

月球驻人基地研究综述与关键技术分析

张泽旭¹, 袁帅¹, 潘文特², 杨强³, 程昆林⁴, 李丽芳⁵,
徐绯⁶, 陈蓉⁷, 王庆功⁸, 郑博⁹

(1. 哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工业大学 特种环境复合材料国家级重点实验室, 哈尔滨 150080;

4. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 工信部重点实验室, 哈尔滨 150001;

5. 哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001;

6. 四川大学 生命科学学院, 成都 610065;

7. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

8. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094;

9. 上海航天技术研究院, 上海 201114)

摘要: 对国内外驻人月球基地关键技术的研究和发展情况进行综述。梳理国内外月球探索与月球基地研究的标志性事件和成果, 探讨并凝练了月球基地建设的四大基本原则, 在此基础上提出了位于月球极区的驻人基地总体规划方案和六大系统组成, 并从月球资源探测与开发、能源利用与环控、生命与健康、月面通信与智能技术、运载与交通以及运维和模拟等层面提炼出多项关键技术, 基于关键技术的研究现状和月球基地建设的实际需求, 总结其研究的不足之处, 为未来驻人月球基地的建设与运维提供建议和展望。

关键词: 月球驻人基地; 总体设想; 关键技术; 发展展望

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)05-0455-15

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220066

引用格式: 张泽旭, 袁帅, 潘文特, 等. 月球驻人基地研究综述与关键技术分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(5): 455-469.

Reference format: ZHANG Z X, YUAN S, PAN W T, et al. Review and prospect of key technologies for lunar manned base[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 455-469.

引言

探测与开发月球是人类探索深空的重要一步。20世纪50年代开始, 人类通过开展多次月球探测活动, 获得了大量科学数据并带回了月壤样本, 极大地推动了新技术、新产业的发展。月球探测活动使航天科技得到巨大进步的同时, 也让人类更为系统地了解了月球环境并大大提升了对月地乃至太阳系的认识程度^[1]。

月球作为距离地球最近的天体, 具有与地球相差甚远的地理环境。高真空、无磁场以及弱引力场等月球环境是开展相应的科学实验和天文观测较为理想的条件^[2]。月球丰富的矿物资源也为人类未来能源枯竭的问题提供了新的解决方案, 其含量丰富的氦-3资源作为一种清洁的核聚变原料, 将为人类能源提供战略保

障。在迈向深空的旅途中, 月球也是重要的门户和中转站。因此, 人类依托于月球建立基地, 不仅能够实现对月球原位资源、能源的开发, 也能够进行深空探测相关技术的验证, 为下一步探测开发火星等其它行星打下基础^[3-4]。

为了更好地开发月球, 世界各国在几十年前就提出了有关月球基地的计划。月球基地是人类所面临的最为宏伟的工程和技术“无人区”, 即便在最近的月球建立基地, 也需要前沿理论、技术理念与装备的原始创新。月球基地建设所发展的新技术将有望推动经济高质量发展, 有力推动产业革命、催生经济新业态, 并开启地月经济时代。进入21世纪, 随着航天技术的不断发展与完善, 各国之间太空竞争也越来越激烈, 纷纷将月球资源的开发和月球基地的建设提上议程, 抢占地月空间探索和开发的优先权^[5]。基于现阶段人类

对月球的认识以及对月球基地的设想,总体上认为月球基地应分阶段地实现如下功能。

1) 探测试验功能

早期的月球基地应处于准备与建设阶段。在此阶段中,基地无法满足驻人要求,探测设备将以无人设备为主,包括月球车、无人飞行器、多种无人作业装备等,也可以在月面铺设空间探测的设备。在月表环境得到进一步了解的情况下,对半永久性、永久性基地进行选址,验证或直接实施相关的月球基地建设技术,搭建简易的基地,为有人基地打下基础。

2) 生命保障功能

中期的月球基地,需要完成从无人到短期有人值守再到长期有人值守的转变。其关键在于建立生命保障系统,完成氧气、水甚至食物等生存必需品的自给自足。此阶段要求在合理利用月球原位资源的基础上,建成永久性基地,并基本实现对能源的开发利用。

3) 生产补给功能

后期的月球基地,目标主要为实现对水资源、能源等资源的工业级开采和利用,在保证自给自足的基础上反哺地球,并为深空探测器提供补给。建成较大规模的探测中心和试验中心,为进一步的深空探测提供帮助。

4) 社区移民功能

最终,月球基地将实现月球生态圈的自循环,能支持一定数量的月球移民进行长期生活,极大加强月地联系,实现月球与地球的一体化。

本综述对国内外驻人月球基地的研究现状进行调查与分析,凝练出建造驻人月球基地的基本方针和多项关键技术,并构建了月球基地的设想图,为未来驻人月球基地的建设提供借鉴意义。

1 月球探测与开发的发展历程

1959年,苏联发射的“月球2号”(Luna-2)探测器实现了月球表面硬着陆,人类月球探测的征程取得了首次成功,同年,“月球3号”(Luna-3)摄得了月球背面照片^[6]。在这之后,美国组织了专家对月球基地进行可行性分析,并提出了多种月球基地的构型,图1为1986年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Administration, NASA)提出的充气式月球科研站。1969—1972年,美国的“阿波罗”(Apollo)计划实现了人类多年来的登月梦想,这一计划的成功,标志着人类对月球的探索取得了突破性进展,为月球基地的建造打下了良好的基础^[7]。1990年,日本的月球探测器“飞天号”发射成功,使日本成为世界上第3个探测月球

的国家^[8],这次探测活动掀起了建设月球基地的新一轮热潮。随后的1994年和1998年,美国发射了“克莱门汀号”(Deep Space Program Science Experiment)^[9]与“探勘者号”(Mars Global Surveyor, MGS)探测器^[10],使人类对月球上地形地貌、元素分布、磁场、水冰资源等有了新的认识,促进了月球基地计划的进一步完善。



图1 1986年NASA提出的充气式月球科研站^[11]

Fig. 1 Inflatable lunar research station proposed by NASA in 1986^[11]

进入21世纪后,世界各国对于月球的探索不断深入,2004年,在人类登月的三十几年后,美国宣布了“重返月球”计划,意图登陆月表并建立永久驻人科研站^[12]。2007年,Google公司和X-Prize基金会联合举办了“登月竞赛”,鼓励私人企业、机构研发月球探测器,实现3个目标:探测器月球着陆、月球车行驶500 m、传输高分辨率月球影像^[13]。来自世界各地的16支队伍参与了比赛,4支队伍签署了火箭发射协议。到2010年为止,NASA审查了十几种月球科研站的构思方案,这些方案以“不需地球货物补给,4名航天员在月球基地驻留探测180天”为最终目标,方案当中提到了使用太阳能电池板和核反应堆对月球基地进行月昼和月夜的交替供能^[15];另一方面,对于宇航员在月面的实验考察和资源探测,方案中设计了如图2所示的封闭式加压月球车,可供居住和月表移动探测,方案指出,若能够沿探测路线建立物资补给站(燃料、生命保障用品等),月球车的探测范围可达数百千米,在这期间宇航员无需返回月球基地。

2013年欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出了通过原位资源的3D打印建设月球基地的构想^[16],避免了从地球发射重型运载火箭到月面,节省了建筑材料的运输成本。著名建筑师Foster设计了一种承重的“悬链线”圆顶结构,带有蜂窝结构墙,可抵御微流星体和太空辐射,并采用加压充气装置来保护宇航员的生命安全,科研站的设计以3D打印月球土壤

的特性为指导, 并制作了一个1.5 t 的建筑块作为演示, 图3为月球基地圆顶建造示意图。



图 2 NASA设计的加压月球车^[14]
Fig. 2 Pressurized lunar rover designed by NASA^[14]



图 3 ESA设计的月球基地圆顶^[17]
Fig. 3 Dome of lunar research station designed by ESA^[17]

在“月球乌托邦”(Moontopia)国际设计大赛中, 要求参赛者设计驻人月球基地, 实现资源、能源自给自足的目标, 胜出的作品名为Test Lab, 如图4所示, 主结构由碳纤维经3D打印制成, 以折纸原理为基础, 在月面进行舱段自主装配, 并与其它舱段连接, 以增强各个分系统之间的交互性, 从而逐步达成月球永久移民的目的^[18]。

图5展示了Test Lab设计结构的纵向剖面, 基地各

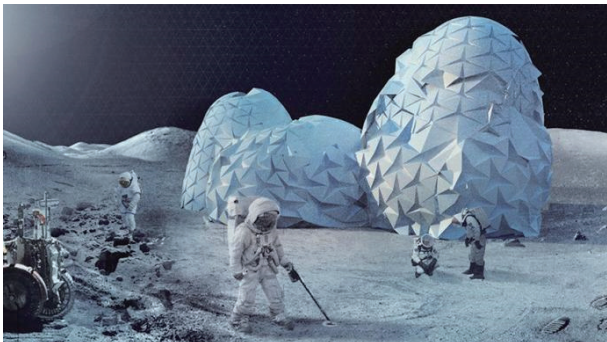


图 4 “Test Lab”驻人月球基地项目
Fig. 4 “Test Lab” project of manned-lunar base

层都分配了特定任务, 如科学实验、资源生产、温度调节、电力供应等, 在月球外部环境出现较大波动(如月震、流星体撞击)时, 宇航员驻留在基地当中, 可以很大限度地保证生命安全。

