

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0352

水汽循环作用下红层泥岩的损伤劣化特性研究

于天佑^{1,2}, 蒋关鲁^{1,2,3}, 饶千竺^{1,2}, 朱 丹^{1,2}, 陈虹羽^{1,2}, 刘先峰^{1,2,3}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点工程实验室, 四川 成都 610031;
3. 新疆工程学院 土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘 要: 为研究水汽循环作用下红层泥岩的强度、变形及损伤的演化规律, 对红层泥岩开展了水汽循环试验。通过单轴压缩试验、巴西劈裂试验以及声发射与三维数字图像相关 (three-dimensional digital image correlation, 简称 DIC-3D) 技术, 研究了不同水汽循环次数下红层泥岩强度、变形及损伤特性的演化规律。研究结果表明: 随着水汽循环次数的增加, 泥岩含水率和体积将产生不可逆累积, 泥岩的水汽平衡时间延长; 水汽循环作用将导致泥岩抗压强度、抗拉强度、弹性模量和剪切模量的衰减, 由此提出了红层泥岩的指数型劣化模型; 在经历不同水汽循环次数后的单轴加载过程中, 泥岩的破裂形态随循环次数的增加由整体剪切破坏逐步发展为局部弥散裂纹发展破坏的模式, 演化规律的特征表现为裂隙闭合点推迟、起裂应力和损伤应力点提前、岩石的压密过程延长、线弹性变形阶段缩短以及岩石抵抗变形的能力降低。

关 键 词: 红层泥岩; 水汽循环试验; DIC-3D 技术; 声发射技术

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 02-479-13

Damage and deterioration characteristics of red mudstone under water vapor cycles

YU Tian-you^{1,2}, JIANG Guan-lu^{1,2,3}, RAO Qian-zhu^{1,2}, ZHU Dan^{1,2}, CHEN Hong-yu^{1,2}, LIU Xian-feng^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Civil Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China)

Abstract: A series of water vapor cycle experiments was conducted to examine the evolution of strength, deformation, and damage characteristics of red mudstone. The experiments included uniaxial compression tests and Brazilian splitting tests, utilizing acoustic emission (AE) and three-dimensional digital image correlation (DIC-3D) technology. The study concentrated on the evolutions in strength, deformation, and damage characteristics of red mudstone following different water vapor cycles. Results indicated that as water vapor cycles increased, the water content and volume of the mudstone showed irreversible accumulation, and the time required to reach water vapor equilibrium extended. Water vapor cycles caused reductions in compressive strength, tensile strength, elastic modulus, and shear modulus of the mudstone, leading to the proposal of an exponential degradation model for red mudstone. During uniaxial loading after different water vapor cycles, the failure mode of mudstone transitioned from overall shear failure to localized development of dispersed cracks. The evolution characteristics included delayed closure points of fractures, earlier onset of initial and damage stresses, extended compaction processes, shortened linear elastic deformation stages, and reduced ability of the rock to resist deformation.

Keywords: red mudstone; water vapor cycle experiments; DIC-3D technology; acoustic emission technology

1 引 言

近年来, 随着中国高速铁路网的快速发展和不

断完善, 穿越西南地区红层泥岩分布区已成为高速铁路建设不可避免的趋势。红层泥岩作为一种土木工程领域常见的工程材料, 主要分布在中国的西南

收稿日期: 2024-03-24

录用日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52378463, No. 52478475, No. 52478472); 国家重点基础研究发展项目 (No. 2022YFE0104600); 四川省国际科技创新合作项目 (No. 2021YFH0024)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52378463, 52478475, 52478472), the National Program on Key Basic Research Project of China (2022YFE0104600) and the Sichuan International Science and Technology Innovation Cooperation Project (2021YFH0024).

第一作者简介: 于天佑, 男, 1995 年生, 博士研究生, 主要从事红层泥岩 (土) 等特殊土方面的研究工作。E-mail: tyu@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 蒋关鲁, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土力学、地基与基础工程方面的研究工作。E-mail: wgljiang@swjtu.edu.cn

地区,经常作为高速铁路埡地基和隧道围岩及地基基础使用^[1-3]。红层泥岩工程性质较差,水敏感性较强,在环境湿度交替变化的影响下,极易产生强度劣化与不可逆变形^[4-5],例如成渝线无砟轨道路埡地基部分工点出现了超过 20 mm 的上拱变形,且仍呈现缓慢且持续上拱趋势,导致轨道结构的损伤与破坏,影响了列车的安全运营。

针对泥岩在湿度循环条件下的损伤劣化特性,既有研究主要开展了干湿循环^[6-8]和水汽循环^[9]两方面的工作。干湿循环试验研究较多,通过对泥岩反复浸水-干燥模拟自然降雨与干燥的交替作用。但此影响较为剧烈,岩体快速崩解与破碎。在实际工程中,除干湿循环影响外,泥岩还会受水汽湿度循环的影响,循环方式更加温和且常见,岩样损伤劣化更加缓慢且持续。

既有研究表明:泥岩在相对湿度循环下的劣化宏观层面表现为不可逆变形的累积发展^[10],在微观层面体现为微裂隙的扩展、连接与贯通^[11-14]。而在力学性质方面表现为强度、刚度及模量等力学参数的衰减^[15]。目前大量国内外学者针对水汽循环作用下红层泥岩的损伤劣化机制开展了深入研究。Pham 等^[10]设计了可精确控制湿度的水汽循环装置,研究了 32%~98%相对湿度范围内泥岩在增-减湿过程中相对湿度、吸力、质量、体积、弹性波波速、强度参数和弹性参数之间的变化关系。Pineda 等^[5]通过水汽循环试验和直剪试验,得到了相对湿度循环对泥岩抗剪强度参数退化的影响规律。Duan 等^[16]研究了泥岩在水汽循环过程中渗透性的演化规律,发现湿度循环所产生的微裂纹会导致岩样气体渗透性增加。Hall^[17]的研究表明,水汽循环过程中泥岩的不可逆损伤主要以湿度滞回圈的形式逐渐发展,并趋于稳定。

上述研究多集中于干湿循环或水汽循环作用下泥岩的强度、变形和损伤演化规律,水汽循环损伤劣化对后续加载中强度、损伤及变形特性的研究鲜有报道。本文对红层泥岩开展水汽循环试验,通过单轴压缩试验、巴西劈裂试验以及声发射与三维数字图像相关(three-dimensional digital image correlation,简称 DIC-3D)技术,研究不同水汽循环次数下红层泥岩强度、变形及损伤特性的演化规律,提出水汽循环作用下红层泥岩的指数型劣化模型。

2 岩样及试验设备

本研究采用的红层泥岩试样取自四川省成渝线成达万铁路某工点挖方路埡工点旁,取样深度为

13~17 m,属微风化或中等风化泥岩,如图 1 所示。路埡泥岩工程性质较差,从上而下风化程度逐渐降低,在环境湿度循环作用下,路埡地基极易发生强度劣化、上拱变形等病害,对线路的运营产生安全隐患。泥岩矿物成分中以石英矿物居多,黏土矿物占全部矿物含量的 10%。泥岩颜色为棕红~紫红色泥状结构,构造为隐晶质、微-泥晶质结构,其矿物成分主要为黏土质矿物,遇水易软化崩解性,岩粉自由膨胀率约为 21%,岩样的基本物理参数如表 1 所示。为减小岩石材料不均匀性的影响,本文研究选取表面无明显损伤的岩石进行弯曲元剪切波波速测试,筛选出剪切波速在(700±50) m/s 的岩样用于后续试验研究。

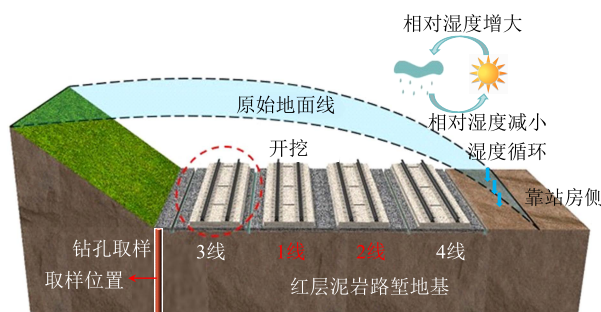


图 1 泥岩取样图

Fig.1 Mudstone sampling diagram

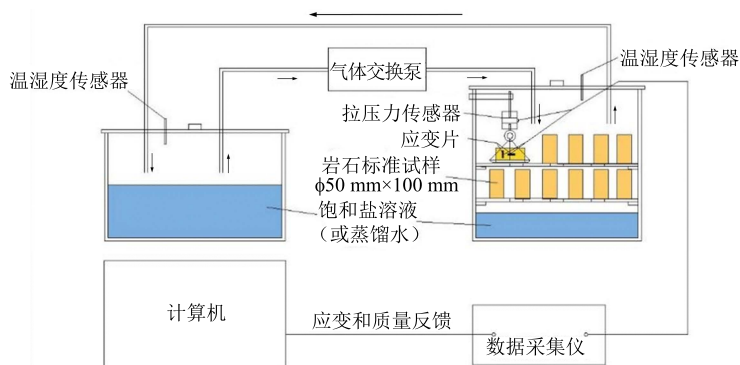
表 1 岩样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of rock samples

