

文章编号: 1007-2993(2026)05-0727-11

干湿循环作用下泥质粉砂岩力学劣化 规律与损伤本构模型

李 智¹ 韩 磊¹ 何晓芸² 侯召旭²

(1. 中交路桥华南工程有限公司, 广东中山 528405; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

【摘要】 针对桂北地区泥质粉砂岩在干湿循环作用下的力学性能劣化问题, 开展不同干湿循环次数的单轴抗压强度试验与 SEM 试验, 并基于能量演化规律确定了泥质粉砂岩的完全压密点, 构建了泥质粉砂岩分段损伤本构模型。研究结果表明: (1) 在经历 5 次干湿循环后, 泥质粉砂岩单轴抗压强度和弹性模量分别下降了 90.7% 和 81.5%, 破坏模式由剪切破坏转变为拉-剪复合破坏。(2) 确定耗散能等于弹性应变能的点为完全压密点, 压密应变随干湿循环次数增加呈线性增大。(3) 分段损伤本构模型拟合结果与试验数据的匹配度较好, 可更准确地描述干湿循环作用下泥质粉砂岩的变形破坏特性。研究结果为桂北地区历经降雨-曝晒循环的边坡稳定性提供了数据支持和理论参考。

【关键词】 泥质粉砂岩; 干湿循环; 单轴抗压试验; 力学性能劣化; 岩石压密段; 损伤本构模型

【中图分类号】 TU452

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0159

Mechanical degradation behavior and damage constitutive model of muddy siltstone under cyclic wetting and drying conditions

LI Zhi¹ HAN Lei¹ HE Xiaoyun² HOU Zhaoxu²

(1. China Communications Road and Bridge South China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528405, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

【Abstract】 Aiming at the deterioration of the mechanical properties of mud siltstone in northern Guangxi Province under the action of wet and dry cycles, uniaxial compressive strength tests and SEM tests with different numbers of wet and dry cycles were carried out, and based on the law of energy evolution, the complete compaction point of mud siltstone was determined, and the segmental damage constitutive model of mud siltstone was constructed. The results show that: (1) After five dry and wet cycles, the uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of the siltstone decreased by 90.7% and 81.5%, respectively, and the damage mode changed from shear damage to tensile-shear composite damage. (2) The point where the dissipated energy is equal to the elastic strain energy is determined as the complete compaction point, and the compaction strain increases linearly with the increase of the number of dry-wet cycles. (3) The fitting results of the segmental damage constitutive model match well with the experimental data, which can more accurately describe the deformation and damage characteristics of muddy siltstone under the action of wet and dry cycles. The results of the study provide data support and theoretical reference for the stability of slopes subjected to rainfall-exposure cycles in Northern Guangxi.

【Key words】 muddy siltstone; dry and wet cycling; uniaxial compressive strength test; mechanical property deterioration; rock compaction section; damage constitutive model

0 引言

泥质粉砂岩广泛分布于桂北地区, 具有崩解性强、力学性能差等不良工程特性。桂北地区以丘陵地貌为主, 在高速公路修建过程中需进行大量路堑边坡开挖, 导致泥质粉砂岩直接暴露于外界环境中, 在

季节性降雨的影响下, 泥质粉砂岩经历多次干湿循环作用, 其内部裂隙逐渐萌生扩展, 力学性能显著劣化^[1], 进而导致泥质粉砂岩边坡稳定性显著降低, 给高速公路的安全运营带来巨大隐患^[2]。因此, 研究干湿循环作用下泥质粉砂岩的力学性能劣化规律对开

基金项目: 中交路桥华南工程有限公司资助项目(R110124H01094)

作者简介: 李 智, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作。E-mail: 185965302@qq.com

通信作者: 韩 磊, 男, 1995 年生, 工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作。E-mail: 2313144534@qq.com

展桂北地区泥质粉砂岩路堑边坡长期稳定性评价工作具有重要的理论和工程意义。

在干湿循环作用下,岩石受到水的反复侵蚀,导致其矿物流失,孔隙结构改变,岩石内部产生不可逆的损伤,进而引起岩石物理力学性能发生劣化^[3]。目前国内外学者通过设计不同条件的岩石干湿循环试验,对岩石物理力学性能劣化规律开展研究。施炎等^[4]发现裂隙岩体渗透特性存在明显的各向异性特征。Zhang等^[5]、Meng等^[6]通过单轴抗压试验,发现砂岩在干湿循环作用下,其抗压强度、弹性模量劣化明显。侯迪等^[7]建立了干湿循环下岩石蠕变本构模型。隆能增等^[8]通过进行三轴压缩试验,分别对砂岩和泥质砂岩的内摩擦角、黏聚力随干湿循环次数的劣化规律进行了研究。为进一步探究岩石在干湿循环作用下的微观劣化机理,许多学者借助扫描电镜(SEM)^[9]、计算机断层扫描(CT)^[10]、核磁共振(NMR)^[11]等技术从微观层面探究干湿循环作用对岩石矿物颗粒状态、孔隙度、颗粒间胶结情况的影响。

在岩石损伤本构模型的研究方面,众多学者基于试验结果,确定评价岩石损伤程度的损伤因子,在此基础上结合岩石损伤统计理论和不同岩石强度准则,建立了考虑不同条件的岩石损伤本构模型。成辉等^[12]通过设计不同干湿循环路径下的三轴压缩试验,基于连续损伤理论和修正 Drucker-Prager(D-P)强度准则建立了考虑干湿循环路径的岩石损伤本构模型。在干湿循环作用下,岩石内部出现损伤,应力-应变曲线存在明显的压密段,邓华锋等^[13]、俱量等^[14]根据试验结果提出基于 D-P 准则的分段式损伤本构模型。

综上所述,目前已有研究成果为正确认识干湿循环作用对岩石的劣化规律奠定了良好的基础,但对桂北地区典型泥质粉砂岩在干湿循环作用下的力学劣化特性及考虑压密段的损伤本构模型的研究仍不充分。鉴于此,本文依托桂林市平昭高速公路某深挖路堑边坡工程,开展典型泥质粉砂岩不同干湿循环次数下的单轴压缩试验,分析干湿循环作用对泥质粉砂岩力学参数劣化及能量演化规律的影响,基于试验结果提出泥质粉砂岩在干湿循环作用下的分段损伤本构模型,以期揭示干湿循环作用下泥质粉砂岩的劣化机制及桂北地区泥质粉砂岩边坡的长期稳定性研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试样制备

试样岩石取自广西桂林平昭高速公路 K21+100

深挖路堑边坡工点,取样后立即采用保鲜膜和缓冲泡沫包裹固定。为确定岩石岩性,进行了薄片鉴定和 XRD 试验,试验结果显示,该岩石为中等风化泥质粉砂岩,具有粉砂状结构、纹层状构造,矿物组成如图 1 所示,主要包括石英(43.9%)、伊利石(48.5%)、赤铁矿(4.1%)等。该泥质粉砂岩天然密度为 2.576 g/cm³,颗粒密度为 2.6 g/cm³,干密度为 2.569 g/cm³,天然含水率为 0.270%,饱和含水率为 0.75%。

