

· 地基与基础 ·



## 水侵条件下软岩崩解特性研究及机理分析\*

王汉臣<sup>1</sup>, 刘 健<sup>1</sup>, 丁 阔<sup>2</sup>, 陈诗雅<sup>2</sup>, 石佳祎<sup>2</sup>

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060; 2. 北方工业大学, 北京 100043)

**摘要:** 软岩在水侵条件下的崩解特性与多种地质灾害密切相关, 为深入探讨软岩的崩解特性, 以平陆运河软岩为研究对象, 通过室内浸泡崩解试验, 观察软岩在不同浸水时间下的崩解行为, 分析崩解规律, 结合 XRD 与扫描电镜, 研究样品的矿物成分及微观结构变化。同时采用离散元法模拟软岩的崩解过程, 探讨软岩崩解机理。研究表明: 软岩在浸水初期发生明显崩解, 随后崩解速度减缓。随着浸水时间的延长, 样品内部孔隙逐渐增大, 矿物成分发生变化, 崩解加剧。软岩崩解过程中颗粒间的摩擦和碰撞使动能迅速增加, 弹性势能也随内部结构变形而增加。研究揭示了水侵条件下软岩的崩解规律及微观结构变化, 结合离散元建模分析崩解机理, 为该地区工程建设提供一定参考。

**关键词:** 软岩崩解; 离散元数值模拟; 微观机理; 崩解特性

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0176-08

### Disintegration characteristics and mechanism of soft rock under water immersion condition

WANG Hanchen<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, DING Kuo<sup>2</sup>, CHEN Shiya<sup>2</sup>, SHI Jiayi<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China;

2. North China University of Technology, Beijing 100043, China)

**Abstract:** The disintegration characteristics of soft rock under water immersion condition are closely associated with various geological hazards. To further investigate the disintegration properties of soft rock, this study focuses on the soft rock of the Pinglu Canal. Indoor soaking disintegration experiments are conducted to observe the disintegration behavior of soft rock at different soaking times and analyze its disintegration patterns. The study incorporated X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) to examine the mineral composition and microstructure changes of the samples. Additionally, the discrete element method is utilized to simulate the disintegration process of the soft rock and explore its disintegration mechanism. The results indicate that soft rock undergoes significant disintegration in the initial stages of soaking, followed by a deceleration in the disintegration rate. As soaking time extends, the internal pores of the samples gradually enlarge, and changes in mineral composition exacerbate the disintegration. During the disintegration process, friction and collision between particles lead to a rapid increase in kinetic energy, while elastic potential energy also rises due to the deformation of the internal structure. This study reveals the disintegration patterns and microstructure changes of soft rock under water immersion condition. Combined with discrete element modeling, it analyzes the disintegration mechanism, providing some reference for engineering construction in the area.

**Keywords:** soft rock disintegration; discrete element numerical simulation; microscopic mechanism; disintegration characteristics

收稿日期: 2024-06-19

\*基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42202315)

作者简介: 王汉臣 (1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事岩土勘察设计和研究工作。

软岩是一种在地质工程中广泛存在的岩石类型,常见于隧道、矿山和边坡等工程中。在施工过程中其原始状态容易受到扰动,进而会与大气和水相遇发生软化和崩解<sup>[1]</sup>。软岩的典型特征主要包括:低强度,软岩的力学强度较低,容易在外力作用下发生变形或破坏;高水敏感性,软岩遇水后,内部结构会发生显著变化,表现为强度迅速下降和体积膨胀,这种水敏感性严重影响稳定性;易崩解性,软岩在遇水或环境变化时,容易发生崩解,其结构从微观缺陷逐渐发展到宏观破碎,导致整体破坏。这些特性使其在工程应用中面临诸多挑战,因此研究软岩的崩解特性及机理,对于工程设计、施工质量和安全评估具有重要意义。

