

中文引用格式:田森,龚远恒,李永新,等. 寒区露天矿边坡裂隙岩体冻-动联合损伤劣化特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4):85-93.

英文引用格式:TIAN Sen, GONG Yuanheng, LI Yongxin, et al. Study on freezing-dynamic combined damage and deterioration characteristics of open-pit slope fractured rock mass in cold region[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(4):85-93.

寒区露天矿边坡裂隙岩体冻-动联合 损伤劣化特性研究*

田森¹副教授, 龚远恒¹, 李永新^{1,2}, 赵映^{1,3}, 王光进⁴教授, 司鹤¹教授

(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 芒市华盛金矿开发有限公司, 云南 芒市 678400; 3 中国电力建设集团有限公司 成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130; 4 昆明理工大学 国土资源学院, 云南 昆明 650093)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.0838

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

【摘要】 为提升寒区露天矿滑坡等地质灾害防控能力, 依托某寒区露天矿高陡边坡工程, 在30次冻融循环试验(温度范围为-30~20℃)的基础上, 开展不同裂隙倾角(0、25、50、75°)边坡潜滑区岩体的单轴变上限循环加卸载试验及同步声发射监测试验, 从宏/细观尺度探究边坡岩体在冻-动(冻融循环与循环加卸载)联合作用下的损伤劣化特性与力学演化特征, 并进一步研究裂隙岩体裂纹起裂、扩展以及破坏模式。结果表明: 随裂隙倾角增大, 裂隙岩体冻融损伤作用逐渐降低, 但抗压强度和弹性模量呈线性趋势增长, 疲劳抗性的最大变形为0.5583%(75°); 相较于普通单轴加载, 循环加卸载条件下裂隙岩体抗压强度最大降低5.6 MPa; 不同岩样费利西蒂比(Felicity比)随加载循环等级增加而减小, 在最终破坏阶段均低于0.7; 随加载循环等级增加, 累计耗散能的增幅随倾角增大而减小; 岩样以张拉破坏为主, 但倾角超过25°时, 张拉和混合破坏有向剪切破坏转变的趋势。

【关键词】 寒区露天矿; 边坡岩体; 裂隙岩体; 冻融循环; 冻-动联合; 损伤劣化; 声发射

Study on freezing-dynamic combined damage and deterioration characteristics of open-pit slope fractured rock mass in cold region

TIAN Sen¹, GONG Yuanheng¹, LI Yongxin^{1,2}, ZHAO Ying^{1,3}, WANG Guangjin⁴, SI Hu¹

(1 Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2 Mangshi Huasheng Gold Mine Development Co., Ltd., Mangshi Yunnan 678400, China; 3 Chengdu Engineering Co., Ltd., Power Construction Corporation of China, Chengdu Sichuan 611130, China; 4 Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China)

Abstract: Based on the high and steep slope project of an open-pit slope in cold region, 30 freeze-thaw cycle tests were conducted. The temperature range was set from -30 °C to 20 °C. Subsequently uniaxial

variable upper limit cyclic loading-unloading tests as well as synchronous acoustic emission monitoring tests were carried out. Slope rock masses with fracture angles of 0, 25, 50 and 75° were used in potential slip zone. The freezing-dynamic (freeze-thaw cycles and cyclic loading and unloading) combined damage and deterioration characteristics and mechanical properties of slope rock mass were explored in macro and mesoscopic scales. Furthermore, the crack initiation, propagation and failure modes of fractured rock mass were studied. The results show that as the fracture angle increases, the freeze-thaw damage effect on the fractured rock mass gradually decreases, while the compressive strength and elastic modulus exhibit a linear increasing trend with the maximum deformation of fatigue resistance of 0.558 3% at 75°. Compared to ordinary uniaxial loading, the compressive strength of fractured rock masses under cyclic loading and unloading condition decreases by 5.6 MPa. The Felicity ratios of different rock masses decrease with the increase of cyclic levels, and the Felicity ratios at the final failure stage were all below 0.7. As the cyclic loading level increases, the increment of cumulative dissipated energy decreases with the increase of fracture angle. The rock masses mainly exhibit tensile failure, but when the angles exceeded 25°, there is a trend of transformation from tensile and mixed failure to shear failure.

Keywords: cold regional open pit; slope rock mass; fractured rock mass; freeze-thaw cycles; freezing-dynamic combined; damage and deterioration; acoustic emission

0 引言

露天矿边坡失稳造成的滑坡、泥石流等灾害日益增多且破坏性极大,已经成为威胁矿山安全的重要因素。特别是在高寒、高海拔地区,复杂多变的地质环境条件对露天矿边坡的稳定性造成了严重影响^[1]。在露天开采过程中,不间断爆破开挖等工程扰动会导致岩体工程不断劣化、应力环境逐步复杂,诱发边坡岩体内部形成孔隙以及不同形态的节理裂隙损伤^[2]。同时,在低温条件下,边坡岩体内部反复的水分冻结和融化会引起冻胀开裂,加剧了裂隙岩体损伤劣化^[3-4]。因此,研究复杂结构边坡岩体在冻-动(冻融循环和循环加卸载)联合作用下的损伤劣化特性,对于寒区露天矿滑坡等地质灾害防控工作具有重要意义。

