

冻融作用下寒区半饱和砂岩强度衰减 与能量演化机制

赵鑫¹, 杨子仪², 于美鲁^{2*}, 廖昌龙¹, 刘晨康², 常银联¹, 杨志一¹, 张雨¹

(1. 中铁十九局集团矿业投资有限公司, 北京 100161; 2. 安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要:针对冻融作用下寒区边坡岩体强度衰减问题,以玉龙铜矿边坡青砂岩为研究对象,通过室内冻融循环、SHPB动态冲击试验和核磁共振孔隙分析,系统研究了半饱和砂岩在冻融作用下的动态力学劣化规律、能量演化特征及孔隙结构演化规律,并建立了基于能量反射率的冻融强度衰减模型。结果表明:随冻融次数增加,砂岩动态峰值应力由65.45 MPa降至51.8 MPa,劣化趋势呈现“先快后慢”的非线性特征;动态应力-应变曲线依次经历弹性阶段、应变软化阶段和快速卸载阶段,应变软化阶段随冻融次数增加逐渐缩短,并出现“应力跌落”与“应变回弹”现象;入射能与透射能总体上随冻融次数增加呈下降趋势,反射能在冻融20次时显著升高;高冻融次数促进了水分向较大孔隙迁移,使孔隙分布范围扩大,增强了介孔与大孔的响应特征。研究成果揭示了冻融循环作用下半饱和砂岩的损伤演化机制,为寒区边坡工程稳定性评价与防护设计提供了理论依据。

关键词:冻融循环;半饱和砂岩;强度衰减;能量演化;损伤模型;动态冲击试验;核磁共振;寒区边坡

中图分类号:TU45;TD854 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)05-0104-08

Mechanism of strength degradation and energy evolution of semi-saturated sandstone in cold regions under freeze-thaw action

ZHAO Xin¹, YANG Ziyi², YU Meilu^{2*}, LIAO Changlong¹, LIU Chenkang²,
CHANG Yinlian¹, YANG Zhiyi¹, ZHANG Yu¹

(1. China Railway 19 Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China; 2. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: To address the strength degradation of slope rock masses in cold regions under freeze-thaw action, the bluish-grey sandstone from the Yulong Copper Mine slope was taken as the research object. Through indoor freeze-thaw cycles, SHPB dynamic impact tests, and nuclear magnetic resonance (NMR) pore analysis, the dynamic mechanical degradation laws, energy evolution characteristics, and pore structure evolution laws of semi-saturated sandstone under freeze-thaw action were systematically investigated, and a freeze-thaw strength degradation model based on absorbed energy was established. The results show that as the number of freeze-thaw cycles increases, the dynamic peak stress of sandstone decreases from 65.45 MPa to 51.8 MPa, exhibiting a nonlinear degradation trend of rapid initial decline followed by slow attenuation. The dynamic stress-strain curve sequentially undergoes an elastic stage, a strain-softening stage, and a rapid unloading stage. The strain-softening stage gradually shortens with

收稿日期:2026-03-06; 修回日期:2026-05-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.011

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:52304118)

第一作者:赵鑫,男,汉族,1987年生,高级工程师,岩土工程专业,博士,研究方向为露天爆破施工,北京市丰台区风荷曲苑2号楼, 375531048@qq.com。

通信作者:于美鲁,男,汉族,1992年生,副教授,工程力学专业,博士,研究方向为矿山岩体力学,安徽省淮南市泰丰大街168号,meilu_yu@163.com。

引用格式:赵鑫,杨子仪,于美鲁,等.冻融作用下寒区半饱和砂岩强度衰减与能量演化机制[J].钻探工程,2026,53(5):104-111.

ZHAO Xin, YANG Ziyi, YU Meilu, et al. Mechanism of strength degradation and energy evolution of semi-saturated sandstone in cold regions under freeze-thaw action[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5):104-111.

increasing freeze-thaw cycles, accompanied by the phenomena of stress drop and strain rebound. Both incident energy and transmitted energy generally show a decreasing trend with increasing freeze-thaw cycles, whereas the reflected energy increases significantly at 20 freeze-thaw cycles. High freeze-thaw cycles promote the migration of moisture into larger pores, expand the pore distribution range, and enhance the response characteristics of mesopores and macropores. The research findings reveal the damage evolution mechanism of semi-saturated sandstone under freeze-thaw cycles, providing a theoretical basis for the stability evaluation and protection design of slope engineering in cold regions.

