



低温下不同饱和度冻结砂岩动态力学行为试验研究

许军策 浦海 沙子恒

引用本文：

许军策, 浦海, 沙子恒. 低温下不同饱和度冻结砂岩动态力学行为试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 88–99.
XU Junce, PU Hai, SHA Ziheng. Experimental study on dynamic mechanical behavior of frozen sandstone with different saturations[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 88–99.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2022-0989>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究

Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 60–67 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9304f9a3-b438-4e4b-92f9-1512a5ed9301>

干湿循环对红砂岩力学特性及损伤影响试验研究

Experimental study on influence of wetting-drying cycles on mechanical characteristics and damage of red sandstone
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/759d89e6-6e53-4e4f-b366-cb483bb90a70>

综放采动应力路径下单裂隙砂岩力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of sandstone with single fracture under fully-mechanized top-coal caving mining stress path
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 95–105 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/887041cc-82c3-44ae-a936-5116902afea6>

单轴压缩下砂岩微破裂演化力学行为研究

Study on mechanical behavior of sandstone micro-fractureevolution under uniaxial compression test
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 60–67 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7e8d9a47-b27f-47be-875e-d6b2946bbe45>

高低温循环冲击作用下砂岩孔裂隙结构的演化特征

Evolutionary characteristics of sandstone pore-fracture structure under the action of high and low temperature cyclic impact
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 139–147 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1774>

砂型3D打印材料对类软岩力学特性影响规律及机理

Influence and mechanism of printing materials on the mechanical properties of sand powder 3D printed weak rock-like materials
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 84–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-2060>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

许军策,浦海,沙子恒. 低温下不同饱和度冻结砂岩动态力学行为试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 88-99.

XU Junce, PU Hai, SHA Ziheng. Experimental study on dynamic mechanical behavior of frozen sandstone with different saturations[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 88-99.

低温下不同饱和度冻结砂岩动态力学行为试验研究

许军策¹,浦海^{1,2},沙子恒¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 新疆工程学院 矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要:含水量是影响寒区岩体冻胀破坏的关键因素之一,而动态荷载的扰动又使其破坏过程进一步复杂化。因此,通过低温分离式霍普金森压杆实验系统,研究了冲击荷载和饱和度的变化对冻结红砂岩动态力学行为的影响,并结合低场核磁共振和扫描电镜等手段探究了砂岩试样微观结构的动态演化。研究结果表明:饱和度的增加重塑了红砂岩试样的孔隙结构,促使冻结过程中试样各尺寸孔隙的发育与扩展,且完全饱和时冻结试样以中-大孔隙发育为主。冲击荷载作用下,以临界饱和度为界,冻结砂岩的动态强度、弹性模量和脆性指数 B_I 均随饱和度增加呈现先增大后减小的趋势。与之相反,冻结砂岩的极限变形能力随饱和度变化呈现相反趋势。此外,随着冲击荷载的增加,冻结砂岩的动态强度、弹性模量和峰值应变均逐渐增加,表现出明显的应变率强化效应;而其脆性指数逐渐降低,冲击速度由4 m/s增加至6 m/s时,完全饱和试样的脆性指数下降了8.1%,表明其动态破坏模式由脆性向韧性的转变。而随着饱和度和冲击荷载的增加,冻结试样从张拉破坏转变为粉碎性的复合破坏,且破碎岩块质量的分布仍然与冻结试样的动态强度密切相关。最后,基于试验结果,讨论了饱和度变化对寒区冻结砂岩动态力学行为的影响机制。

关键词:高寒地区;饱和度;低温;砂岩;SHPB;动态力学特性

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)09-0088-12

Experimental study on dynamic mechanical behavior of frozen sandstone with different saturations

XU Junce¹, PU Hai^{1,2}, SHA Ziheng¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;
2. College of Mining Engineering and Geology, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: Water content is one of the critical factors affecting frost damage to rock masses in alpine regions. A dynamic disturbance load further complicates the issue. In this study, the effects of saturation and impact loading on the dynamic behavior of the frozen red sandstone were investigated using a low-temperature split Hopkinson pressure bar (LT-SHPB) experimental system. By combining low-field nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM), the dynamic evolution of the microstructure of the frozen sandstone due to changes in saturation was investigated. The experimental results show that the increase in saturation reshapes the pore structure of the frozen sandstone and promotes the expansion of pores of different sizes during freezing, while the frozen samples at complete saturation are mainly developed with mesopore and macropore. The dynamic strength, elastic modulus and brittleness index of the frozen sandstone under impact loading, which are limited by the critical saturation S_{rc} , tend to increase and then decrease with saturation increase. In contrast, the ultimate deformation capacity of the frozen sandstone showed an opposite trend with saturation. With increasing impact loading, the dynamic strength, elastic modulus, and peak strain of the frozen sandstone gradually increase, showing an obvious strain-rate enhancement effect; while the brittleness index decreases by 8.1% at full saturation when the impact velocity increases from 4 m/s to 6 m/s, indicating that the dynamic damage mode develops from brittle to ductile. Moreover, the frozen samples changed from tensile

收稿日期: 2022-12-15 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2022-0989

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974296, 52061135111)

作者简介: 许军策(1992—), 男, 河南周口人, 博士研究生。E-mail: xujunce@cumt.edu.cn

通讯作者: 浦海(1978—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: haipu@cumt.edu.cn

damage to composite damage with increasing saturation and impact loading; the distribution of crushing masses remained closely related to their dynamic strength. Based on the experimental results, the mechanism of the effects of saturation variation on the dynamic mechanical behavior of frozen sandstone is discussed.

Key words: alpine regions; saturation; low-temperature; sandstone; SHPB; dynamic mechanical behavior

0 引言

影响高寒地区工程岩体力学行为的因素很多,如荷载、温度、含水量等,其中含水量是一个关键因素。受地表径流和地下水渗流的影响,工程岩体中的含水量并非均匀分布,致使其饱和度存在明显的差异^[1]。低温条件下($<0^{\circ}\text{C}$),孔隙水相变为冰体积膨胀(9%),进而重塑岩石内部微观孔隙结构,导致岩体物理力学性质存在明显差异。此外,寒区工程岩体往往遭受不同形式动态荷载的影响,如露天矿边坡不仅受冻害的影响,且易受爆破施工等冲击载荷的影响,诱发边坡滑移失稳等地质灾害^[2]。因此,开展低温下不同饱水岩石的动态力学试验及损伤机制的研究,对于寒区岩体工程安全具有重要意义。

目前,国内外学者在冻结岩石力学方面开展了大量工作,以研究温度、饱和度及孔隙结构等因素对冻结岩石物理力学特性的影响:如刘波等^[3]开展了4种低温条件下冻结砂岩的单轴压缩试验,发现饱和砂岩的强度随着冻结温度的降低出现先增大后减少的趋势;杨更社等^[4]研究了冻结砂岩的三轴力学特性,结果表明冻结状态下岩石的黏聚力和内摩擦角均增大。此外,KODAMA等^[5]分析了饱和度变化对冻结砂岩力学特性及破坏形态的影响;HUANG等^[6]通过对冻结砂岩进行声发射和应力监测试验,发现当饱和度超过85%时,砂岩冻结过程中出现明显的冻胀应变和声发射信号。徐光苗等^[7]对不同初始孔隙结构砂岩进行冻融试验,揭示了孔隙率变化对岩石冻结劣化特征的影响规律; SARICI等^[8]评估了冻结过程中孔隙率对岩石力学性能的影响,并建立了两者之间的函数关系。然而,上述研究多关注于冻岩静态力学特性的研究,并不足以反映冲击荷载下冻岩的力学响应。

