

DOI: 10.11779/CJGE20230267

循环荷载下硬质层理砂岩疲劳损伤机制试验研究

宋战平¹, 程 昱^{1,2,3}, 杨腾添⁴, 杨鹏涛⁵, 潘红伟⁵

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 5. 中铁北京工程局集团有限公司, 北京 102308)

摘要: 列车动载扰动作用下隧道基底围岩的变形开裂蕴含着复杂的力学损伤问题。为探究循环荷载下硬质层理砂岩的疲劳损伤演化机制, 对层理砂岩进行了疲劳力学试验及电镜扫描试验。结果表明: 层理砂岩的宏观裂隙与动态应力-应变曲线存在时效对应关系, 层理效应越明显, 滞回环跃迁越显著。层理砂岩力学参数具有明显的层理劣化效应。随层理倾角增大, 峰值强度呈缓慢衰减—快速降低—急剧增大的趋势, 疲劳寿命与峰值强度呈正相关。弹性模量呈急剧增大—缓慢增大—趋于平缓或降低的趋势, 周期比分界点为 28.57% 和 81.81%。砂岩破裂模式与层理效应密切相关, 包括张拉破裂(I型和II型)、斜剪破裂及复合破裂; 张拉破裂II型具有压杆效应, 破裂面粗糙度略小; 斜剪破裂面粗糙度显著降低, 压—剪作用导致复合破裂断面出现破碎带和光滑断口。循环加载卸载效应导致层理砂岩的临界损伤呈非线性快速增大—近似线性增长—非线性急剧增大演变, Logistic 反函数损伤模型可很好描述临界损伤规律, 疲劳敏感性顺序依次为斜剪破裂型>复合破裂型>张拉破裂型。

关键词: 岩石力学; 循环荷载; 层理砂岩; 疲劳损伤; 破裂机制

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)03-0490-10

作者简介: 宋战平(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学和研究工作。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn。

Experimental study on fatigue damage evolution mechanism of hard layered sandstone under cyclic loading

SONG Zhanping¹, CHENG Yun^{1,2,3}, YANG Tengtian⁴, YANG Pengtao⁵, PAN Hongwei⁵

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China; 4. China Railway Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 5. China Railway Beijing

Group Co., Ltd., Beijing 102308, China)

Abstract: The deformation and cracking of tunnel basement surrounding rock under the disturbance of train dynamic load contain complex mechanical damage problems. The fatigue mechanics tests and electron microscope scanning tests are carried out to explore the evolution mechanism of fatigue damage of hard layered sandstone under cyclic loading. The results show that there is an aging correspondence between macroscopic cracks and dynamic stress-strain curves of layered sandstone. The more obvious the layer effects, the more frequent the stress drop and the more significant the hysteresis loop transition. The peak strength presents a trend of slow decay-fast decrease-sharp increase and the fatigue life is positively correlated with the peak strength. The elastic modulus presents a trend of sharp increase-slow increase-flattening or decrease, and the dividing points of the period ratio are 28.57% and 81.81%. The fracture mode is closely related to the layer effects, and it presents tensile fracture (I and II types), oblique shear fracture type and compound fracture type. The tensile fracture type II has a compression rod effect and the roughness of fracture surface is slightly smaller. The roughness of the fracture surface of oblique shear fracture type decreases significantly, and compression-shear action leads to fracture zone and smooth fracture of the composite fracture section. The cyclic loading and unloading effects result in the evolution of critical damage of layer sandstone with an evolution trend of nonlinear rapid increase - approximate linear increase - nonlinear sharp increase. The logistic inverse function damage model can well describe the critical damage laws, and the order of fatigue sensitivity is oblique shear fracture type > compound fracture type > tensile fracture type (I and II).

Key words: rock mechanics; cyclic loading; hard layered sandstone; fatigue damage; fracture mechanism

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178393, 51578447); 陕西省创新能力支撑计划-创新团队项目(2020TD-005)

收稿日期: 2023-03-28

0 引言

随着西部大开发战略的持续推进, 大量工程项目在沉积岩体中兴建, 沉积岩隧道的建造数量与日俱增。沉积岩具有典型沉积分层特质^[1-2], 物理力学特征的各向异性显著。荷载扰动环境下赋存围岩蕴含着疲劳力学问题^[3], 导致围岩变形灾害频发。因此, 研究层理岩石的疲劳损伤对围岩工程意义重大。

国内外学者对典型沉积岩的宏微观力学特征进行了广泛关注。Attewell 等^[4]揭示了页岩关键力学指标的各向异性规律; Wasantha 等^[5]研究了层理岩石的破裂模式及结构倾向效应; 周辉等^[6]探究了软硬岩层间的错动效应及不协调变形机理; 李成杰等^[7]揭示了组合体岩样变形差异引起的应变异常规律。沉积岩力学特性与岩层倾角有关, 王兵武等^[8]探究了复合岩样峰后应力与岩层倾角的相关性; Tien 等^[9]分析了岩层倾角对层状岩体变形特性和破坏模式的影响机理。复合层理岩体的研究弥补了单一岩性研究的不足, 既有研究逐渐关注到层理效应对岩体变形破裂形式的影响。围岩的疲劳变形属于动静组合荷载下的力学扰动问题, 岩体结构调整诱发岩层滑移。Tutuncu 等^[10]研究发现应力-应变滞回曲线特征与循环荷载的频率及振幅相关; Okur 等^[11]研究了周期荷载作用下砂岩的承载强度及疲劳损伤特性。周家文等^[12]研究表明砂岩的细观结构显著影响着宏观力学特性; 尤明庆^[13]发现岩石破坏形式包括剪切滑移、拉伸劈裂及压杆失稳 3 种类型。Damjanac 等^[14]发现砂岩长期强度的下限值约为 40% 单轴抗压强度; 梁昌玉等^[15]发现砂岩的裂纹起裂应力约为 40%~50% 单轴压缩强度。由此可见, 工程岩体的时效疲劳特性与循环荷载强度及加卸载次数密切相关。

隧底沉积岩的劣化变形已成为隧道工程建设的突出难题, 而中国铁路隧道普遍存在隧底岩体的劣化变形灾害。既有研究对沉积软岩的疲劳力学特征进行了广泛关注, 工程岩体稳定性与扰动参数有关, 这对探究循环荷载下岩石疲劳损伤特征研究提出更高要求。因此, 沉积硬质的疲劳损伤机制仍需进一步探究。以硬质层理砂岩为试验材料, 开展循环荷载下的疲劳力学试验及微观电镜扫描试验, 基于宏微观特征揭示了层理效应对疲劳损伤的影响机制。

