

DOI: 10.11779/CJGE20221337

外部水源作用下岩石液氮冻结试验研究

谭智勇, 王超林*, 龙安发

(贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 地下工程施工常遇到砂土交错和地下水丰富的软弱地层问题, 液氮低温可使岩土体迅速冻结以达到土层稳定和加固目的, 但液氮在快速冻结的同时也会导致周围岩土体物理力学性质受到劣化, 因此, 探究超低温作用下外部水源对岩石劣化作用的影响对于工程施工的长期稳定和安全具有重要意义。为研究外部水源对岩石低温劣化作用影响, 对不同饱水条件下的岩样进行液氮冷浸处理后开展超声波试验、核磁共振试验和单轴压缩试验。试验结果表明: ①岩样在冻结状态下仍存在损伤, 且损伤程度随岩样恢复室温后进一步增加; ②液氮冷浸时间 40 min 左右对岩样劣化作用最明显; ③外部水环境导致干燥岩样劣化程度增加、而饱和岩样劣化程度降低; ④当岩石外部存在水源时, 长时间(>30 min)的液氮冷浸作用会增加岩石的强度, 而短时间(≤ 30 min)的液氮冷浸处理会劣化岩石的强度。

关键词: 液氮; 冻结损伤; 孔隙结构; 岩石强度

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)02-0415-11

作者简介: 谭智勇(1997—), 男, 硕士, 主要从事液氮致裂岩石等方面的研究工作。E-mail: tzywell@qq.com。

Experimental study on rock damage frozen with liquid nitrogen under external water source

TAN Zhiyong, WANG Chaolin, LONG Anfa

(School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The construction of underground engineering often encounters the problems of staggered sand and soft strata with abundant groundwater. The low temperature of liquid nitrogen can make the rock and soil quickly freeze to achieve the purpose of soil stability and reinforcement. However, the rapid freezing of liquid nitrogen will also lead to the deterioration of the physical and mechanical properties of the surrounding rock and soil. Therefore, it is of great significance to explore the influence of external water source on rock deterioration under ultra-low temperature for the long-term stability and safety engineering construction. In order to study the influences of external water source on the low-temperature deterioration of rock, the ultrasonic experiment, nuclear magnetic resonance experiment and uniaxial compression experiment are carried out on rock samples under different saturated conditions after liquid nitrogen freezing treatment of liquid nitrogen. The test results show that: (1) The rock samples still have damage in the frozen state, and the degree of damage increases further after the rock samples return to room temperature. (2) The freezing time of liquid nitrogen for about 40 minutes has the most obvious deterioration effects on the rock samples. (3) The external water environment increases the deterioration degree of the dry rock samples and decreases the deterioration degree of the saturated rock samples. (4) When there is a water source outside the rock, the long-term (> 30 minutes) freezing of liquid nitrogen will increase the strength of the rock, while the short-term (≤ 30 minutes) freezing of liquid nitrogen will deteriorate the strength of the rock.

Key words: liquid nitrogen; freezing damage; pore structure; rock strength

0 引 言

在城镇化发展不断加速、生态环境要求不断提高的双重约束下, 地下空间开发利用在城市和交通发展中的地位和综合效应日益显现。地下空间开发利用有助于解决目前面临的交通拥堵问题、停车难问题、城市环境问题和土地压力问题。但地铁等地下工程在施工过程中常遇到土壁塌方、突水突泥和砂土交错等问

题^[1]。通过常规的地层加固方法很难彻底解决地下水和岩土塌方等问题。为解决地下施工中所遇到的一系列技术难题, 在 20 世纪 70 年代初, 地层冻结技术开始应用到采矿工程、地下交通工程和城市地下工程的

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52004072, 52264006)

收稿日期: 2022-10-30

*通信作者 (E-mail: 370567882@qq.com)

稳定和加固作用中^[2]。与常规方法不同,地层冻结技术是通过人工制冷冻结岩土体,从而提高岩土体强度和避免岩土体内地下水涌入隧道。地层冻结技术通常利用氨、干冰、盐水和液氮等进行冻结。液氮拥有化学性质稳定、温度极低(-196℃)、冻结速度快(比常规盐水冻结快 10 倍)和无污染等优点,被广泛应用于清障施工、隧道修复、盾构隧道对接、洞口土体加固和局部抢险等地下工程中^[3]。但使用液氮进行冻结施工的同时也会使周围岩体物理力学性质受到劣化^[4],若不关注液氮对岩石产生的劣化效应,可能给地下工程施工带来安全隐患^[5]。

目前,国内外学者已开展了大量液氮作用下岩石力学试验研究^[6-7],岩石强度取决于岩石的凝聚力和岩石颗粒之间的摩擦力^[4]。当液氮冻结岩石时,岩石内部会因孔隙水冻结膨胀和岩石颗粒不均匀收缩而产生两种改变岩石内部结构的应力作用^[8],这是低温作用下岩石受到损伤的主要因素。当岩石外部存在水环境时,岩石与外部水源之间的水分迁移作用^[9]以及外部水源冻结膨胀对岩石产生的挤压作用也是影响岩石劣化的重要因素。此外,液氮对干燥岩石和含水性较高的岩石产生的劣化作用差别较大。对于干燥岩石,低温会导致干燥多孔岩石的孔隙体积和数量减少^[10]。而对于饱和岩石,低温对其造成的劣化作用与渗透率有关。即渗透率较低的岩石在冻结过程中受到的劣化作用较大,而渗透率较高的岩石受到的劣化作用相对较小^[11]。但上述现象只会出现在封闭系统中,在开放系统中,因为渗透率较高的岩石的水分迁移程度会更高,而水分迁移过程中产生的冰透镜^[9, 11]也是造成岩石冻损的主要原因之一,所以此时渗透率大小已不足以影响岩石的冻损程度。因此,外部水环境对岩石低温劣化效果有较大影响。目前,对于外部水环境下的岩石冻结损伤试验较少,需进一步研究与揭示外部水环境下岩石的冻结损伤机制。

本文对不同条件下的饱和岩样和干燥岩样进行液氮冷浸试验,通过超声波试验、核磁共振试验、单轴压缩试验研究了外部水环境条件下液氮对岩石的波速、孔隙和强度的作用机制,研究结果可为液氮冻结岩石理论研究以及工程实际提供了理论依据。

1 试验准备和方案

1.1 试验所用岩样

试验所用的岩样为取自山东日照的红砂岩。岩样尺寸为 Φ50×100 mm,通过定量分析,岩样主要由钠长石(52.3%)、石英(40.8%)、和方解石(6.9%)组成。岩样表面肉眼无见裂纹,通过超声波设备测试,拟采用的岩样波速在 2.8~3.0 km/s。

1.2 试验设备

超声波试验设备为 WSD-4 数字声波仪,见图 1。采样间隔为 0.1 μs,发射电压为 120 V,发射脉宽为 10 μs,滤波 10~500 K,增益 54 dB,采样间距为 100 mm,测量类型为对测。单轴压缩试验采用四川德翔科创仪器有限公司生产的 DSZ-1000 应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪。试验过程采用位移加载控制,加载速率为 0.1 mm/min。

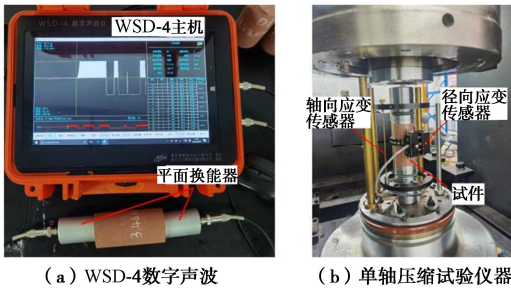


图 1 WSD-4 数字声波仪和单轴压缩试验仪器

Fig. 1 WSD-4 digital acoustic instrument and unconfined uniaxial compression test instrument