Key words: freeze-thaw cycle; semi-saturated sandstone; strength degradation; energy evolution; damage model; dynamic impact test; nuclear magnetic resonance; cold region slope

0 引言

全球寒区分布广泛,我国青藏高原、东北及西北等高海拔、高纬度地区季节性冻土与多年冻土发育,地质体由于冻融循环劣化效应出现的地质问题愈发凸显^[1],各类基础设施(如公路、铁路、水利工程及矿山边坡)的建设和运营均面临严峻的冻融灾害挑战^[2-3]。大孔隙砂岩作为高原寒区露天矿山的岩质边坡主要组成成分之一^[4],在长期冻融循环作用下其内部结构将发生不可逆的损伤,导致力学性能(如强度、弹性模量)显著劣化,进而诱发边坡表层剥落、浅层滑塌乃至大规模失稳等工程灾害,直接影响工程耐久性,威胁生命财产安全^[5]。

当前,国内外学者围绕冻融岩石的物理力学性质已开展了一系列研究,主要集中在冻融后岩石的单轴/三轴强度^[6]、弹性波速^[7]、孔隙结构^[8]及微观形态变化等方面,并初步揭示了水冰相变、冻胀压力、水分迁移等是导致岩体损伤的主要物理机制。贾蓬等^[9]综合纵波波速和孔隙率建立冻融损伤因子,给出了考虑冻融损伤、应变率的动态抗压强度经验方程,基于纵波波速、孔隙率分别建立了强度衰减模型。沈世伟等^[10]对不同初始饱和度红砂岩冻融循环前后的力学参数开展了详细的研究,发现随饱和度的增大,冻融试样峰值强度和弹性模量均呈降低趋势,但只有饱和度 $>60\%$ 时,降低趋势较明显。Zhang等^[11]开展了两种冲击气压下冻融红砂岩的循环冲击试验,研究了循环冲击次数和冻融次数对应力波传播、动态应力-应变曲线、峰值应力和峰值应变的影响规律。金解放等^[12]采用分离式霍普金森压杆(SHPB)动态冲击试验系统对不同含水率红砂岩冲击过程中的能量耗散进行研究,发现随着含水率的增加,各能量演化阶段的起始应变先增大后减小,破坏(卸载)阶段起点处耗散能与总应变能的比值先上升后下降。然而,现有研究仍存在一定的局限性:多数研究侧重于均质饱和和岩块在实验室理想

条件下的冻融响应,寒区边坡岩体本身具有初始损伤,自然环境中饱和含水的冻融岩体极少存在,且对强度衰减规律的描述多停留在宏观经验阶段。

因此,系统研究冻融作用下寒区边坡岩体强度的衰减规律,揭示其损伤失稳演化机理,是寒区工程地质与岩石力学领域亟待深入研究的核心课题。本研究拟通过室内冻融循环试验,揭示半饱和冻融岩体在冻融过程中的损伤演化特征,旨在为寒区边坡工程的稳定性评价、灾害预警及防护设计提供更为科学的理论依据和技术支撑。

1 工程地质概况

玉龙铜矿位于西藏自治区昌都市境内,平均海拔逾4000 m,属高原寒温带季风气候,年均气温低于 0°C 的天数超过180 d,季节性冻土发育,年冻融循环次数超过80次。矿区露天边坡主要由砂岩、板岩及蚀变岩体组成,岩体受构造与风化作用影响,节理裂隙发育,具备显著的初始损伤特征。

鉴于岩体受构造与风化作用及频发的冻融作用影响,具有显著的初始损伤特征,故将边坡岩体大致划分为强风化-构造破碎带岩组、中风化岩组、微风化岩组、斑岩-辉绿岩侵入和蚀变岩组及泥化及松散体岩组。砂岩作为以上岩组主要组成成分,其矿物组成如表1所示,基础物理参数如表2所示。

表1 砂岩矿物组成与含量
Table 1 The mineral composition and content of sandstone

石英/%	钠长石/%	高岭石/%	伊利石/%	绿泥石/%
42.6	29.9	15	11.3	1.3

2 动态力学试验

试验岩样取自玉龙铜矿边坡岩体的青砂岩,依据国际岩石力学与岩石工程学会(International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering,

表2 基础物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters

纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水 率/%	孔隙 度/%
2604.08	2.458	2.555	3.76	3.85

ISRM)标准制备成 $\text{O}50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的岩样,比对高度、质量及纵波波速变化。选取均质完整岩样,随后分别通过SN-101型烘干机烘干岩样,真空饱

水系统对岩样强制饱水,自然风干。结合现场自然岩石饱和度接近50%,故自然风干至饱和度50%,最后放入BPHJ-120C型冻融循环试验箱。冻融试验依据《工程岩体试验方法标准》,冻融温度为 $-20 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,一次冻融循环周期包括冻结4 h、低温恒温1 h、融化4 h和常温恒温1 h四个阶段。本试验设置0、20、40、60、80次5组冻融循环试验次数,每组3块试样。待冻融循环结束后开展SHPB试验,试验流程如图1所示。

