冻融循环作用下砂岩的动态冲击特性试验研究

孙峤[1]，孙路平[1*]，叶泽晖[1]，王泽成[2]，李栋伟[1]

1. 大连大学建筑工程学院，辽宁 大连 116622；
2. 东华理工大学土木与建筑工程学院，南昌 330013

第一作者，E-mail：81593946@qq.com

* 通信作者，E-mail：2045802614@qq.com

2024-03-18 收稿；2024-05-15 修回；2024-05-21 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42061011; 41977236; 42577544)；江西省重点研发项目(20232BBE50025; 20223BBG71W01)；江西省研究生创新专项基金项目(YC2023-B209)；辽宁省兴辽英才计划领军人才项目(XLYC2402027)；大连大学学科交叉重点类项目(DLUXK-2024-ZD-003)

中图分类号：TU45　　文章编号：2096-8523(2026)01-0171-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240103

摘　要：为研究冻融循环对砂岩动态力学性能和微观结构特征的影响，对冻融 0, 30, 60, 90, 120 次的砂岩进行了冲击速度分别为 3, 6, 9 m/s 的动态冲击压缩试验、核磁共振检测以及电镜扫描。结果表明，冻融砂岩的动态冲击破坏模式整体上为粉碎破坏，随着冻融循环次数和冲击速度的增加，砂岩的破碎程度加大，碎块尺度减小，碎块数量和粉末占比增多，分形维数增大。在相同冲击速度下，随着冻融循环次数的增加，砂岩的动态力学性能不断劣化；各动态力学性能指标均具有率相关效应。此外，建立了冻融砂岩的动态峰值应力指数衰减模型，证明了冲击速度可以在一定程度上补偿冻融循环的损伤劣化作用，使冻融砂岩衰减常数减小，半衰期延后。所建立的分形维数–动态强度演化方程，使得分形维数不仅能定量描述砂岩冲击破坏后的破碎程度，还能进一步预测其动态强度。随着冻融循环次数的增加，砂岩内部孔洞、裂隙尺寸扩大且数量增多，结构损伤程度加剧；基于上述结果，探究了冻融循环作用下砂岩的损伤破坏机制，发现砂岩的冻融损伤是多种因素共同作用的结果。该研究可为寒冷地区岩石工程提供相关参考。

关键词：冻融循环；砂岩；冲击；破碎分形；微观结构；衰减模型

据统计，我国寒冷地区所占面积约为全国国土面积的 3/4[1]。寒冷地区的气温表现出在水冰相变临界点上下快速变化的特点，这使得该地区岩石长时间受到冻融循环强风化作用的影响，从而在岩石内部引发不可逆的损伤，严重威胁寒区工程的安全稳定[2-7]。此外，在矿产资源的开采及岩石工程的建设过程中，岩石不可避免地还会受到爆炸、机械扰动等动态荷载的影响[8-10]。因此，研究岩石在冻融和动荷耦合作用下的力学特性，对于在寒冷地区进行矿产资源开采、岩石工程的安全建设及防护等具有至关重要的意义。

在冻融岩石物理性质方面，学者们[11-15]发现冻融循环过程中的水冰相变会导致岩石的体积膨胀和密度降低，损伤劣化的不断积累则会引起岩石纵波波速的下降和内部孔隙率的上升，这些变化使得岩石的安全性和稳定性存在潜在风险。在冻融岩石微观结构变化特征方面，学者们[16-20]采用了多种技术手段，如：CT 扫描、核磁共振(NMR)、扫描电镜(SEM)等，对冻融前后岩石的微观形貌进行检测，结果表明，冻融循环使得岩石内部孔隙数量增多，并且微小孔逐渐演化成中、大孔和裂隙，孔隙结构的变化是岩石冻融损伤最直接的结果表现。在冻融岩石准静态力学特性方面，学者们[21-25]进行了多项试验，包括单轴压缩、巴西劈裂、三轴压缩和三轴剪切等，他们发现

著录信息：孙峤，孙路平，叶泽晖，等. 冻融循环作用下砂岩的动态冲击特性试验研究［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：171-184.
SUN Qiao, SUN Luping, YE Zehui, et al. Experimental study on dynamic impact characteristics of sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 171-184.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

随着冻融循环次数的增加，岩石抗压强度、抗拉强度、弹性模量以及泊松比均呈下降趋势，这意味着冻融岩石在工程应用中可能更容易发生变形和破坏。

除了准静态条件下的研究，冻融岩石的动态力学特性也备受关注。刘德俊等[26]借助分离式霍普金森压杆（SHPB）装置对不同冻融循环次数下的岩石进行了动态巴西圆盘劈裂试验，研究了动态拉伸强度的冻融循环劣化和应变率强化效应，并基于岩石的破碎特征分析了冻融循环的损伤破坏机制。张阳阳等[27]通过对比红砂岩的静、动态劈裂强度，发现相同冻融循环次数下，红砂岩的动态劈裂强度是静态的 3 ~ 4 倍；将冻融循环对红砂岩的损伤程度进行了量化，发现损伤程度和冻融循环次数呈现对数关系。CHANG 等[28]对冻融循环后的垂直、平行层理岩石分别进行了动态冲击压缩试验，发现层理岩石的相关动态力学指标具有明显的各向异性特征；在相同条件下，垂直层理岩石的动态峰值应力始终大于平行层理岩石的动态峰值应力；垂直层理岩石的层理结构与动荷的空间关系更利于其抵抗动态变形。LI 等[29]通过对不同冻融循环次数下的花岗岩进行动态冲击压缩试验，证明了冻胀破坏是引起冻融循环后花岗岩动态强度劣化的主要原因；冻融循环在花岗岩内部造成的损伤不是一个均匀积累的过程。LIU 等[30]研究了冻融循环对岩石动态抗拉性能的影响，并基于动态峰值强度建立了冻融循环衰减模型，结果表明，冻融循环不仅会弱化岩石的力学性能，还会使其耐久性能下降。尹彦波[31]进行了不同冻融循环次数、不同岩石状态以及不同应变率条件下大理石的动态冲击压缩试验，发现常温水对大理石强度起软化作用，低温冻结对大理石强度起强化作用；随着冻融循环次数的增加，岩石状态和应变率对岩石强度的影响逐渐减弱。

上述研究成果揭示了冻融循环对岩石动态力学性能的复杂影响[32-34]，但目前国内外学者对各种岩石的研究较多，而对特定影响情况下的岩石研究较少，对特定工程实际的指导意义不足；且现有研究大多局限于岩石的宏观动态力学响应问题，而对微观结构特征缺乏全面、深入、细致的挖掘，岩石动态力学性能相应的微观机制不甚明晰；此外目前针对分形维数与动态强度演化规律的研究相对较少。因此，本研究以大连市瓦房店市许屯镇受采矿作业影响下的砂岩为研究对象，采用多重方法对其进行试验，以期更全面地理解其力学行为和性质。首先对砂岩试样分别进行不同冻融循环次数下的冻融循环试验；然后利用分离式霍普金森压杆（split hopkinson pressure bar，简称 SHPB）试验系统对冻融砂岩开展动态冲击压缩试验，研究冻融循环次数和冲击速度对砂岩宏观力学性能和分形特性的影响，建立不同冲击速度下冻融砂岩的动态峰值应力指数衰减模型，并推导分形维数与动态强度之间的演化方程；最后采用 NMR 和 SEM 技术对冻融砂岩内部孔隙结构进行检测，从微观角度分析冻融砂岩的损伤破坏机制，旨在为寒冷地区岩石工程提供更全面的数据和更深入的理解，以确保工程的安全性和可持续性。

1　试验概况

1.1　试验装置

动态冲击压缩试验在 SHPB 试验系统上进行。该系统主要由应力波发生装置、杆件装置、数据采集及处理装置组成。试验系统中子弹和杆件的制作材料均为高强度 40Cr 合金钢材，相对密度为 7 800 kg/m^3，纵波波速为 5 195 m/s，屈服强度为 800 MPa。入射杆一端装有波形整形器，用以削弱应力波的高频振荡和弥散效应，实现应变率恒定化和试样内部应力均匀化。入射杆和透射杆表面均贴有超灵敏应变片，用以采集应变的瞬态信号。子弹以一定的速度冲击入射杆，在入射杆的端部产生半正弦应力波，应力波沿着入射杆向前传播，并在杆件与试样的界面处发生反射和透射。应力波在杆件和试样内部经过多次反射和透射后，试样两端的动态应力逐渐趋于平衡。此时，试样轴向应力（σ）、应变（ε）和应变率（$\dot{\varepsilon}$）的计算公式为[35]：

$$\sigma = \frac{A_0}{2A_s} E_0 \left[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_s(t)\right], \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t \left[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_s(t)\right] \mathrm{d}t, \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_0}{L_s} \left[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_s(t)\right], \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_s(t)$ 分别为 t 时刻的入射、反射、透射应变；A_0, E_0, c_0 分别为杆件的横截面积、弹性模量、纵波波速；A_s, L_s 分别为试样的横截面积、高度。

根据 SHPB 试验关于试样两端动态应力均匀平衡的假定，本试验对每组试样均进行了动态应力平衡校验，图 1 为试验中最具代表性试样两端动态应力随时间的变化趋势。由图 1 可知，入射波和反射波在试样入射端产生的应力与透射波在试样透射端产生的应力基本重叠一致，说明试验过程中试样两

