

DOI: 10.7511/jslx20230719002

FDM-DEM 耦合方法模拟月壤水冰模拟物的 SHPB 冲击试验

李云丽^{*1}, 杨振睿¹, 吴文平²

(1. 武汉大学 土木工程与建筑学院 岩土与地下工程系, 武汉 430074;

2. 武汉大学 土木工程学院 工程力学系, 武汉 430072)

摘要:全球对月球的探索在近几年再次掀起一阵热潮,下一阶段探月任务主要集中于对月球极地的取样与资源勘探,涉及月球极地水冰模拟物大量动力学问题的研究。本文采用有限差分法(FDM)与离散元法(DEM)的耦合方法,开展了月壤水冰模拟物的分离式霍普金森压杆(SHPB)试验模拟,研究了月壤水冰模拟物在冲击载荷下的动力学性能及损伤特性。通过与试验结果对比,发现本文提出的 FDM-DEM 模型能够很好模拟月壤水冰模拟物的 SHPB 冲击测试。获得了月壤水冰模拟物峰值强度与应变率的关系,发现月壤水冰模拟物表现出应变率增强效应,即应变率越高,峰值应力越大,这与砂土的应变率不敏感性存在明显差异。冲击过程中,试样的损伤随着冲击速度的增加而增大,但损伤持续时间变短。损伤裂纹首先出现在试样与压杆的交界处,随着试样的压实,试样内部产生裂纹,最终内外部裂纹相互扩展交汇,直至破坏。研究结果为深入理解月球极地月壤水冰模拟物的动力学性能和失效行为提供了重要的参考。

关键词:月壤水冰模拟物;分离式霍普金森压杆(SHPB)试验;FDM-DEM 耦合;动态冲击特性;破坏形态

中图分类号: O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2025)01-0019-07

1 引言

月球作为地球最近的地外星体,是探索深空的首要中转站,对月球的勘探和资源开发是未来地外探索重要基础。作为月球表层分布最广泛的月壤,众多学者研制了模拟月壤并对其力学性能进行了大量研究^[1-3]。Jiang 等^[4]通过试验和数值模拟对探测器的月表通过性开展研究,对比了地球与月球环境下轮-壤作用的不同。Cui 等^[5]研究了钻取时钻具与月壤和月岩作用的温度问题。Prabu 等^[6]对模拟月壤在低围压下进行循环三轴试验,研究了加载频率、围压和相对密度对月壤动力学性能的影响。梁绍敏等^[7]对月壤在锥形物冲击下的动力学特性进行试验和离散元模拟分析,探讨了不同冲击速度、质量及锥角的锥体对动力学特性的影响。

在过去二十多年间,通过对月球表层的探测和分析,发现了月球存在水资源的证据^[8,9]。通过利用月球上的水资源,人类能够减少对地球的供给依

赖,实现更长时间的月球任务和深空探索,这对未来在月球上进行长期探索和基地建设至关重要。下一阶段的探月任务主要集中于对月球南极尤其是永久阴影区的钻探取样和基地建设^[10,11],现有研究表明月球永久阴影区存在大量的含冰冻月壤,因此许多学者对月壤水冰模拟物进行了大量的研究。Pitcher 等^[12]对不同含水量的冰冻模拟月壤进行了贯入阻力测试和单轴压缩试验,结果表明其强度随含水率的增加而提高。为还原月表环境,何成旦等^[13]在-196℃超低温下对两种不同含水率的冻结模拟月壤进行了单轴抗压试验,发现在极低温下冻结模拟月壤呈现与硬岩相似的应力应变特性。Liu 等^[14]针对月壤水冰模拟物的力学性能进行了更加全面的试验分析,对不同干密度、含水率和温度条件下的月壤水冰试样进行单轴抗压强度试验,并建立了反映抗压强度与月壤深度之间关系的预测模型。

钻探、爆破均会产生冲击荷载,研究月壤在冲

收稿日期:2023-07-19;修改稿收到日期:2023-08-31.

基金项目:国家自然科学基金(52009097;12172259);湖北省教育厅科学研究计划(B2021080);

武汉大学科研启动基金(K2021035)资助项目。

作者简介:李云丽^{*}(1984-),女,博士,教授(E-mail:liyunli@wit.edu.cn).

