



关于未来月球基地建设方案的构想

梅洪元, 包为民, 于登云, 刘鹏跃, 王友善, 潘文特, 陈禹, 李佳阳, 高懿婷, 费腾

Research on Building Plans Design for Future China Lunar Base

MEI Hongyuan, BAO Weimin, YU Dengyun, LIU Pengyue, WANG Youshan, PAN Went, CHEN Yu, LI Jiayang, GAO Yiting, and FEI Teng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210061>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

“长征五号”火箭助推器关键技术及方案设计

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle Booster

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 362-371

“长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 335-343

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

关于未来月球基地建筑方案的构想

梅洪元¹, 包为民², 于登云², 刘鹏跃¹, 王友善³, 潘文特¹,
陈禹¹, 李佳阳¹, 高懿婷¹, 费腾¹

(1. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 哈尔滨 150090; 2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048;
3. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在简述各国月球建筑研究发展的基础上, 论述了紧扣需求、布局集约、模组可拓、原位利用、地月结合的月球建筑设计原则, 依据月表和月坑两种不同建造环境, 系统性地提出了具有中国特色的“三叶草”和“中国星”月球建筑方案, 并分析给出了设计方案工程实施需预先突破的主要关键技术, 为中国未来月球基地建设提供基础支撑。

关键词: 月球基地; 月球建筑; 关键技术; 设计方案

中图分类号: V45

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)06-0553-07

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210061

引用格式: 梅洪元, 包为民, 于登云, 等. 关于未来月球基地建筑方案的构想[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 553-559.

Reference format: MEI H Y, BAO W M, YU D Y, et al. Research on building plans design for future lunar base[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 553-559.

引言

月球是地球唯一的天然卫星, 探索月球是对太空环境认知、适应、开发和利用的起点, 是人类争取广阔发展空间的重要途径。迄今, 人类共实施120余次月球探测任务^[1]。随着社会科技的发展和地球不可再生资源的日益枯竭, 建立月球基地, 对月球环境的深入探测和月球资源开发利用已成为人类深空探测领域重要目标。基于此, 世界主要航天国家有关科技人员相继提出了月球栖息地(Lunar Habitat)^[2]、月球基地(Lunar Base)^[3]、月球村(Moon Village)^[4]和月球科研站(Lunar Research Station)^[5]等设想。

月球建筑是各国建设月球基地的重要基础, 是探索月球空间环境、开发利用月球资源必要的设施, 也是“探月工程四期”后续月球基地建设的重要内容。月球建筑是为探月设备提供掩蔽场所和在月生命提供生存空间。月球建筑已成为未来月球基地建设急需突破的瓶颈, 开展月球建筑研究具有重大意义。近年来, 伴随着美、欧、俄、日等发达国家相继提出月球建筑方案构想, 关于月球建筑研究正经历爆发式的发展。中国也提出了科学性、系统性、自主性的月球建筑方案, 为建设月球基地、实现月球环境长期探索和月球

资源开发利用提供基础保障。

1 月球基地建筑研究的发展历程

自首次实现载人登月以来, 随着科学技术发展, 月球建筑已成为人类探索月球的下一重要目标。纵观60多年月球建筑发展的历程, 针对月球建筑的研究持续推进。自20世纪60年代太空基地方案被首次提出, 在世界范围内, 多国家、多机构开展了有关月球建筑的研究, 可概括为3个阶段: 萌芽期、探索期和爆发期。

1961—1992年为月球建筑萌芽期, 首次登月成功掀起了月球建筑研究的热潮, 形成早期的月球建筑构想: 1961年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与固特异(Goodyear)公司合作推出环形充气站概念^[6], 如图1(a)所示; 1963年NASA与波音(Boeing)公司合作推出LESA综合模块概念^[7], 如图1(b)所示; 1974年SSP(前苏联苏维埃空间项目)提出月球基地概念^[8], 如图1(c)所示。这些早期构想勾勒了月球建筑的基本图像。

1993—2017年为月球建筑探索期, 伴随3D打印和充气技术的快速发展, 由NASA和欧洲航天局

收稿日期: 2021-06-29 修回日期: 2021-10-22

基金项目: 探月四期重大工程资助项目; 国家自然科学基金可持续智能驻人月球科研站设计理论与方法资助项目(52238002)