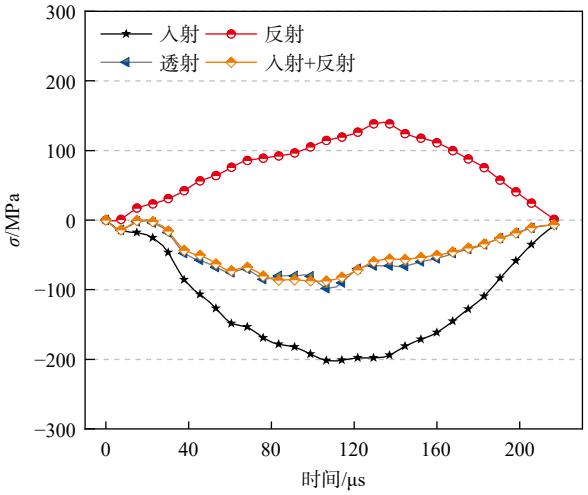


图 1　试样动态应力平衡校验

Fig. 1　Verification of dynamic stress balance for the sample

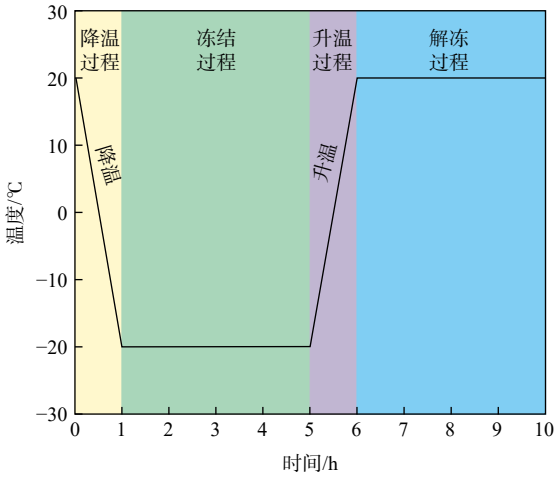


图 2　冻融循环温度时程曲线

Fig. 2　Temperature-time history curve during freeze-thaw cycle

端动态应力基本平衡，试样内部应力分布均匀，试验结果准确可靠。

1.2　试样制备

试验所用砂岩试样均取自辽宁省大连市地区，岩体质地均匀，无明显层理纹路。采用 X 射线衍射对试样的矿物组成成分进行分析，结果表明其主要的矿物成分为石英 38.4%、斜长石 29.2%、菱铁矿 4.1%、黏土矿物 23.4%、石膏 2.9%、铁白云石 2.0%。参照国际岩石力学学会(ISRM)对岩石动态冲击压缩试验试样尺寸的要求，制备高度和直径均为 50 mm 的圆柱体试样，并控制高度和直径的误差在 0.3 mm 范围内，上下端面平整度的误差在 0.02 mm 范围内。为了避免试样离散性对试验结果造成影响，试验前利用声波测速仪对所有试样的纵波波速进行测试，并剔除纵波波速偏差较大的试样。

为了消除含水率的影响，试验采用完全饱水的砂岩试样进行冻融循环处理。首先将试样放入 105℃的烘箱中烘干 48 h，之后移入干燥器中冷却至室温，得到充分干燥的试样；然后利用真空饱和仪对干燥试样进行 48 h 强制饱水，得到完全饱水的试样；最后将表面包裹有保鲜膜的饱水试样放入冻融循环试验机，分别冻融循环 0, 30, 60, 90, 120 次。冻融循环试验机的冻结、解冻温度分别为−20℃, 20℃。为了确保一个冻融循环周期内试样完全的冻结和解冻，参照申艳军等[36] 对冻融循环试验的相关建议，设置一个冻融循环周期为 10 h，其中降温、升温过程各 1 h，冻结、解冻过程各 4 h。冻融循环温度时程曲线如图 2 所示。

1.3　试验方案

试验主要分为 2 个部分：第 1 部分试验主要研究冻融砂岩的动态力学响应问题，即主要分析冻融循环次数和冲击速度对冻融砂岩各动态力学性能指标和分形特性的影响，以及建立不同冲击速度下冻融砂岩的动态峰值应力指数衰减模型和分形维数−动态强度演化方程；第 2 部分试验主要基于 NMR 和 SEM 技术分析砂岩冻融前后内部孔隙结构的变化特征，进而探讨冻融循环对砂岩的损伤破坏机理。

通过对大量类似研究成果的学习与借鉴，将砂岩试样的冻融循环次数 N 设置为 0, 30, 60, 90, 120 共 5 个等级。同时，动态冲击压缩试验中采用预试验的方法确定合适的冲击速度，试验结果表明当冲击速度 < 3 m/s 时，冻融循环次数 N=120 次的试样基本不发生破坏；当冲击速度 > 9 m/s 时，N=0 的试样破坏严重。因此，采用控制变量法，在试样每一个冻融循环次数等级下进行 3 个冲击速度 (3, 6, 9 m/s) 的试验。试验共分为 15 组，并且每一组分别进行 3 次独立的重复试验，选取具有代表性的数据进行处理分析。表 1 给出了不同冲击速度下冻融砂岩试样的动态冲击压缩试验结果。

2　试验结果分析

2.1　破碎分形特性分析

不同冲击速度下冻融砂岩试样的破坏模式整体上均为粉碎破坏，如图 3 所示。从图中可以看出，随着冲击速度和冻融循环次数的增加，冲击荷载作用下试样的破碎程度不断加深，碎块尺度不断减小，碎块数量和粉末占比不断增多。

为了更加准确的量化冲击速度和冻融循环次数对试样破碎程度的影响，基于冲击破碎后碎块的尺

表 1　砂岩试样动态冲击压缩试验结果

Table 1　Results of dynamic impact compression tests on sandstone samples

试样编号	冲击速度/(m·s^{-1})	冻融循环次数N	动态峰值应力/MPa	动态峰值应变/10^{-3}	动态弹性模量/GPa
DY-3-0	3	0	144.27	1.68	315.65
DY-3-30		30	132.53	5.05	80.73
DY-3-60		60	118.36	5.38	88.19
DY-3-90		90	101.21	5.21	77.11
DY-3-120		120	94.98	5.49	37.73
DY-6-0	6	0	182.66	8.77	144.11
DY-6-30		30	171.67	8.17	24.17
DY-6-60		60	145.56	12.66	23.60
DY-6-90		90	132.05	9.76	69.10
DY-6-120		120	119.45	8.17	21.52
DY-9-0	9	0	210.96	9.80	102.42
DY-9-30		30	189.23	9.43	111.01
DY-9-60		60	172.36	7.72	57.17
DY-9-90		90	158.67	14.81	86.52
DY-9-120		120	137.98	10.11	62.95

注: “DY-6-30”中“DY”表示动态压缩; 下同

度和质量占比计算了各组试样的分形维数。采用 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 17.5, 20, 25 mm 8 个孔径的分级筛对破碎后的试样碎块进行筛分, 如图 4 所示, 分形维数 D 可通过式(4)计算得到[37]:

$$\frac{M_r}{M_t}=\left(\frac{r}{r_m}\right)^{3-D}, \tag{4}$$

式中: r 为破碎试样的碎块尺寸; r_m 为破碎试样的最大碎块尺寸; M_r 为尺寸小于 r 碎块的质量; M_t 为所有碎块的质量。

当对式(4)进行 $\lg(M_r/M_t)$–$\lg(r/r_m)$ 绘图时, 曲线的斜率即为 3-D。图 5 为不同冲击速度下冻融砂岩试样的 $\lg(M_r/M_t)$–$\lg(r/r_m)$ 曲线。表 2 为所有曲线的公式拟合及分形维数的计算结果。

表 2　$\lg(M_r/M_t)$–$\lg(r/r_m)$ 曲线公式拟合及分形维数计算结果

Table 2　Fitting formula for the $\lg(M_r/M_t)$–$\lg(r/r_m)$ curves and calibrated fractal dimensions

试样编号	冲击速度/(m·s^{-1})	冻融循环次数N	拟合曲线(相关度R^2)	分形维数
DY-3-0	3	0	y=1.141 5x−0.090 0(0.888 6)	1.858 5
DY-3-30		30	y=1.093 2x−0.044 1(0.962 8)	1.906 8
DY-3-60		60	y=1.001x−0.010 5(0.954 9)	1.999 0
DY-3-90		90	y=0.977 0x−0.029 1(0.957 4)	2.023 0
DY-3-120		120	y=0.893 7x+0.010 9(0.959 3)	2.106 3
DY-6-0	6	0	y=1.066 2x+0.001 1(0.993 5)	1.933 8
DY-6-30		30	y=1.035 3x+0.002 1(0.992 1)	1.964 7
DY-6-60		60	y=0.904 3x−0.012 8(0.993 4)	2.095 7
DY-6-90		90	y=0.865 4x+0.014 6(0.984 4)	2.134 6
DY-6-120		120	y=0.830 4x+0.061 7(0.977 9)	2.169 6
DY-9-0	9	0	y=0.873 7x+0.044 8(0.985 1)	2.126 3
DY-9-30		30	y=0.869 9x+0.040 4(0.993 5)	2.130 1
DY-9-60		60	y=0.756 6x−0.011 1(0.954 6)	2.243 4
DY-9-90		90	y=0.752 7x+0.028 9(0.956 3)	2.247 3
DY-9-120		120	y=0.728 7x+0.039 1(0.964 4)	2.271 3

