

# 岩石冻融过程未冻水含量演化特征及 对力学特性影响研究

宋勇军<sup>1</sup>, 卢云龙<sup>1</sup>, 王双龙<sup>1</sup>, 谢丽君<sup>2</sup>, 操警辉<sup>1</sup>, 安旭晨<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中冶地集团西北岩土工程有限公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 冻融过程岩石孔隙内未冻水含量变化是影响其力学特性的关键因素之一。以砂岩为研究对象, 采用低场核磁共振系统 (nuclear magnetic resonance, NMR) 对岩石冻融过程 (20、0、-2、-4、-6、-10、-15、-10、-6、-4、-2、0、20 °C) 孔隙水含量进行监测, 分析未冻水含量随温度的演化规律, 并探讨岩石冻融过程未冻水含量演化对其力学特性的影响。研究表明: (1) 冻融过程岩石中孔隙水受温度影响显著, 共经过 5 个阶段, 即过冷段、快速冻结阶段、缓慢冻结阶段、缓慢融化阶段和融化加速阶段。(2) 岩石在解冻过程中有明显的滞后现象。在相同温度下, 岩样冻结过程未冻水含量明显高于解冻过程。与之对应, 解冻过程的峰值强度和弹性模量相对于冻结阶段显著提高。(3) 冻融过程的单轴抗压强度以及岩石弹性模量与未冻水含量的关系可由指数函数表示。冻结初期, 岩石力学参数的变化主要受孔隙冰含量的增长及孔隙冰对岩石颗粒的胶结作用影响, 随温度进一步降低, 吸附水膜厚度下降, 吸附能力增强, 使孔隙冰与对岩石颗粒之间的整体性增强, 岩石力学参数进一步发生改变。

**关键词:** 核磁共振; 冻融回滞; 未冻水含量; 力学特性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 04-1049-12

## Evolution characteristics of unfrozen water content and its influence on mechanical properties of rock during freeze-thaw process

SONG Yong-jun<sup>1</sup>, LU Yun-long<sup>1</sup>, WANG Shuang-long<sup>1</sup>, XIE Li-jun<sup>2</sup>, CAO Jing-hui<sup>1</sup>, AN Xu-chen<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Metallurgical Group Northwest Geotechnical Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710061, China)

**Abstract:** The change of unfrozen water content in pores of rock during freeze-thaw process is one of the key factors affecting its mechanical properties. In this paper, the sandstone is taken as the research object, and the pore water content of rock during freeze-thaw process (20, 0, -2, -4, -6, -10, -15, -10, -6, -4, -2, 0, 20 °C) is monitored by low-field nuclear magnetic resonance system (NMR), and the evolution law of unfrozen water content with temperature is analyzed. The influence of the evolution of unfrozen water content on the mechanical properties of rock during freeze-thaw process is also discussed. The research findings show that the pore water in rocks during the freezing-thawing process is significantly influenced by temperature, passing through five stages: supercooling, rapid freezing, slow freezing, slow melting, and accelerated melting. A distinct hysteresis phenomenon is observed in the rock during thawing. At identical temperatures, the unfrozen water content during freezing is notably higher than during thawing. Consequently, the peak intensity and elastic modulus during thawing are significantly greater than during freezing. The relationship between uniaxial compressive strength, rock elastic modulus, and unfrozen water content in freeze-thaw process can be expressed by exponential function. At the beginning of freezing, the change of rock mechanical parameters is mainly affected by the increase of pore ice content and the cementation effect of pore ice on rock particles. With the further decrease of temperature, the thickness of adsorbed water film decreases, and the adsorption capacity increases, so that the integrity between pore ice and rock particles is enhanced, and rock mechanical parameters further change.

**Keywords:** nuclear magnetic resonance; freeze-thaw hysteresis; unfrozen water content; mechanical properties

收稿日期: 2024-06-06

录用日期: 2024-10-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 42277182, No. 11972283)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42277182, 11972283).

第一作者简介: 宋勇军, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: songyj79@xust.edu.cn

通讯作者: 卢云龙, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: luy16789@163.com

## 1 引 言

我国寒区面积辽阔,且主要分布在西北部地区<sup>[1]</sup>,在寒区特殊的自然条件下,岩体工程不可避免受到冻融作用的影响,岩石力学特性的变化严重威胁着岩体工程的安全稳定<sup>[2-3]</sup>,岩石的破坏其根本原因在于冻融过程中岩体孔隙、裂隙中水冰相变<sup>[4]</sup>及水分迁移现象交替发生,引起岩石冻胀变形<sup>[5-7]</sup>,孔隙的贯通与发展<sup>[8-9]</sup>均会影响岩体荷载下的力学性能。其中岩石中的孔隙冰是指在低温情况下,水与其他物质(如盐类或其他溶解物)组合形成了固态结构。然而,在冻结过程中并非所有孔隙水都会冻结,这些水称为未冻水<sup>[10]</sup>,这些未冻结的水向冰晶体迁移,使冻胀力不断增大,导致原生孔孔径增大,或萌生出新的孔(裂)隙等,诱发岩石损伤破坏,未冻水含量的多少决定着冻结岩体的水冰相变情况,水冰相变程度的变化又直接影响着冻结岩体冻胀量的大小<sup>[11-14]</sup>,因此,研究冻融过程岩石的力学特性,揭示未冻水对岩石力学特性的影响机制,对保障岩体工程的安全稳定具有重要意义。

目前众多学者对冻结岩石的力学特性已经进行了大量研究。研究表明,冻结岩石的力学特性相比于天然岩石,其抗压强度<sup>[15-16]</sup>、抗拉强度<sup>[17-18]</sup>都得到了有效的提高,且随温度的降低逐渐增大。

近年来,核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)在研究岩石孔隙水方面得到了广泛应用<sup>[19-20]</sup>,Li等<sup>[21]</sup>通过核磁共振设备,对不同岩石孔隙结构和水可动性进行了对比分析,并基于核磁共振弛豫理论,提出了  $T_2$  值与孔隙大小之间的数学模型。Jia等<sup>[22]</sup>采用核磁共振通过对不同饱和度(20%~100%)细粒砂岩冻结过程进行研究,发现饱和程度越高砂岩过冷效应与潜热释放现象越明显。Su等<sup>[23]</sup>以砂岩为研究对象,对单次冻融循环过程中砂岩未冻水含量演化规律进行研究,建立了温度与未冻水含量的变化关系,并提出了一种计算岩石冻融过程中未冻水含量的模型。宋勇军等<sup>[24]</sup>以裂隙砂岩为研究对象,开展冻融循环试验,通过分析冻结温度、冻融次数、裂隙对未冻水的影响探究未冻水含量与砂岩细观损伤的关联。

对岩石孔隙水的研究逐渐深入,孔隙水相变对岩石力学行为的影响机制逐渐引起人们的广泛关注。李祖勇等<sup>[25]</sup>以裂隙饱和红砂岩为研究对象,研究了冻结砂岩融解过程未冻水含量演化及对砂岩蠕变力学特性的影响,结果表明砂岩长期强度与未冻水含量呈指数关系。Wang等<sup>[26]</sup>选取了砂岩冻结

