

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.03.011

深槽螺旋钻月壤取样深度归位特性分析

杨旭¹, 季节¹, 张伟伟², 陈磊¹, 饶炜¹, 姜生元²

(1.北京空间飞行器总体设计部空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室,北京 100094; 2.哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室,哈尔滨 150001)

摘要:月球极区水冰的取样与原位分析是当前深空探测领域的国际热点之一。利用空间机器人携带深槽螺旋钻进行含水冰月壤冻土的钻进取样被认为是一种较为有工程可实现性优势的取样方法,但从科学价值的角度出发,尚未能验证这种方法对获取月壤样品的深度来源定位性能。面向通过样品分析建立月壤完整剖面信息的科学探测需求,开展深槽螺旋钻进取样的深度归位性能验证。通过对深槽螺旋钻月壤流动特性的理论分析给出了取样钻进规程的许用区间,并进一步通过实验测试的方法对深槽螺旋钻的取样深度归位特性进行了研究。实验结果显示,钻杆螺旋槽中 85% 以上的样品来自提钻前最后钻进的 40 mm 地层,且这一结论在所研究的参数范围内受钻进速度变化的影响不大。因此,通过在同一钻孔中的步进式钻进和提钻取样,可以实现钻孔的完整剖面信息建立。

关键词:深槽螺旋钻;月壤取样;深度归位;取样实验

中图分类号:V416.5 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2026)03-0580-09

Analysis on Depth Homing Characteristics of a Deep Fluted Auger for Lunar Soil Sampling

YANG Xu¹, JI Jie¹, ZHANG Weiwei², CHEN Lei¹, RAO Wei¹, JIANG Shengyuan²

(1. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Applications, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The sampling and in-situ analysis of water ice in the lunar polar regions is currently one of the major international research focuses in the field of deep-space exploration. The use of space robots equipped with deep fluted augers to drill into and sample water-ice-bearing lunar regolith permafrost is considered a sampling method with significant engineering feasibility. However, from a scientific perspective, the ability of this method to accurately determine the depth of origin of lunar regolith samples has not yet been verified. To address the scientific need for establishing a complete profile of lunar regolith through sample analysis, this study verifies the depth-resolution performance of deep fluted auger drilling. Based on a theoretical analysis of the flow characteristics of lunar regolith in deep fluted augers, permissible ranges for drilling procedures are established. Furthermore, the depth-resolution characteristics of the deep fluted auger are investigated through experimental testing. The experimental results show that more than 85% of the samples in the drill rod's spiral flutes originate from the final 40 mm of drilling prior to rod retrieval, and this conclusion is largely

基金项目:国家重大专项工程探月四期。

收稿日期:2026-03-29; **修订日期:**2026-05-09

通信作者:杨旭,男,高级工程师, E-mail:raulyangxu@126.com。

引用格式:杨旭,季节,张伟伟,等.深槽螺旋钻月壤取样深度归位特性分析[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2026,58(3):580-588. YANG Xu, JI Jie, ZHANG Weiwei, et al. Analysis on depth homing characteristics of a deep fluted auger for lunar soil sampling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(3):580-588.

unaffected by variations in drilling speed within the studied parameter range. Therefore, by employing step-by-step drilling and rod retrieval sampling within the same borehole, it is possible to establish a complete profile of the borehole.

Key words: deep fluted auger; lunar soil sampling; depth homing; sampling experiment

近二十年,对月球极区永久阴影区中水冰的探测成为了深空探测领域的国际热点,已经有多项探测任务获得的数据给出了月球永久阴影区中存在水冰的证据^[1-7]。近年来,美国、欧洲、印度等都制定了月球极区探测计划^[8-9]。但此前对于月球水冰的探测都是通过遥感探测方法进行的,获得的科学信息仍然有限,尚缺乏关于月球水冰的直接测量证据,其赋存状态、含量、分布、来源等科学问题仍未得到解答^[10-11]。由探测器着陆于月球极区,通过钻进取样方法对永久阴影区中含有水冰的月壤进行取样,并将样品转移至探测器搭载的仪器进行分析,是实现水冰精确探测与勘察的优选方法。因此,在未来几年各国都将实施着陆月球极区对水冰进行勘察的探测任务,包括NASA的“极地冰资源开采实验-1”(PRIME-1)任务、“挥发物调查极地探测车”(VIPER)任务^[12],以及俄罗斯的月球27(Luna-27)任务^[13]。中国也将实施月球极区着陆探测任务,将对月球极区永久阴影区中的水冰进行勘察、取样和分析^[14-16]。

我国在嫦娥五号任务首次实现了地外天体的样品获取^[17],并使用探测器搭载的取样钻机对月壤进行了1 m深度的连续钻进取芯,获得了具有良好层理保持性的剖面月壤样品^[18]。但面向月球极区含水冰月壤冻土的取样任务相比嫦娥五号任务存在明显的区别,主要体现在以下方面。(1)环境条件新。由月球中低纬光照区变为极区永久阴影区,环境条件更加极端。(2)取样对象新。由无水干燥月壤变为含水月壤冻土,增大了钻进难度。(3)取样需求新。由样品返回变为样品原位分析,增加了对获取样品形态、质量、来源的要求。这些区别为取样任务的设计和实施提出了更大的挑战。考虑月球极区水冰采样探测任务新约束和新需求,面向取样返回任务设计的嫦娥五号、六号“双管单袋无滑差取芯”采样方案(即中空钻具实现月壤钻进,内部软袋外翻包裹月壤芯柱)难以迁移应用。

