

刘知,杨亚军,李喜安.不同含水率下离石黄土崩解过程及特性分析[J].西安科技大学学报,2026,46(2):444-454.

LIU Zhi, YANG Yajun, LI Xi'an. Disintegration process and characteristics of Lishi loess under different moisture contents[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 444-454.

不同含水率下离石黄土崩解过程及特性分析

刘知^{1,2}, 杨亚军³, 李喜安⁴

- 山西省煤炭地质物探测绘院有限公司, 山西 晋中 030600;
- 自然资源部矿业城市自然资源调查监测与保护重点实验室, 山西 晋中 030600;
- 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
- 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要:黄土作为一种水敏性极强的灾害性地质体,浸水时易引发结构失稳,对工程建设和人居环境构成严重威胁。为探究黄土的崩解特性,以初始含水率为主控变量,通过室内崩解试验,对比了不同含水率下离石黄土崩解特性,分析崩解动力学过程,构建描述崩解过程的数学模型,并借助 PFC 软件对土体的崩解过程进行反演,从微观层面揭示在水分作用下黄土颗粒间胶结键的动态劣化机制。结果表明:不同含水率下黄土崩解过程曲线呈现出“S”型特征;在崩解初期,试样内部伴随着水气交换而释放出大量气泡,加速崩解阶段,崩解速率维持在较高水平,后期试样完整性的逐渐丧失,崩解速率逐渐减缓,直至崩解过程结束;在 Gompertz 数学模型中, α 代表崩解曲线的上渐近线值,为崩解所能达到的最大量, λ 为增长率系数,与不同含水率下崩解曲线的斜率相关,反映了崩解速率的变化, β 为曲线的拐点,对应崩解速率的峰值;崩解过程中水分渗透通过破坏既有胶结结构,进而削弱了颗粒接触网络,最终触发宏观崩解失稳现象。研究结果为黄土地区工程实践、地质灾害的预防与治理提供理论参考。

关键词:离石黄土;崩解;Gompertz 数学模型;颗粒流;含水率

中图分类号: TU 44

文献标志码: A

文章编号: 1672-9315(2026)02-0444-11

DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2026.0219

Disintegration process and characteristics of Lishi loess under different moisture contents

LIU Zhi^{1,2}, YANG Yajun³, LI Xi'an⁴

- Coal Geological Geophysical Exploration Surveying and Mapping Institute of Shanxi Province, Jinzhong 030600, China;
- Key Laboratory of Investigation, Monitoring and Protection of Natural Resources in Mining Cities, Ministry of Natural Resources, Jinzhong 030600, China;
- School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
- School of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: As a highly water-sensitive and hazardous geotechnical body, loess is prone to structural in-

收稿日期: 2025-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42230712, 41877225); 自然资源部矿业城市自然资源调查监测与保护重点实验室开放课题项目(2023-B04); 山西省地质勘查建设与发展基金项目(2023-007)

第一作者: 刘知, 男, 山西朔州人, 高级工程师, E-mail: 2454667759@qq.com

通信作者: 李喜安, 男, 陕西丹凤人, 博士, 教授, E-mail: delixa@chd.edu.cn

stability upon water immersion, posing serious threats to engineering construction and the living environment. To investigate its disintegration characteristics, this study employed indoor disintegration tests with the initial moisture content as the primary control variable. A comparative analysis of the disintegration behavior of Lishi loess under varying moisture contents was conducted, alongside an examination of the disintegration kinetics. A mathematical model was proposed to describe the disintegration process, and the Particle Flow Code (PFC) software was utilized to simulate this process, revealing the dynamic degradation mechanism of interparticle cementation bonds under the influence of water at the microscale. The results indicated that the disintegration process curve of loess exhibits an “S” shaped characteristic under different moisture contents. During the initial stage, a substantial amount of bubbles is released accompanying water-air exchange within the specimen. The process accelerates with a high disintegration rate, followed by a gradual decline in the rate as the specimen integrity was progressively lost until disintegration ceased. In the Gompertz mathematical model, α represents the upper asymptote of the disintegration curve, indicating the maximum disintegration extent; λ is the growth rate coefficient, related to the slope of the disintegration curve under different moisture contents and reflecting the change in disintegration rate; and β denotes the inflection point of the curve, corresponding to the moment when the disintegration rate peaks. The disintegration process is initiated by water infiltration, which disrupts the existing cementation structure, subsequently weakens the particle contact network, and ultimately triggers the macroscopic disintegration instability phenomenon. The findings of this study can provide a theoretical reference for engineering practices and the prevention and mitigation of geohazards in loess regions.

Key words: Lishi loess; disintegration; Gompertz mathematical model; Particle Flow Code; moisture content

0 引言

黄河流经世界上黄土分布最为连续、厚度最大、地层层序最为完整的黄土高原;黄河之黄,在于黄土^[1]。黄土是在第四纪干旱-半干旱气候条件下形成的一种以粉粒为主,胶粘粒作为胶结剂并具有开放结构的碎屑状松散堆积物^[2];结构疏松多孔、胶结作用弱、垂直节理发育以及强水敏性等,在自然和人为因素的共同作用下,黄土分布区极易诱发各类灾害、工程问题频发^[3-4],这些问题的发生归结于黄土遇水湿化散解的特性上^[5]。因此,为保证工程结构的稳定运行和防止灾害的发生,对黄土崩解过程进行探讨显得尤为重要。

黄土在浸水条件下极易发生从“结构失稳”到“整体溃散”的灾变过程,这深刻揭示了黄土在水作用下的高度敏感性与脆弱性。近年来,黄土的崩解特性在国内外受到了广泛关注与深入探讨。王箐莪等对不同初始基质吸力的土样进行了崩解试验,发现干燥黄土比湿润黄土更容易发生崩解破坏,非饱和重塑黄土的初始基质吸力与平均崩解速度存在对数关系^[6];谷天峰等以土样尺