随着寒区岩体工程的增加,冻融作用下岩石的动态力学行为日益受到关注^[2]。分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)系统是开展动力学试验的主要设备之一。基于 SHPB 试验系统, XU 等^[9]研究了冻融作用下砂岩动态力学特性,并建立了基于波速变化的动态强度劣化模型;李杰林等^[10]结合 NMR 和 SHPB 试验系统,探究了冻融作用下砂岩孔隙结构的变化对其动态力学性质的影响; LIU 等^[11]对冻融作用后

砂岩进行了不同冲击荷载的 SHPB 试验,建立了试样破碎分形维数和冲击强度之间的关系。ZAKHAROV 通过现场调研,发现在爆破和岩石破裂带等区域内,低温可以起到软化饱和岩石的作用,是导致地质灾害发生的主要原因^[12]。针对此,陈彦龙等开展了低温饱和砂岩的 SHPB 试验,分析了冲击速度对冻结砂岩动态力学特性及破坏形态的影响^[2];基于动态拉伸试验, YANG 等^[13]探索了饱和冻结砂岩的拉伸破裂机理; WENG 等^[14]通过 SHPB 试验研究了低温条件下干燥和饱和粉砂岩动态力学特性,发现含水量是影响冻结砂岩动态强度的关键因素。然而,目前针对低温下饱和度对岩石动态力学特性研究并不完善,多集中于干燥或饱和状态。

因此,以中国新疆地区的红砂岩为研究对象,制备了5种不同饱和度试样,并利用低温 SHPB 试验系统对冻结试样进行4种弹速的冲击试验。基于试验结果,分析了饱和度的变化对砂岩动态力学强度、变形及脆性的影响。此外,结合 NMR 和 SEM 等技术,探究了不同饱和度冻结砂岩微观结构的演化特征。研究结果以期为寒区岩体工程的安全提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料及试样制备

新疆地区属于季节性冻土区域,其岩土工程多遭受冻害的影响。同时,该地区是我国露天采煤基地,冬季爆破作业频繁易诱发岩体边坡滑移等地质灾害。因此,采用了乌鲁木齐某露天矿岩质边坡的砂岩块为研究对象,其结构完整,颗粒均匀,呈现棕红色。通过 X 射线衍射(XRD)试验确定了岩石的基本矿物成分(图 1),该砂岩主要由石英(47.3%)、长石(31.5%)和伊利石(9%)组成,并含有少量方解石和绿泥石。

根据 ISRM 的标准,岩块被加工成直径为 50 mm、长径比为 1 的标准岩样。加工完后,剔除表面存在缺陷的试样,并选择波速相近的试样作为试验对象。完整试样的基本物理力学性质见表 1。

将筛选出的试样进行干燥,并使用真空饱水装置对其饱水;随后,将饱和试样置于 50 °C 的干燥箱中自然蒸发,通过质量控制法获得预先设定的饱和度^[15]。达到指定含水量时,采用凡士林涂抹试样表

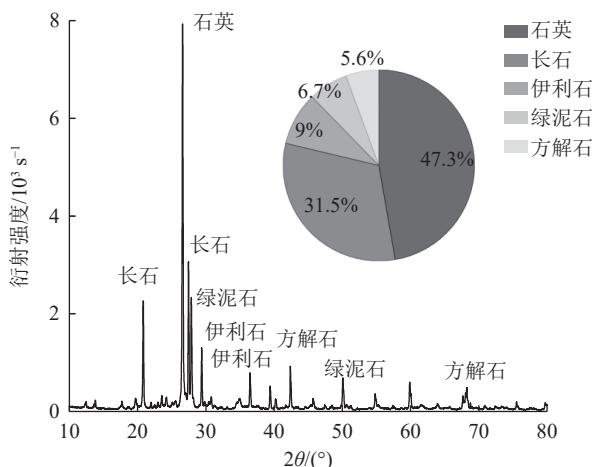


图1 红砂岩试样 XRD 试验结果
Fig.1 XRD results of the red sandstone

面,避免水分蒸发和保持水分均匀分布。本试验的饱和度设为0、30%、50%、80%和100%。最后,考

虑取样地点冬季温度的变化,将制备好的试样放入冻融箱中,在-25℃条件下冷冻24 h^[9]。

1.2 试验设备

低场NMR试验系统的共振频率为12.8 MHz,主磁场强度约为0.3 T。在测试中,不同饱和度样品在-25℃的冻融箱中冻结24 h。冻结后,将试样融化并再次饱和,随后进行NMR测试^[3]。

利用低温SHPB系统开展冻结砂岩冲击试验,其中,子弹和杆的直径均为50 mm,由Cr40制成,其波速、屈服强度和弹性模量分别为5 400 m/s, 800 MPa和208 GPa。低温系统主要包括控制器、液氮罐、电热丝传感器及保温室等。保温室内层主要由硅酸铝针刺毡组成,具有良好的保温效果(图2)。试验时,当传感器检测到低温室温度达到预设值时,电热丝将停止工作,此过程由电磁阀自动控制^[2]。试验时可通过控制器调节保温室内的温度,控制温差为±0.5℃。

表1 红砂岩试样基本物理力学性质

Table 1 General physico-mechanical properties of red sandstone sample

纵波波速/(m·s ⁻¹)	干密度/(g·cm ⁻³)	饱和密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	单轴抗压强度/MPa	泊松比	含水率/%
2 459	2.14	2.31	16.57	13.84	0.23	7.94

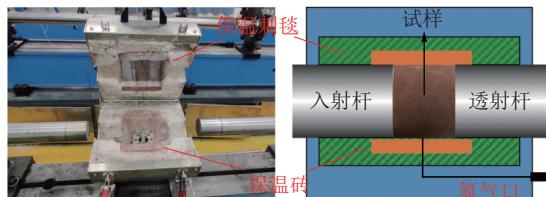


图2 LT-SHPB 试验系统的保温室
Fig.2 Chamber diagram of the LT-SHPB system

试验前,在试样两端涂抹二硫化钼作为润滑剂以减少摩擦效应。将保温室温度调整为-25℃,放入冻结砂岩试样,并选择橡胶圆垫作为脉冲整形器。冲击试验后,基于一维应力波传播理论,采用了三波法计算了试样两端荷载 P_1 和 P_2 、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 与应变 ε (式1)。

$$\begin{cases} P_1 = A_r E_0 [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ P_2 = A_r E_0 \varepsilon_t(t) \\ \dot{\varepsilon} = \frac{C_s}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon = \frac{C_s}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_r 为杆与试样截面积的比值; E_0 、 C_s 和 L_s 分别为杆的弹性模量, 波速及试样的长度; $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射、反射和透射应变。此外, 子弹冲击速度由激光测速仪获得。

1.3 动力学试验方案

如上所述,试验选取了5种饱和度岩样进行冲击试验,以4种冲击速度(4、5、6、7 m/s)作为加载条件,每种条件下3块试样。因此,开展SHPB试验时共需要60块试样,另选取5块作为备用试样。同时,对试样进行了编号,如D-50-4表示饱和度为50%冲击速度为4 m/s试样。此外,进行动力学试验时需要验证试样两端的应力平衡^[16]。

2 试验结果与分析

2.1 LT-NMR 试验结果

LT-NMR试验中,磁共振信号强度代表被测样品中含氢流体的量,而其随时间变化的快慢(横向弛豫时间 T_2)与流体中分子的赋存状态有关。因此,岩石中含氢流体的弛豫时间可全面反映岩石内部孔隙的分布规律^[17]。对于岩石中含氢流体,其在射频脉冲后的弛豫时间 T_2 ^[18]为

$$\frac{1}{T_2} = \rho \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \quad (2)$$

式中: ρ 为表面的弛豫强度,与岩石颗粒表面及胶结物的性质有关; S/V 为岩石内孔隙的比表面,与孔隙的形状有关^[19]。因此,通过试样 T_2 谱图的分布特征,可以间接获得岩石内不同尺寸孔隙的分布规律。

