$); ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为应力应变曲线对应

的应变值; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 ε_1^e 、 ε_2^e 、 ε_3^e 分别为主应力方向上的应力值 (MPa) 与弹性应变; \bar{E} 、 $\bar{\nu}$ 为卸载试验确定的弹性模量 (MPa) 和泊松比, 计算时可取初始弹性模量与泊松比^[27], 本文中岩样仅分析单轴压缩试验, σ_2 、 σ_3 均为 0 (MPa)。

3.2 损伤砂岩能量演化分析

各试验条件下岩样能量演化如图 10 所示, 在岩

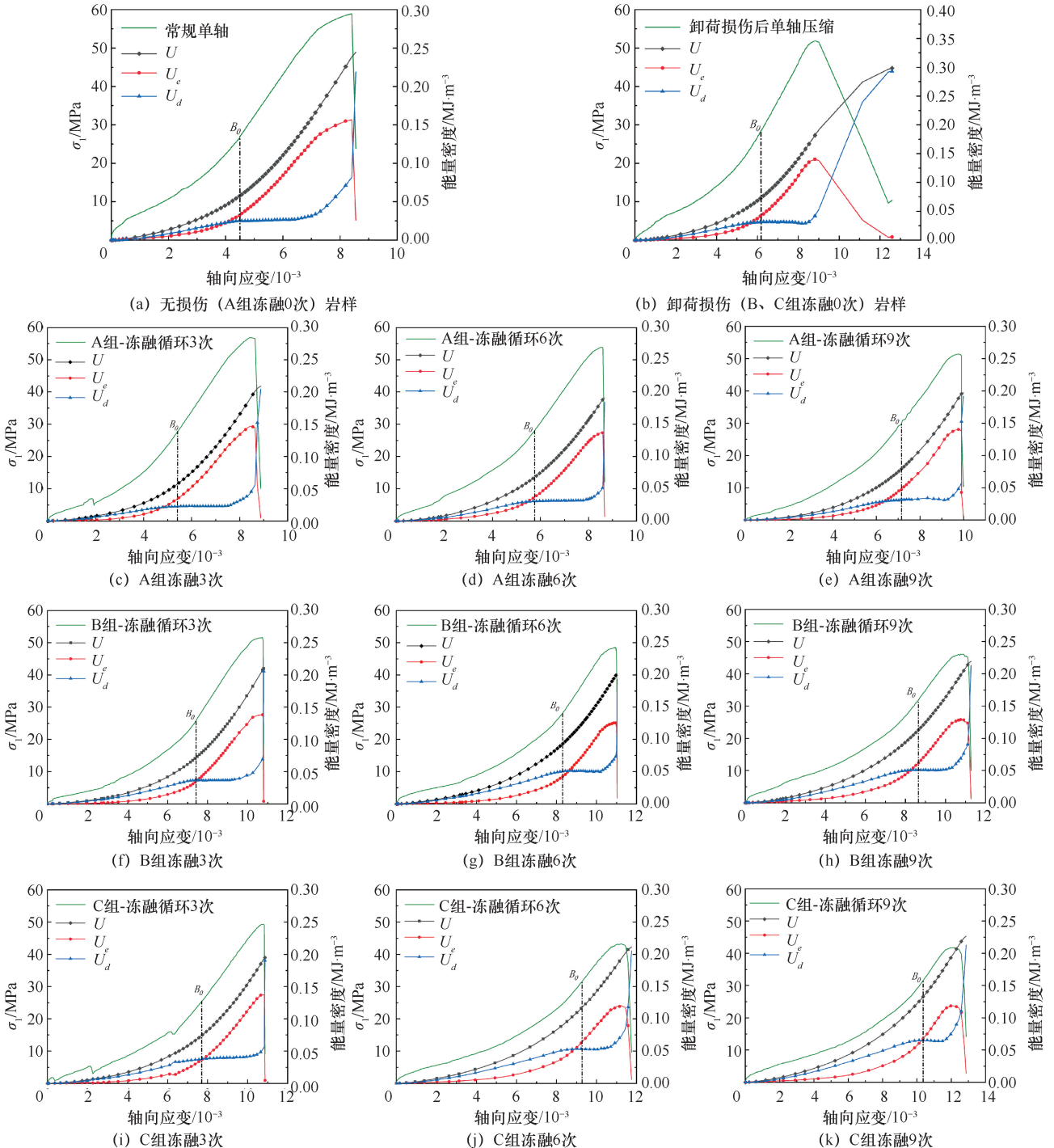


图 10 不同试验条件下能量演化曲线

Fig. 10 Energy evolution curves under different test conditions

样压密阶段前部分, 试验机对岩样输入的能量 U 大都转换为使冻融和卸荷造成的损伤裂隙及原生裂隙闭合的耗散能 U_d , 较少部分能量转化为可释放的弹性应变能 U_e , 压密阶段后部分, 随着能量的输入, 岩样颗粒逐渐密实, 不易错动, 能量弹性能逐渐增大; 当岩样进入弹性变形阶段后, 岩样几乎无微裂纹演化, 耗散能趋于平稳, 该阶段输入的能量几乎全部转化为可释放的弹性应变能, 由图 10 可知, 损伤程度越大, 耗散能平稳阶段越短; 岩样在塑性屈服阶段, 部分单元内部储存的弹性应变能达到单元破坏所需的表面能 U_0 , 单元开始破坏, 随轴向力增大破坏单元逐渐增多, 弹性能释放; 破坏单元达到一定数量后形成贯通破坏面, 弹性能急剧下降。

压密段耗散能越大, 岩样损伤程度越显著, 各试验条件下压密点耗散能如图 11 所示。A、B、C 三组随着冻融次数的增加压密点耗散能分别为: A 组为 $0.0249 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0225 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0309 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0322 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$; B 组为 $0.0313 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0366 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0505 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0513 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$; C 组为 $0.0313 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0377 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0536 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0652 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。