

文章编号:1672-3961(2024)02-0114-12

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.305

# 月球基地的建设远景与挑战

蒋明镜<sup>1,2,3,4</sup>, 王思远<sup>4</sup>, 姜朋明<sup>1</sup>, 华亦雄<sup>5</sup>, 石安宁<sup>4</sup>, 杨越群<sup>1</sup>, 薛桥斌<sup>1</sup>, 戴婉婷<sup>5</sup>, 仇淞<sup>5</sup>

(1.苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2.同济大学土木工程减灾国家重点实验室, 上海 200092; 3.同济大学土木工程学院岩土工程系, 上海 200092; 4.天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300350; 5.苏州科技大学建筑与城市规划学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:**基于对月球资源和环境条件的调研及国内外月球基地建设方案的相关研究与发展现状,综合考虑月球纬度、复杂地形地貌以及月壤/月岩矿物等原位资源利用因素,以传统土木工程为框架,结合当下物联网、大数据、人工智能等研究方法,提出以月表、月海、月岩等地貌特征与不同阶段下月球开发探索的研究目标相结合,分阶段构建“月表之上”“月海之中”“月岩之下”的月球综合体建造基地的设想。对不同阶段的基地建设选址、设计方案、结构特征以及智慧基地的建设要点进行分析,总结面对复杂月面地貌特征条件下构建月球基地综合体所面临的技术挑战和关键科学问题,为未来建设高级月球基地及功能分区部署提供参考。

**关键词:**月球基地;月海;熔岩管道;建设步骤;选址约束;基地综合体

中图分类号:P184.5

文献标志码:A

引用格式:蒋明镜,王思远,姜朋明,等.月球基地的建设远景与挑战[J].山东大学学报(工学版),2024,54(2):114-125.

JIANG Mingjing, WANG Siyuan, JIANG Pengming, et al. The long-range perspective and challenges for the construction of lunar base [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2):114-125.

## The long-range perspective and challenges for the construction of lunar base

JIANG Mingjing<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Siyuan<sup>4</sup>, JIANG Pengming<sup>1</sup>, HUA Yixiong<sup>5</sup>, SHI Anning<sup>4</sup>, YANG Yuequn<sup>1</sup>, XUE Qiaobin<sup>1</sup>, DAI Wanting<sup>5</sup>, QIU Song<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 5. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

**Abstract:** Drawing upon an examination of lunar resource conditions, environmental factors, and both domestic and international research on lunar base construction plans, this paper integrates considerations of latitude, intricate terrain, and geomorphology with in-situ resource utilization, such as lunar regolith and rock minerals. And then, the study combines traditional geotechnical engineering with core technologies, including the Internet of Things (IoT), contemporary communication, big data, and artificial intelligence (AI). It proposes constructing a lunar bases on the geomorphological features of the lunar surface, maria, and lunar rock. In addition, this study analyzes the site selection, design framework, structural features, and construction considerations at various stages of the intelligent base, summarizing key scientific challenges faced during the lunar base complex's development. The analysis offers guidance for future human-advanced lunar base construction and functional zone deployment.

**Keywords:** lunar based; lunar maria; lava tubes; construction steps; location constraints; base complex

收稿日期:2023-11-30

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(42221002);土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金(SLDRCE19-A-06)

第一作者简介:蒋明镜(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为宏微观土力学、太空土力学与工程科研。

E-mail:mingjing.jiang@usts.edu.cn



蒋明镜,教授,国家百千万人才,获“国家中青年特殊贡献专家”称号,国家自然科学基金杰出青年基金获得者。国家自然科学基金工材部咨询委员会专家、水利学科会评专家、国家自然科学基金会评专家。1996年获南京水利科学研究院工学博士学位。1998年任日本大阪土质试验研究所特别研究员,1998—2000年任日本京都大学特别研究员,2000—2003年在加拿大Laval大学从事博士后研究,2003—2004年在英国Manchester大学从事博士后研究,2004—2006年在英国Nottingham大学从事博士后研究。日本JSPS高级研究员,欧盟资助英国牛津大学、爱丁堡大学、华威大学和西班牙加泰罗尼亚理工大学高级访问学者。2006年起任同济大学教授,2018—2021年入选天津大学特聘教授、副院长,2021年入选苏州科技大学特聘教授。2010年起出任国际土力学与岩土工程协会TC105副主席。第二十二届黄文熙讲座人,2019—2022年四次入选Elsevier公布的中国高被引用作者,2019—2022年四次入选美国斯坦福大学公布的全球前2%杰出科学家,2021—2022年入选全球学者库网站公布的全球顶尖10万科学家。发表学术论文644篇,其中ESI高被引论文3篇,SCI收录期刊论文195篇,EI期刊论文343篇,SCI总引5 000多次,ResearchGate总引7 000多次,H指数47,授权专利7项,软件著作权40多项。获国际Scott Sloan优秀论文奖一项。

## 0 引言

月球作为距离地球最近的星体,可视为未来人类探索太空环境的重要起点。中西方文化中均存在有关月球的神话内容,例如希腊神话中的月神阿尔忒弥斯以及我国汉初《淮南子》中提及“嫦娥奔月”的神话故事。人类共实施近120次月球探测任务<sup>[1]</sup>,对月球环境、资源分布、地质地貌等均有了初步认识。在全球不可再生资源供需矛盾日益凸显的前提下,太空移民成为避免地球资源局限性的有效途径之一。月球基地的建立,不仅是人类对太空环境认知、适应、开发和利用的有效起点,也是对月球环境的深入探测和月球资源开发利用的有效途径。

在“先到先得”国际规则下,美国航空航天局(the National Aeronautics and Space Administration, NASA)将月球资源原位利用列为12项关键技术之一。俄罗斯航天局拟开展月球内部地质构造及资源原位利用等研究。日本航空机构提出月亮女神计划;欧洲航天局公布了建造“月球村”的太空计划。美国推出“阿尔忒弥斯(Artemis)”计划,宣布将重返月球并建立月球基地。开展月球资源勘查和利用及月球科研站选址和建设已成为我国探月领域刻不容缓的任务。2020年,我国“嫦娥五号”探测器实现了中国首次地外天体采样返回,将1 731 g月球样品成功带回地球,“绕、落、回”三步走战略圆满完成;2021年,我国与俄罗斯共同签订和发布了《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》;同年,国务院发布了《2021中

国的航天》白皮书,指出未来5 a中国将继续实施月球探测工程,同时计划在2035年前建成国际月球科研站的基本型;2022年11月16日,美国成功发射了阿尔忒弥斯1号无人绕月飞船;2023年6月,印度“月船3号”成功在月球南极登陆。此外,世界各航天强国公认太空制造技术是人类提高地外活动能力、开展深空探索任务的战略性关键技术之一。随着我国空间站天宫一号的顺利升空,太空制造技术已经不是远景目标,已具有较强的现实意义。太空制造技术将为我国空间站在轨应急维修保障、大型空间载荷在轨部署以及空间快速响应等任务需求提供新思路,为太空经济发展带来新机遇<sup>[2-4]</sup>,同时也为由于重力存在而影响生产效率的商品制备提供了特殊条件<sup>[5-7]</sup>。

