

DOI:10.11918/202409070

# 损伤砂岩冻融循环后物理力学行为

朱谭谭<sup>1</sup>, 马福旺<sup>1</sup>, 李昂<sup>1</sup>, 朱豪洋<sup>1</sup>, 宗西垒<sup>1</sup>, 黄达<sup>2</sup>, 冯强<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 长安大学 地质与测绘工程学院, 西安 710064;  
3. 山东科技大学 土木工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 为研究砂岩经历不同单轴应力水平损伤和冻融循环作用后的物理特征及力学行为演化规律, 首先, 给砂岩试样施加不同轴向应力水平, 使试样内产生不同程度损伤; 然后, 对经过应力损伤后的砂岩试样进行冻融循环处理; 最后, 开展损伤砂岩冻融循环后单轴压缩试验。研究了应力损伤和冻融循环对砂岩变形特征的影响, 分析了不同损伤程度砂岩单轴抗压强度和弹性模量演化规律, 揭示了损伤砂岩冻融循环前后孔隙率、孔隙尺寸和孔隙结构分形维数演化机制。结果表明: 冻融循环后, 相同应力下试样的轴向变形显著增大; 砂岩单轴压缩强度和弹性模量随损伤应力和冻融循环次数的增大均表现为逐渐减小; 冻融循环前后, 砂岩孔隙率随损伤应力的增大均逐渐增大, 冻融循环后砂岩孔隙率明显大于冻融循环前砂岩孔隙率, 且冻融循环前后砂岩孔隙率的差异随损伤应力的增大而增大; 随等效半径的增大, 冻融循环前的砂岩孔隙数量占比分为逐渐减小、先增大后减小和逐渐减小3个阶段, 冻融循环后的砂岩孔隙数量占比逐渐减小, 冻融循环后等效半径较大的孔隙占比增大; 冻融循环后砂岩孔隙结构分形维数大于冻融循环前砂岩孔隙结构分形维数, 冻融循环后试样孔隙结构比冻融循环前试样孔隙结构复杂; 冻融循环前后, 砂岩孔隙结构分形维数均随损伤应力的增大均逐渐增大, 但冻融循环后砂岩孔隙结构分形维数增长幅度明显小于冻融循环前的砂岩。

**关键词:** 损伤砂岩; 冻融循环; 单轴压缩; 孔隙结构; 分形维数

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)11-0053-09

## Physical and mechanical behavior of damaged sandstone after freeze-thaw cycles

ZHU Tantan<sup>1</sup>, MA Fuwang<sup>1</sup>, LI Ang<sup>1</sup>, ZHU Haoyang<sup>1</sup>, ZONG Xilei<sup>1</sup>, HUANG Da<sup>2</sup>, FENG Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

**Abstract:** To study the evolution of physical properties and mechanical behavior of sandstone under different uniaxial stress-induced damage conditions and freeze-thaw cycles, firstly, different axial stress levels were applied to sandstone samples to produce different damage degrees. Then, the stress-induced damaged sandstone samples were treated by freeze-thaw cycles. Finally, uniaxial compression tests were carried out on the damaged sandstone. The effects of damage inside the samples and freeze-thaw cycle on the deformation characteristics of sandstone were studied. The evolution laws of uniaxial compressive strength and elastic modulus of sandstone with different damage degrees were analyzed. The evolution mechanism of porosity, pore size, and pore structure fractal dimension before and after freeze-thaw cycle was revealed. The results show that the axial deformation of the samples increases significantly under the same stress after freeze-thaw cycles. The uniaxial compressive strength and elastic modulus of sandstone decrease gradually with the increase of damage stress and the number of freeze-thaw cycles. Before and after the freeze-thaw cycles, the porosity of sandstone increases gradually with the increase of damage stress, and the porosity of sandstone after the freeze-thaw cycle is obviously larger than that before the freeze-thaw cycles. The difference of sandstone porosity before and after the freeze-thaw cycles increases as the damage stress increases. With the increase of the equivalent radius, the proportion of sandstone pore number before the freeze-thaw cycle can be divided into three stages: gradually decreasing, first increasing and then decreasing, and gradually decreasing. After the freeze-thaw cycles, the proportion of sandstone pore number gradually decreases, and the proportion of pores with larger equivalent radius increases after the freeze-thaw cycle. The fractal dimension of sandstone pore structure after freeze-thaw cycles is larger than that before freeze-thaw cycles. The pore structure of sandstone

收稿日期: 2024-09-25; 录用日期: 2024-11-03; 网络首发日期: 2025-07-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250710.1425.015>

基金项目: 国家自然科学基金(42307222); 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室开放基金(SKLBT-2206); 国家自然科学基金联合重点项目(U23A2047)

作者简介: 朱谭谭(1989—), 男, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 李昂, [angli\\_163@chd.edu.cn](mailto:angli_163@chd.edu.cn)

samples after freeze-thaw cycle is more complex than that of sandstone samples before freeze-thaw cycle. Before and after the freeze-thaw cycles, the fractal dimension of sandstone pore structure increases gradually with the increase of damage stress, but the increase amplitude of the fractal dimension of sandstone pore structure after the freeze-thaw cycles is obviously smaller than that before the freeze-thaw cycle.

**Keywords:** damaged sandstone; freeze-thaw cycles; uniaxial compression; pore structure; fractal dimension

低温作用下,岩体孔/裂隙水相变膨胀,岩体承受冻胀力。当冻胀力大于岩体自身强度时,岩体发生冻胀破坏。在长期冻融循环作用下,岩体力学性质劣化,严重影响寒区工程岩体稳定性,造成寒区边坡冻融滑塌等灾害。因此,开展长期冻融循环作用下岩体物理力学行为的研究是十分必要的。