引用本文:李云丽,杨振睿,吴文平. FDM-DEM 耦合方法模拟月壤水冰模拟物的 SHPB 冲击试验[J]. 计算力学学报, 2025, 42(1): 19-25.

LI Yun-li, YANG Zhen-rui, WU Wen-ping. Simulation of SHPB impact tests on lunar water ice simulants using FDM-DEM coupling method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2025, 42(1): 19-25.

击荷载下的动力学特性对未来数十年月球取样、资源勘探和利用、月球基地的建设等项目至关重要,但目前对于月球极地区月壤水冰混合物在冲击荷载下的研究非常少。肖俊孝等^[15]通过分离式霍普金森压杆(SHPB)试验分析了月壤水冰模拟样本的动力学及反射波特性和SHPB试验作为一种常用的材料动态力学测试方法,已用于材料在冲击荷载下的强度、变形和破坏行为的研究^[16]。目前SHPB试验已应用于研究冻土在冲击荷载下的力学特性^[17,18],而且SHPB试验的数值模拟也因其可重复性、方便性和经济适用性等优势开始获得广泛应用。Tang等^[19]采用有限元研究了围压和冲击荷载同时作用下冻土的冲击力学行为,并分析了冻土的能量吸收。Shangguan等^[20]对含预制孔洞的冻土进行有限元模拟,分析了试样的破坏状态。Chunyu等^[21]采用离散元模拟分析冻土在不同应变率下的裂纹生成和演化,发现冲击荷载下冻土的破坏主要为剪切破坏。这些关于SHPB试验的模拟多采用单一数值模拟方法(离散元或有限元方法)。离散元在模拟颗粒体破坏和分析裂纹扩展方面有巨大优势,但对于压杆这种均质连续体,不仅无法保证均匀性,且大量的颗粒数量会降低计算效率。有限元计算效率虽高,但很难对试样在冲击荷载作用下试样内部的裂纹扩展和损伤演化过程进行模拟分析。

鉴于此,本文采用有限差分法(FDM)与离散元(DEM)耦合的方法建立月壤水冰模拟物SHPB冲击试验的数值模型,研究月壤水冰模拟物在不同冲击速度下的动态力学特性和冲击损伤过程。SHPB的建模中,压杆采用FDM建模,月壤水冰模拟样本采用DEM建模。应力波由撞击杆撞入射杆产生,通过改变撞击杆初速度,对不同冲击速度下的月壤水冰模拟物的裂纹演化过程和破坏形态进行分析。

2 FDM-DEM 耦合数值模型

2.1 FDM-DEM 耦合 SHPB 模型

试验使用的SHPB主要由撞击杆、入射杆和透射杆组成,如图1所示。月壤水冰模拟物试样置于入射杆和透射杆之间,通过控制冲击波的强度和形状,可以研究材料在不同应变率下的响应,并获得材料的动态力学特性,如动弹性模量、动屈服强度、应变率敏感性等。

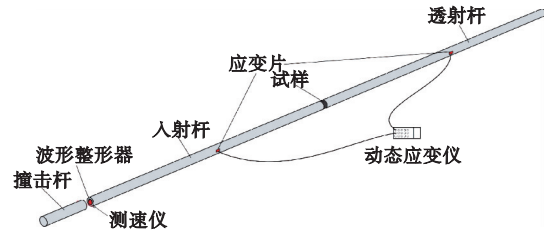


图1 分离式霍普金森压杆试验装置示意图

Fig.1 Schematic of the SHPB test apparatus

基于一维应力波假设,通过二波法^[16]可以获得试样的应力 $\sigma_s(t)$ 、应变率 $\dot{\epsilon}_s(t)$ 与应变 $\epsilon_s(t)$ 。

$$\sigma_s(t) = \frac{E_b A_b}{A_s} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -2 \frac{C_b}{l_s} \epsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_s(t) dt \quad (3)$$

式中 E_b 为杆件的弹性模量, A_0 和 A_s 分别为试样和压杆的横截面积, C_b 为压杆中应力波波速, l_s 为试样的高度。 $\epsilon_T(t)$ 为透射波应变信号, $\epsilon_R(t)$ 为反射波应变信号。