与没有经历冻融循环与卸荷损伤的常规单轴压缩岩样对比, 冻融 9 次后, A、B、C 三组岩样在压密段耗散能分别增加 29.32%、106.02%、161.85%。表明 A 组试验条件对岩样内部损伤程度最小, C 组(“卸荷-冻融”损伤)试验条件损伤最显著。

加载过程中存在可释放弹性应变能的积累, 峰值点处弹性应变能称为储能极限 $U_{e,\max}$, 如图 12 所示, 储能极限越小, 代表岩样破坏所需能量越少, 岩样更容易被破坏。随着冻融次数的增加, A、B、C 三组峰值点储能极限分别为: A 组为 $0.1568 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1468 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1371 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1401 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$; B 组为 $0.1401 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1383 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1258 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1290 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$; C 组为 $0.1401 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1373 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1203 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1184 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随冻融次数增加, A、B 两组储能极限呈先减小后略微增大的趋势, C 组呈持续减小的趋势, 出现增大现象是因为能量是强度和应变的积分, 尽管峰值强度降低, 但所对应的应变增大, 变形能力增强, 其可储存的能量不一定减小^[28], 由强度和变形综合控制。与常规单轴压缩岩样对比, 冻融 9 次后, A、B、C 三组岩样储能极限分别减少 10.65%、17.73%、24.49%。