图3给出了不同饱和度试样冻结后 T_2 谱图分布曲线。冻结试样 T_2 谱图曲线主要呈现出3个峰值, 表明该砂岩内部主要有3种尺寸分布的孔隙结构。根据YAO等^[20]压汞和NMR的试验结果, T_2 、孔隙直径与孔隙水类型之间存在着对应关系, 如 T_2 为0.01~10 ms时, 对应孔径约为0.1 μm , 称为微孔(小孔), 可作为薄膜水与毛细水之间的物理分界线; 而当 T_2 大于100 ms时, 对应孔径大于1 μm , 主要存在自由水, 称为主干孔(大孔)。由图3可知, 与饱水试样相比, 干燥试样各孔径 T_2 谱面积均有减少的趋势, 表明低温下, 干燥试样孔隙结构几乎不受低温的影响。然而, 随着含水量的增加, 第二峰所占面积比由2.19%(干燥)增加至9.32%(饱和), 表明低温下饱和度的增加对中孔扩展发育的影响最大; 而当饱和度超过80%时, 第三峰面积增加了3.57%, 表明砂岩试样的大孔开始进一步发育。因此, 低温下试样饱和度小于80%时, 以中小孔发育为主, 当饱和度超过80%时, 砂岩试样的大孔开始发育扩展。换言之, 低温冻胀劣化主要发生在中-大孔内, 且大孔劣化作用更为明显, 这是由于低温下大孔隙中的水更易形成分子簇, 以克服结晶的能量屏障, 率先成核结冰^[5]。而小孔隙内的水难以成核, 呈现过冷的状态。进而, 低化学势的过冷水易迁移至中-大孔内, 致使孔内冰晶压力的持续增长。当压力超过岩石基质抗拉强度时, 孔隙将进一步发育和扩展。而当孔隙含水量较低时, 冰体积的生长受限, 孔隙的发育将受到抑制。

因此, T_2 谱图中呈现出了第二和第三峰值随饱和度的增大而增加的趋势。

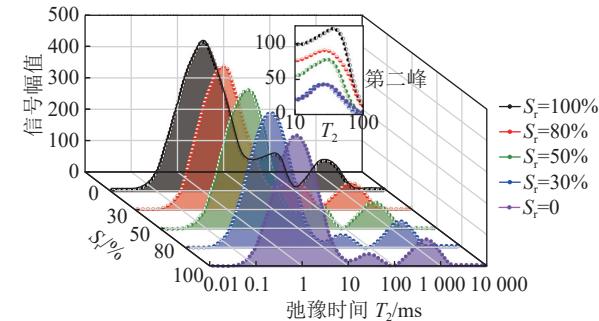


图3 冻融后不同饱和度红砂岩样品弛豫时间 T_2 谱分布
Fig.3 Distribution of T_2 spectrum of red sandstone samples with different saturation after freeze-thaw

2.2 SHPB试验结果

通过调整气压和撞击杆的位置, 确定了4种近似的冲击荷载。如图4a—图4e给出不同饱和度和冲击荷载下动态应力应变曲线, 图4f为试样动态应力应变曲线的典型形态。由图4f可知, 低温下冻结砂岩的应力应变行为表现出4个阶段: I 初始压密阶段; II 线弹性变形; III 塑性软化阶段; IV 峰后破坏阶段, 此阶段试样已从压杆端掉落, 因此不做讨论。由图4a—图4e可知, 干燥状态下冻结试样动态曲线出现了明显的压密阶段, 且随着冲击速度的增加而降低; 而随着饱和度的增加, 压密阶段逐渐减少。为了描述动态应力应变曲线的行为, 采用了几个参数用

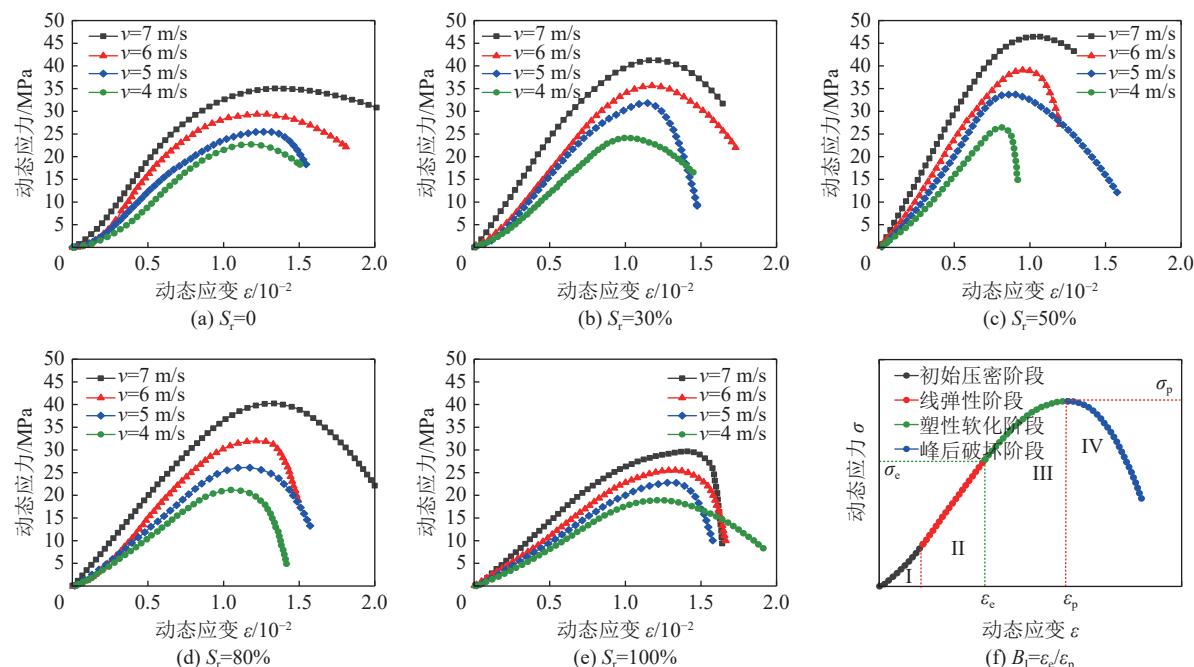


图4 低温度下冻结试样动态应力-应变曲线
Fig.4 Dynamic stress-strain curves for frozen samples at low-temperatures

以评估饱和度和冲击速度对冻结砂岩动态力学特性的影响,主要包括动态强度、峰值应变、弹性模量及动态脆性指数(B_I)等,计算结果见表2。

表2 不同条件下冻结砂岩的动态力学参数

Table 2 Dynamic mechanical parameters of frozen sandstone under different conditions

试样编号	动态强度/MPa	动态模量/GPa	峰值应变/ 10^{-2}	脆性指数 B_I
D-0-4	22.1	1.95	1.167	0.728
D-0-5	25.7	2.04	1.247	0.694
D-0-6	29.3	2.28	1.286	0.657
D-0-7	34.6	2.59	1.353	0.602
D-30-4	24.6	2.39	1.015	0.753
D-30-5	31.3	2.83	1.094	0.721
D-30-6	35.5	3.03	1.176	0.697
D-30-7	42.8	3.42	1.218	0.665
D-50-4	26.4	3.26	0.812	0.862
D-50-5	33.8	3.8	0.891	0.819
D-50-6	39.7	4.07	0.961	0.760
D-50-7	46.5	4.47	1.041	0.682
D-80-4	21.3	2.02	1.049	0.788
D-80-5	26.2	2.27	1.154	0.745
D-80-6	32.6	2.58	1.238	0.703
D-80-7	40.3	3.06	1.318	0.675
D-100-4	19.4	1.71	1.134	0.744
D-100-5	23.6	1.83	1.292	0.712
D-100-6	25.5	1.92	1.331	0.684
D-100-7	28.8	2.11	1.411	0.659