过程中9个温度点进行核磁共振试验和力学试验,分析了冻结过程孔隙水相组成对岩石力学特性的影响,结果表明低温对饱和砂岩有显著的强化作用。

综上所述,现如今关于冻融过程中岩石孔隙内未冻水含量演化规律,及温度变化对岩石力学特性影响的研究已经取得丰富的成果,但对冻融过程未冻水与力学特性变化之间内在影响机制还鲜有报道。本文以砂岩为研究对象,利用核磁共振系统,研究冻融过程未冻水含量的演化规律,进行岩石冻融过程不同温度下的力学试验,探讨了岩石冻融过程中未冻水含量变化对力学特性的影响,进一步研究了未冻水含量与岩石强度之间的深层次联系。

## 2 试验方法

### 2.1 试样制备

本次试验所用砂岩取自西部某岩体工程,按照国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)要求进行试样加工,试样尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。为了减少试样的离散性对试验结果造成影响,首先需要排除外观存在明显差异的试样,再使用超声波测速仪和核磁系统对样本的波速及孔隙组成进行检测,选择波速、密度和孔隙组成相近的岩石样本进行后续研究。将选取岩石试样放置在温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干 $48\text{ h}$ 后测量其基本物理参数,再使用真空饱和仪对样本进行加压,使压强达到 $-0.1\text{ MPa}$ ,并持续饱和 $24\text{ h}$ ,确保样本完全饱和后,进行后续试验研究。试验试样如图1所示,砂岩物理参数均值如表1所示。



图1 岩样  
Fig.1 Rock sample

表1 砂岩岩样物理参数均值  
Table 1 Average physical parameters of sandstone samples

| 纵波波速<br>/( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 干密度<br>/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 饱和密度<br>/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 饱和含水率<br>/% | 孔隙度/% |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------|-------|
| 2.612                                      | 2.133                                     | 2.314                                      | 8.504       | 18.19 |

## 2.2 试验方案

本试验主要包括冻融过程 NMR 测试与力学试验两部分:

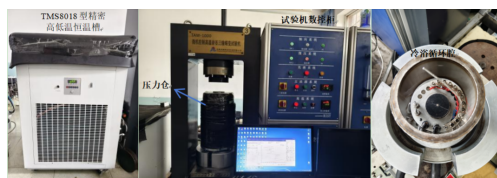
(1) 冻融过程 NMR 测试, 试验设备采用 MacroMR12-150H 型核磁共振系统, 如图 2 所示。冻融设备采用 DW-40 可控温高精度低温试验箱, 精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 室内力学试验, 试验加载设备采用 TW-1000 岩石力学试验机, 该试验机最大加载载荷达 1 000 kN。加载方式采用变形控制, 加载速率 0.05 mm/min。制冷设备采用 TMS8018 型精密高低温恒温槽, 精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

试验所采用试样数量及分组情况详见表 2。



(a) 核磁共振系统



(b) 单轴压缩系统

图 2 试验设备  
Fig.2 Test facility

表 2 试样分组情况

Table 2 Grouping of samples

| 组别 | 数量/个 | 试样用途简述                                                                    |
|----|------|---------------------------------------------------------------------------|
| A  | 3    | 冻融过程 (20、0、-2、-4、-6、-10、-15、-10、-6、-4、-2、0、20 $^{\circ}\text{C}$ ) NMR 测试 |
| B  | 39   | 冻融过程单轴压缩试验, 试验温度同上                                                        |

试验操作细节如下:

(1) 核磁试验: 为确保在每个被测温度点下水冰相变能够达到稳定状态, 采用阶梯式变温, 达到待测温度点后, 需要在将样品放置在待测温度点下至少 4 h 后<sup>[27]</sup>, 进行核磁共振测试, 为避免使核磁试样暴露在室温下时间过长对试验结果造成影响, 每次核磁试验时间小于 1 min。

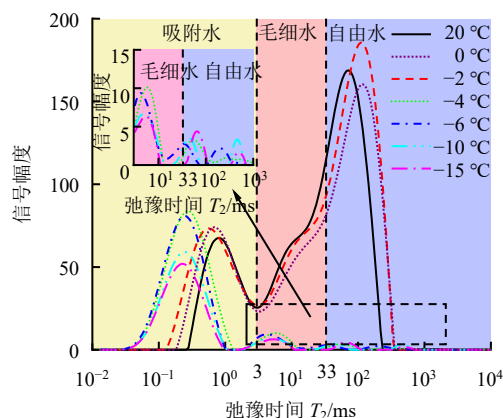
(2) 力学试验: 将试验岩样放入核磁用可编程低温箱冻结, 按照核磁试验降温方式进行阶梯式逐

步降温, 同步开启低温循环冷浴系统, 待三轴压力室降至预定温度后, 试样转移前迅速进行核磁试验, 之后将冻结岩样转移至压力室内, 并继续恒温冻结至少 4 h, 以保证试件内部温度均匀<sup>[28]</sup> (压力室内装设温度传感器, 可对仓内温度实时监控), 之后进行压缩试验。

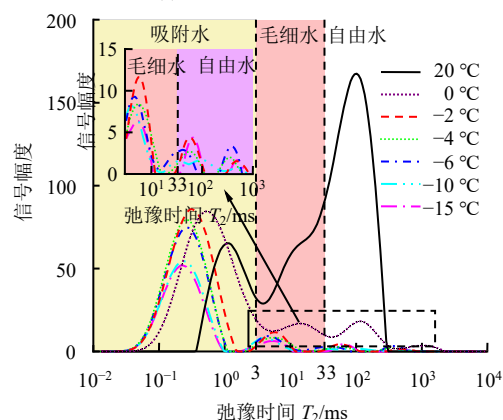
## 3 试验结果分析

### 3.1 冻融过程未冻水含量随温度变化规律

从试验结果可以发现核磁特征曲线共有 3 个峰, 如图 3 所示, 其纵坐标为核磁共振信号的强度或振幅, 与样品中核自旋数量、样品的浓度有关, 即孔隙水含量有关。横坐标为  $T_2$  弛豫时间可根据各个峰所处弛豫时间划分不同状态赋存水, 弛豫时间大于 33 ms 为自由水孔径为大孔, 弛豫时间 3~33 ms 为毛细水孔径为次级孔, 弛豫时间小于 3 ms 为吸附水孔径为微孔<sup>[29]</sup>。



(a) 冻结过程  $T_2$  谱分布曲线



(b) 解冻过程  $T_2$  谱分布曲线

图 3 各过程  $T_2$  谱分布曲线

Fig.3  $T_2$  spectral distribution of each process distribution curve

冻结过程, 试样受温度梯度的影响, 在  $> -2^{\circ}\text{C}$  时, 不同区域孔隙水的核磁信号幅值增强, 并呈现向两侧扩展的趋势, 因此在计算未冻水含量时需要

