

浅层月壤微量采样铲设计与试验

段张庆¹, 张伟伟², 王储³, 田野¹, 巩雪鉴³, 姜生元², 张云凤⁴

(1. 哈尔滨商业大学轻工学院, 哈尔滨 150028; 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;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 4. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要: 基于月球极区月壤挥发物丰度原位高精度分析对测试样本微量定量的要求, 提出一种基于机械臂末端搭载的采样铲方案, 由渐进式铲挖方式构建浅层月壤剖面, 通过定容采样腔构型实现既定深处月壤样品微量定量采集, 并在极端情况下可由铲齿刮取月壤水冰形成碎屑进行样本采集。为验证采样方案的可行性, 搭建了模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台, 开展了渐进式铲挖、定容式微量采样和振动式送样试验, 试验结果表明采样铲具有130 mm深度剖面构建能力与200±30 mg微量采样性能。研究成果可为中国月球极区月壤原位采样探测分析任务提供方案借鉴。

关键词: 月球极区; 剖面铲挖; 采样铲; 微量定量

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0608-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230118

引用格式: 段张庆, 张伟伟, 王储, 等. 浅层月壤微量采样铲设计与试验[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 608-617.

Reference format: DUAN Z Q, ZHANG W W, WANG C, et al. Shovel design and testing for micro-quantitative sampling of shallow moon soil[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 608-617.

引言

目前, 采样分析是获得月球演化信息与极区月壤挥发物赋存特性的重要手段。月球采样探测任务采集的月壤样本, 多在地面实验室进行分析, 但在返回阶段月壤易受冲击振动、温度变化等影响, 造成挥发成分改变、丢失, 致使一定的科学数据无法获知。因此, 面对月球极区探测任务, 原位采样探测分析方法^[1]是获得完整挥发物赋存信息、了解月球形成与演化最有效的手段。为进行原位采样探测分析, 目前多以“铲挖”与“钻取”的方案, 采集月壤样本并由所搭载的科学仪器分析^[2-4]。

“探月三期”针对月球浅层月壤进行采样, 设计了一种安装于机械臂末端的斜插式铲挖采样器, 采用铲取与挖取方式完成采样, 但该采样方案是对月壤采样返回目标设计的, 不适用于原位探测任务分析^[5-6]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的挥发物极地探测车(Volatiles Investigating Polar Exploration Rover, VIPER)计划对月球极地挥发物与水冰进行探测^[7], 预定采用深螺旋槽式外螺旋钻杆方案可实现1 m左右样本

的钻进采样, 该方式采样位置深、效率高、采样量多, 但是整体系统较复杂, 需要由一个被动扫样系统引导螺旋钻具收集样本, 并由单独机构转移将样本送到分析仪器, 整体流程繁琐, 并在采样过程中有混样风险, 也无法满足定量需求。俄罗斯“月球25号”(Luna-25)探测器拟定采用铲、采分离方式采样^[8-9], 该探测器在机械臂末端携带剖面铲和采样器, 由剖面铲构建月壤剖面, 再由采样器通过贯入与伸缩方式可实现5 cm³月壤样本的采集, 此方式可实现定量采样, 但采样器伸缩管易受到临界尺度颗粒的影响堵塞采样器。“月球27号”^[10](Luna-27)着陆器原计划搭载欧洲航天局(European Space Agency, ESA)研制的容腔式可开合钻具, 在钻头部位设置容腔即可实现月壤的采集, 但此过程采样流程复杂无法满足多次采样需求。上述采样方案, 可实现极区月壤的样本采集, 但存在缺少定量装置、采样流程复杂、易受临界颗粒堵塞^[11]等问题。

本文针对“探月四期”工程项目任务需求, 根据月球南极月壤特性与分析仪器样本的需求, 结合国内外采样方案, 进行方案设计。鉴于钻进采样方式系统复杂, 传统铲、采分离方式操作流程繁琐, 为此提出一

种铲、采共体的方式。设计了基于机械臂末端搭载的渐进式铲挖容腔采样方案, 搭建模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台, 验证采样铲方案具有130 mm深度剖面铲挖与 200 ± 30 mg微定量采样的能力。

1 极区月壤采样方案设计

1.1 极区月壤采样方案分析

面向月球南极阳照区浅层月壤挥发物赋存特性原位任务分析需求, 采样机具需具有在一定区域范围内进行多次月壤剖面构建、定深度样本采集与转移样本送样的能力, 如图1所示。由于月面的极端作业环境, 采样机具结构需简单, 且采样流程不宜过度复杂, 以增加其可靠性。为防止探测器剖面构建过程中打滑、倾覆, 在无法提前预知剖面月壤的组成、月壤粒径及实际的物理力学特性^[12]的情况下, 采样机具的作业反力不宜过大。为保证采集样本的品质, 在进行剖面构建、采样及送样转移过程中, 所采集的样本应具有较低的热扰动, 以避免改变样本的挥发分赋存特性。其次质谱仪(Mass Spectrometer)等分析仪器要求样本粒径为小于1 mm的细粒径, 采样质量应满足在 200 ± 30 mg范围内, 不宜过多。因此对月壤进行极区采样, 方案需根据任务功能需求与约束, 如表1所示进行优选设计。

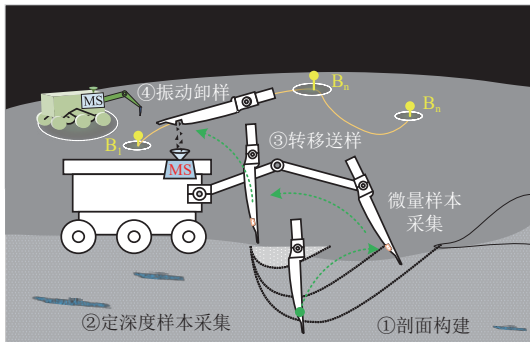


图1 极区原位采样分析背景图

Fig. 1 Background map of in situ sampling analysis in the polar region

表1 采样器功能需求与约束条件

Table 1 Sampler functional requirements and constraints

| 约束条件 | 技术要求 |
|----------------|-----------------------|
| 采样器设计要求 | 结构简单可靠、可重复使用 |
| 样本来源 | 多点定深度采样(范围: 0~130 mm) |
| 样品品质 | 定点采样、低热扰动 |
| 样本采样量需求 | 200 ± 30 mg |
| 样品粒径 | <1 mm |
| 作业反力: 轴向力、水平推力 | <30 N |

