

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0163

LIU Hui, XU Yali, YANG Gengshe, et al. Numerical experimental study on failure process of sandstone containing natural damage under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1875–1886. [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):1875–1886.]

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

刘 慧¹, 徐雅丽¹, 杨更社¹, 潘鹏志², 金 龙³, 唐丽云¹, 黄慧琦¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710075)

摘 要: 裂隙、孔隙等天然损伤使得岩石细观结构呈现强烈的非均质性, 对其破坏过程及模式产生重要影响。本文根据CT无损识别技术, 结合数字图像处理技术和CASRock数值模拟软件, 开展了含天然损伤的冻融砂岩劈裂破坏的数值试验研究。对含天然损伤的冻融砂岩劈裂破坏模式、变形局部化及裂纹演化过程等分析, 揭示了含天然损伤砂岩在冻融和荷载作用下的破坏机制。研究结果表明: 砂岩内原生孔隙(裂纹)的扩展及新生孔隙的生成是冻融岩石破坏演化的主要形式。冻融和荷载作用下含天然损伤岩石的破坏与天然损伤程度及分布有关。次生裂纹的生成多发生于天然损伤密集区域。在加载过程中, 局部化损伤区应力远远大于砂岩整体应力, 局部化损伤区岩石的破坏与该区域能量释放和应力释放具有同步性。局部化损伤反映岩石中裂纹的演化, 有助于预测砂岩裂纹发展的方向。岩石的破坏模式与冻融循环次数有关, 冻融循环促使含天然损伤砂岩逐渐由脆性破坏转化为延性破坏, 冻融作用对岩石整体强度的改变是逐渐劣化的过程。

关键词: 冻融岩石; CASRock; CT扫描; 图像处理; 破坏过程; 局部化损伤

中图分类号: P642.14; TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1875-12

0 引言

岩石在漫长的地质和环境作用下, 其内部形成的孔隙、节理、裂纹和非连续面等初始损伤结构^[1]造成了岩石的非均质性。岩石的非均质性对其破坏过程、破坏形态以及宏观力学性能有重要影响^[2-4]。尤其是在低温环境下, 寒区昼夜冻融交替, 岩石内部细观损伤加速扩展。矿物颗粒在外荷载作用下发生滑移、错动, 促使岩石内部微孔隙(微裂隙)不断萌生、扩展, 岩石初始损伤区域相互连接, 最终导致岩石失去承载能力, 引发一系列工程灾害, 对寒区工程稳定性产生重大影响。

近年来许多学者对冻融岩石力学性能及破坏模式进行了研究^[5-10]。王永岩等^[11]对不同孔隙率的相似页岩进行冻融循环试验, 探究了冻融循环次数和

孔隙率大小对岩石力学性能的影响。路亚妮等^[12]研究不同冻融循环次数和围压下岩石强度和变形参数的变化规律, 分析了岩石在不同层理角度和冻融循环次数下的破坏模式。王乐华等^[13]开展了层理砂岩在自由饱水、真空饱水和不同冻融循环次数下的三轴压缩力学特性试验研究。闻磊等^[14]研究了岩石的致密程度、孔隙率等物理参数对冻融岩石力学性能的影响。宋彦琦等^[15]通过进行不同冻融循环次数灰岩单轴声发射试验, 揭示了冻融及轴向载荷作用下灰岩力学特性演化规律及内部细观结构渐进损伤特征。贾清斐等^[16]对不同初始损伤的冻融泥质粉砂岩进行冲击加载试验, 研究了冻融作用对含初始损伤泥质粉砂岩的宏观动力学性能和损伤演化规律。Yahaghi等^[17]通过冻融试验、单轴抗压强度试验和巴西抗拉强度试验, 研究了不同冻融循环次数下塔斯

收稿日期: 2022-04-24; 修订日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277172; 42177144; 51774231); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2020JZ-53)资助

作者简介: 刘慧, 副教授, 主要从事岩土力学和岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: woaiwojialiu@126.com

玛尼亚砂岩的物理力学性质和破坏行为。

上述研究成果^[18-23]促进了冻融岩石在荷载作用下强度和破坏模式的认识。然而,对含天然损伤岩石破坏过程的研究很少,尤其是对冻融环境下含天然损伤岩石破坏的研究鲜有报道。含天然损伤岩石的破坏是一个复杂的非线性过程,具有变形局部化的特点。元胞自动机(CA)通过构造岩石内部元胞之间的随机相互作用规则,考虑局部和并行特性,描述离散动力系统内部元胞之间的强非线性相互作用,模拟载荷作用下岩石的失效过程,是分析复杂非线性系统的有效方法。李明田等^[24-25]通过研究提出物理格构元胞演化力学模型,模拟岩石的非均质性、各向异性对破坏行为的影响。王士民等^[26]在元胞自动机的基础上加入了岩石力学的理论,提出了演化细胞自动机模型。潘鹏志等^[27-30]结合元胞自动机、弹塑性理论和岩石力学,提出了岩石破裂过程的弹塑性细胞自动机(EPCA)模拟方法,研发了工程岩体破裂过程细胞自动机分析软件CAS-Rock^[31-32],用于岩石裂纹萌生、扩展过程模拟和工程岩体稳定性分析。以上研究表明:细胞自动机理论能够对岩石的破坏过程进行分析,为实现冻融岩石破坏过程的分析提供了可行方法。本文以天然损伤冻融红砂岩为研究对象,将岩石视为由元胞组成的系统,结合CT图像处理技术和CASRock数值模拟软件,构建表征红砂岩初始损伤的二维数值模型。通过对冻融岩石破坏模式、变形局部化及裂纹演化过程等分析,揭示了含天然损伤砂岩在冻融和荷载作用下的破坏机制。

1 含天然损伤砂岩的CT扫描及劈裂破坏试验

1.1 试样制备

试样红砂岩采自陕西渭南,该砂岩由泥状胶结而成,表面呈深红色,质地均匀,颗粒粒径在0.05~0.25 mm之间。将岩样加工制成 $\varnothing 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体。利用超声检测分析仪筛选出波速相近的岩样。筛选好的岩样见图1。将岩样放置在105℃的烘干箱中48 h,得到试样干密度,随后置于真空饱和机进行饱水试验24 h。试样平均波速为 $3.83\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,平均干密度为 $2.31\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均饱和密度为 $2.66\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验方案

(1)冻融循环试验。将砂岩试样放置于



图1 部分砂岩试样

Fig. 1 Some sandstone samples

TMS9018-R20程控低温恒温箱中进行冻融循环试验。依据寒区昼夜温差的特点及相关试验规程^[33]并结合相关学者^[34-35]的研究成果,一个冻融循环周期为24 h,试样在-20℃冻融试验箱冻结12 h,并在+20℃在开放饱水状态下融化12 h。分别对砂岩进行0次、5次、10次、20次、30次冻融循环。

(2)CT扫描试验。该试验采用西京医院的GE Lightspeed 64排VCT X射线螺旋CT机,在冻融循环后对砂岩进行全方位CT扫描,扫描层数为20层。每层间隔2.5 mm,两端层面距离顶部1.25 mm。由于相同的扫描位置对于追踪不同冻融循环次数后的砂岩细观结构演变至关重要,为此将岩样放置在扫描支架上,每次扫描时将支架放置在扫描仪上相同位置。

(3)巴西劈裂试验。采用WDW-100低温电子万能试验机对冻融砂岩进行巴西劈裂试验。在砂岩表面均匀涂抹一层凡士林以确保和传感器接触良好。加载速率设为 $0.06\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,采用位移加载。

