

冻融循环层理砂岩破坏模式试验研究

陈 涛¹, 何 伟²

(1. 黄河科技学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450063; 2. 华北水利水电大学 土木交通学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 在西部高寒地区, 冻融循环作用对岩石路基稳定性具有不可忽视的影响, 易引发一系列的工程地质问题。为研究冻融循环环境下各向异性层理砂岩的损伤特性, 选取路基中典型垂直、平行层理砂岩试样开展冻融循环试验研究, 基于电液伺服压力试验机进行单轴压缩试验, 以应力-应变曲线、力学参数和压缩破坏形态为依据, 探究了冻融循环损伤后层理砂岩强度、变形特征的演化规律及破坏模式。研究表明: 随着冻融次数的增加, 垂直、平行层理试样呈现出向右拉伸, 向下压缩的应力-应变曲线; 垂直层理砂岩试样峰值点下降路径平缓, 而平行层理砂岩试样则沿阶梯状路径下降; 冻融损伤累积减弱了破坏模式的各向异性特征, 随冻融次数的增加, 垂直层理砂岩试样裂缝与加载方向趋于平行, 平行层理砂岩试样则始终表现为沿层理的劈裂破坏。

关键词: 岩石力学; 层理砂岩; 冻融循环; 各向异性; 破坏模式

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0079-06

Research on failure modes of stratified sandstone under freeze-thaw cycling

CHEN Tao¹, HE Wei²

(1. School of Civil Engineering, Huanghe Science & Technology College, Zhengzhou 450063, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In the western alpine region, freeze-thaw cycling can not be ignored on the stability of rock roadbed, which can cause a series of engineering geological problems easily. To study the damage properties of anisotropy stratified sandstone under freeze-thaw cycling, the freeze-thaw cycle tests were carried out on the vertical and parallel stratified sandstone samples on the subgrade, and the differences in the freeze-thaw damage of the two inclinations were analyzed. Single-axis compression testing was carried out based on an electro-hydraulic servo pressure tester. Based on the stress-strain curve, mechanical parameters and compression and failure modes, the evolution law of the sandstone strength and deformation characteristics of the sandstone after the freeze-thaw cycle was explored, research indicated: With the increase of freezing and thawing times, the stress-strain curves of the two kinds of bedding samples were as follows: Stretch to the right and compress down; The descending path of the peak point of the vertical stratified sandstone samples was gentle, while the parallel stratified sandstone samples descends along the stepped path; The accumulation of freeze-thaw damage weakened the anisotropic characteristics of the failure mode. With the increase of freezing and thawing times, the cracks of the vertical stratified sandstone samples were gradually parallel to the loading direction, and the parallel stratified sandstone samples was always shown as splitting damage along the bedding direction.

Key words: rock mechanics; stratified sandstone; freeze-thaw cycle; failure modes

随着西部大开发建设的蓬勃发展以及“一带一路”建设的战略驱动, 川藏铁路等一大批重要工程将在我国西部高寒地区这种特殊地域、特殊环境下建设。在高寒地区, 冻融循环作用对岩石路基稳定性具有不可忽视的影响, 并引发了一系列的工程地质问题^[1], 对我国高寒地区的开发带来诸多困难。矿物质分层是层理岩石的鲜明特点, 由于

各分层本身的强度参数不同, 并且存在大量层理结合部, 导致层理岩石的力学性质比均质岩石更为复杂, 冻融循环作用下的损伤累积更是增加了物理力学性质的复杂性, 基于以往各向同性岩石在冻融环境中的研究成果难以对生产实践提供准确的参考。

