



月面原位资源补给站概念方案设计

王超, 彭祺擘, 王慎泉, 王庆功, 姚伟

Conceptual Design of Lunar Surface In-Situ Resource Supply Station

WANG Chao, PENG Qibo, WANG Shenquan, WANG Qinggong, and YAO Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220071>

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

月球基地建设方案设想

Prospect of Lunar Base Construction Scheme

深空探测学报(中英文). 2018, 5(4): 374-381

月球基地能源系统初步研究

Preliminary Research on the Lunar Base Energy System

深空探测学报(中英文). 2018, 5(6): 561-568

环月轨道交会的载人登月任务轨道与窗口规划

Study on Mission Planning and Window Design for Manned Lunar Far-Side Exploration

深空探测学报(中英文). 2017, 4(5): 471-476

无人月球科考站构建与运行关键技术初探

Preliminary Study on Key Technologies for Construction and Operation of Robotics Lunar Scientific Base

深空探测学报(中英文). 2020, 7(2): 111-117

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

月面原位资源补给站概念方案设计

王超¹, 彭祺擎², 王慎泉², 王庆功¹, 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. 航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 针对载人登月、月球基地建设及月球科学研究等重大工程任务需求, 利用原位资源利用技术, 构建具备一定物资和能源供给能力的月面资源补给站, 通过突破月面原位水冰光热提取、月面原位制氧、月面原位储能发电和月面原位建造等关键技术, 以实现航天员月面驻留生存和月面活动所必须的居住防护舱建造, 水、氧气和燃料等物资, 以及光、热、电等能源的原位获取和补给, 推动中国月球科考与开发活动, 并逐步摆脱依赖地球补给进行月面长期驻留和科考。

关键词: 载人登月; 月球基地; 资源补给站; 原位资源利用

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)06-0596-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220071

引用格式: 王超, 彭祺擎, 王慎泉, 等. 月面原位资源补给站概念方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 596-605.

Reference format: WANG C, PENG Q B, WANG S Q, et al. Conceptual design of lunar surface in-situ resource supply station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 596-605.

引言

月球作为距离地球最近的天体, 以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景, 成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标^[1]。从20世纪50年代开始, 月球一直是深空探测活动的热点。近年来, 美国重返月球“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划和中国实施的探月工程更是把月球探测推向了新的高潮。按照Artemis计划, 最快在2024年实现载人登月, 并将在月球南极附近区域建立永久基地^[2]。2021年底, “中国探月工程四期”正式立项, 进入全面实施阶段, 主要是对月球南极开展科学探测, 并通过不断完善, 为国际月球科研站的建设打下基础。此外, 载人登月也正在深入研究和论证, 将实现航天员首次登陆月球。载人月球科研站可实现更长周期的月球驻留。俄罗斯也发布了10 a的航天规划, 提出将在2025年前后连续实施“月球25号”(Luna-25)月球南极着陆任务、“月球26号”(Luna-26)绕月探测任务、“月球27号”(Luna-27)月球南极着陆巡视任务。俄罗斯还计划与欧洲航天局(European Space Agency, ESA)联合开展月球-土壤(Luna-Grunt)月球南极采样返回任务, 并于2030年前开始建设可容纳12人的月球基地^[3]。

但载人月球科研站与月球基地的建设及航天员长

期驻留月面相关的活动, 面临较为苛刻的辐射环境和微陨石撞击风险与大量的水、氧和燃料等物资补给以及热、电等能源供给需求。传统火箭运载方式受到运载能力和成本的限制, 难以有效支撑未来月面长期探测任务发展。因此需要发展可支撑月面长期驻留的原位资源获取与转化利用能力, 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)是一种可持续能力强、低成本的解决方案^[4]。通过开采月球资源, 原位生产推进剂、氧气、水以及建筑材料等重要物资, 将实现月球探测任务的原位补给, 大大降低从地球的发射质量和成本, 是开展太空可持续探索的基础和地外长期驻留的使能技术^[5]。因此, 基于原位资源利用技术, 开展月球资源探测开发, 构建月面资源补给站, 是减少维持载人月球科研站所必须的地球补给需求, 并帮助发展不依赖地球自主运行基地的重要途径。

本文根据月球科研站建设和运营面临的物资和能源补给需求, 提出一种月面原位资源补给站概念, 开展了补给站功能定位、系统组成及构型方案设计, 分析了补给站技术途径、物质能流关系、建设运行方式和实施思路, 并介绍了补给站涉及的关键技术及其进展状态, 以为月面原位资源补给站方案深化研究和关键技术攻关提供参考。

1 月面原位资源补给站概念方案设计

1.1 月面原位资源补给站功能定位设计

基于月球资源类型和赋存状态, 发展月面原位资源利用相关技术, 构建月面原位资源补给站。月面原位资源补给站作为月面的重要基础设施, 将成为载人月球科研站及未来月球基地的有机组成部分, 呈现典型的功能舱段特点。

月面原位资源补给站主要是利用月球原位丰富的月壤资源, 实现载人月球科研站及月球基地居住舱防护结构的原位建造, 同时为居住舱及月面活动的航天

员提供水和氧气供给, 以弥补再生生保系统循环过程的损失, 从而有效增加航天员的月面驻留时间; 此外, 月面原位资源补给站还可为载人月球科研站、月球基地及关键月面移动设施夜间供热和供电, 有效改善月面设施夜间的工作环境, 解决长周期月夜环境产生的低温保暖难题和关键设备用电需求, 极大地拓展航天员的月面活动范围, 从而降低载人深空探测任务的风险, 丰富载人深空探测成果, 功能定位如图1所示。月面原位资源补给站生产的水、氧气等资源, 还可转化为火箭燃料, 为开展地月空间活动和更远的载人深空探测提供物质基础。