文献[19]通过对多种取样方法的对比分析认为,采用深槽螺旋钻方法对月壤进行钻进取样能够在科学品质、可靠性、安全性、复杂度几方面取得较好的平衡,适合我国月球永久阴影区水冰探测的需求。深槽螺旋钻是一种具有深螺旋槽和低螺旋升角的螺旋钻,在用于月球样品采集时,深槽螺旋钻的主要功能是在钻孔的同时将月壤捕获在螺旋槽

中,这部分月壤随钻杆提出钻孔,成为被采集的样品。文献[20]针对此方法开展了方案设计分析和实验验证,对深槽螺旋钻方法钻进含水冰月壤冻土的能力和获取一定质量样品的能力进行了测试,验证了该方法的工程应用可行性,但未能说明使用该方法获取样品的科学价值,即对于月壤层序的保持性能。

层序保持能力要求采样装置对某一深度区间的月壤进行采样时,获取的样品以尽量高的比例来源于这一深度区间,而尽量少混入其他深度区间的月壤。对月球永久阴影区水冰进行原位采样探测时,需要对钻孔中含水冰月壤样品的来源深度进行定位,从而将仪器分析得到的含水率数据“归位”至钻孔剖面。“深度归位”这一术语来自石油地质钻探领域,指在钻井过程中,根据输送延迟、钻井参数等特征,确定由孔底产生并输送至地表的岩屑的来源深度或地层,将岩屑所属的岩层类型归位至钻孔剖面,从而还原钻孔地层剖面。只有验证深槽螺旋钻方法具有好的取样深度归位能力,才能使得根据不同层序来源的月壤样品分析建立完整准确的月壤剖面信息成为可能,为这种钻进取样方法的科学应用提供有利支撑。已经有很多工作研究了月壤在钻杆螺旋槽中流动时的行为^[21-23],但这些研究均是将月壤作为仅在螺旋槽中流动的对象进行分析,并没有涉及月壤从钻头切削破碎后填充至螺旋槽的过程,因此不能对深槽螺旋钻获取月壤样品的层序保持特性进行分析。

本文将面向深槽螺旋钻的深度归位特性这一研究目标,基于理论分析和实验测试的方法开展研究,确定螺旋槽中捕获的月壤样品在钻孔中的深度来源特性,从而使得建立月壤的完整剖面信息成为可能,为这种钻进取样方法的科学价值提供有利支撑。

1 深槽螺旋钻月壤取样原理

1.1 取样动作流程

在月球采样作业中,深槽螺旋钻将钻至目标深度,并在其螺旋槽内捕获月壤样品。具体来说,深槽螺旋钻的采样过程包括如图1所示的4个步骤:

(1) 钻进阶段。钻具从月壤的表面开始钻孔,期间钻具以 n_d 的速度回转,并以 v_d 的直线速度穿透月壤,这一组操作参数可以是为提高钻进效率优

化的。

(2) 采样阶段。当钻具钻进到希望获得样品的月壤层后(如含有水的冻土层),钻具的操作参数调整为面向高采样性能优化。钻具以 n_s 的速度回转,并以 v_s 的速度穿透月壤,钻进长度 L_s 以捕获样品。在该过程中,钻头切削破碎的月壤逐渐填充到钻杆的螺旋槽中,成为被采集的样品。在采样结束时刻,将钻孔的总深度定义为采样深度 H_s ,其等于钻进阶段和采样阶段的长度之和。

(3) 提钻阶段。钻具以 n_r 的速度回转,并以 v_r 的速度向上提钻,完全退出钻孔。

(4) 刷样阶段。为了最终收集被捕获在螺旋槽中的样品,钻具进入一个刷样机构,其中钻具以 n_b 的速度回转,并以 v_b 的速度向上进给,使得螺旋槽中的样品被刷子清除并被收集。这一步骤有可能反复进行以尽量多地收集样品。

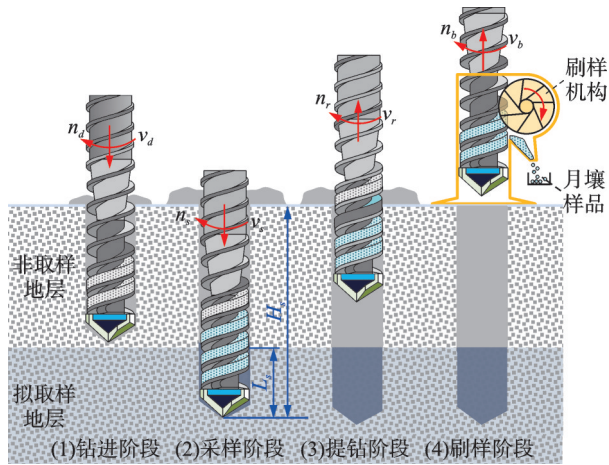


图1 深槽螺旋钻的月壤取样流程

Fig.1 Procedures of lunar soil sampling with a deep fluted auger

1.2 螺旋槽填充过程

深槽螺旋钻在进行钻进取样时,钻头破碎产生的月壤需要首先越过钻头的锥形基体后才能逐渐流入用于容纳月壤样品的螺旋槽中,如图2所示。当钻具从非取样地层穿越地层界面,进入拟取样地层中时,来自目标取样地层的月壤钻屑在逐渐填充进入钻杆螺旋槽时可能会与原先存在于螺旋槽中的月壤发生混杂;而随着在拟取样地层中钻进深度(定义为取样长度 L_s)的增加,来自拟取样地层中的月壤会逐渐替换掉螺旋槽中原有的月壤。根据螺旋排屑的基本原理,虽然可以在进入拟取样地层之前使钻具以高速空转工作一段时间将螺旋槽内钻屑尽量排除,但在实际的月壤钻进取样作业中很可能难以对拟取样的地层进行准确的辨识,排空已有钻屑的时间点难以把握。因此,需开展实验研究深