1 试验概述

1.1 试验设备

循环加卸载试验在陕西省岩土与地下空间工程重点实验室完成。试验设备为电液伺服岩石疲劳力学试

验机(图 1), 最大加载强度为 600 kN, 轴压负荷精度为 $\pm 5\%$, 应力分辨率为 0.10 kN。可实现试验力、变形、位移 3 种控制方式, 刚度指标 $k \geq 6000 \text{ kN/mm/m}$, 变形测量范围为 $\pm 10 \text{ mm}$, 应变精度为 0.0001。层理砂岩的微观电镜扫描试验在西北大学化学与材料科学学院测试中心完成, 试验设备为 ZEISS-Sigma 300 型场发射扫描电镜, 分辨率为 $1 \text{ nm}@30\text{kV}$, 放大倍数为 $10\sim 1000000\times$, 存储分辨率为 $32 \text{ k} \times 24 \text{ k pixels}$ 。



图 1 循环加卸载试验系统

Fig. 1 Testing system of cyclic loading and unloading

1.2 硬质砂岩特性

砂岩取自四川成都, 沉积构造清晰, 层理厚度均匀, 呈紫红色。按照《国际岩石力学学会 ISRM 试验规程》, 通过水刀钻芯、切磨等工序制成 $D \times H = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的柱状岩样, 如图 2。岩芯直径及端面的不平行度分别不大于 $0.20, 0.05 \text{ mm}$ 以降低应力集中带来的试验误差。砂岩的层理倾角为 $0^\circ, 22.50^\circ, 45^\circ, 67.50^\circ, 90^\circ$, 平均密度为 $2.46\sim 2.49 \text{ g/cm}^3$, 纵波波速为 $3.63\sim 4.09 \text{ km/s}$ 。基于饱和层理砂岩的力学试验表明, $0^\circ\sim 90^\circ$ 砂岩的平均峰值强度分别为 $69.42, 63.02, 52.82, 38.90, 48.61 \text{ MPa}$, 属于典型沉积硬岩^[1]。

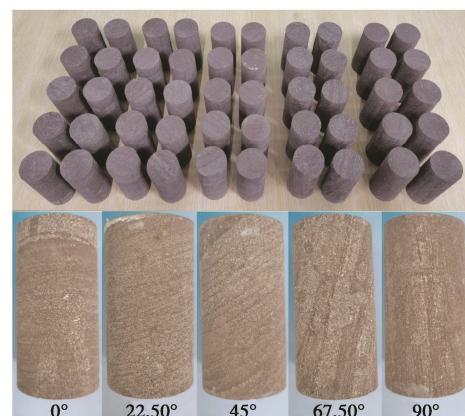


图 2 标准砂岩岩样

Fig. 2 Standard samples of sandstone

X 射线衍射试验表明, 砂岩矿物包括斜长石 (71%)、石英 (10%)、钾长石 (3%)、方解石 (4%),

赤铁矿(2%)、蛭石(4%)、蛇纹石(2%)等。图3为EDS能谱分布图($5000\times$)，砂岩微观断口的矿物以斜长石($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)、石英(SiO_2)及钾长石($\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot6\text{SiO}_2$)为主，含量相差不大；簇状或圆形状矿物晶体间夹杂着微观孔隙，矿物颗粒间通过胶结物质耦合连接，矿物晶体排列的紧密程度影响着砂岩的物理力学特性。

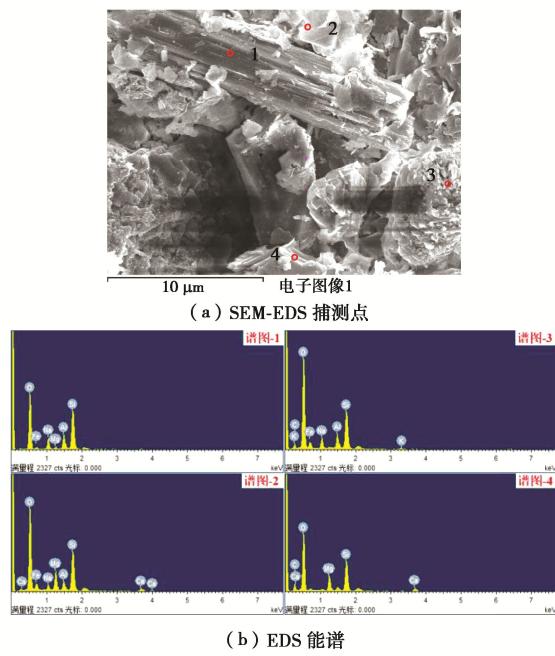


图3 砂岩的SEM-EDS能谱图

Fig. 3 SEM-EDS energy spectra of sandstone

1.3 试验方案

参考《水电水利工程岩石规范：DLT53682007》，加卸载方式为应力控制，如图4所示。

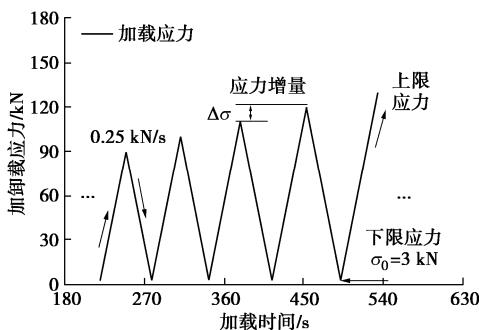


图4 循环加卸载的应力路径

Fig. 4 Stress paths of cyclic loading and unloading

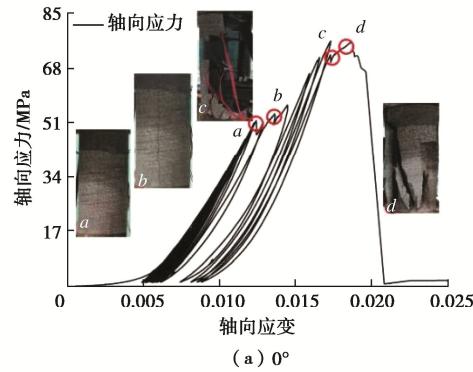
试验步骤：①将砂岩在 25°C 条件下抽气风干48 h；测试纵波波速并编号分组（表1）。②组装砂岩后，以 0.05 kN/s 预加载至 0.30 kN 使岩样端面与压头接触；以 0.25 kN/s 逐渐加载至初始上限应力(10 kN)，再以相同速率卸载至 3 kN 。按照上述方法，对所有岩样依次进行循环加卸载试验。③分级循环加卸载的每一周