毛刷扫样式钻进采样方案如图2(a)所示, 由外螺旋深槽采样钻具构建剖面并将破碎的大颗粒收集转

移, 再由扫样毛刷将钻进破碎的大颗粒从深螺旋槽中扫出采集, 随后由单独机构将样本送到分析仪器。该方案采样效率高、样本粒径小。但在完成剖面构建时, 易产生大量的热, 从而改变了样本的品质, 并且样本深度来源、质量不确定, 不能满足任务与分析仪器需求。

贯入式铲挖采样方案如图2(b), 提出铲、采分离的采样机构, 通过铲挖方式构建剖面, 到指定深度后, 采样机构翻转, 随后伸缩采样管完成采样, 并由机械臂带动完成送样。该方案可完成定深度与定量的采样, 样本转移流程简单。但在构建剖面时, 剖面铲作业反力大, 伸缩采样管在采样时易受临界颗粒堵塞^[13], 可能会导致采样任务失败。

基于机械臂末端搭载的渐进式铲挖容腔采样方案, 设计了一种铲、采共体的剖面月壤微定量采样铲(以下称采样铲)如图2(c)所示。通过渐进式铲挖方式构建剖面, 到达指定深度, 采样铲向下贯入, 实现定深度样本采集, 随后在机械臂带动下将样本转移至分析仪器。该方案采样铲设计为铲、采一体式构型, 结构简单、集成度高、可靠性强、采样流程简洁。通过渐进式铲挖方式构建剖面, 作业反力小、热扰动低; 以贯入方式完成月壤采集, 样本深度确定; 由定容式采样槽构型, 采集的月壤样本粒径小, 可满足定量需求, 但该采样方案效率低、作业时间长。

将上述3种采样方案的特点进行对比, 其结果如表2所示。基于机械臂末端搭载的渐进式铲挖容腔采样方案, 对风化层月壤剖面构建, 作业反力小、热扰动低, 样本品质高; 通过贯入式采样与定容式采样槽, 采集的样本深度确定、样品纯净, 可满足任务需求。

1.2 采样铲结构设计

本文设计采样铲作业主要对象为月球极区浅层干壤^[13], 颗粒形状主要是棱次交错的尖锐颗粒, 流动性较差。月壤颗粒间不规则的排列堆积形成孔隙, 导致月壤具有压缩性。为此要求采样铲具备束流性, 且在进行剖面构建时应该可有效约束失效的月壤, 防止其重新流入铲挖槽。同时, 采样铲还需平整铲挖槽侧壁突出的土包, 以降低铲挖过程中的阻力。并且由于月壤剖面可能包含大颗粒矿石和月壤水冰等特殊情况, 采样铲还需具备宽工况的适应性与耐用性。因此, 采样铲的构型设计应着重于实现剖面构建与月壤样本微量定量的采集。