核磁共振试验在苏州纽迈公司生产的 MacroMR12-150H-I 岩石微观孔隙结构成像分析仪上进行。分析仪磁体为永磁体,磁场强度: 0.3±0.05 T,磁体均匀度≤50 ppm;最大采样带宽为 2000 KHz,采样速率为 50 MHz;90 度脉冲宽度为 9.52 μs,180 度脉冲宽度为 18 μs;脉冲序列为 CPMG;回波间隔时间为 2000 ms。见图 2。

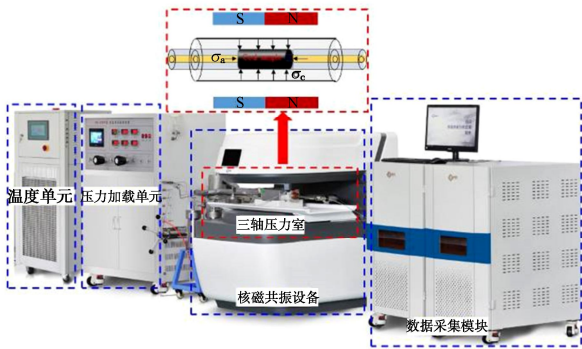


图 2 核磁共振仪器

Fig. 2 Nuclear magnetic resonance instrument

1.3 试验步骤

- (1) 利用 3D 打印制备液氮冷浸试验的薄壁圆柱塑料模具。模具尺寸为: 直径 100 mm, 高度 45 mm, 薄壁厚度 3 mm, 底部薄板中间镂空直径 50 mm 的圆。
- (2) 将所有试件在 105 °C 下烘干 24 h, 待试件恢复室温, 称取试件的重量并测量试件的波速。
- (3) 选取波速相近的 21 个试件, 将其分为 A, B, C 3 组, 每组 7 个试件。将 A, B, C 三组试件至于真空饱水机中饱和 24 h 后, 称量试件质量并进行 T₂ 核

磁试验。

(4) 对 A, B, C 组试件进行液氮冷浸试验 (如图 3 所示), 液氮冷浸处理时间分别为 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 min。液氮处理后, 立即测量超声波波速。在进行液氮冷浸试验时: A 组和 C 组岩样裸露在水环境中, B 组岩样未接触水源。同时为研究岩样含水率影响, 对 A 组和 B 组岩样进行饱水处理, 而对 C 组岩样进行干燥处理。冷浸试验结束后, 待试件表面冰块脱落, 立即擦干试件表面水分并称量质量。

(5) 将试件静置于室温环境 (25℃) 一定时间后, 测量试件的稳定波速。然后对试件进行真空饱水处理 24 h, 称其质量并进行 T₂ 核磁试验。

(6) 对试件进行烘干处理后, 称量试件质量, 进行单轴压缩试验。

每次冷浸试验完成后, 更换杜瓦瓶内的水, 保持水温常温。每组试验工况下进行 2 组平行试验。

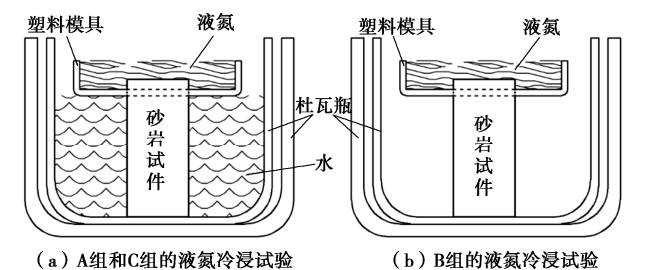


图 3 液氮冷浸岩石试验

Fig. 3 liquid nitrogen freezing rock experiment

1.4 试验现象和讨论

(1) 对于 B 组试件, 当冷浸时间≥20 min 时, 液氮不再沸腾, 试件整体温度趋于稳定 (<-50℃); 对于 A 组和 C 组试件, 试验过程中液氮始终处于沸腾状态, 且当冷浸时间≥20 min 时, 杜瓦瓶内的水开始冻结, 液氮沸腾程度加剧。通过测量水温、试件温度和冰块温度, 可判断导致液氮始终处于沸腾状态的原因是试件与外部水源或冰块之间进行了温度交换。

(2) B 组试件冷浸 30 min 后, 其冷浸面温度达到了测温枪的极限测量温度 (-50℃), 而侧面和底面温度在-47.5℃左右。对于 A 组和 C 组试件, 其冷浸前后的温度变化情况如表 1 所示。

(3) 如图 4 所示, B 组试件冷浸 20 min 时表面开始产生水平裂纹, 各试件的裂纹位置距离冷浸面 60 mm 左右, 故液氮冷浸产生的最大温差在距离冷浸面 60 mm 左右的位置。

(4) 如表 2 所示, C 组试件在冷浸试验后平均质量增加了 15.3 g, 说明冷浸试验过程中, 试件外部的水迁移进入了试件内部。而 A 组试件冷浸后平均质量增加了 1 g 左右, 说明 A 组试件在冷浸过程中存在水分迁入和水分迁出的现象。

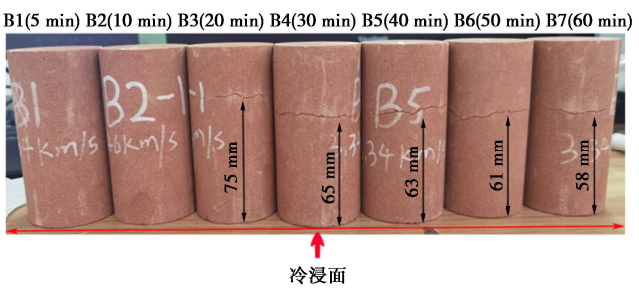


图 4 B 组岩石裂纹扩展情况

Fig. 4 Crack propagation of group B rock

表 1 液氮冷浸试验环境参数 (A 和 C 组平均值)

Table 1 Environmental parameters of liquid nitrogen freezing experiment (mean values of groups A and C)

冷浸时间/min	试验前/℃		试验后/℃			
	水温	试件温度	水温	冷浸面温度	试件中部温度	试件底部温度
5	24.6	24.8	20.6	-11.3	13.7	20.6
10	24.8	25.3	5.6	-22.4	3.2	11.3
20	25.0	24.6	-1.3	-37.5	-6.8	0.8
30	24.6	25.0	-2.7	-47.5	-15.6	-0.2
40	25.1	24.9	-4.2	<-50	-20.7	-1.2
50	24.7	24.8	-4.3	<-50	-21.3	-1.7
60	25.4	26.0	-4.1	<-50	-23.5	-1.6

