

DOI: 10.11779/CJGE20230040

基于嫦娥五号月壤粒形特征的离散元模拟方法

王思远¹, 蒋明镜^{*2,3,4}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 同济大学土木工程减灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程学院岩土工程系, 上海 200092)

摘要: 为满足当前中国探月任务中的“堪测、采、建”战略规划, 获取更加贴近真实的月壤物理力学特性, 考虑月壤颗粒形状的影响, 结合嫦娥五号探月任务中的月壤颗粒图像, 将月壤粒形特征与颗粒级配联系起来, 提出考虑中国月壤粒形特征的离散元数值模拟方法。首先, 基于嫦娥五号探月任务获取的部分月壤颗粒图像, 对颗粒的形状特征及尺寸信息进行提取, 依据其球度特征将月壤的颗粒形态分为6类, 并同月壤颗粒的粒形特征与颗粒尺寸建立对应关系; 其次, 结合本团队开发的三维离散元月壤接触模型, 引入形状参数用以表征月壤颗粒的抗转动能力, 进而在离散元中考虑月壤颗粒的粒形特征, 最终建立考虑中国月壤粒形特征的离散元数值模型; 通过与已知月壤试验结果的对比表明, 该方法可将月壤颗粒形状的可变性直接映射到离散元中。在此基础上, 通过与不考虑粒形特征的数值样进行对比, 探究考虑月壤粒形特征的优势。结果表明: 含嫦娥五号月壤粒形特征的离散元数值模型可以有效捕捉月壤力学行为的主要特征, 为开展月球资源勘探及开发利用研究提供基础。

关键词: 月壤; 粒形特征; 三轴压缩; 宏微观特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0833-10

作者简介: 王思远(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事太空土数值模拟及土体宏微观力学方面研究。E-mail: wsiy@tju.edu.cn。

Lunar regolith simulations with discrete element method based on Chang'E-5 mission's lunar soil particle morphology

WANG Siyuan¹, JIANG Mingjing^{*2,3,4}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To align with the current strategic planning of "survey, mining, and development" in China's lunar exploration mission, and to obtain more accurate physical and mechanical properties of lunar regolith, this study focuses on the influences of lunar regolith particle shape based on particle images from the lunar regolith of the Chang'E-5 mission. A discrete element numerical simulation method that considers lunar regolith particle morphology is proposed by linking particle shape characteristics with gradation. Initially, the shape characteristics and size information of the particles are extracted from the lunar regolith images. The particles are subsequently categorized into six groups based on their sphericity, establishing the corresponding relationships. Secondly, the study utilizes a three-dimensional (3D) lunar regolith contact model and calculates rolling and twisting resistances at inter-particle contact by incorporating shape parameters to account for lunar particle shape effects. Subsequently, the model considers particle size characteristics within the discrete element analysis. Ultimately, a discrete element numerical model that incorporates the particle shape characteristics of the China's lunar regolith is developed. Comparison with the results of Apollo lunar regolith laboratory tests reveals that the variability of grain shape in lunar particles can be directly incorporated into the discrete model.

Additionally, the benefits of considering the grain shape characteristics of lunar regolith are discussed in comparison to numerical samples that neglect the characteristics. The results show that the proposed method can effectively capture the main characteristics of the mechanical behavior of lunar regolith, and

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2021SHFZ264); 国家重大自然灾害防控与公共安全重点专项项目 (2022YFC3003403); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (42221002); 国家自然科学基金重大项目 (51890911); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金项目 (SLDRCE19-A-06)

收稿日期: 2023-01-13

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

provide a basis for the lunar resource exploration and exploitation methods.

Key words: lunar regolith; particle shape characteristic; triaxial compressed test; macro- and micro-mechanical property

0 引言

月球作为世界各国深空探测的首要目标,在完成绕、落、回三期探月工程的背景下,中国已全面启动第四期探月工程,其中月表资源原位利用工程将面临大量资源勘探及开采的任务。但当前缺乏对真实月表环境下月壤物理力学特性的认识,相关理论和分析方法不够成熟,难以准确预测在月表资源勘探和开采中月壤的物理力学响应,这将阻碍月表资源原位利用工程的实施。

相较于中国探月工程,美国阿波罗计划探月任务期间同样获取了部分月壤表层土样及测定了部分表层月壤的物理性质及力学响应^[1-6],但由于月壤的稀缺性,鲜有针对月壤进行损伤性室内试验的研究成果。为了弥补这一缺陷,在采用非损伤测试技术探明月壤的矿物构成后,月壤模拟物可用于初步探明表层月壤的力学性质。例如美国研制了 LSS1~LSS5、MLS-1、MLS-1A、MLS-2、JPL-1、JSC-1、JSC-1A、JSC-1AF、JSC-1AVF、JSC-1AC 等多种模拟月壤模拟物^[7-9];日本研制了 MKS-1、FJS-1 两种类型的月壤模拟物^[10];中国学者也开展了模拟月壤的研制工作,用于满足中国探月工程的需要, Jiang 等^[11]研制的 TJ-1 模拟月壤与已知月壤的力学特性吻合较好; Zheng 等^[12]以辉南火山渣为原料,研制了模拟月壤 CAS-1 用于月壤微波辐射特性的研究;李建桥等^[13]一系列模拟月壤用于月球着陆相关试验研究。Zhou 等^[14]考虑月球表面温度和真空环境的影响开发 BH-1、BH-2 系列月壤,用于探究太空环境下月壤力学性质的演化规律。Li 等^[15]通过使用新的模拟月壤 CUMT-1 探究了低重力条件下月壤的力学响应特点。

除去室内试验方面的研究,数值模拟的手段同样被用于探究月壤的力学响应,以弥补室内试验不足。在已报道的月球风化层的离散元模拟中^[16],从微观力学的角度出发,一定程度上表征了表层月壤的力学性质,但是将具有复杂形状的月壤颗粒理想化建模仍有一定缺陷。为考虑颗粒形状的影响,早期有学者采用椭圆形颗粒证实了粒形在颗粒材料的力学性质中扮演着重要角色,随后 Soltanbeigi 等^[17]以颗粒簇的形式,通过球体的堆积形成不规则颗粒簇进行离散元模拟。为了考虑月壤颗粒形态特征, Katagiri 等^[18]通过 CT 扫描技术对月壤颗粒进行无损检测,获取月壤的颗粒集合特征,建立三维不规则形态的颗粒模型用于离散元模拟,该方法虽然较大程度上考虑了颗粒形状特征,

