冻融循环-荷载作用下不同损伤程度黑云变粒岩破裂特性研究①

陈彦亭[1]，荣辉[1]，叶会师[2]，任旭[3,4]，王帅[3,4]，刘洋[5]，邓文学[5]
（1.河北钢铁集团矿业有限公司，河北 唐山 063210；2.河北钢铁集团司家营研山铁矿有限公司，河北 唐山 063210；3.华北理工大学 矿业工程学院，河北 唐山 063210；4.河北省矿山绿色智能开采技术创新中心，河北 唐山 063210；5.东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110167）

摘　要：以司家营研山铁矿露天开采边坡为例，选取采场东帮、北帮边坡深部的黑云变粒岩进行冲击实验、冻融循环实验和力学加载实验等，研究冻融循环-荷载作用下不同损伤程度黑云变粒岩的破裂特性。结果表明，在冻融作用下，黑云变粒岩质量损失率和孔隙度均随着损伤程度增大而呈现近似线性增大的变化规律；不同损伤程度的黑云变粒岩，冻融后的单轴抗压强度和弹性模量均减小；在荷载和冻融循环作用下，无损伤黑云变粒岩的破坏模式主要为劈裂破坏，有初始损伤黑云变粒岩的破坏模式主要为剪切破坏以及张拉和剪切复合破坏。

关键词：研山铁矿；寒区工程；露天开采；岩石力学；黑云变粒岩；岩石损伤；冻融循环；破裂特性；质量损失；单轴抗压强度
中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.009
文章编号：0253-6099(2026)01-0058-06

Fracture Characteristics of Biotite Granulite with Different Damage Degrees Under Freeze-Thaw Cycles and Loading

CHEN Yanting[1], RONG Hui[1], YE Huishi[2], REN Xu[3,4], WANG Shuai[3,4], LIU Yang[5], DENG Wenxue[5]
(1.*Hebei Iron and Steel Group Mining Co., Ltd.*, *Tangshan* 063210, *Hebei*, *China*; 2.*Sijiaying Yanshan Iron Mine Co., Ltd.*, *Hebei Iron and Steel Group*, *Tangshan* 063210, *Hebei*, *China*; 3.*College of Mining Engineering*, *North China University of Science and Technology*, *Tangshan* 063210, *Hebei*, *China*; 4.*Hebei Provincial Technical Innovation Center for Green and Intelligent Mining*, *Tangshan* 063210, *Hebei*, *China*; 5.*School of Resources and Civil Engineering*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110167, *Liaoning*, *China*)

Abstract: With the open-pit mine slope of Sijiaying Yanshan Iron Mine as an example, biotite granulite specimens from the deep parts of the eastern and northern slopes of the stope were selected for impact tests, freeze-thaw cycle tests and mechanical loading tests, and the fracture characteristics of biotite granulite with different damage degrees under the combined action of freeze-thaw cycles and loading were studied. The results show that under freeze-thaw action, both the mass loss rate and porosity of biotite granulite present approximately linear increase as degree of damage increases. For biotite granulite with different initial damage degrees, the uniaxial compressive strength and elastic modulus all decrease after freeze-thaw cycles. It is shown that intact biotite granulite under loading and freeze-thaw cycles is dominated by splitting failure, while biotite granulite with initial damage is dominated by shear failure and combined tensile shear failure.

Key words: Yanshan Iron Mine; cold region engineering; open-pit mining; rock mechanics; biotite granulite; rock damage; freeze-thaw cycle; fracture characteristics; mass loss; uniaxial compressive strength

季冻区露天矿中，冻融作用是诱发地质灾害的关键因素，随着季节更替，岩体经历冰冻与解冻循环，其内部结构遭侵蚀，强度降低，导致边坡滑坡、山体坍塌等灾害频发，严重威胁矿区安全生产[1-6]。研究荷载和

① **收稿日期**：2025-08-21
基金项目：河钢集团重点科技项目(HG2023212)；河北省高校基本科研业务费(JJC2024066)；中央高校基本科研业务专项资金资助(N2401005)
作者简介：陈彦亭(1981—)，河北滦州人，硕士，正高级工程师，主要从事地质与采矿技术相关工作。E-mail:88433881@qq.com
通信作者：荣辉(1988—)，河北滦州人，高级工程师，主要从事采矿技术相关工作。E-mail:1015143666@qq.com