槽螺旋钻在进行连续钻进取样时,螺旋槽中捕获的月壤样品的深度归位特性。具体而言,需要测试钻具在进入取样地层并钻进取样长度 L_s 的过程中螺旋槽内样本的混杂比例,从而确定深槽螺旋钻中月壤样品的来源深度。

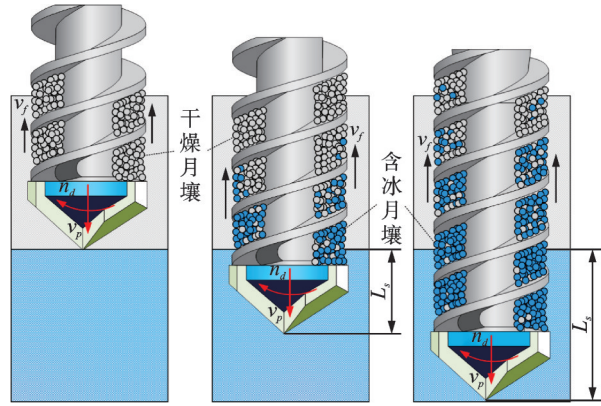


图2 深槽螺旋钻月壤填充过程

Fig.2 The filling process of lunar soil in a deep fluted auger

2 取样钻进规程分析

使用深槽螺旋钻对月壤进行取样时,需要将月壤填充在钻杆最前端的螺旋槽中。在钻杆结构一定时,月壤在钻杆螺旋槽中的流动状态与其运动参数(即规程)相关,仅在使用合理规程参数的情况下才能够采集到月壤样品。因此,需要开展分析明确取样钻进规程参数的边界范围。

2.1 月壤流动模型

月壤在钻杆螺旋槽中流动的基本原理是,月壤随钻杆的回转发生回转的牵连运动,但在孔壁月壤的摩擦力、螺旋槽中月壤内部的挤压应力等驱动力作用下同时发生沿钻杆螺旋翼滑动的相对运动,两种运动合成为相对钻杆螺旋上升的绝对运动。为分析月壤的流动行为,将螺旋槽中填充的月壤沿螺旋槽方向进行微元划分,取出一个月壤微元 P 进行速度分析,如图3所示。

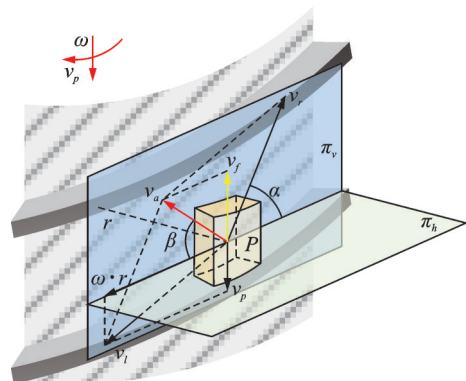


图3 月壤微元运动速度分析

Fig.3 Velocity analysis of lunar soil microelement

图 3 中,月壤微元绕钻杆回转轴线的半径为 r , 钻具以 ω 的角速度回转,同时以 v_p 的线速度向下进给。 π_h 是经过微元中心的水平面, π_v 是经过微元中心且与微元回转半径矢量垂直的平面。在 π_v 平面上进行速度分析, $\omega \cdot r$ 是钻杆回转运动在微元处产生的运动线速度, $\omega \cdot r$ 与钻杆的进给速度 v_p 合成为月壤微元随钻杆运动的牵连运动速度 v_l 。月壤微元沿螺旋翼面滑动的相对速度为 v_r , v_r 与水平面 π_h 的夹角即为钻杆螺旋翼的螺旋升角 α 。相对运动 v_r 与牵连运动 v_l 合成为月壤微元的绝对运动速度 v_a , 使得月壤微元相对钻孔壁产生螺旋上升的运动。速度 v_a 与水平面 π_h 的夹角 β 称为排屑运动角, v_a 的竖直分量 v_f 称为月壤微元的有效排屑速度,即有 $v_f = v_a \cdot \sin\beta$ 。根据速度合成关系,有

$$\begin{cases} v_r \sin \alpha - v_p = v_a \sin \beta \\ \omega r - v_r \cos \alpha = v_a \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

从而可以解得有效排屑速度 v_f 为

$$v_f = \frac{\omega r \tan \alpha - v_p}{\cot \beta \tan \alpha + 1} \quad (2)$$

月壤在螺旋槽中流动时还需要遵循流量平衡原理。在钻进过程中,月壤钻屑会沿着钻具基体与螺旋翼包围组成的螺旋通道向上流动,当月壤钻屑处于稳态流动状态时,钻头破碎产生的月壤与沿钻杆螺旋槽向上流动的月壤应该具有相同的流量。即钻头破碎月壤钻屑产生的体积流量 Φ_{cut} 和沿钻杆轴向流动的月壤体积流量 Φ_{re} 可以表示为

$$\begin{cases} \Phi_{cut} = K_p v_p S_{cut} \\ \Phi_{re} = K_s v_f S_{re} \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_p 为原位月壤破碎后的体积膨胀系数; K_s 为螺旋槽月壤体积填充率; S_{cut} 为钻头切屑破碎截面积; S_{re} 为螺旋钻杆排屑通道截面积。

