

ZHANG Peng, LIU Guanghui, LIU Xin, ZHANG Guang, ZHENG Haibo, DAI Wei, WANG Zhi, NIU Ran, BO Zheng, GAO Ming. Research Progress of Lunar *In-situ* Water Production Techniques (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(2): 309–317. DOI:10.11728/cjss2024.02.2023-0006

月面原位水资源获取技术与发展趋势*

张 鹏 刘光辉 刘 欣 张 光 郑海菠
代 巍 王 之 牛 冉 薄 正 高 铭

(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

摘 要 随着深空探测活动的持续推进,月球探测已成为开展行星际探测的重要部分。月球原位资源利用是保障载人月球探测及月面长期驻留的关键技术途径,中国已将月面原位水获取方法列为月球探测的关键技术之一。月面原位水获取方法主要分为极区水冰勘探开采和月壤氢还原制水两种技术途径。现有勘探到的水冰资源主要位于月球极区,分布不均匀,开采难度大。目前研究提出了多种不同类型的极区水冰勘探开采方法,但实际效果有待月面原位试验验证。月壤加氢还原制水技术方法工作条件不受区域限制,应用范围较广,但仍存在反应条件要求高、能耗大等技术限制,未来需在节能和有效矿物成分富集等方面有所突破。

关键词 月球探测, 原位水获取, 水冰提取, 月壤氢还原

中图分类号 P184

Research Progress of Lunar *In-situ* Water Production Techniques

ZHANG Peng LIU Guanghui LIU Xin ZHANG Guang ZHENG Haibo
DAI Wei WANG Zhi NIU Ran BO Zheng GAO Ming

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract With the continuous advancement of deep space exploration, lunar exploration will be the first step for mankind to carry out interplanetary exploration and expand living territory. The lunar *in-situ* resource utilization will be a key technical approach to support manned exploration and long-term survival on the Moon surface. Almost all space powers are carrying out continuous research on lunar *in-situ* water production technology, and China has also listed lunar surface *in-situ* water production as one of the key technologies for lunar exploration missions. Lunar *in-situ* water production can be mainly divided into two methods: polar water ice exploration/extraction and hydrogen reduction of lunar regolith. The water ice resources that had been detected are mainly located in the lunar polar region, with uneven distribution and great difficulty in extraction method. Many different types of polar water ice ex-

* 国家重点研发计划项目资助 (2021YFA0717200)

2023-01-11 收到原稿, 2023-02-02 收到修定稿

ploration and extraction schemes have been put forward, but the actual effect needs to be verified by sufficient verification experiments and the lunar *in-situ* test. Hydrogen reduction of lunar regolith can be used for *in-situ* water production, and its working conditions are not limited by the region, and its application scope is wide. However, there are some remaining technical limitations such as extreme reaction condition requirements and high energy consumption, which implies urgent demand to make breakthroughs in energy conservation and effective ingredient enrichment. Thus, according to the development strategy deployment of lunar exploration missions and the requirements of *in-situ* water resource acquisition technology in the future, some suggestions are put forward on developing the key development path of *in-situ* water resource acquisition technology in the future. Target areas for future exploration missions, *in-situ* energy acquisition scheme, security and reliability of different technologies will be used as the main basis for different technology selection. It is hoped that this work will provide guidance for *in-situ* resource utilization in future lunar exploration missions.

Key words Lunar detection, *In-situ* water production, Water ice extraction, Lunar soil hydrogen reduction

0 引言

月球作为地球最近的自然天体,一直以来都是开展空间探索的重要目标. 20 世纪以来, 美国和苏联开展了大量月球探测活动, 形成了人类的第一次月球探测热潮. 在第一次月球探测高潮中, 苏联先后发射了 24 个月球号系列探测器, 通过飞掠、环绕、硬着陆、软着陆和自动采样 (样品质量 301 g) 返回等多种方式对月球开展地形地貌、地质构造、月壤特性和地质图绘制等历史性探测. 在同一时期, 美国相继成功实施了先驱者 (Pioneer)、徘徊者 (Ranger)、勘测者 (Surveyor) 和月球轨道器 (Lunar Orbiter) 等系列探测任务, 获取了大量高清月球图像, 制作了月球地形地貌图, 开展月表着陆试验, 为阿波罗载人登月任务的实施提供了坚实的技术支撑. 第一次探月任务高潮通过对月球遥感及就位探测获取的海量数据和返回样品分析, 在月球空间环境探测、地月轨道参数、月面地质结构、月壤及月岩物质成分及化学组成、月球物质资源勘测和月球形成与演化等方面取得了一系列重要研究进展, 获得了对月球本质特征和地月系统相互作用规律的基本认知.