表 2 试件冷浸前后的重量变化情况

Table 2 Weight change of samples before and after freezing

岩样	冷浸前/g		冷浸后/g		
	干质量	饱和质量	冷浸后, 待冰脱落时立即测得的质量	饱和质量	干质量
A1	445.1	473.0	473.9	472.7	445.0
A2	433.9	461.0	461.4	460.5	433.6
A3	444.3	472.6	473.3	472.1	444.0
A4	445.7	473.5	474.3	473.4	445.5
A5	444.4	472.4	474.5	472.2	444.0
A6	444.7	472.6	473.4	472.8	444.1
A7	445.4	473.2	473.8	473.4	445.1
B1	445.7	473.2	473.3	473.0	445.0
B2	442.7	471.1	471.2	471.1	442.0
B3	445.2	472.8	472.7	472.5	444.6
B4	442.0	470.8	470.9	470.4	441.5
B5	442.8	471.0	471.6	471.6	442.4
B6	445.0	472.6	473.6	473.3	444.5
B7	442.0	470.4	470.8	471.0	441.4
C1	441.7	470.4	454.7	470.2	441.0
C2	443.5	471.1	454.5	471.0	443.0
C3	443.2	471.8	458.5	471.6	442.8
C4	444.5	472.0	459.2	472.0	444.0
C5	426.4	455.0	448.8	455.4	425.8
C6	444.0	471.0	459.4	471.7	443.4
C7	444.2	471.6	459.5	471.5	443.6

2 试验结果与分析

2.1 声波变化结果分析

超声波作为一种无损检测技术常用于岩石裂纹检测，岩石的波速受微裂纹体积影响，岩石中微裂纹越多，波速越小。选取 P 波速度来研究液氮处理引起的损伤和开裂效应，其中损伤程度与波速之间的关系可以表示为^[12]

$$D_d = 1 - \left(\frac{v_p}{v_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中： D_d 为岩石的损伤变量； v_p 为岩石的波速； v_0 为未损伤岩石的波速。

冻结状态和室温状态（25℃）的波速变化如表 3 所示。当岩石处于冻结状态时，A，B，C 3 组的波速平均下降 3.57%，7.63%，3.11%。当岩石恢复室温状态时，A，B，C 3 组的波速平均下降 14.67%，19.07%，13.40%。对于 A 组和 C 组试件，冷浸 40 min 时的波速下降幅度最大，而对于 B 组试件，岩石的波速与冷浸时间呈反比趋势。

表 3 岩样的波速和损伤变量

Table 3 Wave velocities and damage variables of rock samples					
岩样	波速/(m·s ⁻¹)			损伤变量	
	原始状态	冻结状态	室温状态	冻结状态	室温状态
A1	2833	2726	2489	0.0721	0.2281
A2	2836	2765	2429	0.0494	0.2664
A3	2845	2770	2418	0.0520	0.2776
A4	2849	2753	2415	0.0626	0.2815
A5	2839	2687	2363	0.1042	0.3072
A6	2846	2751	2460	0.0656	0.2529
A7	2831	2714	2389	0.0809	0.2879
B1	2847	2748	2468	0.0683	0.2485
B2	2840	2746	2447	0.0651	0.2576
B3	2845	2658	2318	0.1271	0.3362
B4	2838	2559	2245	0.1869	0.3742
B5	2847	2546	2217	0.2002	0.3936
B6	2843	2583	2211	0.1745	0.3952
B7	2849	2550	2206	0.1989	0.4004
C1	2831	2809	2548	0.0155	0.1900
C2	2849	2811	2486	0.0265	0.2386
C3	2954	2843	2540	0.0737	0.2607
C4	3016	2933	2653	0.0543	0.2262
C5	2894	2739	2422	0.1042	0.2996
C6	2867	2751	2463	0.0793	0.2620
C7	2965	2854	2531	0.0735	0.2713

随着冻结试件恢复到室温（约 25℃），A，B，C 3 组试件的波速均大幅度降低。由式（1）计算得到：冻

结状态下的损伤变量在 0.01~0.1，而当试件恢复至室温状态时，A，B，C 3 组的损伤变量分别平均增加了 74%，59%，76%。这表示液氮冷浸会使冻结状态下的岩石受到损伤，且当岩石恢复室温后该损伤量将进一步扩大。

如图 5 所示，对于 A 组和 C 组试件，无论在冻结状态还是在室温状态下，波速整体上表现为先增加后减小的规律，即当冷浸时间达到 40 min 时，试件的波速下降幅度最大，而继续增加冷浸时间则会使波速下降幅度降低。

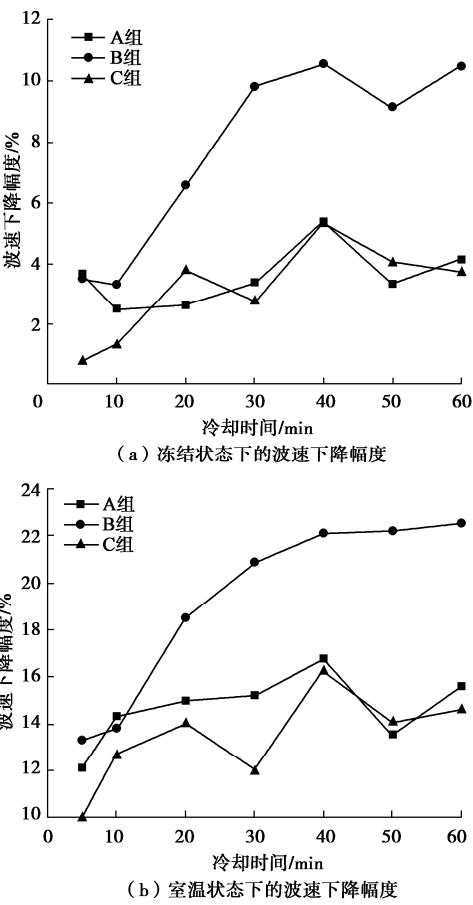


图 5 室温状态和冷冻状态下的波速下降幅度对比

Fig. 5 Comparison of the amplitude of wave velocity decrease in room temperature state and frozen state

结合图 6 和表 4 可知，当冷浸时间大于 40 min 时试件表面被冻结，随着冷浸时间继续增加，试件外部凝结冰块厚度增加，导致试件受到的冰块挤压力变大，该挤压力致使岩石密实程度上升，造成波速下降幅度降低。此外，对于 B 组和 C 组试件，当试件表面被冻结后，其内部岩石颗粒的收缩变形是影响试件内部结构的主要因素^[13]，也是导致冷浸 40 min 后波速下降幅度降低的原因之一；冷浸 60 min 时，波速下降幅度略微增加，表示试件外部凝结的冰块对试件产生的挤压力趋于稳定，但试件内部剩余的未冻孔隙水仍在冻结，进而影响波速变化。

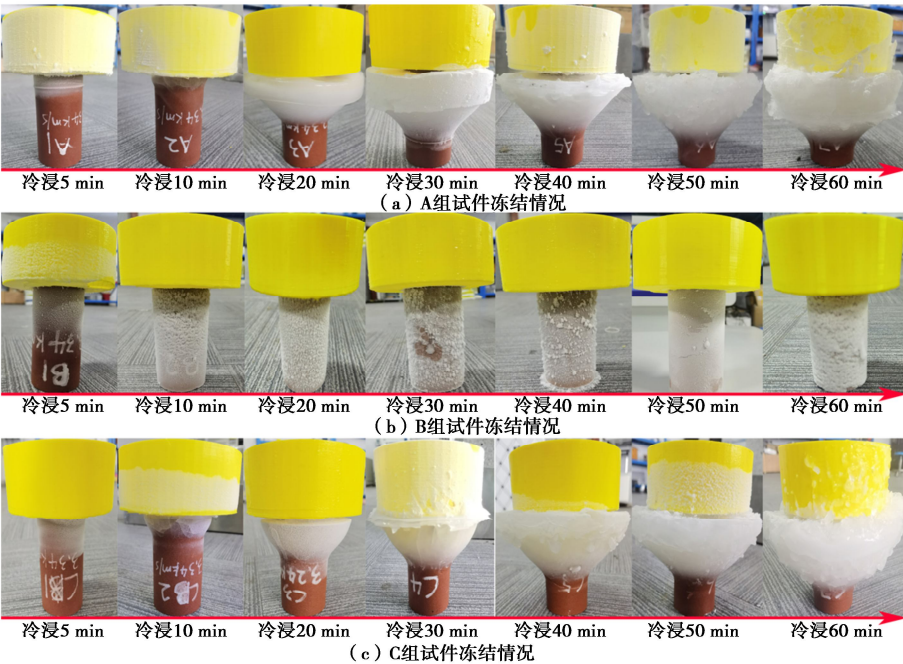


图 6 液氮冷浸试验后各组试件的冻结情况

Fig. 6 Freezing conditions of samples after liquid nitrogen freezing experiment

B 组试件的波速下降幅度与冷浸时间呈正比, 且在冷浸时间达到 40 min 时, 试件的波速下降幅度趋于稳定, 而 A 组和 C 组试件冷浸 40 min 后, 其波速下降幅度降低。因此, 液氮冷浸时间 40 min 左右对岩样劣化作用最明显。