但在计算算力方面有较大的需求。基于此, Jiang 等^[19]将颗粒粒形特征与粒间转动阻力相结合,在将颗粒球形理想化的基础上考虑了颗粒的粒形特征同时降低了计算效率与模型仿真真实度的冲突。该方法同样被 Rorato 等^[20]利用 Hostun 砂的粒形特征进行数值模拟与室内试验结果对比,证实了该方法的有效性。

因此,本文提出一种基于图像考虑中国月壤粒形特征的离散元模拟方法,为在月球环境下运用地球环境的物理知识及研究手段提供思路。通过中国月壤颗粒形态图像数据,提取粒形特征及尺寸数据,建立颗粒尺寸、粒形特征与抗转动程度的对应关系;结合本团队开发的三维月壤接触模型^[21],考虑颗粒形状对颗粒材料整体力学行为的影响,引入抗转动系数,以此为桥梁将月壤的颗粒形状影响考虑到试样的整体计算中;通过构建月壤颗粒形状及尺寸特征的数据库,一方面为后期指导制备月壤模拟物,另一方面用于建立考虑中国月壤粒形特征的离散元数值样,研究开展更加贴近真实月表环境的月壤物理力学特性,为中国月球资源勘探及相关设备开发利用提供数值研究基础。

1 嫦娥五号月壤颗粒形态特征

如图 1 所示,本文研究所使用的月壤样本来自中国探月工程嫦娥五号任务中获取的表层月壤,是迄今为止采样纬度最高的一个新区域。月壤表层颗粒主要有不规则的棱角形、次棱角形及表面粗糙的角砾岩组成^[23]。

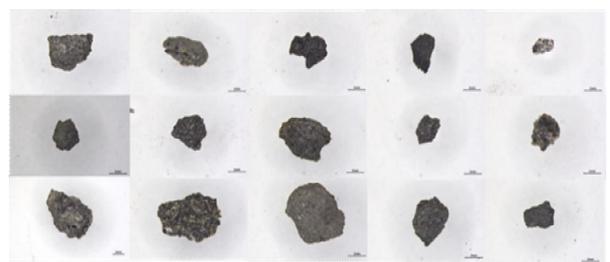


图 1 部分月球表面颗粒^[22]

Fig. 1 Multiple lunar regolith particles^[22]

Rorato 等^[24]认为与球体或球体的相似性用于描述颗粒的形状特征较为合适,因此本文采用球度作为评价标准用于描述中国月壤颗粒的粒形特征;真球度(true sphericity)定义为等效球形体积的表面积与真实颗粒的表面积之比,但计算不规则颗粒的表面积仍有一定的难度,且结合当前所能获取的月壤颗粒图像

属于二维图像特征; 因此, 本文以 2D 图像框架的内对月壤颗粒粒形进行捕捉, 通过颗粒 2D 圆度特征反演对三维空间下颗粒球度^[25], 用于评价月壤颗粒粒形在三维空间下的特征。其中颗粒 2D 圆度特征如下式:

$$S_p = \frac{p_c}{p_s} \quad (1)$$

式中: p_c 为和颗粒面积相同的圆的周长; p_s 为颗粒周长。

粒形 3D 球度 (ψ) 和 2D 圆度 (S_p) 关系如下式:

$$\psi = 1.075S_p - 0.067 \quad (2)$$

如图 2 所示, 依据上述二维成像来考虑月壤的颗粒粒形的定义, 月壤的颗粒粒形的数据捕获整体分为两部分: ①通过对月壤图像进行月壤图像进行二值化识别及相关颗粒特征的捕捉; ②依据二维球度的定义计算输出颗粒粒径尺寸、颗粒面积、颗粒周长等相关信息。在获取月壤颗粒数值尺度后, 应参照标尺换算真实颗粒尺度。

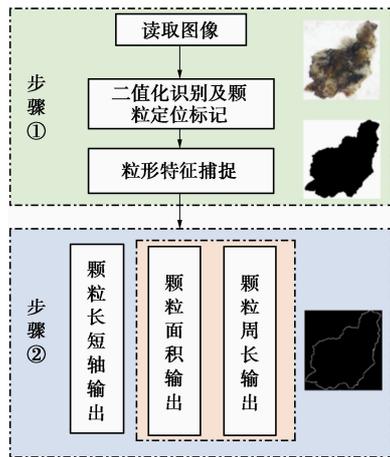


图 2 基于图像识别月壤粒形特征捕获流程图

Fig. 2 Implementation of lunar soil particle shape feature capture based on image processing

如图 3 所示, 通过收集当前已发表的中国月壤相关文献^[26~34]及尚未发表正在研究的月壤颗粒粒形图像, 依照图 2 所述流程, 对所获取的近 612 个月壤颗粒图像进行分析, 用于探究中国月壤的颗粒圆度特征及级配分布。由图 3 (a) 所示, 在已知美国 Apollo 系列月壤级配^[6]背景下, 嫦娥五号样品 CE5C0400^[35]及本文图像识别获取的月壤颗粒级配, 结果表明二者级配均在月壤级配范围内。此外, 进一步观察表明, 在 1~10 μm 粒径范围内, 颗粒数目占比增长缓慢, 有研究^[34]表明在 1~10 μm 粒径范围内存在大量的细粉尘。而现有的月壤文献研究中, 关于该粒径范围月壤粒形特性研究稍有不足。