定义未被钻头破碎的原位月壤密度为 ρ_s , 破碎后流入螺旋槽的月壤密度为 ρ , 则 $K_p = \rho_s / \rho$ 。钻杆截面排屑通道如图 4 所示。由于排屑通道为螺旋形式,螺旋翼占据了一部分排屑通道的有效面积,需要扣除螺旋翼截面对排屑通道截面积的影响。

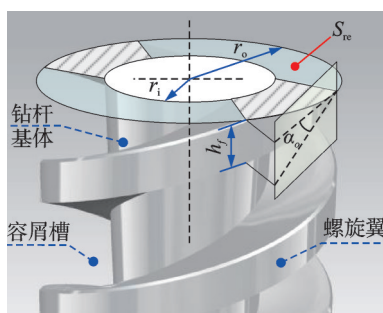


图 4 螺旋钻杆的有效排屑面积

Fig.4 Effective chip removal area of the auger

因此,钻头破碎面积和有效排屑面积分别为

$$\begin{cases} S_{cut} = \pi R^2 \\ S_{re} = \pi (r_o^2 - r_i^2) \left(1 - \frac{h_f}{\pi r_o \tan \alpha_o} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: R 为钻头半径; r_o 为螺旋槽外半径; r_i 为螺旋槽内半径; h_f 为螺旋翼沿轴线的厚度; α_o 为螺旋槽外沿处螺旋升角。

联立式(2~4)可得稳定输送时的排屑运动角 β 为

$$\beta = \arctan \frac{K_p \tan \alpha}{K_s K_{AR} (K_v \tan \alpha - 1) - K_p} \quad (5)$$

式中: K_{AR} 为排屑面积比,即 $K_{AR} = S_{re} / S_{cut}$; K_v 为回转速度与进给速度比,即 $K_v = \omega r / v_p$ 。

式(5)对螺旋槽中任意半径位置处成立,但当式中 r 与 α 均取为螺旋槽外径处参数时,所得 β 角为月壤与孔壁接触面的运动速度方向。当 ω 与 v_p 一定时, β 是螺旋槽月壤密度 ρ 的函数。

以深槽螺旋钻实现月壤取样时,希望将钻头破碎产生的月壤填满钻杆前端的取样螺旋槽,并且达到一定的填充充实度。因此,可以假设螺旋槽内的月壤为与螺旋槽几何形状相同的连续体^[24],且月壤内部存在一个均匀、各向同性的内应力 σ 。

对螺旋槽中月壤微元进行受力分析,如图 5 所示。所取月壤微元占据螺旋槽从内至外、从下到上的整个空间(即填充率 $K_s = 1$),即月壤微元与螺旋槽的内、上、下 3 个面均有接触和摩擦。微元对应的圆心角为 ϵ 。记螺旋槽内侧面、上侧面、下侧面对月壤微元的法向力分别为 F_{in} 、 F_{top} 、 F_{bot} ,摩擦力分别为 f_{in} 、 f_{top} 、 f_{bot} 。月壤微元外侧面与孔壁月壤间的正压力为 F_{out} ,摩擦力为 f_{out} 。假定月壤处于平衡流动状态,则微元之间前向和后向的正压力 F_{fit} 和 F_{bk} 大小相等。

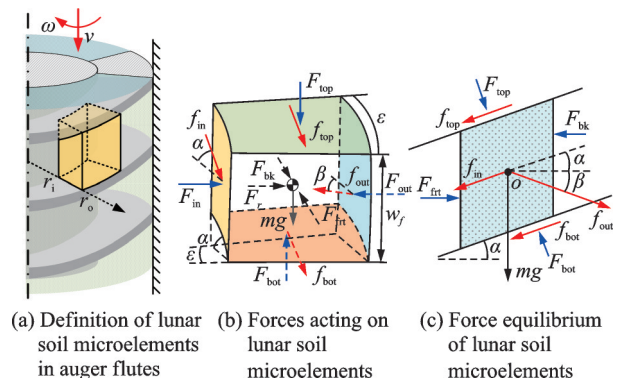


图 5 螺旋槽内月壤微元受力分析

Fig.5 Force analysis of lunar soil microelements in auger flutes

为简化模型,月壤微元不同半径位置的螺旋升角 α 统一按外径处的螺旋升角计算,则微元内、外、上、下各个面的面积及微元体积分别为

$$\begin{cases} S_{in} = \epsilon r_i H \\ S_{out} = \epsilon r_o H \\ S_{bot} = S_{top} = \frac{\epsilon(r_o^2 - r_i^2)}{2\cos\alpha} \\ V = \frac{\epsilon}{2}(r_o^2 - r_i^2)H \end{cases} \quad (6)$$

式中 H 为螺旋槽沿钻具轴向的高度。

月壤微元各个侧面的摩擦力为

$$\begin{cases} f_{in} = \mu_s \sigma S_{in} \\ f_{out} = \mu_w (\sigma S_{out} + m\omega^2 r) \\ f_{top} = \mu_s \sigma S_{top} \\ f_{bot} = \mu_s (\sigma S_{bot} + mg \cos\alpha + f_{out} \sin(\alpha + \beta)) \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ_s 为月壤与螺旋槽之间的滑动摩擦系数; μ_w 为月壤的内摩擦系数; r 为月壤微元的中径, 即 $r = (r_o + r_i)/2$ 。

