



## 月球极区水冰采样探测技术综述

季 节, 张伟伟, 杨 旭, 刘君巍, 马如奇, 孙 京, 姜生元

## Overview of Water Ice Sampling and Detection Techniques in the Lunar Polar Region

Ji Jie, ZHANG Weiwei, YANG Xu, LIU Junwei, MA Ruqi, SUN Jing, and JIANG Shengyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210151>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 月球极区钻取采样技术

Research of Drilling and Sampling Technique for Lunar Polar Region Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 278-289

#### 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展

Research Prospects of Lunar Polar Water Ice Resource In-Situ Utilization

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 241-247

#### 月球水冰探测

Lunar Water-Ice Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 290-296

#### 月球极区探测的主要科学与技术问题研究

Research on the Main Scientific and Technological Issues on Lunar Polar Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 223-231

#### 月球极区探测轨道设计

Orbit Design for Lunar Polar Region Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 248-254

#### 多器联合月球极区探测通信系统设计

Analysis and Design of the Communication System for Multi-Probes Joint Lunar Polar Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(4): 384-390



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# 月球极区水冰采样探测技术综述

季节<sup>1</sup>, 张伟伟<sup>2</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 刘君巍<sup>2</sup>, 马如奇<sup>1</sup>, 孙京<sup>3</sup>, 姜生元<sup>2</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 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;  
3. 中国卫通集团股份有限公司, 北京 100190)

**摘要:** 面向月球水冰科学探测需求, 根据月球极区环境及水冰特性, 总结了实施月球极区水冰采样探测任务面临的挑战及所需的关键技术。根据水冰采样点选址预判需求, 概述了力学触探、热电物性触探、雷达探测、光谱探测、中子谱探测5种方法; 面向表层暴露水冰采样需求, 阐述了铲挖式、浅钻式、磨削式3类表取采样技术; 根据次表层埋藏水冰采样需求, 概括了星壤次表层潜入技术体系, 介绍了集成传感、挥发分提取、星表取钻屑、钻头外取屑、钻头内取屑、取芯6类钻进采样技术。对中国实施月球水冰采样探测任务技术途径提出了建议。

**关键词:** 月球极区; 月球水冰; 采样; 原位探测

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2022)02-0101-13

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210151

**引用格式:** 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.

**Reference format:** 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.

## 引言

月球永久阴影区中可能存在的大量水冰具有重要的科学意义与利用价值<sup>[1]</sup>。通过分析月球水冰中氢元素的同位素丰度, 可探究月球水的来源和演化机制, 反演地月系统的起源与演化历史; 月球上的水冰未来可能成为人类月球活动重要的资源, 月球水资源的开采与利用、极区无人或载人月球基地的构建与运行、以月球作为前进基地制取燃料前往更远的深空等<sup>[2-3]</sup>工程设想提出。

目前月球极区水冰探测结果主要基于雷达、中子、光谱等轨道遥感手段获得, 存在探测精度低、空间分辨率低、信噪比低等问题, 难以获得精细的月球极区水冰分布与含量信息。对月球水冰的最终证认、精细勘察、资源开采与原位利用, 需要依靠前往月球极区或永久阴影坑内的着陆就位采样探测任务<sup>[4]</sup>。美国、俄罗斯等都瞄准了月球南极地区或永久阴影区中的月壤开展水冰钻取采样与原位样品分析<sup>[5-8]</sup>和资源利用。中国也计划实施探月四期工程, 对月球南极地区综合环境特别是永久阴影区中水冰的存在性进行探测<sup>[9]</sup>。未来国内外计划实施的月球水冰着陆就位探测任

务如表1所示。

地外天体的采样是一类与目标对象特性及所处环境高度关联的探测活动。本文主要面向月球水冰科学探测需求, 根据当前对月球极区水冰的共性认识, 总结出实施采样探测的难点与关键技术, 并对月球水冰就位预判表面采样、埋藏水冰采样等关键技术的实施途径进行综述, 给出了研究的方向。

## 1 极区探测的挑战与关键技术

### 1.1 水冰采样探测面临的挑战

月球水冰主要赋存在月球极区的永久阴影区。极区环境与月球中低纬光照区有显著不同, 这给探测任务带来了新的挑战; 另一方面, 环境的不同也使得月壤中的水冰具有特殊的赋存分布和物理力学特性。

#### 1) 低温月球冻土强度高且易受热挥发

在月球高真空环境下, 水冰的挥发速度与温度有关, 半径0.1 mm的冰粒在大于170 K时即会迅速挥发损失<sup>[12]</sup>; 而冰的长期稳定赋存需要温度低于110 K (Formisano等<sup>[13]</sup>研究表明对于时长100 min的采样过程可放宽至123 K), 仅有月球永久阴影区或部分地下冷阱中才能长期满足温度条件<sup>[14]</sup>。按力学苛刻度最高的

表1 未来月球极区水冰着陆就位探测任务概况

Table 1 Overview of in-situ exploration missions for water ice in lunar polar region

任务	研制方	发射时间	水冰探测目标	任务类型	目标探测区	采样装置
PRIME-1 <sup>[6]</sup>	美国	2022.12	VIPER关键技术验证先导任务, 并对光照区埋藏水冰进行钻取采样探测	着陆器	南极光照区, 具体选址未公布	1 m钻机(与VIPER相同)
Luna 25 <sup>[7]</sup>	俄罗斯+ESA	2022	对月球极区月壤中埋藏的浅层水冰进行采样探测	着陆器	南纬70°光照区 <sup>[10]</sup>	机械臂表采
VIPER <sup>[5]</sup>	美国	2023.11	对月球南极PSR水冰进行采样分析, 测定水和氢同位素丰度, 了解水的赋存和来源	着陆器+月球车	南极Nobile坑西侧高山上的千米级直径永久阴影坑	1 m钻机
嫦娥七号 <sup>[9]</sup>	中国	未来5 a内	获得月球极区月壤中挥发分含量和水中氢同位素丰度, 证认水冰的存在并了解来源	着陆器+月球车飞跃器	着陆于南极光照区, 飞跃进入永久阴影区	未见报道
Luna 27 <sup>[8]</sup>	俄罗斯+ESA	2025	对月球极区月壤中埋藏1~2 m的水冰进行采样探测	着陆器	>南纬80°的光照区 <sup>[11]</sup>	机械臂表采+1 m钻机
Artemis III	美国	不早于2025	有人参与的月球永久阴影区水冰资源开采和原位利用	载人月球探测	靠近永久阴影区的光照区	多种宇航员操作的采样工具

情况, 基于月球水冰与月壤颗粒处于冷冻胶结状态的“月球冻土”假说, 大量的月球冻土地面模拟样本制备及力学特性测试结果显示在含水率12.07 wt%、密度1.85 g/cm<sup>3</sup>、温度77 K条件下, 模拟月球冻土样本单轴抗压强度可达37.15 MPa<sup>[15-16]</sup>, 与中硬岩石相当。这要求采样机具能破碎硬质冻土, 同时要控制好采样作业过程中的温升, 防止水冰受热大量挥发损失。

## 2) 月球极区水冰的赋存分布具有随机性

基于月球极区水冰遥感探测数据, 结合水冰冷阱捕获沉积、热冰泵、撞击搅拌等演化机制和极区热环境分析, 月球水冰可能赋存于永久阴影区内的月壤表面以及极区的地下冷阱中, 其形态可分为表面暴露水冰和地下埋藏水冰两类<sup>[17-18]</sup>。受轨道遥感空间分辨率差、信噪比低等限制, 探测数据中所获得的月壤水冰分布结果是一定区域内的平均结果, 不能代表采样作业点局部的水冰赋存情况, 可能存在局部区域内的水冰随机分布的情况。

## 3) 月球永久阴影区内探测器能源有限

中国深空探测器主要依靠太阳能电池供电, 但永久阴影区内终年无光照, 探测器无法获取能源, 只能在坑外光照区充满蓄电池后进坑作业, 单次作业时间十分有限。另外由于永久阴影区内温度可低至40 K, 探测器电子器件等温度敏感设备的主动热控措施也需消耗大量能源, 探测器的能源较紧张。

## 1.2 水冰采样探测的关键技术

### 1) 表面与埋藏水冰复合采样技术

月球极区水冰可能同时赋存于永久阴影区的表面和埋藏的地下冷阱中, 为提高采样探测任务的成功率, 采样探测机具需通过功能复合、异构备份等方式, 具备对表面和埋藏水冰的复合采样能力。