月壤水冰模拟样本的数值模型采用DEM软件PFC3D建立^[22],采用半径为0.48 mm至0.72 mm均匀分布的球体颗粒并加以平行粘结模型胶结。试样尺寸与试验一致,直径为39.1 mm,高度为20 mm。冲击杆、入射杆和透射杆的数值模型采用FDM建立,直径为40 mm;冲击杆长度为300 mm,入射杆和透射杆长度均为2000 mm。为传递冲击杆的撞击力至入射杆,采用团簇颗粒(clump)建立一直径为30 mm、厚度为2 mm的波形整形器。建立的FDM-DEM耦合数值模型如图2所示。为监测杆件上应力波的传递,分别在透射杆和入射杆上设置测点,监测单元的应力变化。

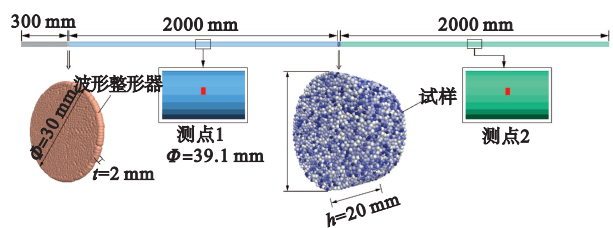


图2 有限差分-离散元耦合数值模型

Fig.2 Numerical model using FDM-DEM coupling method

压杆为均质连续体,由于在整个冲击试验过程中处于弹性状态不发生屈服,故采用弹性本构模型,并通过FDM建立。建立的数值模型参数包括杆的长度、直径及材料性能等均与试验一致。材质为7075铝合金,密度为 2810 kg/m^3 ,弹性模量为72 GPa,泊松比为0.33,列入表1。

表 1 FDM 数值模型参数

Tab. 1 FDM numerical model parameters

杆件	长度 /mm	直径 /mm	材料	密度 P / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
冲击杆	300	—	7075			
入射杆	2000	40	铝	2810	72	0.33
透射杆	2000	—	合金			

2.2 FDM-DEM 耦合原理

由于 FDM 与 DEM 的计算模式不同,因此需要通过耦合运算来进行二者之间的数据传递(图 3a)。本文采用-域(wall-zone)耦合方法,其原理为在有限差分单元的面上建立一系列附着于其表面的三角形耦合面,将有限差分单元节点的位移转换为三角面的位移,根据运动方程和力-位移准则更新离散元中颗粒运动方向和速度;同时,将颗粒与墙体的接触力通过重心插值法外推至三角耦合面节点,再将力和弯矩传递至有限单元的网格点。

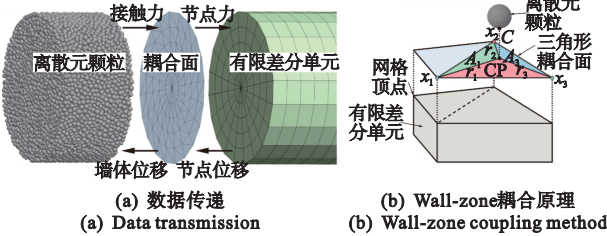


图 3 有限差分-离散元耦合方法
Fig. 3 FDM-DEM coupling method

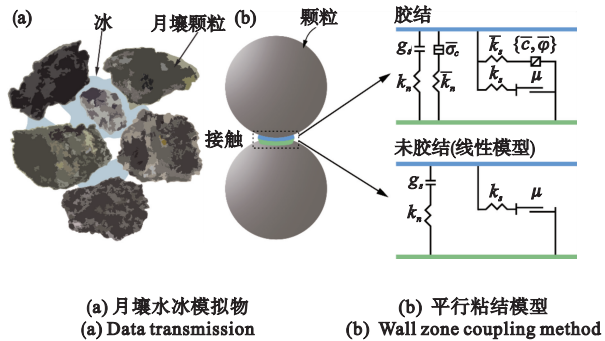


图 4 月壤水冰模拟物和平行粘结模型
Fig. 4 FDM-DEM coupling method data transmission and schematic diagram of wall-zone coupling method

根据对月球含冰月壤的假设及月壤水冰模拟物的显微图像,月壤水冰模拟物的细观示意图如图 4(a)所示,其主要组成为 CUG-1A 模拟月壤和冰^[23]。月壤受冰包裹或胶结。本文在离散元中采用平行粘结模型(图 4b)模拟冰对月壤颗粒的胶结作用。当胶结时,接触键可限制颗粒之间的运动并

