

循环荷载下损伤砂岩力学行为及损伤特征

刘慧志^{1,2}, 严国超²

1. 山西地宝能源有限公司, 山西 太原 030045;
2. 太原理工大学, 山西 太原 030045



摘要:针对金属矿山工程中砂岩围岩的安全稳定需求,通过制备不同损伤程度的砂岩试样,开展循环加载试验。结果表明:随着损伤程度的增大,砂岩试样峰值强度依次降低,直观呈现了损伤砂岩的强度弱化特征。针对无损伤砂岩试样,损伤砂岩的平均峰值强度降幅依次为3.648%、7.116%、19.921%和28.492%。同时,损伤砂岩弹性模量显著降低,高损伤程度的砂岩试样更易在循环应力作用下产生微裂纹贯通及塑性变形,表现出更高的耗散能占比。从能量角度的分析显示,应变能和耗散能均随循环次数呈“初期波动—后期趋稳”的变化规律,且损伤程度越高,微裂纹扩展越显著,表现为损伤能占比更大。研究结果不仅揭示了损伤砂岩在循环荷载下的力学弱化机制,而且为深部金属矿山围岩支护设计与岩体稳定性控制提供了重要参考。

关键词:损伤砂岩;循环荷载;力学行为;损伤特征;应变能

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)06-1167-13 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.065
引用格式: 刘慧志, 严国超. 循环荷载下损伤砂岩力学行为及损伤特征[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(6): 1167-1179. LIU Huizhi, YAN Guochao. Mechanical Behavior and Damage Characteristics of Damaged Sandstone Under Cyclic Loading[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1167-1179.

随着金属资源开采不断向深部推进,金属矿山巷道围岩长期暴露于高地应力和反复加载环境,矿压演化及岩体破坏规律亟待深入研究(谢志英等, 2024; 叶春烽等, 2024; 李欣倡等, 2025; 王文通等, 2025)。伴随着开采深度的加大和采矿强度的提升,矿压问题逐渐显现,成为影响矿井稳定性和人员生命安全的主要因素之一(赵佳佳等, 2023; 庞立宁等, 2024; 冉启灿等, 2024; 张碧川等, 2025)。尤其是在矿压环境下,砂岩作为常见的围岩类型,其力学性能和损伤特征备受关注(肖峰等, 2022; 王文才等, 2023)。在现场实际情况下,由于地应力和爆破震动等因素的影响,砂岩等围岩体内部往往存在初始损伤,即岩体内部已存在的微裂纹和孔洞等缺陷(张培森等, 2023)。在实际工程中,由于长期的

矿压环境及采动作用,围岩常常经历应力的反复加载和卸载过程。这种循环荷载会导致损伤砂岩内部已有的微裂纹不断扩展,进而引发累积损伤,影响岩体整体的稳定性和承载能力。因此,有必要对损伤砂岩在循环荷载下的力学特征进行研究,揭示岩体在矿压环境中的损伤演化规律,从而提升金属矿山生产的安全性。

近年来,针对损伤岩体力学特性的研究已取得一定进展。鉴于天然岩石普遍存在不同程度的初始损伤,肖桃李等(2015)通过在类岩石试件上预制规则分布的初始裂隙,研究了裂隙形态参数及其数量对力学特性和破坏模式的影响。随后, Yang et al (2024)采用“人工定制”方法对预制裂隙的天然岩石进行试验研究,探讨了天然状态下含裂隙岩石的

收稿日期: 2025-01-21; 修订日期: 2025-06-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“无烟煤煤尘表面润湿性调控的分子机制”(编号: 51974195)资助

作者简介: 刘慧志(1988—), 男, 山西太原人, 高级工程师, 从事冲击地压防治研究工作。E-mail: mp_xmine@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

力学特性。然而,以上研究中初始裂隙大多为规则分布的宏观裂隙,这与天然岩石内部微裂隙的随机分布及其闭合特性存在一定差异。针对该问题,李树刚等(2019)采用轴向加载预压的方法,使岩样内部产生一定的微裂隙损伤,进而研究了单轴压缩条件下初始损伤砂岩的力学性质。Lu et al(2021)对不同损伤的黃砂岩试样进行了单轴冲击压缩试验,探究初始损伤对岩体动力特性的影响。综上所述,目前针对损伤岩石力学性质的研究主要集中在单轴压缩和动态冲击等方面(Wang et al, 2018; 张凯等, 2024),对于循环荷载下的损伤岩石力学性质的探究则较少(Ran et al, 2023),尤其对于金属矿山中常见的砂岩体而言,其在循环荷载条件下的力学特性及损伤规律研究仍显不足。由于不同损伤状态下的砂岩,其力学行为、能量耗散水平和最终破坏形态不尽相同,有待进一步开展系统试验,以明晰循环荷载下损伤砂岩力学行为及其损伤特征,从而为深部金属矿山支护及灾害防治提供参考。

鉴于此,本研究以金属矿山工程背景下的典型砂岩作为对象,采用模拟方法,深入研究不同损伤程度和循环荷载条件下,损伤砂岩力学行为及其损伤特征。通过分析循环加卸载过程中损伤砂岩的强度、变形、能量耗散和阻尼参数的动态演化,揭示损伤砂岩力学性质弱化机制。研究结果有助于进一步丰富损伤岩石在循环荷载下的非线性力学研究,旨在为深部金属矿围岩支护设计与岩体稳定性控制提供理论依据和数据支撑。

1 试验方法

1.1 损伤砂岩制备和试验设备

为研究循环荷载下损伤砂岩的力学性质演化及阻尼特性,需要制备具有不同损伤程度的砂岩试样。本文所用砂岩取自某地质构造稳定、岩性均匀且未明显风化的岩层,通过钻取标准岩心后进行切割、磨平,最终得到尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体试样。砂岩试样和试验设备如图1(a)所示。为尽量减少试样自身差异对试验结果的影响,所有试样两端面平行度误差不超过 0.02 mm ,试样轴线与端面垂直度误差不超过 0.05° ,试验无明显裂隙、剥落或风化现象。此外,经过测试,原始完好砂岩平

均单轴压缩强度(UCS)约为 28.5 MPa 。

在获得原始完好试样后,根据需要设置不同的预损伤程度。具体做法如下:将完好试样先置于单轴压力机中,以单次加载—卸载预损伤的方式使试样内部产生一定微裂纹,获得不同损伤水平的试样。即将砂岩试样加载至峰值强度的一定比例,然后卸载,以此引入一定程度的不可逆微裂纹(Hou et al, 2019)。通过改变加载峰值比例(20%, 40%, 60%, 80%),可获得不同损伤等级的砂岩试样,为后续循环荷载试验提供必要的试样(Yu et al, 2022)。为准确表征不同损伤等级岩样的内部结构状态,在预损伤处理后采用超声波法测定各砂岩试样的纵波波速,相关测量结果如图1(b)所示。整体来看,随着预损伤加载比例的提高,岩样波速下降量逐渐增大,这表明试样内部微裂纹密度逐渐升高,损伤程度随之加剧,波速测定结果可作为损伤分级的重要参考指标。

采用上述方法制备的试样在外观上难以发现明显的宏观裂纹,但其内部已出现不同程度的细微裂隙,形成了初始损伤结构。以往在制备损伤岩体时观察到明显的表面宏观裂纹(尹大伟等, 2023)。砂岩的岩性相对均匀且致密,其损伤演化主要表现为内部微裂纹的累积和扩展,当在砂岩表面观察到宏观裂纹时,说明试样已接近破坏状态。在80%加载比例下,虽然部分试样在制备损伤过程中出现了明显的塑性变形,但在宏观观察中并未发现典型的表面宏观裂纹。这说明损伤砂岩的损伤累积主要集中在内部微裂纹的扩展及其联结效应上,而非明显的裂纹扩展至表面。需要指出的是,80% UCS损伤程度的砂岩试样已处于准破坏状态。在预损伤加载过程中,该类试样出现了较明显的塑性变形和内部贯通微裂纹网络。因此,在分析高损伤程度砂岩试样的力学行为时,需特别考虑其准破坏状态对试验结果的影响。