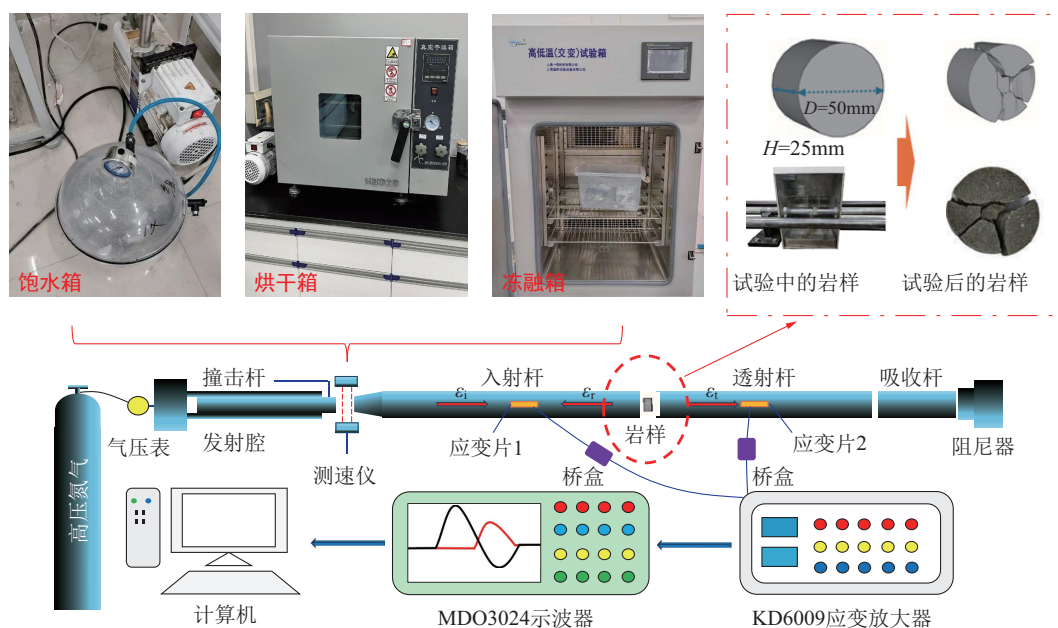


图1 试验流程

Fig.1 Experimental procedure flowchart

SHPB 试验参考 ISRM 建议的《Suggested Methods for Determining the Dynamic Strength Parameters and Mode-I Fracture Toughness of Rock Materials》进行,并结合一维应力波理论和三波法对入射波、反射波和透射波进行数据处理。SHPB 试验系统的入射杆为 $\text{O}37\text{ mm}/50\text{ mm} \times 2400\text{ mm}$ 的变截面杆,透射杆与吸收杆尺寸均为 $\text{O}50\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$,三者均为合金钢杆件,密度为 $7800\text{ kg}/\text{m}^3$,纵波波速为 $5290\text{ m}/\text{s}$,弹性模量为 210 GPa 。冲头选用纺锤形子弹,尺寸为 $\text{O}37\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 。为减少应力波弥散效应,入射断面置有铜质整形器,试样左右均涂抹凡士林耦合剂。

3 试验结果分析

3.1 力学性能劣化分析

通过 SHPB 试验系统对冻融次数为0、20、40、60、80的岩样进行冲击,冲击气压为 0.45 MPa 。SHPB 试验系统收集的电信号通过三波法转换成应变数据,如图2(a)所示。入射波与反射波叠加后的波形与透射波波形近似重合,如图2(b)所示,说明岩石试样两端受力相等,达到应力平衡,满足均匀性假设,试验结果有效。进而得到不同冻融次数的砂岩试样的动态应力-应变曲线,如图2(c)所示。

由图2(c)可以看出,曲线大致分为弹性阶段、应变软化阶段与快速卸载阶段。试样在弹性阶段斜率基本保持不变,呈线性递增。冲击荷载传递的能量在冻融岩石内部转化为弹性能储存,随着能量

