



含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究

王庆功, 王超, 庞勇, 全晓军, 姚颖方, 赖小明, 姚伟

Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith

WANG Qinggong, WANG Chao, PANG Yong, QUAN Xiaojun, YAO Yingfang, LAI Xiaoming, and YAO Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

月壤取芯钻具热特性有限元分析

The Finite Element Analysis of Thermal Property for Lunar Soil-Drilling Sampler

深空探测学报(中英文). 2017, 4(6): 544-551

深层月壤钻取冗余绕组电机控制方法

Control Method of Redundant Winding BLDC for Deep Lunar Soil Drilling

深空探测学报(中英文). 2021, 8(3): 259-268

月球浅层月壤螺旋钻具进芯机制设计

Design of Coring Dynamics with Shallow Loose Lunar Regolith

深空探测学报(中英文). 2021, 8(3): 252-258

基于颗粒单向流动效应的手持式月壤取心装置设计

Design of Handheld Corer for Lunar Regolith Based on Particle Directional Flow Method

深空探测学报(中英文). 2020, 7(2): 164-170



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究

王庆功¹, 王超¹, 庞勇², 全晓军³, 姚颖方⁴, 赖小明², 姚伟¹

(1. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094; 2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094;
3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 4. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210008)

摘要: 在未来深空探测中, 水冰资源的获取与转化是地外天体原位资源利用的重要环节。面向地外天体水冰资源原位利用问题, 研究了含冰星壤钻取密封与水资源提取转化一体化技术, 以实现水、氧、燃料等基本物资的原位补给, 支撑深空探测过程关键技术的发展。首先在地面上构建了典型真空低温环境, 研制了含冰星壤钻取密封与水冰光热提取利用一体化原理样机, 包含星壤钻取、太阳能聚光加热、水资源冷凝与收集和氢氧光电化学合成装置4部分, 并在真空低温环境下开展了原理样机试验。结果表明, 该一体化技术能够实现含冰星壤的低功耗钻取, 土壤输运速率 $> 1.7 \text{ kg/h}$, 功耗 $< 100 \text{ W}$, 水资源获取速率达 26.6 g/h , 氢氧分解的总气体产率达 12.6 g/h 。该研究验证了地外水冰资源提取技术原理的可行性, 同时为解决地外探索中对水氢氧等物资的生产和转化提供了技术支撑。

关键词: 原位资源利用; 含冰星壤; 钻取密封; 水资源提取; 氢氧转化

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)06-0617-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220067

引用格式: 王庆功, 王超, 庞勇, 等. 含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 617-624.

Reference format: WANG Q G, WANG C, PANG Y, et al. Study of drilling-based water extraction technology from icy lunar regolith[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 617-624.

引言

水资源原位获取与转换利用是提升深空探测能力的关键手段, 随着深空探测技术的不断发展和人类探索疆域的拓展, 物质能源补给成为其核心难题^[1-2]。传统运载方式受到运载能力和成本的限制, 难以有效支撑未来空间任务, 需不断降低甚至摆脱对地球物质能源补给的依赖性, 原位资源利用(In-Situ Resource Utilization, ISRU)成为其重要技术手段^[3-4]。水资源获取与转换利用是原位资源利用的主要目标之一。通过水资源的星外原位获取和转换利用, 能有效解决深空探测活动对物质和能源的需求问题^[5-6]。

随着地外天体水资源探测技术的发展, 月球、火星及近地行星表面水资源存在的证据越充分。以月球水冰探测为例, 月球存在水冰的设想最早由美国科学家Watson等^[7]于1961年提出, 其认为月球极地一些撞击坑底部可能处于太阳照射不到的永久阴影区, 表层和次表层温度降常年维持在40 K左右。原始月球脱气作用产生的水、彗星和小行星撞击月球携带至月表的水在低温下可能会以水冰的形式在地质历史中保存下

来。2009年, 美国月面环形山观测与遥感卫星(Lunar Crater Observing and Sensing Satellite, LCROSS)任务利用单次撞击获取月球表面溅射云雾, 通过对云雾含量分析, 结果显示其含有的大量水和水蒸汽, 首次提供了月壤内部存在地下水冰的直接证据^[8]。通过对撞击坑内水分子浓度的探测, 数据表明月壤中的水冰质量含量大约为 $5.6 \pm 2.9 \text{ wt}\%$ 。巨大储量的水资源不仅能支撑人类月球长期居住, 同时可为人类探索其它太阳系星体提供必需的氢氧燃料。“嫦娥五号”任务完成了月球自动采样返回, 科学家通过对月壤样品分析获得了月表原位条件下的水含量^[9]。结果表明, “嫦娥五号”采样区的水含量在 120×10^{-6} (百万分之一)以下, 从别的地方溅射到采样区的更古老岩石中的含水量约为 180×10^{-6} , 这就相当于1 t月壤中大约有120 g的水, 1 t岩石中大约有180 g的水。

月球水冰资源的存在证据掀起了地外原位水资源探测提取的研究热潮^[10-13]。美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)、俄罗斯联合欧洲航天局(European Space Agency, ESA)