此外,为明确初始损伤对砂岩后续力学性能的影响,本研究设置了一组无初始损伤(损伤程度为0% UCS)的砂岩试验作为对照组。无初始损伤的砂岩不经历任何循环加载,直接进行后续的试验。本研究砂岩试样的基本信息及损伤程度如表1所示。

为了全面测试对损伤砂岩在循环荷载下的力学响应及阻尼特性,在微机控制电子万能试验机上

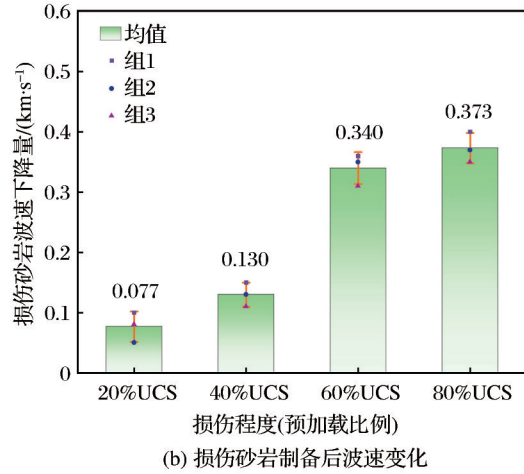


图1 岩石力学试验设备与损伤砂岩波速下降特征

Fig. 1 Rock mechanics experimental equipment and wave velocity decline characteristics of damaged sandstone

表1 试样的基本信息及损伤程度
Table 1 Basic information and damage degree of specimens

试验组别	砂岩编号	质量/g	波速/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	损伤程度
组1	DS-0	434.89	2.62	0% UCS
	DS-1	435.37	2.63	20% UCS
	DS-2	435.71	2.65	40% UCS
	DS-3	435.46	2.63	60% UCS
	DS-4	435.85	2.64	80% UCS
组2	DS-5	436.02	2.64	0% UCS
	DS-6	435.61	2.63	20% UCS
	DS-7	435.42	2.63	40% UCS
	DS-8	435.97	2.64	60% UCS
	DS-9	435.52	2.63	80% UCS
组3	DS-10	435.14	2.63	0% UCS
	DS-11	435.73	2.64	20% UCS
	DS-12	435.96	2.64	40% UCS
	DS-13	436.11	2.65	60% UCS
	DS-14	435.38	2.63	80% UCS

注: UCS为原始完好砂岩平均单轴压缩强度

开展循环加卸载试验(图1)。该设备具有高精度的测量能力,能够实时记录试样在压缩过程中的轴向受力及变形等关键参数。

1.2 循环加卸载路径

所有损伤砂岩均设置统一的循环加卸载路径进行试验,如图2所示。具体而言,在循环加卸载阶段,循环应力在下限6.8 MPa和上限15.2 MPa之

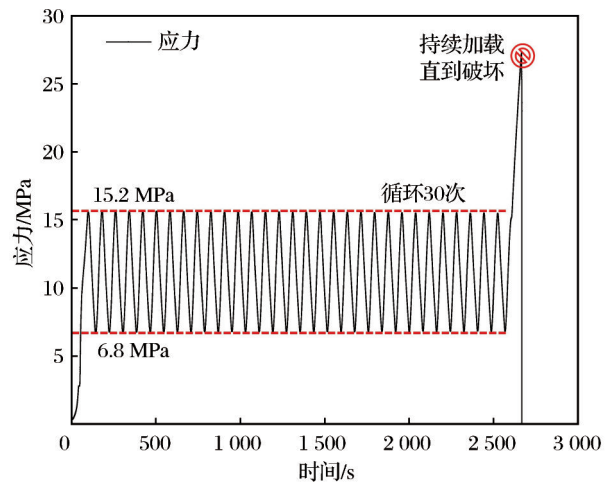


图2 损伤砂岩试样应力路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress path of damaged sandstone specimen

间往复变化,循环次数为30次。循环加载应力幅值参考已有砂岩循环加载试验中典型的应力范围,并结合岩石样品的本身强度进行确定(Zhang et al, 2023)。尽管不同研究的砂岩取样位置存在差异,但砂岩整体物性较均质,且本研究通过统一以单轴抗压强度的百分比设定应力幅值,可一定程度上确保其通用性。

此外,根据前人研究,岩石的归一化裂纹闭合、裂纹萌生阈值平均值分别为21% UCS和33% UCS(Taheri et al, 2020)。因此,本研究按照25%~55% UCS的比例确定应力幅值范围,以覆盖弹性变形与

裂纹演化的过渡区,从而较好地模拟深部金属矿山围岩受采动扰动影响的实际应力状态。循环次数的设置反映了在实际工程中围岩经历长期、反复荷载作用下的累积损伤效应。在循环过程中,通过力传感器和位移传感器对应力—应变响应进行实时记录。循环结束后,进入最终破坏加载阶段,持续加载直至试样失稳破坏,并重点关注破坏时的峰值应力等信息。本研究加载速率保持为400 N/s。通过上述应力路径,所有损伤砂岩样品在相同的加载路径下完成循环损伤和最终破坏,可较为准确地反映循环荷载对砂岩力学行为及阻尼特性的影响。

2 损伤砂岩力学响应特征

2.1 损伤砂岩强度弱化特征

图3所示为各组不同损伤程度砂岩试样的峰值强度对比,平均值以柱状图形式表示,各组数据以散点图形式呈现。通过图3可获得在损伤水平提升条件下砂岩的强度弱化特征。由图3可知,随着损伤程度的增加,砂岩试样峰值强度逐渐降低,平均值为28.317,27.284,26.302,22.676,20.249 MPa。这表明砂岩在经历不同程度的预损伤后,内部形成了数量不一的微裂纹。随着这些微裂纹的不断累积与联通,试样的承载骨架被削弱,整体强度因此表现出逐级下降的趋势。特别是当损伤程度较大时,内部裂纹在后续加载过程中更易扩展并贯通,使砂岩难以维持高水平的应力承载。与此同时,进一步对结果进行量化分析发现,针对无损伤砂岩试样,损伤砂岩的平均峰值强度降幅依次为3.648%、7.116%、19.921%和28.492%。这一结果说明损伤程度对砂岩的强度弱化并非线性过程,微裂纹的萌生与扩展受到原始结构、矿物成分及预损伤加载方式等多重因素的影响,导致其强度弱化存在一定的阶段性和不均匀性。在损伤程度较低时,局部微裂纹的增量尚不足以大幅削弱砂岩试样的承载能力;当微裂纹达到一定临界密度后,其协同扩展更容易导致明显的强度损失,最终使得高损伤程度下的砂岩难以保持较高的强度。

值得注意的是,当损伤程度达到80%UCS时,岩石试样强度已接近其承载极限,微裂纹网络趋于贯通,试样内部发生明显的塑性变形,形成了局部

损伤区,峰值强度显著低于其他损伤等级的岩样。这表明在高损伤等级下,岩石强度的急剧下降不仅是由裂纹数量增加引起,更是由贯通裂纹网络导致有效承载面积急剧缩小所致。准破坏状态对岩样整体力学性能产生了重要影响,也导致损伤程度对砂岩强度弱化的非线性特征。损伤砂岩的强度弱化特征表明无损伤砂岩强度高于损伤处理后的损伤砂岩,这与前人研究结果(李树刚等,2019)相符。由于每组试验数据结果类似,考虑文章篇幅有限,后续仅针对损伤砂岩试样DS-1、DS-2、DS-3和DS-4进行试验数据分析。

