

吴祥业,郑翔,赵善坤,等.蠕变-循环作用下粉砂岩力学响应及损伤演化特征研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026, 45(4):407-415.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260095

Wu Xiangye,Zheng Xiang,Zhao Shankun,et al.Study on mechanical response and damage evolution characteristics of siltstone under creep-cyclic loading[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(4): 407-415. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20260095

蠕变-循环作用下粉砂岩力学响应及损伤演化特征研究

吴祥业^{1,2,3}, 郑翔^{1,2,3}, 赵善坤⁴, 闫宇航^{1,2,3}, 袁盛斌^{1,2,3}, 田宇航^{2,5}, 杨新卓^{1,2,3}

(1. 内蒙古科技大学 安全与应急管理学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 4. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 5. 国能神东煤炭集团 哈拉沟煤矿, 陕西 榆林 719000)

摘要: 针对一次采动后至二次开采期间围岩受载状态转变引发的岩体损伤问题, 开展不同蠕变应力水平与循环加卸载组合作用下的单轴压缩试验, 研究组合作用下粉砂岩的力学性质及声发射特征。研究表明: 不同蠕变应力水平会改变岩石的初始损伤状态, 显著影响后续循环加卸载过程中的能量耗散; 组合作用下粉砂岩的单轴抗压强度随蠕变应力水平提高而降低, 单轴应力-应变曲线中压密阶段缩短、弹性阶段延长; 声发射信号显示, 蠕变诱发的初始损伤促使声发射行为由 Kaiser 效应向 Felicity 效应转变; 经 RA- F_a 裂纹分析, 加载后期岩石破坏以张拉裂纹为主导; 基于统计损伤力学的分段非线性损伤模型能较好地表征不同加载阶段的损伤演化过程。研究结论为围岩体的长期稳定性评价提供参考。

关键词: 蠕变; 循环加卸载; 声发射; 损伤演化; 粉砂岩

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0407-09

Study on mechanical response and damage evolution characteristics of siltstone under creep-cyclic loading

Wu Xiangye^{1,2,3}, Zheng Xiang^{1,2,3}, Zhao Shankun⁴, Yan Yuhang^{1,2,3}, Yuan Shengxiao^{1,2,3},
Tian Yuhang^{2,5}, Yang Xinzhao^{1,2,3}

(1. School of Safety and Emergency Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 4. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. Halagou Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group, Yulin 719000, China)

Abstract: To address rock mass damage induced by the changes of load state of surrounding rock from primary mining to secondary mining, uniaxial compression tests were conducted under different creep stress levels and cyclic loading and unloading combinations. The mechanical properties and acoustic emission characteristics of siltstone under the combined action were investigated. The results show that different creep stress levels will change the initial damage state of rock and significantly affect the energy dissipation in the subsequent cyclic loading and unloading process. The uniaxial compressive strength of siltstone decreases with the increase of creep stress level, and the compaction stage is shortened and the elastic stage is prolonged in the uniaxial stress-strain curve. The acoustic emission signal shows that the initial damage induced by creep promotes the transformation of acoustic emission behavior from Kaiser effect to Felicity effect. Through RA- F_a crack analysis, the rock failure in the later stage of loading is dominated by tensile cracks. The piecewise nonlinear damage model based on statistical damage mechanics can better characterize the damage evolution process at different loading stages. The

收稿日期: 2026-03-04 修回日期: 2026-04-19 接受日期: 2026-04-29 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52264010); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2024LHMS05017); 一流学科科研专项项目 (YLXKZX-NKD-036)

作者简介: 吴祥业 (1986-), 男, 黑龙江 鸡西人, 博士, 副教授, 主要从事矿山压力与巷道围岩控制方面的研究。E-mail: 175874171@qq.com

research conclusions provide a reference for the long-term stability evaluation of surrounding rock mass.

Keywords: creep; cyclic loading and unloading; acoustic emission; damage evolution; silt sandstone

0 引言

在煤炭开采过程中,一次采动后巷道围岩处于较高的静应力环境中,开展二次开采时,采掘作业会对围岩产生动力扰动,围岩在此过程中承受耦合组合载荷^[1]。因此,研究不同蠕变应力水平-循环加卸载组合作用下的岩石力学行为及损伤演化,对保障巷道围岩的稳定性具有重要意义。

学者针对不同加载条件下岩石的力学特性、变形特征等开展大量研究。在单轴加载条件下,胡千庭等^[2]通过多种煤岩单轴压缩声发射试验,揭示了煤岩破坏前声发射参数存在显著突变。肖鹏等^[3]结合试验与数值模拟,从裂隙角度阐释载荷作用下煤体力学响应、能量积聚与释放规律。王创业等^[4]针对饱水与干燥砂岩开展声发射-热红外同步监测试验,证实含水状态显著影响声、热前兆信号的出现顺序与敏感性。在蠕变作用方面,龚函等^[5]通过花岗岩分级加载蠕变试验,提出分形参数是蠕变破坏前兆指标。李杨杨等^[6]针对深部煤岩在蠕变与循环载荷叠加作用下的劣化行为,揭示了高应力区间内损伤非线性增强及能量突变特征。在循环载荷作用下,徐速超等^[7]通过砂卡岩单轴循环加卸载试验发现,滞回环面积与耗散能随循环次数增加同步增大。冉启灿等^[8]从统计分形角度揭示了损伤煤体声发射参数在破坏前的异常演化特征。苗胜军等^[9]、李江腾等^[10]从应力路径、疲劳阶段划分及特征应力判据等方面,阐明了循环加载条件下岩石损伤演化与能量转化机制。在损伤模型方面,刘之喜等^[11]从蠕变应变能密度演化出发,建立考虑能量时效特征的蠕变损伤模型。许刚刚等^[12]、Ru 等^[13]分别针对煤岩、胶结充填体,构建适用于不同加载条件与材料特性的损伤本构模型。