(4)单轴压缩试验。将冻融砂岩进行单轴压缩试验,试验采用DTAW-8000岩石高压动力试验系统,最大加载荷载为1 500 kN。加载速率为 $0.06\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,采用位移加载。

1.3 试验结果

根据巴西劈裂试验和单轴压缩试验得到不同冻融循环次数下砂岩基本力学参数(表1)。根据下式计算可得到砂岩抗拉强度:

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi RL} \quad (1)$$

式中: P 为冻融砂岩破坏时最大载荷(N); R 为冻融砂岩直径(m); L 为冻融砂岩厚度(m)。

图3是砂岩巴西劈裂应力-应变曲线,由图可知,随着冻融循环次数增加,砂岩峰值应变先减小后增大。这是因为岩石在饱水条件下,反复的水冰

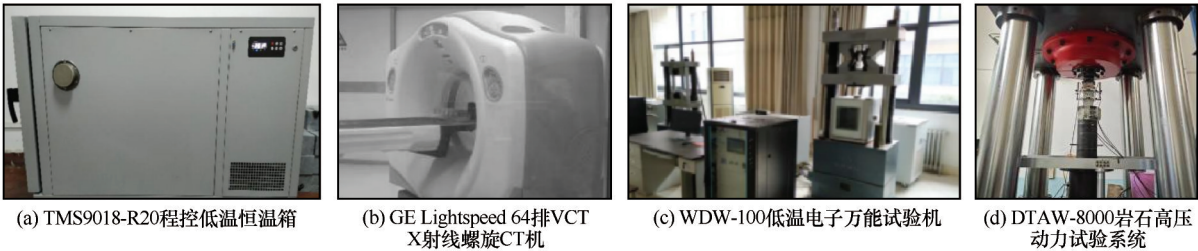


图2 试验仪器

Fig. 2 Test apparatus

表1 砂岩基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of sandstone

冻融循环 次数 <i>N</i>	弹性模量/ GPa	泊松比	饱和密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗拉强度/ MPa
0	1.66	0.26	2.66	4.34
5	1.43	0.26	2.63	3.20
10	1.26	0.27	2.59	2.81
20	1.01	0.27	2.61	1.96
30	0.93	0.27	2.60	1.67

相变产生的冻胀力促使岩石内部孔隙发育,颗粒间黏结力减小,导致砂岩在荷载作用下,加载点间内部黏结薄弱处更易发生破坏,即0次、5次、10次的冻融砂岩整体呈脆性破坏^[36-37],发生破坏时峰值应变逐渐减小,抗拉强度降低。当20次冻融循环时,砂岩内部损伤加剧,微裂隙增多,应力主要用于裂隙间岩石颗粒的摩擦和挤压,砂岩由脆性破坏向塑性破坏转变,即20次和30次冻融循环砂岩破坏时峰值应变增大。

经过冻融循环试验和CT扫描试验,获得了冻融砂岩不同扫描层面的CT图像。图4为砂岩A1第10

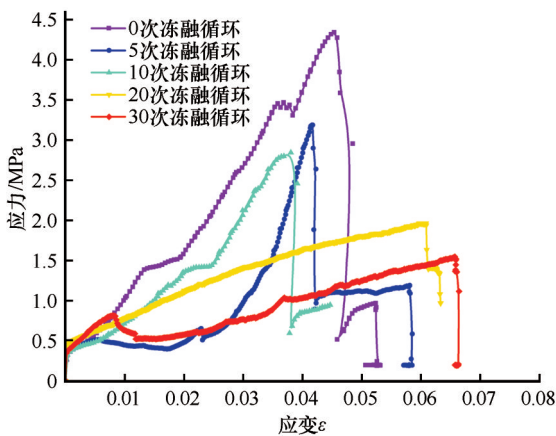


图3 砂岩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of sandstone

层在不同冻融循环次数下的CT图像。根据扫描截面各点物质对X射线吸收系数不同,物质的密度越大,CT数值越大,表现在CT扫描图像亮度越高。砂岩对X射线的吸收系数与CT数之间的关系为^[1]

$$\text{CT}(H) = \frac{\mu - \mu_m}{\mu_m} \times 1000 \tag{2}$$

式中: μ_m 为砂岩单位质量的吸收系数, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$; μ 为岩石颗粒或孔隙对X射线的吸收系数。

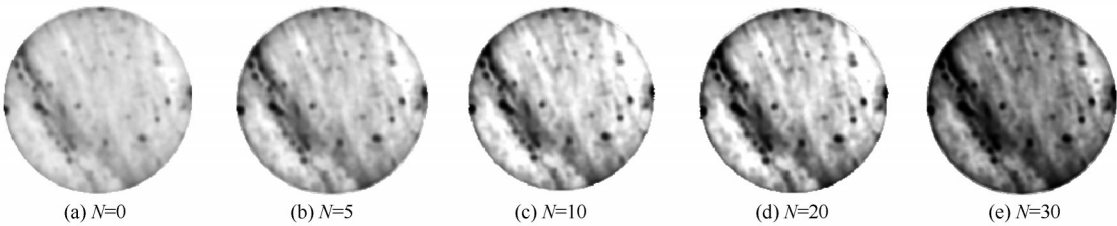


图4 不同冻融循环次数下砂岩CT图

Fig. 4 CT images of sandstone under different freeze-thaw cycles

在岩石CT扫描图像中,白色区域代表岩石颗粒,黑色区域代表微裂纹(孔隙)。通过观察CT数的大小及分布可以了解冻融岩石的损伤扩展。图5为不同冻融循环次数下砂岩CT均值和CT方差变化曲线。由图可知,砂岩CT数均值和方差与冻融循环次数密切相关。随冻融循环次

数增加,砂岩内部孔隙不断扩大,冻融加剧砂岩本身的非均质性,表现为CT数均值减少,方差增大,尤其是在20次冻融循环后,CT数均值急速下降,方差急剧上升。这与应力-应变曲线中砂岩在20次冻融循环时抗拉强度大幅度下降现象吻合。

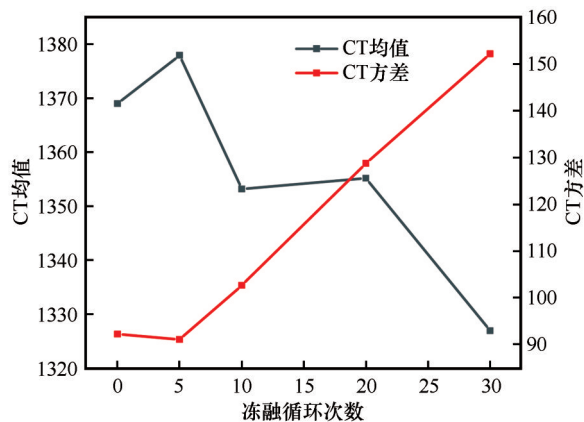


图5 不同冻融循环次数下砂岩CT数均值和方差曲线
Fig. 5 Mean and variance curves of CT number of sandstone under different freeze-thaw cycles

2 冻融砂岩细观损伤结构数字化模型

运用遗传算法与最大类间方差法^[38],完成冻融岩石CT图像分割,建立含天然损伤岩石细观结构

数字化二维模型(图6),再采用CASRock软件,以砂岩室内试验获取的力学参数为数值计算依据,完成了含天然损伤的冻融砂岩破坏过程的数值试验。数值计算参数见表2。该模型直径为50 mm,共划分成4 423个节点,4 353个单元。采用位移加载,加载速率为 $1\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 数值模拟结果及分析