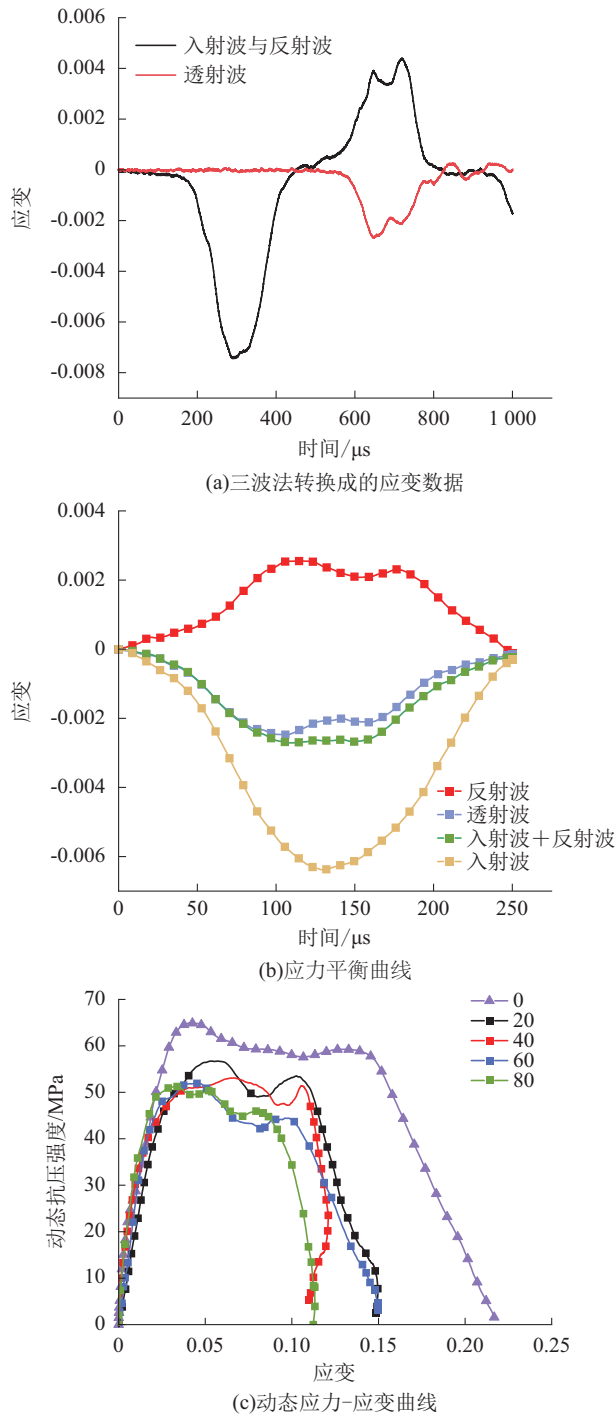


图2 力学响应曲线

Fig.2 Dynamic mechanical response curves

进一步增大,动态应力达到峰值,并进入“平台期”。在应变平台期内,岩石内部结构未完全失稳,仍然提供了一定承载力,属于应变软化阶段。此阶段冻融砂岩内部孔洞、裂隙快速发展并相互贯通。在进入快速卸载阶段时试样完全破坏,此阶段试样与杆

件接触关系的复杂性导致试样的动态应力-应变曲线峰后特征存在较大差异,未冻融试样呈现出“峰后塑性”,冻融20、60、80次岩石试样出现“应力跌落”现象,而在冻融40次出现显著的“应变回弹”现象^[10]。且冻融次数增多加速了含水砂岩内部孔隙发育,同一冲击气压下试样抵抗冲击变形的能力不断降低,冻融次数越多,应变软化阶段越短。冻融岩石内部孔隙结构发育程度越高,“应力跌落”与“应变回弹”现象也就更容易发生,表明岩体内部结构在冻胀力与动力荷载耦合作用下发生不可逆重组。

对比各组试样的动态应力-应变曲线,发现峰值应力由65.45 MPa下降到51.8 MPa,动态峰值应力分别下降12%、18%、19%、20%。可知冻融循环对岩石试样的劣化程度在冻融次数较少时较为明显,随着冻融次数增加,劣化程度不再显著。这也意味着相同冲击气压下,冻融对于岩石试样的损伤劣化速度呈现先快后慢的趋势,随着孔隙结构的发育完全,岩石劣化将无限逼近极值。

3.2 能量演化特征

能量变化是反映冲击荷载下冻融岩石破坏过程的重要表征,冲击荷载的能量包括入射能 $U_i(t)$ 、反射能 $U_r(t)$ 、透射能 $U_t(t)$ 及吸收能 $U_s(t)$ ^[11]。

$$\begin{cases} U_i(t) = A_b E_b C_b \int_0^t \epsilon_i^2(t) dt \\ U_r(t) = A_b E_b C_b \int_0^t \epsilon_r^2(t) dt \\ U_t(t) = A_b E_b C_b \int_0^t \epsilon_t^2(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_b ——杆件的横截面积,取19.625 cm²; E_b ——杆件弹性模量,取210 GPa; C_b ——杆件的波速,取5290 m/s; $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$ 、 $\epsilon_t(t)$ ——试样入射波应变、反射波应变、透射波应变。