现有研究多聚焦单轴加载、蠕变持载、循环加卸载等加载方式下岩石的力学响应、损伤演化,针对蠕变-循环加卸载组合作用下岩石的力学响应、损伤演化机制的研究相对匮乏。作者基于已有研究成果,采用SAW-2000微机控制电液伺服岩石三轴试验机和声发射实时监测系统,开展不同蠕变应力水平、循环加卸载组合作用下岩石力学试验,分析砂岩的力学特性、变形行为及声发射演化过程,并在统计损伤力学理论框架下,提出一种以声发射累积振铃计数为损伤演化试验表征量的非线性分段统计损伤演化模型,为围岩多应力耦合

作用过程中的稳定性分析提供理论参考。

1 粉砂岩蠕变-循环组合作用试验

1.1 样品制备与筛选

试验所用粉砂岩取自内蒙古鄂尔多斯市东胜煤田某矿未受工程扰动、质地均匀的大巷围岩。按ISRM建议方法,采用水切割工艺,加工成 $\Phi 50\text{ mm}\times H100\text{ mm}$ 标准试样,见图1。

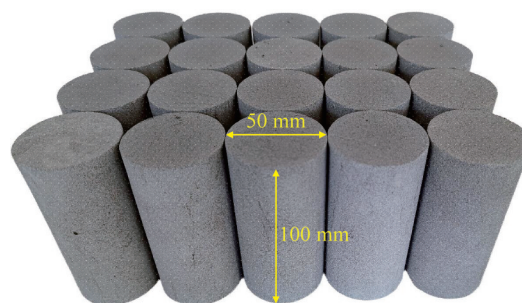


图1 试验用粉砂岩试样

Fig.1 Test sample of siltstone for experimentation

为降低试样离散性,初选密度在 $2.35\sim 2.42\text{ g/cm}^3$ 内的试样,经ZYB-II型装置真空饱水24 h后,利用miniMR-150核磁共振系统获取其孔隙率及 T_2 谱图。剔除离散性较大的试样,选取孔隙率为 $4.0\%\sim 4.2\%$ 的试样,经101-2AB型烘干箱进行干燥处理。利用HS-YS4A型测试仪测定波速,保留纵波波速在 $3.5\sim 3.7\text{ km/s}$ 内的试样,以确保试样的均质性。

1.2 试验设备

试验采用长春科新SAW-2000型微机控制电液伺服岩石三轴试验机(量程 $2\,000\text{ kN}$,精度 $\pm 0.5\%$)进行应力加载控制,借助北京声华SAEU2S型声发射系统对声发射信号进行采集,试验系统见图2。

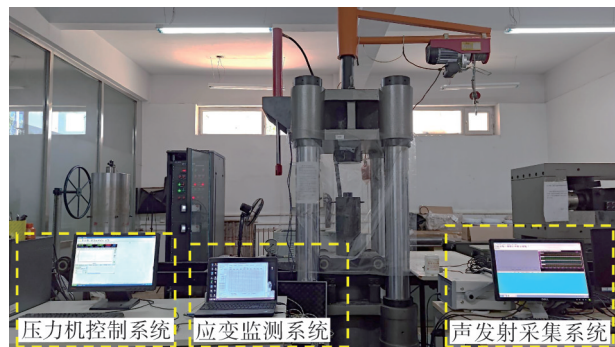


图2 试验系统

Fig.2 Experiment system

试验时,在试样中部粘贴轴向和径向应变片,并于两端对称布置声发射探头。探头表面涂抹耦合剂以保证信号传输。经多次预试验调试确定采集参数,声发射阈值设为40 dB,采样频率为1 MHz,此时采集到的信号能剔除大量干扰噪声,同时最大限度保留有效试验信号^[14]。

1.3 粉砂岩蠕变-循环组合试验方案

为模拟重复采动引起的围岩损伤累积过程,

设计如下试验方案:将试样加载至损伤应力水平并持载6 h;在蠕变后的起裂应力与损伤应力^[15]之间进行40次循环加卸载;单轴压缩至试样破坏。其中,持载应力分别取单轴抗压强度的50%、60%和70%。试验全过程采用轴向载荷控制,加、卸载速率均设定为0.25 MPa/s,试验加载路径见图3。

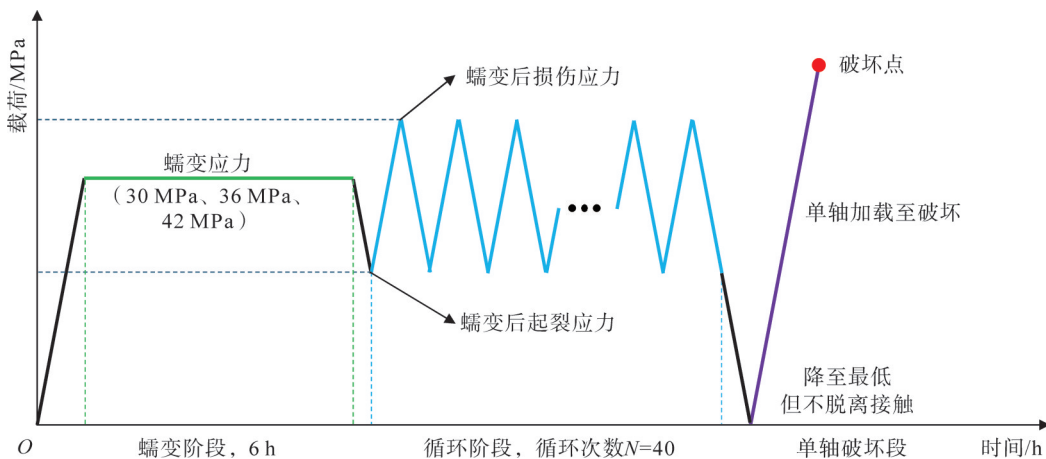


图3 试验全过程加载路径

Fig.3 Loading path during the entire experimenting process

2 组合作用下粉砂岩宏观力学特性

经常规单轴压缩试验,测得粉砂岩试样的平均单轴抗压强度为60 MPa。组合作用后,蠕变应力分别为42 MPa、36 MPa和30 MPa的试样,其平均单轴抗压强度依次为57.04 MPa、60.38 MPa和64.47 MPa。每组工况平行试样不少于3个^[16],限