3.1 冻融砂岩细胞自动机力学分析模型

岩石内部存在孔隙和微裂隙等微缺陷,这些微缺陷使岩石本身具有非均质性。相关研究表明,材料的非均质性可以由材料力学参数(弹性模量,泊松比等)的统计分布来描述。冻融砂岩细胞自动机力学分析模型通过利用Weibull分布给材料细观单元力学性质参数随机赋值的方法来描述岩石的非均质性。该分布的概率密度函数由下式表示^[39]

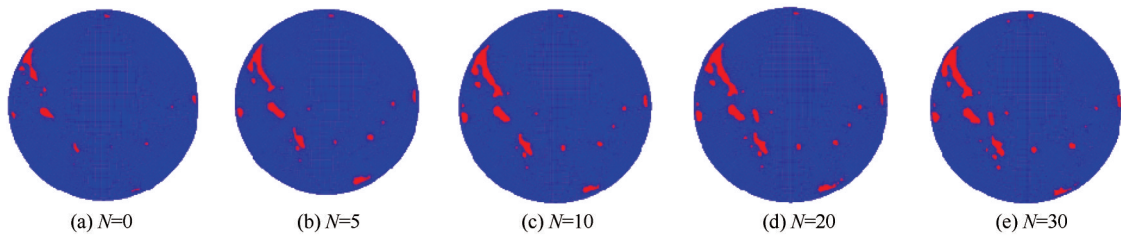


图6 含天然损伤砂岩细观结构网格模型
Fig. 6 Microstructural grid model of sandstone with natural damage

表2 数值计算参数
Table 2 Numerical calculation parameters

材料	初始黏聚力/ Pa	残余黏聚力/ Pa	初始摩擦角/ (°)	残余摩擦角/ (°)	初始拉伸 强度/Pa	残余拉伸 强度/Pa	均质度系数	随机种子数	弹性模量/Pa
岩石	1.3×10^7	1×10^6	49	48	5×10^6	1×10^4	3	10	见表1
孔隙	1.3×10^5	1×10^4	48	48	5×10^5	1×10^4	3	10	1×10^2

$$f(x)=\begin{cases}0&x<0\\ \frac{mx^{m-1}}{x_0^m}\exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m\right]&x\geq0\end{cases}\quad (3)$$

式中: x 是随机变量; m 是形状参数,表示参数的离散程度; x_0 是尺度参数。为了描述岩石的非均质性,可以将形状参数 m 定义为均质度系数。均质度系数 m 越大,岩石内部材料分布越不均匀。该细胞自动机力学分析模型模拟岩石破裂过程的基本思路如下:

(1)将岩石离散为由岩石元胞组成的系统,其非均质性根据Weibull分布给材料性质随机赋值来实现;

(2)对岩石采用某种加载方式(本文采用巴西劈裂加载),根据某种屈服准则(本文采用Mohr-Coloumb准则)来判断元胞是否达到破坏,如果元胞发生破坏则采用弹-脆-塑性本构关系对其进行应力调整,直至没有新的元胞破坏为止;

(3)在应力调整平衡的基础上,对岩石进一步施加荷载,直至发生宏观破坏。

本次数值模拟中,假设岩石元胞满足弹-脆-塑性本构关系,应力点从初始屈服面向后继屈服面的迁移是瞬时完成的,假定应力跌落过程中各应力偏量分量的原有比例保持不变。设初始屈服面上应

力水平为 $\sigma^{(r)}$,残余强度系数为 $\beta^{[40]}$,跌落过程中的应力偏量变化量为^[39]:

$$\Delta s = (1 - \beta) s^{(s)}$$

(4)

则跌落后的应力全量为

$$\sigma^{(f)} = \sigma_m^{(r)} + s^r - \Delta s = \sigma_m^{(r)} + \beta s^{(r)}$$

(5)

式中: $\sigma_m^{(r)}$ 为初始屈服面的球应力张量, $s^{(r)}$ 为初始屈服面的偏应力张量。由于在跌落过程中总应变保持不变,产生的塑性应变的增量由弹性应变的减少所抵消,所发生的塑性应变可以按弹性规律衰减得出,其等效塑性应变增量为:

$$\Delta \bar{\epsilon}^p = (1 - \beta) \sigma_s / E$$

(6)

其中, σ_s 为等效应力,有

$$\Delta s^p = \Delta s$$

(7)

当应力点从初始屈服面向后继屈服面的跌落,将在塑性不平衡力的作用下,继续在后继屈服面上做塑性流动。

3.2 冻融砂岩破坏模式分析

通过数值计算得到冻融作用下砂岩抗拉强度曲线(图7),模拟所得砂岩抗拉强度与室内试验结果较为一致,砂岩抗拉强度随冻融循环次数增加整体呈下降趋势。在冻融作用下,砂岩内部初始损伤加剧。受荷载作用,砂岩整体宏观力学性能下降,冻融促使岩石整体强度劣化。

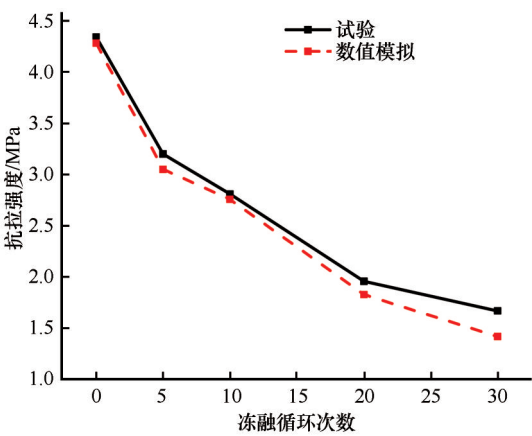


图7 砂岩抗拉强度曲线
Fig. 7 Tensile strength curves of sandstone

黏聚力可以表征岩石内部颗粒间的连接破坏,黏聚力的变化可以动态反映岩石内部裂纹的演化。图8显示了含天然损伤冻融砂岩加载过程中由于黏聚力变化而引发的裂纹的演变。在弹性变形阶段,砂岩除了自身的初始损伤外没有明显的损伤区域。屈服阶段,砂岩内部出现微裂纹,初始损伤区附近出现显著的应力集中现象,在外力作用下,在相近的初始损伤区域之间产生微裂纹,随后微裂纹与初始损伤区域连通形成次生裂纹。岩石从初始损伤演化发展到最终的断裂破坏过程中的一个重要特

