

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.260

引用格式:吴小刚,倪智伟,朱君星,等.冻融循环作用下裂隙灰岩的力学特性及裂纹扩展特征[J].重庆大学学报,2025,48(8):1-13.



# 冻融循环作用下裂隙灰岩的力学特性及裂纹扩展特征

吴小刚<sup>1a,1b,2</sup>,倪智伟<sup>2,3,4,5</sup>,朱君星<sup>2,3,4,5</sup>,秦柯<sup>2,3,4,5</sup>,唐恺<sup>2,3,4,5</sup>

(1. 中国人民解放军陆军工程大学 a. 国防工程学院; b. 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210071; 2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000; 3. 中钢集团马鞍山矿冶研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 4. 华唯金属矿产资源高效循环利用国家工程研究中心有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 5. 非煤露天矿山灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:**寒区岩体由于反复冻融导致的变形破坏是当前亟待研究和解决的前沿课题。为研究冻融循环作用下裂隙岩体的力学特性及裂纹扩展特征,针对冻融循环作用下不同裂隙倾角的裂隙灰岩开展单轴压缩试验,得到相应的应力-应变曲线及宏观破坏特征,并采用电镜分析破坏面的微观特征。试验结果表明:冻融后裂隙灰岩的破坏特征呈明显的脆性破坏,其峰值应力、弹性模量随裂隙倾角的增大而增大,随冻融循环次数的增加而减小;峰值应变随裂隙倾角、冻融循环次数呈正相关。宏观破坏模式主要以裂纹模式为主,片落模式为辅,破坏面与预制裂隙有关,多为张拉裂纹,与冻融循环无明显相关性。微观试验揭露了冻融循环对裂隙灰岩的损伤,微裂纹的平均长度、累计长度和平均宽度随冻融循环次数增加而增大,预制裂隙对破坏面的微观特征无明显影响。对于不同裂隙倾角的裂隙灰岩,预制裂隙影响了宏观破坏裂纹发育,而冻融加剧了内部微裂纹的扩展;裂隙倾角的增大抑制了冻融循环带来的损伤,提高了岩体耐久性。研究成果可为寒区矿山工程开采提供重要参考价值。

**关键词:**裂隙灰岩;裂隙倾角;冻融循环;单轴压缩;峰值应力

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)08-001-13

## The mechanical properties and crack propagation characteristics of fractured limestone under freeze-thaw cycles

WU Xiaogang<sup>1a,1b,2</sup>, NI Zhiwei<sup>2,3,4,5</sup>, ZHU Junxing<sup>2,3,4,5</sup>, QIN Ke<sup>2,3,4,5</sup>, TANG Kai<sup>2,3,4,5</sup>

(1a. School of National Defense Engineering; 1b. National Key Laboratory Explosive Impact and Disaster Prevention, the Army Engineering University of the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210071, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Ma'anshan, Anhui 243000, P. R. China; 3. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui 243000, P. R. China; 4. Huawei National Engineering Research Center for Efficient Recycling of Metallic Mineral Resources Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui 243000, P. R. China; 5. Key Laboratory of Disaster Prevention and Control for Non-coal Open-pit Mines, Ma'anshan, Anhui 243000, P. R. China)

收稿日期: 2023-12-17 网络出版日期: 2024-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1803502, 2021YFC3001303)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1803502, 2021YFC3001303).

作者简介: 吴小刚(1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事矿山岩土工程灾害防控技术方向的研究, (E-mail) Wxgmkj1218@163.com。

**Abstract:** The deformation and failure of rock masses in cold regions due to repeated freeze-thaw cycles present critical challenges that demand thorough investigation. This study examines the mechanical properties and crack propagation characteristics of fractured limestone subjected to varying numbers of freeze-thaw cycles and crack inclination angles. Uniaxial compression tests were conducted, and corresponding stress-strain responses and macroscopic failure patterns were obtained. The fracture surfaces were further analyzed using scanning electron microscopy. Results indicate that repeated freeze-thaw cycles induce pronounced brittle failure in fractured limestone. Peak stress and elastic modulus increase with crack inclination but decrease with the number of freeze-thaw cycles, while peak strain shows positive correlation with both variables. Macroscopic failure is primarily governed by crack-induced breakage, with spalling as a secondary mode. Fracture surfaces predominantly exhibit tensile cracks influenced by pre-existing flaws, but not by the number of freeze-thaw cycles. Microscopically, freeze-thaw action promotes the development of internal microcracks-evidenced by increased crack length, width and density-while pre-existing cracks exert minimal influence on microstructural features. Increasing crack inclination angles suppresses freeze-thaw damage, thus improving rock durability. These findings provide valuable insights for improving the stability and longevity of rock structures in cold-region mining engineering.

**Keywords:** fractured limestone; fissure dip angle; freeze-thaw cycle; uniaxial compression; peak stress

高寒地区储存着丰富的矿产资源,在中国的青藏高原地区,已探明储量的矿产有近70种,包括:铜、铬、钴、钼、铅、锌、铁等,其中铜矿和铅锌矿的储量预计达数千万吨<sup>[1-4]</sup>。在“西部大开发”和“一带一路”战略的推行下,矿产资源的开发利用逐步向高寒高海拔地区转移<sup>[5]</sup>。然而在高寒高海拔地区,含有原生裂隙的工程岩体常常因气候和地质原因出现冻害问题,例如矿山边坡热融滑塌、岩质边坡风化、剥落等<sup>[6-8]</sup>。由冻融或开挖卸荷等诱发的工程事故和灾害会给国家和人民带来巨大的生命财产损失。

冻融循环作用下岩体损伤特性研究对于工程施工和资源开发意义深远,主要包括:冻融岩体物理力学性质、冻融损伤机理以及数值模拟相关研究<sup>[9-13]</sup>。杨更社等<sup>[14]</sup>和周科平等<sup>[15]</sup>通过CT扫描和核磁共振等微观手段研究了岩石经历过冻融损伤后内部孔隙结构的变化特征,通过了解岩体的孔隙空间分布情况,得出岩石内部微孔隙的数量和大小随冻融循环次数的增加而增加。在相同冻融条件下,孔隙大小、贯通程度、孔隙率及岩石本身强度对损伤有重要影响。张慧梅等<sup>[16]</sup>通过对冻融砂岩和页岩的研究表明,随冻融循环次数的增加,岩石的弹性模量及强度减小,应力-应变曲线压缩性增大,弹性增长段减小。肖鹏等<sup>[17]</sup>引入连续损伤力学理论,建立了冻融与围压耦合作用下岩石损伤演化方程和细观损伤本构模型。