于篇幅,此处只选取各组中最接近平均值的代表性试样进行分析。

2.1 粉砂岩蠕变作用下应变演化规律

不同蠕变应力下粉砂岩蠕变阶段的双向应变演化曲线见图4。

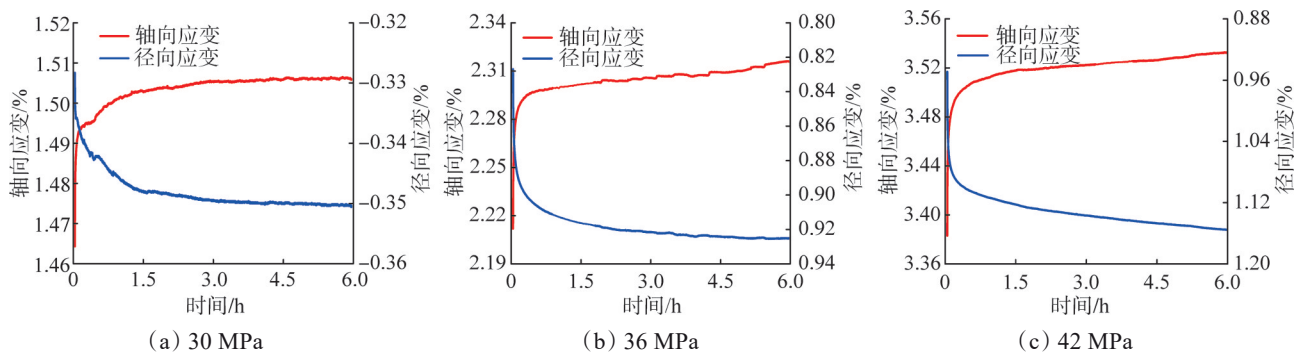


图4 粉砂岩试样在蠕变阶段应变累积特征

Fig.4 Strain accumulation characteristics of siltstone specimens during the creep stage

由图4可知,在恒定蠕变应力下,粉砂岩的轴向和径向应变随时间呈非线性变化。初期(约1.5 h内),受瞬时弹性变形及原生孔隙、裂隙压密作用的影响,应变速率较高,表现为减速蠕变特征;持载中后期,曲线趋于线性,整体处于稳定蠕变

阶段,无明显加速特征,表明内部损伤演化程度有限。轴向、径向蠕变增量均随应力的增大而增加,且径向蠕变增量在42 MPa下超过轴向增量,说明在高应力作用下径向结构劣化更为显著,变形增长更突出。

2.2 粉砂岩蠕变后循环载荷下应变演化规律

循环加卸载阶段,在恒定应力水平下,峰值应变的持续增长反映了试样内部不可逆损伤的累积。不同蠕变应力下,试样轴向与径向峰值应变的演化规律见图5。轴向与径向峰值应变随循环次

数增加呈现初期快速增长、中期平缓演化、后期趋于饱和的特征。轴向残余应变在循环前期显著下降,表明试样经历了初始结构压密。随后,残余应变逐渐趋于稳定但仍保持较高水平,表明试样进入一个损伤持续积累的较稳定状态。

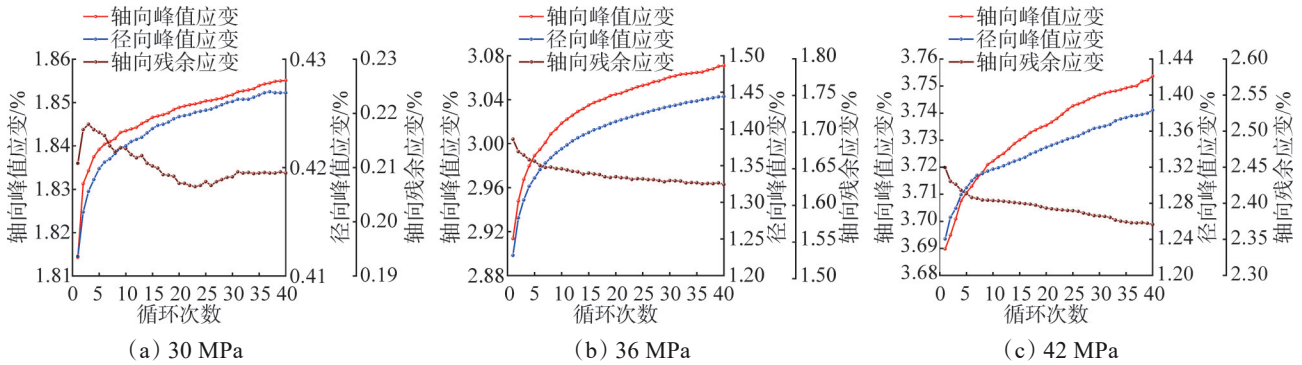


图5 循环加卸载阶段粉砂岩应变演化特征

Fig.5 Strain evolution of sandy siltstone under cyclic loading-unloading conditions

2.3 粉砂岩循环阶段能量演化分析

假设试验过程无热交换,输入机械能全部转化为弹性能与耗散能,其中弹性能在卸载时释放,耗散能用于驱动岩石的不可逆变形与损伤演化,能量计算示意图6。单次循环的耗散能定义为加卸载曲线所围成的面积,对应图6中的 $OAB^{[17]}$ 。循环内的输入能 U 、弹性能 U_e 、耗散能 U_p 分别为

$$U = \int_0^C \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

$$U_e = \int_B^C \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2)$$

$$U_p = U - U_e, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中, σ 、 ε 分别为应力、应变。

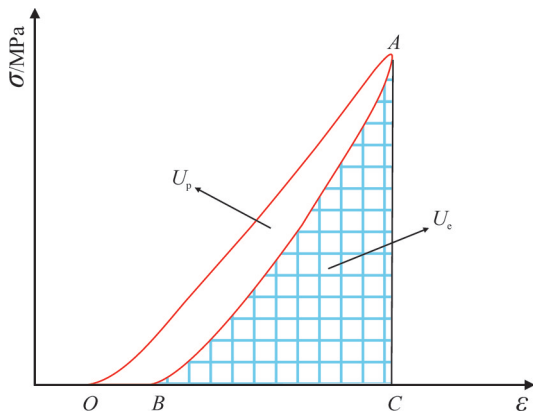


图6 能量计算示意

Fig.6 Schematic of energy calculation

耗散能水平可有效表征循环载荷下岩石的不可逆变形与损伤累积程度,该值越大,表明内部结构调整和破坏越剧烈。不同蠕变应力组合作用

下粉砂岩循环阶段耗散能演化规律见图7。粉砂岩在循环阶段的能量耗散显著,且耗散能随蠕变应力的提高而逐级递增,说明高应力蠕变诱发更严重的初始损伤,加剧后续循环过程中的结构劣化。

