

月球资源勘测与原位利用进展及关键挑战

童小华^{1,2}, 袁烽^{2,3}, 郑虎^{4,5}, 晏雄锋^{1,2}, 王超^{1,2}, 谢欢^{1,2,4},
许雄^{1,2}, 徐聿升^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 魏超^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 4. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
5. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 月面建造是人类探测、利用、开发月球的发展方向。围绕月面建造中用什么建、怎么建等关键问题, 梳理了月球资源勘测与原位利用方向的研究进展。首先总结了面向月面原位资源利用的主要支撑技术, 包括月壤特性分析、模拟月壤制备、月壤原位成型等关键技术; 其次, 介绍了月球基地智能建造进展, 包括月面建筑方案的构想发展历程、原位建造技术对比、月球基地建造环境分析等; 最后, 总结了月球资源原位利用及月球基地建造在资源勘测、建造科学选址、月基承载安全、原位熔融成型、太空建造方案等方面的关键科学挑战。

关键词: 深空探测; 月球建造; 原位资源利用; 模拟月壤
中图分类号: TU29; TU43 **文献标志码:** A

Progress and Key Challenges of Lunar Resource Exploration and In-situ Utilization

TONG Xiaohua^{1,2}, YUAN Feng^{2,3}, ZHENG Hu^{4,5},
YAN Xiongeng^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, XIE Huan^{1,2,3},
XU Xiong^{1,2}, XU Yusheng^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, WEI Chao^{1,2}

(1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Planetary Mapping and Remote Sensing for Deep Space Exploration, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Lunar construction (LC) is one of the important future directions of human exploration, utilization, and development of the Moon. This paper reviews the research progress of LC and in-situ resource

utilization (ISRU), focusing on the key basic science issues including what materials to use and how to build. First, the main supporting technologies for ISRU on the lunar surface are summarized, including lunar soil property analysis, lunar soil simulant preparation, and lunar soil in-situ additive manufacturing technologies. Second, the progress of the intelligent construction of the lunar base is introduced, including the development of the lunar base construction scheme, the comparison of in-situ construction technology, and the analysis of the lunar base construction environment. Finally, the key scientific challenges of LC and ISRU are discussed, including resource exploration, scientific site selection, lunar base bearing safety, lunar soil melting and sintering, and space construction schemes.

Keywords: deep space exploration; lunar construction; in-situ resource utilization; lunar soil simulation

月球自古以来就承载了人们的无限寄托与遐想, 被赋予了不同的意义。随着科技水平的不断发展, 人们也在通过不同的手段和方式探测月球。从 1959 年 9 月 14 日前苏联成功实现月球硬着陆并传回月球背面的图像, 到 1966 年 6 月美国探测器 1 号实现第一次月球软着陆, 再到 1969 年 7 月, 美国的阿波罗 8 号实现载人登月, 并在之后连续实施了 6 次载人登月任务, 人们对月球的了解更加深入。虽然阿波罗计划后, 探月活动陷入一段时间的沉寂, 但 21 世纪以来, 国际上又掀起了新一轮探月高潮, 欧盟、日本等国家和组织逐步启动探月活动, 美国也计划重返月球, 推出阿尔忒弥斯 (Artemis) 计划^[1], 并以建设

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(42221002); 土木工程 I 类高峰学科建设经费; 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 童小华, 中国工程院院士, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为航天测绘遥感与深空探测。

E-mail: xhtong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

月球基地为目标开展各项月球探测和建设任务。

我国 2004 年启动嫦娥探月工程,目前已经成功完成了“绕、落、回”三期任务。探月四期已全面启动,成功发射了鹊桥二号、嫦娥六号等探测器,建立了与月背着陆探测器的通信并完成了月背采样返回任务。后续将陆续开展嫦娥七号、嫦娥八号等探测器,对月球南极开展科学探测,并计划 2030 年前建立起月球科研站的基本型^[2]。

不管是国际还是我国的探月活动,都遵循着从无人探测到有人探测、从远距离观测到近距离绕月再到着陆巡视原位探测的技术发展,后续目标都是建立以月球资源探测、利用、开发、保护为目标的月球科研站或月球基地等月面建造。月面建造工作的开展,标志着人们航天技术从月球探测迈向星际探测的新征程:一方面,开展月面建造能够提供稳定、安全环境开展科学研究、技术开发和资源利用实验;另一方面,开展月面建造能够成为太空探索的跳板,帮助人类迈向更远深空^[3-4]。