表 4 试件表面的冰块垂直厚度

Table 4 Vertical thicknesses of ice on samples surface 单位: mm

组别	冷浸时间/min						
	5	10	20	30	40	50	60
A 组冰厚	4	11	31	55	70	89	93
C 组冰厚	8	15	45	49	65	75	85

2.2 核磁 T_2 结果分析

核磁共振技术根据饱和和岩样中流通的横向弛豫时间 T_2 来确定岩石孔隙结构的特征^[14], 核磁共振的横向弛豫时间 T_2 和孔隙半径 r 的关系可表达为^[15]

$$\frac{1}{T_2} = \rho \cdot \frac{S}{V} = F_s \cdot \frac{\rho}{r} \quad (2)$$

式中: ρ 为横向表面弛豫率 ($\mu\text{m/s}$); T_2 为横向弛豫时间 (ms); S 为孔隙表面积 (cm^2); V 为孔隙体积 (cm^3); F_s 为孔隙性状因子 (球状孔隙, $F_s=3$; 柱状孔隙, $F_s=2$; 裂隙, $F_s=1$); r 为孔隙半径 (μm)。

孔隙半径 r 和 NMR 横向弛豫时间 T_2 的关系可以表示为

$$r = T_2 F_s \rho \quad (3)$$

根据余玥等研究结果^[16], 砂岩的表面弛豫率 ρ 可取 $2.17\sim5.85\ \mu\text{m/s}$, 在 T_2 谱中, 第 1 个峰的 T_2 截止值在 $1.5\sim5.5\ \text{ms}$, 根据式 (3) 和图 7~9 可得第 1 个

峰对应直径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下的孔隙, 第 2 个峰对应直径在 $0.1\sim1\ \mu\text{m}$ 的孔隙, 第 3 个峰对应直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的孔隙。根据闫建平等^[17]对低渗透砂岩的孔隙分类法, T_2 谱中的第 1 个峰对应砂岩试件的微孔, 第 2 个峰对应砂岩试件的中孔, 第 3 个峰对应砂岩试件的大孔。此外, T_2 曲线积分面积与岩石内部的总孔隙体积成正比, 因此可通过 T_2 曲线积分面积来描述岩样内部的总孔隙体积变化^[18]。

图 8, 9 为 A, B 和 C 3 组试件的 T_2 分布曲线。经液氮冷浸处理后, 试件的孔隙体积均有不同程度的增加, 且不同冷浸时间对应的孔隙数量增加幅度有所差异。相较 A 组和 C 组试件, B 组试件的 T_2 曲线变化更加明显, 同时, 外部存在水环境的试件受到低温作用的影响相对较小。

图 10 为不同冷浸时间作用下的 T_2 面积变化情况, 对于 A 组试件, 其微孔和中孔的数量随冷浸时间增加先增加后减少, 而大孔的数量随冷浸时间增加先减少后增加且在冷浸 30 min 后趋于稳定, 即冷浸时间 $\leq 20\ \text{min}$ 时大孔数量减少而微孔和中孔数量快速增加, 冷浸 20~30 min 时大孔数量快速增加而微孔和中孔数量趋于稳定, 冷浸时间 $> 30\ \text{min}$ 时大孔数量达到最大值并趋于稳定而微孔和中孔数量逐渐减少。这是因为当冷浸时间 $\leq 20\ \text{min}$ 时, 水分迁移作用会使岩石内部的孔隙水与外部水源进行互换, 导致 A 组试件温度下降速度变慢 (如表 4 所示, A 组试件相较 C 组试件的冰块垂直厚度增加速度慢, A 组试件的温度下降速度变慢), 从而导致试件内部受到的影响以岩石颗粒收缩

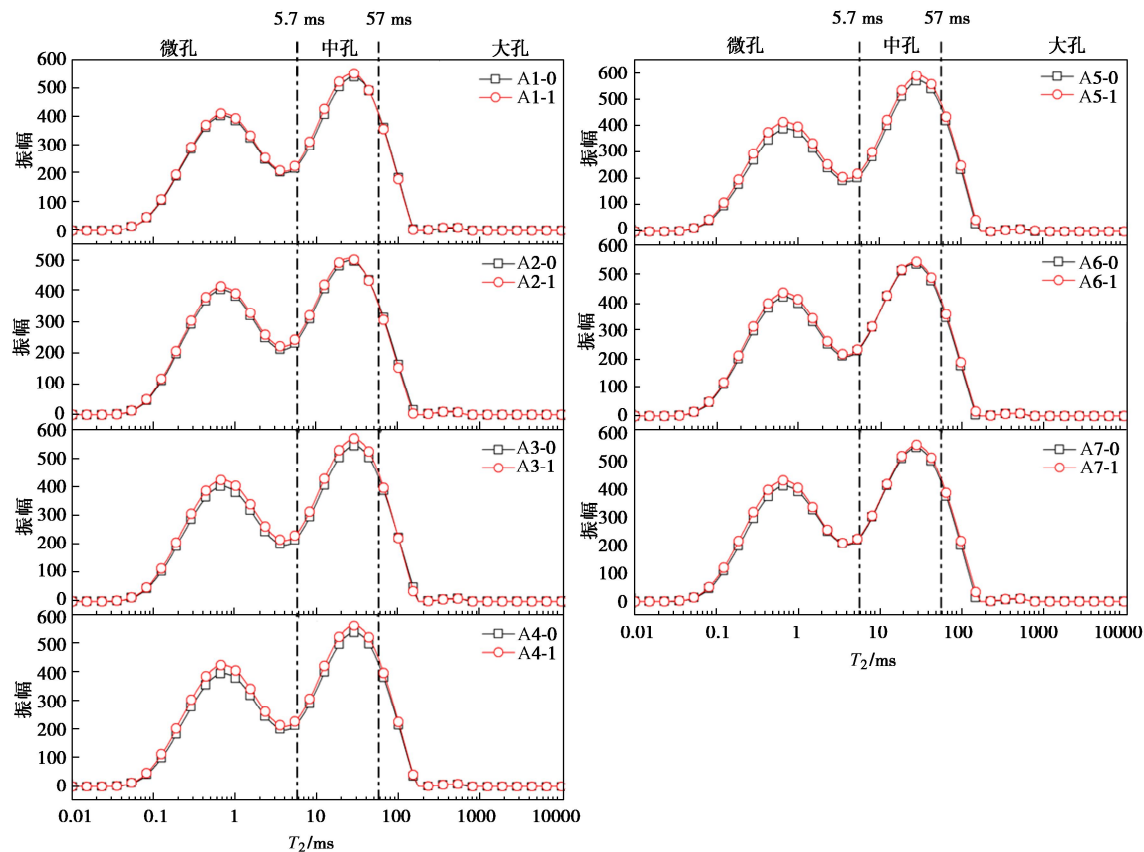


图 7 A 组核磁共振 T_2 分布曲线 (0 为冷浸前, 1 为冷浸后)

