尾矿库边坡泥岩的动态力学响应及微观结构演化研究①

刘萍[1]，张军锋[2]
（1.河南建筑职业技术学院 智能制造学院，河南 郑州 450000；2.郑州大学 土木工程学院，河南 郑州 450000）

摘　要：为揭示尾矿库边坡泥岩在复杂环境作用下的损伤劣化机制，开展了动态单轴压缩试验、CT 扫描及扫描电镜等试验，分析了干湿循环、冻融循环及干湿-冻融循环 3 种典型环境条件下泥岩的动态抗压强度演化与结构损伤机制。结果表明，强风化泥岩的动态抗压强度与动弹性模量随循环次数增加呈持续衰减特征，且劣化速率在 80 次循环后逐渐趋于稳定；在 3 种环境损伤效应中，干湿-冻融循环对泥岩的劣化影响最显著，经过 100 次干湿-冻融循环后，泥岩的动态抗压强度和动弹性模量均下降，孔隙网络连通度显著增加，孔隙率与动态抗压强度呈强负线性相关关系。复杂环境通过加速孔隙膨胀与裂隙扩张，降低了岩体的有效承载面积与应力传递效率，最终引发泥岩的结构损伤与强度劣化。根据研究结果，对尾矿库边坡加固工程提出了相关建议。

关键词：岩石力学；泥岩；尾矿库；边坡；干湿循环；冻融循环；动态力学；微观结构
中图分类号：TD854　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.007
文章编号：0253-6099(2026)04-0054-06

Dynamic Mechanical Response and Microstructure Evolution of Mudstone in Tailings Reservoir Slope

LIU Ping[1], ZHANG Junfeng[2]
(1.*School of Intelligent Construction*, *Henan Technical College of Construction*, *Zhengzhou*, 450000, *Henan*, *China*; 2.*School of Civil Engineering*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450000, *Henan*, *China*)

Abstract: To reveal the damage and degradation mechanisms of mudstone in tailings reservoir slopes under complex environmental conditions, dynamic uniaxial compression tests, CT scanning, and scanning electron microscopy (SEM) were conducted to analyze the evolution of dynamic uniaxial compressive strength and structural damage mechanisms of mudstone under three typical environmental conditions, i.e., wet-dry cycles, freeze-thaw cycles, as well as wet-dry and freeze-thaw cycles. The results show that the dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of strongly weathered mudstone continuously decay with the increase of cycle number, and the deterioration rate gradually stabilizes after 80 cycles. Among those three environmental damage conditions, the coupling effect of wet-dry and freeze-thaw cycles brings the most significant deterioration to mudstone. After 100 wet-dry and freeze-thaw cycles, the dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of mudstone decrease, and the connectivity of pore networks increases remarkably, presenting a strong linear relationship (negative correlation) between porosity and dynamic compressive strength. Complex environments can reduce the effective bearing area and stress transfer efficiency of rock mass by accelerating pore expansion and crack propagation, thus eventually lead to structural damage and strength deterioration of mudstone. Relevant suggestions for slope reinforcement engineering of tailings reservoirs are finally put forward based on the research results.

Key words: rock mechanics; mudstone; tailings reservoir; slope; wet-dry cycle; freeze-thaw cycle; dynamic mechanics; microstructure

尾矿库是矿山关键设施之一。尾矿库边坡通常由松散岩土体堆积而成，一旦发生失稳破坏，极有可能引发矿山土场滑坡、泥石流等地质灾害，进而造成难以估量的损失[1-2]。风化泥岩是尾矿库边坡中常见的一种

① **收稿日期**：2026-03-12
基金项目：国家自然科学基金(52218477)
作者简介：刘萍(1982—)，女，河南滑县人，硕士，讲师，主要从事岩土结构工程的教学与科研工作。E-mail：gaoiii5855@163.com