期卸载下限应力(σ_0)恒定为 3 kN ，以防止岩样脱落导致数据失真。重新加载下一级上限应力超过上一级上限应力 10 kN （应力增量 $\Delta\sigma = \sigma_i - \sigma_{i-1} = 10\text{ kN}$ ），上限应力分别为 $10, 20, 30, \dots, 80, 90, \dots$ ，直至砂岩发生疲劳破裂。④为获得峰后破裂形态，试验机的应力保护值设置为 25 MPa 。即破裂应力降大于 25 MPa 时，停止应力加载。为降低试验偶然性，每种倾角砂岩进行3次试验。⑤循环加卸载后，以典型破裂岩块为微观观测试样，进行电镜扫描（SEM）获得断口形态图像。

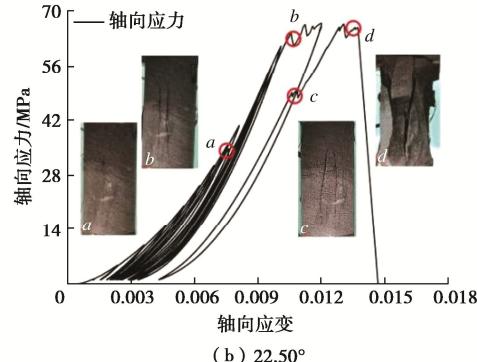
2 疲劳力学特征分析

2.1 动态应力-应变曲线特征

图5仅给出典型硬质层理砂岩的动态应力-应变曲线。图5(a)表明， 0° 砂岩的动态应力-应变曲线大体呈“密集-稀疏”分布，层理效应引起应力降而诱发纵向裂隙。若选用加载应力与峰值比(σ/σ_c)作为判断依据，当 $\sigma/\sigma_c \leq 0.54$ 时，砂岩的原生裂隙被压密导致刚度相对提高，动态应力-应变曲线呈密集分布，第1条张拉裂隙(a , $\sigma/\sigma_c=0.67$)形成表明初期损伤开始累积。当 $\sigma/\sigma_c=0.70$ 时，塑性变形导致新生裂隙萌生，累积损伤加剧，动态应力-应变曲线变得稀疏(b)。当 $\sigma/\sigma_c=0.94$ 时，动态应力-应变曲线出现大幅应力降，裂隙开始贯通(c 点)。当 $\sigma/\sigma_c=0.97$ 时，砂岩的宏观裂隙贯通层理，动态应力-应变曲线迅速下降(d)预示着劈裂破坏。



(a) 0°



(b) 22.50°

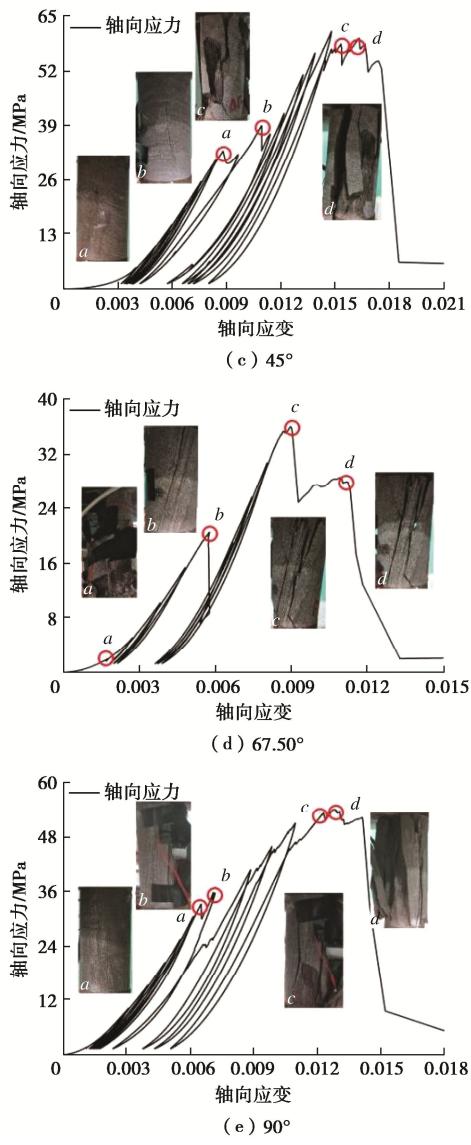


图 5 层理砂岩动态应力-应变曲线形态

Fig. 5 Patterns of dynamic stress-strain curve of layered sandstone

图 5 (b) 表明, 22.50° 砂岩的动态应力-应变曲线形态与 0° 砂岩相似, 层理倾角增大导致动态应力-应变曲线较早出现应力降 ($\sigma/\sigma_c=0.53$); $\sigma/\sigma_c=0.94$ 时, 砂岩形成两条平行张拉裂隙, 随后发生劈裂破坏且破坏程度略大。这是由于增大的层理倾角导致了内部应力调整及结构重组, 裂隙萌生与扩展速度加快。图 5 (c) ~ (d) 表明, 45° ~ 67.50° 砂岩的层理效应显著提高, 动态应力-应变曲线由密集向稀疏分布转变, 大幅应力降导致滞回环向后推移, 出现间断或跃迁的特征。当 $\sigma/\sigma_c < 0.50$ 时, 砂岩尚未微形成宏观裂隙且无应力降出现。当 $\sigma/\sigma_c=0.52$ 时, 表面出现第 1 条张拉裂隙 (a), 应力降幅度相比 22.50° 砂岩显著增强, 稀疏分布的滞回环表明层理损伤累积。随着应力增大, 塑性变形显著, $\sigma/\sigma_c=0.63$ 附近出现连续应力降, 张拉、斜剪裂隙交汇而发生破裂 (c, d), 承载力被显著劣化。当 $\sigma/\sigma_c=1$ 时, 宏观裂隙贯通发生斜

剪破坏, 动态应力-应变曲线出现骤降; 由于端部约束, 峰后砂岩仍具一定承载力但贯通裂隙形成了滑移面。由此表明, 45° ~ 67.50° 砂岩的层理效应显著 (特别是 67.50°), 滞回环出现间断跃迁, 疲劳寿命降低。

图 5 (e) 表明, 90° 砂岩的层理效应被弱化, 动态应力-应变曲线由密集分布过度为稀疏分布, 滞回环未出现间断性跃迁, 峰后应力降偏小, 承载力明显大于 67.50°。分析可知, $\sigma/\sigma_c \leq 0.56$ 时滞回环呈密集分布, $\sigma/\sigma_c=0.61$ 时形成张拉微裂隙; $\sigma/\sigma_c=0.66$ 时滞回环呈稀疏分布, 出现明显应力降, 宏观张拉裂隙出现但尚未贯通。当应力加载到 $\sigma/\sigma_c=0.98$ 时, 动态应力-应变曲线发生骤降, 平行张拉裂隙逐渐贯穿岩样, 劈裂形成多组条状岩块 (d)。

