

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

田森¹, 赵映^{1,2}, 司鹤¹, 朱淳³, 李全贵¹

(1. 重庆大学 资源与安全学院 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130; 3. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210000)

摘要:我国露天矿岩质边坡规模大、数量多, 易受到复杂地质地形、自然及工程扰动等多因素影响而导致滑坡灾害频发, 特别是我国西北地区, 复杂地形与地质构造、恶劣的气候及环境、长期的工程扰动等, 致使滑坡灾害频发, 给人民生命与财产安全带来严重威胁。针对以上问题, 从露天矿岩质边坡特征岩体宏细观损伤演化视角出发, 采用工程现场调研、理论分析、室内试验研究等多方位研究手段, 综合了岩石力学、土力学等理论和方法, 以新疆寒区某露天矿高陡岩质边坡为研究对象, 根据实际工程地质环境特征, 开展潜滑区岩体冻融损伤试验、裂隙岩体冻胀力演化试验、单轴压缩试验研究, 探析不同倾角(0°、25°、50°、75°)裂隙岩体在不同冻融循环条件下的质量损失、波速衰减以及冻胀力演化特征, 揭示裂隙岩体在不同载荷条件下的强度时效特征, 以及冻融循环条件下力学特性演化规律。在此基础上, 结合声发射裂隙场监测试验研究, 阐明边坡岩体最终破裂模式以及在变形及破坏过程中的裂纹形态与扩展宏细观机理。结果表明: 在冻融循环作用下(0、10、20、30次), 岩体饱和质量呈先增后减、纵波波速呈减速衰减趋势; 冻胀力演化分为孕育段、起胀段、稳定段、二次起胀段、消融段5个阶段, 且冻胀力产生、达到峰值所需时间以及峰值大小与裂隙倾角均呈正相关, 裂隙倾角0°、25°、50°、75°岩样峰值冻胀力分别为3.68、3.88、4.04、4.13 MPa。冻胀作用使岩体承受反复张拉作用而强度下降, 是该寒区边坡失稳的重要诱因; 岩体单轴压缩应力-应变关系、裂纹体积应变趋势大致相同, 分为微裂隙闭合、弹性变形、屈服、裂隙加速扩展以及峰后5个典型阶段。岩体抗压强度与弹性模量随冻融次数增加呈线性下降趋势, 随裂隙倾角增大而线性上升。由岩样最终破裂形态及基于混合高斯模型的细观裂纹分类可知, 岩样细观破裂以张拉为主, 最多达到54.2%, 其次为混合裂纹, 最多达到42.3%。随着冻融次数的增加(20~30次), 细观混合裂纹比例增加, 剪切裂纹减少, 宏观破坏模式表现为张拉与剪切的混合破坏。

关键词:岩质边坡; 裂隙岩体; 冻胀力; 冻融循环; 破裂模式

中图分类号: TD804; TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)12-4687-14

Experimental study on freeze-thaw damage characteristics and mechanical properties of fractured rock mass of surface mine slope in cold region

TIAN Sen¹, ZHAO Ying^{1,2}, SI Hu¹, ZHU Chun³, LI Quanguai¹

收稿日期: 2024-04-28 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0474

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51904040); 芒市华盛金矿开发有限公司资助项目(H20241326); 长江学者和高校创新团队发展计划资助项目(IRT_17R112)

作者简介: 田森(1986—), 男, 宁夏银川人, 副教授, 博士。E-mail: sentian@cqu.edu.cn

引用格式: 田森, 赵映, 司鹤, 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.



移动阅读

(1. Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: There are numerous large-scale rock slopes in the surface mines of China, which are easily affected by multiple factors such as complex geological topography and natural, engineering disturbances, thereby resulting in frequent landslide disasters. Especially in northwest China, the landslides in surface mines occur frequently due to the complicated topographical and geological structures, harsh climate and environment, as well as long-term engineering disturbance, which seriously threaten miner's life and property safety. From the perspective of macro-micro damage evolution of characteristic slope rock masses, this study conducted the freeze-thaw test, the frost heave force evolution test, and the uniaxial compression test of fractured rock masses in the potential landslide area, based on the actual engineering geological and environmental characteristics of high-steep rock slope at an surface mine in Xinjiang province. Where multi-faceted research approaches including engineering field investigation, theoretical analysis and laboratory experimental research were adopted, and the theories and methods of rock mechanics and soil mechanics were integrated. Through these tests, the mass loss, wave velocity attenuation and frost heave force evolution characteristics of fractured rock masses with different inclinations (0° , 25° , 50° , 75°) were analyzed under different freeze-thaw cycles, and the strength and aging characteristics of fractured rock masses under different load conditions, along with the evolution of their mechanical properties under different freeze-thaw cycles were revealed. On this basis, combined with the synchronous acoustic emission test, the final rock fracture mode, the morphology and macro-micro propagation mechanisms of cracks during the rock deformation and failure process were expounded. The results show that under the action of freeze-thaw cycles (0, 10, 20, 30 times), the saturation mass of rock masses increased first and then decreased, while the P-wave velocity showed a decelerated decay. The evolution of frost heave force could be divided into five stages: the incubation stage, the heaving stage, the stabilization stage, the secondary heaving stage and the melting stage. Moreover, the generation of frost heave force, the time required to reach peak and the peak values were all positively correlated with the fracture inclination. The peak values of frost heave forces of rock samples with crack inclinations (0° , 25° , 50° , 75°) are 3.68, 3.88, 4.04, 4.13 MPa, respectively. The frost heave effect resulted in a decreased strength of rock masses due to the repeated tensioning action, which was a major cause of slope instability in this cold region. The stress-strain relationship of rock masses under uniaxial compression and the trend of crack volume strain were roughly the same, which could be divided into five typical stages: the microfracture closure stage, the elastic deformation stage, the yield stage, the crack acceleration stage and the post-peak stage. The compressive strength and elastic modulus of rock masses decreased linearly with the increase of freeze-thaw cycles, while increased linearly with the increase of fracture inclination. According to the final fracture morphology of rock samples and the Gaussian mixture model-based classification of microcracks, the tensile fracture was the predominant microfracture mode of rock samples (up to 54.2%), followed by the mixed mode (up to 42.3%). With the increase of freeze-thaw cycles (20–30 times), the proportion of mixed-mode microcracks increased and that of shear cracks decreased. Moreover, the macroscopic failure mode was the mixed tensile–shear failure.

Key words: rock slope; fractured rock mass; frost heave force; freeze-thaw cycle; fracture mode

0 引 言

随着我国经济社会的快速发展,各个行业对矿产资源的需求量与日俱增。露天开采是矿产资源开采的主要方式之一,其开采规模大、效率高、成本较低,在我国约有 80% 的矿产资源需要通过露天开采的形式来开发^[1]。当前,我国露天矿总量居世界前列,其岩质边坡数量、规模以及高陡边坡占比庞大,因受复杂的地质地形、多变的气候条件、频繁的工程扰动等诸

多因素影响致使滑坡灾害频发,给人民群众的生命财产安全和生态环境带来巨大损害,我国是全球矿山岩质滑坡事故发生率最高的国家之一^[2]。随着“一带一路”建设、“西部大开发新格局”等的推进,露天矿滑坡灾害防控研究逐步成为国家保证矿山安全和可持续发展的重大需求。迄今为止,在金属矿山的开采中,露天开采的铁矿量约占总量的 85%,有色金属矿约占 45%,化工物质材料约占 70%,建筑设计等施工材料约占 90%^[2-3]。为了满足日益增长的生产需求,矿产资源

的开采已逐渐转向条件较为复杂的东北、西北地区^[4]。这些地区矿产资源丰富,但基础设施受限、工程地质条件复杂,给露天矿岩质边坡防控研究带来极大挑战^[5]。在露天矿开采过程中,地质作用导致岩体内部形成孔隙及不同形态节理裂隙。这些裂隙被水分侵入,反复的冻融作用引起岩体结构、强度的损伤劣化,对露天矿边坡岩体结构稳定性产生较大影响^[6-7]。因此,研究并厘清由冻胀引起的岩体破坏效应,是保障寒区露天矿边坡稳定性的关键任务之一。

目前,国内外对于岩石冻融损伤研究较多,针对裂隙岩体冻融破裂演化机制研究已有一定基础^[8-10],而关于裂隙冻胀开裂对岩体强度的影响、裂隙岩体破坏模式以及裂纹发育特征规律的研究尚需要进一步探讨。近年来,国内外学者对寒区边坡破坏机制及稳定性的研究陆续增多。在早期,关于岩体冻融研究主要集中于毛细作用理论和冻结前缘理论等。EVERET 提出水分迁移是由于水冰界面上的毛细作用引起的,但该理论对冻融过程水分迁移通量和冻胀力估算偏低,且无法阐释冰“透镜体”的形成^[11]。MILLER 则认为在冻结锋面和冰透镜体之间,存在能够使水分不断向冰透镜体迁移并发生冻结的冻结缘,促进岩石的冻融破坏^[12-13]。随后,诸多学者开始注意到岩体与土体冻融损伤状态的差异,岩体内部含有大量固有缺陷,其强度较土体更高、渗透性较低,并且具有孔隙、节理、裂隙等多重属性^[14-16]。大量研究表明,在裂隙岩体中,基质孔隙内水分迁移对岩体产生的影响较小,岩体裂隙内水分的迁移和水-冰相变膨胀才是导致裂隙扩展和强度下降的关键原因^[17-19]。于是,学者们采用岩体切割裂隙或者采用相似材料预制裂隙的方法研究冻融循环对裂隙岩体的影响机制^[16, 20]。