如图 5(c) 所示, 在月壤微元沿螺旋槽倾斜向上运动的方向受力平衡方程, 有

$$mg \sin\alpha + f_{in} + f_{top} + f_{bot} = f_{out} \cos(\alpha + \beta) \quad (8)$$

将式(6,7)代入整理可得螺旋槽中月壤内应力 σ 与月壤密度 ρ 之间应满足

$$\begin{cases} \sigma = \rho \cdot \frac{A \cdot C}{B} \\ A = g \sin\alpha + \mu_s g \cos\alpha + \mu_w \omega^2 r \\ \quad [\mu_s \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \\ B = -\mu_s H r_i - \mu_s \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\cos\alpha} + \mu_w H r_o \cdot \\ \quad [\cos(\alpha + \beta) - \mu_s \sin(\alpha + \beta)] \\ C = \frac{H}{2}(r_o^2 - r_i^2) \end{cases} \quad (9)$$

月壤是一种散体物质, 由于月壤极端不规则的颗粒形状和良好的粒径级配, 月壤的密度 ρ 可以在较宽的范围内变化, 但月壤所能够达到的密度与其承受到的应力大小有关。Pang 等^[25]通过实验标定了动态情况下月壤密度与应力的压缩性本构关系

$$\sigma = \exp(9 \times 10^{-3} \cdot \rho - 5) \quad (10)$$

将式(9)与式(10)联立, 即可得到以螺旋槽中月壤密度 ρ 为未知量的方程, 即

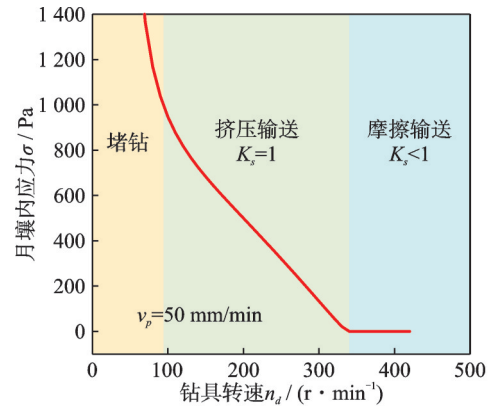
$$\rho \cdot \frac{A \cdot C}{B} = \exp(9 \times 10^{-3} \cdot \rho - 5) \quad (11)$$

求解此方程, 即可得到螺旋槽中月壤密度 ρ 关于钻具各个结构参数以及钻进规程参数 (ω, v_p) 的数值解, 从而可以对螺旋槽中月壤样品的流动模式进行分析。

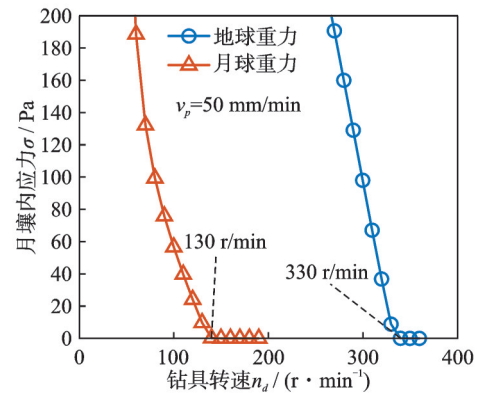
2.2 月壤流动模式分析

基于所建立的月壤流动模型, 可以得出螺旋槽中月壤内应力与钻进规程参数的关系, 结果显示月壤流动模式受转速的影响为主。以钻进速度固定

为 50 mm/min 为例, 地面重力场下月壤内应力随钻具转速的变化关系如图 6(a) 所示, 地月重力场差异的影响如图 6(b) 所示。



(a) Regolith convey mode under the Earth's gravity



(b) Comparative analysis of regolith conveyance under terrestrial and lunar gravities

图 6 钻进规程参数对月壤输送模式的影响

Fig.6 Influence of drilling operating parameters on regolith convey modes

由图 6(a) 可知, 螺旋槽中月壤的输送状态随钻进规程参数的变化存在 3 种模式:

(1) 摩擦输送模式。在高转速工况下, 月壤随钻具回转的牵连运动产生的惯性离心力作用在钻孔壁上, 进而产生的摩擦力即足以驱动月壤克服螺旋槽的摩擦阻力, 从而实现月壤输送。此时月壤不需要内应力的驱动, 填充率 $K_s < 1$ 。

(2) 挤压输送模式。当转速降低, 离心力减小至不能产生足够使月壤克服沿螺旋槽滑动阻力的驱动力, 此时新进入螺旋槽的月壤钻屑对槽内月壤产生挤压, 月壤在螺旋槽中填满挤密并产生了内应力, 这一内应力增加了作用在孔壁上和螺旋槽壁面上的正压力; 但由于月壤与孔壁的摩擦系数显著大于螺旋槽壁面的摩擦系数, 内应力提供了足够使月壤克服阻力的摩擦驱动力。

(3) 堵钻模式。转速继续降低, 驱动月壤排屑所需的内应力急剧增大, 导致钻具的钻进负载剧增, 最终因过载而无法钻进。

根据上述分析,为了采集足量的月壤样品,保持月壤样品在螺旋槽内相对稳定的状态,又不至使钻具过载,应将钻进规程参数控制在挤压输送模式的区域。代入上述公式计算可知,为确保深槽螺旋钻采样时,螺旋槽内样品始终处于挤压输送模式($\sigma > 0$)。如图 6(b)所示,以 $\sigma > 0$ 为判据,在地球重力场下应将钻具回转转速控制在低于 330 r/min 的范围内,在月球重力场下则应将控制转速低于 130 r/min。因本实验面向月球采样工况设计,故将钻具回转转速控制在 130 r/min 以内开展实验。