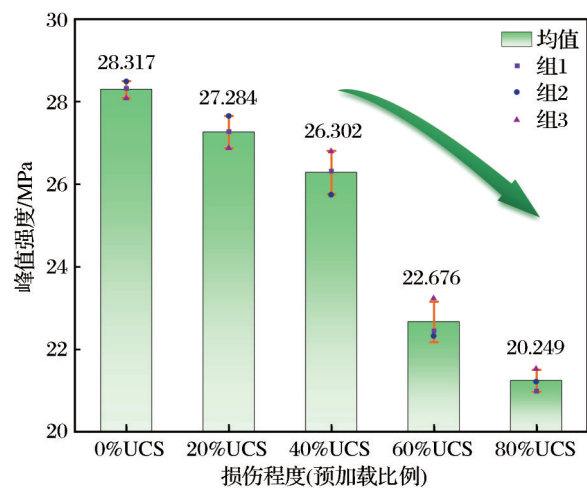


图3 不同损伤程度的砂岩试样强度弱化特征

Fig. 3 Strength weakening characteristics of sandstone specimens with different damage degrees

2.2 损伤砂岩应力—应变曲线

不同损伤程度的损伤砂岩应力—应变曲线特征如图4所示。由图4可以看出,随着损伤程度的不断增大,砂岩试样的应力—应变曲线在峰值强度及变形特征等方面表现出明显差异。砂岩试样DS-1在加载初始阶段呈现出最大的应力—应变曲线斜率,说明其弹性变形能力相对最高,材料具有较好的刚度;相比之下,砂岩试样DS-2、DS-3和DS-4的应力—应变曲线斜率依次减小,这意味着随着损伤程度的增加,砂岩试样内部微裂纹数量和规模不断增多,导致试样整体刚度下降,弹性变形能力减弱。这一趋势也与图4中损伤砂岩在循环阶段滞回环逐渐向后移动的现象相吻合。从峰值强度来看,砂岩试样DS-1峰值强度最高,而砂岩试

样 DS-2、DS-3 和 DS-4 峰值强度依次降低,说明损伤累积会削弱岩石承载能力,这与图 3 的结果吻合。此外,在加载至峰值应力附近或超过峰值应力后,砂岩试样 DS-1 和 DS-2 的应力曲线迅速下降,呈现出更强的脆性破坏特征;对损伤程度更高的砂岩试样 DS-3 和 DS-4 而言,峰后应力下降的速度更缓慢或出现波动,“应力缓降”现象明显增加。这不仅与内部裂纹协同扩展及试样局部破裂有关,也可能与碎裂或摩擦效应导致的应力衰减速度变化相联系。

综合而言,对于低损伤程度的砂岩试样 DS-1,岩石微裂纹尚未显著发展,内部结构完整度高,表现为高强度和高刚度,破坏时的脆性特征更明显。对于中等损伤程度的砂岩试样 DS-2 和 DS-3,随着损伤的累积,岩石的有效承载骨架被削弱,峰值强度下降,弹性变形逐渐降低,局部区域在加载过程中容易发生微破裂并向周围扩展。对于高损伤程度的砂岩试样 DS-4,试样内部已有较多微裂纹贯通或连接,整体承载能力显著下降,往往表现为较低的峰值强度与弹性变形,破坏过程受微裂纹闭合和扩展的影响更显著。此外,从应力—应变曲线特征来看,试样 DS-4 在加载过程中表现出更显著的塑性变形特征,且峰后应力下降较缓甚至出现一定波动,这些均说明该试样在预先损伤阶段已进入准破坏状态。这种损伤累积效应不仅降低了试样的强度,也显著增强了材料的塑性软化趋势。

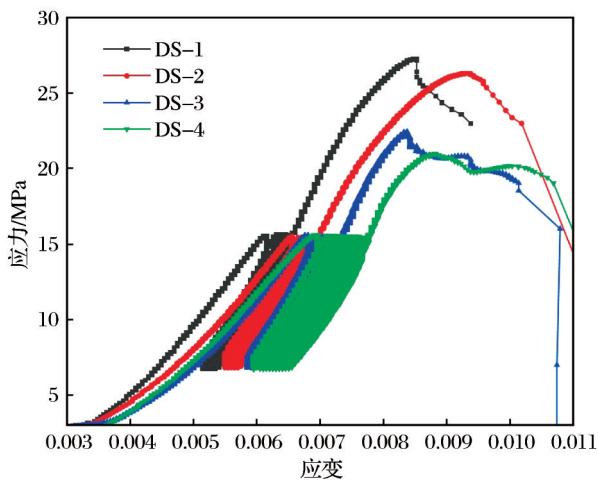


图4 损伤砂岩试样应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of damaged sandstone specimens

2.3 损伤砂岩弹性模量演化

弹性模量表示在荷载作用下抵抗变形的能力,在一定程度上可表征岩石裂纹发育与损伤特征。加卸载响应比是根据应力应变数据来表征试样损伤的一种参数,其计算方法(Ran et al, 2023)如下:

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} = \frac{1}{E} \quad (1)$$

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{1/E_+}{1/E_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (2)$$

式中:Y为加卸载响应比;X为加卸载响应量; ΔR 为响应变化量; ΔP 为荷载变化量; X_+ 和 X_- 分别为加载段和卸载段的响应量; E_+ 和 E_- 分别为加载段和卸载段的弹性模量(GPa); $\Delta \varepsilon$ 为应变变化量; $\Delta \sigma$ 为应力变化量(MPa)。

图5所示为不同损伤程度的砂岩试样在循环加载阶段的弹性模量与加卸载响应比随循环次数的演化规律。总体来看,各试样的弹性模量在最初几次循环时均出现较为剧烈的变化,即加载弹性模量快速上升,卸载弹性模量快速下降,之后二者逐渐下降并趋于稳定;加卸载响应比在初始阶段也大幅下降,随后进入相对平缓的演化过程。这说明早期循环时岩石内部微裂纹的扩展效应较为显著,导致砂岩刚度及能量耗散能力剧烈波动;但随着循环次数的增加,裂纹扩展逐渐趋于平衡,整体力学响应趋于稳定。相较于低损伤程度的砂岩试样 DS-1 和 DS-2,损伤程度更高的砂岩试样 DS-3 和 DS-4 在稳定阶段的弹性模量仍有小幅波动。这表明在高损伤程度下,砂岩试样内部裂纹演化及相互作用更为复杂,对砂岩试样刚度和能量耗散的影响更加敏感。

此外,不同损伤程度的砂岩试样在循环加载阶段的平均弹性模量的演化特征如图6所示。由图6可知,不同损伤程度的砂岩试样平均弹性模量分别为7.530, 7.191, 6.422, 6.655 GPa。整体来看,随着损伤程度的增加,砂岩试样的平均弹性模量呈下降趋势。这表明微裂纹在不断萌生与扩展的过程中削弱了砂岩试样的承载骨架,导致其整体刚度降低。