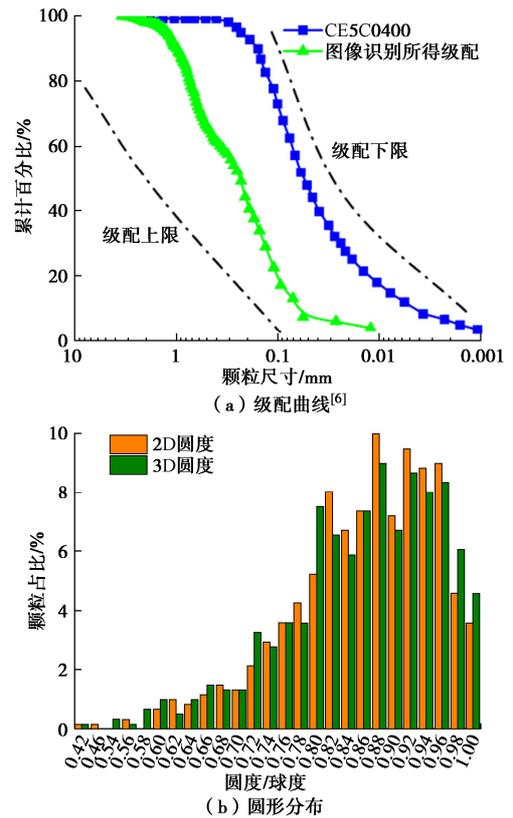


图 3 嫦娥五号月球样品的颗粒形状和尺寸分布

Fig. 3 Particle shape and size distributions of Chang'E lunar sample

此外, 相较于嫦娥样本 CE5C0400 级配曲线, 本文所获取颗粒级配曲线则表现出较为明显的间断感, 导致该现象的原因本文归纳为 2 类: ①当前所发表的文献中颗粒所能收集到的数目较少, 且对 1~10 μm 区间范围的月壤颗粒粒径的研究稍有不足; ②由于科学研究的目不同, 嫦娥月壤样品差异性过高, 导致其整合后, 级配曲线在不同粒径区间表现形式不同。尽管综合多个月壤研究样本后的级配曲线有一定间断, 但所获取的月壤样本同属一批嫦娥五号探月计划任务返回样, 且整合所得级配曲线落入美国阿波罗探月计划所获取的月壤级配上下限范围内, 从另一方面佐证了本文研究数据的合理性。如图 3 (a) 所示: 当前收集月壤颗粒粒径主要以小于 1 mm 粒径的小颗粒为主, 其中小于 1 mm 的颗粒数目占总数目的 90%。在此基础上依据球度对月壤的颗粒粒形特征进行定量分类, 在考虑颗粒粒径的情况下, 对其球度特征进行描述。如图 3 (b) 所示, 当前所收集月壤颗粒平均球度 0.851, 其中大部分月壤颗粒球度集中 0.8~0.97, 嫦娥月壤样本 CE5C0400 获取颗粒平均球度 0.875^[36]。其中有 25% 的颗粒球度小于 0.8, 35% 的颗粒球度大于 0.9, 10% 的颗粒球度大于 0.95。基于此, 拟将月壤的颗粒形态分为 6 类, 如表 1 所示。

表1 月壤的颗粒形态分布表

Table 1 Representative particle morphologies of lunar particles

球度范围	颗粒占比/%	代表性颗粒形态
$S_p < 0.6$	1.3	
$0.6 < S_p < 0.7$	5.8	
$0.7 < S_p < 0.8$	18.1	
$0.8 < S_p < 0.9$	39.27	
$0.9 < S_p < 0.94$	18.3	
$0.94 < S_p < 1.0$	17.18	

如图4(a)所示,在考虑粒径的情况下,对其球度特征进行描述,当前中国月壤粒形圆度分布呈现出随粒径增大,颗粒圆形度呈下降趋势。基于此,造成颗粒圆度随粒径降低现象的结果主要可以归纳解释为:①以当前已发表的能够获取的月壤粒形特征中,由于设备的原因难以捕获细小月壤颗粒的特征,导致在进行粒径数据统计时难以精准统计其平面特征,进而影响球度分布;②在月壤形成过程中,受颗粒间相互作用的结果,颗粒本身棱角进行磨损,导致其球度过高;③在太空真空环境及微重力影响下,有部分质量小且属于熔融状态冷却后的月壤颗粒表现出良好的球形,圆度较高,接近于圆形。

为考虑月壤粒形在DEM模拟中的影响,本文参考Rorato等^[20]提出的球度(true sphericity)与颗粒的抗转动性存在相关性的概念。假设一个完美的球体($\psi=1$)在与另一个任意形状的物体接触时可能不会产生任何旋转阻力,而一个立方体应该具有较高的滚动摩擦值取0.8^[24]。正方形球度计算反演立方体球度为0.806。本文基于线性方程建立球度与抗转动的关系:

$$\beta = -4.12\psi + 4.12 \quad (3)$$

式中: β 为抗转动系数; ψ 为由式(2)转换求得三维球度。其抗转动系数分布如图4(b)所示。由于本文简单认为颗粒球度与其抗转动系数呈线性对应关系,则颗粒抗转动系数分布形式与球度分布形式相左,离散程度较高,且由于较大尺度下,月壤颗粒粒径图像获取清晰,则球度较小,对应的抗转动系数对应较

高,也近似表现出随颗粒粒径增加,颗粒抗转动系数呈正相关趋势。为简单计算,本文对粒径相近颗粒球度及抗转动系数进行统计求均值用于后续的离散元模拟中。

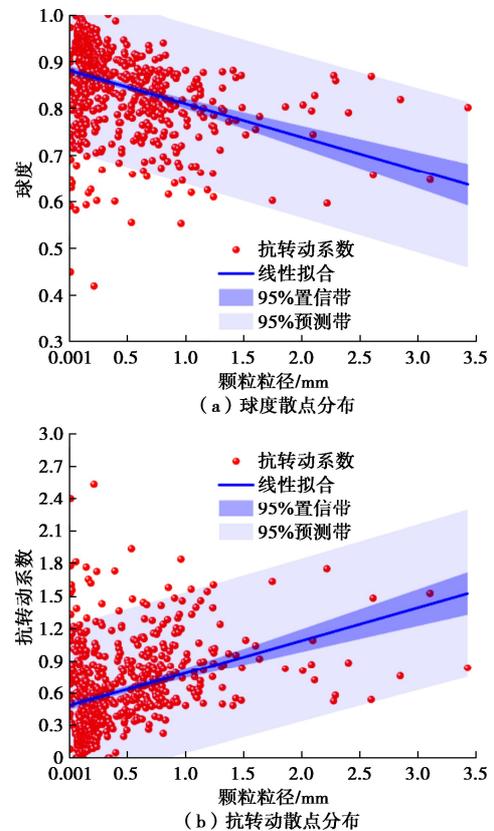


图4 月壤颗粒球度和抗转动的散点分布

Fig. 4 Scatter distribution of sphericity and rolling resistances of lunar soil particles

