

DOI: 10.11779/CJGE20240111

# 太空环境下颗粒材料流动特性离散元分析： 立柱坍塌试验

石安宁<sup>1,2</sup>, 蒋明镜<sup>\*3</sup>, 杨耿超<sup>4</sup>, 郭颂怡<sup>5</sup>, 王思远<sup>1</sup>, 林嘉禹<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072; 2. 华电科工股份有限公司, 北京 100070; 3. 苏州科技大学土木工程学院, 苏州 江苏 215009;  
4. 中山大学航空航天学院力学系, 广州 广东 510006; 5. 香港大学土木工程系, 香港 999077)

**摘要:** 随着世界对深空探测的兴趣日益增加, 研究太空环境对颗粒柱坍塌流动特性及破坏模式的影响对于太空探索中的原位资源利用、基地选址及建造具有十分重要的指导意义。采用离散单元法对不同范德华吸引力影响下颗粒柱坍塌流动特性及破坏模式进行了研究。首先使用考虑范德华吸引力的三维完整接触模型, 以模拟不同范德华力作用下的颗粒柱坍塌; 随后进行了不同范德华力工况下的颗粒柱坍塌离散元模拟; 最后对不同工况下颗粒柱坍塌的流动特性及破坏模式进行了对比分析。离散元结果表明: 在颗粒柱坍塌过程中, 高速度梯度、高转动速度颗粒及稀疏接触位置分布具有较强的正相关性。随着范德华力的增加, 颗粒柱坍塌破坏模式分为弥散型、局部型和稳定型(即无破坏)3种。在弥散型破坏中, 范德华力对颗粒平动速度、转动速度、流动性系数、能量转换和能量耗散占比影响不明显, 而在局部型破坏中, 范德华力的增加会显著降低颗粒平动速度、转动速度及流动性系数, 使重力势能消耗量和阻尼耗散能占比明显减小。

**关键词:** 范德华吸引力; 颗粒柱坍塌; 离散单元法; 流动特性; 破坏模式

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)12-2488-10

**作者简介:** 石安宁(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事颗粒材料及太空土静力学及流动特性方面试验和数值模拟研究。E-mail: shianning0618@163.com。

## Discrete element analysis on granular material of flow mobility characteristics under the extraterrestrial environment: insight from column collapse test

SHI Anning<sup>1</sup>, JIANG Mingjing<sup>3</sup>, YANG Gengchao<sup>4</sup>, KWOK Chungyee<sup>5</sup>, WANG Siyuan<sup>1</sup>, LIN Jiayu<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Huadian Heavy Industries Company Limited, Beijing 100070, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 4. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 5. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** With the increasing interest of countries in deep space exploration, investigating the effect of extraterrestrial environment on the flow mobility and failure mode of granular column collapse, has a vital guiding significance for in-situ resource utilization, base site selection, and construction. This paper employs the discrete element method (DEM) to study the influence of van der Waals force on the flow mobility and failure mode of granular column collapse. Firstly, a complete three-dimensional contact model, considering the van der Waals force between particles, is used to study the flow mobility and failure mode of column collapse. Secondly, the granular column collapse tests under different Van der Waals forces are simulated using DEM. Finally, a contrastive analysis of van der Waals force influence on the flow mobility and failure mode of column collapse is performed. The simulation results show that, during the column collapse process, high granular velocity gradient, high granular rotational velocity, and sparse contact location distribution, have a positive correlation. Three failure modes of column collapse have been identified with the van der Waals force increased, which are the diffusive type, local type,

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(52331010); 国家重大自然灾害防控与公共安全重点专项(2022YFC3003403) This work was supported by Key Project of the National Natural Science Foundation of China (52331010) and National Key Project for Prevention and Control of Major Natural Disasters and Public Security of China (Grant Nos. 2022YFC3003403).

**收稿日期(Received):** 2024-02-02 **修回日期(Revised):** 2024-12-02 **接受日期(Accepted):** 2024-12-04 **网络出版日期(Online):** 2025-12-05

**\*通信作者** (E-mail: mingjing.jiang@usts.edu.cn)

and stable type. In the failure mode of diffusive type, the van der Waals force has little influence on the granular translational and rotational velocities, the flow mobility index, the energy conversion, and the ratio of energy dissipation. However, in the failure mode of local type, with the van der Waals force increased, the granular translational and rotational velocities, the flow mobility index, the energy conversion, and the ratio of energy dissipation decrease significantly.

**Key words:** Van der Waals force; granular column collapse; discrete element method; flow mobility; failure mode

## 0 引言

随着科技的飞速发展, 人类对外太空的探索是不可避免的<sup>[1]</sup>, 而月球作为距离地球最近的天体, 是人类进入广袤宇宙的前哨站。根据中国探月工程“绕”

“落”“回”三步走战略, 建立一个能自给自足、有人值守的月球基地是十分必要的, 它将为中国月球探测提供一个良好的生存和工作环境<sup>[2-3]</sup>。由于月球或外星表面环境(低重力、高真空、高温差、强辐射等)与地球差异巨大, 其中高真空环境会显著提高外星壤间范德华力相互作用<sup>[1]</sup>, 进而影响其物理力学和流动特性。因此, 探究太空环境下颗粒体流动特性及破坏模式, 可为月球及其他行星探测中基地建设和原位资源利用时可能遇到的滑坡、边坡失稳等实际工程问题提供指导性意见。

颗粒柱坍塌被看作是在重力驱动下的自然流(如滑坡、泥石流和岩崩等)中观察到的复杂动力学的简化再现<sup>[4]</sup>。Lube 等<sup>[5]</sup>和 Lajeunesse 等<sup>[6]</sup>同时提出了利用颗粒柱坍塌实验研究颗粒材料的流动行为, 由于其易于设置和复现, 该实验在颗粒材料领域被广泛接受, 并将其建立为瞬变型颗粒流(transient granular flow)的基准案例。在过去几十年中, 人们对干燥及浸没条件下颗粒柱坍塌行为进行了广泛的研究。干燥条件下, 室内试验及离散元模拟已经明确颗粒柱初始高宽比  $a$  是一个主要影响因素, 并且揭示了流滑距离与高宽比  $a$  之间的幂律关系<sup>[5-8]</sup>。而其他影响因素, 如颗粒柱初始质量、粒径和基底的粗糙度等对其流滑距离影响较小<sup>[7-8]</sup>, 当粒径与颗粒形状参数正相关时(粒径越大形状越不规则), 小颗粒的增多会增加滑体的流动性<sup>[9]</sup>, 此外粒间摩擦系数和试样高宽比也会控制坍塌模式<sup>[10]</sup>。浸没条件下, 环境流体与固体颗粒间的复杂相互作用可导致坍塌过程中的流态转变(分别由颗粒惯性、流体惯性及流体黏性占主导), 从而改变颗粒堆积体形态<sup>[11-14]</sup>。此外, 堆积体由于受到剪切引起的超静孔隙压力作用, 其形态还受颗粒柱初始密实度的影响<sup>[13-14]</sup>。

