

DOI: 10.11779/CJGE202109017

月壤临界尺度颗粒运移特性对钻采阻力影响研究

崔建国¹, 田野^{*1}, 刘君巍², 侯绪研², 崔江磊², 杨飞², 王晶¹, 关祥毅¹

(1. 哈尔滨商业大学轻工学院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 临界尺度颗粒是指平均直径大于或等于钻头取芯孔直径的月球土壤颗粒, 其广泛分布于月球次表层土壤中。在钻进过程中受到钻削作用, 一部分临界尺度颗粒被从孔底置出, 并被嵌入钻孔壁产生孔壁置入现象, 从而增大了切削负载功耗; 另一部分跟随钻具回转无法被取芯孔采集, 从而增加了钻进失败的风险。通过建立月壤临界尺度颗粒切削模型, 考虑临界尺度颗粒粒径及其与切削刃相互作用位置, 对切削阻力的影响进行敏感度分析, 得到位置的变化对切削阻力影响最明显。提出法向重叠率的概念, 用以研究位置变化对临界尺度颗粒运移特性及切削阻力的影响关系。将切削刃的回转运动等效为直线运动, 采用离散元方法验证法向重叠率对切削阻力的影响, 得到法向重叠率与临界尺度颗粒孔底置出和孔壁置入现象之间的关系, 以及对应的切削阻力时域变化曲线的特征。通过临界尺度颗粒运移特性模拟试验, 得到法向重叠率与切削阻力呈同方向的线性关系, 当临界尺度颗粒分别产生孔底置出和孔壁置入现象时, 对应的切削阻力时域曲线特征分别为连续峰值和仅有一个峰值点。研究可为月球采样任务中的钻进工况参数识别提供理论依据。

关键词: 月壤钻采; 临界尺度颗粒; 切削阻力; 运移特性

中图分类号: TU192; TU193 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)09-1715-09

作者简介: 崔建国(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事深空探测地面模拟技术及取芯钻具钻进机理的研究。E-mail: cuijiaoguo_huc@163.com。

Influences of critical fragment migration characteristics of lunar soil on drilling resistance

CUI Jian-guo¹, TIAN Ye¹, LIU Jun-wei², HOU Xu-yan², CUI Jiang-lei², YANG Fei², WANG Jing¹, GUAN Xiang-yi¹

(1. Department of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin

Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: The critical fragment refers to the lunar soil particles with average diameter greater than or equal to the diameter of coring bit hole, which is widely distributed in lunar subsurface soil. On one hand, due to the drilling effect in the drilling process, some of the critical fragments are placed from the bottom of the hole and embedded into the borehole wall to produce the hole wall insertion phenomenon, thus increasing consumption of the cutting load power. On the other hand, the others cannot be collected by the coring hole following the rotation of the drilling tool, thus increasing the risk of drilling failure. Firstly, the critical fragment cutting model for lunar soil is established, the particle size of the critical fragment and its interaction position with cutting edge are considered, the sensitivity of cutting resistance is analyzed, and it is obtained that the change of position has the most obvious influences on cutting resistance. Then, the concept of normal overlap ratio is put forward to study the influences of position change on the migration characteristics and cutting resistance of the critical fragment. The rotary motion of cutting edge is equivalent to the linear one, and the influences of normal overlap ratio on the cutting resistance are verified by the discrete element method, so as to obtain the relationship between the normal overlap ratio and the phenomenon of being placed from the bottom of the hole and embedded into the borehole wall to produce the hole wall insertion, as well as the characteristics of the corresponding time-domain change curve of cutting resistance. Finally, through the simulation tests on the migration characteristics of the critical fragment, it is found that the normal overlap ratio and cutting resistance have a linear relationship in the same direction. When the critical fragment produces the process of being placed from the bottom of the hole and embedded into the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772387); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020E027); 哈尔滨商业大学青年创新人才支持项目(2019CX04); 哈尔滨商业大学校级科研项目(18XN070)

收稿日期: 2020-10-12

*通信作者(E-mail: tian8154@126.com)

wall, the time-domain curve features of the corresponding cutting resistances are continuous peak points and only one peak point respectively. The above results may provide the theoretical basis for the parameter identification of drilling conditions in lunar sampling mission.

Key words: lunar soil drilling; critical fragment; cutting resistance; migration characteristic

0 引言

随着地球资源被大规模开发利用, 移步有大量可利用资源的外星球成为了当前科学界的永恒的研究热点话题。目前, 中国的“探月三期”工程走到了最为关键的一步——“绕、落、回”三步走的最后一步。中国计划于2020年实施“嫦娥五号”探月任务。借鉴美、苏等探月大国的采样方式, 中国在采样阶段也将采用钻进取芯方式对月球次表层月壤进行采样^[1-3]。钻取过程中, 月球次表层广泛分布的临界尺度颗粒由于其无法被取芯孔采集也无法被螺旋槽排出的特性, 增加了采样的风险。目前, 为了提高钻进可靠性, 大多数研究着重于优化取芯钻具的结构设计方面^[4-5], 忽略了临界尺度颗粒在钻进过程中的动力学特性与钻进参数之间的关系。