许多学者对冻融循环作用下岩石性质进行了

深入探讨,为高寒地区冻融岩石的研究奠定了基础: T. C. Chen 等^[2]通过对不同含水率 Sapporo 凝灰岩进行冻融损伤试验,得到了冻融劣化程度与含水率的相关关系;徐光苗等^[3]对原始细观孔隙结构不同的饱水红砂岩、页岩进行冻融循环试验,探究了孔隙率对岩石类材料冻融劣化特征的影响;张继周等^[4]分析了冻融循环条件下,岩石质量损伤和单轴压缩力学特性;贾海梁等^[5]基于冻融循环过程中岩石的孔隙结构变化、冻融损伤的微观观察和砂岩的冻胀变形过程,对砂岩冻融损伤机制进行了验证。

也有不少学者对层理岩石进行了有价值的研究:王章琼等^[6]研究了片岩变形参数的各向异性和水敏性机制;孙旭曙等^[7]对预制的不同倾角、单一贯通节理试样进行了三轴压缩试验,探究了节理岩石强度、变形的各向异性特征;陈天宇等^[8]通过 SEM 电镜扫描分析了页岩的微观矿物质结构和层理特征,开展了不同围压、层理角度页岩的力学试验研究,归纳了其力学行为和各向异性特性;肖维民等^[9]基于预制的不同倾角节理岩体模型,研究了柱状节理岩体变形、强度参数随柱体倾角的变化规律,并分析了柱状节理岩体单轴压缩破坏模式;衡帅等^[10]研究了页岩断裂韧性的各向异性特征,并揭示了其断裂机制的各向异性,探讨了层理在页岩网状裂缝形成过程中的重要作用。

随着高寒地区岩土工程逐年增加,涌现出的工程地质问题也越来越多,因此有必要对冻融循环损伤层理岩石开展破坏模式试验研究。本文基于电液伺服压力试验机,对不同次数冻融循环的垂直、平行冻融损伤层理砂岩试样进行压缩试验,研究了冻融循环条件下层理砂岩的强度、变形、破坏模式及其各向异性特征,以进一步探究层理岩石冻融循环条件下的物理力学特性。

1 试验概况

试验用云南典型路基层理砂岩岩样矿物成分主要含量为:石英 48.6%、钾长石 28.4%、伊利石 11.1%、白云石 6%、滑石 2.9%、方解石 2.5%、透辉石 0.5%。

图 1 为基于 Coulomb 定律作出的一般层理岩石力学效应示意图^[7],图中所示力学状态仅为理论情况(在实际中并不存在)。由图 1 可知,当层理角度满足 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 时,摩尔圆上的应力点处于层

理抗剪强度曲线之上,即在该状态下,切向应力大于弱岩石层理的抗剪强度,岩体将沿弱面滑动破坏,在这种破坏模式下,岩石所呈现出的力学性质在很大程度上仅取决于弱层理面的强度,而关于岩石基体力学性能的体现较少。

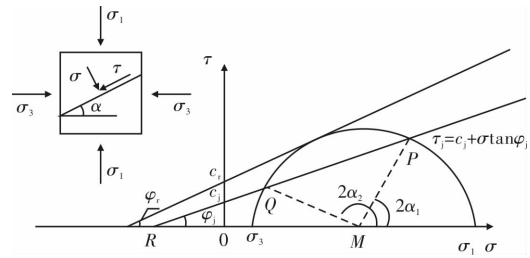


图 1 层理岩石力学效应示意图^[7]

Fig. 1 The mechanics effect of stratified rock

注: σ 为层理面法向应力; τ 为层理面切向应力; α 为层理倾角; c 为材料黏聚力; φ 为材料内摩擦角; 两直线为不同层理抗剪强度曲线。

本文根据木纹砂岩原始层理方向,将试样加工为 $\alpha = 0^\circ$ (层理面与加载方向垂直,称垂直层理试样)和 $\alpha = 90^\circ$ (层理面与加载方向平行,称平行层理试样)两种倾角,试样选用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准试样,见图 2、图 6。试验前首先对原始试样进行外观、质量、超声筛选,剔除离散性较大的试样。