寸、初始含水率等因素为变量,探讨了崩解速率与各指标间的关系^[7];李家春等进行了压实黄土浸水崩解试验,认为压实度、初始含水率是影响崩解速率的关键因素^[8];李喜安将黄土崩解细分为崩离、逆离和解离3种模式,指出浸水面附近的黄土初步崩解为内侧黄土的渐进式增湿提供了必要的边界条件和时间窗口^[9];HUO等从含水率、温度和盐分等因素分析了黄土的崩解过程^[10];LI和WANG探讨了初始含水率、结构、曲率、表面形状等对崩解速率的影响,揭示了形状因素对崩解的重要影响^[11-12]。此外,一些学者研究认为干湿循环和冻融循环导致了土体结构的破坏,并加速了土体内水分的迁移,从而影响土体的崩解性^[13-14]。含水率作为黄土物理性质的关键指标,已成为探讨黄土崩解性及演化规律的研究热点。近些年黄土高原地区的建设向深地发展,不可避免要对坡体进行开挖^[15-16];使得离石黄土广泛出露于地表,增加了其与水接触的可能,进而提升了坡体失稳的可能,加剧了因土水接触而导致包括崩塌、滑坡泥石流等地质灾害的发生频率^[17-19];黄土崩解能力直接反映出其被侵蚀运移的程度,在黄土灾害

的形成和发展中起着至关重要的作用^[20]。

离石黄土在形成年代、物质组成、结构特征和力学性质上与马兰黄土存在显著差异,目前对于马兰黄土的研究已较为系统,但针对离石黄土崩解机制的探索仍显不足,其崩解过程的内在规律和微观机理须进一步探究。颗粒流方法(Particle Flow Code, PFC)依据分子动力学(MD)理论,能够从微观上反应颗粒材料的破碎特性^[21],已广泛应用于对黄土的物理力学试验的模拟,充分证明其在黄土领域的适用性^[22-24]。本研究聚焦于离石黄土的崩解特性,通过室内试验和数学建模相结合的方法,借助 PFC^{3D} 软件在模拟非连续材料(如黄土)的变形和破碎特性方面的优势,揭示不同含水率下离石黄土的崩解动力学规律及微观机制;这一研究为离石黄土分布区的边坡防护、路基修筑

以及地质灾害的预警与治理提供理论依据和技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 样品收集与测试

土样取自山西省兴县杨塔沟,取样层位于 Q₃ 马兰黄土下覆界面之下,通过探井于地表以下 5 m 处获取中更新世离石黄土(Q₂);将土样用铁皮桶包裹,防止在运输过程中对土体结构的损坏。根据规范《土工试验方法标准》(GBT50123—2019)测量并记录了该土样的主要物理力学参数(表 1),对所取的土样过 2mm 筛网,采用 Bettersize 2000 激光粒度分析仪测试黄土试样的颗粒粒径分布(PSD)得到黄土试样的级配曲线(图 1)。

表 1 试验土样的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of test soil sample

比重	含水率/%	干密度/ (g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	颗粒组成/%		
					砂粒 >0.075 mm	粉粒 0.005 ~ 0.075 mm	黏粒 <0.005 mm
2.71	11.22	1.46	31.39	19.43	7.65	79.19	13.16

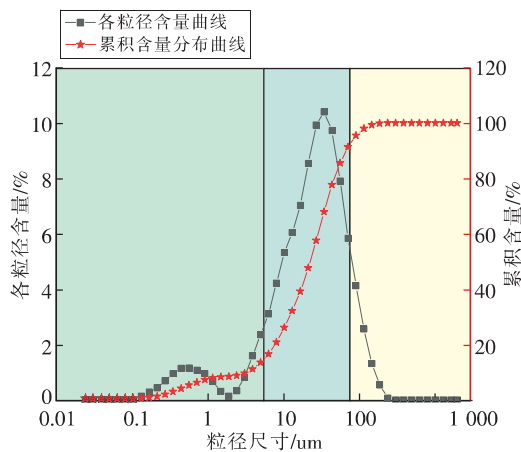


图 1 试样粒度分布特征

Fig. 1 Particle size distribution characteristics of the sample

1.2 试验仪器与方法

室内试验采用文献^[11]中的崩解仪进行崩解试验。由于重塑土土样中,含水率分布更为均匀,在崩解过程中更能突出含水率变化对崩解特性的影响。因此,制备了干密度为 1.45 g·cm⁻³,初始含水率分别为 8%、10%、12%、14%、16% 和 18% 的圆柱体试样(直径 61.8 mm,高 40 mm);制样过程中,将取回的土样烘干、碾压并过 2 mm 的筛网,随

后按照设计含水率和设计干密度计算每个试样所需的干土和纯净水质量,将水倒入装好干土的密封袋,进行充分揉捏,使水分和土样尽量充分混合且不含大颗粒并将其静置 48 h,待水-土充分均匀,然后采用静压法将试样压至设计高度,将环刀样置于保湿皿中养护 24 h 以备后用。

2 室内崩解试验

2.1 崩解现象

不同含水率下试样在浸水后呈现明显的阶段性。首先,土样内部发生强烈的水气交换,大量气泡从黄土试样内部迅速涌出,随着浸泡时间的逐步增加,气泡的溢出速度也在逐渐减缓;在此期间,除了气泡溢出点附近因细粒物质的脱落而呈现出局部雾状外,整个悬浊液保持较高的清澈度;与此同时,相对于整个崩解过程,此时的崩解量较小。紧接着,由于前期气泡快速溢出导致试样局部松动,进而导致小团块的掉落;在高速崩解下试样的完整性丧失,棱角也逐渐被削弱,容器内水的浑浊度明显提升。最后,崩解过程明显减缓乃至停止,试样盘中的土体自稳堆积,逐渐趋于稳定(图 2)。