李宁等^[6]根据切削、静压及钻压作用过程建立旋进式触探试验推导出岩石的内摩擦角及黏聚力等的计算公式。刘泉声等^[7]研究岩石脆性指标对滚刀破岩功率的影响, 结果表明滚刀更难贯入硬质岩石。Siavash等^[8]针对弧形切削刃对岩石切削负载影响研究, 结果表明影响切削力的主要因素为切削刃与岩石相互作用面积、切削刃包络形状。Li等^[9]通过直尺切削试验, 获得模拟月岩破碎行为及其负载特性, 设计了一种高效能钻头, 大大提高钻进可靠性。根据切削土壤的破坏形式, Che等^[10]开展了岩石切削性能和失效行为研究, 试验结果表明, 切削力随切削深度、前角以及岩石单轴抗压强度的增加而增大, 但是受切削速度的影响程度较弱。Dagrain等^[11]将岩石切削过程中的负载特性分成几个主要阶段进行分析, 结果表明随着切削深度的增加切削具的负载表现形式不同, 随着钻进深度的增加钻进负载明显增加。刘天喜等^[12]和庞勇等^[13]通过钻取试验监测月壤大颗粒在不同位置时的运移特性及对钻具钻进力载的影响, 试验结果表明, 影响月壤大颗粒的典型力载特征及影响大颗粒运移特性的关键因素是表面形态。

本文针对在月球钻进取芯过程中, 月壤临界尺度工况中的临界尺度颗粒受钻削作用时的孔底置出与孔壁置入运移特性与钻采阻力之间的对应关系进行探究, 建立月壤临界尺度颗粒切削模型, 通过离散元仿真方法及直尺切削试验验证方式, 探究切削阻力时域曲线不同特征与临界尺度颗粒运移特性之间的关系。

1 临界尺度颗粒运移特性

中国“嫦娥五号”探测器于2020年底在月球正面软着陆, 首次完成了地外天体无人自动采样并返回地球, 预计带回2 kg月壤样品^[14]。如图1所示, 取芯钻具安装在无人着陆器上, 其在钻机的驱动下钻进月球次表层, 做回转和进尺运动, 钻头对原位月壤进行破碎, 钻杆排出破碎月壤, 取芯机构进行月壤样品回收, 软袋包裹月壤样品进入月壤封装装置。广泛分布的月壤临界尺度颗粒对采样任务影响极大, 可直接影响取芯效果。探测器的着陆位置即为选定的钻取位置, 其内月壤颗粒分布情况未知, 无法自主识别并避免恶劣工况。



图1 取芯钻具在着陆器上的安装位置

Fig. 1 Mounting position of coring drill on lander

如图2所示, 为临界尺度颗粒的孔底置出与孔壁置入运移特性示意图。临界尺度颗粒无法进入采样孔也不能被钻杆螺旋槽排出, 一部分直接嵌入孔壁; 另一部分则位于钻头下方与切削具一同切削月壤, 当其受到的切削阻力大于切削刃之间的夹紧力时, 其中的一部分临界尺度颗粒脱离钻头嵌入孔壁, 另一部分未被破碎的临界尺度颗粒被切削刃从孔底置出, 剩余的存在于钻头下方。在临界尺度颗粒运移效果不良时, 极易形成聚积区^[15], 加剧钻头的磨损速度, 甚至出现卡钻、跳钻等机械故障, 导致钻进失败。

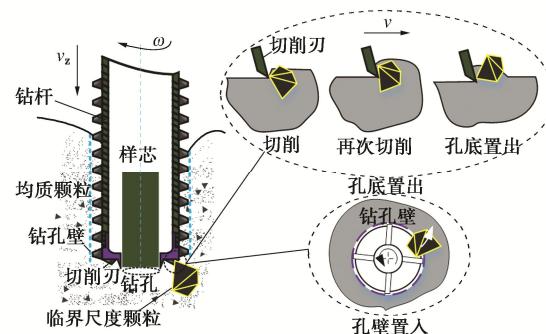


图2 临界尺度颗粒的运移特性示意图

Fig. 2 Migration characteristics of critical fragments

图2中: v_z 为进给速度, v 为钻具线速度, ω 为钻具旋转速度。

图3为月壤临界尺度颗粒钻取工况的地面模拟试验, 当钻杆退出钻孔后, 观察钻孔内壁可发现部分临界尺度颗粒内嵌在孔壁上, 对钻进过程中的钻具的功耗和进给力数据进行监测, 发现不稳定。

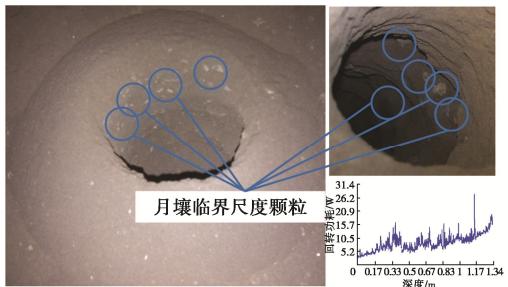


图3 临界尺度工况地面钻取试验

Fig. 3 Surface drilling tests on critical fragments

2 月壤临界尺度颗粒切削模型

钻杆的阻力矩可用于判别月面钻进的可靠性。当钻进深度变化范围较小时, 阻力矩波动程度可用来表示被钻对象的物理特性。因此, 在钻削作用下, 建立月壤临界尺度颗粒切削模型, 可以通过二者相互作用过程中的钻具钻采阻力的变化趋势与临界尺度颗粒的运移特性之间建立联系。临界尺度颗粒与切削刃的轴向、径向重叠长度如图4所示。

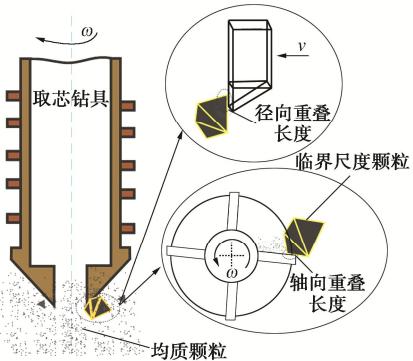


图4 临界尺度颗粒与切削刃作用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of overlap of critical fragments and cutter