2 考虑粒形特征的粒间接触模型

如图5(a)所示,月壤颗粒多表现为形状不规则,粒间以面-面接触居多,表现为“互锁效应”,具有一定的抗转动能力。在考虑颗粒形状的影响后,不规则颗粒所导致的摩擦和剪胀的影响随之产生^[36]。如图5(b)所示,本文通过在颗粒接触处引入抗转动力矩和局部破碎系数,分别考虑不规则颗粒所带来的影响,以及加载过程中颗粒破碎的现象^[19],本文主要介绍如何将颗粒形状引入粒间接触计算。通过球体(3D)和单位长度与变形平面(2D)正交的圆盘(矩形)两个相对的圆形平面接触区域来模拟粒子间接触行为,如图6所示。

$$B = \beta r \quad (4)$$

$$r = \frac{2r_1r_2}{(r_1+r_2)} \quad (5)$$

式中: B 为接触尺度; r 为颗粒半径分别为 r_1 , r_2 相互接触颗粒的共同半径; β 作为无量纲的形状参数,即公式(3),用以映射颗粒形态特征来考虑颗粒形态对

试样剪切强度的影响。

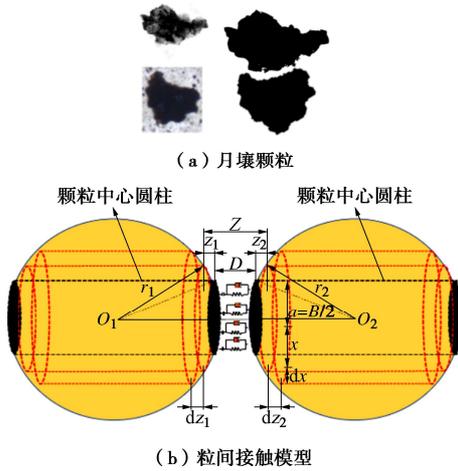


图 5 月壤粒间接触示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lunar soil particle contact

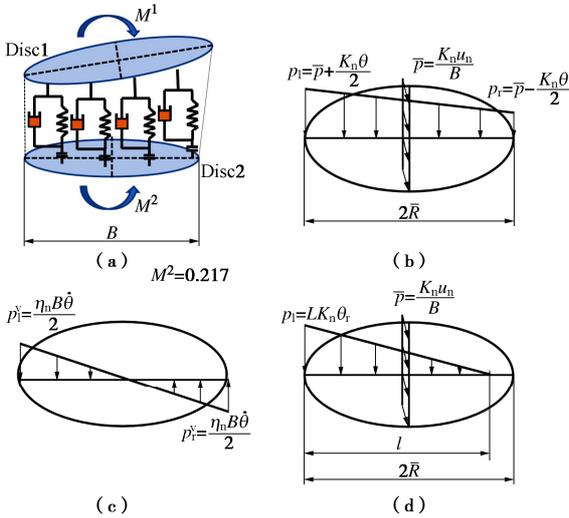


图 6 考虑抗转动影响的粒间演化规律

Fig. 6 Contact evolution between particles considering resistance rotation coefficient

如图 6 所示,先定义一个标准单元(basic element)用于阐述抗转动参数的在接触模型中扮演的意义。首先假设两个颗粒球体接触点处分布无限多个法向及切向元器件,用以描述单元体在滚动和扭转方向上的接触行为,如图 6 (a) 所示。对接触截面(如图 6 (b))进一步分析,其中基本力学响应如下:

$$K_n = k_n B, \quad \eta_n = c_n B \quad (6)$$

式中: K_n (N/m^2)及 η_n (Ns/m^2)分别为基本单元的法向刚度系数和黏滞阻尼系数; k_n 为法向刚度接触系数; c_n 为法向阻尼系数。

在法向力作用下使两个颗粒球在竖向截面内发生旋转,其转动角度可以由下式表示

$$\theta = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \dot{\theta} dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) dt \quad (7)$$

式中: $\dot{\theta}$ 为相对转动率; $\dot{\theta}_1$ 及 $\dot{\theta}_2$ 为颗粒球 1, 2 在 Δt 时间竖向平面内的转动率。

基于此,颗粒接触面中力学响应可以分为两方面影响因素产生(如图 6 (b) 所示): ①颗粒接触; ②颗粒转动。其中单位长度上的不考虑颗粒转动平均接触力(\bar{p})为

$$\bar{p} = \frac{K_n u_n}{B} \quad (8)$$

式中: μ_n 颗粒间重叠量。

上式说明,当粒间接触宽度 B 保持不变时,面上法向接触力保持线性分布并产生抗转动的力矩,随着颗粒发生转动(如图 6 (c)),接触面上的左右两端的接触力和阻尼力发生变化,开始达到第二个阶段:

$$P_{left} = \bar{p} + \frac{k_n B \theta}{2} = \bar{p} + \frac{K_n \theta}{2} \quad (9)$$

$$P_{right} = \bar{p} - \frac{k_n B \theta}{2} = \bar{p} - \frac{K_n \theta}{2} \quad (10)$$

$$p_{left}^v = \frac{\eta_n B \dot{\theta}}{2}, \quad p_{right}^v = -\frac{\eta_n B \dot{\theta}}{2} \quad (11)$$

$$M^{left} = \frac{K_n B^2 \theta}{12} = K_m \theta, \quad M^{left-v} = \frac{\eta_n B^3 \dot{\theta}}{12} = c_r \dot{\theta} \quad (12)$$

在式(9)~(12)中, P_{left} , P_{right} 为接触面左右两端的接触力; p_{left}^v , p_{right}^v 为接触力两端的阻尼力。 M^{left} , M^{left-v} 分别为由接触力和阻尼力所产生的弯矩。式(12)中的转动抗度 K_m 和转动黏滞阻尼系数 c_r 也与颗粒的粒形特征进行联系,如下所示:

$$K_m = \frac{K_n B^2}{12} = \frac{K_n}{12} \beta^2 r^2, \quad c_r = \frac{\eta_n}{12} \beta^2 r^2 \quad (13)$$