软岩的崩解是一个受多种因素影响的复杂现象,国内外学者进行了大量研究。从研究方法分类主要分为:1)室内试验<sup>[5]</sup>。在实验室尺度预设多种试验条件如干湿循环、冻融循环<sup>[9]</sup>、不同pH值<sup>[10-11]</sup>等,研究软岩在不同试验条件下的崩解特性。近年来,国内外许多学者通过室内试验对软岩崩解特性进行了大量研究<sup>[12]</sup>。张涛等<sup>[13]</sup>通过矿物组分分析、耐崩解试验和电阻率测试,研究炭质岩石耐崩解性随浸水时间的变化,提出基于电阻率测试的预测模型;刘凤云等<sup>[14]</sup>在不同水热试验条件下,研究红层软岩的崩解特征,发现黏土矿物含量是崩解的主要原因,崩解程度与初始含水量和水热效应密切相关。2)数值模拟。有限元法(finite element method, FEM)<sup>[15]</sup>、数学模型<sup>[16-17]</sup>、有限离散元法(finite discrete element method, FDEM)<sup>[18]</sup>,用于预测软岩的崩解模式和变化趋势。目前,对软岩崩解的研究工作主要围绕室内试验和少部分有限元数值模拟,但软岩的崩解往往是不连续和不均匀的行为,如碎块的剥落,传统的连续介质方法难以准确描述<sup>[19]</sup>。

因此将室内崩解试验与X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、扫描电镜相结合,从宏观角度阐述软岩崩解规律,并从微观角度探讨其崩解机理,最后在试验结果的基础上,采用离散元法建

立软岩二维崩解模型。探究软岩崩解过程中含水量、颗粒位移以及能量的变化,对崩解机理进行研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料来自于平陆运河先导建设项目,平陆运河始于西江干流西津库区南宁横州市平塘江口,全长约140 km,是一条通江达海的水运通道。运河下伏基岩主要为侏罗系(J)泥质粉砂岩、砂岩和泥岩等均属于软岩,遇水易软化普遍具有较强的崩解性,易引发大量的工程地质问题,直接影响河岸边坡的长期稳定性。由于岩样的特点,在该区域进行样品的采集。触摸岩块后手上会留下明显的痕迹,因此需要对岩块进行特殊处理。

首先,将岩块用薄膜包裹以保护其表面,随后进行蜡封以防止水分和其他环境因素的影响。每个样品都进行详细的标记,以便后续的识别和试验分析。处理完毕后,将样品放入带有减震泡沫板的木箱,确保在运输过程中不受到震动或损坏。随后送往实验室进一步研究。

### 1.2 岩样制备及崩解试验方法

为了减少制样过程对试样的扰动,使用切土钢丝锯小心地切除土样表层的护壁泥浆土,以保持土样原始尺寸。最终用于崩解试验的圆柱体试样的直径约25 mm,高度约30 mm。

选取天然状态下4块大小相似的岩样,每块试样的质量约30 g,进行静止浸泡崩解试验。首先,将试样放入烘箱中,在105~110℃下烘干24 h,待试样在容器内冷却后,称量干燥后的质量 $m_0$ ;然后,将试样分别在水中浸泡5、10、15和20 min,以达到不同崩解时间的试验要求;随后,将崩解后的试样放入恒温烘箱中干燥12 h,直到达到恒定质量 $m_1$ ;最后,使用粒径为2.000、1.000、0.500、0.250、0.100和0.075 mm的圆孔标准筛进行过筛,并分别称量不同粒径范围内崩解物的质量。为了确保试验结果的准确性,每次称量和过筛步骤都经过了严格的校准和记录。在不同浸

泡时间后,详细观察和记录试样的崩解状态,包括颗粒的形态变化和尺寸分布。所有数据将用于分析水浸对软岩崩解行为的影响。此外,在整个试验过程中,严格控制环境温度和湿度,以减少外界因素对试验结果的影响。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 崩解现象分析

将软岩试样分别放入清水浸水至 5、10、15 和 20 min 中进行崩解试验,以 5 min 为例的崩解过程如图 1 所示。



图 1 软岩崩解过程

Fig. 1 Disintegration process of soft rock

在该软岩岩样浸水后,崩解过程大致可以分为 3 个阶段:在崩解初期,试样表面的土颗粒会迅速脱落,大部分土颗粒会溶于水,因此水会逐渐变浑浊,试样崩解呈现出由外向内的渐进式过程;在崩解中期,岩样首先会沿着原有的小裂隙多次开裂,开裂后的小块试样迅速崩解并溶于或沉入水中,而剩余的大块试样则在短时间内保持相对稳定。随着时间的推移,水分持续浸入,崩解进行到最后的阶段,大块试样会再次沿着原生裂隙发生开裂,并最终贯通。

