第 72 卷 第 5 期
2026 年 10 月

武汉大学学报(理学版)
J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)

Vol. 72 No. 5
Oct. 2026,674~684

DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0202

应力-干湿循环耦合作用下泥岩崩解特性及能量演化机制

刘高福[1,2],骆祚森[1,2],黄宜胜[1,2†],张景昱[1,2],王文豪[1,2],刘　旭[1,2],刘　盼[1,2],钱信之[1,2],李佳成[1,2]

1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002

收稿日期:2025-11-03　† 通信联系人 E-mail:hys2007@ctgu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(U22A20600,52327811,52009067);三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(2018KDZ09,2022KDZ23)
第一作者:刘高福,男,硕士生,现从事水工岩土方面研究。E-mail:2538078890@qq.com

摘　要:针对三峡库区万州段侏罗系沙溪庙组岸坡消落带泥岩的应力与水环境赋存状态,开展不同上覆应力(0~0.6 MPa)下的应力-干湿循环耦合崩解试验,分析其崩解特性和能量演化机制。结果表明:1)应力-干湿循环耦合作用显著加速泥岩崩解进程,应力对崩解具有加速调控效应;2)表面能累积速率与累积上限随上覆应力提升而增大,累积速率与崩解速率演化高度一致,表面能对崩解进程具有“先促进、后抑制”的影响;3)耦合作用下的上覆应力呈现“第1~5次干湿循环加速破坏、第6~12次干湿循环促进重构”的阶段差异性演化特征。研究结果可为三峡库区砂泥岩互层库岸稳定性评价提供依据。

关　键　词:消落带泥岩;应力-干湿循环耦合作用;崩解试验;细观结构;能量演化

中图分类号:P642.11;P642.3TU443.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-8836(2026)05-0674-11

Disintegration Characteristics and Energy Evolution Mechanism of Mudstone under Coupled Stress and Wetting-Drying Cycles

LIU Gaofu[1,2], LUO Zuosen[1,2], HUANG Yisheng[1,2†], ZHANG Jingyu[1,2], WANG Wenhao[1,2], LIU Xu[1,2], LIU Pan[1,2], QIAN Xinzhi[1,2], LI Jiacheng[1,2]

1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, Hubei, China;
2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

Abstract: Focusing on the stress and water occurrence environment of mudstone in the bank slope water-level-fluctuation zone of the Jurassic Shaximiao Formation in the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir area, coupled stress and wetting-drying cycle disintegration tests were conducted under different overburden stresses (0-0.6 MPa). The disintegration characteristics and energy evolution mechanism were analyzed. The results show that: 1) The coupled stress and wetting-drying cycles significantly accelerate the disintegration process of mudstone, with stress exerting an accelerating and regulating effect. 2) The accumulation rate and upper limit of surface energy increase with increasing overburden stress. The accumulation rate is highly consistent with the evolution of the disintegration rate, and the surface energy exerts a “promoting first and then inhibiting” effect on the disintegration process. 3) Under coupled action, the overburden stress exhibits stage-differentiated evolution characteristics: accelerated damage during the 1st-5th wetting-drying cycles, and promoted restructuring during 6th-12th cycles. The research results can provide support for the stability evaluation of sandstone-mudstone interbedded reservoir banks in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: mudstone in water-level-fluctuation zone; coupled stress and wetting-drying cycles; disintegration test; mesostructure; energy evolution

引用格式:刘高福,骆祚森,黄宜胜,等. 应力-干湿循环耦合作用下泥岩崩解特性及能量演化机制[J]. 武汉大学学报(理学版),2026,72(5):674-684. DOI:10.14188/j.1671-8836.2025.0202.

LIU Gaofu,LUO Zuosen,HUANG Yisheng,*et al*. Disintegration Characteristics and Energy Evolution Mechanism of Mudstone under Coupled Stress and Wetting-Drying Cycles [J]. *J Wuhan Univ* (*Nat Sci Ed*),2026,72(5):674-684. DOI:10.14188/j.1671-8836.2025.0202(Ch).

0　引　言

三峡库区广泛分布碎屑岩地层,其中砂岩和泥岩为典型岩性。库区蓄水运行后,岸坡岩体长期处于浸泡与干湿循环交替的环境中,导致砂岩、泥岩物理力学特性发生不可逆的劣化[1],进而降低岸坡稳定性,诱发滑坡、塌岸等地质灾害,如兑窝子坪特大型滑坡[2]、秭归张家红屋场滑坡[3]、巫山县塔坪H1滑坡[4]等。尤其在砂泥岩互层岸坡中,泥岩遇水易崩解的特性会显著弱化互层结构稳定性,形成由表及里的局部失稳。

目前,围绕泥岩崩解特性已形成丰富的研究成果。在崩解影响因素方面,吴益平等[5]证实含水率升高会显著加剧泥岩崩解速率与崩解程度;郭小铭等[6]通过矿物成分分析,明确矿物成分差异是影响崩解特性的重要内在因素;付宏渊等[7]指出干湿循环次数是调控崩解物颗粒级配的主要外部因素;黄明等[8]、梁冰等[9]、凌斯祥等[10]发现水环境酸碱度显著改变泥岩崩解速率与崩解程度;申培武等[11]通过块体尺寸试验,揭示大块体泥岩崩解更为剧烈,且崩解过程呈“先急剧、后平缓”的阶段性特征。在崩解机制与评价方面,Zhang等[12]证实崩解软化是导致泥岩力学强度降低的关键因素;苏永华等[13]提出分形维数可作为表征泥岩崩解特性的核心指标;曾铃等[14]、谢和平等[15]、王知深等[16]从能量演化视角出发,提出泥岩崩解本质是内外因素共同作用下表面能不断累积与释放的过程。在工程改良方面,陈勇琪等[17]、何志军等[18]通过生物、物理等改良方法有效降低了泥岩崩解性。

上述研究多聚焦于水环境对泥岩崩解特性的影响,但实际岸坡中的泥岩往往同时承受水环境与应力的耦合作用。针对这一耦合作用下泥岩崩解特性研究仍不完善。泥岩的崩解过程并非水环境独立作用的结果,其赋存的应力条件与水环境形成耦合作用,共同调控崩解进程及劣化程度,而这一耦合作用机制尚未得到系统阐明。基于此,本文以三峡库区万州段消落带为研究对象,通过应力-干湿循环耦合作用崩解试验,系统分析泥岩崩解过程、颗粒级配特征、崩解参数变化规律、细观结构演化及能量演化机制,旨在为三峡库区典型库岸稳定性防控提供科学依据与技术支撑。