随着转角的逐渐增大,计算单元左侧的接触力逐渐增大,而计算单元右侧的接触力逐渐减小,如图 6 (d) 所示,直在颗粒旋转的过程中,其应力和弯矩分别为

$$p_{left} = 2 \frac{K_n \theta l}{B} \quad (14)$$

$$M^l = \frac{K_n \theta l^2}{12B} (3B-2l) = \frac{K_n u_n (3B-2l)}{6} \quad (15)$$

由式(14), (15)可知,在类似图 6 (d) 的阶段,粒间接触的应力、弯矩计算由线性关系转变非线性关系,这大大增加了数值模拟计算难度。因此,假设在该阶段力矩为常数,等于临界状态的力矩。具体应力计算如下所示:

$$p_{left} = 2\bar{p} = 2 \frac{K_n u_n}{B} = K_n \theta_0, \quad p_{right} = 0 \quad (16)$$

$$M_0 = \frac{K_n u_n B}{6}, \quad \theta_0 = 2 \frac{u_n}{B} \quad (17)$$

综上所述,通过嫦娥五号月壤图像获取的颗粒形

态数据,将月壤的颗粒形状特征纳入离散元计算的接触模型中,同时结合月壤颗粒级配曲线,建立颗粒形态特征与级配相结合的数值样,将模拟结果与已知月壤试验结果对比验证其可靠性。在考虑了月壤颗粒形状影响的同时,避免了采用不规则颗粒计算所带来的计算时间的难题,为揭示月壤复杂宏观力学特性和开展月球资源勘探及开发利用研究提供基础。

3 离散元数值模拟试验

本文通过在软件 PFC3D 6.0 中植入团队开发的三维离散元月壤接触模型,结合 Fish 语言编码以实现在数值样中考虑月壤粒形的影响。

3.1 离散元样制备

土体颗粒级配是土体力学和工程特性的重要物理参数^[37],为避免科研目的不同导致样品中月壤级配差异性过大,进而影响到数值样的物理力学性质。在 DEM 模拟中,仅采用 CE5C0400 样品通过图像识别所获取的颗粒级配,通过对月壤二维颗粒图片识别获取相对粒径下的抗转动系数,并与美国阿波罗探月工程计划^[6]中获取的月壤级配区间以及现有的中国探月工程嫦娥五号部分样品的月壤级配^[35]进行比较,结合图 3, 7, 所获得月壤颗粒级配曲线均分布于已知的月壤颗粒级配曲线上下限范围内,从侧面反映了基于图像识别获取月壤级配曲线的可行性。

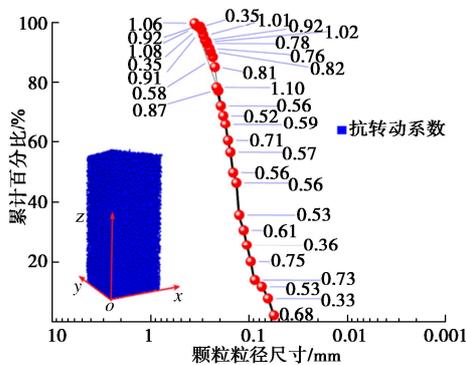


图 7 DEM 模拟颗粒级配曲线及抗转动参数

Fig. 7 DEM simulation of grain grading curve and corresponding resistance rotation coefficient

如图 7 所示,采用由 28 种不同粒径球形颗粒组成颗粒级配结合相应抗转动系数,用以制备离散元数值样。其中相关参数设置如下:颗粒等效模量及法切向刚度比可以经由以往 Apollo 系列获取月壤的弹性模量和泊松比进行标定,但同时需要考虑刚度过小会造成颗粒重叠过大,从而使计算失真。因此根据团队已有参数选取经验^[21],选择颗粒等效模量为 800 MPa,颗粒法切向刚度比选为 5,颗粒间摩擦系数是土体颗粒固有属性,通过试错法选为 0.5。其他参数设置详见

表 2,进行数值样的制备主要分为以下几个步骤:

(a) 试样制备:采用 Jiang 等^[38]提出的分层欠压法,分 10 层制备初始孔隙比为 0.85 的试样,试样高径比 1:2,总颗粒数为 21400。

(b) 施加接触模型,并基于刚性边界条件的伺服机制对试样进行初始固结,固结过程中,以有效应力的形式施加固结压力,使其达到目标固结状态 12.5 kPa 保持稳定。

(c) 将试样置于目标应力下进行等向固结并保持稳定。

(d) 将试样置于 1%/min 应变速率下进行剪切,当轴向应变达到 20%时,结束加载。

为了在单元试验中准确地获得土壤的力学性能,需要确保样品经受均匀的宏观目标应力。在地质实验室中,三轴压缩试验通常使用高度为 8 cm 的圆柱体样品,这导致样品顶部和底部之间由于重力而产生的垂直应力差异,与围压相比可忽略不计。在 DEM 模拟中,通过简单地将重力设置为零,理想地实现了无重力条件,消除了重力对力学行为的影响。

表 2 离散元模拟参数^[21]

Table 2 Parameters used in DEM simulations		
接触类型	微观参数	取值
球-球	颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2320
	有效模量 E_p /MPa	800
	法向与切向刚度比 ζ	5
	抗转动系数 β	见图 7
	局部破碎系数	4
	颗粒摩擦系数	0.5
	局部阻尼	0.7

3.2 数值结果对比验证

月壤颗粒形特征的角度对比验证:其中如图 8 (a), (b) 所示, Apollo 12/16 获取的部分月壤颗粒的颗粒形态^[39]与中国嫦娥五号任务获取颗粒形态(见图 1)基本类似,由于试验方案设计原因, Apollo 12/16 样品均经过筛分取样,导致其颗粒粒径分布相对集中。如图 8 (c) 所示,在仅有颗粒形态数目下,统计分析其样品球度特征演变规律与嫦娥五号系列(见图 4 (a))基本一致,从颗粒形态的角度佐证了数值样和试验样品的相似性。



(a) Apollo12颗粒^[39]