然而,在整个崩解过程中,试样并不会完全崩解,剩余的土体在较长时间内仍能保持稳定状态。该现象表明,在浸水崩解过程中,软岩岩样的崩解具有一定的阶段性和渐进性,初期表现为快速的表面颗粒脱离和小块崩解,随后大块试样逐渐裂解并崩解,最终试样的整体结构明显破坏,崩解物主要呈块状、碎块状,部分呈颗粒状,同时仍有部分较大的块体保持相对的稳定性,并未完全崩解成细小颗粒。

### 2.2 浸泡时间对崩解物粒径比例的影响

在水的持续浸泡作用下,软岩内部结构受到

断裂破坏,逐渐形成更小的颗粒。图 2 为崩解物的颗粒级配情况。

由图 2 可知,大颗粒的百分比一直高于小颗粒。然而,随着浸泡时间的延长,大颗粒逐渐崩解为小颗粒,导致大颗粒的百分比逐步减少,而小颗粒的百分比则逐步增加,从而使得崩解物的粒径分布曲线整体向上移动。具体而言,在崩解初期阶段,大颗粒在水浸过程中保持相对稳定,但随着时间的推移,在崩解中后期阶段,水逐渐渗透到岩样内部,导致其沿着裂隙崩解为较小颗粒。此过程不仅改变了颗粒的大小分布,还对岩样的整体结构造成了影响,另外,随着颗粒细化,岩样的物理性质也可能发生变化,如强度和渗透性。

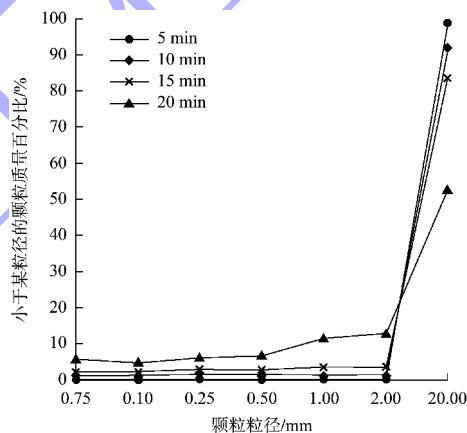


图 2 崩解物颗粒分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of disintegration particle

### 2.3 浸泡时间对耐崩解特性的影响

软岩的耐崩解性是指岩石在遇水软化或崩解时表现出来的抵抗能力,随浸泡时间的增加,可用耐崩解性指数定量分析软岩耐崩解性的变化,其中岩石试样耐崩解指数按照 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》<sup>[20]</sup> 计算为:

$$I_{d,2} = \frac{m_t}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $I_{d,2}$  为第 2 次标准循环的耐崩解指数;  $m_t$  为浸泡  $t$  分钟后残留试样的烘干质量, g;  $m_0$  为浸泡前试样的烘干质量, g。

图 3 为耐崩解指数变化曲线,可以看出,随浸水时间的增加,岩样的  $I_{d,2}$  值呈下降趋势。在浸



水初期(0~15 min),  $I_{d,2}$  值的下降速度较为缓慢;然而,当浸水时间进一步延长至 15~20 min 时,  $I_{d,2}$  值则快速下降。进一步分析发现,在初始浸水阶段,岩样内部的水分侵入主要集中在表层,导致耐崩解性略有降低,但整体影响较小。随着时间的推移,水分逐渐渗透到岩样的内部结构,破坏其内部微裂隙和孔隙结构,导致耐崩解指数迅速下降。特别是在 15~20 min 的阶段,水分的深入渗透加剧了岩样的结构性破坏,耐崩解性急剧减弱。这一结果揭示了软岩在水环境中的弱点,即随着浸泡时间的增加,水分对其结构完整性的破坏作用显著增强。