(European Space Agency, ESA) 主导, 逐渐萌生出一些具有可实施性的相对完整的月球建筑构想: NASA 于1993年和2004年分别提出基于充气自展开技术的月球哨站构想^[9], 如图2(a)所示; 2007年NASA又提出在地球建造充气展开模块^[10], 然后发射至月面形成月球基地建筑的方案, 如图2(b)所示; 2013年ESA与英国福斯特建筑事务所(Foster + Partners)合作, 提出基于充气展开和月壤3D打印技术的较完整月球栖息地构想^[11], 如图2(c)所示。



图1 萌芽期月球建筑方案构想
Fig. 1 Lunar building concepts in germination stage



图2 探索期月球建筑方案构想
Fig. 2 Lunar building concepts in exploratory stage

2018年至今为月球建筑爆发期。期间美国公布了“阿尔忒弥斯”(Artemis)登月计划^[12], 再次将月球基地建设推向热点, 月球建筑快速发展, 形成具有代表性的方案: 麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)和美国SOM(Skidmore, Owings and Merrill)建筑事务所与ESA合作推出竖向舱体方案^[13], 如图3(a)所示; 日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)与鹿岛建设及三所高校合作, 共同提出无人建设的月球建筑方案^[14], 如图3(b)所示; 2020年10月NASA、ICON三维打印科技公司和BIG建筑事务所三方合作, 针对美国“阿尔忒弥斯”登月计划, 推出3D打印月球建筑方案^[15], 如图3(c)所示。

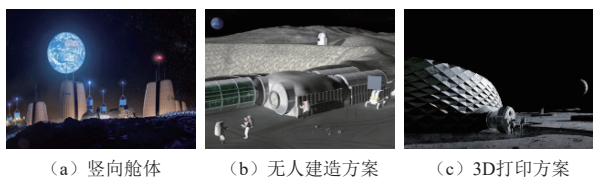


图3 爆发期月球建筑方案构想
Fig. 3 Lunar building concepts in outbreak stage

从月球建筑构想发展历程可发现, 虽然目前各国

尚处于构想阶段, 但已初步形成一些具有建设性的方案。依据建造方式, 可归纳为3个类型: 预制式、展开式和建造式。其中, 预制式为先在地面完整预制建筑然后运载至月球表面安装, 由于运载成本高昂、运载尺寸受限, 该类型适合小型月球建筑; 展开式为在地面预制建筑核心部分, 在月面由建筑核心部分进行展开, 以获得更大使用面积, 该类型方案能够有效结合地月建造优势, 是现阶段可行性较强的方案; 建造式为利用原位材料在月建造建筑主体, 需在月完成材料制备和建设安装, 这种类型方案难度较大, 核心技术有待进一步突破。

2 月球建筑设计分析

2.1 月球建筑应考虑的因素

在月球上建设建筑不同于地球, 需考虑如下主要因素: ①环境, 月表重力约为地球的1/6, 没有大气, 昼夜周期长达27 d、昼夜温差高达300 °C, 具有高真空、强辐射等特点, 易受到太空陨石的直接撞击和微粒子的持续轰击, 环境极端严酷^[16], 同时, 最新研究表明月球赤道附近存在温度稳定的月海孔穴和高原洞穴, 具有天然的掩蔽优势, 月球地下空间具有较大的开发利用潜力^[17-18]; ②资源, 月球蕴含丰富的物质资源, 如月壤、月岩、金属、非金属等矿产资源以及太阳能、氦-3、水冰等能源资源^[19-20], 这些丰富的资源使月球建筑成为可能; ③工程, 建设月球建筑涉及复杂而庞大的系统问题, 包含建筑计划、总体构想、专业协同、功能组织、构造设计等建筑问题; 包含结构选型、结构强度、结构重量等结构问题; 包含抗辐射、抗温差、阻传热、防撞击、高气密等材料问题; 包含地月结合、无人施工等建造问题; 包含太阳能、核能、激光能等能源问题; 包含水循环、氧循环、碳循环、制冷供热等生命保障问题。月球建筑设计需要依据复杂性科学方法, 综合考虑上述因素, 平衡各种矛盾, 合理提出最优解决方案。

通过对月球环境和月球建筑关联问题的梳理, 核心在于: 如何在极端严酷的月球环境和既有地月关系条件下, 充分利用月球原位资源, 精准结合在地球成熟建造技术, 创新构建月球人机混合遥操作建造体系, 实现月球建筑建造及运行智能化。