月球基地是各国探索月球空间环境、开发利用月球资源的必要设施,也是我国开始全面启动探月工程四期任务中的重要内容之一。为满足在月球上中长期驻留以及后期月球移民的目标,世界各国研究人员关于月球基地建筑构想呈现井喷式发展。此外,物联网、大数据、人工智能等众多领域的升级也为基地建设工程向智能化转型提供了基础。在地球环境下,土木工程施工前有“三通一平”的基本要求,而如何有效结合月球环境(高温差、低重力、高真空度等)和月球复杂地形地貌构建月球基地满足未来月球建设开发的需求也是未来月球资源利用的核心目标。基于此,本研究依据月表、月海、月岩环境下的地质地貌特点,结合智能岩土工程的理念与太空制造技术提出了构建月球基地综合体“三步走”的建筑方案。希与同行们共同讨论,以推进我国月球基地的智慧建设。

## 1 月球环境

在月球基地的建设和运营过程中,月球环境对其产生重大影响,主要包括重力、温度、大气、辐射、月球尘埃以及月震,这些作为首要因素考虑在月球居住区建筑设备设计、可靠性及使用等方面。

### 1.1 重力

重力加速度是一个必须认真考虑的关键参数。月球的表面重力仅为地球的1/6。如果按照在地球上运行的要求设计驱动装置,那么地球标准动力机械装置将会导致机械超调,从而导致设备故障或损坏<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 温度

月球大气层缺失导致月球表面昼夜温差巨大,白天最高温度接近400 K,阴影区温度接近90 K。为了抵御月球上的极端温度,需要一层压实的月球风化层覆盖整个结构。根据月球环境的具体要求和建造因素,建筑物外月壤风化层覆盖厚度在1~4 m<sup>[10]</sup>。夜间太阳能电池无法工作,月球不同区域的温差使设备的设计、使用和维护变得相当困难,航空材料对温度的适应性尤为重要。NASA在月球Mare Tranquilitatis(宁静之海)地区发现恒温熔岩管道溶洞,其恒温特性考虑用以建立月岩地下大型人类聚集区。

### 1.3 大气密度

近月空间环境和月球表面环境中的大气密度仅为地球上的1/1 012<sup>[11]</sup>。月球居住区必须保持一定的内部空气压力支持生命系统。此外,热对流和大气传导的散热模式在月球表面不可用,而月球通过辐射散热的散热效率远低于大气传导。此外,由于月球大气层的薄弱,微陨石轰击也会进一步影响月球基地结构的安全。这些因素增大了月球站的结构设计和相关材料选择的难度。

### 1.4 太阳风

月球辐射环境主要由太阳风、太阳宇宙线和太

阳系外的高能银河系宇宙线3种带电粒子源组成。因此在月球基地设计过程中,需要考虑设计承受高浓度电辐射的影响。

### 1.5 月球尘埃

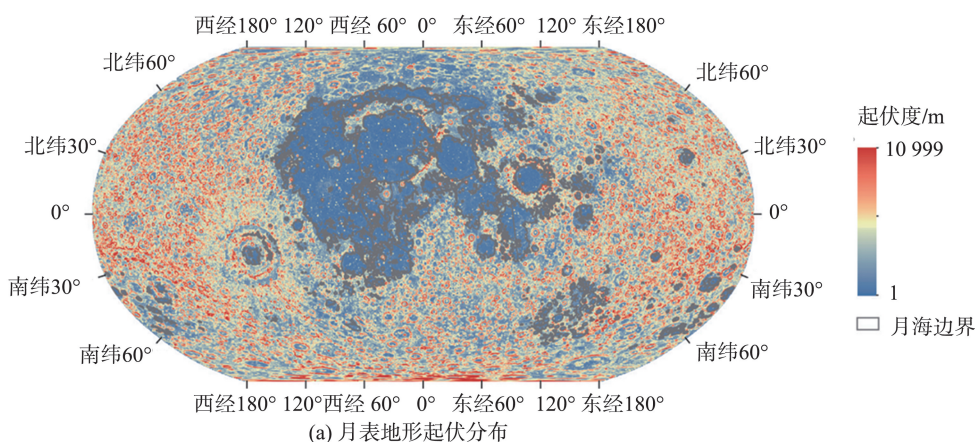
该物质带有静电荷并具有很强的附着力,该特性使得它携带的静电荷可以粘附在不接地的导电表面上。

### 1.6 月震

月球每年大约发生600~3 000次月震,这些月震的强度不仅足以震动居住区,而且足以使月球上的坚硬岩层持续震动几分钟。该现象增加了月球居住结构设计时抗震设计难度。

## 2 月球地貌特点及资源分布

与地球不同,地球地貌特征仍在演化过程中,地幔对流和海底扩张通过火山活动、隆起、断层和俯冲等地质作用发挥着重要作用,但月球上不存在此类情况,月球表面相当稳定,其地貌区域大致可分为月球高地和月海。文献[12]参考地球地貌类型的地形起伏分类标准,以起伏度 $S$ 为阈值对月表地形地貌特征进行评价,如图1(a)所示。结果表明:月微起伏平原( $S < 100$  m)大多分布于海平原及撞击盆地底部;微起伏台地( $100$  m  $< S < 200$  m)主要分布于月海和月表区域的交界区域;微小起伏丘陵( $200$  m  $< S < 300$  m)主要分布于月溪和皱脊等构造单元区域;小起伏山地( $300$  m  $< S < 700$  m)主要分布于撞击坑中央峰及坑底断裂区域;中起伏山地( $700$  m  $< S < 1 500$  m)、大起伏和极大起伏山地( $1 500$  m  $< S$ )等地貌主要分布于撞击坑坑底和坑壁过渡区域、撞击坑坑壁和坑缘过渡区域、撞击盆地盆底与盆壁过渡区域以及盆壁与盆缘过渡区域。此外,图1(b)Malapert Massif 候选着陆区全景图也从侧面表明了月面地形地貌的复杂分布。





料供给基地建设使用。相较于月海区域,月球高地岩石的形成更为古老。高地岩石主要是斜长岩、橄榄辉石岩、斑岩等,含有丰富的铝、钙、镁、硅等元素。此外,已探明高地岩石中也存在橄榄石、单斜辉石和其他矿物<sup>[26]</sup>。这些岩石具有较高的硬度和强度,除了适合用于建筑和基础设施建设外,研究人员也一直积极探索如何利用月球原位资源制备玄武岩纤维用于月球基地的建设,以承受建筑的重量并保护其免受微陨石的伤害。