其中,运用水刀切割技术制备不同尺寸水平贯通裂隙岩体,发现初始冻胀力峰值可以作为裂隙岩体冻融损伤的指标,且裂隙几何形态对冻胀力的演化也具有显著影响^[14, 16]。有学者用水泥砂浆制备不同倾角、迹长、隙宽的一类岩石单裂隙试样,冻融循环试验发现,倾角对岩体强度影响最大、迹长次之,温度的影响较小^[21]。也有学者通过在红砂岩中预制裂隙,研究贯通裂隙尺寸对冻胀力演化规律的影响,发现冻胀力随裂隙宽度增大呈指数型增大,刚性边界产生的裂隙最大冻胀力达到 1.27 MPa^[22]。此外,通过对冻融循环下 2 个不平行裂隙砂岩试样进行研究,发现裂隙扩展是由冻融循环次数和裂隙倾角主导的^[23]。通过开展冻融循环和单轴压缩试验,发现受裂隙冻胀力的驱使,冻胀裂纹不断沿着初始裂隙方向扩展延伸,试样单轴压缩破坏模式容易受到冻胀裂纹的影响,当岩桥倾角较

大时,主要沿着冻胀裂纹方向发生剪切破坏^[24-25]。当前,诸多学者通过耦合不同冻融循环条件参数,开展了不同加载方式下岩体力学特性试验研究,分析岩体力学特性影响、裂隙岩体损伤演化以及破坏模式,并利用不同尺度观测方法,对预制损伤岩体裂隙扩展机制进行探究,取得了一些突破性的结果,在岩质边坡破坏机制及稳定性研究方面也有一定的应用性进展^[26-28]。

综上所述,边坡岩体中的裂隙水在冻融循环作用下发生水-冰相变产生冻胀力,冻胀力的产生与消散会使裂隙处于反复受拉状态,对岩体造成损伤。然而,我国目前对于寒区露天矿边坡裂隙岩体冻融破坏机理研究尚未形成成熟的基础理论体系和方法,且多数研究更适用于土质边坡,而岩质边坡由于孔隙、节理、裂隙等多因素耦合,当经历冻融循环作用时,其力学特性、渗透力及结构参数的演化规律有较大差异^[29-31]。边坡岩体在长期的工程地质作用下出现结构损伤,在反复冻融循环作用下,含水裂隙结构会受到水结冰产生的冻胀力反复作用,局部产生疲劳损伤出现裂纹,随着裂纹扩展而诱发岩块整体断裂^[32-33]。因此,针对冻融作用下裂隙岩体的破裂模式及细观裂隙扩展机制等还需进一步研究。如何从机理上阐明含特征裂隙岩体在极端温度条件下的损伤演化特征及宏细观力学行为特性这一边坡稳定性基础理论问题,成为当今露天矿防灾、减灾工作亟需研究的课题。基于此,笔者以新疆某露天矿北帮边坡潜滑区片麻岩为试验对象,综合运用现场调查、裂隙岩体冻融循环试验、单轴压缩及同步声发射监测试验的手段,研究冻融作用下裂隙岩体的物理力学参数损伤劣化特征、冻胀力演化规律及破坏模式,揭示其在变形及破坏过程中的裂纹形态与扩展宏细观机理。本研究旨在为露天矿岩质边坡稳定性及灾害防控研究提供基础数据及理论依据。

1 试 验

1.1 岩样采集与预制裂隙制备

如图 1 所示,研究使用的岩石样本取自新疆某露天矿 107~117 勘探线间北帮边坡中下部潜滑区,区域高程为 1 130~1 046 m。根据《国际岩石力学学会试验规程 (ISRM2007)》^[34]和《工程岩体试验方法标准 (GBT50266—2013)》^[35]的规定,制备成 $\phi 50$ mm、高 100 mm 的标准岩样,允许误差范围为 ± 0.3 mm。此外,岩样的侧面需保持平滑且垂直,其竖直方向最大偏差不得超过 $\pm 0.25^\circ$;同时,岩样两端面的不平整度 $\sigma \leq 0.02$ mm。

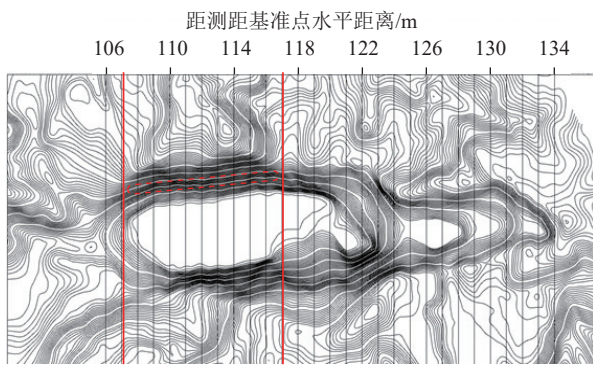


图1 研究区域与采样位置

Fig.1 Research area and sampling location

预制裂隙尺寸、倾角依据工程实际条件设置。由现场勘察结果可知,边坡裂隙倾角区间为 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$,张开度主要集中在2 mm左右。因此,笔者预制裂隙设置于岩样中部,长20 mm,宽2 mm,倾角分别为 0° 、 25° 、 50° 、 75° ,如图2所示。通过观察筛选,排除了具有明显原生缺陷、裂隙或局部缺损的试样,并最终选择纵波波速相近的岩样进行试验,并分为4组(32个岩样),分别进行0、10、20、30次冻融循环试验。

1.2 冻融循环与冻胀力演化试验

根据《水利水电工程岩石试验规程》^[36]和《工程岩体试验方法标准 (GBT50266—2013)》的要求^[35],所有

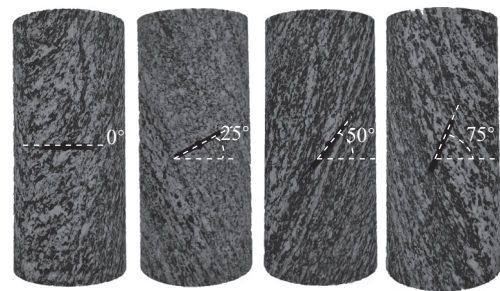
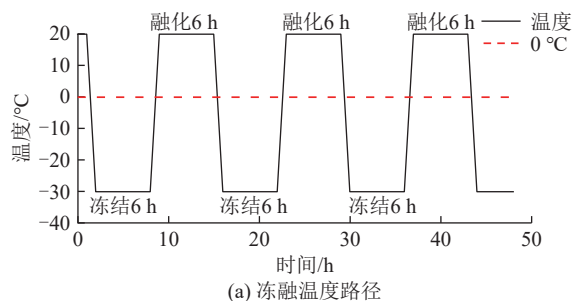


图2 岩样预制裂隙制备

Fig.2 Preparation of prefabricated fractures in rock specimens

的样本都应置于真空饱和装置内,调节压力为当地大气压力水平(约为0.1 MPa),持续抽气12 h。抽气完成后,将岩样在蒸馏水中保持静置12 h,测量其饱和和质量。根据研究区域的自然环境特征,并结合实验室实际条件,本研究将冻融温度设定为 $-30\sim 20^{\circ}\text{C}$,每个冻融循环的周期为12 h,如图3a所示,设置4个冻融循环梯度,分别为0、10、20、30次。在冻融过程中,向岩样裂隙中注入纯净水,并使用防水胶布进行封闭,以模拟自然环境下的岩石裂隙充水状态,然后用保鲜膜包裹,以防环境因素引起误差,如图3b所示。试验过程中,岩样每经历5次冻融循环,对岩样的饱和质量及纵波波速等参数进行记录,直至完成30次冻融循环。



(a) 冻融温度路径



(b) 岩样密封状态

图3 冻融循环试验

Fig.3 Freeze-thaw cycle test

图4为冻融循环试验过程中的冻胀力测试系统,薄膜压力传感器作为关键元件,压力测试范围为0.3~10 MPa。对4种不同倾角预制裂隙内裂隙水、温度、由于相变产生的膨胀力变化过程进行监测,采集频率设置为每5 min采集1次。