岩土体,具有强度低、颗粒碎散、风化程度高等不良工程特性,对环境中的干湿变化较敏感[3]。气候的周期性变化使得尾矿库边坡不可避免地受到反复干湿和冻融影响,边坡泥岩中液相水、固相冰与水蒸气间相互转变,同时岩土体与外界环境不断进行物质和能量的交换,颗粒连接以及排列方式发生改变[4-6]。尾矿库边坡常受到运输车辆振动、机械作业振动、冲击荷载、爆破振动、地震等动态荷载的影响[7-8]。而当前关于泥岩力学特性研究主要考虑静力荷载的影响,忽视了温度与水分耦合作用下动态力学特性的劣变[9]。因此,研究干湿-冻融循环耦合作用下泥岩的动态强度演化行为,对指导尾矿库边坡工程建设具有重要意义。

尾矿库边坡堆积体物理力学性能随水分与温度的变化发生波动[10-11]。在微观层面,岩石受冻融、干湿等循环作用影响,产生膨胀应力,导致裂纹萌生,削弱材料胶结性[12-13];宏观上表现为抗压强度衰减、弹性模量下降及渗透率上升等特征,最终引发边坡失稳[14]。值得注意的是,实际服役环境中的岩体往往受到多因素的耦合作用,这种叠加引发的结构损伤效应会进一步加速岩体力学性能的劣化,对边坡工程的长期稳定性提出了更为严峻的挑战。随着测试手段的进步,高精度测试技术被广泛应用于岩石微观结构研究,如核磁共振、电子显微镜扫描、数字散斑和 CT 扫描等[15-17]。新技术的使用让人们对岩土体缺陷的了解逐步由宏观向微观尺度发展,例如,CT 扫描可直观展现材料内部的三维破裂面形态,而图像分析软件可对裂隙分布进行量化表征,二者结合可用于揭示岩石损伤的细观动因[18]。然而,目前的研究尚未明确泥岩在冻融和干湿循环过程中的性能劣化规律及其结构损伤机制。本文通过对泥岩分别开展干湿、冻融和干湿-冻融 3 种循环条件下的侵蚀试验,系统揭示尾矿库边坡稳定性的演化规律。利用动态单轴压缩仪对试件进行强度劣化特征分析,采用 CT 扫描、扫描电镜图像和 X 射线衍射技术,量化分析岩石结构损伤过程。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

试样为华北地区某金属矿尾矿库边坡的强风化泥岩。该边坡工程地质特点为覆岩厚度薄、堆积体结构松散、岩石吸水易软化崩解、物理和力学性质不佳。泥岩呈灰褐色,节理发育,呈坚硬状。泥岩的基本矿物组成如表 1 所示。泥岩主要由石英、长石、黑云母和黏土矿物组成。

表 1　泥岩的基本矿物组成(质量分数)

Table1　Basic mineral composition of mudstone　%

石英	长石	黑云母	蒙脱石	高岭石	铁锰氧化物	其他矿物
55.7	15.8	5.4	7.9	7.5	2.1	5.6

1.2　试样制备

为了降低试样处理产生的不均匀裂隙对试验结果的影响,保证相同循环次数后试样的均一性,采用圆柱样品(直径 50 mm,长度 100 mm)。参考文献[3-6],选取 0~100 次长期循环测试范围,采用可程式恒温恒湿试验箱模拟当地气候环境,实施以下 3 类循环处理。在干湿循环(5—10 月)模拟中,将试样置于恒温恒湿箱,设定 25 ℃和 75%相对湿度环境进行脱湿;当试样含水率达 3.0%时终止脱湿;抽气饱和后重新增湿至 20.0%,计为 1 次完整干湿循环。在冻融循环(11 月—翌年 4 月)模拟中,以保鲜膜包裹试样,维持冻融过程含水率恒定;在-10 ℃环境中冻结 12 h;转入 20 ℃环境解冻 12 h,计为 1 次完整冻融循环。在干湿-冻融循环模拟中,按上述步骤进行一次干湿处理,然后进行冻融处理,计为 1 次干湿-冻融循环。