在岩体冻融损伤理论方面,国内外研究主要涉及体积膨胀理论、静水压力理论和分凝冰理论等^[5-6]。宏观试验上,经过冻融循环后的砂岩,其抗压强度和弹性模量显著降低,孔隙度随冻融次数增加呈幂函数增长^[7-8];花岗岩的单轴抗压强度、纵波波速损伤变量与冻融系数之间存在线性关系^[9]。在冻融循环过程中,岩体表面的裂纹密度大于内部,冻融破坏以拉伸破坏为主^[10]。李聪等^[11]基于等效裂纹法推导出裂隙扩展后的容积和冻胀力的关系,揭示了寒区边坡岩体裂隙扩展后的冻胀力演化规律。细观研究基于CT扫描、核磁共振技术、声发射技术分析岩体内部结构变化及裂隙场发育状态,冻

融循环引起的微裂隙扩展和孔隙度增加导致岩体宏观劣化^[12-14]。在长期工程扰动作用下,边坡岩体内部裂隙、节理和结构面等受明显周期荷载影响而产生损伤劣化。如循环荷载条件下岩体的峰值强度相对于常规压缩有所降低,同时表现出明显的应力-应变滞后现象^[15];赵国贞^[16]、SHEN Mingxuan^[17]等考虑岩体初始损伤状态,利用核磁共振等技术探究岩体损伤耗能规律。然而,针对冻胀损伤对裂隙岩体力学特性的影响及裂隙岩体裂纹发育特征等,仍需要进一步研究。

鉴于此,笔者依托寒区某露天矿边坡工程,结合实际地质环境特征,拟开展不同裂隙倾角岩体冻融循环和变上限单轴循环加卸载试验,从宏观上探究边坡岩体在冻-动联合作用下的力学特性。同时,基于同步声发射监测系统,研究冻-动联合作用下裂隙岩体细观变形与能量演化特征,揭示裂隙岩体在极端气候条件下的宏观细观损伤劣化特性及破坏模式,以期为寒区露天矿(简称为露天矿)滑坡等地质灾害的防控工作提供参考。

1 冻-动联合损伤劣化特性试验方法

1.1 试验设备及样品制备

岩样取自新疆某露天矿北帮边坡的潜滑区,如图1所示,北帮边坡整体坡体上陡下缓,呈折线型;边坡开挖使岩体应力释放,节理裂隙贯通。切割岩体可见:岩体裂缝张开5~10 cm,深度达10~60 cm。该地区温度为-30~25℃,温差较大。



(a) 露天矿边坡全貌



(b) 北帮边坡

图1 露天矿边坡工程

Fig. 1 Open-pit slope engineering

根据《国际岩石力学学会试验规程》^[18]和《工程岩体试验方法标准》^[19],制备直径50 mm、高100 mm的圆柱形岩体样本。

为探明岩体裂隙角度对其力学特性的影响,以岩样中截面为基准面,在试件中部加工出长20 mm、宽2 mm的不同倾角(0°、25°、50°、75°)裂隙,深度为50 mm,如图2所示。



图2 预制不同倾角裂隙的边坡岩样

Fig. 2 Prefabricated fractured rock samples with different fracture angles

1.2 冻融试验

根据文献[19],将筛选的岩样在真空饱水机中强制饱和48 h,放入岩石冷冻冰柜。为测试该岩体最大冻融损伤量,冻融试验过程中使用注射器向样本裂隙内注入纯净水,用防水胶布与保鲜膜包裹样本,尽可能减少水分流失;将冻结与融化温度分别设置为-30、20℃,每个冻融循环周期持续12 h。

1.3 循环加卸载与同步声发射监测试验

经过30次冻融循环后,根据裂隙倾角不同,将试验分为4组,共16个岩样,常规单轴压缩和变上限单轴循环加卸载试验分别取8个岩样,其中,变上限单轴循环加卸载试验参数见表1。

表1 变上限单轴循环加卸载试验参数

Table 1 Parameters of variable upper limit single-shaft cyclic loading and unloading test

岩性	加载阶段	加载控制方式	加载速率
片麻岩	初始阶段	位移控制/ (mm·min)	0.1
	位移增至 0.3 mm	控制力增加/ (kN·min)	0.5
	压力增至1 kN(位移 增量0.1 mm)	控制力卸载/ (kN·min)	0.5
	依次循环直至破坏		

采用岩石力学试验系统(Rock Mechanical Test System 815, MTS815)及同步声发射监测系统,在岩样表面安装环向引伸计和声发射传感器。