薄膜压力传感器 线性电压转换模块

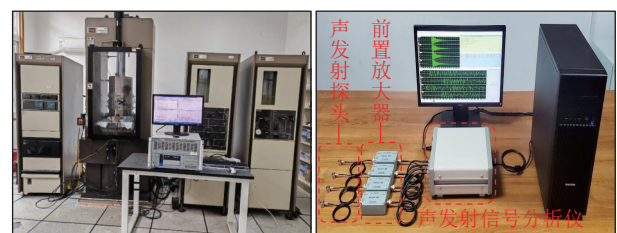
数据记录软件

图4 四通道冻胀测量系统

Fig.4 Four-channel frost heave measurement system

1.3 单轴压缩与同步声发射监测试验

岩样的单轴压缩、同步声发射监测试验在MTS815岩石力学试验系统以及DS2声发射监测系统上进行(图5),本文中声发射监测主要针对于岩体破坏模式及



(a) MTS815力学测试系统

(b) DS2声发射监测系统

图5 岩石力学试验系统

Fig.5 Rock mechanics test system

裂纹形态研究。采用位移控制加载方式,加载速度为 0.01 mm/min,获得岩样的单轴压缩强度及轴向变形过程参数;在岩样表面安装环向引伸计和 6 个声发射传感器,分别安装在距离岩样上下表面 10 mm 处,每组传感器之间相隔 120°,呈等边三角形,以监测岩样的环向变形以及加载过程中的声发射特征。

2 试验结果分析

2.1 冻融循环试验研究

2.1.1 岩样饱和和质量变化

表 1 统计了不同倾角裂隙岩样在经历 0~30 次冻融循环处理后的饱和和质量。由表 1 可知,在经历 30 次冻融后岩样质量分别降低 0.06、0.14、0.13、0.14 g。冻融作用下,所有岩样的饱和质量均表现为先增大后减小的变化规律,但变化幅度较小。这是由于冻融过程中岩石内部的微孔和裂隙在冻胀力作用下贯通并逐步扩大,导致吸水能力增强,随着冻融循环次数的增加,岩样质量损失超过吸收的水分质量,导致其饱和质量下降,质量损失率上升。

计算岩样饱和状态下的质量损失率,公式^[37]为

$$L = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L 为经历 n 次冻融循环处理后试样的饱和质量损失率,%; m_0 为未经过冻融循环处理试样的饱和质

表 1 岩体冻融作用下饱和和质量

Table 1 Saturated mass of rock specimens under freeze-thaw action

倾角/(°)	冻融次数						
	0	5	10	15	20	25	30
0	547.84	547.91	547.93	547.94	547.92	547.87	547.78
25	547.80	547.87	547.89	547.87	547.82	547.74	547.66
50	547.78	547.84	547.87	547.84	547.72	547.68	547.65
75	547.75	547.81	547.84	547.76	547.69	547.65	547.61

量, g ; m_n 为经历 n 次冻融循环处理后试样饱和质量, g 。

图 6 为岩体饱和和质量损失率的变化曲线。在冻融过程中,岩体内部微小孔洞、裂隙在冻胀作用下逐渐贯通,使得吸水率增大,初期这种作用大于岩石表面剥落质量,饱和和质量损失率先减小;随冻融次数的增加,岩石表面剥落量逐渐大于岩石吸水量,饱和和质量损失率则逐渐增大。因此,岩样饱和和质量损失率随冻融次数的增加总体表现为先负后正。

最终质量损失率分别为 0.012%(0°)、0.016%(25°)、0.018%(50°)、0.019%(75°),在相同冻融次数的情况下,质量损失率随着倾角增加有不同程度的增加。这是由于随着裂隙倾角增加,裂隙体积增大,裂隙中可容纳的水较多,水-冰相变产生的冻胀力更大,对岩体造成的损伤也相应增加。

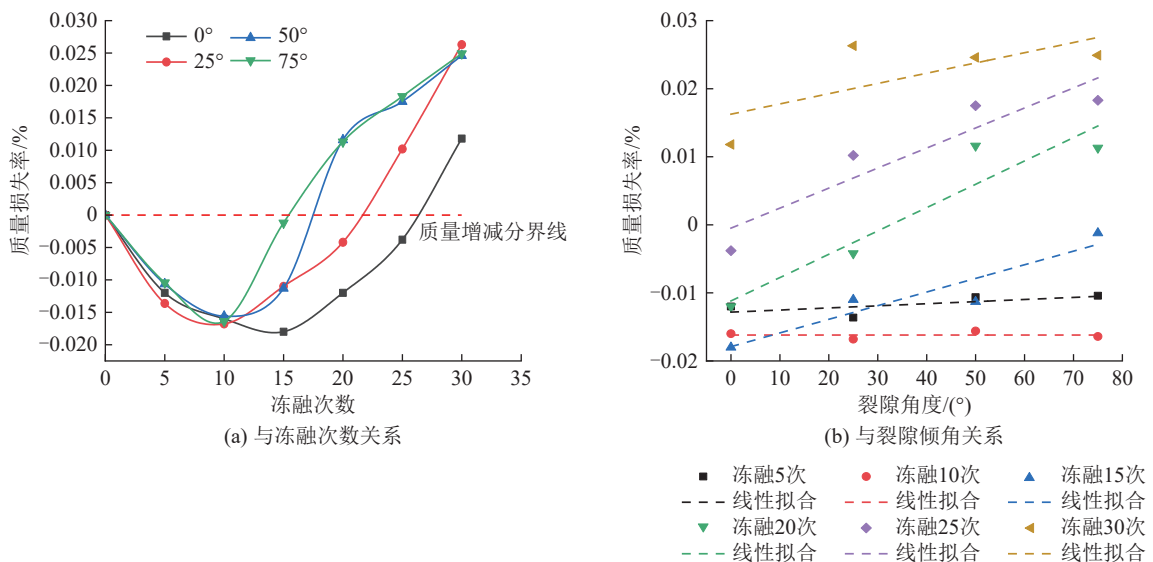


图 6 饱和和质量损失率变化规律

Fig.6 Variation law of saturation mass loss rate

2.1.2 冻融作用下裂隙岩体的纵波波速变化

表 2 为岩样在冻融作用下的纵波波速变化情况。在冻融循环的影响下,岩体内部孔隙、裂隙在反复冻胀作用下扩展、贯通,形成更多孔洞,对纵波传播产生

阻碍,波速随着冻融循环次数增加逐渐衰减。在冻融 30 次时,波速衰减程度分别为 0.68 km/s(0°)、0.79 km/s(25°)、0.96 km/s(50°)、1.08 km/s(75°)。在冻融循环作用下,岩样纵波波速不断衰减,但衰减速率逐渐降低,

即对岩样结构的影响在逐步趋于稳定。同时,裂隙倾角越大的岩样,纵波波速越大。

图 7 为岩体裂隙倾角对声波传播的影响。当裂隙倾角较大时,裂隙在声波传播方向上的投影面积较小,因此声波在传播时遇到的阻碍也较小;相应地,当裂隙倾角较小时,声波在裂隙边界发生了复杂的反射及投射等现象^[38],声波能量损失严重,造成声波到达时间延迟。

计算岩样饱和状态下的纵波波速衰减率,公式^[37-38]如下:

$$L_v = \frac{v_0 - v_n}{v_0} \times 100\%$$

(2)