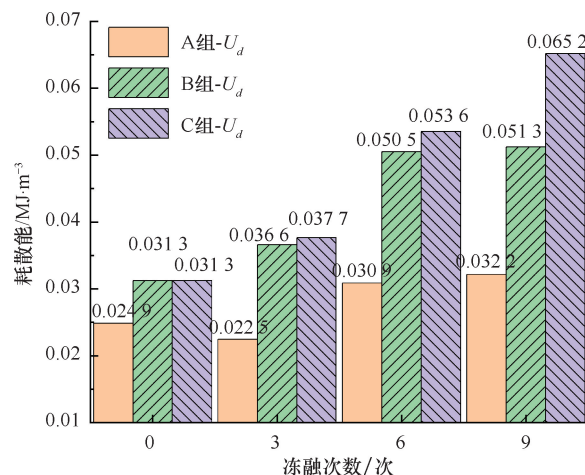


图 11 岩样压密点耗散能

Fig. 11 Dissipated energy at compression points of rock samples

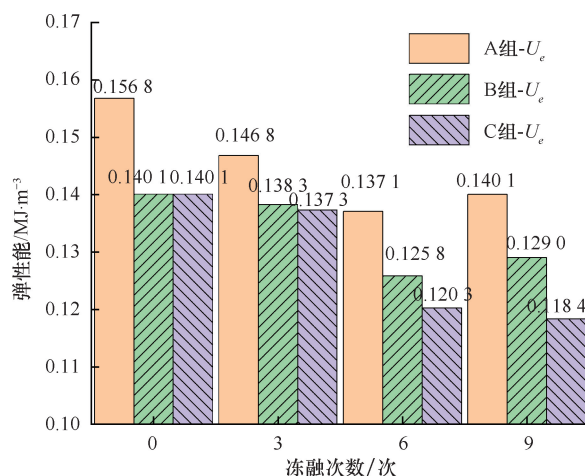


图 12 岩样峰值点弹性能

Fig. 12 Elastic energy at peak point of rock sample

能量演化角度分析表明, 损伤程度最大、储存能量最少均发生在 C 组“卸荷-冻融”损伤条件下。岩质边坡经历开挖等表生改造后, 卸荷效应逐渐显现, 岩体越坚硬卸荷效应越突出, 存在岩体持续变形, 裂隙持续发育^[29]的现象, 且对于结构面复杂的岩质边坡卸荷张拉裂隙更易成为底滑面和后缘滑动边界^[30], 为寒区季节性冻融提供更加发育的损伤条件, 减小岩坡稳定性。综合施工过程中的监测情况合理地对待寒区开挖岩坡进行及时支护, 减小其卸荷损伤程度, 对渗流通道进行灌浆处理, 是一种减弱岩坡受冻融损伤的有效手段。

3.3 损伤砂岩能量分配规律

绘制了峰前耗散能占比 ω_d 和弹性能占比 ω_e 随总输入能的变化曲线来分析损伤砂岩破坏前各阶段总输入能的分配规律, 如图 13 和图 14 所示, 直观反映了岩样在各阶段的内部损伤情况和储存能量的能力; 耗

散能占比与弹性能占比定义如下^[31]

$$\omega_d = \frac{U_d}{U} \times 100\% \quad (6)$$

$$\omega_e = \frac{U_e}{U} \times 100\% \quad (7)$$

式中, U 为试验机对岩石的总输入能($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$); U_d 、 U_e 分别为单元耗散能($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)与单元可释放弹性能($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)。

分析可知: 加载初期, 输入能主要以耗散能的形式存在, 微裂纹和孔隙的存在创造了复杂的应力传递条件, 致使各试验条件下耗散能占比和弹性能占比曲线存在波动现象, 随轴向力的增大, 矿物颗粒挤压导致岩样逐渐密实, 波动现象消失, 如图 13 细部详图所示。随总输入能的逐渐增大, 耗散能占比几乎以线性稳定降低至弹性变形阶段结束达到极值点 F_0 , 进入塑性屈服阶段后, 耗散能占比开始增大, 图 14 所示弹性能占比变化规律与耗散能相反。A、B、C 三组极值点 F_0 处耗散能占比范围分别为 16.79% ~ 21.55%、18.41% ~ 30.62%、25.36% ~ 36.56%, 表明加载前受劣化程度显著的岩样在加载过程中易受到持续损伤; 耗散能使岩样强度持续劣化, 能量积聚是岩样整体破坏的驱动力, 当岩样耗散能占比增大且储能极限减小表明岩样强度损失率提高且积累更少的能量就会发生破坏。

3.4 损伤砂岩失稳模型及机制探讨

能量从岩样端部输入并在内部传递、耗散、储存到最后释放, 综合上述分析, 不同试验条件或对上述过程产生不同程度的影响, 因此建立如图 15 所示岩样失稳模型^[24], 探讨岩样失稳机制。图 15 (a) — (d) 为无损岩样从加载至失稳过程的演化模型, 加载初期,