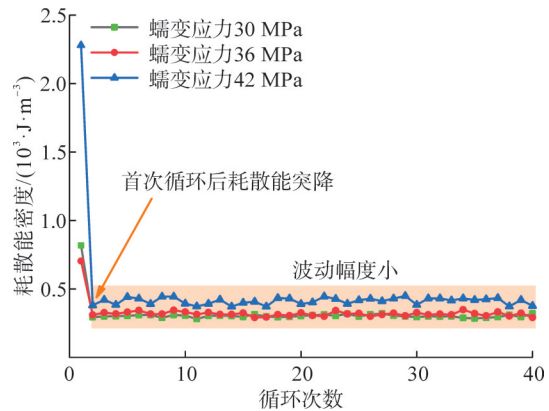


图7 不同蠕变应力下粉砂岩循环阶段耗散能演化规律

Fig.7 Evolution of dissipated energy in sandy siltstone during cyclic stages under varying creep stresses

结合图5应变分析可知,30 MPa下试样以局部塑性变形为主,损伤演化缓慢。42 MPa下试样初始损伤显著,循环阶段表现为裂纹稳定扩展与能量耗散。36 MPa下损伤演化呈渐进特征。综上,蠕变应力通过影响岩石内部损伤状态,进而决定后续循环加载过程中的能量耗散与力学响应。

2.4 粉砂岩蠕变-循环作用下强度演化特征

不同蠕变应力与循环加卸载后粉砂岩的单轴压缩应力-应变曲线见图8(应变经归零处理)。

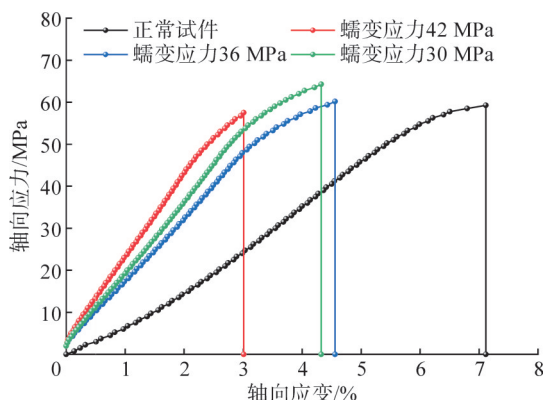


图8 组合作用下粉砂岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of sandy siltstone under combined loading in uniaxial compression

由图8可知,组合加载后,粉砂岩的初始压密阶段缩短,弹性阶段延长。与常规未经历蠕变的试样相比,随蠕变应力升高,单轴峰值强度先增后减:蠕变应力为30 MPa时,峰值强度及弹性阶

段均有所延长,表现出明显的强化特征,说明该应力水平下的组合作用抑制了损伤演化;蠕变应力增至36 MPa时,单轴峰值强度与常规值基本持平,反映了强化与损伤作用的动态平衡;当蠕变应力达到42 MPa时,单轴峰值强度显著降低且非线性变形提前出现,表明高应力下累积损伤主导了力学响应,导致承载力衰减。

3 粉砂岩损伤演化声发射特征研究

3.1 声发射特征参数分析

声发射(acoustic emission, AE)参数是表征岩石裂纹演化及内部损伤过程的重要指标。循环加卸载过程中,若AE活动在应力未达到前次峰值之前受到抑制,则表现为Kaiser效应;若施加的应力尚未达到此前所承受的最高应力水平时,AE信号提前显著增强,则呈现Felicity效应^[18]。试验全过程的AE事件数及累积能量演化见图9。

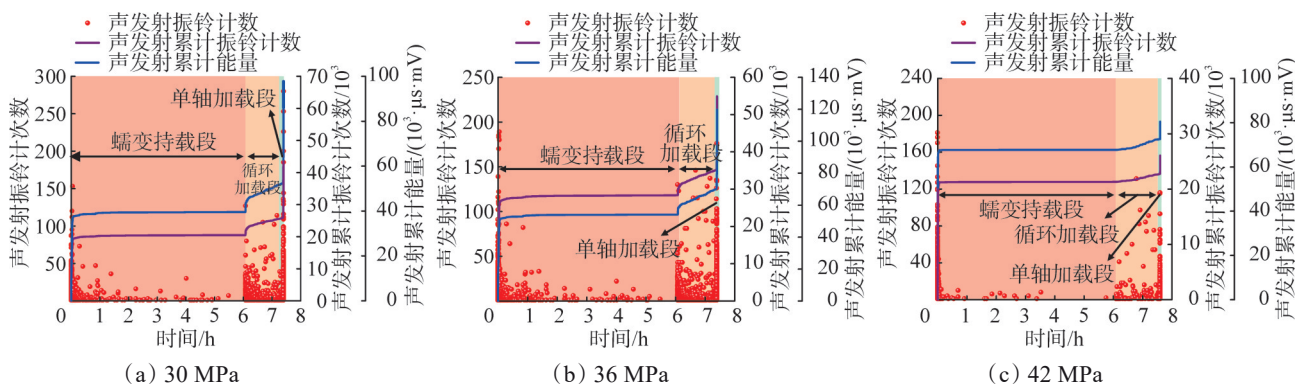


图9 组合作用下粉砂岩试样声发射特征参数演化特征

Fig.9 Evolution characteristics of acoustic emission characteristic parameters of siltstone specimens under combined effects

由图9可见,粉砂岩的损伤演化对加载路径具有显著敏感性。低应力下,蠕变阶段AE活动微弱,循环阶段Kaiser效应显著。中等应力下,蠕变阶段AE参数持续增加,循环阶段Kaiser效应向Felicity效应转变,损伤由缓慢演化进入加速累积阶段。高应力下,蠕变期损伤累积显著,循环阶段以Felicity效应为主导,进入损伤快速演化期。在后续的单轴加载阶段,AE活动剧增,且蠕变应力越高,损伤累积程度越严重。