1.3　动力学试验

采用应变控制式动态加载系统对岩石试件实施动力学试验,被测材料为标准化试样(直径 50 mm,高度 100 mm)。将未处理和循环处理后的试样放在加载台上,采用正弦波加载模拟动态荷载条件下岩石受力情况,设置频率为 1 Hz,振荡次数为 5 000 次。

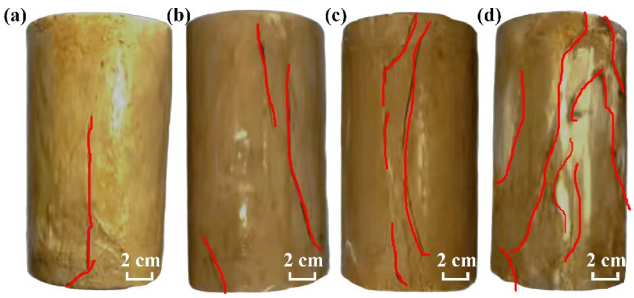
1.4　微观试验

采用高精度 CT 扫描获取泥岩内部结构的细观图像,定量分析孔隙分布。在图像预处理环节,运用 Image J 软件对原始 CT 图像实施灰度校正和噪点消除;采用阈值分割法对图像进行分割处理;最后借助 Avizo 软件进行三维重建,并精准计算孔隙率。利用扫描电子显微镜(SEM)对泥岩微观结构进行观察。

2　结果与分析

2.1　泥岩破坏模式

动态单轴荷载作用下泥岩的破坏特征如图 1 所示。由图 1 可知,动态单轴荷载下的泥岩呈现典型脆性张拉-剪切复合破坏模式,其中干湿-冻融循环下试样的裂隙贯通程度显著高于干湿或冻融条件下的试样,表现为更明显的脆性破坏特征[19]。动态破坏模式演化与循环类型具有较强的相关性。未经处理的试件呈现出典型的劈裂-剪切破坏模式[见图 1(a)];经过 100 次干湿循环处理后,泥岩破坏后的完整性开始下