3 损伤砂岩耗散能演化及阻尼特征

3.1 应变能演化

为了详细探究损伤砂岩能量耗散情况,对应力

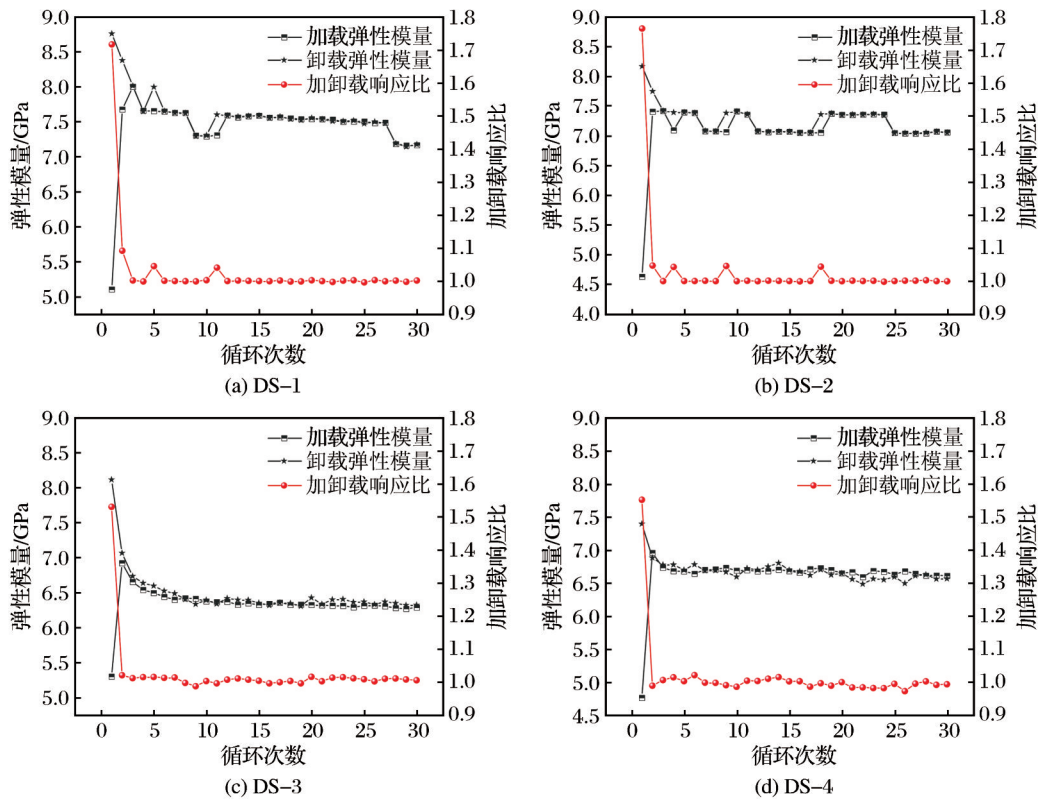


图5 不同损伤程度的砂岩试样弹性模量及加卸载响应比演化

Fig.5 Evolution of elastic modulus and loading–unloading response ratio of sandstone specimens with different damage degrees

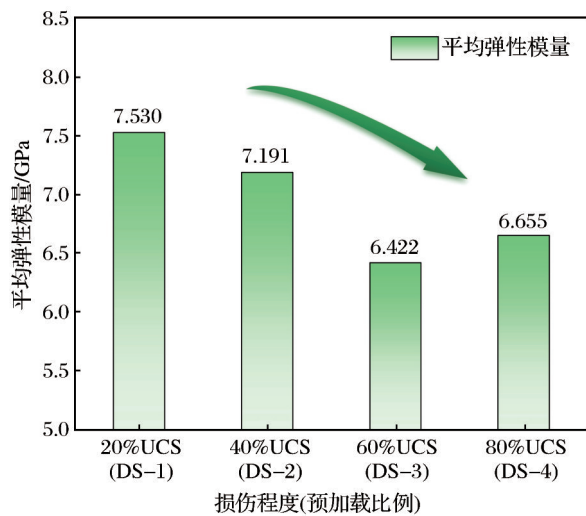


图6 不同损伤程度的砂岩试样平均弹性模量

Fig.6 Average elastic modulus of sandstone specimens with different damage degrees

一应变数据进行深入处理。假设在试验过程中砂岩试样与外界没有发生热交换。如图7所示,循环加卸载包括能量的输入及耗散,输入能 U_I 为 AB 段

与 x 轴围成的面积,弹性能 U_E 为 BC 段与 x 轴围成的面积,耗散能 U_p 为 ABC 面积。计算公式(徐颖等, 2019)如下:

$$U_I = \int_{\varepsilon_A}^{\varepsilon_B} \sigma_L d\varepsilon \quad (3)$$

$$U_E = \int_{\varepsilon_B}^{\varepsilon_C} \sigma_U d\varepsilon \quad (4)$$

$$U_p = U_I - U_E \quad (5)$$

式中: σ_L 为加载段应力; σ_U 为卸载段应力; ε_A 、 ε_B 和 ε_C 分别为 A、B 和 C 三点应变。

由图8可知,不同损伤程度的砂岩试样在循环加载过程中的应变能演化均呈现出“初期剧烈变化—后期逐渐稳定”的基本趋势,但具体数值与波动幅度因损伤程度不同而存在差异。首先,在前几次循环中,所有试样的应变能均出现明显的突变。这是由于试样内部微裂纹在循环加卸载过程中被快速扩展及闭合所致,能量的释放与存储均较为剧烈。随着循环次数的增加,应变能逐渐趋于平稳,说明微裂纹的演化趋于稳定化。进一步比较不同

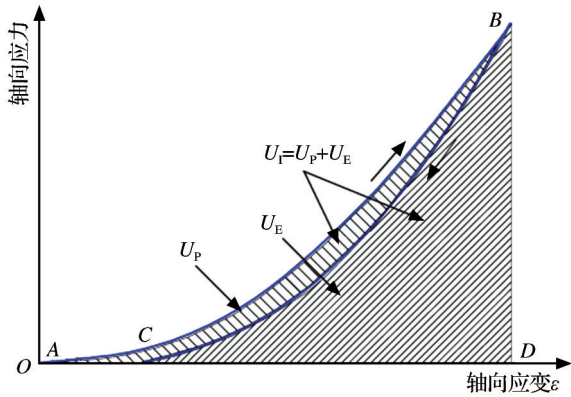


图7 应变能计算示意图(徐颖等,2019)

Fig.7 Schematic map of strain energy calculation (Xu et al, 2019)

损伤程度的砂岩试样可以发现:对于损伤程度较小的砂岩试样DS-1和DS-2,在进入平稳阶段后,其应变能保持在相对较高且稳定的水平,说明内部微裂纹有限,砂岩内部结构整体性较好,对应的耗能量也较低;对于损伤程度较大的砂岩试样DS-3和DS-4,其初期的应变能波动更大,进入稳定阶段所

需的循环次数更多,且最终的应变能水平相对更低。这表明高损伤程度的砂岩试样内部分布有更多的裂纹,其在循环应力作用下更易发生微破裂反复活动,因而能量的储存能力相对降低,能量耗散过程则更加显著。此外,从稳定阶段的应变能值及波动情况推断,高损伤程度的砂岩内部微裂纹对外界应力的敏感程度较高,在局部破裂和颗粒重排等因素的综合影响下,呈现出更复杂的能量演化特征。

总的来说,初期微裂纹的快速闭合与扩展导致能量剧烈波动,随后在循环加载中微裂纹分布和形态逐渐趋于稳定,从而使应变能演化曲线逐渐平稳。随着损伤程度的增大,岩石整体承载骨架被削弱,导致储能能力降低,耗能过程更突出,从而反映出高损伤砂岩在循环加载下更易产生内部破裂和能量耗散。该演化过程与前文所述的弹性模量和加卸载响应比等指标的变化规律相互印证,为理解损伤砂岩的能量累积与破坏机理提供了重要参考。