当钻头部分切削月壤时, 将切削刃前方的月壤均质颗粒、月壤临界尺度颗粒进行独立分析, 力学示意图如5所示。根据土壤切削失效准则, 在切削方向上会形成失效月壤, 本模型不考虑失效月壤的形成(后续试验采用吸力装置进行处理)。

切削刃水平方向的切削阻力

$$F = \cos \xi_1 F_{th} + \cos \xi_2 F_{tc} , \quad (1)$$

式中, F 为切削刃的总切削阻力, F_{tc} 为切削刃对临界尺

度颗粒的作用力, F_{th} 为切削刃对均质颗粒的作用力, ξ_1 及 ξ_2 分别为均质颗粒及临界尺度颗粒对切削刃产生的阻力与水平方向的夹角。

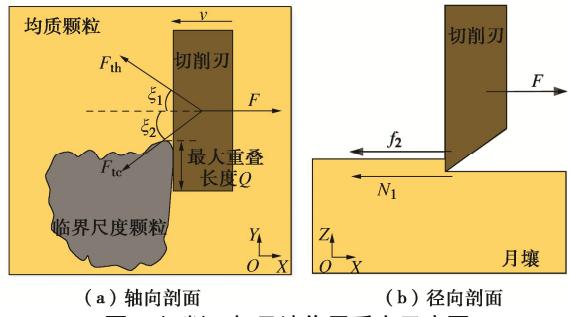


Fig. 5 Schematic diagram of axial section forces on cutter and lunar soil interaction

切削深度固定时, 不计前端失效月壤及临界尺度颗粒碎屑的影响, 根据切削刃前刀面与模拟月壤总的接触面积不变, 所以有

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 , \quad (2)$$

式中, Δs_1 , Δs_2 分别为切削过程中接触临界尺度颗粒的面积、接触均质月壤的面积, Δs 为切削刃切削模拟月壤的总面积。

费雷特直径定义为颗粒在某一平面投影轮廓上的最远两点的距离, 当切削刃与临界尺度颗粒轴向重叠长度大于切削深度时, 费雷特直径可等效为本文所述的切削刃与临界尺度颗粒径向重叠部分长度。根据林呈祥等^[16]对TJ-1模拟月壤颗粒的形貌参数统计, 得出

$$\begin{cases} \Delta s_3 = 0.545Q^2 - 0.207Q + 0.707 & (Q > 0) , \\ \Delta s_3 = 0 & (Q = 0) , \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δs_3 为临界尺度颗粒的投影轮廓面积, Q 为临界尺度颗粒的费雷特直径。

根据已有研究及对原位月壤的研究数据拟合^[17], 月壤自然堆积密度 ρ_z 和下钻深度 z 呈一定线性关系:

$$\rho_z = 1.92 \frac{z + 12.2}{z + 18} . \quad (4)$$

孔隙率 n , 孔隙比 e 与月壤自然堆积密度满足

$$e = \frac{n}{1-n} , \quad (5)$$

$$n = 1 - \frac{\rho_z}{\rho_0} , \quad (6)$$

式中, ρ_0 为月壤相对密度, 探月工程中一般取3.1 g/cm³。

内聚力 c 与内摩擦角 φ 如下式

$$\tan \varphi = \frac{1.3779}{e} - 0.3925 , \quad (7)$$

$$c = 60959 e^{-22.552n} . \quad (8)$$

根据被动土压力系数 K_p 与内摩擦角 φ 之间的关系得

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) . \quad (9)$$

当切削刃前刀面上全部为均质颗粒时, 切削刃在回转过程中受到的阻力主要为出露刃对均质月壤的切削作用, 而孔壁的月壤会有向钻头运动的趋势, 孔壁月壤会对该切削刃的侧壁有压力作用。根据朗肯土压力理论, 当切削刃前刀面侧壁的月壤达到极限抗剪强度时, 作用于切削刃上的作用力为主动或被动土压力^[18]。对切削刃力学分析如图 6 (a) 所示。

在切削方向上建立力学平衡方程式:

$$F_{th} - N_1 - f_2 \cos \theta - f_3 \sin \alpha + N_3 \cos \alpha = 0 , \quad (10)$$

$$N_1 = \frac{1}{2} \Delta s_2 (\rho_z g C K_p + 2c \sqrt{K_p}) , \quad (11)$$

$$f_2 = \left[\rho_z g z K_p + 2c \sqrt{K_p} - \rho_z g (B+C) K_p \right] \cdot \frac{1}{2} D (B+C) . \quad (12)$$

式中 N_1 为被动土压力; F_2 为孔壁对切削刃侧壁的土压力; f_2 为 F_2 作用面产生的摩阻力; α 为切削刃前角; C 为切削刃出露刃长度; $B=$ 切削刃刃长- C ; D 为切削刃侧面长度; N_3 为侧向土滑落对切削刃的支持力; f_3 为 N_3 作用面产生的摩阻力; θ 为钻进规程角。

由于切削刃做恒速螺旋下切运动, N_3 及 f_3 可忽略, 将式 (11), (12) 代入式 (10) 得

$$F_{th} = \frac{1}{2} \left\{ \Delta s_2 (\rho_z g C K_p + 2c \sqrt{K_p}) + fD(B+C) \cdot \left[\rho_z g z K_p + 2c \sqrt{K_p} - \rho_z g K_p (B+C) \right] \right\} , \quad (13)$$