在第二次月球探测高潮中, 美国、欧洲、日本、中国、印度等相继成功发射克莱门汀 (Clementine)、月球勘探者 (Lunar Prospector)、SMART-1 号、月亮女神 (SELENE)、嫦娥、月球勘测轨道飞行器 (LRO) 和月船一号 (Chandrayaan-1) 等探测器, 先后开展了全球性月球地形地貌调查、月球资源调查、月球空间

环境调查、水以及极区水冰调查, 为载人月球探测拉开了重返月球和建立月球永久基地的序幕. 美国阿波罗载人登月计划是目前唯一成功实施的有人月球探测任务, 共执行 6 次载人登月任务^[1]. 同时, 阿波罗计划采集了约 381.7 kg 的月球样品以及大量遥感和就位探测数据, 在月球的地形地貌、月表环境、地质构造、内部结构、化学成分、岩石组成与分布、地月系起源与演化等方面的科学认知有了革命性改变. 目前, 中国已成功实施无人月球探测 (嫦娥工程) 阶段的绕、落、回三期工程. 其中探月工程一期主要实现探测器绕月飞行探测, 获取月面三维高清立体影像, 探测分析月面主要元素及物质类型的丰度和分布规律, 测量表层月壤厚度, 评估氦-3 等挥发分含量, 探测地月空间环境, 并为嫦娥三号目标着陆区提供高分辨率遥感成像. 探月工程二期主要通过月背软着陆的方式, 进行月表地质形貌与内部构造勘查、月表物质资源可开发度勘察、地球等离子体层探测、月基光学天文观测以及地质构造勘查等研究. 探月工程三期在前期探测任务的基础上, 软着陆在月球表面特定区域, 并完成月壤样品自动表采和钻采返回任务^[2,3]. 嫦娥五号已经完成自动采样 (样品质量 1731 g) 返回任务, 相关样品的研究工作也取得了系列进展, 在月壤样品的基础物化特性、地质年代和月球形成等方面报道了一系列重要研究结果, 为月球资源的开发利用奠定了良好基础. 2021 年 6 月中国国家航天局发布了国际月球科研站建设计划. 该计划的科学目标体系包括月球地形地貌与地质构造、月球物理与内部结构、月球化

学、地月空间环境、月基天文观测、月基对地观测、月基生物医学实验和月球资源原位利用等^[4]. 其发展路线主要包括“勘、建、用”三个阶段.

在新一轮探月高潮中, 欧洲空间局、日本、印度、韩国、以色列等国家和机构先后加入月球探测的行列, 呈现出近地轨道—地月空间—火星的深空探测发展态势. 月球探测作为深空探测任务的前沿, 已成为主要航天大国开展深空探测的首要目标, 其中在月面建立永久居住和科研设施、开展长期月面驻留和科学活动被作为远期目标. 在人类进行月面驻留与科学活动过程中, 水/氧等基本生存物资将是最基本的物质补给需求, 也是开展月面科学实验与活动的必要条件之一^[5]. 生存物资完全依靠地面补给的技术手段难以满足长期驻月任务需求, 利用月球资源原位获取生存必需物资是必由之路. 现有研究结果表明, 月面水资源的原位获取可分别通过月球极区水冰提取和矿产资源加氢还原的方式实现, 并且国内外多家机构分别开展了探索性研究工作, 取得了一定进展.

1 月面原位水冰勘探与提取

水是建设未来月球基地并实现月面长期驻留与科考活动的关键战略资源, 也是月球探测任务的主要目标, 月球两极的永久阴影区可能含有储量丰富的水

或水冰资源, 水冰的存在形式、含量和分布, 一直是全球各航天大国月球探测任务的目标之一. 其中 1998 年 NASA 发射的月球勘探者号探测器搭载的中子光谱仪在月球极区探测到大量氢富集的数据^[6], 但该探测数据无法确定是水冰, 还是矿物中结晶水或者结构水 (羟基) 资源. 2008 年印度发射了月船 1 号探测器, 其搭载的月球矿物绘图仪 (M^3) 在月球极区发现了羟基/矿物水的富集, 但是不能区分水、羟基和水冰具体存在的差异. 2009 年 NASA 发射了月球勘测轨道飞行器 LRO, 与其一同发射的月球撞击坑观测和遥感卫星 (LCROSS) 撞向月球南极 Cabeus 陨石撞击坑的永久阴影区内, 产生了岩石碎片、月尘和水蒸气, 获得了月球极区永久阴影区水冰资源存在的证据, 撞击点处月壤中水的质量百分比含量为 $5.6\% \pm 2.9\%$ ^[7].