冻融循环作用下不同损伤岩石的破坏特性,对提高岩体稳定性、降低地质灾害损失具有重要的工程实际意义。

目前,国内外学者对岩体在冻融条件下的力学特性研究较多,重点关注冻融循环、岩石饱和程度以及孔隙度等因素[7-10]。然而在探讨冻融循环对岩石破坏的影响时,容易忽略岩石内孔隙与微裂隙等缺陷所起的作用。文献[11-14]分析了孔隙和微裂缝等对冻融循环作用下岩石破坏的影响,但外力作用会使岩石出现不同程度的损伤,有必要考虑岩石在不同损伤状态及冻融作用下的破坏机制。因此,为了贴近工程实际,将冻融循环与荷载作用结合,考虑岩石损伤状态,研究岩石在荷载、冻融和不同损伤下的破坏特性。

本文以司家营研山铁矿的露天开采边坡为例,选取采场东帮、北帮边坡深部的黑云变粒岩进行冲击实验、冻融循环实验和单轴加载实验,探讨其不同损伤程度下,在冻融循环与荷载联合作用下的力学性能及形变特征,为露天采场边坡的稳定性评估及加固优化策略的制定提供科学依据。

1　实验方法

1.1　试样的选取和制备

本研究所用的岩石试样取自司家营研山铁矿露天采场。经鉴定,所取的岩石主要是黑云变粒岩,遵循《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),从黑云变粒岩中钻取岩心,并将其切割加工成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体。参考国际岩石力学学会(ISRM)的规范,利用切割机和打磨机对试样两端进行精细的平面化处理,保证两端面平行度小于 0.05 mm。加工后的黑云变粒岩试样如图 1 所示。



图 1　黑云变粒岩试样

Fig. 1　Core drilling samples and biotite granulite

对试样进行波速测试,筛选出均匀性较好的试样放入干燥箱内,温度设置为 105 ℃,加热 24 h,待试样冷却至室温后取出,并用保鲜膜紧密包裹,待质量恒定后称重,测量得到干密度和纵波波速。对试样进行饱水质量测试实验,利用真空饱和装置对试样进行水分饱和处理,先对试样进行真空抽取并保持浸泡 3 h,随后调整至正常压力环境,继续浸泡 21 h,每隔 12 h 称重一次,直至试样质量无变化,记录试样的饱水质量,计算得到试样的自然密度、饱水含水率。试样物理参数平均值见表 1。

表 1　试样物理参数平均值

Table 1　Average physical parameters of granulite

纵波波速/(m·s^{-1})	自然密度/(g·m^{-3})	饱水含水率/%
2 860	2.72	0.09

1.2　实验方案

进行了预实验、冲击实验、饱水实验、冻融循环实验和力学加载实验。

1) 预实验。利用 TAW-3000 型电液伺服岩石力学实验系统对试样实施单轴压缩,加载模式选用荷载调控方式,以 0.016 MPa/s 加载速率加载应力至2 kN 后,再以 0.5 MPa/s 加载速率加载试样至破坏,获得试样的峰值强度、弹性模量等力学参数。

2) 冲击实验。基于预实验的单轴压缩数据,采用霍普金森压杆测试装置对选定的黑云变粒岩试样进行冲击实验。为了生成具有不同损伤程度的试样,测试中设定冲击速率分别为 0、50、60、70 m/s,使试样产生不同的初始损伤。

3) 饱水实验。实验步骤同前文饱水质量测试实验。

4) 冻融循环实验。利用 XY-QDR-50 型全自动低温冻融实验装置,对不同损伤试样进行冻融循环实验。首先,从水中取出饱水试样,去除其表面水分,并用保鲜膜紧密包裹,杜绝水分蒸发对冻融效果的影响。其次,将试样置于-20 ℃的冷冻环境中,持续冻结 12 h。冻结结束后,移除保鲜膜,把试样放入恒温箱内的水桶中,加入足量水确保试样完全浸没,随后将恒温箱温度设定为 20 ℃,保温 12 h,防止试样内部水分流失而干扰冻融效果。最后,在所有冻融循环完成后,测定试样 20 次冻融循环后的质量。

5) 力学加载实验。试样经过冻融循环后,对其进行单轴压缩实验,所使用的设备和加载方式与预实验保持一致,直至试样完全破坏后停止加载,实验结束后计算其峰值强度、弹性模量等力学参数。