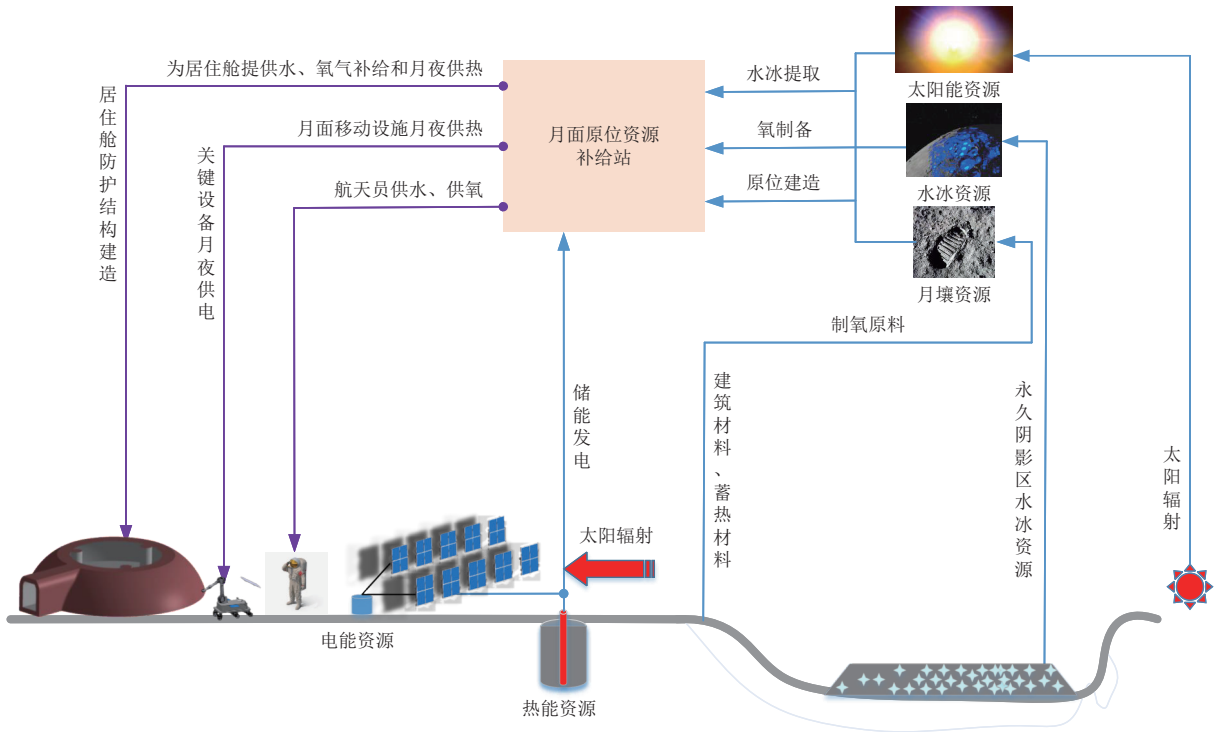


图 1 月面原位资源补给站功能定位
Fig. 1 Function of lunar surface resource supply station

1.2 整体系统构型方案设计

月面原位资源补给站基于原位资源利用技术整体方案如图2所示。该补给站以载人月球科研站、月球基地建设 and 航天员月面持久驻留过程及未来载人深空探测活动所需求的物质和能源补给为目标, 通过原位获取水、氧、碳氢燃料等物资以及热、电等能源, 利用就地月壤材料原位建造, 发展可支撑载人深空探测和长期地外驻留活动的水、电、氧气和燃料联供的月面资源综合补给系统, 降低对地球物资能源补给依赖, 为低成本、可承受的载人深空探测提供技术手段。

月面原位资源补给站系统功能组成如图3所示。针对月面太阳能、水冰及月壤等, 建立能供水、供氧、供电、供热和防护结构月面原位建造的综合补给站,

关键组成包括光热水冰提取、月面原位制氧、月壤3D打印和原位储能发电子系统。

1.3 月面原位资源补给站技术途径分析

月面原位资源补给站涉及的月面原位资源利用技术包括: 水冰提取、氧制备、储能发电和原位建造。

1) 水冰提取

光热水冰提取子系统, 首先采用水冰资源探测装置, 选定水冰提取位置, 利用月壤钻取装置, 将含冰月壤钻取运输并密封; 然后采用高倍太阳光聚光装置, 汇聚太阳光并导入月壤钻取装置内部, 含冰月壤受热相变, 转化为水蒸气; 进而采用水蒸气高效冷凝收集装置, 将水蒸气转化为水资源, 实现月面水冰资源的原位提取, 技术途径如图4所示。