Fig. 7 NMR T_2 distribution curves of Group A (0 is before freezing, 1 is after freezing)

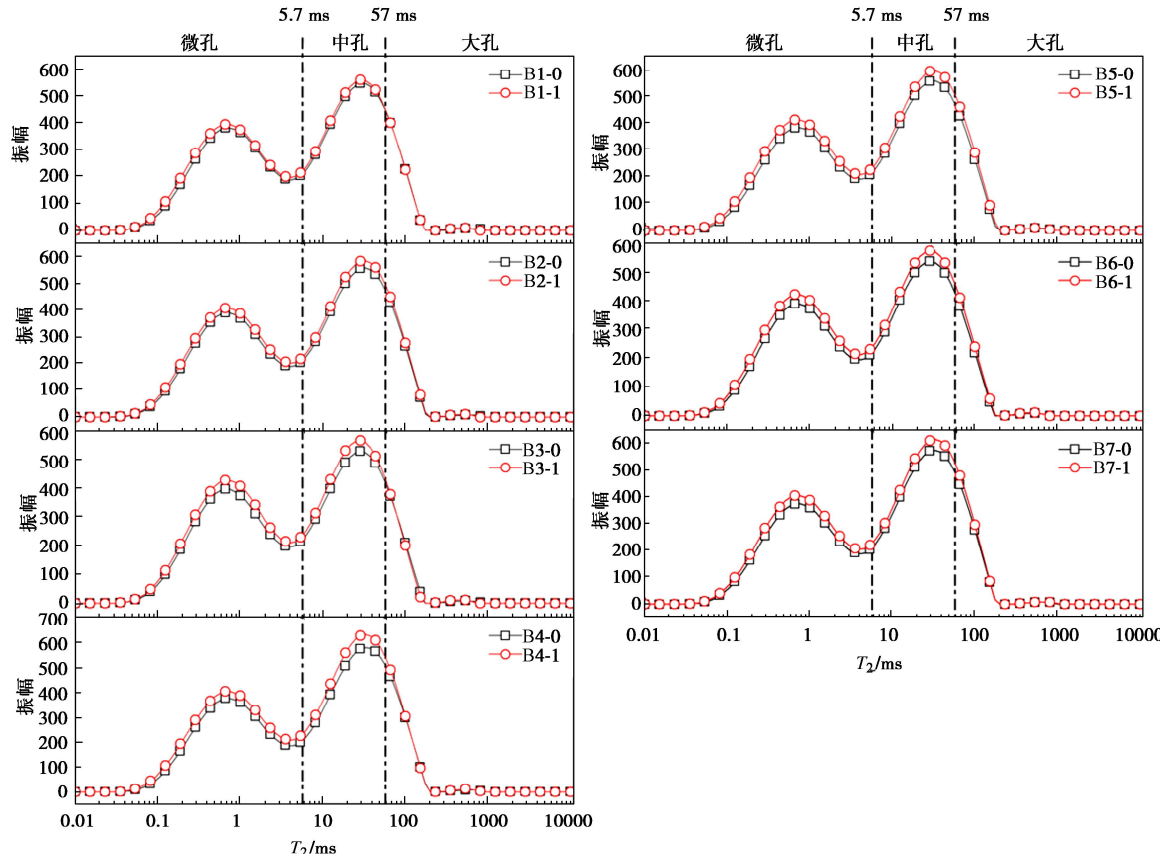
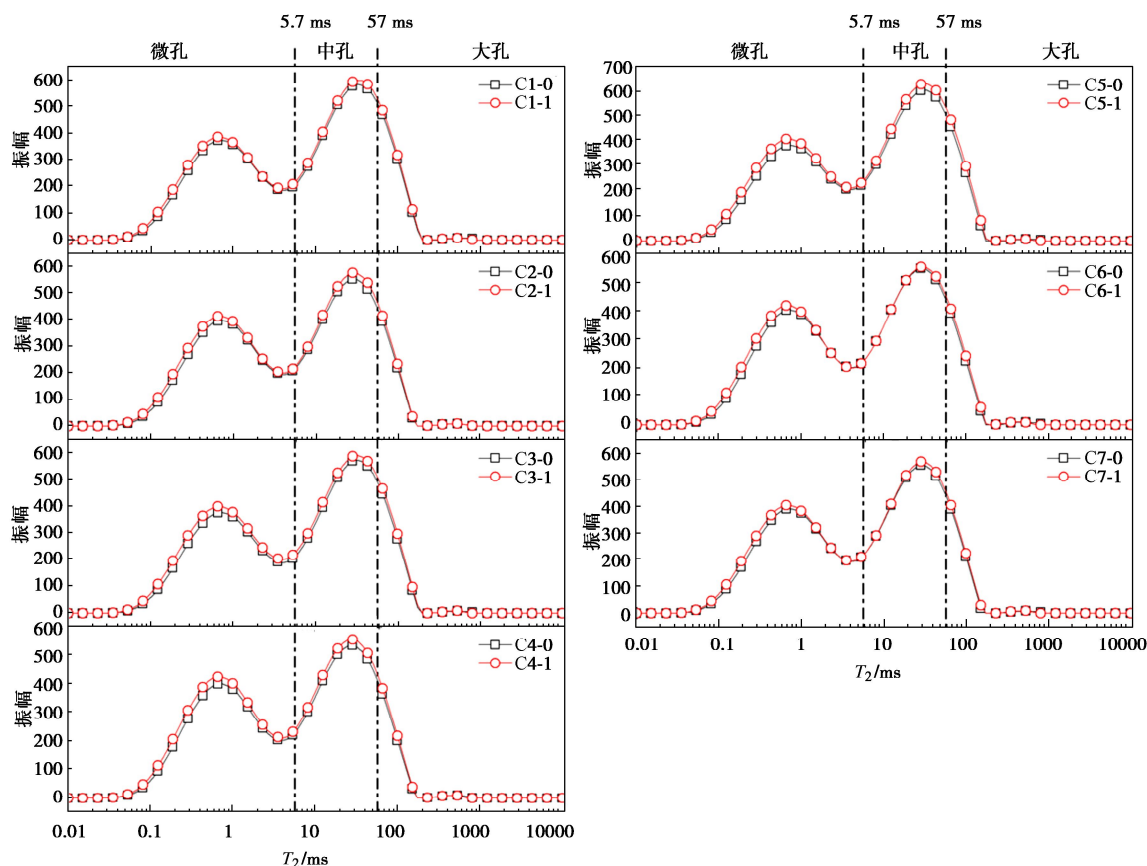
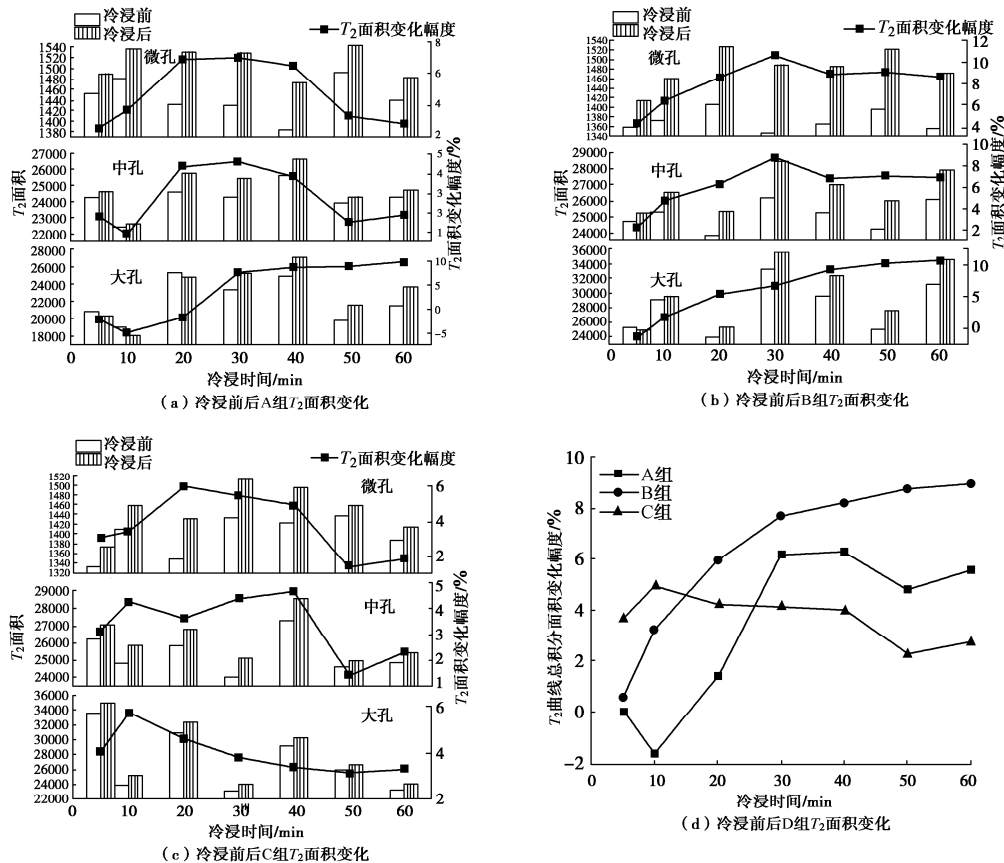