2 冻-动联合损伤劣化特性试验结果与讨论

2.1 冻-动联合作用下岩体宏观力学特性研究

2.1.1 岩体应力-应变曲线特征

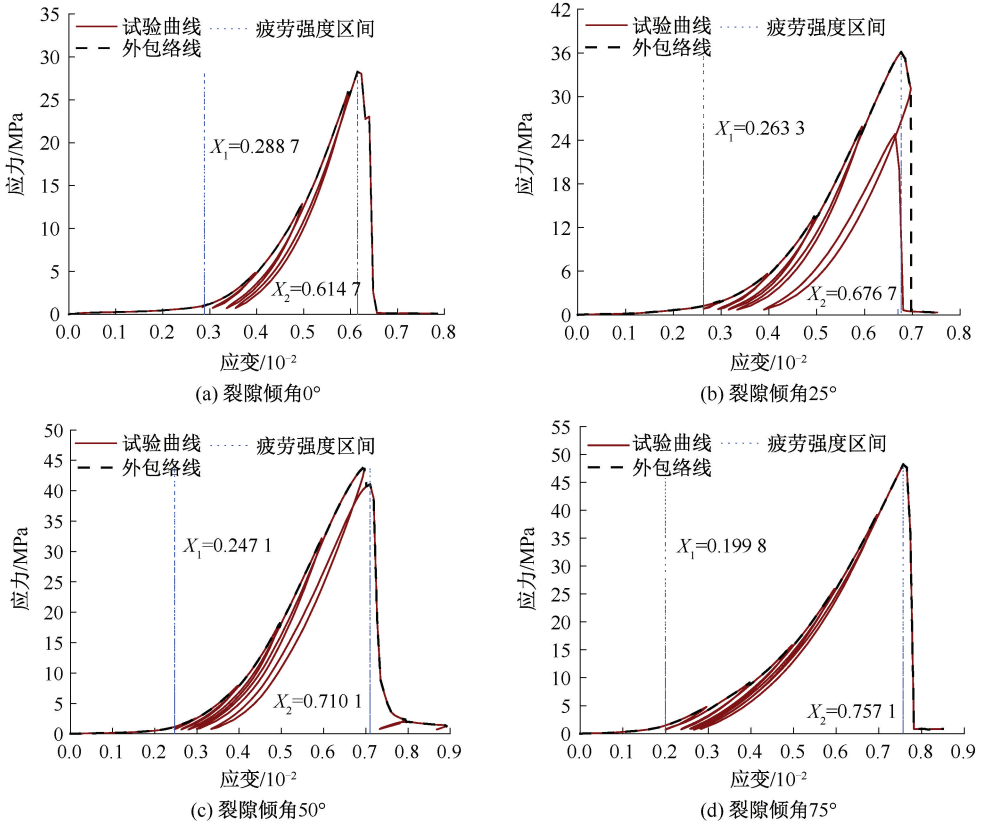
冻融后不同裂隙倾角岩体循环加卸载的应力-应变曲线如图3所示。整个力学试验过程分为3个阶段。初期,应力较低,岩体裂隙逐渐开始被压缩闭合。在第1个循环等级,岩样的应变从 0.2887×10^{-2} (0°)降低至 0.1988×10^{-2} (75°),岩样初期应变随倾角增大逐渐变小,表明岩体初期的强度随倾角的增大而增大,冻融损伤随着倾角的增大而减小。当卸载应力时,岩样内部裂纹在一定压力下无法完全闭合,应力迅速降低而应变缓慢恢复,出现滞回效应,卸载与再加载曲线的交叉形成封闭滞回环。

试验中期,岩样首先进入弹性变形阶段,孔隙被压缩。随荷载增大,岩样内部逐渐压实,进入屈服阶段,并产生新裂隙,其应力-应变曲线逐渐变陡。

在后期,随着新生裂隙稳定贯穿整个岩样,岩样发生宏观破坏,应力加载突降为0。不同裂隙倾角下破坏峰值时的应变从 0.6147×10^{-2} (0°)增大到 0.7571×10^{-2} (75°),其轴向应变随倾角增大而增大,表明岩样的轴向刚度随裂隙倾角的增大而减小。

2.1.2 岩体强度特性

不同裂隙倾角岩体的弹性模量见表2,由表2可知:不同裂隙倾角下,岩样的弹性模量均表现出先增后减的趋势。随着循环等级增加,岩样内部结构变得更加紧密,弹性模量变大;但到第5级循环后,岩样内部新生裂纹的扩展导致岩体软化,弹性模量逐步降低。



注： X_1 、 X_2 为应变代表值。

图3 冻融后不同裂隙倾角岩体循环加载卸载的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of cyclic loading-unloading of rock masses with different fracture angles after freeze-thaw

此外,在相同循环等级下,弹性模量随裂隙角度的增大而增大。如在第5级循环后,弹性模量从14.54 GPa(0°)增至17.79 GPa(75°),与峰值强度变化一致。

表2 不同裂隙倾角岩体的弹性模量

Table 2 Elastic modulus of rock masses with different fracture angles

裂隙倾角/(°)	1级循环/GPa	2级循环/GPa	3级循环/GPa	4级循环/GPa	5级循环/GPa	6级循环/GPa
0	1.51	5.12	10.00	13.55	14.54	破裂
25	1.92	5.11	9.52	13.91	15.78	15.65
50	2.93	6.23	11.78	14.87	16.02	15.79
75	3.99	6.06	12.11	15.43	17.79	17.21

