

DOI: 10.11779/CJGE201411019

大颗粒岩块对月壤钻取过程的影响分析

刘天喜, 魏承*, 马亮, 赵阳

(哈尔滨工业大学航天工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对月壤钻取采样过程中存在大颗粒岩块情况进行三维离散元动态仿真分析。建立考虑扭转、弯曲力矩及等效引力作用的新型三维离散元月壤模型, 通过三轴仿真试验进行细观参数标定, 得到黏聚力为 0.90 kPa, 内摩擦角为 42.25° 的满足真实月壤宏观力学指标的仿真模型。针对月壤内层存在大颗粒情况设计 4 种采样工况分别进行仿真分析, 监测大颗粒运动轨迹与采样效率, 发现了“旋入效应”、“纵向运移效应”与“阻塞效应”, 仿真结果表明岩块粒径大小直接影响采样结果: 当岩块粒径小于钻头“虚拟切削圆”时, 其无论存在于任何位置对采样效率与后续样品缠绕收集均无明显影响; 当岩块粒径大于“虚拟切削圆”时, 阻塞现象严重, 样品收集困难, 极易导致采样失败。研究结论对月壤钻取采样控制设计与钻具结构设计具有重要的工程参考价值。

关键词: 三维离散元模型; 月壤钻取采样; 参数标定; 大颗粒岩块; 动态仿真分析

中图分类号: TU450; V447.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2118-09

作者简介: 刘天喜(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事月壤采样动力学与控制研究。E-mail: jimtianxi@163.com。

Effect of large granular rocks on drilling process of lunar soils

LIU Tian-xi, WEI Cheng, MA Liang, ZHAO Yang

(Dept. of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The drilling process of lunar soils with a large granular rock under the surface is simulated dynamically by 3D discrete element method. A novel 3D discrete element model considering bending and twist moments and equivalent attractive force is established firstly, and then, a triaxial simulation test is conducted to calibrate the micro-parameters. The mechanical macro-parameters of the model are calculated as follows: the cohesion is 0.90 kPa and the internal friction angle is 42.25°, meeting with those of the real lunar soils. Four working conditions are designed and simulated respectively focusing on the case that a large granular rock exists in the lunar soils. By monitoring the sampling efficiency and the motion trajectory of the rock, the "screwing-in phenomenon", "vertical migration phenomenon" and "blocking phenomenon" are discovered. The results show that the diameter of the "large particle" influences the sampling results directly: when the particle size is smaller than the diameter of the "virtual cutting round" of the drill bit, there are no obvious effects either on the sampling efficiency or on the later winding collection; and the blocking phenomenon will appear, reducing the sampling efficiency badly and probably making the sampling task a failure. The achievements of this work have vital engineering reference value to the design of sampling controller and drill structure.

Key words: 3D discrete element model; drilling and sampling of lunar soil; calibration of parameters; large rock; dynamic simulation analysis

0 引言

随着嫦娥三号成功登月, 中国即将开启探月工程最后一步, 采样返回^[1]。依据美国与前苏联的工程经验, 利用空心钻具进行月壤钻取采样是较好的采样方式。目前国内外各研究机构对月壤钻取机理的研究多采用模拟月壤地面试验方式^[2-3], 但地面试验通常成本较高且无法观察月壤内部情况, 而对于工程人员重点关注的一些特殊工况, 如月壤内层存在大颗粒岩块等, 更是难以揭示真实的月壤-钻具作用机理, 因此数学仿

真越来越受到工程人员的重视, 离散元方法^[4]即是岩土介质数学仿真中常用的有效手段^[5]。

离散元方法的核心是模型精准度问题, 即通过建立合适的颗粒接触模型来描述土壤的本构关系, 能够

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105100); 教育部博士点基金项目(20112302120007); 中国博士后科学基金项目(20110491050); 国家重点实验室开放基金项目(HIT.KLOF.2011.075)

收稿日期: 2014-01-08

*通讯作者

真实反映目标土壤的宏观性质, 对此各国学者给出了多种颗粒接触模型^[6-7]。而月壤由于其特殊的空间环境与形成过程, 力学性质与地球土壤截然不同^[8], 其模型建立更加复杂。邹猛等^[9-10]利用 PFC^{2D} 软件建立了月壤模型并研究了月壤力学性质对月球车牵引性能的影响, Jiang 等提出了考虑颗粒间抗转动作用^[11]与范德华力^[12]的二维接触模型, 并通过双轴剪切试验分析了各参数对月壤破坏的影响, 使模型精度更加贴近真实月壤^[13]。但以上模型多为二维模型, 较适用于边坡稳定、抗压承载^[14]、剪切试验^[15]等宏观整体变形工况的仿真分析, 对于月壤钻取等涉及颗粒间大范围空间交错转移的情况, 难免受限^[16-17]。

因此, 建立准确的三维离散元模型用于月壤钻取仿真变得十分重要, 目前仅有少数学者在此方面进行探索。Takashi 等^[18]进行了月壤颗粒形态影响分析, 朱春明^[19]研究了压管过程月壤的土拱现象, 侯绪研等^[20]研究了月壤钻取过程的层理保持特性。以上学者虽进行的是三维分析, 但均采用现有商业软件, 离散元模型较为简单, 在描述具有特殊性质的月球土壤时精度不高。

基于以上问题, 本文针对月壤中存在大颗粒岩块的钻取过程展开仿真分析。首先基于开源离散元程序 Yade 建立了一种考虑颗粒间扭转、弯曲、等效引力作用的新型三维离散元月壤模型^[21], 通过三轴仿真试验对模型细观参数进行标定。然后设计 3 种存在大颗粒岩块的工况进行月壤钻取动态仿真, 与无岩块工况进行对比, 通过监测大颗粒运动轨迹与采样效率分析大颗粒岩块对钻取过程的影响。