### 2) 高效能采样及自主作业规程技术

探测器在阴影坑工作时, 能源有限、工作时间紧

张, 传统的地面遥操作模式难以满足时效要求。因此采样探测机具需提高对硬质冻土的破碎及采样效率并具备在轨全自主作业能力, 可实时根据作业工况调整作业规程参数, 对可能的故障进行自主识别和排除, 节约地面控制人员工况研判、分析和决策的时间。

### 3) 含冰月壤样本高保真采样技术

含冰月壤样本的保真度是保证水冰探测科学品质的重要前提。通过方案设计与动作规划减少采样过程中含冰月壤样品与周围无水月壤的混杂(包括深层样品采集的层序保持), 还需防止作业温升导致水冰大量挥发损失。对于后者, 基于随钻温度监测的采样规程控制(温升过快时降低钻速或暂停)将钻孔温度控制在低于水冰挥发温度是有效的手段<sup>[19]</sup>。

### 4) 月球水冰采样点选址预判技术

月球水冰可能存在局域随机的赋存分布特性, 为提高成功率, 需通过力、热、电、雷达、光谱、中子谱等手段对局域水冰的存在性进行就位探测, 支持采样点的选址。

## 2 月球水冰就位预判探测技术

### 2.1 月球水冰力学触探技术

月球冻土力学反演方法基于月壤颗粒与水冰处于冷冻胶结状态这一假说, 通过测量机具与月壤作用的负载, 结合机—土作用模型对月壤力学参数反演, 并与月球冻土预期具有的力学特性关联来实现水冰含量的辨识。

Zacny等<sup>[20]</sup>基于月球冻土预期具有较高强度的特性, 提出将钻进单位体积月壤所消耗的比能耗与钻进对象的单轴抗压强度关联, 再结合不同含水量的模拟月球冻土单轴抗压强度测试结果, 即可对月壤中水冰的含量辨识。这种方法的前提是月球冻土的单轴抗压

强度不超过50 ~ 60 MPa，与可达100 MPa以上的月球玄武质岩石有明显差异。但钻进比能耗时受钻具构型和钻进规程的显著影响，需在特定的工况下进行专门标定。

月球冻土可能具有深低温下的硬脆、空间分布的缓变与相对均质特性，本文提出一种基于月球冻土力学触探的联合辨识方法框架，如图1所示。利用钻进力载时域突变信号识别地层界面，基于钻进力载荷频域分析识别钻进对象的脆性破坏特征和均质特征，并将上述各种只能对月球冻土单项力学特征进行辨识的触探方法联合使用、综合分析，从而得出月壤水冰存在性的判断结论。

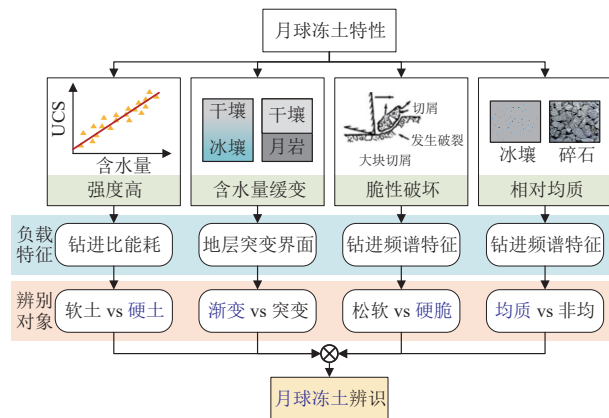


图 1 基于力学特性的月球冻土联合辨识方法

Fig. 1 Joint identification method for icy lunar regolith based on mechanical characteristics

### 2.2 月球水冰热电物性触探技术

热电物性触探方法主要是通过主动激励测量含冰月壤的热学（热容、热导率等）和电学（电阻/电导率、介电常数等）特性参数。由于水冰与月壤矿物在热学、电学参数方面的显著差异，月壤中少量存在的水冰也会使得整体热学、电学参数产生变化，可用于估算月壤中水冰的含量。针对地外天体水冰对象的热电物性探测通常情况是将两种方式联合使用，主要有美国国家航空航天局（National Aeronautics Space and Administration, NASA）发射的“凤凰号”（Phoenix）探测器携带了的土壤热特性和电导率探测器（Thermal Electrical Conductivity Probe, TECP），欧洲航天局（European Space Agency, ESA）发射的“菲莱号”（Philae）探测器上携带的星壤热电物性探测仪器，及俄罗斯Luna 27 ProSEED（PROSPECT's drill）钻机携带的月壤介电传感器。

“凤凰号”着陆器机械臂末端安装了一台用于测量火星壤热电物性的TECP仪器，如图2所示。测量星壤电学参数时，其4探针中探针1、2测量电导率，探针

3、4测量介电常数；测量热学参数时，探针1主动加热，利用探针1、2与参考探针4测量的温度差计算获得星壤热导率和热容<sup>[21]</sup>。

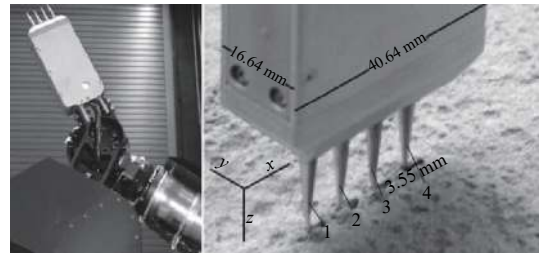


图 2 “凤凰号”火星土壤热电物性探针TECP<sup>[21]</sup>  
Fig. 2 TECP thermoelectric probe of Phoenix Mars lander<sup>[21]</sup>

“菲莱号”着陆器搭载了用于67P彗星科学探测的多用途传感器MUPUS，包括一个测量彗星次表层力学特性和热特性的MUPUS-PEN穿透器，通过锤击机构插入彗星表面，沿深度方向布置16个聚酰亚胺薄膜基钽温度传感器来测量星壤热流<sup>[22]</sup>。“菲莱号”搭载的表面电学探测和声学监测实验仪器包（Surface Electrical Sounding and Acoustic Monitoring Experiment, SESAME）还包括一套对彗星表面进行电学测量的介电常数传感器，采用的是包括3个发射电极和2个接收电极的5电极配置<sup>[23]</sup>。

Luna 27的ProSEED钻机在钻杆上集成了基于介电传感原理的月壤水冰传感器，其电极组件集成在钻杆侧壁上距离钻头约40 cm处（钻杆前部空间被采样驱动机构占据），如图3所示。传感器监测交流电极电流，通过测量含冰月壤极低频（1.5 ~ 100 Hz）介电常数的方法实现水冰的随钻传感探测<sup>[24]</sup>。

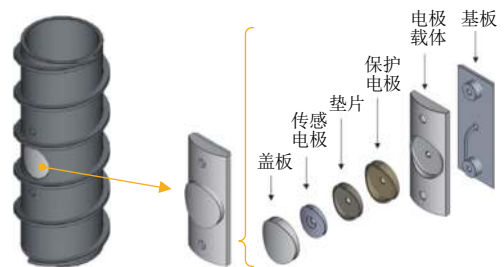


图 3 Luna 27 ProSEED钻机中的介电传感器<sup>[24]</sup>  
Fig. 3 Permittivity sensor in Luna 27 ProSEED drill<sup>[24]</sup>

### 2.3 月球水冰雷达就位探测技术

冰冻挥发物具有全内反射性质，可使反射信号中的电磁波保持原来的极化方式。向含冰的月壤发射极化电磁波后，接收到的回波信号具有高比例的同向极化信号，即高圆极化比（Circular Polarization Ratio, CPR）。但因为除水冰外，其它的散射机制（如大入



射角、月表粗糙度、二次反射等)也可导致CPR增大,基于雷达的月球极区水冰探测结果往往遭受质疑。“克莱门汀号”(Clementine)、“月船一号”(Chandrayaan-1)、“月球勘测轨道飞行器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)等搭载雷达对月球进行了多次轨道遥感探测,“嫦娥一号”“嫦娥二号”也获取到了部分可能与水冰相关的异常回波信号。“玉兔号”月球车携带的月球穿透雷达首次通过车载移动探测形式,对月面行走路径下方的月壤剖面进行探测,通过岩石与月壤界面的反射信号,获取了月球地下岩石的分布信息<sup>[25]</sup>。

通过车载雷达回波CPR增强的现象,对永久阴影区地下富集水冰的地层进行探测,为下钻点选择提供依据,原理上具有可行性。雷达探测还存在数据噪声多、信噪比较低、解译时间长、难以实施获取探测结果,且会由于月壤参考介电常数的偏差引起系统误差等问题,对于应用到月球水冰就位探测是不利的。