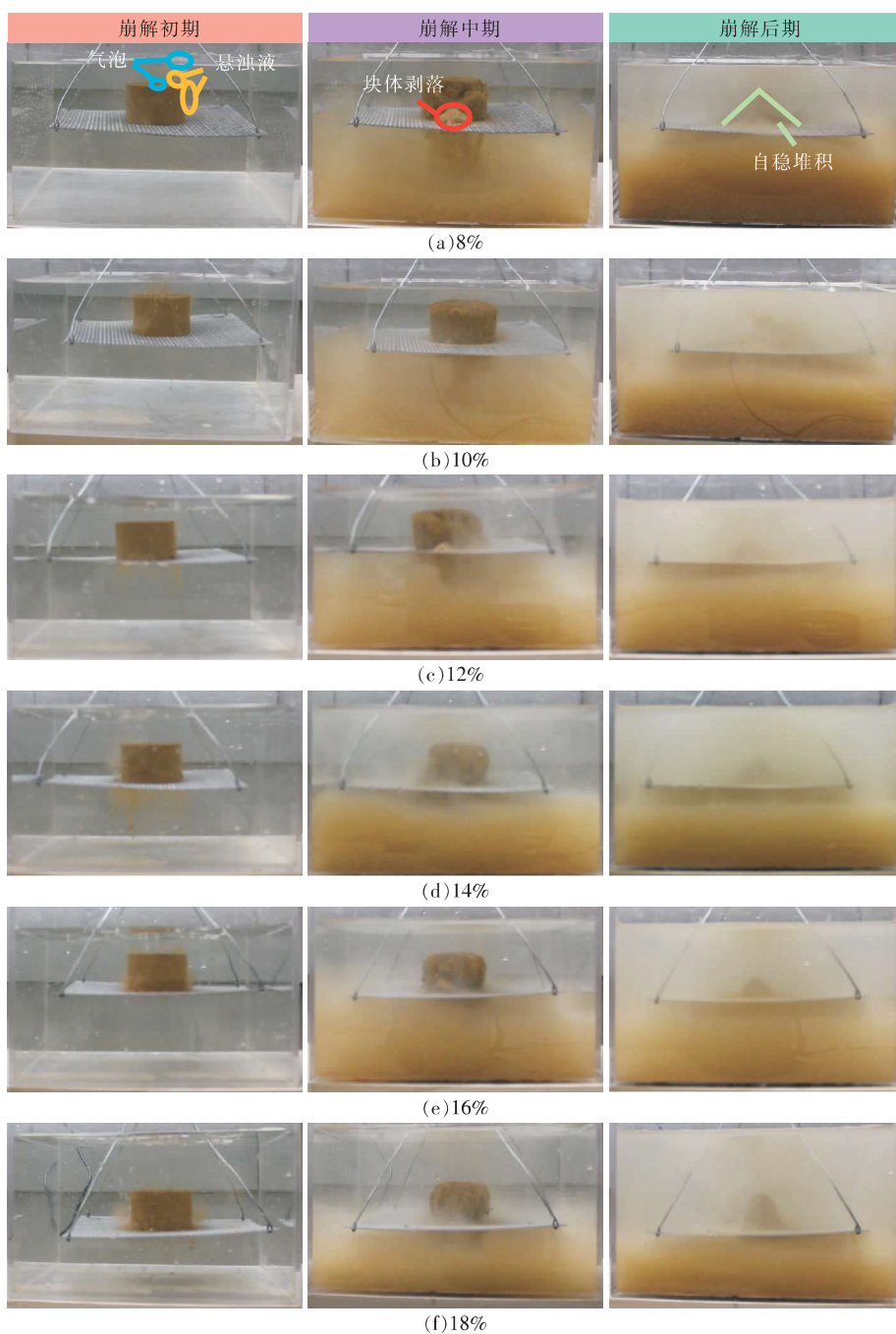


图 2 不同初始含水率下崩解试验过程

Fig. 2 Disintegration test process under different initial moisture contents

2.2 崩解动力学过程

黄土崩解过程中,不同初始含水率的黄土在崩解过程中具有一定的普遍性(图 3)。随着时间的推移,崩解量不断增加,在其他条件相同的情况下,初始含水率成为影响黄土崩解特性的关键因素。具体来看,较低初始含水率的黄土试样崩解曲线的陡峭上升段平均斜率较大,表明其崩解速率较高;与此相反,较高初始含水率的黄土试样崩

解曲线的陡峭上升段平均斜率较小,这说明其崩解速率相对平缓;含水率较低时,崩解较为迅速,达到最大崩解量的时间相对较短,随着含水率的提高,崩解所需的时间在不断延长。

黄土崩解是一个有限地增长过程,Gompertz 曲线通常用来描述初始增长缓慢,随后逐渐加快,当到达一定程度后增长速率下降,最后接近一条水平线,该曲线适合在形态上非对称、样本增长发展先快

后慢地“S”形态曲线拟合^[25]。下面将基于 Gompertz 方程(式(1))对离石黄土崩解过程曲线分析。

$$m_t = ae^{-[\lambda(t-\beta)]} \quad (1)$$

式中 m_t 为崩解量, g; t 为时间, s; α 为曲线上渐近线值; λ 为增长率系数; β 为崩解速率峰值时刻。

Gompertz 模型拟合曲线对于描述不同初始含水率下离石黄土的崩解曲线具有高度的适用性, 拟合度 R^2 介于 0.993 ~ 0.999, 表现出较为理想的拟合效果(图 4)。参数 α 为曲线上渐近线值, 为崩解过程中的最大崩解量, 对比了试验过程中直接测得的最大崩解量与拟合曲线上渐近线的吻合程度, 在不同初始含水率下, 两者之间最大相差 4.556; 当初始含水率为 8% 时, 曲线预测的最大崩解量略低于实测值, 而其余初始含水率下, 崩解量预测的最大值普遍高于实测值, 这是因为在较低含水率下, 曲线的崩解较为迅速且彻底, 而含水率较高时, 崩解过程较为缓慢, 崩解持续时间较长(图 5)。