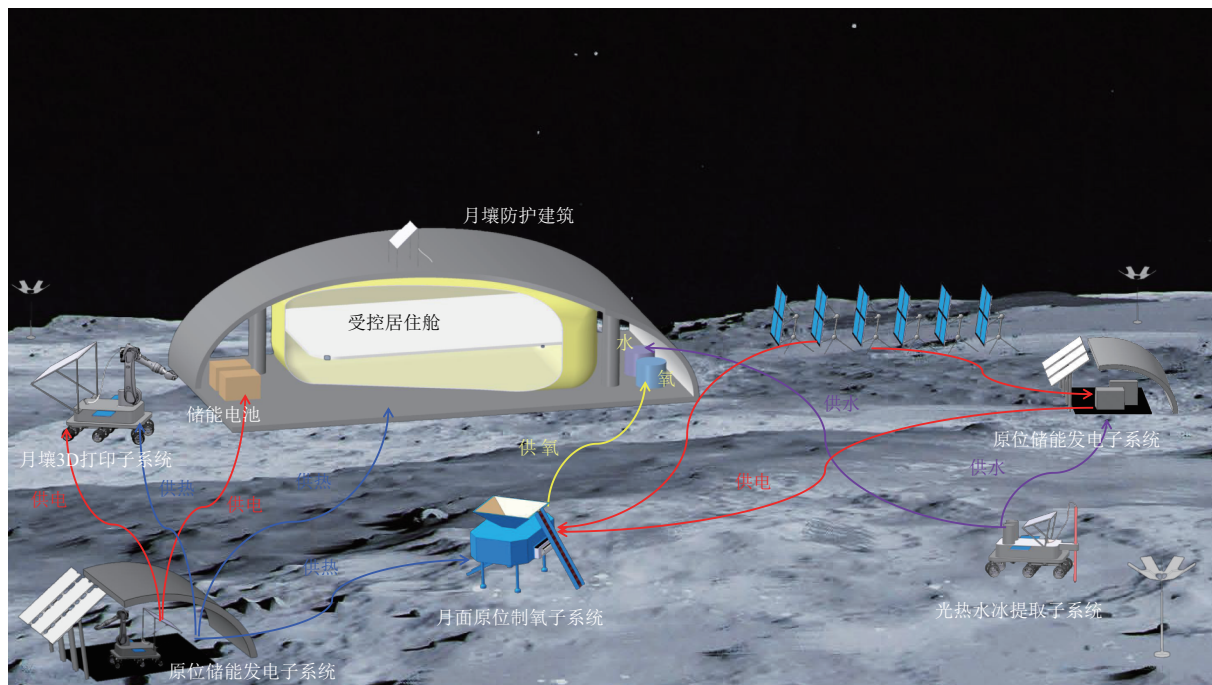


图2 月面原位资源补给站整体概念方案

Fig. 2 Conceptual design of lunar surface resource supply station

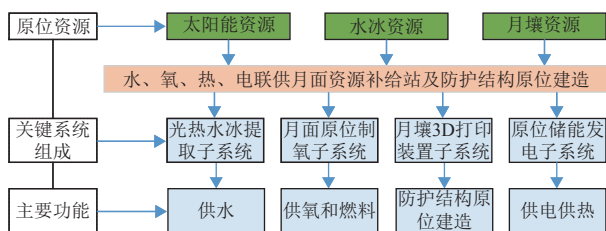


图3 月面原位资源补给站系统组成

Fig. 3 System components of lunar surface resource supply station

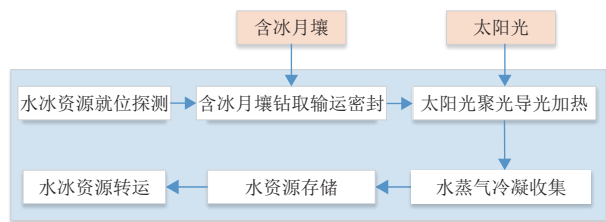


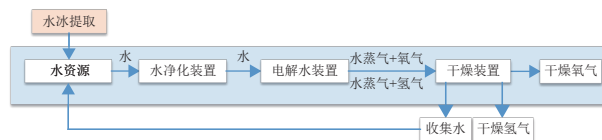
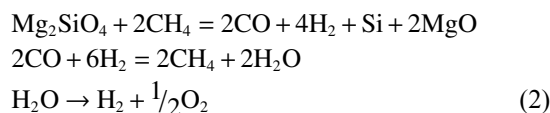
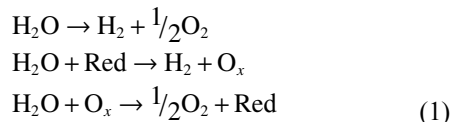
图4 水冰提取技术途径

Fig. 4 Technical approach to water ice extraction

2) 氧制备

月面原位制氧子系统的设计技术途径如图5所示。可采用两条技术路线：分别为水冰提取电解制氧路线和月壤原位制氧路线。针对水冰提取电解制氧路线，具体过程为经水冰提取获得的水资源满足航天员水循环损失补给需求后，剩余水资源利用电化学方法电解水制备氧气。经水冰提取获得的水资源，通过水净化装置，获得的高洁净度液态水经电解水装置，实现水电解制备得到氧气、氢气和水蒸气混合物，经干燥装

置，水蒸气分离后获得干燥的氢气和氧气，分别储存在氧储罐和氢储罐，干燥收集的水循环至水净化装置，开始下一阶段制氧的过程，整个化学反应过程如式(1)所示，技术流程如图5(a)所示，针对月壤原位制氧路线，主要采用碳热还原反应制氧，具体过程为：首先使用采土设备获得月壤并进料至碳热还原反应器，然后通入初始由地球携带至月球的CH₄，与月壤反应(反应温度~1 000℃，低于月壤熔点)，主要生成CO和H₂，同时含有少量CO₂、水蒸气以及粉尘混合物；之后通过分离器，CO、CO₂和H₂进入Sabatier反应器，产生CH₄和水，CH₄被再次通入碳热反应器，最后水通过电解生成H₂和O₂，整个化学反应过程如式(2)所示，技术流程如图5(b)所示。



(a) 水冰提取电解制氧

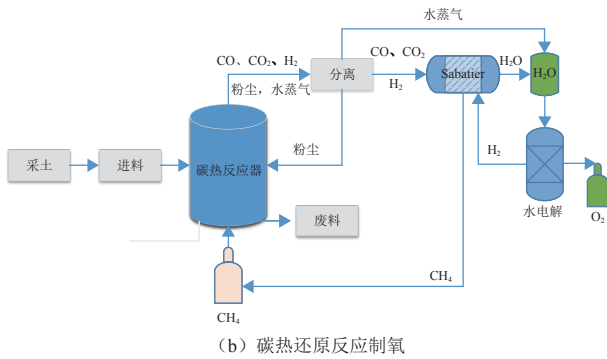


图 5 氧制备技术途径

Fig. 5 Technical processes of oxygen extraction

3) 储能发电

原位储能发电子系统, 包含月壤储能发电和再生燃料电池装置。月昼期间, 通过太阳能高倍聚光及光热转换装置将太阳光汇聚导入月壤块(储热部件)内部, 并将热能储存备用; 同时利用太阳电池阵实现光电转换向负载供电, 过剩的电能用于再生燃料电池的供电, 并利用水冰提取获取的水资源供给再生燃料电池, 电解出 H_2 、 O_2 , 并储存到氧气与氢气储罐中; 月夜期间再生燃料电池利用存储的 H_2 、 O_2 发电, 向负载提供所需的电能, 产生的水将传输到水贮箱中备用, 发电过程产生的热量及储热部件供给的热量用于自身的保温, 而储热装置中储存的过量热能可保障载人月球科研站的热能需求, 原位储能发电如图6所示。

4) 原位建造

设计月壤3D打印子系统, 通过月壤采集筛分、操控运输、聚光加热熔融以及成型工艺控制等技术流

程, 如图7所示, 可实现致密承力结构件的原位制备和烧结以及复杂、疏松多孔的三维保温结构件的原位建造。

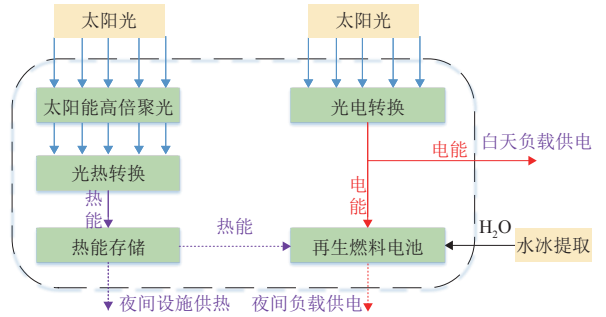


图 6 原位储能发电技术途径

Fig. 6 Technical approach to lunar in-situ thermal energy storage and thermoelectricity generation

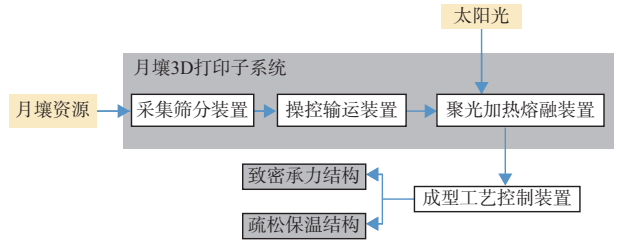


图 7 原位建造技术途径

Fig. 7 Technical approach to lunar in-situ construction

1.4 整体系统物质流和能量流关系分析

月面原位资源补给站系统各子系统之间的物质与能流关系如图8所示。月面太阳光、月壤资源和月壤内部水冰资源是月面原位资源补给站主要输入的物质和能量, 水、氧气、热能、电能和防护结构是月面原位