2.2 月球建筑设计原则

月球基地将是一个有人参与的大型科研设施, 其建设是复杂长期的过程, 月球建筑应紧密围绕月球基地需求开展建设。中国于2016年提出国际月球科研站(International Lunar Research Station, ILRS)计划^[5],

国际月球科研站应由以机器人为主的基本型阶段, 向多个国家、多种模块协同工作的拓展型阶段, 再向支持载人登月和人机联合探测的综合型阶段发展。结合中国国际月球科研站发展战略及未来初级月球基地的功能需求, 月球建筑旨在为载人登月宇航员提供安全稳定的生存空间, 具备短期人员驻留、长期自动运行的功能要求。

依据建筑在月球基地中所承载的功能, 结合从在地球建造中积累的技术经验, 面对月球建造环境, 月球建筑建设应遵循以下原则: ①紧扣月球基地建设需求, 服从和服务于月球基地建设的工程和科学目标; ②应遵循布局集约原则, 即月球建筑应作为月球基地中心站, 以最小半径实现与试验站、能源站、通信站、停放站、补给站、物资着陆区和人员返回区等功能模块的紧密组织及高效运行^[21], 各功能组团的布局关系如图4所示; ③遵循模组可拓原则, 即月球建筑采用单元模块化思想, 规划模组网格, 建立统一建筑标准, 实现可拓展式规划布局, 有利于未来月球建筑集群的衍生和可持续发展; ④采用原位利用原则, 即充分结合月球有利环境, 规避外界不利因素, 利用原位月坑(爆破坑、月海孔穴和高原洞穴)形成的月下掩蔽条件, 重点开发利用月壤、月岩、金属、非金属等原位月球矿物资源, 实现在月取材与在月建造; ⑤采用地月结合原则, 即充分结合在地建造和月球原位资源的双重优势, 遵循由地面预制到月面建造、由单体到整体、由低技到高技、由被动到主动的建造原则, 通过核心舱在地预制、展开舱体在月展开、外围护层在月建造, 综合实现地月建造的有效结合。

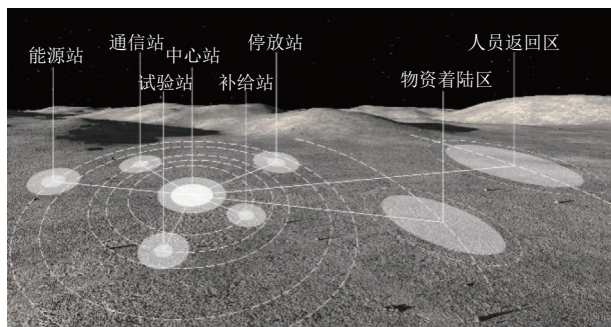


图4 月球基地中各功能组团的位置关系
Fig. 4 Configuration of elements in lunar base

3 月球建筑方案设计构想

本文针对月球基地建设中的建筑问题, 基于月球建筑的特点和设计原则, 依据月表、月坑两种类型建造环境, 分别提出了最具特色的“三叶草”和“中国星”两种月球建筑方案。

3.1 “三叶草”方案

1) 设计理念

该方案为月球基地提供月表式月球建筑, 为人类在月球开展科学研究和资源开发利用提供建筑保障。方案理念取自地球上具有顽强生命力的植物“三叶草”, 寓意在月播种生命, 共筑月海绿洲。

2) 建筑功能

“三叶草”方案由1个核心舱和工作舱、生活舱、生物舱3个展开舱体组成, 呈现出一拖三的布局。核心舱由气闸舱和与3个展开舱体联系的联通舱组成, 内部放置高度集成的建筑声、光、热、电控制系统以及满足生保要求的水循环、氧气制备等设备, 并为3个展开舱体提供水平转运通道; 工作舱体可放置用于在月实验的设备、操作平台及实验资料, 满足航天员的科研工作需要; 生活舱体可放置生保、废物处理、睡眠设备等, 为在月人员的生活起居场所; 生物舱体可放置植物、动物、微生物构成的密闭生物受控生保系统, 结合物资补给为航天员长期在月面工作提供生存保障。

3) 建造过程

首先通过运载器将在地预制的核心舱体及其舱内设备运至月表拟建区域, 核心舱通过水平移动, 精准到达拟建地点。然后通过释放压缩空气使在地球预制的类气凝胶复合功能膜, 实现水平方向展开, 形成工作舱、生活舱、生物舱3个展开舱体。采用激光烧结法实现月壤3D打印, 形成展开舱体的保温、保护层, 利用机械臂在建筑外表皮铺设柔性光伏膜, 为建筑提供能量来源。未来可视工程应用需要, 将三叶草方案多次复制, 实现由多个建筑单体构成的建筑集群。建筑建造的关键步骤如图5所示。建筑的平面图和剖面如图6所示, 展示出建筑的功能构成和空间尺度。