采样铲安装于机械臂末端, 其构型特征在于采样铲由转接口、围切刃、定心齿、铲齿、束流外壁、铲背和定量采样槽组成, 如图3所示。

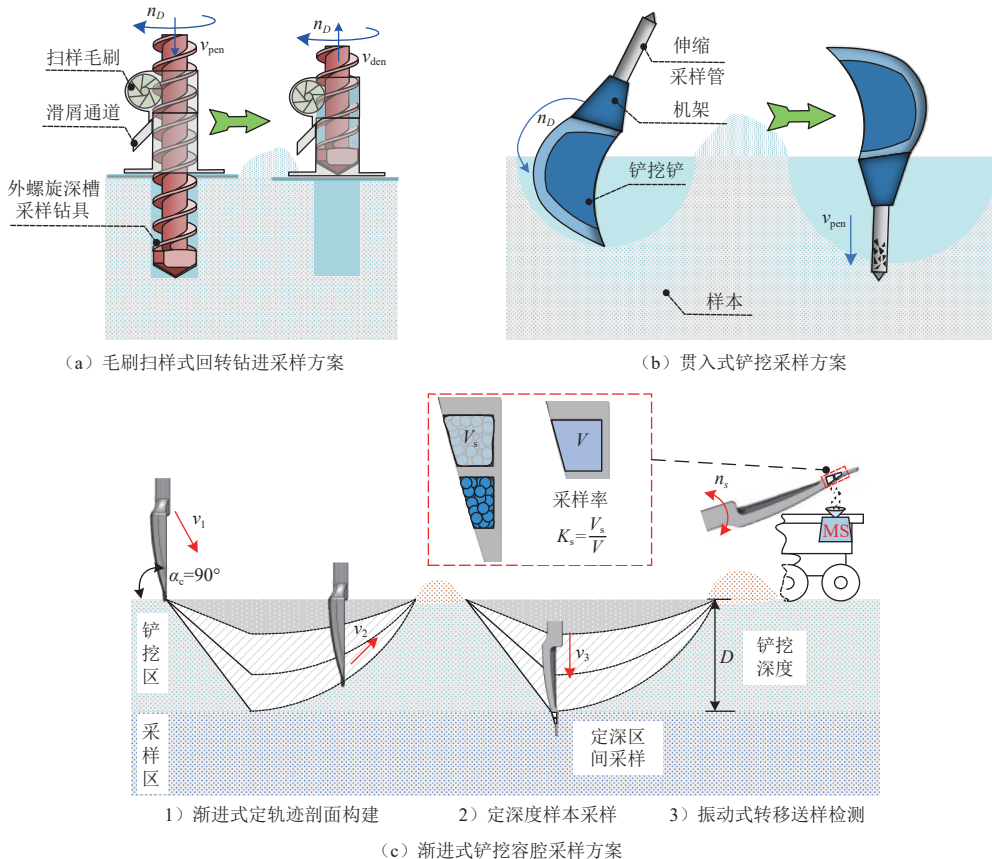


图2 月球极区采样方案

Fig. 2 Lunar polar region sampling scheme

表2 采样方案优缺点对比表

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of sampling schemes

| 采样方案 | 毛刷扫样式钻进采样方案 | 贯入式铲挖采样方案 | 渐进式铲挖容腔采样方案 |
|--------|----------------|--------------------|---------------------|
| 适用目标 | 米级、高强度月壤 | 浅层、松散月壤 | 浅层、松散月壤 |
| 工作原理 | 剖面构建: 螺旋钻具钻进 | 剖面构建: 多次铲挖 | 剖面构建: 渐进式铲挖 |
| | 采样: 外螺旋深槽通道采样 | 采样: 伸缩采样管进行贯入采样 | 采样: 定容采样腔采样 |
| 样品转移 | 送样流程复杂、需单独机构辅助 | 送样流程简单、机械臂结合采样工具送样 | 送样流程简单、机械臂结合采样工具送样 |
| 作业反力 | 小 | 大 | 小 |
| 采样品质 | 热扰动大 | 热扰动小 | 热扰动小 |
| 样品深度来源 | 定层采样, 有混层风险 | 定深采样, 样品纯净 | 定深采样, 样品纯净 |
| 样品定量采样 | 无法定量采样 | 定量采样 | 定量采样 |
| 耐卡滞 | 开放式深螺旋槽不易受卡滞 | 伸缩采样管易受临界尺度堵塞 | 铲采共体式设计、不易受临界尺度颗粒影响 |
| 采样效率 | 高 | 低 | 低 |

采样铲通过转接口与机械臂连接, 两侧有铲刃向外的围切刃, 可在铲挖至一定深度时对铲挖坑侧壁进行平整切分, 减小铲挖过程中的阻力。

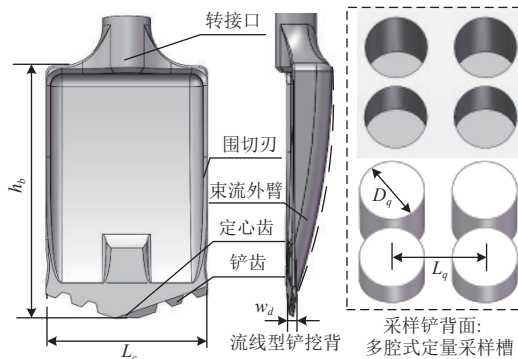


图3 采样铲构型设计特征

Fig. 3 Sampling shovel configuration design features

铲齿由前后对称反向分布的铲齿与定心齿构成, 可在采样铲按照预定轨迹进行铲挖时充当铲齿功能。当铲挖时遇到大颗粒卡滞的情况时, 可进行原地回转, 充当钻刃。在遇见极端工况如月壤水冰时, 通过铲齿刮取方式破碎月壤水冰样本, 并采样碎屑。

铲背的设计为流线型, 可保证采样铲的刚度与强度, 降低采样阶段的贯入阻力, 减小机械臂负载, 增加推移过程的容屑量。其两侧为束流外壁, 与采样铲前进方向形成约束区, 可减小失效月壤向后流动。在

底部设计了多腔式定量采样槽, 采用定容式设计, 可对一定深度的样本进行定量采样。本文设计的采样铲的关键设计参数如表3所示。

表 3 采样铲构型设计关键技术参数

Table 3 Sampling shovel configuration design key technical parameters

| 结构参数 | 数值 |
|----------------------------------|-----|
| 采样铲长度 h_b /mm | 77 |
| 采样铲宽度 L_c /mm | 40 |
| 铲齿厚度 w_d /mm | 1 |
| 定量采样槽直径 D_q /mm | 4 |
| 采样槽水平距离 L_q /mm | 5 |
| 定量采样槽数量 | 4 |
| 多腔体式定量采样槽体积 V /mm ³ | 160 |

1.3 渐进式铲挖

通过渐进铲挖方式构建月壤剖面, 原理如图4所示, 可在机械臂有限的延展空间内, 减小作业过程的反作用力。

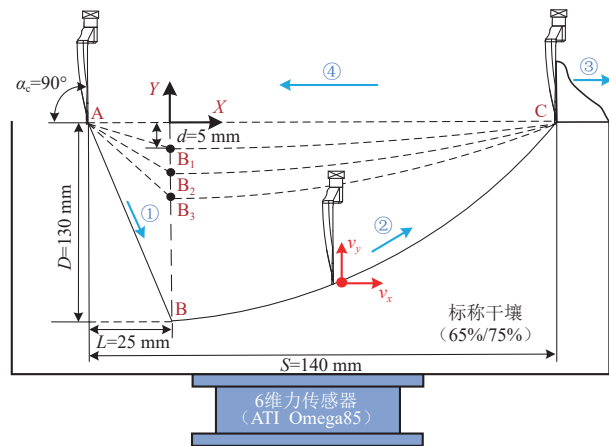


图 4 渐进式铲挖原理

Fig. 4 Progressive shoveling principle

本文利用模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台验证渐进式铲挖方式的可行性。采样铲与模拟月壤表面呈现90°夹角, 在行程为140 mm的有限延展空间内, 向下铲挖, 构建深度为130 mm的月壤剖面。采样铲每次铲挖深度为5 mm, 首先按照“V型”轨迹铲挖25 mm的距离, 然后再由“U型”向上铲挖115 mm的距离。到达表面后, 采样铲将失效月壤推移一段距离后, 返回原点, 开始下一次循环铲挖, 直至达到指定的深度。在采样铲和模拟月壤相互作用时, 通过底部6维力传感器实现铲挖过程中力载的数据记录和检测, 其剖面铲挖参数详见表4。

表 4 铲挖测试参数表

Table 4 Shovel test parameters

| 参数名称 | 参数取值 |
|----------------------------|--------|
| 水平速度/(mm·s ⁻¹) | 5 |
| 轴向速度/(mm·s ⁻¹) | 0~2.26 |
| 铲挖角度/(°) | 90 |
| 单次铲挖深度/mm | 5 |
| 循环次数 | 26 |