3.2 耗散能占比特征

不同损伤程度的砂岩试样耗散能占比特征如

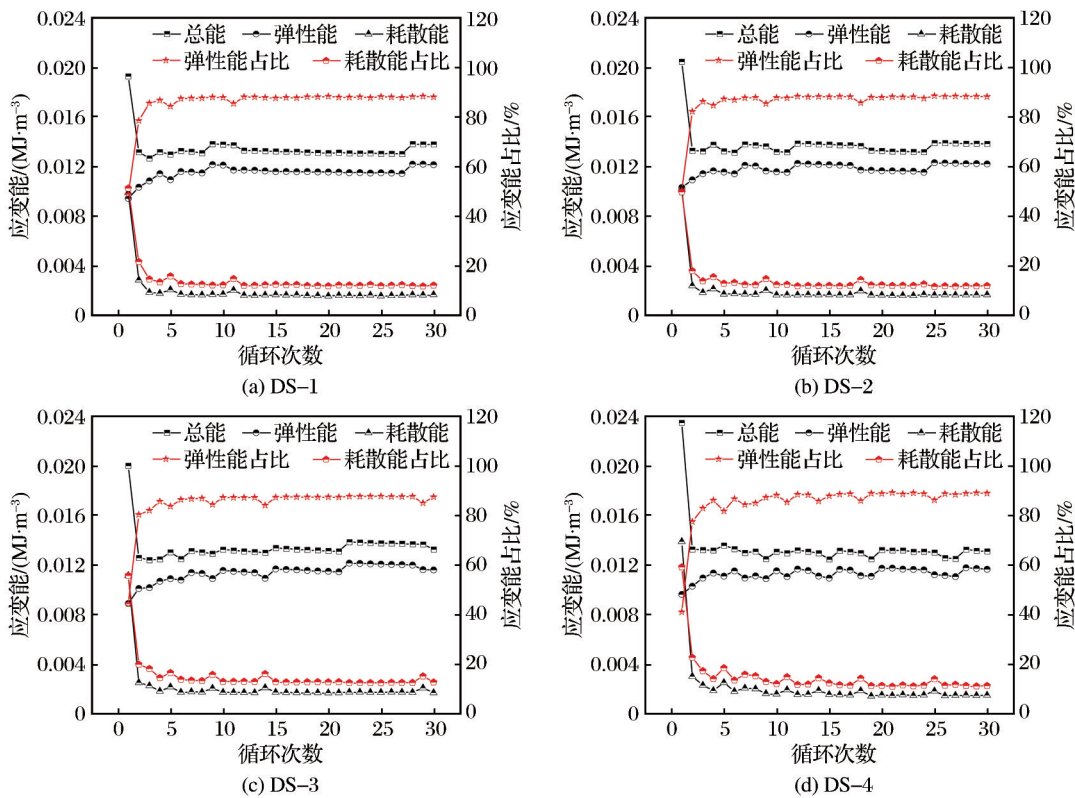


图8 不同损伤程度的砂岩试样应变能演化规律

Fig. 8 Strain energy evolution law of sandstone specimens with different damage degrees

图9所示。从图9可以看出,不同损伤程度的砂岩试样在循环加载过程中所累积的耗散能与对应的耗散能占比(即耗散能在总能量中的相对份额)均随损伤程度的增加呈现整体上升趋势。总体而言,随着损伤程度的不断增加,砂岩试样内部微裂纹相对增多,裂纹在循环加卸载过程中更易发生扩展行为,从而导致耗散能稳步增加;与此同时,耗散能占比也呈现升高态势,说明砂岩试样在单位体积内所吸收的外部能量中,用于塑性变形等不可逆过程的能量耗散比例越来越高。

不同损伤程度的砂岩试样所累积的耗散能分别为0.0588,0.0595,0.0631,0.0633 MJ/m³。对应的耗散能占比分别为14.565%、14.389%、15.642%和15.779%。具体来看,相对损伤较轻的砂岩试样DS-1和DS-2,其耗散能及占比均处于较低水平,说明砂岩试样内部裂纹尚不发达,绝大部分吸收能量被用于弹性储能,仅有少部分在循环作用中被耗散掉。随着损伤程度的进一步增加,砂岩试样耗散能与耗散能占比迅速增大,这表明岩石微结构在循环应力作用下更趋于不稳定,微裂纹扩展及贯通概率增大,从而提高了砂岩试样在每一次加卸载循环中对能量的损耗。

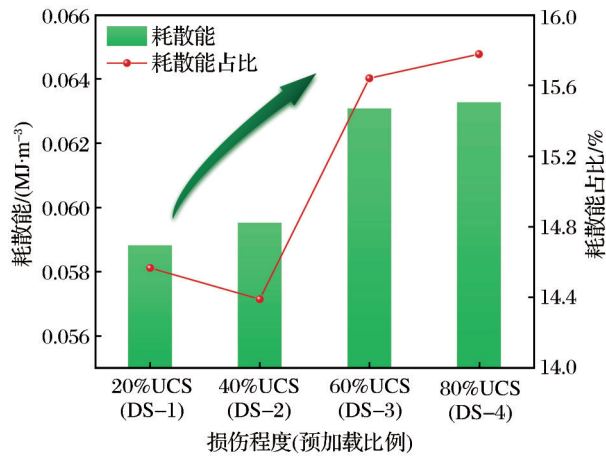


图9 不同损伤程度的砂岩试样耗散能占比特征

Fig. 9 Characteristics of dissipated energy proportion of sandstone specimens with different damage degrees

3.3 阻尼能及损伤能演化

图10所示为循环加卸载的第k级循环的加卸载曲线,以及第k+1级循环的加载曲线。其中,卸载曲线与下一次循环的加载曲线在B点相交,形成

闭合区域BCB,即塑性滞回环。当从B点卸载至C点时,大量受压的孔隙和裂隙无法完全恢复;随后重新加载回到B点的过程中,内部损伤逐渐累积,砂岩试样表现出黏弹性变形。假设在试验过程中砂岩试样与外界没有发生热交换,且弹性性能不损耗,该循环中的能量损失来源于阻尼力所做的功,即阻尼能(滞回环BCB的面积)(尹大伟等,2023)。前文分析了引发损伤、产生残余变形及克服阻尼所消耗的耗散能,但并未具体区分由于塑性损伤和克服黏滞性所耗散的能量。因此,考虑到煤岩的黏弹性变形,将耗散能进一步细分为塑性损伤能和阻尼能,其中耗散能减去部分阻尼能即为塑性损伤能。

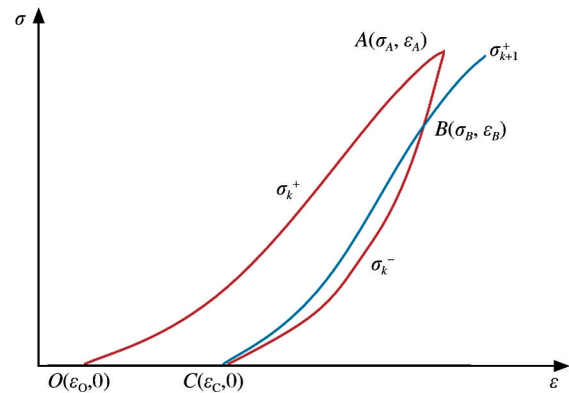


图10 阻尼能计算示意图(尹大伟等,2023)

Fig. 10 Schematic diagram of damping energy calculation (Yin et al, 2023)

图11所示为不同损伤程度的砂岩试样阻尼能及损伤能随循环次数的变化规律。由图11可知:在循环加载的前几次循环中,各试样的阻尼能与损伤能往往出现较大幅度的波动,这是由于早期卸载及再加载过程中,内部受压孔隙和裂隙无法完全闭合或恢复,从而在下一次加载时继续产生新的微裂纹或局部破裂,使得砂岩试样表现出黏弹性和塑性双重变形特征。