岩样在常规单轴压缩与循环加载卸载条件下的峰值抗压强度与峰值应变如图4所示。相较于常规单轴加载,所有岩样的峰值应力均有所降低,而对应的峰值应变有所增加。循环加载卸载条件下的应变增加14.81%(0°)、21.43%(25°)、-5.48%(50°)、2.71%(75°);而抗压强度分别降低17.65%(0°)、15.51%(25°)、6.75%(50°)、3.53%(75°)。这表明岩样在

循环压缩时,其强度比单轴压缩普遍低,两者差异随倾角的增大而减弱。

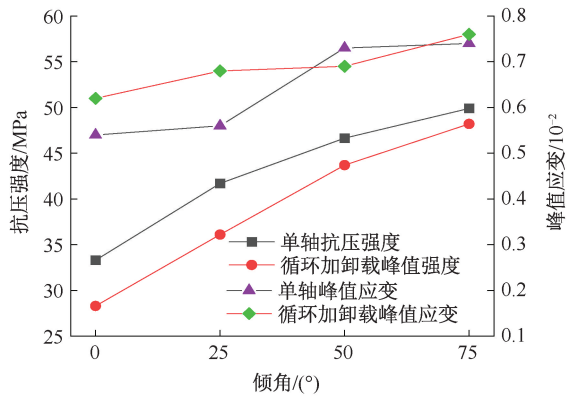


图4 峰值抗压强度与峰值应变对比

Fig. 4 Comparison of peak compressive strength and peak strain

2.2 岩体的耗散能演化特征分析

在循环加载卸载过程中,卸载曲线与再加载曲线交汇形成滞回环^[20]。其计算公式如下:

$$U_l = \int_0^c l_1 d\varepsilon \quad (1)$$

$$U_E = \int_0^C l_2 d\varepsilon \quad (2)$$

$$U_D = U_I - U_E \quad (3)$$

式中: U_I 为输入能密度, MJ/m^3 ; U_D 为耗散能密度, MJ/m^3 ; U_E 为弹性能密度, MJ/m^3 ; C 为峰值应变; l_1 为加载段应力曲线; ε 为轴向应变; l_2 为卸载段应力曲线。

不同裂隙倾角下, 岩样输入能、弹性能、耗散能等与循环等级关系如图 5 所示。随循环等级增加, 输入能和弹性能逐渐增加。当倾角为 50° 时, 输入能从 $5.7925 \times 10^{-4} \text{ MJ}/\text{m}^3$ 增加到 716.5686×10^{-4}

MJ/m^3 , 增幅最大。弹性能在第 4 至第 5 等级时增加较为明显, 各岩样的弹性能增幅分别为 $99.094 \times 10^{-4} \text{ MJ}/\text{m}^3$ (25°)、 $224.37 \times 10^{-4} \text{ MJ}/\text{m}^3$ (50°)、 $242.107 \times 10^{-4} \text{ MJ}/\text{m}^3$ (75°), 增幅随裂隙倾角而变大, 倾角大时输入能也较大, 表明冻融对岩石损伤随裂隙倾角增大而降低。