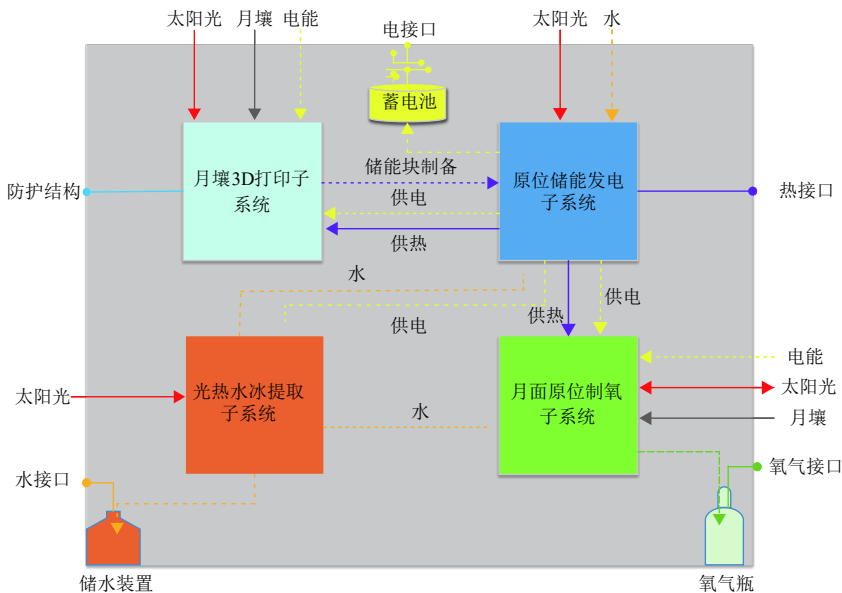


图 8 基于原位资源利用的月球原位资源补给站物质能量流示意图

Fig. 8 Schematic diagram of material energy flow of lunar surface resource supply station

资源补给站主要输出的物质和能量,水、氧气、热能和电能同时保证月面原位资源补给站系统各子系统之间的物质和能量供给循环。

1.5 月面原位资源补给站建设运行方式

月面原位资源补给站作为未来载人月球科研站、月球基地的功能性舱段,是在载人月球科研站、月球基地具有一定配套设施的基础上分布实施并逐级构建。在补给站建设初期,需要载人月球科研站基础设施作为配套支撑,为其提供电能供给;建设中期,补给站基本实现自给自足并具备向载人月球科研站提供部分物资和能源补给;建设后期,具备支撑载人月球科研站、月球基地扩建和长期运营补给能力,其建设运行过程图9所示。

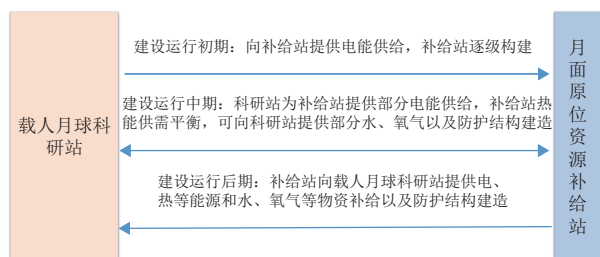


图9 月面原位资源补给站建设运行过程图

Fig. 9 Construction and operation process chart of lunar surface resource supply station

1.6 月面原位资源补给站实施思路

根据月面原位资源补给站涉及的月面原位资源利用技术环节及其发展状态,结合月球探测任务分阶段实施特点,月面原位资源补给站采用技术试验、设备测试及系统集成3个阶段的发展思路,如图10所示,实现关键技术攻关、技术成熟度提升和功能实现。在技

术试验阶段,重点开展月面原位资源补给站涉及的月面原位资源利用技术攻关和演示验证;在设备测试阶段,开展涉及的月面原位资源利用设备研制、环境试验和性能测试,提升技术成熟度;在系统集成阶段,开展月面原位资源补给站集成构建和核心功能发挥,构建完成满足载人月球科研站运行、航天员长期驻留生存和月面活动的物资能源补给体系。通过上述任务的分阶段成功实施,保持月面原位资源补给站涉及的月面原位资源利用技术和系统与其它载人月球探测任务系统的开发一致性,将载人月球探测活动及未来更远深空探测活动由“完全依赖式”向“部分依赖式”和“自维持式”转变,逐步实现“摆脱地球生存和补给依赖”的能力。

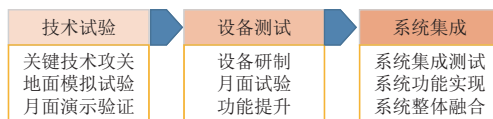


图10 月面原位资源补给站实施思路

Fig. 10 Implement of lunar surface resource supply station

2 月面原位资源补给站

2.1 月面原位水冰资源提取技术

深空探测特别是载人深空探测,水是原位资源利用的关键载体和重要产物,其应用贯穿于能源、推进及生命保障等各个环节。它不但提供维持生命的必需品,而且还提供了深空推进和能源所需的燃料(H_2 和 O_2)。国内外学者及研究机构一直十分重视月球水冰提取方法研究,目前有代表性的月球水冰提取方法包括“斗篷式”热提取方法以及钻取式水冰提取方法,如图11所示。

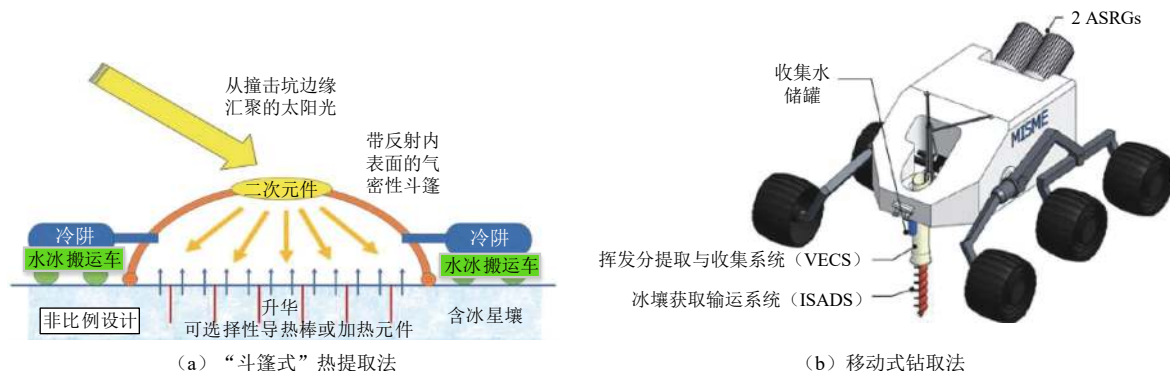


图11 月球水冰提取方法及装置

Fig. 11 Method and instrument of lunar water ice extraction thermal mining concept