当前,国内外学者对完整岩石冻融损伤力学性质及其破坏机理开展了广泛研究,而宏观层面的含节理、裂隙岩体冻融损伤则相对较少。岩体中存在的裂隙、缺陷会破坏岩体完整性,弱化岩体强度和力学特性,容易导致岩体发生破坏<sup>[18-19]</sup>。对于冻融岩体而言,研究主要集中于冻融的机理、力学特性以及破坏模式,而裂隙岩体内部水结冰易发生体积膨胀,对裂隙面产生压力导致裂隙扩展。裂隙岩体相比岩石具有更大的空间尺度(主要是以裂隙为初始损伤的宏观尺度),故相比于完整岩石,裂隙岩体更侧重于裂隙几何特征、空间位置、数量等对岩体物理力学性质及劣化程度的影响<sup>[20]</sup>。除了裂隙分布形式外,裂隙长宽比、裂隙面粗糙度、裂隙封闭程度、岩桥长度也会影响岩体冻融劣化效果。主要原因是因为长裂隙临界强度因子小且容易吸水饱和,而微裂隙因界面曲率效应导致冻结点降低,水分未充分冻结,大孔隙则饱和度低导致难以产生较大冻胀力,使冻融劣化损伤不明显<sup>[21]</sup>。申艳军等<sup>[22]</sup>将单裂隙端部根据损伤程度依次划分为:断裂区、渐进损伤区、系统损伤区,并发现局部化损伤效应与裂隙倾角关系不明显。裴向军等<sup>[23]</sup>取4种寒区裂隙岩石进行冻融应变实验,发现饱和样的冻融应变过程为8个阶段(冷缩、冻胀、冻缩、升温迟滞、热胀、融缩、融缩回弹、融缩趋稳阶段),而干燥样则为5个阶段(冷缩、冷缩趋稳、升温迟滞、热胀、热胀趋稳阶段)。路亚妮等<sup>[24]</sup>针对预制单裂隙模型试样进行冻融循环后的三轴试验,表明单裂隙岩体的损伤劣化模式有3种:颗粒散落模式、龟裂模式和沿预制裂隙断裂模式。贾蓬等<sup>[25]</sup>引入了冻融和荷载损伤因子,建立了考虑岩石压密阶段的分段损伤本构模

型,更合理地描述冻融损伤砂岩的变形破坏特征。

由此可见,冻融裂隙岩体的破坏力学行为演化规律的研究并不深入,也缺少对裂隙岩体的力学特性、破坏模式以及内部裂隙发育机理分析。笔者通过预制不同裂隙角度的灰岩试样,分别对0、25、50、75次冻融循环下的裂隙灰岩展开单轴压缩试验,采用电镜扫描观察其破坏面的微观结构,并分析冻融循环下裂隙灰岩的应力-应变曲线、宏微观破坏模式及冻融耐久性程度,通过对不同裂隙倾角及冻融循环次数下岩体破坏程度的系统分析,揭露了裂隙灰岩的冻融损伤力学特性及裂纹扩展特征。

## 1 试验概况

### 1.1 试验取材

试样取自西藏昌都市江达县玉龙铜矿矿区,矿区海拔高度4 560~5 124 m,相对高差在700 m以内,矿区气候上属于温带半干旱高寒山地气候区,昼夜温差大,辐射强、低温低压、生态脆弱。矿区年平均降雨量755.4 mm,主要集中在5月至9月,矿区水系发达,位于金沙江水系和澜沧江水系之间;矿区年温差较大,年最高气温25℃,最低气温-19.3℃;月平均气温6月至8月最高,11月至次年4月最低,气温日变幅最大为18.5℃。10月至次年4月为冻土期,多降雪,场地标准冻深为180 cm,最大冻土深度220 cm,为季节性冻土。

玉龙铜矿矿区主要为第4系和三叠系上统。第四系主要为崩塌及散落的碎石和残坡积砂、砾和黏土,三叠系上统地层岩性主要以花岗斑岩、砂岩和灰岩为主。矿区岩体节理分布广泛,浅层岩体风化、蚀变强烈,卸荷裂隙发育。选取构成矿区边坡的主要岩石-灰岩作为试验材料进行寒区裂隙岩体经冻融损伤后的力学特性研究,选取原则为完好、风化小、强度高、硬度大、质地均匀、无明显节理、孔隙率低,以保证试样的一致性。



图1 玉龙铜矿矿区岩体

Fig. 1 Rock mass of Yulong copper mine

### 1.2 试样制备

灰岩试样的平均密度为2.629 g/cm<sup>3</sup>,根据国际岩石力学学会建议的方法,将灰岩制成 $\phi 50 \text{ mm} \times L100 \text{ mm}$ 的标准圆柱形试样,并用砂纸打磨使其断面平整度为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。再进行超声波检测,选取波速相近的试样,减小差异性。最后在试样长度方向几何中心预制不同角度的裂隙(见图2),其中,裂隙①为水平裂隙,裂隙②上顶点垂直对应于裂隙①中心点, $l$ 取16 mm, $d$ 取8 mm, $\alpha$ 分别取0°、30°、45°、60°、90°。

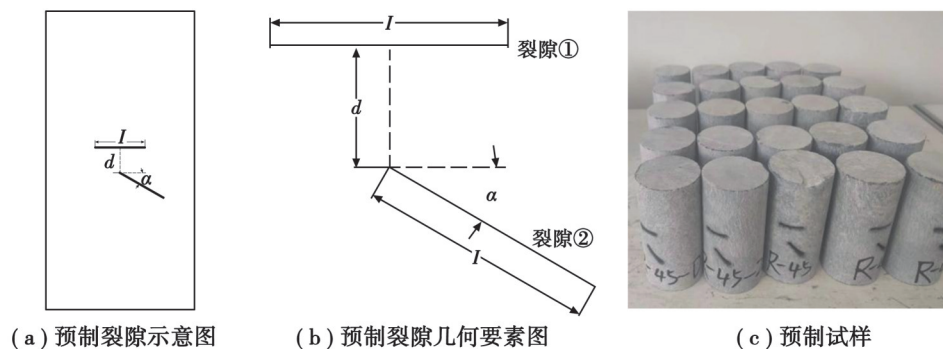


图2 岩样加工及预制裂隙示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rock sample processing and prefabricated fractures



### 1.3 试验方案

#### 1.3.1 冻融试验

根据矿区气候资料,为了便于控制温度,考虑最不利的气候条件,将冻融循环温度界定为 $-20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度变化速率基本上控制在 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 左右,温度变化遵循牛顿冷却定律。试验岩石为低孔隙率的坚硬灰岩,为使冻融损伤试验取得可视化效果,采用加水淹没试样的方法,保证岩体完全处于饱和状态。由于灰岩吸水率低,强度高,所以将冻融循环次数定为0、25、50、75次。试验设备采用CREE-5019B高低温循环试验箱,支持自上而下冻结模式,通过制冷系统与加热系统对试样进行升、降温。