式中, f 为切削刃与土体接触摩擦系数。

在切削过程中, 切削刃切削月岩产生月岩碎屑, 并被切削刃持续切削, 切削刃与月岩之间的相互作用力不断增加, 碎屑部分被挤压, 形成密实核, 因此需要在宏观上对密实核处进行描述^[20]。切削具回转, 月岩表现为即抗压又抗剪。当切削刃仅接触月岩时, 岩石回转切削力学模型如图 6 (b) 所示, 在切削刃与月岩相互接触的极小区域内, 由于应力集中, 密实核传递给母岩的合力为 F_m , 密实核的成型描述如图 7 所示。

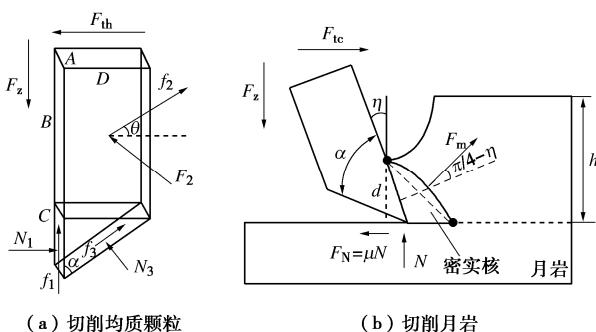


图 6 切削月壤力学示意图

Fig. 6 Diagram of mechanics of lunar soil cutting



图 7 密实核成型描述

Fig. 7 Description of dense nucleation

作用于母岩的合力

$$F_m = 2\sqrt{2}dQ\sigma_s , \quad (14)$$

式中, d 为密实核半径, σ_s 为月岩抗压强度。

在切削方向上建立力学平衡方程式:

$$\begin{aligned} F_{tc} - \mu N - F_m \cos \left(\frac{\pi}{4} - \eta \right) \sin \eta + \\ F_m \sin \left(\frac{\pi}{4} - \eta \right) \cos \eta = 0 \end{aligned} , \quad (15)$$

式中, μ 为月岩与切削刃之间的滑动摩擦系数, N 为月岩对切削刃支持力, η 为切削刃前刀角, h 为切削深度

整理式 (14), (15) 得

$$F_{tc} = 2\mu Ah\sigma_s \tan \frac{\alpha}{2} + \delta \Delta s_1 \sigma_s , \quad (16)$$

式中, δ 为常量, 与岩石破碎角 (岩石剪切面与切削方向的夹角) 有关, A 为切削刃的底刃长度。

将式 (8), (9), (13) 和 (16) 代入式 (1) 中, 即可得到在钻削作用下不同重叠率时切削刃的切削阻力:

$$\begin{aligned} F = \frac{1}{2} \left\{ \Delta s_2 \left[\frac{1.92gC(z+12)\tan^2 \left(\frac{\pi+2\varphi}{4} \right)}{z+18} + \right. \right. \\ \left. \left. 2c \tan \left(\frac{\pi+2\varphi}{4} \right) \right] + \right. \\ \left. \frac{1.92g(z-B-C)(z+12)\tan^2 \left(\frac{\pi+2\varphi}{4} \right)}{z+18} + \right. \\ \left. 2c \tan \left(\frac{\pi+2\varphi}{4} \right) \right\} + 2\mu Ah\sigma_s \tan \frac{\alpha}{2} + \delta \Delta s_1 \sigma_s . \quad (17) \end{aligned}$$

根据式 (17) 得到切削阻力受切削刃与临界尺度颗粒的不同作用位置及颗粒粒径影响下的变化曲线, 如图 8 所示。可知, 固定钻深时, 切削阻力受到二者相互作用位置的影响最大。

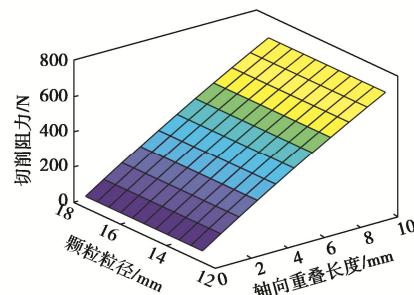


图 8 固定钻进深度下的单刃切削阻力

Fig. 8 Cutting resistances of fixed single edge at depth of drilling

取芯钻具在恒进尺、回转运动的条件下, 不同的下钻角度、预钻区临界尺度颗粒分布情况及在钻进过程中月壤颗粒的差速扰动均会对二者的相互作用位置产生影响, 因此, 定义归一化参数法向重叠率 γ_D :

$$\gamma_D = \frac{Q\Delta s_1}{A\Delta s_3} \quad . \quad (18)$$

3 孔底置出与孔壁置入仿真模拟

3.1 切削轨迹等效分析

取芯钻具的一个钻进规程包括恒定的回转和进给运动, Wheeler 等^[19]建立了惯性力与准静态切削模型叠加的模型, 认为切削具线速度在低于 4.36 km/h 范围内, 惯性力受到切削速度的影响不显著。中国探月任务中所使用的取芯钻具的回转速度为 60~120 rpm, 钻具最大径为 30 mm, 转速换算成线速度如表 1 所示, 属于慢速切削速度范围内。因此, 在惯性力不受影响的情况下, 可将等距的螺旋线型的切削轨迹等效为直线型的切削轨迹。等效成直线运动之后切削轨迹上包含的颗粒类型, 如图 9 所示。