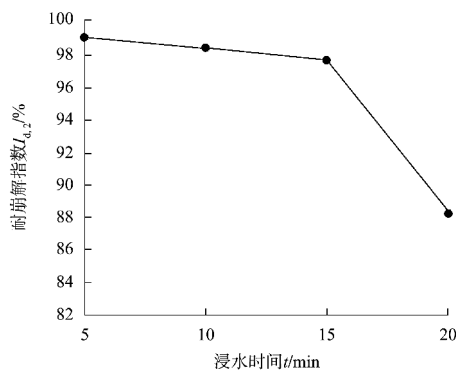


图3 耐崩解指数变化曲线

Fig. 3 Variation curve of slake durability index

## 2.4 崩解机理

XRD 试验结果显示,软岩的主要成分包括黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石)、粉砂砂屑(石英、钾长石、赤铁矿)和碳酸盐水泥(方解石、白云石、菱铁矿),如图4所示。其中,石英和黏土是软岩的主要组成成分。

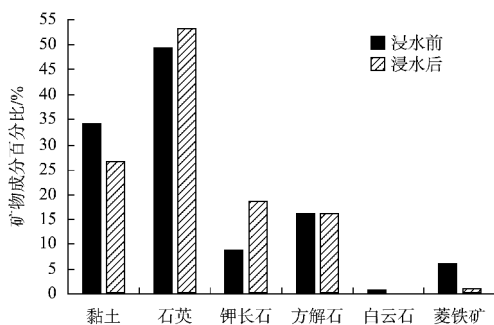
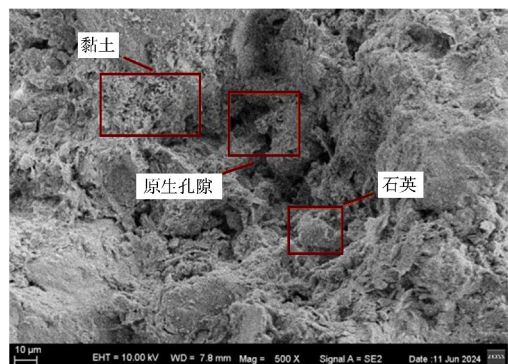


图4 浸泡前后软岩矿物成分变化结果

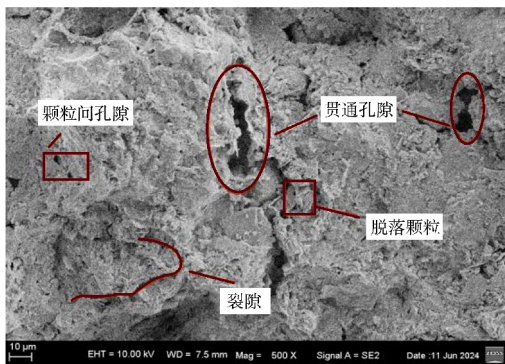
Fig. 4 Mineral composition changes results in soft rock before and after immersion

浸水处理前后,软岩岩样的矿物组成发生了显著变化。天然状态下,软岩中黏土矿物占 34.3%,浸水处理后,比例下降到 26.5%。这种变化是由于黏土矿物中的蒙脱石、高岭石、伊利石等具有很高的水敏性,水分的吸附会导致其吸水膨胀,产生内部应力,使得颗粒发生碎裂。并且随着浸水时间的延长,黏土颗粒之间的结合力进一步减弱,导致颗粒间的摩擦力下降,部分破碎的黏土颗粒从岩样表面脱落,并在水中分散。这一过程中,水分持续进入内部,加剧了软岩的崩解。最后在水的持续作用下,岩样内部的微裂隙逐渐扩展并贯通,形成较大的裂隙系统。原本紧密的颗粒结构被破坏,岩样逐渐崩解成更小的颗粒,最终失去整体结构的稳定性。

此外,为了进一步分析崩解机理,还对浸水前后的软岩岩样进行了扫描电镜试验,如图5所示。从扫描结果可以看出软岩岩样大部分由黏土和石英所组成,这与 XRD 试验结果相符。由图 5a)可知,对于天然岩样,虽存在一些原生孔隙,但这些孔隙相对完整且未受明显破坏,试样整体结构紧密,黏土和石英等矿物颗粒相互填充和支撑,形成了相对稳定的微观结构。在浸水后,水敏性黏土矿物吸水膨胀,使得原生孔隙开始扩展,中小孔逐渐贯通形成相对分散的大孔。除此之外,由于黏土颗粒间的结合力减弱以及黏土矿物在水的作用下溶解,还可以观察到明显的裂隙和脱落颗粒。裂隙贯穿较多区域,形成了较为明显的贯通孔隙。试样的微观结构变得疏松,原本紧密的黏土和石英颗粒之间出现显著分离,部分黏土颗粒脱落,留下了脱落颗粒和新的孔隙,如图 5b)所示。