(a) 初始；(b) 干湿循环；(c) 冻融循环；(d) 干湿-冻融循环

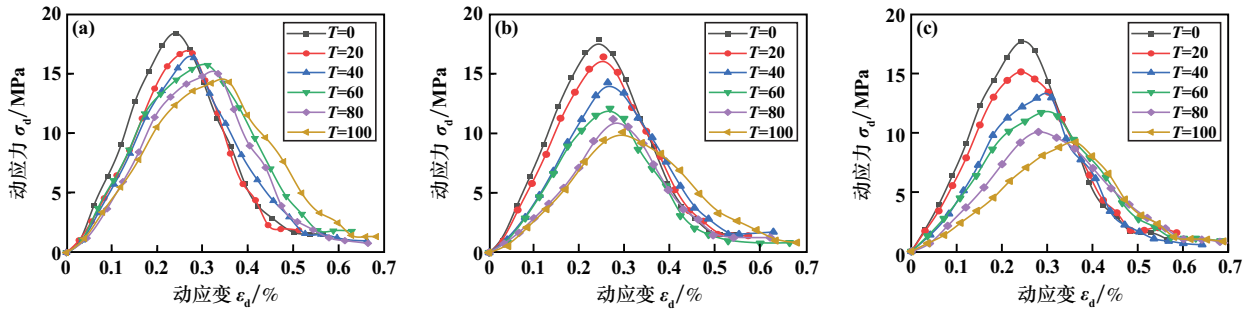
图 1 动态单轴荷载作用下泥岩的破坏特征

Fig. 1 Failure characteristics of mudstone under dynamic uniaxial loading

降，但未出现明显破碎[见图 1(b)]；经过 100 次冻融循环处理后，内部的破坏裂隙纵横分布于泥岩内部，使原本相对完整的结构变得较为破碎[见图 1(c)]；经过 100 次干湿-冻融循环后，岩石破坏模式发生显著转变，产生了多条相互交错的剪切与张拉裂纹，致使原本相对完整的结构变得较为破碎，呈现典型的劈裂-压碎复合破坏模式[图 1(d)]。力学试验结果表明，在干湿-冻融循环影响下，原本具有一定脆性的泥岩试样，在受到动态荷载作用后的破碎程度进一步加重。上述现象与文献[19]中针对湿热交互作用下软岩强度削弱机制的描述相符。在动态单轴荷载下，泥岩破坏模式变化本质上是其内在非均质性、循环处理引发的裂隙网络变化及能量释放机制的共同作用结果。干湿-冻融的复合循环作用通过物理膨胀与化学弱化的协同作用，加剧了裂隙扩展速率与变异性，导致泥岩在动态荷载下呈现更严重的破碎特征。

2.2 泥岩的强度退化规律

根据采集数据，绘制了动态单轴压缩试验结果，绘制了不同环境损伤条件下泥岩的应力-应变曲线，如图 2所示，图中 T 表示循环次数。根据变形特点可将泥岩应力-应变曲线分为：裂隙压密、线弹性变形、屈服变形和残余变形阶段。裂隙压密阶段为开始加载后应力随应变增加缓慢上升的曲线段；线弹性变形阶段为应力随应变增加线性上升阶段；屈服变形阶段为应力上升至突降的阶段；残余变形阶段为应力跌落后保持稳定的阶段。以应力-应变曲线的峰值应力作为泥岩试件的动态强度。由图 2 可知，在干湿循环、冻融循环及干湿-冻融循环 3 种环境作用下，随着循环次数增加，泥岩峰值应力均呈明显下降趋势，而峰值应力对应的应变整体呈增大趋势，说明泥岩在水岩交互作用下表现出显著的强度劣化与变形软化特征。



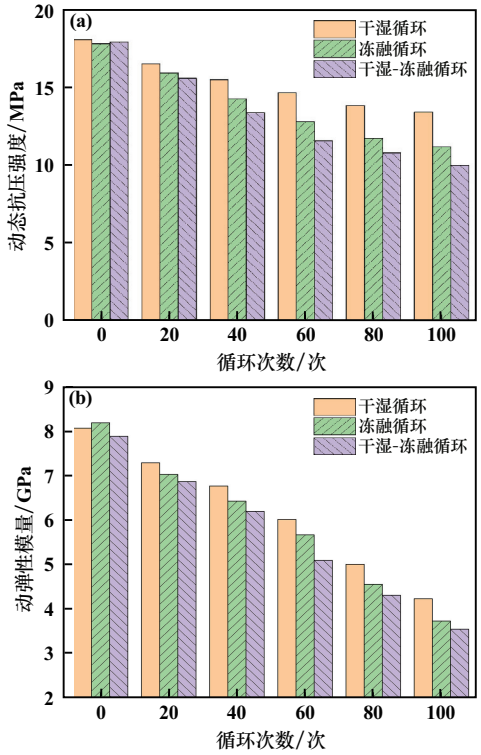
(a) 干湿循环；(b) 冻融循环；(c) 干湿-冻融循环

图 2 不同环境损伤条件下泥岩的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of mudstone under different environmental damage conditions

为进一步量化岩石力学衰减程度，计算得到泥岩动态抗压强度 f_d 和动弹性模量 E_d，如图 3 所示，在干湿、冻融及干湿-冻融循环作用下，随着循环次数由 0 增至 100 次，泥岩 f_d 和 E_d 均呈持续下降趋势。相比而言，干湿循环条件下 f_d 和 E_d 下降幅度相对较小，冻融循环引起的衰减幅度更加明显；干湿-冻融循环作用下的 f_d 和 E_d 整体处于最低水平，说明两种环境作用的叠加进一步加剧了岩石内部结构损伤。随着循环次数增加，各组动态抗压强度下降速率整体有所减缓，而动弹性模量则表现出较为连续的衰减特征。