对核磁信号值进行修正<sup>[30]</sup>。随温度进一步降低,毛细水和自由水的两个峰宽度和高度均随温度降低而下降,吸附水所在峰随温度的降低,高度和宽度先增加后减小, $T_2$ 谱分布曲线整体向左偏移。解冻过程核磁  $T_2$  分布曲线如图 3 所示。随温度升高,各组分孔隙水所处峰宽度和高度均增大,待试样完全解冻,  $T_2$  谱分布曲线整体向右偏移。

为分析冻融过程未冻水含量随温度的变化规律,计算冻融过程各个温度下 ( $-2$ 、 $-4$ 、 $-6$ 、 $-10$ 、 $-15$   $^{\circ}\text{C}$ ) 未冻水含量。计算方法如下<sup>[28]</sup>:

$$\omega' = \frac{\text{FID}_b}{\text{FID}_a} \omega \quad (1)$$

式中:  $\omega'$  为未冻水含量;  $\text{FID}_a$  为根据居里定律修正后在冻融过程中某一温度下核磁共振信号拟合值;  $\text{FID}_b$  为冻融过程中某一温度核磁共振信号测量值;  $\omega$  为常温状态下饱和砂岩含水率。

为直观表示出冻融过程中未冻水含量随温度的变化,绘制图 4。

在冻结过程中,  $0 \sim -2$   $^{\circ}\text{C}$ , 孔隙水出现明显的过冷现象, 如图 4 过冷段所示。过冷现象是指液体在其凝固点以下的温度下仍保持液态状态的现象。过冷效应的因素是由温度、压力、冻结速率和力学扰动等因素共同作用引起的, 具体影响过冷效应的因素还取决于实际的物质和环境条件, 在此阶段岩石孔隙水处于过冷态, 孔隙水的冻结并未发生。

当温度从  $-2$   $^{\circ}\text{C}$  降低至  $-4$   $^{\circ}\text{C}$  时, 未冻水含量急剧下降。随着温度进一步降低, 未冻水含量的下降速度减缓。在  $-15$   $^{\circ}\text{C}$  时, 未冻水含量占初始含水率

的比例为 15.6%。由此可见, 岩石中未冻水含量随温度下降经历了 3 个阶段: 分别为过冷段 ( $0 \sim -2$   $^{\circ}\text{C}$ )、快速冻结阶段 ( $-2 \sim -4$   $^{\circ}\text{C}$ ) 和缓慢冻结阶段 ( $-4 \sim -15$   $^{\circ}\text{C}$ ), 岩石中未冻水含量受温度影响显著。

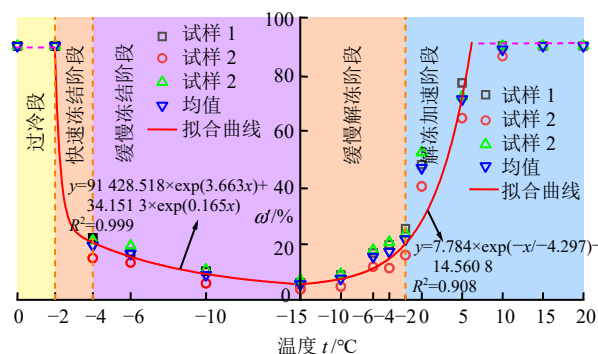


图 4 冻融过程中未冻水含量随温度变化

Fig.4 Variation of content of unfrozen water with temperature during freeze-thaw process

解冻过程中, 未冻水含量的变化如图 4 所示。随着温度升高, 未冻水含量呈现出两个阶段的上升趋势: 分别为缓慢融化阶段 ( $-15 \sim -2$   $^{\circ}\text{C}$ ) 和融化加速阶段 ( $-2 \sim 20$   $^{\circ}\text{C}$ ), 且各温度节点 ( $-10$ 、 $-6$ 、 $-4$ 、 $-2$ 、 $20$   $^{\circ}\text{C}$ ) 未冻水含量相比于  $-15$   $^{\circ}\text{C}$  增幅依次为 12.7%、62.2%、73.8%、102.3%、542.5%。随温度上升未冻水含量上升幅度较慢, 变化幅度较小; 当处于融化加速阶段时, 水冰相变剧烈, 未冻水含量迅速变化。

冻融过程各组分未冻水占比随温度变化及核磁信号变化如图 5 所示。

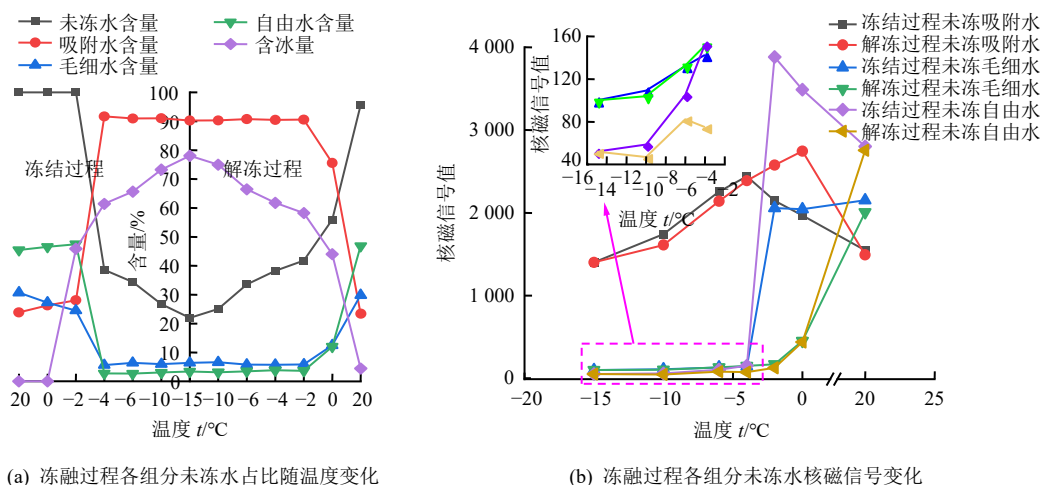


图 5 冻融过程各组分未冻水变化情况

Fig.5 Changes of unfrozen water of each component during freeze-thaw process

在冻结初期, 吸附水含量显著增加, 较常温下增加了 41.6%。此时, 毛细水和自由水迅速相变,

未冻吸附水占总体未冻水含量的 90% 以上。随着温度进一步降低, 未冻水含量的变化主要以吸附水为

主。各组分孔隙水的冻结顺序,自由水和毛细水率先冻结,然后是吸附水。冻结初期,各组分孔隙水冻结速率:自由水>毛细水>吸附水。

解冻过程各组分孔隙水核磁信号变化如图 5(b) 所示。当温度上升至 $-2^{\circ}\text{C}$ 时,与 $-15^{\circ}\text{C}$ 相比,未冻吸附水含量大幅增长,毛细水和自由水含量变化不明显,未冻吸附水占总体未冻水含量 90%以上,未冻水含量的变化主要以吸附水为主。当温度继续上升时,未冻毛细水和未冻自由水的含量快速增加。各组分已冻孔隙水融化顺序为,已冻吸附水率先融化,之后是已冻毛细水和已冻自由水。解冻初期,各组分已冻孔隙水融化速度:已冻吸附水>已冻毛细水>已冻自由水。