岩样的能耗比随循环等级增加呈现先降低后增加的趋势。能耗比在第 1 循环等级最高, 表明经过冻融处理的岩样内部产生裂纹, 存在较大的塑性残余应变。

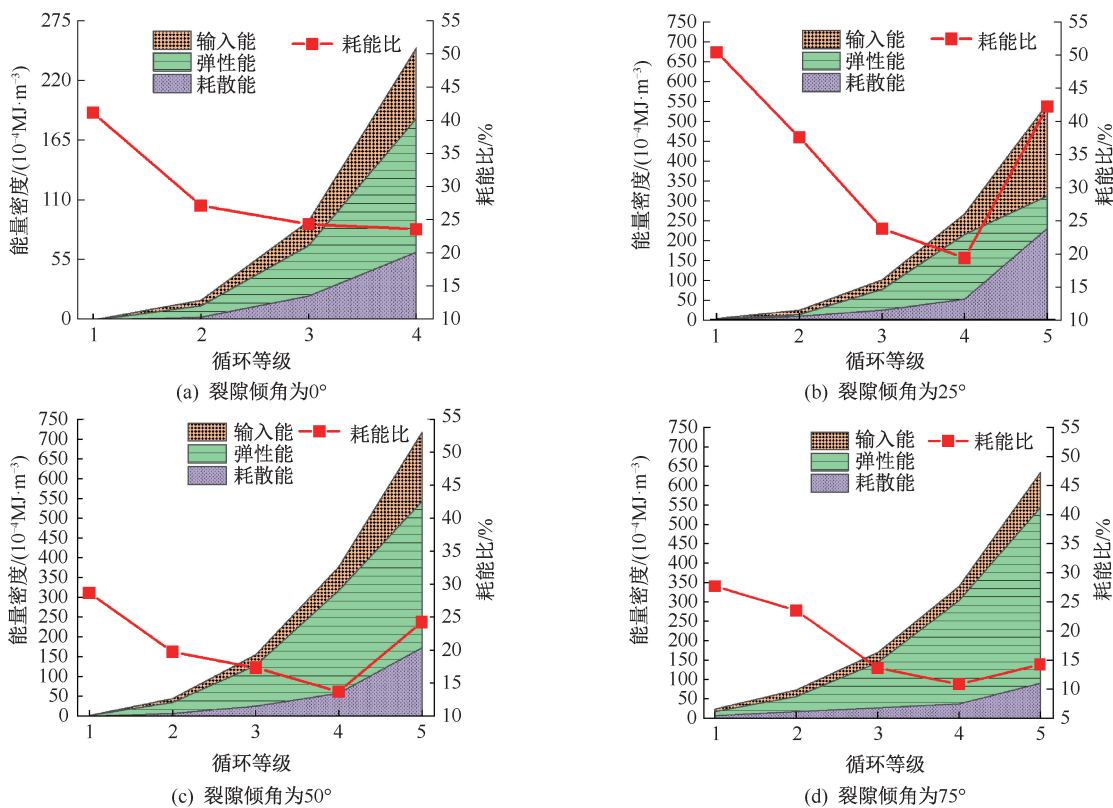


图 5 不同裂隙倾角岩体的输入能、弹性能、耗散能与能耗比演化曲线

Fig. 5 Evolution curves of input energy, elastic energy, dissipated energy, and energy dissipation ratio of rock masses with different fracture angles

2.3 岩体的声发射特征参数演化特征研究

2.3.1 岩体的振铃计数演化特征

不同裂隙倾角下冻-动联合作用下岩样的应力、振铃计数与累计振铃计数演化关系, 如图 6 所示。加载时间 200 s 内, 加载应力低于 15 MPa, 岩样内部新裂隙较少。当岩样进入塑性变形和破坏阶段时, 应力达到峰值, 内部裂隙和微裂纹开始逐渐扩展并贯通, 声发射振铃计数急剧增加。如倾角 0° , 应力达到峰值 (28.27 MPa) 时, 振铃计数是总量的

65%左右, 达到峰值。

不同裂隙倾角岩体破坏时的声发射活动差异较大。岩样倾角为 25° 和 50° 时, 最后一次加载的声发射信号活动相对 0° 倾角变少。这是由于这两个倾角的岩样上一循环等级的峰值应力大于后一循环等级。这表明该岩样具有明显的 Kaiser 效应, 不同裂隙倾角岩样的累计振铃计数呈阶梯分布。