1　试验部分

1.1　试验材料

试验用泥岩取自三峡库区万州段岸坡消落带,地质年代为侏罗系沙溪庙组(J_2S),与库区典型易崩解泥岩地质背景一致。为确保试样的代表性与天然状态完整性,采用钻芯法在岸坡现场钻取泥岩岩芯(直径5 cm,深度20～30 m),岩芯钻取后立即使用保鲜膜密封包裹,以防止水分蒸发导致天然含水率发生改变。经测试,试验用泥岩的天然含水率均值为3.5%,其力学参数如表1所示。参照《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)[19],经切割、打磨,制备符合要求的标准试样(直径5 cm、高10 cm)。试样制备过程中,严格控制其含水稳定性,始终保持天然含水状态。将泥岩样品干燥研磨后,采用D8 DISCOVER型X射线衍射仪(Bruker公司)进行分析,矿物成分结果如表1所示。

表1　泥岩试样力学参数及矿物成分

Table 1　Mechanical parameters and mineral compositions of mudstone samples

密度/(g/cm³)	纵波波速/(km/s)	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa	矿物成分含量/%			
				石英	长石	赤铁矿	黏土矿物
2.52	2.98	7.21	1.56	22.5	33.4	2.4	41.7

1.2　试验方案

泥岩崩解试验装置(自制)如图1所示。该装置利用压力筒内带孔加压盖满足浸泡进水需求,通过压缩上部弹簧施加恒定应力,并控制弹簧压缩量维持额定应力水平,模拟应力-库水位耦合作用的岸坡环境。

基于取样岸坡上覆应力实测值小于等于0.6 MPa的地质条件,设0、0.2、0.4、0.6 MPa共4组等差应力水平,每组设3个平行试样(质量为485～505 g)。试验前剔除缺陷及纵波波速、密度离散性超标试样,经编号后进行12次干湿循环,测试结果取算术平均值。每次循环后对崩解产物进行拍照、筛分、称重、SEM测试(JSM-7800F型,JEOL公司),绘制颗粒级配曲线并计算崩解比、耐崩解性指数、分形维数及累积表面能增量,试验流程如图2所示。

单次干湿循环步骤如下:①装样,试样放入压力筒并置于固定底板上;②加压,依据胡克定律和

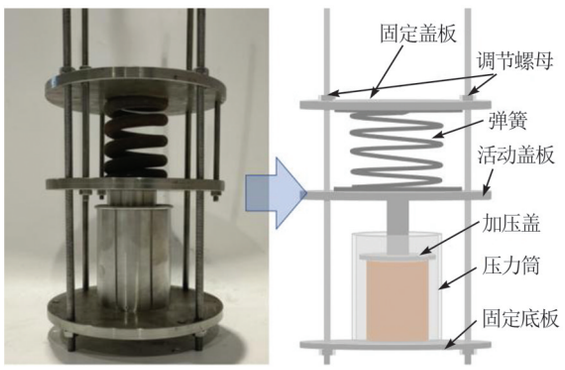


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

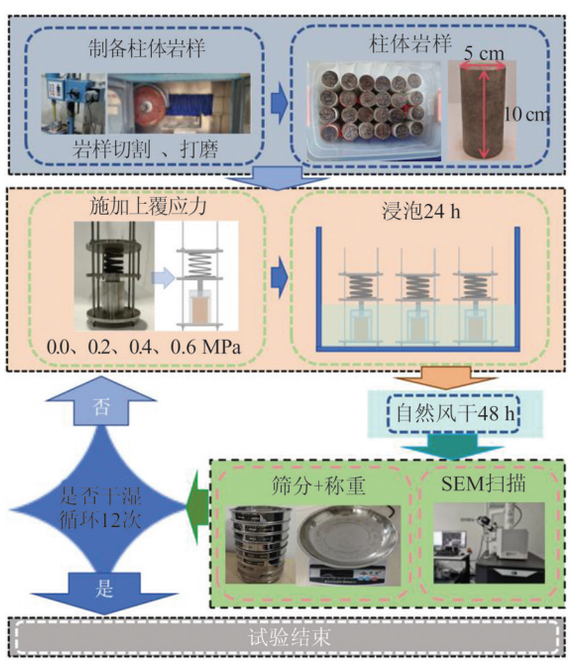


图 2 试验流程图

Fig. 2 Experimental flowchart

压强公式施加目标应力,用游标卡尺测量弹簧压缩量并精准控压;③浸泡,加载稳定的试样缓慢浸入恒温水槽(模拟库区地表水离子组成:(25±2) ℃、pH 8.0±0.2、电导率(200±20) μS/cm),浸泡 24 h;④监测,每 6 h 复核弹簧压缩量,保持应力偏差小于 5%;⑤风干,试样移至室内(温度(23±2) ℃、相对湿度 50%±5%、风速 0.1~0.3 m/s),风干 48 h,完成单次循环。

1.3 崩解参数及表面能计算方法

1.3.1 崩解比

崩解比 R_d 是定量表征泥岩崩解特性的关键指标(无量纲)[20]。以粒组上限粒径(mm)为横坐标、小于该粒径的累积质量分数为纵坐标,绘制崩解产物颗粒级配曲线。第 n 次干湿循环后泥岩崩解比 R_{dn} 的计算[21]如下:

$$R_{dn}=\frac{A_n}{A}\times 100\% \tag{1}$$

式中:A_n(mm)为第 n 次干湿循环筛分后,$[d_{min},d_{max}]$ 粒径区间级配曲线与横轴围成的梯形组合面积;A(mm)为最大粒径 d_{max}、最小粒组最大粒径 d_{min}、质量分数 P 等于 $P(d_{min})$(%)及 P=100% 四边围成的矩形面积。

1.3.2 耐崩解性指数

泥岩耐崩解性指其抵抗水理作用软化崩解的能力,采用耐崩解性指数 I_d 表征[22],第 n 次干湿循环后泥岩耐崩解性指数 I_{dn} 计算如下:

$$I_{dn}=\frac{m_n}{m_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中:m_0(g)为岩样总质量,m_n(g)为第 n 次干湿循环后粒径≥2 mm 的岩样残留质量。

1.3.3 分形维数

岩体在随机外界扰动下的破碎过程具有分形特征,采用分形维数 F_d 定量表征泥岩崩解程度[23]。结合 Weibull 分布与 Tyler 模型建立崩解颗粒质量与粒径的函数[13]:

$$\frac{m_{(d)}}{m_0}=1-\mathrm{e}^{(\frac{d_{max}}{d_m})^k} \tag{3}$$

$$\frac{m_{(d)}}{m_0}=(\frac{d_{max}}{d_m})^k \tag{4}$$

$$F_d=3-k \tag{5}$$

式中:$m_{(d)}$(g)为粒径小于 d 的所有颗粒的质量;d_m(mm)为平均粒径;k 为拟合斜率[24]。

1.3.4 表面能

能量在泥岩崩解过程中发挥关键调控作用。泥岩崩解的本质是能量的转化与耗散过程,表现为泥岩对外做功与能量耗散的综合效应[25-26]。相较于传统宏观力学参数分析,从能量演化视角切入可更直观精准揭示崩解内驱力与演化路径,其中表面能转化是崩解过程中最显著的能量变化形式[27]。