2018 年有研究利用光谱数据在月球极区首次获得了月球存在水冰的直接证据^[8], 文献 [8] 利用搭载在印度月船 1 号上的 NASA 月球矿物成像仪 (Moon Mineralogy Mapper, M^3) 获得的数据, 通过分析 M^3 反射光谱数据的三个显著特征吸收峰 (分别在 1.3、1.5 和 2.0 μm 处) 获得了极区陨石坑永久阴影区内存在水冰资源的直接证据, 最终确认在月球南北纬 70° 以上陨石坑的永久阴影区内发现多处含有水冰的区域, 并绘制了月球两极水冰存在和分布特征, 如图 1 所示^[8]. 在月球中低纬地区, 也先后发现了水资

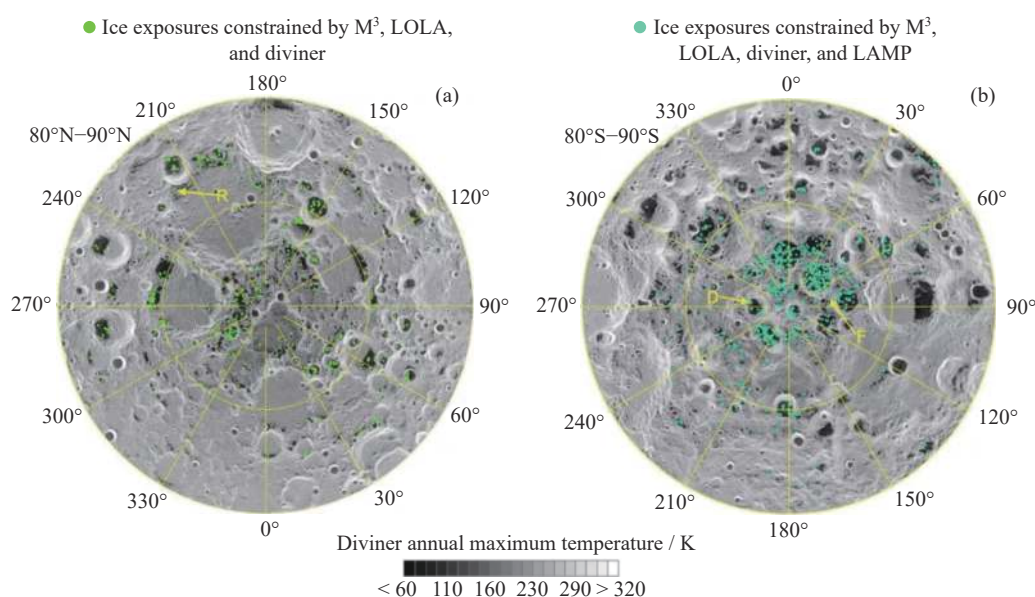


图 1 月球极区水冰探测结果

Fig. 1 Lunar polar water ice detection results

源存在的证据^[9,10]. 中国结合红外光谱和纳米离子探针分析, 发现嫦娥五号矿物表层中存在大量的太阳风成因水, 估算太阳风质子注入为嫦娥五号月壤贡献的水含量至少为 170 ppm, 证实月表矿物是水的重要“储库”, 为月表中纬度地区水的分布提供了重要参考^[10].

除上述月球水冰资源勘探研究进展之外, 有研究提出了不同的月球水冰资源原位获取方法. 如图 2(a) 所示^[11,12], 美国 NASA 研究提出了一种利用太阳光作为主要能源, 实现月球极区永久阴影区水冰资源开采的概念方案^[11]. 美国科罗拉多矿产大学提出了一种帐篷式的光热水冰资源开采提取方法^[12], 直接将太阳光收集并传导至陨石坑内永久阴影区的表层月壤中, 加热月表下水冰的受热相变, 蒸汽在密闭帐篷内圆顶处被捕获, 并通过冷阱方式进行冷凝收集, 如图 2(b) 所示. 目前该方法仍处于概念阶段, 其实际的水提取效果有待进一步验证. 美国科罗拉多矿业大学等研究机构还分别提出了传送带式水冰资源提取、移动式原位水提取和旋耕机式水冰资源提取等方法, 目前这些方法以概念设计和原理实验验证为主, 其技术可行性有待进一步验证.

另一种月球水冰资源开采利用方法是基于含冰月壤钻取的技术. 该方法主要利用钻取装置钻取含冰的月壤, 并采用加热的方法将月壤中的水冰资源加热提取, 达到开发月球水冰资源的目的^[13,14]. 基于该方法, 美国 NASA 提出了资源勘探者 (Resource

Prospector) 任务, 其主要目标是月壤与环境科学探测及氧与月球挥发物提取 (RESOLVE), 由美国 NASA 肯尼迪空间中心负责^[15]. RESOLVE 载荷主要包括月壤钻取系统 (Drill)、挥发物探测分析系统 (NIRVSS)、挥发物提取系统 (OVEN) 以及挥发物分析装置 (LAVA) 等, 如图 3 所示^[15]. 该任务的基本设