1 月壤三维离散元模型

1.1 颗粒组自由度分析

首先建立颗粒接触碰撞坐标系: 定义“接触点”为两颗粒重叠区(或分离区)中点, 定义“法向”为两颗粒质心连线方向并作为 y 轴, 定义“接触面”为垂直于法向且过接触点的平面, 在接触面内取两正交方向分别作为 x 轴与 z 轴。

设两颗粒在空间中运动的线速度矢量为 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$, 角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2$ 。如图 1 所示, 颗粒组在接触点处存在 6 自由度: 法向应变由 $\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2$ 沿 y 轴方向分量引起, 切向应变由 $\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2$ 在接触面内的投影分量及 $\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2$ 在接触面内的投影分量共同引起, 扭转应变由 $\boldsymbol{\omega}_1 - \boldsymbol{\omega}_2$ 沿 y 轴方向分量引起, 弯曲应变由 $\boldsymbol{\omega}_1 - \boldsymbol{\omega}_2$ 在接触面内的投影分量引起。切向与弯曲应变为接触面内的平面向量, 因此具有 2 个自由度。法向与扭转应变仅沿 y 轴方向, 因此只具有 1 个自由度。

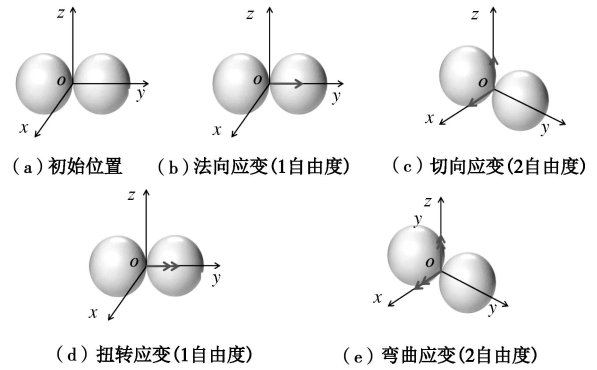


图 1 颗粒接触碰撞自由度

Fig. 1 Degree of freedom of collision of particles

1.2 颗粒接触碰撞模型

通过对颗粒接触碰撞的自由度分析可知: 颗粒间的相互作用不仅包括传统的法向、切向力作用, 还包括扭转与弯曲的力矩作用。本文基于以上分析, 建立带扭转、弯曲力矩的颗粒接触碰撞三维离散元模型, 如图 2 所示。

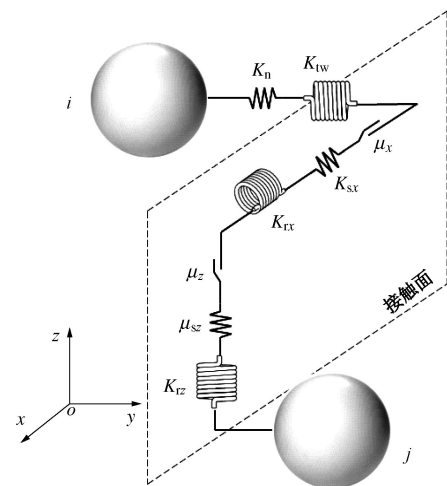


图 2 颗粒接触碰撞三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model for collision of particles

图 2 中, i, j 代表发生接触碰撞的两颗粒, K_n 为法向接触刚度, K_{tw} 为抗扭转刚度。由于接触平面内的切向、弯曲应变均为平面向量, 可将其沿 x 轴与 z 轴方向分解, 并定义相应的接触刚度。其中, K_{sx}, K_{sz} 为切向接触刚度, K_{tx}, K_{tz} 为抗弯曲刚度, μ_x, μ_z 为摩擦系数, ϕ 为颗粒摩擦角, 并且有

$$\begin{cases} K_{sx} = K_{sz} = K_s, \\ K_{tx} = K_{tz} = K_t, \\ \mu_x = \mu_z = \tan \phi. \end{cases} \quad (1)$$

1.3 颗粒法向、切向接触力计算

传统颗粒接触力学模型在法向、切向接触力的计算中大多仅考虑两颗粒相互嵌入时的情况, 而对于已分离的两颗粒, 通过添加非张力连接或分离器, 忽略颗粒间的相互引力。然而真实月壤颗粒间存在较强的

静电引力、范德华力等复杂作用力, 因而已分离的月壤颗粒间仍存在一定的相互作用。从静电引力与范德华力的常见公式中可知这两个力均与颗粒间距离的若干次方成反比, 且作用范围很小。但在离散元仿真中, 考虑到计算效率, 粒径通常选取真实月壤的十倍左右, 此时如果再用真实的静电引力与范德华力计算公式, 则得到的结果将严重失真。因此, 为了体现出颗粒间的引力作用, 本文采用等效的思想来计算引力。本模型将以上复杂作用力综合考虑为抵抗弹簧拉伸的等效引力作用, 并设定最大边界值作为引力失效区。此时法向接触力表示为

$$\begin{cases} F'_n = n \min(K_n \varepsilon_n, C_n), \\ C_n = \alpha_n \pi [\min(r_i, r_j)]^2, \\ F_n = [1 - \lambda_d \operatorname{sgn}(\mathbf{F}'_n \cdot \mathbf{v}_i)] F'_n. \end{cases} \quad (2)$$

式中, ε_n 为法向应变, n 为法向单位向量, λ_d 为数值阻尼系数, 用来表示模型的全局阻尼效应 (通过增加反力 $\Delta F_d = -\lambda_d \cdot \operatorname{sgn}(\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{F}$ 实现)。定义 C_n 为颗粒间临界法向黏聚力, 代表等效引力法向分量的最大值, α_n 为临界法向黏聚系数, r_i 与 r_j 为相互作用的两颗粒半径。