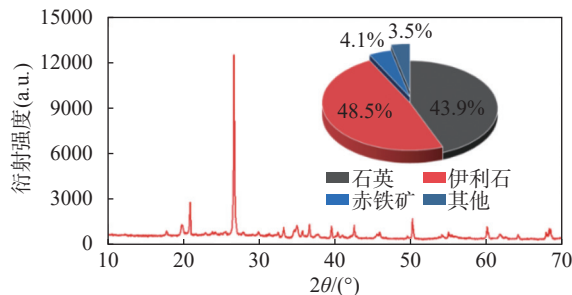


图 1 X-射线衍射图像与矿物成分相对含量

Fig. 1 X-ray diffraction pattern and relative mineral content

利用线切割机将所取岩样沿垂直节理面方向制成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体试样,试样精度、尺寸均满足国际岩石力学学会(ISRM)标准^[15]。对试样进行初步筛选,剔除表面有明显缺陷的试样,将其余完整试样置于恒温、恒湿的环境中静置两周,然后采用非金属超声波检测仪对试样进行波速测试,选取纵波速度相近的试样进行试验,以降低试样的离散性。

1.2 试验方案

取样位置所处地区夏季炎热多雨,该地近 5 年以来,月降雨量最高达 690.6 mm,最高气温达 39 ℃。在短时强降雨的作用下,边坡浅层岩体含水率迅速增大,趋于饱和,降雨后在太阳直射作用下,边坡表层局部温度最高可达 50~60 ℃。基于此,本文采用 60 ℃作为岩石烘干温度,将所有试样置于 60 ℃烘箱中 60 h,确保试样达到干燥状态,以此作为干湿循环试验的初始状态,记录所有试件的质量、纵波波速。岩石饱和阶段采用自由浸水法,根据无损浸水试验结果(见图 2)可知,当试样浸水 60 h 时,其饱和度达到 93.9%,且浸水时间超过 60 h 后,试样吸水率趋于稳定,因此确定岩石饱和时间为 60 h,待试样自由吸水 60 h 后取出;岩石干燥阶段通过将所有试样置于 60 ℃烘箱中 60 h,使所有试样完全干燥,测量记录所有试件的质量、纵波波速,以上为一次完整的干-湿循环流程。通过预实验发现,当干湿循环次数超过 5 次后,试样内部的裂隙逐渐贯通,试样发生严重破坏,无

法进一步进行单轴压缩试验,因此试验共设置 5 次干湿循环,试验方案如图 3 所示,每次干湿循环设置 3 组平行试样。

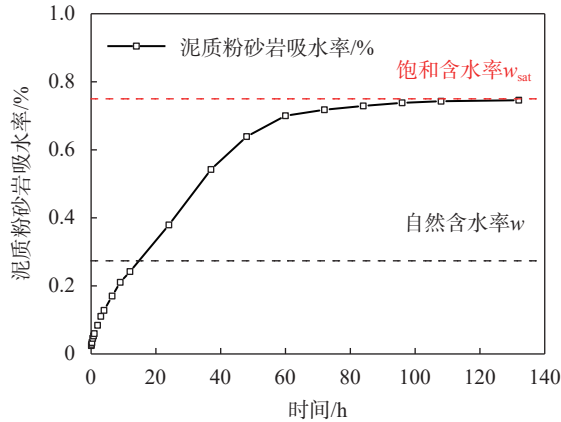


图 2 泥质粉砂岩试样无损浸水试验结果
Fig. 2 Results of free soaking test on argillaceous siltstone sample

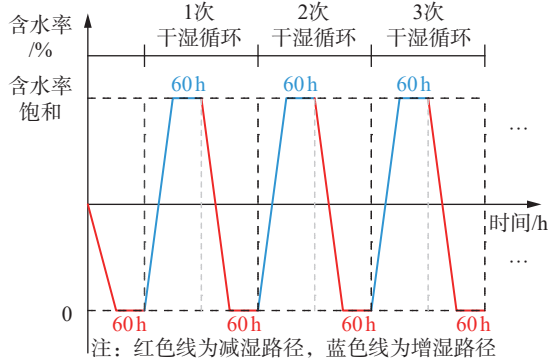


图 3 干湿循环路径图
Fig. 3 Path diagram of wet-dry cycles

不同干湿循环次数试样的单轴抗压强度试验采用电液伺服万能试验机,加载速率为 0.02 mm/min,试样破坏后停止加载,得到不同干湿循环次数下试样的应力-应变曲线。利用 JSM-IT500 钨灯丝扫描电镜扫描试样的破坏断面,得到不同干湿循环次数下试样断面的微观形貌图片。

2 试验结果及分析

2.1 物理参数演化规律

不同干湿循环次数下的试样的质量损失率及纵波波速见图 4。由图 4 可知,在干湿循环达到 1、2 次时,泥质粉砂岩质量损失率较低,不超过 0.1%,但纵波波速有所下降,说明受干湿循环影响,岩样内部已发生损伤,导致纵波传播速度变慢,但其表面并未发生明显崩解剥落现象,岩样质量损失小,说明岩样内部损伤和表面的崩解剥落存在一定延迟;在干湿循环次数达到 3、4 次时,纵波波速下降幅度和质量损失率上升幅度较 1~2 次循环时均有所增加,此时岩

样劣化已从内部损伤,逐渐发展并体现到岩样表面的崩解剥落,岩样质量损失率较前大幅上升,增加了 0.4%;在干湿循环达到第 5 次时,岩样纵波波速下降了 80.0% 但下降幅度明显减小,而质量损失率持续增大,达到了 0.7%,此时泥质粉砂岩试样内部损伤累积,试样劣化较为明显。经分析,该劣化过程的内在机制为:岩样内部发生损伤和表面的崩解剥落存在一定延迟,当岩样内部损伤发展至一定程度时,才会宏观地体现为岩样质量减小;随着干湿循环次数增加,岩石质量损失率逐渐提高,纵波波速逐渐下降,内部损伤逐渐累积,岩石完整性出现显著劣化。

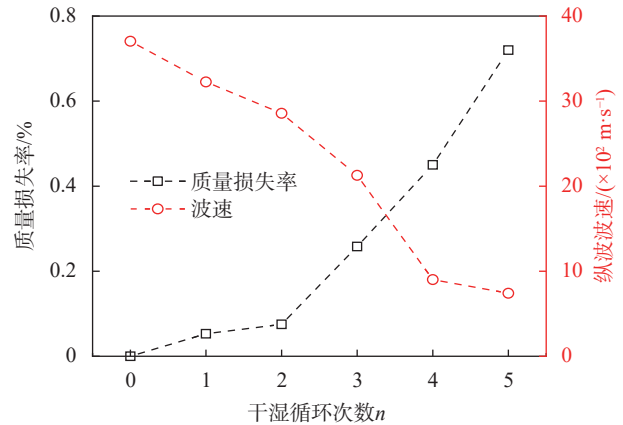


图 4 不同干湿循环次数下泥质粉砂岩质量损失率和纵波波速变化

Fig. 4 Variation in mass loss rate and P -wave velocity of argillaceous siltstone with number of wet-dry cycles