收稿日期: 2022-07-07 修回日期: 2022-08-04

基金项目: 国防科工局-民用航天技术预先-地外原位水资源提取与氢氧光化学合成技术研究资助项目(B0108)

相继制定了地外原位水资源探测提取计划。如NASA的“资源勘探者任务”(Resource Prospector Mission, RPM),其核心是“月壤与环境科学及氧与月球挥发物提取”(Regolith & Environment Science and Oxygen and Lunar Volatile Extraction, RESOLVE)有效载荷的验证^[14]。设想是由月球车来侦察月球永久阴影区及其附近亚表面氢浓度很高的区域,然后钻采样品,并加热和分析。俄罗斯联合ESA的月球—资源着陆器和“皮洛特—加龙省”(PROSPECT)探测器计划。该探测器可实现考察区域土壤挥发物的提取、原位分析和评估。此外,ESA提出了“用于商业空间开发和运输的资源观测与开采系统”(PROSPECT)计划,目标之一也是月球水资源提取分析和转换利用^[15]。

地外天体由于其特殊的极端环境,水资源主要存在于土壤中,且存在形式复杂、不确定性等显著特点,为其原位获取提出了巨大的挑战^[16-18]。弱引力、低气压条件也面临水资源提取过程的蒸汽冷凝、液滴脱离难题^[19-20]。同时,能源物资受到发射成本的限制,地面水资源转化合成所需氢氧原料的方法和技术途径难以满足地外空间原位转换利用需求,水资源的高效转换利用也需另辟蹊径。

为此,本文针对上述问题,提出了含冰星壤钻取密封、水资源光热提取与氢氧分解转化一体化技术。为验证该技术的可行性,首先在地面上建立了典型真空低温环境模拟平台,研制了含冰星壤钻取密封与水冰光热提取利用一体化原理样机。通过系统试验研究,在真空低温环境下实现了水资源和氢氧等物资的连续生产。在月面高真空、极低温和弱引力等极端的环境下,深层月壤内水冰的光热蒸发、输运与收集等仍存在一系列技术挑战。本文所提出的含冰星壤钻取密封与水冰光热提取利用一体化的技术方案,可为月面真实环境下的水冰原位提取提供技术积累。

1 月球水冰原位资源提取设计

1.1 总体流程设计

在模拟低温与真空环境下,通过钻取装置,对低温冷冻的水合星壤钻取,获得的水合星壤收集于钻具内部,并严格密封。之后,通过聚光加热装置向钻具内部输入热量,促使密封的水合星壤水分蒸发。水蒸气在压力驱动下,通过管线输运至水资源冷凝与收集装置,在其内壁面实现高效冷凝并收集,获得液态水。在氢氧光电化学合成装置内,液态水通过光电化学分解,转化为氢气和氧气。地外原位水冰资源提取转化利用技术流程图如图1所示。

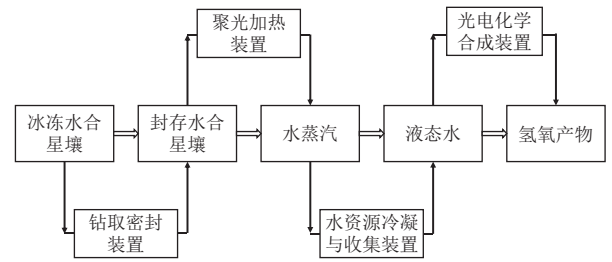


图1 地外原位水冰资源提取转化利用技术流程图
Fig. 1 Technical flowchart of water resource extraction and conversion technology

1.2 模拟含冰星壤的制备

所需的低温含冰星壤样品由模拟月壤制备而成。实验所用模拟月壤为CUG-1,由玄武岩破碎研磨制成,模拟月壤表现颜色较亮,微观呈现颗粒粒径不均、粒形不规则形貌特征。通过EDS和激光粒度分析仪测试,可知该模拟月壤以二氧化硅为主要成分,富含Al、Fe等元素;所选取的模拟月壤粒径在0.1~1mm,使用烘箱去除初始水分,结束烘干后将模拟月壤冷却至室温。

本文采用水合法制备含水模拟月壤,即根据模拟月壤重量和预期含水率计算所需水的重量。将称量的去离子水加入模拟月壤中,在密封的高速搅拌机内充分混合。本文配置了3种不同含水率的水合模拟月壤,分别为2.1%、4.0%和6.0%,如表1所示。将配置的含水模拟月壤装入月壤罐,在振动台上以30 Hz的频率振动压实,约20 min后堆积密度达到1.8 g/cm³。之后将月壤罐整体放入冷冻箱内,在173 K下预冻24 h,获得初始低温冰冻含水星壤。此外,实验中单独测试了冷冻含冰星壤样品的强度。在193 K下,上述3种样品的压缩破坏强度分别为0.4、2.1和3.1 MPa。

表1 不同含水率的模拟月壤样品

Table 1 Hydrated lunar soil simulant samples with different water contents

水合月壤	样品1	样品2	样品3
含水率/wt %	2.1	4.0	6.0
强度/MPa	0.4	2.1	3.1

1.3 钻取密封一体化装置

依据冷冻含冰月壤机械力学特征和预期月壤钻取量,设计并研制了含冰月壤的钻取密封一体化装置,如图2所示。该装置主要功能是实现含冰星壤高效钻取和密封加热,包括驱动模块、钻具模块、密封加热模块等。驱动模块可实现钻取过程中的回转切削和加载进尺运动,在外部驱动程序的控制下,实现不同速率