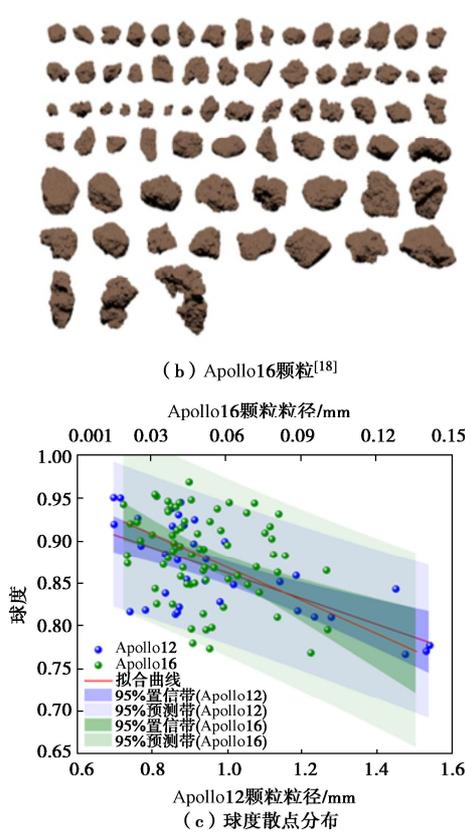


图 8 Apollo 12/16 月壤颗粒形态特性

Fig. 8 Morphological characteristics of soil particles in Apollo 12/16 mission

颗粒级配及力学响应的角度对比验证: 由图 9(a) 所示, 美国 Apollo12 颗粒级配范围高于本文所使用的月壤级配, 但二者 d_{50} 较为接近。由图 9 (b) 可知, 数值样的模拟结果与室内试验的应力应变趋势基本一致, 佐证了 DEM 模拟的有效性。模拟曲线与试验曲线之间差别的原因主要可归结为两方面: ①在基于图像对月壤颗粒捕获时存在误差, 尤其是小颗粒的粒形特征难以精确捕捉; ②收集颗粒数目的限制, 颗粒数目较小, 在表征试样整体特征方面尚有不足。基于上述应力应变响应所标定的参数下的三轴离散元模拟试样能较好地反映月壤的宏微观应力应变响应。

3.3 三轴试验模拟宏观结果对比及讨论

依照上文提及的数值样制备方法, 本文制备 2 组孔隙比为 0.85 的数值样进行三轴剪切试验用以探究月壤粒形对其力学性质的影响。如图 7 所示, 不同颗粒尺寸结合相应的抗转动系数, 命名为粒形样, 未考虑粒形影响, 命名为普通样, 其他参数保持一致。在不考虑太空环境及重力的影响下, 通过不同有效应力水平下 (25, 50, 100 kPa) 三轴压缩实验, 探究月壤粒形的影响。

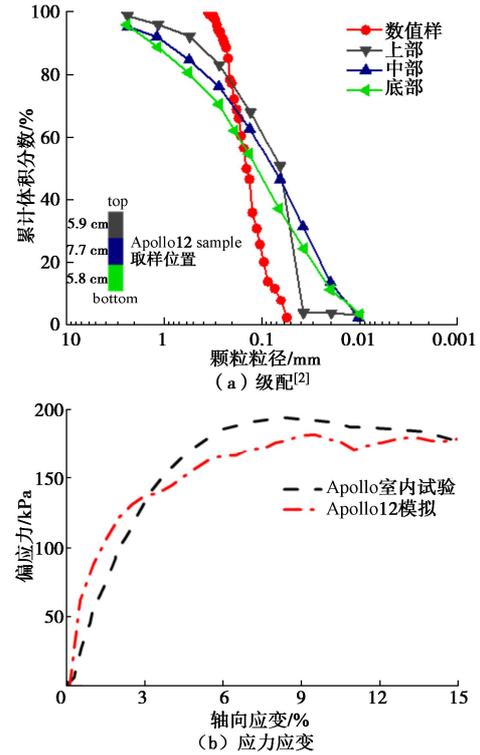


图 9 数值模拟与室内试验对比

Fig. 9 Comparison between numerical simulations and laboratory tests

如图 10 (a) 所示, 在应力应变关系曲线中, 在不同有效围压下, 二者均表现出松样应变硬化的剪切特征, 此外, 明显可以看出在同一有效围压下, 考虑粒形样的峰值强度明显高于普通样, 且随着有效围压的增高, 二者之间的差距加强, 该现象说明颗粒形状在试样力学性质中扮演着重要的角色^[19], 一定程度上佐证了考虑月壤粒形特征的合理性。此外对考虑月壤粒形样的结果进行线性拟合, 在 τ - σ 平面内粒形样的强度破坏包线, 所得黏聚力约为 7.6 kPa, 内摩擦角约为 31.6° , 这符合之前的文献研究中获取月壤黏聚力 (1~10 kPa)、内摩擦角 ($30^\circ \sim 50^\circ$)^[3] 的研究范围。

如图 10 (b) 所示, 土体的剪胀性作为反映土体物理特性的重要指标。在不考虑颗粒粒形的情况下, 普通样的体变曲线与普通砂土松样的体变曲线形状基本一致。在整个剪切过程中试样均处于减缩过程中, 粒形样则表现出明显不同, 且有效围压的影响在试样体变演化过程中不明显。此外, 在剪切过程中, 粒形样则无松砂样的剪切特征, 反而体积剪胀的现象被观察到。上述现象可解释为: 由于在剪切过程中颗粒会发生相对位置的错动或转动, 在考虑颗粒粒形的产生的抗转动效应的影响下, 颗粒发生错动或转动的情况较为困难, 在内能积攒到一定情况后, 产生较大范围的翻动, 进而产生的体积膨胀, 在有效围压较小时该

现象较明显。

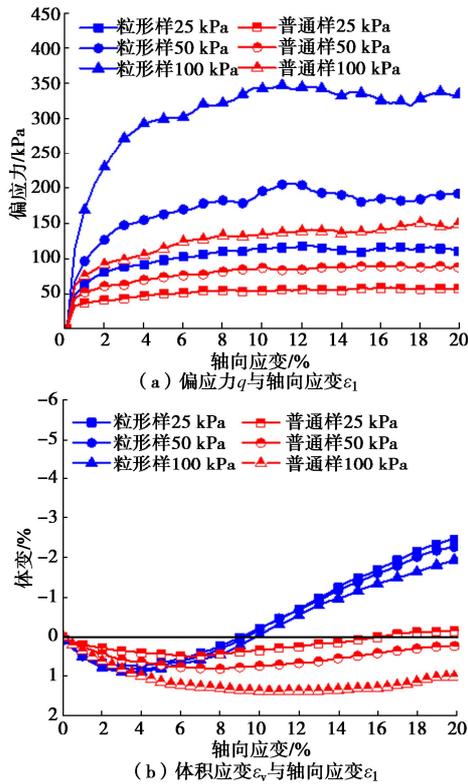


图 10 不同围压下试样三轴试验结果

Fig. 10 Results of conventional triaxial tests under different confining pressures