传递力和弯矩,即冰对月壤的胶结作用;当胶结键断裂,模型等效于线性接触模型。

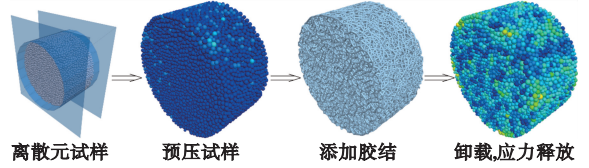


图 5 离散元试样建立及处理过程
Fig. 5 Establishment and processing process of discrete element sample

表 2 DEM 数值模型宏微观参数
Tab. 2 Macro- and micro- parameters of DEM numerical model

参数	7% 含水率试样
颗粒密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2800
颗粒半径 r /mm	0.48~0.72
试样高度 h /mm	20
试样直径 Φ /mm	39.1
初始孔隙率 e	0.35
摩擦系数 μ	0.5
有效弹性模量 E^* /Pa	1×10^9
法相-切向刚度比 κ^*	1.5
胶结键有效弹性模量 \bar{E}^* /Pa	1×10^9
胶结键法相-切向刚度比 K^*	1.5
粘接力 \bar{c} /N	1.2×10^7
抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$ /N	8.4×10^6
摩擦角 $\bar{\varphi}$ /($^\circ$)	45

离散元试样的建立过程如图 5 所示。在由墙体限制的圆柱形区域生成颗粒,待颗粒动能耗散达到能量最低的稳定状态后,对颗粒体进行伺服,使颗粒体紧密。本文采用平行粘结模型模拟月壤水冰模拟物中冰对月壤颗粒的胶结作用,赋予颗粒间胶结后,将围压减小至 1 kPa 以降低模型内部应力,模拟试样取出的状态。最后删除墙体,建立压杆的有限差分数值模型。

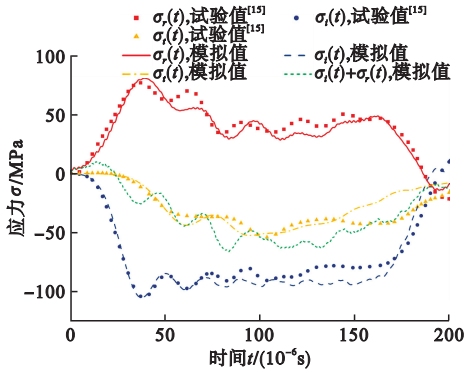
离散元的细观参数通过试错法确定^[24],为了便于和实验结果对比,本文采用 7% 含水率试样的实验结果^[15]来标定离散元数值模拟的参数,通过与试验结果对比标定的细观参数列入表 2。

3 模拟结果及分析

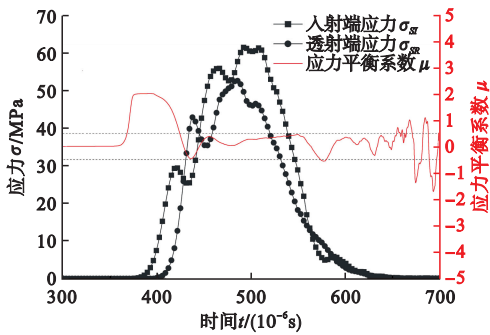
3.1 模型验证

图 6a 对比了试验和数值模拟获得的入射杆和透射杆的应力波信号。通过数值模拟所得波形与试验结果对比,发现由有限差分-离散元耦合模型

模拟所得的入射应力波 $\sigma_i(t)$ 、反射应力波 $\sigma_r(t)$ 和透射应力波 $\sigma_t(t)$ 的传播特性及持续时间与试验结果十分接近,与试验数据吻合较好,验证了此耦合数值模型的有效性和准确性。



(a) 实验和数值模拟获得的应力波传播特征
(a) Stress wave characteristics obtained by numerical simulations and experimental results