对于低损伤程度的试样而言,孔隙与裂纹数量较少,初期波动虽明显但持续时间相对较短;对于高损伤程度的试样,早期波动更显著且持续时间更长,表明其内部裂纹分布更广且演化过程更复杂。随着循环次数的增加,阻尼能与损伤能的演化曲线逐渐进入相对平稳阶段。一方面,经过多次循环后,已生成的裂纹趋于稳定或部分闭合,岩石内部

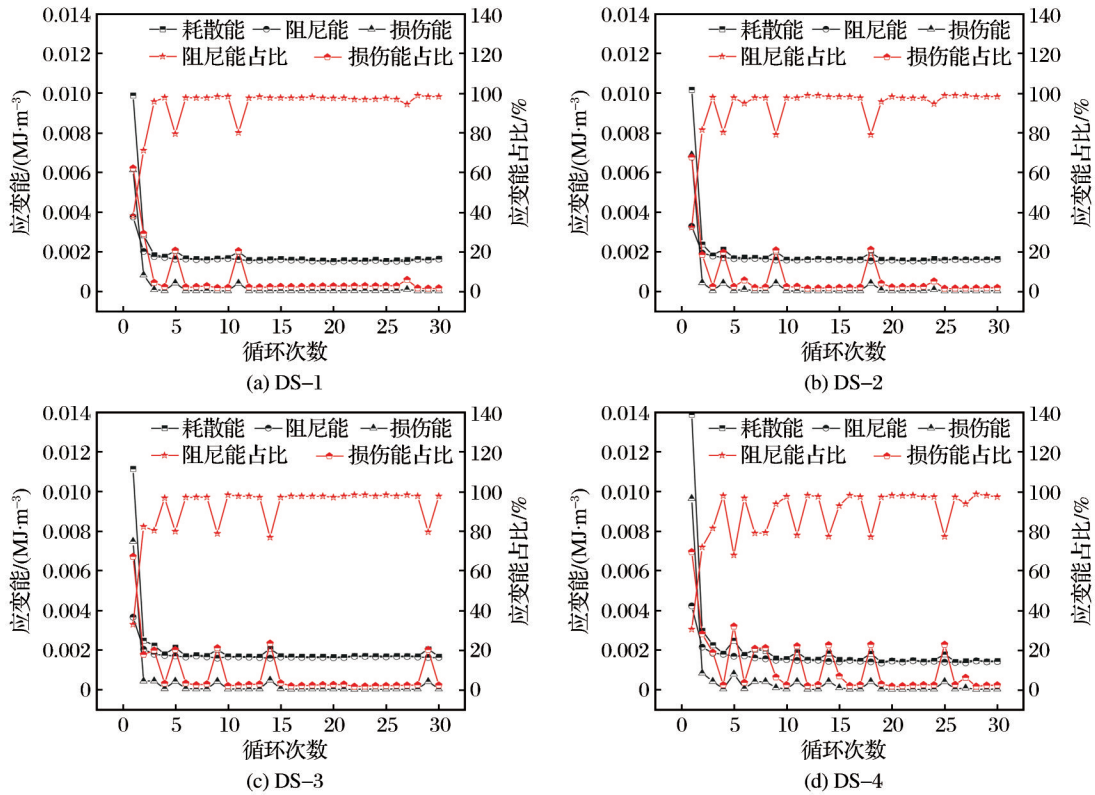


图 11 不同损伤程度的砂岩试样阻尼能及损伤能演化

Fig. 11 Damping energy and damage energy evolution of sandstone specimens with different damage degrees

结构对循环加卸载表现出一定的适应性;另一方面,黏弹性阻力在多次循环后也会随应变速率及孔隙形变模式的稳定而逐步达到相对稳定水平,此时,耗散能主要为阻尼能。而阻尼能主要由滞回环(*BCB*环)的面积所表征,反映的是克服黏弹性阻力所消耗的能量。损伤能更多由塑性破坏或微裂纹扩展所导致的不可逆能量损耗构成。对比不同损伤程度的试样发现,高损伤程度的试样在进入平稳区后的损伤能出现较为频繁的波动,说明其内部尚有部分微裂纹在不断地磨合、摩擦或局部扩展。

3.4 损伤能占比特征

图 12 所示为不同损伤程度的砂岩试样阻尼能及损伤能随循环次数的变化规律。由图 12 可以看出,随着砂岩损伤程度的增大,损伤能与损伤能占比(损伤能与耗散能的比值)整体上呈明显的上升趋势。损伤能占比分别为 15.030%、15.978%、17.508% 和 23.899%。对于损伤程度较小的砂岩试样,损伤能及其占比均处于相对较低的水平,说明此时材料内部微裂纹数量有限,大部分外部输入能量可以在

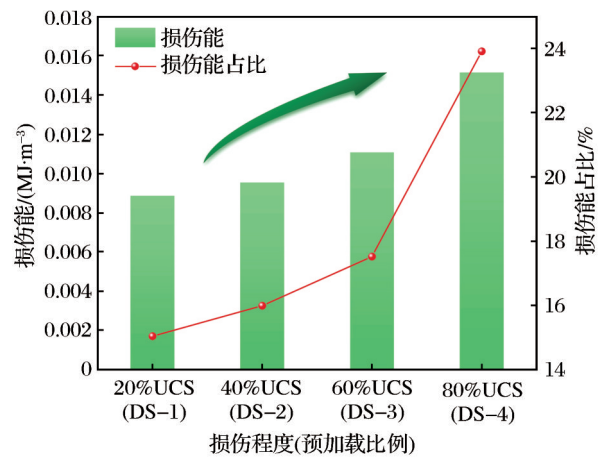


图 12 不同损伤程度的砂岩试样损伤能占比特征

Fig. 12 Characteristics of damage energy proportion of sandstone specimens with different damage degrees

弹性范围内储存或部分转化为黏弹性耗散,真正用于微裂纹不可逆破坏的能量占比较低。随着损伤程度的进一步增加,柱状图所示的损伤能呈显著增长,同时折线反映出的损伤能占比也随之迅速攀升,表明砂岩内部裂纹在循环应力作用下更易发生

扩展、贯通或摩擦滑动,从而产生更大幅度的塑性破坏,导致不可逆能量损耗明显增加。尤其是砂岩试样 DS-4,其损伤能与损伤能占比均达到最高值,说明在高损伤状态下,岩石内部的载荷承载骨架已被大面积削弱,裂纹演化更为剧烈,单位体积吸收的能量中有相当一部分被用于裂纹扩展、贯通及微结构破坏。

4 损伤砂岩力学性质弱化机制

结合前文对不同损伤程度砂岩在力学响应、强度弱化、弹性模量及能量演化方面的研究可知,砂岩预损伤后,在循环加载作用下,随着损伤程度增大,其内部微裂纹数量增多,削弱了砂岩的承载骨架,导致峰值强度与弹性模量大幅降低,并使得脆性破坏特征逐步向延性破坏演化。同时,从能量角度的分析结果表明,应变能、耗散能、阻尼能和损伤能在循环加载初期均经历剧烈波动,而在多次循环后趋于相对稳定,其中耗散能占比随损伤程度的增大而显著提升,反映了裂纹扩展、微破裂和砂岩塑性变形在不可逆能量消耗中所占的比重不断加大。此外,高损伤程度的砂岩内部黏弹性与塑性变形耦合作用更显著,裂纹扩展与摩擦滑动在局部区域反复发生,导致阻尼能和损伤能总体水平及波动幅度均高于低损伤程度的砂岩。