吸收能可用入射能、反射能与透射能表示^[12],能量反射率为 W 。

$$U_s(t) = U_i(t) - U_r(t) - U_t(t) \quad (2)$$

$$W = \frac{U_r(t)}{U_i(t)} \quad (3)$$

入射能、透射能、反射能、吸收能随应变的变化如图3所示,峰值入射能、峰值透射能、峰值反射能、峰值吸收能、能量反射率随冻融次数变化如表3所示。

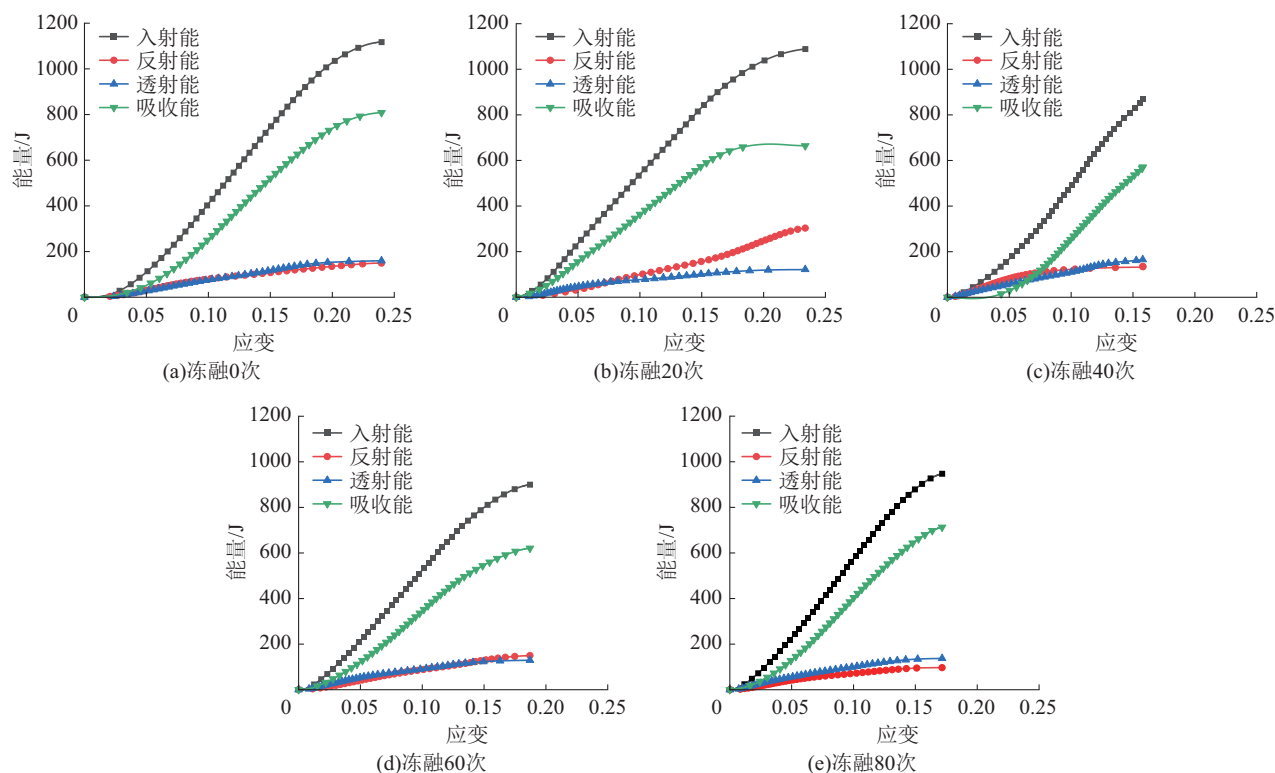


图3 能量变化

Fig.3 Energy variation characteristics

表3 峰值能量变化统计

Table 3 Statistics of peak energy changes

冻融次数/次	入射能/J	吸收能/J	反射能/J	透射能/J	能量反射率
0	1117.41	808.27	159.76	149.38	0.14
20	1089.05	663.87	303.37	121.81	0.27
40	871.88	571.28	165.25	135.35	0.18
60	899.66	620.70	149.58	129.38	0.16
80	947.25	712.87	137.54	96.84	0.15

由图3、表3可知,随着冻融次数增加,入射能总体呈下降趋势,入射能从1117.41 J(0次)逐步降低至871.88 J(40次),之后略有回升,但仍低于初始值。吸收能随冻融次数增加呈先降后升整体偏低特征,冻融初期内部损伤弱化岩石能量吸收能力,后期受孔隙结构调整略有回升。反射能在20次时显著升高至303.37 J,明显高于其他次数,说明冻融过程中材料表面或界面在某一阶段发生显著变化(如微裂纹、冰晶反射增强),导致反射能力突增。透射能整体呈下降趋势,透射能从149.38 J(0次)逐渐下降至96.84 J(80次),尤其在冻融次数较多时下