2.2 峰值强度及疲劳寿命特征

层理砂岩的峰值强度、峰值应变及疲劳寿命分布特征, 见表 1。峰值强度具有明显的疲劳劣化效应。随着层理倾角增大, 静态与动态峰值强度 (σ_c) 均呈缓慢衰减、快速降低、急剧增大的演化趋势, 分界点位于 45° 和 67.50° 附近。0° 时静态及动态峰值强度最大分别为 91.48, 76.41 MPa, 67.50° 时均达到最小, 90° 时出现急剧增大, 总体呈勺型^[17-18]分布。

表 1 层理砂岩峰值强度、峰值应变及疲劳寿命

Table 1 Peak strengths, peak strains and fatigue lives of layered sandstone

试样	静态	动态	动态	疲劳	破裂强	破裂
	σ_c /MPa	σ_c /MPa	ε_c /‰	寿命 N	σ_{fc} /MPa	ε_{fc} /‰
0°-1	90.26	74.02	17.00	16	62.59	19.08
0°-2	91.48	76.41	17.32	16	66.88	19.63
0°-3	93.21	76.56	18.02	17	68.70	20.01
平均值	91.65	75.66	17.45	16.33	66.06	19.57
22.50°-1	80.99	63.21	11.95	13	63.22	10.58
22.50°-2	85.06	64.33	13.44	15	66.59	13.99
22.50°-3	83.55	66.89	12.01	14	65.76	13.75
平均值	83.20	64.81	12.47	14	65.19	12.77
45°-1	75.21	62.56	14.08	14	55.68	17.87
45°-2	72.04	61.20	13.95	13	52.41	17.55
45°-3	69.88	58.33	12.67	11	50.01	16.09
平均值	72.38	60.70	13.57	12.67	52.70	17.17
67.50°-1	52.23	38.57	9.06	8	29.08	11.88
67.50°-2	48.06	35.94	8.97	7	26.70	11.32
67.50°-3	40.16	32.09	7.56	7	26.11	10.25
平均值	46.82	35.53	8.53	7.33	27.30	11.15
90°-1	79.89	58.56	13.77	13	53.04	14.99
90°-2	70.28	53.41	11.33	13	50.21	14.08
90°-3	75.34	54.10	12.85	13	51.08	14.17
平均值	75.17	55.36	12.65	13	51.44	14.41

相比静态试验, 循环加卸载下动态峰值强度具有显著的疲劳劣化效应, 0° ~ 45° 时峰值强度劣化不显著, 降幅为 15.05% ~ 19.94%; 67.50° ~ 90° 时峰值强度劣化程度增大, 降幅增至 25.22% ~ 28.19%。这是由于循环加卸载诱使填充有胶结物的沉积层发生活化变形, 内部裂隙扩展, 发生损伤累积。应力卸载促使

端部约束释放, 岩层结构调整导致层理弱面发生不协调变形^[16-17, 19], 诱使岩层发生滑移扩容。图6为层理砂岩峰值强度与疲劳寿命的关系, 层理结构主导着砂岩疲劳变形, 疲劳寿命随层理倾角增大呈先降低、后增大趋势, $45^\circ \sim 67.50^\circ$ 时疲劳寿命偏小, 0° 和 90° 时疲劳寿命偏大。峰值强度与疲劳寿命对数呈线性相关, 峰值强度越大, 疲劳寿命越大。67.50°时岩层结构异性特征显著, 峰值强度与疲劳寿命的相关性不明显。

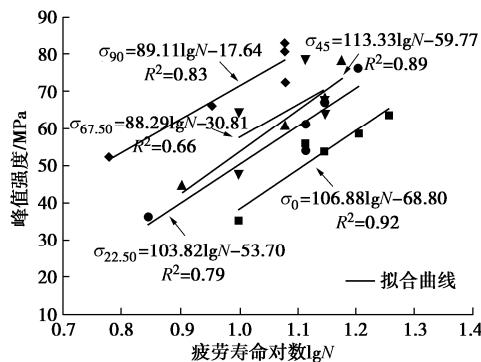


图6 层理砂岩峰值强度与疲劳寿命的关系

Fig. 6 Relationship between peak strength and fatigue life of layered sandstone

2.3 周期峰值应变特征

图7为层理砂岩周期峰值应变的柱状分布特征, 可以看出层理砂岩的周期峰值应变均包括初始变形、等速变形、加速变形的演化过程, 持续时间比分别为 $6.25\% \sim 28.57\%$, $42.86\% \sim 85.71\%$ 和 $7.14\% \sim 36.36\%$ 。分析原因表明, 加载初期的原生裂隙主导着砂岩变形, 周期峰值应变呈缓慢增大趋势。随着应力增大, 局部裂隙开始萌生扩展, 疲劳损伤累积并不断抵消原生裂隙闭合产生的强化效应^[4, 20], 周期峰值应变进入等速变形阶段, 内部裂隙呈稳定扩展趋势。随着应力持续增大, 次生裂隙不断交汇与贯通, 层理弱面发生活化开裂, 层间滑移引起局部应力降, 周期峰值应变呈加速增长趋势。峰值强度附近, 宏观裂隙面发生滑移形成宏观断面, 变形程度剧增导致峰值应变突增, 预示

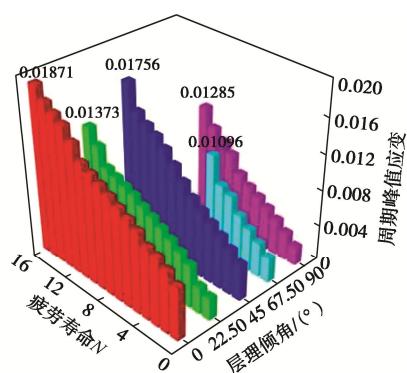


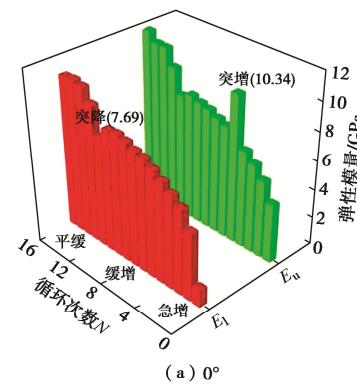
图7 层理砂岩周期峰值应变的柱状分布

Fig. 7 Pillar distribution of periodic peak strain of layered sandstone

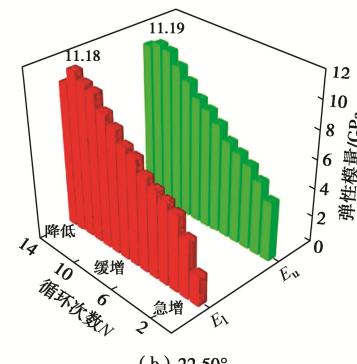
着砂岩破裂。由于层理结构的差异性, 最后一个加载峰值下的扩容程度未能导致所有砂岩发生脆性破裂, 导致破裂应变 (ε_{cc}) 与周期峰值应变 (ε_c) 存在差异。