综上所述,损伤砂岩力学性质弱化机制可归因为以下3个方面:(1)微裂纹累积与局部应力集中效应。砂岩经预损伤加载后,内部微裂纹逐渐萌生并累积形成微裂纹网络。在后续循环加载作用下,这些微裂纹首先闭合,随后又发生扩展与贯通。在裂纹尖端区域,由于应力集中效应显著增强,造成局部区域高应变能积聚,进而诱发新的微裂纹萌生及原有裂纹扩展。这一过程持续进行,导致有效承载面积减小,岩体内部应力重分布现象加剧,整体承载能力逐步下降。(2)裂纹协同效应诱发岩石弱化。当微裂纹密度持续增大,大量微裂纹开始协同贯通形成裂纹网络。这一网络形成后,裂纹相互作用进一步削弱了损伤砂岩整体的力学刚度,导致岩石表现出明显的塑性软化行为。此时,裂纹扩展不再孤立进行,而是通过裂纹相互交会与连接,引起宏观贯通裂纹的快速发育,岩石强度由逐渐下降转

为急剧衰减。(3)能量耗散加速岩石弱化。循环荷载过程中,损伤砂岩内部裂纹不断闭合和重新打开,这种反复变化造成试样内部颗粒间摩擦、滑移及塑性变形加剧,从而表现出显著的黏弹性阻尼特征。同时,每一次裂纹扩展与颗粒重排均伴随不可逆能量耗散(损伤能)的持续积累。当损伤程度较高时,大部分输入能量被用于不可逆塑性损伤而非弹性能量存储,这进一步加速了裂纹贯通和岩石整体强度的退化过程。

值得强调的是,当损伤程度达到80% UCS时,损伤砂岩已接近强度极限状态,内部微裂纹网络基本贯通形成局部塑性破坏区。这种准破坏状态直接导致岩石在后续加载过程中表现出强烈的非线性塑性软化特征,塑性变形明显增加,使其强度呈现急剧退化趋势。同时,这种高损伤状态下的试样在循环荷载作用下,损伤能和耗散能明显升高。由此说明,损伤砂岩力学弱化机制存在非线性特征。

因此,损伤砂岩在循环荷载作用下的力学弱化并非线性递减,而是随着微裂纹网络的扩展、贯通与能量耗散的交互耦合效应,使岩体整体性能呈现出非线性、加速式的劣化趋势。这一机制清晰解释了损伤砂岩由初期的脆性特征逐渐转为明显延性与软化特征的内在原因。

本研究揭示了损伤砂岩在循环荷载下的力学性质和能量演化规律,为金属矿山和地下工程中围岩支护设计提供了理论依据。根据不同损伤程度下砂岩的峰值强度、弹性模量及能量耗散特性,在支护结构设计中优化支护参数,降低因围岩损伤引发的坍塌风险。此外,研究结果能够指导工程设计人员根据实际围岩损伤状况制定更为合理的施工方案和加固措施。在高损伤程度区域,通过优化施工顺序,采用相应的加固技术,能够有效延缓或防止岩体失稳,保障工程施工安全。

5 结论

(1)随着损伤程度的增大,砂岩试样峰值强度逐渐降低,平均值分别为28.317, 27.284, 26.302, 22.676, 20.249 MPa,降幅依次为3.648%、7.116%、19.921%和28.492%。结合应力—应变曲线分析可知,不同损伤程度的砂岩呈现破坏模式由相对脆性

向复杂的脆—延性转化的规律。此外,随着损伤程度的增大,砂岩试样平均弹性模量显著衰减,说明高损伤程度的砂岩试样更易出现裂纹贯通和微破裂扩展等变形特征。

(2)随着损伤程度的增大,砂岩试样的应变能从初期剧烈波动逐渐趋于平稳。对于低损伤程度的试样,应变能在平稳阶段保持较高水平,耗散能占比较低,表明裂纹尚不发达;相反,高损伤试样裂纹发育充分,能量分配更多向耗散偏移,更易产生内部破裂与变形失稳,表现为耗散能占比更大,即损伤砂岩DS-4耗散能占比为15.779%。

(3)在循环加载中,不同损伤程度的砂岩试样的阻尼能和损伤能均经历了“初始急剧波动—中后期逐步稳定”的变化过程,但高损伤试样在能量耗散水平和波动幅度方面普遍高于低损伤试样。不同损伤程度的损伤能占比分别为15.030%、15.978%、17.508%和23.899%,这表明损伤程度越高,砂岩发生微裂纹扩展和塑性破坏等不可逆能量消耗的比例越大,从而在循环加载过程中表现出更强的脆弱性和更高的潜在失稳风险。

(4)损伤砂岩力学弱化机制本质上是由微裂纹扩展引发的局部应力集中、裂纹网络协同贯通效应和不可逆能量耗散特征三者共同作用所致,其弱化过程呈现出明显的非线性和阶段性特征。

参考文献 (References):

- Hou R B, Zhang K, Tao J, et al, 2019. A nonlinear creep damage coupled model for rock considering the effect of initial damage [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52 (5): 1275-1285.
- Lu A H, Xu J H, Xia Y, et al, 2021. Study on dynamic behavior and energy dissipation of rock considering initial damage effect [J]. *Shock and Vibration*, (1): 7937459.
- Ran Q C, Liang Y P, Zou Q L, et al, 2023. Experimental investigation on mechanical characteristics of red sandstone under graded cyclic loading and its inspirations for stability of overlying strata [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9(1): 11.
- Taheri A, Zhang Y B, Munoz H, 2020. Performance of rock crack stress thresholds determination criteria and investigating strength and confining pressure effects [J]. *Construction and Building Materials*, 243: 118263.
- Wang X H, Zhang S R, Wang C, et al, 2018. Initial damage effect on dynamic compressive behaviors of roller compacted concrete (RCC) under impact loadings [J]. *Construction and Building Materials*, 186: 388-399.
- Yang S Q, Li H, Yang Z, et al, 2024. Three-dimensional peridynamic simulation on triaxial compression failure mechanical behavior of cylindrical marble specimen containing pre-existing fissures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 312: 110600.
- Yu W X, Jin L, Du X L, et al, 2022. Effect of initial damage state on static and dynamic fracture of concrete with different sizes: an experimental study [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 274: 108797.
- Zhang B C, Liang Y P, Zhao Z Y, et al, 2023. Effect of stress amplitude on mechanical and acoustic emission of sandstone under constant-cyclic loading [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(7): 284.
- 李树刚, 陈高峰, 双海清, 等, 2019. 加载速率和初始损伤对砂岩能量演化影响的试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 36(2): 373-380.
- Li Shugang, Chen Gaofeng, Shuang Haiqing, et al, 2019. Experimental study on effect of loading rate and initial damage on energy evolution of sandstone [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 36(2): 373-380.
- 李欣倡, 张智宇, 刘浩杉, 等, 2025. 循环冲击下平行裂隙砂岩动态破坏的围压效应 [J]. *黄金科学技术*, 33(2): 328-338.
- Li Xinchang, Zhang Zhiyu, Liu Haoshan, et al, 2025. Confining pressure effect of dynamic failure of parallel fractured sandstone under cyclic impact [J]. *Gold Science and Technology*, 33(2): 328-338.
- 庞立宁, 薛吉胜, 张震, 2024. 深埋厚顶板工作面采场应力演化规律及区域水力压裂卸压技术研究 [J]. *煤炭工程*, 56(11): 110-117.
- Pang Lining, Xue Jisheng, Zhang Zhen, 2024. Stope stress evolution law of deep and thick roof working face and the regional hydraulic fracturing and pressure relief technology [J]. *Coal Engineering*, 56(11): 110-117.
- 冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等, 2024. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制 [J]. *煤炭科学技术*, 52(4): 177-192.
- Ran Qican, Liang Yunpei, Zou Quanle, et al, 2024. Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism [J]. *Coal Science and Technology*, 52(4): 177-192.
- 王文才, 李俊鹏, 王创业, 等, 2023. 外荷载下青砂岩声发射