Sowers等^[6]提出了一种帐篷式的热采矿水冰提取方法,如图11(a)所示,该方法直接将太阳光传导至永

久阴影区的表层和次表层,诱导地下水冰的强制升华,蒸汽在圆顶帐篷内被捕获,之后被引流至冷阱冷

凝收集, 圆顶帐篷既能够提供类似于温室的加热效应又能够对水蒸气捕集。目前为止该方法仍处于概念阶段, 并没有开展实际的水提取研究工作。Zacny等^[7]报道了一种移动式原位水提取装置 (Mobile In-Situ Water Extractor, MISWE), 如图 11 (b) 所示, 该装置包含冻土获取与输送系统 (Icy Soil Acquisition Device, ISADS) 及挥发物提取与捕集系统 VECS。ISADS 拥有一个深沟槽的螺旋钻, 当螺旋钻从冻土中退出时, 土壤留在深沟槽内; VECS (Volatiles Extraction and Capture System) 拥有柱状热交换器和挥发物传递机构, 当深沟槽内的冻土被加热水分挥发时, 水蒸气流入小水罐冷凝收集。依据 MISWE 的水提取方案, 设计了小型的实验台, 开展了火星条件下从冻土中提取水的实验, 结果显示该方案最多能够提取土壤初始含水量的 92%, 所需的能量为 0.9 Wh/g, 提取过程持续时间大约为 40 min。

国内中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室针对国外地外水资源提取过程环节较多 (基本包括钻取、密封和运输 3 个过程)、部组件结构功能单一等典型问题, 创新提出星壤低功耗钻取运输与密封一体化技术及太阳能聚传含冰星壤直接光热处理技术, 研制完成了月球水冰光热提取原理样机, 通过典型的月面环境地面模拟试验, 如图 12 所示, 实现了 6% 初始含水率、-80℃ 低温及小于 10 Pa 真空条件下含冰月壤钻取速率大于 500 g/h、水提取速率大于 20 g/h 的水冰开采能力^[8-10]。



(a) 原理样机



(b) 环境试验

图 12 月球水冰光热提取地面原理样机及其环境试验

Fig. 12 Ground principle prototype and its environmental test of lunar water ice thermal extraction

2.2 月面原位制氧技术

针对月面制氧需求, 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室于 2014 年首次提出地外人工光合成技术, 主要利用人类呼吸的 CO₂ 和月球上原位开采的水资源产生氧气和碳氢化合物。研究团队联合南京大学, 在地外人工光合成技术中涉及的材料优化、物理机制、反应器设计和原理系统开发等方面已取得突破^[11-13]。同时利用“嫦娥五号”取样获得的真实月壤, 从光伏电解、光催化和光热催化 3 个方面, 对“嫦娥五号”月壤的人工光合成性能评估, 提出了可行的地外人工光合成策略和地外生存方案^[14], 如图 13 所示。

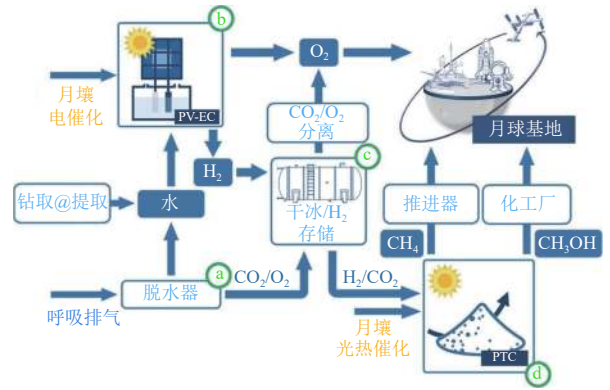
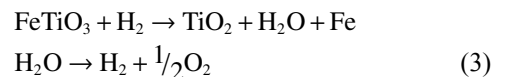


图 13 利用月壤实现地外生存方案

Fig. 13 Scheme of using lunar soil to realize extraterrestrial survival

在月壤原位制氧方面, 国外研究人员分别提出了氢还原法、碳热还原法和熔融电解法制备氧气的思路, 研制完成了地面原理样机并开展了部分环境试验。

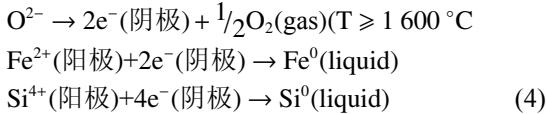
氢还原制氧方法: 该工艺是在有氢气存在的条件下将月壤加热至约 900℃, 氢和月壤中的铁氧化物反应生成水, 水电解后生成氧气和氢气, 氧气储存备用, 而氢气则被循环用于月壤的还原过程, 其化学反应过程如式 (3) 所示。该工艺效率较低, 100 kg 的大块月壤仅能提取 1~3 kg 的氧气^[15]。



基于碳热还原工艺制氧方法: 该工艺是在有甲烷存在的条件下将月壤加热至熔点以上温度 (>1600℃); 甲烷受热裂解, 释放出的碳进入熔融的月壤中, 并与硅酸盐中的氧反应释放出一氧化碳; 一氧化碳再与裂解过程中释放出的氢在催化反应器中反应生成甲烷和水, 再通过电解水的方法制备氧气。该工艺效率适中, 每 100 kg 的大块月壤可提取 10~20 kg 的氧^[16]。

基于熔融氧化物电解工艺制氧方法: 该工艺在有

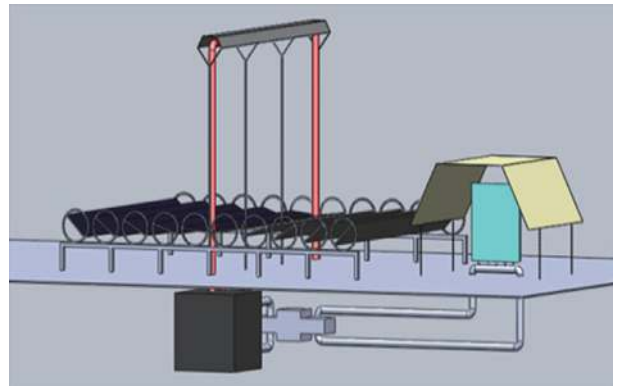
阴极、阳极和电流存在的条件下将月壤加热至熔点温度以上，电解多种金属或非金属氧化物以释放纯净氧气，其化学反应过程如式（4）所示。该工艺效率较高，每100 kg的大块月壤可提取20~30 kg的氧^[17]。