a) 软岩试样浸水前微观结构



b) 软岩试样浸水后微观结构

图 5 软岩试样微观结构

Fig. 5 Microstructure of soft rock samples

### 3 离散元法原理及模型建立

#### 3.1 MatDEM 原理

本文基于颗粒离散元原理,采用南京大学开发的 MatDEM<sup>[21]</sup> 进行数值模拟,在 MatDEM 中,离散单元通过弹簧相互连接,产生法向力( $F_n$ )和剪切力( $F_s$ )。根据莫尔-库仑准则,最大剪切力( $F_{s,max}$ )决定了弹簧所能承受的极限,并建立了离散单元的损坏标准。当剪切力( $F_s$ )超过最大剪切力( $F_{s,max}$ )或正常位移( $X_n$ )小于 0,或大于或等于断裂位移( $X_b$ )时,切向弹簧或法向弹簧将断裂,导致离散单元的分离,如图 6 所示。相关公式如下:

$$F_{s,max} = F_{s,0} - \mu_p F_n \quad (2)$$

$$F_s = K_s X_s \quad (3)$$

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n & (X_n < X_b) \\ K_n X_n & (X_n < 0) \\ 0 & (X_n > 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $F_{s,0}$  为离散单元之间的抗剪强度,  $\mu_p$  为离散单元之间的摩擦系数,  $K_n$  为法向刚度,  $K_s$  为切向刚度,  $X_s$  为切向位移。

在实际应用中,法向力和剪切力的相互作用决定了离散单元的力学行为。当切向力超过临界剪切力,或者正常位移超出允许范围时,弹簧失效,离散单元发生断裂,该过程能够精确地描述材料在应力作用下的响应和损坏机制。

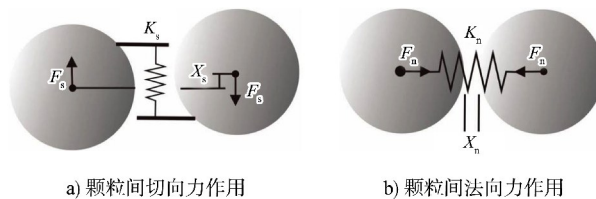


图 6 颗粒间接触

Fig. 6 Inter-particle contact

#### 3.2 模型的建立

模拟崩解过程的 MatDEM 模型如图 7 所示。该模型样品的宽 25 mm、高 30 mm。依据试验获得的颗粒级配数据,在模型中使用不同半径的颗粒代表不同矿物。软岩的崩解过程从外向内进行,当软岩的表层先软化或剥落时,水分逐渐渗透到岩石内部,重复软化的过程。因此,在模拟中,将样品表面的颗粒设定为具有高初始含水率,并用橙色颗粒表示。在水岩界面处,水通过颗粒间的接触逐步传递,水分从高含水率颗粒逐渐向低含水率颗粒迁移,从而模拟浸没试验中的水分渗透现象。由于重力的影响,横向小于垂直方向的渗透率。

此外,岩石和容器之间的接触面会阻碍水的渗透,因此模型的外部 and 底部被设定为隔水边界。模型的上边界、左边界和右边界作为水岩界面,被设定为近似饱和的恒流边界,初始含水量设定为 50%。整个模拟过程在无约束条件下进行,本模型的力学参数根据前期开展的试验和实地调查所选取,如表 1 所示。

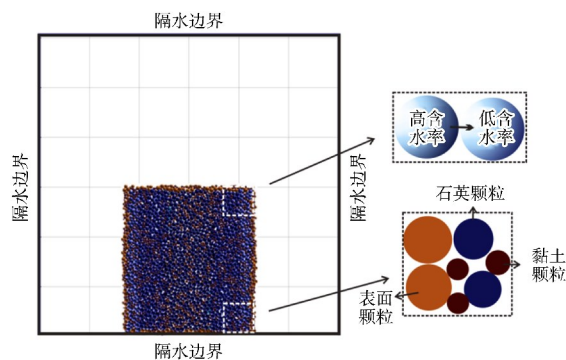


图 7 MatDEM 模型

Fig. 7 MatDEM model

表 1 模型参数  
Tab. 1 Model parameters

| 弹性模量<br>$E/\text{GPa}$ | 泊松比  | 抗拉强度<br>$T_u/\text{MPa}$ | 抗压强度<br>$C_u/\text{MPa}$ | 摩擦<br>系数 $\mu$ | 密度 $\rho/$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|------------------------|------|--------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------------------------|
| 3.2                    | 0.24 | 2                        | 9.6                      | 0.65           | 1 900                                           |