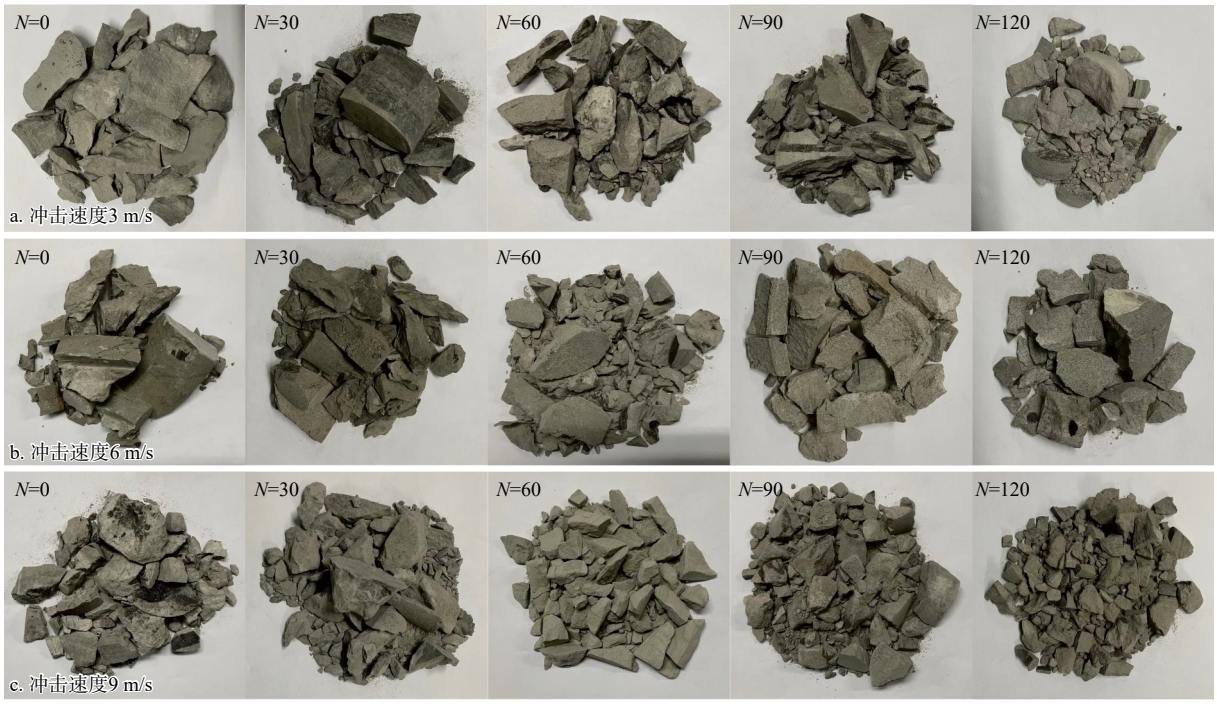


图 3　不同冲击速度下冻融砂岩试样破坏模式（N. 冻融循环次数; 下同）

Fig. 3　Failure patterns of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

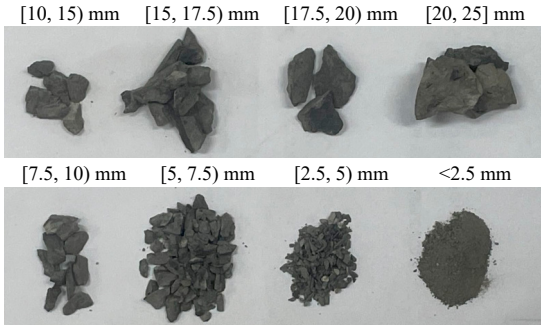


图 4　试样（DY-9-90）碎块筛分

Fig. 4　Sieving of fragments from sample DY-9-90

图 6 为不同冲击速度下冻融砂岩试样的分形维数曲线。根据图 6 可知，在相同冻融循环次数下，试样的分形维数随冲击速度的增大逐渐提高。冲击荷载所携带的能量一部分用于促进试样内部孔洞、裂隙的发展，另一部分则以弹性能的形式储存在试样内部。当进入卸载阶段且卸载力小于弹性力时，积聚在试样内部的弹性能被释放，进而转化为试样破碎所需要的能量。当冲击速度较大时，冲击荷载所携带的能量较多，同时转化为弹性能的能量占比较高，因而大量的弹性能被储存于试样内部。进入卸载阶段后大量弹性能被释放，导致试样被破碎为尺度较小的碎块和岩屑粉末，试样的破碎程度严重，甚至过剩的弹性能被转化为岩屑粉末的飞射动能。在相同冲击速度下，试样的分形维数随冻融循环次数的增加逐渐提高。这是由于随着冻融循环次数的增加，水冰反复相变会导致试样内部孔洞、裂隙大量发育，试样的损伤劣化程度加深，进而导致冲击荷载作用下试样的破碎程度更加严重。

因此，冲击速度和冻融循环次数均影响试样的破碎程度，进而影响其分形维数的大小。冲击速度越大、冻融循环次数越多，试样的破碎程度越高，分形维数的数值就越大。冻融循环次数对试样破碎程度的影响不如冲击速度。

2.2　动态力学特性分析

2.2.1　动态应力–应变曲线

使用 SHPB 试验系统对冻融砂岩试样进行动态

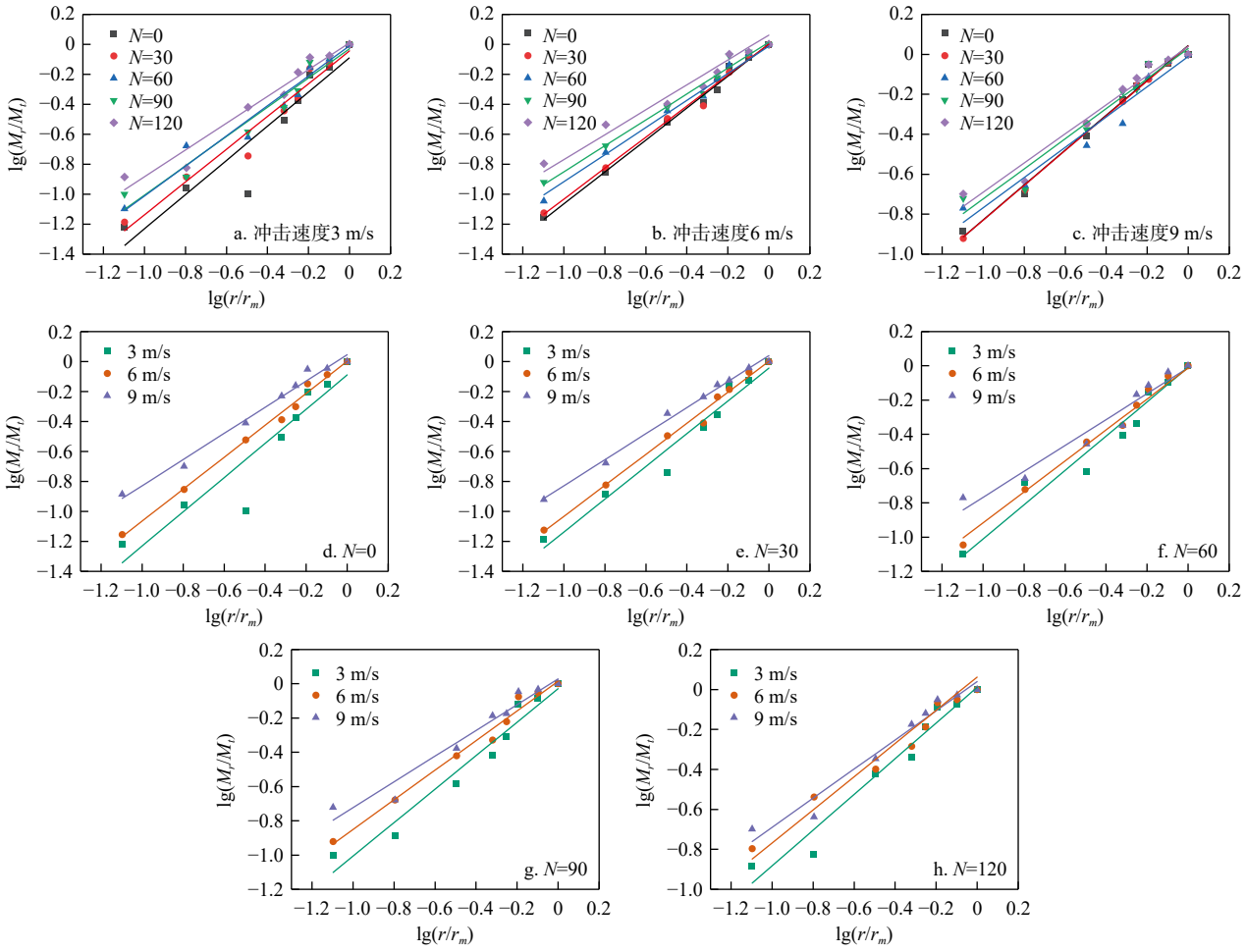


图 5　$\lg(M_r/M_t)$–$\lg(r/r_m)$ 曲线（r 为破碎试样的碎块尺寸；r_m 为破碎试样的最大碎块尺寸；M_r 为尺寸小于 r 碎块的质量；M_t 为所有碎块的质量）