2 铲挖效能测试验证平台

2.1 模拟月壤制备

为制备符合极区月壤力学特性的模拟月壤样本, 需要从化学组成、矿物组成和粒径分布3个基本方面作为制备模拟月壤的标准^[14]。

1) 化学组成: 参考极区LP伽马光谱数据、斜长质月壳层和Apollo 16月壤分析结果, 极区月壤的化学组成参考如表5所示。

表 5 不同地区月壤化学组成(百分含量)对比

Table 5 Comparison of lunar regolith chemical composition in percentage at different regions

| 化学成分 | Apollo 16月壤* | 参考值(3σ) |
|--------------------------------|--------------|-----------|
| SiO ₂ | 45.00 | 44.3~45.8 |
| TiO ₂ | 0.52 | 0.2~0.8 |
| Al ₂ O ₃ | 27.60 | 24.4~30.8 |
| FeO | 4.85 | 2.6~7.1 |
| MgO | 5.46 | 3.4~7.6 |
| CaO | 15.80 | 14.1~17.5 |

注: *Apollo 16返回月壤平均成分^[15]。

2) 矿物组成: 主要为斜长石(钙长石), 月壤中的斜长石可达70~80 vol%, 橄欖石、辉石和玻璃质的含量小于20 vol%^[16]。

3) 粒径分布: 颗粒直径以小于1 mm为主, 绝大部分颗粒直径30 μm~1 mm, 平均粒径140~375 μm^[17]。

本文所选用模拟月壤原料采用不同粒径级配的斜长岩和玄武岩按7:3比例混合配置而成, 结果如表6所示。参照NASA研制的NU-LHT-2M型高地模拟月壤粒度累计曲线^[18], 经激光粒度分析仪检测, 制备的模拟月壤获得的粒径累计曲线与NU-LHT-2M略有不同, 但均落在月壤均值加减一倍标准偏差范围内, 所得的结果如图5所示。

对极区风化层深度区间在0~130 mm范围内采样的月壤, 由Heiken推测月壤剖面深度与密度的关系^[19], 在130 mm深度区间月壤的相对密度大约为65%, 在300 mm以下增加到90%以上, 此后随深度增加, 宏观体密度几乎不发生较大变化, 结果如图6所示。根据月壤的物理特性测试结果分析, 月壤的承载力、压缩性

和抗剪性等宏观力学性质主要与孔隙比密切相关,受温度影响较小。

表 6 模拟月壤制备粒径级配表

Table 6 Particle size gradation table in lunar regolith simulation

| 矿物类别 | 粒径大小 | 粒径级配等级/mm | 百分含量/% |
|---------|---------|------------|--------|
| 斜长岩 (A) | 细粒径 (F) | 0.025~0.05 | 27.124 |
| | | 0.05~0.075 | 5.838 |
| | | 0.075~0.1 | 9.062 |
| | | 0.25~0.5 | 9.062 |
| | 粗粒径 (C) | 1~2.8 | 4.838 |
| | | 2.8~14 | 5.014 |
| 玄武岩 (B) | 细粒径 (F) | 0.025~0.05 | 11.598 |
| | | 0.05~0.075 | 2.508 |
| | | 0.075~0.1 | 3.886 |
| | | 0.25~0.5 | 3.886 |
| | 粗粒径 (C) | 1~2.8 | 2.081 |
| | | 2.8~14 | 2.155 |

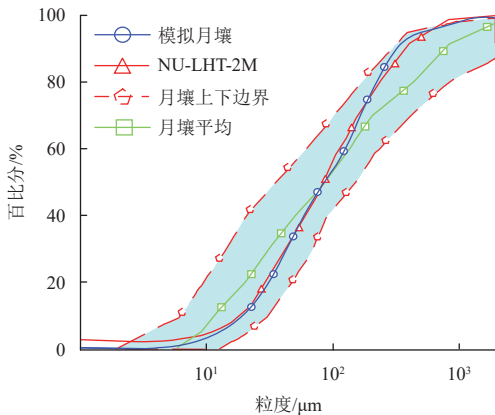


图 5 模拟月壤粒度累计曲线

Fig. 5 Lunar regolith simulation grain size accumulation curve

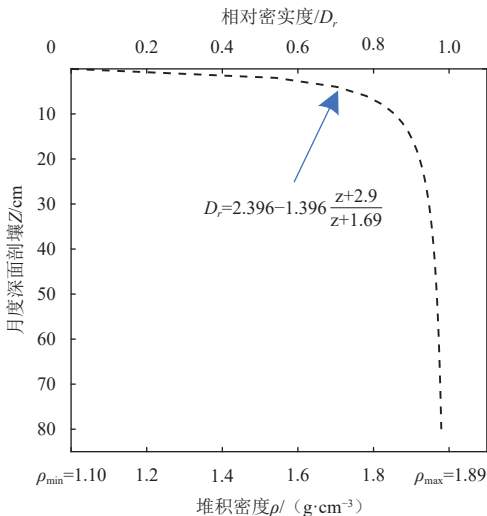


图 6 月壤剖面深度与密度

Fig. 6 Depth and density of lunar regolith profile

本文模拟月壤样本制备流程:按照粒径级配混合模拟月壤,在热风烘箱110℃的环境下烘干去水8h。根据目标深度区间平均月壤密度与相对密度之间的关系,采用分层压实方式在常温状态下制备相对密度为65%和75%的模拟月壤样本^[20]。

同时,为验证采样铲针对月壤水冰样本的采样性能,采用文献^[20]描述的样本制备方法,制备了含水率2wt%的模拟月壤水冰样本,并开展刮取采样试验。

2.2 试验测试平台设计

为验证该采样方案的可行性,测试采样铲功能,本文搭建模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台,如图7所示。主要由机械运动系统和数据采集及控制系统组成,其中机械运动系统包括进尺、摆转、回转与切削机构4部分。基于该平台开展了渐进式铲挖效能测试、定容式微量采样与振动式送样试验。