输入能量用于因颗粒错动使孔隙压密的耗散能和逐级增加的可释放弹性能, 当积累能量达到承载单元表面能后单元破坏, 弹性能释放传递至周边单元且易向较

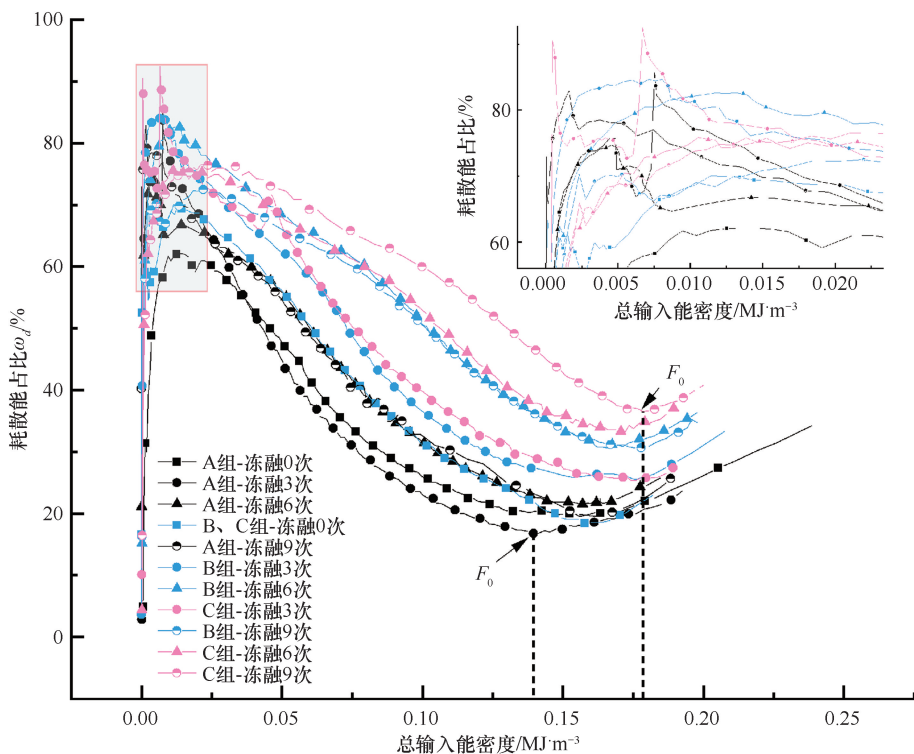


图 13 岩样峰前耗散能占比曲线

Fig. 13 Proportion of dissipated energy before the peak of the rock sample

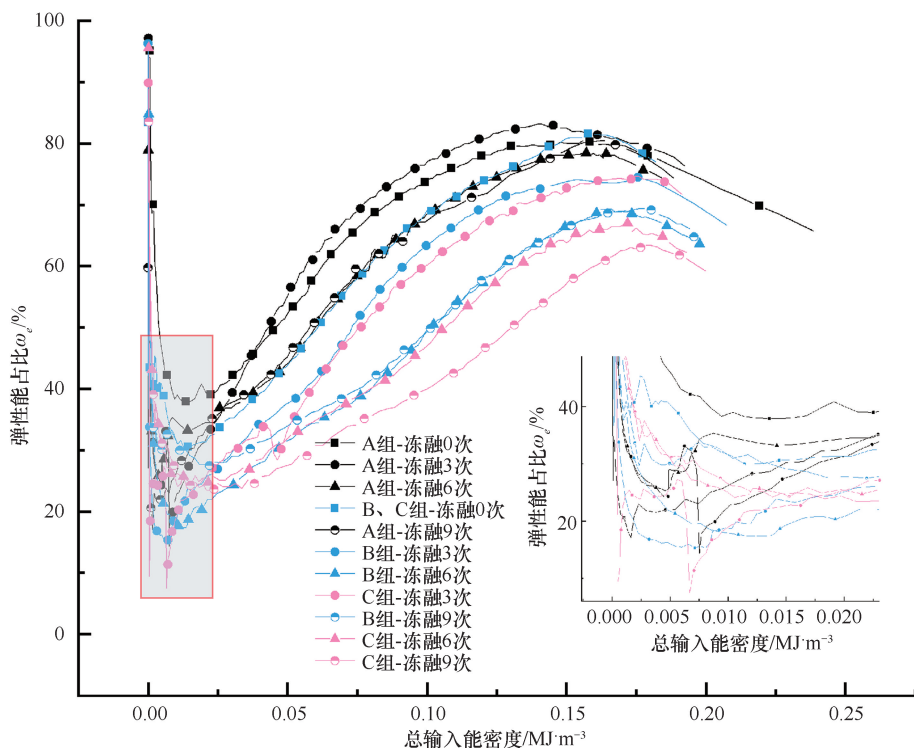


图 14 岩样峰前弹性能占比曲线

Fig. 14 Proportion curve of elastic energy before the peak of rock samples

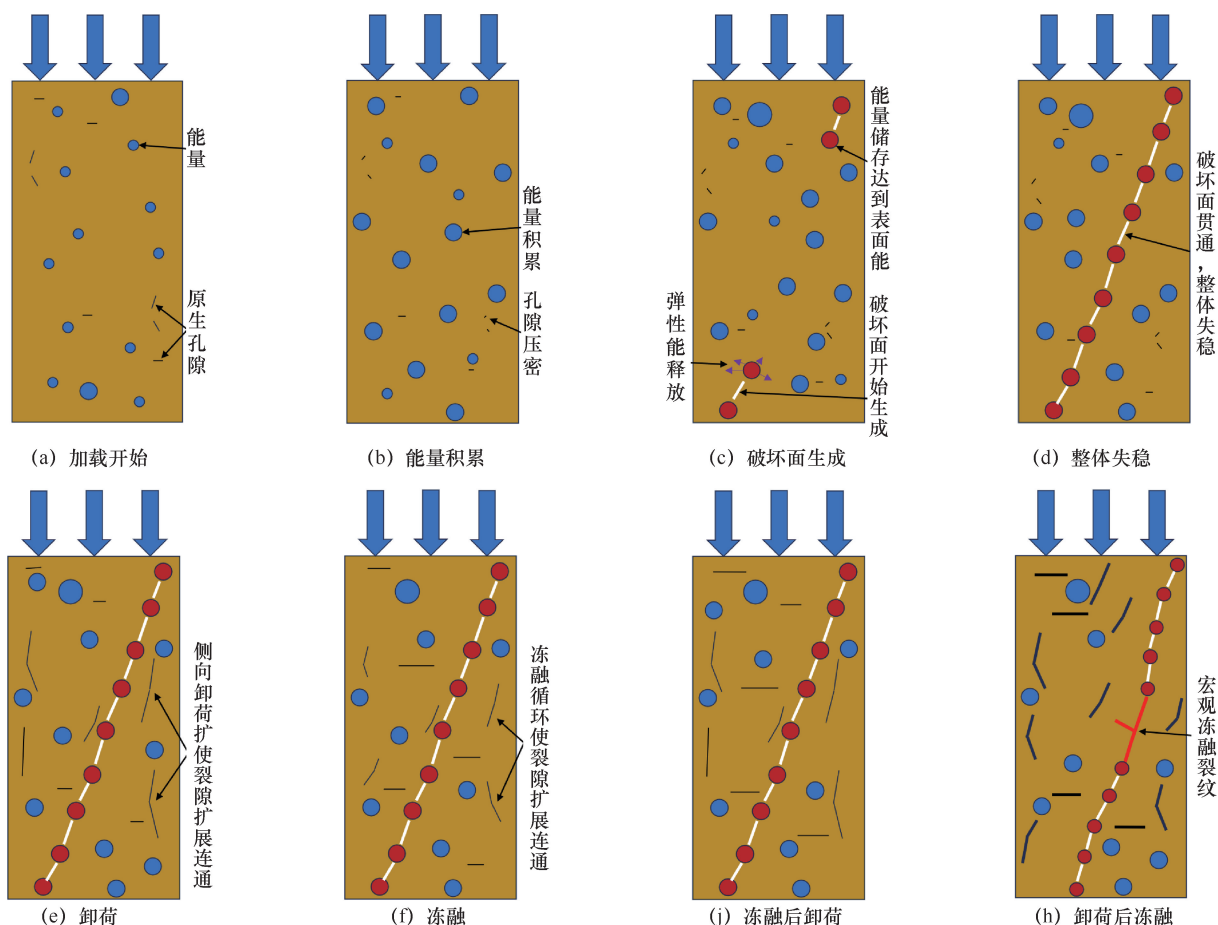


图 15 岩样失稳演化模型

Fig. 15 Instability evolution model of rock samples

小压应力或拉应力方向释放^[26], 转化为裂隙生成及连通所需的耗散能和可供其余未达到表面能的单元吸收的弹性能, 耗散能使岩样颗粒间相互作用持续劣化; 继续加载, 破坏单元累加, 多数单元弹性能短时间内达到表面能后, 大量弹性能瞬间释放传递, 主破坏面形成, 岩样整体失稳。