下的月壤钻取。钻具模块由隔热传力输出轴、钻具和可压缩波纹管组成。密封加热容器由模拟星壤密封冷端、聚四氟隔热容器套、隔热支撑环、模拟星壤自激流动加热容器构成。

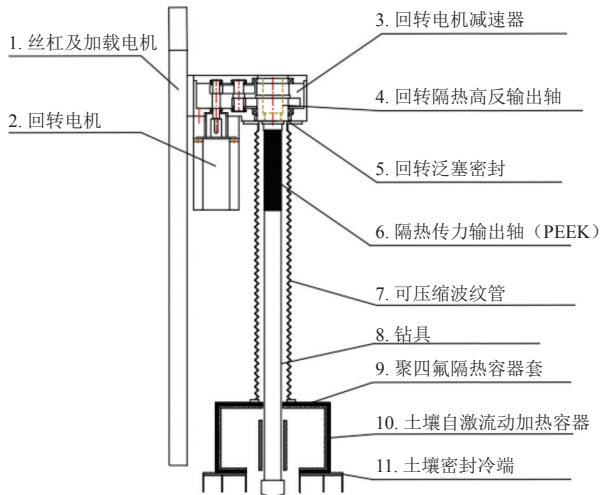


图 2 钻取密封一体化装置示意图
Fig. 2 Illustration of drilling system

钻具的钻头直径49 cm, 钻杆的总长度0.5 m, 钻杆上的螺纹间距30 mm, 螺纹齿高1.5 mm。钻杆内部为中空结构, 光热装置将热量射入钻杆内部, 通过壁面吸热传导至钻进的土壤内部。

钻取装置与月壤罐严格密封, 两者可承受外部 10 Pa 以下的真空度, 因此月壤中的水分能够在月壤罐和月壤收集腔内留存, 可避免泄漏至外部真空环境中。在内部压力驱动和排气作用下, 蒸汽可通过月壤收集腔的蒸发孔和蒸汽管路, 定向进入冷凝装置内。

1.4 太阳能聚光加热装置

依据光热功率需求而设计的太阳能聚光加热装置如图3所示。该装置由两级聚光透镜组成, 一级透镜可实现太阳模拟器光源的平行输出, 二级透镜实现光源的再次汇聚; 二级透镜直径254 mm, 透镜高度42 mm, 厚度5.5 mm, 透镜采用高纯度石英玻璃制成, 表面涂覆了光学增透膜, 高效地透过光线。汇聚的模拟光源直接射入钻具内部, 钻杆内上半段 (20 cm) 为镀银的高反壁面, 可实现65.1%的反光率。下半段 (30 cm) 为氧化发黑的高吸壁面, 可实现78%的吸光效率。

太阳模拟器在输入电功率3.5 kW条件下, 其输出的光通量400 W。射入钻具内部后, 经高反段反射进入高吸段的总光通量325 W, 光传导吸收效率达到80.1%。该光功率在钻取具能够完全转化为热功率, 并促使水冰蒸发。

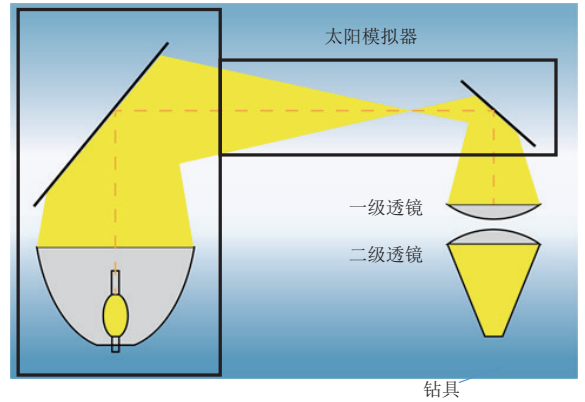


图 3 太阳能聚光加热装置示意图
Fig. 3 Illustration of solar light concentration and heating system

1.5 水资源冷凝与收集装置

水蒸汽通过蒸汽管路进入水资源冷凝与收集装置中, 如图4所示。该装置设计过程中着重考虑了低压、弱引力条件下的高效凝结换热, 蒸汽在凝结表面的成核可控, 凝结液滴快速脱离等问题。通过将锥形冷凝表面与锥槽导液结构相结合, 形成了锥槽导液结构的水资源冷凝与收集装置。冷凝面主体为漏斗状, 冷凝表面采用了亲水处理, 可同时利用锥形结构梯度驱动力和重力效应实现液滴的高效凝结和快速收集。