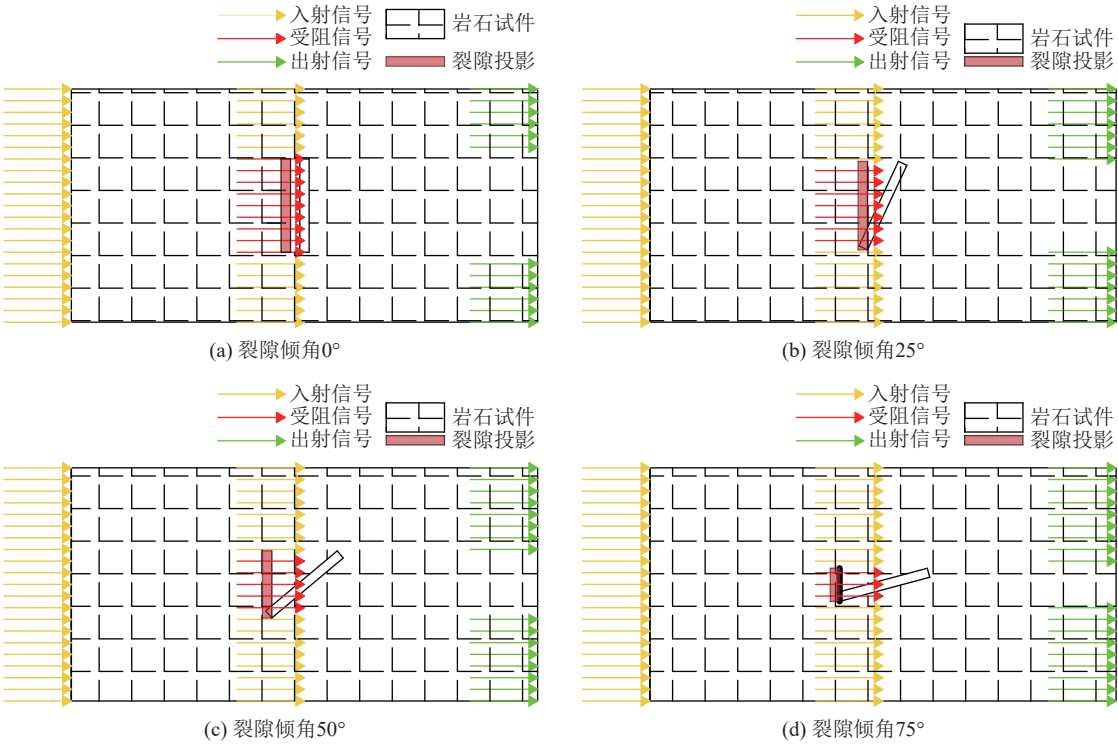


图 7 不同裂隙倾角岩样声波传播机制

Fig.7 Influence of fracture angle on p-wave propagation mechanism

图 8 为波速衰减率变化曲线。在冻融循环作用下,波速衰减率随冻融次数增加呈减速上升趋势,在冻融循环的最终阶段(30 次)分别达到 16.626%(0°)、18.415%(25°)、21.053%(50°)、22.594%(75°),表明随着冻融次数增加,岩样的纵波波速持续降低,损伤逐渐增大,但增大程度在不断降低,影响程度减弱。同时,冻融次数相同,波速衰减率和裂隙倾角呈正相关,即岩体裂隙倾角越大,冻融对岩体产生的破坏也越强。

2.2 裂隙岩体冻胀力演化试验研究

为了模拟矿区岩体的冻融环境,温度范围设定为

表 2 岩体饱和纵波波速

Table 2 P-wave velocity of saturated rock specimens

km/s

倾角/(°)	冻融次数						
	0	5	10	15	20	25	30
0	4.09	3.90	3.73	3.63	3.51	3.45	3.41
25	4.29	4.06	3.87	3.74	3.60	3.54	3.50
50	4.56	4.29	4.08	3.92	3.74	3.64	3.60
75	4.78	4.46	4.23	4.01	3.89	3.75	3.70

式中: L_v 为经历 n 次冻融循环后岩样的纵波波速衰减率,%; v_0 为未经过冻融处理试样的纵波波速, km/s; v_n 为经历 n 次冻融循环处理后试样的纵波波速, km/s。

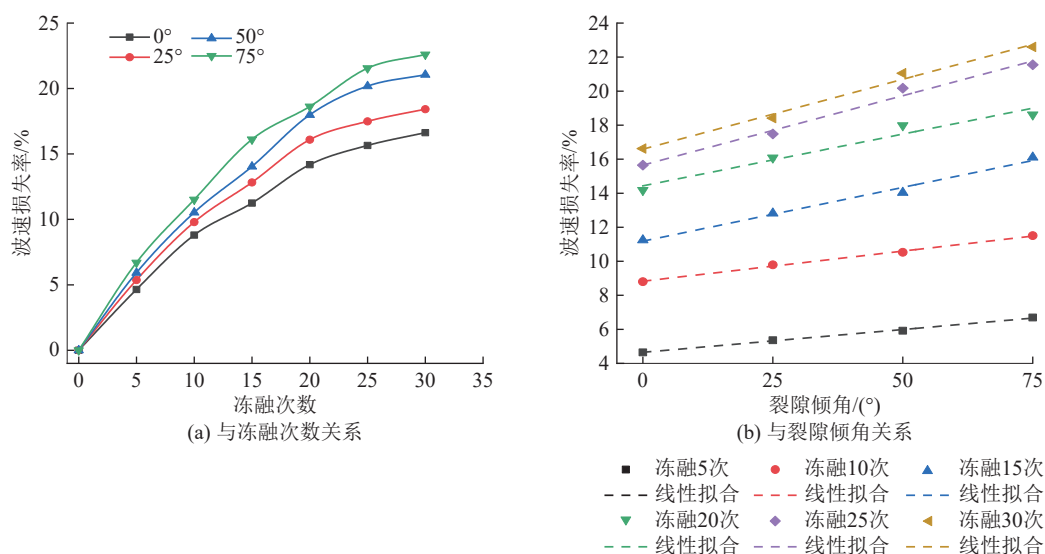


图8 波速衰减率变化规律

Fig.8 Variation law of wave velocity loss rate

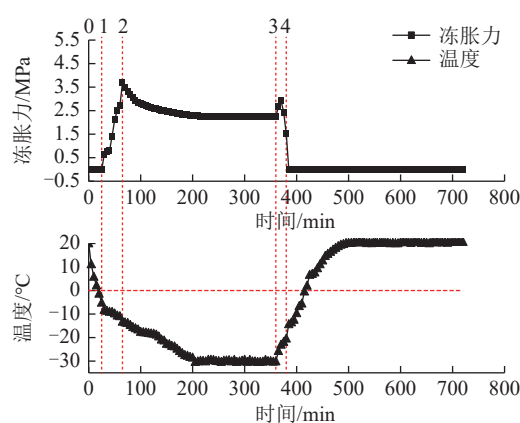


图9 裂隙水冻胀力典型演化关系曲线

Fig.9 Typical evolution curve of frost heave force in crack water 著的冻胀作用;

3) 稳定段: 图中 2—3 段, 温度继续下降至 -30°C , 冻胀力逐渐下降并趋于稳定;

4) 二次起胀段: 图中 3—4 段, 岩样低温冷冻处理结束, 置于水箱中水浴融化。在初始融化时, 随温度上升, 裂隙中冻胀力出现二次增大的现象;

5) 消融段: 图中 4—5 段 (370 min 以后属于第 5 段), 此时裂隙冰逐步融化, 冻胀力迅速减小, 骤降至零。

图 10 为不同倾角裂隙岩体冻胀力随温度变化曲线。裂隙倾角较大时, 冻胀力出现及达到峰值的时间较晚, 且峰值冻胀力也相对较大。其中, 裂隙倾角 0° 、 25° 、 50° 及 75° 岩样, 其冻胀力的产生时间分别为 30、50、60、65 min, 达峰值冻胀力的时间分别为 65 min (3.678 MPa)、75 min (3.875 MPa)、85 min (4.026 1 MPa) 及 105 min (4.128 MPa)。裂隙倾角越大, 裂隙体积越

大, 因此结冰时间更长, 积聚的冻胀力也更大。

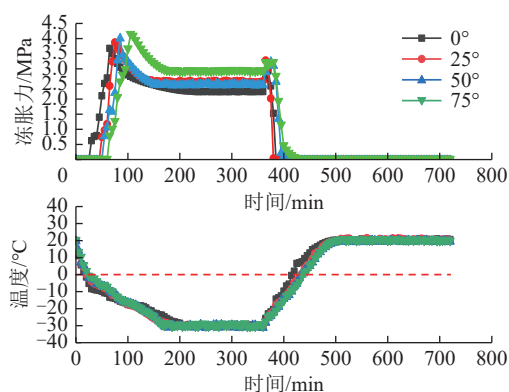


图10 不同倾角裂隙岩体冻胀力演化曲线

Fig.10 Frost heave force evolution curves of fractured rock specimens with different fracture angles

2.3 冻融循环作用下裂隙岩体宏观力学特性研究

2.3.1 冻融循环作用下裂隙岩体应力-应变曲线特征

岩体内水分在低温下, 体积会逐渐膨胀增大, 在岩石原始裂隙和孔洞中不断产生冻胀力, 驱使岩石内部原生裂隙和结构产生裂纹起裂, 使岩石内部结构产生严重破坏, 其强度和变形特性均受到影响^[39-40]。图 11 为同倾角裂隙岩样在经历 0、10、20、30 次冻融循环后的全应力-应变曲线和裂纹体积应变曲线。由图可知, 曲线可大致划分为 5 个阶段: 微裂隙闭合阶段、弹性变形阶段、屈服阶段、裂隙加速扩展阶段以及峰后阶段。

1) 微裂隙闭合阶段: 施加压力相对较小, 岩样内部微小裂隙、孔隙逐渐闭合, 表现出非线性变形特征。随施加应力增大, 曲线斜率逐渐上升, 变形逐渐明显; 此外, 裂纹体积呈下降趋势, 处于体积压缩阶段, 变形