- 特征及损伤演化规律[J].黄金科学技术,31(3):516-530. Wang Wencai, Li Junpeng, Wang Chuangye, et al, 2023. Acoustic emission characteristics and damage evolution of green sandstone under external loads[J]. Gold Science and Technology, 31(3): 516-530.
- 王文通,郭沙,李治兴,等,2025.基于核磁共振技术的砂岩孔隙结构冻融损伤演化规律试验研究[J].黄金科学技术,33(1):114-126. Wang Wentong, Guo Sha, Li Zhixing, et al, 2025. Experimental study on the evolution law of freeze-thaw damage of sandstone pore structure based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Gold Science and Technology, 33(1): 114-126.
- 肖峰,曹平,刘智振,等,2022.不同应力上限和加载速率下的黄砂岩疲劳特性研究[J].黄金科学技术,30(2):233-242. Xiao Feng, Cao Ping, Liu Zhizhen, et al, 2022. Study on fatigue characteristics of yellow sandstone under different stress upper limits and loading rates[J]. Gold Science and Technology, 30(2): 233-242.
- 肖桃李,李新平,贾善坡,2015.含2条断续贯通预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,34(12):2455-2462. Xiao Taoli, Li Xinping, Jia Shanpo, 2015. Failure characteristics of rock with two pre-existing transfixion cracks under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(12): 2455-2462.
- 谢志英,许可,陆逸帆,等,2024.三轴压缩下单裂隙位置对复合岩样力学变形与破坏模式的影响[J].黄金科学技术,32(3):458-469. Xie Zhiying, Xu Ke, Lu Yifan, et al, 2024. Influence of single fissure position on mechanical deformation and failure modes of composite rock specimens under triaxial compression[J]. Gold Science and Technology, 32(3): 458-469.
- 徐颖,李成杰,郑强强,等,2019.循环加卸载下泥岩能量演化与损伤特性分析[J].岩石力学与工程学报,38(10):2084-2091. Xu Ying, Li Chengjie, Zheng Qiangqiang, et al, 2019. Analysis of energy evolution and damage characteristics of mudstone under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(10): 2084-2091.
- 叶春烽,谢和平,李存宝,2024.直接剪切下页岩的各向异性破坏特征和强度预测模型[J].工程科学与技术,56(2):257-267. Ye Chunfeng, Xie Heping, Li Cunbao, 2024. Anisotropic failure characteristics and strength prediction model of shale under direct shear[J]. Advanced Engineering Sciences, 56(2): 257-267.
- 尹大伟,丁屹松,汪锋,等,2023.考虑初始损伤的压力水浸煤岩力学特性试验研究[J].煤炭学报,48(12):4417-4432. Yin Dawei, Ding Yisong, Wang Feng, et al, 2023. Experimental study on mechanical properties of coal soaked in pressurized water considering initial damage[J]. Journal of China Coal Society, 48(12): 4417-4432.
- 张碧川,邹全乐,冯增朝,等,2025.基于倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型的渗透率空间分布规律[J].岩石力学与工程学报,44(3):638-650. Zhang Bichuan, Zou Quanle, Feng Zengchao, et al, 2025. Spatial distribution law of permeability based on the mining-induced stress relief boundary model of inclined coal seam in overlying strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 44(3): 638-650.
- 张凯,张东晓,赵勇强,等,2024.损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究[J].煤田地质与勘探,52(3):96-106. Zhang Kai, Zhang Dongxiao, Zhao Yongqiang, et al, 2024. Experimental study on acoustic emission evolution characteristics and response mechanism of damaged rocks[J]. Coal Geology & Exploration, 52(3): 96-106.
- 张培森,许大强,颜伟,等,2023.不同初始损伤程度下循环加卸围压对岩石劣化及渗流特性的影响研究[J].岩石力学与工程学报,42(9):2109-2124. Zhang Peisen, Xu Daqiang, Yan Wei, et al, 2023. Study on the influence of cyclic confining pressure on rock deterioration and seepage characteristics under different initial damage degrees[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(9): 2109-2124.
- 赵佳佳,田世祥,李鹏,等,2023.SiO₂-H₂O纳米流体强化煤尘润湿性的微观机理研究[J].化工学报,74(9):3931-3945. Zhao Jiajia, Tian Shixiang, Li Peng, et al, 2023. Microscopic mechanism of SiO₂-H₂O nanofluids to enhance the wettability of coal dust[J]. CIESC Journal, 74(9): 3931-3945.

Mechanical Behavior and Damage Characteristics of Damaged Sandstone Under Cyclic Loading

LIU Huizhi^{1,2}, YAN Guochao²

1. *Shanxi Dibao Energy Co., Ltd., Taiyuan 030045, Shanxi, China;*

2. *Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030045, Shanxi, China*

Abstract: To ensure the safety and stability of sandstone surrounding rock in deep metal mining environments, this study systematically examined the mechanical behavior and energy evolution characteristics of sandstone subjected to varying degrees of damage under cyclic loading and unloading conditions. Standard cylindrical sandstone specimens underwent pre-loading treatment to induce different damage levels, which were subsequently verified through ultrasonic P-wave velocity tests. Following this, cyclic loading tests were performed under a consistent stress path to thoroughly assess the mechanical response and energy dissipation behavior of the specimens. The findings reveal that as the degree of damage increases, the strength and stiffness of the sandstone progressively diminish. Compared to the undamaged samples, the peak strength values of the damaged specimens decreased by 3.648%, 7.116%, 19.921% and 28.492%, respectively. Furthermore, the stress-strain curves demonstrated a transition from brittle to ductile failure modes. Furthermore, as the degree of damage increased, the average elastic modulus of the sandstone specimens exhibited a significant decline. This suggests that specimens with higher levels of damage are more susceptible to crack penetration and microfracture propagation. An analysis of the energy dynamics revealed that both strain energy and dissipated energy during cyclic loading generally followed a pattern characterized by an “initial drastic fluctuation followed by subsequent stabilization”. For specimens exhibiting low damage levels, strain energy remained relatively high during the stabilization phase, and the proportion of dissipated energy was low, indicating limited crack development. Conversely, specimens with high levels of damage displayed well-developed cracks, with energy distribution shifting predominantly towards dissipation. This shift renders them more vulnerable to internal fracturing and deformation-induced instability, as evidenced by a higher proportion of dissipated energy. The proportion of dissipated energy increased with the degree of damage, accompanied by a notable rise in both damping energy and damage energy contributions. The energy damage ratios for sandstone specimens at varying levels of damage were observed to be 15.030%, 15.978%, 17.508% and 23.899%, respectively. These findings suggest that as the degree of damage increases, there is a corresponding rise in the proportion of irreversible energy consumption attributable to microcrack propagation and plastic deformation. This results in heightened vulnerability and an increased potential risk of instability during cyclic loading. The mechanical weakening mechanism of damaged sandstone is primarily influenced by the interplay of local stress concentration induced by microcrack propagation, cooperative crack networking, and irreversible energy dissipation. This degradation process is characterized by distinct nonlinear and staged features. The outcomes of this study enhance the understanding of the nonlinear weakening mechanisms of damaged sandstone under cyclic loading, and provide essential theoretical insights and practical support for the design of support structures and the management of rock mass stability in deep metal mining environments.

Key words: damaged sandstone; cyclic loading; mechanical behavior; damage characteristics; strain energy