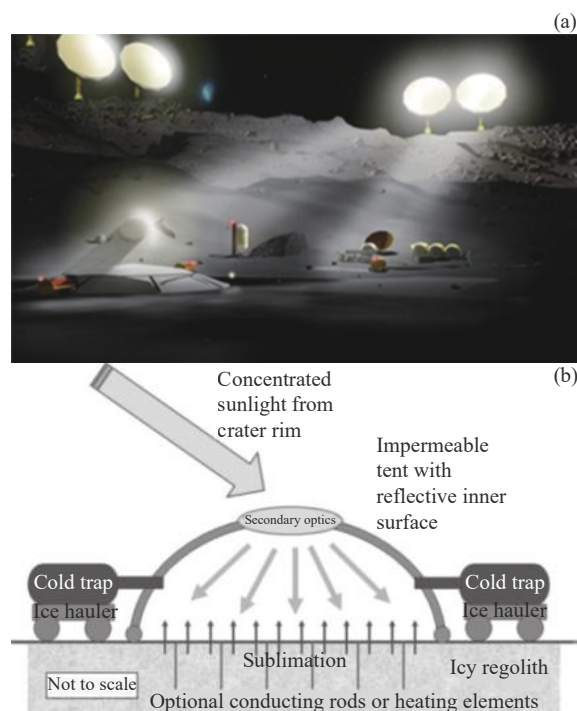


图 2 极区水冰资源光热提取技术

Fig. 2 In-situ extraction programs of extraterrestrial water ice resource

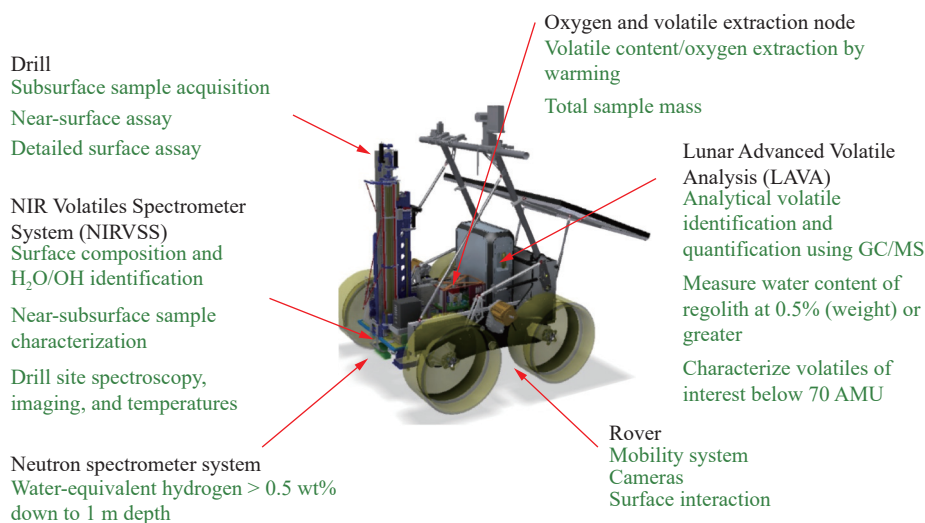


图 3 RESOLVE 月球探测科学载荷及取样装置

Fig. 3 RESOLVE lunar exploration scientific payload and its sampling equipment

想是, 由月球车巡视勘查月球陨石坑永久阴影区内及其附近浅表层的富氢区域, 通过月壤钻取装置钻采样品, 进行原位加热和检测分析. 该装置不仅可以直接探测并提取水, RESOLVE 有效载荷上还将配备月壤氧提取设备, 通过氢氧化学反应方法制备水资源. RESOLVE 有效载荷主要利用钻取方式获取月壤并完成输运及密封存储. 钻具采用结构轻量化设计思路, 设计钻深可达 1 m, 重量控制在 25 kg 以内, 功耗控制在 300 W 以内. 目前钻具已完成月球极区环境适应性试验以及与有效载荷其他组件的装配集成试验.

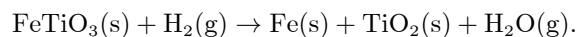
目前, 中国也开展了月球水冰资源勘测与原位提取利用的研究. 例如, 嫦娥七号探测器已经立项推进实施, 该探测器计划前往月球南极开展水冰资源钻探科研活动, 为未来月球基地建设提供技术储备. 中国空间技术研究院提出了基于月面原位聚光加热-冷凝的技术方案来实现月球水冰资源原位提取与收集的方法^[16-18]. 如图 (4) 所示^[17], 该方法主要采用含冰月壤螺旋钻取与高倍聚光加热一体式设计, 并采用冷凝收集的方式实现含冰月壤的水冰资源光热提取与收集, 目前已分别开展了地面环境原理验证实验和模拟月面低温真空环境取水实验, 均得到了良好的取水效果.