#### 1.3.2 单轴压缩试验

试验所用设备为Rock Top多场耦合试验仪(见图3),由轴压系统、围压系统、渗透压系统等组成。最大轴向压力500 MPa,最大围压60 MPa,上下端口渗透压最大分别为60 MPa和50 MPa。三轴压力室具有轴向应变仪和环向位移计。其中,LVDT位移传感器量程为12 mm,精度为 $\pm 0.001\text{ mm}$ 。该试验设备适用于岩石类地质材料的流体-力学耦合试验和常规力学试验。

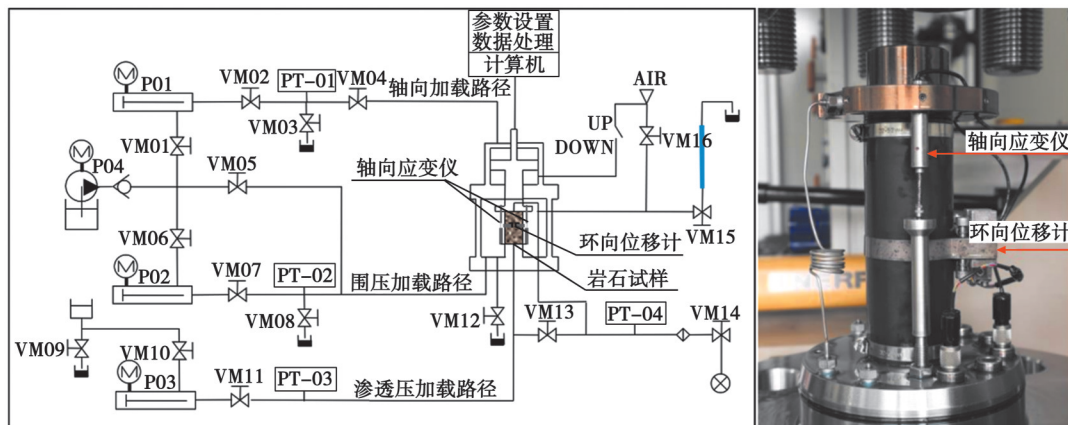


图3 RockTop多场耦合试验仪

Fig. 3 RockTop multi-field coupling tester

设试验组20组,命名格式为 $R-\alpha-N$ , $\alpha$ 表示裂隙倾角, $N$ 表示冻融循环次数,每组2个平行试样,共40个试样。将经过冻融循环的试样进行质量、波速测定,并通过Rock Top多场耦合试验仪开展单轴压缩试验,试验方案如表1所示。

表1 试验方案

Table 1 Test plan

试验组	裂隙倾角/ $^{\circ}$	冻融循环次数	冻融区间/ $^{\circ}\text{C}$	轴压加载速率/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
$R-\alpha-N$	0/30/45/60/90	0/25/50/75	$-20\sim 25$	0.06

## 2 试验结果

### 2.1 应力-应变曲线

对不同冻融循环条件下含预制裂隙的灰岩试样进行单轴压缩试验,得出应力-应变曲线如图4所示。又根据应力-应变曲线得到裂隙灰岩的峰值强度和应变,如表2所示。结果显示,裂隙灰岩表现出微裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙稳定发展阶段、屈服阶段和破坏阶段。当2条预制裂隙相互平行,裂隙倾角为 $0^{\circ}$ 时,试样的最小抵抗面积最小,峰值强度最低;当2条预制裂隙相互垂直,裂隙倾角为 $90^{\circ}$ 时,试样的最小抵抗面积最大,峰值强度最大。在冻融循环作用下,试样的峰值强度随冻融循环次数的增加而减小,符合冻融损伤规律<sup>[26]</sup>。裂隙倾角为 $0^{\circ}$ 时, $R-0-75$ 试样的峰值强度相较于 $R-0-0$ 试样下降了52.2%,裂隙倾角为 $90^{\circ}$ 时,

R-90-75 试样的峰值强度相较于 R-90-0 仅下降了 16.1%,说明裂隙倾角的增大抑制了裂隙灰岩冻融循环带来的损伤。峰值应变随裂隙倾角、冻融循环次数呈正相关,达到峰值强度后立即出现应力跌落现象,峰值应变在 0.352%~0.571%之间,小于 3%,通过文献[27]所述,该破坏模式为脆性破坏。

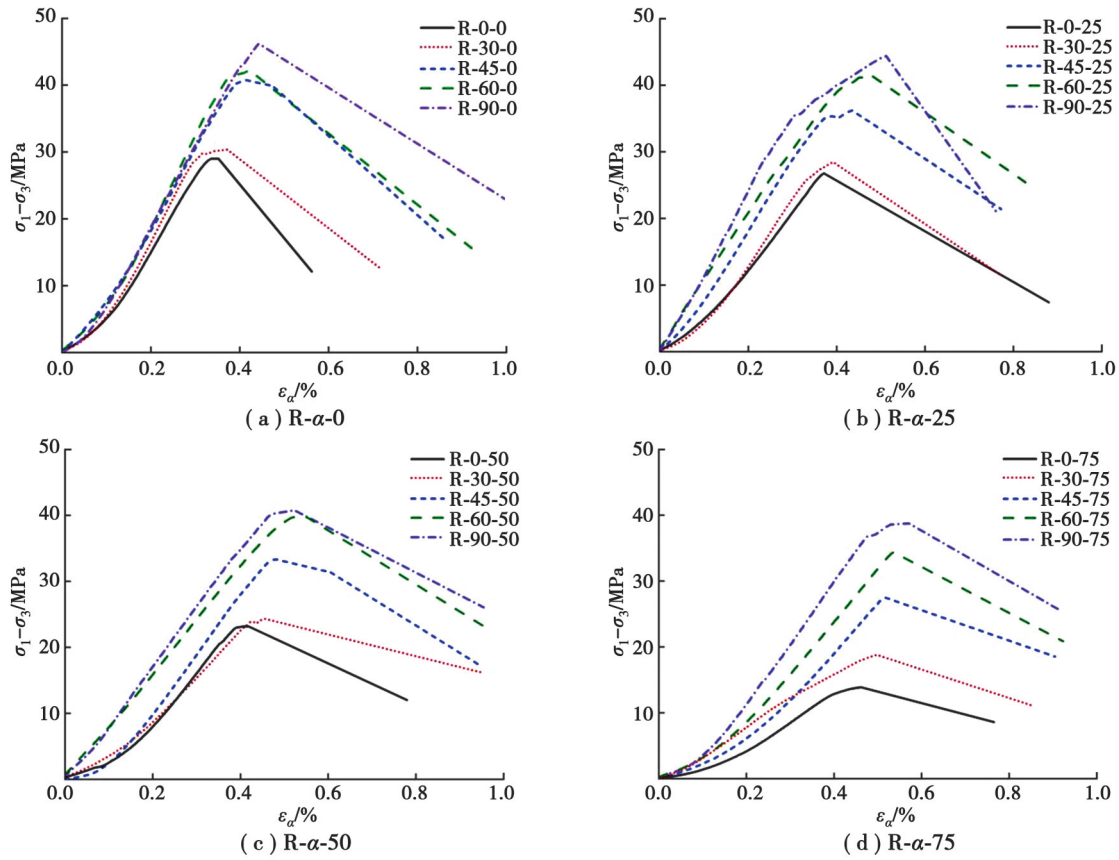


图 4 冻融循环条件下裂隙灰岩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of fractured limestone under freeze-thaw cycles