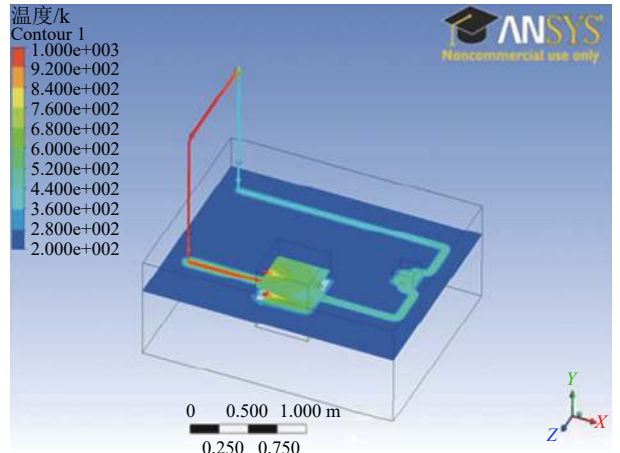
研究人员对不同月壤制氧工艺方法进行了对比分析^[18-19]。分析结果表明，氢还原法涉及的化学反应温度较低，使得月壤反应过程一直处于颗粒状态，化学反应过程风险较低，但制备效率较低；而碳热还原法和熔融电解法反应温度较高，都超过了月壤熔点，导致其在反应过程中月壤以熔岩的形态参与化学反应，不易对月壤物质转移和操控，但制备效率较高。

2.3 月面原位储能发电技术

月球等地外天体土壤资源丰富，利用月壤进行蓄热和发电是满足月球基地能源需求的重要解决方案。美国国家航空航天局（National Aeronautics Space and Administration, NASA）2015年发布的技术路线图把月壤蓄热列为原位资源利用核心技术内容之一^[20]，开展了大量研究工作。NASA使用月球当地材料制作热床作为太阳能储热介质，热床作为标准化基础结构提供热能，如图14所示，使科学和探测仪器能度过极冷月夜。白天吸收太阳能使温度升高，夜晚时将科学和探测仪器置于热床上方维持最低温度^[21]。



(a) 发电系统方案



(b) 温度特性

图 15 月壤储能发电系统方案及温度特性^[22]

Fig. 15 System concept of thermal energy storage and its temperature distribution^[22]

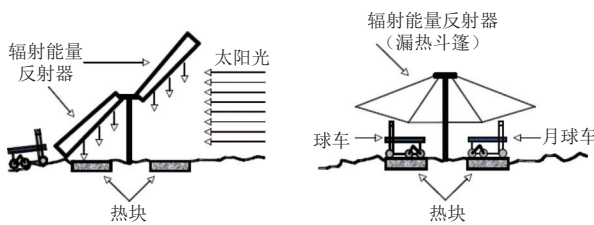


图 14 热床储能方案
Fig. 14 Lunar thermal wadi concept

欧洲、美国NASA等机构设计了月壤储能发电系统概念设想，并对月壤储能发电系统的温度特性进行了研究计算，如图15所示^[22-25]。

中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室是国内最早开展月壤储能发电技术研究的单位，提出并设计完成了月壤储能发电系统方案，通过理论建模和数值仿真，对系统储热能力和发电效率深入分析，初步验证了原位资源储能发电方案的技术可行性^[26-27]；地面原理研制系统试验实现了储热能力275 kJ/kg和发电能量密度6.71 W/kg的技术指标，如图16所示。

2.4 月面原位建造技术

随着月球探测活动的不断深入，月球科研站、月球基地等重大月面设施建设已纳入各航天大国发展规划。如果通过地面预制手段，依靠火箭发射升空，则设施建造费用高昂，需要考虑最大化就地取材、原位建造，使月面设施建造具备可实施性。月壤3D打印建造通过利用月面丰富的月壤资源，依托3D打印技术，实现月面设施的原位建造。近年来，各国相继开展了月壤3D打印技术的前期研究，相继提出并发展了多种工艺的3D打印方法，目前较为主流的月壤3D打印技术包括月基材料挤出/喷射技术和粉末床融合技术。

材料挤出/喷射技术的典型代表包括水泥轮廓技术（cement contour crafting）和粘合剂喷射技术（binder jetting）。水泥轮廓技术是一种低耗能的增材制造技术，可以采用“月壤水泥”进行大型结构件建造。2006年起，美国NASA研究团队尝试在月壤颗粒中添加硫作为粘合剂，形成月壤混凝土，开展了水泥轮廓技术研究^[28]；粘合剂喷射技术的打印过程是将纯液体粘合剂喷射到疏松的颗粒层，喷射粘合剂的区域颗粒层将

固化, 逐层进行打印。ESA研发的D-shape技术就是采

用粘合剂的方法增材建造^[29]。

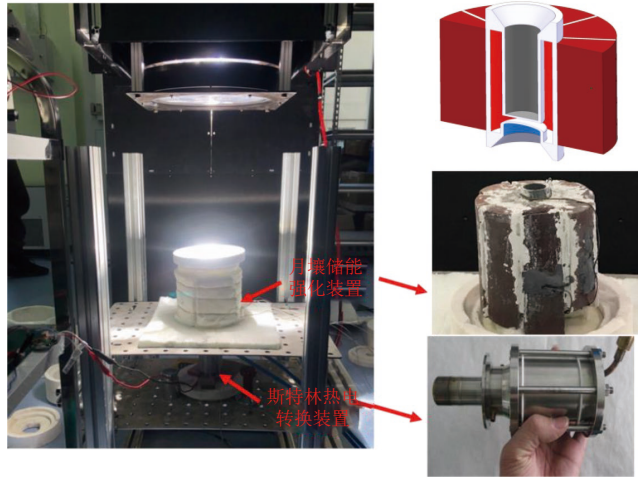
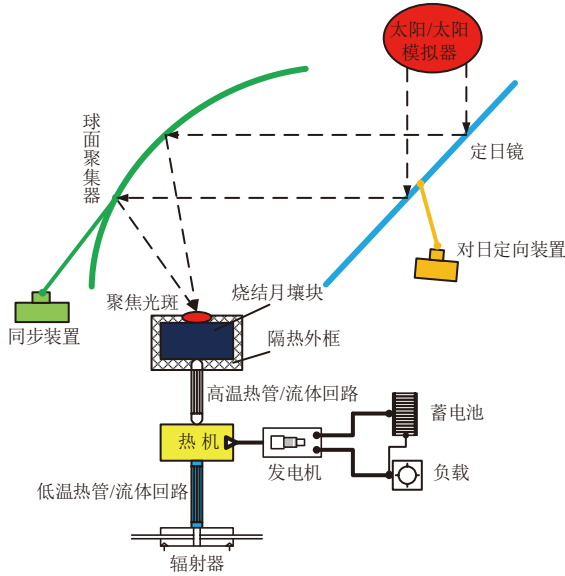