2.2.1 动态强度演化

根据表2中数据,冻结砂岩的动态强度与冲击速度和饱和度关系如图5所示。由图可知,低温条件下试样动态强度随着冲击速度增大而增大,表现出明显的应变率强化效应;然而,随着饱和度增加呈现先增大后降低趋势。当冲击速度为5 m/s时,与干燥试样相比,饱和度由30%增至100%,动态强度分别增加24.9%,32.7%,2.86%和-7.3%,表明对于该类红砂岩当饱和度超过80%时,冻结强化效应将被抑制。低温时,由于界面能的影响,岩石内较大孔隙中的水迅速成核并冻结。若大孔中含水量较低,即使通过未冻水迁移补给也很难产生结晶压力。此时,孔隙冰起到支撑孔壁和减少裂隙长度的作用,进而降低了裂隙尖端的应力集中^[5]。因此,当冲击应力波在试样内传播时,孔隙尖端裂纹不易发育。同时,未冻薄膜水与岩石基质和孔隙冰之间的黏附力增强了

孔隙的抗拉和抗剪切的力学特性。然而,当含水量超过孔隙空间所能承受的水冰相变体积增量时,不可避免地促进微裂隙的持续发育,进而降低试样的动态强度。

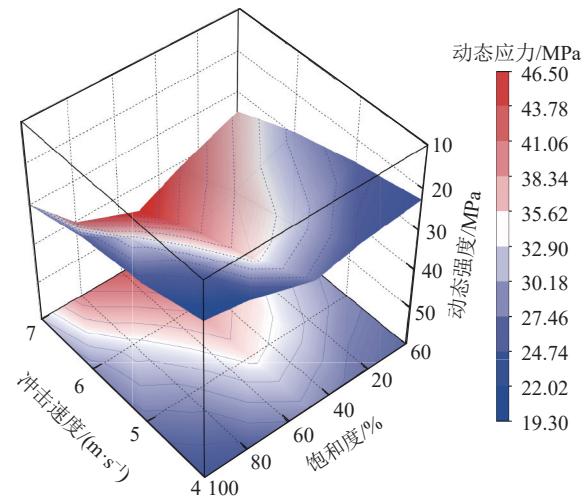


图5 冻结砂岩动态强度与冲击速度和饱和度的关系
Fig.5 Dynamic strength of samples versus impact velocity and saturation

此外,采用动态强度增加因子(D_{IF})评估了冻结砂岩试样强度的增长率,结果如图6所示。 D_{IF} 计算如式(3)所示,其中 $f_v(d)$ 为冲击速度为 v 时试样动态强度,而 $f(s)$ 为其静态强度。由图可知,冻结砂岩的动态强度增长随饱和度的增加先升高后降低;而随着冲击速度呈线性增加(式(4)),且增加速率与饱和密切相关,50%饱和度时其增加率达到最大。例如,冲击速度为6 m/s时,试样饱和度由0增加至50%时, D_{IF} 由2.11增长至2.87;而到饱和度增加至80%, D_{IF} 下降为2.31。因此,饱和度50%~80%之间存在临界饱和度 S_{rc} 。当饱和度大于 S_{rc} 时,砂岩中的孔隙冰对动态强度的增强作用逐渐受到抑制,尤其是接近饱和时,在结晶压力的作用下孔裂隙发育扩展进一步阻碍了试样动态强度的增加。

$$D_{IF} = \frac{f_v(d) - f(s)}{f(s)} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{IF} = 0.412 + 0.295v \quad (S_r = 0, R^2 = 0.961) \\ D_{IF} = 0.223 + 0.396v \quad (S_r = 30\%, R^2 = 0.975) \\ D_{IF} = 0.035 + 0.472v \quad (S_r = 50\%, R^2 = 0.993) \\ D_{IF} = -0.341 + 0.455v \quad (S_r = 80\%, R^2 = 0.979) \\ D_{IF} = 0.461 + 0.239v \quad (S_r = 100\%, R^2 = 0.982) \end{array} \right. \quad (4)$$

事实上,孔隙水相变为冰时体积膨胀对岩石骨架产生一定的冻胀力^[21]。HUANG等^[6]通过实际测量,发现饱和度是影响其冻胀力的关键因素。假设

试样内部冻胀力均匀分布岩石基质内, 冻胀力 P_i 与饱和度 S_r 和冻结率 u 间的关系可用式(5)表示^[22]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = \frac{[\beta n S_r u - n(1 - S_r)] K_r K_i}{K_r S_r + K_i} H[u - x] \\ H[u - x] = \begin{cases} 0 & (u \leq x) \\ 1 & (u > x) \end{cases} \\ x = \frac{1 - S_r}{\beta S_r} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: β 为冰的体积膨胀系数; n 为孔隙率; u 为冻结率; K_r 和 K_i 分别为岩石骨架体积模量与冰体积模量; $H[u - x]$ 为阶跃函数。由式(5)可知, 孔隙内结晶压力受孔隙率、饱和度、冻结率及冰和岩石骨架的体积模量等因素影响。根据文献 [3], β 取 9%, K_r 和 K_i 分别为 20.83 GPa 和 5 GPa; 为了显示结果, 这里阶跃函数默认为 1, S_r 值大于 0.8。将上述参数带入式(5)可得冻结压力与饱和度和冻结率的关系如图 7 所示。

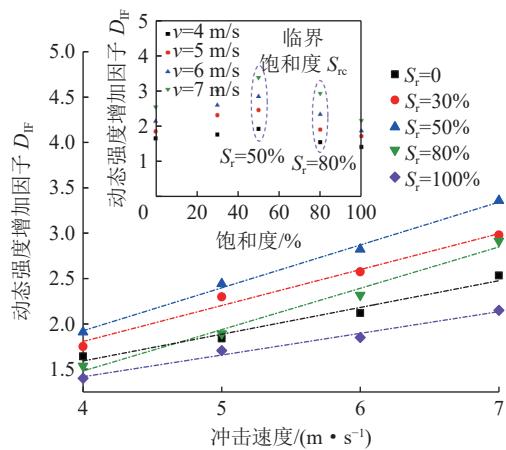


图 6 冻结试样 D_{IF} 与冲击速度和饱和度的关系

Fig.6 D_{IF} versus impact velocity and saturation of sample

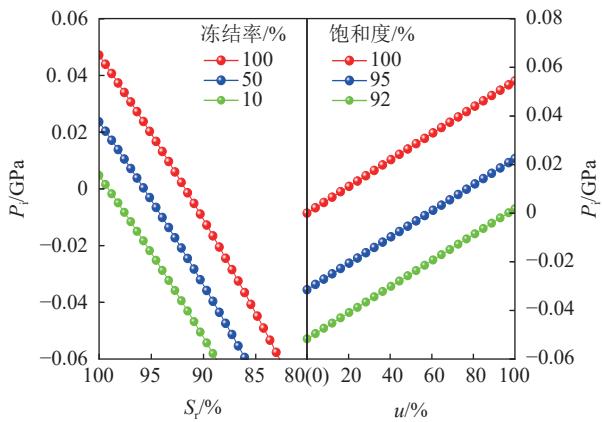


图 7 试样冻胀力随饱和度 S_r 和冻结率 u 变化

Fig.7 Frost heaving force versus saturation S_r and freezing rate u

由图 7 可知, 冻胀力与孔隙饱和度呈现正相关关系, 但在较低饱和度试样内部并不能产生有效冻胀应力; 而完全饱和时, 即使在较低冻结率下仍可以

产生有效冻胀应力。随着孔隙水冻结率的增加, 孔隙内冻胀应力的强度因子将逐渐大于裂纹扩展临界强度因子 K_{IC} , 促使孔隙隙的发育与扩展, 导致岩石内部累计损伤的增加。因此, 当饱和度超过 S_r 时, 试样动态强度将逐渐减小。然而, 材料特性, 如孔隙结构、矿物颗粒和胶结强度特征等也是影响冻胀力大小和位置的关键因素。由于所选试样为新疆地区砂岩, 其成岩时间短、胶结能力弱、强度较低, 对于冻胀应力更为敏感^[9]。因此, 试验砂岩产生冻胀损伤的饱和度低于其理论值 91%。