图 8 B 组核磁共振 T_2 分布曲线 (0 为冷浸前, 1 为冷浸后)

Fig. 8 NMR T_2 distribution curves of Group B (0 is before freezing, 1 is after freezing)

图9 C组核磁共振 T_2 分布曲线 (0 为冷浸前, 1 为冷浸后)Fig. 9 NMR T_2 distribution curves of Group C (0 is before freezing, 1 is after freezing)图10 不同冷浸时间作用下的 T_2 面积变化幅度Fig. 10 Variation of T_2 area under different freezing time

变形为主、孔隙水冻结膨胀为辅，因此表现为大孔数量减少而中孔和微孔的数量缓慢增加；当冷浸 20~30 min 时，试件表面开始结冰，水分迁入和迁出受阻，试件温度快速降低，此时试件内部受到的劣化作用以孔隙水冻结膨胀为主且冻胀力逐渐增加，但由于试件外部受到的冰块挤压力也在逐渐增加，因此表现为大孔数量随冷浸时间增加快速增加，而微孔和中孔的数量此时达到了最大值并趋于稳定；当冷浸 30~40 min 时，逐渐增加的冰块挤压力使得试件的孔隙数量趋于稳定；当冷浸时间 >40 min 时，试件外部凝结的冰块对试件产生较大的挤压力，试件内部的孔隙水与外部水源之间的水分迁移作用消失。此时，孔隙水结冰膨胀挤压孔隙壁，而未冻孔隙水会因孔隙空间的减少挤压孔隙尖端^[9]，两者的共同作用将导致岩石孔隙体积和孔隙数量增加。然而，由图 10 (a) 可知，此时试件微孔和中孔的数量在快速减少，而大孔的数量趋于稳定，这说明此时试件外部受到的冰块挤压力对试件起到了保护和强化作用。

对于 B 组试件，其微孔、中孔和大孔的数量随冷浸时间的增加而增加且在冷浸时间 >40 min 时趋于稳定。这是因为试件冷浸 5~20 min 时，其内部存在较大的温度应力和冻胀力，导致试件的孔隙数量快速增加。而冷浸 20 min 后，试件整体温度开始趋于稳定 (<-50℃)，此时造成试件劣化的主要原因是未冻孔隙水的冻结膨胀，但因为未冻孔隙水含量随冷浸时间增加而减少，所以冻胀作用对孔隙的影响趋于稳定，试件孔隙数量也逐渐达到稳定不再增加。

对于 C 组试件，其微孔和中孔的数量随着冷浸时间增加呈现出先增加后减少的规律，即冷浸 5~40 min 时，试件微孔和中孔数量随冷浸时间增加呈现出逐渐增加的趋势，冷浸 40 min 后微孔和中孔数量则快速减少，而大孔数量在冷浸 10 min 时达到最大值，随着冷浸时间增加大孔数量逐渐减少。封闭系统中，低温会

导致干燥岩石的孔隙体积和孔隙数量减少^[10]，因此在开放系统中，水分迁移是造成 C 组试件孔隙增加的主要原因。同时，结合大孔数量在冷浸 10 min 后不断减少的规律可推断，作用于 C 组试件的水分迁移现象仅在较小的范围内进行。由图 6 和表 4 可知，试件表面的冰块厚度随着冷浸时间的增加而增加，说明试件受到的冰块挤压力在逐渐上升，而当冷浸时间 >40 min 时，微孔和中孔数量快速减少，说明此时试件受到的冰块挤压力较大，且该压力对试件起到了保护和强化作用。

试件的总孔隙体积变化规律如图 11 (d) 所示，当冷浸时间 ≤20 min 时，C 组试件的总孔隙体积变化幅度比 A 组试件大，而当冷浸时间 >20 min 时，A 组试件的总孔隙体积变化幅度略大于 C 组试件的总孔隙体积变化幅度，即外部水源会增加干燥试件的劣化程度。当冷浸时间 >40 min 时，A 组和 C 组试件的总孔隙体积变化幅度均减少，表示此时试件受到的外部冰块挤压力大于孔隙水冻结膨胀产生的内应力。而在整个冷浸时间段中，B 组试件的总孔隙体积变化幅度均比 A 组试件大，说明外部水源的存在会降低饱和试件的低温劣化程度。

如图 11 所示，当冷浸时间 ≥30 min 时，试件表面被冻结，试件与外部水源之间的水分迁移作用被阻断，试件内部的孔隙水因冻结而逐渐减少。然而，A 组和 C 组试件的整体温度受到外部水源的最低温度 (-4℃左右)、附着在表面冰块的最低温度 (-22℃左右) 和底面边界温度 (-1.5℃左右) 的影响始终无法趋于稳定，这说明 A 组和 C 组试件内部在整个冷浸试验中均受到温度应力的影响，但由于试件外部冰块挤压力的存在，导致温度应力作用减小。此外，结合图 4 可知，B 组试件表面在冷浸时间 ≥20 min 时出现了肉眼可见的裂纹，但 A 组和 C 组试件在整个冷浸时间段内均未出现肉眼可见的裂纹，这说明当冷浸时间 ≥20 min 时，