切向接触力则表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}'_s = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_s}{|\boldsymbol{\varepsilon}_s|} \min(|K_s \boldsymbol{\varepsilon}_s|, |\mathbf{F}_n| \tan \phi + C_s), \\ C_s = \alpha_s \pi [\min(r_i, r_j)]^2, \\ \mathbf{F}_s = (1 - \lambda_d \operatorname{sgn}(\mathbf{F}'_s \cdot \mathbf{v}_i)) \mathbf{F}'_s. \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_s 为切向接触刚度, $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ 为切向应变。定义 C_s 为颗粒间临界切向黏聚力, 代表等效引力切向分量的最大值, α_s 为临界切向黏聚系数。

当法向或切向接触力达到最大值, 即临界法向或切向黏聚力时, 根据颗粒间不同的相对位置以及达到最大值的先后顺序可分为 3 种情况, 如图 3 所示。

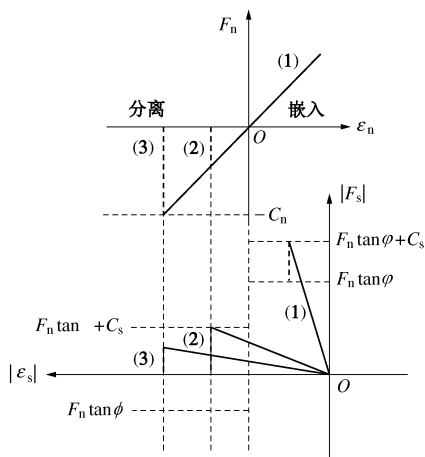


图 3 法向、切向接触力

Fig. 3 Normal and shear contact forces

(1) 切向接触力先达到最大值且两颗粒仍处于嵌入状态: 切向接触力由 $F_n \tan \phi + C_s$ 变为 $F_n \tan \phi$, 作为切向接触力的增长限制, 法向接触力仍按弹簧变形量计算。

(2) 切向接触力先达到最大值且两颗粒已处于分离状态: 切向接触力由 $F_n \tan \phi + C_s$ 变为 0, 法向接触力同样变为 0, 进入等效引力失效区。

(3) 法向接触力先达到最大值: 此时两颗粒必处于分离状态 (因为嵌入状态法向接触力无最大限制), 切向、法向接触力同时变为 0, 进入等效引力失效区。

法向接触力方向沿两颗粒质心连线方向, 不会产生附加力矩。而切向接触力作用于接触点且垂直于质心连线方向, 对两颗粒质心均会产生附加力矩作用, 表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{A1} = d_1 (-\mathbf{n}) \times \mathbf{F}_s, \\ \mathbf{M}_{A2} = d_2 \mathbf{n} \times \mathbf{F}_s, \end{cases} \quad (4)$$

式中, d_1 为接触点到颗粒 i 质心的距离, d_2 为接触点到颗粒 j 质心的距离。

1.4 颗粒扭转、弯曲力矩计算

扭转与弯曲作为颗粒间的主要力矩作用形式, 对月壤宏观抗剪强度存在巨大影响。首先根据迭代时步建立相对转角与颗粒角速度差的对应关系:

$$\begin{bmatrix} \Theta_{tw} \\ \Theta_{rx} \\ \Theta_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{Pr} j_y \\ \operatorname{Pr} j_x \\ \operatorname{Pr} j_z \end{bmatrix} (\omega_1 - \omega_2) dt, \quad (5)$$

式中 Θ_{tw} 为颗粒相对扭转角, Θ_{rx} , Θ_{rz} 为颗粒相对弯曲角, $\operatorname{Pr} j_i$ 指在某方向上的分量。

然后根据所定义的接触刚度计算出扭转、弯曲力矩:

$$\begin{bmatrix} M_{tw} \\ M_{rx} \\ M_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tw} & & \\ & K_r & \\ & & K_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_{tw} \\ \Theta_{rx} \\ \Theta_{rz} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, K_{tw} 为抗扭转刚度, K_r 为抗弯曲刚度。

2 月壤模型细观参数标定

采用离散元法建立月壤模型, 期望其在力学性能上与真实月壤接近, 因而需要利用离散元三轴仿真试验对模型各细观参数进行标定。

2.1 宏观、细观参数

月壤的宏观参数能够体现月壤的力学性能, 尤其是用以表征抗剪强度的月壤黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ , 真实月壤的抗剪强度指标最佳估计值如表 1 所示。

月壤离散元模型的细观参数主要分为 3 类: 先验参数、固定参数和可变参数。先验参数为: 三轴仿真

试验围压 σ_3 。固定参数为颗粒粒径 d 。可变参数包括: 颗粒摩擦角 φ , 颗粒弹性模量 E , 切向法向刚度比 ν , 数值阻尼系数 λ_d , 颗粒密度 ρ , 临界法向黏聚系数 α_n , 临界切向黏聚系数 α_s , 抗弯曲系数 K_r , 抗扭转系数 K_{tw} 。

表 1 月壤内聚力、内摩擦角最佳估计值^[22]

Table 1 Best estimates of cohesion and internal friction angle of lunar soils

位置 /cm	内聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
0~15	0.44~0.62	0.52	41~43	42
0~30	0.74~1.10	0.90	44~47	46
30~60	2.40~3.80	3.00	52~55	54
0~60	1.30~1.90	—	48~51	—

考虑到计算机的计算能力和效率, 颗粒粒径 d 不能完全按照真实月壤的实际粒径范围进行取值, 本实验取平均粒径为 1 mm , 分布范围为 $0.5\sim1.5\text{ mm}$, 分布方式为线性分布, 通过调整可变参数得到宏观力学性质等效的月壤模型。