然而上述研究均没有考虑真空环境对颗粒柱坍塌流动行为的影响, 在太空环境中, 高真空使空间中游离气体分子减少, 使颗粒可吸附分子减少, 进而使颗粒间距离进一步减小, 最终导致颗粒间范德华力等吸引力显著增大<sup>[1]</sup>, 并对颗粒柱坍塌的流动行为造成未知的影响。Mériaux 等<sup>[15]</sup>通过室内试验研究了干黏性粉体(半水石膏)颗粒柱坍塌及其准静态倒塌过程,

并与无黏性干砂进行了对比, 发现随着柱体高宽比  $a$  的增加, 断层逐渐变平, 黏性颗粒柱初始高宽比  $a$  和最终堆积体长度间满足幂律关系。Abramian 等<sup>[16]</sup>通过有限元及离散元方法研究了黏性颗粒柱的坍塌, 将微观(粒观)尺度黏聚力与宏观尺度黏聚力联系起来, 并通过与试验相对比验证了上述模拟方法的适用性。Elekes 等<sup>[17]</sup>进行了不同重力场下考虑范德华力影响的休止角离散元模拟, 发现了当黏性力与重力比超过某一临界值时, 颗粒堆积体形状由圆锥形向不规则形状转变。Staron 等<sup>[18]</sup>研究了不同粒间黏聚力下颗粒柱的破坏步骤, 探讨了宏观黏聚力与粒间黏聚力的关系。

由于室内试验难以准确测量出颗粒间微观信息, 难以发掘出宏观现象下的微观本质。自 1979 年 Cundall 等<sup>[19]</sup>提出离散单元法(distinct element method)以来, 凭借其易实现、可重复性高等优点, 其逐渐被广泛用于岩土领域的相关模拟研究, 是研究宏微观土力学的有效工具之一<sup>[20]</sup>。在上述离散元模拟中多使用经典接触模型, 无法模拟高内摩擦角材料; 且所施加的黏性力多为常数值, 不会根据颗粒大小和环境真密度不同而改变。因此, 为探究不同真密度引起的范德华吸引力不同对颗粒柱坍塌过程中破坏模式及流动性的影响, 本文使用了团队提出的考虑范德华吸引力的三维完整接触模型<sup>[21-23]</sup>, 并进行了干燥条件下不同范德华吸引力工况下颗粒柱坍塌试验三维离散元模拟, 随后着重从宏微观角度发现并解释范德华吸引力对颗粒柱坍塌过程中破坏模式及流动性的影响, 其结果可为中国外太空探测中提高资源原位利用效率, 科考站的合理选址及安全建设提供理论基础。

## 1 接触模型和模拟步骤

### 1.1 考虑范德华力作用的三维完整接触模型

经典离散元接触模型<sup>[19]</sup>, 简化粒间接触为点接触, 仅考虑接触法切向的力学响应, 仅适用于模拟低强度砂土。Jiang 等<sup>[22]</sup>假设粒间接触面为圆形, 进一步提出了考虑弯转及扭转向的三维完整接触模型, 该模型可以进行较高强度砂土模拟。基于已有离散元模拟<sup>[23]</sup>研究成果, 该接触模型在完整三维接触模型的基础上考虑粒间范德华力影响<sup>[21]</sup>, 其力学响应如图 1 所示, 其中具体推导及计算公式详见文献[21~23]。该接触模型中范德华吸引力计算公式为

$$F_v = \frac{A\beta^2 R^2}{24D^3} \quad (1)$$

式中:  $A$  为 Hamaker 常数;  $\beta$  为接触的抗转动系数;  $R$  为接触两端颗粒平均半径, 等于  $R_1R_2/(R_1+R_2)$ ;  $D$  为粒间接触距离 (受真空间隙影响, 一般真空间隙大, 粒间距离近  $D$  值小, 反之粒间距离远  $D$  值大)。参考已有研究成果<sup>[1]</sup>,  $A$  在月表环境下一般取值为  $4.3 \times 10^{-20}$  J, 由于  $D$  值主要受到真空间隙影响, 因此式 (1) 可以简化成  $F_v = 43C_f\beta^2 R^2/240$ , 范德华力单位为 N, 其中  $C_f$  为范德华力系数, 用以控制范德华力的大小。由于粒间范德华力十分复杂, 会随着颗粒距离的变化而变化, 本接触模型对粒间范德华吸引力进行了简化, 使其只作用于已有接触颗粒之间, 且不随颗粒重叠量的变化而变化, 不会对本次研究产生实质性影响<sup>[23]</sup>。

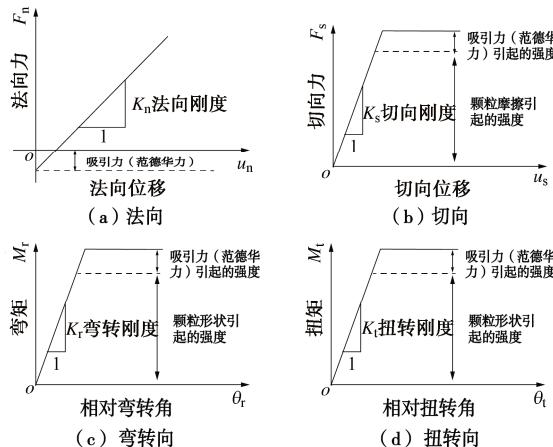


图 1 考虑范德华吸引力的三维完整接触模型力学响应<sup>[23]</sup>

Fig. 1 Mechanical response of three-dimensional complete contact model including Van der Waals force<sup>[23]</sup>

## 1.2 颗粒级配及接触参数选取

为探究干燥条件下范德华吸引力对颗粒柱坍塌试验的影响, 离散元模拟选取颗粒粒径分别为 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2 mm 的球形颗粒, 质量占比均为 20% 的 5 组颗粒。参考已有离散元模拟中参数选取<sup>[12-13]</sup>, 排除其他因素干扰, 颗粒材料密度为  $2500 \text{ kg/m}^3$ , 接触等效模量为  $10 \text{ MPa}$ , 接触法切向刚度比为 1.5, 摩擦系数为 0.1, 抗转动系数为 0.05, 破损系数为 2.1, 法切向黏滞阻尼比为 0.13, 上述特殊参数详细解释详见文献<sup>[22]</sup>。参考已有离散元模拟, 较低量级接触模量使用对模拟结果影响不大<sup>[24-25]</sup>, 为了提高计算效率, 本次模拟等效接触模量按比例缩小 100 倍。侧墙与球间摩擦系数为 0.0, 为简化模拟粗糙基底且不考虑夹带效应 (entrainment effect) 对结果的影响, 底墙采用刚性墙, 球墙间摩擦系数设置为 1.0。

为更好的探究范德华吸引力在颗粒柱坍塌中发挥的作用, 定义吸引力数 (attraction number)  $A_n$  来表征

范德华力与单颗粒所受重力比值, 其中  $A_n = F_v/(m_{d50}g)$ , 其中  $F_v$  为范德华力,  $m_{d50}$  为中值粒径颗粒质量,  $g$  为地球重力加速度。