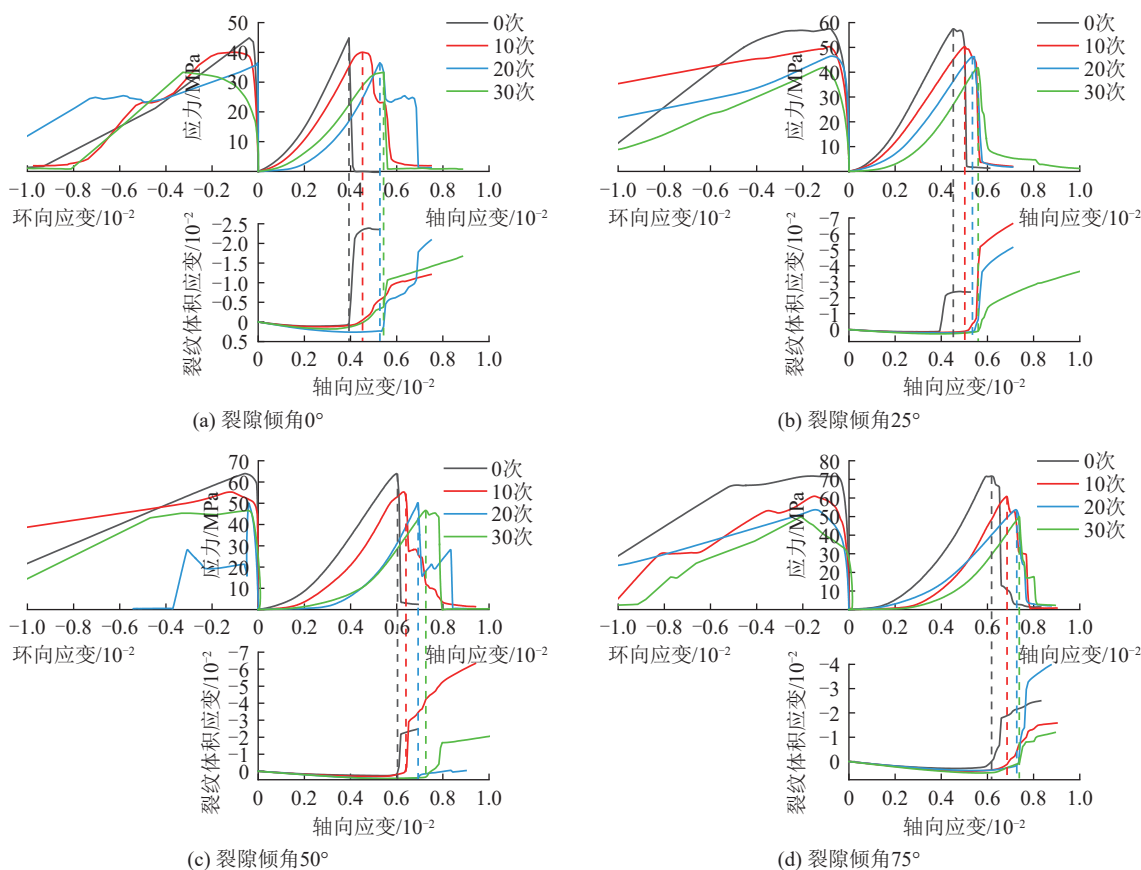


图 11 不同倾角裂隙岩体应力-应变与裂纹体积应变曲线

Fig.11 stress-strain curves and crack volume strain curve

主要来源于微裂隙和孔隙的闭合,因此产生的环向应变极小,曲线斜率较大。此阶段持续时间及孔隙、裂隙的压缩量均与冻融次数成正比。

2) 弹性变形阶段:随载荷增加,岩体内部的微裂隙完全闭合,孔隙被压缩、岩体发生弹性变形,该阶段曲线斜率接近于常数,即岩体的弹性模量。在此阶段,由于冻融次数的增加,岩体逐渐软化,弹性段逐渐平缓。此外,岩样环向变形随压力的增加缓慢增大。由于在这一阶段并无新的裂隙产生,因此裂纹体积应变变化较小。

3) 屈服阶段:内部微裂纹扩展,冻融次数较多时,此阶段特征更明显;同时,随轴向压力增大,裂隙持续产生,裂纹体积应变也随之进入稳定增长阶段,曲线斜率趋近于常数。

4) 裂隙加速扩展阶段:岩样内部裂纹迅速发育并最终贯通,导致严重的局部应力集中,形成局部破坏,随之引起应力的重新分布,形成新的应力集中区域,如此循环,直至整体破坏。冻融次数较少时(0~10次),岩样破坏表现为达到峰值应力后突然的脆性断裂;冻融次数较多时(20~30次),这一阶段特征明显,表现为应力波动、应变快速增加,直至破裂;同时,

当应力达到峰值时(虚线所示),裂隙体积应变也出现拐点,预示着岩样即将破裂。一般来说,冻融次数越多,拐点出现时间越迟。

5) 峰后阶段:当载荷达到抗压强度后,其内部结构彻底破坏,完全丧失承载能力。在此阶段,形成了明显的宏观破裂面,岩样变形主要为破裂面的滑移;未经冻融岩样此阶段一般较短,表现为瞬间丧失所有承载能力,应力立刻降至0;冻融次数较多的岩样峰后应力缓慢降低,形成贯通裂纹后仍具有一定承载能力,完全破坏时的轴向变形更大;此外,岩体形成了贯通裂隙,变形主要是沿贯通裂隙滑动,因此裂纹体积应变曲线较为平缓。

总的来说,岩体峰值应力与冻融次数呈负相关。随冻融次数增加,峰值强度对应的轴向应变与环向应变也逐渐增加,曲线由硬岩破坏特征向软岩破坏特征转变,峰后具有的承载能力也有所增大,表现出一定的塑性特征。

2.3.2 冻融作用对裂隙岩体强度与弹性模量的影响

表3统计了冻融作用下岩体的主要力学特征参数。经过30次冻融循环后,裂隙倾角为0°时,峰值强度从44.86 MPa降低到33.32 MPa,下降率25.32%,弹

性模量由 14.76 GPa 降低到 11.26 GPa, 下降率 29.36%; 倾角为 25°, 试件峰值强度与弹性模量下降率分别为 27.38% 和 22.81%; 倾角为 50°时, 试件峰值强度与弹

性模量下降率分别为 26.78% 和 22.66%; 裂隙倾角为 75°时, 试件峰值强度与弹性模量下降率分别为 30.49% 和 24.57%。相关参数拟合曲线如图 12 所示。

表 3 冻融循环条件下岩体单轴抗压强度、弹性模量关联

Table 3 Relationship between uniaxial compressive strength, elastic modulus, and freeze-thaw cycles

裂隙倾角/(°)	冻融次数	平均单轴抗压强度/MPa	单轴抗压强度衰减程度/%	平均弹性模量/GPa	弹性模量衰减程度/%
0	0	44.86	0	14.76	0
	10	40.04	10.74	12.82	13.14
	20	36.51	18.61	11.26	23.71
	30	33.32	25.72	10.42	29.40
25	0	57.46	0	17.51	0
	10	50.30	12.46	13.74	21.53
	20	46.28	19.46	12.97	25.93
	30	41.73	27.38	13.52	22.79
50	0	63.78	0	16.22	0
	10	55.23	13.41	13.71	15.47
	20	50.16	21.35	13.91	14.24
	30	46.70	26.78	12.54	22.69
75	0	71.75	0	18.29	0
	10	60.66	15.46	17.70	3.23
	20	53.45	25.51	13.34	27.06
	30	49.87	30.49	13.80	24.55

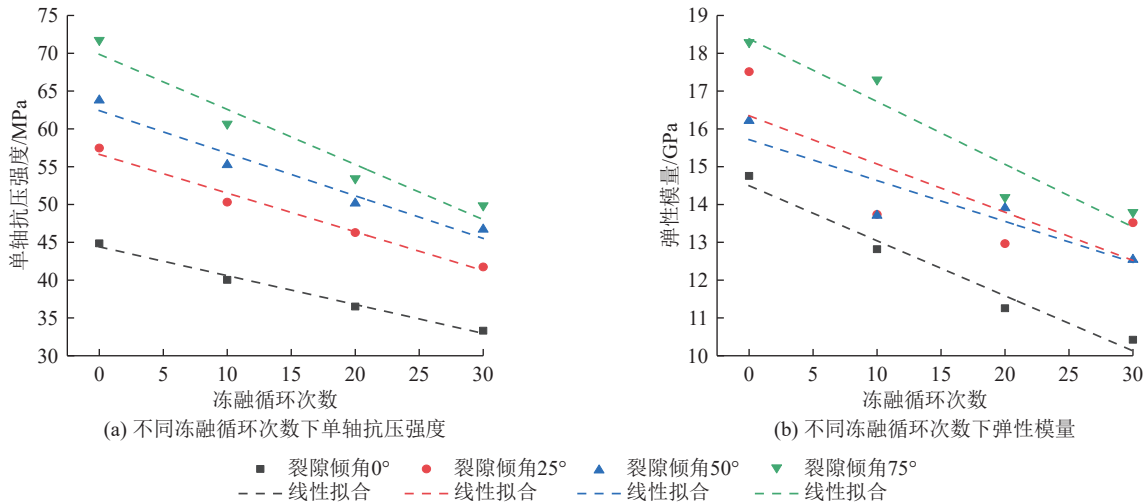


图 12 岩体力学特征参数拟合曲线

Fig.12 Fitting curve of mechanical characteristic parameters of rock masses

2.4 裂纹分类与破裂模式分析

图 13 表示不同条件下岩样的最终破裂模式。由图可知, 当冻融次数为 0, 所有岩样破裂面较为单一, 随冻融次数的增加, 破裂面复杂程度亦增加, 除了主

破裂面以外还存在较多数量次生裂纹, 并且集中于预制裂隙处。由此可见, 冻融作用使岩体内部产生了较多微裂纹, 岩体局部和整体强度均有所下降, 在压缩过程中更易形成局部破裂。