## 2.4 月球水冰光谱就位探测技术

水冰与月壤矿物具有不同的吸收光谱,利用光谱技术对疑似含冰月壤进行探测,通过检查光谱信号中是否存在与水冰相关的特征吸收光谱,即可判断是否存在水冰,或许还可估算水冰的含量。

NASA对与月球极区同属高地类型、矿物组分和光谱特性相似的“阿波罗16号”月壤样品和纯水冰进行了近红外光谱测量<sup>[26-27]</sup>,结果如图4所示。水冰在1.5、1.8、2.0、2.2  $\mu\text{m}$ 附近存在与月壤显著区别的近红外光谱特征,可作为红外探测的依据。

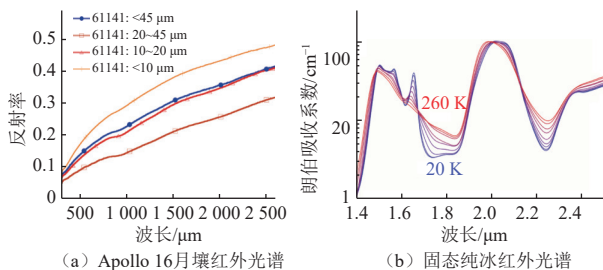


图4 月壤与冰的红外光谱特征<sup>[26-27]</sup>

Fig. 4 Infrared spectral feature of lunar regolith and ice<sup>[26-27]</sup>

挥发物调查极区探索巡视器(Volatiles Investigating Polar Exploration Rover, VIPER)月球车搭载了一台用于探测月壤水冰的近红外挥发物光谱仪系统(Near InfraRed Volatiles Spectrometer System, NIRVSS),在钻孔过程中对排至月表的样品通过含水量评估来决定是否采样<sup>[28]</sup>。NIRVSS的光谱探测范围1.6~3.4  $\mu\text{m}$ ,钨丝灯产生连续波段的宽谱光源照射样品,用光栅对接收的反射光进行色散处理获得光谱

图。其钨丝灯光源导致系统功耗较高,长时间照射还可能使月壤温升过高导致水冰挥发损失;接收端需要多波段分光光栅,不利于仪器的小型化。

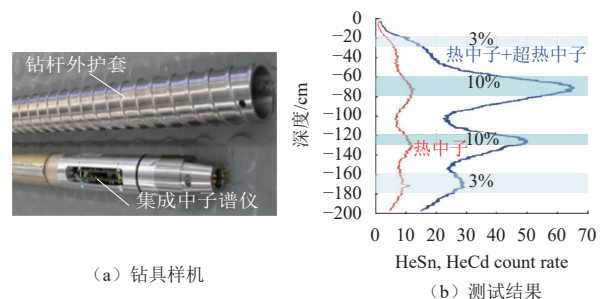
如果仅用于水冰探测,无需获得连续光谱,仅对几个水冰特征吸收峰和吸收谷所在的波长进行反射光强差分测量,也可实现水冰探测。这种方法简化了仪器,有利于小型化,可实现多样化的搭载形式(如集成至机械臂前端或钻杆内部)。Lunar CubeSat卫星上搭载了一台基于多波长差分探测原理的红外光谱仪,选取1 064、1 495、1 850及1 990 nm探测波长,采用4个单色激光器作为光源,体积小、质量轻,功耗低,利用时分复用原理,4个波段复用同一套光路收发装置,进一步减小了工程代价<sup>[29]</sup>。

除红外波段,水冰与月壤矿物在160~400 nm的紫外波段也具有显著光谱特征。与红外波段比,紫外波段的优势是不需很强的太阳光或主动光源,仅利用恒星或星际介质的散射光即可满足探测需求<sup>[30]</sup>。这种方法也已在月球水冰的轨道遥感探测中得到了应用。

## 2.5 月球水冰中子谱就位探测技术

宇宙射线中存在核物质衰变产生的高能中子,在与氢原子核发生碰撞时会损失最多的能量,转变为较低的超热中子与热中子。通过中子谱仪对一定空间范围内的超热中子和热中子计数即可反映氢元素的丰度,基于氢主要以水冰形式存在的假设,还可间接反映水冰含量。

NASA艾姆斯研究中心与Honeybee等机构联合研制了一种集成中子谱仪的火星钻机BNeuP<sup>[31]</sup>,如图5所示。其搭载的中子谱仪以放射性元素<sup>252</sup>Cf作为中子源,使用气体比例计数管测量热中子通量和超热中子通量,探测地下氢元素的富集区域,从而识别钻进过程中的富冰地层。整个仪器重量仅517 g,功耗2.25 W,总长度686 mm,直径29 mm。BNeuP在2 m深的含冰模拟火星壤地层中进行了钻进与随钻探测测试,结果表明钻机内集成的中子谱仪能够对含水的星壤地层进行准确的识别。



(a) 钻具样机

(b) 测试结果

图5 集成随钻中子谱仪的BNeuP钻具样机与测试结果<sup>[31]</sup>

Fig. 5 BNeuP with neutron spectrometer and test results<sup>[31]</sup>

中子谱仪虽然空间分辨率差，但具有一定的穿透能力，因此也可以搭载于月表探测器的平台上，对周围小范围内地表或地下米级深度内可能存在的水冰进行探测；如果搭载于巡视器对行走路径上的水冰分布进行勘察，可支持采样点的选取。艾姆斯研究中心开发了一种搭载于星球车上的中子谱仪原型样机 SNeuP<sup>[31]</sup>，并最终被选定为VIPER月球车的科学载荷之一，即中子谱仪（Neutron Spectrometer System, NSS）。NSS中子谱仪也采用热中子和超热中子双通道检测方案，整体质量1.9 kg，功耗1.6 W；在月球车以10 cm/s的速度行驶时，含水量检测下限0.5 wt%<sup>[32]</sup>。

中子谱探测的优势是其对月壤具有一定穿透能

力，能探测到存在于地下的水冰；且能够针对氢元素进行探测，是置信度最高的一种方法。雷达探测虽也能穿透月壤，但难以实时获取高置信度的月壤水冰探测结果。光谱探测容易受月壤矿物本底光谱噪声的影响，在低含水率月壤中信噪比低。将月壤水冰就位预判探测的几类方法总结如表2所示。综合各方案探测原理与探测特点，可以得出以下结论：对于表面暴露水冰，红外光谱方法最适合；对于浅层埋藏水冰，中子谱方法是置信度最高，但由于其空间分辨率差无法精确定位，仍需要通过随钻集成的力学、热电物性触探或光谱手段对水冰赋存地层进行随钻探测，从而能够实现较为精确的埋藏水冰样品定位与采集。

表2 月壤水冰就位预判探测方法小结

Table 2 Summary of methods for in-situ detection of lunar water ice

预判方法	力学触探	热电触探	雷达探测	光谱探测	中子谱探测
原理	月球冻土与无水月壤力学特性不同	水冰的热学、电学特性参数与月壤不同	水冰具有全内反射性质，通过雷达回波的CPR探测水冰	水冰在特定波段的吸收光谱特性与月壤不同	通过高能中子与氢核碰撞产生的热中子探测氢元素
优点	力学反馈属采样机具原有功能，无附加工程代价	热电传感器容易与采样机具集成，质量代价小	对地下10 m级埋藏水冰具有穿透探测能力	精度和灵敏度较高，可获得含水率半定量结果；置信度高	对m级深度内氢元素具有专一性探测能力，置信度高
缺点	灵敏度与精度差，置信度低	灵敏度与精度有限，对温度敏感性强	干扰因素多、噪声水平高、数据处理困难	穿透能力弱，仅能探测表面暴露水冰	空间分辨率差，难以精确定位

### 3 月球极区表层水冰采样技术

表取主要是覆盖月壤表层约0.1 m量级深度的采样需求，可达0.2~0.3 m。表取采样器与深层采样器相比，其一般尺寸较小，可以由机械臂搭载运动，在探测器本体不移动的情况下，实现星表的快速多点触达。对于赋存于月球永久阴影区表面的水冰，能够实现表层含冰月壤样品采集的方式主要有铲挖式、浅钻式和磨削式3种途径，如图6所示。