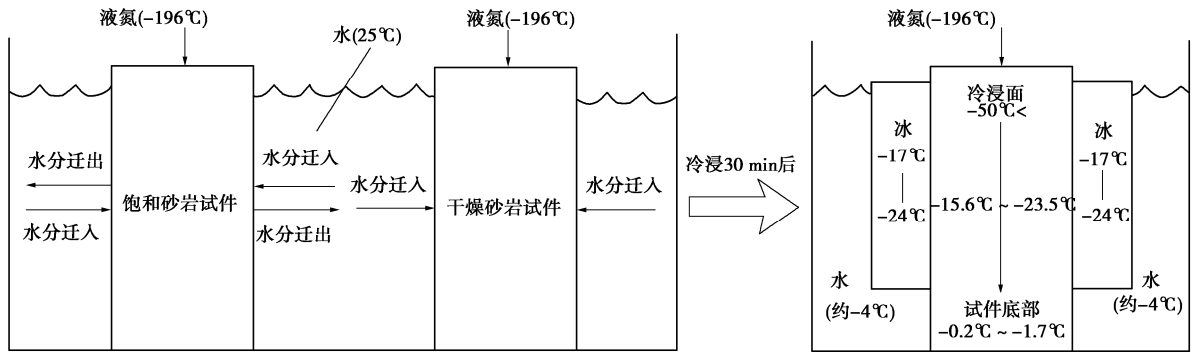


图 11 冷浸试验中的水分迁移现象

Fig. 11 Water migration in freezing experiment

试件外部的水源对试件起到了保护作用。

2.3 单轴压缩试验结果分析

图 12 为 A, B, C 3 组试件峰值强度与冷浸时间的关系, 未处理试件的强度在 43 MPa 左右。当经过 5~60 min 的冷浸处理后, A 组试件的强度分别降低了 16.2%, 21%, 35.7%, 35.1%, 40%, 9% 和 18%; B 组试件的强度分别降低了 7%, 6%, 24.65%, 36.5%, 40.5%, 37% 和 46%; C 组试件的强度分别降低了 17.4%, 22.6%, 31.2%, 46.5%, 23.7%, 4.7% 和 8.8%。可以发现, 在整个冷浸时间段内, B 组试件的强度下降幅度几乎与冷浸时间呈正比, 且最大强度降低幅度约 46%, 且当冷浸时间 ≥ 40 min 时, B 组试件的强度稳定在 23 MPa 左右, 此时继续增加冷浸时间对试件产生的劣化效果较小; 对于 A 组和 C 组试件, 随着冷浸时间增加, 其强度均呈现出先减少后增大的规律, 即当冷浸时间在 30~40 min 时, 试件的强度降幅达到了最大值 (40% 和 46.5%), 而继续增加冷浸时间会导致 A 组和 C 组试件的强度逐渐增加, 这说明当岩石外部存在水源时, 长时间 (>30 min) 的液氮冷浸作用会增加岩石的强度。此外, 当冷浸 5~30 min 时, A 组和 C 组试件的强度降幅大于 B 组试件, 这说明当试件存在外部水源时, 短时间 (≤ 30 min) 的液氮冷浸处理会劣化岩石的强度。

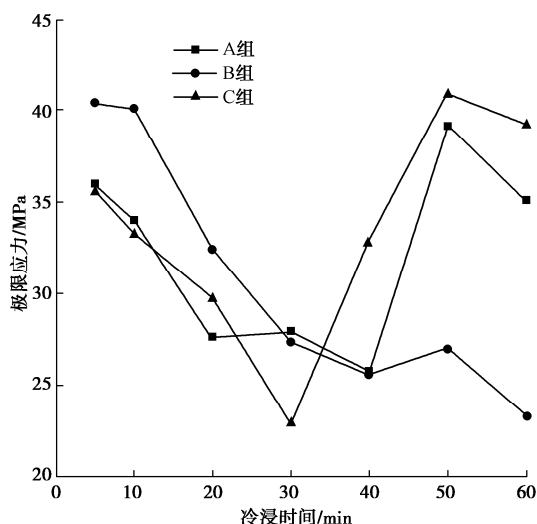


图 12 极限应力随冷浸时间变化曲线

Fig. 12 Curves of ultimate stress with freezing time

3 分析与讨论

岩石强度取决于岩石凝聚力和颗粒间的内摩擦力。由于液氮温度极低, 室温下岩石经液氮冷浸后, 短时间内可达到 200℃ 以上的温差, 这会降低岩石的凝聚力和颗粒间的内摩擦力, 导致岩石力学性质发生改变。通过试验研究发现, 液氮冷浸会降低饱和砂岩的超声波速、增加孔隙体积以及降低抗压强度, 导致

干燥多孔岩石的孔隙体积和数量减少^[10]。而当试件外部存在水源时, 饱和砂岩和干燥砂岩的液氮冻结损伤作用存在一些差异, 主要有以下 3 个方面原因。

(1) 从含水状态角度分析。当砂岩处于干燥状态时, 砂岩为单相介质且离散性较大, 颗粒间的孔隙通透性较高、沾黏力较弱, 在液氮冻结过程中, 小颗粒会填充大颗粒的孔隙, 使得砂岩变得更加密实。当砂岩处于饱和状态时, 砂岩为两相介质, 由岩石颗粒和裂隙中的水组成。经液氮冷浸处理后, 岩石颗粒遇冷收缩, 液相水冻结膨胀, 两者的共同作用加剧了砂岩的损伤, 进而影响岩石力学参数。由试验结果可知, 当试件外部存在水源时, 试件与外部水源之间会进行小范围的水分迁移, 该现象在一定程度上增加了干燥砂岩的含水率并造成干燥砂岩的损伤。一方面, 进入干燥砂岩内部的孔隙水冻结膨胀后会直接对砂岩本身造成损伤; 另一方面, 干燥砂岩内部的冻结膨胀区域与收缩变形区域之间的不均匀变形也会导致干燥砂岩受到损伤。因此水分迁移引起的含水率变化是干燥砂岩孔隙结构和力学性质在液氮冷浸试验中发生改变的主要原因之一。

(2) 从孔隙体积和孔隙数量角度分析。液氮冻结会使干燥砂岩的孔隙体积和孔隙数量减少, 这是因为当砂岩颗粒因低温作用而收缩时, 颗粒之间的孔隙尺寸会相应减小且小岩石颗粒会填充大岩石颗粒的孔隙, 从而导致孔隙数量和孔隙体积下降。液氮冻结会使饱和砂岩的孔隙体积和孔隙数量增加, 这是因为饱和砂岩的岩石颗粒间隙被液相水填满, 虽然岩石颗粒也会因低温作用而收缩, 但此时小岩石颗粒无法填充大岩石颗粒的孔隙, 因此在液氮冻结过程中, 饱和砂岩的孔隙数量和孔隙体积受到温度应力和孔隙水冻结膨胀的双重影响而增加。

当试件外部存在水源时, 水分迁移作用会使干燥砂岩的部分孔隙被液相水填满, 进而阻止部分小颗粒填充大颗粒的孔隙。孔隙水冻结膨胀后, 干燥砂岩内部出现的冻结膨胀区域和收缩变形区域是影响干燥砂岩孔隙体积和孔隙数量变化的主要原因, 即冻结膨胀区域的孔隙体积和孔隙数量增加, 而收缩变形区域的孔隙体积和孔隙数量减少, 两者的共同作用是造成干燥砂岩孔隙结构变化的主要原因之一。此外, 经过长时间的冷浸处理后, 外部冰块的挤压力会使砂岩趋于密实, 因此外部水源冻结后对砂岩产生的挤压力也是造成砂岩孔隙结构变化的主要原因之一。