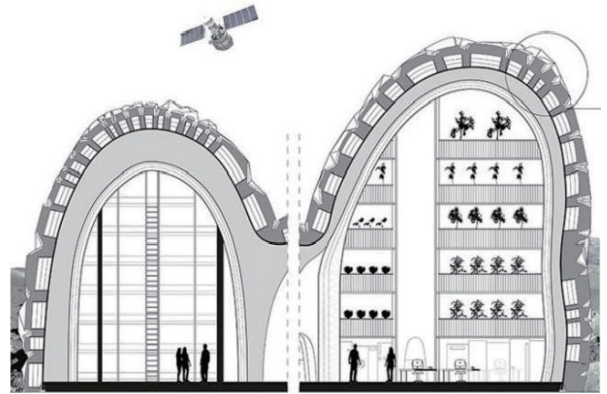


图 5 “Test Lab”结构的纵向剖面
Fig. 5 Longitudinal profile of “Test Lab” structure

2017年, 美国前总统特朗普签署了《1号太空政策指令》, 正式批准Artemis计划^[19]。按照该计划, 美国将在2024年前运送美国宇航员重返月球, 并在2025至2030年间建立月球轨道“门户”空间站(Gateway)和月球表面科研站以实现美国月面持续驻留, 为未来美国宇航员登陆火星的任务打下基础。该月球基地包括3个核心单元: ①能够在着陆区附近进行货物运载和人员输送的月球地形车; ②可移动科研站平台, 该平台能够跟随光照区移动, 这将使航天员们单次月球表面驻留时间延长到最多45天; ③月球表面基础设施, 能够同时容纳最多4名航天员。航天员们将在月表工作, 同时测试机器人和其它先进技术, 为将来登陆火星提供技术保障。在Artemis月球着陆系统(Human Landing System)的建设过程中, NASA与SpaceX公司签订了一份29亿美元的合同, 打算利用SpaceX公司的星舰(Starship)进行月球着陆^[20], 如图6所示, 这一星舰是埃隆·马斯克设计的可重复使用的星际飞船的改进版, 可以定期飞往月球。在SpaceX的计划方案中, 提出了月面燃料补给站的建设, 以便星舰进行能源补充, 运输月球原位资源或运送宇航员返回地面。

2019年, SOM (Skidmore, Owings & Merrill) 建筑公司与欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)合作, 规划并确立了月球村(Moon Village)这一多学科项目^[22], 意图在月球南极的沙克尔顿陨石坑(Shackleton Crater)的边缘, 安置如图7所示的大型居住模块, 借助陨坑边缘长期的阳光

照射,月球基地可获得一定的能量供应,而且宇航员可在陨坑内部开展原位资源的提取实验,如极区水冰的开采与运输。通过打造结构的耐久性和功能的自足性,SOM力图使月球村成为月球上第一个永久驻人基地^[23]。

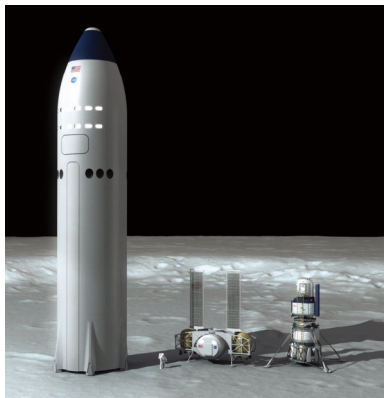


图6 SpaceX为HLS(人类着陆系统)提供的星舰^[21]

Fig. 6 Starship for HLS (human landing system) provided by SpaceX^[21]

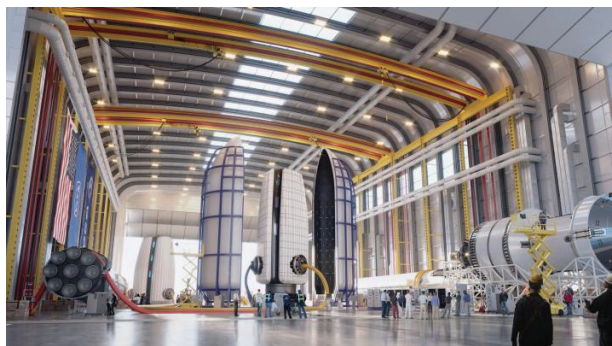


图7 Moon Village项目的居住模块

Fig. 7 Residential module of Moon Village project

驻人模块设计成混合结构,由三组纵向的刚性框架和一个充气壳体结构组成^[24],具有宽阔的内部空间,如图8所示。模块分为4层,各层之间相互连通,总共可容纳4~6人。模块具有4个加压挡位,以提高动力。图9为驻人模块内部的设计布局。



图8 Moon Village驻人模块结构设计

Fig. 8 Structural design of residential module in Moon Village



图9 Moon Village驻人模块内部布局

Fig. 9 Internal layout of residential module in Moon Village

2019年,NASA和ESA规划了月球前哨站“门户”(Gateway)的轨道设计,它将绕月球运行,成为宇航员和机器人探索月球表面的科研站,为前往更遥远目的地的宇航员提供物资储备,并提供一个中继通信的场所和一个科学研究实验室。2021年,ESA选定了5个可行的探索月球熔岩管洞穴的方案并进行可行性分析,目前虽然获得了月球表面的相关信息^[25],但是ESA希望未来通过月球熔岩管洞穴的探索,可以在熔岩管内部建立月球基地并获得水和其它资源。

中国的月球探测工程于2004年正式开展,命名为“嫦娥工程”,具体分为“绕、落、回”三期。“嫦娥四号”探测器首次实现航天器在月球背面软着陆和巡视勘察。2020年,“嫦娥五号”探测器实现中国首次地外天体采样返回,标志着探月工程“三步走”战略目标圆满实现。

中国针对月球基地方面的研究虽然整体起步较晚,但随着探月工程的进一步发展,月球基地的相关技术研究愈发得到重视。目前,探月四期工程已经全面启动,其主要目标为建设月球科研站的基本型,将与相关国家、国际组织和国际合作伙伴共同开展国际月球科研站建设^[26-28]。2021年,中国和俄罗斯签署了共建月球国际科研站的战略合作协议^[29],并发布了《国际月球科研站路线图(V1.0)》和《国际月球科研站合作伙伴指南(V1.0)》,计划协作完成月球科研站建设的勘、建、用3个工程阶段^[30-31]:

第一阶段计划于2025年前后完成,主要对月球进行勘察、为国际月球科研站选址、进行高精度软着陆的技术验证。在此期间中国将发射“嫦娥六号”和“嫦娥七号”探测器,实现月球极区采样返回、月球极区高精度着陆和阴影坑飞跃探测等任务。

第二阶段期间,中国“嫦娥八号”探测器和俄罗斯“月球-28”(Luna-28)将在2026—2030年间在月球选定地点着陆,并进行联合作业。该阶段将完成国际月球科研站指挥中枢技术验证、大承载货物运送及确保高精度软着陆。2030—2035年,项目将集中建设国际

月球科研站, 完成在轨和月面能源、通讯、运输等设施建设, 进行月球资源原位利用技术的研究、探索 and 验证, 以及其它一些深空探测通用关键技术的验证。

在第三阶段, 即2036年之后, 国际月球科研站(图10)将被用于进行长期科学探索、技术验证等, 并将作为基地支持短期载人登月任务。

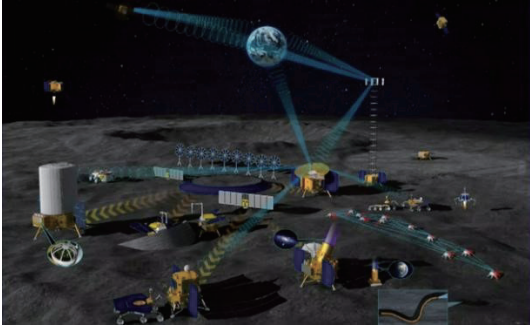


图10 国际月球科研站概念图

Fig. 10 Conception of international lunar research station

中国学者已经对月球基地的选址问题进行了详细讨论^[32-33], 并提出了月面无人和有人科研站的总体方案^[34-36]。以月球基地的可持续发展为目的, 有学者讨论了月球原位资源利用技术^[37], 对月球原位矿产、能源和特殊环境资源的利用, 从探测、开采、运输、分离与提取、产品存储五方面的技术进行了研究。以此为基础, 文献^[38]对其中探测方面的需求进行了具体分析, 提出了月面飞行探测器的相关设计方案。