## 4 模拟结果

### 4.1 崩解过程

崩解过程中岩样的含水率变化和颗粒位移方向的动态变化如图 8 所示, 揭示了泥岩在水侵蚀作用下的复杂行为。在模拟开始时, 即崩解初期, 样品的含水量从外部向内部开始传递, 样品表面的含水量表现出高饱和状态, 并且表面的碎屑颗粒也表现出较高的含水量。同时, 样品中心区域的含水量却相对较低, 几乎与初始状态保持一致,

该现象也完全符合室内试验崩解初期所显示的结果。随着步长的增加, 崩解进入到中后期阶段, 更多的颗粒在重力作用下逐渐脱落, 并在样品底部两侧堆积。这一现象与实验室试验中的颗粒沉积情况基本一致。随着样品顶部的高含水量而导致颗粒逐渐软化, 以及外层颗粒的不断脱落和内部颗粒的逐渐暴露, 样品的结构逐渐发生崩解, 最终使得整体结构不稳定。

此外, 图 8 中还可以观察到, 含水量的变化直接影响颗粒的位移和运动方向。外层颗粒因含水量增加而变得松散和不稳定, 在崩解初期颗粒运动方向向外脱落, 而随着时间变化, 颗粒的运动方向从向外部变为向下沉积最终导致结构崩解。

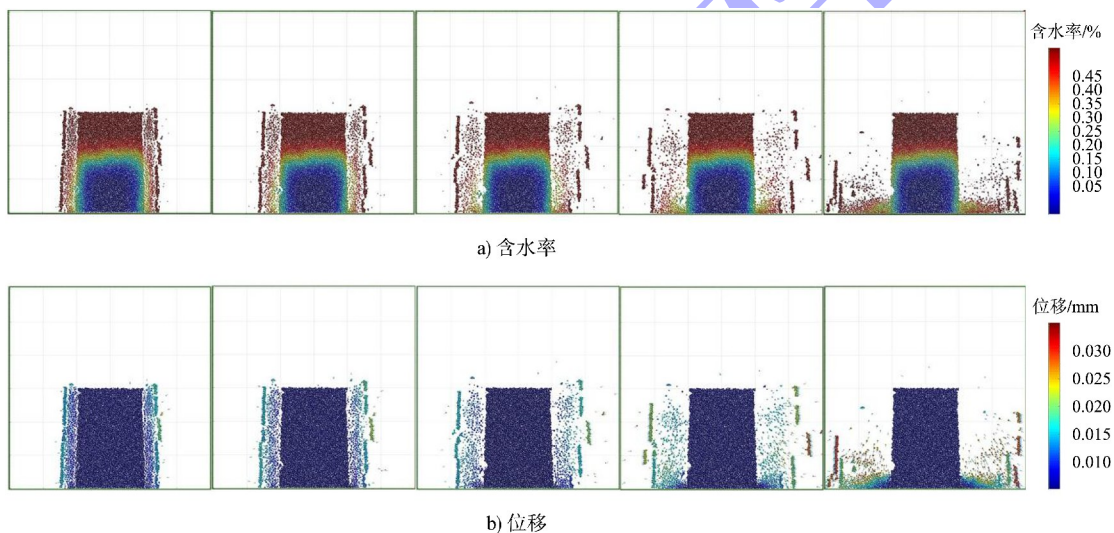


图 8 崩解过程中含水率和位移变化

Fig. 8 Water content and displacement variation during disintegration process

### 4.2 能量随浸泡时间变化

软岩崩解过程是一个能量变化的过程, 这是由于在崩解过程中岩样也处于破碎的状态, 而岩样内部各个原子又是通过化学键相连接, 所以当岩样受到外力作用, 化学键断裂, 弹性势能也由此发生改变; 另外, 随着崩解过程的进行, 颗粒由于相互运动(摩擦或撞击)以及脱落也会使得动能和势能发生改变。