2.2 细观参数标定

细观参数标定思路如下: 首先根据真实月壤样品三轴试验应力应变曲线进行对比调整, 然后通过不同围压下三轴仿真试验计算抗剪强度, 与最佳估计值比对进行验证。

Scott^[23]在地面环境, 围压 53 kPa 左右条件下以孔隙比 0.87 的真实月壤样品与孔隙比 0.63 的地球土壤做了迷你三轴压缩试验进行对比, 应力应变曲线如图 4 所示, 地球土壤只有通过增加密实度才能达到与月壤相同的抗剪强度, 说明了月壤的高抗剪性。月壤样品的应力应变曲线表明当轴向应变达到 7% 左右时样品发生屈服, 应力差达到峰值 200 kPa , 以其为参考曲线进行离散元模型的参数标定。

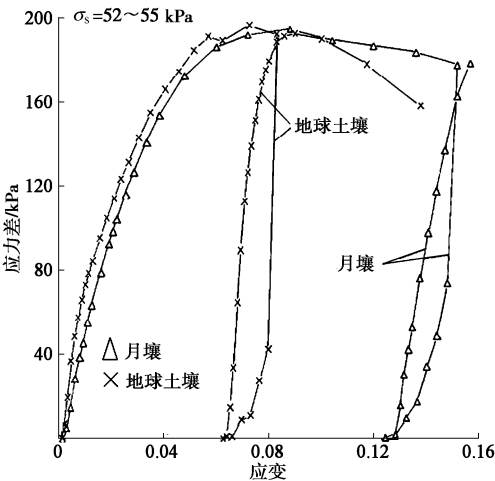


图 4 真实月壤三轴试验应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of real lunar soils in triaxial tests

首先选择一组细观参数, 使颗粒密度、颗粒摩擦角和弹性模量等尽量接近真实月壤颗粒, 在月球重力下沉积至自然堆积密度(保证与后续在月球重力下钻取仿真相一致), 用此时的样品进行三轴仿真试验。将输出的应力应变曲线与参考曲线进行对比, 根据屈服点处轴向应变值及应力差峰值的差异, 通过对每个参数分别取多组数值进行调整, 明确各参数的影响方向, 最终标定出一组最佳的细观参数: 颗粒摩擦角为 60° , 颗粒弹性模量为 45 MPa , 切向法向刚度比为 0.5 , 数值阻尼系数为 0.3 , 颗粒密度为 2900 kg/m^3 , 临界法向黏聚系数为 10^9 Pa , 临界切向黏聚系数为 10^9 Pa , 抗弯曲系数为 10 , 抗扭转系数为 3 。其对应的应力应变曲线如图 5 中 53 kPa 工况所示。当轴向应变为 7% 左右时发生屈服, 应力差达到峰值 222.3 kPa , 已超过参考曲线, 说明该组参数下的离散元模型完全有能力实现月壤的宏观抗剪性质。

为保证该组细观参数在不同围压情况下依然可以反映月壤的真实宏观性质, 需在不同围压下分别做三轴仿真试验, 计算得出模型的抗剪强度指标, 与最佳估计值对比, 最终确认模型的正确性。利用上述标定的细观参数, 在 $53, 78, 103\text{ kPa}$ 围压下进行 3 组离散元三轴仿真试验, 得到 3 条应力应变曲线, 如图 5 所示。

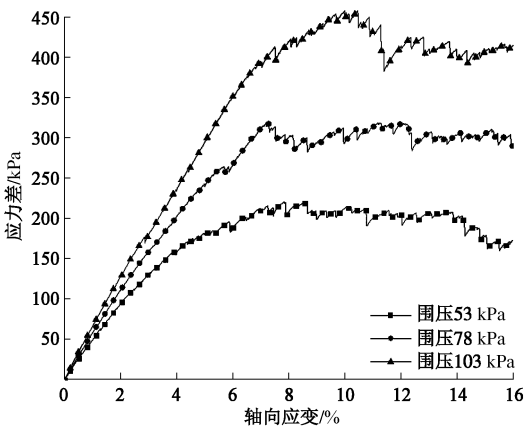


图 5 不同围压下离散元三轴仿真试验结果

Fig. 5 Results of triaxial simulation tests under different confining pressures

根据每条应力应变曲线屈服点处的应力差与相应围压计算得大主应力分别为 $\sigma_1=275.3, 400.5, 530.5\text{ kPa}$, 并以此 3 组数值绘制 3 组莫尔应力圆。抗剪强度包线虽在理论上与 3 组莫尔应力圆均相切, 但由于试验数据存在误差, 包络线无法保证与 3 个圆均相切。在此采用最小二乘法^[24]对抗剪强度包线进行拟合, 结果如图 6 所示。

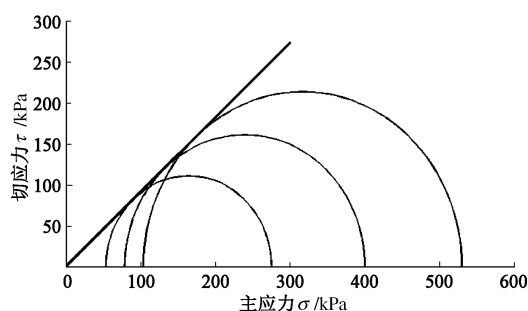


图6 莫尔应力圆及抗剪强度包线

Fig. 6 Mohr's circle and shear strength envelope

经测算,月壤离散元模型内聚力 c 为 0.90 kPa, 内摩擦角 φ 为 42.25° , 满足表 1 所示真实月壤宏观力学性能指标, 表明所建立的月壤离散元模型可以代替真实月壤完成月壤钻取过程的仿真任务。

3 大颗粒岩块影响分析

3.1 仿真条件

对月壤钻取过程进行动态仿真, 首先建立此过程下的月壤仿真模型, 模型细观参数取表 2 中经三轴试验标定后的数值, 重力环境设为月球重力 $G=1.67 \text{ m/s}^2$, 模型尺寸与颗粒特性参数为: 模型形状为正方体, X 向边长为 40 mm, Y 向边长为 40 mm, Z 向边长为 40 mm, 平均粒径为 1, 粒径范围为 0.5~1.5, 颗粒数量为 39650, 粒径分布方式为线性。