图 15(e)–(h) 为各损伤条件下岩样整体失稳时模型, 研究证明^[32], 本文卸荷损伤采取的定轴压卸围压方式对岩样侧向变形扩容影响明显, 且变形量自卸荷面向里逐渐减小, 因此卸荷损伤易使平行于卸荷面方向孔隙连通, 张拉裂纹的形成与卸荷效应存在必然联系。文献[33]表明, 冻胀力的大小及方向受孔隙裂隙几何形态及冻结方向有关, 本试验过程中内鼓现象及宏观冻融裂纹在岩样中部为主要出现区域, 认为本文所用岩样在本文冻融环境中, 冻融循环对中部岩体裂隙扩展与连通较其他部位更明显, 破坏后表面出现较多张拉裂纹。综合前述分析, 冻融后卸荷损伤对岩样裂隙发育并无明显相互作用效果, 内部孔隙损伤趋近于卸荷与冻融损伤叠加, 张拉裂纹发育较冻融

损伤更深。前期卸荷损伤使岩样孔隙发育, 为饱水后冻融提供了发育的孔隙环境, 含水量增大, 冻胀效果更加显著; 冻融宏观裂纹端部能量更易积聚和破坏, 导致主破坏面及张拉裂纹等沿其方向发展。

综合上述各试验条件岩样劣化特点和能量耗散与释放角度分析, 内部结构损伤越严重的单元更易积聚能量且同时其储能极限降低; 随能量的输入及释放, 受卸荷及冻融作用形成的微裂隙更易在其损伤基础上发展直至破坏。