综上,在组合加载作用下,粉砂岩的声发射响应随蠕变应力水平提高,呈现出由Kaiser效应主导向Felicity效应主导的转变特征;损伤演化由稳定压密与缓慢发展逐步过渡至快速累积,这决定了后续的失稳破坏过程。

3.2 基于声发射RA- F_a 裂纹扩展类型分析

岩石宏观破坏源于内部微裂纹的萌生、扩展

与贯通,破裂特征反映了损伤的规模与类型。为识别粉砂岩破裂过程中的裂纹性质,引入基于RA和 F_a 参数的识别方法,表达式分别为

$$RA = t_R/A, \quad (4)$$

$$F_a = C/t_D, \quad (5)$$

式(4)、式(5)中: t_R 为信号上升时间; A 为幅值; C 为AE信号计数; t_D 为AE信号持续时间。

由于RA和 F_a 参数同时受材料微观破裂机制与声发射系统动态响应特性的制约,其分布呈现显著的非均匀性,分界斜率 k 不具备普适解析表达。为避免主观设定引入的偏差,可采用基于参数极值的几何构造方法,通过RA与 F_a 的最大值点及坐标轴构建特征矩形,并以其对角线作为裂纹类型判别边界,将该直线斜率定义为分界斜率 k ,从而实现判别准则的客观化与尺度自适应^[19],即

$$k = F_{a_{\max}}/RA_{\max}, \quad (6)$$

式中, F_{amax} 、 RA_{max} 分别为 F_a 和 RA 的最大值。

若信号位于 $RA-F_a$ 平面分界线上, 则判定为张拉裂纹, 位于下方则判定为剪切裂纹^[20]。试验全

过程按加载方式划分为蠕变持载、循环加卸载及单轴加载 3 个阶段, 各阶段 $RA-F_a$ 占比特征见图 10。

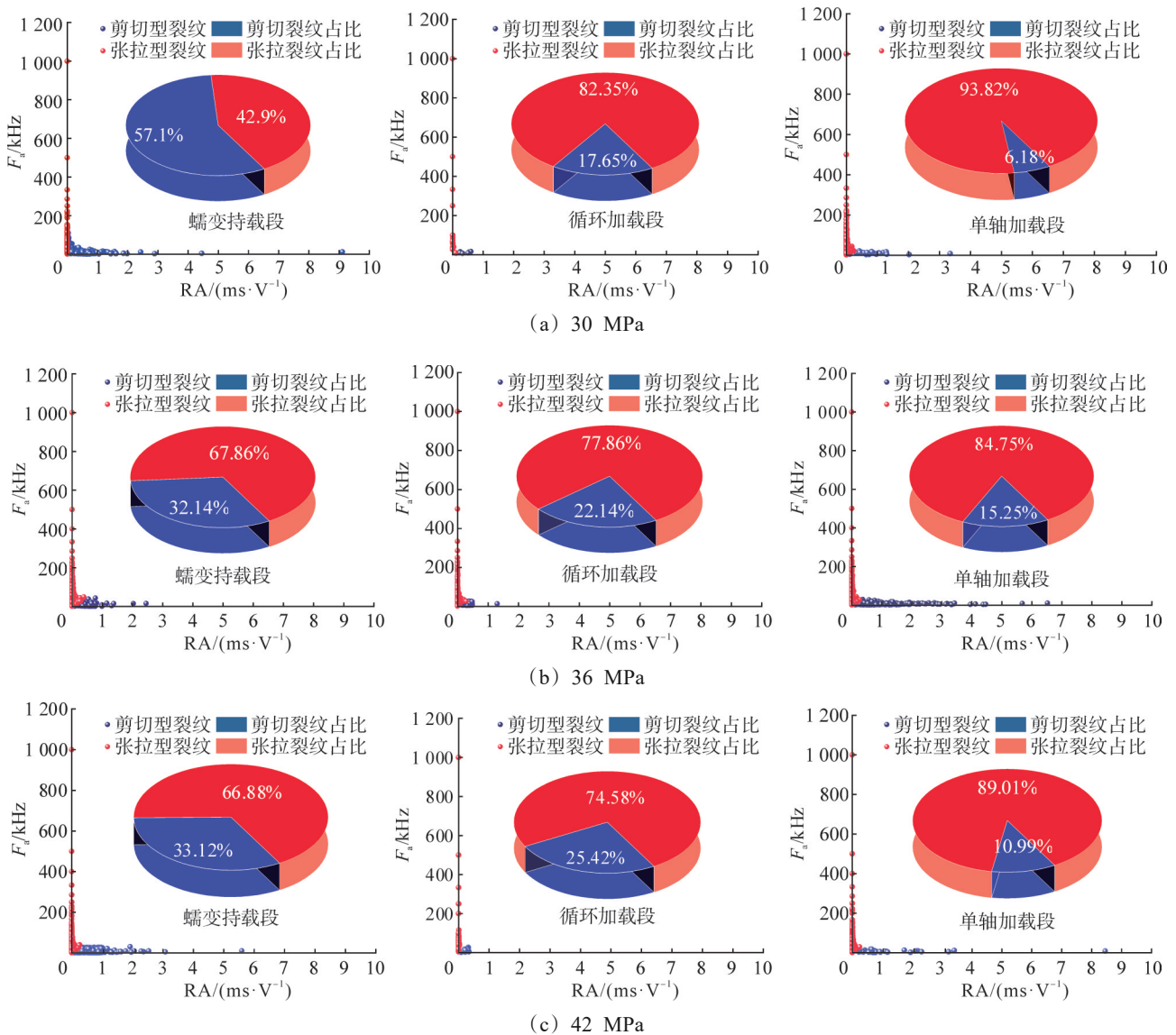


图 10 组合作用下粉砂岩 $RA-F_a$ 分布特征

Fig.10 Distribution characteristics of $RA-F_a$ in sandy siltstone under combined loading