2　实验结果分析

2.1　黑云变粒岩质量变化

试样经历冻融循环后的质量变化能够衡量其受损

程度。完成 20 次冻融循环实验后,对试样进行烘干,称取其干燥状态下的质量。为了保证实验的准确性,选取 3 个试样的平均值得到试样的质量变化。为减小因试样初始质量差异对实验结果带来的影响,采用质量损失率 R_m 来描述黑云变粒岩质量的变化,其计算公式[3]为:

$$R_m = \frac{m_0^{\mathrm{d}} - m_N^{\mathrm{d}}}{m_0^{\mathrm{d}}} \tag{1}$$

式中:m_0^{d} 为试样初始状态,即冻融循环前干燥状态下的质量,g;m_N^{d} 为试样 N 次冻融循环后干燥状态下的质量,g。

不同损伤程度的试样在饱水条件下,经过 20 次冻融循环后质量变化如表 2 所示。从表 2 可知,不同损伤程度的试样在经历 20 次冻融循环后质量均减小,主要是水在岩石孔隙中冻结时,体积膨胀产生冻胀力,反复作用使岩石内部微裂纹扩大和增多,破坏岩石的整体性和完整性。孔隙结构的改变、微裂纹的发展导致岩石颗粒剥落,使得岩石质量损失。

表 2 不同损伤程度试样冻融循环前后的质量变化

Table 2 Mass changes in specimen with different damage degrees before and after freeze-thaw cycles

冲击速度/(m·s^{-1})	干燥质量/g		质量变化/g
	冻融循环前	冻融循环后	
0	538.41	537.83	−0.58
50	540.39	538.98	−1.41
60	541.69	539.62	−2.07
70	542.37	539.25	−3.12

岩石初始损伤影响冻融循环后质量的损失,在经历冻融循环后,随着损伤程度增加,试样质量的下降幅度呈现增大的变化规律,有初始损伤的岩石在损伤区域的水分聚集更集中,产生的冻胀力更大,导致岩石颗粒剥落加剧,损伤劣化效应增加,质量损失率高于无初始损伤的岩石。

图 2 为不同损伤程度试样的质量损失率。试样质量损失率随着试样损伤程度增大而增加,采用多项式拟合两者之间的关系,得到拟合曲线的相关系数为 0.99,拟合程度较高,其拟合函数为:

$$y_1 = 0.098 + 0.153x_1, R^2 = 0.99 \tag{2}$$

在相同冻融循环次数条件下,试样损伤程度越高,其对应的质量损失率越大,主要是由于试样的损伤程度加剧,其内部可容纳的水分增多,水转化为冰的过程中产生更大的冻胀力,这一效应相应地加剧了试样的损伤。

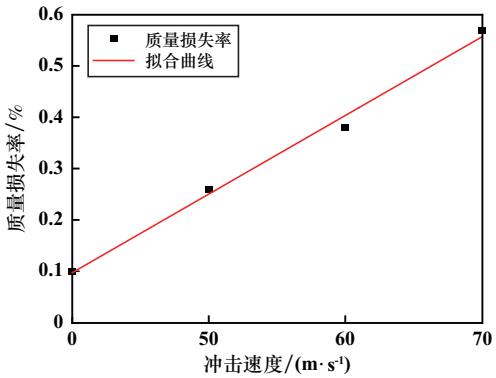


图 2 不同损伤程度试样的质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate of specimen with different degrees of damage

2.2 黑云变粒岩孔隙度的变化

孔隙度变化是反映岩石冻融劣化的重要参数之一,其变化规律可间接反映试样的冻融损伤程度。利用质量法测量经过 20 次冻融循环后试样的孔隙度,其计算公式[3]为:

$$P = \frac{m_N^{\mathrm{S}} - m_N^{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{w}} AH} \tag{3}$$

式中:P 为孔隙度;m_N^{S} 为 N 次冻融循环后试样饱水质量,g;ρ_{w} 为水的密度,g/cm^3;A 为试样截面积,cm^2;H 为试样高度,cm。

不同损伤程度的试样经过 20 次冻融循环后在不同状态下的质量变化如表 3 所示。

表 3 不同损伤程度试样冻融循环后在不同状态下的质量变化

Table 3 Mass changes in specimen with different damage degrees after freeze-thaw cycles