Fig. 5　Curves of $\lg(M_r/M_t)$ verus $\lg(r/r_m)$

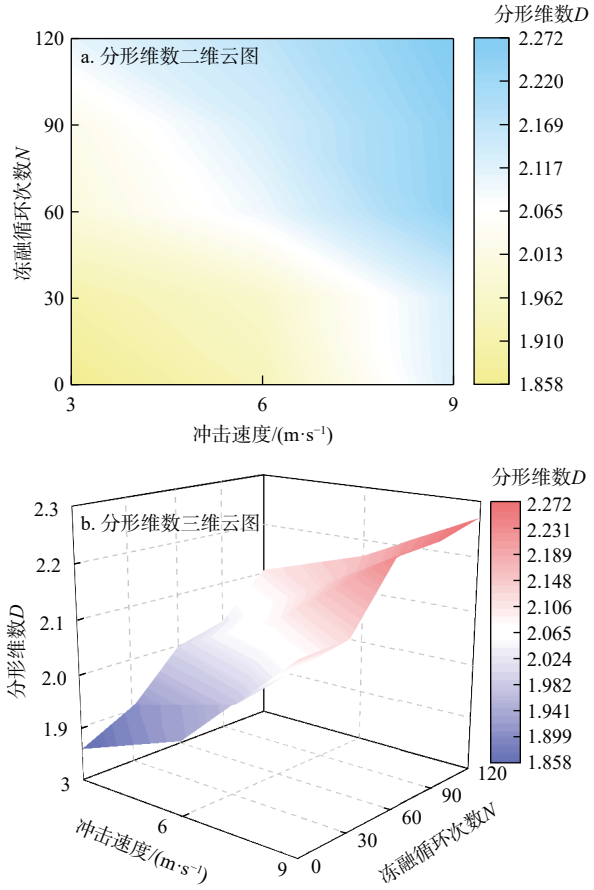


图 6　不同冲击速度下冻融砂岩试样分形维数

Fig. 6　Fractal dimensions of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

冲击压缩试验并对试验数据进行处理分析，得到不同冲击速度下试样的动态应力−应变曲线，如图 7 所示。可以看出，冻融砂岩的动态应力−应变曲线大致可分为 3 个阶段，以 DY-3-120 试样为例，曲线可分为弹性阶段（*OA* 段）、屈服阶段（*AB* 段）和破坏阶段（*BC* 段）。在弹性阶段，试样的应力水平随应变的增加而急速上升，动态应力−应变曲线近似呈现线性，且斜率基本保持不变，冲击荷载所携带的能量转化为弹性能存储于试样内部，试样内部的孔洞、裂隙未得到发展连通，对试样造成的影响较小。随着应力、应变水平的进一步增大，动态应力−应变曲线逐渐进入屈服阶段，应力随应变增加的速度减缓，曲线的斜率动态减小，且当达到试样动态峰值应力时减小至 0，曲线的屈服平台明显，此阶段试样存储的弹性能被释放并用于促进试样内部孔洞、裂隙的发展连通。进入破坏阶段后，试样的应力水平随应变的增加而快速下降，试样内部的孔洞、裂隙完全扩展贯通，试样发生宏观破坏，同时，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：当冲击速度为 3 m/s 时，5 组冻融循环次数（*N*=0, 30, 60, 90, 120）下，试样的动态应力−应变曲线峰后特征均为“峰后塑性”（黑色虚线）；当冲击速度为 6 m/s 时，*N*=0, 30 和 60 试样的峰后特征为“应力跌落”（灰色虚线），而 *N*=90 和 120 试样的峰后特征为“应变回弹”（红色虚线）；当冲击速度为 9 m/s 时，试样的峰后特征则均为“应变回弹”。

从图 7 中可以看出，冻融循环次数和冲击速度的变化，均会对动态应力−应变曲线的形态产生明显影响。当冻融循环次数一定时，弹性阶段的曲线长度随冲击速度的增大而增长，试样表现出更强的冲击韧性；冲击速度越大，曲线的屈服平台整体上相对更加明显，表明试样韧性增强甚至产生不可恢复的塑性变形；冲击速度越大，由于试样内部存储的弹性能未得到完全释放而在破坏阶段越容易发生“应力跌落”甚至是“应变回弹”现象，试样呈现明显的脆性破坏特征。当冲击速度一定时，弹性阶段的曲线斜率随冻融循环次数的增加而减小，表明冻融循环作用使得试样被逐渐软化，试样抵抗变形的能力也相应变弱；屈服阶段的曲线斜率随冻融循环次数的增加而增大，表明冻融循环次数越多，试样的脆性特征越明显；相较冲击速度，冻融循环次数对试样破坏阶段曲线形态特征的影响不甚明显。

2.2.2　动态强度特性

根据各组试样的动态应力−应变曲线得到不同冲击速度下冻融砂岩试样的动态峰值应力，如图 8 所示。由图 8 可知，以冲击速度为 3 m/s 时试样的动态峰值应力为基准，当冲击速度为 6 m/s 时，5 组冻融循环次数（*N*=0, 30, 60, 90, 120）下，试样动态峰值应力的增幅分别为 26.62%, 29.53%, 22.98%, 30.47%, 25.77%；当冲击速度为 9 m/s 时，增幅分别为 46.23%, 42.78%, 45.62%, 56.77%, 45.28%。由此可知，在相同冻融循环次数下，试样的动态峰值应力存在明显的率相关效应，即当冻融循环次数一定时，随着冲击速度（应变率）的增大，试样动态峰值应力呈现增大趋势，其主要原因为：在冲击荷载作用下，试样内部的孔洞、裂隙不断发育联合，最终导致试样被破坏。但不论是孔洞、裂隙的发展还是试样塑性变形的产生均需要时间，而非瞬态。当冲击速度较小时，试样具有充足的时间实现孔洞、裂隙的发展和塑性变形的产生，此时试样的动态峰值应力较小。当冲击速度较大时，孔洞、裂隙的发展和塑性变形的产生跟不上冲击速度，孔洞、裂隙不但不发展反而被压密，从而对试样的破坏强度起到强化作用，此时试样的动态峰值应力较大。

同时，在相同冲击速度下，随着冻融循环次数的

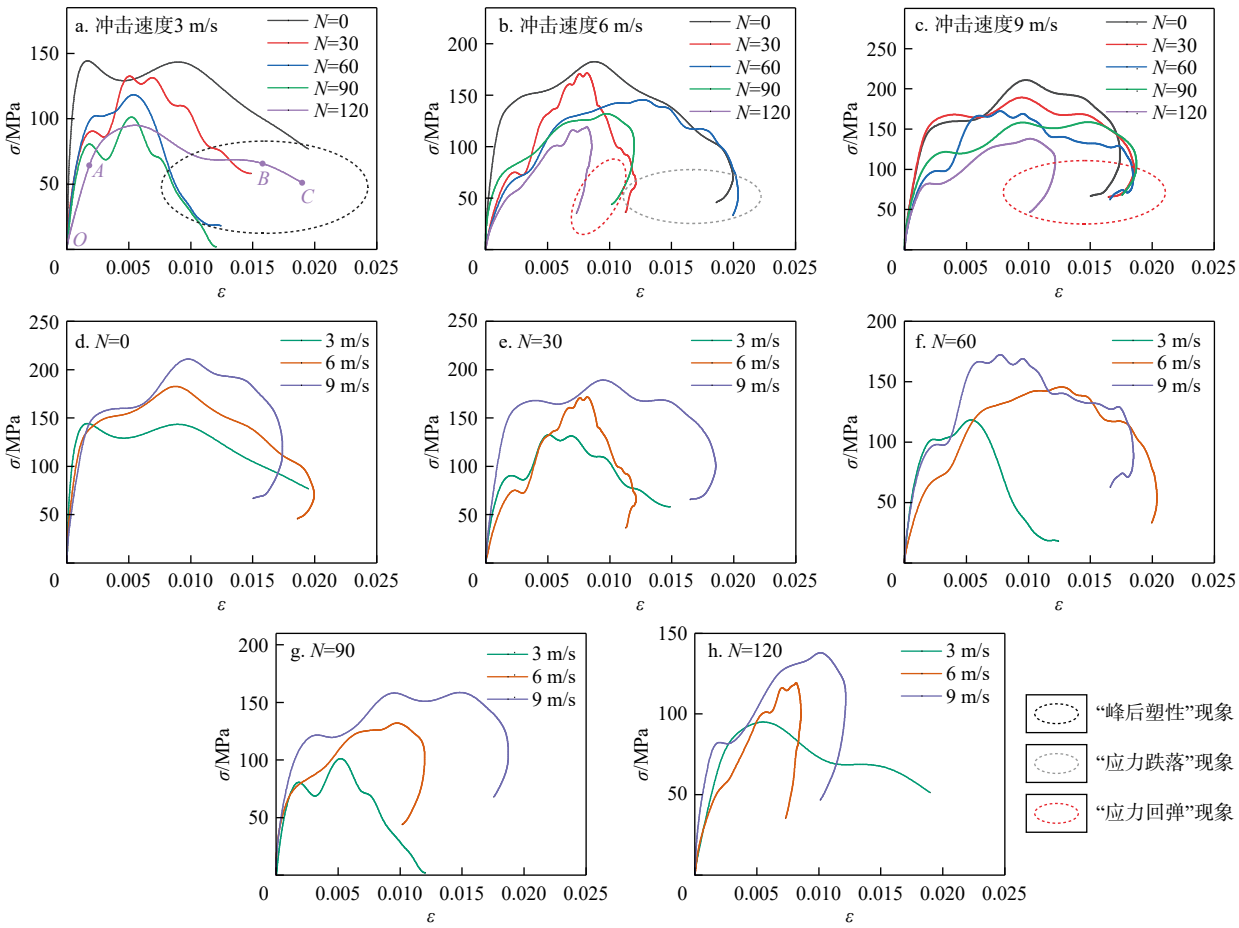


图 7　不同冲击速度下冻融砂岩试样动态应力 (σ)–应变 (ε) 曲线（*OA* 段为弹性阶段；*AB* 段为屈服阶段；*BC* 段为破坏阶段）

Fig. 7　Dynamic stress-strain curves of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