2.4 弹性模量特征

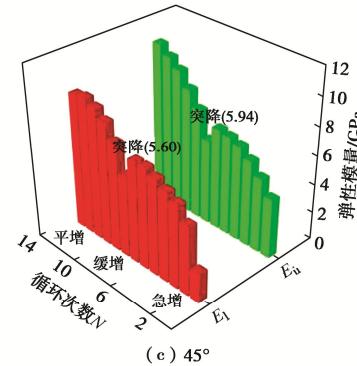
加卸载弹性模量 (E_l , E_u) 与循环次数 (N) 的关系, 如图8所示。加卸载弹性模量因层理结构差异具有不同的响应特征, 大体经历急剧增大、缓慢增大、趋于平缓或降低的演变趋势。



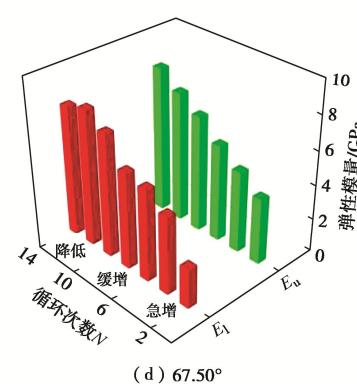
(a) 0°



(b) 22.50°



(c) 45°



(d) 67.50°

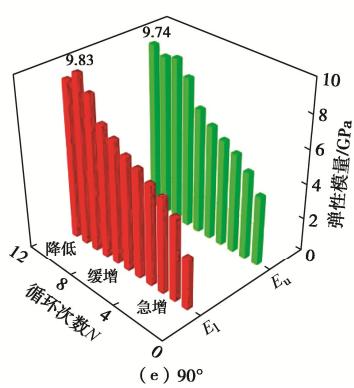


图 8 层理砂岩的弹性模量分布

Fig. 8 Distribution of elastic modulus of layered sandstone

若引入周期比(阶段周期/总周期, N/N_{total})作为判断依据, 当 $N/N_{\text{total}} < 12.50\% \sim 28.57\%$ 时, 内部原生裂隙被压缩, 弹性变形被强化导致 E_l , E_u 均呈非线性急剧增大。加载初期的 E_l 明显小于 E_u , 研究^[21]认为与前期应力引起的内部应力调整有关。当 $28.57\% \leq N/N_{\text{total}} < 60\% \sim 81.81\%$ 时, 内部裂隙的演化伴随着应变能累积, 加载应力诱使裂隙扩展, 疲劳损伤开始抵消加载强化作用, 导致 E_l , E_u 大体呈缓慢增大趋势。岩层间的应力交互作用引起了 E_l , E_u 值的局部突变, 0° 时 E_l , E_u 分别在 $N=12$ 和 5 时发生突降(7.69 GPa)和突增(10.34 GPa), 45° 时 E_l , E_u 分别在 $N=8$ 和 7 时发生突降(5.60, 5.94 GPa)。另外, E_l 和 E_u 出现了先逐渐靠近、后缓慢分离的变化规律, E_l 和 E_u 近似相等时意味着砂岩接近脆性变形。 E_l 和 E_u 的差值增大则表征不可逆变形的累积, 这与既有研究^[22]一致。当 $N/N_{\text{total}} \geq 81.81\%$ 时, 内部的裂隙扩展为主导优势, 次生裂隙交汇贯通形成宏观裂纹, E_l , E_u 均呈趋于平缓或降低趋势, 这与千枚岩^[23]的弹性模量的演化特征具有一致性。加载至破裂强度时宏观破裂面的形成诱使弹性模量降低。

3 宏微观破裂机制

3.1 裂隙分布形态

图 9 为层理砂岩的宏观裂隙分布形态, 破裂模式包括张拉破裂 I型(0° 和 22.50°)、张拉破裂 II型(90°)、斜剪破裂型(67.50°)及复合破裂型(45°)。图 9(a)表明, 张拉破裂 I型(以 0° 代表)的主裂隙(ab , cd , ef , gh)扩展路径与层理结构近似垂直, 次生裂隙多诱发于上端面。这是由于加载应力与层理弱面垂直, 环向膨胀变形微弱, 弱面特征差异导致集中应力。当局部弱层黏聚力不足以抵抗结构变形时, 导致微小斜剪裂隙(ef , kl)出现。张拉破裂 II型的裂

隙扩展存在本质差异, 如图 9(b)。 90° 时层理结构与加载应力并联, 岩石结构受压形成的压杆效应^[13]导致弱面开裂, 张拉裂隙沿弱面的贯穿程度明显增大。非稳定扩展阶段的砂岩形成了顺层理张拉裂隙(ab , cd , ef , gh), 局部衍生有未贯通的次生斜剪裂隙及张拉裂隙(ij , ik)。砂岩基岩结构对承载能力起主控作用, 以张拉裂隙分布为主。