对于月球基地子系统相关技术的研究, 目前主要集中在建造、能源、生态几方面。在基地的建造方面, 文献^[39-41]分析了月球环境下进行建造的挑战和技术关键, 提出了原位资源利用、地月建造结合和单元协同拓展三项策略; 另有学者设计了具体的月球基地建造结构, 如球冠型充气膜式、充气展开式及月球天梯等^[42-45]。围绕月球基地的能源问题, 重点对基于月球原位资源的发电技术进行了研究, 以核能发电、闭环核能磁流体产能等技术为基础, 设计了基于核电的能源系统总体方案^[46-47]。此外, 文献^[48]对受控生态生保系统物质流调控分析, 为驻人基地的生态系统提出了物质流动态平衡调控方案。

除了月球驻人基地的建造、能源、生态等方面的研究工作外, 国内对月面建筑理论和方法也进行了研究, 提出了多种月面建筑构想, 其中比较有代表性的是梅洪元院士及其团队依托月面机器人、机械臂等智能建造技术, 提出了“月海绿洲”主题“三叶草”式布局 and “红星满月”主题“五角星”式布局两种月球基地设计方案, 如图11和图12所示^[49]。



图11 “三叶草”式月球基地示意图

Fig. 11 Schematic diagram of “clover” lunar base

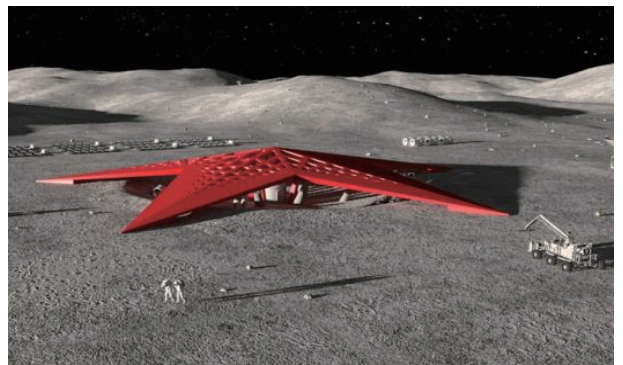


图12 “五角星”式月球基地示意图

Fig. 12 Schematic diagram of “five pointed star” lunar base

丁烈云院士及其团队以“月球原位建造”的思路为基础, 将中国传统“制砖-砌筑”的建造方式与3D打印建造方式结合, 总结了“整体预制拼装、局部打印连接”的原位建造方法^[50], 并提出了“玄武基地”的概念设计, 如图13。

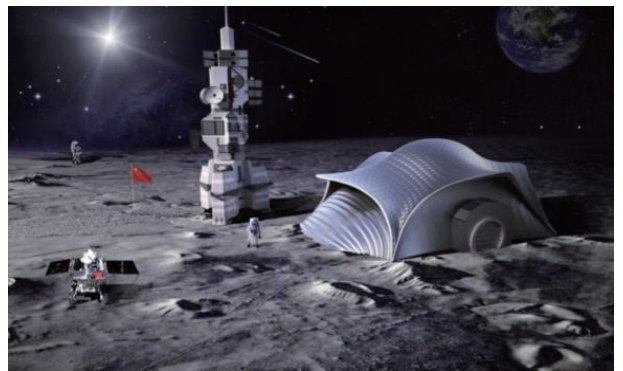


图13 “玄武基地”示意图

Fig. 13 Schematic diagram of “Xuan Wu” lunar base

国内外月球探测与开发、月球基地建设标志性节点由图14给出。

由此可见, 目前飞行器绕月、落月以及月壤采样

等技术已经较为成熟,以月球科研站为雏形,月球基地的建设方案也在逐步规划、验证当中。现在已有一些国家提出“在10年内建成小型月球基地;在20年内建成驻人月球基地”的目标,以实现月球的进一步探索与分析。待月球基地建成,后续还会进行原位资源勘探、矿物提取,并完成相关科学实验,为将来月球驻人探测与开发提供必要条件。但一些问题仍存在争论:①月球基地的选址问题,月球两极具有长时间光照条件、潜在的水资源,适合人类驻留,原位资源采

集利用需要选址他处,未来可能是多处地址结合的形式;②人类居住空间的建造问题,目前主要有3种途径,一种是利用原位建造外部壳体、结合内部增压空间实现极端环境防护,一种是利用月球的地下熔岩管空间,还有一种是地面预制拼装,如增压月球车方案;③月球驻人基地的成本与成效问题,尤其是月面水冰资源、矿产资源的富集程度是否实现低成本开发利用,月面开发活动如何反哺地球经济,月面高效能源的获取与存储如何实现等。

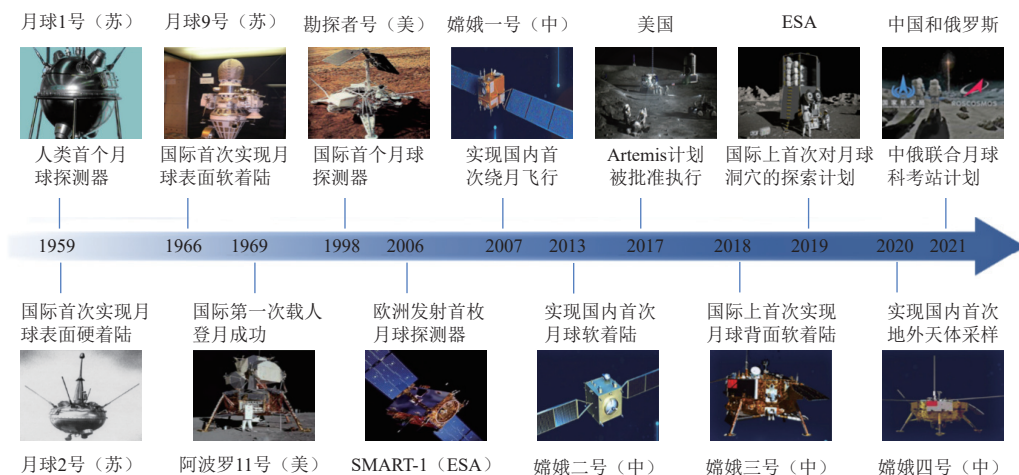


图14 月球探测与开发和月球基地建设标志性节点

Fig. 14 Key nodes of lunar exploration and development and lunar base research

2 未来月球驻人月球基地总体设想

月球驻人基地是未来人类在月球上建立的生产、生活和科学研究设施集合。月球驻人基地能够为多人长时间月面驻留提供条件,可以支撑深度月球科学探测和前沿科学研究、月球资源开发和利用、新技术孵化和实践以及支撑未来火星驻人探测与开发等活动。世界主要航天国家,虽然都提出了月球基地建设的设想,但真正建成月球基地所面临的困难非常多,目前尚未形成清晰的月球驻人基地构想。

包为民院士在谈到未来月球基地建设时指出“理想的月球基地至少应该包括以下几个方面的内容:一是应该具备类似于地球基地的这种环境,第二具备适合人类起居的生活环境,第三是满足开展科研工作及资源开发利用所需要的一些条件。综合考虑,月球驻人基地的体系构建需要坚持以下4个原则:①“过得去”,宇航员和必要的物资和设备能够及时送到月球,提出能够满足载人登月、大规模载物登月的大型运载系统需求;②“待得住”,宇航员能在地外长时间驻留,提出建立适合人类长期生活、工作的环境空间,解决航

天员所需的食物、氧气、水等生存必需品持续供应的需求;③“走得开”,宇航员能够离开月球基地开展月面活动,开采的月球原位资源也需及时运送到基地,提出满足星表短距离、中距离以及长距离输送人员物资的交通系统的需求;④“回得来”,宇航员、科研样品、大量物资等能够不断从月面运回地球,提出原位推进剂制造和可重复运载系统的需求。

结合以上原则和需求,建立由以下六大系统组成的月球驻人基地的基本框架:①月球居所建筑—为人类探测与开发提供基本的生活、活动空间;②月球能源系统—为月球驻人科研站的运行持续提供能源;③月球生态系统—为航天员提供长期生活环境和生存必需品;④地月交通与运载系统—保证基地可达性和物资在月球基地之间的运输;⑤月球资源开发工厂—提供地外驻人的物质保障和原位资源的开发;⑥月球信息化系统—保证月球基地多维信息处理和管控,包括通信、监测、数据处理等。这六大系统组成相互配合,分工合作、协调一致,形成一个功能配套、持续稳定运行的地外驻人探测与开发研究系统。

以水资源和光照为主要评估因素,选址在富含水冰月坑附近的平地建造驻人月球基地,初步完成了驻人月球基地设想,如图15所示。图中阴影部分为月球极地的永久阴影区,智能机器人完成开采水冰的任

务,并利用跳跃式系统完成水冰的运输;月坑上方光照充足区域建造月球基地的核心区,由居住系统、能源系统、交通运输系统、资源开采工厂等组成,支撑宇航员长期生活和科考任务。