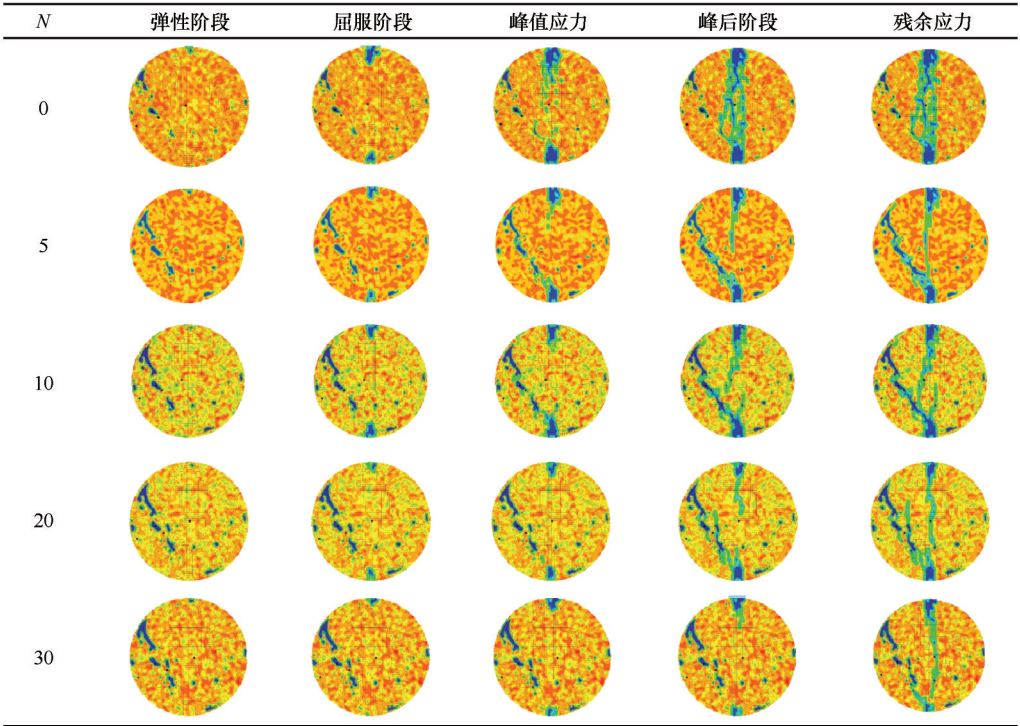


图8 冻融砂岩劈裂全过程黏聚力云图
Fig. 8 Viscosity nephogram of whole splitting process of frozen-thawed sandstone

点就是贯通性主裂纹的形成。进入峰后阶段,砂岩在强烈的张拉作用下,裂纹开始沿主应力方向扩展延伸,致使元胞单元在应力作用下不断破裂,微裂纹之间相互连接,形成宏观贯通主裂纹。

根据数值计算可得到含天然损伤砂岩在荷载作用下破坏云图(图9),数值模拟结果与实验得到的0、5、10、20、30次冻融破坏模式基本一致。对于未冻融砂岩,中心劈裂是主要的破坏模式,砂

岩在荷载作用下一分为二。随循环次数的增加,冻融造成的损伤会不断累积导致砂岩产生大量远离试样中心线的微裂隙,致使岩样整体破碎程度加剧。砂岩破裂裂纹与实验结果差异较大,主要是由于细观结构是决定岩石破坏过程和模式的重要因素,而实验所用岩样与数值计算模型岩样的内部细观结构不同,因而最终破裂面有较大的差异。

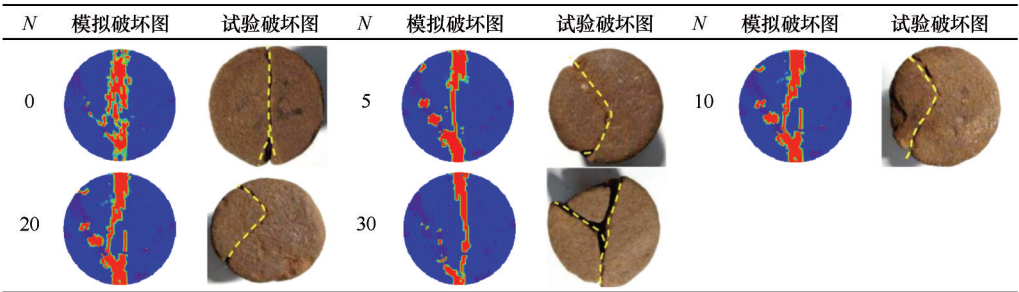


图9 砂岩破坏图

Fig. 9 Failure diagram of sandstone

结合图8可知,冻融砂岩破坏模式的改变,主要由冻融循环和岩石的初始损伤共同引起。冻融循环致使砂岩整体力学性能下降,内部损伤加剧,而初始损伤导致冻融砂岩在受荷过程中微裂纹的发展具有损伤局部化特性。在加载过程中,含天然损伤冻融砂岩的裂纹演化主要包括两种方式,一种是沿初始损伤区的次生裂纹扩展贯通,一种是沿加载点方向主裂纹的贯通。其中,次生裂纹的演化具有明显的局部化损伤特性,初始损伤的分布和大小有

助于预测岩石中裂纹发展的方向。

3.3 冻融循环作用下砂岩局部化变形分析

由图10可反映出砂岩在经历不同冻融循环次数后的损伤演化规律。

(1)砂岩内部损伤主要由孔隙和微裂隙组成。在冻融循环作用下,砂岩截面的微孔隙、裂隙等天然损伤随冻融循环次数的增加不断向外辐射、延伸、贯通。同时初始损伤区域外有新的孔隙产生,但数目较少。

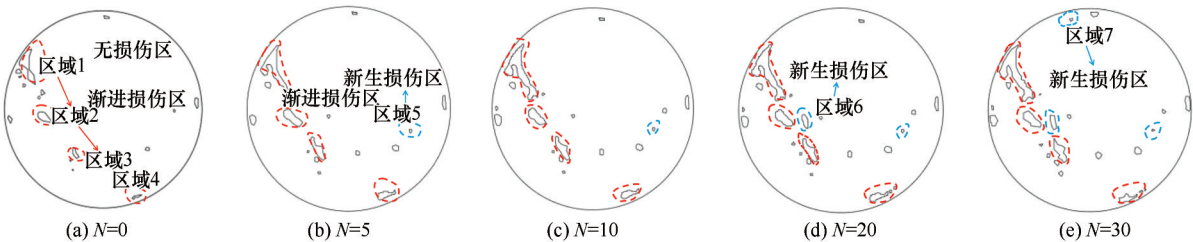


图10 不同冻融次数下砂岩损伤分布图

Fig. 10 Vector images of CT images of sandstone under different times of freezing and thawing

(2)在冻融环境中,砂岩内部天然损伤的演化模式可分为两种:一种是损伤沿天然损伤区域向周围辐射扩展。在这种损伤演化模式下,天然损伤裂隙(孔隙)相互延伸,直至部分裂隙相互贯通,如图10中区域1、2、3、4;另一种是新生微孔隙(裂隙)。在冻胀力作用下,胶结强度较弱的矿物颗粒间的连接不断发生破坏,致使新生微孔隙(裂隙)的产生,

如区域5、6、7。

(3)本文根据砂岩在冻融循环作用下不同区域损伤发展情况,将砂岩划分为“无损伤区”,“渐进损伤区”(区域1、2、3、4),“新生损伤区”(区域5、6、7)。其中“无损伤区”指砂岩不含微孔(裂)隙的区域。“渐进损伤区”指岩石内部的天然损伤(微孔隙、微裂纹)在冻融作用下损伤向外辐射扩展,将这部分

会发生损伤扩展的天然损伤区域称为渐进损伤区。“新生损伤区”指砂岩在冻融循环作用下,岩石内部部分区域颗粒间胶结强度减弱,砂岩无损伤区域出现新生微孔(裂)隙,这部分新生微孔(裂)隙称为新生损伤区。砂岩初始孔隙(裂隙)的生长以及新生孔隙的生成、扩展是冻融岩石损伤演化的主要形式。并且受冻融作用,两种损伤演化模式是一个动态转化的过程。