3 深度归位特性实验分析

3.1 实验方法

为了表征螺旋槽中来自不同地层的月壤样品的混杂程度,定义样品纯度指标 K_{sap} ,其含义为螺旋槽采集的月壤样品中来自目标取样地层的月壤所占的质量分数,即

$$K_{sap} = \frac{\text{来自目标地层的月壤质量}}{\text{螺旋槽中月壤总质量}} \times 100\% \quad (12)$$

为了指示钻杆螺旋槽中月壤样品的来源,在早期实验研究中尝试过采用不同颜色的模拟月壤制备分层样本的方法,但在提钻后只能通过观察螺旋槽中月壤样品的颜色区别进行定性分析,而无法获得定量测试数据。因此,提出了使用干燥月壤和含水冻土作为分层钻进材料,并以螺旋槽中获得的样品含水率作为评价深槽螺旋钻取样深度归位特性的方法。

月球上含水月壤主要赋存于月球两极的永久

阴影坑内,坑内年平均温度可低至 20~40 K,最高不超过 110 K ($-163\text{ }^\circ\text{C}$)^[26],含水率一般不超过 10%^[27]。在这种极端低温下,水冰将月壤颗粒冻结在一起形成高强度的冰壤胶结物^[28]。为对含水月壤的力学特性进行准确模拟,使用 JLU-H 模拟月壤^[29]与质量分数为 6% 的水分充分混合后,通过梯度制冷方法制备分层样本开展实验。制备模拟月球冻土分层样本的方法如图 7 所示,步骤包括:

(1) 样本压制。分别配置一定质量的常温含水模拟月壤和干燥模拟月壤,填入两个月壤桶中并使用压力机进行压制,压制过程要注意控制样本的上表面与月壤桶表面齐平,并在样本中置入温度传感器。

(2) 一级冷冻。完成压制后,将含水样本与干燥样本分别垫保鲜膜封盖放入 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 超低温冰箱中进行制冷,使得含水模拟月壤冻结为冻土样本,并与月壤桶紧密结合,且避免在后续过程中水分向干燥月壤层中迁移。

(3) 翻转拼接。冻结完成后,取出两个样本并拆除封盖,将与月壤桶冻结固定在一起的冻土样本翻转拼接至干燥月壤样本上方,完成样本的拼接安装。

(4) 二级冷冻。将拼接后的样本再次翻转,使干燥月壤样本位于上层,并将拼接后的样本安装液氮方桶中,通入液氮开始二级冷冻,直到干燥月壤样本与冻土样本的内部温度都低于 $-180\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(5) 取样实验。达到目标温度后,拆除样本上表面封盖,开始实验。

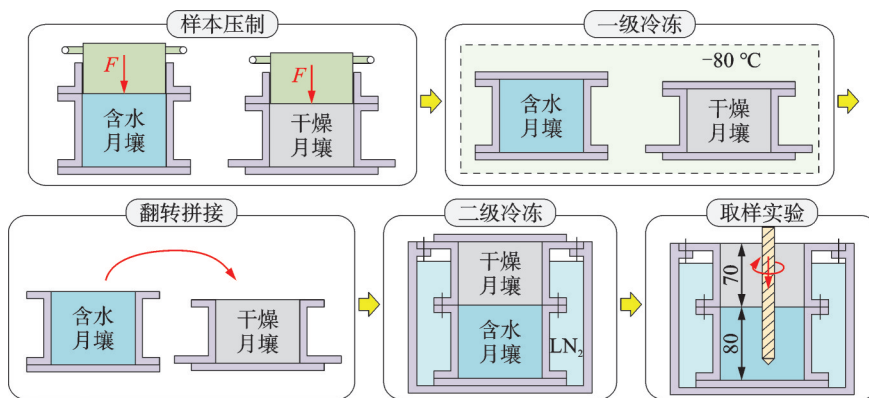


图 7 分层样本制备方法

Fig.7 Layered sample preparation method

因为采用了干燥月壤和含水月壤分层样本的实验方法,上层的干燥月壤地层视为不希望获取的月壤,而钻具穿透干燥月壤后采集的含水月壤样品是取样目标,因此样品纯度 K_{sap} 可以等价于“钻杆螺旋槽中含水月壤质量 m_{IR} 占螺旋槽中月壤总质量 m_R 的比例”。进一步地,可以采用螺旋槽月壤样

品的含水率作为指示样品来源的标记,来定量指示钻杆螺旋槽中采集的月壤样品来自含水月壤样本层的比例,从而对样品的混杂程度进行定量计算。具体而言,向 K_{sap} 的计算公式中引入螺旋槽月壤样品中的水冰质量 m_{ice} 这一中间变量,将计算式改写为

$$K_{sap} = \frac{m_{IR}}{m_R} \times 100\% = \frac{m_{ice}/m_R}{m_{ice}/m_{IR}} \times 100\% = \frac{1 - m_{Rs}/m_R}{1 - m_{IRs}/m_{IR}} \times 100\% \quad (13)$$

式中： m_{ice}/m_R 表示螺旋槽月壤样品含水率，可以改写为 $1 - m_{Rs}/m_R$ ； m_{ice}/m_{IR} 等价于含水月壤样本层的平均含水率，可以改写为 $1 - m_{IRs}/m_{IR}$ 。 m_{Rs}