表 1 钻具回转速度与线速度换算表

Table 1 Conversion of rotary speed and linear speed of drilling

| tool | 回转速度/rpm | 60 | 80 | 100 | 120 |
|---------------------------|----------|------|------|------|-----|
| 线速度/(mm·s ⁻¹) | 47.1 | 61.2 | 78.7 | 94.2 | |

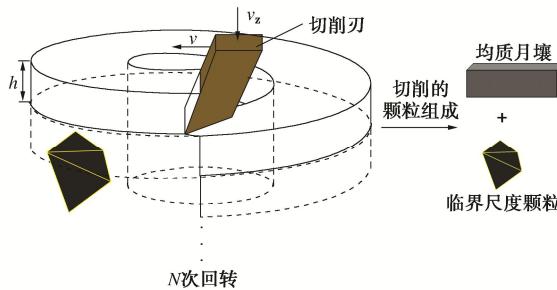


图 9 回转轨迹等效示意图

Fig. 9 Schematic diagram of equivalent rotation trajectory

3.2 参数设置

本文采用离散元方法 DEM 进行仿真模拟。在对模拟月壤进行参数标定时, 假设均质颗粒与临界尺度颗粒均为 Molerus I 型土体, 各向同性。参考相关文献[20~22], 仿真环境参数标定如表 2 所示。切削模拟月壤颗粒运动分析与应力分布对比, 测定大范围稳定的仿真边界, 并且可以完整的显示临界尺度颗粒的运移特性, 本文设置仿真边界为 $x \times y \times z = 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。

图 10 为在切削过程中, 某瞬时临界尺度颗粒速度云图。从图 10 (a) 可以看出, 切削刃不断切削临界尺度颗粒, 在切削方向上失效模拟月壤不断堆积, 临界尺度颗

粒质心上升, 产生孔底置出现象; 从图 10 (b) 可以看出, 受切削作用后, 嵌入孔壁的临界尺度颗粒的运移速度接近于 0, 受到切削刃的差速扰动后没有回落现象, 产生孔壁置入现象。

表 2 仿真环境参数标定

Table 2 Parameter calibration of simulation environment

| 参数 | 数值 |
|-----------------------------|-----------------|
| 颗粒泊松比 | 0.35 |
| 均质颗粒半径/mm | 1.0 |
| 临界尺度颗粒粒径/mm | 15 |
| 颗粒密度/(kg·m ⁻³) | 2900 |
| 颗粒剪切模量/Pa | 1×10^8 |
| 切削刃泊松比 | 0.3 |
| 切削刃密度/(kg·m ⁻³) | 7800 |
| 切削刃杨氏模量/Pa | 7×10^7 |
| 切削深度/mm | 4 |
| 重力加速度/(m·s ⁻²) | 1.6 |
| 切削速度/(mm·s ⁻¹) | 94.2 |
| 颗粒-颗粒恢复系数 | 0.1 |
| 颗粒-颗粒静摩擦系数 | 0.514 |
| 颗粒-颗粒动摩擦系数 | 0.1 |
| 颗粒-几何体恢复系数 | 0.2 |
| 颗粒-几何体静摩擦系数 | 0.3 |
| 颗粒-几何体动摩擦系数 | 0.1 |

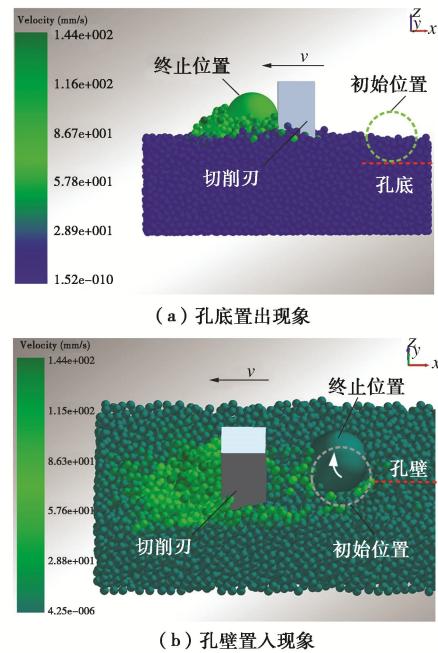


图 10 仿真切削过程速度云图

Fig. 10 Simulation of cutting process speed nephogram

3.3 仿真结果分析

设置切削速度为 94.2 mm/s 切削深度为 4 mm, 仿真模拟结果分别如图 11 (a), (b) 所示。当法向重叠率 $\gamma_{15}=0.026$ 时, 临界尺度颗粒被切削刃有效拨开, 产生孔壁置入现象, 当法向重叠率 $\gamma_{15}=0.439$, 且切削刃底刃中点与颗粒质心重合时, 临界尺度颗粒随动于切削刃, 质

心不断上升，产生孔底置出现象。

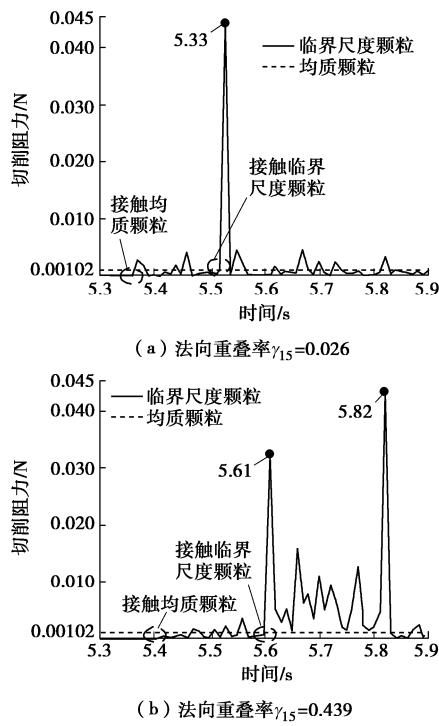


图 11 切削阻力时域变化曲线

Fig.11 Time-domain variation curves of cutting resistance

临界尺度颗粒的孔底置出与孔壁置入现象，对应切削阻力时域曲线特征为连续峰值和仅有一个峰值点。通过仿真结果验证，可以根据切削阻力时域曲线特征判断临界尺度颗粒的运移特性。