钻头与钻杆采用地质勘探常见结构, 钻头形状为旋转锥面加 8 凸台结构, 并在每个凸台上均设有立齿 (斜圆柱体) 作为主切削面 (凸台与立齿的位置分布如图 7 所示)。在旋转过程中, 立齿切削面形成一个“虚拟切削圆”, 由钻头各结构尺寸参数可算得“虚拟切削圆”直径 d_0 。钻杆为双螺纹结构, 螺纹形状为矩形。

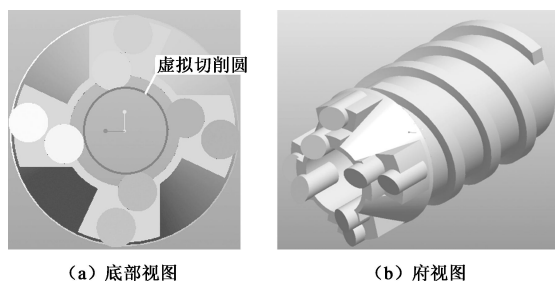


图7 钻头、钻杆模型

Fig. 7 Model for bit and drill stem

钻头与钻杆的结构参数设计参数为: 内径为 14 mm, 外径为 28.7 mm, 高为 16 mm, 大凸台外径为 28 mm, 小凸台外径为 19 mm, 立齿高为 10 mm, 立齿直径为 5 mm, 钻头锥角为 26° , 虚拟切削圆直径为 9.5 mm; 内径为 22 mm, 外径为 25 mm, 高为 40 mm,

螺距为 11 mm, 导程为 22 mm, 牙高为 2 mm, 牙宽为 3 mm, 螺纹升角为 14.5° 。

材料方面, 考虑到月壤钻取机构“轻质、高强度”的技术要求, 选用铝合金材料, 具体参数为杨氏模量为 70 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 2900 kg/m^3 , 摩擦系数为 0.36。

基于以上仿真条件, 月壤钻取过程离散元动态仿真初始化情况如图 8 所示。

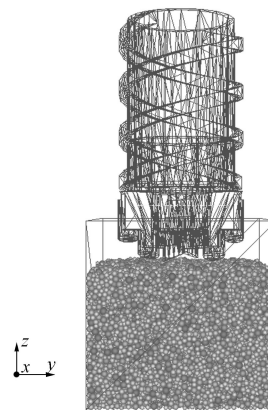


图8 仿真初始化

Fig. 8 Initialization of simulation

3.2 仿真工况设计

对于月壤钻取仿真各工况, 设计钻进量为 30 mm, 进给速度为 0.01 m/s, 钻具转速为 $8\pi \text{ rad/s}$ 。共设计 4 种试验工况, 分别为: 无大颗粒情况、中心位置处 5 mm 大颗粒情况、中心位置处 10 mm 大颗粒情况、中心偏右位置处 5 mm 大颗粒情况, 详细设计方案如下: ①无大颗粒情况: 颗粒形状为圆球状, 所有属性按仿真条件设定, 如图 9 (a) 所示。②中心位置处 5 mm 大颗粒情况: 在月壤模型几何中心位置生成颗粒直径为 5 mm (小于虚拟切削圆) 的大颗粒, 其他同工况 1, 如图 9 (b) 所示。③中心位置处 10 mm 大颗粒情况: 在月壤模型几何中心位置生成颗粒直径为 10 mm (大于虚拟切削圆) 的大颗粒, 其他同工况 1, 如图 9 (c) 所示。④中心偏右位置处 5 mm 大颗粒情况: 在 $x=20 \text{ mm}$, $y=27 \text{ mm}$, $z=20 \text{ mm}$ 位置处 (钻头切削齿正下方) 生成颗粒直径为 5 mm 的大颗粒, 其他同工况 1, 如图 9 (d) 所示。

3.3 “大颗粒”运动轨迹分析

由于钻取采样后的月壤需装入取芯软管, 并经缠绕存放于收容器中, 若月壤样品中含有大块岩石或土块, 则易使取芯软管破裂或无法缠绕。因此, 需明确存在“大颗粒”情况下“大颗粒”的运动轨迹, 以避免无法完成样品收集的任务。