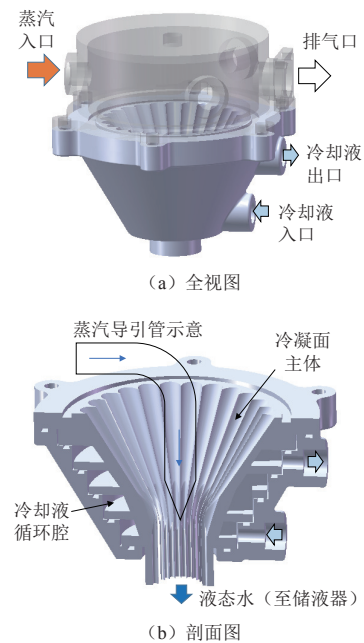


图 4 水资源冷凝与收集装置示意图
Fig. 4 Illustration of vapor condensation and water collection system

水资源冷凝与收集装置通过液冷的方式冷却, 维持其低温冷凝环境。本文采用了30%的酒精-水溶液作为冷却工质, 工质由外部水冷机驱动循环, 冷凝温度为0℃左右。

随着水冰的蒸发,月壤收集腔和蒸汽管路内的压力逐渐增大,在压差驱动下,蒸汽定向流至冷凝器内。在蒸汽导引管的导流作用下,蒸汽直接通入冷凝面的喉部位置,有效降低了蒸汽的旁通损失,并增大了有效冷凝面积。但由于蒸发的水汽中含有大量不凝气体,而影响冷凝效率,在实验中通过冷凝器的排气口间歇性排出不凝气体。排气过程会降低冷凝器内的压力,有助于管路内的蒸汽快速流向冷凝器。但冷凝装置内的压力始终保持在1000 Pa以上,保证水蒸汽有效冷凝。

1.6 氢氧光电化学合成装置

为在真空低温环境中将水分解为氢氧物质,本文设计了一种新型的光热辅助氢氧光电化学合成装置,如图5所示。采用10%碳载铱(Ir/C)和10%碳载铂(Pt/C)材料分别作为产氧和产氢电极材料,隔膜采用复合质子交换膜Nafion/PTFE(25~125 μm)。该装置通过硅橡胶线密封/聚四氟乙烯面密封,液态水入口与冷凝装置连接,高压电极与外置电源连接。

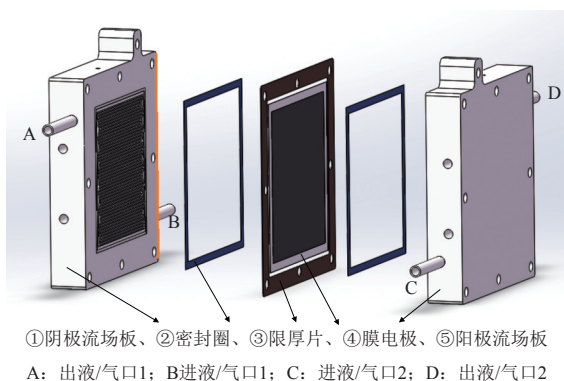


图5 氢氧光电化学合成装置示意图
Fig. 5 Illustration of water decomposition system

该装置的反应有效面积100 mm × 100 mm,可承受反应气压1000 Pa,气液体流速设计为300 sccm(双极)。在440 mA/cm²的设计性能输出下,可实现15 g/h的氢氧产率。

1.7 一体化原理样机

将上述装置连接并置于真空低温环境中,构成一体化原理样机。为此,本研究在地面上建立了真空低温环境模拟实验平台,如图6所示。该平台包括大型低温真空腔、太阳光模拟器、低温制冷机、大型循环冷却泵等设备。模拟实验平台通过真空泵维持其真空状态,压力可抽至1 Pa以下;通过氦气低温制冷机维持实验平台内的低温环境,腔内低温冷头的温度可控制在200 K以下。

真空腔内各装置的联接关系和工作原理如图7所示。将压缩、冷冻后的水合模拟月壤罐安装于低温真空腔后,通过低温冷头维持其低温冰冻状态。整个样机的运行过程由外部程序控制,控制线路通过真空腔上的破空阀与腔内设备连接。低温真空腔内达到所需的低温和真空条件后,即运行钻取装置将含冰星壤提取、保存在月壤收集腔内。聚光加热装置启动后,将模拟太阳光汇聚于钻具的中空腔内,热量传导给周围的低温月壤,促使水冰蒸发。蒸汽在通过月壤收集腔的出气口和蒸汽管路进入水资源冷凝收集装置。冷凝收集装置由外部冷却循环机提供制冷,蒸汽冷凝为液态水,并靠重力和毛细力收集于储液器内。在氢氧光电化学合成装置中,液态水通过光电催化,转化为氢气和氧气。