2.2 力学特性演化规律

不同干湿循环次数下泥质粉砂岩的应力-应变曲线和力学参数变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,泥质粉砂岩的应力-应变曲线可大致分为压密阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和峰后破坏阶段 4 个阶段。随着干湿循环次数增加,岩石内部的裂隙和孔隙逐渐增加,其压密阶段明显变长,表明干湿循环导致岩石内部缺陷累积,致使密度下降,进而引起岩石抵抗变形的能力下降。泥质粉砂岩弹性模量和峰值抗压强度随干湿循环次数增加基本呈线性下降的趋势,5 次干湿循环后弹性模量下降了 81.5%,单轴抗压强度下降了 90.7%。特别地,在 5 次干湿循环后,泥质粉砂岩的峰值抗压强度和弹性模量下降明显,较干湿循环 4 次分别降低了 33.9% 和 47.1%,峰值应变与前几次干湿循环规律不同,出现明显降低,这是因为在第 5 次循环后,岩石内部的损伤累积达到了一个临界阈值,导致结构崩溃和力学性能的急剧恶化。此时,裂隙网络的连通性和扩展程度使得岩石无法承受更多的载荷,从而引发了峰值强度、峰值应变和弹

性模量的突降。

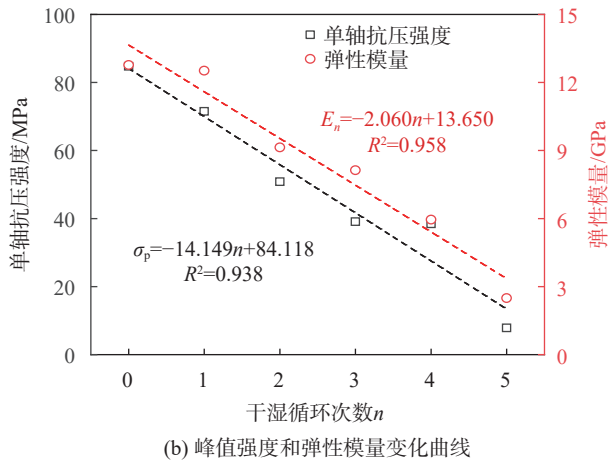
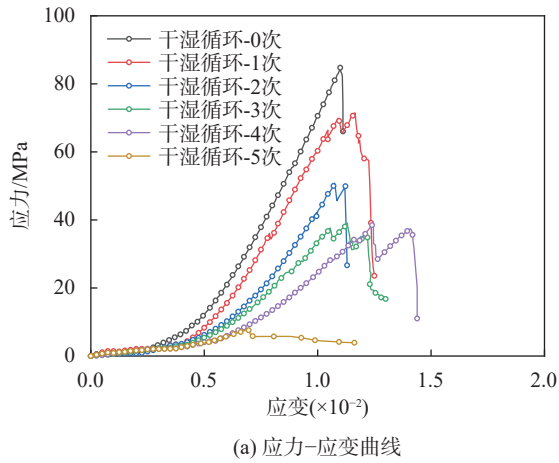


图5 不同干湿循环次数下泥质粉砂岩单轴压缩试验结果
Fig. 5 Results of uniaxial compression tests on argillaceous siltstone under different numbers of wet-dry cycles

综上,干湿循环作用导致泥质粉砂岩的力学性能发生显著劣化。其原因为泥质粉砂岩内部的膨胀性矿物在干湿循环作用下发生吸湿膨胀和干燥收缩作用,导致岩石局部发生应力集中现象,引起其内部裂隙萌生并逐渐扩张;同时部分颗粒剥落,岩石结构发生变化,矿物颗粒间的摩擦力降低,泥质粉砂岩整体稳定性下降。

2.3 能量演化规律

岩石的损伤和破坏本质表现为能量驱动下的宏观失稳现象,其发生机制涉及复杂的能量转化过程。岩石弹性应变能是岩石在外力作用下,因内部分子间作用力的暂时改变而储存于岩石内部的能量形式。这种能量在卸载时可被释放,并在线弹性阶段遵循胡克定律,即与应力和应变的平方成正比关系。与此同时,岩石耗散应变能则反映了岩石内部因不可逆过程(如塑性变形、裂纹扩展等)所导致的能量损失。这些能量转化形式包括以热能或声能等形式散发的能量,通常无法再用于恢复材料的原始状态。在分析岩

石加载过程中的能量演化规律时,一些微观能量损耗(如热能、声能和动能等)可被视为次要因素而简化处理^[16],故可认为岩石加载过程是耗散应变能(U_d)与弹性应变能(U_e)累积与转化过程综合作用的结果,即输入的总能量在加载过程中转化为储存于岩石内部的弹性应变能和以各种形式损耗的耗散能:

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

其中

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

$$U_e = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} f_u(\varepsilon) d\varepsilon = \sigma^2 / (2E_d) \quad (3)$$

$$U_d = \int_0^{\varepsilon_1} f(\varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} f_u(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中: U 为岩石吸收的总应变能密度, MJ/m^3 ; U_e 为岩石的弹性应变能密度, MJ/m^3 ; U_d 为加载过程中耗散的应变能密度, MJ/m^3 。 $f(\varepsilon)$, $f_u(\varepsilon)$ 为加载函数; ε_0 为弹性应变点; ε_1 为塑性应变点; E_d 为弹性模量, MPa 。试验加载过程 U_e , U_d 演化关系见图6。

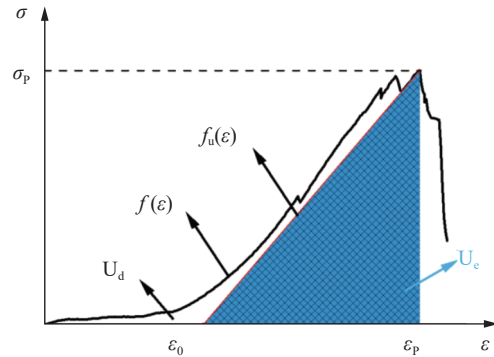


图6 试样加载过程能量演化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of energy evolution during sample loading

不同干湿循环次数下单轴抗压试验过程中泥质粉砂岩试样的能量演化规律见图7。由图7可知,在加载过程中,由于外力对试样做功,总能量不断增加,弹性应变能与应力均随应变呈现先增大再减小的变化趋势,耗散能呈现先增加,然后保持稳定,在试样破坏后迅速增大的三段式变化规律,耗散能主要与裂隙的开展和闭合有关^[17]。在压密阶段,试样内部裂隙和孔隙被不断压缩闭合,此时岩石吸收的能量主要用于内部裂隙和孔隙的闭合,故在压密阶段耗散能大于弹性应变能。在弹性变形阶段和弹塑性变形阶段,岩石内部孔隙已被压实,但由于试验加载岩石内部应力集中,仍可能会有少量微裂纹萌生、扩展^[18],故岩石耗散能会缓慢增加或持平,此时岩石吸收的能量主要用