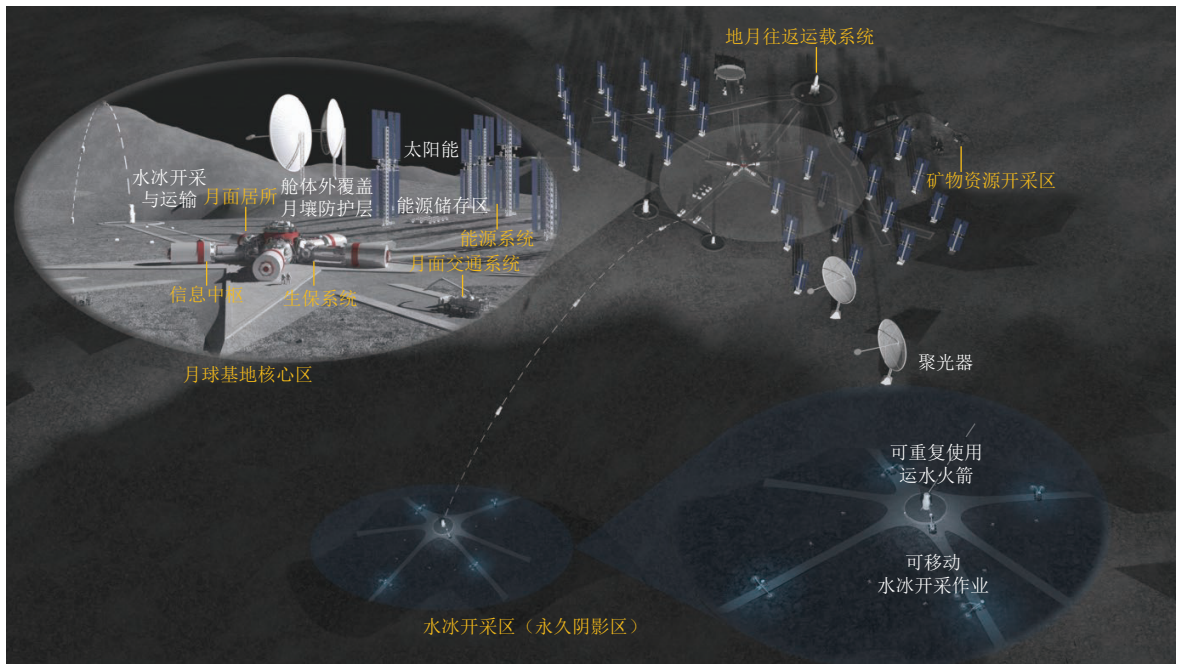


图15 未来月球驻人基地设想

Fig. 15 Schematic diagram of overall planning of lunar base

1) 月球资源开采系统

由于地月空间物资运输成本高昂,开发和利用月面资源是实现月球驻人科研站长期可持续运行的关键。月球资源开发和利用系统的目标是利用月球资源为月球驻人科研站提供物质基础。月球水冰、月球氧化矿物质等资源的勘探、开采、提炼、存储与利用,可为月球基地运行提供水氧等生命物质、液氢液氧燃料物质以及硅、铁等原料物质。月球资源开采系统考虑月面极端环境条件下月球原位资源开采和转化过程中物理和化学作用机理,提高资源开发和利用的效率。

2) 月球居所与建筑

地面建筑与结构由设计成熟功能配套舱体按照模块化的形式组合而成,外层附着月壤提供极端环境防护,舱体提供基本的生活、活动空间,用于满足宇航员在月球长期的生存和工作需求。但由于地外空间的辐射、真空、大温差、微流星体等特殊环境,使得建筑概念、结构以及构筑方式与地面形态差异明显。需要针对上述极端环境与特殊需求,发展地外空间建筑概念和结构、功能总体设计。由于地外空间物资运输成本高昂,驻人基地的原位建筑,月面辐射、流星体等极端环境的防护结构,星表交通运输、驻人基地功

能区以及加工厂等月面基础设施均需实现原位建造。

3) 月球能源系统

能源是月球驻人基地长期稳定运维的基础,充足的能源是月球驻人科研站能够顺利建设并稳定运行的有利保证,攸关航天员的生命安全。研究月球可再生能源将极大程度降低地外驻人科研站对地球资源的依赖,满足极端环境和资源匮乏下能源大规模获取的需求,才能实现月球驻人科研站长期稳定、可持续运行。

4) 月球生态系统

长期有人月球驻留与开发必须建立适合人体长期生活、工作的环境空间,解决航天员所需的食物、氧气和水等生存必需品的持续供应。月面环境的生命保障和维持研究体系是构建地外生态与生命体系的重要技术和基础体系,是实现变革性生物改造与环境改造的重要支撑,也是侧重生物科学、生命科学、环境多学科交叉的重要领域。月球空间环境不仅不适宜人类驻留,且对人、植物、微生物影响规律也尚未得知,在地外构建生态系统极为复杂,后期驻留宇航员健康与安全也难以保障。因此,需要从生命物质、生态环境和生命健康多个维度保证宇航员的安全与健康。

5) 地月交通与运载系统

地月运载与交通技术体系保障着月球驻人探测和开发地的可达性。地月交通与运载系统可分为地月往返运输系统和月球运输系统,根据月面行走距离的长短,可设计中短距离的地面运输平台和远距离可重复载人飞行器。然而,地外运载与交通发展极为困难,一方面,距离时长约束下星际运载难度极大,地理信息不确定下星体的精确地理信息难以确定,且运载器燃料供给汲取难、月面板端环境下通信支持相对较弱;另一方面,运载与交通体系需要研发复杂任务与环境背景的新型星表交通系统与智能运载交通信息系统。

6) 月球基地信息系统

信息系统是月球基地的大脑,负责分析和管控月球基地海量的信息流与数据流,保障各系统间高效安全协同运行,需要在通信、导航、监测、控制等多个维度提供支持,为地月之间、月球基地局部提供稳定、可靠、连续的通信链路和月面导航支持,构建以智能传感和大数据分析为信息中枢的月球基地建造和安全运维中心,实现月球基地的信息化和智能化。

3 驻人月球基地关键技术

根据驻人月球基地的总体设想,建成后的基地将从资源和能源等多个方面有力支撑大规模地月空间探索与开发活动,实现地月空间的可持续开发与探索,但也面临着前所未有的技术挑战:①极端环境与防护,月面特殊或极端环境对基础设施、人员与装备的影响和约束,如辐射、微流星撞击、真空与高低温循环(-184~127℃),尤其是月尘对人员装备的损害等;②低成本与可持续性,“阿波罗”计划曾耗资255亿美元,成本关乎工程可实现性、决定具体技术途径,仍需发展高效的原位能源获取与原位资源转化利用技术,满足基地建设和运行需求;③长期自主运行,在成本、人力、地面响应周期的约束下,长期驻人月球基地必须实现高度自主化,极端环境可达,采集、挖掘、建造、运输等人力辅助,遥操作与人机协作等能力成为必须。

依据上述需求,驻人月球基地按照功能可以划分为六大技术群,即:①月球资源探测与开发技术群;②能源利用与环控技术群;③生命与健康技术群;④月面通信与智能技术群;⑤运载与交通技术群;⑥月球基地运维和模拟技术群。六大技术群相互支撑。

1) 月球资源探测与开发技术群

聚焦月球水冰和月壤等物质资源的前期探测与后

期开发相关的关键技术,保障驻人基地生保物资和月球建筑居所的原位建造能力,重点包含3个方面。

(1) 月球资源探测分析与评估技术

月球资源可为生保、能源、基建提供支撑,是驻人月球基地建设和后期科研站安全稳定运行的保障^[54]。月球资源探测主要聚焦高精度和综合月球资源勘查技术,即通过月表多点采样、高精度遥感探测和原位物化探等多方式对月球矿产和水冰等资源种类、分布和储量进行详细分析和评估,构建月表和月球深部的地质结构和资源分布图,为后期月球基地选址和资源开发提供科学依据。

(2) 月面资源开采与转化技术

原位资源开发和利用是实现月球基地长期稳定运行的关键。月壤、月岩和极地水冰等资源能够为科研站的运行提供水、氧气、氢气、金属等物质。月面开采与转化技术聚焦月面微重力和高真空等极端环境下月面资源的开采、分离、分解、转化工艺流程,具体包括月壤/月矿挖掘和收集,力学特性研究和机构设计优化,低能耗氧气和金属分离,多挥发物混杂水的分离、高精度提纯以及氢氧转化等。

(3) 月面制造和建筑建造技术

由于地月运输成本高昂,月球基地的防护结构、着陆场、功能区道路需最大限度地利用月面原位资源。月面建筑建造技术应构建以月面原位制造为主的工程体系,重点突破月面真空低重力环境下月壤资源工程材料转化技术,包括月壤固化和3D打印制造工艺(包括粘合剂喷射成型、挤出积淀工艺)、月壤烧结和拼装技术、月壤袋约束成型工艺、月壤基玄武岩纤维制备技术、月壤基新型非金属材料(如玻璃钎料、无机粘接剂等)制造技术以及月面焊接与连接技术,形成月壤资源原位整体增材制造的月面建筑建造技术。

2) 能源利用与环控技术群

聚焦月球可再生能源获取和存储、小型化核能技术、能源系统管理和远距离传输、月球基地内环境控制等关键技术的研究。

(1) 地外空间可持续能源利用技术

月球基地的建设和运行均离不开能源供应。科研站需充分利用月球空间独特的物理环境与能源资源,亟需开展空间核电源、太阳能电源、月表温差发电、月球基地热能等清洁能源关键技术研究,聚焦太阳能全光谱光电转换、太阳能聚光发电、晶硅太阳能光伏发电、裂变核能发电设备小型化、高效能的热电材料等研究方向。