综上, 月球极区水冰资源勘探与提取技术主要采用原位光热的方法实现极区含冰月壤的加热及水资源提取收集, 该技术方案原料来源充分, 适合规模化应用. 但是, 月球极区水冰资源的详细分布区域、赋存状态和埋深等关键问题有待通过极区就位探测进

一步确定. 同时, 月球极区水冰资源光热提取技术的能源原位获取方案作为该技术的基本前提, 需要发展高效的太阳能收集及转化利用的技术方案. 并且, 目前现有研究方案以概念设计和原理实验为主, 需要加快工程任务推进实施, 实现月面原位科学实验的验证.

2 月壤加氢还原制水

由于月球极区水冰资源分布区域和水冰提取能源获取技术等限制, 月球极区水冰资源提取技术方法的应用范围将受到一定限制, 难以在全月面规模化广泛应用. 然而随着美国 Artemis 重返月球计划和中国载人登月任务等国际重大探月任务的推进实施, 月面原位资源开发利用技术研究逐渐成为现有月球探测任务的主要目标, 针对必需的水/氧等基本生存物资原位补给需求, 研究机构分别提出了采用月壤加热熔融电解制氧和加氢还原制水的技术方案, 并开展了地面原理验证实验和可行性分析验证等^[19]. 其中月壤中钛铁矿的加氢还原制水方案目前被认为是最具可行性的原位水补给方案, 其基本反应原理为



数十年前就有研究尝试分别对钛铁样品、模拟月壤、玻璃珠样品和月壤样品加氢还原制备水, 再通过电解水制氧. 这些模拟实验均将氢气作为还原剂, 还原化学键较弱的氧化物 (FeO , Na_2O , TiO_2 和 SiO_2 等), 生成水和金属单质或硅.

Sargeant 等^[20] 根据欧空局 (ESA) 月球极区挥发分探测与资源原位利用载荷 (PROSPECT) 规划, 设计并搭建了钛铁矿氢还原制水装置样机, 如图 5 所示^[20]. 并且详细开展了 FeTiO_3 加氢还原反应过程研究, 揭示了反应温度、压强和反应时间等要素的影响机制, 进而详细开展了模拟月壤 (NU-LHT-2 M)、月球陨石样品 (NWA12592) 和阿波罗 11 号任务样品 (10084 和 60500) 等不同类型样品加氢还原制水的验证性实验测试分析, 均实现了一定程度的氢还原制水效果, 其中针对高钛的阿波罗月壤样品 (10084, 钛铁矿含量约 14.55%), 月壤中氧元素的还原质量百分比约为 $0.94\% \pm 0.03\%$. 而对于低钛样品 (60500, 钛铁矿含量约 1.14%), 其月壤中氧元素的还原质量百分比约为 $0.18\% \pm 0.02\%$. 同时, 针对不同类型矿石种类, 研究结果表明辉石和橄榄石等矿石颗粒都出现了

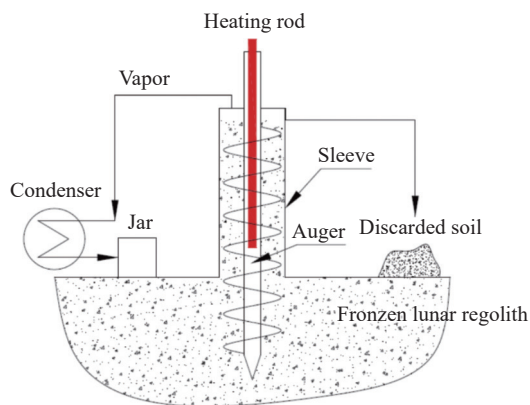


图 4 螺旋钻取提取水方案

Fig. 4 Consecutive auger-based water extraction scheme

明显的氢还原结果, 而对于胶结质颗粒, 由于其稳定的玻璃质结构, 没有发生明显的氢还原现象 (见图 6^[20]).

美国航空航天局 (NASA) 约翰逊航天中心为了其 ROxygen 项目的实施, 详细开展了模拟月壤氢还原制水的验证性实验研究 (见图 7)^[21], 其氧元素转化利用百分比约为 1%~2%. 并且提出了月面氧原位获取产量达到每年 1000 kg 的规模化装置方案. 美国肯尼迪航天中心、马歇尔航天中心和喷气推进实验室 (JPL) 等也先后开展了月壤转化利用的研究工作, 认为月壤氢还原制水是安全性最高、技术难度较低的月壤制水并进一步制氧的原位开发利用技术方案^[22].