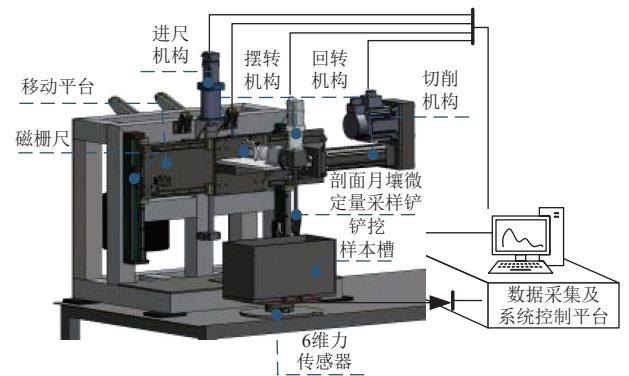


图 7 模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台

Fig. 7 Shovel dredge sampling performance testbed for lunar regolith simulation profiles

采样铲安装于回转机构末端,由进尺与切削机构通过系统控制平台实现联动,完成预定轨迹铲挖动作,进行渐进式铲挖,并由6维力与数据采集平台记录铲挖过程中的力载数据。当构建一定深度的剖面时,进尺机构将采样铲进行贯入,实现样本的采集,并由回转和摆转机构实现所采集样本的转移送样,完成单次剖面构建、采样和送样任务。模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台参数如表7。

表 7 试验台参数

Table 7 Test bench parameters

| 性能参数名称 | 参数取值 |
|----------------------------|----------|
| 切削速度/(mm·s ⁻¹) | 0~220 |
| 进尺速度/(mm·s ⁻¹) | 0~20±0.1 |
| 水平行程/mm | 180 |
| 铲挖深度/mm | 150 |

3 试验及结果分析

3.1 剖面铲挖试验

采样铲对模拟月壤铲挖, 模拟其铲挖轨迹, 如图8所示。在模拟月壤为65%密实度时, 该铲挖过程的轴向力与水平推力力载曲线如图9所示。深度130 mm铲挖过程水平推力变化的曲线如图9(a)所示, 通过力载曲线可知, 水平推力最大为17 N左右, 随着铲挖深度的增加, 水平推力呈现上升趋势。铲挖深度为125~130 mm过程中水平推力变化曲线如图9(b)所示, 水平推力在采样铲进行V型向下铲挖过程中缓慢增加, 随后存在一段波动, 再由U型向上铲挖过程中呈现减小趋势。深度为130 mm铲挖过程中轴向力的变化曲线如图9(c)所示, 随着铲挖深度的增加, 轴向力呈现上升趋势, 由于临界尺度颗粒与大颗粒的存在, 力载数据出现了波动, 绿色虚线部分为铲挖过程失效月壤重力, 由于样本槽尺寸有限, 无法堆积过多失效月壤, 需通过毛刷将该部分失效月壤扫出样本槽。铲挖深度125~130 mm过程中轴向力变化曲线如图9(d)所示, 在铲挖阶段轴向力存在一定波动, 随铲挖深度的增加, 轴向力变大, 在铲挖达到单次最深处时, 轴向力达到峰值。通过渐进式铲挖过程剖面构建阶段, 不同深度铲挖的过程如图10所示。

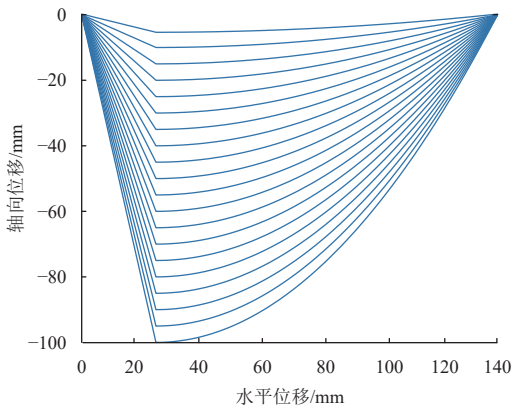
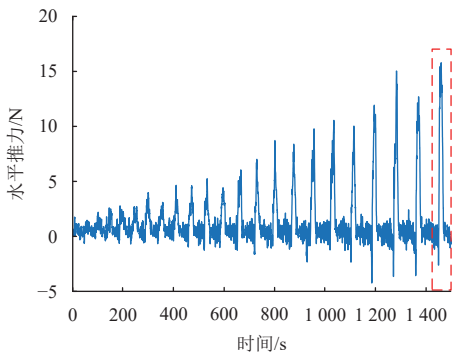
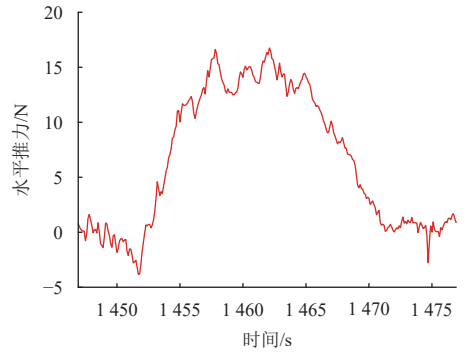


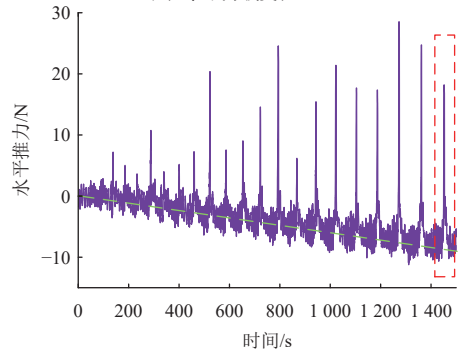
图 8 铲挖轨迹 (100 mm)
Fig. 8 Shovel track (100 mm)