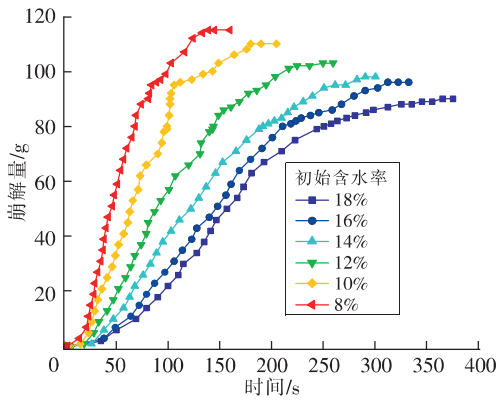


图 3 不同初始含水率黄土崩解过程曲线
Fig. 3 Disintegration process curves of loess with different initial moisture contents

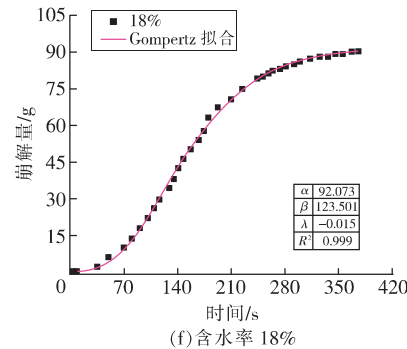
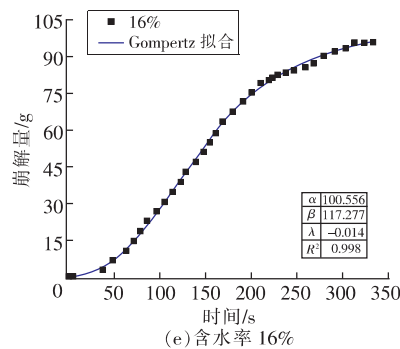
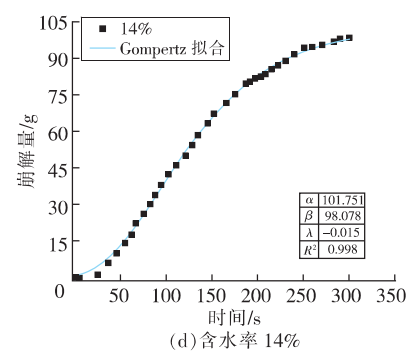
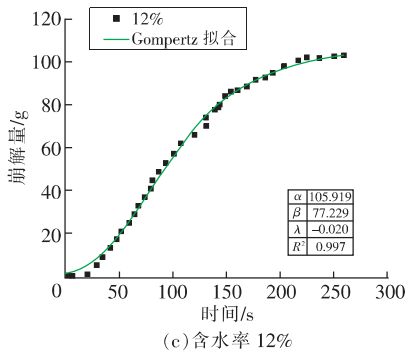
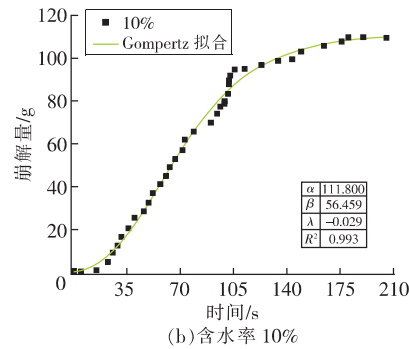
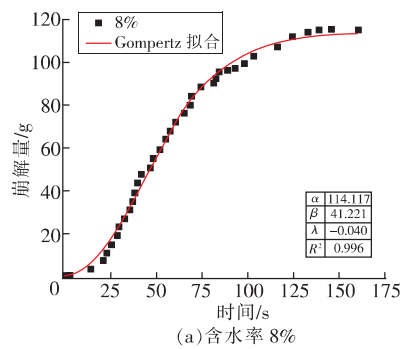


图 4 不同初始含水率黄土崩解过程拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of the disintegration process of loess with different initial moisture contents

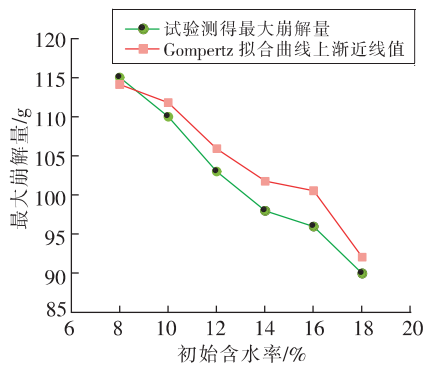


图 5 拟合曲线上渐近线值与最大崩解量对比
Fig. 5 Comparison between the value of the asymptote on the fitted curve and the maximum disintegration amount

参数 β 为曲线增速达到峰值时对应的时间,在该点之前,曲线上各点切线的斜率逐渐增大,而过了该点之后,各点切线的斜率逐渐减小; β 点在几何上代表了曲线凹凸性的改变,在崩解过程中代表了崩解速率由快至慢的转折点,这一点崩解速率达到了最大值。 β 值随含水率的增大呈线性增大,这是因为在崩解过程中,初始含水率较高的试样其崩解进程比较缓慢,崩解需要更长的时间来完成(图 6)。

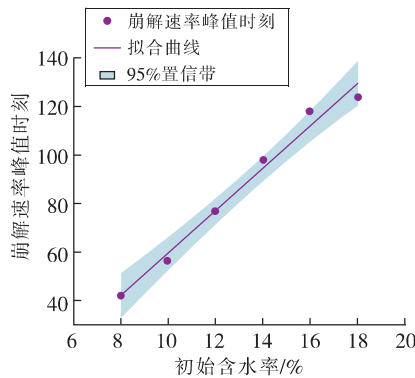


图 6 崩解速率峰值时刻变化曲线
Fig. 6 Variation curves of the peak moment of disintegration rate