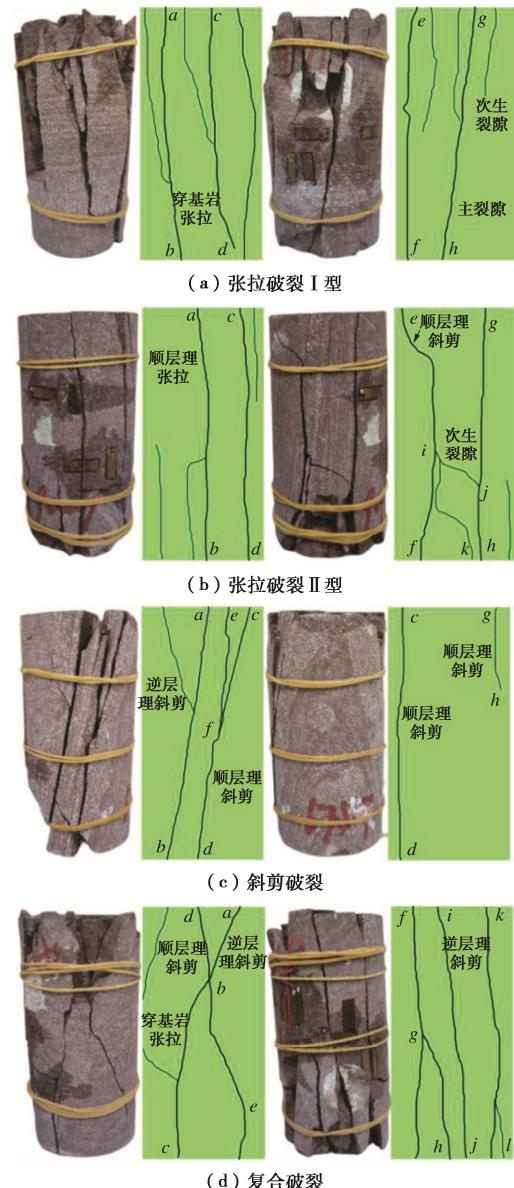


图 9 层理砂岩的宏观裂隙形态

Fig. 9 Patterns of macroscopic fissure of layered sandstone

图 9(c)表明, 67.50° 时层理效应显著, 荷载作用下弱面间的裂隙快速扩展, 形成了 2 条与层理平行的顺层理斜剪裂隙(ab , cd), 主裂隙的扩展诱生了局部逆层理斜剪裂隙和顺层理斜剪裂隙。比较而言, 斜剪破裂砂岩的主裂隙数量偏少, 几乎未出现张拉裂隙, 破裂面形成了斜切岩板及 V 型破碎区(efc)。由图 9(d)可知, 45° 砂岩的破裂模式存在由张拉破裂向斜

剪破裂过度,压剪-张拉联合力学作用下破坏面形成了张拉裂隙、斜剪裂隙。相比张拉破裂,复合破裂砂岩(45°)的层理劣化效应较为显著,但仍不足以引起纯斜剪破裂,导致了斜剪-张拉裂隙的交替扩展。图9(d)表明 45° 时端部约束作用诱生了端部压缩核(db_a),逆层理斜剪裂隙(ab)与顺层理斜剪裂隙(db)交汇后扩展为穿基岩张拉裂隙(bc)及顺层理斜剪裂隙(be),最终形成X型共轭剪切破裂面;层理引裂作用下张拉裂隙(fg)扩展形成了逆层理斜剪裂隙(gh)。

3.2 微观断口形貌特征

图10为层理砂岩的微观断口形貌特征。图10(a)表明,张拉破裂I型砂岩主要以脆性张拉断裂为主,断口比较光滑,形成了平滑面状断口。循环作用导致岩层开裂,胶结体、岩屑及破裂矿物晶体等散落,形成了胶结体间孔隙及晶体间孔隙。这是由于加卸载效应导致了层理胶结位置发生错动开裂,引起了胶-晶间衍生张拉裂隙,致使基岩块体断裂分离并形成破碎带。

图10(b)表明,相比张拉破裂I型,张拉破裂II型砂岩的破裂断面粗糙度略小,微观断口或断面比较平滑,无明显凸起或穿晶裂隙。这是由于应力扰动下层理弱面发生张拉破裂时,主要以胶结体开裂、贯通形成破裂面为主,仅有局部矿物晶体的张拉断裂。宏观破裂面发生了摩擦、撕裂,引起局部结构面出现了一致次序的张拉撕裂、摩擦划痕或晶间裂隙。张拉破裂形成的压杆效应引起了矿物晶体间的力学作用,形成了晶间贯穿裂隙。矿物颗粒承载强度差异引起的晶体楔入作用,导致了周边岩层开裂、晶间贯穿裂隙汇聚,这种损伤行为与晶体间黏聚力、晶体-胶结体间的胶结强度密切相关。

由图10(c)可知 45° 砂岩弱面滑移变形对局部矿物颗粒产生了脆性剪切或撕裂作用,导致平滑断面出现,断口形成了簇状撕裂断痕及滑移断痕。由此可知,相比张拉破裂I型,斜剪破裂型的破裂面粗糙度显著降低,未出现明显的破碎带。图10(d)表明砂岩由张拉过渡为斜剪破裂,断口形貌、微裂隙形态与张拉破裂型略有差异。 45° 砂岩的层理效应逐渐凸显,破裂面以张拉、剪切变形为主,胶结弱面最先出现斜剪倾向,诱使矿物晶体-胶结体界面、晶体-晶体间出现张拉裂隙、胶结体间孔隙;胶结体因受压-剪作用形成破碎带及片状或絮状的散落胶结物。SEM图像表明,斜剪受压导致砂岩断面形成了平滑断口、棱状断口、断崖式状断口,断口未形成明显晶间裂隙或穿晶裂隙。

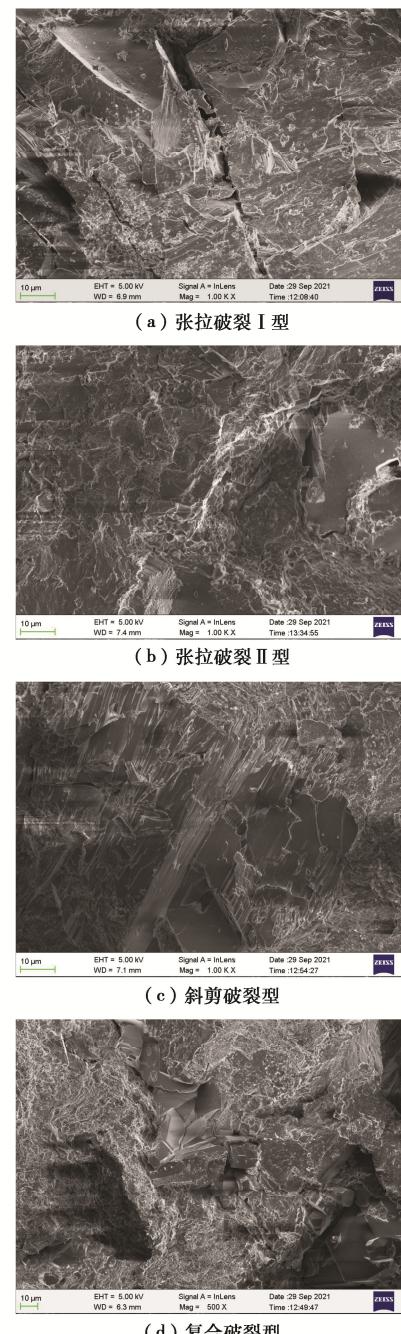


图10 层理砂岩的微观断口 SEM 图像

Fig. 10 Microfracture SEM images of layered sandstone

4 非线性临界损伤演化特征

岩样破坏本质上为塑性变形向极限承载能力的过度,吴政等^[24]将岩石峰值应变对应的损伤称为临界损伤。将第N级荷载下的临界损伤(D_{max})定义为峰值强度(σ_{max})、周期峰值应变(ε_{max})及弹性模量(E_l)的函数:

$$D_{max} = 1 - \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max} E_l} \quad . \quad (1)$$