月面建造涉及到一系列的基础科学问题,包括用什么建、怎么建等^[5]。首先是用什么建,考虑到地月运输成本高、风险大,研究表明建设国际科研站规模的月面科研站,仅运输成本将达 50 亿美元^[6],因此原位资源利用(In-situ Resource Utilization, ISRU)成为了月球科研站建设的重要手段,即利用月壤、光照等固有资源,通过人工转化技术获得可支撑月面建造的建筑材料。其次是怎么建,考虑月球表面存在低重力(1/6 地球重力)、超真空、大温差、强辐射、多陨石等特殊环境,月面建造与地球将存在显著的不同,在建造方案理念、力学结构原理等均有所不同^[7]。

为回答上述问题,国内外学者已开展了多种理论方法和不同技术途径的探索,并逐步形成了月球资源勘测与原位利用的特色研究方向。本文首先从月壤特性分析、模拟月壤制备、月壤原位成型等方面,介绍月面原位资源利用的关键支撑技术;其次,从月面建筑方案的构想发展历程、原位建造技术对比、月球基地建造环境分析等方面,介绍了月球基地智能建造的进展;最后,从资源勘测、建造科学选址、月基承载安全、原位熔融成型、太空建造方案等方面总结月球资源原位利用及月球基地建造的关键科学挑战。

1 月面原位资源利用支撑技术

1.1 月壤的物理和化学特性

月壤与地球土壤的形成过程截然不同,月壤是在氧气、水、风和生命活动都不存在的环境下,由于陨石及微陨石的撞击、宇宙射线和太阳风轰击、大幅度温度变化等共同作用下导致的月球岩石热胀冷缩破碎形成的^[8-10]。月海区月壤平均厚 4~5m,高地区平均厚约 10~20m^[8]。

月壤的化学成分、岩石类型和矿物组成复杂多样,主要包括矿物碎屑、原始结晶岩碎屑、角砾岩碎屑、各种玻璃、黏合集块岩(独特的月壤组分)、陨石碎片等^[11]。当碎屑粒径小于 250 μm 使岩石类型的辨认存在一定困难时,一般采用碎屑中单矿物的化学成分来判断岩石类型。如表 1 为月表各采样区月壤的平均化学组成^[12-13],表 2 为月表各采样区月壤的平均矿物组成^[12,14]。

表 1 采样区域月壤化学元素组成(w.t.%)

Tab.1 Chemical composition of lunar soil in different sampling sites (w.t. %)

| 化学元素 | A 11 | A 12 | A 14 | A 15 | A 16 | A 17 | L 16 | L 20 | L 24 | CE 5 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| SiO ₂ | 42.20 | 46.30 | 48.10 | 46.80 | 45.00 | 43.20 | 41.70 | 45.10 | 43.90 | 42.2 |
| TiO ₂ | 7.80 | 3.00 | 1.70 | 1.40 | 0.54 | 4.20 | 3.40 | 0.55 | 1.30 | 5.00 |
| Al ₂ O ₃ | 13.60 | 12.90 | 17.40 | 14.60 | 27.30 | 17.10 | 15.30 | 22.30 | 12.50 | 10.8 |
| FeO | 15.30 | 15.10 | 10.40 | 14.30 | 5.10 | 12.20 | 16.70 | 7.00 | 19.80 | 22.5 |
| MnO | 0.20 | 0.22 | 0.14 | 0.19 | 0.30 | 0.17 | 0.23 | 0.13 | 0.25 | 0.28 |
| MgO | 7.80 | 9.30 | 9.40 | 11.50 | 5.70 | 10.40 | 8.80 | 9.80 | 9.40 | 11.0 |
| CaO | 11.90 | 10.70 | 10.70 | 10.80 | 15.70 | 11.80 | 12.50 | 15.10 | 12.30 | 11.0 |
| Na ₂ O | 0.47 | 0.54 | 0.70 | 0.39 | 0.46 | 0.40 | 0.34 | 0.50 | 0.31 | 0.26 |
| K ₂ O | 0.16 | 0.31 | 0.55 | 0.21 | 0.17 | 0.13 | 0.10 | 0.10 | 0.04 | 0.19 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.40 | 0.51 | 0.18 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.16 | 0.11 | 0.23 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.30 | 0.34 | 0.23 | 0.36 | 0.33 | 0.33 | 0.28 | — | 0.32 | — |
| S/LOI | 0.12 | — | — | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.21 | 0.08 | 0.14 | — |
| Total | 99.9 | 99.11 | 99.83 | 100.79 | 100.78 | 100.14 | 99.68 | 100.82 | 100.37 | 98.94 |