于发生弹性变形,弹性应变能迅速增大,超过耗散能。试样进入峰后破坏阶段后,裂纹快速发展,不断产生、扩展、交叉、合并,出现宏观裂隙,并逐渐贯通,此时耗散能快速增大,弹性应变能显著减小,耗散能逐渐超过弹性应变能。从第5次干湿循环作用下的能量演化曲线上可以看出,试样峰值强度对应的应变为0.778%,相较于干湿循环4次时峰值强度对应的应

变1.244%减小了37%,可见由于岩样损伤严重,其强度下降迅速,在应变较小时就已破坏,此时试样极有可能仍处于压密阶段,故此讨论压密段相关内容时,不考虑该工况。

根据泥质粉砂岩试样在单轴压缩过程中的能量演化,发现在耗散能等于弹性应变能之前,耗散能处于缓慢增长阶段,在耗散能等于弹性应变能之后,耗

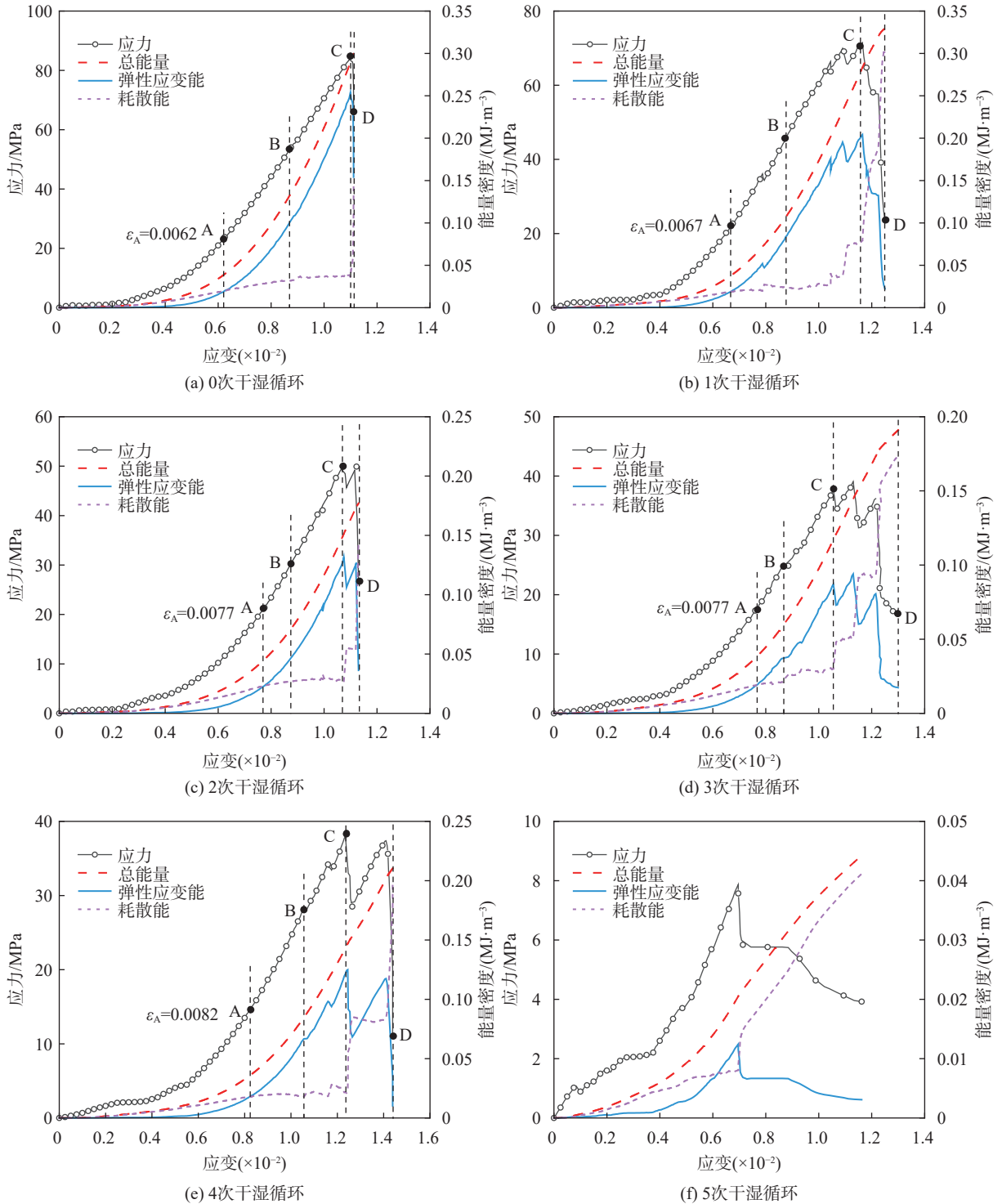


图7 单轴压缩试验过程泥质粉砂岩试样的能量演化曲线

Fig. 7 Energy evolution curves of argillaceous siltstone sample during uniaxial compression test

散能增长速度减缓,故定义岩石耗散能等于弹性应变能时为完全压密点,用此方法确定的压密点与贾蓬等^[17]的研究结果一致。完全压密点对应的应变为压密应变 ε_A ,那么单轴压缩试验的应力-应变曲线可据此划分成如图7所示的OA段(压密阶段)、AB段(弹性变形阶段)、BC段(弹塑性变形阶段)、CD段(峰后破坏阶段)。

不同干湿循环次数下的压密应变的变化曲线见图8。由图8可知,压密应变随着干湿循环次数增加大致呈线性增大的变化趋势。经分析,其成因为:随着干湿循环次数增加,岩石内部的裂纹不断发展,内部损伤逐渐累积,裂纹闭合所需的能量逐渐增多,达到压密状态所对应的应变不断增大。由图8的压密应变拟合线可知,当干湿循环达5次时,压密应变约为0.88%,而干湿循环5次的泥质粉砂岩单轴压缩试验时峰值强度应变为0.70%,推测此时岩石试样由于劣化严重在未完全压密时已被压坏。