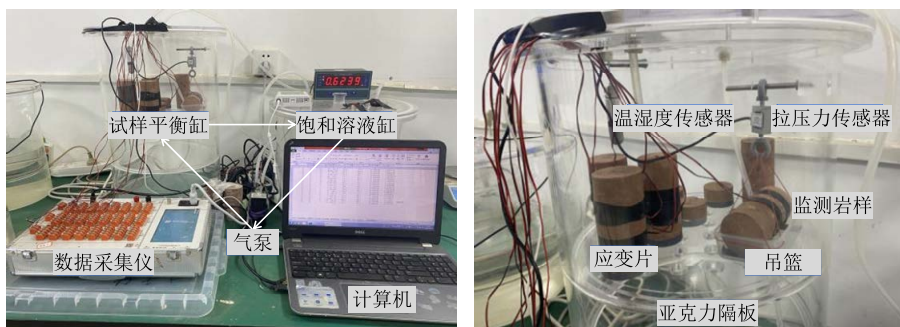
岩样 类型	天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率 /%	颗粒相对 密度	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙率 /%
红层 泥岩	2.28~2.30	6.41~6.65	2.70~2.73	2.13~2.14	19.81~21.04

2.1 水汽循环试验系统

岩样湿度的控制主要通过密闭的水汽循环控制系统实现,该系统可精确控制平衡缸内的湿度。试验装置如图 2 所示,主要由试样平衡缸、饱和盐溶液缸、气体交换泵和数据采集系统所组成。根据开尔文定律^[18],当系统达到湿度平衡时,认为岩样孔隙内部的湿度与溶液上方的湿度相等。本研究所选用的盐溶液为饱和乙酸甲盐溶液,在 25 °C 温度条件下可提供约 30% 的相对湿度,而蒸馏水可以在 25 °C 条件下达到 100% 的相对湿度,通过气体交换泵实现两个缸之间的强制气体对流循环,从而实现相对湿度 RH=30%~100% 水汽循环的控制。参考文献[5],水汽循环关键参数的获取方法和湿度平衡标准如表 2 所示。



(a) 水汽循环设备原理示意图



(b) 水汽循环装置具体布置图

图 2 水汽循环装置

Fig.2 Water vapor cycle device

表 2 水汽循环关键参数的获取方法和水汽平衡判定标准^[5]Table 2 Methods for obtaining key parameters of water vapor cycle and criteria for determining water vapor cycle equilibrium^[5]

测量参数	测量手段	平衡标准
质量	通过拉压力传感器测量	3 d 内相对稳定
湿度	通过温湿度传感器测量	环境湿度达到并保持目标 相对湿度 10 d
体积	通过 120-20AA 型应变片测量	3 d 内相对稳定
模量	通过弯曲元装置测量	—

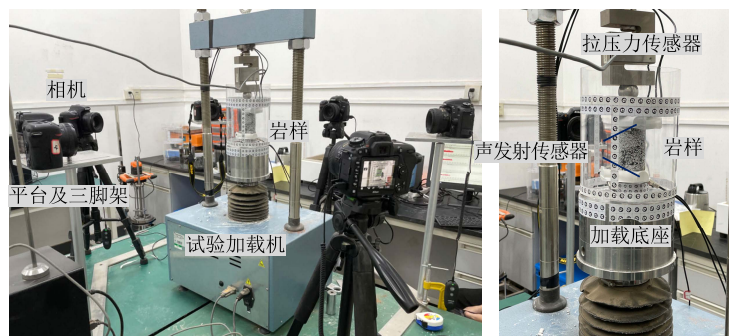
2.2 基于声发射与 DIC-3D 技术的加载系统

DIC-3D 技术可以实现试样在加载过程中的非接触式变形测量, 确定试样在不同加载阶段的变形和表面裂纹扩展情况^[19]; 而声发射 (acoustic emission, 简称 AE) 技术可以通过岩样在加载破碎断裂过程中释放的能量特征来反映试样内部的损伤劣化和微裂纹扩展特征^[20]。因此, 本文基于声发射与 DIC-3D 技术的加载系统来研究不同水汽循环次数下的岩样在单轴加载过程中的强度及损伤变形特性, 系统的布置细节如图 3(a)所示。对不同水汽循环次数下的岩样表面喷洒散斑, 并在试样底部与顶部分别布置 4 个声发射传感器, 基于美国物理声学公司 (Physical Acoustics Corporation, 简称 PAC) 声发射采集系统来采集整个加载过程中岩样内部的破裂信号。声发

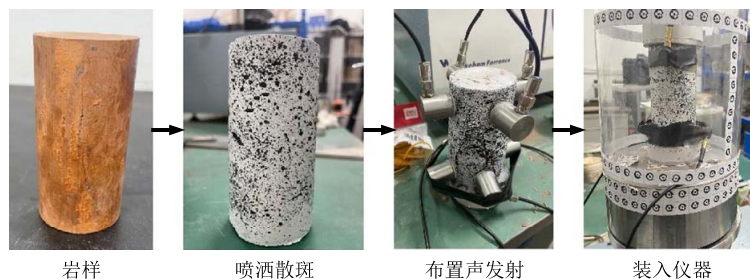
射传感器的布置如图 3(b)所示, 8 个声发射传感器交错布置可以更好地对岩样加载过程中的破碎事件进行精确定位。另外在岩样周围每隔 60° 等间距各布置一台高速照相机, 通过 DIC-3D 双目立体成像技术^[21], 使用李林等^[19]研发的单轴/三轴试验变形测量与后处理软件 GeoTri3D, 对相邻两相机所拍到岩样表面的散斑进行局部分析, 经过网格划分、应变、位移场计算后, 再对其多个面进行三维拼接, 即可 360° 全方位重现物体表面的真实变形特征。

3 试验方案

基于水汽循环试验系统, 分别对直径为 50 mm、高度为 100 mm 的单轴岩样以及直径为 50 mm、厚度为 20 mm 的巴西劈裂岩样开展水汽循环试验。既有研究表明, 大多数工点的旱-雨季湿度幅值 ΔRH 为 50%~70%^[22-24], 因此, 本文以 $\Delta RH = 70\%$ 作为水汽循环的湿度幅值 (最高湿度 $RH_{\max} = 100\%$, 最低湿度 $RH_{\min} = 30\%$), 水汽循环次数不少于 4 次, 每次水汽循环历时 40~45 d, 循环过程中实时监测岩样的质量、湿度、应变等关键参数。同时在每次循环结束时, 用弯曲元波速测试系统来测试岩样的弹性波与剪切波波速, 进而计算岩样的弹性模量和剪切模量^[25], 其计算方法见式 (1)~(5):



(a) 基于声发射与 DIC-3D 技术的加载系统具体布置图



(b) 岩样加载前的预处理与声发射传感器的布置

图 3 基于声发射与 DIC-3D 技术的加载系统

Fig.3 Loading system based on acoustic emission and DIC-3D technology

$$v_s = \frac{h}{t_s} \quad (1)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

$$v_p = \frac{h}{t_p} \quad (3)$$

$$E = \rho v_p^2 \quad (4)$$

$$v = \frac{0.5v_p^2 - v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \quad (5)$$

式中: h 、 ρ 分别为岩样的密度和高度, $h = 100 \text{ mm}$; t_p 、 t_s 分别为弹性波和剪切波在岩样中的传递时间; v_p 、 v_s 分别为岩样的剪切波波速和弹性波波速; E 和 G 分别为岩样的弹性模量和剪切模量; v 为岩样的泊松比。