刘慧等<sup>[1]</sup>对含天然损伤砂岩开展了冻融循环后劈裂试验和数值模拟,结合 CT 扫描,揭示了含天然损伤砂岩在冻融和应力作用下的破坏机制。Liu 等<sup>[2]</sup>采用应力损伤的方法对含预制裂隙砂岩进行损伤,然后开展了冻融循环和单轴压缩试验,分析了不同损伤程度对岩石块体表面、质量、体积、抗压强度和弹性模量的影响。Tang 等<sup>[3]</sup>采用类岩石材料开展冻融循环试验,研究了冻融循环、约束应力和多裂隙相互作用对冰裂隙的作用机制。王飞等<sup>[4]</sup>认为载荷或冻融作用对不同初始损伤红砂岩孔隙结构和力学性质影响规律相似。李杰林等<sup>[5]</sup>采用核磁共振研究了冻融循环作用下花岗岩裂隙发育和扩展特性,认为孔隙发育程度对花岗岩冻融损伤有重要影响。杨更社等<sup>[6]</sup>对岩石缺陷进行了量化分级,明确了不同层级下的损伤特征及对应损伤识别方法,归纳了微、细、宏观尺度下岩石冻融损伤识别及评价方法。Hu 等<sup>[7]</sup>对三轴循环加卸载损伤后花岗岩开展单轴压缩试验,认为试样的损伤程度主要由循环次数控制。史为政等<sup>[8]</sup>开展了应力-冻融耦合试验,认为应力作用能够抑制冻融损伤。张继周等<sup>[9]</sup>对经 1% 硝酸溶液腐蚀后的粉砂质泥岩、辉绿岩和白云质灰岩开展了冻融试验,发现岩石冻融损伤受岩性、环境、冻融温度及循环次数等因素影响。Li 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于离散元方法的模型,用于研究冻融循环引起的岩石破碎。张慧梅等<sup>[11-12]</sup>、刘享华等<sup>[13]</sup>运用损伤力学理论和应变等价原理,建立了裂隙岩石冻融-应力耦合损伤模型。李新平等<sup>[14]</sup>建立了冻融受荷裂隙岩石损伤劣化模型,发现冻融和应力诱发的损伤相互耦合会使总损伤有所减小。Qiao 等<sup>[15]</sup>和赵建军等<sup>[16]</sup>对含预制裂隙岩石试样开展了冻融循环和单轴压缩试验,探讨了裂隙岩石冻胀压力演化和冻融损伤机理。Chen 等<sup>[17]</sup>对含非贯穿裂隙岩石开展了冻融循环和单轴压缩试验,分析了冻融循环次数和裂缝密度对裂隙岩石宏观破裂特性

的影响。Wang 等<sup>[18]</sup>对含预制裂隙大理石、花岗岩、砂岩进行了冻胀力测试,发现冻胀力不仅受裂缝几何形状的影响,还受岩性的影响。吕思清等<sup>[19]</sup>构建了考虑初始压密段影响的总损伤本构模型,并采用室内力学试验验证了其有效性。Jia 等<sup>[20]</sup>研究发现砂岩孔隙结构中存在两个主要的损伤过程:1) 次生裂隙中的水迁移至主裂缝并冻结,导致主裂缝的起裂和扩展;2) 二次裂隙中未冻水原位冻结,导致二次裂隙的起裂、扩展和搭接。Huang 等<sup>[21]</sup>测量了不同含水量砂岩在不同冻融循环次数后的单轴压缩强度,认为砂岩冻融损伤程度和含水量密切相关。

综上所述,学者们对损伤岩石冻融物理力学行为开展了大量研究工作,但是岩体损伤和冻融循环在损伤岩石冻融劣化过程中谁起主导作用,岩体力学性质对两个作用的敏感性等问题仍没有彻底解决。基于此,本文首先给砂岩试样施加不同轴向应力水平,得到不同损伤程度的砂岩试样,然后对损伤砂岩试样开展冻融循环试验和单轴压缩试验,并采用 CT 扫描系统对砂岩试样冻融损伤进行三维重构。研究砂岩力学性质劣化过程中损伤和冻融的作用机制,以及对两个因素的敏感性,分析了损伤砂岩孔隙结构演化规律。

## 1 试验方法

### 1.1 试样加工

试验所选用的黄砂岩取自中国四川省,所有试样取自同一岩块,岩块质地均匀,表面呈淡黄色,无肉眼可见缺陷,天然密度为  $2.25 \text{ g/cm}^3$ 。经过取芯、切割、打磨等工序将砂岩加工成符合国际岩石力学学会建议试验标准的圆柱体试样,如图 1 所示,试样直径为 50 mm,试样高度为 100 mm。



图 1 试验用圆柱体砂岩试样

Fig. 1 Cylindrical sandstone samples used in the tests

## 1.2 试验方案

试验过程主要分为试样加工、单轴抗压强度测试、应力损伤、CT 扫描、饱水、冻融循环、冻融后单轴压缩几个步骤。试验中涉及 3 个单轴压缩过程: 单轴抗压强度测试、应力损伤和冻融后单轴压缩试验。其中, 单轴抗压强度测试采用 UST-1、UST-2、UST-3、UST-4 共 4 个试样。应力损伤采用单轴压缩方式进行, 将该过程称为损伤过程。砂岩试样经过应力损伤和冻融循环后进行单轴压缩试验, 用于研究损伤砂岩冻融循环后的单轴压缩力学行为, 将损伤砂岩冻融循环后的单轴压缩试验称为单轴压缩过程。

试样加工完成后首先测试试样的单轴压缩强度。4 个试样平均单轴抗压强度  $\sigma_0$  为 95.68 MPa, 平均弹性模量为 8.97 GPa。得到试样的单轴抗压强度后, 对试样进行应力损伤。损伤方法为对试样施加一个轴向应力, 即损伤应力  $\sigma_p$ 。定义损伤应力与平均单轴抗压强度的比值为损伤应力比  $R$ , 为了得到不同损伤程度的砂岩试样, 设置 5 个损伤应力比  $R: 0, 0.2, 0.4, 0.6$  和  $0.8$ 。冻融循环试验开始前, 对损伤后的砂岩试样进行饱水处理。饱水过程首先将试样在水中浸泡 18 h, 然后采用 SRH 真空饱水机进行饱水。饱水时间为 48 h, 饱水压力为  $-100$  kPa。饱水处理完成后, 擦拭掉试样表面水后采用塑料薄膜包裹试样, 防止冻融循环试验过程中试样水分蒸发。采用 LK-225G 低温试验箱开展冻融循环试验, 冻融循环次数分别为 10、20、30、40 和 50 次。即共设置 5 组冻融循环次数, 每组冻融循环次数下均设置 5 组不同损伤应力。冻结温度设置为  $-30$   $^{\circ}\text{C}$ , 融化温度设置为  $20$   $^{\circ}\text{C}$ , 冻结时间和融化时间均为 4 h。根据徐光苗等<sup>[22]</sup>和李平等<sup>[23]</sup>的研究成果和经验, 试验所设置的温度和时间可以让标准圆柱体试样充分冻结或融化。