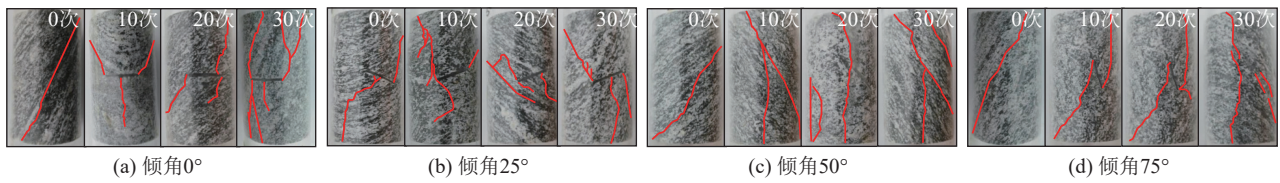


图 13 不同裂隙倾角岩体在冻融循环作用下宏观破裂形态

Fig.13 Macroscopic fracture modes of specimens after different freeze-thaw cycles

当裂隙倾角为 0° 和 25° 时, 经冻融后的岩样裂纹从预制裂隙处开始向两端发育逐渐贯通, 形成宏观破裂面, 次生裂纹也多由预制裂隙处开始发育。当裂隙倾角较大为时, 主破裂面几乎不与预制裂隙相交, 表明当预制裂隙倾角增大, 其对岩体结构强度的影响降低。

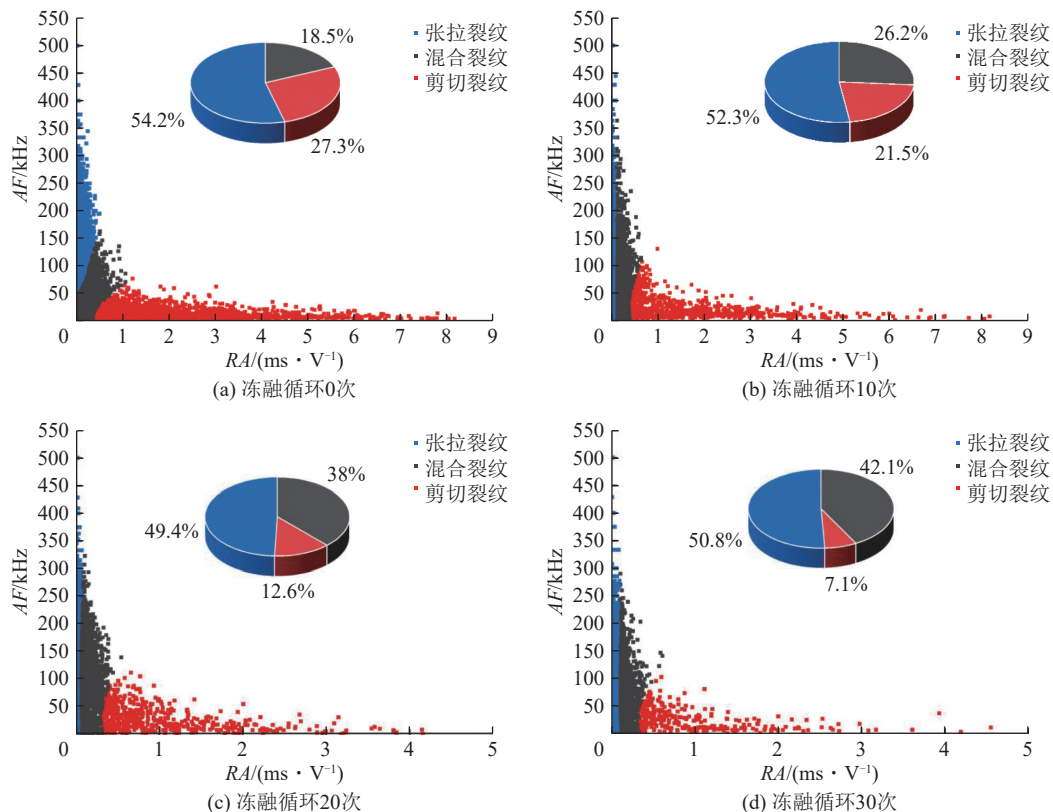
同时, 笔者利用高斯混合模型, 在 Matlab 中编写程序, 获得岩样 RA 和 AF 的特征向量概率分布关系^[41]。结合细观裂纹分类与宏观破裂面形态分析, 揭示不同冻融条件下裂隙岩体破裂过程中剪切裂纹、张拉裂纹以及混合裂纹的分布情况和所占比例^[39, 42-43]。图 14—图 17 表示基于混合高斯模型对裂纹类型判别分类情况 ($AF-RA$)。

结合图 12 可知, 含预制裂隙的片麻岩试样在单轴压缩过程中的微破裂以拉伸破坏为主, 达到 54.2%; 其次为混合裂纹, 最大达到 42.3%; 剪切裂纹

最少, 占比均在 35% 以下。当裂隙倾角为 0° 和 25° 时 (图 14—图 15), 其剪切裂纹占比比较低, 以张拉破坏为主。

如图 16—图 17 所示, 当裂隙倾角较大时 (50° 和 75°), 岩体裂隙形态同样以张拉裂纹为主, 但其剪切裂纹及混合裂纹占比相对提升, 特别是剪切裂纹占比整体上随裂隙倾角增大有一定的提升。

结合细观裂纹分类与宏观破裂面形态分析可知, 由于冻融作用导致岩样整体和局部的强度降低, 致使其受压时破坏模式较未经冻融的岩样更加复杂, 易形成张拉混合破裂。细观上表现为随冻融次数增加, 岩样混合裂纹占比在一定程度上亦增加。随着裂隙倾角增大, 岩样受压剪作用时易沿裂隙形成压剪破裂, 宏观破坏形态趋于剪切破坏, 相应的细观上表现为剪切裂纹占比略微增加。

图 14 裂隙倾角 0° 岩样不同冻融循环次数下细观裂纹分类情况Fig.14 Mesoscopic crack classification of rock specimens with 0° fracture inclination angle under different freeze-thaw cycles

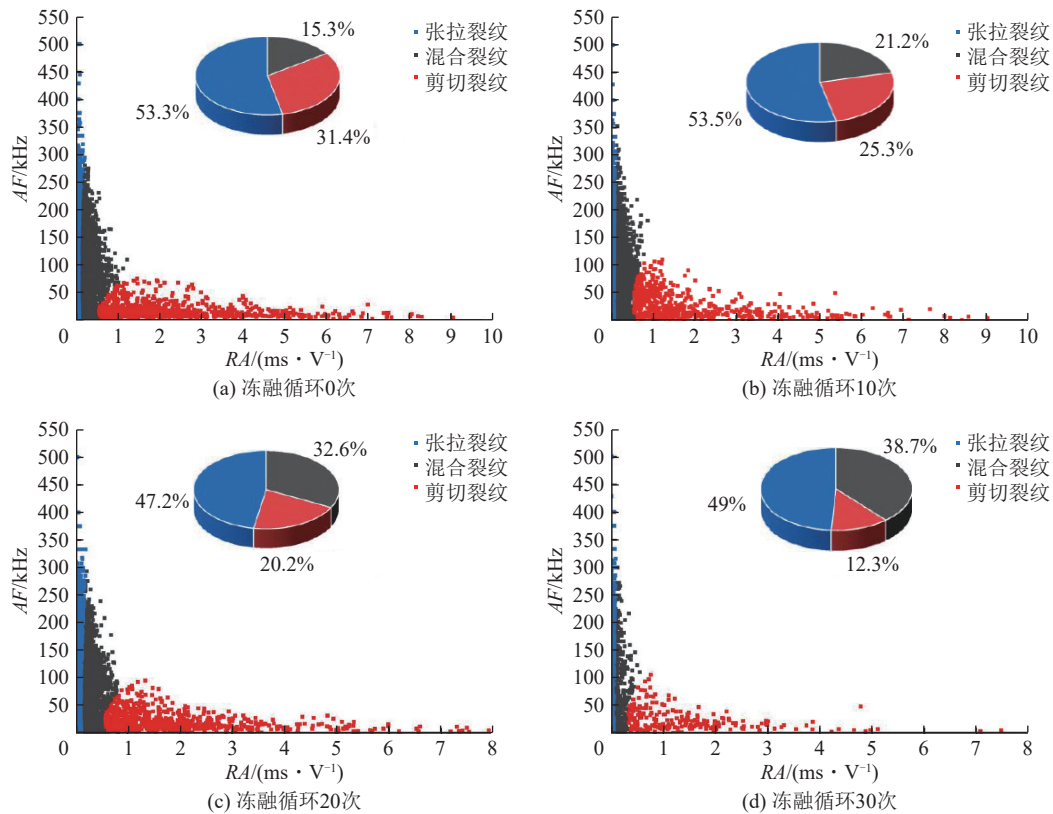


图 15 裂隙倾角 25°岩样不同冻融循环次数下微观裂纹分类情况

Fig.15 Mesoscopic crack classification of rock specimens with 25° fracture inclination angle under different freeze-thaw cycles