冲击速度/(m·s^{-1})	冻融循环后质量/g		质量变化/g
	干燥状态	饱水状态	
0	537.83	538.52	0.69
50	538.98	541.30	2.32
60	539.62	543.41	3.79
70	539.25	544.88	5.63

采用线性函数拟合孔隙度与损伤程度之间的关系,如图 3 所示。冻融后试样孔隙度随着试样损伤程度增加呈线性规律增加,其线性拟合的相关系数为 0.99,拟合函数为:

$$y_2 = 0.34 + 0.83x_2, R^2 = 0.99 \tag{4}$$

冻融循环作用后,试样的损伤程度影响孔隙度,试样的损伤程度对岩石的劣化损伤作用显著,其主要原因在于冻融循环过程中,岩石内部的孔隙水冻结膨胀,导致孔隙逐渐发育,孔隙数量增加。

2.3 冻融循环后黑云变粒岩的强度特性

通过单轴压缩实验,获得了试样冻融前后、不同损

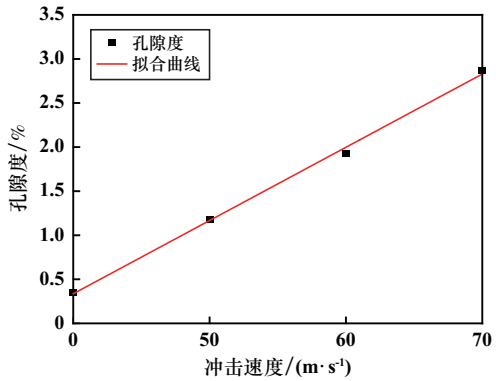
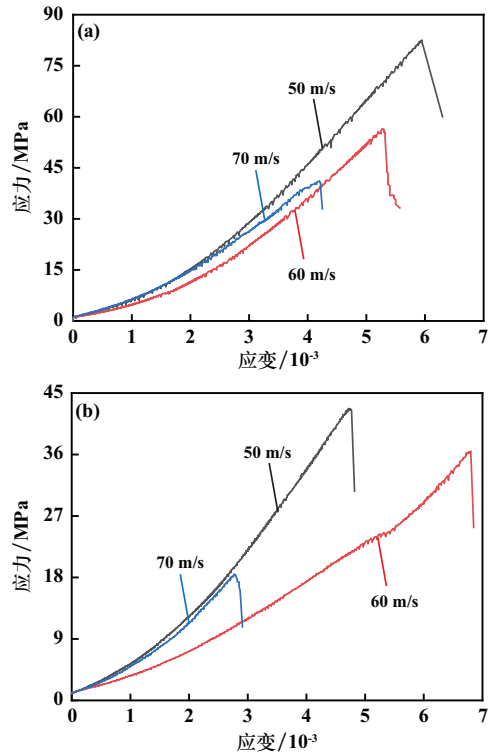


图 3　不同损伤程度试样的孔隙度变化

Fig. 3　Porosity change of specimen with different degrees of damage

伤程度下的应力-应变关系曲线，如图 4 所示。从图 4 可知，试样冻融循环前后的抗压强度均随着损伤程度增加而减小，冻融循环后试样的抗压强度明显减小，表明冻融后试样内部的细观损伤增加。



（a）冻融循环前；（b）冻融循环后

图 4　不同损伤程度试样的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of specimen with different degrees of damage

为了分析不同损伤程度试样在冻融前后抗压强度的劣化程度，采用冻融前后试样抗压强度降低率进行评估，抗压强度降低率越大，冻融后的劣化强度越大，抗压强度降低率 C 的计算公式为：

$$C = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_1} \times 100\% \qquad (5)$$

式中：σ_0 为冻融循环后试样的单轴抗压强度，MPa；σ_1 为冻融循环前试样的单轴抗压强度，MPa。

根据岩石单轴压缩实验和公式（5）得到不同损伤程度试样冻融循环前后的抗压强度及其降低率，如表 4所示。由表 4 可知，试样冻融循环后抗压强度降低率为 33%～56%，均值 43%，表明试样在冻融循环作用后强度劣化程度将近减半，抗冻性能下降。在冻融循环过程中，岩石损伤主要归因于水分冻结成冰时释放的膨胀应力。膨胀应力会促使岩石内部微小孔隙和裂缝的形成与扩展。随着冰的融化，水分会渗透微小孔隙和裂缝，并在后续的冻结过程中进一步促进裂缝的扩大。