表 2 裂隙灰岩峰值强度及峰值应变

Table 2 Peak strength and peak strain of double-fissure limestone

试验组	$\alpha/(\circ)$	N							
		0		25		50		75	
		峰值 强度/MPa	峰值 应变/%	峰值 强度/MPa	峰值 应变/%	峰值 强度/MPa	峰值 应变/%	峰值 强度/MPa	峰值 应变/%
R-0-N	0	29.00	0.352	26.78	0.371	23.17	0.419	13.87	0.462
R-30-N	30	30.36	0.372	28.46	0.392	24.39	0.452	18.79	0.498
R-45-N	45	40.78	0.412	36.21	0.435	33.32	0.482	27.55	0.515
R-60-N	60	42.22	0.422	41.30	0.482	39.65	0.517	34.39	0.536
R-90-N	90	46.20	0.443	44.38	0.512	40.78	0.523	38.77	0.571

在应力-应变曲线中,可以观察到随冻融循环次数的增加弹性变形阶段由陡变缓,而随裂隙倾角的增大由缓变陡,根据应力-应变曲线得出裂隙灰岩的弹性模量如图 5 所示,可以看出弹性模量随冻融循环次数的增加而减小,随裂隙倾角的增大而增大。经历 75 次冻融后,裂隙倾角为 90°的试样弹性模量损失最小。

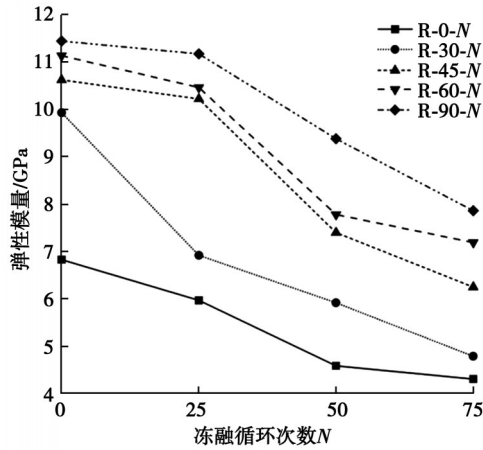
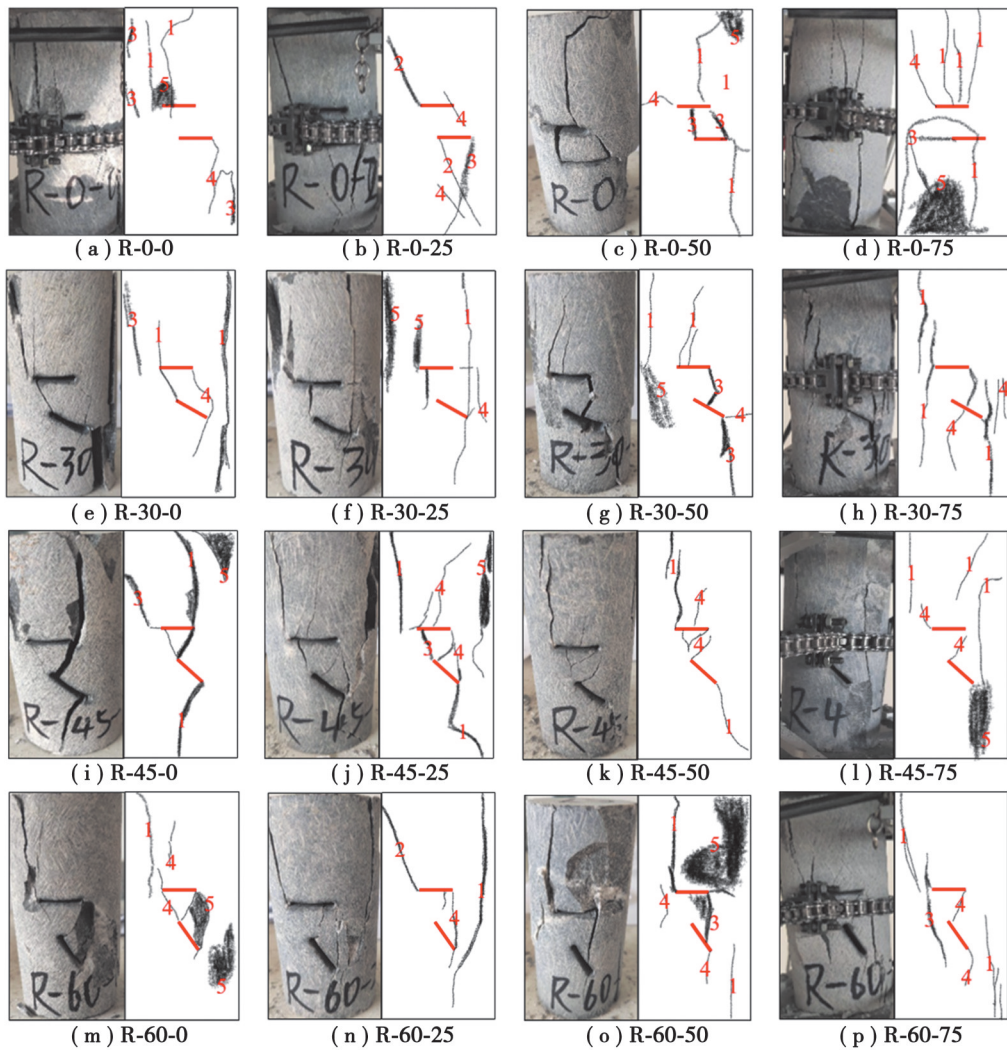


图5 裂隙灰岩弹性模量

Fig. 5 Elastic modulus of double-fissure limestone

## 2.2 宏观破坏特征

裂隙灰岩试样同样属于硬岩,试验破坏前塑性变形很小,破坏瞬间产生,裂隙扩展迅速,主要以裂纹模式为主,片落模式为辅。图6为裂隙灰岩的宏观破坏特征图,试样皆是瞬态的脆性破坏,且破坏面主要与预制裂隙相关,冻融循环作用影响不大。裂纹首先萌生于预制裂隙端部,启裂缝与预制裂隙①基本垂直,多为张拉裂纹伴随少量宽裂缝和细裂纹的产生。