2.2.2 动态弹模演化

根据图 4f, 采用了弹性阶段 (II) 的切线模量作为其动态弹性模量。动态弹性模量与冲击速度和饱和度变化关系如图 8 所示。研究发现, 冻结砂岩动弹性模量与峰值应变的变化规律相反。5 种饱和度下, 冲击速度由 4 m/s 增加至 7 m/s 时, 砂岩动态弹性模量分别增大了 32.8%、43.1%、37.1%、51.5% 及 23.4%, 具有明显的刚度强化效应。当试样饱和度小于 80% 时, 试样动态弹性模量呈增大趋势, 这是由于水相变为固体冰, 降低了岩石内部缺陷的体积^[23]。当冲击荷载增加时, 岩石内部缺陷的降低有助于压缩应力波的传播, 抑制了内部小缺陷或亚缺陷的激活, 进而增强了试样的抗变形能力。然而, 当饱和度超过 S_r , 在冻胀力的作用下部分裂隙开始发育, 导致试样内部缺陷体积的增加, 因此其动态弹性模量出现降低趋势。

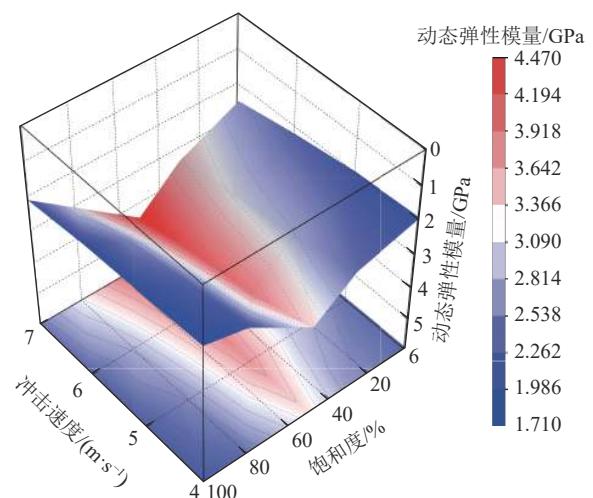


图 8 试样动态弹性模量与冲击速度和饱和度的关系

Fig.8 Dynamic elastic modulus versus impact velocity and saturation

2.2.3 动态脆性指数

脆性是岩石材料的一个重要参数, 用来描述岩石的变形与破坏过程。不同的外部因素, 如含水量、

温度等,不可避免地会改变岩石材料的脆性参数和破坏模式^[24]。因此,采用一个脆性指数来表征饱和度和冲击速度对冻结砂岩峰前变形特征的影响,计算公式如下^[25]:

$$B_I = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_p} \quad (6)$$

式中: ε_p 和 ε_e 分别为应力应变曲线中峰值点与屈服点应变坐标值;当 B_I 为 1 时认为试样完全脆性,即 B_I 值越大表示试样的脆性越大。根据表 2 中数据,冻结砂岩脆性指数随初始饱和度与冲击速度关系曲面,如图 9 所示。

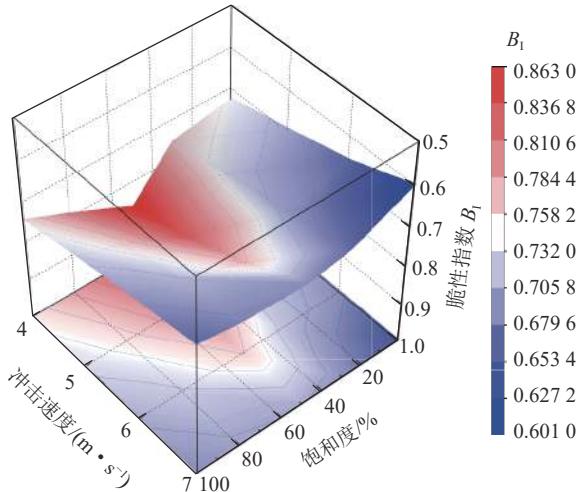


图 9 试样脆性指数与冲击速度和饱和度的关系

Fig.9 B_I versus impact velocity and saturation of samples

由图 9 可知,冲击速度的增加促使冻结砂岩试样由高脆性向韧性转变。从能量角度出发,脆性的增加意味着试样内部弹性能累积阶段增大,而裂纹发育不稳定阶段减少。因此,可以认为低冲击速度下,冻结试样内部微裂隙不易发育,这与陈彦龙等所试验的结果相一致^[2]。此外,冻结砂岩的脆性随着饱和度增加呈现出增长的趋势,这是由于孔隙冰的存在阻止了裂隙的进一步扩展,增加了试样的抗变形能力,在应力应变曲线上表现为 III 阶段的减少。然而,这种增长趋势受饱和度限制,当饱和度超过其 S_{rc} 时,此时孔隙冰既起到了降低岩石内部缺陷作用,又通过冻胀力促进了裂隙的发育扩展。因此,2 种作用下起到关键性的作用将控制着冻结砂岩的动态变形与破坏行为,即决定了试样脆性破坏的程度。

2.3 宏观破坏特征分析

岩石的破碎响应与冲击荷载和岩石微观结构关系密切^[26]。图 10 为不同饱和度和冲击速度下冻结砂岩的破坏形态,由图 10 可知,由于砂岩试样强度较低,不同冲击速度下均完全破碎。饱和度 50% 冻

结试样破碎块粒度分布较大,而试样达到饱和时,较高冲击速度下(7 m/s)试样破碎为粉末状。根据图可推断出,随着饱和度和冲击荷载增加,冻结试样将从张拉破坏转变为粉碎性的复合破坏。这是由于饱和度的增加,促进了试样微裂隙的发育,在荷载作用下更多裂隙将会产生,因此破碎形态更为复杂。

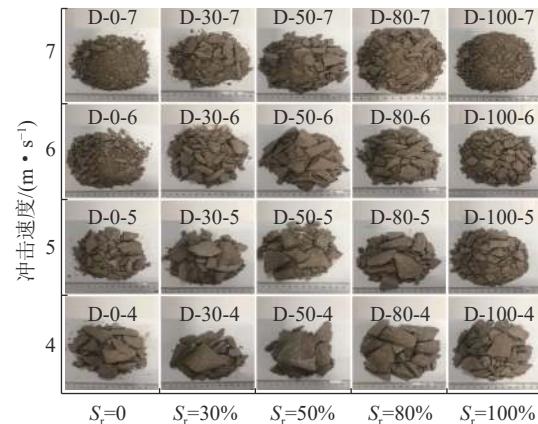


图 10 不同饱和度和冲击速度下冻结砂岩的破坏形态

Fig.10 Failure characteristics of frozen sandstone with different saturations and impact velocities

为了量化试样宏观破碎形态,通过筛网对破碎块体进行筛分,筛网孔径为 0.75~45 mm。图 11 显示了试样破碎块体的筛分结果。图中数据 R 是基于每组中最大滞留质量比例而归一化处理后的可视化结果(同组最大数据显示为 100%)。由于 45 mm 岩块质量与其他岩块质量相差较大,因此归一化处理时将数据分为 2 组,即存在 45 mm 为一组(R 最大值为 75.6%),其余为一组(R 最大值为 32.5%)。 R 的计算式为 m_i/m_{tot} , m_i 和 m_{tot} 分别为各级筛网滞留质量和试样破碎总质量, g。