3.4 荷载作用下冻融砂岩局部化变形破坏分析

采用 CASRock 中的岩石破裂程度 Rock Frac-

ture Degree(RFD)指标^[32]来反映冻融循环作用下受荷损伤破坏程度,RFD 指标的取值范围为 0~2。当 RFD 小于 1 时,岩石元胞处于峰前状态,由蓝色和青色表示;当 RFD 等于 1 时,岩石元胞处于峰值状态,由绿色表示;当 RFD 大于 1 时,岩石元胞处于峰后状态;当 RFD 等于 2 时,岩石元胞处于残余应力状态,由黄色和红色表示,此时岩石元胞完全破坏。

根据数值模拟结果分析得到冻融砂岩不同测点的应力、能量、岩石破裂程度(RFD)随时间变化情况(图 11),为探究荷载作用下含天然损伤冻融砂岩

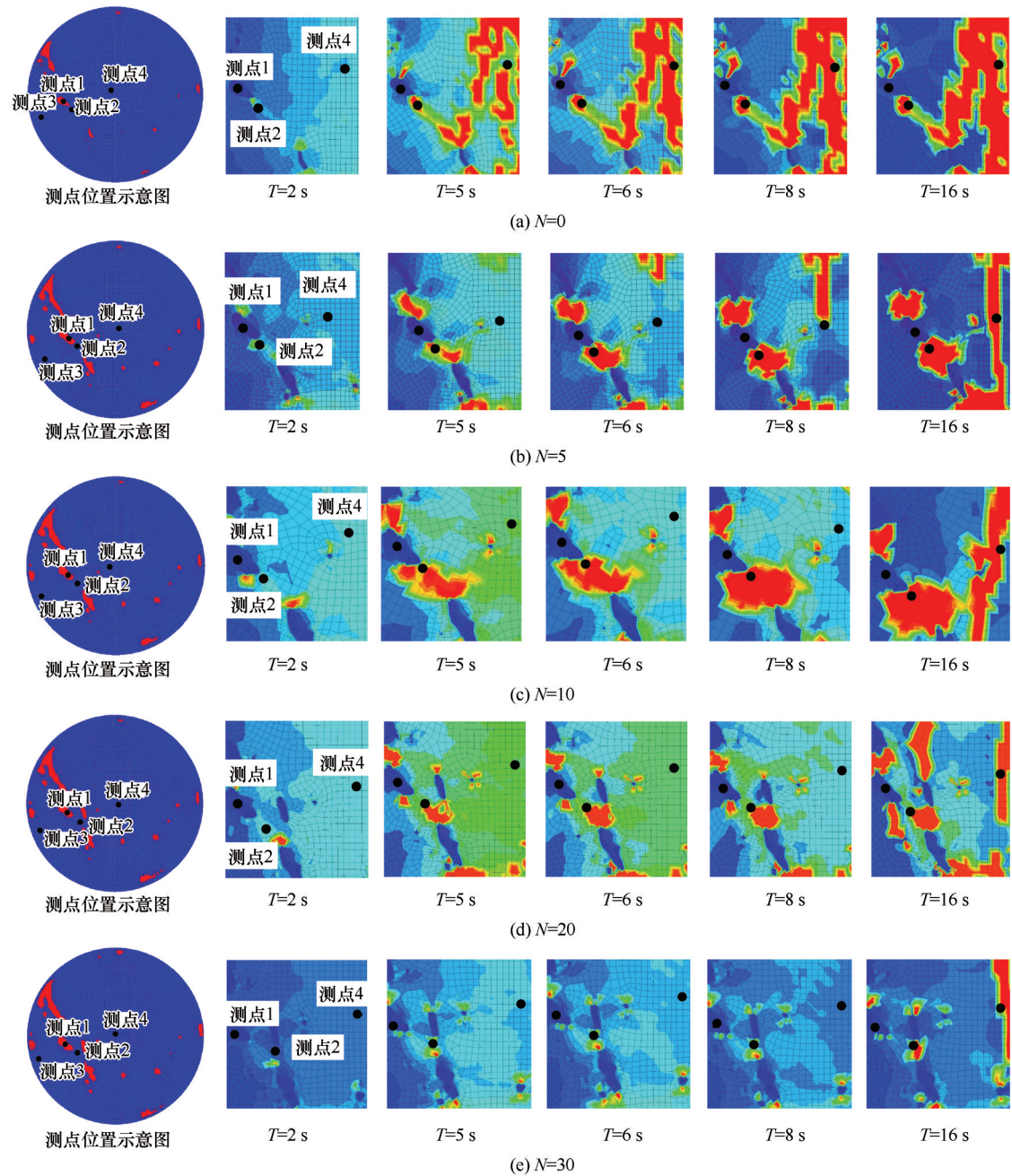


图 11 不同冻融循环次数下砂岩不同测点 RFD 破坏云图

Fig. 11 RFD failure cloud images of sandstone at different measuring points under different freeze-thaw cycles

变形局部化规律,在模型上取4个测点(图11),其中测点1位于渐进损伤区(区域2)内部,测点2位于渐进损伤区(区域2)边缘,测点3位于砂岩边缘,测点4位于砂岩中心线上。

由于测点1位于初始损伤区内,测点3位于砂岩边缘,整个破坏过程中应力、RFD及能量没有明显变化,本文将研究重点放在测点2和测点4上。根据不同冻融循环次数下砂岩测点2的RFD-时间变化曲线(图12)及不同测点RFD-时间变化曲线(图13),结合图8可以看出砂岩RFD的发展与砂岩黏聚力破裂的发展存在对应关系。5次冻融循环时砂岩测点2元胞在6 s时达到破坏,测点4元胞在8 s时达到破坏。由RFD-时间曲线斜率变化情况可知,测点4元胞从初始加载到最后的破坏是一个瞬间的过程,测点2元胞的破坏是一个渐进的过程,说明局部化损伤的产生是一个损伤逐渐累积的过程。随冻融循环次数增加,测点2元胞发生破坏时间滞后,且30次冻融时测点2元胞未达到破坏状态,这是因为冻融促使岩石内部微裂纹和孔隙发育,应力主要用于孔隙(裂纹)间的挤压、摩擦,直接作用于元胞的作用力减小,使整个元胞的破坏滞后。

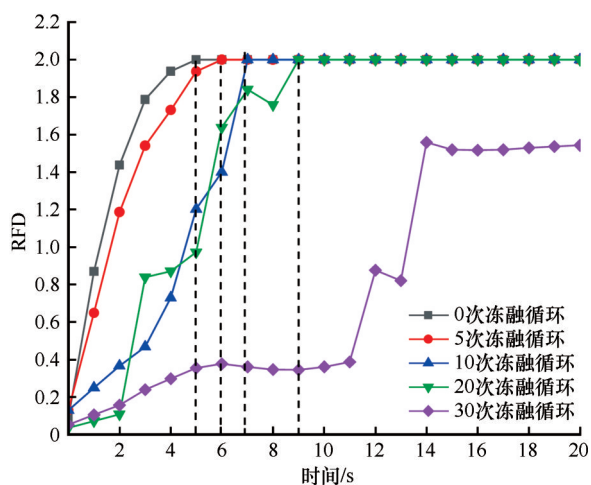


图12 不同冻融循环次数下砂岩RFD-时间曲线

Fig. 12 RFD-time curve of sandstone under different freeze-thaw cycles

由图14可知,在初始加载阶段,砂岩能量呈平稳上升趋势,进入线弹性变形阶段后,砂岩能量呈快速增加趋势,整个变化过程主要为能量累积的过程。峰值前砂岩存储能量,峰值时砂岩能量发生突降。在峰后阶段,砂岩测点2元胞能量整体呈缓慢释放的特点,而测点4元胞能量迅速释放。由图15