### 3.2 冻融回滞对未冻水含量影响

冻融回滞是指物质在冻结和解冻过程中,其相变温度不一致的现象<sup>[31]</sup>。在岩石这样的多孔介质中,由于孔隙结构的复杂性和水分迁移的非均质性,这种现象导致在冻融循环中,岩石的物理性质如强度、未冻水含量等表现出滞后性,如图 6、表 3 所示。

根据图 6 的数据显示,在冻融循环过程中未冻水含量与孔隙冰含量随温度的变化呈现出明显差异。具体而言,虽然在冻结与解冻过程中存在相同温度点,但相应的未冻水含量并不一致。随着温度的变化(分别为 $-10$ 、 $-6$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ ),解冻过程中未冻水含量相对于冻结过程的比值依次为 92.31%、94.48%和 95.53%。这种不一致性可以归因于冻融回滞的影响,特别是在 $-2^{\circ}\text{C}$ 时显得尤为显著。

在温度降至 $-2^{\circ}\text{C}$ 时,由于过冷效应的存在,孔隙水仍处于过冷状态,并未发生大规模的冻结现象;相反,在解冻过程中,当温度上升至 $-2^{\circ}\text{C}$ 时,大部分孔隙水仍然保持冻结状态,因此此时解冻过程中

的未冻水含量显著低于冻结过程中的未冻水含量。这种现象揭示了冻融循环过程中明显的回滞效应,即在相同温度下,冻结和解冻过程中的水分相态变化并不完全可逆。

表 3 为一试样冻融过程的核磁数据,从中可以详细看出冻融过程各组分未冻水核磁信号值变化情况。由于水分迁移,解冻过程 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $-2^{\circ}\text{C}$ 吸附水含量高于冻结过程,但受冻融回滞的影响,解冻过程总体核磁信号值低于冻结过程。

当温度处于负温时,相同温度条件下,冻结过程中的未冻水含量大于解冻过程中未冻水含量。这是因为处于不同状态下的水分子,吸热和散热的能力不同<sup>[28]</sup>。在解冻阶段,由于温度上升,吸附水的含量会首先增加,但由于其吸热速度相对较慢,因此未冻水的含量增长速度也相对缓慢。其次影响未冻水含量的最主要因素为自由水和毛细水,在解冻过程中 $-4^{\circ}\text{C}$ 后自由水和毛细水核磁强度逐渐增加。解冻过程可描述为,温度从 $-15^{\circ}\text{C}$ 逐渐升高,饱和和砂岩中未冻吸附水首先吸热向周围进行热传导,已冻吸附水含量增加,冰晶开始减少,矿物颗粒表面的未冻水膜逐渐消散。随温度进一步升高,毛细水及自由水开始解冻,毛细水解冻到一定程度后,自由水开始融化。温度持续升高,孔隙冰逐渐减少,相对的孔隙水逐渐增多,在温度达到正温区后,未冻水膜完全消失,完成解冻过程。

因此岩石在经过冻融过程中,会产生滞后效应,其温度和相应的未冻水含量之间并非一一对应关系。这种回滞效应不仅反映了水在冻融过程中相变的复杂性,还暗示了温度对孔隙水冻结和解冻的非对称影响。这一现象对理解冻融循环对材料内部水分分布及其力学性质的影响具有重要意义。

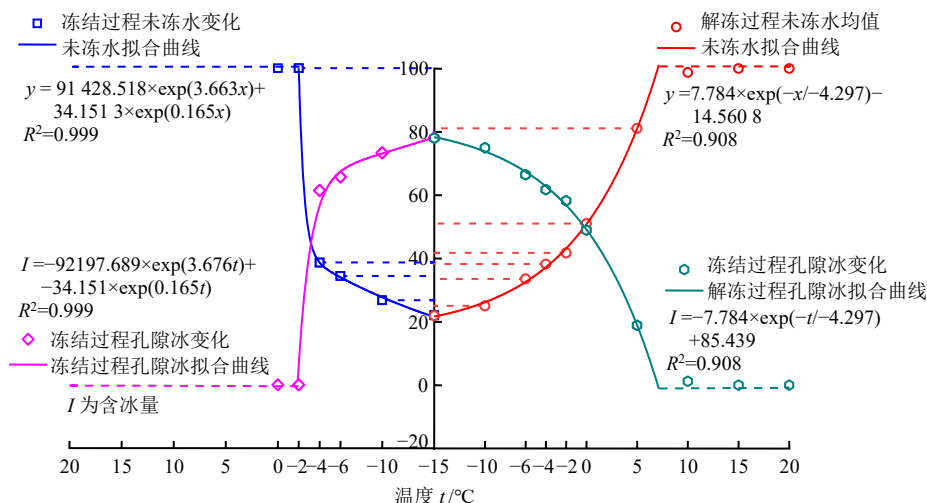


图 6 冻融过程未冻水与孔隙冰随温度变化

Fig.6 Variation of unfrozen water and pore ice change with temperature during freeze-thaw process

表 3 岩石冻融过程相同温度下孔径核磁信号对比表

Table 3 Variation of pore diameter nuclear magnetic signal during rock freeze-thaw process

| 孔径区间分布        | 冻融过程  | 不同温度(°C)下核磁信号值 |          |          |          |          |          |          |
|---------------|-------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|               |       | 20             | 0        | -2       | -4       | -6       | -10      | -15      |
| 微孔 (<3 ms)    | 冻结过程↓ | 1 547.09       | 1 968.76 | 2 145.59 | 2 441.30 | 2 254.87 | 1 741.22 | 1 400.03 |
|               | 解冻过程↑ | 1 492.17       | 2 745.53 | 2 576.19 | 2 387.30 | 2 139.76 | 1 611.35 | 1 400.03 |
| 次级孔 (3~33 ms) | 冻结过程↓ | 2 151.57       | 2 042.79 | 2 055.79 | 142.54   | 132.21   | 109.27   | 99.93    |
|               | 解冻过程↑ | 2 107.84       | 453.12   | 169.87   | 151.53   | 132.67   | 103.97   | 99.93    |
| 大孔 (>33 ms)   | 冻结过程↓ | 2 800.30       | 3 486.56 | 3 881.57 | 152.20   | 105.13   | 58.69    | 46.98    |
|               | 解冻过程↑ | 2 853.92       | 436.60   | 126.52   | 75.01    | 82.35    | 47.03    | 46.98    |