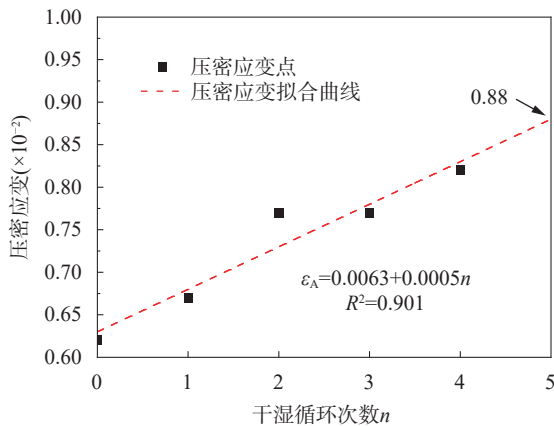


图8 不同干湿循环次数下压密应变变化曲线

Fig. 8 Variation curves of compaction strain with number of wet-dry cycles

2.4 破坏模式

图9为不同干湿循环次数下泥质粉砂岩试样经单轴压缩后的破坏模式。由图9可知,随着干湿循环次数增加,试样表观裂纹数量逐渐增加,当干湿循环次数小于等于1次时,试样主裂缝为斜裂缝,其与水平方向的夹角范围为 $70^\circ \sim 80^\circ$,说明此时试样的破坏模式为剪切破坏,当干湿循环次数达2~4次时,随着干湿循环次数的增加,试样主裂缝与水平方向的夹角为 $75^\circ \sim 83^\circ$,逐渐由斜裂缝向竖向裂缝转变,试样的破坏模式随着干湿循环次数的增加逐渐由剪切破坏向拉-剪复合破坏转变,当干湿循环次数达到第5次时,试样的一条主裂缝与水平方向夹角约为 85° ,且试样表观裂纹数量较多,破碎程度高,其破坏模式以拉张破坏为主。

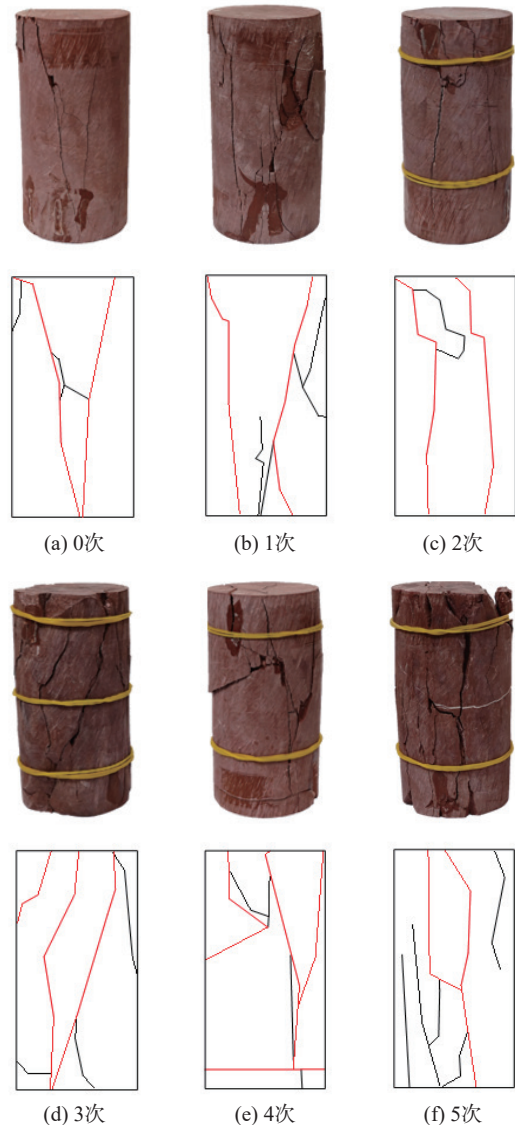


图9 不同干湿循环次数下单轴压缩试验泥质粉砂岩破坏模式

Fig. 9 Failure modes of argillaceous siltstone in uniaxial compression tests under different numbers of wet-dry cycles

图10为不同干湿循环次数下泥质粉砂岩试样破坏断面的电镜扫描照片。由图10所示,泥质粉砂岩内部矿物形态主要呈片状,矿物颗粒彼此之间呈现紧密堆叠的状态,岩石结构致密,力学性能较好。当干湿循环次数为0次和1次时,泥质粉砂岩的破坏断面较为平整,局部仅有少量的颗粒碎屑,微裂隙几乎不可见,表明岩石的整体完整性较好。然而,随着干湿循环次数的增加,尤其是在2~3次干湿循环时,破坏断面处开始出现明显的裂隙。这些裂隙通常沿着矿物颗粒的边界或弱结合界面扩展,表明内部的应力集中逐渐加剧,断面平整度也显著降低,裂隙在矿物之间逐步扩展,并伴随着颗粒的脱落。当干湿循环次数达到4~5次时,岩样劣化程度进一步加剧,断

面上的裂隙变得更加贯通且明显张开, 裂隙宽度和深度都显著增加。尤其是当干湿循环次数达到 5 次时, 裂隙沿着矿物颗粒的晶界扩展, 导致大量的颗粒破碎

和脱落, 矿物颗粒之间的结合力大幅下降, 在断面上可以观察到破碎的矿物颗粒以及堆积的碎屑, 反映出此时泥质粉砂岩在干湿循环作用下发生了严重劣化。

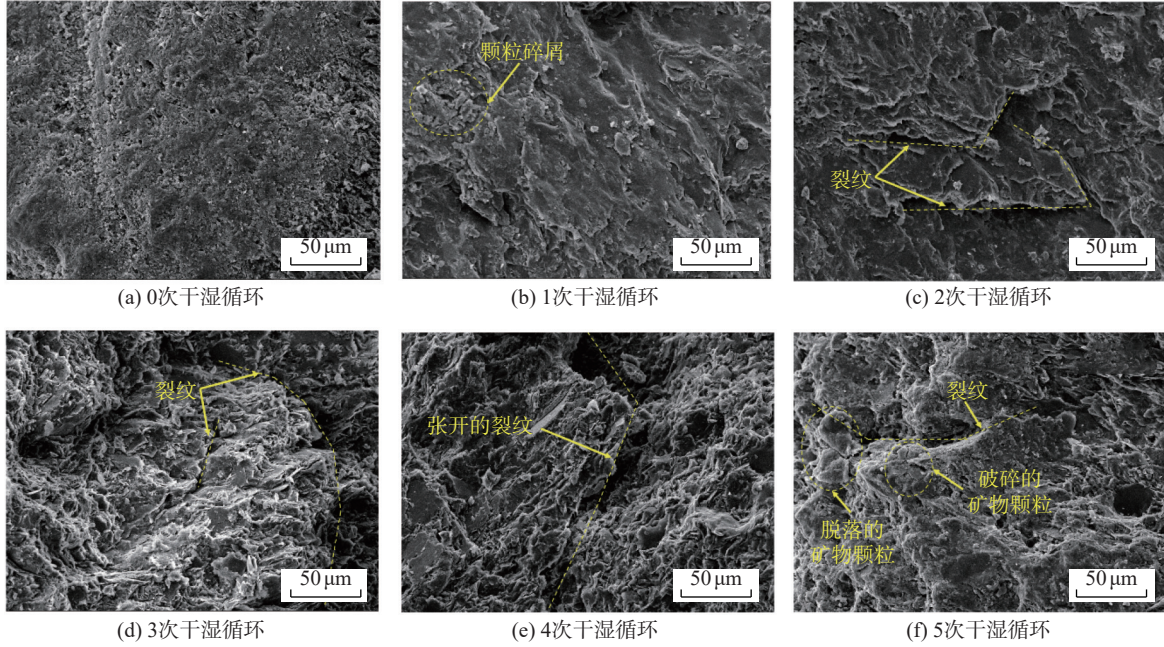


图 10 不同干湿循环次数下泥质粉砂岩破坏断面的微观形貌(500 倍)