4 结果讨论

本文综合考虑了寒区水电工程存在的客观冻融环境与工程开挖扰动因素对岩体的损伤, 开展了“冻融”损伤、“冻融-卸荷”损伤和“卸荷-冻融”损伤条件下的单轴压缩试验, 分析了岩样的力学特征和能量演化规律, 为高寒地区岩坡受开挖扰动后不同损伤区的损伤劣化程度提供一定的参考价值, 与前人研究相比更加注重施工前后岩体不同区域的具体损伤状态, 但本文进行的研究较为基础, 与其他研究存在以

下异同与不足。

(1)与文献[27]相比,单轴压缩下岩样能量演化规律整体一致,但其应力-应变曲线在冻融多次后出现多峰情况,本文并没有出现,分析认为所选岩样矿物成分及孔隙结构差异,受冻融损伤机制不同,导致岩样破裂机制与本文存在差异。

(2)本文选取了1 MPa/min卸荷速率和60%卸荷量级评判卸荷损伤,后续可考虑不同卸荷速率和不同卸荷量级的分析。

(3)本文只针对完整砂岩进行了研究和分析,并未对含裂隙或夹层岩样及其他种类岩样进行研究,后续可针对工程中不同程度裂隙发育带及不同部位和成分岩体进行研究。

5 结论

本文对砂岩开展“冻融”(A)损伤、“冻融-卸荷”(B)损伤、“卸荷-冻融”(C)损伤三种试验条件下的单轴压缩试验,分析了岩样强度、变形特性及能量损伤规律,得到主要结论如下。