λ 为增长率系数,与崩解过程曲线的斜率有密切的联系,Gompertz 模型得到的 λ 值。随着含水率的增大, λ 的绝对值整体上呈现出负指数形式的减小,这一变化在崩解过程曲线上表现为增长段曲线的斜率逐渐降低,即增长段的平均斜率变小,曲线变得更加平缓,体现了含水率增大时崩解性的丧失(图 7)。Gompertz 时间函数描述崩解过程时,公式参数简洁、各参数物理意义明确的优点,

该数学模型能够非常准确地表达黄土的崩解过程。

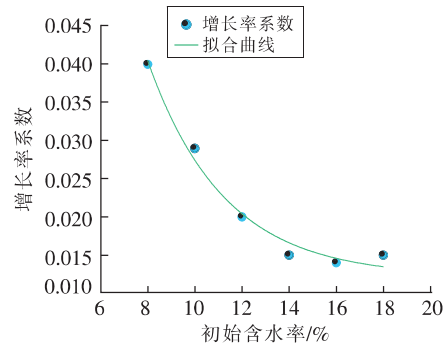


图 7 增长率系数变化曲线
Fig. 7 Variation curves of the growth rate coefficient

3 崩解过程的数值表达

3.1 数值概念模型

在 PFC^{3D}中,材料的宏观特征通过众多微观颗粒的接触本构关系所体现,该软件中有线性接触粘结模型和平行粘结模型。线性接触粘结模型即在接触点位置设置法向和切向强度实现颗粒之间的粘结力,该模型常用于模拟孔隙大、松散材料,它提供了一个理想化的线弹性界面,该界面在接触处具有粘结或摩擦力,界面不抵抗相对旋转^[26]。若颗粒间存在粘结,则颗粒间接触表现为线弹性,一旦超过粘结强度,接触键就会断裂;而在非粘结状态下,接触界面表现为线弹性和摩擦,通过库仑定律来控制滑动行为,接触键断裂后退化为线性模型(图 8)。在本次研究中,我们选择线性接触粘结模型作为描述颗粒间接触互动的基础模型,用以模拟黄土崩解的全过程。

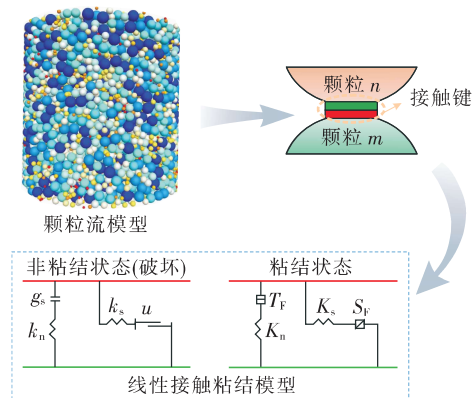


图 8 颗粒间接触模型
Fig. 8 Inter-particle contacts model

3.2 崩解过程的验证

PFC 中的数值模型是由一系列不同半径的球体按照特定的体积分数在空间中排列而成,这些球体因颗粒粒径(PSD)的差异,导致模型中的球体总数和配位数存在显著差异,而配位数则直观地反映了颗粒间的接触和粘结情况。在 PFC 中生成颗粒的方法多样,其中常见的有半径扩大法和颗粒级配法^[27];为了反映与黄土较为相近的胶结特性,同时避免生成球的总数过大而无法计算,本研究借鉴了文献^[28]提到的粒径放大法对黄土颗粒尺寸放大处理;文中构建了直径为 61.8 mm、高度为 40 mm 的圆柱体模型试样。基于室内三轴试验测得的宏观力学数据,对模型中的关键微观参数进行了标定,以确保数值模型能够准确复现土体的真实力学行为(表 2)。

表 2 颗粒细观参数

Table 2 Particle mesoscopic parameters

颗粒半径/mm	密度/(kg·cm ⁻³)	弹性模量/Pa	初始孔隙率/%	泊松比	刚度比	摩擦系数
0.6~1.4	2100	4.5×10 ⁷	35	0.44	1.0	0.42

同一含水率下,随着崩解过程的进行导致颗粒逐渐解体,具体表现为颗粒位移的不断增大;对于不同含水率下,在相同时刻内,随着初始含水率的不断增大,颗粒的位移逐渐减小(图 9)。数值模拟结果进一步揭示,在低含水率下,球体在空间分布比含水率较高时更为混乱,在试验过程中也有所体现,即随着含水率的增加,水的浑浊程度也在不断减小;同时,通过数值模拟中试样的形态变化,可以观察到与试验结果相吻合的变化规律,在崩解模拟过程的初期,仅有试样的棱角和边缘部分