针对 3 种存在“大颗粒”的工况, 记录了各工况下“大颗粒”的运动轨迹, 并针对“大颗粒”粒径与位置的不同, 分析各自轨迹特点。

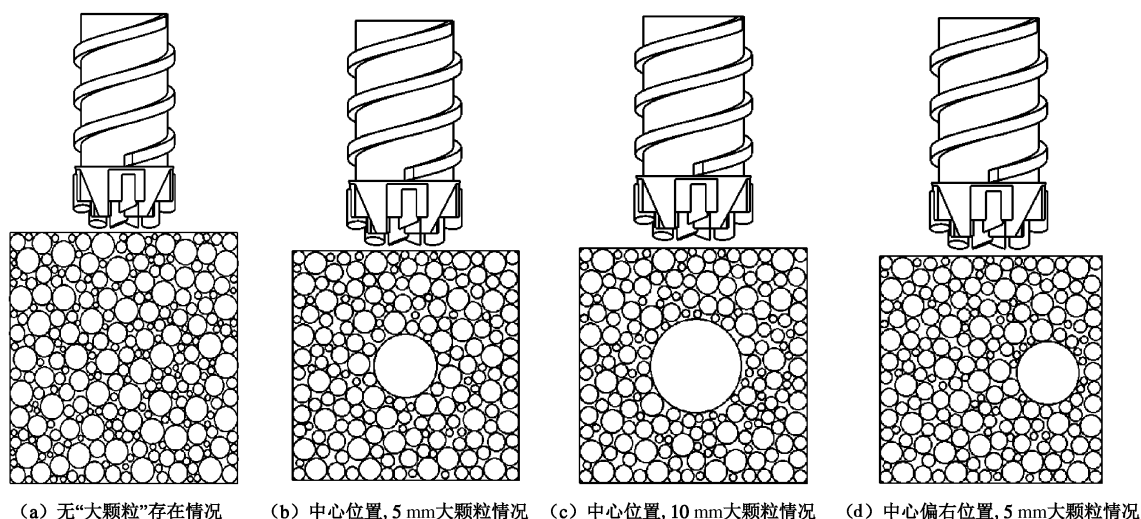


图 9 仿真工况设计

Fig. 9 Design of simulation conditions

(1) 中心位置处 5 mm 大颗粒情况

大颗粒运动形式表现为螺旋上升, 最终运动到取芯管内月壤样品顶端, 如图 10 所示。

(2) 中心位置处 10 mm 大颗粒情况

大颗粒运动形式表现为螺旋下降, 且运动范围逐渐收敛, 始终堵在钻头底端, 如图 11 所示。

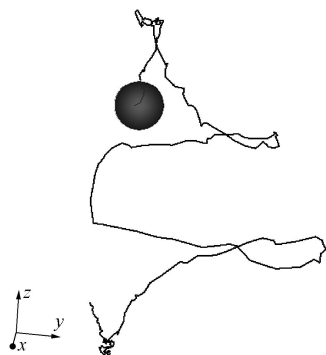


图 10 工况 2 下颗粒运动轨迹

Fig. 10 Particle trajectories under condition 2

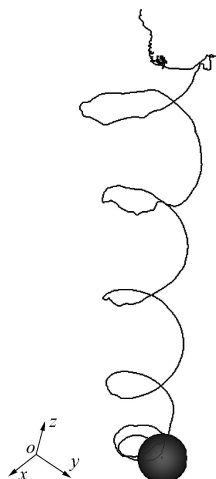


图 11 工况 3 下颗粒运动轨迹

Fig. 11 Particle trajectories under condition 3

(3) 中心偏右位置处 5 mm 大颗粒情况

初始阶段运动形式表现为螺旋下降, 当进入取芯管内后运动形式变为螺旋上升, 并最终运动到取芯管内月壤样品顶端, 如图 12 所示。

综合分析上述 3 种工况下大颗粒的运动情况: 当初始位置不在中心时, “大颗粒”在与钻头接触后发生螺旋下降的随动行为, 同时具有向取芯管内部运动的趋势, 即发生“旋入效应”; 当初始位置在中心或已“旋入”取芯管内时, “大颗粒”的运动形式会统一转为螺旋上升, 在周围小颗粒推动下向顶端运动, 发生“纵向运移”; 当粒径大于虚拟切削圆时, “大颗粒”会在钻头作用下螺旋下降, 并稳定在钻头底端, 难以向其他方向运动, 发生“阻塞效应”。

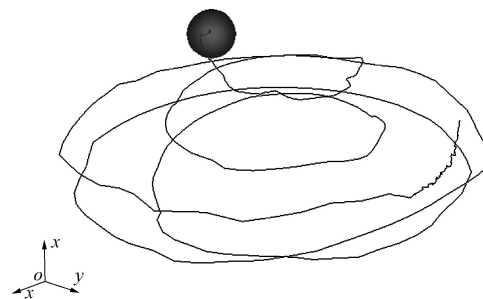


图 12 工况 4 下颗粒运动轨迹

Fig. 12 Particle trajectories under condition 4

3.4 月壤采样效率分析

采样效率是月壤钻取的核心问题, 也是衡量采样操作优劣的重要指标。在此, 定义取芯管内月壤样品的最终高度与初始高度比为“月壤采样比”, 记为 δ_d , 以此参数为衡量月壤采样效率的指标, 同时观察取芯管内月壤样品的形状与颗粒充实度。

对于全部 4 种工况, 分别截取初始时刻与最终时刻的月壤剖面图, 观察大颗粒的初始与最终位置, 记录内部月壤样品的初始与最终高度, 对比分析采样效

率的高低。

(1) 无大颗粒情况

初始时刻, 月壤模型高度为 30.6 mm, 最终时刻取芯管内月壤样品高度为 22.2 mm, $\delta_d=0.725$, 取芯管内月壤样品呈圆柱状且颗粒充实, 如图 13 所示。

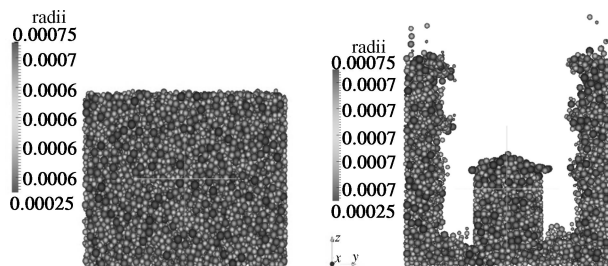


图 13 工况 1 下月壤采样效率

Fig. 13 Soil sampling efficiency under condition 1

(2) 中心位置处 5 mm 大颗粒情况

初始时刻, 月壤模型高度为 31.1 mm, 最终时刻取芯管内月壤样品高度为 21.9 mm, $\delta_d=0.704$, 取芯管内月壤样品呈圆柱状且颗粒充实, “大颗粒”最终位于取芯管内月壤样品的顶端, 如图 14 所示。