图11为层理砂岩临界损伤与循环次数的关系。初始演化阶段(1~3周期),临界损伤处于低水平,呈

非线性快速增大, 张拉破裂砂岩的初始损伤明显小于斜剪破裂或复合破裂砂岩。该阶段新生裂隙所占比相对较少^[25], 砂岩处于压密变形阶段。低速演化阶段临界损伤近似线性增长, 斜剪破裂型岩样的损伤增幅明显大于张拉破裂型, 与复合破裂型砂岩的损伤值相差不大。这是由于岩层结构逐渐适应了加卸载环境, 新生裂隙与原生裂隙的作用不断相互抵消^[20, 25], 总裂隙处于稳定扩展态势, 应力调整达到新的平衡阶段, 疲劳变形进入稳定阶段, 周期比为 70%~80%。临界损伤的波动性突增表明局部岩层裂损。加速演化阶段, 随着上限应力增大, 次生裂隙发生贯通形成宏观破裂面, 不可逆变形快速累积。临界损伤呈非线性急剧增大, 最后一级荷载下的临界损伤为 0.8833~0.9692。临界损伤的突增预示着砂岩的整体破裂。

图 11 表明临界损伤分布符合反 S 型函数, 表征临界损伤的时效演变规律。引入 Logistic 函数:

$$Y = \frac{a}{1 + b e^{mX}} \quad . \quad (2)$$

式中: Y 为因变量; X 为自变量; a , b , m 为参量。

Logistic 反函数为

$$X = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{a}{bY} - \frac{1}{b} \right) \quad . \quad (3)$$

既令 $1/m=c_1$, $a/b=c_2$, $-1/b=c_3$, 则临界损伤模型表示为

$$D_{\max} = c_1 \ln(c_2 / N + c_3) \quad . \quad (4)$$

基于损伤模型利用 1Stopt 优化软件对临界损伤数据进行回归分析, 相关系数 (R^2) 均大于 90%, 表明 Logistic 反函数损伤模型可以很好的描述砂岩临界损伤规律。若以损伤低速演化阶段的线性斜率来表征峰前损伤规律, 即临界损伤对层理结构的响应因子 (K_{D_c})。由此可知, 67.50° 时疲劳变形敏感性最显著, $K_{D_c}=0.0577$; $0^\circ \sim 22.50^\circ$ 及 90° 时疲劳变形敏感性偏小, $K_{D_c}=0.0245\sim 0.0312$; 45° 时疲劳变形敏感性处于中等水平, $K_{D_c}=0.0363$, 这与前文的破裂机理一致。

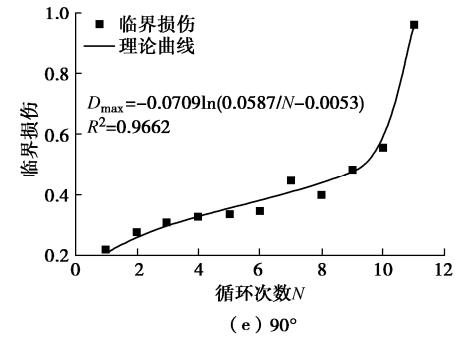
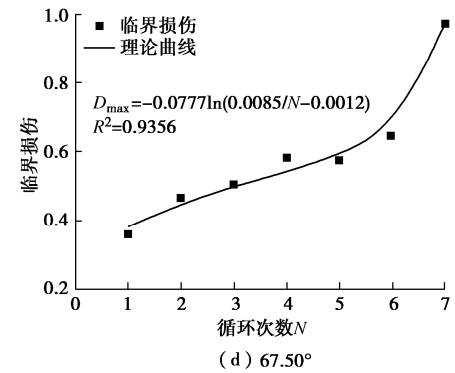
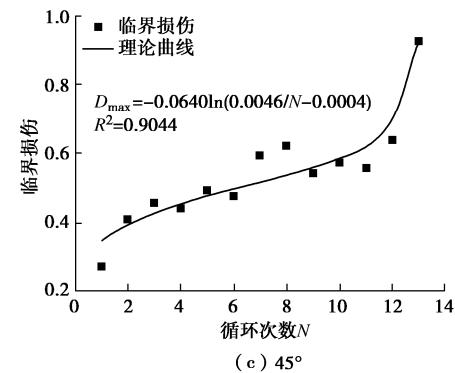
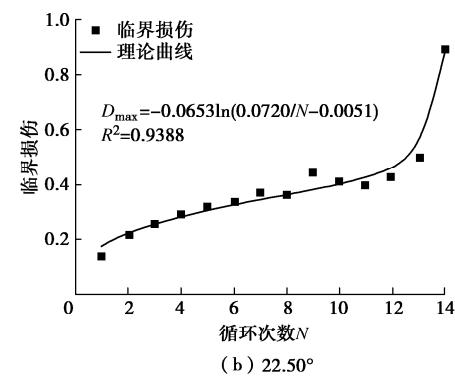
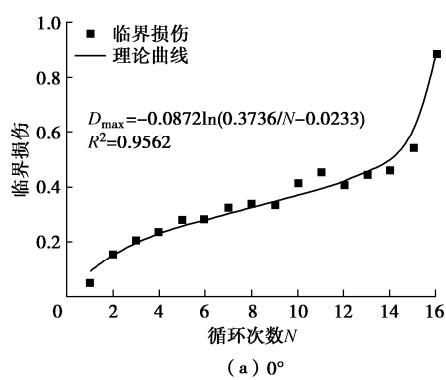


图 11 层理砂岩的临界损伤模型方程
Fig. 11 Critical damage model equation for layered sandstone

5 结 论

(1) 层理砂岩裂隙与动态应力-应变曲线存在时效对应关系, 层理效应对滞回环影响显著。 $0^\circ \sim 22.50^\circ$ 时层理效应不明显, 滞回曲线呈密集-稀疏分布; $45^\circ \sim 67.50^\circ$ 时层理效应增强, 滞回曲线呈间断性跃迁, 疲劳寿命降低。 90° 时压杆效应增强, 滞回曲线由密集向稀疏过渡。