基于上述能量机制,第 n 次干湿循环的表面能增量 ΔW_n 的计算公式如下[8]:

$$\Delta W_n=\sum_{i=1}^{10}\frac{4\pi^2R^3\sigma_R^2S}{\alpha^2d_{mi}(1-D)^{2\lg(\frac{R}{d_{mi}})}E}(P_{i,n}-P_{i,n-1}) \tag{6}$$

式中各参数依据文献[28]及本研究试样特性取值:原始柱样尺寸 R=50 mm;泥岩抗拉强度 σ_R 为 0.5 MPa;等效弹性模量 E=2.63 MPa;损伤变量 D=0.125;应力状态因子 a=1.0;荷载与裂纹因子(无量纲)$S=1\times10^7$;d_{mi}(mm)为第 i 组(从小到大排列)粒组的平均粒径;$P_{i,n}$(或 $P_{i-1,n}$)为第 i(或 $i-1$)组粒组在第 n 次干湿循环后的质量分数。

经过n次干湿循环的累积表面能W_n计算公式:

$$W_n=\sum_{i=1}^{10}\frac{4\pi^2R^3\sigma_R^2S}{\alpha^2d_{mi}(1-D)^{2\lg\left(\frac{R}{d_{mi}}\right)}E}(P_{i,n}-P_{i,0}) \quad (7)$$

2　泥岩崩解结果与分析

2.1　泥岩崩解特性分析

2.1.1　宏观崩解特征

对不同上覆应力作用下各次干湿循环后泥岩的宏观崩解现象进行拍摄,选取第2、4、6、8、10、12次循环后的泥岩崩解形态进行对比分析,结果如图3所示。其中,中值粒径d_{50}指在颗粒的累积粒度分布中累积百分比达到50%时所对应的粒径值,表征颗粒群的中心位置。

前4次干湿循环中,可明显观察到原岩残留块体,大尺寸崩解物多呈片状;第4~8次干湿循环后,部分泥岩已发生泥化,但仍可见较大尺寸崩解物残留;第8~12次干湿循环后,崩解物颗粒整体细小且泥化程度加剧。就上覆应力的影响而言,在第0~8次干湿循环阶段,上覆应力的增大加速了大尺寸岩体的破碎进程;在第10~12次干湿循环阶段,则进一步促进崩解物的泥化与颗粒细化。结合以往研究[29],泥岩崩解劣化本质上是崩解产物整体粒径细化的过程,且干湿循环次数(第1~12次)与上覆应力水平(0~0.6 MPa)均与颗粒细化程度呈正相关。

2.1.2　崩解物颗粒级配变化规律

不同上覆应力作用下,泥岩崩解过程中各粒组质量分数随干湿循环次数的演化曲线如图4所示。分析图4可知:①随干湿循环次数增加,不同上覆应力作用下各粒径崩解产物的质量分数呈现阶段性变化特征,40~50 mm原岩残留体占比快速下降,第6次循环后占比降至0;②2~<5、5~<10、10~<20、20~<40 mm中粗粒级崩解产物质量分数均呈先增后减的过渡性特征,而0.5~<1、0.25~<0.5、0.075~<0.25、<0.075 mm细粒级产物含量持续增加;③相同循环次数时,随上覆应力增大,粒径<1 mm的细粒碎屑含量增加,粒径为1~<10 mm的中粒碎屑质量分数在第6次循环前上升、第10次循环后下降,粒径>10 mm的粗粒碎屑含量持续减小至0,表明上覆应力加剧了各粒组含量的变化趋势。

平均粒径d_m指代表颗粒群平均大小的参数,反映颗粒群的集中趋势。由图5(a)可知,d_{50}和d_m在崩解过程中持续减小,且相同循环次数下,上覆应力越大,d_{50}与d_m值越小,表明上覆应力显著促进崩解产物的细化过程。

结合图4所示崩解产物颗粒级配的连续性特征,通过对比d_m与d_{50}的差值评估颗粒群分布偏态性[30]:$d_m-d_{50}>0$时为正偏态分布,表明存在粗颗粒尾迹;$d_m-d_{50}<0$时为负偏态分布,表明存在细颗粒尾迹。由图5(b)可知,随循环次数增加,崩解产物颗粒级配由负偏态逐步转为正偏态,随后偏态减