4个转动自由度，其中腕关节1个自由度可以使采样铲绕腕关节转动，实现“铲挖”的动作。

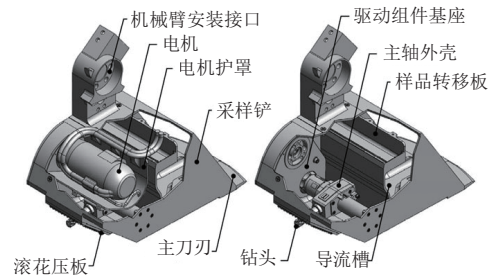


图7 “凤凰号”ISAD 采样器<sup>[34]</sup>  
Fig. 7 ISAD sampler of Phoenix lander<sup>[34]</sup>

俄罗斯Luna 25着陆器也采用了铲挖式的月球表层水冰采样方式。其采样铲搭载于4自由度机械臂末端，通过与钻具的配合实现0.2~0.3 m的挖掘深度，并用铲斗将获取的月壤样品转移至着陆器搭载的激光质谱仪对原位样品分析<sup>[35]</sup>。

铲挖采样一般用较大容积的铲斗以提高挖掘效率，但过大的铲斗又使得其难以实现精确放样，容易出现样品散落问题，也难以精确控制采样量，不利于对月壤含水量的精确测定。如果永久阴影区表面存在硬质的纯水冰霜冻层或与月壤冻结在一起的硬质冻土层，铲挖难以对其破碎，无法获得含冰月壤样品，需通过其他动力破碎方式将冰壤胶结物破为碎屑。

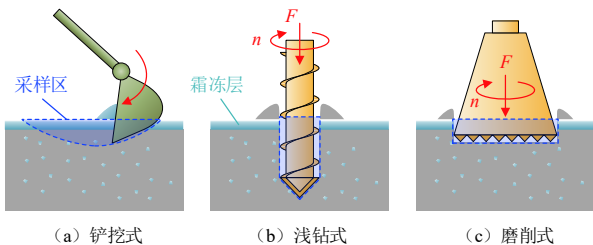


图6 表层水冰采样的3种途径  
Fig. 6 Three ways of surface ice sampling

#### 1) 铲挖式

铲挖方式用于水冰采样最早见于“凤凰号”探测器，在机械臂末端搭载了冻土采集装置（Icy Soil Acquisition Device, ISAD），具有铲挖和浅钻采样功能，主要目标是对火星北极高纬地区火星壤中可能存在的水冰进行探测<sup>[33]</sup>。ISAD采样器的主体是采样铲（scoop），如图7所示。机械臂由2根臂杆组成，具有

## 2) 浅钻式

浅层钻取采样是一种采用回转钻进对星壤、岩石样品进行动力破坏从而获得样品的方式,可用于从具有一定强度的对象中获取样品,钻进深度一般为几毫米至几十毫米。

火星北极地区浅表层土壤中埋藏的水冰处于冻结状态,ISAD采样器的铲斗背后集成了一个小型的冲击钻头(rasp),在采样铲将水冰之上的浮土层去除后对硬质水冰进行钻进破碎,再由采样铲将样品转移至分析仪器<sup>[34]</sup>。

“好奇号”(Curiosity)机械臂末端携带了一台粉末采集钻机系统(Powder Acquisition Drill System, PADS),通过冲击钻进方式对火星岩石采样,钻孔直径16 mm、冲击频率30 Hz、最大冲击功0.8 J、额定钻压力120 N、最大采样深度50 mm<sup>[36-37]</sup>。PADS的采样功能由钻头组件实现,钻头组件的前端是一个带有细长螺旋槽钻杆的小钻头,钻杆外侧有内径6.5 mm的护套。在钻头对岩石钻进破碎时,产生的岩石碎屑沿螺旋槽向上输送,进入钻杆顶端的样品容腔内,并随后在机械臂腕关节转动下,利用重力从样品容腔侧面的开口进入样品处理模块。

“毅力号”(Perseverance)火星车在机械臂末端也搭载了一台岩石磨削/采样钻机(Corer),如图8所示。Corer钻机也采用了冲击钻进方式,冲击频率23~40 Hz可调、钻头额定转速200 r/min、钻压力80~120 N、整机质量23.5 kg<sup>[38]</sup>。与“好奇号”相比,Corer增加了钻取完整岩石样芯的能力,还通过搭载可拆换的表土钻头和磨削工具,使得Corer采样器同时具有了星壤采样、岩石磨削、岩芯取样等多种功能,最大钻进深度80 mm,单次岩芯采样量可达8 cm<sup>3</sup>。

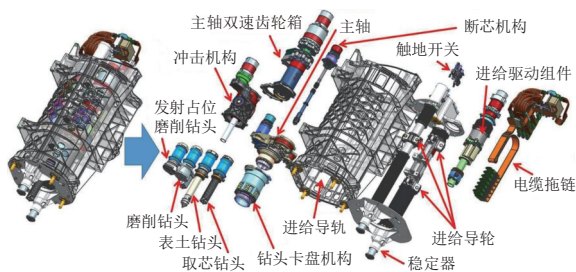


图8 “毅力号”Corer采样钻机<sup>[38]</sup>

Fig. 8 Corer drill of Perseverance rover<sup>[38]</sup>

## 3) 磨削式

磨削也是一种对表层坚硬物质的动力破碎方式,通过平面型的离散切削齿或钢刷对岩石表面风化层回转切削去除,为光谱仪创造岩石内部的观测界面,一般不直接用于采样。“勇气号”(Spirit)、“机遇号”(Opportunity)、“好奇号”“毅力号”火星车均配备了岩石磨削装置,如图9所示。

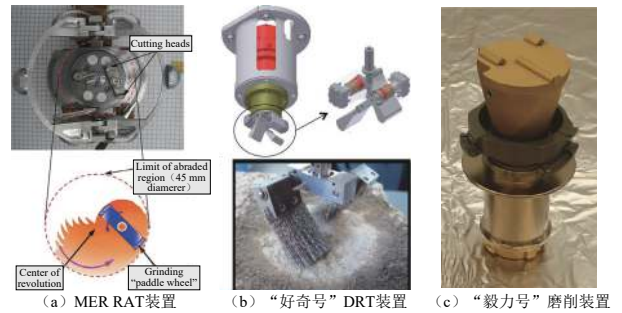


图9 不同的磨削装置方案<sup>[39-42]</sup>

Fig. 9 Different types of abrasion tools<sup>[39-42]</sup>

MER火星车机械臂搭载的岩石磨削装置(Rock Abrasion Tool, RAT)采用了自转切削齿加公转覆盖的方案,能在不超过100 N轴压力和8~11 W功耗情况下对岩石表面直径45 mm、深5 mm的区域磨削破碎<sup>[39]</sup>。“好奇号”的粉尘去除装置(Dust Removal Tool)改用回转钢丝刷的方案,磨削区域直径同为45 mm<sup>[37]</sup>。“毅力号”的磨削装置与钻机集成,采用了具有碳化钨切削齿的磨削钻头,对岩石的磨削区域增大到了直径50 mm、深16 mm<sup>[38]</sup>。

上述3种岩石磨削装置虽然没有采样功能,但对于以薄层冰壳或冻土形态存在的月球表面水冰也能够实现有效破碎,特别是基于表面水冰由冷阱捕获形成霜冻层的机制推断,磨削方式由于可覆盖大面积、小深度的特点,比浅钻方式获取样品的效率更高。

英国“小猎犬2号”(Beagle 2)着陆器机械臂末端携带的仪器中包括一个将岩石表面磨削、取样集成在一起的RC/G岩石取芯/磨削装置,重154 g,尺寸包络30 mm×60 mm×100 mm,功耗6 W,如图10所示。RC/G能在岩石表面形成直径30 mm的磨削区域,其内轴还包含一个微型末端执行器(Micro End Effector, MEE)采样装置,由一对可以开合的半钻头组成,可使MEE变成一只夹子,能对磨削破碎的岩屑样品夹取采样<sup>[40]</sup>。这种将磨削破碎与夹取采样集成的方案,在发挥磨削优势的同时实现样品采集。

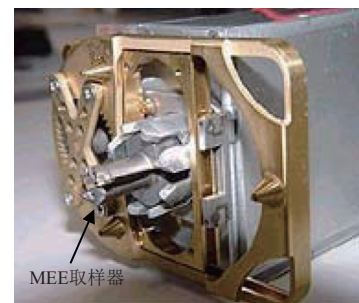


图10 “小猎犬2号”的RC/G取芯磨削装置<sup>[38]</sup>

Fig. 10 Corer drill of Beagle 2 lander<sup>[38]</sup>



## 4 月球极区埋藏水冰采样技术

### 4.1 星壤次表层潜入原理

对月球极区月壤中埋藏的水冰采样，要求采样机具能进入一定深度的次表层月壤中，即实现月壤次表层的“潜入”，从而触达赋存在其中的含水冰地层，进而开展采样、探测作业。按机具与星壤作用的潜入原理划分，实现地外天体星壤的次表层潜入主要有静力挤入、动力挖掘、动能侵彻3种方式，如图11所示。