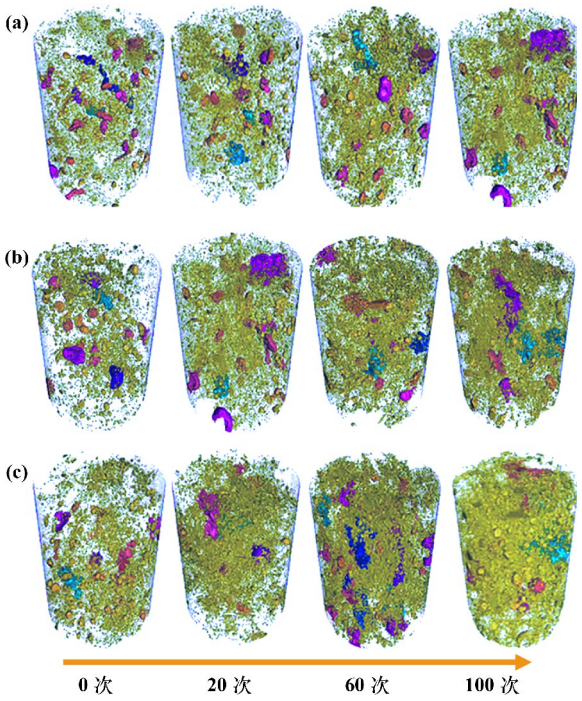
基于文献[20]，阐释不同环境损伤条件下泥岩应力-应变曲线的变化机理。岩石力学性能的劣化现象本质上是由微观结构改变引起。在微观结构的持续损伤过程中，裂隙扩展使泥岩骨架的刚度降低。强度衰减呈现三阶段变化趋势，清晰地反映了裂隙网络从快速扩展直至趋于稳定的演化过程。在冻融循环过程中，水楔效应发挥作用，而干湿循环则引发胶结弱化现象[21]。二者相互协同，形成物理与化学作用的叠加效应。在此基础上，受到荷载作用时，岩石内部弹性应变能会迅速释放，进而加剧了岩石力学性能的劣化程度[21]。



（a）动态抗压强度；（b）动弹性模量

图 3　泥岩动态抗压强度和动弹性模量

Fig. 3　Dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of mudstone



（a）干湿循环；（b）冻融循环；（c）干湿-冻融循环

图 4　泥岩孔隙率动态演化模型

Fig. 4　Dynamic evolution model for porosity of mudstone

3　泥岩的微观损伤机制

3.1　孔隙分布特征

基于数字岩心重构技术建立泥岩的孔隙率动态演化模型,结果如图 4 所示。初始状态下,泥岩试件内仅有少量连通孔隙,这表明初始状态下泥岩内部仅存有少量微小孔隙。分别经过 20 次干湿、冻融和干湿-冻融循环后,泥岩微观结构发生显著变化,孔隙数量增加,这些孔隙在物理作用下进一步扩展成微裂缝。就 3 种循环作用对孔隙结构的影响而言,干湿-冻融循环作用下的孔隙连通程度最高。在 0~100 次干湿-冻融循环过程中,泥岩内部的裂隙尺寸和连通度均呈现明显的增长态势,经过 60 次干湿-冻融循环后,泥岩内部形成裂隙的三维连通面,并在随后的过程中进一步扩张。从三维岩心的孔隙重构结构来看,泥岩内部微观结构在干湿与冻融循环作用下的损伤程度最高。

采用 CT 扫描技术表征泥岩微观结构和孔隙分布,分析其孔隙分布和尺寸的变化规律。CT 扫描结果表明,在干湿-冻融循环下,泥岩的小孔喉(孔径小于 10 μm)数量占比减少了 37.2%,反映了原有孔隙在冻胀挤压下发生合并重组;中孔喉(孔径 10~100 μm)数量减少了 21.5%,主要是矿物颗粒界面脱黏形成新生微孔隙;大孔喉(孔径大于 100 μm)占比提升了 15.7%,表明次生裂隙在循环过程中发生连通。在干湿-冻融循环作用下,泥岩的晶体结构疲劳损伤发生累积,通过一系列的微观结构变化,降低了岩石的有效承载面积以及应力传递效率。泥岩孔隙率与抗压强度的关系如图 5 所示,泥岩的抗压强度与孔隙率满足线性负相关关系。孔隙率仅反映孔隙体积所占比例,而孔隙的连通性决定了动应力在岩石内部的传递路径及其集中程度。基于三维孔隙模型的定性分析结果可知,随着干湿-冻融循环次数增加,孔隙网络的连通度呈现出显著提升的态势。因此,孔隙网络的扩张和连通在