损伤砂岩试样冻融循环后开展单轴压缩试验, 研究损伤砂岩试样冻融循环后的单轴力学行为。单轴压缩试验采用 SHT4605-G 电液伺服试验机, 试验机最大量程为 600 kN。单轴压缩试验前在试样两个端部涂抹凡士林, 减小端部摩擦效应对试验结果的影响。部分试验设备和试验细节如图 2 所示, 具体试验工况如表 1 所示, 其中  $N$  为冻融循环次数, 试样编号中 PD 表示预损伤, PD 后数字表示损伤应力  $\sigma_p$  与平均单轴抗压强度的百分比, FT 表示冻融循环, FT 后数字表示冻融循环次数。另外, 为研究冻融循环前后砂岩试样孔隙结构特征, 选取冻融循环次数为 50 次的 5 个试样进行两次 CT 扫描, 两次 CT 扫描分别在应力损伤后和冻融循环后进行。



图 2 部分试验设备及试验过程图示

Fig. 2 Test equipment and diagram of the test process

表 1 试样编号及具体试验工况

Tab. 1 Samples No. and corresponding specific test conditions

$N$	试样编号	$\sigma_p/\sigma_0$	$N$	试样编号	$\sigma_p/\sigma_0$
10	PD00-FT10	0	40	PD00-FT40	0
	PD20-FT10	0.2		PD20-FT40	0.2
	PD40-FT10	0.4		PD40-FT40	0.4
	PD60-FT10	0.6		PD60-FT40	0.6
	PD80-FT10	0.8		PD80-FT40	0.8
20	PD00-FT20	0	50	PD00-FT50	0
	PD20-FT20	0.2		PD20-FT50	0.2
	PD40-FT20	0.4		PD40-FT50	0.4
	PD60-FT20	0.6		PD60-FT50	0.6
	PD80-FT20	0.8		PD80-FT50	0.8
30	PD00-FT30	0			
	PD20-FT30	0.2			
	PD40-FT30	0.4			
	PD60-FT30	0.6			
	PD80-FT30	0.8			

## 2 试验结果及分析

### 2.1 损伤砂岩冻融循环后变形特征

以冻融循环次数为 50 次的试样和损伤应力为  $0.8\sigma_0$  的试样为例, 损伤过程和单轴压缩过程中试样应力-应变曲线如图 3 所示, 损伤砂岩破坏试样如图 4 所示。损伤过程和单轴压缩过程中, 砂岩试样均存在明显的压密阶段。在压密阶段, 轴向应力随轴向应变的增大非线性缓慢增大。压密阶段过后, 试样轴向应力随轴向应变的增大基本呈线性增大, 即试样进入弹性阶段。如图 3 所示, 同一个试样, 在相同应力下, 单轴压缩轴向应变明显大于损伤过程轴向应变, 这是由两个原因引起的: 1) 损伤过程和单轴压缩过程中, 试样经历轴向加载-卸载-加载过程, 砂岩材料再加载过程中, 应变会大于前一次加载过程中相同应力下的应变; 2) 试样损伤后经历了多次冻融循环, 冻融循环过程中, 试样承受冻胀力, 当

冻胀力大于试样基质骨架自身强度时,试样内产生宏细观冻胀裂隙,试样抵抗变形的能力减弱,相同应力下试样的轴向变形增大。

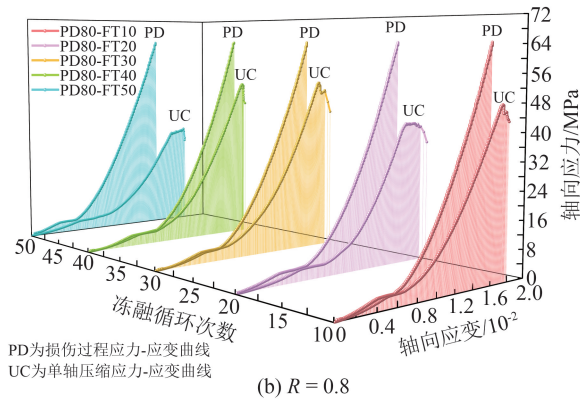
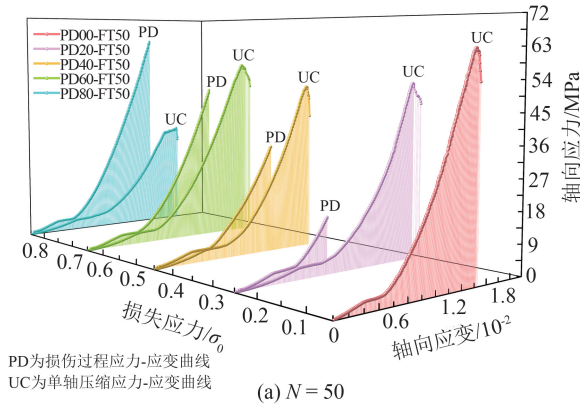


图 3 损伤砂岩应力-应变曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curves of damaged sandstone