已有研究表明,对天然玄武岩采用高温熔融拉丝处理制成无机非晶态玄武岩纤维,具有强度高、化学性质稳定、耐辐射、抗紫外线、耐高低温以及价格低廉等优点<sup>[27]</sup>。利用月壤制备的玄武岩纤维除了具备良好的力学特性外,还具有阻挡辐射、隔热和过滤等特殊性能。仿照在纺织服装产业中3D打印技术应用,可将月壤基纤维添加入壤基材料中打印结构构件,也可直接利用月壤基纤维打印壤工材料,包括壤工格栅、壤工布、壤工袋等<sup>[28]</sup>。因此,月壤基纤维材料无疑为人类月球基地建设打开了新思路。

月壤的低导热系数使其具有良好的隔热与温度的保持效应。在此基础上,可以推测月表一定深度下存在恒温层,为人类生存提供适宜的温度环境。如图5所示,目前在月球上已发现了300多个恒温熔岩管洞穴入口<sup>[29-30]</sup>。

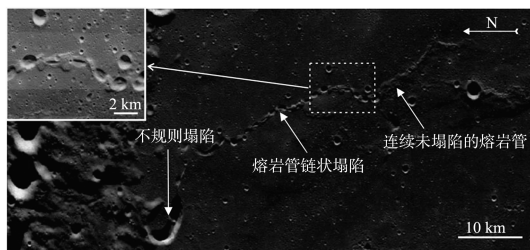


图5 月面熔岩管道链状分布形貌特征

Fig.5 Distribution of a lava tube on the lunar surface

熔岩管空间巨大<sup>[31]</sup>,月球熔岩管的宽度预计可达1~2 km<sup>[32]</sup>,长度可达数十至数百公里;月球熔岩管是火山爆发时由流动的熔岩形成的特殊地下洞穴,其顶部由玄武岩构成,可以避免辐射、高温差以及陨石撞击等问题。因此,构建月球基地、地下轨道交通、原位热能储存以及月球生命体存储等建筑设施时应充分考虑熔岩管道的优势。

综上所述,月球地形地貌分布方式复杂,且不同地貌特征资源分布不同。在月球基地的构建过程中如何有效结合月球的地貌特征是一大挑战。此外,由于地月环境的差异,地球的建设经验能否完整照搬用以月球基地建设仍是急待解决的问题。

### 3 月球居住区的研究现状

月球基地的建设对人类长期开发利用月球资源以及进一步探索深空具有十分重大的意义。太空基地方案首次在20世纪60年代提出,此后世界上许多国家和机构针对月球建筑展开了相应的研究,在设计和技术上得到不断发展和完善<sup>[33-35]</sup>。月球基地的设计建造需要考虑的因素包括安全、宜居、可扩展以及经济合理等。月球基地建筑形式如图6所示,当前阶段各国研究比较成熟的基地建造类型有刚性舱组装式<sup>[36]</sup>、柔性舱组装式<sup>[37]</sup>、月面建筑式<sup>[38]</sup>以及地穴构建式<sup>[39]</sup>。

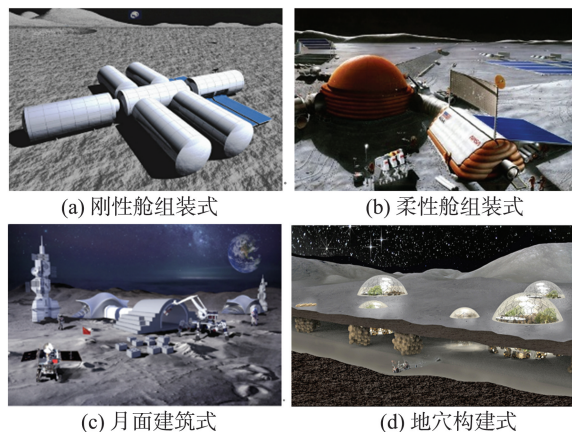


图6 月球基地建筑形式

Fig.6 Architectural form of lunar base

#### 3.1 刚性舱组装式

刚性舱组装式月球基地的构建一般采用金属材料,如图6(a)所示。其功能与性能可类比国际空间站,在设计建造时也采用舱段对接的方式,该类型基地建造所需的相关技术已经比较成熟,适用平坦空旷的月表地面。刚性舱结构具备以下优点:能够防护一定量级的空间射线,抵抗一定程度的外力破坏,使用寿命相对较长,环境适应性优良等。刚性舱式基地适合采用模块化设计,即采用标准化方法,使各构件的接口一致,所需空间尺寸相同,达到同类构件协同应用于多个系统的目的,如散热器、热交换器等部分热力系统构件经过设计可以拆解、翻新和整合到其他结构中。

#### 3.2 柔性舱组装式

针对容积较大、功能要求较多的人员保障型月面基地,若运输中仍然采用刚性舱模块,会导致运载火箭整流罩难以容纳,采用柔性膜充气结构的可行性更高<sup>[40]</sup>。柔性舱大多采用可折叠结构,因此在运输过程中可以通过折叠舱体减小火箭内部空间占用。在抵达月面后,可以通过机械或充气等

方式自动展开,这对月面场地平整度有较高要求。柔性舱可以由柔性材料构建,也可以采用兼具折叠性和强度优势的刚性芯材和柔性外层结合的方式构建,如图6(b)所示。柔性舱体除了运输过程中空间要求较小的优势外,在提供相同容积的条件下,其质量低于刚性舱。但柔性舱体对于材料的要求相对较高,需要满足耐用、柔性、密封性能好、密度低、较高的弹性模量、可控热膨胀系数、易于加工以及经济合理等要求<sup>[41]</sup>。柔性舱在月表、月海均可建造,同时结合月表风化层烧结及3D打印技术构建外保护层,用以抵抗环境温度和宇宙射线的影响。

### 3.3 月面建筑式

月面建筑式月球基地利用月面原位资源进行现场建造,该方法可以针对不同的环境和实际需求采用不同的设计建造形式(见图6(c))。相比于刚性舱、柔性舱,月面建筑式对地貌平整度有较高要求,月面建筑式基地可以依据需求不同在多种地貌进行建造,同时可以按照实际需求结合不同的建造技术利用月球原位资源进行建造,该方法对地球资源依赖小<sup>[42]</sup>。对于月球原位建造方案主要包括3D打印方式和月球原位资源建造式。

#### 3.3.1 3D打印方式

该技术在太空环境中利用月球岩石粉末作为原材料制备建筑材料,为开发原位资源建造月球住所开辟了可能性,但其部分液体原料仍需要从地球运输,采用太阳能熔融月表风化层作为打印的原材料可行性相对较高。此外,3D打印设备还和机器人结合进行建造,可以在降低成本的同时使建筑更为可靠<sup>[43]</sup>。我国中科院空间应用中心在法国波尔多开展抛物线飞行试验,证明了微重力环境下3D打印装备相关的技术与工艺的可行性,实现了多种材料的微重力打印<sup>[44]</sup>。