## 1.3 离散元颗粒柱坍塌试验步骤及工况

在离散元试样制备中, 采用分层落雨法制成长宽高分别为  $15.2 \text{ mm} \times 15.2 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ , 初始孔隙比为 0.8 的试样, 试样内含颗粒约为 104000 个, 如图 2 所示。 $y$  轴方向采取周期边界在保证试样颗粒数量一定的前提下以减少边界效应的影响。

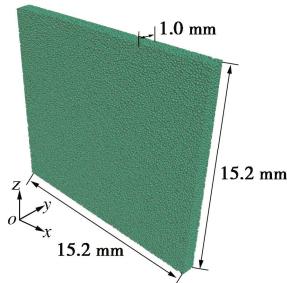


图 2 离散元试样尺寸示意图

Fig. 2 Size sketch of numerical specimen for DEM simulation

DEM 颗粒柱坍塌试验与室内试验基本保持一致, 主要分为两个阶段: ①重力固结阶段, 在制样完成后, 对所有粒间接触施加对应工况下的范德华力, 并在沿  $z$  轴负方向重力加速度作用下, 使试样平衡, 如图 3 (a) 所示; ②坍塌阶段, 在试样固结完成后, 将墙 2 直接删除, 让颗粒在重力作用下滑动至稳定状态时停止模拟, 如图 3 (b) 所示, 其间记录相应数据。

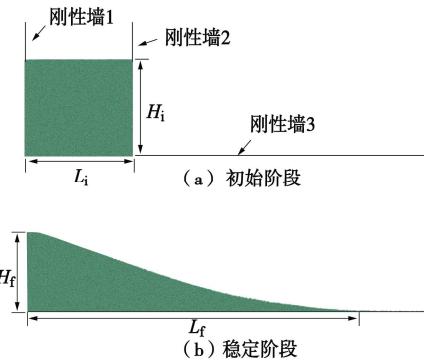


图 3 颗粒柱坍塌初始及稳定阶段示意图

Fig. 3 Sketch of initial and steady states for granular column collapse

本次离散元模拟为探究不同范德华力作用下对颗粒柱坍塌过程中破坏模式及流动性的影响, 在地球重力场  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  下, 选定了 11 组不同范德华力系数  $C_f$  ( $0.0, 1.0 \times 10^2, 1.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^4, 5.49 \times 10^4, 1.0 \times 10^5, 1.66 \times 10^5, 3.02 \times 10^5, 5.49 \times 10^5, 1.0 \times 10^6, 1.66 \times 10^6$ ) 工况进行了离散元模拟, 并对结果进行对比分析, 由于  $C_f = 1.66 \times 10^6$  工况在试验模拟过程中

(墙2删除后)始终保持初始稳定状态,因此在后续的结果分析中不对其相应数据进行展示。

## 2 离散元模拟结果

### 2.1 颗粒平动速度演化规律

图4(a)、4(b)为两种工况( $C_f = 0.0$ 和 $C_f = 1.0 \times 10^6$ )不同特征点下颗粒平动速度场,由图4中附图展示的平均颗粒平动速度演化规律可以看出,颗粒柱坍塌过程主要分为竖向坍塌加速阶段、水平扩散阶段和稳定阶段3个阶段,依照不同阶段的划分选取对应阶段内及边界上的A, B, C, D共4个特征点以期观察到不同特征点下颗粒平动速度场变化规律。

从图4(a)中可以看出,当范德华力系数 $C_f = 0.0$ 时,特征点A处于坍塌加速阶段内,此时颗粒处于加速阶段,主要为重力势能转化为平动动能,从速度场可以看出颗粒柱右侧速度最大,且表现为在滑动区域内速度沿右侧向左侧逐渐减小(呈现出一定速度梯度)。特征点B处于阶段1和2的交界处此时颗粒速度最大,从速度场可以看出颗粒柱右侧速度继续增大,且也表现出在滑动区域内速度沿右侧向左侧逐渐减小的趋势(呈现出一定速度梯度)。特征点C处于阶段2内,此时颗粒主要表现为水平扩散,滑动区域逐渐变长变薄,除尖端部分颗粒外,颗粒整体速度呈现出减小趋势。特征点D处于阶段3内,此时颗粒基本不再移动,处于稳定状态。

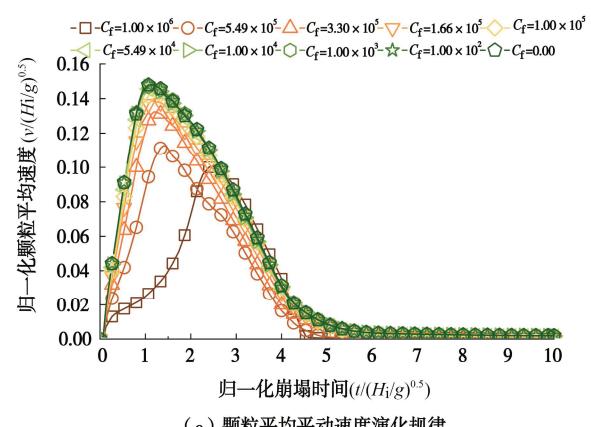
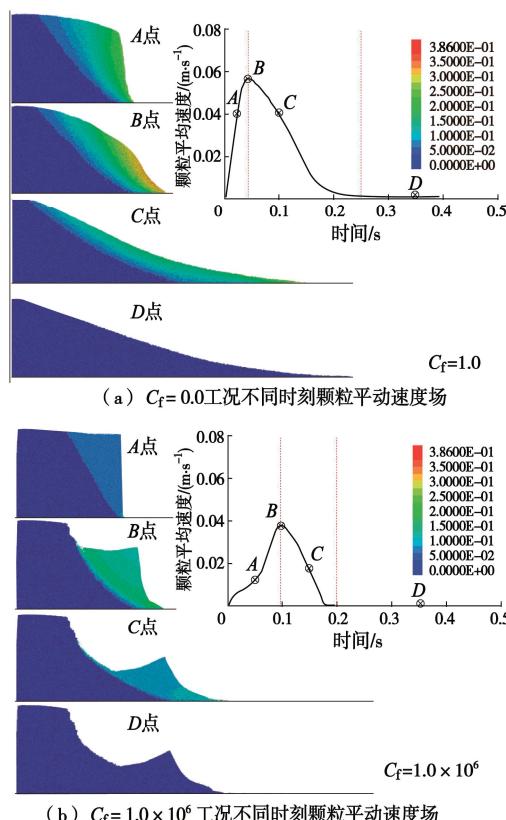