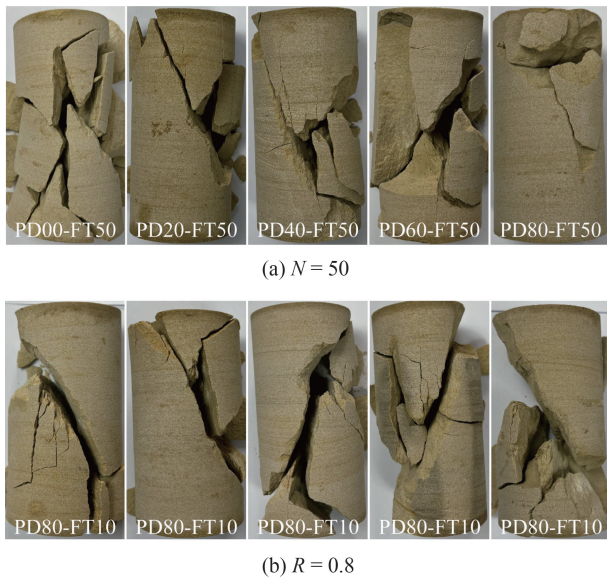


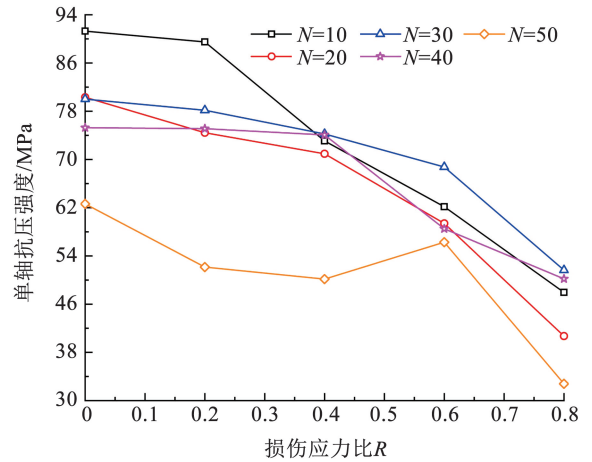
图 4 损伤砂岩破坏试样

Fig. 4 Failed specimen of damaged sandstone

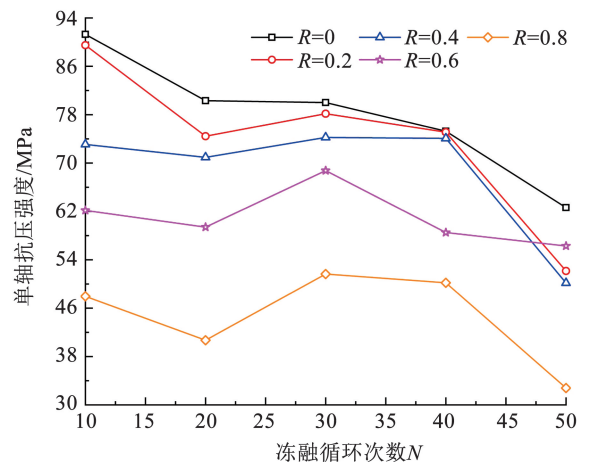
## 2.2 单轴抗压强度和弹性模量演化规律

砂岩试样单轴抗压强度随损伤应力的变化如图 5(a)所示。总体上,不考虑砂岩材料自身力学行为离散性的影响,砂岩试样单轴压缩强度随着损伤

应力的增大逐渐减小。损伤过程中,砂岩承受轴向应力。但损伤应力本身并不会明显减小砂岩的单轴抗压强度。因为再加载过程中,应力超过上一次加载应力后,应力-应变曲线会基本沿着原来的单调加载曲线上,而单轴抗压强度基本不变<sup>[24]</sup>。砂岩单轴抗压强度随损伤应力的增大逐渐劣化的主要原因是随着损伤应力的增大,试样内产生的细观裂隙增多,试样的孔隙率增大。试样内裂隙增多,承受冻胀力的能力减弱。同时,损伤并饱水后,试样内孔/裂隙水增多,试样冻胀变形增大。因此,随着损伤应力的增大,试样的单轴抗压强度逐渐减小。砂岩试样单轴抗压强度随冻融循环次数的变化如图 5(b)所示。随冻融循环次数的增大,砂岩试样的单轴抗压强度整体上逐渐减小。相同损伤条件下,试样内部损伤程度可认为基本相同。随着冻融循环次数的增大,试样内冻融损伤累积,试样抗压强度降低,抗变形能力劣化。



(a) 单轴抗压强度与损伤应力的关系



(b) 单轴抗压强度与冻融循环次数的关系

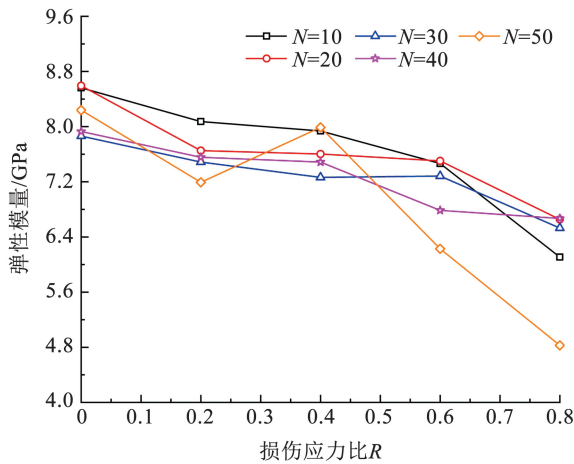
图 5 单轴抗压强度演化规律

Fig. 5 Evolution of uniaxial compression strength

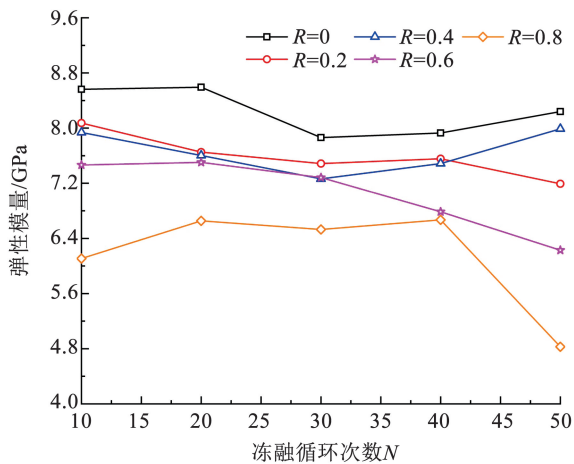
综上所述,砂岩试样单轴抗压强度随损伤应力和冻融循环次数的增大均逐渐减小,但导致砂岩单

轴抗压强度的减小的原因并非损伤应力的变化,而是损伤应力不同引起试样内损伤程度不同,在冻融循环过程中继而引起冻融损伤不同,最终导致试样的单轴抗压强度发生变化。

砂岩试样弹性模量随损伤应力的变化如图 6(a) 所示。整体上,损伤砂岩冻融循环后单轴压缩弹性模量随损伤应力的增大均逐渐减小。这是因为随着损伤应力的增大,试样内微小裂隙增多,孔隙率增大。饱水后,试样内含水量随着损伤应力的增大而增大。低温条件下,孔/裂隙水相变膨胀,试样基质骨架承受冻胀力。相同冻融循环次数下,试样冻胀损伤随着损伤应力的增大而增强。冻融循环后,试样抗变形能力随损伤应力的增大而逐渐劣化,相同应力下试样的轴向变形增大,即试样的弹性模量减小。损伤砂岩冻融循环后单轴压缩弹性模量随冻融循环次数的变化如图 6(b) 所示。砂岩弹性模量随冻融循环次数的增大,整体上也表现为逐渐减小。这是因为相同损伤条件下,随着冻融循环次数的增大,试样内冻胀损伤增强,冻融循环后试样抵抗变形的能力减弱,试样的单轴压缩弹性模量逐渐减小。