#### 3.3.2 月球原位资源建造式

文献[38]提出了用于月球基地建造的机器人预制月壤砖原位建造方案,提出通过原位建造制备月砖。针对空间原位制造和空间原位资源利用问题,NASA马歇尔空间飞行中心开展了一系列系统研究,提出月面基地原位建造可以采用高能束原位烧结和挤出成型的方式<sup>[45]</sup>。NASA还设计了一种月壤袋装填系统,具有较好的密实性和成型率,并设计多个月壤袋顶部连接的拱结构,均取得了不错的成型效果<sup>[46]</sup>。由月壤建造的月表建筑不仅节省成本,后期易于维护而且月壤本身也具备良好的保温和防射线性能<sup>[47]</sup>。

### 3.4 地穴构建式

如图6(d)所示,地穴构建式主要是在月球熔岩管道中或者在月表以下进行建造,借助其自然优势能够极大地降低成本、保证建筑物的可靠性,还能够有效降低宇宙射线等的危害<sup>[48]</sup>。此外,人工开挖地下空间也是建造途径之一<sup>[42]</sup>。月球低纬度地区存在的恒温层<sup>[49]</sup>可以进行开发利用,进而建立具有适宜人类生存温度的月球基地。

综上所述,月球基地与传统的月球探测器不同,其类似于小型人类社区,需要满足能源、通信、物资补给、设备维护维修、废弃物资处理、产品离场返回和系统运营等需求。月球基地建设成熟阶段的主要目标是实现模块化繁殖,在复杂地形地貌条件下,仍能通过多个模块化单位的连通组合,建立一个完整的月球移民区。因此,在月球基地建设时,应综合考虑上述基地功能需求,并与月球的地质构造相结合,将航天员开展月面长期驻留、试验等科研活动与在月球广泛存在的月表、月海、月岩地下溶洞等3种地质地貌有效结合,分阶段进行短期、中期、长期月球任务的月球基地建设。

## 4 广寒宫综合体月球基地方案建设远景及若干科学问题

月球基地建设实施前需要对其科学目标、工程目的、基地选址及可拓展性进行统筹分析。其中基地选址是一个系统且复杂的选择过程,需要综合考虑战略目标、研究目的、工程能力约束和资源利用等因素<sup>[3]</sup>。目前研究表明,在月球基地选址过程中,月球极区、赤道区域和月球正面都有优势。月球极区会长时间在太阳辐射下暴露,这意味着可以利用太阳能为月球基地供能<sup>[10]</sup>;而位于月球赤道附近的月海区拥有可用于月球载人基地建设的丰富矿产资源<sup>[11]</sup>。

以月球南极地区为例,月球南极地形地貌特点如图7所示<sup>[50]</sup>。月球南极Aitken盆地作为月表最大、最古老的结构,直径2500 km,深度约13 km,且地质活动遗迹复杂多样,分布丰富的资源,对于研究月球地质特点有重要意义<sup>[50]</sup>。图7(a)标记的拟定着陆点及其周围规划的穿越线跨越了不同年龄、可能不同性质的地质地形,且该区域通信信号强度也易满足实现,如图7(b)所示。但薛定谔盆地的3D地貌图(见图7(c))地形地貌分布复杂,常规的月球基地综合体的建筑构想在此类地质条件下仍有不足。

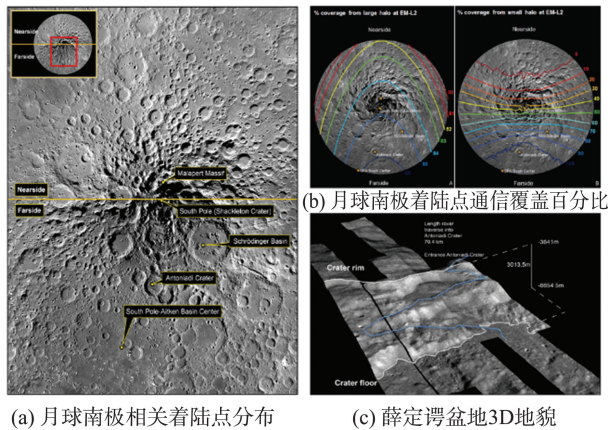


图7 月球南极地形地貌特点

Fig.7 Topography map of the lunar surface in the lunar south polar regions

目前月球居住区设施的研究主要集中在简化且可扩展的结构(如刚性舱与柔性舱结构),以满足初始的月球探索和居住需求。对于结合月球地形地貌特征的月球综合体建造基地的组合探讨较少,相关设计构想仍停留在初级阶段。如何在实现基地模块化繁殖的基础上,同时整合基地多维、多尺度信息模型数据和感知数据,构建三维数字基地空间信息有机综合体,建立月球基地高级阶段的地外移民区仍是急待解决的问题。

在月球复杂地形地貌条件下,能通过多个模块化单位的连通组合,建立一个完整的月球移民区,是月球基地结构设计的目标。本研究拟结合月球南极复杂地形地貌特点,将月球基地主要功能区特性与月表、月海、月岩相结合,提出广寒宫综合体月球基地(后简称为广寒宫基地)的构想。面对月球建造环境,以地球建造技术经验为基础,月球基地构建应遵循以下原则:(1)月球基地应具备人类基本生活功能,如居住、医疗、教育、休闲和运动等;(2)月球基地能够为科研人员提供生产条件,如科研、地质调查、植物种植、能源与食物生产等;(3)月球基地采用单元化模块思想,规划模组网络,建立统一标准用于可拓展式布局,为后期月球建筑集群的衍生做准备;(4)采用月表原位资源利用与地月运输相结合的模式,实现在月就地取材与建造。此外,本研究根据广寒宫基地建设周期、分阶段建设、可拓展性等要求,结合月球基地发展过程,将基地建造划分为3个时期<sup>[51]</sup>。

#### 4.1 初期阶段

已有资料表明,我国当前能够实现月球基地运载火箭的载荷能力分别不小于200 kg(CZ-3B运载火箭)、2000 kg(CZ-5运载火箭)、15000 kg(CZ-9运载火箭)<sup>[39]</sup>。基于此,月球基地前站建设主要可分为无人基地勘察阶段和有人基地建设阶段。在

无人基地勘察阶段,首先,向已定基地选址的意向区域发射月面巡视器,执行勘测任务,面对月球复杂地貌时,考虑预先在地面或绕月中转站提前发射携带足够当量炸药的小型运载火箭,在指定月表区域利用爆炸冲击对月表地貌进行整平;其次,发射携带相关探测仪器、月面工作机器人、能源站及通信站组件的着陆器为后续建设提供基础保障,通过远程操控并构建基本月球基地雏形;再次,发射携带月面居住舱及相应设备的月面着陆器到指定月面选址,完成月面居住舱的部署;最后,实现载人登月。