Fig. 10 Micromorphology of fracture surface of argillaceous siltstone under different numbers of wet-dry cycles ($\times 500$)

3 干湿循环损伤本构

3.1 损伤变量

损伤变量是评价岩石损伤程度的重要指标, 定义损伤变量时, 采用的参数主要包括: 孔隙度、弹性模量、峰值应力、纵波波速等。

(1) 干湿循环损伤变量确定

损伤变量 D 的表达式见式(5)^[19], 其中 X_0 、 X_n 为干湿循环 0 次和 n 次后的损伤程度衡量指标。干湿循环后, 受化学溶蚀和物理侵蚀双重作用, 岩石内部损伤累积, 其弹性模量和单轴抗压强度逐渐下降, 若分别以弹性模量 E 和单轴抗压强度 σ_p 作为计算干湿循环损伤变量的指标, 可得到随干湿循环次数的变化如图 11 所示, 可见二者随干湿循环次数的变化趋势基本一致, 且数值变化均在 0 ~ 0.6, 故以相等的权重综合考虑弹性模量和单轴抗压强度两个指标, 定义干湿循环损伤变量 D_1 见式(6)。

$$D = 1 - \frac{X_n}{X_0} \quad (5)$$

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{E_0 - E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{p0} - \sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) = 1 - \frac{E_n}{2E_0} - \frac{\sigma_{pn}}{2\sigma_{p0}} \quad (6)$$

式中: D_1 为干湿循环引起的岩石损伤变量; E_0 、 E_n 分

别为干湿循环 0 次、 n 次后岩石的弹性模量; σ_{p0} 、 σ_{pn} 分别为干湿循环 0 次、 n 次后岩石的单轴抗压强度。

(2) 受荷损伤变量确定

假设岩石总单元数目为 N , 由于荷载作用已破坏失效的单元数目为 N_f , 则受荷损伤变量 D_2 为:

$$D_2 = \frac{N_f}{N} \quad (7)$$

岩石微元强度的分布具有随机性, 在构建损伤本构模型时, 需选择合适的统计分布来描述岩石微元强度的分布规律, 对受荷产生的损伤程度加以量化。假设岩石单元的损伤服从 Weibull 分布, 其岩石单元强度概率密度函数 $p(F)$ 可表示为:

$$p(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (8)$$

式中: F 为岩石单元体强度; m 和 F_0 为 Weibull 分布参数, 其中 m 为形状参数, F_0 为尺度参数。

则岩石受荷损伤变量 D_2 满足

$$D_2 = \frac{N_f}{N} = \frac{N \int_{-\infty}^F p(F) dF}{N} = \int_{-\infty}^F p(F) dF \quad (9)$$

则 D_2 为岩石单元强度概率密度函数 $P(F)$, 得到岩石在荷载作用下的受荷损伤变量为:

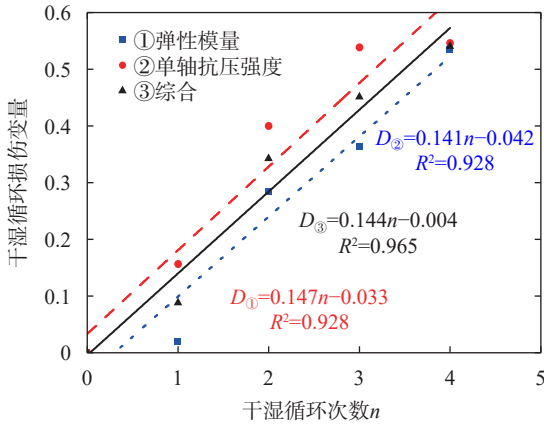


图 11 不同干湿循环次数下泥质粉砂岩的干湿循环损伤变量

Fig. 11 Damage variable induced by wet-dry cycles in argillaceous siltstone

$$D_2 = P(F) = \int_{-\infty}^F p(F) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (10)$$

(3) 干湿循环和荷载共同作用下的岩石损伤变量

干湿循环与荷载共同作用下的岩石损伤不是两者单独作用的损伤简单相加,而是两者耦合而成的整体效应,则干湿循环和荷载共同作用下的岩石损伤变量 D_{12} 满足

$$D_{12} = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \quad (11)$$

将 D_1 、 D_2 表达式代入式(11)得到 D_{12} 表达式如下

$$D_{12} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (12)$$

3.2 强度准则

基于 Lemaitre 应变等价假说、广义胡克定律可建立岩石在干湿循环和单轴压缩条件下的基本损伤

$$\sigma = \begin{cases} \frac{1}{2} E_0 \varepsilon \left(\frac{E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F_{1n}}\right)^{m_{1n}}\right] \right\}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{An} \\ \frac{1}{2} E_0 (\varepsilon - \varepsilon_A) \left(\frac{E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{An}}{F_{2n}}\right)^{m_{2n}}\right] + \sigma_{An}, & \varepsilon > \varepsilon_{An} \end{cases}$$

式中: ε_{An} 、 σ_{An} 分别为干湿循环 n 次泥质粉砂岩单轴抗压应力-应变曲线完全压密点 A 对应的应变和应力; m_{1n} 和 F_{1n} 为泥质粉砂岩干湿循环 n 次后单轴抗压应力-应变曲线压密阶段的 Weibull 分布函数参数; m_{2n} 和 F_{2n} 为泥质粉砂岩干湿循环 n 次后单轴抗压应力-应变曲线压密阶段后的 Weibull 分布函数的参数。

3.4 分段损伤本构模型验证

结合不同干湿循环次数下的泥质粉砂岩单轴抗压试验结果,通过数据拟合得到干湿循环和单轴压缩

本构模型:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_0 \varepsilon_1 (1 - D_{12}) + 2\nu \sigma_3 \\ &= E_0 \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到泥质粉砂岩在加载至破坏过程中以脆性破坏为主,本文假定岩石单元体强度服从最大拉应变强度准则^[20]:

$$F = F(\varepsilon) = \varepsilon \quad (14)$$

式中: ε 为岩石的最大轴向应变。

将式(14)代入式(13),可得:

$$\sigma_1 = E_0 \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{E_n}{E_0} + \frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{p0}} \right) \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F_0}\right)^m\right] \right\} \quad (15)$$