图 16 月壤储能发电系统方案及原理试验

Fig. 16 System concept of thermal energy storage and its principle test

粉末床融合技术的典型代表包括选择性太阳光烧结、选择性激光熔融 (Selective Laser Melting, SLM) 和选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 等成型技术。该技术的主要过程是直接利用高功率聚焦光斑对月壤逐层烧结熔融成型, 实现原位建造和制造。美国NASA的喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 和ESA的DLR实验室都相继开展了选择性太阳光烧结月壤成型试验, 初步验证了选择性太阳光烧结原位建造的可行性^[30-33]。月壤的SLM和SLS成型工艺是近年来国内外研究热点。与选择性太阳光烧结工艺相比, SLS/SLM方法需要的烧结能量更少, 分辨率更高 (亚毫米), 适合制造工程零件和关键建筑组件。然而, SLS/SLM所用的光斑尺寸小, 打印速度较慢 ($\sim 2 \text{ cm}^3/\text{h}$)^[34]。

华中科技大学、哈尔滨工业大学等高校和科研院所相继开展了月面原位建造概念方案和相关技术研究, 取得了阶段性研究成果^[34-35]。中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室基于原位资源利用思路, 在月壤致密化烧结成型研究基础上, 针对月壤材料的理化特性和颗粒特征, 创新提出月壤静电运输-聚光熔融3D打印新方法^[36]。在月壤颗粒静电操控方面, 采用试验观察与仿真研究相结合的方法, 深入分析了月壤颗粒静电操控内在机理, 解释了静电力控制颗粒实现定向精准运输的内在控制机制, 发展了月壤颗粒静电操控方法^[37-38]。分别利用汇聚太阳光和激光开展了月壤烧结熔融成型试验, 深入解析了关键烧结熔融参数对成型质量的影响^[39], 如图17所示。

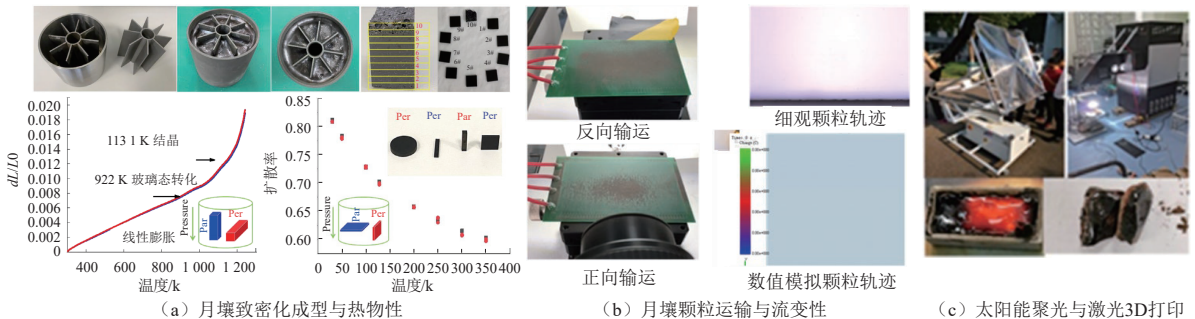


图 17 月壤3D打印领域研究进展

Fig. 17 Research progress of lunar 3D printing

3 结 论

本文针对一种月面原位资源补给站开展了概念方

案设计, 初步设计构建了补给站系统及其整体构型方案, 基本确立了补给站涉及的技术环节和技术途径,

建立了补给站系统内部物质能流关系,提出了补给站建设和实施思路,将为补给站方案深化论证提供重要参考。

月面原位资源补给站各个环节技术实现路径较多,如何通过顶层技术体系构建,针对月面极端环境、原位资源类型、赋存形式等典型特征,结合工程任务具体实施要求,进行技术路线选择和技术经济效益分析是月面原位资源补给站方案深化研究需要解决的首要问题。