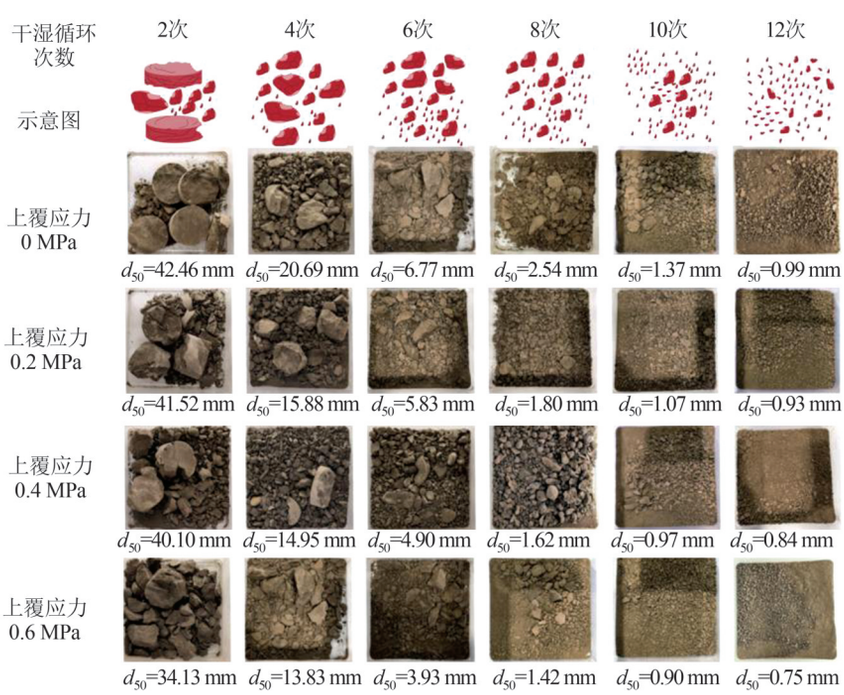


图3　泥岩宏观崩解现象

Fig. 3　Macroscopic disintegration phenomena of mudstone

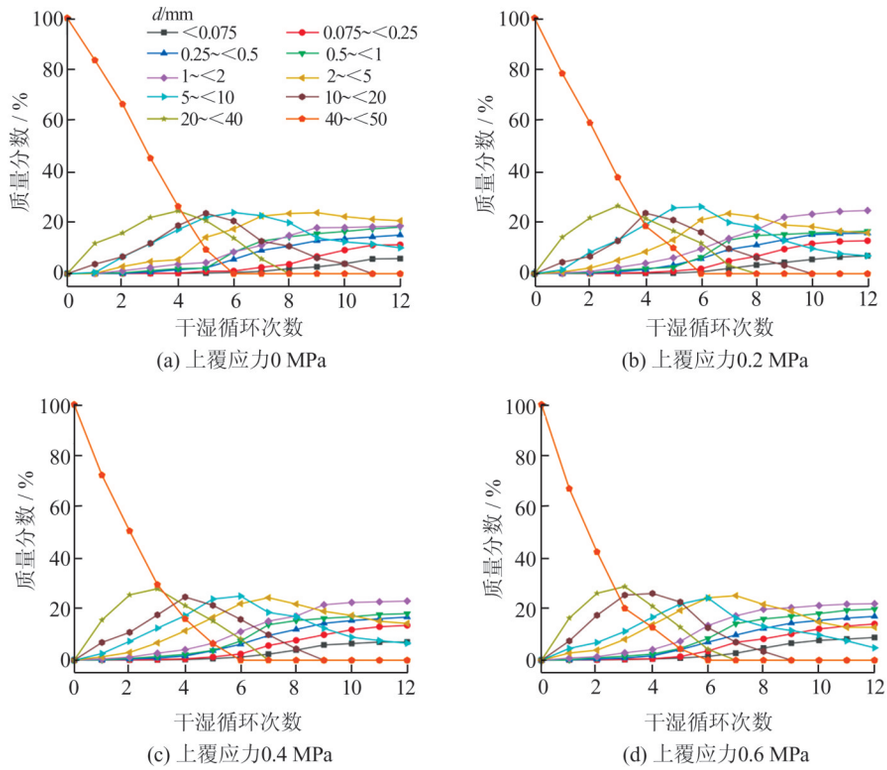


图 4 应力-干湿循环耦合作用下各粒组颗粒质量分数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of mass fraction of each particle size group under coupled stress and wetting-drying cycles

弱,演化阶段如下:①第 0~3 次循环:粗粒占主导,细颗粒形成尾迹,颗粒群呈负偏态;②第 3~5 次循环:中细粒含量增加,较大上覆应力下更早转为正偏态,表明应力加速粗粒破碎;③第 5~12 次循环:粗粒持续崩解,中粒持续细化,颗粒群趋于对称。此外,第 6~12 次循环:d_m-d_{50}值随上覆应力增大而减小,结合图 5(a)分析,上覆应力越大,颗粒细化程度越高,粒径分布的偏态程度越弱,体现应力对崩解的加速调控效应。

2.1.3 崩解比和耐崩解性指数变化规律

图 6(a)为应力-干湿循环耦合作用下泥岩的崩解比。R_{dn}与干湿循环次数(0~12 次)呈正相关,0、0.2、0.4、0.6 MPa 上覆应力作用下,第 0~8 次干湿循环时,泥岩的崩解程度随上覆应力的增加而加剧。第 9~12 次干湿循环中,崩解程度仍随应力增大而有所加剧,但不同上覆应力间的差异较小,最终崩解比依次为 0.962、0.968、0.970、0.974。上述结果表明,上覆应力的增大对泥岩崩解程度具有促进作用。

崩解比计算过程中 d_{max}取值为 50 mm(原岩样直径),第 6 次循环后粒径大于 40 mm 的产物已完全崩解,后续产物最大粒径显著减小(最小约 5 mm)。因此,崩解比可能难以准确反映中、细粒崩解行为。

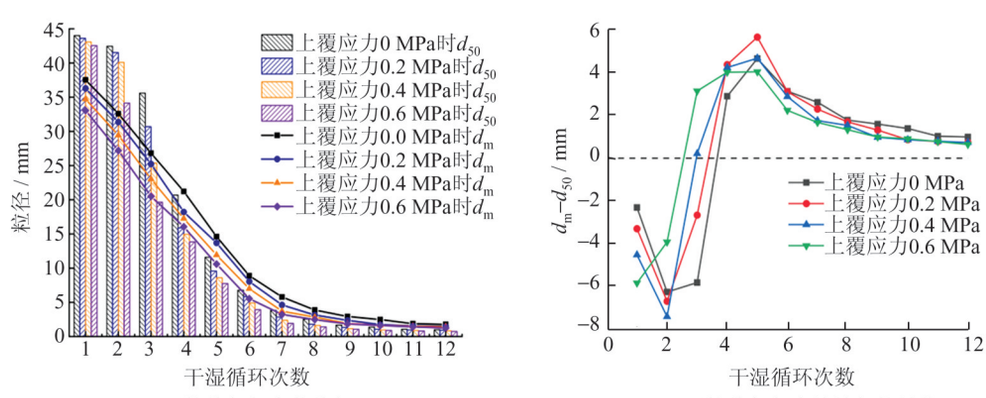


图 5 崩解产物平均粒径与中值粒径及二者差值

Fig. 5 Mean particle size, median particle size and their difference of disintegration products

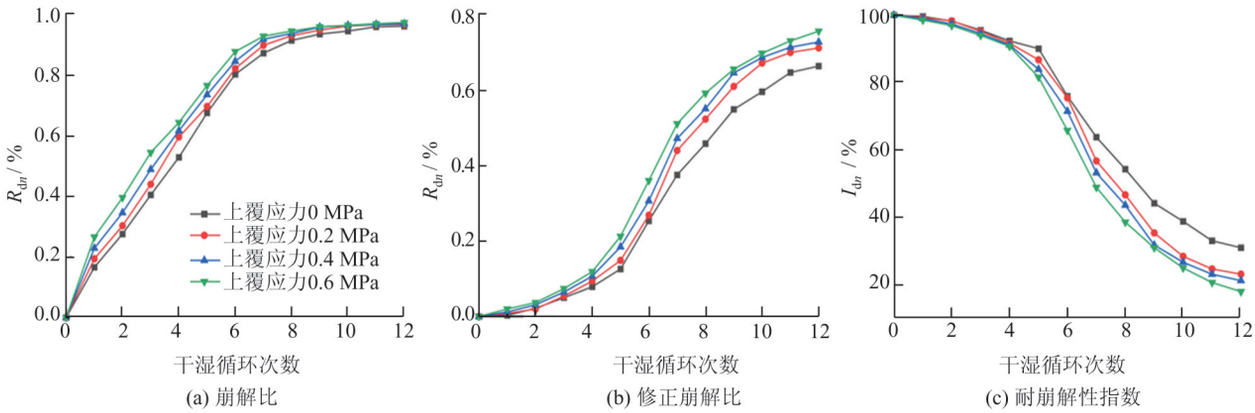


图6　应力-干湿循环耦合作用下泥岩崩解参数

Fig. 6　Disintegration parameters of mudstone under coupled stress and wetting-drying cycles

参考以往研究[31],引入崩解颗粒粒径阈值d_{cr}=5 mm,计算修正崩解比R'_{dn},如图6(b)所示。当d_{cr}=5 mm时,R'_{dn}随干湿循环次数的增大而增大,0、0.2、0.4、0.6 MPa上覆应力下,12次循环后R'_{dn}分别为0.665、0.713、0.729、0.758,且上覆应力越大,R'_{dn}上升速率越快,同循环次数的R'_{dn}值越大。表明崩解过程中,中、细粒的崩解程度、崩解速率均随上覆应力的增大而提高。