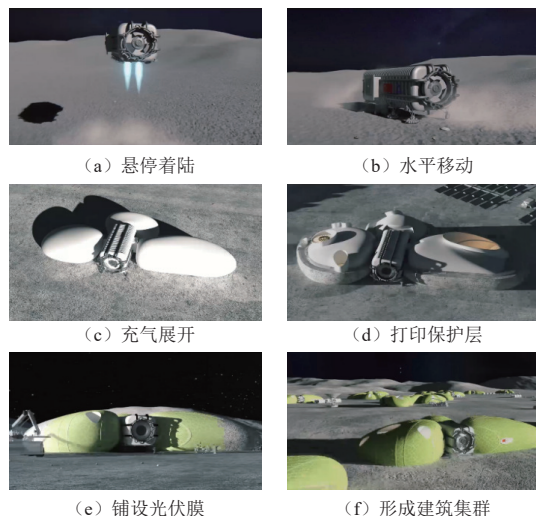


图5 “三叶草”方案建造过程
Fig. 5 “Clover” construction process

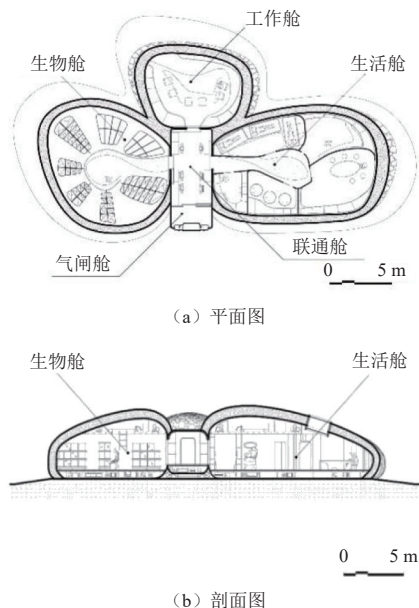


图6 “三叶草”方案技术图
Fig. 6 Layout of “Clover”

3.2 “中国星”方案

1) 设计理念

该方案充分利用原位月坑(爆破坑、月海孔穴和高原洞穴)带来的天然掩蔽条件,利用天然月壤回填方式构建月球建筑,其功能目标与三叶草方案相同。方案理念取自象征民族精神的“闪闪红星”,构型为具有民族特征的“中国星”,寓意红星满月。

2) 建筑功能

“中国星”方案与“三叶草”方案具有相似的功能组成,由1个核心舱和3个展开舱体(工作舱、生活舱、生物舱)组成。核心舱由气闸舱和垂直交通舱组成,并集成放置建筑声、光、热、电控制系统及满足生保要求的水、氧气循环设备,并为3个展开舱体提供垂直转运通道;展开舱体成竖向叠合布置,其中生物舱具有更高的采光需求,布置在建筑中靠近月表的负一层,工作舱及生活舱具有更好的室内温度需求及抗撞击能力,布置在建筑中热环境更为稳定的负二层。红五星部分为建筑的保护罩,能够为建筑室内入口及月表设备提供保护,同时红五星表面铺设光伏膜,为建筑供给能源。

3) 建造过程

首先将带有在地预制的核心舱体及其舱内设备的运载器在月坑附近合适的区域着陆,然后运至拟建月坑选址地点。然后将在地预制的类气凝胶复合功能膜通过释放压缩空气实现竖直方向展开,分别形成工作舱、生活舱、生物舱3个功能舱体。完成自展开过程

后,利用处于月表的挖土机器人、夯实月壤机器人等智能设备收集月壤,并将月壤回填至月坑之中,将核心舱体及展开舱体部分掩埋,并在回填坑表面铺设月壤袋。最后,利用微重力3D打印技术建造保护罩。建筑建造的关键步骤如图7所示。建筑的平面图和剖面图如图8所示。