增加，试样的动态峰值应力呈现劣化趋势。以未冻融（*N*=0）试样的动态峰值应力为参考，当冲击速度为 3 m/s 时，4 组冻融循环次数（*N*=30, 60, 90, 120）下，试样动态峰值应力的降幅分别为 8.13%, 17.96%, 29.84%, 34.17%；当冲击速度为 6 m/s 时，降幅分别为 6.02%, 20.31%, 27.71%, 34.60%；当冲击速度为 9 m/s 时，降幅则分别为 10.30%, 18.30%, 24.79%, 34.59%。分析可知，当冲击速度一定时，试样的动态峰值应力随冻融循环次数的增加而逐渐降低。这表明在冻融循环的过程中，当温度降低时，试样内部的自由水冻结成冰会产生约 9% 的体积膨胀，进而会对孔隙壁产生挤压形成冻胀力，当矿物晶体自身的拉伸强度弱于冻胀力时，试样内部便会产生新的孔洞、裂隙。当温度升高时，冰晶体会重新融化成自由水，并向新的孔洞、裂隙空间迁移。因此，当冻融循环次数增加时，上述过程会被不断重复，损伤劣化便会在试样内部不断积聚，最终导致试样动态峰值应力的降低。

综上所述，冲击速度和冻融循环次数均影响试样的动态峰值应力。冲击速度越大、冻融循环次数越少，试样的动态峰值应力就越大。

衰减常数一般用来评价冻融循环对岩石的损伤劣化程度[38]，其值越大表明损伤劣化程度越严重。基于衰减常数的冻融岩石衰减模型表达形式通常分为指数和线性 2 种：

$$\sigma_N = \sigma_0 \mathrm{e}^{-2N}, \tag{5}$$

$$\sigma_N = \sigma_0 - \lambda N, \tag{6}$$

式中：σ_N 为冻融循环后岩石的动态峰值应力；σ_0 为未冻融岩石的动态峰值应力；λ 为衰减常数；N 为冻融循环次数。

将试验所得各组冻融砂岩试样的动态峰值应力带入式(5)和(6)进行拟合，发现 3 种冲击速度下试样的衰减模型更加符合指数表达形式，如图 9 所示，具体可表示为：

$$\begin{aligned}
\sigma'_N &= 144.266\,5\mathrm{e}^{-0.003\,6N} (R^2 = 0.985\,6) \\
\sigma''_N &= 182.664\,7\mathrm{e}^{-0.003\,5N} (R^2 = 0.978\,7) \\
\sigma'''_N &= 210.956\,3\mathrm{e}^{-0.003\,4N} (R^2 = 0.994\,2)
\end{aligned}, \tag{7}$$

式中：σ'_N、σ''_N、σ'''_N 分别为冲击速度为 3, 6, 9 m/s

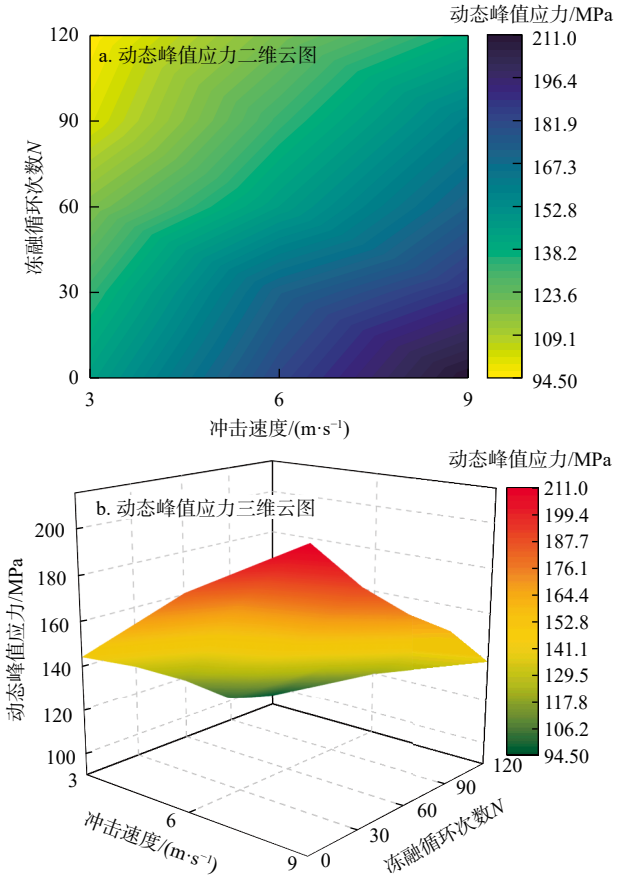


图 8　不同冲击速度下冻融砂岩试样动态峰值应力

Fig. 8　Dynamic peak stress of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

时，冻融循环 N 次后试样的动态峰值应力。随着冲击速度的增大，冻融砂岩衰减常数呈现减小趋势，这说明冲击速度可以在一定程度上补偿冻融循环对试样的损伤劣化作用。

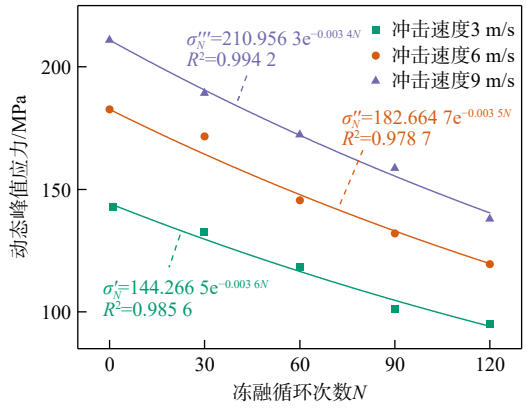
为了反映岩石对冻融循环作用的敏感性和耐久性，定义岩石的半衰期为岩石冻融状态下动态峰值应力衰减至未冻融状态下动态峰值应力的一半时，所经历的冻融循环次数[38]：

$$\sigma_{N_{1/2}} = \frac{1}{2}\sigma_0, \tag{8}$$

联立式(5)和(8)可得岩石半衰期 $N_{1/2}$ 为：

$$N_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}。 \tag{9}$$

将式(7)所得衰减常数带入式(9)计算可知，3 种冲击速度下试样的半衰期分别为 193，198，204 次。根据殷英政等[39]对我国多个城市当量冻融循环次数的统计，大连地区的当量冻融循环次数为 1.42，即大连砂岩每年大约经历 1.42 次冻融循环。因此，在 3 种冲击速度下，大连砂岩大约分别经过 136，139，144 a 后其动态峰值应力劣化至未冻融状态下动态峰值应力的一半。



σ_N'、σ_N''、σ_N''' 分别为冲击速度为 3，6，9 m/s 时，冻融循环 N 次后试样的动态峰值应力

图 9　不同冲击速度下冻融砂岩衰减模型

Fig. 9　Attenuation models of freeze-thawed sandstone under different impact velocities

峰值应力的一半。

为了进一步分析分形维数与动态强度之间的演化规律，由式(7)可知，不同冲击速度下冻融砂岩的动态峰值应力与冻融循环次数呈指数关系，其关系式如下：

$$\sigma_N = \sigma_0 e^{-\lambda N}, \tag{10}$$

式中：σ_0，λ 的取值如表 3 所示。

表 3　不同冲击速度下冻融砂岩试样动态峰值应力参数

Table 3　Parameters of the dynamic peak stress model for freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

冲击速度/(m·s⁻¹)	σ_0/MPa	λ
3	144.266 5	0.003 6
6	182.664 7	0.003 5
9	210.956 3	0.003 4

又由图 10 可知，不同冲击速度下冻融砂岩的分形维数与冻融循环次数呈线性关系，可采用线性拟合得到分形维数与冻融循环次数之间的关系函数如下：

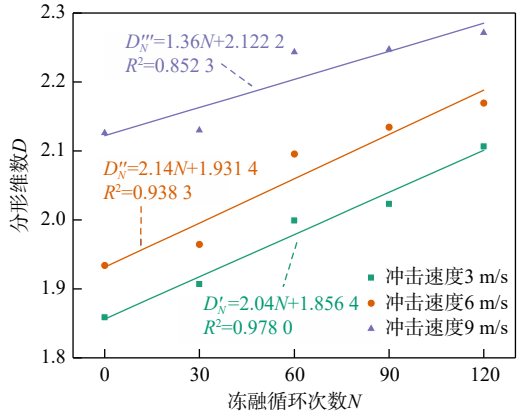
$$D_N = aN + b, \tag{11}$$

式中：D_N 为冻融循环 N 次后，不同冲击速度下砂岩试样破坏状态下的分形维数；a，b 的取值如表 4 所示。

联立式(10)和(11)得到分形维数与动态峰值应力之间的演化方程如下：

$$\sigma_N = \sigma_0 e^{\frac{\lambda}{a}(b-D_N)} = \sigma_0 \exp\left[\frac{\lambda}{a}(b - D_N)\right]。 \tag{12}$$