应力-干湿循环耦合作用下泥岩耐崩解性指数(I_{dn})计算结果如图6(c)所示。I_{dn}随干湿循环次数增加持续降低,且在第9~12次循环时下降幅度逐渐放缓。第0~4次干湿循环阶段,上覆应力施加与否对泥岩耐崩解性指数影响较小;而在第5~12次循环阶段,上覆应力对其产生显著劣化作用,且劣化程度与上覆应力(0~0.6 MPa)呈正相关。

结合图6(c),耐崩解性指数I_{dn}与循环次数n、上覆应力q均存在显著相关性,其折线走向为"反S"型,初始值为100,构建拟合函数如下:

$$I_{dn}=a+\frac{100-a}{1+\left(\frac{n}{b}\right)^{c}} \tag{8}$$

式中:n为干湿循环次数;a、b、c为与上覆应力q相关的拟合参数。代入试验数据进行拟合(式(9)),拟合结果显示决定系数R^2>0.99,简化卡方统计量reduced Chi-Sqr远小于1,拟合精度良好(图7)。

$$I_{dn}(n,q)=11.180+10.257\mathrm{e}^{-4.710q}+\frac{100-11.180-10.257\mathrm{e}^{-4.710q}}{1+\left(\frac{n}{7.320-1.159q}\right)^{-3.513q^2+2.152q+4.238}} \tag{9}$$

分析表明,泥岩耐崩解性指数I_{dn}随循环次数增加呈"反S"型衰减,衰减速率先加快后减缓;上覆应力越大,相同干湿循环次数下I_{dn}值越小,泥岩耐崩解性能劣化越显著。

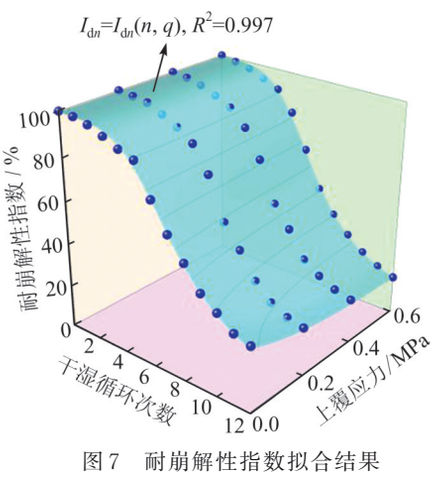


图7　耐崩解性指数拟合结果

Fig. 7　Fitting results of disintegration resistance index

2.1.4　分形维数变化规律

应力-干湿循环耦合作用下泥岩的分形维数演化过程如图8所示。采用Boltzmann模型对分形维数的演化过程进行拟合:

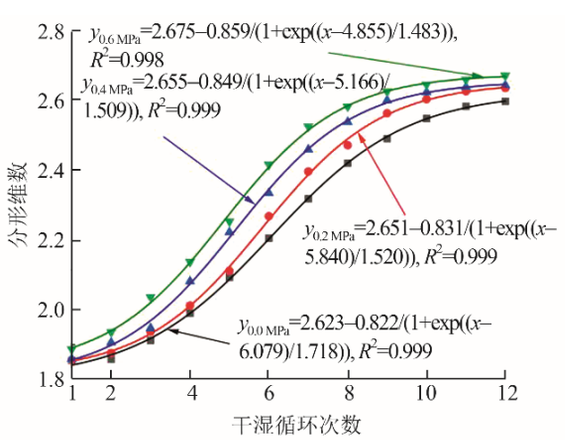


图8　应力-干湿循环耦合作用下泥岩的分形维数

Fig. 8　Fractal dimension of mudstone under coupled stress and wetting-drying cycles

$$y = C_2 + \frac{C_1 - C_2}{1 + e^{\frac{x - x_0}{f_w}}} \tag{10}$$

式中:C_1为曲线初始平台值(下限值);C_2为曲线最终平台值(上限值);x_0为拐点中心(速率峰值点);f_w为宽度因子(时间常数与斜率因子比值)。拟合结果显示:$R^2>0.99$,Reduced Chi-Sqr远小于1。分形维数F_d随干湿循环次数呈"S"型增长。在曲线下凹阶段,泥岩试样在应力-干湿循环耦合作用下发生崩解,形成粗粒、中粒、细粒崩解碎屑,分形维数增速持续加快,表明崩解过程逐渐加速。在曲线上凸阶段,分形维数演化规律与文献[21]所述相似,粗粒、中粒、细粒崩解碎屑继续崩解为中粒、细粒碎屑,分形维数增速逐渐放缓,表明崩解进程趋于稳定。凹凸段交点对应于崩解速率峰值点,在0、0.2、0.4、0.6 MPa上覆应力下,崩解速率峰值点x_0分别为6.079、5.840、5.166、4.855,崩解速率峰值点随上覆应力增加而左移(提前);上限C_2分别为2.623、2.651、2.655、2.675,随上覆应力增加而增大。在应力-干湿循环耦合作用的泥岩崩解过程中,上覆应力在0~0.6 MPa范围内越大对崩解的促进作用越显著。

2.2 能量演化机制分析

应力-干湿循环耦合作用下泥岩累积表面能W_n计算结果,如图9所示。累积表面能W_n随干湿循环次数的增加而递增,演化呈三阶段特征:第1~4次缓慢增长;第5~9次增速加快;第10~12次增速逐渐放缓。0、0.2、0.4、0.6 MPa应力下,12次循环后累积表面能分别为37、42、44、47 J,表明上覆应力显著促进表面能累积,加速崩解。结合文献[14]分析可知:①表面能累积量存在上限(崩解物细化程度存在上限),且与上覆应力正相关;②表面能累积速率受应力与当前累积量双重调控,应力越大,表面能累积速率越快;累积量较低时,崩解物体系处于低表面能态,崩解具有充足的热力学驱动力,表面能累积速率加快,呈"崩解促进崩解"效应;累积量接近上限时,崩解物进一步细化需要克服更高的界面能垒,表面能累积速率减缓,呈"崩解抑制崩解"效应。表面能累积速率的变化规律与崩解速率变化规律相一致,进一步验证了能量演化对崩解进程具有"先促进、后抑制"的调控机制。