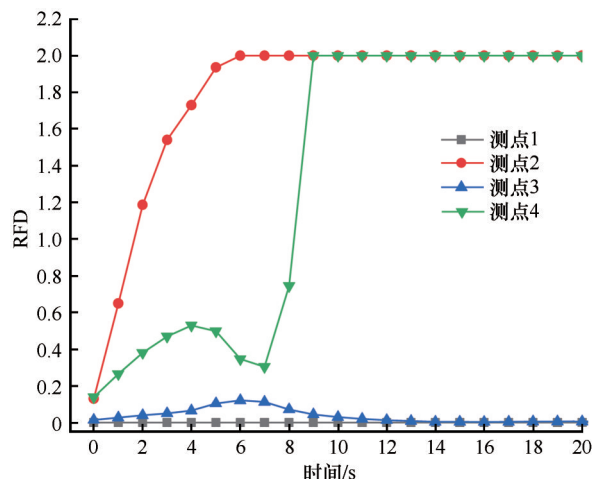


图13 5次冻融砂岩不同测点RFD-时间曲线

Fig. 13 5 RFD-time curves of different measuring points of freeze-thaw sandstone

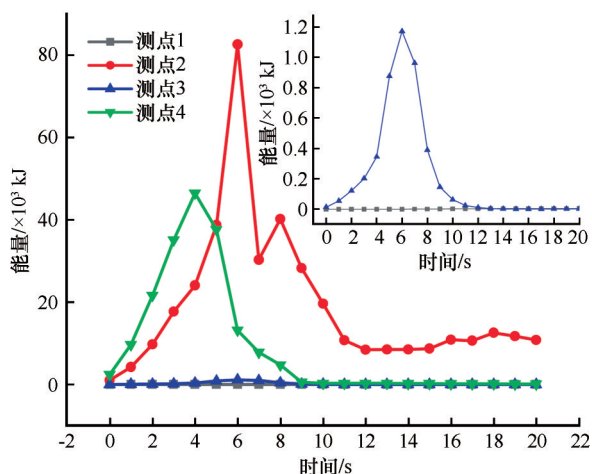


图14 5次冻融砂岩不同测点能量-时间曲线

Fig. 14 Energy-time curve of different measuring points in 5 freeze-thaw sandstones

可知,加载过程中,含天然损伤砂岩内部应力分布不均匀,应力主要集中在初始损伤区附近和试样中心线上。其中,测点2元胞(局部损伤区)应力和测点4元胞(主裂纹区)应力远大于砂岩整体应力。

由测点2元胞应力、RFD和能量曲线可知,在加载过程中,测点2岩石元胞的破坏与该元胞能量释放和纵向应力释放具有同步性($T=6$ s时),此时该元胞应力达到临界值,即局部损伤区的破坏是应力和能量突变的结果。而测点4岩石元胞的破坏与能量释放和纵向应力释放不同步($T=4$ s, $T=8$ s),主裂纹贯通滞后于应力和能量的释放。可见,在加载阶段,由于岩石的非均质性和初始损伤的存在,应力分布不均匀,应力主要集中在初始损伤区附近。当岩石主裂纹区域应力达到临界值时,初始损伤区吸

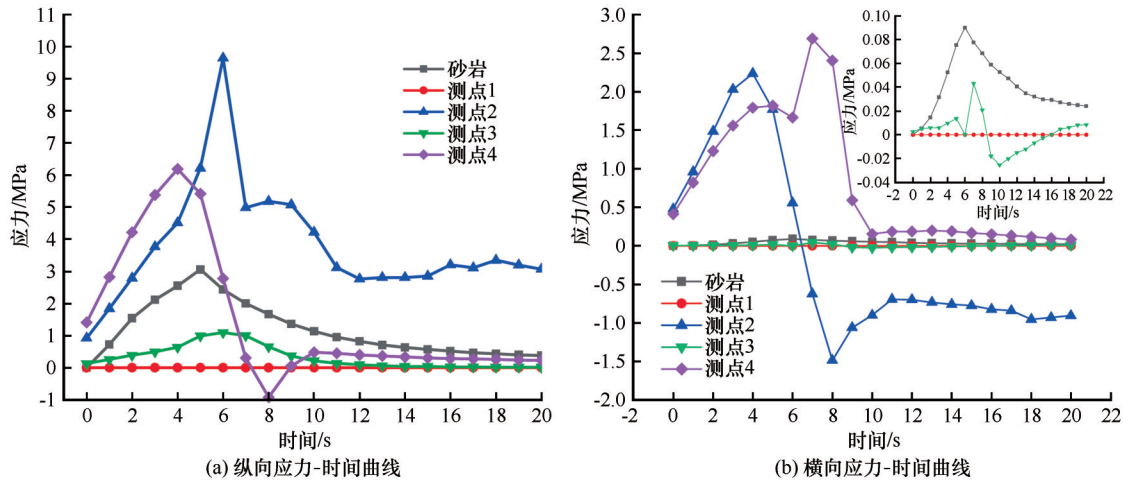


图 15 5次冻融砂岩不同测点应力-时间曲线

Fig. 15 The stress-time curves of different measuring points of five freeze-thaw sandstones

收外界能量突增,造成了主裂纹区域岩石元胞破坏的滞后性。

3.5 含天然损伤砂岩破坏过程声发射能量分析

砂岩变形过程中的声发射累计能量能够反映

岩石的变形破坏过程。数值计算结果中屈服的高斯点数量即为所对应的声发射数。不同冻融循环次数下砂岩的应力—累计能量—声发射能量—时间曲线如图 16 所示。

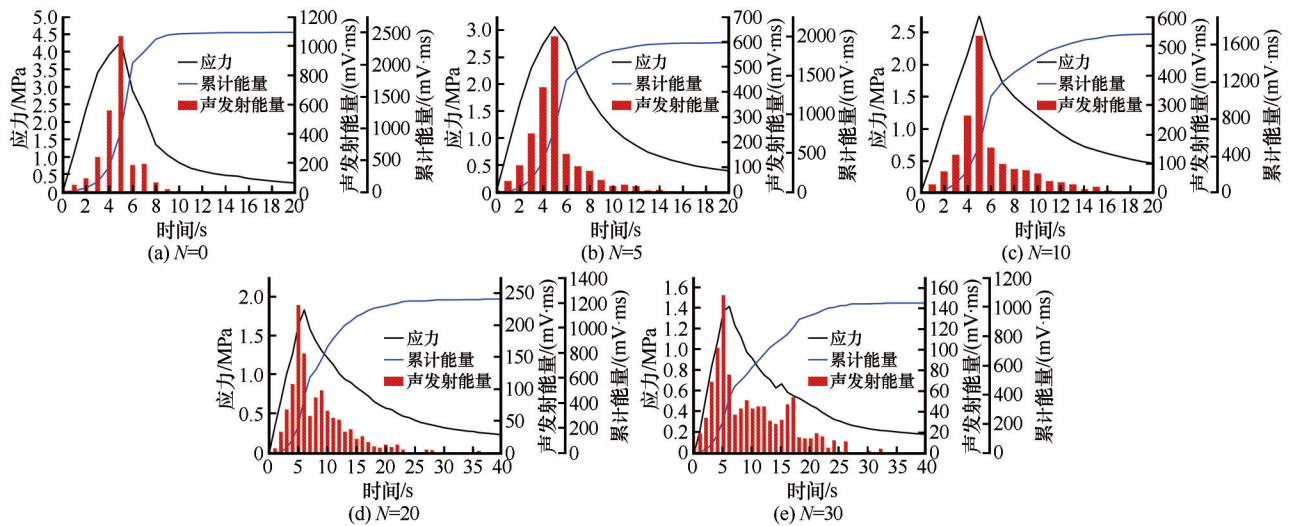


图 16 冻融砂岩应力—累计能量—声发射能量—时间曲线

Fig. 16 Stress-cumulative energy-acoustic emission energy-time curve of freeze-thaw sandstone