由式(12)可知，冻融砂岩动态峰值应力与分形维数之间呈反比例关系，分形维数越小，说明砂岩试



D'_N、D''_N、D'''_N 分别为冲击速度为 3, 6, 9 m/s 时，冻融循环 N 次后砂岩试样破坏状态下的分形维数

图 10　不同冲击速度下冻融砂岩试样分形维数与冻融循环次数关系拟合

Fig. 10　Fitted relationships between fractal dimension and number of freeze-thaw cycles for freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

表 4　不同冲击速度下冻融砂岩试样分形维数的参数 (*a*, *b*)

Table 4　Parameters of the fractal dimension model for freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

冲击速度/(m·s^{-1})	a/10^{-3}	b
3	2.04	1.8564
6	2.14	1.9314
9	1.36	2.1222

样整体密实程度越高，冻融循环对试样内部孔隙结构的损伤程度越小，动态峰值应力越大。通过函数方程式，能够实现不同冲击速度下冻融砂岩动态强度与分形维数数值之间的转化，增加了分形维数的使用途径，使其不仅能够定量的描述冲击破坏后试样的破碎程度，还能进一步预测出试样的动态峰值应力，提高了数据的利用率及获取灵活性。

2.2.3　动态变形特性

图 11 为不同冲击速度下冻融砂岩试样的动态峰值应变图。由图 11 可知，试样的动态峰值应变也存在明显的率相关效应，即当冻融循环次数一定时，随着冲击速度的增大，试样动态峰值应变整体上呈现增大趋势。同时，冻融循环作为一种强风化作用，通过改变试样内部孔隙结构特征进而影响试样的宏观力学性能。因此，冻融循环作用不仅会弱化试样的动态强度，还会削弱试样抵抗动态变形的能力，使试样动态峰值应变整体上随冻融循环次数的增加而增大。从图 11 中还可以发现，冻融砂岩试样并未表现出应变率敏感材料所具有的典型“动脆”现象，即

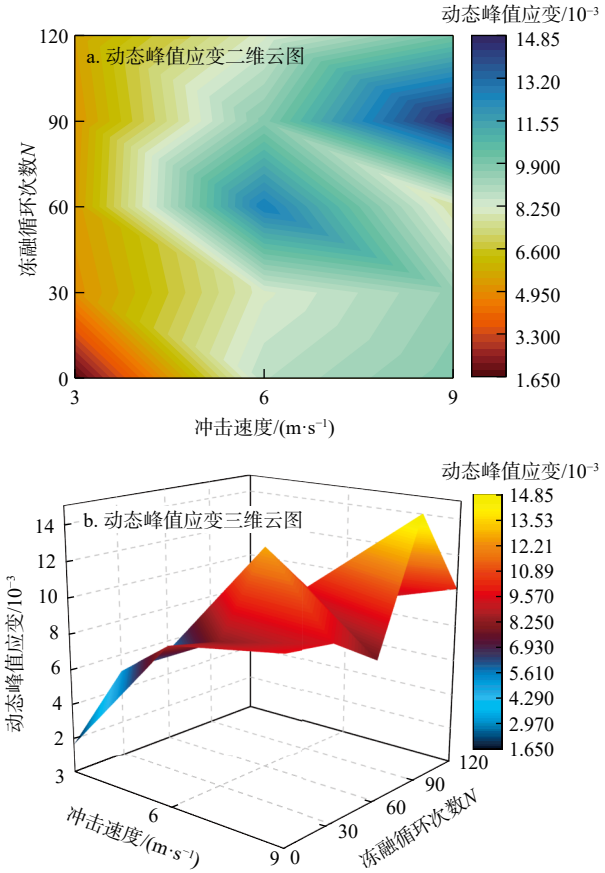


图 11　不同冲击速度下冻融砂岩试样动态峰值应变

Fig. 11　Dynamic peak strain of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

试样动态峰值应变随冲击速度的增大而减小。同时，当冲击速度为 6 和 9 m/s 时，动态峰值应变随冻融循环次数增加而增大的规律不甚明显。这是因为砂岩自身的孔隙性及冻融循环作用使得试样内部存在大量的孔洞、裂隙，在冲击荷载作用下，试样的破坏是应变率硬化和损伤软化(孔隙扩展连通)共同作用、相互影响的结果，因而单一影响因素下试样动态峰值应变的规律性不强。

动态弹性模量是衡量岩石抵抗动态变形能力强弱的重要指标。参照李夕兵等[40]对岩石动态弹性模量的研究方法，定义动态应力−应变曲线中 50% 峰值应力点处，应力与应变的比值为动态弹性模量。图 12 为不同冲击速度下冻融砂岩试样的动态弹性模量图。从图 12 中可以看出，试样动态弹性模量同样存在率相关效应。同时，在相同冲击速度下，随着冻融循环次数的增加，试样动态弹性模量虽有一定的波动，但整体上呈现下降趋势。这可能是因为试样在受到冻融损伤后，其内部产生较多孔洞、裂隙，试样的密实程度大大降低，完整性被严重破坏，进而导致试样抵抗动态变形的能力减弱。

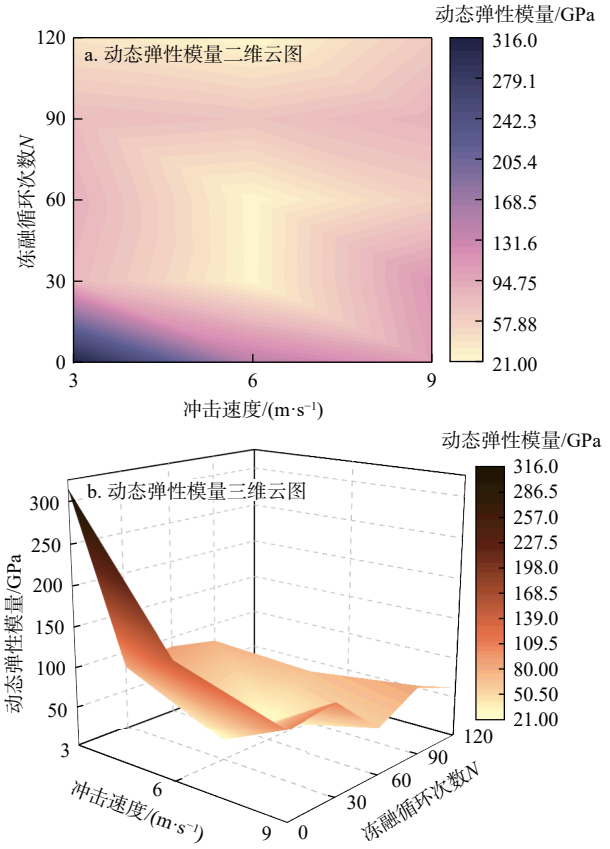


图 12　不同冲击速度下冻融砂岩试样动态弹性模量

Fig. 12　Dynamic elastic modulus of freeze-thawed sandstone samples under different impact velocities

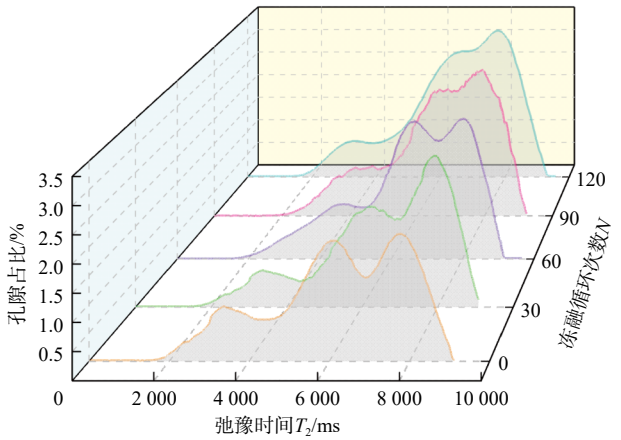


图 13　冻融砂岩试样核磁共振（T_2）谱图

Fig. 13　T_2 spectra for freeze-thawed sandstone samples

2.3　微观损伤特性分析

2.3.1　核磁共振 T_2 谱分布

核磁共振作为一种无损检测技术，能够在不破坏试样的基础上实现对试样内部孔隙结构的测试，其基本原理为利用试样中水分子氢核的弛豫特性，获取孔隙水在试样中的数量及分布状态，进而获取试样的微观孔隙结构特征。图 13 为不同冻融循环次数下砂岩试样的 T_2 谱图。