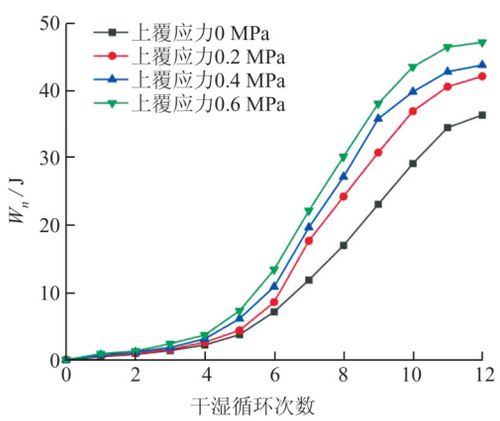
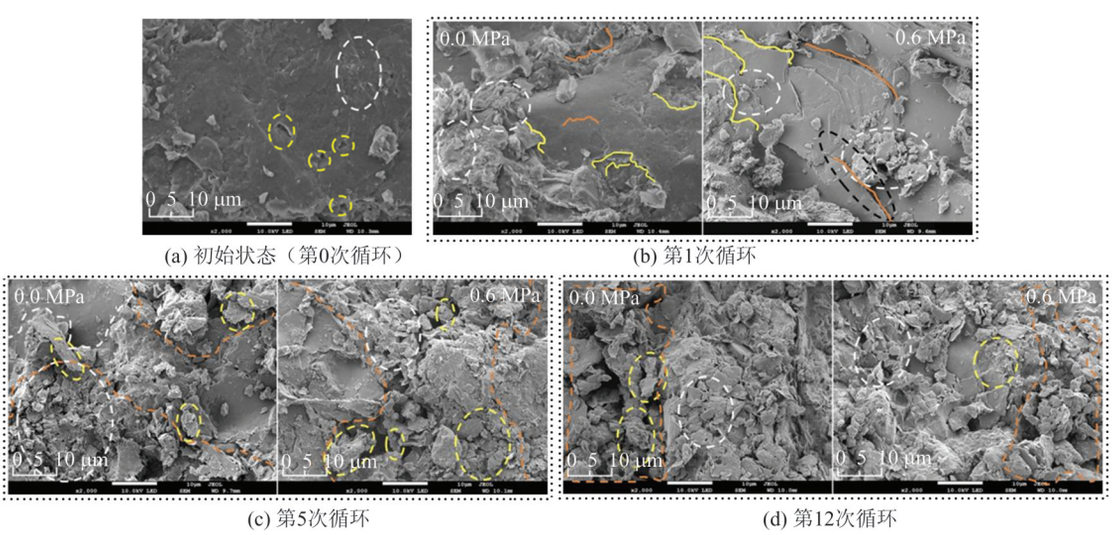


图9 应力-干湿循环耦合作用下泥岩的累积表面能

Fig. 9 Cumulative surface energy increment of mudstone under coupled stress and wetting-drying cycles

2.3 崩解劣化机理分析

以往研究表明,泥岩的细观结构变化对宏观表现具有显著调控作用[32]。为揭示崩解劣化机理,选取0 MPa和0.6 MPa应力下第0、1、5、12次循环的代表性SEM图进行对比分析(图10)。泥岩的细观结构演化过程如下:



(a) 初始状态(第0次循环) (b) 第1次循环

(c) 第5次循环 (d) 第12次循环

图10 泥岩的细观结构

Fig. 10 Mesostructure of mudstone

①初始状态(第0次循环),泥岩细观结构胶结致密,表面仅存在少量浅层微孔,整体形态平整;块状、片状石英等矿物颗粒被胶结物包裹,局部隐约出露[33];宏观上表现为完整柱状体,无明显裂隙。

②第1次循环后,胶结物发生溶蚀,矿物颗粒轮廓显露,结构产生微小裂隙与页状横向缝(横缝);在0.6 MPa应力作用下,溶蚀效应加剧,出现板块隆起与宽裂隙;宏观表现为柱状试样吸水膨胀、脱水收缩后发生破碎,粒径普遍较大,上覆应力越高,破碎细化效应越显著。

③第5次循环后,细观结构呈松散状态,长棱状矿物颗粒大量暴露、脱落,裂隙与孔隙深度扩展、部分贯通,水分子侵入通道增多,导致崩解速率升高;在0.6 MPa应力作用下,结构损伤加剧,裂隙贯通,颗粒间黏结力显著减弱;宏观崩解速率达到峰值,高应力作用下过渡性产物占比提升,峰值出现时间前移。

④第12次循环后,矿物颗粒逐渐圆化[34],孔隙入口被细颗粒填充,弱黏结结构趋于稳定,整体形成蜂窝状结构[35];0.6 MPa应力下颗粒圆化更显著,弱黏结现象减少,蜂窝结构更为稳固;宏观上表现为崩解趋于完全,以细颗粒产物为主。

分析泥岩宏观崩解过程、颗粒级配特征、崩解参数变化规律、细观结构演化及能量演化机制,上覆应力增大显著加剧颗粒细化效应的作用机理为:在崩解前期(第1~5次干湿循环),上覆应力通过加速胶结物溶蚀与裂隙扩展,促使细观结构趋于松散,进而驱动宏观崩解过程;后期(6~12次干湿循环),上覆应力促进细观结构重组,强化蜂窝结构的稳定性,从而推动颗粒形态演化。具体如图11所示。

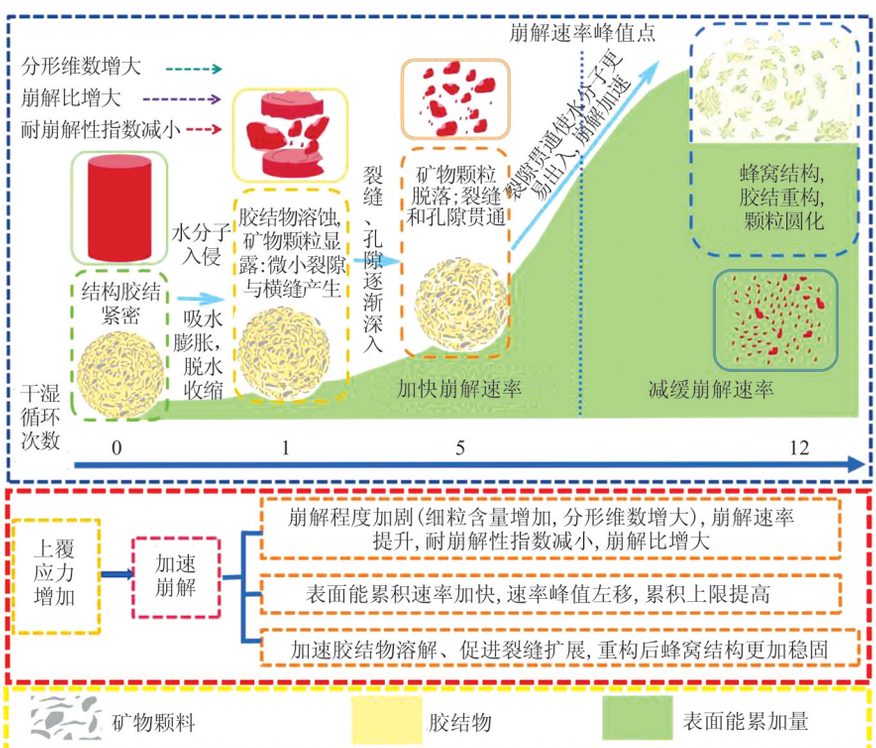


图11　应力-干湿循环耦合作用下泥岩崩解机理

Fig. 11　Disintegration mechanism of mudstone under coupled stress and wetting-drying cycles