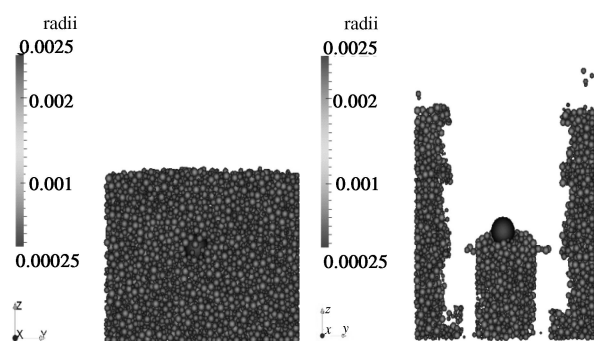


图 14 工况 2 下月壤采样效率

Fig. 14 Soil sampling efficiency under condition 2

(3) 中心位置处 10 mm 大颗粒情况

初始时刻, 月壤模型高度为 31.6 mm, 最终时刻取芯管内月壤样品高度为 17.1 mm, $\delta_d=0.541$, 取芯管内出现“中空”现象, “大颗粒”始终堵在钻头底端, 如图 15 所示。

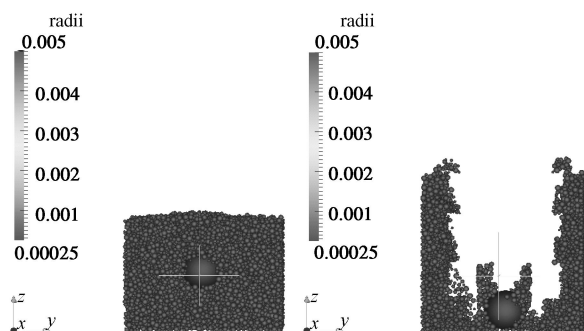


图 15 工况 3 下月壤采样效率

Fig. 15 Soil sampling efficiency under condition 3

(4) 中心偏右位置处 5 mm 大颗粒情况

初始时刻, 月壤模型高度为 31.5 mm, 最终时刻取芯管内月壤样品高度为 22.1 mm, $\delta_d=0.702$, 取芯管内月壤样品呈圆柱状且颗粒充实, “大颗粒”最终也位于取芯管内月壤样品的顶端, 如图 16 所示。

综合分析上述 4 种工况下的月壤采样效率: 当“大颗粒”粒径小于虚拟切削圆时, 不论初始位置在何处, 最终均运动到取芯管内月壤样品的顶端, 不影响后续样品袋的缠绕收集。并且, 此 2 种工况下的月壤采样效率也与工况 1 下的采样效率接近; 当粒径大于虚拟切削圆时, “大颗粒”的存在“阻塞”了外部颗粒的进入, 同时使已进入取芯管内的月壤样品发生流失, 形成中空样品, 严重影响了月壤采样效率, 使得采样任务无法正常完成。

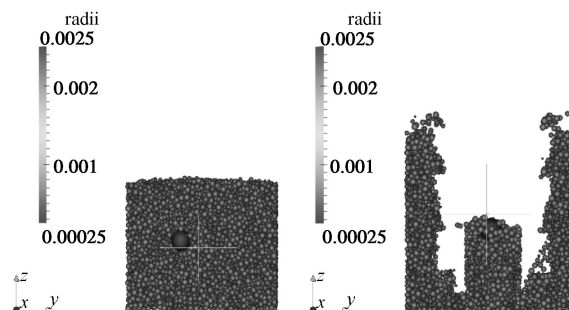


图 16 工况 4 下月壤采样效率

Fig. 16 Soil sampling efficiency under condition 4

文献[25]中引述了美国阿波罗-16 号进行月壤采样时 72~80 cm 深度段无样品, 80~120 cm 段样品断断续续, 阿波罗-17 号在 38~40 cm 段和 71~80 cm 段无样品, 前苏联 Luna-24 号月表下约 60 mm 未取上岩心。以上美苏月壤钻取采样失败情况与“阻塞效应”的表现形式极为相似, 说明月壤表层存在大颗粒岩块很可能是采样失败的重要原因之一, 具有重要的工程研究意义。

4 结 论

本文首先建立了考虑颗粒间扭转、弯曲、等效引力作用的新型三维离散元月壤模型, 利用三轴仿真试验, 对模型细观参数进行标定, 最终完成 4 种工况下月壤钻取过程的动态仿真, 通过对颗粒运动轨迹与采样效率的监测, 分析了月壤内层中存在大颗粒岩块时对采样过程的影响, 并得到以下 3 点结论。

(1) 发现“旋入效应”, 即当钻头立齿下方存在岩块时, 岩块会在与钻头随动的同时, 受到内外侧月壤不均等的压力作用, 有向内侧旋入的趋势, 从而成为月壤样品。该效应说明钻头旋转过程中容易带动周边月壤进入取芯管, 有利于更多样品的采集, 同时更

容易收集到大颗粒岩块, 丰富样品种类。

(2) 发现“纵向运移效应”, 即当岩块进入取芯管内后, 会在周围小颗粒的推动下螺旋上升, 向样品顶端运动。该效应可避免样品中间存在大颗粒岩块, 影响后续样品袋的缠绕收集。