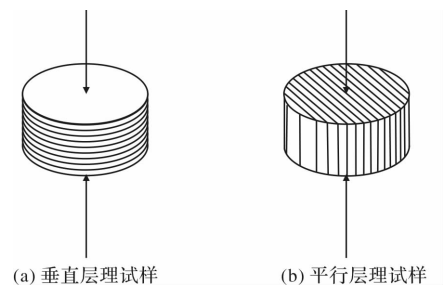


图 2 两种倾角层理试样

Fig. 2 Two kinds of inclined stratified samples

根据《GB/T50266-2013 工程岩体试验方法标准》^[12]进行冻融循环试验:首先将筛选后的试样放置在 $107 \pm 1^\circ\text{C}$ 恒温箱中鼓风烘干 24 h,待冷却后将干燥试样煮沸 6 h,并确保煮沸过程中液面始终高于试样,制得饱水试样,最后使用自动冻融循环试验箱对饱水试样进行冻融试验^[12]。在本试验中,每个试验条件对应 3 块试样,两种倾角层理试件的冻融循环次数均设置为 0 次、10 次、20 次、30 次、40 次共 5 个循环组,一次冻融循环试验如图 3 所示,每完成 4 次冻融循环,对试样的饱水质量和水中质量进行一次测量^[12]。

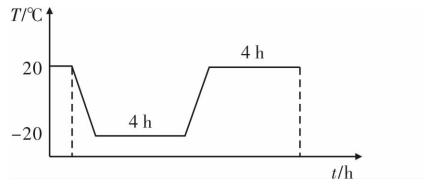


图 3 一次冻融循环试验

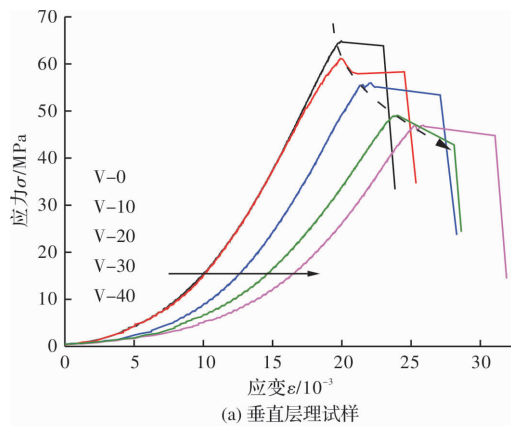
Fig. 3 One freeze-thaw cycle

2 试验结果与分析

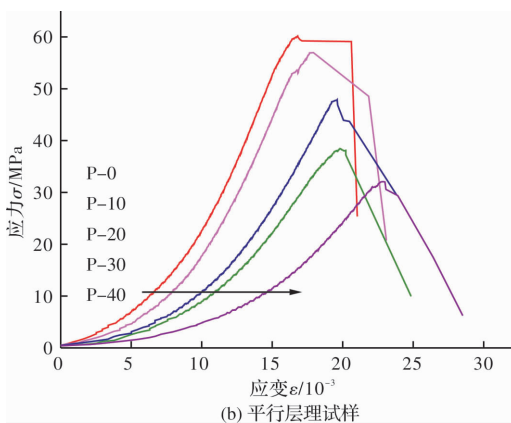
2.1 冻融循环层理砂岩力学特性

采用电液伺服压力试验机, 以 20 kN/min 的加载方式对冻融循环试样进行压缩试验. 为了消除试验开始时压缩机和试件接触调整产生的紊乱数据, 在对应力-应变曲线进行处理时, 选取应力大于 0.5 MPa 以后的数据为有效数据, 从得到的应力-应变曲线来看, 不存在幅度较大的波动现象.

从每种试验条件下的 3 个试样中选取典型的应力-应变曲线(图 4). 由图 4 分析可知, 冻融循环试样应力-应变曲线整体趋势为: 随着冻融次数 m 的增大, 曲线向右拉伸, 向下压缩.