4 临界尺度颗粒的运移特性模拟试验

4.1 试验方法及原理

试验采用哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制研究中心研制的直尺切削试验台 SLC-1，如图 12 所示，试验台采用伺服电动缸作为直线运动的驱动装置，进尺调整机构调整切削深度，通过六维力传感器实现对切削阻力的测量，利用高速摄像机对临界尺度颗粒的运移特性进行记录。切削过程中，切削方向及侧向会产生失效模拟月壤[23]，影响六维力传感器精度，因此，利用吸力装置来处理失效部分。

经过筛选，选取小粒径、中粒径、大粒径的月壤临界尺度颗粒如图 13 (a) 所示，粒径范围分别为 3~14, 14~16, 16~30 mm。根据月壤粒径范围，月壤均质颗粒选用粒径范围在 0.025~0.05 mm 的天然玄武岩粉末，月壤临界尺度颗粒选用粒径为 10~30 mm 的天然玄武岩颗粒。通过液压机加载压实，使制备的模拟月壤的密度、内聚力、内摩擦角、孔隙比更接近真实月壤，制备的待切削的模拟月壤样本如图 13 (b)

所示，压实之后的均质月壤物理力学参数如表 3 所示。

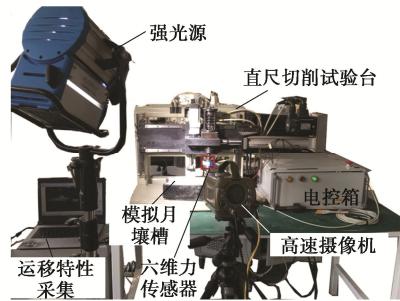
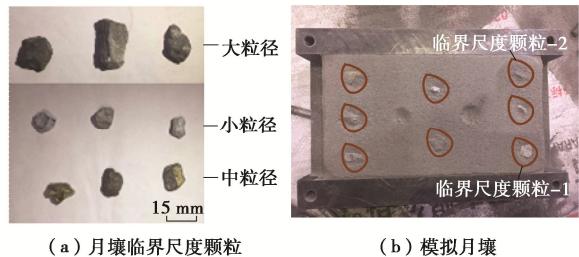


图 12 SLC-1 试验台结构图

Fig. 12 Structure drawing of SLC-1 testing bench



(a) 月壤临界尺度颗粒

(b) 模拟月壤

图 13 模拟月壤样品

Fig. 13 Simulated lunar soil samples

表 3 试验制备均质月壤物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of prepared homogeneous lunar soil

| 参数 | 密度/(g·cm ⁻³) | 泊松比 | 孔隙比 | 内摩擦角/(°) |
|----|--------------------------|------|------|----------|
| 数值 | 2.1 | 0.35 | 0.31 | 34.96 |

4.2 试验结果分析

(1) 切削速度对切削阻力的影响分析

对全部由月壤均质颗粒制备的模拟月壤进行直尺切削试验，通过控制切削刀的切削速度，得出切削刀的切削阻力时域变化曲线，如图 14 (a) ~ (c) 所示，得出平均切削阻力，可以明显看出，切削速度的变化对切削阻力影响可以忽略。

(2) 孔壁置入与孔底置出现象分析

切削速度分别为 61.2, 78.7 和 94.2 mm/s 的情况下，切削模拟月壤产生的切削阻力时域变化曲线分别如图 15 (a) ~ (c) 所示。各曲线均经过滤波处理，空载时的切削阻力时域变化曲线均为在 0 N 附近波动的曲线。切削均质颗粒时，为在平均切削阻力附近波动的曲线。如图 15 (a) 所示，当法向重叠率分别为 $\gamma_{13}=0.035$ 及 $\gamma_{15}=0.026$ 时，所产生的切削阻力时域变化曲线特征为均产生单峰值点，临界尺度颗粒产生孔壁置入现象，且此时法向重叠率较低，临界尺度颗粒更容易产生孔壁置入现象，与其粒径大小无关。如图

15 (b) 所示, 当法向重叠率分别为 $\gamma_{13}=0.198$ 及 $\gamma_{15}=0.148$ 时, 切削阻力时域变化曲线特征分别为仅有单峰值点和连续峰值。如图 15 (c) 所示, 当法向重叠率分别为 $\gamma_{13}=0.587$ 及 $\gamma_{15}=0.439$, 且切削刃质心与临界尺度颗粒质心的连线平行于切削方向时, 切削阻力时域变化曲线特征均为含有连续峰值。