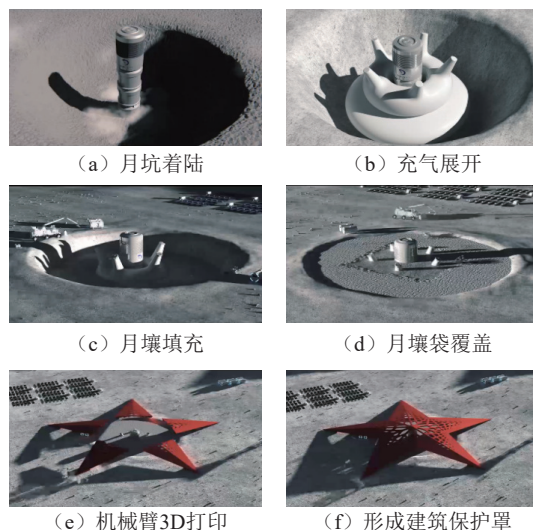


图7 “中国星”方案建造过程
Fig. 7 “Red Star” construction process

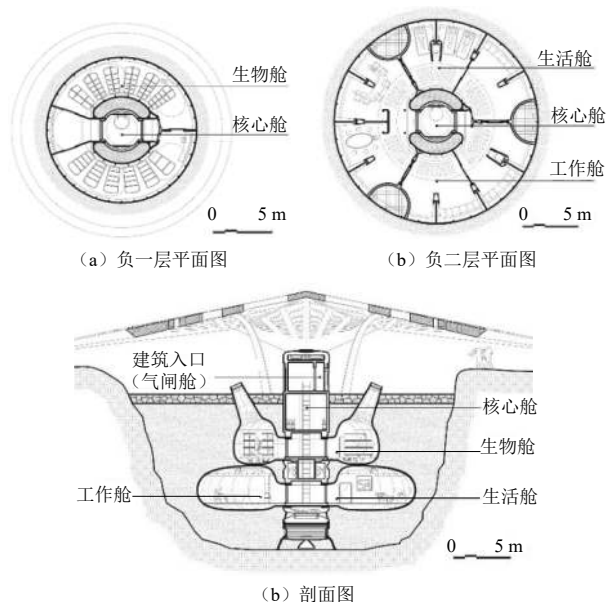
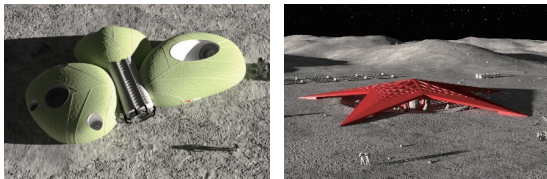


图8 “中国星”方案技术图
Fig. 8 Layout of “Red Star”

3.3 方案对比

“三叶草”和“中国星”是针对相同任务目标,面对不同建造环境所形成的两套独立方案,如图9所示,具有一定的相似性和差异性。



(a) “三叶草”方案

(b) “中国星”方案

图9 中国未来月球基地建设方案构想

Fig. 9 Building plans for future China lunar base

相似性主要表现在: 任务目标相似, 即满足3~4名航天员短期在月工作和生活需求; 功能组成相似, 即由联通舱和气闸舱构成的核心舱, 及生活舱、工作舱、生物舱组成; 建造方式相似, 即核心舱在地预制, 展开舱体在月建造。

差异性主要表现在: 建造环境不同, “三叶草”方案针对月表环境, 更具普遍性, “中国星”方案针对月坑和爆破坑环境, 更具特殊性; 对外部不利环境要素的应对方式不同, “三叶草”方案通过建造复合表皮的方式实现对外部不利环境要素的阻隔, “中国星”方案通过利用天然月坑或爆破坑的掩蔽优势, 以填埋月壤的方式, 实现对外部不利环境要素的阻隔; 空间组织方式不同, “三叶草”方案采用水平展开, 由核心舱同层联通各功能舱体, “中国星”方案采用垂直展开, 形成月面层、负一层、负二层的多层空间, 通过核心舱中的竖向运输设备联通各功能舱体。

4 主要关键技术

实现月球建筑是一项复杂且庞大的工程, 方案的实施建造过程涉及一系列关键技术。除精准着陆控制、月基通信、智能机器人等月球基地建设所需航天器工程技术外, 从月球建筑建设方面初步分析, 至少需预先突破如下建造关键技术。

1) 建筑复合表皮技术

建筑复合表皮是将多层次、多功能、多材质的建筑表皮整合成为彼此互补、构造有序的建筑表皮系统性技术。针对本文月球建筑方案, 建筑表皮整体具备高阻热、利蓄能、抗撞击、防辐射、可产能的功能, 综合实现抵挡月表严酷环境、提供稳定室内环境的作用。