(b) 应力平衡系数分析
(b) Analysis of stress balance coefficient

图6 应力平衡分析

Fig. 6 Stress equilibrium analyses

为评估试样两端在冲击荷载加载过程中的均匀性,可采用通过比较入射波-反射波之和 $\sigma_i(t) + \sigma_r(t)$ 与透射波 $\sigma_t(t)$,可分析施加在试样入射端和透射端上的应力。经比较可知,在加载和卸载的过程中,试样保持应力平衡的状态。另一种评价应力平衡状态的方法为直接测量法。相较于试验,在数值模拟中,颗粒体的力学性能可以受到实时监测,并直接获得参数。施加于压杆-试样交界面的力可直接通过遍历墙体上的接触力得到,因此入射端应力 σ_{SI} 和透射端应力 σ_{ST} 可由式(4,5)计算得出。

$$\sigma_{SI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c^I} F_i^I}{\pi r^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{ST} = \frac{\sum_{j=1}^{N_c^T} F_j^T}{\pi r^2} \quad (5)$$

式中 F_i^I 和 F_j^T 分别为入射端和透射端面上第 i 个和第 j 个颗粒的轴向接触力, N_c^I 和 N_c^T 为入射端和透射端面上接触的数量, r 为试样的半径。

为量化试件两端应力一致性,在此引入应力平

衡系数 μ ,其定义为两端应力之差与二者平均数的比值,

$$\mu = \frac{2(\sigma_{SI} - \sigma_{ST})}{\sigma_{SI} + \sigma_{ST}} \quad (6)$$

试样两端应力及应力平衡系数分析结果如图6b所示。在加载初期阶段,由于应力波传播需在试样中传递,故入射端的应力大于透射端,应力平衡系数较大。但在后续的加载过程中,应力平衡系数保持稳定,在零值附近波动,表明在加载过程中试样两端所受应力的平衡性较好。

综上,通过对图6冲击加载过程中的应力波传播规律及应力平衡分析,证明该有限差分离散元耦合模型能较好地模拟 SHPB 试验,可以有效分析月壤水冰模拟物在冲击荷载下的力学特性。

3.2 应变率增强效应

图7为7%含水率的月壤水冰模拟物在不同应变率下峰值应力随应变率的变化。其中直线为试验结果拟合值,黑色的方点为数值模拟获得的不同冲击速度下对应的应变率及其峰值应力。通过试验结果和数值模拟结果的对比,进一步验证了本文采用的 FDM-DEM 耦合模型研究月壤水冰模拟物的 SHPB 冲击试验的准确性。同时,从图7可知,月壤水冰模拟物在冲击载荷作用下具有较为明显的应变率增强效应。随着应变率的增加,试样所受冲击时间缩短,颗粒之间相对位移减小,颗粒迅速压密实,使得胶结键断裂所需应力增大。根据 Kim 等^[25]的研究,当应变率超过 10 s^{-1} 时,冰的强度随应变率的增加呈现明显的增大趋势。而与月壤力学性能相似的砂土则对应变率的变化相对不敏感^[26]。这表明月壤水冰模拟物中的冰在冲击荷载中对试样的力学性能起主要作用,其峰值应力随应变率的增加而增加,主要与冰的强度随应力率的增加而增加有关,这也是月壤水冰模拟物力学性

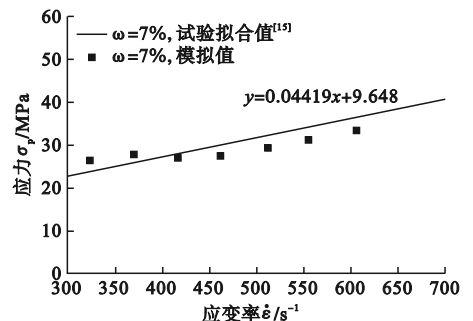


图7 7%含水率试样的峰值应力随应变率变化
Fig. 7 Variation of the peak stress with strain rate of specimen with water content of 7%