(2) 能源原位高效存储与传输技术

月球能源系统中另外一个重要技术问题就是如何存储能源,用于满足驻人科研站在漫长寒冷的月夜的能量需求。月球基地聚焦基于物理、化学和生物新方法实现能量的高效存储,主要开展极端环境下化学和生物电池、高密度机械储能、先进原位储热、能量高效传输方案研究,重点突破极端环境下高效化学反应能量转化、基于月面人工微生态系统开发生物储能、基于月壤等原位资源的热能存储、基于激光和微波等载体的远距离无线能源传输等前沿技术。

(3) 月球基地环境控制技术

环控系统是支撑月球基地驻人的关键,主要包括为基地制热、制冷的温度控制系统,补充氧气、净化空气的空气净化系统,开展基于原位太阳能和地热能等资源的月昼供冷和月夜供暖新方法研究,并结合高效储能-释能方法实现基地内部温度控制,利用化学和生物手段实现低能耗水/氧气循环和净化,保障在月面高真空大温差环境下月球基地内部环境的宜居性。

3) 月表生命与健康技术群

聚焦驻人月球基地生水氧的生命保障物质的原位获取,长时间驻留宜居微生态环境的构建,月球极端环境对人健康影响以及月球生命健康保障。

(1) 生命保障与功能型生态重构技术

长期有人月球驻留与开发必须建立适合人体长期生活、工作的环境空间,持续并稳定供应所需的食物、氧气和水等生存必需品,保障基地内物质/能量流平衡,确保基地内人员的身心健康与居住舒适度。此外,研究有限资源的原位循环利用技术,以温和生物反应过程为出发点,突破地外作物高产与全过程自动化、肉类生物合成与赋型、月壤原位资源化改良、废弃物高效净化与转化、有害微生物精准识别与防控等单元技术瓶颈,构建完备的驻人科研站物质循环和能量流动系统,实现小型功能生态系统设计和运行调控,构建以微生物为功能主体,人、植物、小型动物相互依存的受控生态生保系统,为航天员的健康生活、高效工作提供坚实保障。

(2) 极端环境下宇航员安全保障技术

月面环境温度变化剧烈、空间粒子/辐射严重,且脱离磁场保护后,航天员受到空间辐射的严峻考验。此外,带电微纳月尘污染力极强,月尘粘附会引起机械结构卡死、密封机构失效、光学系统灵敏度下降、部件磨损以及热控系统故障、登月服等装备外层材料的磨损。月球基地为满足长期自主运行的目标,必须对月面的大温差、强辐射及月尘污染等加以防护,重

点研究基于人造磁场的空间粒子/空间辐射防护,温控/辐射/带电粒子/微流星冲击综合防护材料,光/机/电设备的密封与月尘防护,航天服被动防尘与主动除尘以及月尘过滤技术。

(3) 地月智能健康诊断与医疗技术

长期月面任务环境下,航天员的健康及生理状态影响到整个月球探测与开发活动的进程,对航天员进行全面的生理和健康监测,发展远程医疗和地外空间医疗技术成为必需。利用月基有限医疗资源对航天员健康状况进行定期监测和治疗是智能健康诊断与医疗系统的重要职能,发展适宜于太空应用的、可穿戴生理生化状态无创、长期、连续监测技术,将人工智能、大数据和先进生物医学知识相结合发展智能健康自主诊断技术,精确调控,最大程度地减弱航天员在月球上长时间驻留带来的生理损伤;发展适合低重力、外太空环境的先进医学诊断系统和远程医疗装备,突破“地月协同”远程诊疗技术,提升长期月面驻留任务的医学保障能力。

4) 月面通信与信息技术群

聚焦地月和月面通信及导航关键技术、面向多任务的智能机器人等。

(1) 地月高宽带通信和精准导航技术

地月高宽带通信主要依托于月球中继和导航星座系统,满足全月面全时段环月飞行器以及月面探测单元通信需求。基于多中继通信的全月面实时导航与地月通信技术,长延时的中断允许网络技术,月球通信总体拓扑结构分析与模拟仿真技术,高可靠性、低能耗的月球通信基站和小型化月面无线网络软硬件系统,航天员紧急通信协议等是地月高宽带通信技术的重点研究方向和内容,将阶跃式提升月球基地稳定建设与运行能力。此外,为了满足月球基地建设对通讯与导航授时技术的迫切需求,信息与通信任务聚焦先进的地-月、月球基地内的光通信与无线通信、高速局域网络和导航授时技术与装备,支撑月球基地的信息化和智能化。

(2) 人机协作和遥控操作技术

月球基地的建造和运维任务复杂度高、流程繁琐,极端环境下面临许多高度不确定性的突发情况,机器人—人现场协作和空间遥操作是不可或缺的关键技术。基于人工智能算法、先进传感、控制论和机器人技术,开展人机先进的交互手段、人机协同感知、机器人认知增强和协作安全保障等人机现场协作技术,有效地提高月面作业的效率。同时,针对复杂危险的场景,利用地—月或者在轨遥操作技术实现人机

远距离协同作业,重点开展监督式遥操作技术,并结合先进的感知和操控方法,提高远程呈现和精准控制的能力。通过人机现场协作和遥操作技术大大提高月面作业的效率,有效地保障月球驻人基地的安全建造和运行。

(3) 月面智能自主作业机器人技术

月球基地建设过程涉及原材料生产、设备搬运、建筑建造等诸多环节,任务囊括多机系统任务规划、多机协同精准操控、环境多状态感知与协同探测等,为驻人科研站智能建造装备/机器人研制、极端环境新材料研发带来了挑战。面向科研站结构建造和内里局部区域环境作业任务需求,重点加强月球基地建设的系列化智能自主机器人技术攻关,包括基于月球原位资源的3D打印机器人、原位资源的开采与加工机器人、月面着陆缓冲-移动作业理论和极端月面环境下机器人材料与结构研究,发展轮式、足式着陆-缓冲功能一体化月面作业装备,突破地外有限资源约束下的机器人非机构环境感知及多传感器信息融合,与自主决策、装备间对接、多装备协同移动控制等智能化技术,为科研站建设、原位资源的开采和加工等奠定技术基础。

5) 运载与交通技术群

聚焦地月往返运输系统和月面交通系统关键技术与装备。

(1) 地月往返运输系统技术

地月往返运输系统包括天地往返重载运输系统、空间运输系统、月球着陆上升器,有力支撑载人登月、月球基地建设和月球资源开发与利用等任务。需要从总体设计、材料、结构、推进以及导航与控制多维度进行研究工作,构建高可靠、低成本地月运输体系、可重复运载器方案、液氢液氧推进技术、复杂月面地形垂直着陆自适应导航与控制方法。同时保障在微重力、低温等空间/月面极端环境约束下在轨、月面多场景燃料加注机构和管控能力,实现地月空间远距离航班化运输能力。

(2) 月面移动和飞行技术

月面移动和飞行技术保障月面探测地的可达性,支撑宇航员离开基地进行月表多点科考任务。根据探测地距离和地理环境的差异,涵盖月面小范围移动车、中短距离移动增压移动车、大范围月面飞行器技术,重点解决月面复杂地理环境下高强度和轻量化移动底盘构建、移动增压舱设计与优化、可重构月面飞行器推进技术(可实现月面低空飞行和入轨飞行)、精准着陆技术等,保障宇航员安全同时保障多点探测

任务有效执行。

(3) 月面推进剂制备、存储与加注技术

月面推进剂制备、存储和加注技术是支撑地月可重复运载和月面可重复飞行系统的关键,需要系统性解决极端环境下液氢液氧制备、存储与加注一系列基础问题,建立真空低重力环境下水低能耗分解制氧制氢和氢氧分离工艺、低温下液氢液氧存储技术、在轨和月面加注过程中液相分层和定位、低重力下气液高效分离、低温推进剂热防护和蒸发量控制、高效轻质对接结构和近距离精准调控、推进剂精准测量和智能监测等技术,有效地保障在极端环境下氢氧燃料低成本制备和安全智能加注。

6) 月球基地运维和模拟技术群

聚焦极端环境下运行的智能运行、状态监测和极端防护,实现地面模拟环境下月球关键技术的验证。

(1) 月面设施状态监测与信息管理技术

由于月球表面环境恶劣,时常发生小天体或陨石撞击事件,威胁月球基地的安全。针对长期服役的设备、平台,为保证各系统持久可靠运行,同时为保证人类可长期、稳定、安全地居住在月球表面,必须对月球基地的实时运行状态进行监控,对可能存在的安全风险做出提示或预警。重点发展月球基地健康监测与智能运维技术,长时间稳定监测技术,高效预警机制,建立一套系统的、功能全面的月球基地运行维护管理的大数据处理与数字孪生系统,为月球基地保驾护航。此外,月球基地能源、交通、建筑和生命系统的信息监测和处理将面临着少量的监测压力,需重点发展跨设备采集与控制、异构数据管理与自主信息处理、高速数据采集与收发、高可靠性与安全性设计等方向。