(a) 弹性模量与损伤应力的关系



(b) 弹性模量与冻融循环次数的关系

图 6 弹性模量演化规律

Fig. 6 Evolution of elastic modulus

损伤砂岩试样的单轴抗压强度、弹性模量与损伤应力和冻融循环次数的关系可以用线性方程表示为

$$\sigma_0^f = \begin{cases} a\sigma_p + b \\ aN + b \end{cases} \quad (1)$$

$$E^f = \begin{cases} a\sigma_p + b \\ aN + b \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\sigma_0^f$  为损伤砂岩试样冻融循环后单轴抗压强度;  $E^f$  为损伤砂岩试样冻融循环后单轴压缩弹性模量;  $a$ 、 $b$  为拟合参数, 其中参数  $a$  绝对值的大小可以表示单轴抗压强度、弹性模量对损伤应力和冻融循环次数的敏感性,  $a$  的绝对值越大表示单轴抗压强度或弹性模量对损伤应力或冻融循环次数越敏感。通过对损伤砂岩单轴抗压强度、弹性模量随损伤应力和冻融循环次数的变化曲线进行最小二乘法拟合, 得到不同条件下的拟合参数  $a$  如表 2 和图 7 所示。

表 2 不同冻融循环次数和损伤应力下拟合参数  $a$  的取值  
Tab. 2 Parameter  $a$  under various number of freeze-thaw cycles and pre-damage stress

$N$	$a@ \sigma_0^f \rightarrow \sigma_p$	$a@ E^f \rightarrow \sigma_p$	$\sigma_p$	$a@ \sigma_0^f \rightarrow N$	$a@ E^f \rightarrow N$
10	56.99	2.76	0	0.62	0.01
20	47.14	2.01	$0.2\sigma_0$	0.74	0.02
30	33.06	1.43	$0.4\sigma_0$	0.43	0
40	33.37	1.65	$0.6\sigma_0$	0.13	0.03
50	27.80	3.89	$0.8\sigma_0$	0.21	0.03

注:  $a@ \sigma_0^f \rightarrow \sigma_p$  表示对  $\sigma_0^f$  随  $\sigma_p$  的变化拟合得到的参数  $a$ , 其他参数同理。

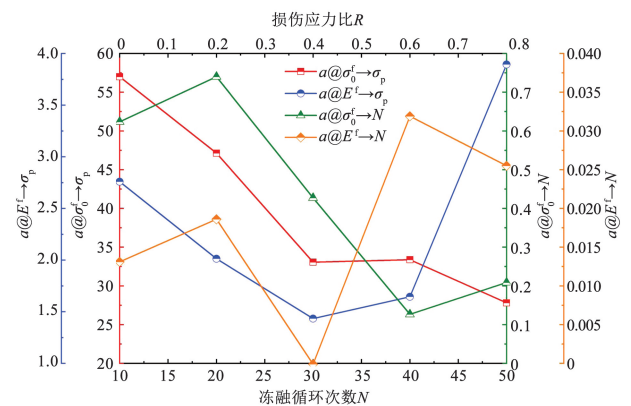


图 7 不同损伤应力和冻融循环次数下拟合参数  $a$

Fig. 7 Changes in parameter  $a$  under various pre-damage stress and various number of freeze-thaw cycles

由表 2 和图 7 可知, 拟合参数  $a$  的变化规律较为复杂, 整体上参数  $a@ \sigma_0^f$  随损伤应力和冻融循环次数的增大表现为逐渐减小并伴随一定的波动, 参数  $a@ E^f$  的变化更为复杂。砂岩材料自身具有非均质、非连续特征, 导致砂岩的力学性质具有较大的离散性, 这一特征在图 5 和图 6 中可以得到充分说明。

经过应力损伤和冻融循环处理后,试样内损伤加剧,试样的非均质、非连续特性增强。损伤试样冻融循环后单轴抗压强度和弹性模量随损伤应力和冻融循环次数的变化并非强线性关系,这会放大线性拟合参数  $a$  的离散性。这可能是参数  $a$  表现出较为复杂的变化规律的主要原因。对单轴抗压强度-损伤应力关系曲线进行线性拟合,得到参数  $a$  的值在 27.8 ~ 56.9 之间,对单轴抗压强度-冻融循环次数关系曲线进行线性拟合,得到参数  $a$  在 0.13 ~ 0.74 之间。由此可以看出,损伤砂岩单轴抗压强度对损伤应力的敏感性远大于对冻融循环次数的敏感性。对弹性模量-损伤应力关系曲线线性拟合得到参数  $a$  的值在 1.43 ~ 3.89 之间,对弹性模量-冻融循环次数关系曲线线性拟合得到参数  $a$  的值在 0 ~ 0.03 之间,由此可知,弹性模量对损伤应力的敏感性同样远大于对冻融循环次数的敏感性。综上所述,损伤砂岩冻融循环后单轴抗压强度和单轴压缩弹性模量对损伤应力的敏感性均大于对冻融循环次数的敏感性。这主要是因为单轴抗压强度和弹性模量的劣化主要是由冻融过程中试样内的冻胀损伤引起的,而孔/裂隙率决定了试样的储水空间。含水量越大,试样冻胀损伤越严重,冻融循环后试样的单轴抗压强度和弹性模量劣化越严重。

### 2.3 损伤试样冻融循环前后孔隙特征

CT 扫描分辨率为 74.31  $\mu\text{m}$ ,每个试样扫描后可以得到 1 345 个截面的灰度图像序列。不同密度物质具有不同的 X 射线吸收能力,导致 CT 图像中每个像素点的灰度值不同。岩石基质等密度较大的物质灰度值高,在 CT 扫描图像中显示为白色或灰色,孔隙、裂隙等位置密度低,灰度值小,在 CT 图像中呈黑色。CT 扫描过程中不可避免产生噪声干扰,在试样边缘产生伪影现象。因此,通过 Avizo 软件对扫描图像进行裁剪,得到砂岩中心区域图像(直径为 45 mm,高度为 90 mm)。通过调整对比度、中值滤波、非锐化掩蔽滤波等降噪方法,获得更加清晰的图像如图 8 所示。计算得到每个截面孔隙率后求平均值即可得到试样中心区域(直径为 45 mm,高度为 90 mm 的中心区域)的平均孔隙率。需要注意的是,在冻融过程中,岩石试样边缘冻融损伤会大于试样内部的冻融损伤,即试样内冻融损伤具有非均匀性。采用中心区域试样的扫描图像计算得到的孔隙率会略低于试样的真实孔隙率。