3.4 三轴试验模拟细观结果对比及讨论

为了进一步探究剪切过程中月壤数值样内部的演化规律，引入平均纯转动率 (averaged pure rotation rate, 简称 APR)、力学配位数来表征试样剪切过程中的内部机理。Jiang 等^[40]认为颗粒间的能量消散与滑动转动量相关，而滑动转动量可以分解为与颗粒中心平动部分及与颗粒转动和颗粒尺寸相关 (纯转动率 (pure rotation rate)，简称 PR)，后者表达式为

$$\dot{\theta}^p = \frac{1}{r} (r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) \quad (18)$$

式中： r_1, r_2 分别为相接触的颗粒 1 和颗粒 2 的半径； $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 分别为颗粒 1 和颗粒 2 的相对转动率； r 为两个颗粒的平均半径，其表达式为

$$r = \frac{2r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (19)$$

当考虑某颗粒群的平均纯转动率 (APR)，可以作为连接砂土宏微观研究的变量；本文引用 APR 变量，将颗粒的转动特性加以利用，用以描述砂土的剪切带演化机理，其计算公式如下：

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{\theta}^p = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{r^k} (\dot{\theta}_1^k r_1^k + \dot{\theta}_2^k r_2^k) \right] \quad (20)$$

式中： N 为接触点总数； r_k 为第 k 个接触点相互接触颗粒的平均半径。

力学配位数^[41]通过计算颗粒平均拥有的有效的接触数目及扣除接触数量小于等于一个的颗粒后的配位数具体计算可参考下式：

$$Z = 2N_c / N_p \quad (21)$$

$$Zm = (2N_c - N_{p1}) / (N_p - N_{p1} - N_{p0}) \quad (22)$$

式中： Z 为配位数； N_c 为接触数目； N_p 为颗粒数目； N_{p0} 和 N_{p1} 分别是接触数目为 0 和 1 的数目。

由图 11 (a) 可知，在不同围压下普通样的 APR 值远大于粒形样的结果，且普通样的 APR 值明显表现出与有效围压呈正相关的联系。该现象表明，考虑颗粒粒形的影响能够有效的降低了颗粒在剪切过程中的转动效应，从侧面反映了理想球形颗粒在模拟土体力学行为的局限性。力学配位数表征颗粒平均拥有的有效的接触数目，用以表征试样的密实程度。如图 11 (b) 所示，在不同有效围压下，普通样的力学配位数大于粒形样的配位数，且在三轴剪切的过程中，普通样力学配位数随轴向应变增加基本保持不变，粒形样则表现出随轴向应变增加颗粒配位数减少的负相关规律；这表明在剪切过程中，普通样密实度基本保持不变，而粒形样密实度随轴向应变的增加逐渐降低，这与上文所观察到的体变现象基本一致。综上可知，颗粒粒形特征在试样的力学性质及体变特征扮演重要角色。

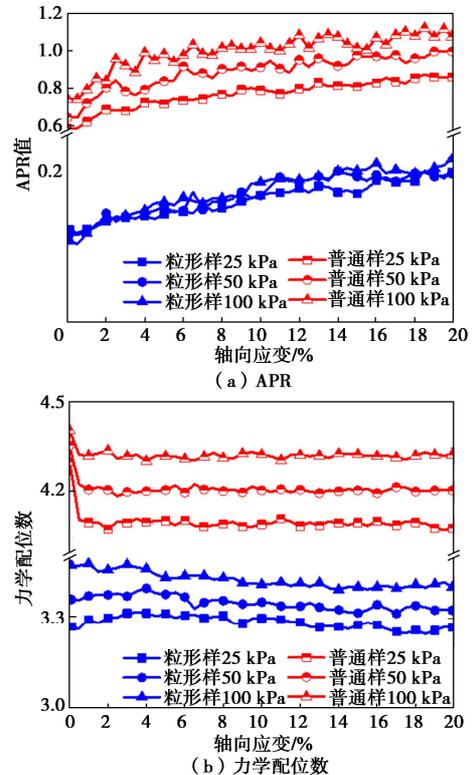


图 11 剪切过程中力学配位数及 APR 演化规律

Fig. 11 Evolution of mechanical coordination number and porosity during shearing

4 结论与展望

本文将月壤颗粒特征与抗转动特性结合起来, 提出一种考虑中国月壤颗粒形态特征的离散元模拟方法。主要得到以下3点结论。

(1)通过图像识别手段对月壤颗粒特征进行识别捕捉, 获取其粒形特征及尺寸信息, 初步建立1~3040 μm 粒径范围下嫦娥五号月壤粒形特征与尺寸数据库, 从不同尺寸范围内颗粒映射对应的形态特征, 在获取足够多的月壤粒形及级配相关信息后, 可以用于指导月壤模拟物的制备、对月壤真实力学性能、边值问题的研究。

(2)确立月壤粒形特征与其抗转动特性的对应关系, 并结合本团队研发的三维月壤接触模型, 进而考虑粒形特征的影响, 通过与已知月壤试验结果进行对比验证其有效性。

(3)以月壤粒形为影响因素, 模拟不同有效围压下的三轴剪切试验, 结果表明了月壤粒形对其宏观性质的有重要的影响, 也佐证了在探究月表物理力学性质的过程中考虑粒形特性的必要性。

最后需要指出, 本文所提出的考虑月壤粒形特征的数值模拟是依据近612颗嫦娥五号月壤颗粒的相关形态特征进行建模, 所使用的颗粒数目仍然较少, 代表性有所不足。其次, 由于技术的限制, 本文基于二维图像对月壤颗粒形态特征进行捕获, 虽然降低了数据处理的难度, 但反演颗粒三维球度信息仍存在一定误差。要想更加精细准确的模拟中国月壤的粒形特征, 可以考虑采用CT扫描技术从三维全息角度进行突破, 并且从多角度对微观尺度下的相关参数进行标定, 不仅仅停留在宏观试验结果的对比上。