(2) 极端环境下月面装备防护技术

认知长期空间环境下服役,结构与装备的性能退化过程,是开展有效防护设计的基础。需要进一步认知月表高真空、大温差、多辐射、带电月尘、微流星轰击等极端环境效应,在此基础上建立月面综合环境等效模拟方法。系统性研究复杂恶劣的月基环境对装备、建筑结构与生保装备的材料性能及关键核心电子元器件的影响规律,揭示月表多物理场耦合作用下材料-器件-部组件-系统的多层级影响规律;全面揭示失效模式及机理,建立相应的失效与寿命预报机制;最终提出针对性的结构与装备失效方法系统研究,建立质量屏蔽防护、电磁场防护等辐射防护方法,为各类装备长期稳定服役提供理论与技术支撑。

(3) 月面资源开发地面模拟技术

月球极端环境效应模拟试验平台与试验技术, 是发展地外空间技术与演示验证的重要支撑。月面资源开发需要开展月面探测机器人长期极端冷热循环环境下机构的可靠性试验, 长期空间辐射环境电子设备可靠性与寿命试验, 月尘对光/机/电及太阳能电池板设备的污染与除尘技术试验等。面对极地水冰开采任务, 利用地面模拟技术完成微重力环境下的提炼和净化模拟装备的开发与实验, 涵盖地面高真空、大温差、微重力、多辐射、带电月尘等月球环境模拟技术, 月尘、月壤等物质资源的模拟产品技术, 资源开采/利用

装置原型机在地面极端环境模拟下实验测试技术, 以及月面综合环境加速验证关键技术, 形成空间综合环境模拟与试验系统。发展相应的多物理场数值模拟技术, 建立等效模拟物理模型, 构建月表多因素数值仿真模拟平台。

国内外对这六大类关键技术和系统开展了系列研究工作, 在基本原理研究、关键技术攻关和原型样机研制3个层面取得了丰硕的成果(如表1所示), 但是技术系统性、成熟度以及前沿概念和方案还需要进一步研究, 为月球驻人月球基地的建设提供重要的理论和技术支撑。

表1 驻人月球基地关键技术研究现状总结与分析

Table 1 Summary and analysis of the key technologies for manned lunar base

关键技术	国内外研究现状	分析与总结
月球资源探测与开发	月球全球空间分辨率数10m至km量级、高覆盖率的宏观遥感探测 ^[51] ; 还原法、电解法、热解法月球金属原位提炼 ^[52-53] ; 月球氦-3开采热释放特性研究 ^[54] ; 月壤混凝土、月壤烧结、月壤粘结、月壤袋约束等地面演示技术 ^[55] 。	缺少月面多点高精度资源分布图, 资源低能耗原位开采、提取以及原位建造方案需进一步完善。
月面能源利用与环控	光伏、光热、低功率同位素电池技术 ^[56] ; 40 kWe空间核反应堆电源系统方案 ^[57] ; m级距离、W级无线能量传输 ^[58] ; 基于月壤的能量原位存储技术 ^[59] ; 菲涅尔镜-热离子变换太阳能发电技术 ^[60] 。	光热、光伏发电技术成熟, 小型化核裂变技术亟需攻关, 并缺少创新的原位能源概念和方案。
月表生命与健康保障	深空环境对宇航员肌肉和骨骼影响定量分析与部分康健措施 ^[61] ; 美国新型月面宇航服研制成功 ^[62] ; 利用“阿波罗”月壤样品实现植物培育 ^[63-64] ; “月宫一号”人工闭合生态系统地基综合实验装置 ^[65] 。	月面极端环境对长期驻留航天员健康影响缺少系统性的研究, 人造生态系统的可持续性和自循环性还无法实现。
月面通信与智能系统	“鹊桥”中继卫星系统 ^[66] ; 月球极区多器联合通信技术 ^[67] ; 美国LCRD激光通信在轨演示 ^[68] ; 智能探测机器人、多功能建造机器人、人机协作技术发展迅速 ^[69-73] 。	地月通信、探测与开发机器人系统已有较深技术积累, 但机器人的智能程度还需进一步提高。
地月运载与交通系统	重型火箭“长征九号”已在技术攻关, 美国SLS (Space Launch System) 火箭发射在即; 美国ULA (United Launch Alliance) 完成地月往返运输部分原型系统 ^[74] ; 月面载人增压移动舱地面实验 ^[75-76] ; 已实现常温推进剂加注技术, 低温加注尚在攻关中 ^[77] 。	中国重型运载火箭、可重复使用运载系统、月面增压移动舱等核心系统正处于研发阶段。
月球基地运维和地面模拟	月尘力热电特性、主动和被动防护机理研究 ^[78-80] ; 月面充气展开舱微流星和热防护 ^[81] ; 月面环境单要素模拟技术 ^[82] ; 空间综合环境与物质作用平台(国家大科学工程)即将建成 ^[82] 。	月尘特性、主被动防护方法已经开展大量理论和实验, 需开展工程化和装备化实践。

4 结束语

随着地月空间大规模、常态化探索与开发步伐的加快, 月球驻人基地将是支撑地月空间资源开发的重要一环。世界航天强国和新兴国家对人类重返月球表现出极大的兴趣, 以美国“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划为平台, 密切协作开展了月球驻人基地关键技术的研究。中国也制定了无人月球基地发展计划, 载人登月、月面驻人探测与开发也提上议程。