表 4　不同损伤程度试样冻融前后抗压强度及其降低率

Table 4　Compressive strength and its reduction rate of samples with different damage degrees before and after freeze-thaw cycles

冲击速度/（m·s⁻¹）	抗压强度/MPa		抗压强度降低率/%
	冻融循环前	冻融循环后	
0	102	68	33
50	82	42	49
60	56	38	32
70	41	18	56

2.4　冻融循环后黑云变粒岩的变形特性

2.4.1　弹性模量的变化

依据图 4，选取实验峰值应力 40%～60%区间对应的割线模量值作为岩石弹性模量，并据此进行冻融作用前后的对比分析。峰值应力 40%～60%区间，岩石既已克服初始缺陷的影响，又能较好地保持相对稳定的内部结构，此阶段的割线模量值能够更准确地反映岩石在实际受力过程中的弹性特征，通过计算应力-应变曲线中割线的斜率，得到不同损伤程度试样冻融循环前后的弹性模量及其变化，如表 5 所示。根据表 5 可知，冻融循环次数保持不变时，随着试样损伤程度加剧，冻融前的弹性模量呈逐渐降低趋势；冻融后，弹性模量先下降后上升。此外，随着试样损伤程度增加，冻融前后试样的弹性模量变化呈现减小趋势。冻融循环

表 5　不同损伤程度试样冻融循环前后的弹性模量及其变化

Table 5　Elastic modulus and its changes of specimen with different degrees of damage before and after freeze-thaw cycles

冲击速度/（m·s⁻¹）	弹性模量/GPa		弹性模量变化/GPa
	冻融循环前	冻融循环后	
0	14.7	9.8	−4.9
50	10.9	7.1	−3.8
60	8.1	4.4	−3.7
70	7.9	5.3	−2.6

作用后,试样弹性模量减小,试样内部结构发生破坏,损伤程度增加,表明冻融作用增加了岩体内的裂隙数量,加剧了试样的劣化。

2.4.2 破坏模式分析

图5为不同初始损伤程度试样在冻融循环-单轴压缩作用下的破坏形貌。对比分析表明,初始损伤程度对试样的破坏模式具有显著影响。当初始损伤为0时,试样主要表现为轴向劈裂破坏特征,裂纹沿轴向延伸并形成贯通性裂隙;存在初始损伤的试样则呈现典型的单斜面剪切破坏模式,形成贯穿试样的单一剪切滑移面。这种现象表明初始损伤的存在会改变岩石内部的应力分布特征,导致破坏机制从脆性张拉破坏向剪切滑移破坏转变。



(a) 0; (b) 50 mm/s; (c) 60 mm/s; (d) 70 mm/s

图5 不同损伤程度试样的破坏形貌

Fig. 5 Damage morphology of specimen with different degrees of damage

2.5 黑云变粒岩破坏的内在机制

在冻融循环和单轴压缩作用下,不同损伤程度的试样强度变化及宏观破坏的差异性主要体现在试样内矿物颗粒胶结承载变化和裂隙结构变化等方面,其具体影响过程主要表现为:

1) 试样的损伤程度各异,内部裂隙的分布也各不相同,损伤程度严重的试样,裂隙分布密集,在进行饱水处理后,水将充填试样的裂隙,裂隙内的水一方面会降低裂隙与矿物颗粒之间的摩擦力,另一方面会促使试样中的可溶性矿物溶解,导致矿物颗粒间的胶结力减弱,进而使得岩石的抗变形性能下降,对于损伤程度较高的岩石,其抗变形性能的降低尤为显著。

2) 试样由饱水阶段演变为冻结阶段时,裂隙内的水将逐渐转化为冰晶状态,体积膨胀,在冻胀力作用下裂隙周围的矿物颗粒受挤压变形,岩石裂隙受张拉扩张,试样在冷冻过程中受到损伤,且试样的损伤程度越大,其受到的损伤越严重。冻结温度由常温下降至预设温度过程中,矿物颗粒发生收缩,使得矿物颗粒之间的黏结性能弱化。

3) 试样由冻结阶段演变为解冻阶段时,温度上升,试样内部的冻结水逐渐变为自由水,并流至新裂隙和原始裂隙中,当试样经历多次冻融循环后,其裂隙进一步扩大,抗变形能力进一步减弱,强度逐渐降低,力学特性由脆性向延性转化,破坏模式也逐渐从劈裂型破坏转变为剪切型破坏以及剪切与张拉复合破坏。