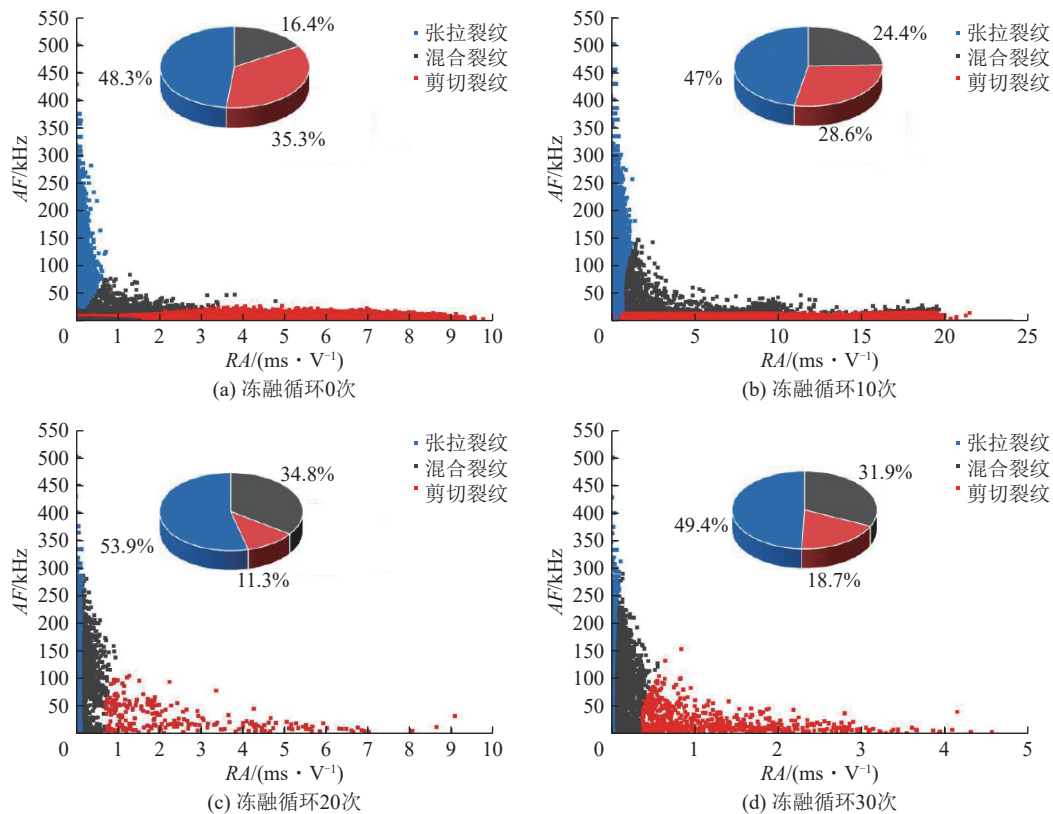


图 16 裂隙倾角 50°岩样不同冻融循环次数下微观裂纹分类情况

Fig.16 Mesoscopic crack classification of rock specimens with 50° fracture inclination angle under different freeze-thaw cycles

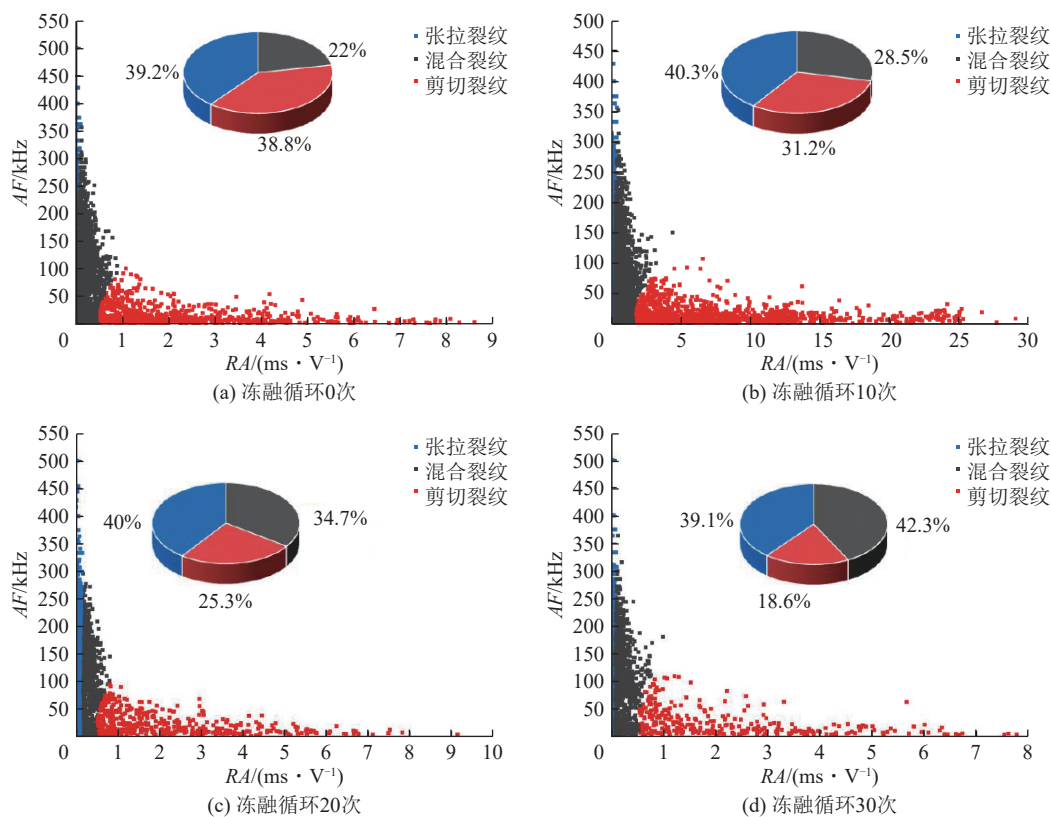


图 17 裂隙倾角 75°岩样不同冻融循环次数下微观裂纹分类情况

Fig.17 Mesoscopic crack classification of rock specimens with 75° fracture inclination angle under different freeze-thaw cycles

3 结 论

1) 研究了不同倾角 (0°、25°、50°、75°) 裂隙岩体在冻融循环作用下的损伤灾变行为。冻融作用下, 岩样的饱和质量表现为先增加后减小, 经历 30 次冻融循环后, 饱和质量损失率分别为 0.012%、0.016%、0.018%、0.019%; 冻融作用对岩样波速影响强烈, 饱和纵波波速呈减速衰减趋势, 30 次冻融循环后波速衰减率分别为 15.06%、19.21%、20.27%、19.80%; 裂隙水冻胀力的演化分为孕育段、起胀段、稳定段、二次起胀段、消融段 5 个典型阶段。随裂隙倾角的增大 (0°、25°、50°、75°), 冻胀力的产生时间分别为 30、50、60、65 min, 达到峰值冻胀力所需时间分别为 65、75、85、105 mins, 峰值冻胀力分别为 3.68、3.88、4.04、4.13 MPa。由此可见, 在该试验中, 冻胀力产生、达到峰值所需时间、峰值大小与裂隙倾角呈正相关。冻胀作用使岩体张开裂隙承受反复的张拉作用, 导致边坡岩体强度下降, 是影响寒区边坡稳定性的重要诱因。

2) 研究了岩样单轴抗压强度、轴向应变、环向应变及裂纹体积应变的演化特性。岩样应力-应变曲线、应力-裂纹体积应变的形态大致相同, 可大致分为微裂隙闭合阶段、弹性变形阶段、屈服阶段、裂隙非稳定发展阶段、峰后骤降 5 个阶段, 并且裂纹体积应变

在破坏前出现明显的拐点, 可作为岩体破坏的判据。在冻融循环作用下, 同裂隙倾角岩样抗压强度和弹性模量呈线性下降规律, 岩样脆性特征减弱、塑性特征提高; 随着冻融循环次数的增加, 岩体的强度和弹性模量呈线性下降; 在相同冻融条件下, 岩体的抗压强度和弹性模量随裂隙倾角增大呈线性增加。

3) 对于相同倾角岩样, 随着冻融次数的增加, 除主破裂面以外存在较多次生裂纹, 并且均集中于预制裂隙周围。在相同冻融条件下, 裂隙倾角为 0°和 25°时, 岩样主控裂纹从预制裂隙处开始向两端发育逐渐贯通, 次生裂纹也多由预制裂隙处开始发育; 当裂隙倾角为 50°和 75°时, 主控破裂面几乎不经过预制裂隙, 表明当预制裂隙倾角较大时, 其对岩体结构的影响较低。