广寒宫基地前期建设如图8所示。在月表之上建设广寒宫基地前哨站,该阶段主要目标是为研究人员(初定6~50人)和短期(6~12个月)内待在月球上的宇航员提供研究与居住保障。该阶段建设重点是以满足短期生活居住及科研试验为基本准则,使用刚性舱组合式或柔性舱组合式组装完成各单元模块,在初步建立生活区雏形以及解决3D打印设备及后期建筑材料的调试与加工问题后,设置相关功能区分,如:(1)能源区,构建太阳能光伏板及温差发电,为后期月球探测车及相关工程设备充电补充能源;(2)构建建筑材料生产基地,利用月球原位资源生产建筑材料,参照纺织产业的模式,利用月壤玄武岩纤维制备月壤基材料,生产结构构件;(3)月地探测实验室,通过安置月面检测设备开展对天观测、空间环境探测、月面科学探测及月球地质探测,为后期构建月岩之下人类聚集区收集前期资料;(4)对基地周围岩土工程勘察,通过原位测试试验(如十字板剪切、静力触探、动力触探、静载试验、波速测试及其他现场试验等)获取基地工程地质参数(如月岩特性、月球地质构造及不良地质现象类比等),并将其作为数据基础与建筑信息模型化(building information modeling, BIM)与地理信息系统(geographic information system, GIS)相互结合,用于构建三维地质模型,为后面中期基地建设做数据铺垫。

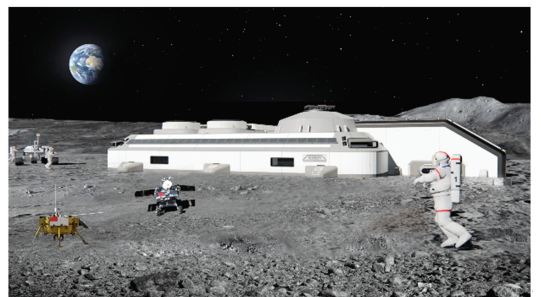


图8 广寒宫基地前期建设示意图

Fig.8 Schematic diagram of the preliminary construction of Guanghan Palace base

本节提及的在广寒宫基地建设初期阶段的技术

实施及科研方案为未来建设月球基地提供了一定参考,但在技术实施过程中仍存在一些挑战:(1)考虑到运载火箭的载荷能力,其所携带月球居住舱的有效空间较少;(2)刚性月面居住舱及柔性月面居住舱对月面地貌的平整度有较高的需求,能否有效降落安置月面居住舱也是较大挑战;(3)如何在月球地质条件下将爆炸物理作用力与弹坑形态建立联系,进而保障月面居住舱的部署;(4)地月通信及远程月面机器人操控技术;(5)月球基地意向选址所处维度不同则对应的所属地质条件、地貌特征的差异,以及昼夜温差的差别对“月表之上”前站月球基地的基地建设及使用寿命带来挑战。

## 4.2 中期阶段

广寒宫基地建设中期阶段的主要目标是进一步与月表、月海、月岩溶洞的月球地貌特征结合,实现完备的功能分区、完善种植区、扩大能源产能以实现能源自给自足,同时开展月球旅游业,为月球旅游的游客提供住宿、游乐等项目,实现一定程度上的商业盈利。

### 4.2.1 月表之上

月表之上基地建设如图9(a)所示,基地相关建设目标有:(1)进一步扩大完善温室种植基地,小型动物饲养基地及生活废物回收利用设施,形成自循环的生态系统;(2)构建月面冰水探测开采试验,补充月表基地用水;(3)建立月面制氧实验室以完成月面获取氧气的自给自足;(4)构建月面稀土矿物提取及储存区,以进行对月面珍稀矿物的储存及返地运输;(5)接收储备载人航天工程货物的泡沫多孔高分子废弃材料,用于基地居住设施建造材料,解决货物包装泡沫高分子材料的回收再利用难题;(6)构建月面生物制药实验室,通过月面生物圈建设搭建合成基因元件库,利用月球表面的太空环境,突破微生物天然产物合成水平低的技术瓶颈,实现太空环境生物制药的商业资源开发。随着月面之上基地初步成型,结合BIM模型及城市信息化模型(city information modeling, CIM)平台的理念,同时结合基于物联网(the internet of things, IoT)的传感器和终端云计算技术<sup>[52]</sup>,实时监测基地参数信息,加快月球基地的数字化建设,为后期智慧基地做铺垫。

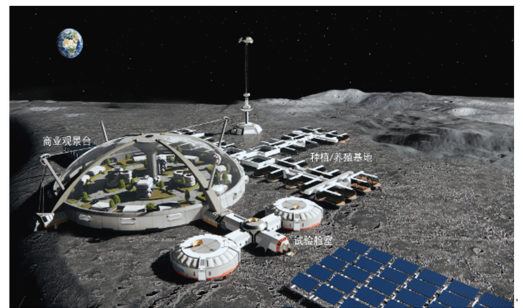
### 4.2.2 月海之中

月海之中基地建设如图9(b)所示,基地在月海地貌中期建造过程中主要负责的职能有月面建造材料的获取与构建,构建运载火箭及飞行器起飞中心用以满足地月间人员、物资往返及前往火星的中继站,月球其他珍贵矿物的开采及储存。此外,由

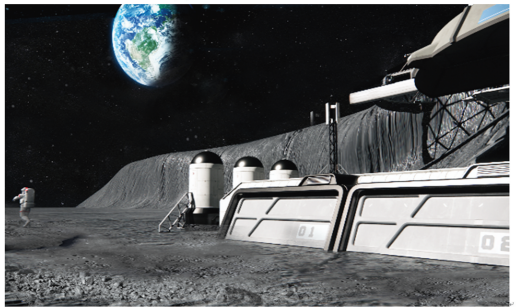
于月球缺少大气层的覆盖,在月球基地的建设需要建造足够厚的防护层消除巨大温差、宇宙辐射、微陨星雨等带来的威胁<sup>[53]</sup>。