(2) 力学参数具有层理劣化效应。峰值强度呈缓慢衰减—快速降低—急剧增大的趋势, 疲劳寿命与峰值强度呈正相关。层理结构对弹性模量影响较大, 周期比 $N/N_{\text{total}} < 12.50\% \sim 28.57\%$ 时, E_l, E_u 呈非线性急剧增大; $28.57\% \leq N/N_{\text{total}} < 60\% \sim 81.81\%$ 时, E_l, E_u 呈逐渐缓慢增大; 当 $N/N_{\text{total}} \geq 81.81\%$ 时, E_l, E_u 呈趋于平缓或降低。

(3) 破裂模式包括张拉破裂 I 型和 II 型、斜剪破裂型及复合破裂型。相比张拉破裂 I 型, 张拉破裂 II 型的压杆效应导致破裂面粗糙度降低。斜剪破裂型砂岩破裂面未出现明显破碎带。复合破裂型砂岩断面出现裂隙双重演化特征, 压-剪作用形成破碎带和光滑断口。

(4) 循环加卸载效应导致临界损伤呈非线性快速增大、近似线性增长、非线性急剧增大趋势, Logistic 反函数损伤模型可以很好描述临界损伤规律。层理砂岩的疲劳敏感性依次为斜剪破裂型>复合破裂型>张拉破裂型。

参考文献:

- [1] 宋战平, 程 昽, 杨腾添, 等. 渗透-应力耦合作用下灰岩压缩破坏及声发射特性分析[J]. 煤炭学报, 2019, **44**(9): 2751-2759. (SONG Zhanping, CHENG Yun, YANG Tengtian, et al. Analysis of compression failure and acoustic emission characteristics of limestone under permeability-stress coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2019, **44**(9): 2751-2759. (in Chinese))
- [2] 宋战平, 程 昝, 杨腾添, 等. 渗透压作用对灰岩孔隙结构演化规律影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4607-4619, 4643. (SONG Zhanping, CHENG Yun, YANG Tengtian, et al. Experimental study of the influence of osmotic pressure on pore structure evolution in limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 4607-4619, 4643. (in Chinese))
- [3] 赵云阁, 黄麟淇, 李夕兵. 岩石损伤强度及峰值强度前后阶段的声发射识别[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(10): 1908-1916. (ZHAO Yunge, HUANG Linqi, LI Xibing. Identification of stages before and after damage strength and peak strength using acoustic emission tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(10): 1908-1916. (in Chinese))
- [4] ATTEWELL P B, SANDFORD M R. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock—III[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, **11**(11): 439-451.
- [5] WASANTHA P L P, RANJITH P G, SHAO S S. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: use of acoustic emission[J]. Ultrasonics, 2014, **54**(1): 217-226.
- [6] 周 辉, 宋 明, 张传庆, 等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 465-473. (ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 465-473. (in Chinese))
- [7] 李成杰, 徐 颖, 冯明伟, 等. 单轴荷载下类煤岩组合体变形规律及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(5): 1773-1782. (LI Chengjie, XU Ying, FENG Mingming, et al. Deformation law and failure mechanism of coal-rock-like combined body under uniaxial loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(5): 1773-1782. (in Chinese))
- [8] 王兵武, 李银平, 杨春和, 等. 界面倾角对复合层状物理模型材料力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊2): 139-147. (WANG Bingwu, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Influences of interface inclination on mechanical properties of composite bedded physical model material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 139-147. (in Chinese))
- [9] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(8): 1163-1181.
- [10] TUTUNCU N. Intralaminar failure stresses due to centrifugal forces in polar-anisotropic circular plates[J]. Journal of Composite Materials, 1998, **32**(21): 1948-1963.
- [11] OKUR D V, ANSAL A. Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, **27**(9): 843-854.
- [12] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1172-1183. (ZHOU Jiawen, YANG Xingguo, FU Wenxi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1172-1183. (in Chinese))
- [13] 尤明庆. 岩样单轴压缩的失稳破坏和试验机加载性能[J]. 岩土力学, 1998, **19**(3): 43-49. (YOU Mingqing. Instable

- failure of rock specimen in uniaxial compression and the loading behavior of testing machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(3): 43-49. (in Chinese))
- [14] DAMJANAC B, FAIRHURST C. Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, **43**(5): 513-531.
- [15] 梁昌玉, 李晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1830-1838. (LIANG Changyu, LI Xiao, WANG Shengxing, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1830-1838. (in Chinese))
- [16] CHENG Y, SONG Z P, YANG T T, et al. Investigating the aging damage evolution characteristics of layered hard sandstone using digital image correlation[J]. Construction and Building Materials, 2022, **353**:128838-128856.
- [17] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 609-616. (HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 609-616. (in Chinese))
- [18] 邓华锋, 李涛, 李建林, 等. 层状岩体各向异性声学和力学参数计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊1): 2725-2732. (DENG Huafeng, LI Tao, LI Jianlin, et al. Study on calculation method of anisotropic acoustic and mechanical parameters of layered rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S1): 2725-2732. (in Chinese))
- [19] 李彦伟, 姜耀东, 杨英明, 等. 煤单轴抗压强度特性的加载速率效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, **33**(4): 754-760. (LI Yanwei, JIANG Yaodong, YANG Yingming, et al. Research on loading rate effect of uniaxial compressive strength of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, **33**(4): 754-760. (in Chinese))
- [20] 程昀, 宋战平, 金解放, 等. 应力卸载过程砂岩应力波传播及衰减特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(8): 151-158. (CHENG Yun, SONG Zhanping, JIN Jiefang, et al. An experimental study on stress wave propagation and attenuation of sandstone during stress unloading process[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, **39**(8): 151-158. (in Chinese))
- [21] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1287-1296. (ZUO Jianping, XIE Heping, MENG Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1287-1296. (in Chinese))
- [22] 左建平, 宋洪强. 煤岩组合体的能量演化规律及差能失稳模型[J]. 煤炭学报, 2022, **47**(8): 3037-3051. (ZUO Jianping, SONG Hongqiang. Energy evolution law and differential energy instability model of coal-rock combined body[J]. Journal of China Coal Society, 2022, **47**(8): 3037-3051. (in Chinese))
- [23] 周阳, 苏生瑞, 马洪生. 循环荷载作用下绿泥石千枚岩弹性模量演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, **51**(3): 783-792. (ZHOU Yang, SU Shengrui, MA Hongsheng. Experimental research on elastic modulus evolution of chlorite phyllite under cyclic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, **51**(3): 783-792. (in Chinese))
- [24] 吴政, 张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(1): 55-61. (WU Zheng, ZHANG Chengjuan. Investigation of rock damage model, and its mechanical behaviour[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(1): 55-61. (in Chinese))
- [25] 赵闯, 武科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 890-896. (ZHAO Chuang, WU Ke, LI Shucai, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 890-896. (in Chinese))