分别取出经历 0~4 次水汽循环的岩样开展单轴压缩试验与巴西劈裂试验, 采用位移控制方式加载, 加载速度为 0.1 mm/mm 。具体试验方案和试验步骤如表 3 和图 4 所示。图中, 点 A 代表岩样的初始状态, $B_0 \sim B_4$ 和 $C_0 \sim C_4$ 分别为每次水汽循环岩样达到最低相对湿度 ($\text{RH}_{\min}=30\%$) 和最高湿度 ($\text{RH}_{\max}=100\%$) 时的状态。在每次循环的最低湿度 $\text{RH}_{\min}$ 时开展单轴压缩试验与巴西劈裂试验。为保证试验结果的可靠性, 表 3 中不同水汽循环次数时均设置了 3 个平行岩样, 试验结果取 3 个岩样结果的平均值,

如水汽循环 4 次单轴压缩试样 U-4 的试验结果为 U-4-1、U-4-2、U-4-3 这 3 个平行试样结果的平均值。

表 3 水汽循环总体试验方案

Table 3 Plan for water vapor cycle experiments

试验类型	试样编号	循环次数 N / 次	试样尺寸 / mm×mm	监测指标
单轴 抗压 试验	U-0	0	$\phi 50 \times 100$	质量、湿度、 体积应变和 单轴压缩强度
	U-1	1	$\phi 50 \times 100$	
	U-2	2	$\phi 50 \times 100$	
	U-3	3	$\phi 50 \times 100$	
	U-4	4	$\phi 50 \times 100$	
巴西 劈裂 试验	B-0	0	$\phi 50 \times 20$	抗拉强度
	B-1	1	$\phi 50 \times 20$	
	B-2	2	$\phi 50 \times 20$	
	B-3	3	$\phi 50 \times 20$	
	B-4	4	$\phi 50 \times 20$	

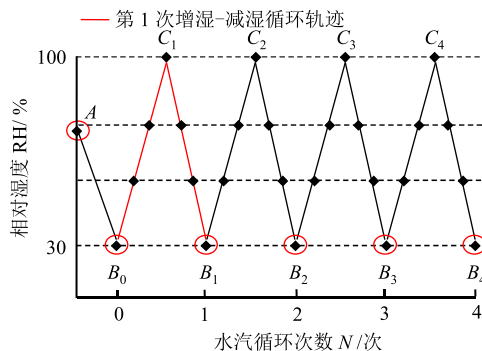


图 4 水汽循环试验步骤

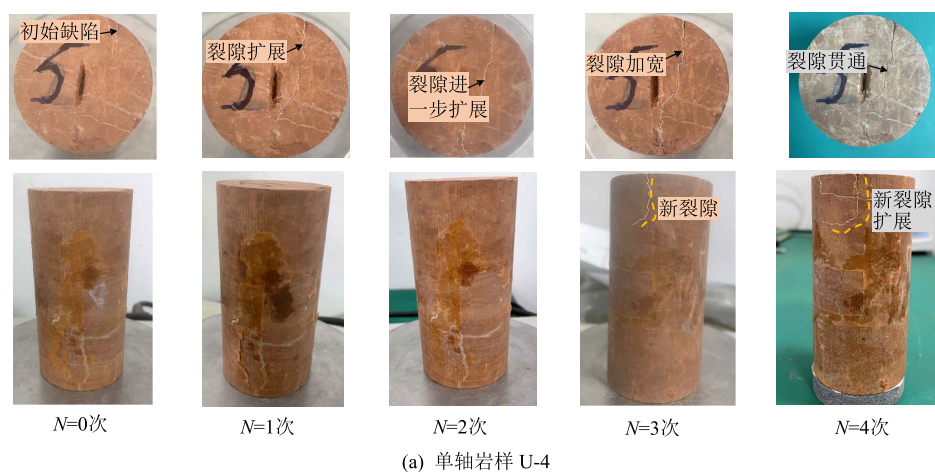
Fig.4 Steps for water vapor cycle experiments

4 试验结果与分析

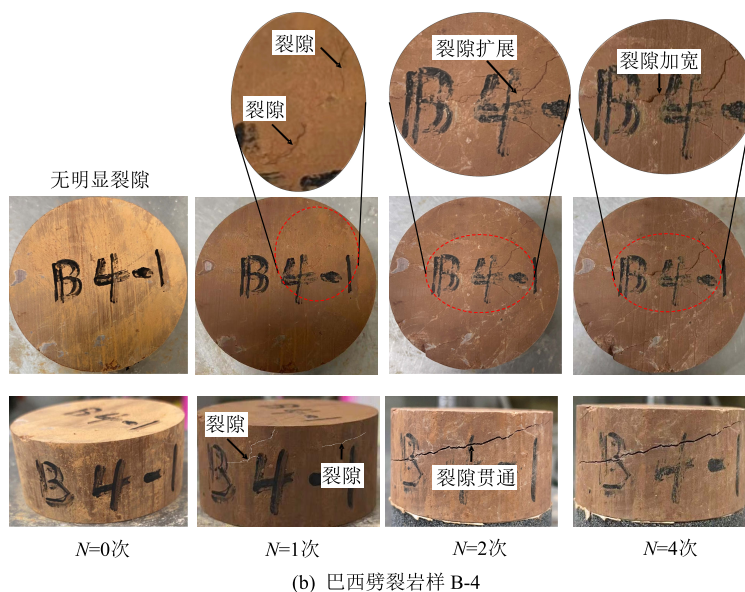
4.1 水汽循环作用下泥岩的变形及强度劣化规律

水汽循环作用下泥岩宏观形貌变化如图 5 所示。经历 1 次水汽循环后, 裂隙沿初始缺陷逐渐发育。经历两次水汽循环后, 岩样裂隙长度与宽度均进一步发展扩张, 试样顶面有一定剥落, 岩样表面完整性降低。随着水汽循环的进行, 在经历 3、

4 次水汽循环后岩样侧面产生新裂隙, 且既有损伤裂隙最终形成贯通性裂隙。综上所述, 泥岩裂纹在水汽循环作用下表现为裂隙数量、长度及宽度的增加, 新旧裂隙的勾连与贯通。既有研究表明, 裂纹的扩张主要是岩石在增湿和减湿过程中轴向、径向应变的各向异性导致^[5], 且产生的裂隙及微裂纹多位于膨胀性黏土矿物与非膨胀性黏土矿物的交界处^[26]。



(a) 单轴岩样 U-4



(b) 巴西劈裂岩样 B-4

图 5 水汽循环试验泥岩形貌变化图

Fig.5 Morphology changes in water vapor cycle experiments

图 6 展示了环境湿度 RH 和岩样含水率随水汽循环次数的时程曲线。一方面, 含水率的变化滞后于环境湿度的变化。这是由于岩体达到湿度平衡所需时间不仅取决于外界湿度的变化, 还取决于岩样自身的结构以及岩体内水分的迁移速度。另一方面, 还可以发现随着水汽循环次数的增加, 泥岩每

次循环平衡时间延长, 质量发生累积增减。既有研究表明, 水汽循环会促进岩石结构的劣化与表面微裂隙的发展, 水分需要进一步深入岩体内部与岩样内亲水性黏土矿物结合才能达到湿度平衡, 从而导致岩样平衡时间逐步增长^[5]。另外, 吸附特性变化^[27]、增湿路径变化、化学反应等因素均可能导致泥岩的

湿度平衡时间延长^[28]。

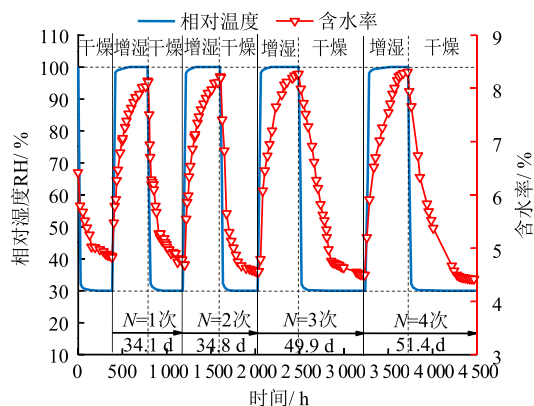
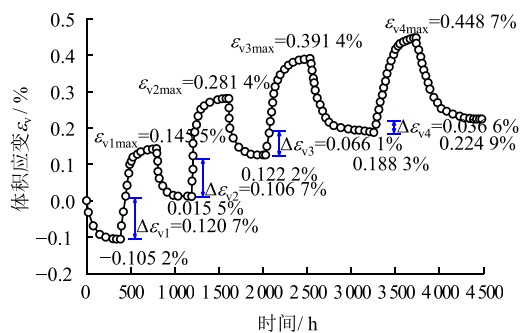
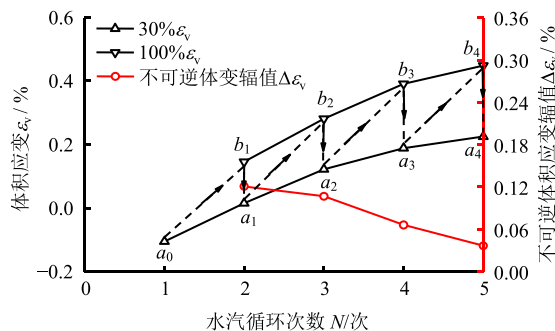