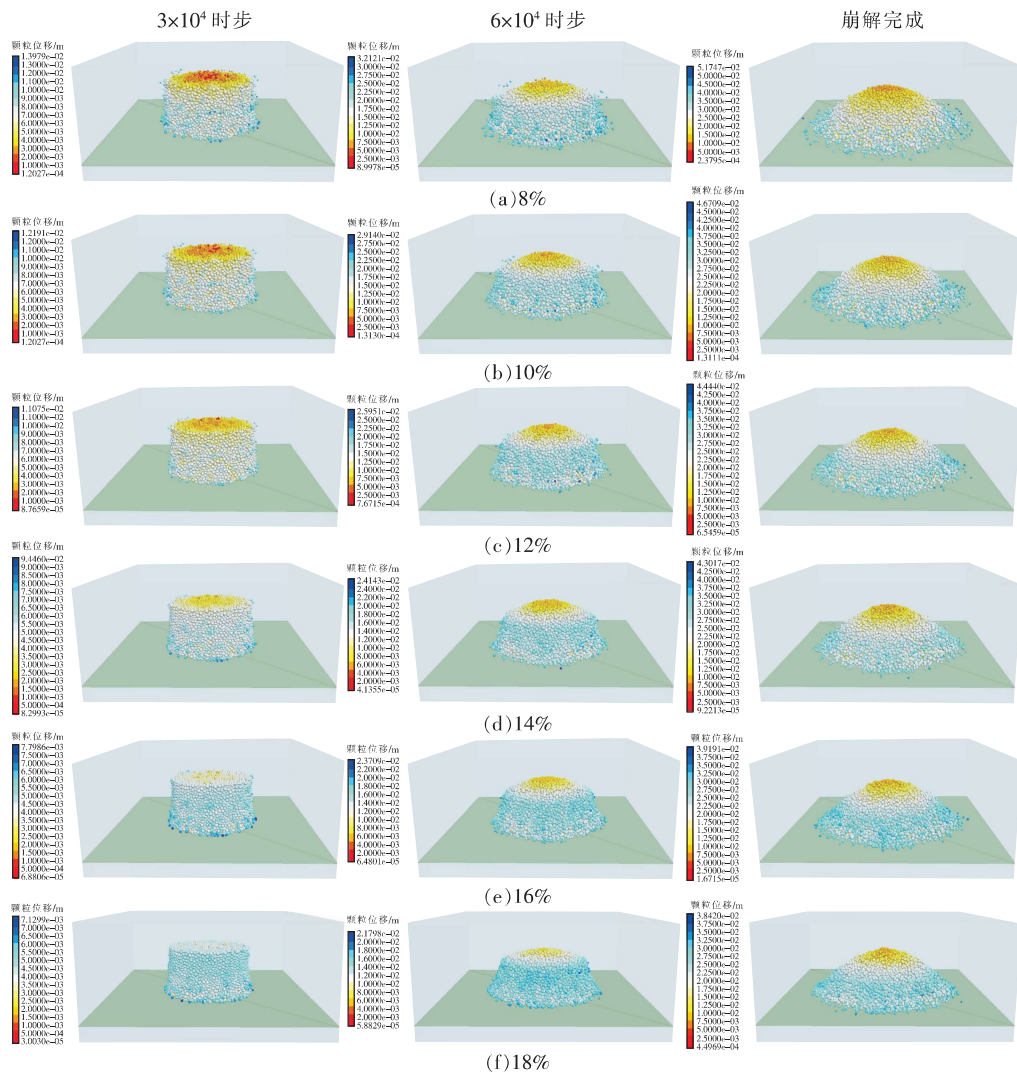


图 9 崩解过程颗粒位移云图

Fig. 9 Particle displacement nephogram during the disintegration process

全球颗粒发生脱落,而试样依然保持着相对完整的形态,随着模拟的进行,试样棱角的球体完全脱落,其完整性已经丧失;当崩解结束时,颗粒之间形成了稳定的堆积状态,呈现自稳的特征。不同初始含水率下黄土崩解率与时间的关系曲线不仅反映了黄土崩解过程的阶段性特征,而且揭示了含水率对崩解行为的重要影响;随着试样含水率的提升,崩解率的变化趋势呈现逐渐变缓的态势,这表明在高含水量下,黄土达到完全崩解状态所需的时间更长,甚至丧失崩解性(图 10)。

在进行颗粒流数值模拟的过程中,黄土颗粒间的胶结作用是通过接触键来模拟和反映的,对比初始含水率为 8% 和 18% 不同时间段内颗粒接触力的变化情况(图 11)。在崩解过程中,相较于试样内部那些保持着一定强度和相互作用的接触点,位于试样棱边及试样表面的接触力迅速衰减至零;这些边缘和表面的颗粒在水的作用下连接最为脆弱,更容易受到外部环境的影响和内部应力的变化,从而导致接触力迅速丧失,接触力的消

失为后续颗粒的逐渐脱落和分离创造了条件。

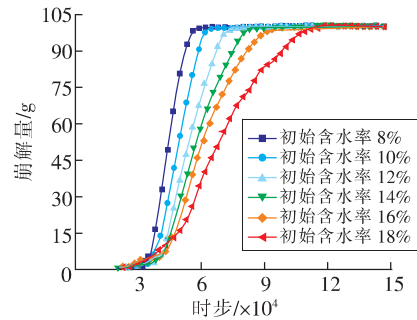


图 10 崩解率变化曲线

Fig. 10 Variation curves of disintegration rate

随着崩解过程的不断推进,试样的整体形态也在经历着显著的变化,原本紧凑的颗粒排列逐渐变得松散,颗粒的相对位置也在不断调整;此过程中,颗粒之间的接触力在持续减弱,试样内部结构稳定性的持续下降。这种接触力的减弱不仅是由颗粒间的胶结作用逐渐失效,还受到各种外部应力和内部变形的影响,这些作用共同导致颗粒间相互作用的进一步削弱。