为了对砂岩试样裂隙网络进行三维重构,需使用合适的灰度阈值分离岩石基质和孔隙结构。将 CT 扫描灰度图像转换为二值图像,采用 Liu 等<sup>[25]</sup>提出的方法确定岩石基质与孔隙的分割阈值。如

图 9 所示,试样计算孔隙率随灰度分割阈值的增大呈非线性增大。计算孔隙率可以分为 3 段:AB 段、BC 段和 CD 段。在 AB 段和 CD 段,可以认为计算孔隙率随灰度阈值呈线性变化。在 AB 段,由于分割阈值较小,可以认为灰度小于分割阈值的像素均为孔隙,灰度大于分割阈值的像素部分为孔隙,部分为基质。在 CD 段,由于分割阈值较大,可以认为灰度大于分割阈值的像素均为岩石基质,灰度小于分割阈值的像素部分为基质,部分为孔隙。分别对 AB 段和 CD 段进行线性拟合,得到直线  $L_{AB}$  和直线  $L_{CD}$ 。直线  $L_{AB}$  和直线  $L_{CD}$  的交点  $T$  对应的分割阈值即为岩石基质和孔隙的灰度分割阈值。

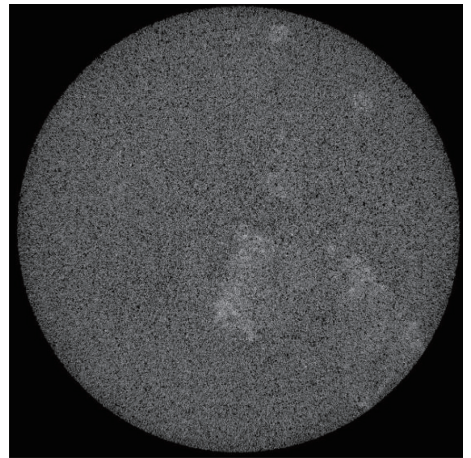


图 8 CT 扫描灰度图像

Fig. 8 CT scan gray-scale image

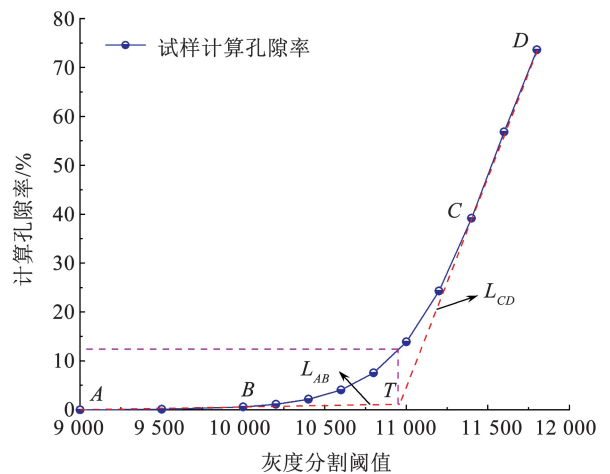


图 9 计算孔隙率与分割阈值的关系

Fig. 9 Correlation between the calculated porosity and the segmentation threshold

#### 2.3.1 孔隙率演化规律

冻融循环为 50 次的试样孔隙率随损伤应力的变化如图 10 所示。其中孔隙率增长率是试样冻融循环前后孔隙率的变化与冻融循环前试样孔隙率的比值。冻融循环前,预损伤应力比由 0 增大到 0.8,

试样孔隙率由 11.43% 增大到 13.81%, 增大了 20.82%。冻融循环处理后, 预损伤应力比由 0 增大到 0.8, 试样孔隙率由 13.10% 增大到 17.27%, 增大了 31.83%。冻融循环前和冻融循环后试样的孔隙率均随预损伤应力的增大而增大, 但孔隙率增大机制不同。冻融循环前的试样, 随着轴向应力的增大, 试样内的应力损伤增强, 试样内微裂隙增多, 导致试样孔隙率随损伤应力的增大而增大。而冻融循环后的试样孔隙率的增大由两部分组成: 1) 冻融循环处理前, 预损伤应力较大的试样孔隙率较大, 冻融循环处理后试样孔隙率计算中会将这部分孔隙体积计入; 2) 冻融循环过程中, 由于孔隙水的相变膨胀, 试样产生冻胀损伤, 损伤应力大的试样孔隙率大、孔隙水含量大、承受冻胀力的能力弱, 这导致损伤应力大的试样在冻融循环过程中会产生更严重的冻胀损伤, 这也是如图 10 所示试样孔隙率增长率随预损伤应力比增大而增大的原因。损伤应力比由 0 增大到 0.8, 孔隙率增长率由 14.62% 增大到 25.04%。

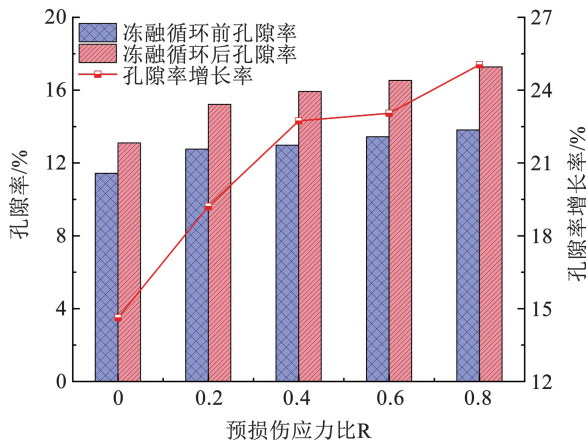


图 10 孔隙率随损伤应力的变化

Fig. 10 Change in volume porosity with pre-damage stress

### 2.3.2 孔隙等效半径

将每个孔隙等效为球体, 则孔隙的等效半径为

$$r_e = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \quad (3)$$

其中:  $r_e$  为孔隙的等效半径,  $V_p$  为单个孔隙体积。

为分析不同尺寸孔隙的比例, 将孔隙等效半径每隔 50  $\mu\text{m}$  划分为一组, 统计每组孔隙数量并计算其占总裂隙数量的比例如图 11 所示。冻融循环前和冻融循环后的试样, 孔隙数量占比均整体表现为随孔隙等效半径的增大逐渐减小。但冻融循环前和冻融循环后的试样孔隙等效半径的分布又有所不同。对于冻融循环前的试样, 孔隙等效半径与频率的关系可以分为 3 个阶段: 1) 损伤应力比为 0 ~ 0.2 时, 试样内等效半径在 0 ~ 50  $\mu\text{m}$  之间的孔隙数量最