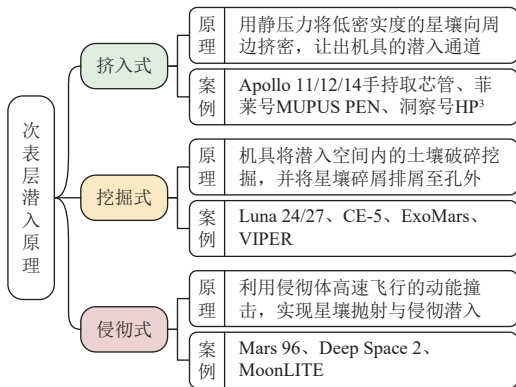


图 11 地外天体星壤次表层潜入原理

Fig. 11 Technologies for subsurface tunneling on extraterrestrial bodies

静力挤入方式是用静压力或低频冲击力将机具直接压入土壤，利用浅表层星壤密度低、孔隙率高的特点，通过机具压缩星壤颗粒间的孔隙，形成潜入所需的通道空间。但这种形式的潜入能力有限，对星壤类型具有选择性，“洞察号”（InSight）携带的HP³潜入

器在火星遭遇了高粘聚性星壤无法潜入的问题<sup>[42]</sup>。

动力挖掘方式最主要的特征是将潜入空间内的星壤挖掘破碎，把星壤碎屑运移至孔外，使机具与原位星壤实现空间置换。动力挖掘方式对星壤的挖掘破碎有回转切削、冲击破碎等，排屑输送有螺旋输送、振动输送和气吹输送等方式。与排屑相比，星壤挖掘破碎对机具潜入能力和负载是主要影响因素。因此，高效的星壤/岩石破碎技术是实现次表层潜入的核心。

动力挖掘方式中，冲击回转切削破碎与螺旋钻杆排屑的组合（即钻进）是最主流的地外天体星壤次表层潜入形式，其应用广泛、技术成熟度高<sup>[43]</sup>，美国 Apollo载人登月、VIPER、苏联/俄罗斯的Luna 24/27、中国“嫦娥五号”等均采用了回转冲击钻进方式对月球的星壤次表层钻探。对于冲击加载的方式，按原理划分可分为如图12所示的4类，特点总结如表3。

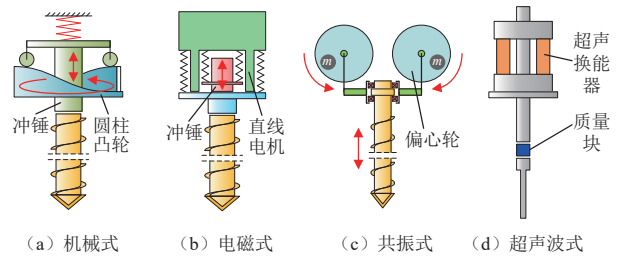


图 12 钻进过程常见的冲击加载方式

Fig. 12 Common methods for introducing impact to drilling

表 3 挖掘/排屑潜入方式对比

Table 3 Comparison of excavation / chip removal methods

挖掘/排屑方式		原理	优点	缺点	
挖掘方式	回转切削破碎	切削刃使星壤发生剪切破坏	泛用性广，成熟度高	对高硬度目标切削效率低	
	冲击破碎	机械冲击 (<30 Hz)	采用凸轮或电磁方式压缩弹簧储能释放，在岩石-钻头界面处产生应力集中而破碎	对高硬度目标穿透效率高，冲击功不随频率变化	需要单次大冲击功
		电磁冲击 (<100 Hz)			驱动直线电机尺寸质量大
		共振冲击 (>100 Hz) <sup>[44]</sup>	通过偏心轮或弹簧振子激振使钻杆共振，提高穿透能力	提高穿透速率，且共振使岩屑流	能耗大，能量效率低，且低频时冲击功小
		超声波 (10~10 <sup>3</sup> Hz)	以压电陶瓷激振，经变幅杆驱动质量块高频冲击钻杆，使岩石发生疲劳破坏	不需要锋利钻头，破岩能力强，平均功耗低，反作用力低	发热大，需要声学接触，穿透速率低
	回转切削+冲击破碎	结合上述原理，月壤用回转切削，岩石用冲击破碎	破岩能力强、能效比高	需要多个动力源，机构复杂度高	
排屑方式	螺旋输送	在回转运动驱动下使土屑沿螺旋槽运移	结构简单，技术成熟，适用于各种钻进深度	大深度下摩擦负载高，易发热	
	振动输送 <sup>[45]</sup>	土屑振动流化后被挤压排除，或沿机具结构接力跳动运移	浅层潜入时挤出排屑效较高	大深度下排屑效率低，振动容易破坏孔壁	
	气吹输送 <sup>[46]</sup>	利用高速气流携带土屑颗粒输送	排屑输送效率极高	月球为真空环境，载气资源有限，应用难度大	

动能侵彻指利用高速飞行的侵彻体直接轰击星球表面，利用其动能实现星壤的抛射与射孔潜入。这种

方式尤其适合于本身没有配置着陆器/巡视器的地外天体飞掠、环绕探测任务，通过携带小型的侵彻式探测


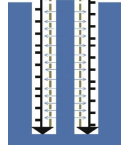

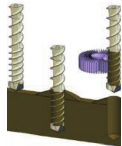
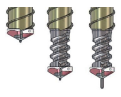



器并在轨道上释放进行侵彻，能够以小的质量代价实现对地外天体的就位次表层探测。但由于动能侵彻过程对原态星壤的力、热扰动较大，容易破坏月壤水冰的赋存状态导致水冰挥发损失。

### 4.2 月球水冰钻进采样技术途径

对于埋藏于地下月壤中的水冰，各个团队开展了多种形式的采样技术途径研究，按采样原理划分总结后，如表4所示。

表 4 月球水冰钻取采样技术途径对比  
Table 4 Comparison of lunar water ice sampling methods while drilling

采样方式	集成传感	挥发分提取	星表取钻屑	钻头外取屑	钻头内取屑	取芯
图示						
采样探测步骤	①钻进 ②分析	①钻进 ②挥发分提取 ③分析	①钻进 ②星表采样 ③传送样品 ④分析	①钻进 ②提钻刷屑 ③传送样品 ④分析	①钻进 ②开口采样 ③封口 ④提钻 ⑤样品转移 ⑥分析	①钻进 ②开口采样 ③断芯 ④封口 ⑤提钻 ⑥岩芯排出 ⑦样品处理 ⑧分析
获取的样品形态	数据	挥发分	钻屑 (大量混杂)	钻屑 (中等混杂)	钻屑 (少量混杂)	完整岩芯
典型案例	BNeuP	Honeybee PVEx	暂无	VIPER TRIDENT	Luna 27 ProSEED	ExoMars drill

#### 1) 随钻传感

随钻传感探测是指将探测水冰的仪器或传感器与钻杆集成，在进行极区月壤钻进潜入过程中一般不涉及对钻屑样品的获取和处理，直接对原位星壤进行探测，提供有关水冰存在性的信息，也可以看作是一种广义的“采样”方法。随钻传感方法对钻机结构机构与传感仪器载荷的集成提出了很高的要求，研制难度大，但能在线对钻孔中水冰的存在性探测，结果即可以作为水冰证认的证据链条之一，又可为星壤采样点的预判和采样决策提供关键信息支持，是实现月球水冰采样的重要支撑技术。


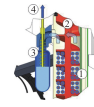
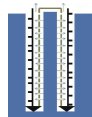
#### 2) 挥发分提取

挥发分提取以直接获取月壤中以水冰为代表的挥发分为目的，将含冰月壤中的“壤”部分可以视为多余物抛弃，将原位分析仪器的水分加热提取功能直接集成到采样机具实现。

美国Honeybee公司开发了3种基于原位挥发分提取原理的月壤水冰提取装置——星球挥发分提取器 (Planetary Volatiles Extractor, PVEx)<sup>[47-48]</sup>。PVEx的3种方案对比如表5所示。Sniffer方案采用了开有气孔的可加热钻杆，在钻进含冰月壤后加热钻杆进行水蒸气提取。但在测试中发现挥发的水蒸气大部分从钻杆外侧逃逸，而非通过气孔进入钻杆内部，导致提取水的效率极低<sup>[48]</sup>。MISWE (Mars In Situ Water Extractor) 方案采用了深螺旋槽结构的钻杆设计，钻