(3) 从超低温冻结与常规冻结的角度分析。液氮冻结与常规冻结的区别主要表现在冻结对象的温度变化效率上 (液氮冻结比常规盐水冻结的冻结速度快 10 倍)。这就意味着在同样的环境下, 相较于常规冻结,

超低温冻结将在岩石内部的不同区域之间形成更大的温度应力。该温度应力的差别可能对于以孔隙水冻结膨胀为冻结损伤主要影响因素的饱和砂岩而言并不会表现出明显的影响,但对于以水分迁移为冻结损伤主要影响因素的干燥砂岩影响较大。①较大的温度梯度有利于水分迁移作用^[20],这表示使用液氮进行超低温冻结的岩石与外部水源之间进行的水分迁移范围会更大,因此干燥砂岩在液氮冷浸作用下会产生更大的损伤。②当岩石内部的孔隙水冻结后,相较于常规冻结法,超低温冻结在岩石内部产生的较大温差会导致岩石内部收缩变形区域的收缩变形程度更高,因此冻结膨胀区域与收缩变形区域的差异也更大,所以对于干燥岩石造成的影响更大。③从外部水源冻结后对试件产生保护和强化作用来分析,虽然超低温冻结相较于常规冻结而言更容易损伤岩石,但就试件外部凝结的冰块来说,相同时间内,外部水源在超低温的作用下的结冰速度更快,冰块冻结程度更高,因外部冰块而产生的挤压力也会以更快的速度增长,因此能够在短时间内对岩石起到保护和强化作用,避免岩石受到损伤。

4 结 论

以红砂岩为研究对象,研究外部水环境作用下液氮对岩石的物理力学性质劣化效应,得到以下3点结论。

(1)通过测量液氮冻结前后岩石的超声波波速得出,岩样在冻结状态下仍存在损伤,且损伤程度随岩样恢复室温后进一步增加。当冷浸时间大于40 min时,岩样损伤程度降低,岩样外部凝结冰块对岩样产生的挤压力和岩石颗粒的收缩变形是损伤程度降低的主要原因。

(2)由核磁共振试验可知,对于外部存在水环境的岩样,冷浸时间、水分迁移、孔隙水冻结情况以及岩样外部冰块对岩样产生的挤压力是造成孔隙变化的主要因素。外部水环境导致干燥岩样劣化程度增加,而饱和岩样劣化程度降低。当冷浸时间 ≥ 20 min时,试件外部的水源会对试件起到保护和强化作用。

(3)由力学试验结果得出,当岩石外部存在水源时,长时间(>30 min)的液氮冷浸作用会增加岩石的强度,而短时间(≤ 30 min)的液氮冷浸处理会劣化岩石的强度。

参考文献:

[1] 周洁,李泽垚,万鹏,等.组合地层渗流对人工地层冻结及周围工程环境效应的影响[J].岩土工程学报,2021,

43(3): 471-480. (ZHOU Jie, LI Zeyao, WAN Peng, et al. Effects of seepage in clay-sand composite strata on artificial ground freezing and surrounding engineering environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 471-480. (in Chinese))

[2] 陈瑞杰,程国栋,李述训,等.人工地层冻结应用研究进展和展望[J].岩土工程学报,2000,22(1): 40-44. (CHEN Ruijie, CHENG Guodong, LI Shuxun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 40-44. (in Chinese))

[3] 汪恩良,任志凤,韩红卫,等.超低温冻结黏土单轴抗压力学性质试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(10): 1851-1860. (WANG Enliang, REN Zhifeng, HAN Hongwei, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of ultra-low temperature frozen clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1851-1860. (in Chinese))

[4] 黄中伟,位江巍,李根生,等.液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J].岩土力学,2016,37(3): 694-700, 834. (HUANG Zhongwei, WEI Jiangwei, LI Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 694-700, 834. (in Chinese))

[5] 董新平,于少辉,张毅豪,等.地铁联络通道冻结法施工中涌水成因及防治[J].地下空间与工程学报,2022,18(1): 322-329, 340. (DONG Xinping, YU Shaohui, ZHANG Yihao, et al. The causes and prevention measures of water inflow at cross passage located in sandy gravel layers and constructed by artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 322-329, 340. (in Chinese))

[6] 蔡承政,任科达,杨玉贵,等.液氮压裂作用下页岩破裂特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(11): 2183-2203. (CAI Chengzheng, REN Keda, YANG Yugui, et al. Experimental research on shale cracking characteristics due to liquid nitrogen fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2183-2203. (in Chinese))

[7] ZHANG S K, HUANG Z W, ZHANG H Y, et al. Experimental study of thermal-crack characteristics on hot dry rock impacted by liquid nitrogen jet[J]. Geothermics, 2018, 76: 253-260.

[8] GAO F, CAI C Z, YANG Y G. Experimental research on rock

- fracture failure characteristics under liquid nitrogen cooling conditions[J]. *Results in Physics*, 2018, **9**: 252-262.
- [9] MATSUOKA N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1990, **17**(3): 253-270.
- [10] CAI C Z, LI G S, HUANG Z W, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, **21**: 507-517.
- [11] NAKAMURA D, GOTO T, ITO Y, et al. A basic study on frost susceptibility of rock: differences between frost susceptibility of rock and soil[C]//*Cold Regions Engineering* 2009. Duluth, 2009.
- [12] 何玉红. 单轴荷载下砂岩波速特征与损伤演化规律研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, **12**(1): 44-48. (HE Yuhong. Research on ultrasonic velocity properties and damage development of sandstone under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, **12**(1): 44-48. (in Chinese))
- [13] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(9): 1409-1412. (YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(9): 1409-1412. (in Chinese))
- [14] LI S, TANG D Z, PAN Z J, et al. Characterization of the stress sensitivity of pores for different rank coals by nuclear magnetic resonance[J]. *Fuel*, 2013, **111**: 746-754.
- [15] 田佳丽, 王惠民, 刘星星, 等. 基于NMR耦合实时渗流的砂岩渗透特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(9): 1671-1678, 8. (TIAN Jiali, WANG Huimin, LIU Xingxing, et al. Permeability characteristics of sandstone based on NMR-coupled real-time seepage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(9): 1671-1678, 8. (in Chinese))
- [16] 余 玥, 孙一迪, 高 睿, 等. 基于 T_2 截止值确定致密岩心表面弛豫率[J]. *石油实验地质*, 2022, **44**(2): 342-349. (YU Yue, SUN Yidi, GAO Rui, et al. Determination of surface relaxivity for tight sandstone cores based on T_2 cut-off value[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, **44**(2): 342-349. (in Chinese))
- [17] 闫建平, 温丹妮, 李尊芝, 等. 基于核磁共振测井的低渗透砂岩孔隙结构定量评价方法: 以东营凹陷南斜坡沙四段为例[J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(4): 1543-1552. (YAN Jianping, WEN Danni, LI Zunzhi, et al. The quantitative evaluation method of low permeable sandstone pore structure based on nuclear magnetic resonance(NMR) logging[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(4): 1543-1552. (in Chinese))
- [18] 王怀栋. 超低温液氮条件下页岩脆性破裂机理研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017. (WANG Huaidong. Study on Mechanism of Brittle Fracture of Shale under Super-low Temperature Condition of Liquid Nitrogen[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2017. (in Chinese))
- [19] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. *Water Resources Research*, 1980, **16**(5): 918-930.
- [20] 高玉佳, 王 清, 陈慧娥, 等. 温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(5): 698-702. (GAO Yujia, WANG Qing, CHEN Hui'e, et al. Effect of temperature on migration of water in seasonal frozen soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(5): 698-702. (in Chinese))