2) 预制结构展开技术

预制结构展开技术可通过一定的触发机制控制建筑结构的形变, 使预制结构进行可控展开。针对本文月球建筑方案, 可采用充气展开、机械展开、聚合物展开、记忆金属展开等具有代表性的展开方式。由于整体结构需要满足折叠和运载火箭发射的要求, 并能在无人或人机协作条件下在月展开, 因此预制结构展

开技术应满足折叠性、轻质性、稳定性、容错性、可测性、可控性的需求。

3) 月壤利用技术

月壤是月表广泛存在的物质, 是一种具有重要加工价值的原位建筑材料。NASA喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的研究表明以月壤作为月球建筑的防护层可极大地减少昼夜温差对建筑结构产生的循环应力和辐射造成的材料性能损伤和老化^[22]。针对本文月球建筑方案, 月壤利用技术主要体现在两个方面: 其一为月壤袋灌装砌筑技术, 指通过在地预制的月壤袋有效固化松散月壤, 可利用机器人实现月壤采集、月壤袋灌装、月壤砖铺设的一体化操作; 其二为月壤3D打印技术, 指采用月壤水泥基材料进行3D打印, 实现原位建造。

4) 智能化无人建造装备技术

月表条件严酷, 应尽可能减少航天员的直接建造。智能化无人建造装备技术是实现月球建筑无人建造的关键, 具有降低人员安全风险、提升建筑建造效率、提高建筑建造精度等多重优势^[23]。针对本文月球建筑方案, 智能化无人建造装备主要是包含在轨人机混合遥操作、微重力下建造机械控制、施工安全监控、误差监测以及建筑设备无人安装等技术, 例如, 智能化挖土、物质搬运、夯实月壤机器人等等。这些智能化无人装备是保障月球建筑建造的基础。

5) 建筑内部环境控制技术

保障在月航天员的生命安全是月球建筑的重要任务, 其内部环境控制技术是实现这一任务的关键。内部环境控制技术由多个子技术系统构成, 包含供气调压、气体成分控制、温湿度调控、通风净化、火灾防控、水管理、废物管理等^[3]。针对本文月球建筑方案, 建筑内部环境控制技术应在地面预先突破, 并高度集成在核心舱体内, 实现集中管理和统一控制。在完成展开舱体搭建后, 连接展开舱体内的功能设备和核心舱内的环境控制核心模块, 形成整体系统。

6) 再生式生保技术

为在月航天员提供再生式物资补给是实现较长期持续的在月生存的关键。再生式生保技术, 由早期开环式生保逐渐发展为闭环式生保系统, 实现碳、氢、氧的有机循环, 形成可持续的生命物质补给^[24]。针对本文月球建筑方案, 再生式生保技术应在地面预先取得突破, 并将其设备转运安置在生物舱体内, 由生物舱体作为生保系统主体, 生物舱体中的植物、动物、微生物与建筑中的人员构成密闭生物受控生保系统, 从而形成可再生链环。

值得指出的是,建设月球建筑是一项长期复杂的工程,除此之外,在建筑、结构、材料、建造、能源、生保等方面仍需开展多项关键技术研究,这些主要关键技术的预先突破是保障月球建筑建设顺利实施的前提条件。