图6 泥岩含水率与湿度随水汽循环次数的变化曲线
Fig.6 Curves of mudstone water content and humidity with water vapor cycles

水汽循环作用下泥岩体积应变 ε_v 与不可逆体积应变幅值 $\Delta\varepsilon_v$ 规律如图7所示。由图可知, a_0b_1 增湿路径泥岩体积膨胀, 产生 0.250 7% 的体积应变; b_1a_1 减湿路径泥岩体积收缩, 产生 -0.130 0% 的体积应变, $a_0b_1a_1$ 第 1 次增-减湿路径, 泥岩共产生 0.120 7% 的不可逆体积应变。同理, 第 2、3、4 次



(a) 体积应变随时间变化曲线

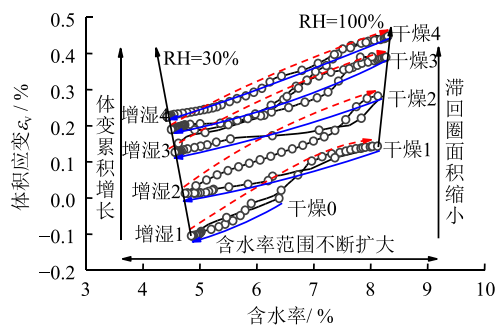


(b) ε_v 和 $\Delta\varepsilon_v$ 随 N 的变化曲线

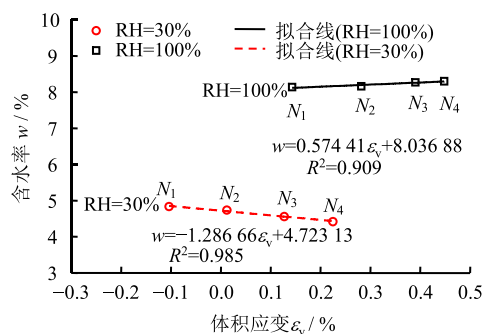
图7 泥岩体积应变 ε_v 与不可逆体积应变幅值 $\Delta\varepsilon_v$ 的变化曲线
Fig.7 Curves of volumetric strain ε_v and irreversible volumetric strain amplitude $\Delta\varepsilon_v$ of mudstone

水汽循环, 泥岩产生的最大不可逆体积应变分别为 0.106 7%、0.066 1% 和 0.036 6%。随着水汽循环次数 N 的增加, 水汽循环对泥岩的影响减弱, 岩样的体积应变 ε_v 和不可逆最大体积应变 $\varepsilon_{v\max}$ 逐渐增长并趋于稳定, 每次水汽循环不可逆体积应变幅值 $\Delta\varepsilon_v$ 逐渐减小。试验结果与 Pineda 等^[5]的研究结果基本一致。

水汽循环作用下泥岩体积应变与含水率的关系如图8所示。由图8(a)可以看出, 随着水汽循环次数的增加, 岩体含水率幅值呈喇叭形态发展, 且不同水汽循环次数下的不可逆变形主要表现为滞回圈的形式, 滞回圈面积逐渐减小。图8(b)展示了增湿、减湿过程中岩体达到湿度平衡时含水率与峰值体积应变之间的关系。由图可以发现, 100%湿度峰值点含水率随着水汽循环次数呈线性增大, 而 30%湿度峰值点含水率随着水汽循环次数呈线性减小, 表明各循环次数平衡状态下泥岩含水率与体积应变表现出良好的线性关系。



(a) 体积应变随含水率的变化曲线

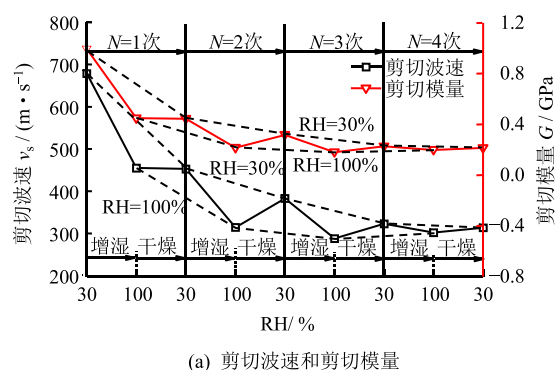


(b) 含水率随峰值体积应变的变化曲线

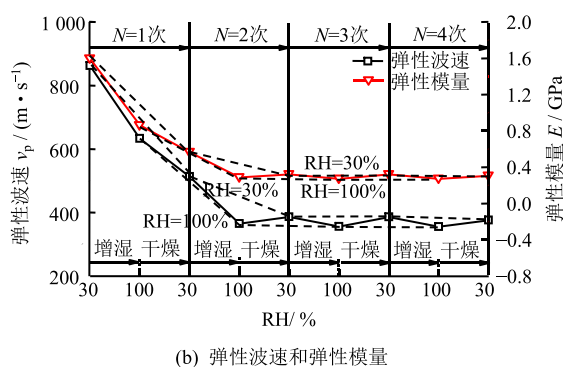
图8 泥岩体积应变与含水率的关系
Fig.8 Relationship between volumetric strain and water content of mudstone

图9为不同水汽循环次数下泥岩的波速、模量和泊松比的变化情况。随着水汽循环次数的增加,

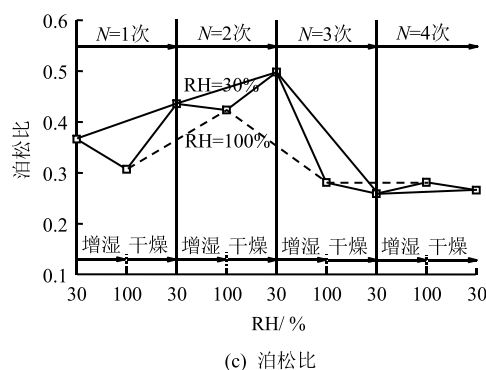
泥岩剪切模量和弹性模量均呈指数形式减小并逐渐趋于稳定。泥岩泊松比呈现先增加后减小的趋势,第1、2次循环泥岩泊松比增加,第2、3次循环泥岩泊松比减小并趋于稳定。上述研究结果表明,随着循环次数增加,岩体强度的劣化效应逐步减弱,并逐渐趋于稳定。由于试验周期较长,本文仅完成了4次水汽循环,但通过以上趋势可以判定,更多次数水汽循环对泥岩的劣化程度将远小于前两次循环。



(a) 剪切波速和剪切模量



(b) 弹性波速和弹性模量



(c) 泊松比

图9 不同水汽循环次数下泥岩波速、模量和泊松比变化情况

Fig.9 Wave velocity, modulus, and Poisson's ratio of mudstone under different water vapor cycles

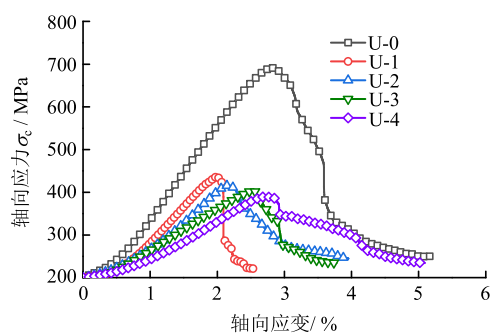
对经历不同水汽循环次数的泥岩开展单轴压缩试验和巴西劈裂试验,从而研究水汽循环对泥岩

抗压强度和抗拉强度的影响。根据国际岩石力学学会的规定^[29],岩石的抗拉强度 σ_t 可通过下式计算:

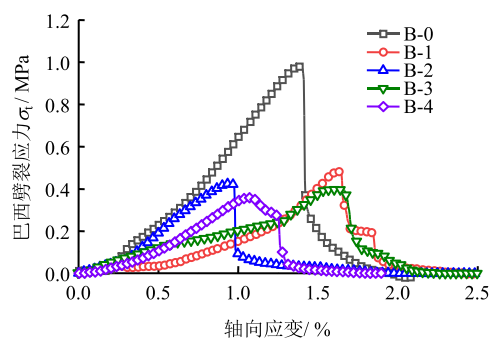
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (6)$$

式中: P 为最大竖向荷载; D 为试样直径; t 为试样厚度。

不同水汽循环次数下泥岩的单轴压缩强度、抗拉强度如图10所示。由图可以看出,随着水汽循环次数 N 的增加,泥岩单轴压缩强度和抗拉强度不断减小,0~4次水汽循环后岩样单轴压缩强度 σ_c 分别为9.81、4.72、4.32、4.04、3.77 MPa,抗拉强度 σ_t 分别为1.48、0.43、0.40、0.38、0.36 MPa。表明第1次水汽循环对泥岩强度影响十分显著,此时泥岩强度退化至初始状态的约48%。随后几次循环开始泥岩强度退化幅度减缓,表明此时泥岩各方面已产生较大程度的劣化,水汽循环的作用相对减弱,进一步证明了泥岩强度退化存在一个阈值。



(a) 单轴压缩试验



(b) 巴西劈裂试验

图10 不同水汽循环次数下泥岩的单轴压缩、拉伸应力-应变曲线

Fig.10 Uniaxial compression and tensile stress-strain curves of mudstone under different water vapor cycles

汇总泥岩抗压强度 σ_c (基于单轴压缩试验)、抗拉强度 σ_t (基于巴西劈裂试验)和弹性模量 E (弯

曲元测得)、剪切模量 G (弯曲元测得) 4 种力学参数, 并分别进行归一化处理 (各参数与其初始值相比), 建立归一化损伤参数 ($\sigma_c / \sigma_{c0} = 1 - D$, $\sigma_t / \sigma_{t0} = 1 - D$, $E / E_0 = 1 - D$, $G / G_0 = 1 - D$) 与水汽循环次数 N 和体积应变 ε_v 的关系, 绘制得到泥岩强度与刚度退化 (归一化) 曲线如图 11 所示。基于参考文献[26]提出的岩石力学性质劣化理论, 建立适用于本文泥岩的力学性质退化模型, 确定出泥岩的关键参数。损伤变化率与当前的损伤状态 D 近似正比关系^[5], 关系式为

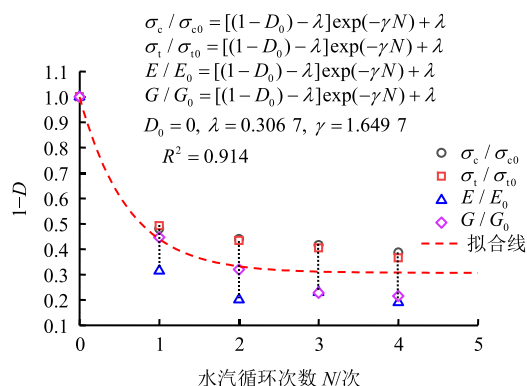
$$\left. \begin{aligned} -\frac{d(1-D)}{dN} &\propto (1-D) \\ -\frac{d(1-D)}{d\varepsilon_v} &\propto (1-D) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将本文研究得到的力学参数 σ_c 、 σ_t 、 E 和 G 引入式 (7), 进一步整理, 得到 4 种力学参数的退化公式为

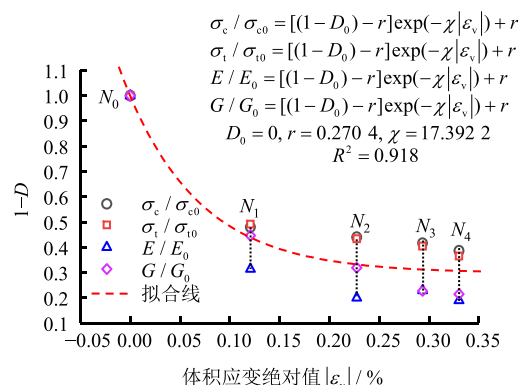
$$\left. \begin{aligned} 1-D &= \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}}, \frac{E}{E_0}, \frac{G}{G_0} \right) = [(1-D_0) - \lambda] \cdot \exp(-\gamma N) + \lambda \\ 1-D &= \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}}, \frac{E}{E_0}, \frac{G}{G_0} \right) = [(1-D_0) - r] \cdot \exp(-\chi |\varepsilon_v|) + r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: D_0 为水汽循环作用对岩样的初始损伤, 默认 $D_0 = 0$; 参数 γ 、 χ 控制着曲线的退化速率; 参数 λ 、 r 为控制曲线衰减阈值的参数。基于式 (8) 对损伤变量 D 随水汽循环次数 N 和体积应变 ε_v 的变化趋势进行拟合, 拟合结果如图 11 所示。由图可以看出, 4 种参数归一化后具有较强的相关性, 公式中的参数取值为 $\lambda = 0.3067$ 、 $\gamma = 1.6497$ 、 $r = 0.2704$ 和 $\chi = 17.3922$ 时, 取得了良好的拟合效果。由拟合曲线的发展趋势可以预测, 水汽循环作用下泥岩强度和

模量的退化趋势为: 第 1 次水汽循环后泥岩的强度和刚度折减幅度最大, 随着水汽循环的进行, 泥岩强度和刚度趋于稳定, 而这一状态对应泥岩的全风化状态, 甚至为不完整岩石。最后, 表 4 总结了整个水汽循环过程中岩样劣化的关键参数及其衰减规律。



(a) 泥岩相关力学参数随水汽循环次数 N 的劣化曲线



(b) 泥岩相关力学参数随累积体积应变绝对值 $|\varepsilon_v|$ 的劣化曲线

图 11 泥岩损伤状态 $(1-D)$ 随水汽循环次数 N 和体积应变 $|\varepsilon_v|$ 演化曲线

Fig.11 Evolution of mudstone damage state $(1-D)$ with water vapor cycles N and volumetric strain $|\varepsilon_v|$

表 4 不同水汽循环次数下泥岩的关键参数试验结果

Table 4 Experimental results of key parameters of mudstone under different water vapor cycles

循环次数 N /次	持续时间 /d	质量变化 /g	含水率变化 /%	不可逆体积应变 /%	累积体积应变 /%	剪切模量 /GPa	弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
0	—	446.10	4.83	0.000 0	0.000 0	0.995	1.598	0.37	9.81	0.98
1	34.1	460.10~445.50	8.14~4.69	0.120 7	0.120 7	0.444	0.566	0.44	4.72	0.48
2	34.8	460.46~444.97	8.22~4.56	0.106 7	0.227 4	0.318	0.321	0.50	4.32	0.43
3	49.9	460.75~444.68	8.27~4.49	0.066 1	0.293 5	0.227	0.320	0.26	4.04	0.40
4	54.4	460.90~444.37	8.30~4.42	0.036 6	0.330 1	0.214	0.304	0.27	3.77	0.36

4.2 基于DIC技术泥岩的损伤及变形结果与分析

基于 DIC 技术对不同循环次数泥岩在单轴加

载过程中的破裂形态进行三维重建分析, 在加载曲线中的取点位置如图 12 所示, 点 $a \sim e$ 分别对应试

样的初始状态、弹性变形状态、塑性变形状态、峰值应力状态和破坏状态。岩样的三维重建结果如图 13、14 所示,各分图中试样从左至右分别对应 $a \sim e$ 的不同时刻。可以发现,在破裂形态方面,未经水汽循环的试样主要以倾斜剪切带(面)的形式破裂;经历水汽循环后,由整体剪切破坏发展为局部弥散裂纹的破坏模式。随着循环次数的增加,泥岩破裂受微裂纹和薄弱部位(水汽循环产生)影响,由完整到破碎,由有序聚集向随机、杂乱、离散的方向转变。具体破坏进程为:

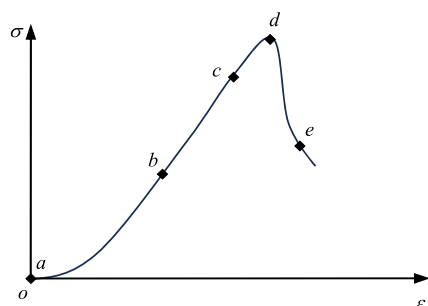


图 12 DIC-3D 技术三维重建取点

Fig.12 Point selection for 3D reconstruction using DIC-3D technology

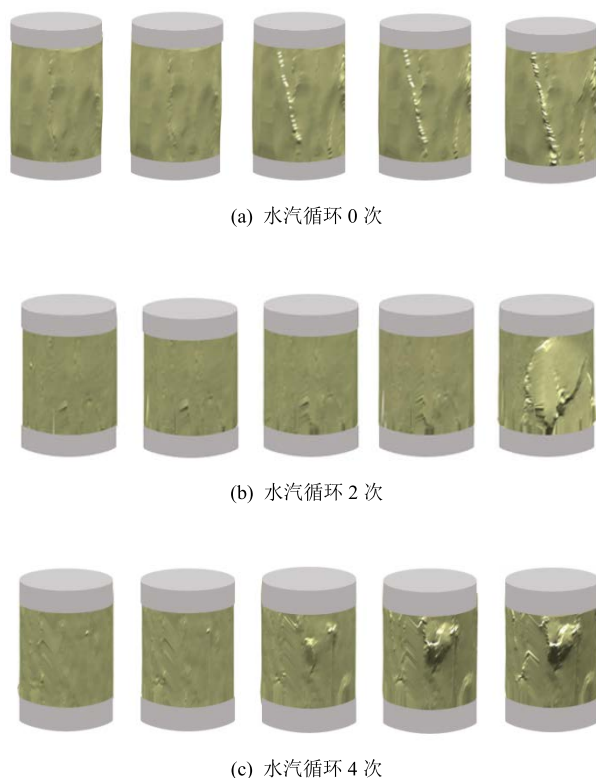


图 13 基于 DIC-3D 技术的岩样三维重建实体图

Fig.13 3D reconstructed models of rock samples based on DIC-3D technology

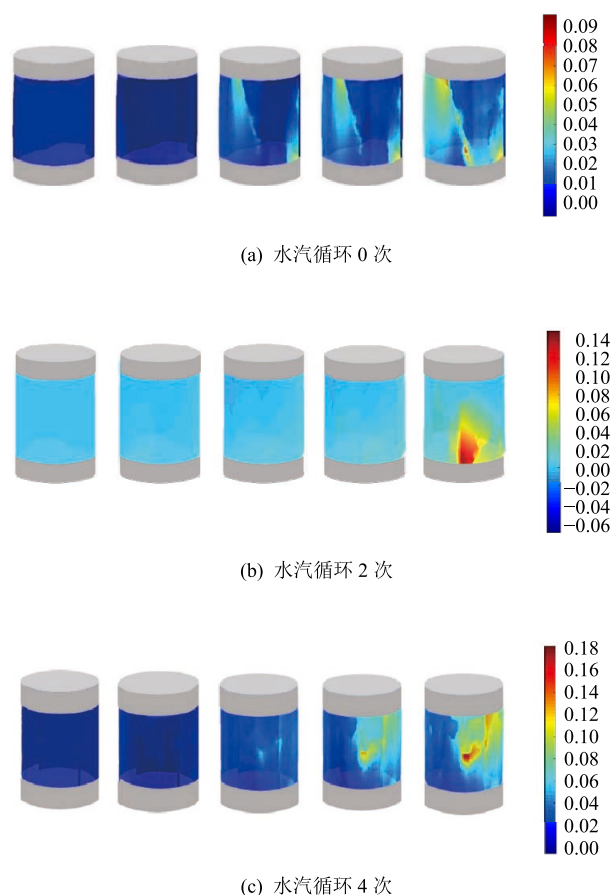


图 14 基于 DIC-3D 技术的岩样三维重建径向应变云图

Fig.14 Radial strain cloud maps of rock samples 3D reconstruction based on DIC-3D technology

(1) 未经历水汽循环的泥岩试样在发生破坏时会产生较为明显的倾斜剪切带,剪切带围成试样的整体破坏面。该试样从塑性变形状态开始出现可见裂纹,裂纹由顶部向底部延伸,最终贯通形成倾斜主裂纹。

(2) 经历两次水汽循环后,泥岩试样破坏后虽仍然出现倾斜剪切带,但剪切带分布于试样的中下部局部位置,该试样裂纹从底部开始发展,向顶部延伸,左侧倾斜裂纹到试样中部发生弥散性发展,与右侧倾斜裂纹围成局部剪切破坏面。

(3) 经历 4 次水汽循环后,试样表面存在初始微裂纹和局部微小突起;泥岩进入塑性变形状态后,局部突起明显扩大,局部微裂纹扩展延伸;随后的峰值应力状态和破坏状态,泥岩表面突起和微裂纹继续弥散发展,在试样整体剪切变形的基础上,最终连通成局部小型破坏面。且由图 14 岩样的径向应变云图可以发现,随着水汽循环次数的增多,其最大径向应变也逐步增大,逐渐由 9%发展到了 18%,进一步表明水汽循环次数的增大更容易引起岩样的体胀变形。

4.3 单轴加载过程中泥岩的声发射特性结果与分析

岩石在压缩过程中会伴随裂纹的闭合、起裂萌生、扩展、贯通以致破坏。因此,特征应力值的确定对岩石加载阶段的划分、损伤状态与裂纹活动的判识具有重要意义。如图 15 所示,通过 4 个与裂纹演化有关的特征应力值,分别为裂隙闭合应力 σ_{cc} 、起裂应力 σ_{ci} 、损伤应力 σ_{cd} 以及峰值应力 σ_c ,可将岩石单轴压缩过程中的应力-应变曲线分为以下 5 个阶段^[30-31]: I 阶段,裂隙闭合阶段 ($0 \sim \sigma_{cc}$); II 阶段,线弹性变形阶段 ($\sigma_{cc} \sim \sigma_{ci}$); III 阶段,裂纹萌生和稳定扩展阶段 ($\sigma_{ci} \sim \sigma_{cd}$); IV 阶段,裂纹不稳定扩展 ($\sigma_{cd} \sim \sigma_c$); V 阶段,破坏和峰后阶段 (σ_c 之后)。其中,损伤应力 σ_{cd} 也代表了岩石的扩容点,岩石材料在荷载作用下产生不可逆的损伤破坏。

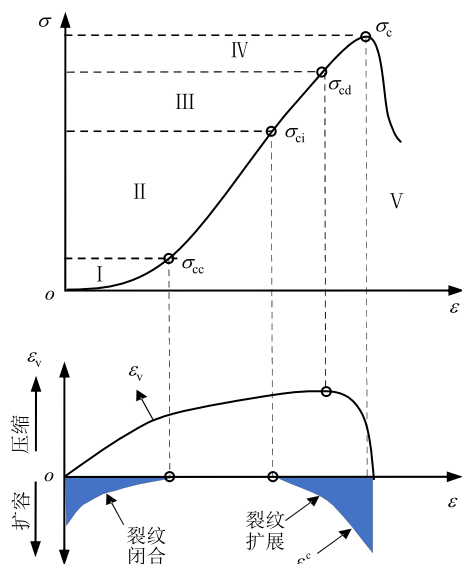


图 15 特征应力值及阶段划分^[31]

Fig.15 Characteristic stress values and stage division^[31]

目前,确定岩石特征应力值的方法主要包括体积应变法、轴向刚度法和声发射法^[32],本文采用声发射法确定不同水汽循环次数下泥岩的特征应力值。声发射法主要通过 AE 计数率(单位时间内的 AE 计数总和)的演化规律确定特征应力,判别依据和原理如下:

(1) 裂隙闭合应力 σ_{cc} : 试验加载初期,孔隙压密会引起短暂的声发射信号,AE 事件率首先出现较高水平并呈现下降趋势,进入弹性阶段后,声发射活动维持较低水平,故将 AE 计数率进入平静期的起点视作裂隙闭合应力点 σ_{cc} 。本试验部分岩样由于泥岩自身特性的原因,压密阶段声发射活动

相对较弱,裂隙闭合应力 σ_{cc} 默认为岩样在压密阶段与弹性阶段的转折点。

(2) 起裂应力 σ_{ci} : 以平静期结束,AE 计数开始增长的位置作为起裂应力 σ_{ci} ,即 AE 计数率首次突增点。

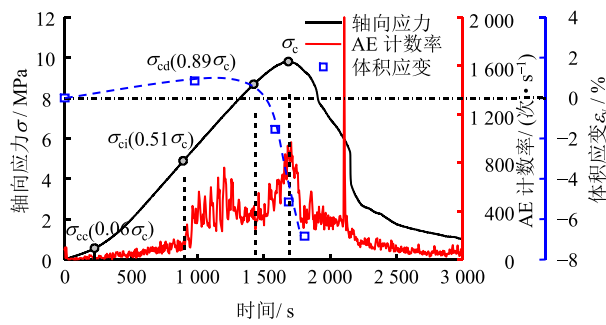
(3) 损伤应力 σ_{cd} : AE 计数率加速增长的起点,即 AE 计数率第 2 次突增点。此时 AE 计数产生突变,声发射活动显著增强。