和 m_{IRs} 分别为对应 m_R 和 m_{IR} 烘干后的质量。因此，为方便测量和计算样品纯度 K_{sap} ，按如图 8 所示流程操作，使用深槽螺旋钻在模拟样本中开展跨地层的取样钻进实验，在钻取实验后分别对螺旋槽月壤样品和含水月壤样本层进行取样，通过热重法测量含水率，即可计算得到样品纯度 K_{sap} 。

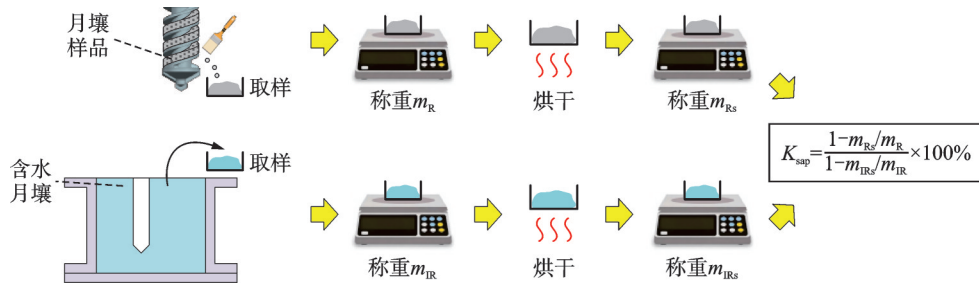


图 8 样品纯度 K_{sap} 的测试方法

Fig.8 Test method of sample purity K_{sap}

3.2 实验结果与分析

配置了含水率 6% (质量分数) 的冻土样本置于下层，深度为 80 mm，上层覆盖 70 mm 深度的干燥模拟月壤样本。使用深槽螺旋钻在钻进穿透上层的干燥模拟月壤样本后，继续在下层冻土样本中分别钻进 10、20、30、40、50 和 60 mm；为保证跨越地层前后螺旋槽内样本流动状态一致，钻具的进给速度采用速度闭环模式控制，为保证钻压力不超出实验台限制，钻具的钻进速度取较小值，为 10 和

20 mm/min 两种；钻具转速固定为 120 r/min。钻进达到指定的钻进深度后钻具停转，在不回转状态下将钻具提出钻孔，用毛刷刷取螺旋槽中的月壤样品并测量含水率。刷取螺旋槽内样品时，将钻具螺旋槽的取样段划分为两个检测区，在钻头基体上方处 0~20 mm 区间内为检测区 1；20~40 mm 区间内为检测区 2，如图 9 所示。在每一钻次实验中对两个检测区中获得的月壤样品分别测量含水率并计算样品纯度。

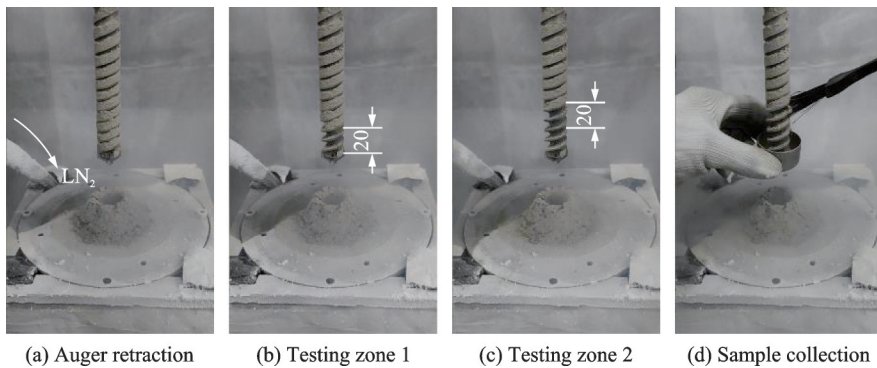


图 9 螺旋槽样品纯度检测方法

Fig.9 Purity testing method for samples in auger flutes

样品纯度实验测量结果如图 10 所示。从总体趋势来看，样品纯度随着钻具在冻土地层中的取样长度增加而增长，取样长度为 20 mm 时，螺旋槽靠近钻头的检测区 1 中样品纯度就已达到 78%~85%，而稍微远离钻头的检测区 2 中样品纯度也在较高的 54%~70% 之间；当取样长度增加到 40 mm 后，样品纯度的值趋于稳定，检测区 1 与检测区 2 中样品纯度均高于 85%。不同钻进规程的样品纯度测量结果显示了少量偏差，可能是由于实验过程中的

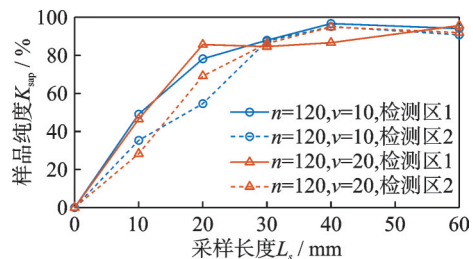


图 10 钻进规程对样品纯度的影响

Fig.10 Influence of drilling operational parameters on sample purity

随机性所导致的。

因此,根据取样深度归位特性实验结果可以得出结论:使用深槽螺旋钻对月壤进行取样时,当在目标地层中的取样长度超过40 mm后,可以保证螺旋槽前端取样段内超过85%的样品来自目标取样地层;或者说,在钻进取样的任意时刻,取样段螺旋槽中填充的月壤样品超过85%来自最近钻进的40 mm深度地层。因此,考虑一定裕度情况下,可以设定钻具在目标地层中的最小取样长度 L_s 为50 mm,此时螺旋槽中85%的样品来自提钻前最后钻进的40 mm地层。