进月壤后将钻杆从钻孔中提出后再加热钻杆对水分进行提取，提高了水提取效率。Corer方案采用中空薄壁钻具设计，钻入月壤后对取芯钻具内部含冰月壤加热提取水分，在减小钻进月壤能耗的同时进一步提高了水提取效率。

表 5 PVEx挥发分提取装置的3种方案  
Table 5 Three schemes of volatile extraction by PVEx

名称	Sniffer	MISWE	Corer
图示			
水提取 能耗/(W·h·g <sup>-1</sup> )	45	2.6	2.2
复杂度	低	中	低
风险	钻杆冻结、气孔堵塞	螺旋槽内钻屑无法甩掉	土芯无法排出、气孔堵塞

对大量月壤挥发分加热提取时需要较大的功耗，钱学森空间技术实验室针对此问题提出了一种光热钻取一体化提取方案。钻具顶端设置有聚光装置，可将汇聚的太阳光导入钻杆内部实现对水冰的加热提取<sup>[49]</sup>。此外，科罗拉多矿业大学还提出一种被动热提取方案，即在永久阴影区内搭建半球形帐篷，并在坑外将阳光定向引入帐篷实现对月壤水冰的加热提取。这种方案相比挖掘月壤提取方案以及钻孔提取方案在大量开采水冰的经济性上更占优势<sup>[50]</sup>。

上述挥发分提取方案缩减了开挖月壤的规模，减少了能量消耗，适合未来对月球水资源大量开采的需求。但对于水冰证认与勘查任务来说，挥发分提取方式对水冰的扰动较大，可能破坏原始氢同位素比例等科学信息，且这种方式仍然无法获得样品中“壤”的部分，降低了其科学价值。

### 3) 星表取钻屑

钻具钻进含冰月壤过程中，破碎的含冰月壤钻屑被钻杆输送至星表，并在钻杆周围形成一个圆锥形堆积体。星表取钻屑是指利用铲挖或夹取等方式，对钻孔中排至星表的含冰月壤堆积体取样。但由于钻屑输送过程可能存在混杂，及采样过程可能产生层序扰动，月壤星表取钻屑方法存在无法区分采集样品在钻孔中具体深度来源的问题。对于同时配置了表取机械臂和钻取装置的探测任务来说，星表取钻屑方式可以作为其钻取采样功能的一种备份方式，在钻具采样功能失效的情况下也能完成对埋藏水冰样品的采集。

### 4) 钻头外取屑

钻头外取屑通过在钻杆前端设计低螺旋升角、大槽深的螺旋槽，使得在钻进过程中产生的钻屑在螺旋槽中堆积留存，随后将钻杆提出孔外，将螺旋槽内的样品刷落下来实现采样。

VIPER月球车搭载的TRIDENT (The Regolith and Ice Drill for Exploration of New Terrains) 钻探系统为应用钻头外取屑方法设计了两段不同结构的钻杆螺旋槽，如图13所示。其中位于钻头近端的是采样螺旋，其螺旋槽深且螺旋升角小，有利于将钻屑留存在螺旋槽内；位于钻头远端的是排屑螺旋，其螺旋槽浅且升角大，有利于提高排屑效率。钻头采用直线型刮刀钻头设计，切削刃采用耐冲击的硬质合金材料，焊接在钛合金的钻头基体上<sup>[51-52]</sup>。TRIDENT采用了一种称为“咬取”(bite)的采样流程，如图14所示。对一个钻孔多次钻进，每个钻次仅100 mm长度，使得这一钻次所产生的钻屑尽量留在采样螺旋槽内，少量多余的钻屑由排屑螺旋输送至钻孔外；随后进行提钻和刷样，将采样螺旋槽中的样品刷落至接样容器实现一次采样。

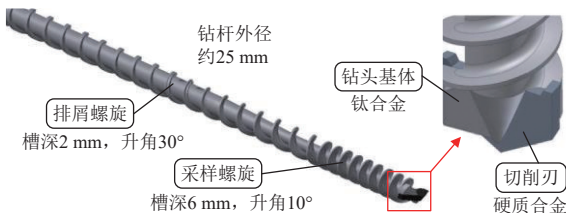


图 13 地外天体星壤次表层潜入原理

Fig. 13 Technologies for subsurface tunneling on extraterrestrial bodies

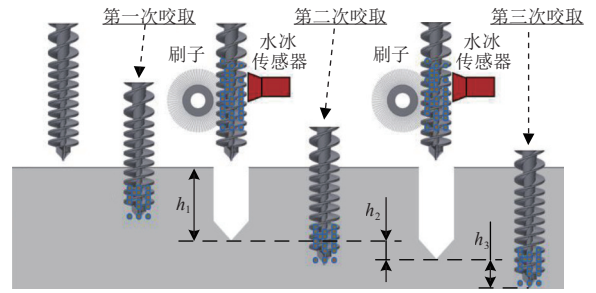


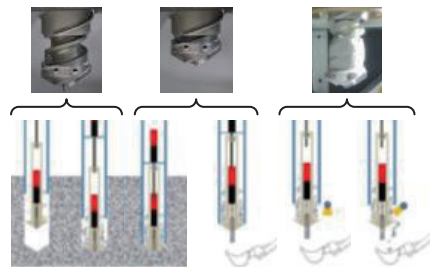
图 14 TRIDENT“咬取”采样流程<sup>[53]</sup>

Fig. 14 Bite sampling approach of TRIDENT drill<sup>[53]</sup>

钻头外取屑能实现钻深方向100 mm级别的样品层序区分，实现对水冰埋藏深度较为准确的定位，获得沿整个钻孔深度方向上的水冰丰度情况；且钻头结构简单，不需额外的复杂机构动作。另外，与钻头内取屑和取芯方式相比，其采样和排屑在钻杆上是串行实现的，不涉及到控制钻屑流向的问题，减少了对钻头构型和钻进规程的设计约束。钻头外取屑的缺点：①采样螺旋槽为半开放式结构，不易精确控制采集的样品量，且提钻转移时存在样品受扰动撒落的风险；②采样螺旋槽横截面内各处的颗粒流速不同，且槽内的钻屑与钻孔壁月壤可能发生物质交换，会造成螺旋槽内来自不同钻孔深度的样品发生混杂。

### 5) 钻头内取屑

Luna 27着陆器搭载的ProSEED采样钻探系统采用了钻头内取屑的采样方案，其钻头为可开合的结构设计<sup>[54]</sup>。驱动钻头开合的电机集成在钻杆内部，使得钻头能够相对钻杆产生轴向移动，实现钻头内部采样容腔的打开与封闭<sup>[55]</sup>，钻头构型同样采用了直线型刮刀钻头设计。ProSEED钻探系统的采样流程如图15所示。钻头钻进到目标采样位置时，采样容腔打开后继续钻进，使得破碎产生的含冰月壤碎屑进入采样容腔内部；采样完成后，钻头回退使容腔闭合，钻屑样品被封闭保存在钻头内部。需要放样时，钻具从钻孔中提出并对准接样设备（接样漏斗或机械臂的铲子），然后钻头采样容腔打开，刷落样品实现放样。相比钻



(a) ProSEED钻机采样流程 (b) ProSEED钻机放样流程

图 15 ProSEED钻探系统的采样流程<sup>[55]</sup>

Fig. 15 Sampling design of ProSEED drill<sup>[55]</sup>

头外取屑方式, ProSEED采用的钻头内取屑方案存在明显的优势: ①采样过程样品容腔暴露时间短, 采样完成后容腔关闭将样品与外界隔离, 减少混样; ②可开合容腔的设计使得钻机可以定点获得来自特定深度地层的样品; ③可以通过控制样品容腔的容积实现对采样量的体积控制。

钻头内取屑方案的缺点: ①采样开合机构复杂度、集成度高, 研制难度大, 可靠性风险高; ②采样容腔闭合形成一个具有硬边界约束的区域, 存在因为颗粒卡滞导致钻头无法闭合甚至机构卡死失效的风险; ③采样与排屑并行实现, 月壤存在流入采样容腔和流向排屑螺旋两种路径, 需要在钻头结构和规程设计中考虑钻屑流向的引导。