能区别于一般砂土的主要标志之一。

3.3 损伤演化和裂纹扩展

试验从宏观层面对试样的力学特性进行分析,但对于其微观层面的观察,如裂纹的萌生和演化的过程较为困难。离散元可从多个层面和角度对试样在不同时刻的裂纹演化进行分析,以从宏微观层面解释月壤水冰模拟物在冲击荷载下的力学特性。为了更好地分析试样中微裂纹的分布和演化,在试样的中部沿试样的轴向进行厚度为 1 mm 的切片,如图 8 所示。图 8 给出了试样在不同冲击速度下不同时刻裂纹的萌生扩展及试样的损伤演化过程。在加载的初始阶段($t=4.50 \times 10^{-4}$ s),试样中的裂纹多产生于试样与压杆的交界处。随着加载的进一步进行($t=4.75 \times 10^{-4}$ s \sim 5.00×10^{-4} s),试样逐渐压密,裂纹开始于试样内部萌生。最后,内外部的裂纹相互扩展并最终连接,形成破碎带,将试样分割成多个碎块。在较低的冲击速度($v=6$ m/s)下,初始裂纹少量产生于试样-压杆交界处($t=4.75 \times 10^{-4}$ s),入射端与透射端的裂纹数量大致相等;而在较高的冲击速度($v=10$ m/s)下,更多的裂纹产生于入射端交界处,这是因为在更高的冲击速度下,高幅值的应力波致使入射端的试样迅速压实并导致胶结断裂。试样在更高冲击速度下的试样裂纹扩展更为迅速,且随着冲击速度的增加,试样的破坏程度更为严重。

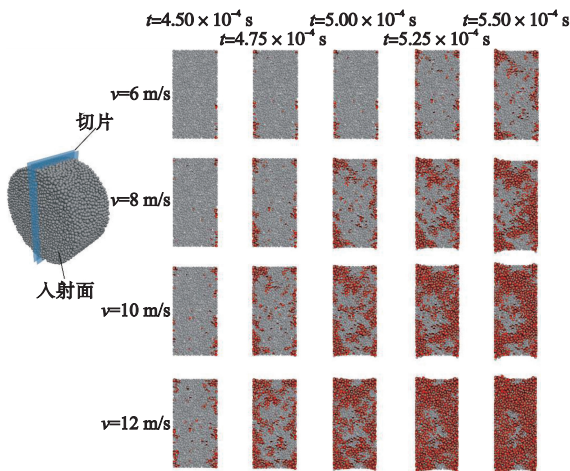


图 8 试样在不同冲击速度下不同时刻的裂纹演化过程 (红色线段代表胶结键的断裂)

Fig. 8 Damage evolution process of sample under impact loading (red lines denote the failure of bonds)

为描述试样的损伤程度,本文采用损伤系数描述

$$\delta = \frac{n_c}{n_b} \quad (7)$$

式中 n_c 为断裂胶结键的数量, n_b 为平行粘结键的总数。图 9 为 7% 含水量的月壤水冰模拟物在不同撞击速度下损伤系数 δ 的变化过程。当试件受到冲击载荷时,试件内裂纹数量在最初阶段缓慢增长,此时裂纹多产生于试样与压杆的交界面处,随后裂纹数量在短时间内迅速增加,导致试件发生破坏。最终,裂纹数量停止增加并保持稳定,表明应力波对试件的破坏终止。由图 9 可知,最终损伤系数 δ 随冲击速度的增加而增大,但裂纹演化持续时间随冲击速度的增加而减小。该现象产生的可能原因为,当试件在较低的冲击速度下($v=6$ m/s)承受冲击载荷时,初始阶段损伤形成的速率较低,初始裂纹在试件中缓慢产生。随着加载的继续,裂纹相互延伸并交汇形成破坏区,导致损伤急剧增加。之后,损伤的增长速度减慢,裂纹从破坏区边界开始萌生。当冲击速度增大时($v=10$ m/s),裂纹在加载的初始阶段迅速产生。颗粒在短时间内的运动幅度较小,这限制了裂纹从初始裂纹继续扩展,因此试样内很少产生次生裂纹,大量的小碎块随之形成,导致损伤迅速增加。

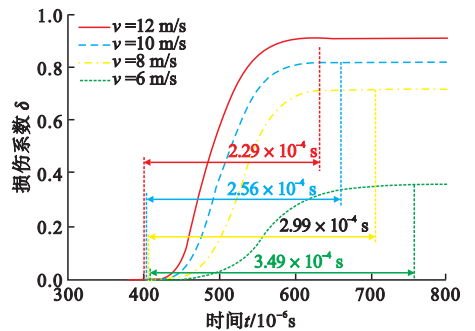


图 9 试样在不同冲击速度下损伤系数的变化

Fig. 9 Variation of the damage coefficient of lunar water ice simulant at different impact velocities