(4) 峰值应力 σ_c : 应力-应变曲线中峰值应力对应点,此时声发射活动很强。

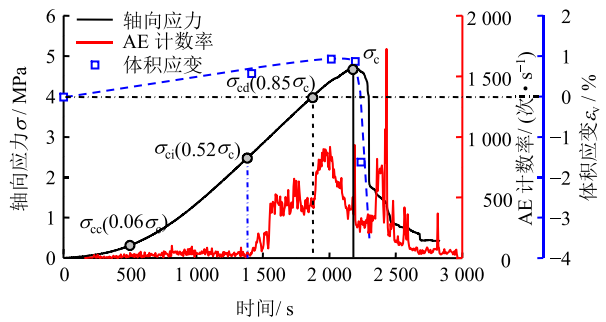
基于 DIC 技术测得不同加载时刻泥岩的体积应变,采用上述判定依据确定特征应力点和划分加载阶段,绘制不同水汽循环次数泥岩特征应力点和体积应变曲线如图 16 所示。由图可以看出,基于 AE 计数率确定的应力特征点与体应变曲线的变化趋势具有较好的对应关系,进一步验证了特征应力点划分确定的正确性,不同水汽循环次数下岩样的上述应力特征值见表 5。

为进一步研究水汽循环次数对泥岩特征应力值的影响,将特征应力值归一化,绘制归一化特征应力曲线,如图 17 所示。由图可以发现,随着水汽循环次数的增加,归一化 σ_{cc} 逐渐增大,即裂隙闭合应力占峰值应力的比值增大,裂隙闭合点推迟,说明岩体压实阶段随着水汽循环的增大而逐渐延长,弹性阶段不断延迟;归一化 σ_{ci} 和 σ_{cd} 减小,表明水汽循环作用会导致起裂应力点和损伤应力点提前。因此,水汽循环作用会导致裂隙闭合阶段(I)延长,线弹性阶段(II)缩短,裂纹不稳定扩展阶段(IV)延长。水汽循环会对岩体造成不可逆的累积损伤和变形,造成岩石裂隙逐渐发展,使岩石的压密过程延长;同时伴随着岩石强度的下降,岩石变形恢复能力降低,弹性变形阶段缩短。结构的劣化还会导致岩石抵抗变形能力降低,导致岩石起裂点和扩容点均提前,岩体更容易提前发生破坏与体胀现象。

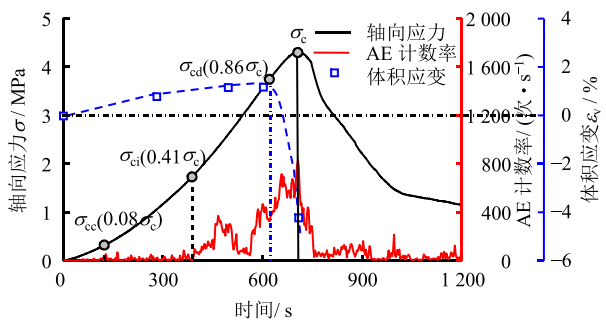
不同水汽循环次数泥岩单轴压缩试验破裂形态和声发射三维定位如图 18 所示。由图可以看出,未经历水汽循环的泥岩试样在发生破坏时会产生较为明显的剪切带,声发射信号点位置主要集中在贯通裂纹附近。随着水汽循环次数的增加,泥岩试样贯通裂纹方向更加杂乱与弥散,泥岩表面主裂纹扩展的同时伴随着更加离散的损伤。岩样内部监测的声发射三维定位点数量增加,分布更加均匀离散。表明水汽循环会使泥岩的破坏形态由单一的剪切破坏面向更加离散的破坏转变。以上现象进一步表明水



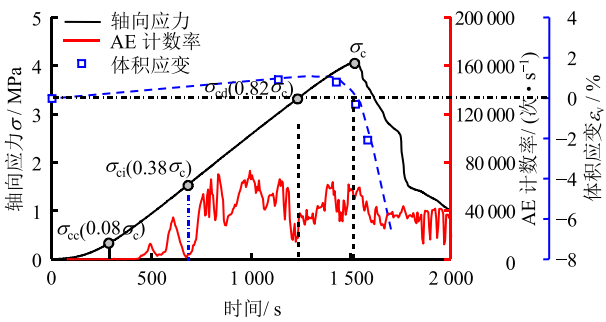
(a) 水汽循环 0 次



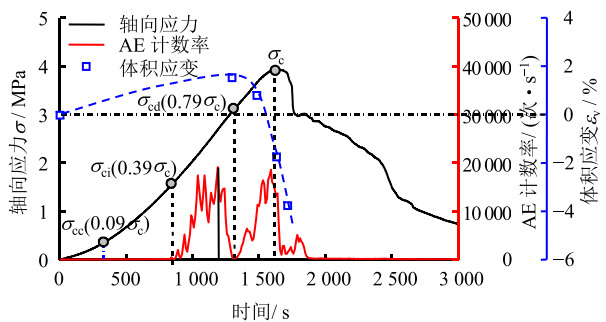
(b) 水汽循环 1 次



(c) 水汽循环 2 次



(d) 水汽循环 3 次



(e) 水汽循环 4 次

图 16 声发射特征应力点和体积应变曲线
Fig.16 AE characteristic stress points and volumetric strain curves

表 5 不同循环次数泥岩的特征应力值
Table 5 Characteristic stress values of mudstone under different water vapor cycles

水汽循环次数 N/次	裂隙闭合应力 σ_{cc} / MPa	起裂应力 σ_{ci} / MPa	损伤应力 σ_{cd} / MPa	峰值应力 σ_c / MPa
0	2.319	4.825	8.155	9.820
1	0.269	2.421	4.226	4.718
2	0.277	2.253	3.688	4.325
3	0.345	1.554	3.335	4.080
4	0.351	1.543	3.115	3.937

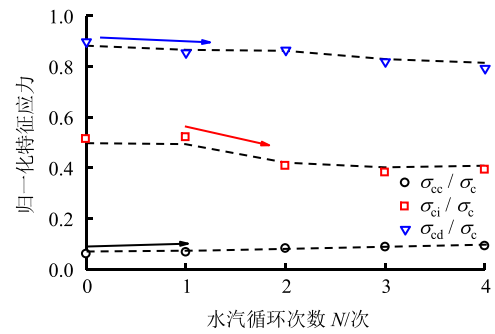
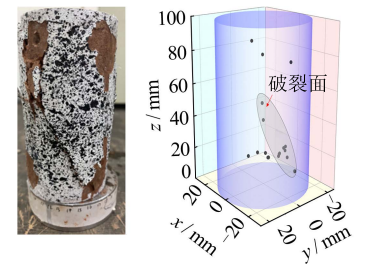
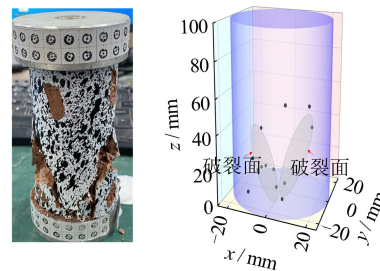


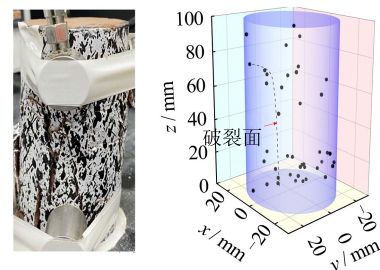
图 17 归一化特征应力随水汽循环次数的变化曲线
Fig.17 Curves of normalized characteristic stress with water vapor cycles



(a) 水汽循环 0 次



(b) 水汽循环 1 次



(c) 水汽循环 4 次

图 18 不同水汽循环次数泥岩单轴压缩试验破裂形态及声发射三维定位

Fig.18 Fracture patterns and 3D acoustic emission localization of mudstone in uniaxial compression tests under different water vapor cycles