图 9 为崩解过程中的能量变化。从图中可以看出, 在整个崩解过程中, 动能表现出了显著的增加趋势, 随后逐渐趋于平稳。这表明在崩解初

期, 颗粒的摩擦和碰撞运动增加, 动能迅速增加; 但随着崩解过程的进行, 颗粒之间的摩擦和碰撞逐渐减弱, 动能逐渐减少。同时, 弹性势能在整个过程中缓慢增加, 这是因为泥岩颗粒在崩解过程中, 内部结构的弹性变形增加, 储存了更多的弹性势能。相反, 重力势能则呈现下降趋势, 部分重力势能转化为动能、弹性势能, 随着泥岩颗粒的移动, 重力势能逐渐减少。

综上, 软岩在崩解过程中经历了显著的能量变化, 主要体现在动能和弹性势能的增加以及重力势能的减少。崩解初期, 颗粒运动剧烈, 动能



显著增加,而随着时间的推移,动能逐渐趋于平稳。弹性势能的缓慢增加反映了内部结构的变形过程,而重力势能的减少则是由于颗粒的下沉和脱落,转化为其他形式的能量。

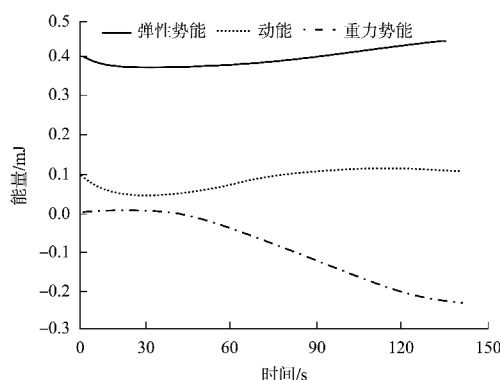


图9 能量随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of energy changing with time

## 5 结论

1) 软岩浸水崩解主要分3个阶段:崩解初期表面颗粒迅速脱落,崩解中后期裂隙扩展并贯通,大块岩体开裂。且随着浸泡时间增长,颗粒逐渐细化,耐崩解性显著降低,在崩解进行到15~20 min变化剧烈。

2) 软岩矿物组成的类型和含量是影响崩解性强弱的重要因素,本文研究的软岩岩样黏土矿物含量占比较高,浸水前后黏土矿物含量下降了7.8%,原因是在遇到水的作用时,由于黏土矿物晶格构造的特殊性,颗粒会吸水产生膨胀,这种膨胀使得岩体内部产生不均匀应力,导致孔隙贯通、裂隙产生以及颗粒脱落,最终诱发岩样的崩解。

3) 采用离散元法建立软岩的二维崩解模型,对试验结果进行验证,软岩在崩解过程中表现出显著的阶段性特点。初期样品表面含水率高,导致外层颗粒迅速脱落并向外运动,中心区域含水率低,结构保持稳定。随着浸泡时间的增加,样品内部含水率逐渐上升,颗粒软化并向下沉积,最终导致整体结构的不稳定。

4) 软岩崩解过程中能量发生了显著变化:动能和弹性势能增加,重力势能减少。崩解过程中,颗粒摩擦碰撞增多,动能显著增加,随后趋于平稳。而弹性势能缓慢增加,重力势能因颗粒下沉

转化为动能和弹性势能。

## 参考文献:

- [1] 尹红亮,文良东,吴国庆,等.干湿循环条件下红层泥岩崩解特性及规律研究[J].公路交通科技,2023,40(4): 94-102.  
YIN H L, WEN L D, WU G Q, et al. Study on disintegration characteristics and rule of red-bed mudstone under action of dry-wet cycles[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40 (4): 94-102.
- [2] 程树范,曾亚武,叶阳,等.甘肃红层泥岩耐崩解试验与矿物夹杂效应研究[J].岩土力学,2023,44(S1): 99-106.  
CHENG S F, ZENG Y W, YE Y, et al. Slake durability test and mineral inclusion effect of Gansu red-bed clay rock[J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(S1): 99-106.
- [3] 王宇,夏厚磊,邓华锋,等.含水泥岩卸荷蠕变数值模拟及劣化机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7): 1621-1635.  
WANG Y, XIA H L, DENG H F, et al. Numerical simulation of unloading creep and deterioration mechanism of water-bearing mudstone[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43(7): 1621-1635.
- [4] 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.  
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.
- [5] 廖进,兰春晖,吴勇桃,等.红层软岩软化的微-细-宏观界面关联过程与跨尺度级联效应[J].岩石力学与工程学报,2024,43(5): 1241-1254.  
LIAO J, LAN C H, WU Y T, et al. Micro-meso-macro interface correlation processes and cross-scale cascade effects in red-bed soft rocks softening[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43 (5): 1241-1254.
- [6] 付业扬,刘朝晖,高乾丰,等.干湿循环作用下预崩解炭质泥岩微观结构及持水特性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(1): 292-304.