3.4 破坏形态

试样在不同冲击速度下的试验后($t=1.0 \times 10^{-3}$ s)的破坏形态如图 10 所示,其中由平行粘结键胶结在一起的球体颗粒,即碎块由不同颜色区分表示。灰色部分则为不与其颗粒胶结的基础球形颗粒,代表该部分试样已完全破坏。在较低的冲击速度下($v=6$ m/s, 8 m/s),试样中心产生较大的碎块,较小的碎块沿径向分布于试样其余部分。在较高的冲击速度下($v=10$ m/s, 12 m/s),试样破坏程度更高,完成破碎的颗粒增多,产生的碎块体积较小。随着冲击速度的增加,中心的碎块逐渐破碎,更多的微小碎块产生,试样的损伤加剧。

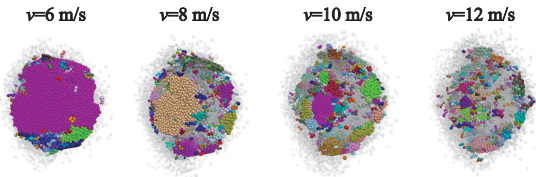


图 10 不同冲击速度下试样损伤形态

Fig. 10 Failure patterns of lunar water ice simulant under different impact velocities

4 结 论

本文通过有限差分法和离散元耦合的方法建立月壤水冰模拟物 SHPB 试验的数值模型,模拟研究了月壤水冰模拟物在冲击荷载下损伤演化和破坏形态,分析了月壤水冰模拟物在冲击载荷作用下动力学特性及损伤演化过程。主要结论如下:

(1)使用 FDM-DEM 耦合方法建立的 SHPB 试验数值模型较好地模拟了压杆中的应力波传播和试样的破坏过程,且提升了计算效率。通过与试验结果对比,验证了模型的可靠性。

(2)月壤水冰模拟物在冲击载荷作用下呈现应变率增强效应,即峰值应力随应变率的增加而增加。这与一般砂土的应变率不敏感性有明显的不同。

(3)月壤水冰模拟物在冲击过程中,试样的损伤随着冲击速度的增加而增大,但损伤持续时间减小。损伤裂纹首先出现在试样与压杆的交界处,随着试样的压实,试样内部产生裂纹,最终内外部裂纹相互扩展交汇,直至破坏。

参考文献(References):

- [1] Li Y Q, Liu J Z, Yue Z Y. NAO-1: Lunar highland soil simulant developed in China[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, **22**(1): 53-57.
- [2] Zeng X W, He C M, Oravec H, et al. Geotechnical properties of JSC-1A lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, **23**(2): 111-116.
- [3] Suescun-Florez E, Roslyakov S, Iskander M, et al. Geotechnical properties of BP-1 lunar regolith simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, **28**(5): 04014124.
- [4] Jiang M J, Dai Y S, Cui L, et al. Experimental and DEM analyses on wheel-soil interaction[J]. *Journal of Terramechanics*, 2018, **76**: 15-28.
- [5] Cui J S, Hou X Y, Wen G L, et al. Thermal simulation of drilling into lunar rock simulant by discrete element method[J]. *Acta Astronautica*, 2019, **160**: 378-387.
- [6] Prabu T, Muthukkumaran K, Venugopal I. Assessment of dynamic properties of a new lunar highland

soil simulant (LSS-ISAC-1) developed for Chandrayaan missions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **155**: 107178.