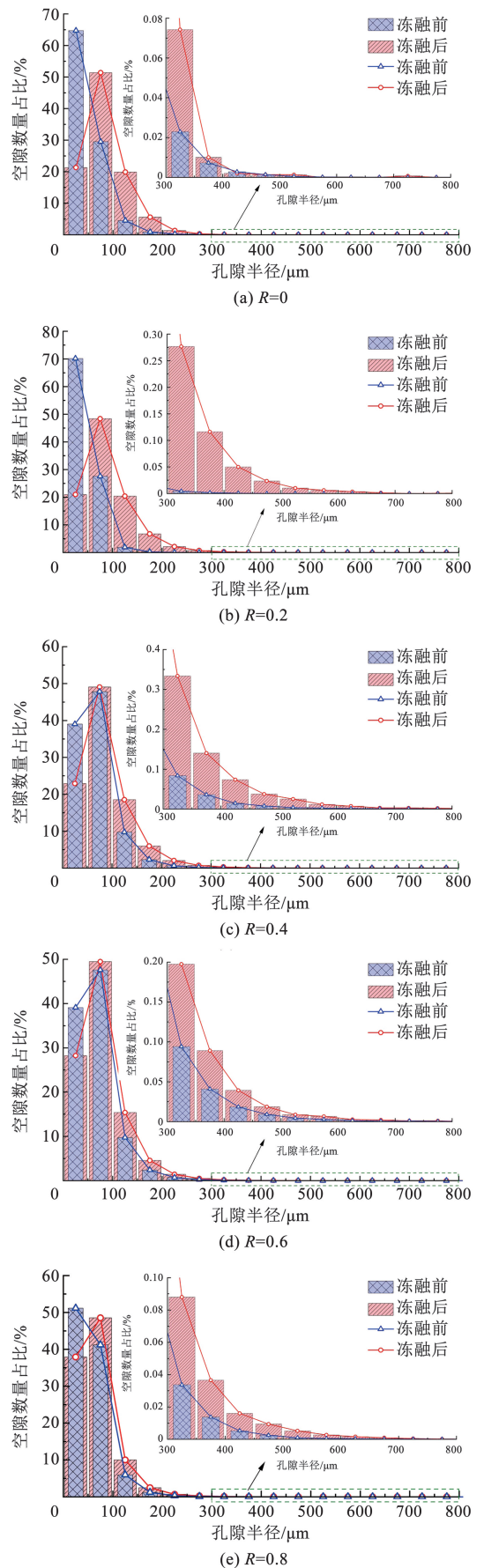


图 11 冻融循环前后试样孔隙等效半径分布

Fig. 11 Distribution of pore equivalent radius before and after the freeze-thaw cycle

多,且随着等效半径的增大,对应的孔隙数量占比逐渐减小。2)当损伤应力比增大到0.4~0.6时,试样内等效孔隙半径在50~100  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙数量最多,在0~50  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙次之。这是因为随着应力的增大,试样内产生微损伤,大量小孔隙起裂扩展,形成较大孔隙。等效半径为0~50  $\mu\text{m}$ 的孔隙减少,50~100  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙增多。3)当损伤应力比达到0.8时,试样内的损伤进一步加剧,试样内尺寸较大的缺陷更容易起裂扩展,形成尺寸更大的孔隙。这导致50~100  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙减少,占比减小。虽然0~50  $\mu\text{m}$ 之间孔隙的数量不会增多,但由于孔隙的扩展贯通,导致总孔隙数量减小,因此等效半径在0~50  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙数量占比增大。

与冻融循环前的试样不同,冻融循环后的试样,孔隙数量占比均表现为随等效半径的增大先增大后减小,数量最多的孔隙等效半径为0~50  $\mu\text{m}$ 。相较于冻融循环前的试样,等效半径在0~50  $\mu\text{m}$ 之间的孔隙占比均有所减小,等效半径大于50  $\mu\text{m}$ 的孔隙占比均有所增大。这主要是因为冻融循环过程中,孔隙水相变膨胀,基质骨架受冻胀力作用发生破裂,微小孔隙会相互连通形成较大的孔隙,导致0~50  $\mu\text{m}$ 的孔隙数量占比减小,大于50  $\mu\text{m}$ 的孔隙数量占比增大。

### 2.3.3 孔隙结构分形特征

采用数盒子法计算冻融循环前后试样孔隙分布的三维分形维数。如图12所示,将砂岩CT扫描图像置于立方体中,立方体细分为若干边长为 $a$ 的小盒子,并计算包含孔隙的小盒子个数 $P(a)$ ,不断调整小盒子尺寸,得到一系列的 $P(a)$ 。双对数坐标下 $\log P(a)$ 和 $\log a$ 回归直线斜率即为试样孔隙结构的分形维数。

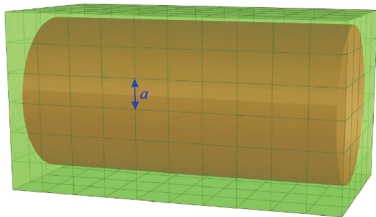


图 12 盒维数法

Fig. 12 Box dimension method

冻融循环前后,试样孔隙结构分形维数演化规律如图13所示。分形维数反映了复杂形体占有空间的有效性,它是复杂形体不规则性的量度。一般情况下,分形维数越大,试样内孔隙结构越复杂,反之越简单。冻融循环前的试样,孔隙结构分形维数随损伤应力的增大明显增大,损伤应力比由0增大到0.8,孔隙结构分形维数由2.46增大到2.56,增

大了4.07%。这表明,随着损伤应力的增大,试样损伤逐渐加剧,试样内孔隙结构更为复杂。冻融循环后的试样,孔隙结构分形维数随损伤应力的增大也逐渐增大,但随损伤应力的增长幅度明显小于冻融循环前的试样。冻融循环后的试样孔隙结构分形维数明显大于冻融循环前的试样,表明冻融循环过程中试样冻胀损伤明显增加的孔隙结构的复杂性。综上所述,应力损伤和冻融循环使得试样内孔隙和裂隙增多,形成了更为密集和错综复杂的网络。