由图 11 可知,在相同的冲击速度下,同一筛网的滞留质量与饱和度密切相关。但并没有表现出一致的相关性,而是有 3 种关系:正向、负向和波动的关系。随着冲击速度的增加,冻结试样的破碎质量分布逐渐从左上角过渡到右下角区域,这标志着冻结砂岩破碎逐渐向细粒粉移动。尽管冲击速度不同,较大的破碎质量的分布仍然与其动态强度密切相关,如“凸波动”型的分布与动态强度相匹配。然而,随着破碎粒度的降低,破碎岩块的分布与动态强度和饱和度有很大的差异。这是由于岩石内部结构性差异决定了冰结晶应力的作用,如提供支撑力或促进孔隙发育等,进而影响了破碎岩块的质量分布。

2.4 微观破坏特征分析

利用 SEM 图像(1 000 倍)来推断砂岩冻结后微观形态变化,结果如图 12 所示。原始状态下其结构

较为松散, 存在较多原生微裂隙和孔等缺陷; 低温冻结后, 由于矿物颗粒热的收缩性, 试样表面变得密实, 部分原生裂隙闭合, 此时最大裂隙宽度仅为 $2 \mu\text{m}$; 当试样饱水至 30% 时, 由于部分孔隙内水相变为冰, 冰晶应力导致部分闭合裂隙重新激活, 此时孔隙冰以增强作用为主; 随着饱和度增加至 50% 时, 部分微裂隙进一步发育贯通, 但多数微裂隙宽度小于 $1 \mu\text{m}$, 此时孔隙冰对内部造成损伤程度仍低于其强化作用; 然而, 当饱和度达到 80% 时

(图 12e), 由于孔隙水量的增加, 冻结后孔隙冰的持续膨胀促进裂隙的持续发育, 部分微裂隙宽度已达到 $5 \mu\text{m}$, 这种现象意味着孔隙冰的劣化作用已经显现; 当试样完全饱和时, 试样断面出现了被挤出的块体, 表明块体周围裂隙贯通后, 冰的体积仍继续膨胀进而导致岩块被挤出, 表面微裂隙宽度已接近 $9 \mu\text{m}$, 这是一个相对较大的数值。因此, 由于岩石内部损伤增大, 冻结饱和试样的宏观力学行为如动态强度和模量出现了降低现象。

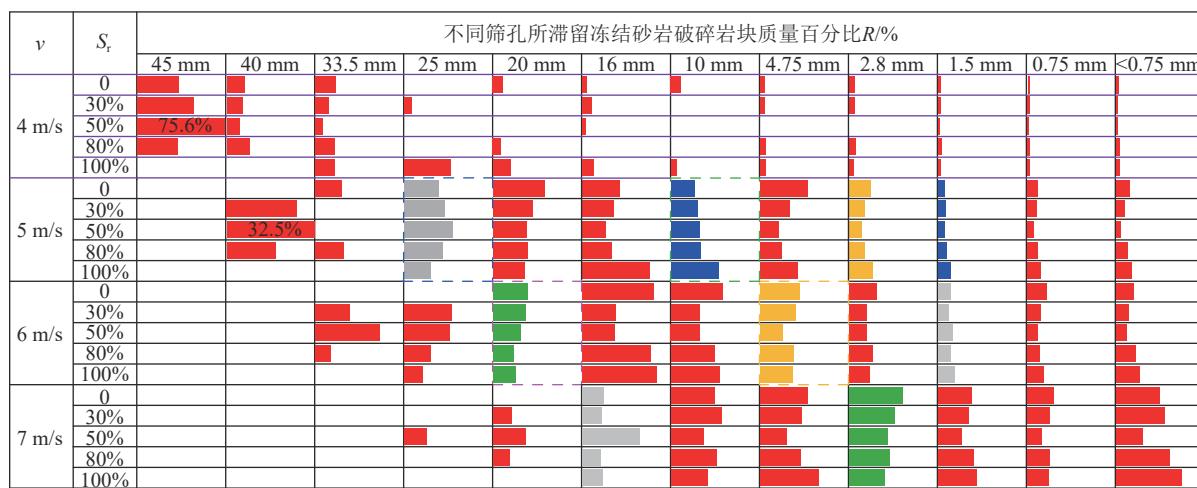


图 11 冲击载荷下冻结试样的破碎块体质量分布

Fig.11 Broken mass distribution of frozen samples under impact load

3 结果讨论

天然岩体由于成岩过程复杂而形成大量不规则孔裂隙, 加之地下水的迁移与渗流的影响, 致使岩石中孔隙水分布不均匀, 造成了饱和度的差异^[27]。当温度低于 0°C 时, 孔隙冰的存在提高了其动态力学性能。这种增强现象在静态试验中也存在, BO-HACS 等^[28]通包络模型证实了单轴状态下, 冻结岩石的裂纹扩展应力阈值与孔隙冰模量呈正相关。此外, 沉积岩多由矿物颗粒组成, 温度下降时颗粒的热收缩性使内部更为致密, 有效降低了内部孔裂隙的体积, 进而改善了岩石力学性能。NMR 结果可以看出, 该类岩石低温下矿物颗粒有明显的收缩性(图 3)。PLATT^[29]的研究同样证明了低温作用下, 由于岩石基质的收缩, 不同种类砂岩孔隙率均有降低趋势。然而, 随着孔隙水含量的增加, 孔隙冰的持续膨胀将逐渐在岩石内部产生累计损伤^[3]。正如 PRICK 所指出, 饱和度是决定孔隙冰强化或损伤的关键因素^[30]。因此, 需要进一步讨论饱和度对冻结岩石动态力学行为的影响。

干燥或孔隙水含量极低的岩石, 孔隙内部主要

被气体占据, 冻结期间动态力学特性变化只与矿物颗粒的收缩有关; 而随着饱和度的增加, 冻结期间的孔隙冰的膨胀逐渐成为岩石动态强度或模量变化的主要原因。当孔隙水含量较少时, 孔隙冰生长受限并不能对基质造成有效损伤^[15]。此时, 孔隙冰起到了增强作用, 如充填孔隙、支撑孔壁和增加黏附力的作用(图 13)。因此, 随着饱和度的增加试样动态力学特性如强度、模量等呈增大趋势。然而, 当饱和度逐渐增大时($>50\%$), 尤其是饱和度为 $80\% \sim 100\%$ 时, 试样的动态强度和模量均产生了明显的降低, 可以认为当饱和度超过 50% 时, 孔隙冰的存在逐渐在岩石内部产生了有效损伤。同时, 内部损伤如微裂隙的发育贯通导致冲击荷载下试样破坏更加破碎。因此, 当岩石饱和度大于其临界值时, 岩石内部存在足够水为冻结过程冻胀力提供增长物质基础^[31], 在此条件下, 冻结砂岩的动态力学性质需要考虑冻胀损伤机制所造成的影响。