$RA-F_a$ 特征的演化具有显著的阶段性。蠕变阶段, 散点集中于低 RA 区, 呈现张拉-剪切复合模式, 且随应力增加向高 RA 区扩散; 循环阶段, 受应力扰动影响, 散点范围扩大, 张拉裂纹占比激增, 演化模式由复合型向张拉主导转变; 单轴阶段, 散点集中于高 F_a 、低 RA 区, 表现为张拉贯通特征。综上, 粉砂岩的裂纹演化经历了“蠕变期初始损伤-循环期加速累积-单轴期贯通破坏”的渐进过程, 张拉型裂纹随加载阶段的推进逐渐主导宏观破坏。

4 基于声发射全过程损伤演化模型

4.1 基于声发射的损伤演化模型建立

为分阶段分析粉砂岩的损伤演化过程, 基于声发射累积振铃计数, 针对“蠕变期初始损伤-循环期加速累积-单轴期贯通破坏”的加载历程, 构建一种分段且连续的非线性损伤模型。该模型从加载开始, 至单轴破坏结束。

假定试样由大量微观单元构成。若微单元总数为 M , 时刻 t 失效的单元数为 $m(t)$, 则试样的宏

观损伤程度为

$$D(t) = \frac{m(t)}{M} \quad 0 \leq D(t) \leq 1. \quad (7)$$

$D(t)=0$ 表示试样未发生宏观损伤; $D(t)=1$ 表示试样被完全破坏。

AE 信号中的振铃计数反映了试样内部裂纹起裂、扩展及贯通过程中释放的事件数量。假设单位时间内振铃计数的增量与新增失效微单元数成正比,则可建立累积振铃计数 $N(t)$ 与损伤单元数 $m(t)$ 之间的线性映射关系为

$$N(t) = N_0 + \xi m(t), \quad (8)$$

式中: N_0 为初始累计振铃计数; ξ 为比例系数。

将式 (7) 代入式 (8) 中,可得

$$N(t) = N_0 + \xi MD(t). \quad (9)$$

为消除比例系数与微单元总数的不确定性,引入破坏终点时刻 t_f (即试样发生宏观破坏的时刻),并假定此时损伤满足

$$D(t_f) = 1,$$

则破坏终点累计振铃计数为

$$N_f = N(t_f) = N_0 + kM. \quad (10)$$

考虑到组合实验的加载历程严格分为蠕变、循环和单轴三个阶段,为准确反映各阶段内声发射活动水平的差异,将全过程按加载时间划分为三个连续区间:蠕变阶段为 $0 \leq t \leq t_c$,循环阶段为 $t_c < t \leq t_y$,单轴破坏阶段为 $t_y < t \leq t_f$,其中, t_c 、 t_y 、 t_f 分别为蠕变结束时刻、循环结束时刻和破坏时刻。

因此,定义各阶段末的累计振铃计数为

$$N_c = N(t_c), \quad N_y = N(t_y), \quad N_f = N(t_f).$$

由归一化公式得出各阶段末的损伤水平为

$$D_c = \frac{N_c - N_0}{N_f - N_0}, \quad D_y = \frac{N_y - N_0}{N_f - N_0}, \quad D_f = 1.$$

根据阶段损伤的定义,假定新增损伤仅发生于前一阶段仍保持完好的材料部分。即若某阶段结束时材料损伤为 D^* ,则剩余完好比例为 $1-D^*$,后续阶段的损伤增量将作用于该完好部分,并以乘性互补的方式进行耦合。基于此,采用 Weibull 函数刻画损伤演化过程中的非线性特征。为保证不同阶段在各自区间内具有统一的无量纲描述,引入分段无量纲时间变量^[21-22]

$$t_1 = \frac{t}{t_c}, t_2 = \frac{t - t_c}{t_y - t_c}, t_3 = \frac{t - t_y}{t_f - t_y},$$

式中, $t_1 \in [0, 1]$, $t_2 \in (0, 1]$, $t_3 \in (0, 1]$

定义 Weibull 型进程函数为

$$\Phi(t, \tau, \beta) = \frac{F(t, \tau, \beta)}{F(1, \tau, \beta)} = \frac{1 - \exp[-(t/\tau)^\beta]}{1 - \exp[-(1/\tau)^\beta]}. \quad (11)$$

由式 (11) 可知,该函数满足边界条件 $\Phi(0, \tau, \beta) = 0$ 、 $\Phi(1, \tau, \beta) = 1$,可构建各阶段内满足端点约束的非线性损伤演化规律。在蠕变阶段,损伤由 0 演化至 D_c ,采用端点归一化函数可表示为

$$D(t) = D_c \Phi(t_1, \tau_c, \beta_c) \quad 0 \leq t \leq t_c, \quad (12)$$

式中, τ_c 、 β_c 均为蠕变阶段的 Weibull 参数。

在循环阶段,损伤由 D_c 增长至 D_y 。考虑到该阶段新增损伤仅作用于蠕变阶段结束后剩余的完好部分 (比例为 $1-D_c$),则循环阶段在完好部分中最终产生的损伤比例为

$$\Delta_c = \frac{D_y - D_c}{1 - D_c} \quad 0 \leq \Delta_c \leq 1. \quad (13)$$

以 τ_y 、 β_y 作为循环阶段 Weibull 参数,则循环阶段损伤演化方程可表示为

$$D(t) = D_c + (1 - D_c) \Delta_c \Phi(t_2, \tau_y, \beta_y) \quad t_c < t \leq t_y. \quad (14)$$

同理,单轴破坏阶段的损伤由 D_y 增长至 1,新生损伤仅作用于循环阶段结束后剩余的完好部分 (即 $1-D_y$),从而可建立以 τ_u 、 β_u 为 Weibull 参数的损伤演化方程

$$D(t) = D_y + (1 - D_y) \times \Phi(t_3, \tau_u, \beta_u) \quad t_y < t \leq t_f. \quad (15)$$