### 4.2.3 月岩之下

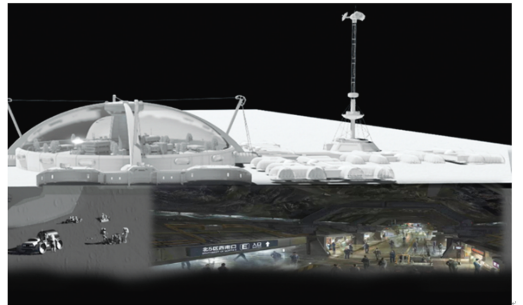
已有研究表明熔岩管道内部的恒温环境能为人类的生活和生产提供有利条件<sup>[54-55]</sup>,因此在熔岩管道内构建永久地下月球人类生活区是一个有效的选择。但天然月球熔岩管道数目少且位置固定,仅依靠熔岩管道进行改造的构建方式无法满足在月球特定位置建设月岩地下基地的需求。因此,在月球地质信息及月面施工工艺相对完善的基地建设中期,可以考虑借鉴小行星监测预警及防御技术<sup>[56]</sup>,在月面指定位置精准定位、轰击穿孔,人为创建月岩之下的施工环境,建设人类生活区工程,为构建月球建设基地后期的大型月球基地综合体做铺垫,月岩之下基地建设见图9(c)。



(a) 月表之上基地建设



(b) 月海之中基地建设



(c) 月岩之下基地建设

图9 广寒宫基地中期建设

Fig.9 Medium term construction of Guanghan Palace base

此外,在进行月岩之下的岩土工程时,需要结合计算机视觉技术、激光雷达技术<sup>[57]</sup>,考虑到地下工程的复杂性,设置无线传感网络监测系统<sup>[58]</sup>用于

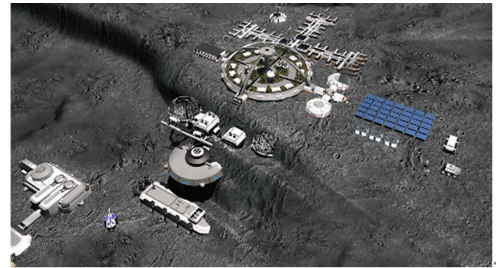
监测高地应力对地下月岩体静态稳定性与动态破碎影响,同时将该数据融合已有的数值软件可开展岩体方面高地应力引起的岩体板裂现象(如塌方、岩爆、板裂等灾害)的数值模拟分析<sup>[59]</sup>。初步建立集地质特点、地下建筑物、地下管线、地下监测预警网络为一体的月岩之下空间开发利用管理平台,为后期高级智慧基地建设打下基础。

广寒宫基地建设中期阶段的技术实施及科研方案为未来建设月球基地指明了一些探索方向,但在实施过程中仍存在一些挑战:(1)当前地月运输系统尚不成熟且运输成本过高,极大限制了月球基地中期阶段建设进程;(2)载人航天工程货物上的废弃物(如用于减少运载火箭飞行过程中振动的泡沫多孔高分子材料)的回收再利用可操作性尚不明确;(3)开采利用月面原位资源时,低钻压力限制下月球硬质矿物的破碎与截割技术研究,以及微重力环境下块状、粉状矿物的收集与封装技术尚不成熟;(4)月球资源转化(例如推进剂、能源、生态环境保护的消耗品)过程机器设备制备及加工工艺的核心技术手段仍是挑战;(5)土木工程施工作业有明显的空间环境依赖性,且在施工过程中,需要足够了解月表环境、月壤、月壤材料宏微观动静力学特性;(6)月面施工与月表地形地貌、月壤原位结构紧密相关。在此基础上,如何考虑人工及地月运输成本、机器人施工建造方案、机械施工技术、地月人机交互及智慧城市的耦合关联,需要多学科领域的交叉合作研制。

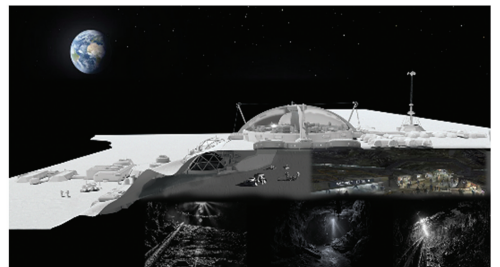
### 4.3 高级阶段

广寒宫基地综合体如图10所示。广寒宫基地单元模块化建设完成后,实现模块化繁殖复制是人类月球基地成熟的标志。在建设发展过程中,难免要面对基地发展过程中日益突出的人地矛盾,提高土地的利用效率和保障城市的可持续发展,也是基地建设发展的重点。月球基地实现模块化繁殖,即通过多个模块化单元的连通组合,建立一个完整的月球移民区,需要考虑的是:(1)月球基地模块化设计时需要考虑结构组装的灵活性和功能的可扩展性,各个功能区可以通过连通的通道或连接通道相互连接,形成一个整体基地架构;(2)成熟阶段的月球基地需要建设完善的公共设施,包括医疗中心、教育设施、休闲娱乐区、商业中心、运动设施等,以提供良好的生活条件和满足居民的各种需求;(3)为了实现长期定居的需求,月球基地需要完全实现设施和消耗品的自给自足,这可以通过增加种植区的规模、发展生态系统循环利用技

术、利用月球自然资源等方式实现。



(a) 俯视图



(b) 剖面图

图10 广寒宫基地综合体

Fig.10 Aerial View of the Guanghan Palace base

在满足上述基地建设要求的同时,结合CIM的概念,构建数字化城市建设平台,利用数字化技术解决城市空间在规划、建设、管理及运维的相关问题是未来宜居城市的必然选择。在岩土领域将BIM、GIS、IoT等技术与虚拟现实(visual reality, VR)、增强现实(argument reality, AR)技术相结合能够有效提高月球基地的精细化管理水平<sup>[53,60]</sup>,这也是将月球基地打造成未来星际移民宜居城市示范社区的必要基础。未来宜居城市的发展规律必然是虚实结合的城市,数值城市的建立将极大改善现有城市资源分配模式及利用效率,而实现这一愿景的基础是智慧基础设施的建立。月球中预估的氦-3矿物的储备也为未来打造月球基地的绿色共生愿景提供足够清洁能源支撑。此外,在基地建设中要加强我国传统文化参与度,在未来打造城绿融合的生态网络时,将传统文化、地方特色与基地的生态网络相结合,构建城市生态网络血脉的同时融入我国传统文化因子,激发基地多元活力,传承特色文化。

本研究提出的广寒宫基地单元体,依据月球复杂地形地貌进行设计,使得月球基地在满足不同地形地貌条件下,且能够提供较好公共设施保障。此外,在基地建设过程中构建全覆盖、全要素、全尺度及强关联的三维空间数据底板,为构建数字化城市建设平台储备相关数据,实现即时分析、实时展现的宏观大场景加微观小场景的三维动态实景可视化展示。

## 5 结束语

未来月面基地的建设是继我国载人航天工程、

导航系统工程、探月工程后又一项国家战略工程,就其规模、投入及其意义而言,无疑是人类史上又一壮举。本研究围绕建设适宜人类长期居住的综合型月球基地,提出结合月球地形地貌特征选取基地位置以及建造形式,并提出相应的建设构想。