由图 16 可以看出,岩石的累计能量与冻融循环次数密切相关,冻融循环次数高的试样累计能量低于冻融循环次数低的试样。在应力作用下,岩石元胞的破坏伴随着声发射能量的产生。低冻融次数时,在岩石发生宏观破坏前,岩石元胞的破坏主要集中在峰值附近。随冻融循环次数的增加,岩石发生宏观破坏前,岩石元胞的破坏几乎伴随整个加载过程。岩石的破坏模式与冻融循环次数密切相关,在宏观上表现为冻融岩石承载能力降低,岩石逐渐

由脆性破坏转化为延性破坏,冻融对岩石整体强度是一个逐渐劣化的过程。

5 结论

本文运用 CT 图像处理技术与 CASRock 软件相结合的方法,对含天然损伤岩石进行巴西劈裂破坏过程模拟,对破坏模式、变形局部化及裂纹演化过程等分析,揭示了含天然损伤砂岩在冻融和荷载作用下的破坏机制。得到以下结论:

(1)冻融和荷载作用下含天然损伤岩石裂纹演化主要与初始损伤程度、损伤分布有关。在天然损伤集中的区域会形成次生裂纹。岩石破坏不是完全的、同步的损伤,而是以局部变形的形式发展。局部损伤作为一个重要的破坏特征,可以反映岩石中裂纹的演化,有助于预测岩石中裂纹发展的方向。

(2)根据砂岩在冻融循环作用下不同区域损伤发展情况,可将岩石可分为无损伤区、渐进损伤区和新生损伤区。在冻融环境下,初始孔隙(裂隙)的生长以及新生孔隙的生成、扩展是岩石损伤演化的主要形式。

(3)含天然损伤砂岩内部应力分布不均匀,局部损伤区和主裂纹区应力远大于砂岩整体应力。在加载过程中,局部损伤区岩石元胞的破坏与该元胞能量释放和纵向应力释放具有同步性,主裂纹区岩石元胞的破坏与能量释放和纵向应力释放非同步,主裂纹贯通滞后于应力和能量的释放。

(4)岩石的累计能量与冻融循环次数密切相关,冻融循环次数高的试样累计能量低于冻融循环次数低的试样。随冻融循环次数的增加,岩石发生宏观破坏前,岩石元胞的破坏几乎伴随整个加载过程。冻融循环促使含天然损伤砂岩逐渐由脆性破坏转化为延性破坏,冻融作用对岩石整体强度的改变是逐渐劣化的过程。

参考文献(References):

- [1] Yang Gengshe, Liu Hui. Micro structure and damage mechanical properties of frozen rock based on CT image processing [M]. Beijing: Science Press, 2016. [杨更社, 刘慧. 基于CT图像处理的冻结岩石细观结构及损伤力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [2] Zhang Bo, Yang Xueying, Li Shucai, et al. Uniaxial tensile failure characteristics of rock materials with two groups of superimposed X-shaped fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1987-1993. [张波, 杨学英, 李术才, 等. 含两组叠置X型裂隙类岩石材料单轴拉伸破坏特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1987-1993.]
- [3] Li Lielie, Guan Junfeng, Liu Zhiyong. A random discrete element method for modeling rock heterogeneity[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 8(1): 1-13.
- [4] Bedford J D, Faulkner D R, Lapusta N. Fault rock heterogeneity can produce fault weakness and reduce fault stability[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 326-326.
- [5] Yu Enyi, Jin Aibing, Sun Hao, et al. Evolution characteristics and attenuation model of compressive strength and porosity of limestone under cryogenic freezing-thawing cycles[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 55-60. [于恩毅, 金爱兵, 孙浩, 等. 超低温冻融循环下灰岩抗压强度与孔隙率的演化特征及衰减模型[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 55-60.]
- [6] Tang Shibin, Luo Jiang, Tang Chunan. Theoretical and numerical simulation of rock fracture induced by low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1596-1607. [唐世斌, 罗江, 唐春安. 低温诱发岩石破裂的理论及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1596-1607.]
- [7] Rong Huren, Gu Jingyu, Rong Miren, et al. Strength and microscopic damage mechanism of yellow sandstone with holes under freezing and thawing[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-13.
- [8] Meng Fangdong, Zhai Yue, Li Yubai, et al. Experimental study on dynamic tensile properties and energy evolution of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2445-2453. [孟凡东, 翟越, 李宇白, 等. 冻融循环作用下砂岩的动态抗拉性能及能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2445-2453.]
- [9] Liu Jie, Zhang Han, Wang Ruihong, et al. Research on progressive damage degradation of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1381-1394. [刘杰, 张瀚, 王瑞红, 等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394.]
- [10] Li Jieliang, Zhu Longyi, Zhou Keping, et al. Damage characteristics of sandstone pore structure under freezing and thawing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3524-3532. [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.]
- [11] Wang Yongyan, Liu Xueqing, Su Chuanqi, et al. Experimental study on the effects of freeze-thaw cycles on similar materials with different porosity[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 102-109. [王永岩, 柳雪庆, 苏传奇, 等. 冻融循环对不同孔隙率页岩相似材料影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 102-109.]
- [12] Lu Yani, Li Xinping, Han Yanhua. Mechanical characteristics of an isotropic sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 889-898. [路亚妮, 李新平, 韩燕华. 各向异性砂岩冻融力学特性研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 889-898.]
- [13] Wang Lehua, Jiang Zhaorong, Li Jianlin, et al. The bedding sandstone unloading mechanical properties experimental study in the freeze-thaw cycle conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1052-1058. [王乐华, 姜照容, 李建林, 等. 冻融循环条件下层理砂岩卸荷力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1052-1058.]
- [14] Wen Lei, Li Xibing, Yin Yanbo, et al. Study of physico-mechanical properties of granite porphyry and limestone in slopes of open-pit metal mine under freezing-thawing cycles and their application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 632-639. [闻磊, 李夕兵, 尹彦波, 等. 冻融循环作用下花岗岩斑岩和灰岩物理力学性质对比分析及应用研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 632-639.]
- [15] Song Yanqi, Ma Hongfa, Liu Jichen, et al. Experimental investigation on the damage characteristics of freeze-thaw limestone by the uniaxial compression and acoustic emission monitoring tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Suppl 1): 2603-2614. [宋彦琦, 马宏发, 刘济琛, 等. 冻融灰岩单轴声发射损伤特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 2603-2614.]
- [16] Jia Yufei, Wang Haocheng, Xia Dong, et al. Study on macro-