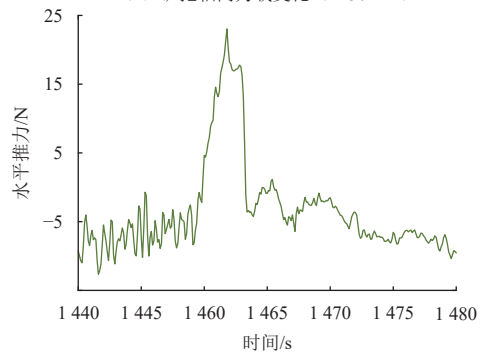
(a) 铲挖水平力载变化 (-130 mm)



(b) 铲挖水平力载变化 (125~130 mm)



(c) 铲挖轴向力载变化 (-130 mm)



(d) 铲挖轴向力载变化 (125~130 mm)

图 9 铲挖力载变化曲线图

Fig. 9 Shovel digging force load change curve

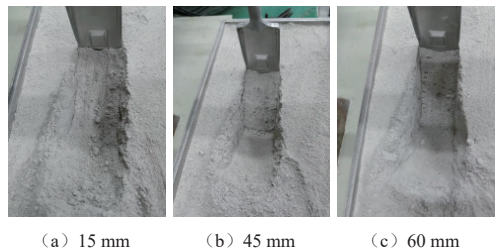
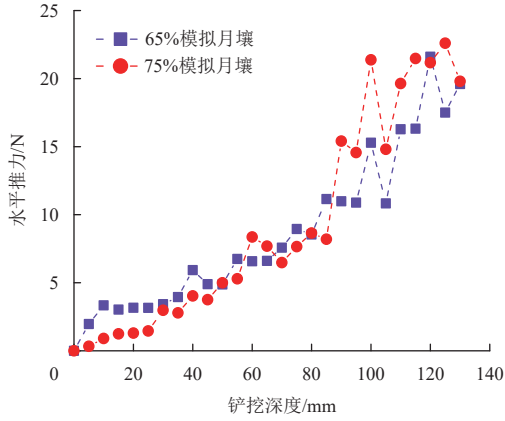


图 10 不同铲挖深度

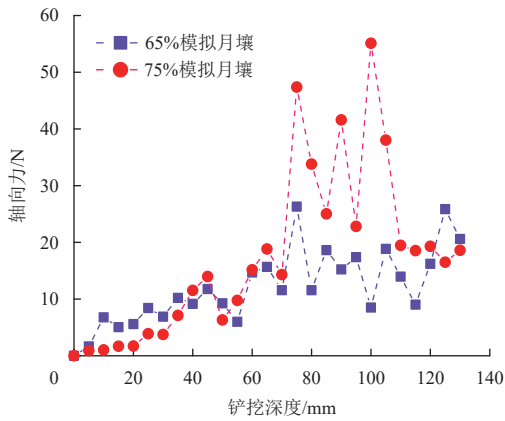
Fig. 10 Different shovel depths

提取单次铲挖过程的力载峰值, 得到铲挖深度与力峰值点之间的关系。密实度为65%与75%时, 对模拟月壤进行深度为130 mm铲挖, 其轴向力与水平推力的变化曲线如图11所示。由图11(a)可知, 在密实度为65%与75%时, 水平推力整体趋势随铲挖深度增加而变大, 在该过程中波动较小, 在深度达到130 mm

时,最大力载可达到24 N;由图11 (b)可知,在密实度为65%与75%时,轴向力趋势随铲挖深度加深而变大,该过程中出现较大的波动,密实度越高波动性越大,最大轴向力达到55 N,造成该原因是高密实度模拟月壤样本的压缩性小,颗粒对采样铲的轴向反力大。



(a) 不同密实度水平力变化



(b) 不同密实度轴向力变化

图 11 不同密实度铲挖深度的力载变化图

Fig. 11 Variation of force loads for different compactness of shovel excavation depths

3.2 贯入采样试验

采样铲在完成剖面构建后,需通过贯入方式对指定深度的月壤采样,如图12 (a)所示。采样铲对指定深度模拟月壤进行10次采样的结果如图13所示。从图12中可以观察到,通过多腔式定量采样槽采集的模拟月壤,其采样量均值在208 mg,10次采样中最大值为221 mg,最小值为188 mg,采样量均在目标采样区间内,未出现超出采样量上下限的情况。

同时为验证采样铲采样能力,针对粒径区间在0.025~1 mm的不同模拟月壤原料(如图12 (b))进行10组采样,绘制采样量箱体图,结果如图12 (c)所示,采样量的分布区间、中位线、上下边缘与数据异常值。在粒径区间为0.025~1 mm内,随着粒径增大,

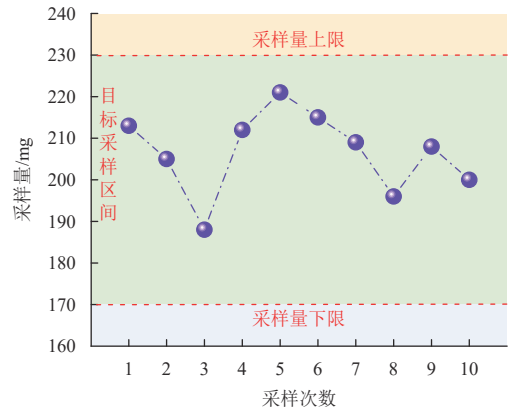
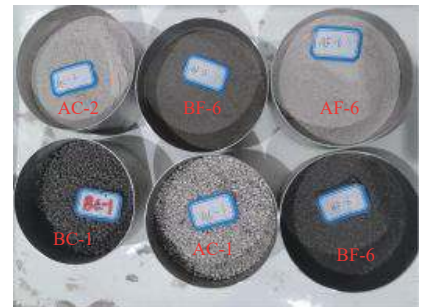


图 12 采样铲对模拟月壤的采样量

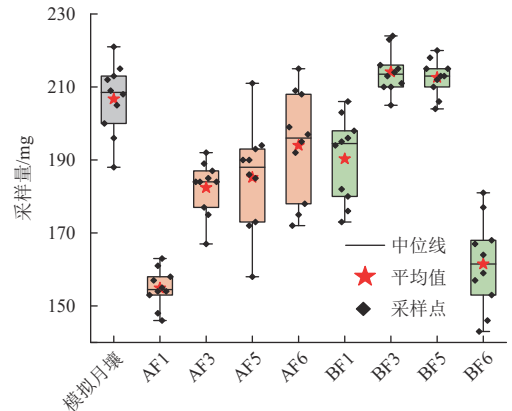
Fig. 12 Sampling volume of simulated lunar soil by sampling shovels