来自美国 NASA 的 Kanamori 等^[23] 和 Steffen 等^[24,25] 详细分析了月面氢还原制水的物质流和能量流方案 (见图 8^[23]), 并且详细计算了采用该方法实现

原位水资源补给的能量需求. 根据未来月球探测任务分阶段实施规划, 从月壤采集需求量、能耗量和技术经济性等方面论证分析了月壤原位氢还原制水的可行性. 其将月面生存原位水/氧补给技术研究分为三个阶段, 即全流程技术月面原位演示验证阶段、3 人 10 天乘组任务需求原位补给阶段和 6 人 45 天乘组任务原位补给阶段, 针对各个阶段的月壤氢还原制水/氧的物质和能源需求, 进行了详细的论证分析.

目前, 已先后提出了固定反应床、移动反应床和气流反应床等不同还原反应器技术方法. 针对不同类型月壤氢还原反应器类型, 从反应温度、颗粒尺寸要求和热控设计等方面进行的技术对比结果列于表 1^[26].

目前中国针对月壤加氢还原制水的相关研究尚处于起步阶段, 由于月球综合空间环境条件的限制,

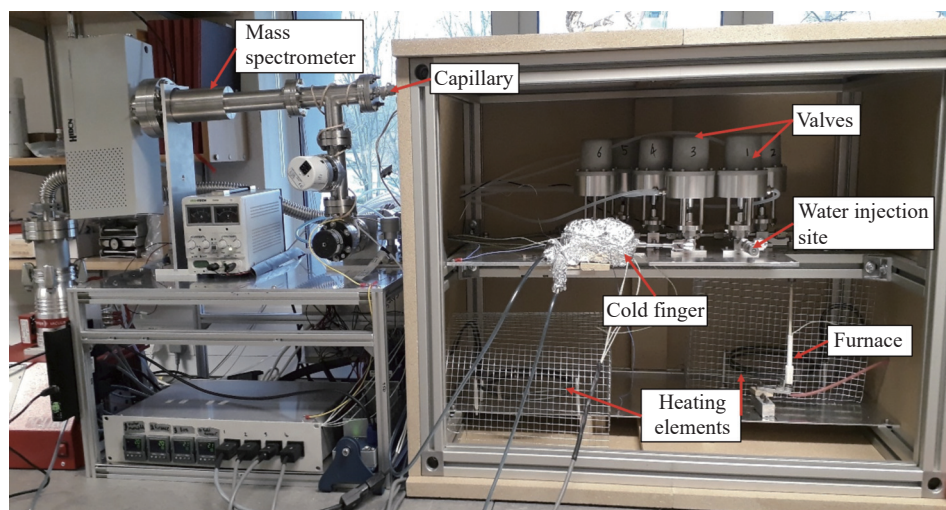


图 5 钛铁矿 (FeTiO_3) 氢还原制水装置样机

Fig. 5 Prototype for hydrogen reduction of ilmenite to produce water

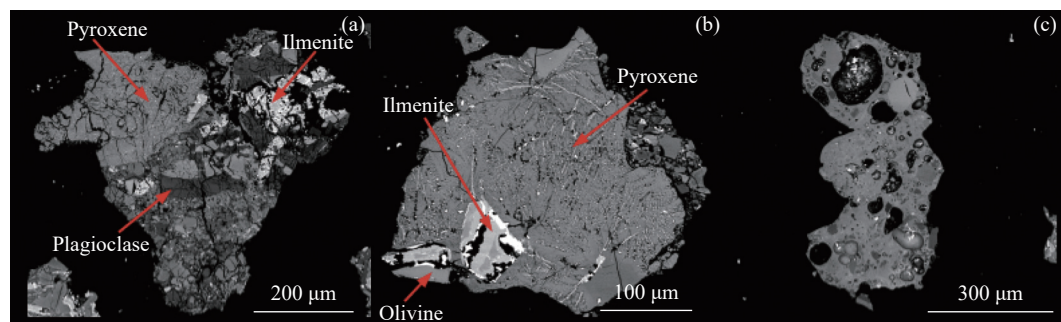


图 6 阿波罗 11 号样品 (10084) 不同类型样品颗粒的氢还原微观结构

Fig. 6 Hydrogen reduction microstructures of different particles from Apollo 11 samples (Sample No. 10084)

部分技术对月球环境的适用性较难验证. 同时, 大温差、宇宙射线强辐射和弱引力等条件给相关材料、工艺和产物的稳定性带来了不确定因素. 因此, 面向中国载人月球探测及月面驻留面临的关键生存物资补给需求, 亟需深入开展相关基础科学问题研究, 探寻可适应月球综合空间环境条件的优化技术方案, 并进一步开发高度适应月球环境、设备简单、高效、低成本的月壤加氢还原制水科学实验载荷, 完成月面科学实验验证, 为中国载人月球探测和未来载人深空探测任务奠定技术基础.