汽循环会使泥岩内部产生更多的细微裂纹和薄弱部位,在单轴压缩过程中,岩体内部结构发生压缩、错动和拉裂,沿着水汽循环产生的细微裂纹部位产生破坏。

5 结 论

本文通过室内试验,研究了水汽循环作用下红层泥岩的强度、变形及损伤的演化规律,得出主要结论如下:

(1) 水汽循环作用下泥岩变形的各向异性会促进裂纹的萌生与扩展,最终导致泥岩宏观裂纹数量、尺寸的增加以及裂隙的贯通;随着水汽循环次数的增加,岩体含水率幅值呈喇叭形态发展,不可逆损伤主要表现为滞回圈的形式,逐渐增长并趋于稳定。

(2) 随着水汽循环次数的增加,泥岩抗压强度、抗拉强度、弹性模量和剪切模量存在相似的劣化规律,水汽循环前期(0~2次)泥岩物理力学性质劣化明显,后续循环劣化趋势减缓。在此基础上,提出了适用于红层泥岩的力学性质指数退化模型。

(3) 破裂形态方面,在单轴试验条件下,未经水汽循环的试样主要以倾斜剪切带(面)的形式破裂;经历水汽循环后,由整体剪切破坏发展为局部弥散裂纹的破坏模式。随着循环次数的增加,泥岩破裂受微裂纹和薄弱部位(水汽循环产生)影响,由完整到破碎,由有序聚集向随机、杂乱、离散的方向转变。

(4) 损伤劣化演化规律如下:裂隙闭合点推迟,起裂应力和损伤应力点提前,岩石的压密过程延长,线弹性变形阶段缩短,岩石抵抗变形的能力降低。

参 考 文 献

- [1] 于天佑,蒋关鲁,饶千竺,等.基于声发射参数分析的红层泥岩高周循环加卸载损伤及变形特性[J].中国铁道科学,2024,45(1):12-25.
YU Tian-you, JIANG Guan-lu, RAO Qian-zhu, et al. Investigation of damage and deformation characteristics of soft red mudstone using acoustic emission parameter analysis under high-cycle cyclic loading conditions[J]. **China Railway Science**, 2024, 45(1): 12-25.
- [2] 陈康,刘先峰,袁胜洋,等.饱和红层泥岩填料累积变形特性及安定界限研究[J].岩土力学,2022,43(5):1261-1268.
CHEN Kang, LIU Xian-feng, YUAN Sheng-yang, et al. Experimental study of accumulative deformation behaviour and shakedown limit of saturated red mudstone fill material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1261-1268.
- [3] 程强.红层软岩开挖边坡致灾机理及防治技术研究[D].成都:西南交通大学,2008.
CHENG Qiang. Study on hazard mechanism and prevention technology of cutting slope in red beds soft rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [4] 陈康,刘先峰,袁胜洋,等.含水率对红层泥岩填料刚度劣化特性及微观结构影响研究[J].岩土力学,2024,45(7):1976-1986.
CHEN Kang, LIU Xian-feng, YUAN Sheng-yang, et al. Effect of water content on stiffness degradation and microstructure of red mudstone fill material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 1976-1986.
- [5] PINEDA J A, ALONSO E E, ROMERO E. Environmental degradation of claystones[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(1): 64-82.
- [6] YANG X J, WANG J M, ZHU C, et al. Effect of wetting and drying cycles on microstructure of rock based on SEM[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2019, 78: 183.
- [7] 徐志华,张国栋,孙钱程,等.干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J].中国公路学报,2018,31(2):226-233.
XU Zhi-hua, ZHANG Guo-dong, SUN Qian-cheng, et al. Experimental research on strength degradation of red sandstone under dry-wet cycle conditions[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(2): 226-233.
- [8] ZHANG Z H, LIU W, HAN L, et al. Disintegration behavior of strongly weathered purple mudstone in drawdown area of Three Gorges reservoir, China[J]. **Geomorphology**, 2018, 315: 68-79.
- [9] WAN M, DELAGE P, TANG M A, et al. Water retention properties of the Callovo-Oxfordian claystone[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 64: 96-104.
- [10] PHAM Q, VALES F, MALINSKY L, et al. Effects of desaturation-resaturation on mudstone[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2007, 32(8/14): 646-655.
- [11] PINEDA J, ROMERO E, GRACIA D M, et al. Shear strength degradation in claystones due to environmental effects[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(6): 493-501.
- [12] 郭义.香溪河岸坡粉砂岩干湿循环损伤机理试验研究[D].武汉:中国地质大学,2014.
GUO Yi. Research on the damage mechanism of siltstone from Xiangxi river bank in drying and wetting cycle[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [13] 杨成祥,宋磊博,王刚,等.CT实时观察下泥岩遇水

- 软化过程的机理[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2015, 36(10): 1461-1465.
- YANG Cheng-xiang, SONG Lei-bo, WANG Gang, et al. Mechanism of water-weakening process of mudrock observed using real-time CT[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2015, 36(10): 1461-1465.
- [14] 王玮玮, 刘新喜, 李盛南, 等. 干湿循环对炭质泥岩蠕变及损伤特性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(9): 173-181.
- WANG Wei-wei, LIU Xin-xi, LI Sheng-nan, et al. Study on effect of wetting and drying cycles on creep and damage characteristics of carbonaceous mudstone[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2022, 49(9): 173-181.
- [15] QIONG W, LIU Y X, TANG H M, et al. Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges reservoir area[J]. **Engineering Geology**, 2023, 314: 107013.
- [16] DUAN Z, SKOCZYLAS F, WANG C, et al. Hydric cycle impacts on CO₂ argillite permeability and Young's modulus[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 54(3): 1-19.
- [17] HALL K. The interconnection of wetting and drying with freeze-thaw: some new data[J]. **Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband**, 1988, 71: 1-11.
- [18] COUSSY O. Mechanics of porous continua[M]. [S. l.]: Wiley, 1995.
- [19] 李林, 沈珂任, 王林, 等. 三轴试样全息变形实时测量系统的搭建、验证与应用[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 108-117.
- LI Lin, SHEN Ke-ren, WANG Lin, et al. Set up, validation, and application of a full-field real-time deformation measurement system for triaxial specimen[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2023, 56(8): 108-117.
- [20] 朱俊, 邓建辉, 黄弈茗, 等. 饱和大理岩特征强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1129-1138.
- ZHU Jun, DENG Jian-hui, HUANG Yi-ming, et al. Experimental study on the characteristic strength of saturated marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(6): 1129-1138.
- [21] WANG Y, LAVA P, COPPIETERS S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an erichsen test: methodology and validation[J]. **Strain**, 2013, 49(2): 190-198.
- [22] OLIVIER H J. Some aspects of the influence of mineralogy and moisture redistribution on the weathering behaviour of mudrocks[C]//Proceedings of the 4th ISRM Congress. Montreux: A A Balkema, 1979: 467-474.
- [23] REJEB A, CABRERA J. Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site[C]//Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe. [S. l.]: IAEA, 2006.
- [24] MOYA I R B D, EDUARDO ALONSO PÉREZ DE AGREDA, MORALES E E R, et al. Tunnelling and swelling in triassic sulphate-bearing rocks. Part II: case studies from Jura Mountains[J]. **Epsilon**, 2009, 12: 39-53.
- [25] JYANT KUMAR N S S. Interpretation of bender element test results using sliding Fourier transform method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2019, 56: 2004-2014.
- [26] MONTES H G, DUPLAY J, MARTINEZ L, et al. Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions[J]. **Applied Clay Science**, 2004, 25(3/4): 187-194.
- [27] 宗克清, 何德涛, 陈春飞, 等. 深部碳循环的环境气候效应[J]. 岩石学报, 2022, 38(5): 1389-1398.
- ZONG Ke-qing, HE De-tao, CHEN Chun-fei, et al. The effect of the deep carbon cycle on environment and climate[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2022, 38(5): 1389-1398.
- [28] 原鹏博, 杨烜宇, 赵天宇. 水-盐作用下红层砂岩声波特性劣化试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 227-234.
- YUAN Peng-bo, YANG Xuan-yu, ZHAO Tian-yu. Deterioration characteristics of red-bed sandstone acoustic wave properties due to water and salt solution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 227-234.
- [29] Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1978, 15(3): 99-103.
- [30] MARTIN C. The strength of massive Lac Du bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba: University of Manitoba, 1993.
- [31] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 643-659.
- [32] LIU L W, LI H B, LI X F, et al. Full-field strain evolution and characteristic stress levels of rocks containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2020, 79(6): 3145-3161.