5 结 论

本文依据月球基地建设的不同发展阶段,创新性提出了“三叶草”和“中国星”两套中国未来月球基地建设方案构想,并分析给出了设计方案工程实施需预先突破的主要关键技术,旨在为中国未来月球基地的建设方案选型提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 于登云,葛之江,王乃东,等.月球基地结构形式设想[J].*宇航学报*, 2012, 33(12): 1840-1845.
YU D Y, GE Z J, WANG N D, et al. Supposal for structure form of lunar base[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(12): 1840-1845.
- [3] 果琳丽,王平,朱思涌,等.载人月球基地工程[M].北京:中国宇航出版社,2013.
GUO L L, WANG P, ZHU S Y, et al. Engineering for manned lunar base[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013.
- [4] CRAWFORD I. Why we should build a Moon village[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2017, 58: 18-21.
- [5] 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: 2577-2586.
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and International lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65: 2577-2586.
- [6] HANSEN J R. Spaceflight revolution: NASA Langley Research Center from Sputnik to Apollo[M]. Washington DC: Natl Aeronautics & Space Admin, 1995.
- [7] LOWMAN P D. Lunar bases: a post-Apollo evaluation[M]//MENDELL W W. Lunar bases and space activities of the 21 century. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1985.
- [8] SIDDIQI A A. Challenge to Apollo: the Soviet Union and the space race, 1945—1974[M]. Washington DC: NASA, 2000.
- [9] COHEN M M. Mobile lunar base concepts[M]//EI-GENK M S, BRAGG M J. Space technology and applications international forum—STAIF 2004. Albuquerque: American Inst. of Physics, 2004.
- [10] HAEUPLIK-MEUSBURGER S, OZDEMIR K. Deployable lunar habitation design[M]//BADESCU V. Moon: prospective energy and material resources. New York: Springer, 2012.
- [11] CESARETTI G, DINI E, DEKESTELIER X, et al. Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronaut*, 2014, 93: 430-450.
- [12] VONEHRENFRIED M D. The Artemis lunar program: returning people to the Moon[M]. Chichester: Springer, 2020.
- [13] INOCENTE D, KOOP C, PETROV G I, et al. Master planning and space architecture for a Moon village[C]//Proceedings of 70th International Astronautical Congress. Washington DC: [s. n.], 2019.
- [14] National Research and Development Agency of Japan. The JAXA Space Exploration Innovation Hub Center co-produces results on remote and automatic control to build lunar base[EB/OL]. (2019-03-28) [2021-06-15]. <https://global.jaxa.jp/press/2019/03/20190328a.html>.
- [15] ICON Team. ICON receives funding from NASA and launches “Project Olympus” to reach for the stars with off-world construction system for the Moon[EB/OL]. (2020-10-01) [2021-05-21]. <https://www.iconbuild.com/updates/icon-receives-funding-from-nasa-and-launches-project-olympus>.
- [16] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005.
OUYANG Z Y. Introduction of lunar science[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005.
- [17] 肖龙,黄俊,赵佳伟,等.月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J].*中国科学*, 2018, 48(11): 87-100.
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *Science China*, 2018, 48(11): 87-100.
- [18] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. *Icarus*, 2017, 282: 47-55.
- [19] 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, 27(5): 498-503.
OUYANG Z Y, ZOU Y L, LI C L, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources[J]. *Earth Science*, 2002, 27(5): 498-503.
- [20] 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.
- [21] 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: 95-98.
ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19: 95-98.
- [22] BENAROYA H. Building habitats on the Moon[M]. Chichester: Springer, 2018.
- [23] CHENG Z, RUI C, JIE X, et al. In-situ construction method for lunar habitation: Chinese super mason[J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 66-79.
- [24] LIU H, YU C Y, MANUKOVSKY N S, et al. A conceptual configuration of the lunar base bio regenerative life support system including soil-like substrate for growing plants[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(6): 1080-1088.

作者简介:

梅洪元(1958—),男,院士,博士生导师,主要研究方向:寒地建筑、超极寒环境建筑。

通讯地址:哈尔滨市南岗区黄河路73号,哈工大建筑设计研究院(150090)

电话:(0451)86289306

E-mail: meihongyuan@hit.edu.cn

于登云(1961-), 男, 院士, 博士生导师, 中国航天科技集团有限公司科技委副主任, 中国探月工程副总设计师, 主要研究方向: 航天器系

统工程、动力学与控制技术。本文通讯作者。

通讯地址: 北京市海淀区阜成路16号航天科技大厦(100048)

E-mail: yudyun@sina.com

Research on Building Plans Design for Future China Lunar Base

MEI Hongyuan¹, BAO Weimin², YU Dengyun², LIU Pengyue¹, WANG Youshan³, PAN Wente¹,
CHEN Yu¹, LI Jiayang¹, GAO Yiting¹, FEI Teng¹

(1. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Science and Technology Commission of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

3. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In this article, the general principles of lunar building, including demand-orientation, intensive planning module extension, in-situ utilization, and Earth-Moon combination were discussed. Based on the two different construction environments of the moon surface and the moon pit, the “Clover” and the “Red Star” lunar building schemes were systematically proposed, and main key construction technologies needed to be broken through in advance were provided.

Keywords: lunar base; lunar building; key technology; design scheme

Highlights:

- This paper systematically sorts out the development of lunar building.
- We analyze the influence factors of lunar building and proposes design principles.
- Based on two types of construction environment: the Moon surface and the Moon pit, two sets of lunar building plans were proposed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]