(a) 采样铲进行贯入采样



(b) 模拟月壤原料



(c) 模拟月壤及原理采样箱体图

图 13 模拟月壤及原料与采样量

Fig. 13 Lunar regolith simulation, raw materials and sampling quality

斜长岩的采样量均值呈上升趋势, 而玄武岩由于颗粒表面的黏附性较低存在一定的波动。当粒径大于1 mm时, 对模拟月壤原料采样失败率高, 无法完成正常采样。

由于极区月壤剖面可能存在月壤水冰, 为验证采样铲针对月壤水冰样本的采样性能, 对模拟月壤水冰开展摸索性采样试验。由于月壤水冰的机械强度高, 采用上述贯入采样方式, 存在采样能力弱、作业反力大的问题, 为此可通过采样铲的铲齿刮取破碎月壤水冰, 形成月壤水冰碎屑堆, 实现月壤水冰采集。

针对2 wt%含水率的模拟月壤水冰, 采用采样铲刮取的方式构建剖面(如图14(a)), 形成了深度为5 mm的剖面, 并在采样坑的一侧堆积了一定坡度的水冰碎屑(如图14(b)), 采样铲通过挤压等方式, 将月壤水冰碎屑采集至采样槽内(图14(c))。



(a) 采样铲刮取月壤水冰过程 (b) 采样铲构建月壤水冰剖面



(c) 采样铲对月壤水冰采样

图 14 采样铲针对月壤水冰进行采样

Fig. 14 Sampling shovel for sampling lunar regolith water ice

将采样槽内的模拟月壤样本经激光粒径分析, 结果如图15, 可知随着粒度的增加, 样本体积分布呈现先增加再减小, 再次增大再减小的趋势。所采集的模拟月壤样本, 80.34%粒径低于0.1 mm, 99.41%低于1 mm, 样本颗粒最大粒径1.45 mm。

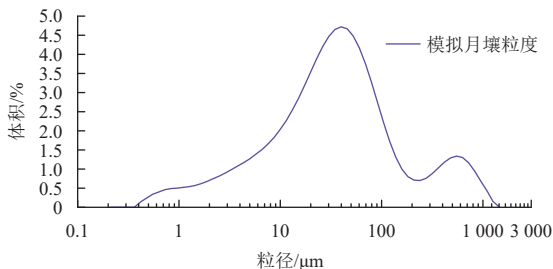


图 15 采样槽内模拟月壤粒度分布

Fig. 15 Simulated particle size distribution of lunar soil in a sampling tank

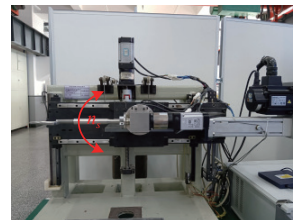
3.3 振动式送样试验

通过采样铲采集的月壤样本, 需要转移到分析仪器。为模拟机械臂的振动送样过程, 由模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台对样本转移送样, 采样铲采集模拟月壤的样本后, 通过摆转机构将采样铲转动到水平状态, 随后采样铲在水平方向以60 r/min的摆动角速度, 进行±10°的摆动, 达到水平状态时急停, 样本从采样槽中脱落, 完成送样过程。

为采样铲进行振动式摆转送样过程如图16所示。其中, 图16(a)为采样铲旋转至水平位置时, 定量采样槽内样本无明显脱落; 图16(b)为在水平状态按照上述动作, 振动摆转后急停, 定量采样槽内样本掉落; 图16(c)进行振动送样后, 定量采样槽内样本无存留。



(a) 采样铲摆动水平位置



(b) 振动式摆转送样



(c) 采样铲内样本脱落

图 16 振动式摆转送样

Fig. 16 Vibratory oscillating sample delivery

4 结 论

本文以探月工程四期对月球极区月壤挥发物赋存特性科学载荷探测任务为输入, 以极区月壤特性为目标制备模拟月壤, 分析极区采样任务背景与技术约束, 结合国内外月球极区采样方案, 提出了一种基于机械臂末端搭载的渐进式铲挖容腔采样方案, 搭建了模拟月壤剖面铲挖采样效能测试平台, 开展对采样铲方案可行性验证试验。