2.3.2 岩体的 Felicity 比演化特征

σ_i 为第 i 次加载过程中出现明显声发射现象时

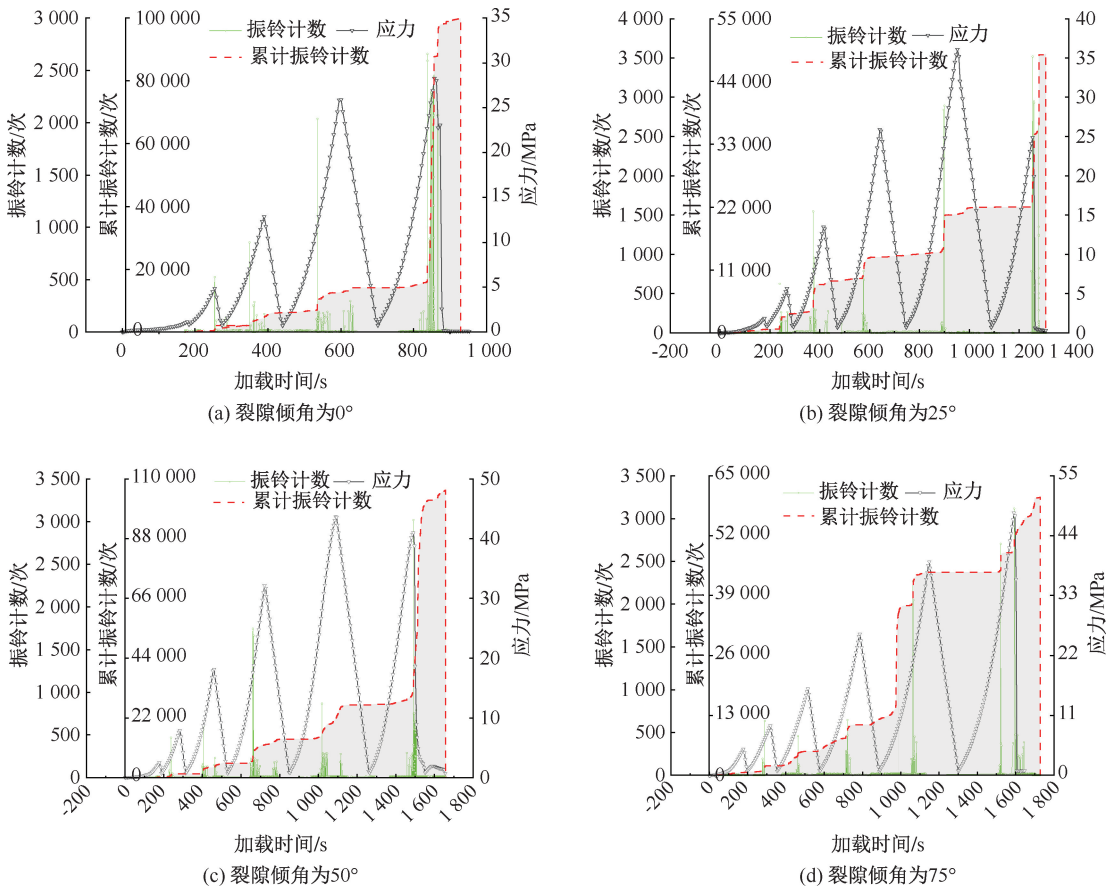


图6 不同裂隙倾角岩体的应力与累计振铃计数演化曲线

Fig. 6 Evolution curves of stress and cumulative ringing count of rock masses with different fracture angles

的应力值; σ_i 为第 $i-1$ 次加载所达到的最大应力值。试验采集了振铃计数增加 100 次时的应力作为有效应力,得到有效应力点随循环等级的分布状态,如图 7 所示。由图 7 可知:应力值随加载循环等级呈线性增长。各岩样的有效应力值分别为 17.26 MPa (0°)、24.89 MPa (25°)、30.17 MPa (50°)、30.24 MPa (75°),随裂隙倾角的增大而增大,表明倾角会影响岩体进入破坏阶段的速度。

Felicity 比随循环等级变化情况如图 8 所示。随着循环等级增加,Felicity 比呈下降趋势,表明岩样损伤程度逐渐加剧。如裂隙倾角为 50° 时,在前 3 级循环中,Felicity 比从初始的 1.42 下降至 1.01。随着加载应力进一步增加,岩样由弹性变形逐渐进入塑性变形阶段,此时内部裂隙进一步扩展并贯通,Felicity 比持续下降。第 6 级循环后,各岩样的 Felicity 比进一步降至 0.67 (0°)、0.69 (25°)、0.70 (50°)、0.77 (75°),岩样已进入破坏阶段,内部损伤程度达到最大。Felicity 比值随倾角的增大而减小,再次验证了岩石强度随倾角增大而增大的趋势。

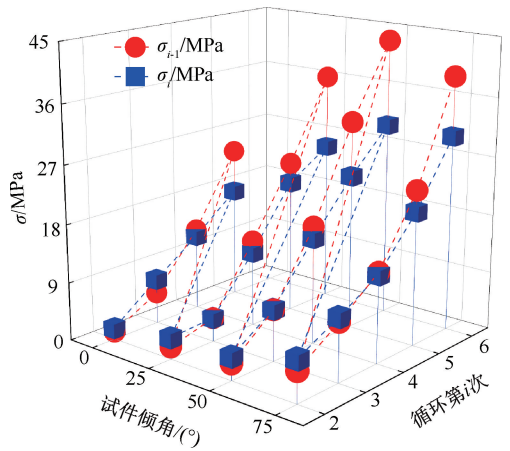


图7 岩体的应力点分布

Fig. 7 Felicity stress point distribution diagram of rock masses

2.4 岩体宏/微观破坏模式研究

岩体宏观破坏形态如图 9 所示。裂隙倾角为 0 和 25° 的岩样破裂面较为复杂,宏观破裂面从预制裂隙处向岩样两端发展,直至贯通。随裂隙倾角增大,贯通裂纹逐渐远离预制裂隙。裂隙倾角 50 和

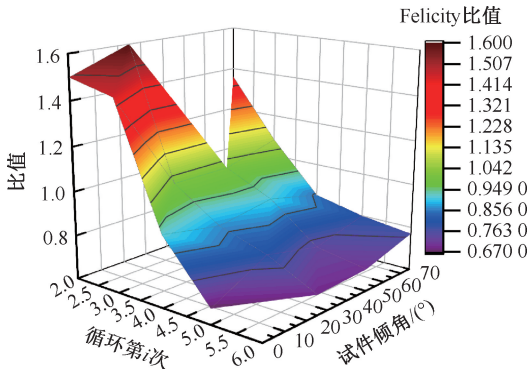


图 8 Felicity 比演化关系

Fig. 8 Felicity ratio evolution relation

75°的岩样破裂面相对简单,特别是 75°的试件,几乎是单一断面的劈裂破坏,预制裂隙处几乎未见新裂纹形成。由此可见:随预制裂隙倾角增大,宏观破裂面与试件表面的交线逐渐远离预制裂隙。

图 10 为基于混合高斯模型 (Gaussian Mixture Model, GMM) 的裂纹分类^[21],裂纹 1 代表混合裂纹,2 为张拉裂纹,3 为剪切裂纹。岩体各倾角的张拉裂