(1)与无损伤岩样相比,A、B、C三组单轴抗压强度劣化度最大分别为12.78%、21.76%、29.14%,弹性模量劣化度最大分别为14.83%、25.56%、33.50%,前期冻融损伤对卸荷损伤的反馈程度要低于前期卸荷损伤对冻融损伤的反馈程度。

(2)冻融损伤使岩样张拉裂纹增多,岩样破裂形态由剪切破坏向拉剪复合破坏演化,C组拉伸裂纹发育最深,剪切滑移面和张拉裂纹易与宏观冻融裂纹连通且沿其方向发展。

(3)与常规单轴压缩岩样对比,冻融9次后,A、B、C三组岩样在压密段耗散能分别增加29.32%、106.02%、161.85%,峰值点储能极限分别减少10.65%、17.73%、24.49%。

(4)A、B、C三组极小值点耗散能占比范围分别为16.79%~21.55%、18.41%~30.62%、25.36%~36.56%,表明加载前受劣化程度显著的岩样在加载过程中易受到持续损伤;岩样耗散能占比增大且储能极限减小表明岩样强度损失率提高且积累更少的能量就会发生破坏。

(5)构建岩样失稳模型,简单探讨岩样失稳机制,认为卸荷损伤与冻融损伤的形成机制对岩样宏观破裂形态、加载过程中能量的耗散占比及弹性能储存释放有直接影响。

由试验结果分析,针对工程应用,应综合地质勘测与实际施工情况对受冻融影响关键岩体做好有效支

护减小卸荷效应影响,并在坡表做好导排水和灌浆防渗等措施减少水体渗透路径,以削弱冻融损伤对岩体带来的影响。

参考文献(References):

- [1] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
LI Jianlin. Unloading Rock Mass Mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [2] 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.
- [3] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034-2041.
LI Jianlin, WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2034-2041.
- [4] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平, 等. 应力路径对裂隙试样力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3092-3099.
HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SHI Junping, et al. Experimental study of effect of stress paths on mechanical characteristics of cracked samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3092-3099.
- [5] 赵国彦, 戴兵, 董陇军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3121-3127.
ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics 2015, 36(11): 3121-3127.
- [6] 孙浩, 朱东风, 金爱兵, 等. 非线性卸荷速率下的硬岩破坏特性与裂纹演化规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 1010-1018.
SUN Hao, ZHU Dongfeng, JIN Aibing, et al. Failure characteristics and crack evolution laws of hard rock under nonlinear unloading rates [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(7): 1010-1018.
- [7] 邓华锋, 陈天楠, 李建林, 等. 峰前卸荷损伤灰岩的再加载力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1301-1311.
DENG Huafeng, CHEN Tiannan, LI Jianlin, et al. Reloading experimental research on the mechanical properties of limestone