由图 13 可知，冻融试样的核磁共振 T_2 谱整体上呈现 3 峰分布特征，其中第 2 峰和第 3 峰表现出明显的波峰特征，而第 1 峰的波峰特征不甚明显。根据核磁共振试验的相关理论，弛豫时间 T_2 与孔隙半径成正比，即弛豫时间 T_2 越大的孔隙其孔隙半径越大。因此，第 1 峰对应的孔隙为冻融试样内部的微小孔，第 2 峰对应为中孔，第 3 峰对应为大孔及裂隙。可以看出冻融试样内部的中、大孔及裂隙占主导地位，冻融试样的孔隙度相对较大。同时，随着冻融循环次数的增加，冻融试样内部微小孔的占比逐渐减小，中、大孔及裂隙的占比逐渐增大，说明冻融循环次数的增加使得试样内部微小孔逐渐演化为中、大孔及裂隙。另外，随着冻融循环次数的增加，核磁共振 T_2 谱所围面积逐渐增大，这表明冻融循环过程中产生的冻胀力及水化作用，使得试样内部产生大量的微小孔和中孔，冻融循环次数的增加使得微小孔和中孔不断发展连通，最终形成大孔及裂隙，试件内部产生的累计损伤不断增大。

2.3.2　扫描电镜（SEM）检测

利用扫描电镜对不同冻融循环次数下砂岩试样的微观结构特征进行观察，如图 14 所示。从图中可以看出，冻融循环作用会对试样产生不同程度的损伤劣化。当 N=0 时，试样内部结构较为完整，矿物晶体排列紧密，胶结物质填充均匀，无明显的大孔洞及裂隙，仅有少部分原生微小孔洞；当 N=30 时，试样中的可溶性胶结物质被自由水溶解、溶蚀，使得少部分矿物晶体之间的胶结物质缺失，胶结物质内部产生少量孔洞；当 N=60 时，胶结物质继续被溶解，其内部孔洞数量及尺寸增加，同时，孔隙水冻结成冰产生的冻胀力超过矿物基质之间的黏结力，使得矿物晶体和胶结物质之间产生肉眼可见的裂隙；当 N=90 时，孔洞和裂隙不断发育，数量增多；当 N=120 时，除孔洞和裂隙发育完全、数量较多外，矿物晶体内部出现了许多长度较长的裂隙。综合上述 SEM 结果可知，冻融循环次数越多，试样内部积聚的能量越多，产生的冻融损伤效应越明显。

总体来说，导致试样产生冻融损伤的因素有很多。当温度升高时，试样内部自由水的赋存会对试样的物理、化学及力学性质产生影响。同时，自由水一般分布于矿物基质颗粒之间和孔洞、裂隙之内。分布于矿物基质颗粒之间的自由水可起到润滑的作用，但同时也会弱化试样的骨架支撑效果，使得试样抵抗变形的能力下降；分布于孔洞、裂隙之内的自由水则可溶解试样中的可溶性胶结物质，从而导致试样的密实度降低，胶结物质内部产生微小孔洞。当

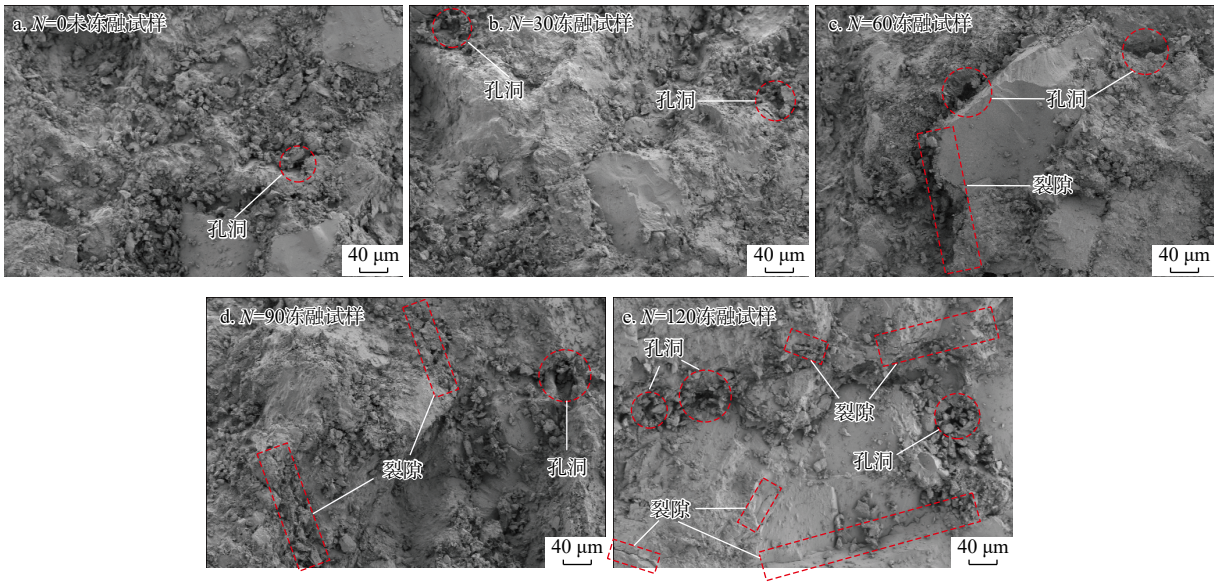


图 14　不同冻融循环次数下的冻融砂岩试样扫描电镜（SEM）图像

Fig. 14　SEM image for freeze-thawed sandstone samples under different freeze-thaw cycles

温度降低时，试样内部矿物基质热膨胀系数的不同导致其体积收缩程度不同，进而导致矿物基质之间的联结作用减弱甚至产生裂隙。除此之外，水冰相变体积膨胀会对孔隙壁形成挤压产生冻胀力，当冻胀力大于矿物基质之间的黏结力时，矿物晶体和胶结物质之间便会产生孔洞及裂隙。同时，当冻胀力大于矿物晶体自身的拉伸强度时，矿物晶体内部也会产生裂隙，从而对其完整性产生破坏。

多种机制的共同作用，使得试样内部的孔隙网格不断被拓展。当温度升高冰晶体融化之后，自由水会迁移到新的孔洞、裂隙空间中。随着下一次冻融循环的发生，上述冻融损伤过程会被重复，试样的损伤劣化程度则不断加剧。

3　结　论

（1）不同冲击速度下冻融砂岩的破坏模式整体上均为粉碎破坏。随着冻融循环次数和冲击速度的增加，冲击荷载作用下砂岩的破碎程度加深，碎块尺度减小，碎块数量和粉末占比增多，分形维数增大。冻融循环次数对砂岩破碎程度的影响不如冲击速度。

（2）当冲击速度一定时，冻融循环次数的增加使得砂岩动态力学性能不断被劣化，具体表现为峰值应力和弹性模量减小，峰值应变增大。同时，各动态力学性能指标均具有率相关效应。通过建立能够预测反复冻融循环后砂岩动态峰值应力的衰减模型，揭示了冲击速度的增大可以在一定程度上补偿冻融循环对砂岩的损伤劣化作用，使其衰减常数减小，半衰期延后。

（3）通过分析不同冲击速度下冻融砂岩动态峰值应力与分形维数的相关性，建立了适用于大连地区砂岩动态峰值应力与分形维数的关系函数，使得分形维数不仅可以定量描述冲击破坏后砂岩的破碎程度，还能获取动态峰值应力的数值，为岩石工程的性能评估、预测以及矿产资源的爆破开采提供有力工具。

（4）随着冻融循环次数的增加，砂岩内部可溶性胶结物质被溶解、溶蚀，矿物晶体和胶结物质之间的粘结作用减弱，冻胀力逐渐超过矿物晶体自身的拉伸极限，微小孔有逐渐演化成中、大孔及裂隙的趋势，孔隙数量增多。砂岩的内部损伤程度加剧，密实程度降低，完整性被破坏。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范：GB50176-2016[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB50176-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.（in Chinese）

[2] 薛翊国，孔凡猛，杨为民，等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题 [J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(3)：445-468.
XUE Y G, KONG F M, YANG W M, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along

Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468. (in Chinese with English abstract)

[3] QI C Q, LI Q P, MA X F, et al. Deterioration of fresh sandstone caused by experimental freeze-thaw weathering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 214: 103956.

[4] 陈国庆, 万亿, 孙祥, 等. 不同温差冻融后砂岩蠕变特性及分数阶损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1962-1975.
CHEN G Q, WAN Y, SUN X, et al. Research on creep behaviors and fractional order damage model of sandstone subjected to freeze-thaw cycles in different temperature ranges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1962-1975. (in Chinese with English abstract)

[5] 蒋婷婷, 潘华利, 艾一帆, 等. 冻融循环及含水率对冰碛土力学特性影响 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 238-252.
JIANG T T, PAN H L, AI Y F, et al. Effect of freeze-thaw cycles and water content on the mechanical properties of moraine soil[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 238-252. (in Chinese with English abstract)

[6] 李俊, 张伟丽, 陈宗武, 等. 冻融循环对 MICP 加固土性能的影响 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 175-184.
LI J, ZHANG W L, CHEN Z W, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the properties of MICP-treated soil[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(1): 175-184. (in Chinese with English abstract)

[7] 钟博, 宋玲, 雷兵兵, 等. 冻融循环作用下土工格室加筋粗粒土大型三轴试验 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(6): 189-198.
ZHONG B, SONG L, LEI B B, et al. Large-scale triaxial test analysis on geocell-reinforced effect of coarsegrained soil under freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(6): 189-198. (in Chinese with English abstract)

[8] ZHANG H M, MENG X Z, YANG G S. A study on mechanical properties and damage model of rock subjected to freeze-thaw cycles and confining pressure[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 174: 103056.