(a) 垂直层理试样



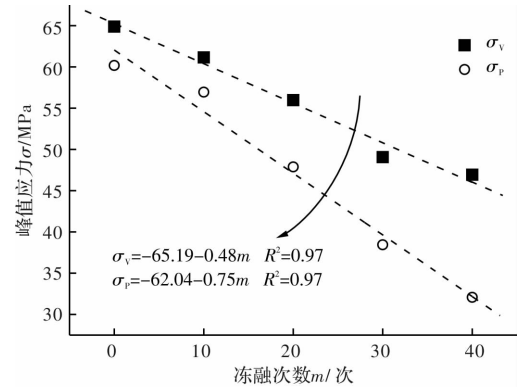
(b) 平行层理试样

图 4 冻融循环试样应力-应变曲线

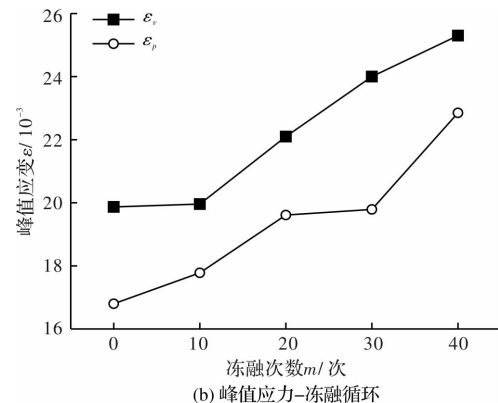
Fig. 4 Stress-strain curve group of freeze-thaw cycle specimen

注: 图中编号 V- x , P- x 分别表示冻融 x 次垂直层理试样、冻融 x 次平行层理试样

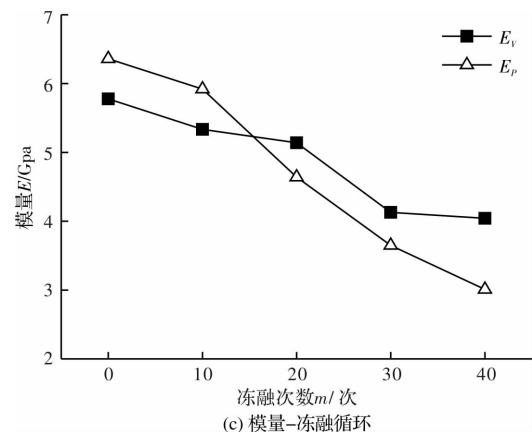
由冻融循环层理砂岩试样力学参数图(图 5)可知, 随着冻融循环次数的增加, 应力-应变曲线压密应变范围逐渐变大, 峰值应力和模量逐渐降低, 峰值应变逐渐增大. 其中, 峰值应力 σ 与冻融次数 m 呈线性关系, 拟合效果良好, 关系式见图 5(a).



(a) 峰值应力-冻融循环



(b) 峰值应变-冻融循环



(c) 模量-冻融循环

图 5 冻融循环层理砂岩试样力学参数

Fig. 5 Mechanical parameters of stratified sandstone samples for freeze-thaw cycles

注: 图中角标意义同图 4.

平行、垂直两种试样在冻融循环过程中损伤发育程度不一, 并且在承受荷载时, 试样内部结构响应有所差异. 因此, 两种试样在冻融循环损伤后所呈现出的力学性质存在明显的差异:

(1) 峰值点劣变路径

应力-应变曲线峰值点是应力-应变关系的重

要特征,在冻融循环试样应力-应变曲线组中,峰值点的系列变化直观地体现了冻融循环条件下岩石材料的性能劣化规律。由图4可见,在横轴为应变,纵轴为应力的坐标轴中,40次冻融循环过程中,垂直层理试样峰值点下降路径平缓,而平行层理试样则明显不同,下降路径近似于阶梯状,即垂直层理试样峰值应变和峰值应力随着冻融次数的增加而平滑降低,而平行层理试样峰值应变的下降相对于峰值应力则有“放缓”现象。