## 4 冻融过程岩石力学特性变化规律

### 4.1 冻融过程温度对应力-应变曲线的影响

基于冻融过程单轴压缩试验,可以得出在冻融过程中岩石单轴压缩应力-应变曲线随温度变化情况如图 7 所示。

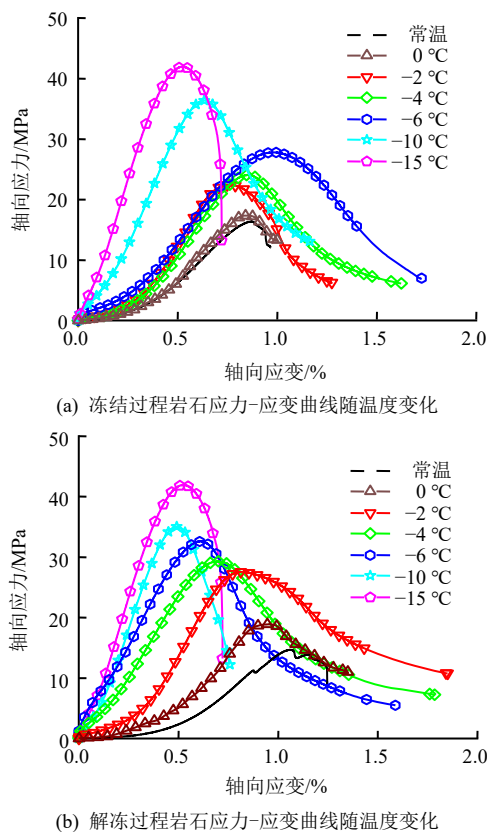


图 7 冻融过程应力-应变曲线随温度变化

Fig.7 Variation of stress-strain curves vary with temperature during freeze-thaw process

岩石在冻结过程中,根据应力-应变曲线变化情况,分为 4 个阶段:孔隙裂隙压密阶段,弹性变形阶段,裂隙扩展阶段,破裂后阶段。随温度的降低,砂岩冻结比的增加,砂岩的应力-应变曲线逐渐向上、向左移动,即砂岩孔隙水的冻结程度影响其稳定性,压密阶段呈现出随着应变的增

大应力快速增加的现象,且压密现象逐渐变得不明显,单轴抗压强度随温度降低明显升高。在岩石解冻的过程中,我们观察到随着温度的上升,应力与应变的关系曲线变得更为平稳,岩石样本的轴向应变逐步上升,而轴向应力在温度上升时明显下降,峰值应变明显上升,同时压密效应也变得越来越明显。

### 4.2 冻融过程水冰相变对峰值强度的影响

图 8 展示了岩石样本在冻融循环中对其峰值强度产生的影响模式。在实际压缩过程中,由于机械扰动,孔隙水的过冷现象得以消除,因此对 -2 °C 的扰动样本重新进行扰动状态下核磁共振测试,以得到未冻水含量的变化状况。冻结过程相比于未冻结前试样在 0、-2、-4、-6、-10、-15 °C 时峰值强度增幅依次为 2.37%、55.81%、70.09%、82.44%、95.30%、139.35%。当在温度从 20 °C 下降到 0 °C 的过程中,砂岩的峰值强度基本保持不变。随着温度从 0 °C 降至 -15 °C,砂岩的峰值强度逐步上升,这说明在低温条件下,砂岩展现出了很高的抗压性能。特别是当温度从 0 °C 降低到 -2 °C 时,峰值强度从 15.56 MPa 增加到 24.25 MPa,岩石强度增强效果最为显著。

解冻过程岩石试样从 -15 °C 解冻到 -10、-6、-4、-2、0、20 °C,相比于 -15 °C 状态下,岩石强度降低幅度依次为 6.12%、19.70%、24.91%、28.41%、49.59%、58.75%。

冻融过程中,岩石峰值强度随未冻水含量的降低呈近似的指数函数关系且相关性较高,冻结过程  $R^2=0.965\ 6$ ,解冻过程  $R^2=0.997\ 5$ 。

$$\sigma = \sigma_0 + A_1 \exp \left( -\frac{\omega'}{t_0} \right) \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为峰值强度 (MPa);  $\omega'$  为未冻水含量;  $A_1$  为拟合值。

水冰相变作为影响岩石力学特性的重要因素,其相对于初始常温时未冻水含量的变化量与

峰值强度变化量之间的关系具体数值见表4。

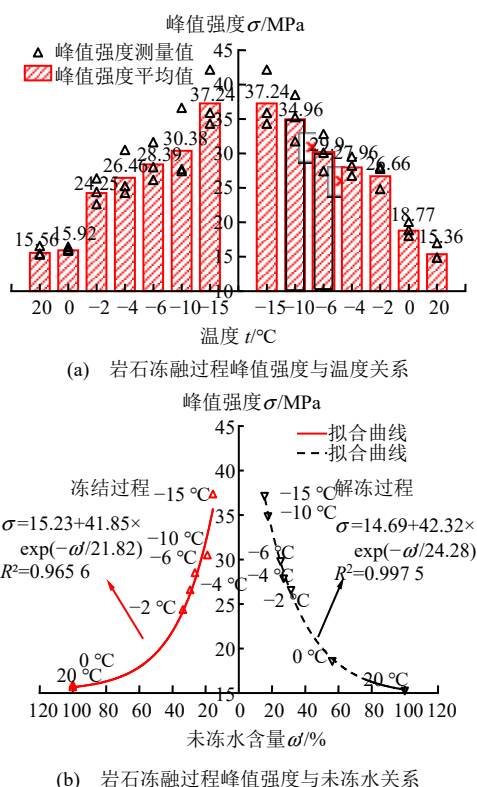


图8 岩石冻融过程水冰相变对峰值强度的影响  
Fig.8 Effect of water-ice phase transition on peak strength during rock freeze-thaw process

表4 未冻水含量与峰值强度相对变化表  
Table 4 Relative change values of unfrozen water content and peak intensity

| 过程   | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 未冻水     |         | 峰值强度      |         |
|------|------------------------|---------|---------|-----------|---------|
|      |                        | 未冻水含量/% | 相对变化量/% | 相对变化 /MPa | 相对变化量/% |
| 冻结过程 | 常温                     | 100.00  | 0.00    | 0.00      | 0.00    |
|      | 0                      | 100.00  | 0.00    | 0.37      | 2.37    |
|      | -2                     | 33.67   | 66.33   | 8.68      | 55.81   |
|      | -4                     | 29.29   | 70.71   | 10.90     | 70.09   |
|      | -6                     | 26.38   | 73.62   | 12.82     | 82.44   |
|      | -10                    | 18.89   | 81.89   | 14.82     | 95.30   |
| 解冻过程 | -15                    | 15.57   | 84.43   | 21.67     | 139.35  |
|      | -10                    | 17.54   | 82.45   | 19.40     | 124.67  |
|      | -6                     | 25.25   | 74.75   | 14.34     | 92.22   |
|      | -4                     | 27.07   | 72.92   | 12.40     | 79.74   |
|      | -2                     | 31.49   | 68.50   | 11.09     | 71.32   |
|      | 0                      | 56.81   | 43.19   | 3.22      | 20.71   |
|      | 常温                     | 100.00  | 0.00    | -0.21     | -1.29   |