此外,月面原位资源补给站涉及水冰提取、月壤制氧、储能发电以及原位建造等多个环节,技术跨度大、技术过程复杂,多项技术研究尚处于起步阶段,如何通过基础研究和原始创新,从根本上解决制约月面原位资源补给站关键技术攻关和工程实施的瓶颈性难题是未来重点需突破的技术。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,于登云,孙泽洲,等.中国月球探测器的成就与展望[J].深空探测学报(中英文),2016,3(4):323-333.
YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.
- [2] NASA. NASA's lunar exploration program overview[EB/OL]. (2020-11-1)[2022-10-22]. <http://www.innovation4.cn/library/r49711>.
- [3] 熊明华,刘永喆,宋轶妹.俄罗斯载人登月相关问题分析[J].国际太空,2016(8):47-55.
- [4] SACKSTEDER K, SANDERS G. In-situ resource utilization for lunar and Mars exploration[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2007.
- [5] KENNEDY K, ALEXANDER L, LANDIS R, et al. NASA technology area 07 human exploration destination systems roadmap[C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Reston: AIAA, 2011.
- [6] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, 7(4): 235-244.
- [7] ZACNY K, CHU P, PAULSEN G, et al. Mobile in-situ water extractor(MISWE) for Mars, Moon, and asteroids in situ resource utilization[C]//AIAA Space 2012 Conference & Exposition. Pasadena, California: AIAA, 2012.
- [8] 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.
- [9] HE L H, WANG C, ZHANG G, et al. A novel auger-based system for extraterrestrial in-situ water resource extraction[J]. *Icarus*, 2021, 367: 114552.
- [10] 何立臣,王超,姚伟.含冰模拟月壤水资源提取实验研究[J].航天器环境工程,2020,37(5):511-518.
HE L C, WANG C, YAO W. Experiment study of water resource extraction from frozen lunar regolith simulants[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(5): 511-518.
- [11] FENG D Q, JIANG W J, ZHANG C, et al. A membrane reactor with microchannels for carbon dioxide reduction in extraterrestrial space[J]. *Catalysts*, 2022, 12: 3.
- [12] YANG L Q, ZHANG C, YU X W, et al. Extraterrestrial artificial photosynthetic materials for in-situ resource utilization[J]. *National Science Review*, 2021, 8(8): 1-26.
- [13] 冯德强,张策,姜文君,等.地外人工光合成装置研制与试验[J].中国空间科学技术,2020,40(6):13-22.
FENG D Q, ZHANG C, JIANG W J, et al. Design and trail of extraterrestrial artificial photosynthesis device[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(6): 13-22.
- [14] YAO Y F, WANG L, ZHU X, et al. Extraterrestrial photosynthesis by Chang'E-5 lunar soil[J]. *Joule*, 2022, 6(5): 1008-1014.
- [15] KELLER B, CLARK D, KIRKLAND J. Field test results of the PILOT hydrogen reduction reactor[C]//AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Reston: AIAA, 2009.
- [16] WHITE B, GUSTAFSON R, FIDLER M. 2010 field demonstration of the solar carbothermal regolith reduction process to produce oxygen[C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, FL: AIAA, 2011.
- [17] SANDERS G B, LARSON W E. Progress made in lunar in-situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program[R]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [18] 李芄,王世杰,李雄耀,等.利用月球含氧矿物制取氧气的方法学比较[J].矿物岩石地球化学通报,2009,28(2):183-188.
LI P, WANG S J, LI X Y, et al. Review of oxygen production using oxygenous minerals on the Moon[J]. *Bulletin of Mineralogy*, 2009, 28(2): 183-188.
- [19] 王志浩,刘宇明,田东波,等.月壤原位利用工程技术发展浅析[J].航天器环境工程,2019,36(6):647-654.
WANG Z H, LIU Y M, TIAN D B, et al. Preliminary analysis of technologies pertaining to the in-situ utilization of lunar soil[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 647-654.
- [20] National Aeronautics and Space Administration. NASA technology roadmaps TA 7: human exploration destination systems[R]. USA: NASA, 2015.
- [21] BALASUBRAMANIAM R, GOKOGLU S, SACKSTEDER K, et al. Analysis of solar-heated thermal wadis to support extended-duration lunar exploration[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2011, 25(1): 130-139.
- [22] CLIMENT B, TORROBA O, GONZALEZ-CINCA R, et al. Heat storage and electricity generation in the Moon during the lunar night[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 352-358.
- [23] HAGER P B, KLAUS D M, WALTER U. Characterizing transient thermal interactions between lunar regolith and surface spacecraft[J]. *Planetary and Space Science* 92, 2014, 92: 101-116.
- [24] FLEITH P, COWLEY A, POU A C, et al. In-situ approach for thermal energy storage and thermoelectricity generation on the moon: modelling and simulation[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 181: 104789.
- [25] MALOS F M, SERRA P, FERERES S, et al. Lunar ISRU energy storage and electricity generation[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 412-420.
- [26] LU X, MA R, WANG C, et al. Performance analysis of a lunar based solar thermal power system with regolith thermal storage[J]. *Energy*,

- 2016, 107: 227-233.
- [27] LU X, YAO W, WANG C, et al. Exergy analysis of a lunar based solar thermal power system with finite-time thermodynamics[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 792-796.
- [28] BEHROKH K, DOOIL H, KE-THIA Y, et al. Mega-scale fabrication by Contour Crafting[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2006, 1(3): 301-320.
- [29] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 430-450.
- [30] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800-810.
- [31] FATERI M, MEURISSE A, SPERL M, et al. Solar sintering for lunar additive manufacturing[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(6): 1-10.
- [32] NAKAMURA B, SMITH K. Solar thermal system for lunar ISRU applications: development and field operation at Mauna Kea, HI[C]/49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: AIAA, 2011.
- [33] ISACHENKOV M, CHUGUNOV S, AKHATOV I, et al. Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure-an overview[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 180: 1-48.
- [34] ZHOU C, CHEN R, XU J, et al. In-situ construction method for lunar habitation: Chinese super mason[J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 66-79.
- [35] 魏帅帅, 宋波, 陈华雄, 等. 月球表面 3D 打印技术畅想[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(3): 76-87.
- WEI S S, SONG B, CHEN H X, et al. Imagination on 3D Printing on the Moon Surface[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(3): 76-87.
- [36] 王超, 姚伟, 李啸天, 等. 一种利用静电输运和激光熔融烧结的原位资源处理系统: 中国: ZL201810183951.5[P]. 北京: 中国空间技术研究院, 2018.
- [37] GU J, WANG Q, WU Y, et al. Numerical study of particle transport by an alternating travelling-wave electrostatic field[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 505-517.
- [38] GU J, ZHANG G, WANG Q, et al. Experimental study on particles directed transport by an alternating travelling-wave electrostatic field[J]. *Powder Technology*, 2022, 397: 117107.
- [39] 王超, 张光, 李啸天, 等. 模拟月壤激光熔融成型工艺参数试验初探[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(5): 575-580.
- WANG C, ZHANG G, LI X C, et al. Experimental study of the parameters of laser melting molding process with regard to simulated lunar soil[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(5): 575-580.

作者简介:

王超(1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 地外原位资源开发与利用技术。

通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号(100094)

Email: wangchao@qxslab.cn

电话: (010)68111346

姚伟(1972-)男, 研究员, 主要研究方向: 地外原位资源开发与利用技术。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@qxslab.cn

Conceptual Design of Lunar Surface In-Situ Resource Supply Station

WANG Chao¹, PENG Qibo², WANG Shenquan², WANG Qinggong¹, YAO Wei¹

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

2. Scientific Research Training Center for Astronauts, Beijing 100094, China)

Abstract: According to the requirements of major engineering tasks such as manned lunar landing, lunar base construction and lunar scientific research, the in-situ resource utilization technology was used to build a lunar surface resource supply station with certain material and energy supply capacity and break through key technologies such as in-situ water ice photo-thermal extraction, in-situ oxygen production, in-situ energy storage and power generation, and in-situ construction of the lunar surface, so as to realize the construction of residential protective cabins necessary for astronauts' lunar presence and activities and in-situ acquisition and supply of water oxygen, fuel and other materials, as well as light, heat, electricity and other energies, which will promote the development of China's lunar scientific research and development activities, and gradually realize lunar surface settlement and scientific research ability free from dependence on Earth's supply dependence.

Keywords: manned lunar landing; lunar base; resource station; in-situ resources utilization

Highlights:

- The concept of lunar resource station based on in-situ resource utilization was first proposed.
- The system configuration scheme of lunar resource station based on in-situ resource utilization was designed.
- The technical approaches and implementation ideas of lunar resource station based on in-situ resource utilization were established.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]