- FU Y Y, LIU Z H, GAO Q F, et al. Microstructure and water holding characteristics of pre-disintegrated carbonaceous mudstone under the action of wetting and drying cycles[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2023, 54(1): 292-304.
- [7] 曾铃, 邱健, 匡波, 等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩强度特性及其劣化机制 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(9): 3635-3646.
- ZENG L, QIU J, KUANG B, et al. Strength characteristics and deterioration mechanism of pre-disintegrated carbonaceous mudstone in wetting and drying cycles[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2023, 54(9): 3635-3646.
- [8] 杜志祥, 白丁伟, 时步炯, 等. 干湿循环作用下峨州-新昌地区红层软岩崩解及强度弱化特性 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 253-261.
- DU Z X, BAI D W, SHI B J, et al. Disintegration and strength weakening characteristics of red-bed soft rock in the Shengzhou-Xinchang area under dry-wet cycles [J]. Bulletin of geological science and technology, 2024, 43(1): 253-261.
- [9] 郭海桥, 程伟, 尚志, 等. 水分和冻融循环对酷寒矿区煤矸石风化崩解速率影响的定量研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3859-3864.
- GUO H Q, CHENG W, SHANG Z, et al. Quantitative determination of the effect of moisture and freeze/thaw cycles on coal gangue decay rate in severe cold mining areas[J]. Journal of China coal society, 2019, 44(12): 3859-3864.
- [10] 邓涛, 黄明, 詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1480-1485.
- DENG T, HUANG M, ZHAN J W. Fractal evolution law of clay rock disintegration under different pH conditions[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2014, 42(10): 1480-1485.
- [11] 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, 59.
- LIANG B, TAN X Y, JIANG L G, et al. Experimental analysis of slaking characteristics of mudstone in different pH solutions[J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2015, 37(2): 23-27, 59.
- [12] 付国斌, 于越, 闫盛熠, 等. 白鹤滩库区小坝组泥岩崩解特性及边坡破坏机制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1137-1146.
- FU G B, YU Y, YAN S Y, et al. Mudstone disintegration characteristics and slope failure mechanism of xiaoba formation in baihetan reservoir area [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(3): 1137-1146.
- [13] 张涛, 杨玉玲, 骆俊晖. 水侵条件下炭质岩石耐崩解特性及预测模型研究 [J/OL]. 土木工程学报, <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24010014>.
- ZHANG T, YANG Y L, LUO J H. Slake durability behaviors and predictive model of carbonaceous rocks exposed to water intrusion [J/OL]. China civil engineering journal, <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24010014>.
- [14] 刘凤云, 谢飞, 邱恩喜, 等. 川西红层软岩崩解演变特征与微观响应机理试验研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1597-1608.
- LIU F Y, XIE F, QIU E X, et al. Experimental study on disintegration evolution characteristics and microscopic response mechanism of red-bed soft rock in western Sichuan [J]. Journal of engineering geology, 2022, 30(5): 1597-1608.
- [15] 胡志杰, 李光裕. 降雨条件下崩解炭质泥岩一维渗流特性研究 [J]. 公路, 2018, 63(11): 21-27.
- HU Z J, LI G Y. Research on seepage characteristics of one-dimensional carbon mudstone disintegration under rainfall condition[J]. Highway, 2018, 63(11): 21-27.
- [16] 赵明华, 陈炳初, 苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 351-356.
- ZHAO M H, CHEN B C, SU Y H. Fractal analysis and numerical modeling disintegrate process of red-bed soft rock[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2007, 38(2): 351-356.
- [17] 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.
- 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(2): 350-355.