综上,声发射累计振铃计数表征下的三阶段非线性损伤演化方程可统一表示为

$$D(t) = \begin{cases} D_c \Phi(t_1, \tau_c, \beta_c) & 0 \leq t \leq t_c \\ D_c + (1 - D_c) \Delta_c \Phi(t_2, \tau_y, \beta_y) & t_c < t \leq t_y \\ D_y + (1 - D_y) \Phi(t_3, \tau_u, \beta_u) & t_y < t \leq t_f \end{cases} \quad (16)$$

式中: $D_c = \frac{N_c - N_0}{N_f - N_0}$; $D_y = \frac{N_y - N_0}{N_f - N_0}$; $\Delta_c = \frac{D_y - D_c}{1 - D_c}$ 。

4.2 损伤演化模型的验证

为保证分段损伤模型的数学一致性与物理合理性,从连续性、单调性及边界条件等方面对所建立的三阶段非线性损伤方程进行理论验证。根据上述损伤演化方程,在 $t=t_c$ 处 (即蠕变阶段末) 有

$$D(t_c^-) = D_c, \quad \Phi(1) = D_c,$$

循环阶段起点处对应的损伤表达式为

$$D(t_c^+) = D_c + (1 - D_c) \Delta_c, \quad \Phi(0) = D_c,$$

故 $D = (t)$ 在 $t=t_c$ 处连续。

同理,在 $t=t_y$ 处有

$$D(t_y^-) = D_c + (1 - D_c) \Delta_c, \quad \Phi(1) = D_c + (1 - D_c),$$

$$D(t_y^+) = D_y + (1 - D_y)\Phi(0) = D_y.$$

因此, $D(t)$ 在 $t=t_y$ 处连续, 表明该三段非线性损伤函数在两个分段节点处均满足连续性条件。

由于 $\Phi(t, \tau, \beta) \in [0, 1]$ 且随 t 单调不减, 各阶段损伤项均通过非负系数线性叠加, 循环、单轴破坏阶段新增损伤仅作用于剩余完好部分, 因此损伤变量 $D(t)$ 在全过程中单调不减, 取值范围稳定为 $[0, 1]$ 。

基于上述分析, 为验证所建立的基于声发射累积振铃计数的三阶段非线性损伤演化模型的适用性, 采用声发射累积振铃计数试验数据进行验证。将试验获得的声发射累积振铃计数记为

$N_{\text{exp}}(t)$, 根据前述推导, 损伤变量与声发射累积振铃计数之间满足如下归一化关系

$$D(t) = \frac{N(t) - N_0}{N_f - N_0}. \quad (17)$$

将式 (16) 代入式 (17), 得到模型对累计振铃计数的预测式为

$$N_{\text{pred}}(t) = N_0 + (N_f - N_0)D(t). \quad (18)$$

将上述三阶段损伤模型代入累计振铃计数预测式, 得到预测值 $N_{\text{pred}}(t)$, 并与 $N_{\text{exp}}(t)$ 进行对比分析。选取决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均绝对误差 MAE 以及最大绝对误差作为评价指标, 结果见图 11。

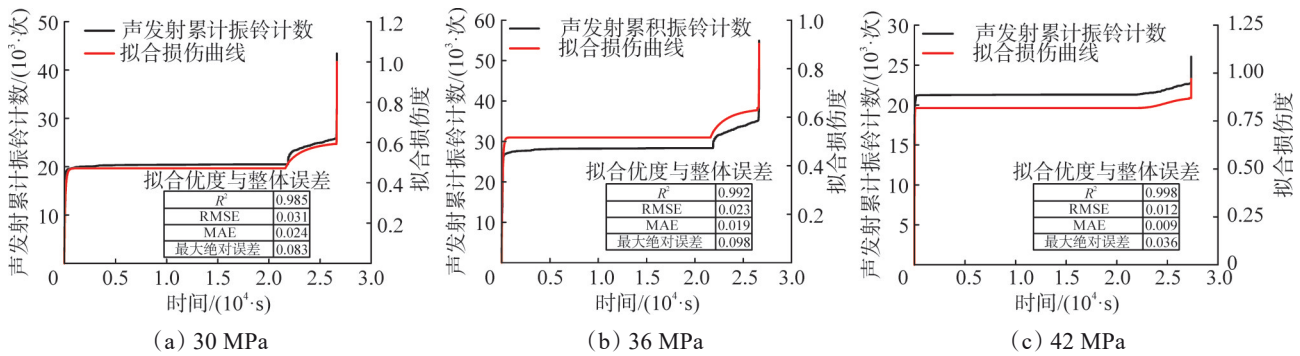


图 11 不同蠕变应力下声发射累积振铃计数与预测值对比

Fig.11 Comparison of acoustic emission cumulative ringing count and prediction under different creep stress

由图 11 可见, 分段损伤模型的决定系数 R^2 大于 0.98, RMSE 及 MAE 均较小。虽在阶段转换处存在一定误差, 但整体符合分段演化物理特征, 能精确刻画损伤演化趋势。

5 结论

本文开展不同蠕变应力水平下“蠕变-循环加卸载”组合作用后的单轴压缩试验, 探究粉砂岩的力学响应特性, 并基于声发射累积振铃计数, 建立分段式统计损伤模型, 验证模型的合理性与准确性, 主要结论如下。

(1) 在组合作用中, 蠕变应力水平显著影响岩石损伤演化, 并进一步控制循环加卸载阶段的能量耗散。随着蠕变应力升高, 循环加卸载阶段的能量耗散水平显著增加。

(2) 随着蠕变应力水平升高, 单轴应力-应变曲线的压密阶段逐渐消失, 弹性变形阶段显著延长。粉砂岩在蠕变-循环加卸载作用下的单轴力学响应由结构强化转为损伤主导。

(3) 声发射响应随蠕变应力水平提高, 由 Kaiser 效应转变为 Felicity 效应, 损伤演化由稳定压密转为快速累积。粉砂岩在组合应力作用下的裂纹演化受蠕变应力水平与加载路径共同控制,

张拉裂纹的主导作用随蠕变应力水平提高而增强。

(4) 基于声发射累积振铃计数, 建立一种适用于“蠕变-循环加卸载-单轴压缩”组合条件下的分段非线性损伤演化模型。该模型能够较好地刻画各阶段损伤演化趋势, 对二次开采时的围岩稳定性分析具有一定参考意义。