1) 提出一种基于机械臂末端搭载的渐进式铲挖容腔采样方案, 并设计了一种铲、采共体的剖面月壤微定量采样铲, 可完成指定深度区间的微定量采样任务。

2) 提出一种渐进式铲挖方式, 可在有限延展空间内构建月壤剖面, 减少作业反力, 降低能耗。

3) 通过采样铲的多腔式定量采样槽构型设计, 可

完成微量采样任务;由振动摆转送样方式可完成送样任务,采样量以及采样精度均满足预期。

4)在极端工况遇到月壤水冰的情况下,可通过铲齿刮取的方式构建一定深度剖面,并对破碎后的月壤水冰碎屑进行采样。

参 考 文 献

- [1] ZOU Y, LIU Y, JIA Y. Overview of China's upcoming Chang'E series and the scientific objectives and payloads for Chang'E-7 mission[C]//Proceedings of 51st Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston: AIAA, 2020 (2326): 1755.
- [2] 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 J, ZHANG W W, YANG X, 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.
- [3] 张伟伟,姜生元,李鹏,等.月壤剖面锥形螺旋刃成孔钻头设计[J].宇航学报,2016,37(12):1347-1355.
- ZHANG W W, JIANG S Y, LI P, et al. Design of a screw-coned drill for lunar regolith drilling mission[J]. Journal of Astronautics. 2016, 37(12): 1347-1355.
- [4] 邓湘金,郑燕红,金晟毅,等.嫦娥五号探测器月面铲挖采样前后状态变化分析[J].宇航学报,2021,42(8):1004-1014.
- DENG X J, ZHENG Y H, JIN S Y, et al. Changes in sampling sites before and after digging in Chang'e-5 mission[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(8): 1004-1014.
- [5] 姚猛,郑燕红,赵志晖,等.一种月表采样器合理铲挖深度的研究[J].航天器工程,2017,26(3):50-56.
- YAO M, ZHENG Y H, ZHAO Z H, et al. Research on reasonable excavation depth for lunar regolith sampler[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(3): 50-56.
- [6] 姜水清,刘荣凯,林云成,等.铲挖式表层月壤采样器设计与试验[J].中国空间科学技术,2019,39(1):49-58.
- JIANG S Q, LIU R K, LIN Y C, et al. Design and test of a sampler for lunar surface regolith[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 39(1): 49-58.
- [7] PAULSEN G, MANK Z, WANG A, et al. The regolith and ice drill for exploration of new terrains (TRIDENT): a one-meter drill for the lunar resource prospector mission[C]//Proceedings of 44th Aerospace Mechanisms Symposium. Cleveland: NASA, 2018.
- [8] LITVAK M L, KOZLOVA T O, ILYIN A G, et al. Ground-based testing of the lunar manipulator complex of the Luna-25 project[J]. Solar System Research, 2021, 55: 605-619.
- [9] LITVAK M, KOZLOVA T, ILYIN A, et al. Luna-25 robotic arm: results of experiment with analog of lunar regolith in lunar like conditions[J]. Acta Astronautica, 2022, 200: 282-290.
- [10] SEFTON-NASH E, FISACKERLY R, Fisackerly R, et al. The ESA PROSPECT payload for Luna 27: development status[EB/OL]. [2021-7-21](2023-8-17). <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2021/>
- EPSC2021-291.html.
- [11] 崔建国,田野,刘君巍,等.月壤临界尺度颗粒运移特性对钻采阻力影响研究[J].岩土工程学报,2021,43(9):1715-1723.
- CUI J G, TIAN Y, LIU J W, et al. Influence of particle transport characteristics on drilling resistance of lunar soil at critical scale[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1715-1723.
- [12] ROBERT J G, BRANT C W, MARTY A G. Development of a high fidelity lunar soil simulant[J]. Space and Applications International Forum, 2008(6): 213-220.
- [13] HONNIBALL C I, LUCEY P G, LI S, et al. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(2): 121-127.
- [14] 李雄耀,魏广飞,曾小家,等.极区月壤和水冰形成演化机制及物理特性研究[J].深空探测学报(中英文),2022,9(2):123-133.
- LI X Y, WEI G F, ZENG X J, et al. Review of the lunar regolith and water ice on the poles of the Moon[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 123-133.
- [15] LAWRENCE D J. A tale of two poles: toward understanding the presence, distribution, and origin of volatiles at the polar regions of the Moon and Mercury: polar volatiles at the Moon and Mercury[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(1): 21-52.
- [16] BASU A, RIEGSECKER S. Modal mineralogic distribution in the regolith at Apollo landing sites[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E2): 4361-4368.
- [17] CARRIER III W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 956-959.
- [18] ZENG X W, HE C M, WILKINSON A. Geotechnical properties of NT-LHT-2M lunar highland simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, 23(4): 213-218.
- [19] HEIKEN G, VANIMAN D S, FRENCH B M, et al. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [20] 赵宇,季节,田野,等.含冰模拟月壤切削负载试验研究[J].深空探测学报(中英文),2022,9(6):606-616.
- ZHAO Y, JI J, TIAN Y, et al. Experimental study on cutting load of simulated lunar soil containing ice[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 606-616.

作者简介:

段张庆(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:地外天体采样探测等。

通信地址:哈尔滨市松北区学海街1号哈尔滨商业大学(150028)

E-mail: dzqing996544566f@163.com

张伟伟(1988-),男,副研究员,主要研究方向:星球采样机器人技术、星壤物性原位探测技术与星球水冰资源利用技术。**本文通信作者。**

通信地址:哈尔滨市南岗区一匡街2号哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)

E-mail: zweier@hit.edu.cn

Shovel Design and Testing for Micro-Quantitative Sampling of Shallow Moon Soil

DUAN Zhangqing¹, ZHANG Weiwei², WANG Chu³, TIAN Ye¹,
GONG Xuejian³, JIANG Shengyuan², ZHANG Yunfeng⁴

(1. School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

4. Beijing Spacecraft Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In situ high-precision analyses of volatile abundance in lunar soil in the lunar polar regions require micro-quantification of test samples. In this paper, a sampling shovel scheme based on the end of a robotic arm was proposed. A shallow lunar soil profile was constructed by progressive shovel digging, micro-quantitative collection of lunar soil samples at fixed depths was achieved through the configuration of a fixed-capacity sampling chamber, and the shovel teeth could be used to scrape the debris formed by the water ice of the lunar soil for sample collection in extreme cases. To verify the feasibility of the sampling scheme, a simulated lunar soil profile shovel-digging sampling efficiency test platform was built, and progressive shovel-digging, fixed-capacity micro-sampling, and vibratory sampling tests were carried out. These tests show that the sampling shovel has the capability of constructing a 130 mm deep profile and a 200 ± 30 mg micro-quantitative sampling function. The research results provide a feasible scheme for the exploration and analysis of China's lunar soil sampling in the polar regions of the Moon.

Keywords: polar regions of the moon; cutaway shovel digging; sampling shovel; micro-quantification

Highlights:

- A volumetric cavity shovel digging scheme based on the end-mounted robotic arm was proposed to design an integrated shovel and mining shovel for micro-quantitative sampling of profiled lunar soil.
- A profiling shovel-digging sampling efficiency test-bed simulating lunar soil was built and disassembly tests were conducted to verify the feasibility of the scheme.
- A progressive shovel digging method was proposed, which can effectively reduce the operational reaction force and energy consumption of the sampling shovel during the construction of lunar soil profiles in the weathered layer of the polar region.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]