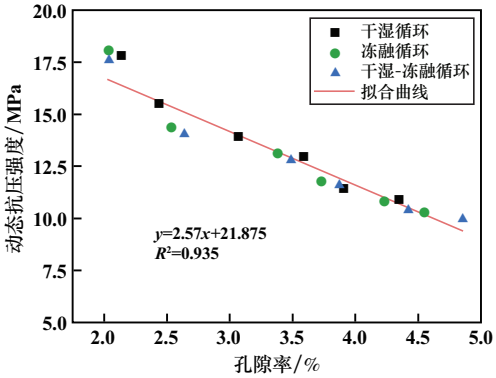


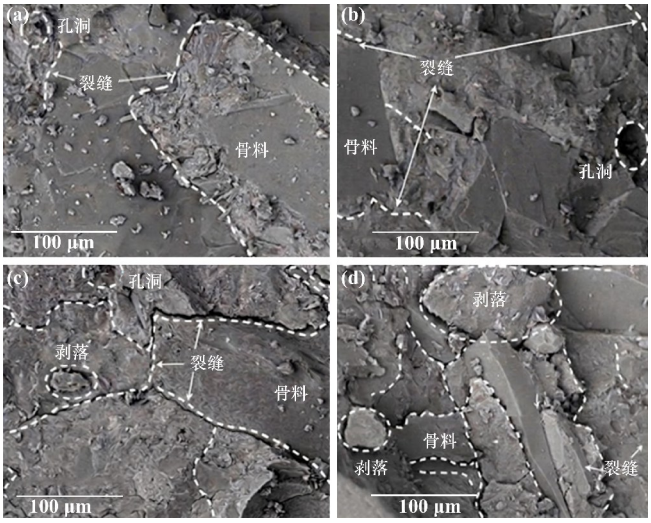
图 5　泥岩孔隙率与抗压强度的关系

Fig. 5　Relationship between porosity and dynamic compressive strength of mudstone

干湿-冻融循环过程中显著改变了岩石微观结构,进而对泥岩宏观力学性能产生显著影响。

3.2 细观结构的劣化机理

为分析不同干湿环境损伤作用对泥岩性能的影响机理,开展扫描电镜试验。泥岩的微观结构特征如图 6 所示。初始状态下的泥岩晶体排列较为致密,形成较好的整体结构。经历 100 次干湿或冻融循环后,泥岩内部晶体颗粒呈疏松化特点,矿物晶体颗粒间的裂隙长度、宽度和连通度增加。而干湿-冻融循环作用导致原本致密的矿物晶体结构产生连通裂隙面,泥岩试件内部结构出现显著损伤,孔隙发生扩展和贯通,进而使颗粒的接触力减小。究其原因,干湿循环过程中的温度梯度与湿度波动引发矿物颗粒间毛细水膜周期性收缩-膨胀,产生局部应力集中。冻融循环中的冻胀作用使得孔隙水发生相变,冰体积增加约 9%,导致孔隙体积膨胀并形成较高的冻胀压力[22]。这一系列的变化是造成泥岩出现结构损伤和强度劣化现象的根本原因。因此在水分和温度的长期作用下,泥岩内部微观层面矿物成分发生相变,细观层面形成微裂纹扩展路径,最终在宏观层面表现为力学性能的衰减。