6) 取芯

前述几种钻取采样方式都是将冷冻胶结状态的月球冻土破碎后获得碎屑形态的样品, 采样形式在一定程度上破坏了月球冻土的冰壤胶结原态性, 存在对样品力、热扰动较大的问题。取芯采样方案采用中空钻具, 在钻进过程中保留中间完整的土芯, 能够较好地保持样品的原态性。ESA的ExoMars火星车计划携带一套用于火星岩石采样的取芯钻具, ExoMars drill的钻头采用了中心可开合的采样容腔设计, 预计可以获得火星次表层最深2 m处的岩石样本<sup>[56-57]</sup>, 采样放样流程如图16所示。为实现取芯采样, ExoMars drill相比ProSEED钻机多增加了断芯和封口两个机构动作, 相关驱动电机与传动机构全部集成在钻杆内部, 大大增加了采样机具研制的复杂度; 同时, 钻头内取屑方式

涉及到的颗粒卡滞、月壤流向控制等问题也同样存在。此外, 如果分析仪器仍需要碎屑形态的样品, 则还需要增加用于破碎冻土芯的样品处理装置。

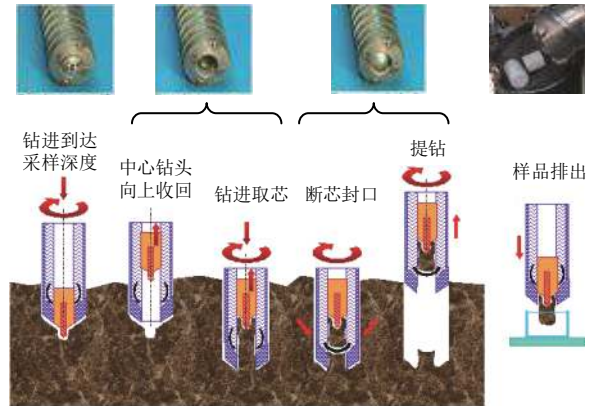


图 16 ExoMars drill的采样与放样流程  
Fig. 16 Sampling and transferring approach of ExoMars drill

面向月球水冰科学探测的需求, 对上述6种钻进采样形式从获取样品的科学价值、钻具研制复杂度、采样动作流程复杂度、采样风险4个方面进行了分析与总结, 如表6所示。另外, 考虑未来月球水资源大量开采与原位利用的需要, 补充了水资源提取效率的评价维度。经综合分析, 认为面向月球水冰的科学探测需求, 钻头外取屑方式在科学价值和复杂度之间取得了最好的平衡, 是目前综合较优的月壤水冰钻取采样方法; 面向水资源开采利用需求, 挥发分提取方式是效率最高的采样方法。

表 6 月壤水冰钻进采样方法小结

Table 6 Summary of lunar water ice sampling methods while drilling

采样方式	集成传感	挥发分提取	星表取钻屑	钻头外取屑	钻头内取屑	取芯
(A) 科学价值	仅获得传感数据, 价值最低	仅有挥发分, 价值次低	样品混杂度较高, 价值一般	样品混杂度中等, 价值较高	样品混杂度较低, 价值较高	能获得原态土芯, 价值最高
(B) 研制复杂度	钻杆集成传感器, 复杂度高	钻具集成加热与气体传输装置, 复杂度高	钻杆简单但需机械臂配合, 复杂度较高	钻杆为纯结构物, 复杂度最低	钻杆集成开合电机与机构, 复杂度高	钻杆集成取芯电机与机构, 复杂度高
(C) 采样复杂度	不涉及月壤样品操作	仅提取挥发分, 复杂度低	复杂度较低	复杂度一般	钻头需开合, 复杂度较高	需操作土芯, 复杂度最高
(D) 采样风险	不涉及月壤样品操作	水蒸气逃逸损失	样品大量混杂	半封闭容腔卡石块风险中等	封闭容腔卡石块风险高	封闭容腔卡石块风险高
(E) 水提取效率	无	节省月壤开采量, 效率最高	单次采样量较大, 效率较高	单次采样量中等, 效率一般	单次采样量较低, 效率低	单次采样量较低, 效率低
综合评价	面向水冰科学探测需求: 钻头外取屑、钻头内取屑、取芯是综合较优的采样方法 面向水资源开采利用需求: 挥发分提取方式是综合较优的采样方法					

5 结束语

本文基于月球极区环境及水冰特性总结了实施月球水冰采样探测任务的挑战及所需关键技术, 并对实

施月球水冰就位探测与采样的原理和方法进行了概述, 分析了各自的优势和局限。

月球极区水冰可能随机分布于永久阴影区的表层



或次表层, 因此中国未来实施月球极区水冰采样探测任务时应考虑搭载小型化的就位水冰探测仪器支持采样点选择, 同时采用表层和次表层复合采样方式提高对水冰位置的到达能力。对于采样选址, 应考虑联合使用不同探测原理的预判载荷, 通过多源数据关联提高找到水冰的成功率; 对于月球表面以薄冰层或冻土形态存在的水冰, 通过磨削方式获取样品更为适合; 对于次表层潜入与采样, 回转冲击钻进结合外螺旋容屑采样方案可以在复杂度、保真度、拓展性上取得最佳平衡。另外, 由于严苛的作业时间和资源约束, 未来还应结合钻具具体形态开展月球水冰自主钻探技术研究, 实现自主工况识别、规程调整、故障排除, 提高任务的成功率。

### 参 考 文 献

- [1] CARPENTER J, FISACKERLY R, HOUDOU B. Establishing lunar resource viability[J]. *Space Policy*, 2016, 37: 52-57.
- [2] BISWAS J, SHERIDAN S, PITCHER C, et al. Searching for potential ice-rich mining sites on the Moon with the Lunar volatiles scout[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 181: 104826.
- [3] SOWERS G F. A cislunar transportation system fueled by lunar resources[J]. *Space Policy*, 2016, 37: 103-109.
- [4] CRAWFORD I, ELVIS M, CARPENTER J. Using extraterrestrial resources for science[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2016, 57(4): 432-436.
- [5] COLAPRETE A. Volatiles investigating polar exploration rover(VIPER)[R]. USA: NASA, 2021.
- [6] ZACNY K, CHU P, VENDIOLA V, et al. Trident drill for viper and prime1 missions to the Moon[C]//Lunar and Planetary Science Conference. USA: NASA, 2021.
- [7] MITROFANOV I, DOLGOPOLOV V, KHARTOV V, et al. "Luna-Glob" and "Luna-Resurs": science goals, payload and status[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria: European Geosciences Union, 2014.
- [8] SEFTON-NASH E, FISACKERLY R, TRAUTNER R, et al. The ESA prospect payload for Luna 27: development status[C]//Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: EGU, 2020.
- [9] 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]//51st Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2020.
- [10] DJACHKOVA M V, LITVAK M L, MITROFANOV I G, et al. Selection of Luna-25 landing sites in the south polar region of the Moon[J]. *Solar System Research*, 2017, 51(3): 185-195.
- [11] KING O, WARREN T, BOWLES N, et al. The Oxford 3D thermophysical model with application to PROSPECT/ Luna 27 study landing sites[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 182: 104790.
- [12] ANDREAS E L. New estimates for the sublimation rate for ice on the Moon[J]. *Icarus*, 2007, 186(1): 24-30.
- [13] FORMISANO M, DE SANCTIS M C, DE ANGELIS S, et al. Prospecting the Moon: numerical simulations of temperature and sublimation rate of a cylindrical sample[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 169: 8-14.
- [14] 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.
- [15] PITCHER C, KÖMLE N, LEIBNIZ O, et al. Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(5): 1197-1208.
- [16] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: application to ISRU on the Moon and Mars[C]//16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Cleveland, Ohio: ASCE, 2018.
- [17] SCHORGHOFER N, TAYLOR G J. Subsurface migration of H<sub>2</sub>O at lunar cold traps[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E2): 1-11.
- [18] CANNON K M, BRITT D T. A geologic model for lunar ice deposits at mining scales[J]. *Icarus*, 2020, 347: 113778.
- [19] TIMONEY R, WORRALL K, FIRSTBROOK D, et al. Development of a heuristic thermal control system for the ultrasonic planetary core drill[C]//16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Cleveland, Ohio: ASCE, 2018.
- [20] ZACNY K, GLASER D, BARTLETT P, et al. Drilling results in ice-bound simulated lunar regolith[C]//AIP Conference Proceedings. [S. l.]: AIP, 2007.
- [21] ZENT A P, HECHT M H, COBOS D R, et al. Thermal and electrical conductivity probe(TECP) for Phoenix[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E3): 1-19.
- [22] SPOHN T, SEIFERLIN K, HAGERMANN A, et al. Mupus—a thermal and mechanical properties probe for the Rosetta lander Philae[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1): 339-362.
- [23] LETHUILLIER A. Characterization of planetary subsurfaces with permittivity probes: analysis of the SESAME-PP/Philae and PWA-MIP/HASI/Huygens data[D]. Paris, France: Paris-Saclay University, 2016.
- [24] TRAUTNER R, REISS P, KARGL G. A drill-integrated miniaturized device for detecting ice in lunar regolith: the PROSPECT permittivity sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(12): 125117.
- [25] LI C, SU Y, PETTINELLI E, et al. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 lunar penetrating radar[J]. *Science Advances*, 2020, 6(9): 1-8.
- [26] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook, a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [27] GRUNDY W M, SCHMITT B. The temperature-dependent near-infrared absorption spectrum of hexagonal H<sub>2</sub>O ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, 103(E11): 25809-25822.
- [28] ROUSH T L, COLAPRETE A, COOK A, et al. The volatiles investigating polar exploration rover(VIPER)Near Infrared Volatile Spectrometer System(NIRVSS)[C]//Lunar and Planetary Science Conference. USA: AIAA, 2021.
- [29] VINCKIER Q, HARDY L, GIBSON M, et al. Design and characterization of the multi-band SWIR receiver for the lunar