参考文献(References):

- [1] 吴祥业, 刘洪涛, 李建伟, 等. 重复采动巷道塑性区时空演化规律及稳定控制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3389-3400.
Wu Xiangye, Liu Hongtao, Li Jianwei, et al. Temporal-spatial evolutionary law of plastic zone and stability control in repetitive mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3389-3400.
- [2] 胡千庭, 刘荣辉, 李全贵, 等. 单轴压缩下典型煤岩破坏的声发射特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 1769-1781.
Hu Qianting, Liu Ronghui, Li Quanguai, et al. Acoustic emission characteristics study of typical coal rock failure under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 1769-1781.
- [3] 肖鹏, 李秉昆, 黄晓昇, 等. 单轴压缩下裂隙煤体能量演化与数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(4): 692-703.
Xiao Peng, Li Bingkun, Huang Xiaosheng, et al. Energy evolution and numerical simulation of fractured coal under uniaxial compression[J]. Journal of Xi'an University of Science and

- Technology, 2025, 45(4): 692-703.
- [4] 王创业, 闫宇航, 隋青瑞, 等. 饱水、干燥砂岩损伤破坏声、热异常信号及敏感性耦合分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3185-3196, 3270.
- Wang Chuangye, Yan Yuhang, Sui Qingrui, et al. Acoustic and thermal anomaly signals and sensitivity coupling analysis of damage to water-saturated and dry sandstones[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3185-3196, 3270.
- [5] 龚岗, 张中伟, 肖琦, 等. 分级加载条件下花岗岩蠕变破坏声发射震源前兆特征[J]. 金属矿山, 2024(12): 67-76.
- Gong Gang, Zhang Zhongwei, XIAO Qi, et al. Acoustic emission source precursor characteristics of granite creep failure under step loading condition[J]. Metal Mine, 2024(12): 67-76.
- [6] 李杨杨, 张士川, 沈宝堂, 等. 蠕变损伤煤岩分段增幅循环劣化机制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 64-76.
- Li Yangyang, Zhang Shichuan, Shen Baotang, et al. Subsection amplification cyclic deterioration mechanism of creep damaged coal [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 64-76.
- [7] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929-2934.
- Xu Suchao, Feng Xiating, Chen Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2929-2934.
- [8] 冉启灿, 梁运培, 叶春峰, 等. 循环荷载下损伤煤体声发射统计分形规律及破坏前兆特征[J/OL]. 煤炭学报, 2025-08-12. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0578>.
- Ran Qican, Liang Yunpei, Ye Chenfeng, et al. Statistical fractal pattern of acoustic emission and failure precursor characterization in damaged coal subjected to cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2025-08-12. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0578>.
- [9] 苗胜军, 王辉, 杨鹏锦, 等. 近疲劳强度循环荷载对泥质石英粉砂岩力学特性影响研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2109-2119.
- Miao Shengjun, Wang Hui, Yang Pengjin, et al. Effect of cyclic loading near fatigue strength on mechanical properties of argillaceous quartz siltstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2109-2119.
- [10] 李江腾, 肖峰, 马钰沛. 单轴循环加卸载作用下红砂岩变形损伤及能量演化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 139-146.
- Li Jiangteng, Xiao Feng, Ma Yupei. Deformation damage and energy evolution of red sandstone under uniaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 139-146.
- [11] 刘之喜, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 岩石蠕变应变能密度演化时效特征与损伤本构模型研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(1): 153-166.
- Liu Zhixi, Zhao Guangming, Meng Xiangrui, et al. Study on aging characteristics of creep strain energy density evolution and damage constitutive model of rock[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(1): 153-166.
- [12] 许刚刚, 谷拴成, 王晓东, 等. 煤岩蠕变试验及其灾变模型[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(2): 366-378.
- Xu Ganggang, Gu Shuancheng, Wang Xiaodong, et al. Creep test and catastrophic model of coal rock[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(2): 366-378.
- [13] Ru W K, Li D Y, Han Z Y, et al. Failure mechanism and damage constitutive model of cemented tailings backfill with different cement-tailings ratios under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University, 2025, 32(8): 2979-2997.
- [14] Yan Y H, Wang C Y, Sui Q R, et al. Investigation on the damage-fracture evolution and early warning of instability precursors in locked rock slopes[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2026, 143: 105504.
- [15] 周辉, 孟凡震, 卢景景, 等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 913-918, 925.
- Zhou Hui, Meng Fanzhen, Lu Jingjing, et al. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 913-918, 925.
- [16] GB/T 23561.7—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分: 单轴抗压强度测定及软化系数计算方法[S].
- [17] 杨磊, 高富强, 王晓卿, 等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3894-3902.
- Yang Lei, Gao Fuqiang, Wang Xiaoqing, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3894-3902.
- [18] 张广辉, 邓志刚, 蒋军军, 等. 不同加载方式下强冲击倾向性煤声发射特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020(5): 977-982, 990.
- Zhang Guanghui, Deng Zhigang, Jiang Junjun, et al. Acoustic emission characteristics of coal with strong impact proneness under different loading modes[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020(5): 977-982, 990.
- [19] 苏占东, 朱祥锟, 刘晓丽, 等. 不同达加断裂角类岩体模型的声发射特征和破裂机制[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(1): 61-73.
- Su Zhandong, Zhu Xiangkun, Liu Xiaoli, et al. Acoustic emission characteristics and fracture mechanisms of rock-like models with different superimposed fracture angles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 61-73.
- [20] 刘刚, 石翔, 咎永龙, 等. 基于矩张量反演与RA-AF分析砂岩微裂纹演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45(2): 381-396.
- Liu Gang, Shi Xiang, Zan Yonglong, et al. Research on the evolution law of microcracks in sandstone based on rectangular tensor inversion and RA-AF analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2026, 45(2): 381-396.
- [21] Chen Y L, Tang X L, Xu L T, et al. Comparative study of multiple statistical damage mechanics models for rock behaviors under high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2024, 447: 138049.
- [22] Feng T X, Yu X L, Cheng G Q. Damage constitutive model of rock and application based on strength theory[J]. Journal of Mechanics, 2024, 40: 336-353.