(a)初始状态;(b) 100 次干湿循环;
(c) 100 次冻融循环;(d) 100 次干湿-冻融循环

图 6 泥岩的微观结构特征

Fig. 6 Microstructure characteristics of mudstone

综上所述,干湿循环与冻融循环对泥岩的损伤效应具有多尺度耦合特征。水分和温度效应通过水分侵蚀与冻融耦合作用,引发微观结构疲劳损伤,进而产生相变劣化与裂隙扩张,最终导致力学性能退化。干湿-冻融循环作用会对泥岩产生显著的损伤作用,致使泥岩颗粒间原本紧密的胶结逐渐被削弱。这种作用不仅加快孔隙膨胀,而且促使岩石内部的微裂纹不断扩展,最终通过降低有效承载面积和应力传递效率,导致泥岩发生结构性损伤和强度劣化。鉴于本文证实干湿-冻融复合循环对泥岩造成显著的损伤效应,在尾矿库边坡加固设计中,建议优先构建完备的排水系统和长期的湿度、温度监测平台,最大程度降低坡体内水分的积聚及反复湿热循环的影响,进而延缓边坡泥岩力学性能的劣化进程。

4 结论

1) 在动态单轴荷载下,尾矿库边坡泥岩破坏模式演化与干湿循环类型存在强相关性。在干湿-冻融循环影响下,泥岩的脆性破坏程度进一步加剧。

2) 3 种典型环境循环作用均导致泥岩抗压强度衰减,且动态抗压强度与动弹性模量的劣化幅度随循环次数增加而增大。其中,干湿-冻融循环作用下,泥岩的最终动态抗压强度与动弹性模量总降幅最大,显著低于单一干湿或冻融循环,表明多物理场耦合对材料承载力具有协同削弱效应。

3) 干湿-冻融循环对材料孔隙结构具有破坏效应,导致孔隙率增大,而孔隙率与动态抗压强度呈强负相关性。干湿-冻融循环的环境效应加速了孔隙膨胀,进而促使微裂纹扩展并形成贯通的孔隙网络。这一过程通过降低有效承载面积和应力传递效率,最终引发泥岩的结构损伤。

4) 干湿-冻融循环作用通过水分侵蚀与冻融膨胀引发微观结构损伤,进而造成动态抗压强度劣化。工程上,建议构建完备的排水系统,以及长期的温度和湿度监测平台,延缓泥岩劣化进程。

参考文献(References):

[1] 杜海瑞,赵红泽,郭帅. 露天矿复杂地质区域不同排弃方式下排土场变形机理研究[J]. 金属矿山, 2024(12):269-274.
Du Hairui, Zhao Hongze, Guo Shuai. Deformation mechanism of dump with different construction methods in complex geological area of open pit mine[J]. Metal Mine, 2024(12):269-274.

[2] Chen Z Q, He C, Ma G Y, et al. Energy damage evolution mechanism of rock and its application to brittleness evaluation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019,52(4):1265-1274.

[3] 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.

[4] 刘先峰,王通,李建国,等. 冻融循环作用下灰岩和石英岩力学特性及损伤本构模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2025,46(1):1-14.

Liu Xianfeng, Wang Tong, Li Jianguo, et al. Experimental study on the mechanical properties and damage constitutive models of limestone and quartzite under freeze-thaw cycles[J]. China Railway Science, 2025,46(1):1-14.

[5] 侯召旭,刘先峰,王通,等. 冻融损伤石英岩力学特性及损伤本构模型[J]. 长江科学院院报, 2025,42(1):177-185.
Hou Zhaoxu, Liu Xianfeng, Wang Tong, et al. Mechanical characteristics and damage constitutive model of quartzite under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025,42(1):177-185.

[6] 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.

[7] 付宏渊,陈镜丞,曾铃,等. 温、湿度对粉砂质泥岩单轴力学性能的影响试验[J]. 土木工程学报, 2019,52(1):89-98.
Fu Hongyuan, Chen Jingcheng, Zeng Ling, et al. Experiment on the effects of temperature and humidity on uniaxial mechanical properties of silty mudstone[J]. China Civil Engineering Journal, 2019,52(1): 89-98.