图 7 美国约翰逊航天中心模拟月壤氢还原制水实验装置

Fig. 7 Experimental facility for water production by hydrogen reduction of lunar soils at Johnson Space Center

3 结论与未来发展

作为月面最重要的生存物资和原位科研生产的重要原材料, 月球水资源逐渐成为未来月球基地建设及月面长期驻留和科学活动的必备战略资源, 将是各国月球探测任务的主要发展目标. 月球水冰资源的勘探有助于揭示地球生命起源和地月系统形成与演化等重大科学问题. 月球水资源原位获取技术不仅可直接作为月球基地建设与长期运行的必备技术, 还将有助于未来火星资源开发利用及载人火星探测等重大任务发展. 目前, 月球极区水冰资源的勘探开采和月壤氢还原制水是现有发展较为成熟的两种方法. 极区水冰资源的勘探与开采是月球原位获取水资源最直接的方式. 该方法的优势是水冰资源来源比较充分, 适合大规模化的开发利用. 但是, 其受到水冰资源存量不均衡和地理位置的制约, 仅在极区发现可能有水冰的存在, 其他区域的存量可能极为有限. 同时, 月球水冰资源勘探对采样设备和分析设备的要求较高, 其

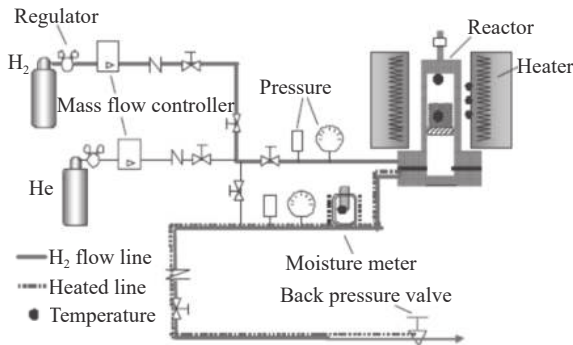


图 8 月壤氢还原制水技术流程

Fig. 8 Diagrams of water production by hydrogen reduction of lunar soils

表 1 不同技术方案类型氢还原反应器的对比分析

Table 1 Comparative analysis of hydrogen reduction reactors with different technical schemes

	固定反应床	移动反应床	气流反应床	液化反应床
气固反应适应性	不适合连续处理; 分批处理生成产物不均匀	低粉末含量微粒较为均匀; 反应器容量较大	反应速度快, 回收利用未反应粉末困难	颗粒尺寸分布没有特殊要求; 可能存在大量粉末; 连续处理生成均匀粉末
温度分布	由于放热反应存在过热点风险	通过高速固体循环和气体流动将温度梯度控制在允许范围内	可通过高速固体循环将轴向温度梯度约束在允许范围内	高固体混合确保温度分布均匀; 通过侵入床内的热交换器或通过增减固体控制温度
热控设计	换热不良、热传输限制扩展	固体热容大导致换热不良; 通过固体循环进行大量热传输	介于液化床和移动床之间	高效传热, 固体热传导效率高
月壤颗粒尺寸	颗粒尺寸8~20 μm , 分布均匀, 无粉末	颗粒尺寸2~6 mm, 分布均匀, 无粉	颗粒尺寸0.02~6 mm, 分布分散	颗粒尺寸0.02~0.5 mm, 分布集中

开采也受到水冰赋存的具体位置、赋存深度和赋存状态等关键要素限制,这将是未来水冰勘探与开采必须克服的困难.月壤氢还原制水技术以月面广泛分布的月壤资源作为主要原材料,其技术优势在于原材料来源充足,应用范围广,不受区域限制,且反应产物也可用于月面建造等.但是该技术也受到月壤矿物成分的制约,且化学反应条件苛刻,能量消耗大,氢气消耗也需要地球的运载补给.为了提高效率和资源利用率,钛铁矿等有效成分的富集和高效节能反应器的开发研制将是未来研究重点.

因此,根据中国未来月球探测任务发展战略部署,针对原位水资源获取技术需求,未来开展月面原位水资源获取技术研究应重点考虑以下几个方面.

(1) 探测任务目标区域是不同技术选择的主要依据.不同月球探测任务的目标区域明显不同,分别包括两极地区、中纬地区和低纬地区等.针对不同的目标区域,可分别发展极区水冰资源获取和月壤氢还原制水等不同的技术方案.根据上述文献分析,在月球两极地区,建议优先发展水冰资源钻探与提取为一体的水资源获取技术方案.而在中低纬地区,建议优先发展月壤氢还原制水技术,可解决月面长期驻留与科学活动面临的水资源补给需求.

(2) 能源高效原位获取将是月球原位水资源获取技术发展的基本保障.月球极区水冰资源勘探提取技术和月壤氢还原制水技术均需要大量的能源需求,能源原位获取和供应将直接决定水资源的提取效率以及氢还原制水的反应效率.月面具有丰富的太阳能资源,太阳能的高效收集和转化利用将成为月球原位水资源获取的基本保障,需要重点攻关和发展.