(1)在月球基地前哨站建设构想中,考虑结合月表地形地貌特征,构建月表之上月球基地初期建设,同时可开展月球原位建筑材料、月球地探勘测、月球生命体储存、月球原位能源储层等前瞻性研究;

(2)在月球基地中期建设构想中,考虑结合月球地下恒温环境及月海地貌特征,构建月海之中与月岩之下的基地中期建设,完善种植区、扩大能源产能以实现能源自给自足,同时基于 IoT 的传感器和终端云计算技术结合 BIM 及 CIM 的理念,提出智慧月球基地的构想;

(3)在月球基地单元模块化建设完成后,可以通过结合月球地下恒温环境实现模块化繁殖,融合岩土工程智慧城市建设,实现月球基地高级综合体的规划、设计、施工、运维全过程。

本研究月球基地的建设愿景构想及相关功能的设计为未来开发月球资源及打造月球移民社区提供了参考,但具体实施仍面临较多的挑战。其关键科学技术挑战主要归纳如下:(1)在广寒宫基地建设初期阶段主要面临早期月球居住舱的有效空间较少,月球基地意向选址面临月表地质条件、地貌特征、昼夜温差的挑战;(2)在中期阶段则需要解决地月运输系统尚不成熟且运输成本过高以及如何对月面原位资源开采利用和土木工程施工有明显的空间环境依赖性问题;(3)在高级阶段要考虑如何结合智慧城市的概念,利用数字化技术解决月球基地的空间规划、建设、管理及运维的相关问题。

#### 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 Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.

[2] 张颖一,张伟,王功. 太空增材制造的技术需求和应用模式探索[J]. 中国材料进展, 2017,36: 503-511.  
ZHANG Yingyi, ZHANG Wei, WANG Gong. Discussion on the technical demands and application modes of additive manufacturing in space[J]. Materials China, 2017, 36: 503-511.

[3] 田小勇,李尘,卢秉恒. 空间 3D 打印技术现状与前景[J]. 载人航天, 2016, 4: 471-476.  
TIAN Xiaoyong, LI Chen, LU Bingheng. Status and prospect of 3D printing technology in space[J]. Manned

Spaceflight, 2016, 4: 471-476.

[4] 梁静静,杨彦红,金涛,等. 金属材料空间 3D 打印技术研究现状[J]. 载人航天, 2017, 23: 663-669.  
LIANG Jingjing, YANG Yanhong, JIN Tao, et al. Research status of 3D printing technology for metals in space[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23: 663-669.

[5] 王功,刘亦飞,程天锦,等. 空间增材制造技术的应用[J]. 空间科学学报, 2016, 36: 571-576.  
WANG Gong, LIU Yifei, CHENG Tianjin, et al. Application of additive manufacturing technology for space[J]. Chinese Journal of Space Science, 2016, 36: 571-576.

[6] 黄秋实,李良琦,高彬彬. 国外金属零部件增材制造技术发展概述[J]. 国防制造技术, 2012, 10: 26-29.  
HUANG Qiushi, LI Liangqi, GAO Binbin. Overview of the development of additive manufacturing technology for foreign metal parts [J]. Defense Manufacturing Technology, 2012, 10: 26-29.

[7] 孙红俊,蒋宇平. NASA 在国际空间站试验零重力环境下的 3D 打印技术[J]. 军民两用技术与产品, 2013,11: 58-60.  
SUN Hongjun, JIANG Yuping. NASA 3D printing technology in the zero gravity environment of the International Space Station experiment [J]. Dual Use Technologies & Products, 2013, 11: 58-60.

[8] YE Peijian, XIAO Fugen. Issues about lunar environment in lunar exploration project [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1): 1-11.

[9] MOROTA T, HARUYAMA J, HONDA C, et al. Mare volcanism in the lunar farside moscoviense region: implication for lateral variation in magma production of the moon [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(21): 1-5.

[10] JOLLY S D, HAPPEL J, STURE S. Design and construction of shielded lunar outpost [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1994, 7(4): 417-434.

[11] KONDYURINA I, KONDYURIN A, LAUKE B, et al. Polymerisation of composite materials in space environment for development of a moon base [J]. Advances in Space Research, 2006, 37(1): 109-115.

[12] 邓佳音,程维明,刘樯漪,等. 月表地貌起伏形态分异特征及分级标准研究 [J]. 地理学报, 2022, 77 (7): 1794-1807.  
DENG Jiayin, CHENG Weiming, LIU Qiangyi, et al. Morphological differentiation characteristics and classification criteria of lunar surface relief amplitude [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1794-1807.

[13] ZHANG H, ZHANG X, ZHANG G, et al. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, 65: 1-8.

[14] GRANT H, HEIKEN D, BEVAN M. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon [M]. London: the Press Syndicate of the University of Cambridge, 1991.