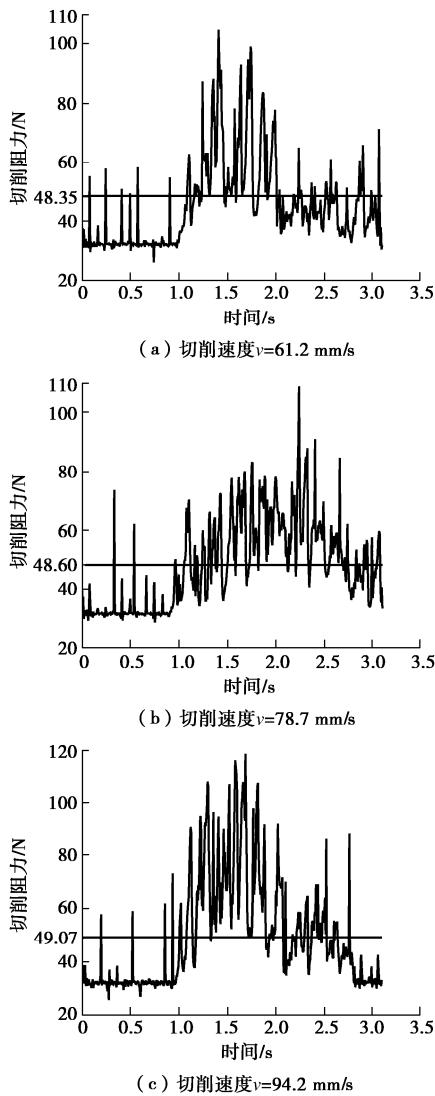


图 14 平均切削阻力变化曲线

Fig. 14 Average cutting resistance curves

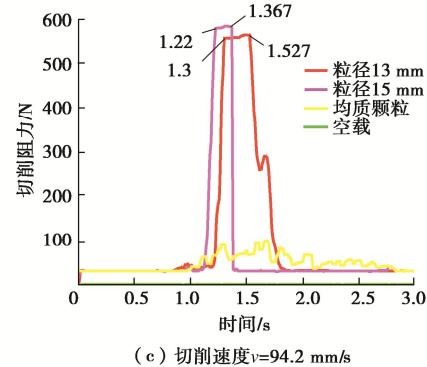
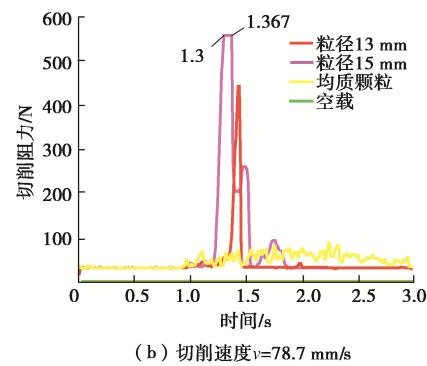
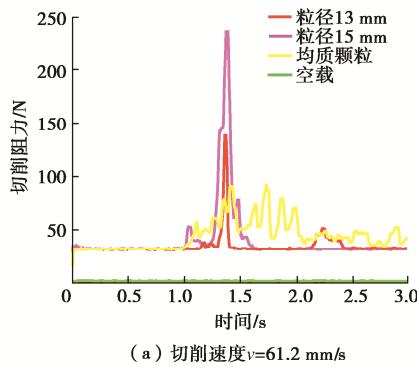


图 15 切削阻力时域变化曲线

Fig. 15 Time-domain variation curves of cutting resistance

如图 16 (a) 所示, 临界尺度颗粒-1 被切削刃有效拨开, 其质心偏移一侧均质颗粒产生松动, 临界尺度颗粒嵌入孔壁, 产生孔壁置入现象。如图 16 (b) 所示, 在切削轨迹上, 临界尺度颗粒-2 被切削刃持续切削, 直至切削过程结束未脱离切削刃, 从临界尺度颗粒初始位置可以看出, 临界尺度颗粒最终上升至模拟月壤表面, 产生孔底置出现象。

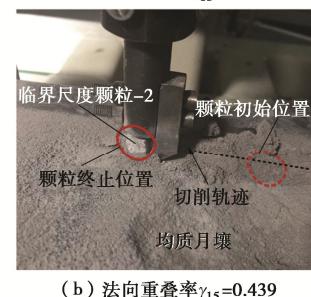
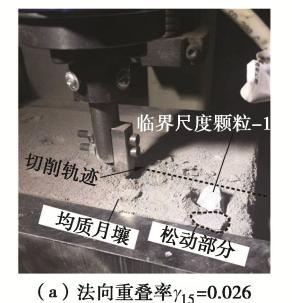


图 16 切削过程结束

Fig. 16 Completion of cutting process

(3) 法向重叠率对切削阻力的影响分析

由图 17 可以看出, 在下钻深度变化范围较小的情况下, 相同粒径的临界尺度颗粒, 随着法向重叠率增加, 切削刃的切削阻力呈逐渐增大趋势。

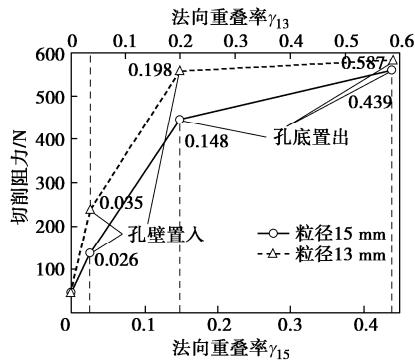


图 17 切削阻力 - 法向重叠率试验曲线

Fig. 17 Curves of cutting resistance-normal overlap rate tests

5 结 论

(1) 法向重叠率的增加, 会导致切削刃的切削阻力增加, 并且临界尺度颗粒粒径因素对切削阻力影响较小。

(2) 当法向重叠率越小时, 临界尺度颗粒越容易产生孔壁置入现象。当法向重叠率越大时, 临界尺度颗粒越容易产生孔底置出现象。

(3) 钻具的切削阻力时域变化曲线可作为判别临界尺度颗粒运移特性的依据。当切削阻力时域变化曲线中含有连续峰值和仅有一个峰值点时, 临界尺度颗粒分别产生孔底置出和孔壁置入现象, 临界尺度颗粒粒径因素对其运移特性影响较小。