- [7] 梁绍敏,王永滨,王立武,等.锥形物体对月壤冲击过程的试验及离散元分析[J]. *中国空间科学技术*, 2019, **39**(6): 62-71. (LIANG Shao-min, WANG Yong-bin, WANG Li-wu, et al. Physical experiment and discrete analysis of impact between conical object and simulated lunar soil[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019, **39**(6): 62-71. (in Chinese))
- [8] Kumar S, Singh A, Sharma A, et al. Polarimetric analysis of L-band DFSAR data of Chandrayaan-2 mission for ice detection in permanently shadowed regions (PSRs) of lunar South polar craters[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(12): 4000-4029.
- [9] Honnibal C I, Lucey P G, Li S, et al. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**: 121-127.
- [10] Li C L, Wang C, Wei Y, et al. China's present and future lunar exploration program[J]. *Science*, 2019, **365**(6450): 238-239.
- [11] Wei G F, Li X Y, Zhang W W, et al. Illumination conditions near the moon's south pole: Implication for a concept design of China's Chang'E-7 lunar polar exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2023, **208**: 74-81.
- [12] Pitcher C, Kömle N, Leibniz O, et al. Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants[J]. *Advances in Space Research*, 2016, **57**(5): 1197-1208.
- [13] 何成旦,李亚胜,温智,等.月球极区冻结模拟月壤物性力学特性研究[J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(6): 1773-1781. (HE Cheng-dan, LI Ya-sheng, WEN Zhi, et al. Study on physical and mechanical properties of frozen simulated lunar soil in lunar polar region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(6): 1773-1781. (in Chinese))
- [14] Liu J W, Zhang W W, Tian Y, et al. Analysis and prediction of uniaxial compressive strength of icy lunar regolith under extreme temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(12): 4391-4407.
- [15] 肖俊孝,庞宝君,唐钧跃,等.月壤水冰模拟样本 SHPB 试验及反射波特异性分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, **9**(2): 150-156. (XIAO Jun-xiao, PANG Bao-jun, TANG Jun-yue, et al. SHPB test of lunar water ice simulant and analysis of reflected wave characteristics[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, **9**(2): 150-156. (in Chinese))
- [16] Kuhn H, Medlin D. *Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing* [M]. Ohio: ASM International, 2000.
- [17] Xie Q J, Zhu Z W, Kang G Z. Dynamic stress-strain behavior of frozen soil: Experiments and modeling[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014,

- 106:153-160.
- [18] Zhang F L, Zhu Z W, Fu T T, et al. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, **140**:103217.
- [19] Tang W R, Zhu Z W, Fu T T, et al. Dynamic experiment and numerical simulation of frozen soil under confining pressure[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, **36**(6):1302-1318.
- [20] Shangguan Z H, Zhu Z W, Tang W R. Dynamic impact experiment and numerical simulation of frozen soil with prefabricated holes[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, **146**(8):04020085.
- [21] Chunyu Z F, Zhu Z W, Li B, et al. Numerical simulation research on impact mechanical properties of frozen soil based on discrete element method[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2023, **32**(3):442-461.
- [22] Itasca Consulting Group, Inc. PFC Documentation [Z]. 2019.
- [23] Musilova M, Jones A, Miljkovic K. Cryogenic microscopic assessment of lunar and planetary icy regolith analogues[A]. Proceedings of the 68th International Astronautical Congress (IAC) by the International Astronautical Federation (IAF)[C]. 2017.
- [24] Dong S, Jia T, Fu F, et al. A simple approach of calibrating input parallel bond model parameters for DEM simulations of rock behaviour[A]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science[C]. 2020.
- [25] Kim H, Keune J N. Compressive strength of ice at impact strain rates[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, **42**(8):2802-2806.
- [26] Omidvar M, Iskander M, Bless S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, **49**:192-213.

Simulation of SHPB impact tests on lunar water ice simulants using FDM-DEM coupling method

LI Yun-li^{*1}, YANG Zhen-rui¹, WU Wen-ping²

(1. Department of Geotechnical and Underground Engineering, School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In recent years, there has been a resurgence of global interest in exploring the moon. The next phase of lunar exploration missions will mainly focus on sampling and resource exploration in the lunar polar regions, involving a large amount of dynamic research of lunar water ice simulants. In this paper, the coupling method of finite difference method (FDM) and discrete element method (DEM) is used to carry out the split Hopkinson pressure bar (SHPB) test of lunar water ice simulants, and the dynamic properties and damage characteristics of lunar water ice simulants under impact loading are studied. By comparing with the experimental results, it is found that the FDM-DEM model proposed in this paper can effectively simulate the SHPB impact testing of lunar water ice simulants. The relationship between peak strength and strain rate of lunar water ice simulants is obtained. It is found that lunar water ice simulants exhibit a strain rate enhancement effect, where a higher strain rate results in a higher peak stress, which is significantly different from the strain rate insensitivity of sandy soils. During the impact process, the damage of the sample increases with the increase of impact speed, but the duration of the damage decreases. The damage cracks first appear at the interface between the sample and the compression rod. As the sample is compacted, cracks are generated inside the sample, and eventually the internal and external cracks of the sample propagate and intersect with each other until failure occurs. The results provide important references for a deeper understanding of the dynamic performance and failure behavior of lunar water ice simulants in the lunar polar regions.

Key words: lunar water ice simulants; SHPB tests; FDM-DEM coupling method; impact dynamic properties; failure patterns