3.3 分段损伤本构方程

干湿循环过程中泥质粉砂岩微裂隙不断萌生扩展,随着干湿循环次数增加,泥质粉砂岩在单轴抗压试验过程中的压密阶段逐渐延长且压密应变随干湿循环次数的增加大致呈现线性增大的特点。在压密阶段,泥质粉砂岩的切线模量远小于其弹性模量,且切线模量随应变增大而逐渐增大,故泥质粉砂岩压密阶段的应力-应变曲线呈下凹形;在非压密阶段,岩石随着竖向荷载的逐渐增大依次经历弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和峰后破坏阶段,其在非压密阶段的应力-应变曲线大致呈上凸形。因此,若仅用式(15)拟合得到泥质粉砂岩的应力-应变曲线,此时的压密阶段近似为直线或上凸形,导致试验数据与理论曲线之间存在偏差^[21]。基于此,本文以完全压密点 A 为分界点,将泥质粉砂岩的应力-应变曲线分为压密阶段和非压密阶段,提出分段式损伤本构模型见式(16)。

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \varepsilon_{An} \\ \sigma &> \varepsilon_{An} \end{aligned} \quad (16)$$

条件下的损伤本构模型参数如表 1 所示。 m 和 F 是 Weibull 分布函数的参数,其中 m 与岩石的脆性呈正比。由表 1 可见,随着干湿循环次数增加,泥质粉砂岩损伤本构模型的 m_{1n} 、 m_{2n} 均逐渐减小,在干湿循环达到第 4 次时,分别降低了 14.82%、83.85%,显然非压密阶段的 m_{2n} 降低幅值更大,说明由于干湿循环导致泥质粉砂岩脆性降低主要体现在压密阶段之后;根据李天斌等^[22] 研究,当 $m=8$ 时本构特征为脆性,当 $m=1.7$ 时本构特征为塑性。故我们认为干湿循环到 3 次时,试样本构特征仍为脆性;当干湿循环达 4 次

时, m 值降至 5.5590, 虽小于 8, 但远大于 1.7, 此时我们认为试样破坏模式为保留一定脆性破坏特征的延性破坏。

表 1 不同干湿循环次数条件下泥质粉砂岩分段损伤本构模型参数

Tab. 1 Parameters of the piecewise damage constitutive model for argillaceous siltstone under different numbers of wet-dry cycles

干湿循环次数 n	D_{12}	$\varepsilon_{An}/10^{-2}$	σ_{An}/MPa	压密段			非压密段		
				m_{1n}	F_{1n}	R^2	m_{2n}	F_{2n}	R^2
0	0.000	0.62	22.153	2.0419	1.0450	0.9943	34.4300	0.5635	0.9983
1	0.088	0.67	22.017	2.0390	1.1716	0.9943	14.0067	0.5581	0.9936
2	0.342	0.77	19.862	1.8300	1.3975	0.9980	13.9500	0.4061	0.9546
3	0.451	0.77	17.847	1.7469	1.2932	0.9967	8.5985	0.4402	0.9770
4	0.540	0.82	14.680	1.7392	1.4533	0.9933	5.5590	0.6791	0.9692

由表 1 可知损伤本构模型对试验结果拟合的决定系数 R^2 均在 0.95 以上, 可见提出的损伤本构模型对试验结果拟合效果较好。将该模型理论曲线和传统损伤模型^[19] 曲线与试验数据进行对比, 对比结果如图 12 所示。由图 12 可知, 传统模型因未

考虑压密阶段, 边界条件仅考虑了原点及峰值点坐标, 拟合效果较差, 而本文提出的分段式损伤本构模型能较好地对试验压密段进行拟合, 验证了压密段单独建模的必要性, 适用于历经干湿循环后压密阶段明显的岩石。

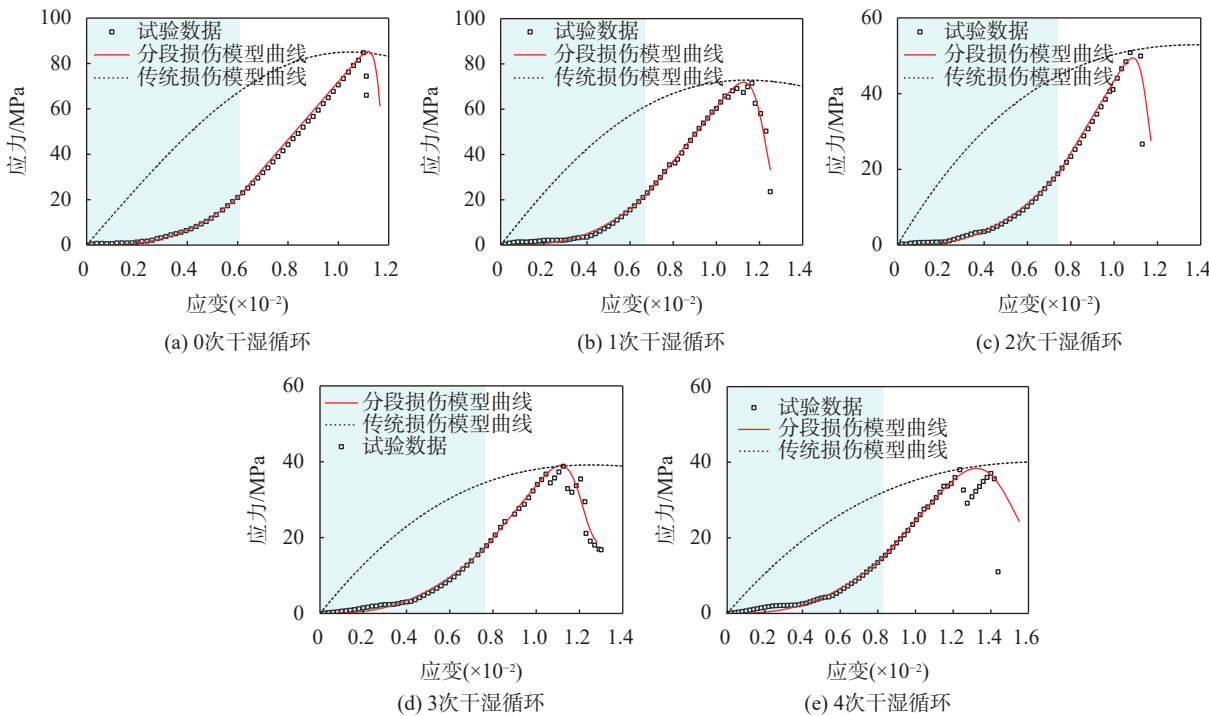


图 12 泥质粉砂岩分段式损伤本构模型验证结果(图中蓝色背景为压密段)

Fig. 12 Validation results of the piecewise damage constitutive model for argillaceous siltstone (the blue background in the Fig. indicates the compaction stage)

4 结论

本文开展了桂北地区典型泥质粉砂岩不同干湿循环次数下的单轴压缩试验, 分析了干湿循环作用对泥质粉砂岩力学参数劣化及能量演化规律的影响, 提出泥质粉砂岩在干湿循环作用下的分段损伤本构模型。主要研究结论如下:

(1)随着干湿循环次数的增加, 泥质粉砂岩的物理力学参数逐渐劣化, 破坏模式发生转变, 与初始状态相比, 5 次干湿循环后, 泥质粉砂岩质量损失率达到 0.7%, 纵波波速下降了 80.0%, 弹性模量和单轴抗压强度分别下降了 81.5% 和 90.7%, 破坏模式由剪切破坏转变为拉-剪复合破坏。

(2)根据加载过程中泥质粉砂岩的能量演化规律,确定耗散能等于弹性应变能的点为完全压实点,压实应变随干湿循环次数增加呈线性增大的变化趋势,表明岩石内部损伤随干湿循环次数增加而不断累积。

(3)综合考虑弹性模量和单轴抗压强度两个指标确定干湿循环损伤变量,基于最大拉应变强度准则建立了干湿循环作用下泥质粉砂岩的分段损伤本构模型,该模型与试验数据的拟合效果显著优于传统岩石损伤本构模型。

参 考 文 献

- [1] 黄震,张海,冯学茂,等.干湿循环与围压作用下粉砂岩损伤及本构研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 122-128. (HUANG Z, ZHANG H, FENG X M, et al. Damage and constitutive study of siltstone under dry-wet cycle and confining pressure[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(3): 122-128. (in Chinese))
- [2] 张旭,周绍武,李元松,等.公路泥质砂岩边坡预警判据与参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(3): 90-97. (ZHANG X, ZHOU S W, LI Y S, et al. Early warning criterion and parameter sensitivity analysis of argillaceous sandstone slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(3): 90-97. (in Chinese))
- [3] 朱江鸿,韩淑娴,童艳梅,等.干湿循环对不同密度砂岩强度劣化的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 126-134. (ZHU J H, HAN S X, TONG Y M, et al. Effect of dry-wet cycles on the deterioration of sandstone with various initial dry densities[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(3): 126-134. (in Chinese))
- [4] 施炎,王团乐,宛良朋,等.干湿循环作用下裂隙岩体渗流特性演化规律研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(7): 198-203. (SHI Y, WANG T L, WAN L P, et al. Seepage characteristics of fractured rock mass under dry-wet cycling action[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(7): 198-203. (in Chinese))
- [5] ZHANG H X, LU K P, ZHANG W Z, et al. Quantification and acoustic emission characteristics of sandstone damage evolution under dry-wet cycles[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103996.
- [6] MENG Y Y, JING H W, YIN Q, et al. Investigation on mechanical and AE characteristics of yellow sandstone undergoing wetting-drying cycles[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(11): 3267-3278.
- [7] 侯迪,许珍,莫至坤,等.干湿循环条件下岩石蠕变本构模型研究及应用[J]. *人民长江*, 2023, 54(12): 218-224. (HOU D, XU Z, MO Z K, et al. Research and application of rock creep constitutive model under different dry-wet cycles[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(12): 218-224. (in Chinese))
- [8] 隆能增,任松,吴斐,等.酸性干湿循环下泥质砂岩劣化及声发射演化特征识别研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(9): 2653-2668. (LONG N Z, REN S, WU F, et al. Degradation of argillaceous sandstone and identification of acoustic emission evolution characteristics under acidic wet-dry cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(9): 2653-2668. (in Chinese))
- [9] 李志刚,叶宏林,代云云,等.干湿循环作用下云母石英片岩抗剪性能劣化规律及机理[J]. *地球科学*, 2024, 49(3): 1028-1038. (LI Z G, YE H L, DAI Y Y, et al. Law and mechanism of shear degradation of mica quartz schist under dry-wet cycles[J]. *Earth Science*, 2024, 49(3): 1028-1038. (in Chinese))
- [10] 安然,孔令伟,张先伟,等.干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 758-767. (AN R, KONG L W, ZHANG X W, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wetting-drying environments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 758-767. (in Chinese))
- [11] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等.基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 825-831. (SONG Y J, ZHANG L T, REN J X, et al. Study on damage characteristics of weak cementation sandstone under drying-wetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 825-831. (in Chinese))
- [12] 成辉,付宏渊,曾铃,等.考虑干湿循环路径的粉砂质泥岩力学特性及本构模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(9): 1912-1922,1980. (CHENG H, FU H Y, ZENG L, et al. Mechanical properties and constitutive model of silty mudstone considering drying-wetting cycle path[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2024, 58(9): 1912-1922,1980. (in Chinese))
- [13] 邓华锋,胡安龙,李建林,等.水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. *岩土力学*, 2017, 38(3): 631-639. (DENG H F, HU A L, LI J L, et al. Statistical damage constitutive model of sandstone under water-rock interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3): 631-639. (in Chinese))
- [14] 俱量,朱兴华,温瑞祥,等.干湿循环作用下泥岩力学

- 特性及损伤演化统计模型研究[J]. 工程地质学报, 2024. ((JU L, ZHU X H, WEN R X, et al. Study on the mechanical properties and damage evolution statistical model of mudstone under wet-dry cycling[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, doi: [10.13544/j.cnki.jeg.2024-0136](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2024-0136). (in Chinese))
- [15] BROWN E T. Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods[M]. Oxford: Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press, 1981.
- [16] 戴 兵, 赵桂峰, 张 雷, 等. 不同加载速率作用下含平行裂隙岩石的试验研究: 能量耗散与损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3397-3412. (DAI B, ZHAO G F, ZHANG L, et al. Experimental study of rock with parallel cracks under different loading rates: energy dissipation and damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3397-3412. (in Chinese))
- [17] 贾 蓬, 毛松泽, 孙占阳, 等. 冻融损伤砂岩的能量演化及分段本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 908-919. (JIA P, MAO S Z, SUN Z Y, et al. Energy evolution and piecewise constitutive model of freeze-thaw damaged sandstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 908-919. (in Chinese))
- [18] 张志镇, 高 峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962. (ZHANG Z Z, GAO F. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-962. (in Chinese))
- [19] 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): 471-476. (ZHANG H M, YANG G S. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471-476. (in Chinese))
- [20] 候 超, 靳晓光, 何 杰, 等. 基于最大拉应变准则的冻融岩石损伤模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(5): 1045-1055. (HOU C, JIN X G, HE J, et al. Research on damage model of rock under freeze-thaw cycles based on maximum tensile strain Criterion[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5): 1045-1055. (in Chinese))
- [21] 刘先峰, 王 通, 李建国, 等. 冻融循环作用下灰岩和石英岩力学特性及损伤本构模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(1): 1-14. (LIU X F, WANG T, LI J G, et al. Experimental study on the mechanical properties and damage constitutive models of limestone and quartzite under freeze-thaw cycles[J]. China Railway Science, 2025, 46(1): 1-14. (in Chinese))
- [22] 李天斌, 高美奔, 陈国庆, 等. 基于热-力-损伤本构参数的硬岩脆性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2593-2602. (LI T B, GAO M B, CHEN G Q, et al. A method for evaluating brittleness of hard rocks based on thermal-mechanical-damage constitutive parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2593-2602. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-08