参 考 文 献:

- [1] 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 Ming-jing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195–254. (in Chinese))
- [2] 尹振宇, 许 强, 胡 伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2170–2180. (YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Research on the constitutive properties of granular materials considering the effect of particle breakage: Progress and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2170–2180. (in Chinese))
- [3] 唐钧跃, 全齐全, 姜生元, 等. 模拟月壤钻进力载建模及试验验证[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 85–93. (TANG Jun-yue, QUAN Qi-quan, JIANG Sheng-yuan, et al. Mechanics modeling and experimental validation for lunar regolith simulant drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 85–93. (in Chinese))
- [4] 郭汝坤, 冯 春, 李战军, 等. 牙轮钻工作参数与岩体强度对应关系的理论分析与实验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1221–1229. (GUO Ru-kun, FENG Chun, LI Zhanjun, et al. Theoretical and experimental studies on relationship between working parameters of cone drill and rock strengths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1221–1229. (in Chinese))
- [5] 张 宇, 陈善雄, 余 飞, 等. 低应力水平下 CAS-1 模拟月壤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 174–181. (ZHANG Yu, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Experimental study of mechanocal properties of lunar soil simulant CAS-1 under low stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 174–181. (in Chinese))
- [6] 李 宁, 李 蕤, 宋 玲. 基于回转切削的岩石力学参数获取新思路[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 323–329. (LI Ning, LI Qian, SONG Ling. Acquiring mechanical parameters of rock basd on rotational cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 323–329. (in Chinese))
- [7] 刘泉声, 刘建平, 时 凯, 等. 评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 498–510. (LIU Quan-sheng, LIU Jian-ping, SHI Kai, et al. Evaluation of rock brittleness indexes on rock fragmentation efficiency by disc cutter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 498–510. (in Chinese))
- [8] DOSHVARPASAND S, RICHARD T, MOSTOFI M. Effect of groove geometry and cutter in rock cutting[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 151(10): 1–1.
- [9] LI P, JIANG S Y, TANG D W, et al. Design and testing of coring bits on drilling lunar rock simulant[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(4): 1057–1076.
- [10] CHE D, ZHANG W Z, EHMANN K. Chip Formation and force responses in linear rock cutting: an experimental study[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(8): 1–12.
- [11] DAGRAIN F, QUICKELBERGHE F V, TSHIBANGU J P. A new procedure to analyse the wear of cutting elements[C]// Eurock 2006, 2006, Belgium.

- [12] 刘天喜, 魏承, 马亮, 等. 大颗粒岩块对月壤钻取过程的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2118 - 2126. (LIU Tian-xi, WEI Cheng, MA Liang, et al. Effect of large granular rocks on drilling process of lunar soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2118 - 2126. (in Chinese))
- [13] 庞勇, 冯亚杰, 孙启臣, 等. 月壤大颗粒对钻进力载影响的仿真及试验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 397 - 404. (PANG Yong, FENG Ya-jie, SUN Qi-chen, et al. Simulation and experimental study on the effect of large granular rocks in lunar soil on drilling load[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(3): 397 - 404. (in Chinese))
- [14] QIAN Y Q, XIAO L, YIN S, et al. The regolith properties of the Chang'e-5 landing region and the ground drilling experiments using lunar regolith simulants[J]. Elsevier Inc, 2020, 337(5): 113508 - 113521.
- [15] TIAN Y, TANG B, YANG F, et al. Lunar critical fragment layer simulant identification using an impact method[J]. Acta Astronautica, 2020, 173(6): 294 - 302.
- [16] 林呈祥, 凌道盛, 钟世英, 等. TJ-1 模拟月壤颗粒几何特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 451 - 456. (LIN Cheng-xiang, LING Dao-sheng, ZHONG Shi-ying, et al. Geometric characteristics of TJ-1 lunar soil simulant particles[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(3): 451 - 456. (in Chinese))
- [17] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14 - 19. (ZHENG Yong-chun, OUYANG Zi-yuan, WANG Shi-jie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(4): 14 - 19. (in Chinese))
- [18] 胡伟, 孟建伟, 刘顺凯, 等. 单螺旋锚桩水平承载机理试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 158 - 167. (HU Wei, MENG Jian-wei, LIU Shun-kai, et al. Experimental and theoretical researches on horizontal bearing mechanism of single screw anchor pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 158 - 167. (in Chinese))
- [19] WHEELER P, GODWIN R. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20km/h[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(3): 243 - 249.
- [20] LI P, JIANG S Y, TANG D W, et al. A PFC3D-based numerical simulation of cutting load for lunar rock simulant and experimental validation[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(10): 2583 - 2599.
- [21] 戴北冰, 杨峻, 刘锋涛, 等. 散粒土自然堆积的宏细观特征与形成机制[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 57 - 60. (DAI Bei-bing, YANG Jun, LIU Feng-tao, et al. Macro- and micro-properties and formation mechanisms of granular piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 57 - 60. (in Chinese))
- [22] CARRIER W. Geotechnical Properties of Lunar Soil[R]. Lake Land: Lunar Geotechnical Institute, 2005.
- [23] 田野, 陈萌萌, 杨飞, 等. 用于砂土层连续采样的柔性软袋式钻取采样技术研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 246 - 252. (TIAN Ye, CHEN Meng-meng, YANG Fei, et al. Technology of coring drill with flexible tube for sand layers continuous sampling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 246 - 252. (in Chinese))