研究结果表明, 岩石的冻胀损伤是由毛细管机制、结晶压机制、体积膨胀机制及静水压机制共同作用的结果, 而各损伤机制与岩石孔隙结构特征密切

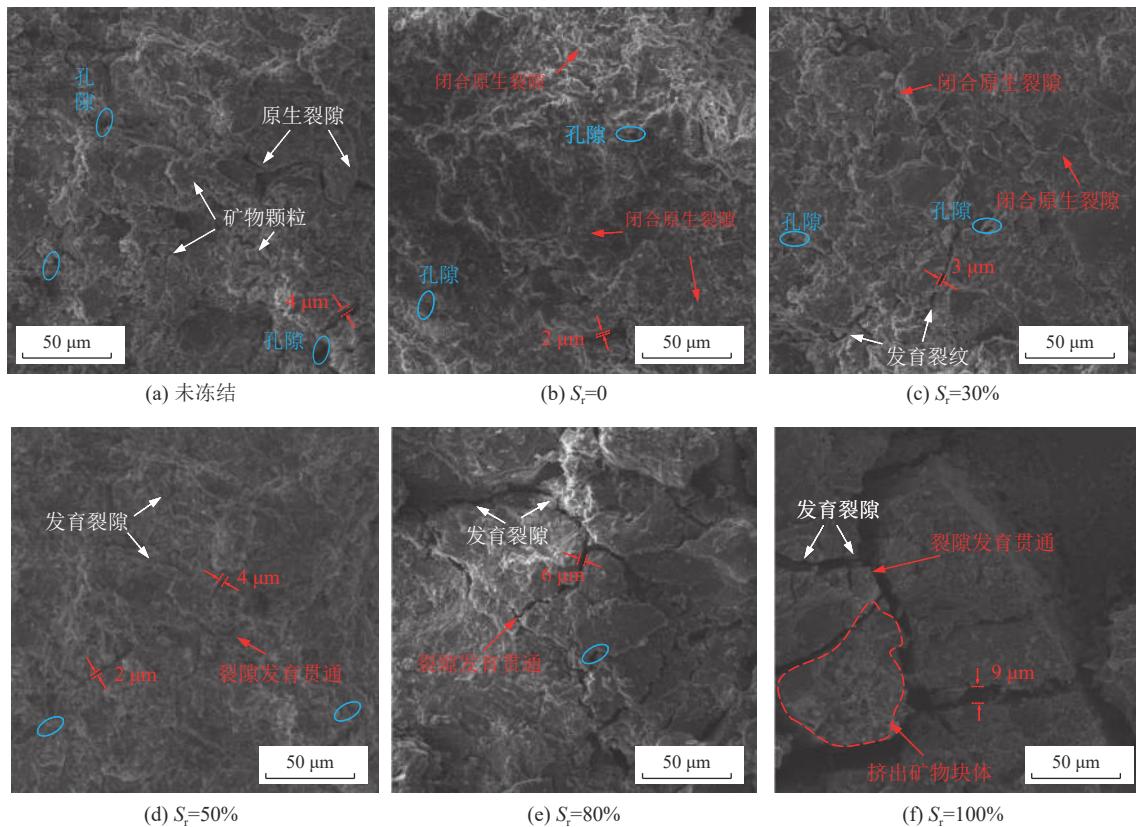


图 12 不同饱和度冻结红砂岩断面微观特征

Fig.12 Fracture characteristics of frozen sandstone sample with different saturations

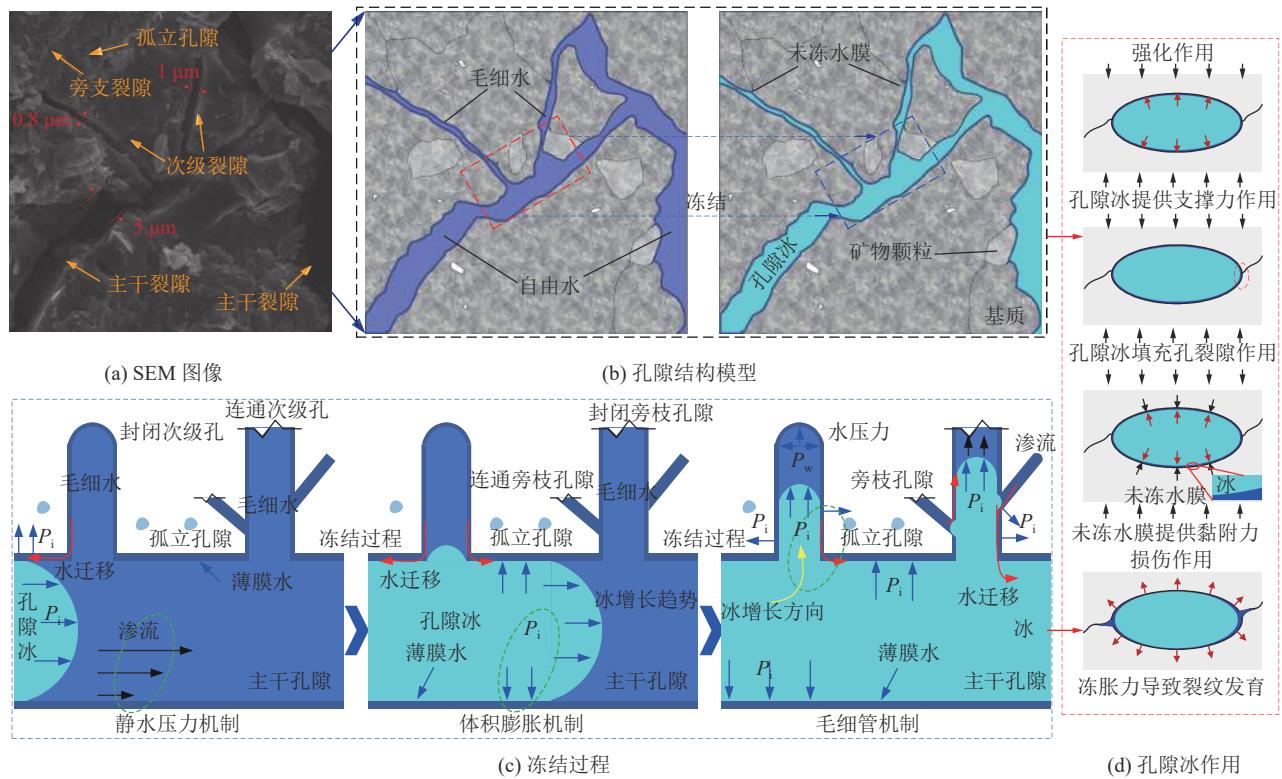


图 13 砂岩冻结过程中孔隙冰的影响机制

Fig.13 Influence mechanism of pore ice during sandstone freezing

相关^[15]。正如图13所示,岩石孔隙结构主要包括主干孔隙、次级孔、旁枝孔隙及孤立孔隙。由于孔隙中水的冻结点与孔半径成反比^[19],大孔隙中的水先结冰,进而生长至次级孔。当试样含水量较低时($S_r=30\%$),次级孔中过冷水通过水膜迁移至主干孔中。由于含水量较低,孔隙冰生长至一定体积后即停止,此时依赖于毛细管机制的冰生长受到了抑制。而随着试样饱和度的增加,主干孔中冰的生长有足够未冻水补给,进而驱赶部分未冻水进入到相连的小孔隙中。若小孔隙为封闭孔,其内部将产生较大的水压力 P_w ,当压力超过岩石基质的抗拉强度时,将引起次级孔的扩展,这也是 T_2 谱图中第二峰面积变化原因;若孔隙为连通孔时,孔隙冰将产生静水压力驱动未冻水渗流形成损伤,并对岩石骨架施加了一个动水压力,降低了岩石基质的变形阻力^[32]。同时,孔隙冰产生的冻胀压力 P_i 也造成了孔壁的损伤^[33]。因此,在压缩应力波的作用下,内部孔隙将快速发育,导致试样破碎程度和动态力学强度的变化。

随着冻结过程的发展,主干孔的冰逐渐向次级孔内发育(图12c)。在孔隙冰发展过程中,薄膜水机制扮演了重要的角色,这是由于较大孔隙中冰的化学势相对较低,小孔隙中的过冷水将沿冰与孔壁间薄膜水逐渐向大孔隙中迁移^[3],导致大孔隙中的冰不断生长,其压力 P_i 也逐渐升高。而当大孔隙中的冰压 P_i 与小孔隙的水压 P_w 差值为($2\gamma_{sl}/R$) $\cos\theta$ (γ_{sl} 为冰水界面张力; R 为毛细管等效半径; θ 为接触角^[19])时,孔隙冰逐渐向小孔隙发展,进而产生冻结膨胀促进孔隙发育。因此,饱和度增加时,冻结岩石力学性能并不是一直增强,而当超过临界饱和度时这种增强效果将会逐渐受到抑制,但仍以增强效果为主。然而,对试验所选新疆地区红砂岩,饱和度超过80%这种增强效果将低于损伤效果,超过其临界饱和度时,冻结砂岩试样的动态强度和模量逐渐降低,而极限变形能和破碎程度逐渐增大。总的来说,随着饱和度的增加孔隙冰由填充、支撑和胶结增强作用逐渐转变为促进裂纹发育扩展的冻胀损伤作用。