月球基地是一个十分复杂的系统, 普遍认为其建

设需经历无人、短期有人值守和长期驻人等多个阶段, 在真空、低重力、低温等极端环境约束下分阶段地解决居所、能源、交通、环境、生态等多个层面的基础问题和关键技术。同时, 为了保证基地建造和运维的低成本性和可持续性, 需要充分利用月面环境资源和物质资源, 以学科深度交叉融合孵化新概念, 新概念催生颠覆性技术, 新技术指导新装备研发的总体思路, 深入挖掘原位资源的潜能, 为月面发电、生保、建造等关键技术提供全新的变革性的解决方案, 最大程度降低对地球资源和能源的依赖。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球某些资源的开发利用前景[J]. 地球科学, 2002(5): 498-503.
OUYANG Z Y, ZOU Y L, LI C L, et al. Prospects for the development and utilization of some lunar resources[J]. *Earth Science*, 2002(5): 498-503.
- [2] 果琳丽, 王平, 朱恩涌, 等. 月球基地概述[J]. 科技创新导报, 2014, 11(25): 18-19.
GUO L L, WANG P, ZHU E Y, et al. Overview of lunar base[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2014, 11(25): 18-19.
- [3] 马晓荣. 中俄携手建设月球科研站[J]. *中国军转民*, 2021(5): 11-12.
MA X R. China and Russia join hands to build a lunar research station[J]. *China Military to Civilian*, 2021(5): 11-12.
- [4] 宋靖华, 张杨姝禾, 袁煊鑫. 利用熔岩管道建设月球基地的规划设计[J]. 城市建筑, 2019, 16(7): 44-51.
SONG J H, ZHANG Y S H, YUAN H X. Planning concept of using lava pipeline to build a lunar base[J]. *Urban Architecture*, 2019, 16(7): 44-51.
- [5] MOROZHENKO A V, VIDMACHENKO A P. Moon base and problems of global changes on the earth[J]. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2004, 36(11): 1-9.
- [6] SLYUTA E. The Luna program[J]. *Sample Return Missions*, Elsevier, 2021(3): 37-78.
- [7] TAYLOR S R. Lunar science: a post-Apollo view: scientific results and insights from the lunar samples[M]. Holland: Elsevier, 2016.
- [8] 卢波. 世界月球探测的发展回顾与展望[J]. *国际太空*, 2019(1): 12-18.
LU B. Review and prospect of the development of lunar exploration in the world[J]. *Space International*, 2019(1): 12-18.
- [9] NOZETTE S, RUSTAN P, PLEASANC L P, et al. The clementine mission to the Moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, 266(5192): 1835-1839.
- [10] 郑永春, 邹永廖, 付晓辉. LRO和LCROSS探月计划: 科学探测的分析与启示[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 117-129.
ZHENG Y C, ZOU Y L, FU X H. LRO and LCROSS missions: overview and enlightenment for future lunar exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 117-129.
- [11] BENAROYA H, BERNOLD L. Engineering of lunar bases[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(4-5): 277-299.
- [12] SCHMITT H H, ARMSTONG N. Return to the Moon: exploration, enterprise, and energy in the human settlement of space[M]. New York: Copernicus Books, 2006.
- [13] DELLA T A, FINZI A E, GENTA G, et al. AMALIA mission lunar rover-the conceptual design of the team ITALIA rover, candidate for the Google Lunar X prize challenge[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67(7-8): 961-978.
- [14] DE L P, HARRIS G L, WARGETZ A M. Design construction and implementation of an inflatable lunar habitat base with pressurized rover and suit ports[C]//Proceedings of 43rd International Conference on Environmental Systems. [S. l.]: ICES, 2013.
- [15] YAO C, HU G, XIE J, et al. Scheme research of nuclear reactor power system for lunar base[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(3): 464.
- [16] SGAMBATIA A, BERGA M, ROSSIA F, et al. URBAN: conceiving a lunar base using 3D printing technologies[J]. *International Astronautical Congress*, 2019, 4(532): 12917-13674
- [17] DE K X, DINI E, CESARETTI G, et al. Lunar outpost design[J]. *Research and Development*, 2015, 5: 1-10.
- [18] Nine visions for lunar architecture revealed in Moontopia competition[EB/OL]. (2017-01-17)[2022-07-04]. <https://www.dezeen.com/2017/01/17/nine-visions-lunar-architecture-moon-moontopia-competition/>, 2017/01.
- [19] 张家铭, 闫赟彬. 美国宇航局“Artemis”月球探测计划新进展[J]. *航天返回与遥感*, 2022, 43(2): 127-133.
ZHANG J M, YAN Y B. The progress of NASA's Artemis lunar exploration program[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(2): 127-133.
- [20] WEBER R C, KENNEDY L D, GARBER A, et al. NASA's human landing system: enabling the next generation of lunar science[C]//Proceedings of 53rd Lunar and Planetary Science Conference (LPSC). [S. l.]: LPSC, 2022.
- [21] FOUST J. Three ways to the Moon: NASA will soon narrow the possible strategies for landing people on the Moon[J]. *IEEE Spectrum*, 2020, 58(1): 44-47.
- [22] RUGANI R, MARTELLI F, et al. Moon Village: main aspects and open issues in lunar habitat thermoenergetics design a review[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/I&CPS Europe). [S. l.]: IEEE, 2021.
- [23] PETROV, GEORGI, et al. Moon village reference masterplan and habitat design[C]//Proceedings of 49th International Conference on Environmental Systems. USA: ICES Steering Committee, 2019.
- [24] SOM designs inflatable Moon Village to be first-ever lunar habitat[EB/OL]. (2019)[2022-07-04]. <https://www.dezeen.com/2019/04/11/moon-village-som-news-design/>.
- [25] TORRESE P, POZZOBON R, ROSSI A P, et al. Detection, imaging and analysis of lava tubes for planetary analogue studies using electric methods (ERT)[J]. *Icarus*, 2021, 357: 114244.
- [26] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 航天白皮书: 2021中国的航天[EB/OL]. (2022-01)[2022-07-04]. www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/47675/Document/1719949/1719949.html.
- [27] 赵竹青. 国家航天局: 2030年前完成“嫦娥八号”发射[EB/OL]. (2022-01-18)[2022-07-04]. http://news.youth.cn/jxsw/202201/t20220128_13409892.htm.
- [28] 赵竹青. 国家航天局: 探月四期将建设月球科研站基本型[EB/OL]. (2022-01-18)[2022-07-04]. finance.people.com.cn/n1/2022/0128/c1004-32342421.html.
- [29] 国家航天局. 中俄联合发布国际月球科研站路线图和合作伙伴指南[EB/OL]. (2021-06)[2022-07-04]. www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812157/content.html, 2021/06.
- [30] 国家航天局. 国际月球科研站合作伙伴指南. [EB/OL]. (2021-06)[2022-07-04]. www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812147/content.html.
- [31] 国家航天局. 国际月球科研站路线图 [EB/OL]. (2021-06)[2022-07-04]. www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758843/c6812151/content.html, 2021/06.
- [32] 李志杰, 果琳丽, 彭坤. 载人月球基地选址的几个基本因素[J]. *载人航天*, 2015, 21(2): 158-162.
LI Z J, GUO L L, PENG K. Research on site selection of manned lunar

- base[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, 21(2): 158-162.
- [33] 贾瑛卓, 邹永廖. 月基对地观测对月球基地选址需求分析[J]. *航天器工程*, 2016, 25(6): 116-121.
JIA Y Z, ZOU Y L. Research on lunar site selection for lunar base earth observation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 116-121.
- [34] 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. *导弹与航天运载技术*, 2009(2): 25-30.
DENG L Y, GUO J F, CUI N G. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J]. *Missile and Space Vehicle*, 2009(2): 25-30.
- [35] 张焯, 胡智新. 无人月球基地总体初步设想[J]. *航天器工程*, 2010, 19(5): 95-98.
ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 95-98.
- [36] 果琳丽, 李志杰, 齐盼, 等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(6): 1-10.
GUO L L, LI Z J, QI B, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(6): 1-10.
- [37] 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. Study on in-situ resource utilization technology of the Moon[J]. *Space International*, 2017(3): 44-50.
- [38] 田亚骏, 张明, 林轻. 月面大范围探测功能需求分析及其研究现状[J]. *载人航天*, 2020, 26(5): 649-655.
TIAN Y, ZHANG M, LIN Q. Analysis of function requirements in large-scale lunar surface detection and its research status[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(5): 649-655.
- [39] 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(4): 374-381.
YUAN Y, ZHAO C, HU Z Y. Prospect of lunar base construction scheme[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 374-381.
- [40] SUN Z X. A robotic arm based design method for modular building in cold region[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1452.
- [41] 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.
- [42] 屠永清, 寇广福. 球冠型充气膜结构月球科考站的研究[J]. *工业建筑*, 2007(S1): 519-522.
TU Y Q, KOU G F. Research on inflatable membrane structure of globe crest form for the Moon base[J]. *Industrial Construction*, 2007(S1): 519-522.
- [43] 徐彦, 郑耀, 匡松松, 等. 展开式月球科考站热防护结构方案研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(2): 168-174.
XU Y, ZHENG Y, KUANG S S, et al. Conceptual design of flexible thermal protect structure for deployable lunar habitats[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 168-174.
- [44] 田忠建, 蒋婷婷, 周莉, 等. 月球天梯月球科考站的总体设计[J]. *机械管理开发*, 2018, 33(6): 4-6, 11.
TIAN Z J, JIANG T T, ZHOU L, et al. A lunar bases overall design of a lunar space elevator[J]. *Mechanical management and development*, 2018, 33(6): 4-6, 11.
- [45] 付新卫, 孟少华, 周印佳, 等. 柔性可展开太空舱研究进展[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(3): 37-46.
FU X W, MENG S H, ZHOU Y J, et al. Investigation development on space inflatable capsule[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(3): 37-46.
- [46] 李月, 范国臣, 高著秀. 基于月球环境能量和含能物质的发电技术研究[J]. *科学技术创新*, 2019(30): 1-3.
LI Y, FAN G C, GAO Z X. Research on power generation technology based on lunar environmental energy and energetic materials[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019(30): 1-3.
- [47] 刘飞标, 朱安文. 月球科考站闭环核能磁流体发电技术初步研究[J]. *载人航天*, 2017, 23(2): 202-206.
LIU F B, ZHU A W. Research on closed cycle nuclear magnetohydrodynamic (MHD) power generation technology for lunar base[J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(2): 202-206.
- [48] 郭双生. 我国月球科考站受控生态生保系统物质流调控分析研究[J]. *载人航天*, 2017, 23(5): 680-687.
GUO S S. Analytic study on material flow regulation in CELSS of future Chinese lunar base[J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(5): 680-687.
- [49] 刘益清, 梅洪元, 刘鹏跃, 等. 月球环境下建筑设计策略研究[J]. *当代建筑*, 2022(1): 21-24.
LIU Y Q, MEI H Y, LIU P Y, et al. The design strategy of habitat in lunar environment[J]. *Contemporary Architecture*, 2022(1): 21-24.
- [50] 丁烈云, 徐捷, 骆汉宾, 等. 月面建造工程的挑战与研究进展[J]. *载人航天*, 2019, 25(3): 277-285.
DING L Y, XU J, LUO H B, et al. Lunar construction: challenges and research progress[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25: 277-285.
- [51] 何志平, 桂裕华, 李津宁, 等. 面向月球环绕探测的光谱成像: 研究现状与技术挑战[J]. *光学学报*, 2022(17): 402-412.
HE Z P, GUI Y H, LI J N, et al. Spectral imaging for lunar orbit exploration: research status and technical challenges[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022(17): 402-412.
- [52] 高楠, 许英奎, 罗泰义, 等. 月球矿产资源勘查进展及展望[J]. *矿物学报*, 2022, 42(2): 222-230.
GAO N, XU Y K, LUO T Y, et al. Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022, 42(2): 222-230.
- [53] 李琛, 魏奎先, 李阳, 等. 月球表面矿产资源原位利用研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(12): 3289-3299.
LI C, WEI K X, LI Y, et al. Research progress on in-situ resources utilization of lunar surface minerals[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(12): 3289-3299.
- [54] 宋洪庆, 杜恒畅, 张杰, 等. 月球氦-3资源的原位开采热释放行为研究[J]. *空间科学学报*, 2021, 41(5): 787-792.
SONG H Q, DU H C, ZHANG J, et al. Release behavior research of in-situ Helium-3 resources extraction in moon under heating[J]. *Chin. J. Space Sci*, 2021, 41(5): 787-792.
- [55] 冯鹏, 包查润, 张道博, 等. 基于月面原位资源的月球基地建造技术[J]. *工业建筑*, 2021, 51(1): 169-178.
FENG P, BAO C R, ZHANG D B, et al. Construction technology for lunar bases using lunar in-situ resources[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(1): 169-178.
- [56] 任德鹏, 李青, 许映乔. 月球基地能源系统初步研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(6): 561-568.
REN D P, LI Q, XU Y Q. Preliminary research on the lunar base energy system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(6): 561-568.
- [57] 姚成志, 胡古, 解家春, 等. 月球基地核电源系统方案研究[J]. *原子能*