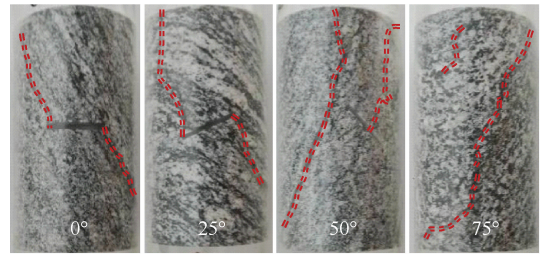
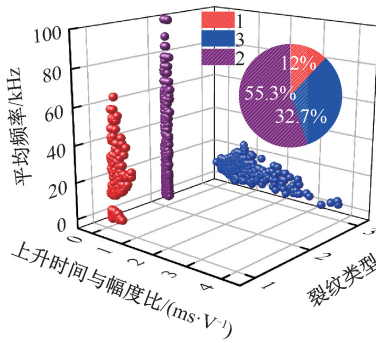


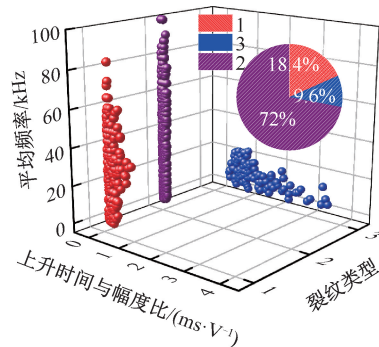
图 9 循环加卸载下岩体破坏形态

Fig. 9 Failure mode of rock masses under cyclic loading-unloading

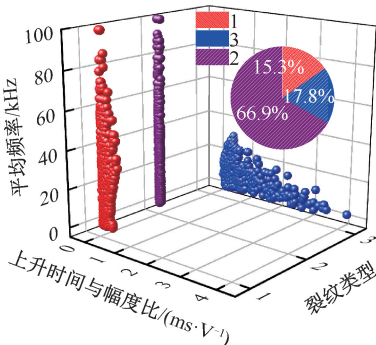
纹占比均大于 50%,主要以张拉裂纹为主。如裂隙倾角为 0°时,张拉裂纹占 55.3%,剪切裂纹占 32.7%。其中,裂隙倾角 25°岩样张拉破坏最为明显。当超过 25°时,剪切裂纹逐渐增加,达到 19.5%,而张拉裂纹和混合裂纹逐渐减少。这表明岩石破坏模式从张拉破坏逐渐转向单一的剪切破坏,但张拉破坏仍占主导。这一规律与图 9 中的宏观破坏模式相对应。



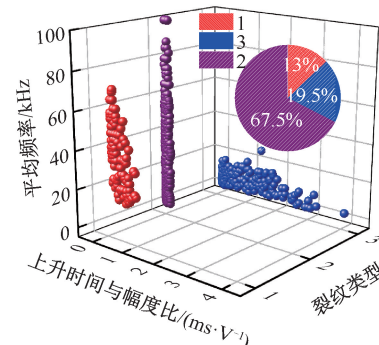
(a) 裂隙倾角 0°



(b) 裂隙倾角 25°



(c) 裂隙倾角 50°



(d) 裂隙倾角 75°

图 10 基于 GMM 的裂纹分类

Fig. 10 Crack classification based on GMM

3 结 论

1) 随裂隙倾角的增大,岩体的抗压强度和弹性

模量呈线性增长趋势,裂隙倾角较大的岩样在循环加卸载下表现出更强的疲劳抗力与抗冻融损伤能力。相较于单轴常规加载条件,循环加卸载条件下

的裂隙岩体抗压强度有所降低,最大降低了17.65%。受冻融损伤的岩样在循环加载下表现出更明显塑性特征。

2) 在循环加卸载过程中,随循环等级的增加,岩体耗能比呈现先降低后增加的趋势,累计耗散能的增幅随裂隙倾角的增大逐渐降低,新裂隙的形成和扩展趋于稳定。试验过程中出现了 Kaiser 效应和 Felicity 效应。岩样的 Felicity 比随循环等级增加而

减小,最终破坏阶段的比值均低于0.7。

3) 随应力水平提升,岩体内部形成新裂隙,特别是在接近峰值应力时,声发射振铃计数达到峰值,岩样表面裂纹由预制裂隙处向岩体两端扩展,最终贯通破坏。此外,岩体均以张拉破坏为主,,当裂隙倾角超过25°时,随倾角的增大,张拉和混合破坏有向剪切破坏转变的趋势。