3　结　语

本文以三峡库区万州段侏罗系沙溪庙组岸坡消落带泥岩为研究对象,开展应力-干湿循环耦合作用崩解试验,运用多方法系统探究了泥岩崩解特性、能量演化机制及细观劣化机理,主要结论如下:1)上覆应力加剧了颗粒细化,并与崩解参数呈显著相关性,对崩解演化起到加速与调控作用,应力-干湿循环耦合作用可显著加速泥岩崩解过程;2)表面能累积量、累积上限及累积速率均随上覆应力增大而升高,累积速率的变化规律与崩解速率的变化规律高度协同,且形成先促进、后抑制崩解的阶段性演化机制;3)从细观劣化机理分析,耦合作用中上覆应力对崩解过程具有差异性的作用特征,第1~5次干湿循环促进损伤劣化,第6~12次干湿循环促进细观结构重组及矿物颗粒形态演化。

该研究揭示了应力-干湿循环耦合作用对泥岩崩解的调控机制,并从能量演化角度反映了泥岩崩解的内在驱动机制,明确了宏观崩解行为与细观结构劣化之间的内在关联。研究成果可为三峡库区消落带岸坡稳定性评价及同类工程地质灾害防控提供科学依据与技术参考。未来研究可进一步拓展应力加载范围,模拟更为复杂的水-岩化学作用环境,并结合数值模拟手段,提升研究成果在工程应用中的适用性与精度。

参考文献:

[1] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等. 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(10): 1851-1858. DOI:10.11779/CJGE201710013.
ZHANG J Y, WAN L P, PAN H Y, *et al*. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(10): 1851-1858. DOI: 10.11779/CJGE201710013(Ch).

[2] 薛莉云, 董宏戈, 陈波, 等. 特大型滑坡灾害成功避险与应急处置——以重庆市巫山县铜鼓镇兑窝子坪地质灾害为例[J]. 中国应急救援, 2025(1): 65-70. DOI:10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2025.01.010.
XUE L Y, DONG H G, CHEN B, *et al*. Successful risk avoidance and emergency response of the large scale landslide hazard: Taking Duiwoziping in Tonggu Town, Wushan County, Chongqing as an example[J]. *China Emergency Rescue*, 2025(1): 65-70. DOI:10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2025.01.010(Ch).

[3] 邓茂林, 彭旭, 魏东, 等. 2024年7·10湖北秭归张家红屋场滑坡基本特征与成因机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, **45**(2): 329-337. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241023005.
DENG M L, PENG X, WEI D, *et al*. Study on basic characteristics and genesis mechanisms of Zhangjiahong-wuchang landslide in Zigui, Hubei on July 10, 2024[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2025, **45**(2): 329-337. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241023005(Ch).

[4] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制[J]. 水文地质工程地质, 2020, **47**(4): 73-81. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003043.
WEI T Y, YIN Y P, GAO Y, *et al*. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, **47**(4): 73-81. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003043(Ch).

[5] 吴益平,余宏明,胡艳新.巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(7): 1201-1203. DOI:10.16285/j.rsm.2006.07.037.
WU Y P, YU H M, HU Y X. Research on engineering geological characters of aubergine mudstone of Badong new city zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(7): 1201-1203. DOI:10.16285/j.rsm.2006.07.037(Ch).

[6] 郭小铭, 刘英锋, 郭康, 等. 鄂尔多斯盆地南部侏罗系杂色泥岩特征及形成机制[J]. 矿业安全与环保, 2024, **51**(6): 130-137. DOI:10.19835/j.issn.1008-4495.20230685.
GUO X M, LIU Y F, GUO K, *et al*. Characteristics and formation mechanism of Jurassic variegated mudstone in the southern Ordos Basin[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, **51**(6): 130-137. DOI:10.19835/j.issn.1008-4495.20230685(Ch).

[7] 付宏渊, 杨海涛, 吴二鲁, 等. 考虑炭质泥岩颗粒破碎的级配演化预测模型[J]. 水利学报, 2024, **55**(9): 1058-1070. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20230740.
FU H Y, YANG H T, WU E L, *et al*. Prediction model of gradation evolution considering particle breakage of carbonaceous mudstone[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, **55**(9): 1058-1070. DOI: 10.13243/j. cnki. slxb.20230740(Ch).

[8] 黄明, 詹金武. 酸碱溶液环境中软岩的崩解试验及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(9): 2607-2612. DOI:10.16285/j.rsm.2015.09.022.
HUANG M, ZHAN J W. Disintegration tests and energy dissipation characteristics of soft rock in acid and alkali solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(9): 2607-2612. DOI:10.16285/j.rsm.2015.09.022(Ch).

[9] 梁冰, 谭晓引, 姜利国, 等. 泥质岩在不同pH值溶液中的崩解特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015,**37**(2): 23-27. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.004.
LIANG B, TAN X Y, JIANG L G, *et al*. Experimental analysis of slaking characteristics of mudstone in different pH solutions[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2015,**37**(2): 23-27. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.004(Ch).

[10] 凌斯祥, 冯俊杰, 李晓宁, 等. 化学溶液作用下红层泥岩崩解特性与驱动机制[J]. 工程地质学报, 2025, **33**(1): 106-122. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2022-0744.
LING S X, FENG J J, LI X N, *et al*. Disintegration characteristic and driving mechanism of red-bed mudstone under the action of chemical solution[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, **33**(1): 106-122. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2022-0744(Ch).

[11] 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(7): 1990-1998. DOI:10.16285/j.rsm.2017.07.019.
SHEN P W, TANG H M, WANG D J, *et al*. Disintegration

characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(7): 1990-1998. DOI:10.16285/j.rsm.2017.07.019(Ch).

[12] ZHANG S, XU Q, HU Z M. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China [J]. *Engineering Geology*, 2016, **204**: 1-13. DOI:10.1016/j.enggeo.2016.01.013.

[13] 苏永华, 赵明华, 刘晓明. 软岩膨胀崩解试验及分形机理[J]. 岩土力学, 2005, **26**(5): 728-732. DOI:10.16285/j.rsm.2005.05.011.
SU Y H, ZHAO M H, LIU X M. Research of fractal mechanism for swelling & collapse of soft rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(5): 728-732. DOI:10.16285/j.rsm.2005.05.011(Ch).

[14] 曾铃, 张华麟, 戚双星, 等. 基于能量耗散原理的炭质泥岩崩解特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, **52**(11): 4181-4189. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.037.
ZENG L, ZHANG H L, QI S X, *et al*. Experimental study on disintegration characteristics of carbonaceous mudstone based on energy dissipation principle[J]. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 2021, **52**(11): 4181-4189. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.037(Ch).