降明显。表明冻融导致岩石内部结构逐渐稀疏、损伤累积,能量穿透能力减弱。另外,0次冻融时吸收能占比最大,约72.3%,反射能和透射能占比较小;20次冻融时反射能占比显著提高,约27.9%,吸收能占比下降,约60.9%;80次冻融时吸收能占比回升,约75.3%,透射能占比降至最低,约10.2%。说明冻融次数对岩石能量传递特性有显著影响,尤其是反射能在冻融中期异常增强。岩石能量吸收能力在冻融初期下降,后期略有恢复,可能与岩石损伤有关。透射能持续下降,说明冻融加剧了岩石内部结构的破坏,降低了能量穿透性,能量分配模式在冻融过程中发生明显变化,反映了岩石物理状态的动态演变。

3.3 孔隙演化特征

将0、20、40、60、80次冻融处理的砂岩试样进行核磁信号分析。核磁共振岩心分析系统(MecroMR12-150H-VTHP)如图4所示,采用CPMG序列,设置回波数量12000个,等待时间3000 ms,回波时间0.2 ms,累加采样次数32次。

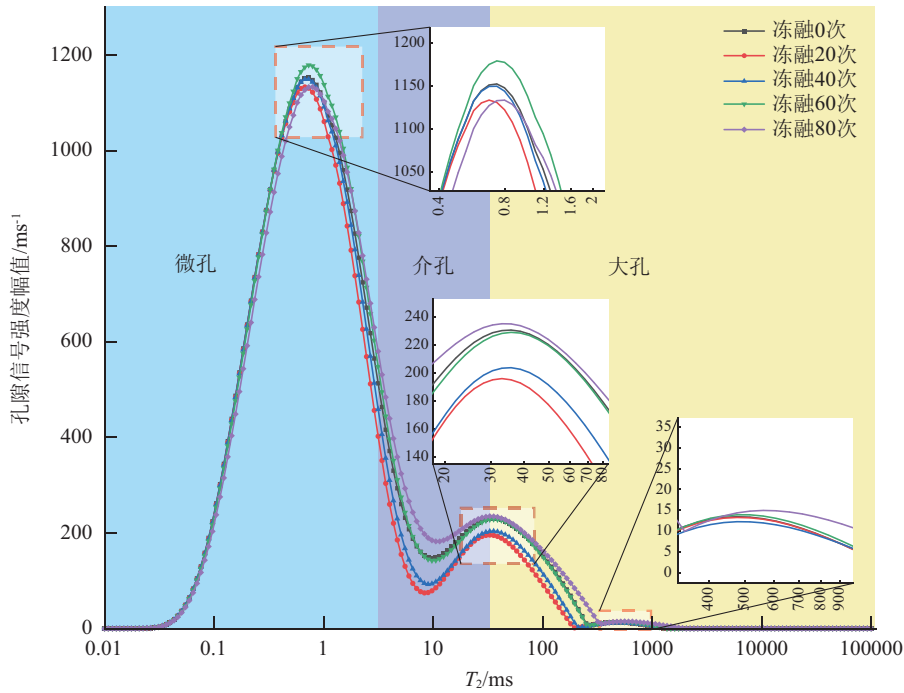
核磁共振岩心分析系统测得的孔隙信号 T_2 谱如图5所示。将 $T_2 < 3$ ms划分为微孔, $3 \leq T_2 < 33$



图4 核磁共振岩心分析系统

Fig.4 Nuclear magnetic resonance core analysis system

ms为介孔, $T_2 \geq 33$ ms为大孔。孔隙信号峰值集中于短弛豫时间区间,表明岩石内部孔隙以微孔为主。随着 T_2 增大,信号强度明显降低,介孔区仅出现次级峰,大孔区则主要表现为弱信号拖尾,介孔和大孔所占比例相对较小。不同冻融次数下,各孔径区间的信号强度存在差异。高冻融次数曲线信号更为明显,在微孔区冻融60次信号最强,在介孔和大孔区冻融80次试样信号最强。说明高冻融次数有利于水分向大孔隙及连通孔隙迁移。岩石孔隙以微孔为主,介孔和大孔为辅,冻融次数升高使孔隙水分布范围扩大,并增强了介、大孔隙的响应特征。

图5 T_2 谱Fig.5 T_2 spectrum

3.4 强度衰减模型

冲击荷载下不同冻融次数岩石吸收能量失稳破坏具有显著差异,以能量反射率作为损伤变量,定义损伤因子 D_1 :

$$D_1 = 1 - \frac{W}{W_n} \quad (4)$$

式中: W_n ——冻融砂岩的能量反射率; W ——常规岩石冲击荷载下的能量反射率。

冻融环境下岩石的细观介质损伤(单元)参数(如强度)也是不均匀的。定义损伤因子 D_2 为损伤微单元 n 与总微单元 N 的比值,取值范围是 0~1。

$$D_2 = \frac{n}{N} \quad (5)$$

由于岩石天然非均质,其细观力学性质在材料力学中满足 Weibull 双参数分布,其密度函数 $f(F^*)$:

$$f(F^*) = \frac{\beta}{F^0} \left(\frac{F^*}{F^0} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F^0} \right)^{\beta} \right] \quad (6)$$