- considering pre-peak unloading damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1301-1311.
- [8] WANG Y, HAN J, LI P, et al. Effect of prior cyclic damage on rock failure exposed to triaxial multistage unloading confining pressure and cyclic loads [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(3): 1140-1158.
- [9] 胡宝文, 南博文, 吕聪瑞, 等. 卸荷条件下花岗岩破裂面粗糙度特征及成因分析试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(2): 180-192.
- HU Baowen, NAN Bowen, LYU Congrui, et al. Experimental study on roughness characteristics and genesis analysis of granite fracture surface under unloading condition [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 180-192.
- [10] 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, 28(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, 28(8): 1688-1694.
- [11] 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.
- [12] 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 Xiping, LU Yani, WENG Yangjun, et al. 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.
- [13] 宋彦琦, 马宏发, 刘济琛, 等. 冻融灰岩单轴声发射损伤特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2603-2614.
- SONG Yanqi, MA Hongfa, LIU Jichen, et al. Experimental investigation on the damage characteristics of freeze-thaw limestone by the uniaxial compression and acoustic emission monitoring tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2603-2614.
- [14] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74: 555-565.
- [15] 俞缙, 傅国锋, 陈旭, 等. 冻融循环后砂岩三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2001-2009.
- YU Jin, FU Guofeng, CHEN Xu, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone after freezing-thawing cycles under triaxial confining pressure unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2001-2009.
- [16] 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 Minggao, XU Qiang, DENG Wenfeng, 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.
- [17] 倪晓慧, 沈晓梅, 华昕若, 等. 冻融循环后砂岩卸荷过程应变能转化特征研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(4): 246-255.
- NI Xiaohui, SHEN Xiaomei, HUA Xinruo, et al. Strain energy conversion behaviors of sandstone after freeze-thaw cycles under triaxial confining pressure unloading [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4): 246-255.
- [18] 朱珍德, 色麦尔江·麦麦提玉苏普, 方若进, 等. 冻融循环作用下砂岩卸荷强度特性试验及损伤特性研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 1-5.
- ZHU Zhende, Semerjan Memetyusup, FANG Ruojin, et al. Unloading strength characteristics and damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3): 1-5.
- [19] 色麦尔江·麦麦提玉苏普, 朱珍德. 冻融循环作用下卸荷砂岩微观损伤特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 76-81.
- SEMAIERJIANG Maimaitiyusupu, ZHU Zhende. Experimental study on micro-damage characteristics of unloaded sandstone under freeze-thaw cycles [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 76-81.
- [20] CHEN X Z, CHEN L L, MA B, et al. Mechanical-characteristic evaluation of excavation unloading rock mass subject to high-temperature conditions [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130: 105757.
- [21] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. “饱和-风干”循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 483-488.
- DENG Huaifeng, LI Jianlin, WANG Kongwei, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 483-488.
- [22] 陈光波, 张俊文, 李谭, 等. 水岩作用下煤岩组合体力学特性损伤劣化机制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 701-712.
- CHEN Guangbo, ZHANG Junwen, LI Tan, et al. Timeliness of damage and deterioration of mechanical properties of coal-rock

- combined body under water-rock interaction [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 701-712.
- [23] 叶永芑, 杨圣奇, 孙博文. 红砂岩冻融循环三轴力学特性及损伤机制[J]. 实验力学, 2023, 38(6): 751-761.
YE Yongpeng, YANG Shengqi, SUN Bowen. Triaxial mechanical properties and damage mechanism of the freeze-thaw cycle of red sandstone [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(6): 751-761.
- [24] CHEN G B, TANG W, CHEN S J, et al. Damage effect and deterioration mechanism of mechanical properties of fractured coal-rock combined body under water-rock interaction [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 58: 513-537.
- [25] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 292-296.
YOU Mingqing, HUA Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 292-296.
- [26] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyu, et al. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [27] 贾蓬, 毛松泽, 孙占阳, 等. 冻融损伤砂岩的能量演化及分段本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 908-919.
JIA Peng, MAO Songze, SUN Zhanyang, et al. Energy evolution and piecewise constitutive model of freeze-thaw damaged sandstone [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(3): 908-919.
- [28] GAO F, CAO S P, ZHOU K P, et al. Damage characteristics and energy-dissipation mechanism of frozen-thawed sandstone subjected to loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102920.
- [29] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [30] 麻景瑞, 董元滨. 顺向节理高陡岩质边坡破坏机理研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(4): 114-121.
MA J R, DONG Y B. Study on the failure mechanism of high steep rock slope with bedding joints [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(4): 114-121.
- [31] 苗胜军, 刘泽京, 赵星光, 等. 循环荷载下北山花岗岩能量耗散与损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 928-938.
MIAO Shengjun, LIU Zejing, ZHAO Xingguang, et al. Energy dissipation and damage characteristics of Beishan granite under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 928-938.
- [32] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 502-512.
HUANG Da, HUANG Runqiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 502-512.
- [33] 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 Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, 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.

(责任编辑 王海锋)