4 结 论

1) 低温冻结过程中,饱和度小于其临界饱和度时,试样以小孔发育为主;接近饱和时,试样内部中-大孔开始迅速发育,表现为 T_2 谱图中第二峰和第三峰峰面积的增大。

2) 随着冲击速度的增加,冻结砂岩的动态力学特性表现出明显的冲击强化效应;而随着饱和度的

增加,冻结砂岩的动态强度,弹性模量和脆性均呈现先增大后下降趋势。

3) 随着饱和度的增加,冻结试样将从张拉破坏转变为粉碎性的复合破坏,且破碎质量的分布呈现出正向、负向和波动3种关系,而较大破碎质量的分布仍然与其动态强度密切相关。

4) 饱和度的增加促进了红砂岩内部孔隙的发育,尤其是饱和岩石内部裂隙相互贯穿形成裂隙网络,可以观测到接近9 μm宽度的裂隙,孔隙冰对试样强化作用逐渐被损伤作用所抑制。

参考文献(References):

- [1] 宋勇军,杨慧敏,谭皓,等.冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(8):1513-1524.
SONG Yongjun, YANG Huimin, TAN Hao, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freezethaw environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1513-1524.
- [2] 陈彦龙,崔慧栋,李明,等.实时低温条件下露天矿饱和损伤煤系砂岩动态力学特性及其破坏机制[J].*煤炭学报*,2022,47(3):1-14.
CHEN Yanlong, CUI Huidong, LI Ming, et al. Study on dynamic mechanical properties and failure mechanism of saturated coal-measure sandstone in open pit mine with damage under real-time low-temperature conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1-14.
- [3] 刘波,孙颜顶,袁艺峰,等.不同含水率冻结砂岩强度特性及强度强化机制[J].*中国矿业大学学报*,2020,49(6):1085-1093.
LIU Bo, SUN Yanding, YUAN Yifeng, et al. Strength characteristics of frozen sandstone with different water content and its strengthening mechanism[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(6): 1085-1093.
- [4] 杨更社,魏尧,申艳军,等.冻结饱和砂岩三轴压缩力学特性及强度预测模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2019,38(4):683-694.
YANG Gengshe, WEI Yao, SHEN Yanjun, et al. Mechanical behavior and strength forecast model of frozen saturated sandstone under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 683-694.
- [5] KODAMA J J, KODAMA T, GOTO Y, et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 62: 1-13.
- [6] HUANG Shibing, CAI Yuanjian, LIU Yanzhang, 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.
- [7] 徐光苗,刘泉声,彭万巍,等.低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(12):2502-2508.
XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experi-

- mental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2502–2508.
- [8] SARICI Didem, OZDEMIR Engin. Determining point load strength loss from porosity, Schmidt hardness, and weight of some sedimentary rocks under freeze–thaw conditions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 62.
- [9] XU Junce, PU Hai, SHA Ziheng. Mechanical behavior and decay model of the sandstone in Urumqi under coupling of freeze–thaw and dynamic loading[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(4): 2963–2978.
- [10] LI Jielin, HONG Liu, ZHOU Keping, et al. Mechanical characteristics and mesostructural damage of saturated limestone under different load and unload paths[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: 1–16.
- [11] LIU Shi, XU Jinyu, LIU Shaohe, et al. Fractal study on the dynamic fracture of red sandstone after FT cycles[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(5): 1–11.
- [12] ZAKHAROV E V. Effects of negative temperatures on crushing rocks of various deposits in Yakutia[J]. *Obogashchenie Rud*, 2021, 32(4): 3–9.
- [13] YANG Renshu, FANG Shizheng, GUO Dongming, et al. Study on dynamic tensile strength of red sandstone under impact loading and negative temperature[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(5): 4527–4537.
- [14] WENG Lei, WU Zhijun, LIU Quansheng, et al. Energy dissipation and dynamic fragmentation of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures[J]. *Engineering fracture mechanics*, 2019, 220: 106659.
- [15] 万亿, 陈国庆, 孙祥, 等. 冻融后不同含水率红砂岩三轴蠕变特性及损伤模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(8): 1463–1472.
WAN Yi, CHEN Guoqing, SUN Xiang, et al. Triaxial creep characteristics and damage model for red sandstone subjected to freeze–thaw cycles under different water contents[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1463–1472.
- [16] XU Junce, PU Hai, SHA Ziheng. Experimental study on the effect of brittleness on the dynamic mechanical behaviors of the coal measures sandstone[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: 1–11.
- [17] 陈国庆, 简大华, 陈宇航, 等. 不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变特性[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 661–669.
CHEN Guoqing, JIAN Dahua, CHEN Yuhang, et al. Shear creep characteristics of red sandstone after freezethaw with different water contents[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 661–669.
- [18] 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]. *岩土力学与工程学报*, 2012, 31(4): 731–737.
ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, 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.
- [19] 程桦, 陈汉青, 曹广勇, 等. 多孔岩石冻融水分迁移损伤机制及试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1739–1749.
CHENG Hua, CHEN Hanqing, CAO Guangyong, et al. Damage mechanism of porous rock caused by moisture migration during freezethaw process and experimental verification[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1739–1749.
- [20] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1371–1380.
- [21] LYU Zhitao, LUO Sicheng, XIA Caichu, et al. A thermalmechanical coupling elastoplastic model of freeze–thaw deformation for porous rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55: 3195–3212.
- [22] 康永水, 刘泉声, 赵军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2518–2526.
KANG Yongshui, LIU Quansheng, ZHAO Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2518–2526.
- [23] 李宏岩. 低温下砂岩动态力学特性试验研究[J]. *中国测试*, 2022, 48(6): 148–152.
LI Hongyan. Experimental study on dynamic mechanical properties of sandstone at sub-zero temperature[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(6): 148–152.
- [24] ZHANG Jian, DENG Hongwei, DENG Junren, et al. Development of energybased brittleness index for sandstone subjected to freeze-thaw cycles and impact loads[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 48522–48530.
- [25] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1974, 11(10): 389–392.
- [26] 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 Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. physical characteristics and degradation model of stratified sandstone under freeze-thaw cycling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 632–641.
- [27] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 低温环境下红砂岩蠕变特性及其模型[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2795–2803.
SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Creep property and model of red sandstone under low temperature environment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2795–2803.
- [28] BOHACS Kevin M, CARROLL Alan R, NEAL John E, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework[M]. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 2020: 3–12.
- [29] PLATT Nigel H, WRIGHT V. Paul. Palustrine carbonates and the Florida Everglades; towards an exposure index for the fresh-wa

- ter environment[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62(6): 1058–1071.
- [30] PRICK Angelique. Critical degree of saturation as a threshold moisture level in frost weathering of limestones[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, 8(1): 91–99.
- [31] 申艳军, 杨更社, 王 婷, 等. 岩石内孔隙/裂隙冻胀力模型及其适用性评价[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 117–128.
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ting, *et al.* Evaluation of frost heave force models of pore /fissure in rock and their applicability[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 117–128.
- [32] 贾海梁, 项 伟, 谭 龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 879–895.
JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, *et al.* Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 879–895.
- [33] 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 Dejun, PU Hai, SHA Ziheng, *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.