图4 颗粒柱颗粒平动速度演化规律

Fig. 4 Translational velocity evolution law of granular column collapse

从图4(b)中可以看出,当范德华力系数 $C_f = 1.0 \times 10^6$ 时,特征点A的颗粒速度明显小于 $C_f = 0.0$ 工况,可能由于粒间范德华力作用,滑动区域呈现出整体向下运动趋势,且域内没有明显的速度梯度分布。特征点B时刻颗粒速度有一定程度增加,但与 $C_f = 0.0$ 工况明显不同,颗粒速度增加主要发生在滑动与稳定区域交界处,且在交界处表现出一定速度梯度。特征点C时刻滑动区域继续向右运动,且该区域整体速度逐渐减小,滑动与稳定区域交界处速度梯度基本消失。特征点D处于稳定阶段内,此时与 $C_f = 0.0$ 工况类似,整体基本处于稳定状态。图4(c)为平均颗粒平动速度演化规律,后续分析中,各项平均值为试样整体颗粒的平均值, $v$ 为颗粒平动速度, $H_0$ 为试样初始高度, $g$ 为地球重力加速度,从图中可以看出,不同工况下平均颗粒平动速度均表现出先增大后减小的趋势,且当范德华力系数大于某一阈值( $C_f = 1.0 \times 10^5$ )后,其归一化速度峰值及对应归一化时间有明显减小和滞后趋势。随着范德华力大于某一阈值后,坍塌阶段1持续时间有明显增大,而阶段2持续时间则明显减少。该现象产生的原因可能是由于粒间范德华力的作用,限制了颗粒重力势能向动能的转化,进而延长了阶段1的持续时间。该现象与浸没颗粒柱坍塌时,在密实状态下由于剪胀作用引起的负孔隙压力减缓坍塌运动类似<sup>[13, 26]</sup>。此外,由于范德华力的持续作用,导致颗粒动能耗散的增加,使阶段2的持续时间明显缩短。

### 2.2 颗粒柱坍塌变形演化规律

参考已有研究成果<sup>[27]</sup>,对初始试样进行网格划分以观察其坍塌过程中试样不同位置运动情况。图5为两种工况在4个特征点上颗粒柱变形情况。由图5(a)可知,随着坍塌的发展,滑动区域整体网格均产生明显变形。与之相对应的是从图5(b)中可知,当范德华力足够大时,随着坍塌的发展,只有滑动和稳定区

域交界处网格发生明显变形，而其余部分网格变化不明显。上述差异性现象产生的原因可能是由于粒间范德华吸引力的作用，限制了局部颗粒的相对运动，导致变形网格数量减小，破坏模式发生改变。

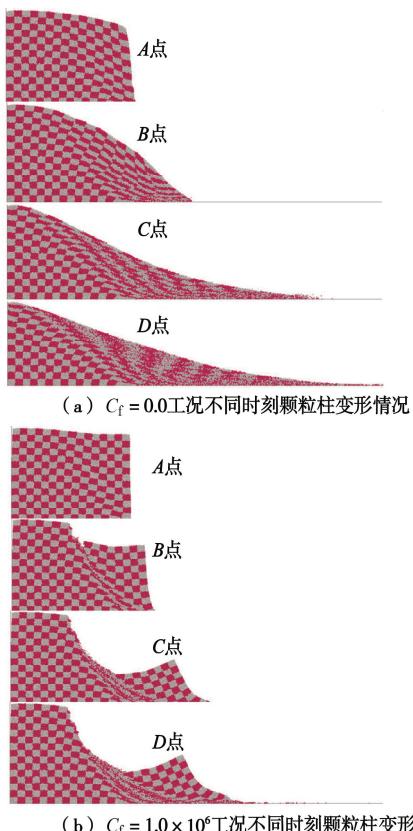


图 5 颗粒柱变形演化规律

Fig. 5 Deformation evolution law of granular column collapse

### 2.3 滑动区域质量占比

为进一步探究范德华力对坍塌过程的影响，按照颗粒在坍塌过程中的位移划分滑动及稳定区，其中阈值为一倍最大粒径。图 6 (a) 为滑动区域质量占比演化规律，其中子图为两种工况下稳定状态滑动及稳定区域划分情况，从图 6 中可以看出  $C_f = 1.0 \times 10^6$  工况滑动区域体积要明显小于  $C_f = 0.0$  工况。由图 6 (a) 可知，范德华力的增大会滞后滑动区迅速增加对应的时刻，且在阶段 3 会阻止滑动区域的缓慢增加。

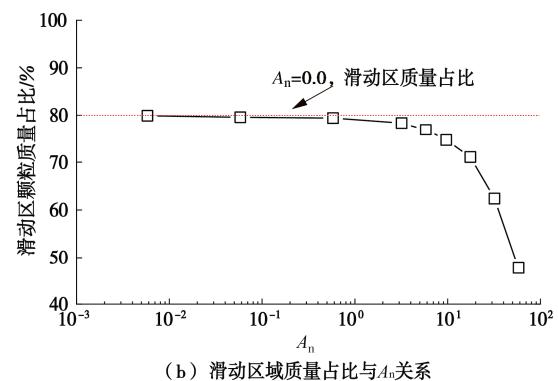
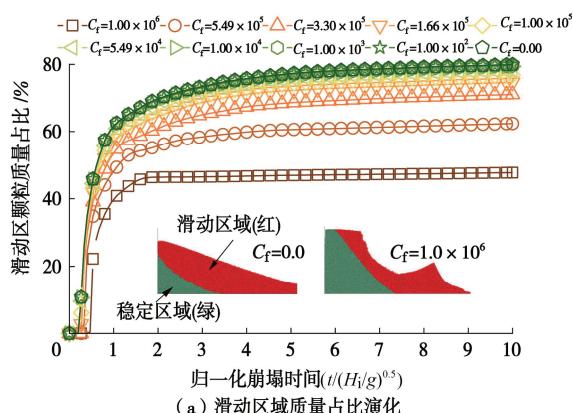


图 6 滑动区域质量占比演化规律

Fig. 6 Evolution law of slip zone mass percentage

图 6 (b) 为稳定阶段不同工况下滑动区域质量占比与  $A_n$  关系，由图可知，随着范德华力的增大，滑动区域占比初始保持相对稳定随后迅速减小。上述现象说明当范德华力大于阈值时会明显减少滑动颗粒的数量，增加试样的稳定性，改变试样的破坏模式。

### 2.4 颗粒转动速度演化规律

由于高转速颗粒主要集中于滑体产生高相对速度梯度位置，因此这里输出颗粒转动速度场来探究范德华吸引力对颗粒柱坍塌破坏模式的影响。

图 7 (a), (b) 为  $C_f = 0.0$  和  $C_f = 1.0 \times 10^6$  工况不同特征点颗粒转动图，由图可知，在  $C_f = 0.0$  工况 ABC 特征点中，高转速颗粒主要分布于滑动区域内部，且滑动区底墙位置尤为明显，而与上述高转速颗粒分布特征明显不同，在  $C_f = 1.0 \times 10^6$  工况 ABC 特征点中，高转速颗粒主要分布于滑动和稳定区域之间，滑动区域内颗粒基本无高转速颗粒。上述现象说明，在无范德华力作用下，滑动区域颗粒间多产生弥散型相对滑动，以产生细小剪切带为主，而当范德华吸引力大于阈值时，粒间范德华力阻止了滑动区域弥散型颗粒相对运动的产生，使滑动区域呈现出整体运动趋势，进而而在滑动及稳定区域边界处生成主滑动带，使破坏形式发生改变。图 7 (c) 为颗粒平均转动速度演化规律， $\omega$  为颗粒转动速度， $r$  为颗粒半径，由图 7 可知，颗粒转速演化规律与平动速度演化规律类似，表现出当范德华力大于阈值时，随范德华力的增大而颗粒转动峰值减小且对应时间延后的现象。上述颗粒平动及转动速度相似规律表明，在颗粒柱坍塌过程中，颗粒平动及转动速度表现为正相关性。