基于上述基础研究,冻融循环与荷载作用下岩石的损伤演化与裂隙水-冰相变、矿物胶结力丧失及冻胀力作用密切相关。这些机制为寒区岩体工程的稳定性评价与风险防控提供了依据。在实际工程中,依据岩体初始损伤程度和含水状态,预判其强度衰减规律及破坏模式转变趋势。需要对冻融影响区岩体参数进行差异化折减,并在防护中重点采取防水排水、局部加固等措施,以抑制裂隙发展与冻胀损伤。

3 总结

1) 冻融循环作用后,黑云变粒岩质量减小,随着黑云变粒岩损伤程度增大,质量损失率呈近似线性增加的特征。

2) 冻融循环作用后,孔隙度随着黑云变粒岩损伤程度增大呈近似线性增大的特征。

3) 黑云变粒岩在经历冻融循环后,抗压强度和弹性模量下降。随着损伤程度增大,弹性模量变化量呈减小趋势。

4) 受冻融循环和单轴压缩的影响,无初始损伤的黑云变粒岩破坏模式主要表现为轴向劈裂。有初始损伤的试样破坏模式主要是单斜面剪切破坏以及剪切与张拉复合破坏。

参考文献(References):

[1] 田森,赵映,司鹄,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.

[2] 刘艳章,王瑾,尹东,等. 冻融作用下单裂隙类砂岩冻胀力与强度变化规律研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):115-119.
LIU Yanzhang, WANG Jin, YIN Dong,et al. Experimental study on frost heaving pressure and strength variation of single crack quasi-sandstone under freeze-thaw process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):115-119.

[3] 宋勇军,操警辉. 冻融-荷载共同作用下砂岩损伤力学特性[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.

[4] WANG S, XU Y, ZHANG Y B, et al. Effects of sandstone mineral composition heterogeneity on crack initiation and propagation through a microscopic analysis technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023,162:105307.

[5] 杨志全,甘进,樊详珑,等. 岩石冻融损伤机理研究进展及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2023,43(1):176-188.
YANG Zhiquan, GAN Jin, FAN Xianglong, et al. Research progress and prospect on freeze-thaw damage mechanism of rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023,43(1):176-188.

[6] 王京瑶. 冻融作用下砂岩损伤演化特征及断裂机理研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
WANG Jingyao. Study on the damage evolution characteristics and fracture mechanism of sandstone under freeze-thaw action[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[7] 贾朝军,庞锐锋,俞隽,等. 基于离散元的岩石冻融损伤劣化机制研究[J]. 岩土力学, 2024,45(2):588-600.
JIA Chaojun, PANG Ruifeng, YU Jun, et al. Investigation on freeze-thaw damage mechanism of porous rock with discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(2):588-600.

[8] 宋勇军,孟凡栋,毕冉,等. 冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2023,50(6):69-79.
SONG Yongjun, MENG Fandong, BI Ran, et al. Research on creep characteristics and pore structure evolution characteristics of freezing-thawing rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6):69-79.

[9] TAN X J, CHEN W Z, YANG J P, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011,68(3):130-138.

[10] 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.

[11] HUANG S B, CAI Y T, LIU Y Z, et al. Experimental and theoretical study on frost deformation and damage of red sandstones with different water contents[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021,54(8):4163-4181.

[12] 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 Shuanhai, LI Ning, WANG Xiaodong, 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.

[13] 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.
WU Xiaogang, NI Zhiwei, ZHU Junxing, et al. The mechanical properties and crack propagation characteristics of fractured limestone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2025,48(8):1-13.

[14] 高峰,熊信,周科平,等. 冻融循环作用下饱水砂岩的强度劣化模型[J]. 岩土力学, 2019,40(3):926-932.
GAO Feng, XIONG Xin, ZHOU Keping, et al. Strength deterioration model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(3):926-932.

引用本文:陈彦亭,荣辉,叶会师,等. 冻融循环-荷载作用下不同损伤程度黑云变粒岩破裂特性研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):58-63.
CHEN Yanting, RONG Hui, YE Huishi, et al. Fracture characteristics of biotite granulite with different damage degrees under freeze thaw cycles and loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):58-63.

版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部
2026 年 2 月