4) 通过宏细观判定裂纹分类可知, 岩样破裂以拉伸裂纹为主, 占比最大达到 54.2%; 其次为混合裂纹, 达到 42.3%, 剪切裂纹最少, 均在 40% 以下。随着冻融次数的增加, 混合裂纹占比有一定程度的增加, 宏观表现为破裂面的复杂性增加。

参考文献(References):

- [1] 刘希灵, 李夕兵, 宫凤强, 等. 露天开采台阶面下伏空区安全隔离层厚度及声发射监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3357-

- 3362.
- LIU Xiling, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. Safety isolation layer thickness and acoustic emission monitoring of cavity under open pit benches[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 3357–3362.
- [2] 曹贺. 露天矿山开采技术进展及发展趋势研究[J]. *世界有色金属*, 2020(24): 58–59.
- CAO He. Progress and development trend of open pit mining technology[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(24): 58–59.
- [3] 王忠鑫, 田会, 王东, 等. 露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S1): 129–153.
- WANG Zhongxin, TIAN Hui, WANG Dong, et al. Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pit mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S1): 129–153.
- [4] 陈彦龙, 崔慧栋, 李明, 等. 实时低温条件下露天矿饱和损伤煤系砂岩动态力学特性及其破坏机制[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1168–1179.
- CHEN Yanlong, CUI Huidong, LI Ming, et al. Dynamic mechanical properties and failure mechanism of saturated coal-measure sandstone in open pit mine with damage under real-time low-temperature conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1168–1179.
- [5] 吴顺川, 张化进, 肖术, 等. 考虑服务年限的露天矿边坡时变目标可靠度研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(3): 542–548.
- WU Shunchuan, ZHANG Huajin, XIAO Shu, et al. Study on time-varying target reliability of open-pit slope considering service life[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(3): 542–548.
- [6] QU Y L, CHEN G L, NIU F J, et al. Effect of freeze-thaw cycles on uniaxial mechanical properties of cohesive coarse-grained soils[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9): 2159–2170.
- [7] JIA J L, SUN K G, WEI Y, et al. Prediction of frost heaving stress in saturated sandstone in unidirectional freezing conditions[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2023, 21(11): 1725–1738.
- [8] YANG X R, JIANG A N, ZHENG S. Analysis of the effect of freeze-thaw cycles and creep characteristics on slope stability[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(11): 1033.
- [9] JING J J, WU Z J, YAN W J, et al. Experimental study on progressive deformation and failure mode of loess fill slopes under freeze-thaw cycles and earthquakes[J]. *Engineering Geology*, 2022, 310: 106896.
- [10] GUO C B, ZHANG Y S, ZHANG Y N, et al. Freeze-thaw cycle effects on granite and the formation mechanism of long-runout landslides: Insights from the Luanshibao case study in the Tibetan Plateau, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(10): 394.
- [11] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57: 1541.
- [12] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. *Highway Research Record*, 1972, 393: 1–11.
- [13] LEI D X, LIN H, WANG Y X. Damage characteristics of shear strength of joints under freeze-thaw cycles[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2022, 92(5): 1615–1631.
- [14] 申艳军, 杨更社, 王铭, 等. 冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 709–717.
- SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ming, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 709–717.
- [15] LU Y N, LI X P, CHAN A. Damage constitutive model of single flaw sandstone under freeze-thaw and load[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 159: 20–28.
- [16] 贾蓬, 王晓帅, 王德超. 饱水裂隙岩石冻融变形特性研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(2): 345–354.
- JIA Peng, WANG Xiaoshuai, WANG Dechao. Study on the freeze-thaw deformation characteristics of saturated fractured rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(2): 345–354.
- [17] 乔趁, 王宇, 宋正阳, 等. 饱水裂隙花岗岩周期冻胀力演化特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2141–2150.
- QIAO Chen, WANG Yu, SONG Zhengyang, et al. Experimental study on the evolution characteristics of cyclic frost heaving pressure of saturated fractured granite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2141–2150.
- [18] 桂智琛, 徐良骥, 刘潇鹏, 等. 基于时序 InSAR 的关闭矿井地表残余沉降监测[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 54–63.
- GUI Zhichen, XU Liangji, LIU Xiaopeng, et al. Monitoring surface residual settlement of closed mines based on time series InSAR[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 54–63.
- [19] 陈汉青, 程桦, 曹璐, 等. 土/岩体的冻融回滞及水分迁移综合机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(11): 2365–2375.
- CHEN Hanqing, CHENG Hua, CAO Lu, et al. Research on the comprehensive mechanism of freeze-thaw hysteresis and water migration of soil/rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(11): 2365–2375.
- [20] CHEN Y F, LIN H. Deterioration laws of Hoek-Brown parameters in freeze-thaw multi-fractured rock mass[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123: 103716.
- [21] ZHANG G Z, CHEN G Q, XU Z X, 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.
- [22] 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.
- [23] ZHOU X P, NIU Y, ZHANG J Z, et al. Experimental study on effects of freeze-thaw fatigue damage on the cracking behaviors of sandstone containing two unparallel fissures[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(6): 1322–1340.
- [24] 刘艳章, 郭赞林, 黄诗冰, 等. 冻融作用下裂隙类砂岩断裂特征与强度损失研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S2): 62–71.
- LIU Yanzhang, GUO Yunlin, HUANG Shibing, et al. Study of fracture characteristics and strength loss of crack quasi-sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 62–71.

- [25] 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 waterbearing cracks during freezing-thawing process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1832–1845.
- [26] 陈绍杰, 张立波, 李振华, 等. 采煤沉陷区土地建筑利用研究进展与展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 101–118.
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, LI Zhenhua, et al. Research progress and prospect of building utilization in coal mining subsidence areas[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 101–118.
- [27] LU H Q, BAO W X, YIN Y, 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.
- [28] 宋勇军, 程柯岩, 孟凡栋. 冻融作用下裂隙岩石损伤破坏声发射特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 408–419.
SONG Yongjun, CHENG Keyan, MENG Fandong. Research on acoustic emission characteristics of fractured rock damage under freeze-thaw action[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 408–419.
- [29] XU J C, LIU Y T, NI Y D. Hierarchically weighted rough-set genetic algorithm of rock slope stability analysis in the freeze-thaw mountains[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(6): 227.
- [30] 罗路广, 裴向军, 黄润秋, 等. 冰缘地区岩质斜坡冻融侵蚀时空分异特征与产屑率研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1319–1328.
LUO Luguang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics and rate of freeze-thaw erosion of rock slopes in periglacial area[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1319–1328.
- [31] HUANG S B, LU Z X, YE Z Y, et al. An elastoplastic model of frost deformation for the porous rock under freeze-thaw[J]. *Engineering Geology*, 2020, 278: 105820.
- [32] QIAO C, WANG Y, LI C H, et al. Catastrophe instability analysis of rock slopes with locked segments in open-pit mine due to freeze-thaw weathering[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(4): 135.
- [33] 傅鹤林, 李欢, 李鲇, 等. 寒区炭质千枚岩冻-动联合损伤特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 274–284.
FU Helin, LI Huan, LI Jie, et al. Research on freezing-dynamic combined damage characteristics of carbonaceous phyllite in cold region[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 274–284.
- [34] 郑虹, 冯夏庭, 陈祖煜. 岩石力学室内试验 ISRM 建议方法的标准化和数字化[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2456–2468.
ZHENG Hong, FENG Xiating, CHEN Zuyu. Standardization and digitization for isrm suggested methods of rock mechanics laboratory tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2456–2468.
- [35] 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.
- [36] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [37] 肖鹏, 陈有亮, 杜曦, 等. 冻融循环作用下砂岩的力学特性及细观损伤本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 805–815.
XIAO Peng, CHEN Youliang, DU Xi, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles and studies on meso-damage constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 805–815.
- [38] SHI Z M, LI J T, WANG J, et al. Fracture behavior and damage evolution model of sandstone containing a single pre-existing flaw under discontinuous fatigue loading[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2023, 32(1): 3–27.
- [39] 陆翔, 周伟, 才庆祥, 等. 冻融循环下泥岩力学特性及细观破裂机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 819–829.
LU Xiang, ZHOU Wei, CAI Qingxiang, et al. Mechanical properties and meso fracture mechanism of mudstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 819–829.
- [40] FENG Q, HOU S J, LIU W W, et al. Study on the simulation method and mesoscopic characteristics of rock freeze-thaw damage[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 153: 105038.
- [41] 王桂林, 王润秋, 孙帆, 等. 单轴压缩下溶隙灰岩声发射 RA-AF 特征及破裂模式研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 118–128.
WANG Guilin, WANG Runqiu, SUN Fan, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission and failure mode of Karst-fissure limestone under uniaxial compression[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8): 118–128.
- [42] JU S Y, LI D S, JIA J Q. Machine - learning - based methods for crack classification using acoustic emission technique[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 178: 109253.
- [43] ZHANG H Y, GUO J Q, SUN F Y, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics in the fracture process of granite under dry and saturated state[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, 40(10): 5213–5231.