(3) 发现“阻塞效应”, 即当存在粒径小于虚拟切削圆直径的岩块存在时, 对月壤采样效率无明显影响。而存在粒径大于虚拟切削圆直径的大岩块时, 岩块将在钻头的推动作用下螺旋下降, 并始终堵在钻头入口处, 难以逃逸, 严重影响月壤采样效率, 该效应对美苏月壤钻取采样失败段的原因分析提供了重要思路, 对我国月壤钻取机构设计具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(3): 351 - 358. (OUYANG Zi-yuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advances in Earth Science, 2004, **19**(3): 351 - 358. (in Chinese)).
- [2] WATANABE K, SHIMODA S, KUBOTA T, et al. A mole-type drilling robot for lunar subsurface exploration[C]// Proceeding of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: iSAIRAS 2003, NARA, Japan, 2003.
- [3] 赵 曾, 孟炜杰, 王国欣, 等. 钻取式月壤采样器力载试验研究[C]// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会. 杭州, 2012: 896 - 902. (ZHAO Zheng, MENG Wei-jie, WANG Guo-xin, et al. Load test research on drilling type lunar soil sampler[C]// Chinese Society of Astronautics Deep Space Exploration Technology Professional Committee the Ninth Academic Annual Conference. Hangzhou, 2012: 896 - 902. (in Chinese))
- [4] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, **29**(1): 47 - 65.
- [5] DONZÉ F V, RICHEFEU V, MAGNIER S A. Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics[J]. State of the art of geotechnical engineering. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **8**: 1 - 44.
- [6] OIDA A, MOMOZU M. Simulation of soil behavior and reaction by machine part by means of DEM[J]. International Commission of Agricultural Engineering (CIGR, Commission Internationale du Genie Rural) E-Journal. Manuscript PM 01 004. 2002, **4**: 1 - 7.
- [7] OBERMAYR M, DRESSLER K, VRETTOS C, et al. A bonded-particle model for cemented sand[J]. Computers and Geotechnics, 2012, **49**: 299 - 313.
- [8] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B. M. Lunar Sourcebook[M]. London: Cambridge University Press, 1991.
- [9] 邹 猛. 月面探测车辆驱动轮牵引性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008. (ZOU Meng. Study on traction ability for driving wheel of the lunar rover[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese))
- [10] 李因武, 李建桥, 邹 猛, 等. 月壤力学性质对月球车牵引性能影响的模拟[J]. 农业机械学报, 2009, **40**(1): 1 - 4. (LI Yin-wu, LI Jian-qiao, ZOU Meng, et al. Simulation of traction ability of lunar rover with different mechanics of lunar soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, **40**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [11] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(5): 340 - 357.
- [12] 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.
- [13] 蒋明镜, 郑 敏, 王 闯. 月壤双轴试验的剪切带离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3801 - 3809. (JIANG Ming-jing, ZHENG Min, WANG Chuang. Distinct element analysis of shear band of lunar soil in biaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3801 - 3809. (in Chinese))
- [14] 蒋明镜, 贺 洁, 刘 芳. 基于离散元颗粒抗转模型的平移刚性挡墙被动土压力分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2788 - 2795. (JIANG Ming-jing, HE Jie, LIU Fang. Distinct element simulation of passive earth pressure against a translating rigid wall using a rolling resistance contact model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2788 - 2795. (in Chinese))
- [15] 蒋明镜, 张伏光, 孙渝刚, 等. 不同胶结砂土力学特性及胶结破坏的离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 1969 - 1976. (JIANG Ming-jing, ZHAGN Fu-guang, SUN Yu-gang, et al. DEM simulation of mechanical behaviour and bond breakage of different cemented sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 1969 - 1976. (in Chinese))
- [16] ZHAO C. Computational simulation of frictional drill-bit

- movement in cemented granular materials[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, **47**(8): 877 – 885.
- [17] STAVROPOULOU M. Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, **43**(7): 1034 – 1051.
- [18] TAKASHI M, JUN K, KENTARO U, et al. 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, **22**(1): 15 – 23.
- [19] 朱春明. 模拟月壤土拱效应试验研究与三维离散元模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. (ZHU Chun-ming. Study on simulating lunar soil arching test and three-dimensional discrete element simulation[D]. Wuhan: University of Geosciences, 2010. (in Chinese))
- [20] 侯绪研, 崔金生, 赵德明等. 基于离散元法的月面取样技术对月壤样品层理信息影响的分析[C]// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第八届学术年会. 上海, 2011: 568 – 577. (HOU Xu-yan, CUI Jin-sheng, ZHAO De-ming, et al. Influence analysis of lunar sampling technique on bedding information of lunar soil sample based on DEM[C]// Chinese Society of Astronautics Deep Space Exploration Technology Professional Committee the Eighth Academic Annual Conference. Shanghai, 2011: 568 – 577. (in Chinese))
- [21] ŠMILAUER V. Cohesive particle model using the discrete element method on the yade platform[D]. Grenoble: Université de Grenoble, 2010.
- [22] GROMOV V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils[J]. *Earth Moon and Planets*, 1998, **80**(1): 51 – 72.
- [23] SCOTT R F. 27th Rankine Lecture-Failure[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**(4): 423 – 466.
- [24] 余东明, 姚海林, 吴少锋. 三轴试验抗剪强度参数值回归分析法的区别与修正[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(10): 3037 – 3042. (YU Dong-ming, YAO Hai-lin, WU Shao-feng. Difference and modification of regression analysis methods to estimate shear strength parameters obtained by triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(10): 3037 – 3042. (in Chinese))
- [25] 鄢泰宁, 冉恒谦, 段新胜. 宇宙探索与钻探技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, **37**(1): 3 – 7. (YAN Tai-ning, RAN Hen-qian, DUAN Xin-sheng. Universe exploration and drilling technology[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, **37**(1): 3 – 7. (in Chinese))

《中国公路学报》2015 年征订通知

《中国公路学报》(Ei Compendex 收录, 月刊, ISSN 1001-7372, CN 61-1313/U) 是由中国公路学会主办, 长安大学承办的公路交通行业权威的学术刊物, 自 2007 年起一直被 Ei 数据库收录; 主要刊载道路工程、桥梁与隧道工程、交通工程、汽车与汽车运用工程、工程机械、物流、经济与管理等领域的学术论文及应用技术论文, 并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。

《中国公路学报》现为月刊, 大 16 开本, 页码每期 128

页, 主要读者对象为公路交通领域的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。编辑部于 2014 年初开通了网络在线投稿系统, 欢迎广大读者踊跃投稿!

2015 年, 《中国公路学报》每期定价仍为 30.00 元, 全年共 360.00 元, 国内邮发代号: 52-194, 国外发行代号: M7917。欢迎订阅!

地址: 西安市南二环路中段长安大学杂志社, 邮编: 710064, 联系人: 马 勇, 电话: (029)82334387, 网址: <http://zgglxb.chd.edu.cn/>, 邮箱: zgglxb@163.com。

(《中国公路学报》编辑部 供稿)