在冻结过程中,当温度降低至 $-2^{\circ}\text{C}$ 时未冻水的含量相对于常温状态下下降了66.33%,峰值强度增加了55.81%,在此阶段未冻水含量下降最快,峰值强度的增加量最大,当温度从 $-2^{\circ}\text{C}$ 降低

至 $-15^{\circ}\text{C}$ 时未冻水含量下降至15.57%,峰值强度相比于常温状态下增加了139.35%,此时约84.43%的孔隙水发生冻结。由于温度的降低,水逐渐转化为冰,形成冰骨架,随着温度的进一步降低,冰相逐渐增加,与砂岩基质共同承担外部荷载。这一现象可能是导致岩石抗压强度增加的主要原因。

在解冻过程中,从 $-15^{\circ}\text{C}$ 解冻到 $-2^{\circ}\text{C}$ ,未冻水的含量增加至31.49%,峰值强度相比于 $-15^{\circ}\text{C}$ 降低了28.4%,且由 $-2^{\circ}\text{C}$ 上升到常温,在此温度区间,未冻水含量剧烈变化,增加了68.50%,冻结比大量下降,强度变化量最大;在解冻的过程中,吸附水首先开始解冻,随后毛细水和自由水含量逐步增加,孔隙中原本被冰相占据的空间会逐渐释放出来,未冻水填充这些孔隙空间。其冻结比,即冰质量与孔隙水总质量之比降低<sup>[29]</sup>,冰相的减少会对岩石孔隙的支撑作用减弱,这进一步会导致岩石的整体刚度和稳定性降低,从而使岩石的峰值强度也相应减少。

#### 4.3 冻融过程水冰相变对弹性模量及峰值应变的影响

岩石冻融过程中水冰相变会对其弹性模量及峰值应变产生一定的影响。

图9展示了岩石样本在冻融过程中温度对其弹性模量和峰值应变的影响情况。在冻结过程中岩石的弹性模量与未冻结前相比, $-2^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-15^{\circ}\text{C}$ 时弹性模量增幅依次为103.2%、117.9%、119.4%、127.2%、171.3%,随着温度的下降,弹性模量逐渐增加。当温度降至 $-15^{\circ}\text{C}$ 时,与常温相比,峰值应变减少了39.0%,峰值应变随着温度的下降而减少。

解冻过程中,从 $-15^{\circ}\text{C}$ 解冻到 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 弹性模量降低幅度依次为18.5%、21.3%、21.8%、27.1%、48.5%、64.1%,弹性模量会随着温度的上升而逐渐减少。当温度上升到 $20^{\circ}\text{C}$ 时,与 $-15^{\circ}\text{C}$ 相比,峰值应变上升了38.30%,峰值应变随着温度的增加而上升。

图10展示了岩石冻融过程未冻水含量变化对弹性模量和峰值应变的影响。在岩石冻结的过程当中,当温度下降到 $-2^{\circ}\text{C}$ 的时候,未冻水含量与初始含水率的比率从100%下降到33.67%,与此同时,弹性模量也提升了71.3%。在温度逐渐下降到 $-15^{\circ}\text{C}$ 的情况下,未冻水的变化量达到了84.43%,与冻结前相比,弹性模量增长了173.1%,峰值应变减少了39.0%。

解冻过程与冻结过程是截然相反的,当温度从 $-15^{\circ}\text{C}$ 开始解冻至 $-2^{\circ}\text{C}$ 时,未冻结的水分含量增加至 31.49%,而弹性模量相比于 $-15^{\circ}\text{C}$ 下降了 27.1%。当温度升高至试样完全解冻时,与 $-15^{\circ}\text{C}$ 相比,岩石的弹性模量下降了 64.1%,峰值应变增加了 61.9%。未冻水含量降低时,岩石的弹性模量增加,峰值应变降低;未冻水含量升高时,岩石的弹性模量降低,峰值应变增加。

在冻结过程中,弹性模量的增加和峰值应变的下降是由于孔隙中原先被液态水填充的部分逐步转变为冰相空间。这导致了大量的毛细水和自由水冻结,孔隙中的冰含量显著上升。由于冰相体积的增大,需要压缩的岩石孔隙体积减小,同

时冰骨架被嵌入到孔隙中,与岩石骨架发生胶结,共同抵抗压缩变形。另一方面,当吸附水持续地冻结时,吸附水膜的厚度越薄,其吸附效果就越出色<sup>[32-34]</sup>,这进一步强化了孔隙冰与岩石结构之间的整体性,导致了岩石弹性模量的上升和峰值应变的下降。

在解冻的过程中,冰相空间会逐步转变为液态水空间,孔隙中未冻水的含量也会增加,这导致岩石内部的孔隙体积增加。冰相的减少会降低岩石骨架的嵌合能力,增加未冻水含量,降低吸附水膜的吸附能力,降低冰相与岩石颗粒的吸附力,降低岩石的整体性,从而降低岩石的弹性模量,增加峰值应变。

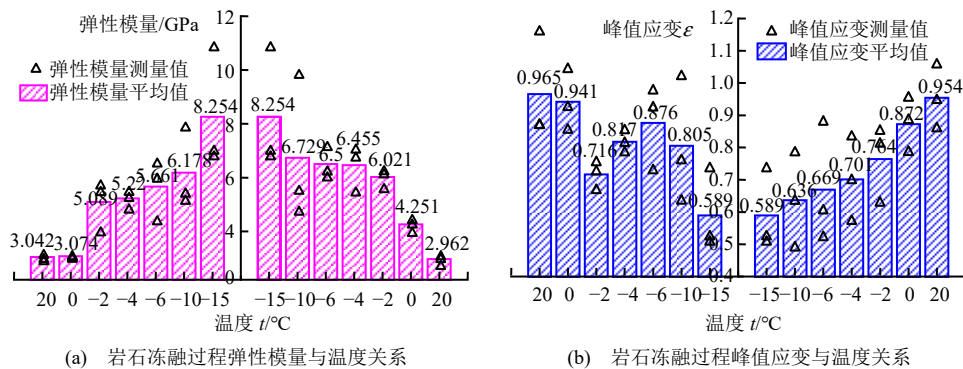


图 9 冻融过程温度对弹性模量及峰值应变的影响

Fig.9 Effect of temperature on elastic modulus and peak strain during freeze-thaw process