- 科学技术, 2016, 50(3): 464-470.
- YAO C Z, HU G, XIE J C. Scheme research of nuclear reactor power system for lunar base[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(3): 464-470.
- [58] 倪旺, 丁飞, 宗军, 等. 电源无线传输与能源互联技术的研究进展[J]. 2019, 43(2): 357-360.
- NI W, DING F, ZONG J, et al. Research progress on electronic energy wireless transfer and energy interconnection[J]. 2019, 43(2): 357-360.
- [59] ELLERY A. Generating and storing power on the moon using in situ resources[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2022, 236(6): 1045-1063.
- [60] FERERES S, ESCARIO S, PRIETO C, et al. Regolith packed bed thermal energy storage for lunar night survival [C]//Proceedings of 2019 European Space Power Conference (ESPC). [S. l.]: ESPC, 2019.
- [61] COMFORT P, MCMAHON JJ, et al. Effects of spaceflight on musculoskeletal health: a systematic review and meta-analysis, Considerations for Interplanetary Travel[J]. Sports Medicine, 2021, 51: 2097-2114.
- [62] NASA taps axiom space for first artemis moonwalking spacesuits[EB/OL]. (2022-09)[2023-01-17]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-taps-axiom-space-for-first-artemis-moonwalking-spacesuits>.
- [63] PAUL A, ELARDO S M, FERL R. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration[J]. Communications Biology, 2022, 5: 382.
- [64] PRZYBYLA C. Space aquaculture: prospects for raising aquatic vertebrates in a bioregenerative life-support system on a lunar base[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2021, 8: 699097.
- [65] 刘红, 姚智恺, 付玉明. 深空探测生物再生生命保障系统研究进展和发展趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 489-499.
- LIU H, YAO Z K, FU Y M. Research status and development trend of bio-regenerative life support system for deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 489-499.
- [66] 张立华, 吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(6): 497-505.
- ZHANG L H, WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 497-505.
- [67] 刘适, 李炯卉. 多器联合月球极区探测通信系统设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 384-389.
- LIU S, LI J H. Analysis and design of the communication system for multi-probes joint lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 384-390.
- [68] DAVID J I, BERNARD L E, JOHN W S. Laser communications relay demonstration (LCRD) update and the path towards optical relay operations[C]// Proceedings of 2017 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2017.
- [69] 李卫华, 郭军龙, 丁亮, 等. 月球车地面遥操作技术发展现状与未来展望[J/OL]. 航空学报, 2022, 43(9): 026333. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220228.1122.028.html>.
- LI W H, GUO J L, DING L, et al. Review and prospect of ground teleoperation technology for lunar rover[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 026333. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220228.1122.028.html>.
- [70] 孙俊凯, 孙泽洲, 辛鹏飞, 等. 深空着陆探测足式机器人发展综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1765-1775.
- SUN J K, SUN Z Z, XIN P F, et al. Review on development of legged robots for deep space landing exploration[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1765-1775.
- [71] 孟光, 韩亮亮, 张崇峰. 空间机器人研究进展及技术挑战[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 8-32.
- MENG L, HAN L L, ZHANG C F. Research progress and technical challenges of space robot[J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 523963.
- [72] 程力. 面向月面探测任务的人机协作关键技术研究及系统实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [73] HAMBUCHEN K, MARQUEZ J, FONG T. A review of NASA human-robot interaction in space[J]. Space Robotics, 2021, 2: 265-272.
- [74] KUTTER B F. Cislunar-1000: transportation supporting a self-sustaining space economy[C]//Proceedings of 2016 SPACE Conferences and Exposition. [S. l.]: AIAA, 2016.
- [75] 邓宗全, 范雪兵, 高海波, 等. 载人月球车移动系统综述及关键技术分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 675-689.
- DENG Z Q, FAN X B, GAO H B, et al. Review and key techniques for locomotive system of manned lunar rovers[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 675-689.
- [76] 王平, 于晓强, 郭继峰. 月球大范围探测巡视器及GNC技术发展综述[J]. 2022, 43(5): 548-562.
- WANG P, YU X Q, GUO J F. A survey of lunar wide-range exploration rover and GNC technology[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(5): 548-562.
- [77] 马原, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂在轨加注技术与方案研究综述[J]. 宇航学报, 2016, 37(3): 245-252.
- MA Y, LI Y Z, WANG L, et al. Review on on-orbit refueling techniques and schemes of cryogenic propellants[J]. 2016, 37(3): 245-252.
- [78] 李陶林, 常宝宝, 石宪章, 等. 面向月尘防护的舱外航天服面料芳纶1313的功能化修饰[J]. 载人航天, 2022, 28(2): 196-201.
- LI T L, CHANG B B, SHI X Z, et al. Functionalization of spacesuit used aramid fabric (nomex) towards lunar dust mitigation[J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(2): 196-201.
- [79] 穆萌, 张海燕, 王晓, 等. 月尘被动防护技术的最新研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 135-150.
- MU M, ZHANG H Y, WANG X, et al. State-of-the-art passive protection technologies of lunar dust[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(6): 135-150.
- [80] WANG X, WANG W D, SHAO H, et al. Lunar dust-mitigation behavior of aluminum surfaces with multiscale roughness prepared by a composite etching method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(29): 34020-34028.
- [81] 徐铨东, 王玉林, 于东, 等. 充气展开月面居住舱微流星体防护及隔热设计[J]. 载人航天, 2022, 28(3): 297-305.
- XU H D, WANG Y L, YU D, et al. Micrometeoroid protection of inflatable deployable lunar habitation module and thermal insulation design[J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(3): 297-305.
- [82] 冯皎齐, 易忠, 李西园, 等. 面向载人月球探测的月面环境模拟试验关键技术分析[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(1): 1-6.
- FENG Y Q, YI Z, LI X Y, et al. Key technologies in lunar surface environmental simulation test for manned lunar exploration[J].

Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(1): 1-6.

作者简介:

张泽旭(1971-): 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 无人集群智能协同感知与自主决策、航天器自主导航与控制、数据可视化应用、驻人月球/火星基地基础理论及关键技术。

通信地址: 哈尔滨工业大学科学园深空探测楼(150001)

电话: (0451)86402628

E-mail: zexuzhang@hit.edu.cn

袁帅(1988-): 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 自适应学习理论和智能优化算法、飞行器动力学与控制、空间人机协作以及月面智能操作技术。**本文通信作者。**

通信地址: 哈尔滨工业大学科学园深空探测楼(150001)

电话: (0451)86402628

E-mail: shuaiyuan@hit.edu.cn

Review and Prospect of Key Technologies for Lunar Manned Base

ZHANG Zexu¹, YUAN Shuai¹, PAN Wente², YANG Qiang³, CHENG Kunlin⁴, LI Lifang⁵,
XU Fei⁶, CHEN Rong⁷, WANG Qinggong⁸, ZHENG Bo⁹

(1. Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

4. Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology, School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

5. Laboratory for Space Environment and Physical Sciences, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

6. College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

7. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

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

9. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201114, China)

Abstract: The research and development of key technologies of manned lunar bases home and abroad were summarized in this paper. The landmark events and achievements of lunar exploration and lunar base research were studied. The four basic principles of lunar base construction were proposed, based on which the overall planning scheme and six major systems of the manned lunar base located in the polar region of the moon were developed. In addition, a number of key technologies were extracted from the aspects of lunar resource exploration and development, energy utilization and environmental control, life and health, lunar surface communication and intelligent technology, carrying and transportation, operation and maintenance and simulation. Finally, based on the research status of key technologies and the actual needs of the construction of lunar bases, the shortcomings of this research were summarized, to provide suggestions and prospects for the construction, operation and maintenance of future manned lunar bases.

Keywords: manned lunar base; overall vision; key technologies; prospects

Highlights:

- Different phases in the development process of human lunar exploration since the 1960s are elaborated in stages, and several key nodes or important plans are selected to make for a detailed analysis and discussion.
- The general route, development trend, international cooperative relations and expected goals of China in the direction of manned lunar base in the future are described in a more comprehensive way.
- Ideas for the future human manned lunar base on the Moon are put forward, four principles that should be adhered to in constructing the system of human manned lunar base are summarized, and a base framework composed of six systems: architecture, energy, ecology, transportation, resource development and information technology is established.
- Six mutually supportive key technology groups of the human manned base are proposed, and the connotation, significance and implementation methods of each technology group are explored to ensure the stable operation of the lunar base and meet the needs of sustainable exploration of the space environment.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]