(2)峰后应变软化曲线形态

峰值强度之后,岩石结构已发生整体性破坏,随着材料形变的继续增加,强度迅速下降,这种现象叫做“应变软化”^[15]。由应变软化曲线形态,可以得到岩石失稳后的结构-荷载响应关系,由图4可见,垂直层理试样在峰值强度之后,应力发生小幅降低,并在一定应变区段内保持,由试验现场观测可知,峰值强度之后,试样的承载能力下降非常快,因此这段应力平衡时间其实非常短,材料应变率较高;对于平行层理试样,峰后曲线并没有出现应力平衡段,应力随应变的增长直线下降。

(3)强度、变形参数

如图4、图5所示,在相同冻融循环次数下垂直层理试样的峰值应力和峰值应变均大于平行层理试样,随着冻融次数的增加,两种倾角试样峰值应力差值逐渐增大,为了进行定量说明,引入衡量岩石强度的各向异性指标^[16]:

$$R_c = \sigma_{ci(90)} / \sigma_{ci(0)}$$

式中: $\sigma_{ci(90)}$ 为垂直层理试样峰值应力, $\sigma_{ci(0)}$ 为水平层理试样峰值应力。

可得, R_c 由0次冻融循环时的1.07,增加到了40次冻融循环时的1.46,即强度的各向异性特征随冻融次数的增加愈加明显;而峰值应变之差相对稳定,在40次冻融循环试验中,比值均值为1.15。

由冻融循环层理砂岩的损伤发育研究可知,平行层理试样冻融损伤发育程度高于垂直层理试样^[17],一般来讲,材料损伤程度越高,其抵抗变形的能力越弱^[17],但如图5(c)所示,在10次冻融循环之前,平行层理试样弹性模量却大于垂直层理试样,分析其原因,是由层理结构在荷载下所发挥的效能所致:(1)平行层理试样承受荷失稳时,岩石内部结构力学效应类似于各层理面的“压

杆失稳”^[6],材料的变形抵抗能力得到充分发挥,表现为弹性模量更大;(2)随着冻融次数的增加,冻融损伤程度逐渐加深,以致损伤累积效应逐渐削弱层理结构对试样变形抵抗能力的影响,加之平行层理试样损伤发育程度更高,因此20次冻融循环以后,平行层理试样的弹性模量小于垂直层理试样。

2.2 冻融循环层理砂岩破坏模式

岩石试样破坏模式体现了岩石物理力学性质,其破坏模式不仅和加载条件、矿物质性质有关,同时还与其损伤程度及内部结构特征相关。岩石层理及沿层理分布的孔隙、微裂隙等缺陷在受荷失稳时均表现为弱势结构,更易于联结为破坏性的大裂缝。观察试样裂缝形态可得(见下图6),由于试样层理方向及冻融条件下层理砂岩损伤发育存在差异,因此,在不同冻融循环次数下,两种层理试样单轴静态压缩破坏裂缝和形态也表现出显著的各向异性特征,同时还可得到,冻融循环作用对试样破坏模式有着明显影响。

对于垂直层理试样,在冻融次数为0次、10次时,主裂缝以一定角度(30°左右)发展,表现为贯穿多个层理面的剪切破坏形态,但是随着冻融循环次数的增加,主裂缝与加载方向逐渐趋于平行。

对于平行层理试样,由于原始缺陷及冻融循环损伤多平行于层理分布,在轴向荷载下,缺陷进一步发育,最终贯通、扩展为沿层理的破坏裂缝,因此无论是0、10次冻融,还是20、30、40次冻融,试样破坏模式均表现为劈裂破坏形态;同时还可以观察到,随着冻融次数的增加,两种层理试样裂缝数量均呈现出整体增多的趋势。