- scopic dynamic properties of rock with impact damage on argillaceous siltstone under freeze-thaw[J]. *Metal Mine*, 2022(2): 36-41. [贾清斐, 王浩程, 夏冬, 等. 泥质粉砂岩冻融作用下含初始损伤岩石动力学特性试验研究[J]. *金属矿山*, 2022(2): 36-41.]
- [17] Yahaghi J, Liu H, Chan A, et al. Experimental and numerical studies on failure behaviours of sandstones subject to freeze-thaw cycles[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 31: 100655.
- [18] Mahabadi O K, Randall N X, Zong Z, et al. A novel approach for micro-scale characterization and modeling of geomaterials incorporating actual material heterogeneity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(1): L01303.
- [19] Mahabadi O K, Tatone B S A, Grasselli G. Influence of micro scale heterogeneity and micro structure on the tensile behavior of crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(7): 5324-5341.
- [20] Li Dejian, Qi Hao, Li Chunxiao, et al. Brazilian disc splitting tests and numerical simulations on coal samples containing bedding planes[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(2): 150-159. [李德建, 祁浩, 李春晓, 等. 含层理面煤试样的巴西圆盘劈裂实验及数值模拟研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(2): 150-159.]
- [21] Hu Xunjian, Zhu Qizhi, Chen Liang, et al. Modeling damage evolution in heterogeneous granite using digital imagebased Grain-Based Model[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020: 4925-4945.
- [22] Chen Bin, Xiang Jiansheng, John-Paul Latham, et al. Grain-scale failure mechanism of porous sandstone: an experimental and numerical FDEM study of the Brazilian tensile strength test using CT-scan microstructure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020: 104348.
- [23] Dong Fangfang, Zhu Tantan, Qu Zijian, Particle flow-based investigation on the tensile behaviours of rock after freeze-thaw treatment[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2021, 38(3): 22-29. [董方方, 朱谭谭, 屈子健. 基于颗粒流的富水岩石冻融后拉伸力学行为研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(3): 22-29.]
- [24] Li Mingtian. Study of lattice cellular automaton of numerical simulation of rock failure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2004. [李明田. 岩石破裂过程数值模拟的格构细胞自动机方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.]
- [25] Li Mingtian, Feng Xiating, Zhou Hui. Evolving cellular automata for simulating rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1656-1660. [李明田, 冯夏庭, 周辉. 模拟岩石破坏过程的物理细胞演化力学模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1656-1660.]
- [26] Wang Shimin, Feng Xiating, Wang Yongjia, et al. An evolutionary cellular automaton (ECA) study of brittle rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2634-2639. [王士民, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 脆性岩石破坏的演化细胞自动机(ECA)研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2634-2639.]
- [27] Pan Pengzhi, Feng Xiating, Zhou Hui. Three-dimensional cellular automaton simulation of brittle rock fracture evolution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1471-1476. [潘鹏志, 冯夏庭, 周辉. 脆性岩石破裂演化过程的三维细胞自动机模拟[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1471-1476.]
- [28] Pan Pengzhi, Feng Xiating, Zhou Hui. Development and applications of the elasto-plastic cellular automaton[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(2): 126-143.
- [29] Pan Pengzhi, Yan Fei, Feng Xiating, et al. Modeling of an excavation-induced rock fracturing process from continuity to discontinuity[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2019, 106: 286-299.
- [30] Mei Li, Mei Wanquan, Pan Pengzhi, et al. Modeling transient excavation-induced dynamic responses in rock mass using an elasto-plastic cellular automaton[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2020: 103183.
- [31] Pan Pengzhi, Mei Wanquan. Dynamic response analysis method, software and applications in engineering rockmass based on CASRock[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2021, 3(3): 1-10. [潘鹏志, 梅万全. 基于CASRock的工程岩体动力响应分析方法、软件与应用[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2021, 3(3): 1-10.]
- [32] Feng Xiating, Pan Pengzhi, Wang Zhaofeng, et al. Development of cellular automata software for engineering rockmass fracturing processes[C]//International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Torino, Italy: Springer International Publishing, 2021.
- [33] China Electricity Council. GB/T 50266—2013 Standard for tests methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. [中国电力企业联合会. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.]
- [34] Shen Yanjun, Yang Gengshe, Rong Tenglong et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1775-1782. [申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1775-1782.]
- [35] Wang Xu, Tang Danming, Xia Lina, et al. Contrastive study of chinese and american standards of rock freeze-thaw test[J]. *Sichuan Water Power*, 2016, 38(3): 111-113. [王旭, 汤大明, 夏姗姗. 岩石冻融试验的中美标准对比研究[J]. *四川水力发电*, 2019, 38(3): 111-113.]
- [36] Zhang Erfeng, Yang Gengshe, Liu Hui. Experimental study on the meso-damage evolution law of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(10): 50-55. [张二锋, 杨更社, 刘慧. 冻融循环作用下砂岩细观损伤演化规律试验研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(10): 50-55.]
- [37] Tan Wenhui, Ba Jing, Guo Mengqiu, et al. Brittleness characteristics of tight oil siltstones[J]. *Applied Geophysics*, 2018, 15(2): 175-187.
- [38] Liu Hui, Yang Gengshe, Ye Wanjun, et al. Analysis of water ice content and damage characteristics of frozen rock based on CT image three-value segmentation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(6): 1130-1137. [刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于CT图像三值分割的冻结岩石冰含量及损伤特性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(6): 1130-1137.]
- [39] Pan Pengzhi. Research on rock fracturing process and coupled hydro-mechanical effect using an elasto-plastic cellular automaton[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006. [潘鹏志. 岩石破裂过程及其渗流-应力耦合特性研究的弹塑性细胞自动机模型[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.]
- [40] Shen Xinpu, Cen Zhangzhi, Xu Bingye. The characteristics of elasto-brittle-plastic softening constitutive theory and its numeri-

cal calculation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1995, 35(2): 22-27. [沈新普, 岑章志, 徐

秉业. 弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1995, 35(2): 22-27.]

Numerical experimental study on failure process of sandstone containing natural damage under freeze-thaw cycle

LIU Hui¹, XU Yali¹, YANG Gengshe¹, PAN Pengzhi²,
JIN Long³, TANG Liyun¹, HUANG Huiqi¹

(1. College of Architecture and Civil Engineerin, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co. LTD, Xi'an 710075, China)

Abstract: Natural damage such as fissures and pores make the rock microstructure show strong heterogeneity, which influences the failure process and mode. In this paper, the numerical test of freeze-thaw sandstone splitting failure with natural damage was carried out based on CT non-destructive identification technology, combined with digital image processing technology and CASRock numerical simulation software. The analysis of splitting failure mode, deformation localization and crack evolution process of freeze-thaw sandstone with natural damage reveals the failure mechanism of sandstone with natural damage under freeze-thaw and load. The results show that the expansion of primary pores (cracks) and the formation of new pores in sandstone are the main forms of freeze-thaw rock failure evolution. The failure of rock containing natural damage under freeze-thaw and load is related to the degree and distribution of natural damage. The generation of secondary cracks mostly occurs in natural damage-intensive areas. During the loading process, the stress in the localized damage zone is far greater than sandstone's overall stress, and rock's failure in the localized damage zone is synchronized with the energy release and stress release in the region. Localized damage reflects the evolution of cracks in rocks and helps to predict the direction of sandstone crack development. The failure mode of rock is related to the number of freeze-thaw cycles. The freeze-thaw cycles make the sandstone with natural damage gradually change from brittle failure to ductile failure, and the change of the overall strength of the rock is a gradual deterioration process.

Key words: freeze-thaw rock; CASRock; CT scan; image processing; destruction process; localized damage

(责任编辑: 李双洋)