4 结 论

本文面向深槽螺旋钻对月壤钻进取样的深度归位问题,采用理论分析和实验测试的方法,确定了钻杆螺旋槽中填充的月壤样品的来源深度区间。实验结果显示,螺旋槽中85%以上的样品来自提钻前最后钻进的40 mm地层。因此,通过在同一钻孔中的步进式钻进和提钻取样,可以从上至下逐步将不同深度区间的月壤样品采集并转移至原位分析仪器开展样品分析,从而实现钻孔完整剖面信息的建立。

参考文献:

- [1] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume [J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [2] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [3] THOMSON B J, BUSSEY D B J, NEISH C D, et al. An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO mini-RF orbital radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: 1-4.
- [4] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, et al. LROLAMP observations of the LCROSS impact plume[J]. *Science*, 2010, 330: 472-476.
- [5] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M. Initial results for the north pole of the moon from mini-SAR, chandrayaan-1 mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: 1-6.
- [6] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the moon seen by M3 on chandrayaan-1 [J]. *Science*, 2009, 326(5952): 568-572.
- [7] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 483-486.
- [8] SPEYERER E J, ROBINSON M S. Persistently illuminated regions at the lunar poles: Ideal sites for future exploration[J]. *Icarus*, 2013, 222(1): 122-136.
- [9] 王立武,郭东文,张章,等.美国宇航局Artemis月球探测计划简介[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(5): 1-12.
WANG Liwu, GUO Dongwen, ZHANG Zhang, et al. Introduction to NASA's Artemis lunar exploration program[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 1-12.
- [10] 吴伟仁,于登云,王赤,等.月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 223-231.
WU Weiren, YU Dengyun, WANG Chi, et al. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 223-231.
- [11] JIA Y, ZHANG Z, QIN L, et al. Research of lunar water-ice and exploration for China's future lunar water-ice exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 0026.
- [12] FEDER J. NASA prepares to drill for the "oil of space" [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2021, 73(4): 24-28.
- [13] TRETYAKOV V, MITROFANOV I, ZELENYI L. Russian lunar landers luna-25 and luna-27: Goals of the missions and scientific investigations at moon polar regions[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. [S.l.]: [s.n.], 2020: 6753.
- [14] 张焯,杜宇,李飞,等.月球南极探测着陆工程选址建议[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 232-240.
ZHANG He, DU Yu, LI Fei, et al. Proposals for lunar south polar region soft landing sites selection[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 232-240.
- [15] 余后满,饶炜,张益源,等."嫦娥七号"探测器任务综述[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(6): 567-576.
YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, et al. Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7 [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(6): 567-576.
- [16] 饶炜,方越,彭松,等.月球南极探测着陆区选址方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 571-578.
RAO Wei, FANG Yue, PENG Song, et al. Landing site selection method of lunar south pole region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 571-578.

- [17] 姚猛, 郑燕红, 金晟毅, 等. 一种月面采样量的在轨自主测量方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S1): 33-38.
YAO Meng, ZHENG Yanhong, JIN Shengyi, et al. On-orbit autonomous measuring method of lunar sampling quantity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 33-38.
- [18] ZHOU C, JIA Y, LIU J, et al. Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission—Chang’E-5[J]. Advances in Space Research, 2022, 69(1): 823-836.
- [19] 季节, 张伟伟, 杨旭, 等. 月球极区水冰采样探测技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 101-113.
JI Jie, ZHANG Weiwei, YANG Xu, et al. Overview of water ice sampling and detection techniques in the lunar polar region[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 101-113.
- [20] 季节, 杨旭, 张伟伟, 等. 含冰月壤冻土钻取采样方案设计与验证[J]. 航天器工程, 2023, 32(1): 73-81.
JI Jie, YANG Xu, ZHANG Weiwei, et al. Design and verification of drilling and sampling scheme for icy lunar regolith[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(1): 73-81.
- [21] FENG Y, HUANG S, PANG Y, et al. Granular dynamics in auger sampling[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 935: A26.
- [22] TAN S, DUAN L, GUO Z, et al. Theoretical derivation of the cuttings transportation trajectory for lunar sampling auger drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 204-209.
- [23] ZHAO D, TANG D, HOU X, et al. Soil chip convey of lunar subsurface auger drill[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(10): 2196-2203.
- [24] ROBERTS A W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors[J]. Powder Technology, 1999, 104(1): 56-67.
- [25] PANG Y, ZHANG T, WEI H, et al. Influence of lunar regolith compressibility on sampling performance of thick wall spiral drills[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(2): 350-362.
- [26] WILLIAMS J P, GREENHAGEN B T, PAIGE D A, et al. Seasonal polar temperatures on the Moon [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2019, 124(10): 2505-2521.
- [27] MITROFANOV I, LITVAK M, SANIN A, et al. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117: E12.
- [28] LIU J, ZHANG W, TIAN Y, et al. Analysis and prediction of uniaxial compressive strength of icy lunar regolith under extreme temperature[J]. Advances in Space Research, 2022, 69(12): 4391-4407.
- [29] SUN X, ZHANG R, LI X, et al. JLU-H: A novel lunar highland regolith simulant for use in large-scale engineering experiments[J]. Planetary and Space Science, 2022, 221: 105562.

(编辑:夏道家)