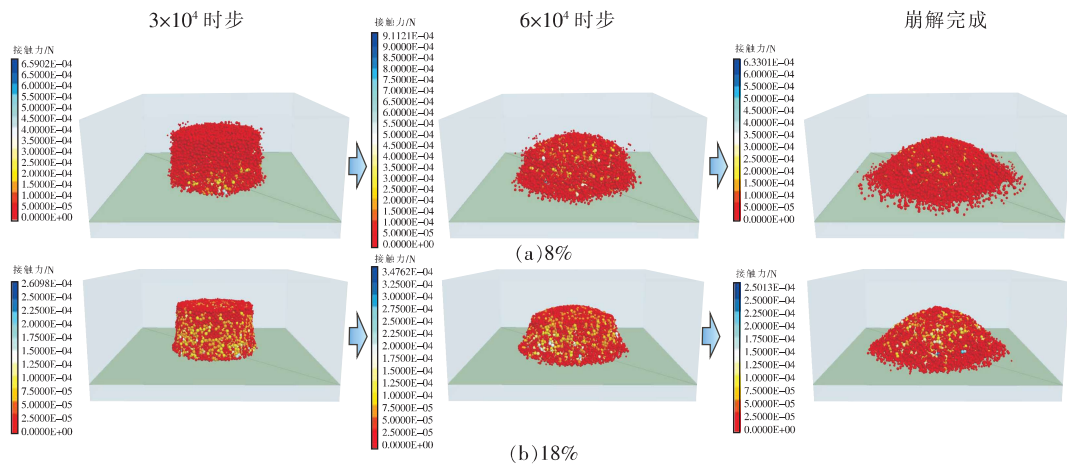


图 11 不同阶段接触力变化云图

Fig. 11 Cloud map of contact force variation at different stages

模拟结果与通过试验获得的规律完全吻合,进一步验证了数值模拟结果的准确性和可靠性。数值模拟能够重现黄土崩解的物理过程,为我们深入理解黄土崩解现象提供了有力的工具。通过对比试验与模拟结果,可以发现含水率是影响黄土崩解速率和进程的关键因素之一。

4 黄土崩解的影响因素及机制

4.1 崩解过程的机制分析

黄土的崩解过程与其颗粒间胶结强度遇水变

弱有关,胶结物水稳性差是崩解过程发生的物质基础,通过数值模拟发现,在崩解过程中颗粒间的接触随时间不断减少。黄土颗粒间粘结力的强弱很大程度上取决于胶结物的物质组分,不同胶结物组分在浸水时呈现不同的性状而影响胶结力。崩解性除了与粘粒含量有关外,主要还与其赋存状态有关。以凝块形式存在的黏粒含量越多,则黄土颗粒之间胶结程度越高,孔隙率越小,透水性也越弱,越不利于崩解;若黏粒多以集粒形式存在,则利于崩解^[9]。易溶盐类的胶结物溶解较为

迅速,浸水后该部分的胶结由于其本身的溶解急剧变弱;同时,易溶性盐的溶解会改变颗粒表面的电荷分布和吸附特性,进一步影响颗粒间的相互作用^[29];此外,黄土中的蒙脱石、伊利石等矿物成分在水的作用下会发生溶解和离子交换反应,导致矿物结构受损,颗粒间联结力减弱,从而进一步推动了崩解过程^[30]。综上所述,水分入渗对黄土崩解速率的影响是多方面且相互关联的,既涉及物理结构的变化,也包含化学过程的参与。

4.2 初始含水率对崩解过程影响

在其他条件不变的情况下,黄土的崩解速率随初始含水率的增大而减小,当含水率增加到一定程度后,崩解性几乎消失。在崩解过程中,固-液界面的扩展伴随固-气界面的减少,增强了团聚体内部的土颗粒间结合强度^[31];初始含水率的增加促进了粘土矿物的提前膨胀,有效释放了内部应力,并增强了土体的塑性变形能力,使得在后续浸水过程中不易发生应力集中和突然破坏^[32];同时,水分还作为催化剂,促进了土颗粒表面离子交换和氢键的形成,这些化学作用进一步增强了颗粒间的吸引力,构建了更加坚固的土壤微观结构^[33]。因此,随着初始含水率的增加,黄土的崩解速率呈现下降趋势。

5 结论

1)在设定含水率范围内的崩解过程遵循“S”型三阶段模式。初期缓慢阶段,外部水分侵入与内部非饱和吸力的抗衡;中期加速阶段,吸力的急剧丧失触发颗粒间胶结结构的连锁式脆性断裂,崩解速率达到峰值;后期稳定阶段,残余体在重力与摩擦力作用下达到自稳状态。

2)基于 Gompertz 方程构建的崩解动力学模型,可定量表征离石黄土崩解过程。模型参数中, α 表征最大崩解程度,与初始含水率成负相关; λ 反映了崩解速率的变化,其绝对值随含水率增大呈负指数衰减; β 是崩解速率达到峰值的临界时刻,与含水率呈线性正相关。

3)通过 PFC 数值模拟,从细观尺度阐明了水分作用下黄土崩解的动态失效机制。水分的渗入持续弱化颗粒间接触键,导致力链网络发生拓扑失稳;主要力链在重定向过程中发生断裂,最终引发宏观承载结构的失稳坍塌。

参考文献(References):

- [1] JUANG C H, DIJKSTRA T, WASOWSKI J, et al. Loess geohazards research in China: Advances and challenges for mega engineering projects[J]. *Engineering Geology*, 2019, 251(4): 1-10.
- [2] LI X, LI L. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: An experimental study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 1-14.
- [3] ZHANG F, WANG G. Effect of irrigation-induced densification on the post-failure behavior of loess flowslides occurring on the Heifangtai area, Gansu, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236(SI): 111-118.
- [4] HOU X, VANAPALLI S K, LI T. Water infiltration characteristics in loess associated with irrigation activities and its influence on the slope stability in Heifangtai loess highland, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 234(12): 27-37.
- [5] 王念秦,魏精瑞. 定体积黄土崩解仪器的研制与应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(3): 145-149.
WANG Nianqin, WEI Jingrui. Development and application on the instruments of constant volume loess disintegration[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(3): 145-149.
- [6] 王菁莪,项伟,毕仁能. 基质吸力对非饱和重塑黄土崩解性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3258-3262.
WANG Jinge, XIANG Wei, BI Renneng. Experimental study of influence of matric suction on disintegration of unsaturated remolded loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3258-3262.
- [7] 谷天峰,袁亮,胡炜,等. 黑方台黄土崩解性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 62-70.
GU Tianfeng, YUAN Liang, HU Wei, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 2017, 44(4): 62-70.
- [8] 李家春,田伟平. 工程压实黄土崩解试验研究[J]. *重庆交通学院学报*, 2005, 24(5): 74-77.
LI Jiachun, TIAN Weiping. Experiment of compacted loess disintegration[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2005, 24(5): 74-77.
- [9] 李喜安,黄润秋,彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 3207-3213.

- LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing. Experimental study on disintegration of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 3207-3213.
- [10] HUO B, HUANG Q, KANG X, et al. Experimental study on the disintegration characteristics of undisturbed loess under rainfall-induced leaching[J]. Catena, 2023, 233: 107482.
- [11] LI X, WANG L, YAN Y, et al. Experimental study on the disintegration of loess in the Loess Plateau of China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 78(7): 4907-4918.
- [12] WANG J, GU T, ZHANG M, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(6): 1317-1329.
- [13] LI G, MA W, MU Y, et al. Effects of freeze-thaw cycle on engineering properties of loess used as road fills in seasonally frozen ground regions, North China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(2): 356-368.
- [14] 刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 冻融循环条件下原状黄土强度损伤试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(5): 633-639.
- LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Experimental study on strength damage of undisturbed loess under freeze-thaw cycles condition[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(5): 633-639.
- [15] GUO Z, HUANG Q, LIU Y, et al. Stability analysis and design optimization of multi-stage slope in gully land consolidation projects on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(11): 431.
- [16] CHENG Y, HUO A, ZHAO Z, et al. Analysis of loess fracture on slope stability based on centrifugal model tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 3647-3657.
- [17] 李同录, 习羽, 侯晓坤. 水致黄土深层滑坡灾变机理[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1113-1120.
- LI Tonglu, XI Yu, HOU Xiaokun. Disaster mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1113-1120.
- [18] 王新刚, 胡斌, 赵治海, 等. 渗流作用下节理型黄土开挖边坡塌滑破坏分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 47-52.
- WANG Xingang, HU Bin, ZHAO Zhihai, et al. Analysis of collapse sliding failure of the excavation slope of joint type loess under the action of seepage[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 47-52.
- [19] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691.
- PENG Jianbing, LIN Hongzhou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684-691.
- [20] ZHANG W, FAN N, LI Y, et al. Water-induced disintegration behaviour of Malan loess[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(8): 1891-1901.
- [21] 潘红宇, 王康, 张天军, 等. CO₂气爆含控制孔煤层裂隙演化颗粒流模拟[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(2): 230-236.
- PAN Hongyu, WANG Kang, ZHANG Tianjun, et al. Particle flow simulation of CO₂ explosion fracture evolution in coal seam with control holes[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(2): 230-236.
- [22] 王杰, 庄建琦, 孔嘉旭, 等. 基于DEM模拟的破碎对黄土滑坡动力学特征影响研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 502-513.
- WANG Jie, ZHUANG Jianqi, KONG Jiaxu, et al. Influence of fragmentation on dynamic characteristics of loess landslide based on DEM simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 502-513.
- [23] 常文斌, 王平, 于一帆, 等. 颗粒离散元模拟边坡动力响应的研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 48-53.
- CHANG Wenbin, WANG Ping, YU Yifan, et al. Research progress of the slope dynamic response simulation by Particle Discrete Elements Method[J]. Journal of Water resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 48-53.
- [24] 张子莹, 曹宝花, 韩泽敏, 等. PFC^{3D}颗粒流模拟纳米黏土改良黄土三轴试验[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(3): 365-373.
- ZHANG Zixuan, CAO Baohua, HAN Zemin, et al. PFC^{3D} particle flow simulation of Nano-Clay modified loess triaxial test[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(3): 365-373.
- [25] 李国平, 谷海静, 郭冬冬. 基于Gompertz函数的矿区地表下沉预测方法[J]. 陕西煤炭, 2024, 11(6): 156-161.
- LI Guoping, GU Haijing, GUO Dongdong. Prediction of the surface subsidence in mining area based on Gompertz function[J]. Shaanxi Coal, 2024, 11(6): 156-161.
- [26] JIANG M J, LI T, HU H J, et al. DEM analyses of one-

- dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 60(7):47-60.
- [27] 朱建, 万加根, 季圣星, 等. 基于力链的土体直剪试验颗粒流数值模拟研究[J]. *水力发电*, 2025, 51(5):30-36.
- ZHU Jian, WAN Jiagen, JI Shengxing, et al. Particle flow numerical simulation of direct shear test of soil based on force chain[J]. *Water Power*, 2025, 51(5):30-36.
- [28] SCHENKER I, FILSER F T, HERRMANN H J, et al. Generation of porous particle structures using the void expansion method[J]. *Granul Matter*, 2009, 11(3):201-208.
- [29] ASSADI-LANGROUDI A, NG' AMBI S, SMALLEY I. Loess as a collapsible soil: Some basic particle packing aspects[J]. *Quaternary International*, 2018, 469(4):20-29.
- [30] SADISUN I A, SHIMADA H, ICHINOSE M, et al. Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2005, 23(3):199-218.
- [31] 赵敏, 何晖. 非饱和黄土水-气渗透性试验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2005, 25(3):292-295.
- ZHAO Min, HE Hui. Experiment on water-air permeability of unsaturated loess[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, 25(3):292-295.
- [32] ANNABI M, HOUOT S, FRANCOU C, et al. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(2):413-423.
- [33] 何青峰, 徐志浩, 郭亮, 等. 不同含水量下原状离石黄土的结构强度[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(6):860-864.
- HE Qingfeng, XU Zhihao, GUO Liang, et al. Structural strength of the original Lishi loess under different water content[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(6):860-864.

(责任编辑:李克永)