图6 低温真空环境模拟实验平台
Fig. 6 Image of integrated experimental system

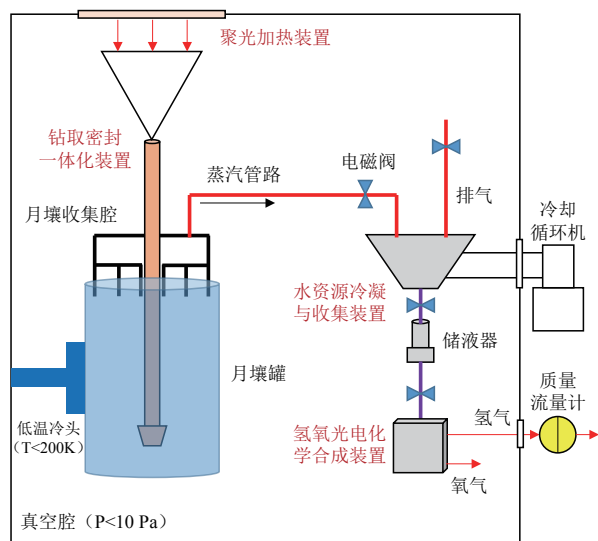


图7 一体化原理样机工作示意图
Fig. 7 Schematic chart of integrated experimental system

1.8 系统实验流程

首先,将真空腔内的压力降至10 Pa以下,低温制

冷机持续开启, 维持冰冻月壤罐温度在193 K以下。在此低温真空条件下, 启动钻取装置, 对含冰星壤切削钻取, 进尺速度设置为10 mm/min, 回转速度100 r/min。钻取达到预定深度后, 启动太阳能聚光装置, 在电功率3.5 kW的条件下, 对钻具内部持续加热。水蒸汽出现后定向流至冷凝装置, 被冷却后冷凝成为液滴, 自动收集至储液器。实验中通过冷凝器排气口的电磁阀控制, 间歇性排出不凝气体。取水过程结束后, 启动储液器与氢氧光化学合成装置之间的控制阀, 液态水进入氢氧光化学合成装置。调节该装置的操作电压, 即获得不同的水分解速率, 实验中监测了氢气的产生速率。

上述过程中, 水的热力学状态如图8所示。含水月壤颗粒在常温下经过冷冻后, 温度维持在200 K以下(状态点1)。在真空腔内, 钻取装置和月壤罐与外界严格密封, 钻取过程可视为等压过程, 但由于钻取机械能输入, 含冰星壤温度略有上升(状态点2)。光热作用后, 含冰星壤温度迅速上升, 水冰融化(状态点3), 相变过程为

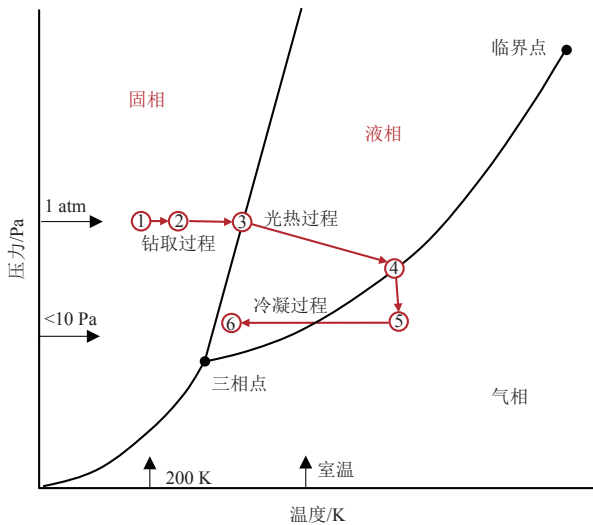
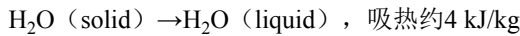


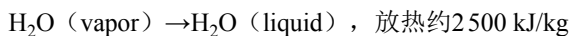
图8 水冰资源提取热力学过程^[21]

Fig. 8 Thermodynamic conditions for water extraction process^[21]

由于排气作用, 蒸汽管路内的压力持续下降(状态点4), 促使液态水快速蒸发为气体并过热(状态点5), 相变过程为

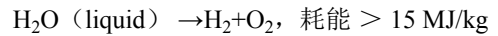


在冷凝器内, 蒸汽冷凝为液态水(状态点6), 相变过程为



之后, 在氢氧光电化学合成装置内, 液态水被分

解为氢气和氧气, 化学过程为



2 实验结果分析

2.1 钻取过程

在真空低温环境下, 对所配置的3种不同含水率冰冻模拟月壤样品进行了钻取实验。在固定的钻具回转速度(100 r/min)和进尺速度(10 mm/min)下, 获得的钻取过程功耗曲线如图9所示。所有实验的钻取深度均为30 cm左右。

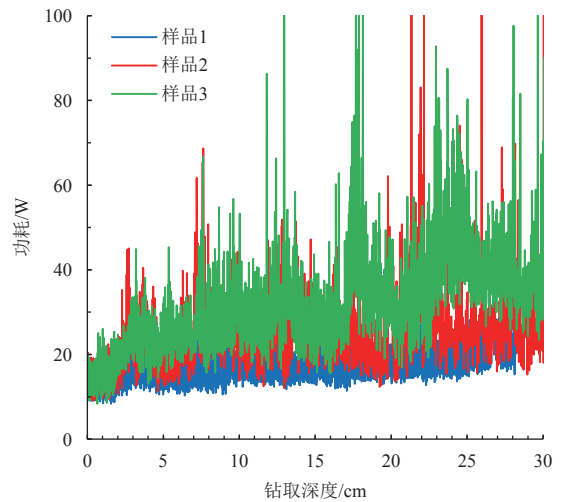


图9 钻取过程与功耗关系图

Fig. 9 Power consumption in drilling process

从功耗曲线上可以看出, 在193 K冷冻条件及模拟月壤含水率2%~6%之间时, 钻取过程的功耗均不超过100 W, 总体处于50 W以下。在此含水率范围内, 钻取功耗随着含水率的增加有所上升。钻取功耗与冰冻月壤的机械性能有关^[22], 随着冰冻月壤含水率的增加, 其机械硬度显著提高(见表1所示)。相应地, 钻取功耗有所增加。同时, 在钻取过程中, 功耗曲线有高频振动现象, 这是因为快速土壤切削与钻取过程中, 随着瞬态机械力的变化, 瞬时电流也在跳动, 计算得到的功耗相应波动。