### 2.5 粒间接触演化规律

从颗粒平动及转动速度云图中可以发现随着范德华力的增大，坍塌形式会发生改变，为验证上述现象的准确性，这里输出粒间接触分布云图进行验证分析。

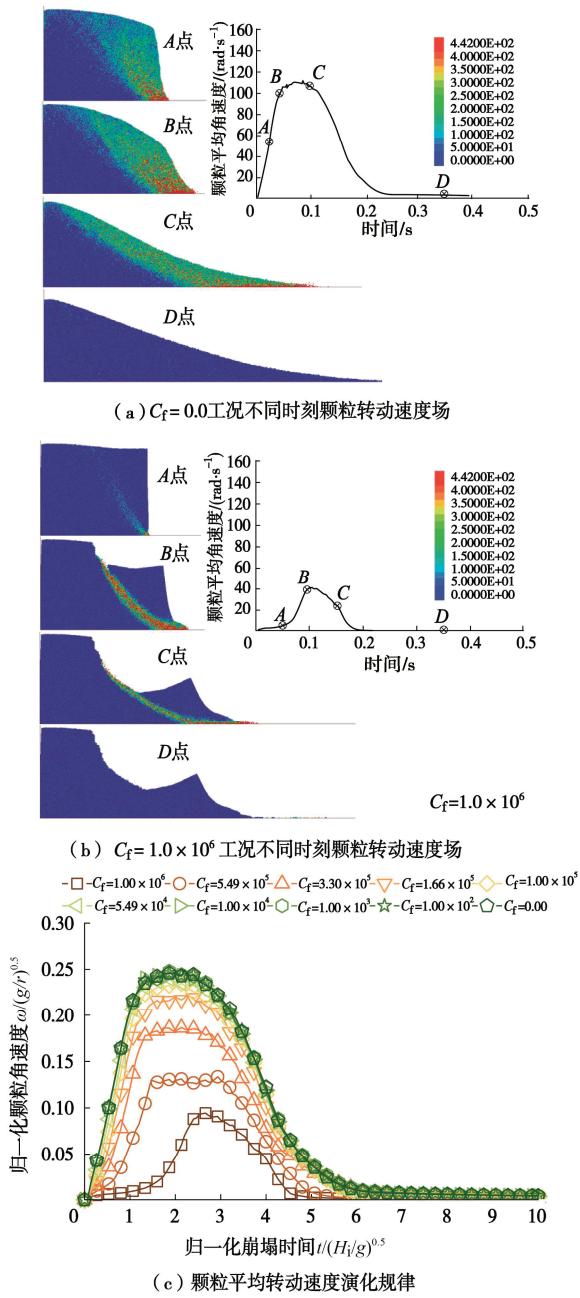


图 7 颗粒柱颗粒转动速度演化规律

Fig. 7 Rotational velocity evolution law of granular column collapse

图 8 (a) 为  $C_f = 0.0$  工况不同时刻颗粒接触分布, 从图中可以看出, 在  $ABC$  特征点接触分布云图中, 滑动区域整体接触分布要明显稀疏于稳定区域。图 8(b) 为  $C_f = 1.0 \times 10^6$  工况不同时刻颗粒接触分布, 从图中发现在  $ABC$  特征点接触分布图中, 接触分布稀疏区域呈主带状分布, 主要集中在滑动区与稳定区域交界处, 该现象明显不同于图 8(a) 中的接触分布特征。结合颗粒平动及转动速度云图可以看出, 高平动速度梯度、高转速颗粒和接触分布稀疏区域位置具有高度的相关性, 上述现象均与粒间相对运动相关, 因此可以说明当范德华力大于某一阈值时, 颗粒崩塌由弥散型破坏

向局部型破坏转变。图 8(c) 为不同范德华力作用下颗粒配位数演化规律, 配位数表征单位颗粒所拥有的接触数目<sup>[28]</sup>, 由图 8 可知, 在崩塌过程中, 不同工况下配位数均表现为先减小后增大的趋势, 且随着范德华力的增加, 该变化幅值有所减小, 与图 8(a), (b) 中接触分布稀疏位置由整个滑动区转向集中于滑动和稳定区交界处现象相吻合。

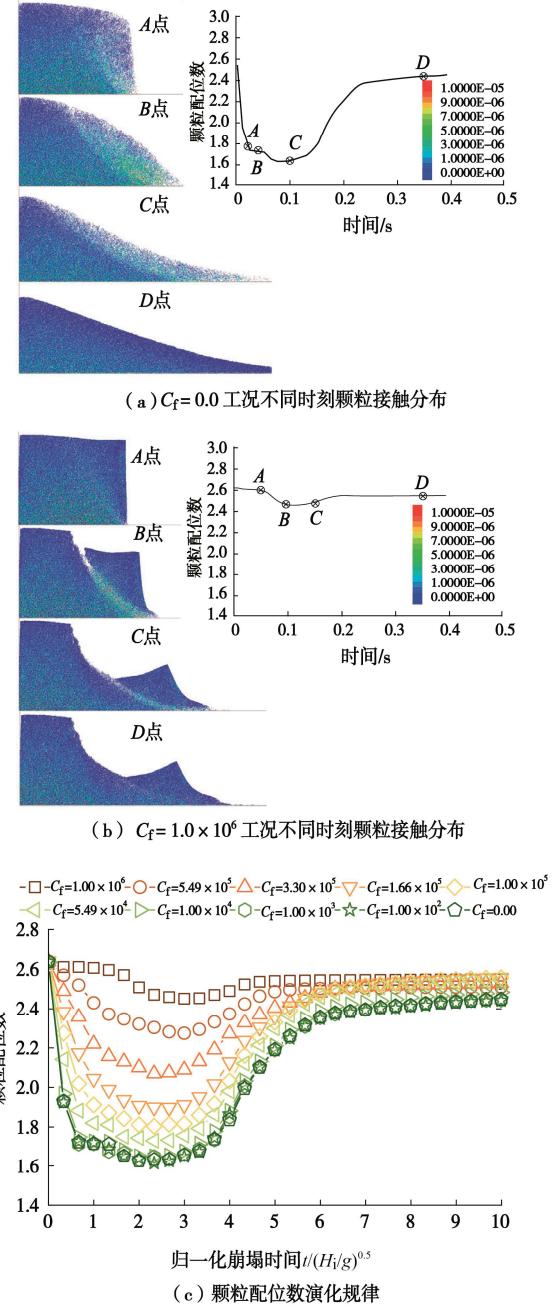


图 8 颗粒柱颗粒接触演化规律

Fig. 8 Contact evolution law of granular column collapse

## 2.6 高转动速度颗粒分布特征

在坍塌过程中, 高转速颗粒的分布特征与破坏模式有紧密联系, 因此为定量描述坍塌破坏模式的转变过程, 参考已有文献[29, 30]采用基尼系数  $G_s$ , 来量