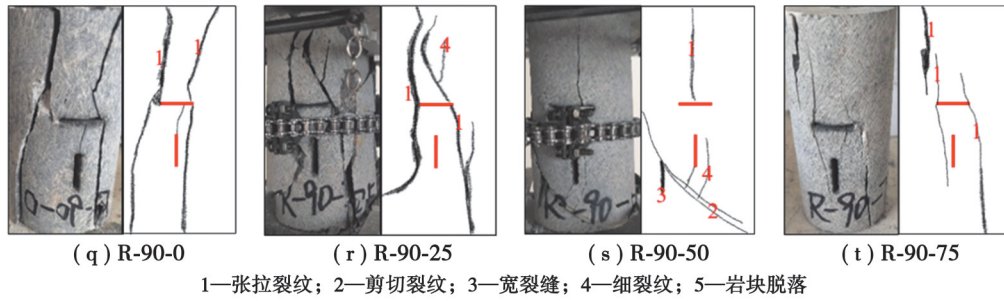


图6 裂隙灰岩宏观破坏特征图

Fig. 6 Macroscopic failure characteristics of fissure limestone

在裂隙倾角为 $<90^\circ$ 时,预制裂隙②上部裂隙尖端主要产生竖向的扩展裂纹至预制裂隙①,试样破坏时往往产生一条或多条经过预制裂隙①的张拉裂纹,2条预制裂隙间通常出现次生裂纹扩展,与预制裂隙搭接和贯通,形成贯穿裂纹,导致岩体力学指标快速下降;预制裂隙端部区域与岩桥区域还出现部分单斜面或“X”型斜面剪切裂纹扩展,甚至局部岩块脱落或崩解,承载力迅速降低,甚至整体崩解,完全丧失承载力。贯穿整个试样的贯穿裂纹通常经过2条预制裂隙,或由2条预制裂隙搭接。在裂隙倾角为 $90^\circ$ 时,贯穿裂纹仅经过预制裂隙①,不经过预制裂隙②,故R-90-N试样的强度最大,且不会出现岩块脱落现象。

总体来讲,经历不同冻融条件的裂隙灰岩单轴压缩宏观破坏模式可分为:

1) 裂纹模式。破坏面主要是脆性劈裂破坏,且和预制裂隙有关,启裂缝多为张拉裂纹伴随少量宽裂缝和细裂纹。裂隙倾角 $<90^\circ$ 时,贯穿裂纹经过预制裂隙①和预制裂隙②;裂隙倾角为 $90^\circ$ 时,贯穿裂纹仅经过预制裂隙①,不经过预制裂隙②。

2) 片落模式。裂隙倾角 $<90^\circ$ 时,随着冻融循环作用的进行,试样端部区域及岩桥区域最先出现岩体指标弱化,在外荷载作用下出现块体脱落甚至崩解。

### 2.3 冻融风化程度系数

冻融系数体现了岩石抵抗冻融损伤破坏的能力,冻融系数越大则岩石的抗冻性越强,越小则岩石越容易遭受冻融风化破坏,用 $K_f$ 表示。

$$K_f = \frac{\bar{\sigma}_n}{\bar{\sigma}_0}, \quad (1)$$

式中: $K_f$ 为冻融系数,介于0~1之间; $\bar{\sigma}_0$ 为冻融前的平均单轴抗压强度; $\bar{\sigma}_n$ 为冻融后的平均单轴抗压强度。

冻融风化程度系数( $K'_f$ )也是岩石抵抗冻融风化破坏的重要指标,不仅考虑了岩石的强度,还考虑了岩石的孔隙率和吸水率,相比冻融系数更为客观,通常用以评定冻融循环后岩样的风化程度。

$$K'_f = \frac{K_n + K_f + K_w}{3}, \quad (2)$$

式中: $K'_f$ 为冻融风化程度系数; $K_n$ 为孔隙率系数; $K_f$ 为冻融系数; $K_w$ 为吸水率系数。

由于研究对象为低孔隙率硬质灰岩,吸水率平均为0.3%,饱和吸水率平均为0.45%,可知试样吸水率极低,因此将 $K_w$ 近似取值为1。

考虑冻融作用对岩体的影响,则孔隙率系数为

$$K'_n = K_n = 1 - \frac{V_{PN}}{V_N} = 1 - P_c, \quad 0 < K'_n < 1 \quad (3)$$

式中: $K'_n$ 为考虑冻融作用后的孔隙率系数; $V_{PN}$ 为N次冻融后的孔隙/裂隙体积; $V_N$ 为N次冻融后的总体积, $V_N \approx 1$ ;  $P_c$ 为冻融后的有效孔隙率。

由表3可以看出,考虑冻融作用后的孔隙率系数 $K'_n$ 在多次冻融后仍然接近于1,说明冻融作用对孔隙率影响不大,而冻融系数的损失则相对更加明显。冻融风化程度系数与冻融系数的变化规律十分相似,说明对于均匀质、低孔隙率的脆性硬岩,决定其冻融风化程度系数的主要是抗压强度的变化;孔隙率系数和吸水率系数的权重在多孔材料或亲水软性材料中会得到提升。随冻融循环次数的增加,冻融风化程度系数明显减小,表明试样的抗冻融能力逐渐减弱。当试样在冻融条件下,冻融风化程度系数随裂隙倾角的增大而增大,裂隙

倾角的增大抑制了试样的冻融风化。

当岩样经历75次冻融后,冻融风化程度系数的均值为0.89,大于相应的冻融系数0.69,试样仍然具有较高的完整性,主要是因为低孔隙率和高硬度对冻融风化产生的抑制作用,减缓了岩体冻融劣化损伤的进程。

表3 冻融风化程度系数计算表

Table 3 Calculation table of degree coefficient of freeze-thaw weathering

试样编号	$K'_n$	$K_f$	$K'_f$	试样编号	$K'_n$	$K_f$	$K'_f$
R-0-0	0.997 7	1.000 0	0.999 2	R-0-50	0.996 4	0.807 3	0.934 6
R-30-0	0.998 5	1.000 0	0.999 5	R-30-50	0.996 0	0.803 1	0.933 0
R-45-0	0.999 0	1.000 0	0.999 7	R-45-50	0.996 4	0.816 9	0.937 8
R-60-0	0.996 9	1.000 0	0.999 0	R-60-50	0.997 2	0.940 3	0.979 2
R-90-0	0.997 5	1.000 0	0.999 2	R-90-50	0.996 3	0.892 4	0.962 9
R-0-25	0.997 4	0.931 9	0.976 4	R-0-75	0.995 8	0.483 3	0.826 4
R-30-25	0.997 5	0.937 3	0.978 2	R-30-75	0.996 7	0.618 9	0.871 9
R-45-25	0.998 2	0.889 4	0.962 5	R-45-75	0.995 2	0.674 6	0.889 9
R-60-25	0.996 6	0.979 7	0.992 1	R-60-75	0.994 2	0.818 1	0.937 4
R-90-25	0.996 4	0.972 6	0.989 6	R-90-75	0.996 0	0.841 9	0.946 0