[15] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2603-2608. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.15.001.
XIE H P, PENG R D, JU Y, *et al*. On energy analysis of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(15): 2603-2608. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.15.001(Ch).

[16] 王知深, 魏尧, 陈云娟, 等. 干湿循环下川中红层泥岩力学特性劣化机制和能量演化特征试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, **33**(4): 1304-1316. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2023-0223.
WANG Z S, WEI Y, CHEN Y J, *et al*. Experimental study on deterioration mechanism of mechanical properties and energy evolution of red mudstone under dry-wet cycle in central Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, **33**(4): 1304-1316. DOI: 10.13544/j. cnki. jeg. 2023-0223(Ch).

[17] 陈勇琪, 肖瑶, 邓华锋, 等. 木钙-纤维协同微生物改良红层泥岩填料试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, **21**(6): 2005-2016. DOI:10.20174/j.JUSE.2025.06.17.
CHEN Y Q, XIAO Y, DENG H F, *et al*. Experimental study on the improvement of red mudstone filler by calcium lignosulfonate-fiber and MICP synergistic effect[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2025, **21**(6): 2005-2016. DOI:10.20174/j.JUSE.2025.06.17(Ch).

[18] 何志军,曾铃,查焕奕,等. 干湿循环作用下有机硅改性炭质泥岩的崩解特性及抑崩解机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2026, **48**(4): 44-54. DOI: 10.11835/j. issn. 2096-6717. 2024. 066.
HE Z J, ZENG L, ZHA H, *et al*. Disintegration characteristics and disintegration inhibition mechanism of organo-silicone-modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycling effects[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2026, **48**(4): 44-54. DOI: 10.11835/j. issn. 2096-6717. 2024. 066(Ch).

[19] SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S].
SL/T 264—2020 Code for rock tests in water and hydropower projects[S](Ch).

[20] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. *Engineering Geology*, 2009, **108**(1/2): 36-42. DOI:10.1016/j.enggeo.2009.06.002.

[21] 付宏渊, 刘杰, 曾铃, 等. 考虑荷载及干湿循环作用的炭质泥岩崩解特征试验[J]. 中国公路学报, 2019, **32**(9): 22-31. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.09.002.
FU H Y, LIU J, ZENG L, *et al*. Disintegration characteristics of carbonaceous mudstone under loading and wet-dry cycles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(9): 22-31. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2019.09.002(Ch).

[22] 王浪, 邓辉, 邓通海, 等. 泥岩耐崩解性和颗粒粒径相关性的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, **34**(8): 120-124. DOI:10.11988/ckyyb.20160498.
WANG L, DENG H, DENG T H, *et al*. Correlation between disintegration resistance and particle size of mudstone [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, **34**(8): 120-124. DOI: 10.11988/ckyyb.20160498 (Ch).

[23] 柴肇云, 张亚涛, 张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(5): 1188-1193. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0897.
CHAI Z Y, ZHANG Y T, ZHANG X Y. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(5): 1188-1193. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0897(Ch).

[24] 杨峰峰, 张巨峰, 郑超, 等. 基于分形原理的红层软岩崩解特性试验研究[J]. 应用力学学报, 2022, **39**(2): 350-355. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2022.02.020.
YANG F F, ZHANG J F, ZHENG C, *et al*. Experimental study on disintegration characteristics of red bed soft rock based on fractal principle[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2022, **39**(2): 350-355. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2022.02.020(Ch).

[25] 曹丽丽, 浦海, 李明, 等. 煤系砂岩动态拉伸破坏及能量耗散特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(2): 492-499. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.6030.
CAO L L, PU H, LI M, *et al*. Experimental research on the dynamic tensile fracture and the energy dissipation characteristics of coal-serial sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, **42**(2): 492-499. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.6030(Ch).

[26] XIE H P, GAO F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(3): 477-488. DOI:10.1016/S1365-1609(99)00074-X.

[27] ZENG L, LI F, LIU J, *et al*. Effect of initial gravimetric water content and cyclic wetting-drying on soil-water characteristic curves of disintegrated carbonaceous mudstone[J]. *Transportation Safety and Environment*, 2019, **1**(3): 230-240. DOI:10.1093/tse/tdz018.

[28] 刘晓明, 熊力, 刘建华, 等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(10): 3143-3149.
LIU X M, XIONG L, LIU J H, *et al*. Slacking mechanism of red sandstone based on energy dissipation principle[J]. *Journal of Central South University*(*Science and Technology*), 2011, **42**(10): 3143-3149(Ch).

[29] 马杰,刘先峰,袁胜洋,等.干湿循环作用下红层泥岩崩解特性多尺度研究[J/OL].西南交通大学学报,1-11[2025-10-22]. https://link. cnki. net/urlid/51.1277. U. 20250506. 1412.014.
MA J, LIU X F, YUAN S Y, *et al*. Multi-scale study of disintegration of red mudstone under wetting-drying cycles[J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1-11[2025-10-22]. https: //link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20250506.1412.014(Ch).

[30] 张家发, 叶加兵, 陈劲松, 等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 343-349. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.005.
ZHANG J F, YE J B, CHEN J S, *et al*. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(2): 343-349. DOI:10.16285/j.rsm.2016.02.005(Ch).

[31] 曹雪山, 额力素, 赖喜阳, 等. 崩解泥化过程中泥岩强度衰减因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(10): 1936-1942. DOI:10.11779/CJGE201910019.
CAO X S, E L S, LAI X Y, *et al*. Factors for strength attenuation of mudstone during slaking and disintegration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(10): 1936-1942. DOI:10.11779/CJGE201910019(Ch).

[32] HUANG M, XU C S, ZHAN J W. Assessments of the disintegrating behaviour of clay shale considering the effect of pH condition[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, **24**(1): 97-109. DOI: 10.1080/19648189.2017.1366952.

[33] 骆祚森,钟鹏,邓华锋,等.干湿循环作用下泥岩湿胀变形特征及机理研究[J].材料导报,2026 ,**40**(13) : 113-120. DOI:10.11896/cldb.25060100.
LUO Z S, ZHONG P, DENG H F, *et al*. Study on the characteristics and mechanisms of wetting-induced swelling deformation of mudstone following wet-dry cycles [J]. *Materials Reports*, 2026 ,**40**(13) : 113-120. DOI:10.11896/cldb.25060100(Ch).

[34] 邓华锋,周美玲,李建林,等.水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,**35**(S2):3481-3491.DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.0810.
DENG H F, ZHOU M L, LI J L, *et al*. Mechanical properties deteriorating change rule research of red-layer soft rock under water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S2): 3481-3491. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.0810(Ch).

[35] 陈诗雅. 干湿循环条件下泥岩渗透—力学特性变化及边坡稳定性研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2025.
CHEN S Y. Study of hydraulic-mechanical property alterations in mudstone under wet-dry cycling conditions and their implications for slope stability [D]. Beijing: North China University of Technology, 2025(Ch).

□