化表征高转动颗粒的分布特征, 其中当  $G_s$  为 0.5 时表明颗粒在目标区域均匀分布, 如图 9 (a) 中虚线, 而当  $G_s$  分别等于 0 或 1 时表明颗粒在目标区域远端或近端聚集。选取 B 点时高转速颗粒位置分布信息进行分析。

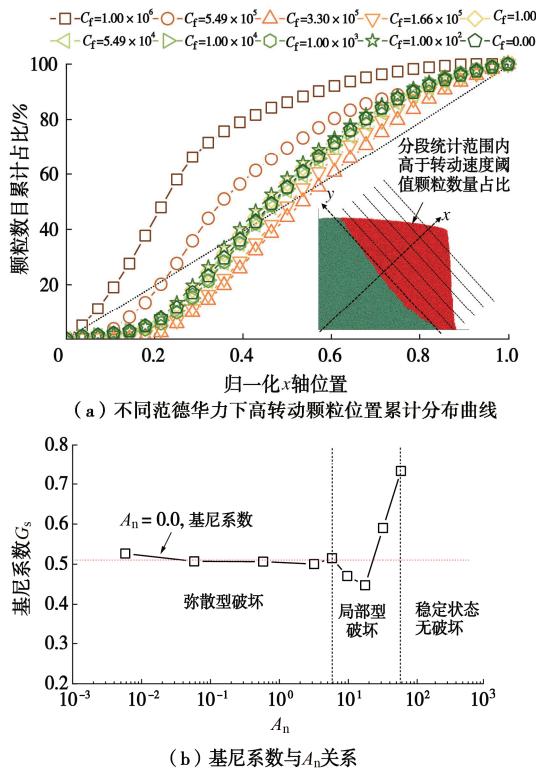


图 9 高转动颗粒位置分布规律演化

Fig. 9 Evolution law of highly rotational particle location distribution

图 9 (a) 为高转速颗粒在滑动区域的分布曲线, 附图为坐标变化及区域划分, 由于不同工况下高转速颗粒主要分布于滑动区域内部及边界处, 因此沿稳定及滑动区域边界设定为局部坐标  $y$  轴, 随后沿着  $x$  轴正方向对滑动区域进行分段处理 (30 段) 至滑动区域右上边界, 并对变换后坐标轴从原点至滑动区域右上边界进行归一化处理, 其中 0 和 1 分别对于坐标原点和  $x$  最大值处 (滑动区域右上边界)。基于前期调试, 发现 0.2 倍阈值时, 高转速颗粒能更好的分布于滑动区域内, 因此选取大于阈值 ( $0.2\sqrt{g/r}$ ) 的颗粒数目进行统计, 用以统计高转速颗粒在该区域的分布情况。由图可知, 虚线表示高转速颗粒完全平均分布, 作为对比, 当范德华力较小时, 高转速颗粒分布较均匀 (主要分布于  $x$  轴 0.2~0.7 位置), 随着范德华力持续增大, 高转速颗粒分布曲线开始向  $x$  轴原点移动, 如  $C_f=1.0 \times 10^6$  工况, 其主要分布于  $x$  轴 0.0~0.3 位置, 上述规律与图 7 规律基本吻合。基于图 9 (a), 使用基尼系数来量化表征高转速颗粒在滑动区域分布的均匀程度, 图 9 (b) 为基尼系数  $G_s$  与吸引力数  $A_n$  关系, 由

图可知, 在初始阶段, 随着  $A_n$  的增长,  $G_s$  基本维持在 0.5 左右浮动, 但当  $A_n$  大于 5.0 时,  $G_s$  开始偏离 0.5, 其中  $C_f=1.0 \times 10^6$  工况  $G_s$  为 0.73, 说明其高转速颗粒主要集中于  $x$  轴原点处 (滑动和稳定区域交界处)。由  $G_s$  的变化规律可定量的将不同范德华吸引力下颗粒柱坍塌破坏模式分为弥散型破坏模式 ( $A_n=0 \sim 5.0$ )、局部型破坏模式 ( $A_n=5.0 \sim 60.0$ ) 和稳定状态模式 ( $A_n>60.0$ ) 3 类。

## 2.7 流滑距离及流动系数

流滑距离一般用以判断滑动体的破坏波及范围, 而流动性系数可以排除颗粒柱初始长宽比  $a$  的影响, 来无量纲化的表征其流滑距离。参考已有颗粒柱坍塌研究成果<sup>[4]</sup>, 本次研究流动性系数  $R^* = (L_f - L_i) / L_i$ , 式中  $L_f$  为颗粒柱坍塌后稳定状态时长度,  $L_i$  为坍塌前颗粒柱长度, 具体如图 3 所示。

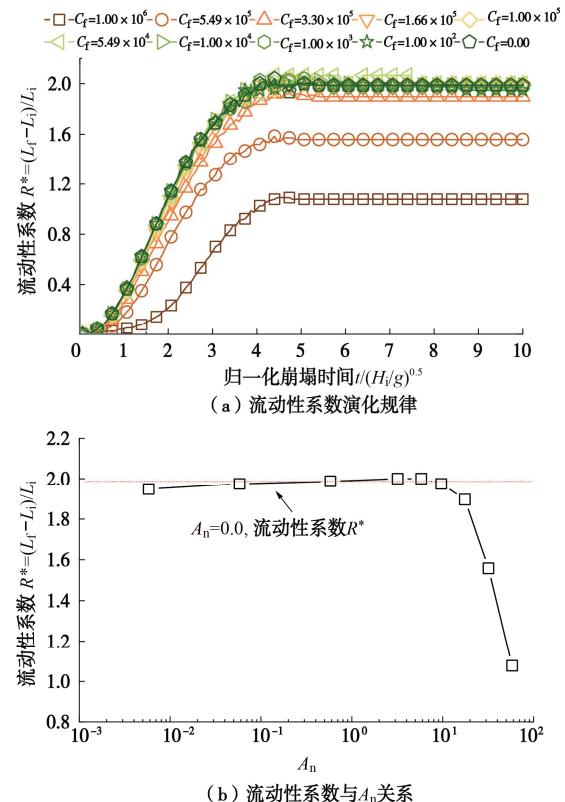


图 10 流动性系数随范德华力演化规律

Fig. 10 Evolution law of flow mobility index with different Van der Waals force

图 10 (a) 为不同范德华力作用下流动性系数  $R^*$  演化规律, 由图可知, 流动性系数显著增长主要发生在归一化坍塌时间 0~4 之内, 且随着范德华力的增加, 其流动性系数的增幅及稳定值均有所减小。图 10 (b) 为流动性系数  $R^*$  与  $A_n$  关系, 由图 10 可知, 在一定范德华力范围内, 流动性系数基本保持稳定, 而当范德华力大于某一阈值时, 其流动性系数明显减小,