## 2.4 耐久性

岩体耐久性采用 Mutlutürk 等<sup>[28]</sup>于2004年提出的衰变函数模型,假设因反复冻融或冷热变化引起的岩石完整性损伤率与每次循环开始时的岩石完整性成正比,即

$$-(dI/dN) = \lambda I, \quad (4)$$

式中:  $-(dI/dN)$  为正在减小的衰变速率;  $\lambda$  为衰变系数;  $I$  为岩石完整性。

对式(4)进行积分和变换,可得到关于多次冻融循环后岩石完整性的指数型方程

$$I_N = I_0 e^{-\lambda N}, \quad (5)$$

式中:  $I_0$  为初始完整性;  $I_N$  为经过  $N$  次冻融作用后完整性;  $N$  为冻融循环次数;  $e^{-\lambda N}$  为衰变因子。

定义完整性半衰期( $N_{1/2}$ )为岩石完整性衰减为其1/2时的冻融循环次数,是岩石冻融耐久性的一个测量指标,完整性半衰期( $N_{1/2}$ )与衰变系数 $\lambda$ 为负相关。不难发现,将 $I_N = I_0/2$ 代入式(5),则式(5)变换为

$$N_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}. \quad (6)$$

通过建立岩石力学指标与冻融循环次数  $N$  的关系曲线,可以得到岩样的衰减系数 $\lambda$ ,进而通过式(6)求出岩石冻融完整性半衰期  $N_{1/2}$ ,亦可通过式(5)求出岩石经过  $N$  次冻融作用后完整性。将试样在不同冻融循环次数下的抗压强度规律进行拟合即可得到衰变系数 $\lambda$ ,如图7和表4所示。

式(6)中采用的拟合公式为

$$\sigma = X e^{-\lambda N}, \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  为抗压强度;  $X$  为与岩体初始完整性有关的常数。于是得到岩体试样的衰变系数 $\lambda$ ,带入式(6)可以得到岩体完整性半衰期  $N_{1/2}$ 。

根据衰变系数和完整性半衰期计算表,可知  $X$  逐渐增大,与裂隙岩体强度和完整性有关;衰变系数 $\lambda$ 与  $X$  及完整性半衰期  $N_{1/2}$  成反比,随着裂隙倾角增大而减小,而完整性半衰期  $N_{1/2}$  则呈现增大的趋势,得出结论与抗压强度的规律一致。

完整性半衰期  $N_{1/2}$  是岩体冻融耐久性的一个重要指标,可以看出,2条预制裂隙水平时岩样的完整性半衰期  $N_{1/2}$  最小,意味着冻融89次就可使岩体完整性衰减为原来的1/2,因此平行裂隙会大大减弱岩体的物理力学指标,在工程施工中应尽量避免此类岩石。当2条预制裂隙垂直,即裂隙倾角为  $90^\circ$  时,岩样的完整性半衰期  $N_{1/2}$  达到最大,即裂隙倾角为  $90^\circ$  时耐久性最好。



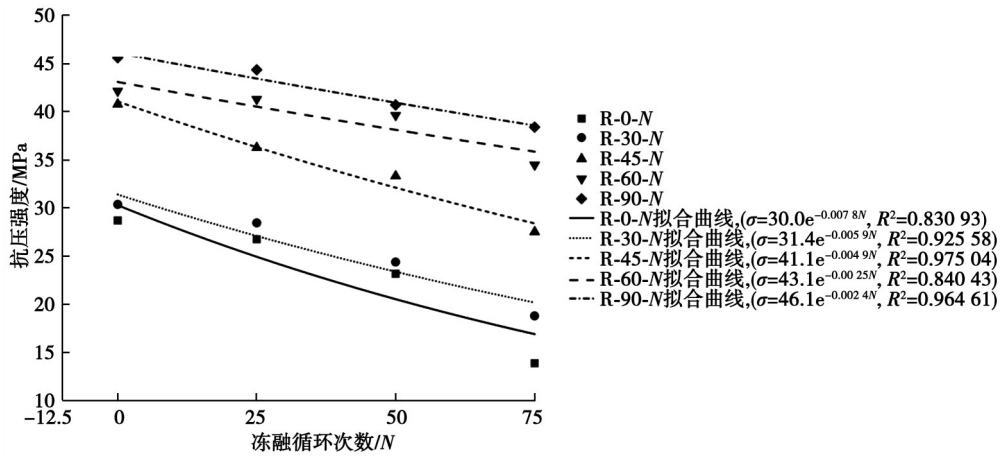


图 7 冻融作用下抗压强度变化规律

Fig. 7 Changes of compressive strength under freeze-thaw action

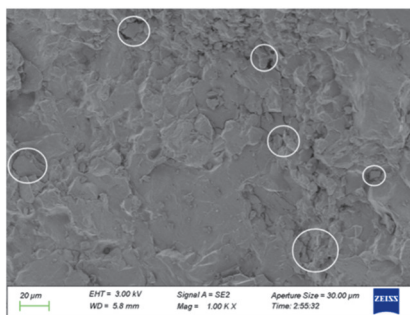
表 4 岩体衰变系数及半衰期计算表

Table 4 Calculation table of decay coefficient and half-life of rock mass

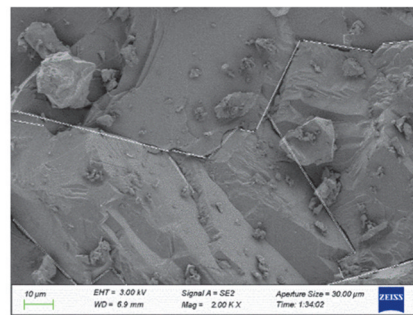
试样编号	拟合公式	衰变系数 $\lambda$	拟合优度 $R^2$	完整性半衰期 $N_{1/2}$ /次
R-0-N	$\sigma = 30.3e^{-0.0078N}$	0.0078	0.83093	88.85
R-30-N	$\sigma = 31.4e^{-0.0059N}$	0.0059	0.92558	117.46
R-45-N	$\sigma = 41.1e^{-0.0048N}$	0.0049	0.97504	141.43
R-60-N	$\sigma = 43.1e^{-0.0025N}$	0.0025	0.84043	277.20
R-90-N	$\sigma = 46.1e^{-0.0024N}$	0.0024	0.96461	288.75

### 3 微观试验

通过对裂隙灰岩破坏面标尺为  $20\ \mu\text{m}$  的 SEM 图像进行分析,如图 8 所示。对比试样 R-0-0 与 R-90-0、R-0-75 与 R-90-75,结果显示不同裂隙倾角的破坏面表现特征没有明显变化规律,说明预制裂隙对破坏面的微观特征没有明显影响;但是对比试样 R-0-0 与 R-0-75、R-90-0 与 R-90-75,发现随着冻融次数的增加,未经冻融循环的试样矿物颗粒之间紧密连结,而经冻融循环作用后矿物颗粒之间出现较大孔隙,分析是矿物颗粒不断发生热胀冷缩现象导致矿物晶体化学键断裂,从而发生崩解,进一步导致破坏面表面的悬浮颗粒块体数量增加,可认为这种状态为破坏表面熵值(混乱程度)增大。冻融循环加剧了内部结构的破坏,使微观结构中孔隙尺寸不断增大:一方面,随着冻融时间的增加,岩体受到应力腐蚀开裂效应的增加,内部不稳定颗粒块体软化脱落;另一方面,冻胀产生的累计残余变形导致微裂纹萌生和扩展,造成裂纹内矿物颗粒块体脱落,这些矿物颗粒块体在冻融过程中受到冰体的阻挡并不能有效运移至岩体外部,成为岩体内部的悬浮颗粒块体。