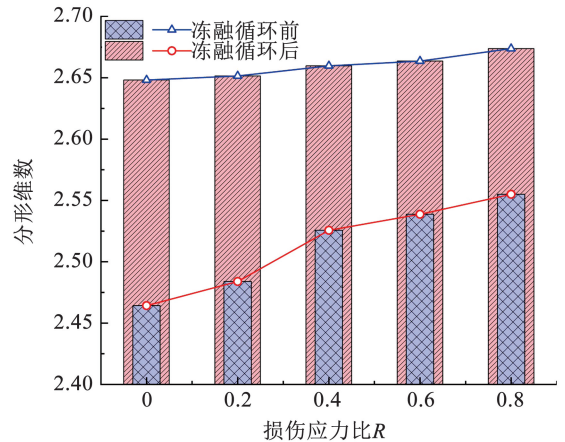


图 13 孔隙结构分形维数演化规律

Fig. 13 Fractal dimension evolution of pore structure

## 3 结 论

为研究损伤砂岩冻融循环后多尺度力学行为,对砂岩试样首先进行了应力损伤,然后进行了冻融循环处理,最后开展了单轴压缩试验,可以得到以下主要结论:

1)冻融循环会加剧试样内的损伤,相同应力下,冻融循环后砂岩轴向变形大于冻融循环前砂岩的轴向变形。

2)损伤砂岩单轴抗压强度和弹性模量均随损伤应力和冻融循环次数的增大逐渐减小,且单轴抗压强度和弹性模量对损伤应力的敏感性远大于对冻融循环次数的敏感性。

3)冻融循环前后,砂岩孔隙率随损伤应力的增大均逐渐增大,冻融循环后砂岩孔隙率大于冻融循环前砂岩的孔隙率。冻融循环后砂岩内尺寸较大的孔隙数量占比增加。

## 参考文献

- [1]刘慧,徐雅丽,杨更社,等.冻融循环作用下含天然损伤砂岩破坏过程的数值试验研究[J].冰川冻土,2022,44(6):1875  
LIU Hui, XU Yali, YANG Gengshe, et al. A numerical experiment study on the damage process of sandstone with natural damage under freeze-thaw cycling [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6): 1875

- [2] LIU Taoying, CUI Mengyuan, ZHANG Chaoyang, et al. Nuclear magnetic resonance analysis of the failure and damage model of rock masses during freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81: 445
- [3] TANG Xuhai, TAO Siji, LI Ping, et al. The propagation and interaction of cracks under freeze-thaw cycling in rock-like material [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 154: 105112
- [4] 王飞, 高明忠, 邱冠豪, 等. 初始损伤-载荷-冻融作用下红砂岩的孔隙结构及力学特性[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 194  
WANG Fei, GAO Mingzhong, QIU Guan hao, et al. Pore structure and mechanical properties of red sandstone under the action of initial damage-load-freeze-thaw cycles [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(6): 194
- [5] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1208  
LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, et al. Experimental study on freeze-thaw damage of rock pore structure based on nuclear magnetic resonance technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1208
- [6] 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  
YANG Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, et al. Multiscale study and progress on mechanical properties of rock mass under freeze-thaw environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 545
- [7] HU Jianhua, ZENG Pingping, YANG Dongjie, et al. Experimental investigation on uniaxial compression mechanical behavior and damage evolution of pre-damaged granite after cyclic loading [J]. Energies, 2021, 14(19): 6179
- [8] 史为政, 段志, 许晓亮, 等. 预应力及冻融循环对砂岩物理力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 815  
SHI Weizheng, DUAN Zhi, XU Xiaoliang, et al. Influence of prestress and freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of sandstone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineer, 2023, 19(3): 815
- [9] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688  
ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. Study on the mechanism and mechanical properties of rock damage degradation under freezing and thawing conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688
- [10] LI Tianzheng, ZHANG Limin, GONG Wenping, et al. Cyclic freezing-thawing induced rock strength degradation, crack evolution, heave and settlement accounted for by a DEM model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105498
- [11] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471  
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research on the damage model of rocks under the coupling action of freezing and thawing and loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471
- [12] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 140  
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Rock freeze-thaw mechanics experiments and damage extension characteristics [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(1): 140
- [13] 刘享华, 张科, 刘文连. 荷载与冻融共同作用对多裂隙砂岩能量转化与损伤特性的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 715  
LIU Xianghua, ZHANG Ke, LIU Wenlian. Impact of load and frost on energy conversion and damage characteristics of multi-jointed sandstone [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 715
- [14] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2307  
LI Xinping, LU Yani, WANG Yangjun. Study on damage model of single fracture rock mass under coupling action of freezing and thawing loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2307
- [15] QIAO Chen, WANG Yu, TONG Yongjie, et al. Deterioration characteristics of pre-flawed granites subjected to freeze-thaw cycles and compression [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39: 5907
- [16] 赵建军, 解明礼, 余建乐, 等. 冻融作用下含裂隙岩石力学特性及损伤演化规律试验研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1199  
ZHAO Jianjun, XIE Mingli, YU Jianle, et al. Study on mechanical properties and damage evolution rules of rock with joint subjected to frost and thaw actions [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1199
- [17] CHEN Yifan, LIN Hang, LIANG Linyuan. Freeze-thaw failure characteristics and strength loss of non-penetrating fractured rock mass with different fracture densities [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 124: 103792
- [18] WANG Yu, SUN Tao, YANG Haonan, et al. Experimental investigation on frost heaving force (FHF) evolution in pre-flawed rocks exposed to cyclic freeze-thaw conditions [J]. Geofluids, 2021, 20: 6639683
- [19] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏观损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1124  
LÜ Siqing, ZHU Jiebing, WANG Bin, et al. Study on macro-micro damage model of open jointed sandstone subjected to frost and load coupling actions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1124
- [20] JIA Hailiang, DING Shun, ZI Fan, et al. Evolution in sandstone pore structures with freeze-thaw cycling and interpretation of damage mechanisms in saturated porous rocks [J]. Catena, 2020, 195: 104915
- [21] HUANG Shibing, HE Yingbo, YU Shilin, et al. Experimental investigation and prediction model for UCS loss of unsaturated sandstones under freeze-thaw action [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(1): 41
- [22] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076  
XU Guangmiao, LIU Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076
- [23] 李平, 唐旭海, 刘泉声, 等. 双裂隙类砂岩冻胀断裂特征与强度损失研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 115  
LI Ping, TANG Xuhai, LIU Quansheng, et al. Experimental study on fracture characteristics and strength loss of intermittent fractured quasi-sandstone under freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 115
- [24] 张永兴. 岩石力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006  
ZHANG Yongxing. Rock mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006
- [25] LIU Bo, MA Yongjun, LIU Nian, et al. Investigation of pore structure changes in Mesozoic water-rich sandstone induced by freeze-thaw process under different confining pressures using digital rock technology [J]. Cold regions science and technology, 2019, 161: 137