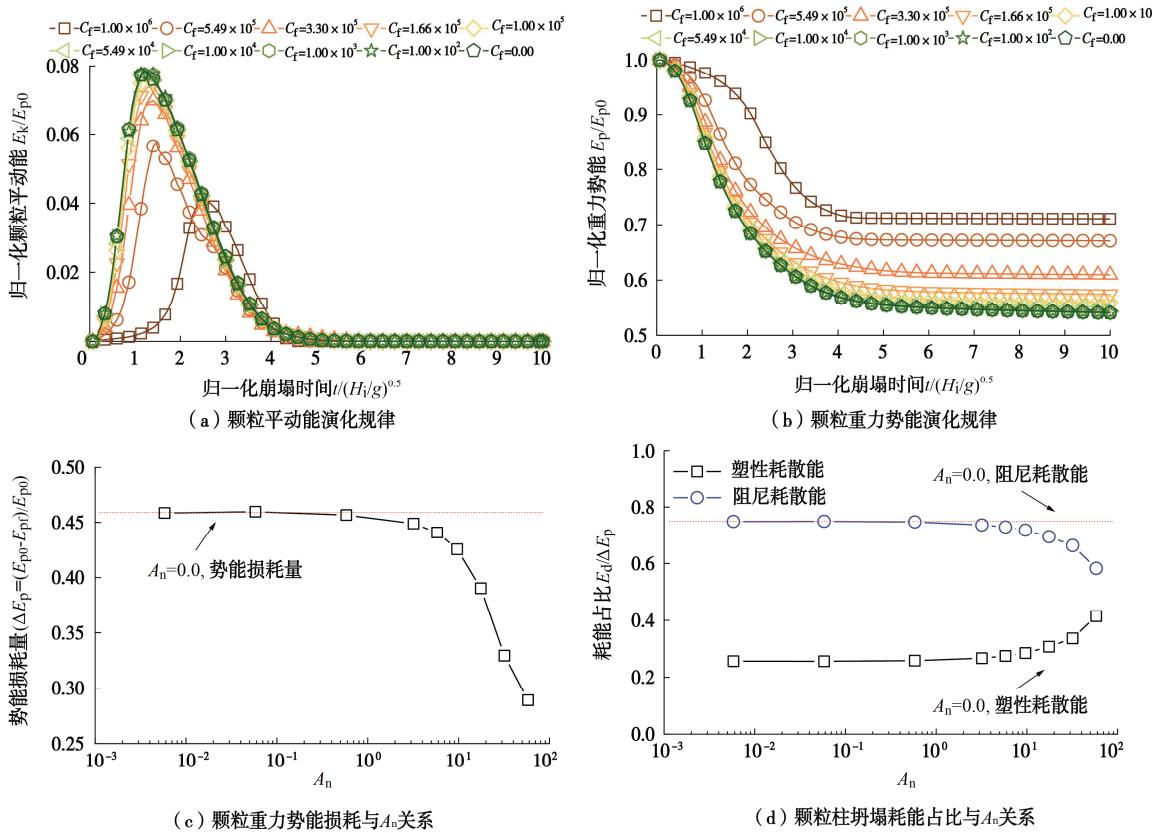


图 11 颗粒坍塌能量演化规律

Fig. 11 Energy evolution law of granular column collapse

这与上述分析结果较吻合, 说明当处于弥散型破坏模式时, 范德华力对颗粒柱坍塌流动性系数影响很小, 而在局部型破坏模式内时, 范德华力的增大会显著降低其流动性系数。

## 2.8 能量演化规律

图 11 (a) 为颗粒平动能演化规律, 图 11 中  $E_k$  表示平动能,  $E_{p0}$  为初始重力势能, 由图 11 可知, 颗粒平动能演化规律与颗粒平动速度基本一致, 表现处在弥散型破坏模式内范德华力影响不明显, 而在局部型破坏模式下范德华力的增大会显著降低其动能峰值和延后其峰值出现对应时间。图 11 (b) 为颗粒重力势能演化规律, 图中  $E_p$  为重力势能, 由图可知, 重力势能也表现为在弥散型破坏模式内范德华力影响不明显, 而在局部型破坏模式内范德华力的增大会减少坍塌过程中势能的损失。图 11 (c) 为颗粒重力势能耗散量与  $A_n$  关系, 图中  $\Delta E_p$  为重力势能差值, 等于稳定状态时重力势能  $E_{pf}$  减去初始状态重力势能  $E_{p0}$ , 由图可知, 在弥散型破坏模式内, 范德华力对重力势能耗散影响不明显, 而在局部型破坏模式内, 随着范德华力的增大, 重力势能耗散量减少, 表明此时范德华力的增大会限制颗粒的竖向和水平位移, 进而抑制重力势能向动能的转化, 使颗粒柱的流动性减小。

图 11 (d) 为颗粒柱坍塌耗能占比与  $A_n$  关系, 其中塑性耗能  $E_{ds}$  包括接触间切向、弯转向、扭转向塑性耗能, 阻尼耗能  $E_{dd}$  主要为接触间黏滞阻尼耗能。由图可知, 在弥散型破坏模式内, 塑性及阻尼耗能占比基本保持稳定, 范德华力影响不明显, 而在局部型破坏模式内, 随着范德华力的增大, 阻尼耗能占比逐渐减小而塑性耗能占比逐渐增大。上述现象表明, 在弥散型破坏模式阶段, 范德华力的变化对颗粒运动影响很小, 其耗能占比基本保持不变, 而在局部型破坏模式阶段, 范德华力的增大会阻碍颗粒间的相对运动, 进而减小阻尼耗能, 导致阻尼耗能占比的减小。

## 3 结 论

本文基于团队提出的考虑范德华吸引力作用的三维完整接触模型<sup>[26-28]</sup>, 进行了干燥条件下太空环境影响的颗粒柱坍塌试验三维离散元模拟, 对不同范德华吸引力作用下颗粒流动特性及颗粒柱破坏模式进行了对比分析, 得到 4 点结论。

(1) 高颗粒速度梯度、高颗粒转动速度及稀疏接触位置分布具有较强的正相关性, 参照高转速颗粒位置分布特征, 基于基尼系数  $G_s$  定量的将不同范德华力作用的颗粒柱坍塌破坏模式划分为弥散型破坏模式、

局部型破坏模式和无滑动稳定型模式 3 种。

(2) 颗粒平均平动速度、转动速度演化特征在弥散型破坏模式中, 受范德华吸引力影响不明显; 而在局部型破坏模式中, 随着范德华吸引力的增大, 平动及转动峰值明显减小、峰值对应时间也明显滞后。

(3) 在弥散型破坏模式内, 范德华吸引力对颗粒柱流动性影响不明显; 而在局部型破坏模式内, 颗粒柱流动性随着范德华吸引力的增大而明显减小。

(4) 在弥散型破坏模式内, 范德华力变化对能量转换及耗散影响不大; 而在局部型破坏模式内, 随着范德华力的增大(颗粒间越难以发生相对运动), 颗粒重力势能耗散明显减小, 且阻尼耗散能占比也明显减小。