(a) R-0-0 (20  $\mu\text{m}$ )



(b) R-0-0 (10  $\mu\text{m}$ )

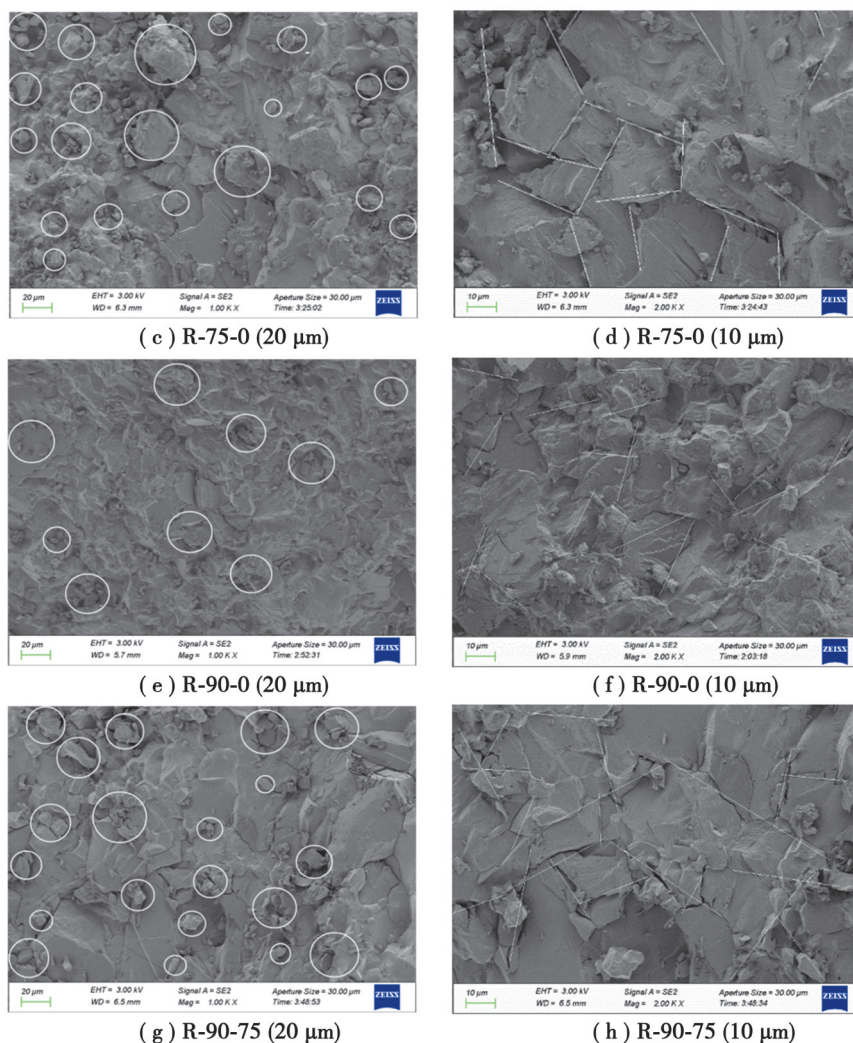


图8 裂隙灰岩试样SEM图像部分展示

Fig. 8 Partial SEM image of a fractured limestone sample

对选取放大倍数为2 000倍、标尺为10  $\mu\text{m}$ 的SEM微观破坏面结构图像,利用可以测量粒径和晶面间距的ImageJ软件统计微裂纹的尺寸信息。微裂纹尺寸信息统计结果如表5所示,微裂纹尺寸主要随着冻融循环次数发生变化,与裂隙倾角无明显相关性。微裂纹平均长度、累计长度和平均宽度都随着冻融循环次数增加而增大,裂纹长度多介于18~28  $\mu\text{m}$ 之间,宽度介于0.3~0.9  $\mu\text{m}$ 之间,累计长度的增加和裂纹长度及数量的增加都有关系,细观下破坏面结构也更为破碎。

表5 微观微裂隙尺寸信息统计表

Table 5 Statistical table of microfracture size information

$\alpha$	微裂纹平均长度/ $\mu\text{m}$				微裂纹累计长度/ $\mu\text{m}$				微裂纹平均宽度/ $\mu\text{m}$			
	0次	25次	50次	75次	0次	25次	50次	75次	0次	25次	50次	75次
0	18.37	19.62	21.11	24.04	347.05	405.29	418.27	492.17	0.47	0.53	0.53	1.07
30	20.42	21.79	24.46	26.32	421.31	413.94	512.62	552.79	0.34	0.54	0.69	0.87
45	23.57	21.93	21.36	26.83	394.60	457.15	430.58	576.20	0.46	0.34	0.56	0.64
60	20.80	24.98	25.31	27.67	427.14	424.23	494.00	537.83	0.34	0.35	0.34	0.79
90	20.76	22.03	26.03	26.68	364.61	373.95	456.06	506.93	0.33	0.37	0.47	0.58

## 4 结 论

为研究裂隙灰岩经历冻融损伤的变形破坏特征,通过对不同裂隙倾角的裂隙灰岩进行冻融循环和单轴压缩试验,得到相应的应力-应变曲线,并通过对裂隙灰岩的宏微观破坏特征进行分析,得出以下结论:

1)不同冻融条件下的裂隙灰岩,在相同裂隙倾角下,其峰值应力随冻融循环次数的增加而减小;在相同冻融循环条件下,其峰值应力随裂隙倾角的增大而增大,裂隙倾角的增大抑制了冻融循环带来的损伤。峰值应变随裂隙倾角、冻融循环次数呈正相关,试样均呈现明显的脆性破坏。弹性模量随冻融循环次数的增加而减小,随裂隙倾角的增大而增大。

2)不同冻融条件下裂隙灰岩的单轴压缩宏观破坏模式主要以裂纹模式为主,片落模式为辅。破坏面与预制裂隙有关,裂纹首先萌生于预制裂隙端部,启裂缝与预制裂隙①基本垂直,多为张拉裂纹伴随少量宽裂缝和细裂纹。裂隙倾角 $<90^\circ$ 时,贯穿裂纹经过预制裂隙①和预制裂隙②;裂隙倾角为 $90^\circ$ 时,贯穿裂纹仅经过预制裂隙①,不经过预制裂隙②。片落模式岩块脱落仅出现在裂隙倾角 $<90^\circ$ 时,试样端部及岩桥区域。