- flashlight CubeSat mission[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 1-25.
- [30] HAYNE P O, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, et al. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from lunar reconnaissance orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. *Icarus*, 2015, 255: 58-69.
- [31] ELPHIC R C, CHU P, HAHN S, et al. Surface and downhole prospecting tools for planetary exploration: tests of neutron and gamma ray probes[J]. *Astrobiology*, 2008, 8(3): 639-652.
- [32] FONG T. Volatiles investigating polar exploration rover(VIPER)[C]//West Virginia University Robotics Seminar. USA: AIAA, 2021.
- [33] BONITZ R G, SHIRAIISHI L, ROBINSON M, et al. NASA Mars 2007 Phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, 113: 1-11.
- [34] ZACNY K, PAULSEN G, MCKAY C P, et al. Reaching 1 m deep on Mars: the icebreaker drill[J]. *Astrobiology*, 2013, 13(12): 1166-1198.
- [35] LITVAK M. The vision of the Russian space agency on the robotic settlements in the Moon[R]. Moscow: ROSCOSMOS, 2016.
- [36] OKON A B, Brown K M, McGrath P L, et al. Mars science laboratory drill[C]//Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium. Pasadena, CA: AIAA, 2010.
- [37] ANDERSON R C, JANDURA L, OKON A B, et al. Collecting samples in Gale Crater, Mars; an overview of the Mars science laboratory sample acquisition, sample processing and handling system[J]. *Space science reviews*, 2012, 170(1-4): 57-75.
- [38] MOELLER R C, JANDURA L, ROSETTE K, et al. The Sampling and Caching Subsystem(SCS) for the scientific exploration of Jezero crater by the Mars 2020 Perseverance rover[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 1-43.
- [39] THOMSON B J, BRIDGES N T, COHEN J, et al. Estimating rock compressive strength from rock abrasion tool(RAT) grinds[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(6): 1233-1244.
- [40] RICHTER L, COSTE P, GROMOV V V, et al. Development and testing of subsurface sampling devices for the Beagle 2 lander[J]. *Planetary and Space Science*, 2002, 50(9): 903-913.
- [41] ANTILA M E. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument[D]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2005.
- [42] SPOHN T, GROTT M, MÜLLER N, et al. Mars regolith properties as constrained from HP<sup>3</sup> mole operations and thermal measurements[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. [S. l.]: EGU, 2020.
- [43] ZHANG T, XU K, YAO Z, et al. The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(6): 487-497.
- [44] PAULSEN G, SZCZESIAK M, MAKSYMUK M, et al. SONIC drilling for space exploration[C]//Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration. Pasadena, California: NASA, 2012.
- [45] CHEN H, LI L, ZHANG W, et al. A vibratory conveying method for planetary regolith: preliminary experiment and numerical simulation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 29386-29396.
- [46] ZACNY K A, QUAYLE M C, COOPER G A. Enhancing cuttings removal with gas blasts while drilling on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2005, 110(E4): 1-16.
- [47] ZACNY K, INDYK S, LUCZEK K, et al. Planetary volatiles extractor(PVEx) for in situ resource utilization(ISRU)[C]//15th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Orlando, Florida: ASCE, 2016.
- [48] VENDIOLA V, ZACNY K, MORRISON P, et al. Testing of the planetary volatiles extractor(PVEx)[C]//16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Cleveland, Ohio: ASCE, 2018.
- [49] 王超, 张晓静, 姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 241-247.
- WANG C, ZHANG X J, YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [50] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, 7(4): 235-244.
- [51] PAULSEN G, ZACNY K, YAGGI B, et al. Development and testing of the lunar resource prospector drill(RPD)[C]//15th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Orlando, Florida: ASCE, 2016.
- [52] 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]//44th Aerospace Mechanisms Symposium. Cleveland, OH: NASA, 2018.
- [53] ZACNY K, PAULSEN G, KLEINHENZ J, et al. Development and testing of a lunar prospecting drill(LPD) to search for water-ice[C]//Earth and Space 2014. St. Louis, Missouri: ASCE, 2014.
- [54] HEATHER D, SEFTON-NASH E, FISACKERLY R, et al. The ESA prospect payload for LUNA 27: development status and science activities[C]//52nd Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: ESA, 2021.
- [55] SAVOIA M, RUSCONI A, FUMAGALLI A, et al. PROSPECT: Sampling tool approaches for lunar icy regolith[C]//68th International Astronautical Congress. Adelaide, Australia: IAC, 2017.
- [56] RE E, MAGNANI P, IZZO M, et al. ExoMars multi rod drill development and testing[C]//10th Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. Noordwijk, The Netherlands: [s. n.], 2008.
- [57] MAGNANI P, RE E, FUMAGALLI A, et al. Testing of ExoMars EM drill tool in mars analogous materials[C]//Proceedings of ASTRA. Noordwijk, The Netherlands: ESA, 2011.
- 作者简介:  
季节(1995-),男,博士生,主要研究方向:地外天体采样探测。  
通讯地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)  
电话:(010)68745726  
E-mail:jjjie2849@163.com  
姜生元(1969-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:地外天体采样探测、星表智能作业机器人、宇航空间机构及控制。本文通讯作者。  
通讯地址:哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)  
电话:13796621169  
E-mail:jiangshy@hit.edu.cn

## Overview of Water Ice Sampling and Detection Techniques in the Lunar Polar Region

Ji Jie<sup>1</sup>, ZHANG Weiwei<sup>2</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, LIU Junwei<sup>2</sup>, MA Ruqi<sup>1</sup>, SUN Jing<sup>3</sup>, JIANG Shengyuan<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

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

3. China Satellite Communications Co. Ltd., Beijing 100190, China)

**Abstract:** For the aim of scientific exploration of lunar water ice, this review summarizes the challenges and key technologies needed for water ice sampling and detection in the lunar polar region according to the lunar polar environment and the characteristics of lunar water ice. For the demand of selection of water ice sampling site, according to different working principles, five methods were summarized: mechanical sensing, thermoelectric physical property sensing, radar detection, spectrum detection and neutron spectrum detection. Then, for the demand of surface-exposed water ice sampling, three kinds of surface sampling techniques, including scooping, shallow drilling, and grinding were described. For the needs of subsurface buried water ice sampling, first, the subsurface regolith penetration techniques for extraterrestrial objects were summarized, then six kinds of drilling sampling techniques were introduced, including integrated sensing, volatile extraction, lunar surface drilling cuttings acquisition, bit external cuttings acquisition, bit internal cuttings acquisition and coring. Finally, suggestions on technical approaches for China's implementing lunar water ice sampling and exploration missions were put forward.

**Keywords:** lunar polar region; lunar water ice; sampling; in-situ exploration

### Highlights:

- The challenges and key technologies of water ice detection and sampling in the lunar polar region are summarized.
- For sampling site selection, a review of in-situ water ice detection methods with different principles is introduced.
- For possible surface ice and buried ice, a thorough discuss on different sampling approaches is provided and suggestions are proposed.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]