致谢: 感谢中国科学院地质与地球物理研究所杨蔚研究员对本文提供的巨大帮助! 感谢团队硕士生管成良、李天赐、石宵宵、杨越群在本文中提供的帮助。

参考文献

- [1] COSTES N C, CARRIER W D, MITCHELL J K, et al. Apollo 11 soil mechanics investigation[J]. *Science*, 1970, **167**(3918): 739-741.
- [2] SCOTT R F, CARRIER W D, COSTES N C, et al. Apollo 12 soil mechanics investigation[J]. *Géotechnique*, 1971, **21**(1): 1-14.
- [3] JAFFE L D. Shear strength of lunar soil from Oceanus Procellarum[J]. *The Moon*, 1973, **8**(1): 58-72.
- [4] SCOTT R F. Failure[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**(4): 423-466.
- [5] 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.
- [6] CARRIER III W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(10): 956-959.
- [7] WILLMAN B M, BOLES W W, MCKAY D S, et al. Properties of lunar soil simulant JSC-1[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1995, **8**(2): 77-87.
- [8] KLOSKY J L, STURE S, KO H, et al. Geotechnical behavior of jsc-1 lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2000, **13**(4): 133-138.
- [9] ALSHIBLI K A, HASAN A. Strength properties of JSC-1A lunar regolith simulant[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(5): 673-679.
- [10] KANAMORI H, UDAGAWA S, YOSHIDA T, et al. Properties of Lunar Soil Simulant Manufactured in Japan[M]. *SPACE 98*, 1998: 462-468.
- [11] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, **25**(3): 463-469.
- [12] ZHENG Y C, WANG S J, OUYANG Z Y, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. *Advances In Space Research*, 2009, **43**(3): 448-454.
- [13] 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(6): 1557-1561. (LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labtory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(6): 1557-1561. (in Chinese))
- [14] ZHOU S, YANG Z, ZHANG R, et al. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition[J]. *Acta Astronautica*, 2021, **189**: 90-98.
- [15] LI R, ZHOU G, YAN K, et al. Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, **32**(1): 1-15.
- [16] HUANG Y, LU X, ZHAO R, et al. Three dimensional simulation of lunar dust levitation under the effect of simulated sphere body[J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, **48**(4): 297-306.
- [17] SOLTANBEIGI B, PODLOZHNYUK A, PAPANICOLOPULOS S. et al. DEM study of mechanical characteristics of multi-spherical and superquadric particles at micro and macro

- scales[J]. *Powder Technology*, 2018(329): 288-303.
- [18] KATAGIRI J, MATSUSHIMA T, YAMADA Y, et al. Investigation of 3d grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, **28**(4): 4014092.
- [19] JIANG M J, SHEN Z F, WANG J. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, **65**: 147-163.
- [20] RORATO R, ARROYO M, GENS A, et al. Image-based calibration of rolling resistance in discrete element models of sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **131**: 103929.
- [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] 月球与深空探测科学数据与样品发布系统[EB/OL]. <http://202.106.152.98:8081/moondata/web/datainfo/main.action#>,2007-10-24/2023-01-02.(Lunar and Deep Space Exploration Scientific Data and Sample Release System[EB/OL].<http://202.106.152.98:8081/moondata/web/datainfo/main.action#>,2007-10-24/2023-01-02. (in Chinese))
- [23] YANG W, WANG Y, GAO L, et al. Sci-tech arts on Chang'e-5 lunar soil[J]. *Innovation (Camb)*, 2022, **3**(5): 100300.
- [24] RORATO R, ARROYO M, GENS A, et al. Particle shape distribution effects on the triaxial response of sands: a DEM study[C]// *Micro to MACRO Mathematical Modelling in Soil Mechanics*, Cham, 2018.
- [25] RORATO R, ARROYO M, ANDÒ E, et al. Sphericity measures of sand grains[J]. *Engineering Geology*, 2019, **254**: 43-53.
- [26] LI Q, ZHOU Q, LIU Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts[J]. *Nature*, 2021, **600**(7887): 54-58.
- [27] HE Q, LI Y, BAZIOTIS I, et al. Detailed petrogenesis of the unsampled Oceanus Procellarum: the case of the Chang'E-5 mare basalts[J]. *Icarus*, 2022, **383**: 115082.
- [28] YANG Y, JIANG T, LIU Y, et al. A micro mid-infrared spectroscopic study of Chang'E-5 sample[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(8): e2022J-e7453J.
- [29] LI J, LI Q, ZHAO L, et al. Rapid screening of Zr-containing particles from Chang'E-5 lunar soil samples for isotope geochronology: Technical roadmap for future study[J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, **13**(3): 101367.
- [30] JIA L, CHEN Y, MAO Q, et al. Simultaneous in-situ determination of major, trace elements and Fe 3+ / Σ Fe in spinel using EPMA[J]. *Atomic Spectroscopy*, 2022, **43**(1): 42-52.
- [31] ZHANG D, SU B, CHEN Y, et al. Titanium in olivine reveals low-Ti origin of the Chang'E-5 lunar basalts[J]. *Lithos*, 2022(414/415): 106639.
- [32] LI C, LI Y, WEI K X. Study on surface characteristics of Chang'E-5 fine grained lunar soil[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022: **50**: 1-10.
- [33] JI J, HE H, HU S, et al. Magmatic chlorine isotope fractionation recorded in apatite from Chang'e-5 basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022(591): 117636.
- [34] LI C, HU H, YANG M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. *Natl Sci Rev*, 2022, **9**(2): 1-13.
- [35] ZHANG H, ZHANG X, ZHANG G, et al. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission[J]. *Science China (Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2022, **65**(2): 106-113.
- [36] BARDET J P. Observations on the effects of particle rotations on the failure of idealized granular materials[J]. *Mechanics of materials*, 1994, **18**(2): 159-182.
- [37] 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))
- [38] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, **30**(7): 579-597.
- [39] HEYWOOD H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057, 72[C]// *Proceedings of the Lunar Science Conference*, Houston, 1971.
- [40] JIANG M J, YU H, HARRIS D. Kinematic variables bridging discrete and continuum granular mechanics[J]. *Mechanics Research Communications*, 2006, **33**(5): 651-666.
- [41] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(1): 43-53.