对比分析冻融次数较少时两种层理砂岩试样的破坏模式,之所以垂直层理试样破坏裂缝以一定角度发展,分析原因是由于冻融损伤程度较低时,层理结合部作为弱势结构在裂缝发展时作用相对明显,引导开裂路径向层理方向偏移;但随着冻融次数的增大,岩石内部损伤发育加剧,由层理构造引起的破裂强度差异对断裂路径发展的影响逐渐减小,因此,破坏裂缝逐渐呈现出各向同性岩石单轴静态压缩状态下典型的张拉破坏模式^[18],导致破坏裂缝沿加载方向发育,归纳可得如图7所示冻融循环层理砂岩单轴压缩裂缝发展规律。

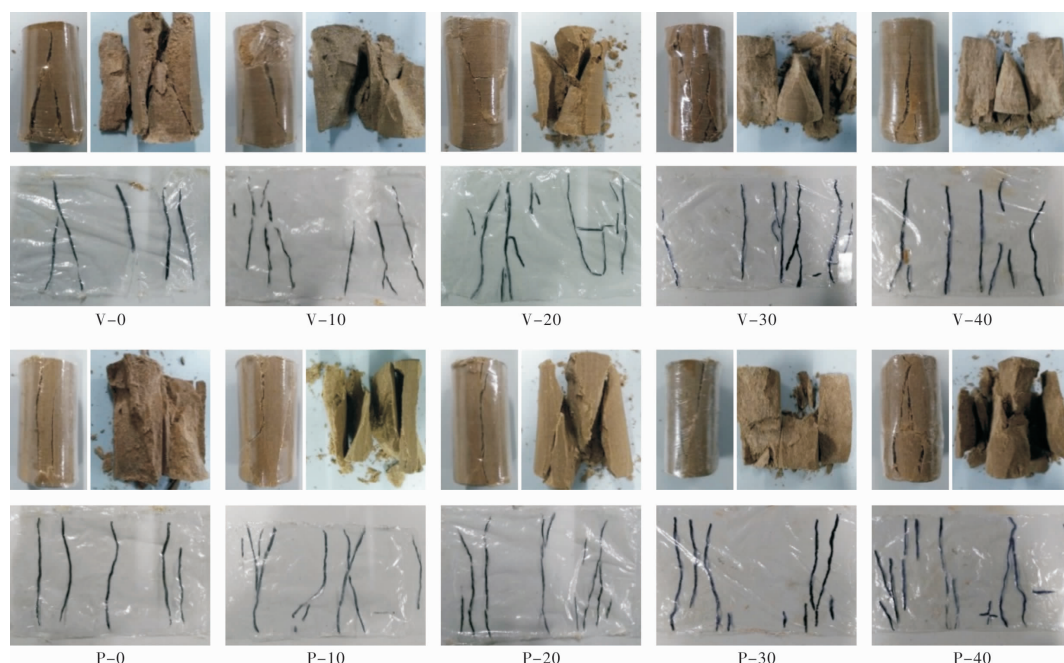


图6 单轴压缩试验试样破坏形态

Fig. 6 Destructive form of uniaxial compression test specimen

注: 图中编号意义同图4.

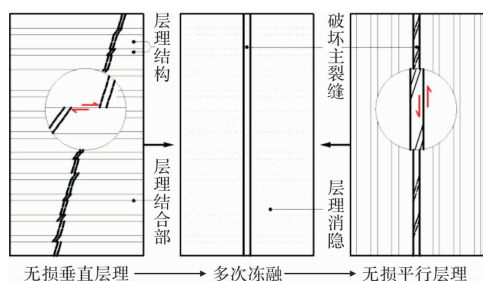


图7 两种倾角层理试样破坏模式

Fig. 7 Destruction patterns of two kinds of inclined stratified samples

注: 图中宽、窄两种条带示意不同层理结构; 细线即层理结合部; 多次冻融后, 虚线表示层理结构作用消隐; 粗实线为破坏裂缝。

3 结论

本试验对垂直、水平层理砂岩进行不同次数冻融循环试验, 基于电液伺服压力试验机对冻融损伤试样进行单轴压缩试验, 研究了冻融循环作用下层理砂岩的强度、变形、破坏模式及其各向异性特征, 结论以下:

(1)随着冻融次数的增加, 两种倾角层理试件应力-应变曲线整体表现为: 向右拉伸, 向下压缩。

(2)以应变为横轴, 应力为纵轴, 在40次冻融循环过程中, 垂直层理试样峰值点下降路径平缓, 而平行层理试样下降路径近似于阶梯状; 垂直层理试样在峰值强度之后, 应力小幅度减小, 并在一定应变区段内保持稳定, 而平行层理试样峰值

点后应力随应变直线下降。

(3)随着冻融损伤的累积, 层理砂岩强度的各向异性特征愈加明显, 而层理结构对试样变形抵抗能力的影响降低, 具体表现为, 20次冻融前, 平行层理试样弹性模量大于垂直层理试样, 20次冻融后, 平行层理试样弹性模量小于垂直层理试样。

(4)冻融少于10次时, 垂直层理试样破坏裂缝以一定角度(30° 左右)发展, 表现为贯穿多个层理面的剪切破坏, 随着冻融次数的增加, 裂缝与加载方向趋于平行; 平行层理试样则始终表现为沿层理的劈裂破坏; 随着冻融次数的增加, 两种层理试样裂缝数量均整体增多。

参考文献 References

- [1] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1318-1336.
CHEN Weizhong, TCAN Xianjun, YU Hongdan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of low temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1318-1336.
- [2] CHEN T C, YEUNG M R, MORIC N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(1): 127-136.
- [3] 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 freezing-thawing cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [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 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.
- [5] 贾海梁, 项伟, 谭龙等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879-895.
- JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879-895.
- [6] 王章琼, 晏鄂川, 黄祥嘉, 等. 鄂西北片岩变形参数各向异性及水敏性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 3968-3972.
- WANG Zhangqiong, YAN Echuan, HUANG Xiangjia, et al. Anisotropic and water sensitivity properties study of schist deformation parameters in northwest of hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 3968-3972.
- [7] 孙旭曙, 李建林, 王乐华, 等. 单一预制节理试件各向异性力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 29-41.
- SUN Xushu, LI Jianlin, WANG Lehua, et al. Experimental research on anisotropic mechanical characteristic of samples with single prefabricated joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 29-41.
- [8] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1772-1779.
- CHEN Tianyu, FENG Xiating, ZHANG Xiwei, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1772-1779.
- [9] 肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 等. 单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 957-963.
- XIAO Weimin, DENG Ronggui, FU Xiaomin, et al. Model experiments on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 957-963.
- [10] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228-237.
- HENG Shuai, YANG Chunhel, GUO Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228-237.
- [11] HENG Shuai, YANG Chunhel, GUO Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228-237.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Engineering rock mass test method: GB/T 50266-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [13] 郑广辉, 许金余, 王鹏等. 冻融循环作用下层理砂岩物理特性及劣化模型[J]. 岩土力学, 2019(2): 632-641.
- ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Physical characteristics and degradation model of stratified sandstone under freeze-thaw cycling[J]. Rock and Soil Mechanics 2019(2): 632-641.
- [14] BROWN E T. Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods[M]. London: Pergamon Press, Oxford, 1981, 81-221.
- [15] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 2651-2655.
- ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of three gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 2651-2655.
- [16] SAROGLOU H, TSIMBAOS G. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 223-234.
- [17] 张慧梅, 张蒙军, 谢祥妙, 等. 冻融循环条件下红砂岩物理力学特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(1): 69-74.
- ZHANG Huimei, ZHANG Mengjun, XIE Xiangmiao, et al. The experimental study on the physical and mechanical properties of red sandstone under the action of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(1): 69-74.
- [18] 牛双建, 靖洪文, 梁军起, 等. 不同加载路径下砂岩破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3968-3974.
- NIU Shuangjian, JING Hongwen, LIANG Junqi, et al. Experimental study of failure mode of sandstone under different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 3968-3974.