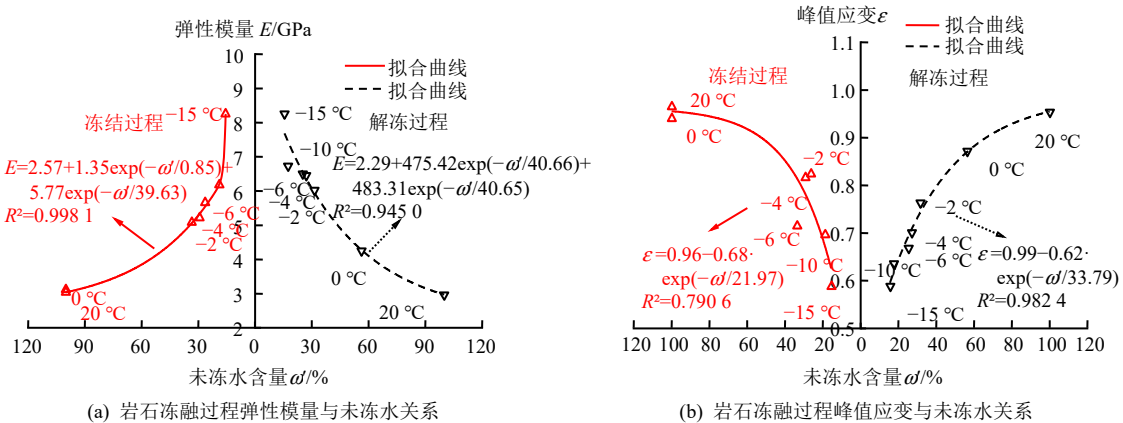


图 10 冻融过程水冰相变对弹性模量和峰值应变的影响

Fig.10 Effect of water-ice phase transition on elastic modulus and peak strain during freeze-thaw process

#### 4.4 冻融回滞对岩石力学特性的影响

在岩石经历冻融过程时,其力学性质会受到未冻水冻融回滞效应的影响。关于未冻水含量与岩石力学特性增长率之间的具体关联,可以参考图 11,具体的数据如表 5 所示。

在解冻阶段,未冻水的含量变化会滞后于冻结阶段,而在相同的温度环境中,冻融阶段的未冻水含量与温度之间的关系并不总是一一对应。与冻结

过程相比,解冻过程中的力学参数的变化同样是滞后的,其增长率相比于冻结过程有明显的提升。

其中不同温度条件下 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 的冻结过程试样强度与解冻过程试样强度之比依次为 87%、94.9%、94.6%、90.9%,可以看出解冻过程试样强度高于冻结过程试样强度 8%左右。不同温度下 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 的冻结过程试样弹性模量与解冻过程试样弹性模量之比依次为 84.5%、

81.6%、87.1%、91.8%，解冻过程试样弹性模量高于冻结过程试样弹性模量 13% 左右。这是由于在进行冻融循环的过程中，冻结岩石内部自由水与毛细水产生孔隙冰，此时孔隙水主要以吸附水为主，吸附水膜厚度变薄与否对岩石颗粒的吸附能力有显著影响。受冻融回滞的影响，在一致的温度条件下，解冻过程未冻水含量低于冻结过程，孔隙冰高于冻结过程，未冻水的吸附能力相比于冻结过程有所提高，孔隙冰含量以及未冻水膜厚度的差异共同作用下，在冻融过程相同温度下，岩石整体性高于冻结过程。

因此，孔隙内未冻水受冻融回滞效应影响所表现出的非对称性，同样显著影响了材料力学性质的

变化过程。在冻融过程中，岩石等材料的力学参数同样受到这一回滞效应的制约和调节。

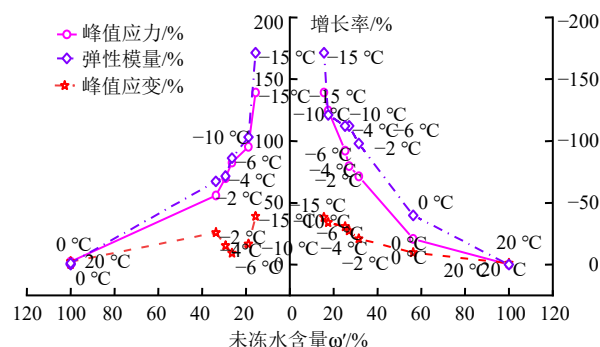


图 11 未冻水含量与力学特性增长率的变化关系  
Fig.11 Relationship between the content of unfrozen water and the growth rate of mechanical properties

表 5 未冻水含量与力学特性增长率的变化关系对照表

Table 5 Comparison of the relationship between unfrozen water content and the growth rate of mechanical properties

| 温度/℃ | 未冻水含量/% |        | 应力/%   |        | 应变/%   |        | 弹性模量/% |        |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | 冻结↓     | 解冻↑    | 冻结↓    | 解冻↑    | 冻结↓    | 解冻↑    | 冻结↓    | 解冻↑    |
| 20   | 100.00  | 100.00 | 0.00   | -0.01  | 0.00   | -1.13  | 0.00   | -0.03  |
| 0    | 100.00  | 56.33  | 2.37   | 20.71  | -2.34  | -9.64  | 1.05   | 39.74  |
| -2   | 33.67   | 31.49  | 55.84  | 71.34  | -25.80 | -20.83 | 67.30  | 97.92  |
| -4   | 29.29   | 27.07  | 70.01  | 79.69  | -15.33 | -27.35 | 71.59  | 112.19 |
| -6   | 26.38   | 25.25  | 82.45  | 92.16  | -9.22  | -30.67 | 86.09  | 112.19 |
| -10  | 18.89   | 17.54  | 95.24  | 124.67 | -16.58 | -34.09 | 103.09 | 121.20 |
| -15  | 15.57   |        | 139.30 |        | -38.96 |        | 171.33 |        |

## 5 结 论

(1) 冻融过程岩石中孔隙水受温度影响显著，冻结过程中未冻水含量随温度的降低而降低且经过过冷段、快速冻结阶段、缓慢冻结阶段 3 个阶段；解冻过程中未冻水含量变化经过缓慢融化阶段和融化加速阶段两个阶段。

(2) 孔隙未冻水在解冻过程中有明显的滞后现象，其未冻水含量与温度之间的平衡关系不是一一对应的。在一致的温度条件下，冻结过程的岩体中未冻水的含量明显高于解冻过程。同时，未冻水含量与岩石力学参数之间也并非一一对应，解冻过程岩石的力学参数也相对于冻结阶段显著提高。

(3) 岩石试样在冻融过程中物理力学特性出现了显著变化，未冻水与力学特性关系可由指数函数  $\sigma = \sigma_0 + A_1 \exp(-\omega'/t_0)$  表示。冻结过程，未冻水含量降低导致试样峰值强度及弹性模量显著提高，峰值应变显著降低，温度降低到 -15 °C 时，单轴抗压强度增加了 139.35%，弹性模量增加了 171.3%，峰值应变降低了 39%。解冻过程，未冻水含量升高

使试样峰值强度及弹性模量均降低，峰值应变显著升高，从 -15 °C 至完全解冻，相比于 -15 °C，单轴抗压强度降低了 58.75%，弹性模量降低了 64.1%，峰值应变提高了 61.9%。

(4) 冻融过程中未冻水含量越低，对岩石物理力学特性影响越大。冻结初期，岩石力学参数主要受孔隙冰含量的增长及孔隙冰对岩石颗粒的胶结作用影响，随温度进一步降低，吸附水膜对岩石颗粒吸附作用增强，而吸附强度取决于吸附水膜厚度；在缓慢解冻阶段岩石物理力学特性的改变主要受已冻吸附水解冻的影响，随温度进一步升高至正温区，岩石力学特性的改变主要受已冻毛细水和已冻自由水融化的影响。