式中: F^* ——岩石微元损伤分布变量; β 、 F^0 ——该密度函数的尺度参量、形状参量。

所以 n 和 D_2 可表示为:

$$n = N \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F^0} \right)^\beta \right] \right\} \quad (7)$$

$$D_2 = \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F^0} \right)^\beta \right] \right\} \quad (8)$$

基于冻融-荷载耦合损伤方法,冻融损伤因子 D_3 :

$$D_3 = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \quad (9)$$

$$D_3 = 1 - \frac{W}{W_n} \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F^0} \right)^\beta \right] \quad (10)$$

引入Drucker-Prager强度准则作为砂岩在冻融荷载作用下微元破坏的依据,可得:

$$\begin{cases} F^* = \alpha I_1^* + \sqrt{J_2^*} \\ \alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \\ I_1^* = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \\ J_2^* = \frac{1}{6} [(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2] \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_1^* ——有效应力张量第一不变量; J_2^* ——有效应力张量第二不变量; φ ——内摩擦角; σ_1^* 、 σ_2^* 、 σ_3^* ——对应于 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的有效应力。

由于试验是一维应力波传播, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则:

$$F^* = \frac{\sigma_d (3 + \sin \varphi)}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),得:

$$D_3 = 1 - \frac{W}{W_n} \exp \left[- \left(\frac{W_n \epsilon (1 + \sqrt{3} \alpha)}{\sqrt{3} F^0} \right)^\beta \right] \quad (13)$$

基于Lemaitre应变等价原理,岩石的损伤可用下式表达:

$$\sigma = \sigma^* (1 - D_3) \quad (14)$$

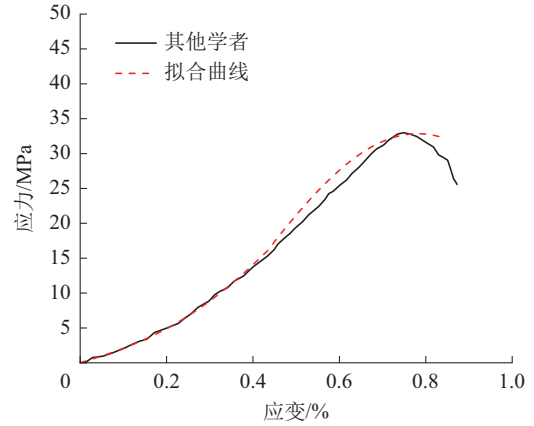
式中: σ_d ——试样的动态峰值应力; σ ——名义应力张量; σ^* ——有效应力张量,即常规岩样的峰值应力。

将式(13)代入式(14),得:

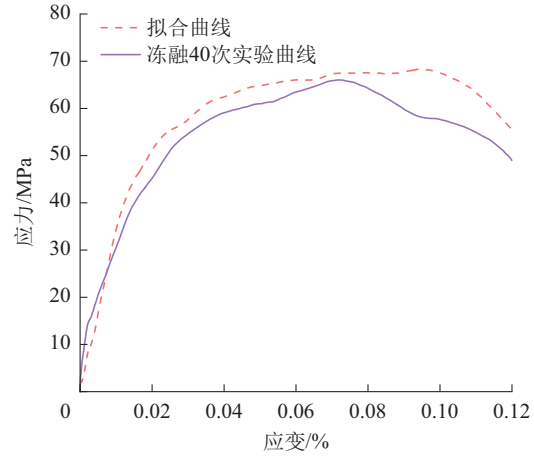
$$\sigma = \sigma^* \frac{W}{W_n} \exp \left[- \left(\frac{W_n \epsilon (1 + \sqrt{3} \alpha)}{\sqrt{3} F^0} \right)^\beta \right] \quad (15)$$

得到基于能量反射率变化的强度衰减模型,与其他学者^[6]的研究进行对比,如图6(a)所示,反映了

冻融损伤导致的应力衰减规律。对比实验数据如图6(b)所示,可以基本反映冻融损伤变化。



(a) 对比其他学者拟合曲线



(b) 对比典型实验数据

图6 冻融强度衰减模型

Fig.6 Freeze-thaw strength degradation model

4 结论

本研究基于室内冻融循环与SHPB动态冲击试验,建立基于能量反射率的冻融岩石强度衰减模型,系统揭示了半饱和青砂岩在冻融作用下的强度衰减规律与能量演化机制,得到以下主要结论。

(1)冻融作用导致砂岩动态强度显著劣化,随冻融次数增加,动态峰值应力由65.45 MPa降至51.8 MPa,劣化呈现“先快后慢”特征,表明冻融损伤在初期较为剧烈,后期趋于稳定。动态力学行为呈现阶段性演化特征,随着冻融次数增加,应变软化阶段逐渐缩短,并出现“应力跌落”与“应变回弹”现象,反映出冻融损伤促进了内部裂隙的发育与贯通,改变了岩石的破坏模式。