[9] WENG L, WU Z J, LIU Q S. Dynamic mechanical properties of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(10): 4381-4401.

[10] LIU C J, DENG H W, ZHAO H T, et al. Effects of freeze-thaw treatment on the dynamic tensile strength of granite using the Brazilian test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 327-332.

[11] 陆翔, 周伟, 才庆祥, 等. 冻融循环下泥岩力学特性及细观破裂机理研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 819-829.
LU X, ZHOU W, CAI Q X, et al. Mechanical properties and meso fracture mechanism of mudstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 819-829. (in Chinese with English abstract)

[12] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 冻融循环作用下层理砂岩物理特性及劣化模型 [J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 632-641.
ZHENG G H, XU J Y, WANG P, et al. Physical characteristics and degradation model of stratified sandstone under freeze-thaw cycling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 632-641. (in Chinese with English abstract)

[13] ESLAMI J, WALBERT C, BEAUCOUR A L, et al. Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 420-429.

[14] CHEN L, WU P, CHEN Y L, et al. Experimental study on physical-mechanical properties and fracture behaviors of saturated yellow sandstone considering coupling effect of freeze-thaw and specimen inclination[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1029.

[15] 刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 等. 冻融循环作用下石窟砂岩物理力学性质损伤规律研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(5): 943-954.
LIU X F, GUO Z Y, WANG L G, et al. Experimental study on physical and mechanical property damage of grotto sandstone in freeze-thaw cycle[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5): 943-954. (in Chinese with English abstract)

[16] 杨鸿锐, 刘平, 孙博, 等. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 545-555.
YANG H R, LIU P, SUN B, et al. Study on damage mechanisms of the microstructure of sandy conglomerate at Maijishan grottoes under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 545-555. (in Chinese with English abstract).

[17] 刘杰, 张瀚, 王瑞红, 等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394.
LIU J, ZHANG H, WANG R H, et al. Investigation of progressive damage and deterioration of sandstone under freezing-thawing cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1381-1394. (in Chinese with English abstract)

[18] 秦庆词, 李克钢, 李明亮, 等. 基于核磁共振技术的白云岩微观损伤致劣机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 2944-2954.
QIN Q C, LI K G, LI M L, et al. Study on the deterioration mechanism of dolomite microscopic damage based on NMR technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2944-2954. (in Chinese with English abstract)

[19] LI J L, KAUNDA R B, ZHOU K P. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 133-141.

[20] HOU C, JIN X G, HE J, et al. Experimental studies on the pore structure and mechanical properties of anhydrite rock under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 781-797.

[21] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 830-839.
LIU H, LIN J H, YANG G S, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 830-839. (in Chinese with English abstract)

[22] 宋彦琦, 马宏发, 刘济琛, 等. 冻融灰岩单轴声发射损伤特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 2603-2614.
SONG Y Q, MA H F, LIU J C, et al. Experimental investigation on the damage characteristics of freeze-thaw limestone by the uniaxi-

al compression and acoustic emission monitoring tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2603-2614. (in Chinese with English abstract)

[23] LI K S, LI M T, ZHANG D, et al. Effect of moisture content on bursting liability of sandstone due to freeze-thaw action[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(1): 8832528.

[24] 张亮, 牛富俊, 刘明浩, 等. 冻融损伤与围压对层状岩石强度各向异性的影响 [J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 366-375.
ZHANG L, NIU F J, LIU M H, et al. Effects of freeze-thaw damage and confining pressure on anisotropy strength of bedded rock[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2): 366-375. (in Chinese with English abstract)

[25] FU H L, ZHANG J B, HUANG Z, et al. A statistical model for predicting the triaxial compressive strength of transversely isotropic rocks subjected to freeze-thaw cycling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 237-248.

[26] 刘德俊, 浦海, 沙子恒, 等. 冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 60-67.
LIU D J, PU H, SHA Z H, et al. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 60-67. (in Chinese with English abstract)

[27] 张阳阳, 黄伟. 冻融循环后红砂岩静动态劈裂拉伸性能对比分析 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 94-99.
ZHANG Y Y, HUANG W. Comparative analysis of static and dynamic split tensile properties of red sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 94-99. (in Chinese with English abstract)

[28] CHANG S, XU J Y, BAI E L, et al. Static and dynamic mechanical properties and deterioration of bedding sandstone subjected to freeze-thaw cycles: Considering bedding structure effect[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 12790.

[29] LI Y B, ZHAI Y, MENG F D, et al. Study on the influence of freeze-thaw weathering on the mechanical properties of Huashan granite strength[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 4741-4753.

[30] LIU C J, WANG D G, WANG Z X, et al. Dynamic splitting tensile test of granite under freeze-thaw weathering[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140: 106411.

[31] 尹彦波. 不同应变率下冻融损伤大理岩的动态压缩特性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 139-145.
YIN Y B. Study on dynamic compression characteristics of freeze-thaw damaged marble under different strain rates[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 139-145. (in Chinese with English abstract)

[32] 杨国梁, 尚卓, 邹泽华, 等. 冻融循环下砂岩的动态劈裂特性与应变演变机理 [J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 199-208.
YANG G L, SHANG Z, ZOU Z H, et al. Study on dynamic splitting and evolution mechanism of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 199-208. (in Chinese with English abstract)

[33] NIU C Y, ZHU Z M, ZHOU L, et al. Study on the microscopic damage evolution and dynamic fracture properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 191: 103328.

[34] ZHAI Y, MENG F D, LI Y B, et al. Research on dynamic compression failure characteristics and damage constitutive model of sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106577.

[35] 刘志义, 甘德清, 甘泽. 微波照射后磁铁矿石动力学性能及破碎特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 126-136.
LIU Z Y, GAN D Q, GAN Z. Experimental research on the dynamic mechanical properties and breakage behaviors of magnetite caused by microwave irradiation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 126-136. (in Chinese with English abstract)

[36] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1775-1782.
SHEN Y J, YANG G S, RONG T L, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1775-1782. (in Chinese with English abstract)

[37] 张慧梅, 陈世官, 王磊, 等. 扰动冲击下弱胶结红砂岩的能量耗散与分形特征 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 622-631.
ZHANG H M, CHEN S G, WANG L, et al. Energy dissipation and fractal characteristics of weakly cemented red sandstone under disturbance impact[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 622-631. (in Chinese with English abstract)

[38] MUTLUTÜRK M, ALTINDAG 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.

[39] 殷英政, 李志国. 我国代表城市混凝土冻融循环次数探讨 [J]. 低温建筑技术, 2015, 37(11): 12-15.
YIN Y Z, LI Z G. Discussion on freeze-thaw cycles of concrete in representative cities in China[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(11): 12-15. (in Chinese)

[40] 李夕兵, 宫凤强, 高科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251-260.
LI X B, GONG F Q, GAO K, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251-260. (in Chinese with English abstract)

Summary for “冻融循环作用下砂岩的动态冲击特性试验研究”

Experimental study on dynamic impact characteristics of sandstone subjected to freeze-thaw cycles

SUN Qiao[1]，SUN Luping[1*]，YE Zehui[1]，WANG Zecheng[2]，LI Dongwei[1]

1. School of Civil Engineering， Dalian University， Dalian Liaoning 116622， China；
2. School of Civil & Architecture Engineering， East China University of Technology， Nanchang 330013， China

First author，E-mail：81593946@qq.com

* Corresponding author， E-mail： 2045802614@qq.com

Abstract：[**Objective**] This study aims to investigate the effects of freeze-thaw cycles on the dynamic mechanical properties and microstructural characteristics of sandstone. [**Methods**] Dynamic impact compression tests, nuclear magnetic resonance (NMR) detection, and scanning electron microscopy (SEM) observations were conducted on sandstone samples subjected to 0, 30, 60, 90, and 120 freeze-thaw cycles, with impact velocities set at 3, 6, and 9 m/s respectively. [**Results**] The results indicate that the dynamic impact failure mode of freeze-thawed sandstone is overall crushing failure. As the number of freeze-thaw cycles and impact velocity increase, the fragmentation degree of sandstone intensifies, characterized by reduced fragment size, increased number of fragments and proportion of powder, and elevated fractal dimension. Under the same impact velocity, the dynamic mechanical properties of sandstone continuously deteriorate with the increase in freeze-thaw cycles, and all dynamic mechanical performance indicators exhibit rate-dependent effects. Additionally, an exponential attenuation model for the dynamic peak stress of freeze-thawed sandstone was established, which proves that impact velocity can partially compensate for the damage and deterioration caused by freeze-thaw cycles, resulting in a smaller attenuation constant and a delayed half-life. The established fractal dimension-dynamic strength evolution equation enables the fractal dimension to not only quantitatively describe the fragmentation degree of sandstone after impact failure but also further predict its dynamic strength. With the increase in freeze-thaw cycles, the size and number of pores and cracks inside the sandstone increase, and the degree of structural damage aggravates. Based on the above results, the damage and failure mechanism of sandstone under freeze-thaw cycles was explored, revealing that the freeze-thaw damage of sandstone is the result of the combined action of multiple factors. [**Conclusion**] This study can provide relevant references for rock engineering in cold regions.

Key words: freeze-thaw cycle；sandstone；impact；fragmentation fractal；microstructure；attenuation model

Received：2024-03-18；Revised：2024-05-15；Accepted：2024-05-21

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240103