钻取过程获得的冰冻月壤颗粒, 沿钻杆外螺纹运送至月壤收集腔内(如图7所示)。实验结束后, 将钻具拆分并对获取的月壤称重, 结果见表2。可以看出, 在钻取深度30 cm时, 钻具内所能运输的土壤重量约为900 g, 总体输运速率在1.8~2.0 kg/h。然而, 对于不同样品, 随着含水率的提高, 月壤输运量有所降低。这是由于在高含水率时, 冰冻土壤的强度和黏度均有所增加^[23]。本文3种样品的压缩强度由0.4 MPa增加到

3.1 MPa (见表1)。含冰月壤硬度提高后, 钻取功耗显著增加, 同时钻具抖动变得强烈, 月壤颗粒在沿钻杆上升的过程会有一定损失。

表2 钻取过程土壤获取量

Table 2 Amount of lunar soil collected by drilling

样品	钻取条件	月壤获取量/g	月壤运输速率/(kg·h ⁻¹)
样品1	回转速度100 r/min	994.4	1.99
样品2	进尺速度10 mm/min	933.6	1.87
样品3	钻取深度30 cm	893.1	1.79

2.2 取水过程

在固定的光热功率下(即325 W), 3种样品的水资源提取结果如图10所示。可以看出, 对于不同含水率的月壤样品, 获得的瞬时取水量和取水速率均存在显著差异。当冰冻月壤的初始含水率为6%时(即样品3), 实验中发现, 光热输入后在蒸汽管路内很快有蒸汽出现(< 5 min, 即预热时间), 冷凝器内的液滴凝结快速且连续, 约30 min后液态水收集速率显著上升。在70 min有效实验时间内, 共获得31 g液态水, 平均取水速率为26.6 g/h。然而, 当样品含水率降为4%时(即样品2), 取水速率明显下降。一方面预热时间延长(> 10 min), 同时液滴凝结呈现为间歇滴落状态, 在110 min后共获得12 g液态水, 平均取水速率为仅6.5 g/h。而当初始含水率为2%时(即样品1), 预热时间显著较长(约为45 min)。由于实验前期水汽密度很低, 液滴冷凝变得低效, 只有当管路内的水蒸汽达到一定密度后(即约1 h后), 才出现液滴连续冷凝, 该工况下获得的平均取水速率6.2 g/h。由于实验采用的光热蒸发方式, 获得的液态水水质整体较好。

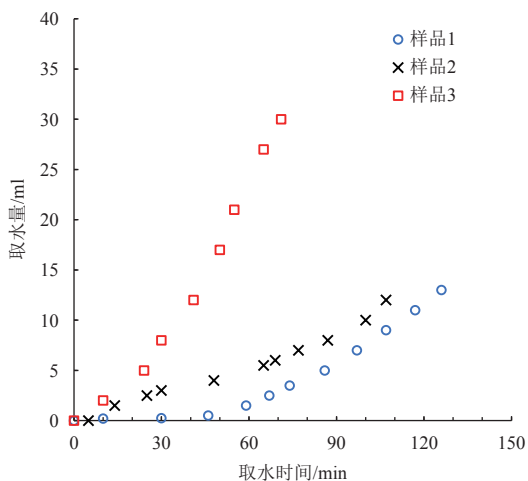


图10 不同样品的取水过程图

Fig. 10 Water extraction processes for different samples

取水实验结束后, 提取了月壤收集腔和月壤罐内

不同部位的模拟月壤样品, 测试了残余水分, 以分析所提取水资源的主要来源。月壤罐内的取样位置如图11所示, 结合钻具的密封压痕位置, 确定的取样径向位置分别在 $R_1 = 33$ mm, $R_2 = 50$ mm, $R_3 = 75$ mm处。