本研究仅进行了地球重力条件下的不同范德华力作用的颗粒柱坍塌试验模拟, 而近地行星以低重力场居多(重力场小于地球), 低重力、高温差及范德华力联合作用对颗粒柱坍塌流动特性及破坏模式的影响是否与地球环境下有类似规律仍需要进一步详细的研究。因此, 笔者后续研究拟考虑不同重力、高温差及范德华力联合作用下, 不同高宽比颗粒柱坍塌流动特性和破坏模式的变化规律, 以期找到其中规律, 为我国外星探测中原位资源利用、科研站选址及建设提供一定的理论指导依据。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 石安宁: 写作-初稿撰写、可视化、软件应用、研究方法、调查研究、正式分析、数据整理。蒋明镜: 写作-审阅与编辑、监督管理、资源支持、概念构思。杨耿超: 写作-审阅与编辑、可视化、监督管理、研究方法、正式分析。郭颂怡: 写作-审阅与编辑、可视化、监督管理、研究方法、正式分析。王思远: 可视化、软件应用、数据整理。林嘉禹: 可视化、软件应用、数据整理。SHI Anling: Writing-original draft, Visualization, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. JIANG Mingjing: Writing-review & editing, Supervision, Resources, Conceptualization. YANG Gengchao: Writing-review & editing, Visualization, Supervision, Formal analysis. KWOK Chungyee: Writing-review & editing, Visualization, Supervision, Formal analysis. WANG Siyuan: Visualization, Software, Data curation. LIN Jiayu: Visualization, Software, Data curation.

## 参考文献:

[1] PERKO H A, NELSON J D, SADEH W Z. Surface cleanliness effect on lunar soil shear strength[J]. Journal of Geotechnical

and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(4): 371-383.

- [2] 蒋明镜, 张鑫蕊, 司马军, 等. 壤基材料加筋月壤技术在月球基地建设中的应用[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版), 2023, **40**(3): 11-20, 53. (JIANG Mingjing, ZHANG Xinrui, SIMA Jun, et al. Future application of lunar-textile composite/reinforced regolith to the construction of lunar base[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2023, **40**(3): 11-20, 53. (in Chinese))
- [3] 蒋明镜, 王思远, 姜朋明, 等. 月球基地的建设远景与挑战[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, **54**(2): 114-125. (JIANG Mingjing, WANG Siyuan, QIANG Pengming, et al. The long-range perspective and challenges for the construction of lunar base[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, **54**(2): 114-125. (in Chinese))
- [4] CABRERA M, ESTRADA N. Granular column collapse: Analysis of grain-size effects[J]. Physical Review E, 2019, **99**(1): 012905.
- [5] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S J, et al. Axisymmetric collapses of granular columns[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, **508**: 175-199.
- [6] LAJEUNESSE E, MANGENEY-CASTELNAU A, VILOTTE J P. Spreading of a granular mass on a horizontal plane[J]. Physics of Fluids, 2004, **16**(7): 2371-2381.
- [7] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S, et al. Collapses of two-dimensional granular columns[J]. Phys Rev E: Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2005, **72**(4): 041301.
- [8] LAJEUNESSE E, MONNIER J B, HOMSY G M. Granular slumping on a horizontal surface[J]. Physics of Fluids, 2005, **17**(10): 103302.
- [9] NIE J Y, CUI Y F, WU Z J, et al. DEM study on role of fines in mobility of dry granular flows considering particle size-shape correlation[J]. Computers and Geotechnics, 2024, **166**: 105980.
- [10] LAI Z Q, JIANG E H, ZHAO L J, et al. Granular column collapse: Analysis of inter-particle friction effects[J]. Powder Technology, 2023, **415**: 118171.
- [11] COURRECH DU PONT S, GONDRET P, PERRIN B, et al. Granular avalanches in fluids[J]. Physical Review Letters, 2003, **90**(4): 044301.
- [12] BOUGOUIN A, LACAZE L. Granular collapse in a fluid: different flow regimes for an initially dense-packing[J]. Physical Review Fluids, 2018, **3**(6): 064305.
- [13] JING L, YANG G C, KWOK C Y, et al. Flow regimes and

- dynamic similarity of immersed granular collapse: a CFD-DEM investigation[J]. Powder Technology, 2019, **345**: 532-543.
- [14] YANG G C, JING L, KWOK C Y, et al. Size effects in underwater granular collapses: experiments and coupled lattice Boltzmann and discrete element method simulations[J]. Physical Review Fluids, 2021, **6**(11): 114302.
- [15] MÉRIAUX C, TRIANTAFILLOU T. Scaling the final deposits of dry cohesive granular columns after collapse and quasi-static fall[J]. Physics of Fluids, 2008, **20**(3): 033301.
- [16] ABRAMIAN A, STARON L, LAGRÉE P. The slumping of a cohesive granular column: continuum and discrete modeling[J]. Journal of Rheology, 2020, **64**(5): 1227-1235.
- [17] ELEKES F, PARTELI E J R. An expression for the angle of repose of dry cohesive granular materials on Earth and in planetary environments[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, **118**(38): e2107965118.
- [18] STARON L, DUCHEMIN L, LAGRÉE P Y. Cohesive granular columns collapsing: Numerics questioning failure, cohesion, and friction[J]. Journal of Rheology, 2023, **67**(5): 1061-1072.
- [19] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, **29**(1): 47-65.
- [20] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野: 宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 195-254. (JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 195-254. (in Chinese))
- [21] JIANG M J, SHEN Z F, THORNTON C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **54**: 104-116.
- [22] JIANG M J, SHEN Z F, WANG J F. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **65**: 147-163.
- [23] 奚邦禄. 月壤开挖试验与三维离散元模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2019. (XI Banglu. Experimental and Three-dimensional Distinct Element Simulation of Lunar Soil Excavation Test[D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese))
- [24] HÄRTL J, OOI J Y. Experiments and simulations of direct shear tests: porosity, contact friction and bulk friction[J]. Granular Matter, 2008, **10**(4): 263-271.
- [25] LOMMEN S, SCHOTT D, LODEWIJKS G. DEM speedup: Stiffness effects on behavior of bulk material[J]. Particuology, 2014, **12**: 107-112.
- [26] YANG G C, JING L, KWOK C Y, et al. Pore-scale simulation of immersed granular collapse: implications to submarine landslides[J]. Journal of Geophysical Research (Earth Surface), 2020, **125**(1): e2019JF005044.
- [27] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, **30**(4): 335-361.
- [28] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. Geotechnique, 2000, **50**(1): 43-53.
- [29] LINARES-GUERRERO E, GOUJON C, ZENIT R. Increased mobility of bidisperse granular avalanches[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, **593**: 475-504.
- [30] SHI A N, YANG G C, KWOK C Y, et al. Enhanced mobility of granular avalanches with fractal particle size distributions: Insights from discrete element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2024, **642**: 118835.