(2)砂岩在冻融初期损伤累积导致能量吸收能力下降。能量演化特征直观反映了冻融过程中岩石内部结构的动态损伤与自适应过程。岩石的内部动态损伤反映在孔隙度的变化中,高冻融次数有利于水分向较大孔隙和连通孔隙迁移。岩石孔隙以微孔为主,介孔和大孔为辅,冻融次数升高使孔隙水分分布范围扩大,并增强了介、大孔隙的响应特征。

(3)基于能量反射率的冻融损伤模型实现对冲击荷载下冻融岩石损伤破坏的失稳预测,反映了损伤累积导致强度衰减的过程,与其他学者研究对比有较好一致性。寒区边坡工程初期稳定性评价应重点考虑冻融早期损伤快速累积效应,强化现场监测。在防护设计中也应考虑岩体冻融后的能量吸收特性转变,提升边坡抗扰动能力。

参考文献(References):

- [1] 陶学伟,张凯恒,郎振威,等.冻融循环作用下裂隙岩体注浆加固机理研究与应用[J].钻探工程,2025,52(4):129-138.
TAO Xuewei, ZHANG Kaiheng, LANG Zhenwei, et al. Research and application of grouting and reinforcement mechanism of fractured rock mass under freeze-thaw cycle[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 129-138.
- [2] Yu M L, Wang Z W, Xu Y, et al. Study on mechanical properties and energy evolution characteristics of excavation unloading rock under freeze-thaw temperature range[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 325: 111293.
- [3] 胡敏红,刘磊,岳文泽,等.蒙古国某深基坑安全越冬保温防护技术研究[J].钻探工程,2023,50(4):103-109.
HU Minhong, LIU Lei, YUE Wenzhe, et al. Research on cold-insulation and protection for safety overwintering of deep foundation pits in Mongolia[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 103-109.
- [4] 孙路,凌雪,关东帅,等.深井温湿环境下泥页岩力学特性及微观孔隙结构演化机制[J].钻探工程,2023,50(S1):126-134.
SUN Lu, LING Xue, GUAN Dongshuai, et al. Mechanical properties and microscopic pore structure evolution mechanism of shale under deep well temperature and humidity environment[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 126-134.
- [5] 徐铮,张化民,于好善,等.川藏铁路勘察工程的孔内试验及钻孔质量控制方案——以DZ-S-04-1号钻孔为例[J].钻探工程,2021,48(5):32-37.
XU Zheng, ZHANG Huamin, YU Haoshan, et al. In-hole test and borehole quality control plan for the Sichuan-Tibet Railway investigation project—Taking Borehole DZ-S-04-1 as an example[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 32-37.
- [6] Wang Z W, Yu M L, Wang L, et al. Strength degradation characteristics and damage constitutive model of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 22674.
- [7] 谢昊天,徐颖,郑强强,等.冻融循环作用下饱水砂岩强度衰减及细观结构特征[J].煤炭科学技术,2024,52(12):84-93.
XIE Haotian, XU Ying, ZHENG Qiangqiang, et al. Experimental study on strength degradation and meso-structural characteristics of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 84-93.
- [8] Wang Z W, Yu M L, Zuo J P, et al. Fracture characteristics and evolution mechanism of freeze-thaw rock under mixed mode I/II loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 139: 105105.
- [9] 贾蓬,毛松泽,卢佳亮,等.冻融循环对绿砂岩动态抗压性能影响的试验研究[J].北京理工大学学报,2023,43(8):841-851.
JIA Peng, MAO Songze, LU Jialiang, et al. Experimental study on the effect of Freeze-Thaw cycles on the dynamic characteristics of green sandstone[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(8): 841-851.
- [10] 沈世伟,吴飞,甘霖,等.不同初始饱和度红砂岩冻融后物理力学性质研究[J].钻探工程,2021,48(1):120-128.
SHEN Shiwei, WU Fei, GAN Lin, et al. Study on physical and mechanical properties of red sandstone with different initial saturation after freeze-thaw[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 120-128.
- [11] Zhang R R, Shen Y H, Ma D D, et al. Dynamic mechanical properties and damage mechanism of red sandstone subjected to freeze-thaw cycling under incremental repeated impact loading[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2025, 39(4): 04025041.
- [12] 金解放,余雄,钟依禄.不同含水率红砂岩冲击过程中的能量耗散特性[J].有色金属科学与工程,2021,12(5):69-80.
JIN Jiefang, YU Xiong, ZHONG Yilu. Energy dissipation characteristics of red sandstone with different water content during impact loading[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(5): 69-80.

(编辑 王跃伟)