(5) 冻融回滞效应不仅在水分相态变化中扮演了重要角色，还通过影响材料内部应力和变形机制，显著改变了岩石的力学性质。这对于寒冷地区岩石的长期稳定性评估和工程材料设计具有重要意义，在考虑冻融循环对岩石及其他建筑材料的影响时，必须充分考虑这种回滞效应对力学参数的非对称性影响。

## 参 考 文 献

- [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 Yong-jun, YANG Hui-min, TAN Hao, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freeze-thaw environment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(8): 1513-1524.
- [2] 李杰林, 朱龙胤, 周科平, 等. 冻融作用下砂岩孔隙结构损伤特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3524-3532.  
LI Jie-lin, ZHU Long-yin, ZHOU Ke-ping, et al. Damage characteristics of sandstone pore structure under freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3524-3532.
- [3] 张金达. 新疆乌尉高速 SJ-1 段地质灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
ZHANG Jin-da. Risk assessment of geological hazards in the SJ-1 of Xinjiang Urumuchi-Yuli Highway[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [4] 翟成, 董若蔚. 低温冻结石门揭煤煤体未冻水含量变化特征[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 132-138.  
ZHAI Cheng, DONG Ruo-wei. Variation features of unfrozen water content of coal under low temperature freezing in uncovering coal in cross-cut[J]. **Coal Science and Technology**, 2019, 47(1): 132-138.
- [5] 杨昊, 张晋勋, 单仁亮, 等. 冻结饱水单裂隙岩体力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1245-1255.  
YANG Hao, ZHANG Jin-xun, SHAN Ren-liang, et al. Experimental study on mechanical properties of frozen saturated single fractured rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1245-1255.
- [6] 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 Han-qing, CAO Guang-yong, et al. Damage mechanism of porous rock caused by moisture migration during freeze-thaw process and experimental verification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(9): 1739-1749.
- [7] 贾蓬, 王晓帅, 王德超, 等. 饱水裂隙岩石冻融变形特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(2): 345-354.  
JIA Peng, WANG Xiao-shuai, WANG De-chao, et al. Study on the freeze-thaw deformation characteristics of saturated fractured rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(2): 345-354.
- [8] AKAGAWA S, FUKUDA M. Frost heave mechanism in welded tuff[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 1991, 2(4): 301-309.
- [9] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2000-2012.  
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 2000-2012.
- [10] PRICKA. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles[J]. **Catena**, 1995, 25(1/4): 7-20.
- [11] 杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 545-563.  
YANG Geng-she, SHEN Yan-jun, JIA Hai-liang, et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(3): 545-563.
- [12] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1530-1542.  
LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Preliminary study of frost heave pressure and its influence on crack and deterioration mechanisms of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1530-1542.
- [13] SHENG W Z, HANG L, YI F C, et al. Analysis on the evolution of frost heaving pressure of penetrating crack considering water content and migration[J]. **Simulation**, 2023, 99(1): 41-54.
- [14] 贾海梁, 赵思琪, 丁顺, 等. 含水裂隙冻融过程中冻胀力演化及影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1832-1845.  
JIA Hai-liang, ZHAO Si-qi, DING Shun, et al. Study on the evolution and influencing factors of frost heaving force of water-bearing cracks during freezing-thawing process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(9): 1832-1845.
- [15] 屈永龙, 杨更社, 奚家米, 等. 低温-加载作用下白垩

- 系砂岩的变形破坏特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2431-2442.
- QU Yong-long, YANG Geng-she, XI Jia-mi, et al. Deformation and failure characteristics of Cretaceous sandstone under low temperature and loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(9): 2431-2442.
- [16] 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 Geng-she, WEI Yao, SHEN Yan-jun, et al. Frozen saturated sandstone triaxial compressive mechanical properties and strength prediction model study[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(4): 683-694.
- [17] 蔡正宇, 张帆. 实时低温条件下花岗岩巴西劈裂试验[J]. 中国科技论文, 2022, 17(7): 789-794.
- CAI Zheng-yu, ZHANG Fan. Brazilian splitting test of granite under real-time low temperatures[J]. **China Sciencepaper**, 2022, 17(7): 789-794.
- [18] 刘波, 张功, 李守定, 等. 砂质泥岩在低温劈裂试验中的声发射研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2702-2709.
- LIU Bo, ZHANG Gong, LI Shou-ding, et al. Acoustic emission study on frozen sandy mudstone in Brazilian splitting test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 1): 2702-2709.
- [19] 周凤玺, 赵文沧. 基于土-水特征曲线的非饱和冻土未冻水含量预测[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2719-2727.
- ZHOU Feng-xi, ZHAO Wen-cang. Estimating unfrozen water content in unsaturated frozen soils based on soil water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(9): 2719-2727.
- [20] 谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1566-1572.
- TAN Long, WEI Chang-fu, TIAN Hui-hui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1566-1572.
- [21] LI S, TANG D, XU H, et al. Comparative analysis on water movability in pores of different reservoir rocks by nuclear magnetic resonance[J]. **Energy Exploration & Exploitation**, 2015, 33(5): 689-705.
- [22] JIA H, DING S, WANG Y, et al. An NMR-based investigation of pore water freezing process in sandstone[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, 168: 102893.
- [23] SU Z, TAN X, CHEN W, et al. A model of unfrozen water content in rock during freezing and thawing with experimental validation by nuclear magnetic resonance[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2022, 14(5): 1545-1555.
- [24] 宋勇军, 张君, 陈佳星, 等. 裂隙砂岩未冻水含量演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 575-584.
- SONG Yong-jun, ZHANG Jun, CHEN Jia-xing, et al. Evolution characteristics of fractured sandstone is not frozen water content research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(3): 575-584.
- [25] 李祖勇, 杨更社, 魏尧. 白垩系冻结砂岩解冻过程中蠕变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1777-1788.
- LI Zu-yong, YANG Geng-she, WEI Yao. Study on creep mechanical properties of frozen cretaceous sandstone during thawing process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(9): 1777-1788.
- [26] WANG T, SUN Q, JIA H, et al. Linking the mechanical properties of frozen sandstone to phase composition of pore water measured by LF-NMR at subzero temperatures[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80(6): 4501-4513.
- [27] TICE A R, OLLPHANT J L, ZHU Y L, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soils as determined by pulsed nuclear resonance and physical desorption data[J]. **Journal of Glaciology and Geology**, 1983, 5(2): 37-46.
- [28] 申艳军, 杨更社, 王铭, 等. 冻融循环过程中岩石热传导规律试验及理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2417-2425.
- SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, WANG Ming, et al. Experimental and theoretical study on thermal conductivity of rock under cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(12): 2417-2425.
- [29] QIU B, FAN L, MA C, et al. Effects of ice content on compression characteristics of frozen sandstone by in-situ NMR technology[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2023, 9(1): 1-14.