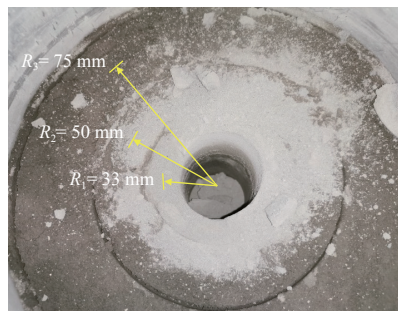


图11 残余水分测试取样位置图

Fig. 11 Positions of samples collected for tests of residue water content

残余含水率测试结果见表3。可以看出, 收集到月壤收集腔的样品, 水分几乎全部蒸发, 水的提取率大于85%。月壤罐内与加热钻杆接触的区域(即 R_1 在33 mm之内), 月壤水分也能够吸热蒸发, 但对于不同样品, 水分提取率有较大差异。例如, 对于样品1和样品2, 由于实验时间较长, R_1 在33 mm之内的水分几乎完全蒸干, 残余含水率均在0.5%以下。对于离加热钻杆较远的位置, 月壤水分提取率相对较低。比如 $R_1 = 50$ mm位置的月壤只有少量水蒸发, 而 $R_1 = 75$ mm位置的月壤几乎没有水分损失。这是因为含冰月壤本身的热导率较低(仅为0.1 W/m·K左右), 堆积月壤内部热传导较慢^[24], 较短时间内热量扩散量不足以促使远处的水分充分吸热并蒸发。对于样品3, 实验结束后 R_1 在33 mm处仍有3.1%的含水率(提取率约为50%), 但 $R_1 = 50$ mm和 $R_1 = 75$ mm处水分提取率小于15%。

表3 不同取样位置样品残余含水率

Table 3 Residue water contents for collected samples.

样品	月壤收集腔	位置 R_1	位置 R_2	位置 R_3
样品1/1%	0.2	0.3	1.9	2.0
样品2/2%	0.3	0.5	3.5	3.9
样品3/3%	0.9	3.1	5.2	5.9

上述实验结果表明, 月壤含水率显著影响了水分的提取效率。然而值得一提的是, 在月表高真空环境下, 水冰升华所需的蒸发热显著变小(参见图8水的三相点及热力学状态)。因此, 即使月壤含水量较低, 在月壤集中收集后, 通过较少的热量输入下, 水冰也可快速升华。结合月面自然冷阱与低温辐射环境, 可将蒸汽有效冷凝, 获得液态水或固态冰。

2.3 氢氧分解过程

冷凝器内的液态水进入氢氧光化学合成装置后,即开始氢氧光电化学合成测试,结果如表4所示。实验中逐步增加氢氧光化学合成装置的实验电流,相应的电压同步上升,装置产生的H₂和O₂流量显著增加。实验过程中实时监测了H₂的体积流量(见图7),通过单位转换,可获得H₂和O₂的总气体产生速率。在电流为30 A时,H₂产生速率达到了260 ml/min,总气体产生速率12.6 g/h,达到了预期的氢氧分解效果。

表4 氢氧分解过程及流量测试

Table 4 Process for water decomposition

电流/A	电压/V	H ₂ 体积流量/(ml·min ⁻¹)	总气体产率/(g·h ⁻¹)
10	3.5	40	1.9
20	3.9	156	6.8
25	4.7	194	9.4
30	5.2	260	12.6

3 结论

本文开展了含冰月壤低功耗钻取密封与水资源提取转化一体化技术研究,根据主要技术环节所研制的原理样机能够连续实施冰冻月壤的密封钻取、太阳能聚光加热、水资源蒸发与冷凝收集和光热辅助氢氧分解等过程。在典型真空低温环境下,原理样机系统实验表明,钻取装置实现了模拟含冰星壤的低功耗钻取,土壤运输速率 > 1.7 kg/h,功耗 < 100 W。在模拟月壤含水率为6%时,水资源的提取速率达到26.6 g/h,水分主要来源为钻取收集的月壤样品及月壤罐内与钻取直接接触的部分月壤,氢氧光化学合成装置获得的总气体产生速率12.6 g/h,验证了含冰星壤水冰资源提取与利用一体化技术的可行性。

本文研究验证了以光热输入和钻取密封为基础的水冰资源原位提取及氢氧制备技术路线。未来面向月面高真空与极低温环境,仍需完成一系列技术突破,包括月壤水冰的原位封存、低能耗水冰提取、水冰提纯与收集利用等。同时需实施含冰月壤规模化提取技术方案论证,为深空探测活动中水氢氧等物资的原位补给提供支撑。

参考文献

[1] 叶培建,彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. *中国工程科学*, 2006, 8(10): 13-18.
 YE P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. *Engineering Science*, 2006, 8(10): 13-18.
 [2] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2014, 1(1): 5-17.

WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17.
 [3] 李志杰,果琳丽. 月球原位资源利用技术研究[J]. *国际太空*, 2017, 3: 44-50.
 LI Z J, GUO L L. Research on the technology of lunar in-situ resource utilization[J]. *Space International*, 2017, 3: 44-50.
 [4] 车浪,王彬,赵鹏飞,等. 月壤原位利用技术研究进展[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(11): 1433-1446.
 CHE L, WANG B, ZHAO P F, et al. Research progress in the in-situ utilization of lunar soil[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(11): 1433-1446.
 [5] 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.
 [6] 何立臣,王超,姚伟. 含冰模拟月壤水冰资源提取实验研究[J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(5): 511-518.
 HE L C, WANG C, YAO W. Experimental study of water resource extraction from frozen lunar regolith simulants[J]. *Space Environment Engineering*, 2020, 37(5): 511-518.
 [7] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3033-3045.
 [8] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
 [9] LIN H, LI S, XU R, et al. In situ detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander[J]. *Science Advances*, 2022, 8(1): eab19174.
 [10] 徐琳,刘建忠,邹永廖,等. 月球表面水冰的探测和意义[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(1): 42-49.
 XU L, LIU J Z, ZOU Y L, et al. Discovery of water ice on the moon surface and its significance[J]. 2003, 23(1): 42-49.
 [11] 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.
 [12] ZACNY K, VENDIOLA V, MORRISON P, et al. Planetary Volatiles Extractor (PVEx) for prospecting and in situ resource utilization[C]//Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. Columbia, Maryland: LPI, 2021.
 [13] HE L, WANG C, ZHANG G, et al. A novel auger-based system for extraterrestrial in-situ water resource extraction[J]. *Icarus*, 2021, 367: 114552.
 [14] BOUCHER D. Development and testing of the resolve sample acquisition system[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Texas: IEEE, 2013.
 [15] FISACKERLY R, CARPENTER J, HOUDOU B, et al. Accessing, drill and operating at the lunar south pole: status of European plans and activities[C]//9th Symposium on Space Resource Utilization. San Diego, California, USA: AIAA, 2016.
 [16] 杜宇,盛丽艳,张焜,等. 月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 607-614.
 DU Y, SHENG L Y, ZHANG H, et al. Analysis of the occurrence mode of water ice on the Moon and the prospect of in-situ lunar exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 607-614.
 [17] 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.
- [18] 刘德赞, 张焯, 杨帅, 等. 月球极区钻取采样技术[J]. 深空探测学报 (中英文), 2020, 7(3): 278-289.
- LIU D Y, ZHANG H, YANG S, et al. Research of drilling and sampling technique for lunar polar region exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 278-289.
- [19] 丁晟, 全晓军, 林涛, 等. 圆锥槽结构强化低压水蒸气的膜状凝结实验研究[J]. 低温工程, 2021, 243(5): 28-32.
- DING S, QUANG X J, LIN T, et al. Experimental research on conical groove structure strengthening film-wise condensation of low-pressure steam[J]. *Cryogenics*, 2021, 243(5): 28-32.
- [20] REISS P, GRILL L, BARBER S J. Thermal extraction of volatiles from the lunar regolith simulant NU-LHT-2M: Preparations for in-situ analyses on the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 175: 41-51.
- [21] LIU Y, WANG C, PANG Y, et al. Water extraction from icy lunar regolith by drilling-based thermal method in a pilot-scale unit[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 202: 386-399.
- [22] QIAN Y, 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]. *Icarus*, 2020, 337: 113508.
- [23] ATKINSON J, PRASAD M, ABBUD-MADRID A, et al. Penetration and relaxation behavior of JSC-1A lunar regolith simulant under cryogenic conditions[J]. *Icarus*, 2020, 346: 113812.
- [24] WASILEWSKI T G, BARCIŃSKI T, MARCHEWKA M. Experimental investigations of thermal properties of icy lunar regolith and their influence on phase change interface movement[J]. *Planetary and Space Science*, 2021, 200: 105197.
- 作者简介:
王庆功(1988-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 地外资源利用、空间多相流动与传热传质。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号(100094)
 电话: (010)68111066
 E-mail: wangqinggong.2011@tsinghua.org.cn
姚伟(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 行星宜居性及可持续探索、地外原位资源利用技术等。**本文通讯作者**。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号(100094)
 电话: (010)68747483
 E-mail: yaowei_72@hotmail.com

Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith

WANG Qinggong¹, WANG Chao¹, PANG Yong², QUAN Xiaojun³,
 YAO Yingfang⁴, LAI Xiaoming², YAO Wei¹

(1. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. Beijing Spacecrafts Manufacturing Factory, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

4. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract: Water is the most important resource for in-situ resource utilization (ISRU) in future deep space exploration. To solve the fundamental problems of water ice exploitation and utilization in extraterrestrial planets, an integrated method of soil drilling and water extraction from icy lunar regolith was proposed in this paper. A pilot-scale experimental facility is developed where a cryogenic environment is built in a vacuum chamber. The full processes for water extraction are studied, including soil drilling, photo-thermal heating, vapor condensation and water decomposition. Correspondingly, four key components are fabricated, including a sealed, drilling device, a photo-thermal heating device, a vapor condensation and droplet collection device, and an electro-catalysis water decomposition device. A systematical study is performed in the pilot-scale facility. The integrated procedure of water extraction and utilization is well operated. The drilling process transports the lunar regolith at a speed over 1.7 kg/h with a low power consumption of less than 100 W. The water extraction rate is about 26.6 g/h when the water content of lunar regolith is 6%, while the total gas flow rate in the electro-catalysis device is 12.6 g/h. This study validates the reliability of drilling-based thermal water extraction technology from lunar regolith in cryogenic condition, which can be referenced for future engineering programs.

Keywords: in-situ resource utilization; icy regolith; sealed drilling; water extraction; hydrogen and oxygen

Highlights:

- A drilling-based thermal water extraction method from icy lunar regolith was proposed and validated.
- The full procedure includes soil drilling, thermal heating, vapor condensation and water decomposition.
- The drilling system transports lunar regolith at a speed of over 1.7 kg/h and a low power consumption of less than 100 W.
- The average water extraction rate is about 26.6 g/h when water content of lunar regolith is 6%.
- The total gas flow rate in the electro-catalysis device is 12.6 g/h.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]