[15] FATERI M, GEBHARDT A. Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-

- site manufacturing applications[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2015, 12(1): 45-46.
- [16] KEIHM S J, PETERS K, LANGSETH M G, et al. Apollo 15 measurement of lunar surface brightness temperatures thermal conductivity of the upper 1% meters of regolith [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(3): 337-351.
- [17] HEMINGWAY B S, ROBIE R A, WILSON W H. Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15, and 16 landing sites, between 90 and 350 K [C] // *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*. Houston, USA; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973: 2481-2487.
- [18] LOGAN L M, HUNT G R, BALSAMO S R, et al. Midinfrared emission spectra of Apollo 14 and 15 soils and remote compositional mapping of the moon[C] // *Proceedings of the Third Lunar Science Conference*. Houston, USA; *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1972: 3069-3076.
- [19] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: evidence for water ice at the lunar poles [J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1496-1500.
- [20] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, et al. Evidence for water ice on the moon; results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(10): 2016-2029.
- [21] STARUKHINA L V, SHKURATOV Y G. The lunar poles: water ice or chemically trapped hydrogen [J]. *Icarus*, 2000, 147(2): 585-587.
- [22] 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*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [23] RODIONOVA Z F, ZHARKOVA A Y, GRISHAKINA E A, et al. Topographic features of the lunar maria and basins [J]. *Solar System Research*, 2021, 55: 183-199.
- [24] HEAD III J W. Lunar volcanism in space and time [J]. *Reviews of Geophysics*, 1976, 14(2): 265-300.
- [25] 欧阳自远. 国际月球科研站 [R]. 北京: 格致论道讲坛, 2021.
- [26] 凌宗成, 刘建忠, 张江, 等. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海-冷海地区 (LQ-4) 为例 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 107-120.
- LING Zongcheng, LIU Jianzhong, ZHANG Jiang, et al. The lunar rock types as determined by Chang'E-1 IIM data: a case study of Mare Imbrium-Mare Frigoris Region (LQ-4) [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 107-120.
- [27] 霍倩, 刘姝瑞, 谭艳君, 等. 连续玄武岩纤维改性方法的研究进展 [J]. *纺织科学与工程学报*, 2021, 38(1): 73-78.
- HUO Qian, LIU Shurui, TAN Yanjun, et al. Research progress on modification methods of continuous basalt fiber [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2021, 38(1): 73-78.
- [28] 蒋明镜, 张鑫蕊, 司马军, 等. 壤基材料加筋月壤技术在月球基地建设中的应用 [J]. *苏州科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(3): 11-20.
- JIANG Mingjing, ZHANG Xinrui, SIMA Jun, et al. Future application of lunar-textile composite /reinforced regolith to the construction of lunar bases [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 40(3): 11-20.
- [29] 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: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(11): 87-100.
- XIAO Long, HUANG Jun, ZHAO Jiawei, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(11): 87-100.
- [30] WAGNER R V, ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits [J]. *Lcaurus*, 2014, 237: 52-60.
- [31] BENAROYA H. Lunar habitats: a brief overview of issues and concepts [J]. *Reach*, 2018, 7: 14-33.
- [32] CHAPPAZ L, SOOD R, MELOSH H, et al. Buried empty lava tube detection with GRAIL data [C] // *Astro Dynamics Specialist Conference*. San Diego, USA, AIAA Press, 2014: 4-7.
- [33] 梅洪元, 包为民, 于登云, 等. 关于未来月球基地建设方案的构想 [J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 553-559.
- MEI Hongyuan, BAO Weimin, YU Dengyun, et al. Research on building plans design for future China lunar base [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 553-559.
- [34] 朱恩涌, 果琳丽, 陈冲. 有人月球基地构建方案设想 [J]. *航天返回与遥感*, 2020, 34(5): 1-6.
- ZHU Enyong, GUO Linli, CHEN Chong. Research on manned lunar base construction scheme [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 34(5): 1-6.
- [35] 李志杰, 果琳丽, 梁鲁, 等. 有人月球基地构型及构建过程的设想 [J]. *航天器工程*, 2015, 24(5): 23-30.
- LI Zhijie, GUO Linli, LIANG Lu, et al. Configuration and construction process of manned lunar base [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 23-30.
- [36] GRANDL W. Lunar base 2015 stage 1 preliminary design study [J]. *Acta Astronautica*, 2007, 60(4/5/6/7): 554-560.
- [37] BENAROYA H, BERNOLD L. Engineering of lunar bases [J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(4/5): 277-299.
- [38] 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.
- [39] 宋靖华, 张杨姝禾, 袁焕鑫. 利用熔岩管建设月球基

- 地的规划设想[J]. 城市建筑, 2019, 16(7): 44-51.
- SONG Jinghua, ZHANG-YANG Shuhe, YUAN Huanxin. A tentative plan of lunar base under lava tubes[J]. Urbanism and Architecture, 2019, 16(7): 44-51.
- [40] 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 Yong, ZHAO Chen, HU Zhenyu. Prospect of lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 374-381.
- [41] CESARETTI G, DINI E, DE KESTELIER X, 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.
- [42] 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.
- FENG Peng, BAO Charun, ZHANG Daobo, et al. Construction technology for lunar bases using lunar in-situ resources[J]. Industrial Construction, 2021, 51(1): 169.
- [43] ULUBEYLI S. Lunar shelter construction issues: the state-of-the-art towards 3D printing technologies [J]. Acta Astronautica, 2022, 195: 318-343.
- [44] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358.
- OUYANG Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy [J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(3): 351-358.
- [45] KHOSHNEVIS B, BODIFORD M P, BURKS K H, et al. Lunar contour crafting a novel technique for ISRU-based habitat development[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit-Meeting Papers. Nevada, USA: AIAA Press, 2005: 7397-7409.
- [46] SMITHERS G A, NEHLS M K, HOVATER M A, et al. A one piece lunar regolith bag garage prototype[R]. Huntsville, USA: Marshall Space Flight Center, 2007.
- [47] AKISHEVA Y, GOURINAT Y. Utilisation of moon regolith for radiation protection and thermal insulation in permanent lunar habitats[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3853.
- [48] NAITO M, HASEBE N, SHIKISHIMA M, et al. Radiation dose and its protection in the moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube[J]. Journal of Radiological Protection, 2020, 40(4): 947.
- [49] 谢和平, 张国庆, 李存宝. 月球恒温层地下空间利用探索构想[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 1-8.
- XIE Heping, ZHANG Guoqing, LI Cunbao. Scheme of underground space utilization of lunar thermostatic layer [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 1-8.
- [50] ALLENDER E J, ORGEL C, ALMEIDA N V, et al. Traverses for the ISECG-GER design reference mission for humans on the lunar surface[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 692-727.
- [51] UY SALOMA E E S, BOONYATEE T. Image processing for geotechnical laboratory measurements[J]. Geomate Journal, 2016, 10(22): 1964-1970.
- [52] DAI Y Y, ZHANG K, MAHARJAN S, et al. Edge intelligence for energy-efficient computation offloading and resource allocation in 5G beyond[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12175-12186.
- [53] ONSEL E, CHANG O, MYSIOREK J, et al. Applications of mixed and virtual reality techniques in site characterization[C]//26th Vancouver Geotechnical Society Symp. Vancouver, Canada: AGU Press, 2019: 1-9.
- [54] COOMBS C R, HAWKE B R. A search for intact lava tubes on the moon: possible lunar base habitats [C]//The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston, USA: NASA Press, 1992(1): 219-229.
- [55] HARUYAMA J, SAWAI S, MIZUNO T, et al. Exploration of lunar holes, possible skylights of underlying lava tubes, by smart lander for investigating moon (slim)[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2012, 10(28): 7-10.
- [56] 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. 科学通报, 2020, 65(5): 346-372.
- GONG Zizheng, LI Ming, CHEN Chuan, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(5): 346-372.
- [57] MAZZANTI P. Displacement monitoring by terrestrial SAR interferometry for geotechnical purposes [J]. Geotechnical News, 2011, 29(2): 25.
- [58] 江月新, 黄云龙, 余建军. 基于 WiFi 通信的矿井监测无线传感器网络研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 278-280.
- JIANG Yuexin, HUANG Yunlong, YU Jianjun. Research on mine monitoring wireless sensor network based on WiFi communication [J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 278-280.
- [59] 李真, 闫广亮, 宋建村, 等. 思山岭铁矿超深超大规模开采工艺与思考[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 1-6.
- LI Zhen, YAN Guangliang, SONG Jiancun, et al. Study and consideration on mining method of ultra deep and ultra large-scale in sishanling iron mine[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(8): 1-6.
- [60] 陈湘生, 洪成雨, 苏栋. 智能岩土工程初探[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2151-2159.
- CHEN Xiangsheng, HONG Chengyu, SU Dong. Intelligent geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2151-2159.