参 考 文 献

- [1] 李长洪,肖永刚,王宇,等. 高海拔寒区岩质边坡变形破坏机制研究现状及趋势[J]. 工程科学学报, 2019, 41(11): 1374-1386.
LI Changhong, XIAO Yonggang, WANG Yu, et al. Review and prospects for understanding deformation and failure of rock slopes in cold regions with high altitude[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(11): 1374-1386.
- [2] LIU Zhifang, XIANG Yang, LIU Wei, et al. Effect of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic characteristics of claystone: a case study of slope stability from open-pit mines in wet regions[J]. Water, 2024, 16(5): DOI: 10.3390/w16050640.
- [3] 李广贺,呼子桓,王东,等. 露天矿端帮开采支撑煤柱失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 122-128.
LI Guanghe, HU Zihuan, WANG Dong, et al. Study on instability criterion of rib pillars in open-pit during highwall mining [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(9): 122-128.
- [4] 王文才,李俊鹏,王创业,等. 不同开采工况诱发边坡变形与时效稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增1): 72-78.
WANG Wencai, LI Junpeng, WANG Chuangye, et al. Analysis on slope deformation and aging stability induced by different mining conditions[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 72-78.
- [5] AMIRKIYAEI V, GHASEMI E, FARAMARZI L. Estimating uniaxial compressive strength of carbonate building stones based on some intact stone properties after deterioration by freeze-thaw [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(9): 1-11.
- [6] SHI Shengzhu, ZHU Fengjin, ZHU Jiancai. Investigation on damage creep constitutive model of rock under the coupled effect of freeze-thaw cycles and loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, 47(4): 1281-1299.
- [7] 宋勇军,操警辉. 冻融-荷载共同作用下砂岩损伤力学特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 94-104.
SONG Yongjun, CAO Jinghui. Damage mechanical properties of sandstone under combined action of freeze-thaw and load [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 94-104.
- [8] CHEN Tiancheng, YEUNG M R, MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 127-136.
- [9] 刘宏,张诏飞,李兆龙,等. 冻融循环作用下的花岗岩边坡岩体强度研究[J]. 金属矿山, 2024(2): 255-261.
LIU Hong, ZHANG Zhaofei, LI Zhaolong, et al. Study on the strength of granite slope rock mass under freeze-thaw cycles[J]. Metal Mine, 2024(2): 255-261.
- [10] 朱谭谭,李昂,黄达,等. 应力-冻融耦合作用下砂岩变形与损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 342-351.
ZHU Tantan, LI Ang, HUANG Da, et al. Deformation and damage characteristics of sandstone under the combined action of stress and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 342-351.
- [11] 李聪,张新宙,吴亮亮,等. 裂隙岩体冻胀力演化解析模型与裂纹亚临界扩展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增1): 3439-3449.

- LI Cong, ZHANG Xinzhou, WU Liangliang, et al. Analytical model of frost heave force evolution in fractured rock mass and analysis of subcritical crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3 439-3 449.
- [12] 刘慧, 杨更社, 申艳军, 等. 冻融-受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1 136-1 149.
- LIU Hui, YANG Gengshe, SHEN Yanjun, et al. CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1 136-1 149.
- [13] XU Huiying, BU Jingwu, CHEN Xudong, et al. Fracture behavior of dredged sand concrete under freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130192.
- [14] ZHENG Yaini, JIA Chaojun, LEI Mingfeng, et al. Investigation of the constitutive damage model of rock under the coupled effect of Freeze-Thaw cycles and loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(3): 1 861-1 879.
- [15] GAN Leiyu, LIU Yu, ZHANG Zongliang, et al. Experimental investigation of the dynamic mechanical properties of concrete under different strain rates and cyclic loading[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02750.
- [16] 赵国贞, 程伟, 刘超, 等. 基于循环加卸载的煤岩体破坏力学行为和能量演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7):1 636-1 645.
- ZHAO Guozhen, CHENG Wei, LIU Chao, et al. Failure mechanical behavior and energy evolution of coal and rock under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7):1 636-1 645.
- [17] SHEN Mingxuan, ZHAO Yu, BI Jing, et al. Micro-damage evolution and macro-mechanical property of preloaded sandstone subjected to high-temperature treatment based on NMR technique[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130638.
- [18] 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): 2 456-2 468.
- 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): 2 456-2 468.
- [19] GB/T50266—2013, 工程岩体试验方法标准[S].
- GB/T50266—2013, Standard for test methods of engineering rock mass[S].
- [20] 陈见行, 曾班全, 张俊文. 冲击荷载下加卸载效应对冲击性岩石力学特性的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2 283-2 297.
- CHEN Jianxing, ZENG Banquan, ZHANG Junwen. Influence of loading and unloading effect on mechanical properties of impact rock under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2024:49(5):2 283-2 297.
- [21] 黄晓红, 董诗琪, 李静, 等. 基于 GMM+SVM 的声发射花岗岩裂纹识别研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 21-28, 34.
- HUANG Xiaohong, DONG Shiqi, LI Jing, et al. Research on granite crack identification by acoustic emission based on GMM+SVM[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 21-28, 34.

作者简介: 田森 (1986—),男,宁夏银川人,博士,副教授,主要从事矿山岩体工程灾变动力学、岩土边坡稳定性及滑坡灾害监测预警等方面的研究。E-mail: sentian@cqu.edu.cn。