[8] 李宏强,姚忠勋,曾志杭,等. 冻融循环单轴压缩下不等长交叉裂隙砂岩变形破坏特征研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024,46(6):65-72.
Li Hongqiang, Yao Zhongshao, Zeng Zhihang, et al. Study on deformation and failure characteristics of sandstone with unequal length cross cracks under uniaxial compression of freeze-thaw cycle[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, 46(6):65-72.

[9] 赵越,牛心玉,齐晓磊,等. 水化-冻融耦合作用下大理岩蠕变长期强度[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025,55(1):188-198.
Zhao Yue, Niu Xinyu, Qi Xiaolei, et al. Creep long-term strength of marble under coupling effect of hydration freezing-thaw[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025,55(1):188-198.

[10] Gong F Q, Yan J Y, Luo S, et al. Investigation on the linear energy storage and dissipation laws of rock materials under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019,52(11): 4237-4255.

[11] 孟凡东. 砂岩冻融损伤劣化机制及冲击荷载作用下的力学响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(11):2860.
Meng Fandong. Study on freeze-thaw damage degradation mechanism of sandstone and its mechanical response characteristics under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(11):2860.

[12] 陈祥,肖桃李,折海成. 三轴压缩条件下单裂隙岩样裂隙扩展研究[J]. 科学技术与工程, 2022,22(26):11567-11576.
Chen Xiang, Xiao Taoli, Zhe Haicheng. Triaxial compression condition order fracture rock fissure extension study[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(26):11567-11576.

[13] 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.

[14] Xie H P, Li L Y, Peng R D, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009,1(1):11-20.

[15] Li J H, Zhang L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil[J]. Computers and Geotechnics, 2010,37(4):466-475.

[16] 熊朝林,陈俊智. INRBO-SVM 模型在边坡安全系数预测中的应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):20-25.
Xiong Chaolin, Chen Junzhi. Application of INRBO-SVM model in predicting slope safety factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):20-25.

[17] 任建喜,杨涓冰,谢易,等. 冻融雁行裂隙花岗岩单轴压缩宏细观疲劳特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2024,32(3):840-850.
Ren Jianxi, Yang Haobing, Xie Yi, et al. Experimental study on macro-micro fatigue characteristics of freeze-thaw double-fissured granite under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(3):840-850.

[18] Yuan W, Liu X R, Fu Y. Study on deterioration of strength parameters of sandstone under the action of dry-wet cycles in acid and alkaline environment[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018,43(1):335-348.

[19] 胡星宇,高乾丰,曾铃,等. 湿热循环作用下中风化花岗岩强度损伤特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023,19(6):1800-1808.
Hu Xingyu, Gao Qianfeng, Zeng Ling, et al. Study of strength damage characteristics of moderately weathered granite under wetting-heating cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023,19(6):1800-1808.

[20] 周翠英,苏定立,刘镇. 软岩渗流-化学-损伤软化过程中能量耗散机制[J]. 工程地质学报, 2019,27(3):477-486.
Zhou Cuiying, Su Dingli, Liu Zhen. Discussion on energy dissipation mechanism in seepage-chemical damage-softening process of soft rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2019,27(3):477-486.

[21] 彭勃. 冻融循环条件下徽成盆地红层泥质岩裂隙演化规律研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2023:44-47.
Peng Bo. Research on the crack evolution law of the red-bed mudstone of Huicheng Basin under freeze-thaw cycles[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023:44-47.

[22] 林诗哲,胡新丽,张海燕,等. 白鹤滩水电站库区红层砂岩干湿循环下结构劣化及渗透性演化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024,35(5):67-77.
Lin Shizhe, Hu Xinli, Zhang Haiyan, et al. Structural degradation and permeability evolution of red sandstone under dry-wet cycles in the Baihetan hydropower station reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024,35(5):67-77.

引用本文:刘萍,张军锋. 尾矿库边坡泥岩的动态力学响应及微观结构演化研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):54-59.
Liu Ping, Zhang Junfeng. Dynamic mechanical response and microstructure evolution of mudstone in tailings reservoir slope[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):54-59.