3)裂隙灰岩质地均匀、孔隙率低,属脆性硬岩,冻融作用对其孔隙率影响较小,决定其冻融风化程度系数的主要是抗压强度的变化。随冻融循环次数的增加,裂隙灰岩的冻融风化程度系数明显减小,抗冻融能力逐渐减弱。在冻融条件下,其冻融风化程度系数随裂隙倾角的增大而增大,裂隙倾角的增大抑制了冻融风化损伤。

4)通过求出完整性半衰期 $N_{1/2}$ 来预测裂隙灰岩的完整性破坏程度,发现裂隙灰岩的裂隙倾角越大,其耐久性越好。对于孔隙率低的脆性硬岩,主要是抗压强度的劣化效果决定着整体的冻融效果,冻融风化程度系数大于冻融系数,说明低孔隙率对冻融风化产生的抑制作用,减缓了岩体冻融劣化损伤的进程。

5)预制裂隙对冻融、荷载耦合作用下的裂隙灰岩破坏面微观特征无明显影响,但随冻融循环次数的增加,破坏面微观表面熵值(混乱程度)增大。破坏后的裂隙灰岩微裂纹平均长度、累计长度和平均宽度都随冻融循环次数增加而增大。

6)单轴压缩下裂隙灰岩的破坏模式,其宏观破坏面裂纹扩展与预制裂隙相关,与冻融循环作用无明显相关性;微观下其破坏面的裂纹发育受冻融循环影响较大,与预制裂隙无明显相关性。

## 参考文献

- [1] 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 Y Z, Guo Y L, Huang S B, et al. Study on fracture characteristics and strength loss of fractured sandstone under freeze-thaw action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 62-71. (in Chinese)
- [2] 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 C H, Xiao Y G, Wang Y, 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. (in Chinese)
- [3] 侯志强.高海拔寒区矿山边坡裂隙岩体冻融力学特性及其稳定性研究[D].北京:北京科技大学,2022.  
Hou Z Q. Research on freezing-thawing mechanical properties of fractured rock masses and stability of mine slope in high altitude cold region[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022. (in Chinese)
- [4] 高峰,周科平,熊信.我国高海拔寒区金属矿产资源开采现状及关键问题[J].矿业研究与开发,2022,42(10):1-5.  
Gao F, Zhou K P, Xiong X. Present situation and key problems of metal mineral resources exploitation in high altitude cold region of China[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10): 1-5. (in Chinese)
- [5] 刘享华,张科,刘文连.荷载与冻融共同作用对多裂隙砂岩能量转化与损伤特性的影响[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(3):715-730.  
Liu X H, Zhang K, Liu W L. Influence of coupling action of loading and freeze-thaw cycles on the energy conversion and damage characteristics of sandstone containing multiple flaws[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 715-730. (in Chinese)
- [6] Krautblatter M, Funk D, Günzel F K. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(8): 876-887.



- [7] 徐拴海, 李宁, 王晓东, 等. 露天煤矿冻岩边坡饱和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2561-2571.  
Xu S H, Li N, Wang X D, et al. Damage test and degradation model of saturated sandstone due to cyclic freezing and thawing of rock slopes of open-pit coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2561-2571. (in Chinese)
- [8] 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 C, Wang Y, Song Z Y, 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. (in Chinese)
- [9] 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 G M, Liu Q S. 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. (in Chinese)
- [10] Zhou K P, Li B, Li J L, et al. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1254-1261.
- [11] Liu H, Yang G S, Yun Y H, et al. Investigation of sandstone mesostructure damage caused by freeze-thaw cycles via CT image enhancement technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8875814.
- [12] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 冻融荷载耦合作用下节理岩体损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1602-1611.  
Yuan X Q, Liu H Y, Liu J P. A damaging model of jointed rock under coupled action of freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1602-1611. (in Chinese)
- [13] 宋勇军, 孙银伟, 李晨婧, 等. 基于离散元法模拟的冻融砂岩微观破裂演化特征研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3602-3616.  
Song Y J, Sun Y W, Li C J, et al. Meso-fracture evolution characteristics of freeze-thawed sandstone based on discrete element method simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3602-3616. (in Chinese)
- [14] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻融条件下岩石损伤扩展特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 838-842.  
Yang G S, Zhang Q S, Pu Y B. A Study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 838-842. (in Chinese)
- [15] 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 K P, Li J L, Xu Y J, 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. (in Chinese)
- [16] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1756-1762.  
Zhang H M, Yang G S. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1756-1762. (in Chinese)
- [17] 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 P, Wang X S, Wang D C. Study on the freeze-thaw deformation characteristics of saturated fractured rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(2): 345-354. (in Chinese)
- [18] Xu H, Qin Y P, Wang G, et al. Discrete element study on mesomechanical behavior of crack propagation in coal samples with two prefabricated fissures under biaxial compression[J]. Powder Technology, 2020, 375: 42-59.
- [19] Carlson G, Shirzaei M, Ojha C, et al. Subsidence-derived volumetric strain models for mapping extensional fissures and constraining rock mechanical properties in the San Joaquin valley, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(9): e2020JB019980.
- [20] 秦世康, 陈庆发, 尹庭昌. 岩石与岩体冻融损伤内涵区别及研究进展[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(3): 385-397.  
Qin S K, Chen Q F, Yin T C. Connotation differences and research progress of the freeze-thaw damages of rock and rock mass[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(3): 385-397. (in Chinese)
- [21] 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 Q S, Huang S B, Kang Y S, 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. (in Chinese)
- [22] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 562-570.

- Shen Y J, Yang G S, Rong T L, et al. Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 562-570. (in Chinese)
- [23] 裴向军, 蒙明辉, 袁进科, 等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1999-2006.  
Pei X J, Meng M H, Yuan J K, et al. Freezing-thawing characteristics of fractured rockmass under dry and saturated conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1999-2006. (in Chinese)
- [24] 路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1579-1584.  
Lu Y N, Li X P, Wu X H. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1579-1584. (in Chinese)
- [25] 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 P, Mao S Z, Sun Z Y, 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. (in Chinese)
- [26] 赵建军, 解明礼, 余建乐, 等. 冻融作用下含裂隙岩石力学特性及损伤演化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1199-1207.  
Zhao J J, Xie M L, Yu J L, et al. Experimental study on mechanical properties and damage evolution of fractured rock under freezing-thawing action[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1199-1207. (in Chinese)
- [27] 倪智伟, 吴小刚, 陈浩, 等. 分级循环加卸载试验下砂岩的力学特性研究[J]. 金属矿山, 2021(10): 21-27.  
Ni Z W, Wu X G, Chen H, et al. Study on mechanical properties of sandstone under grading cyclic loading and unloading test[J]. Metal Mine, 2021(10): 21-27. (in Chinese)
- [28] Mutlutürk M, Altındag R, Türk G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 237-244.

(编辑 郑洁)