(3) 月壤的原位开采、运输和矿物富集是月面原位水资源获取规模化应用的重要基础.极区含冰月壤的高效钻取及输运有待进一步发展高效的技术方法和充分实验.钛铁矿作为月壤加氢还原制水的主要原材料,其分选富集技术难题尚需突破.针对上述两个不同的原位水资源获取技术方案,月壤的原位开采、运输和矿物富集都是未来规模化应用的重要基础.

(4) 安全可靠的技术方案亟需地面实验和月基原位实验的充分验证.目前针对极区水冰资源勘探提取和月壤氢还原制水技术需求,分别提出了不同的技术方法,并开展了地面原理实验验证,但是相关样机的研制和载荷研发有待进一步加强,并且有待开展月基

原位实验验证.

参考文献

- [1] LI Chunlai, LIU Jianjun, ZUO Wei, *et al.* Progress of China's lunar exploration (2011-2020)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 68-75 (李春来, 刘建军, 左维, 等. 中国月球探测进展 (2011-2020 年)[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 68-75)
- [2] XU L, LI H, PEI Z Y, *et al.* A brief introduction to the international lunar research station program and the interstellar express mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 511-513
- [3] XU L, PEI Z Y, ZOU Y L, *et al.* China's lunar and deep space exploration program for the next decade (2020-2030)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 615-617
- [4] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al.* Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. *科学通报*, 2020, **65**(24): 2577-2586)
- [5] LI Yinghui, SUN Yeqing, ZHENG Huiqiong, *et al.* Recent review and prospect of space life science in China for 40 years[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 46-67 (李莹辉, 孙野青, 郑慧琼, 等. 中国空间生命科学 40 年回顾与展望[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 46-67)
- [6] CLARK R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the moon[J]. *Science*, 2009, **326**(5952): 562-564
- [7] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, *et al.* Detection of water in the LCROSS Ejecta Plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 463-468
- [8] 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 of the United States of America*, 2018, **115**(36): 8907-8912
- [9] 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
- [10] ZHOU C J, TANG H, LI X Y, *et al.* Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 5336
- [11] NASA. Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies[EB/OL]. (2019-04-11)[2023-01-11]. https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2019_Phase_I_Phase_II/Thermal_Mining_of_Ices_on_Cold_Solar_System_Bodies
- [12] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, **7**(4): 235-244
- [13] 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
- [14] 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 (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)
- [15] WILLIAM E L, MARTIN P, GERALD B S, *et al.* RESOLVE: An International Mission to Search for Volatiles at the Lunar Poles[C]//International Space Exploration Research Institute (ISERI) 2013 Symposium
- [16] LI X T, ZHANG G, WANG C, *et al.* Water harvesting from soils by light-to-heat induced evaporation and capillary water migration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, **175**: 115417
- [17] HE L C, WANG C, ZHANG G, *et al.* A novel auger-based system for extraterrestrial in-situ water resource extraction[J]. *Icarus*, 2021, **367**: 114552
- [18] LIU Y W, 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*, 2023, **202**: 386-399
- [19] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, *et al.* The Artemis Program: an overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020
- [20] SARGEANT H M, ABERNETHY F A J, ANAND M, *et al.* Feasibility studies for hydrogen reduction of ilmenite in a static system for use as an ISRU demonstration on the lunar surface[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **180**: 104759
- [21] LEE K A, ORYSHCHYN L, PAZ A, *et al.* The ROxygen Project: outpost-scale lunar oxygen production system development at Johnson Space Center[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, **26**(1): 67-73
- [22] SANDERS G B, LARSON W E. Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, **26**(1): 5-17
- [23] KANAMORI H, WATANABE T, AOKI S. Power requirements for the construction and operation of a lunar oxygen plant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, **26**(1): 160-168
- [24] STEFFEN C J JR, FREEH J E, LINNE D L, *et al.* System modeling of lunar oxygen production using fission surface power: mass and power requirements[J]. *Nuclear Technology*, 2009, **166**(3): 240-251
- [25] STEFFEN C J JR, FREEH J E, LINNE D L, *et al.* System modeling of lunar oxygen production: mass and power requirements[C]//Proceedings of Space Nuclear Conference. Boston: American Nuclear Society, 2007
- [26] ZHANG Yulin. Cislunar Space Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022 (张育林. 地月空间工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2022)

作者简介



张 鹏 男, 1981 年 3 月出生于北京市, 现为中国科学院空间应用工程与技术中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为载人航天空间应用系统研制、月球探测新方法、月球探测大数据处理与集成技术和月球原位资源利用等。
E-mail: zhangpeng@csu.ac.cn



张 光 (通信作者) 男, 1986 年 11 月出生于河南省商丘市, 现为中国科学院空间应用工程与技术中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为载人月球探测新方法、月球原位资源开发利用和行星科学等。
E-mail: zhangguang@csu.ac.cn