表 2 采样区域月壤中各类矿物和玻璃的体积分数(%)

| Tab.2 Volume fractions of minerals and glasses in lunar soil in different sampling sites (%) | | | | | | | | | | |
|--|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 矿石 | A 11 | A 12 | A 14 | A 15 | A 16 | A 17 | L 16 | L 20 | L 24 | CE 5 |
| 斜长石 | 21.4 | 23.2 | 31.8 | 34.1 | 69.1 | 39.3 | 14.2 | 52.1 | 20.9 | 30.1 |
| 辉石 | 44.9 | 38.2 | 31.9 | 38.0 | 8.5 | 27.7 | 57.3 | 27.0 | 51.6 | 42.0 |
| 橄榄石 | 2.1 | 5.4 | 6.7 | 5.9 | 3.9 | 11.6 | 10.0 | 6. | 17.5 | 5.8 |
| 石英 | 0.7 | 1.1 | 0.7 | 0.9 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 1.7 | 0.4 |
| 钛铁矿 | 6.5 | 2.7 | 1.3 | 0.4 | 0.4 | 3.7 | 1.8 | 0.0 | 1.0 | 4.5 |
| 月海玻璃 | 16.0 | 15.1 | 2.6 | 15.9 | 0.9 | 9.0 | 5.5 | 0.9 | 3.4 | 16.6 |
| 高地玻璃 | 8.3 | 14.2 | 25.0 | 4.8 | 17.1 | 8.5 | 11.2 | 12.8 | 3.8 | |
| 其他物质 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.6 |
| 总计 | 99.9 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 99.9 | 100 | 99.9 | 99.9 | 100.0 |

由于月球环境的特殊性,导致月壤的力学特性和地球上常见土壤区别较大,主要表现在颗粒大小、颗粒形态、密度、孔隙率、颗粒比重、凝聚力、内摩擦角等方面。月壤的粒度分布范围很广,绝大部分颗粒直径位于 30 μm ~1mm 之间^[8-9,15-17],见表 3。其颗粒形态多变,从圆球状、椭球状到极端棱角状都有出现,常见的颗粒形态为长条状、次棱角状和棱角状^[18-20],见表 4。

表 3 月壤的平均颗粒形态

| Tab.3 Mean sizes of lunar soil particles | | | | |
|--|-------------------|--------|---------------------|------|
| 任务 | 粒径/ μm | 粒径标准偏差 | 有效粒径/ μm | 不均一性 |
| A 11 | 48~105(中值) | 0.620 | 35.4 | 2.77 |
| A 12 | 42~94(中值) | 0.586 | 47.4 | 2.49 |
| A 14 | 75~802(中值) | 0.677 | 40.9 | 3.38 |
| A 15 | 51~108(中值) | 0.536 | 28.4 | 2.15 |
| A 16 | 101~268(平均) | 0.885 | 19.2 | 7.97 |
| A 17 | 42~166(平均) | 0.747 | 17.9 | 4.41 |
| L 16 | 70~120(中值) | 0.623 | 30.3 | 2.81 |
| L 20 | 70~80(中值) | 0.816 | 13.2 | 5.83 |
| CE 5 | 4.84~432.27(平均) | — | 4.75 \pm 0.39 | 15.1 |

表 4 月壤的平均颗粒形态

| Tab.4 Mean morphology of lunar soil particles | | |
|---|------------------------------------|------------|
| 参数 | 平均值 | 描述 |
| 延性 | 1.35 | 稍长条状 |
| 长度直径比 | 0.55 | 稍长条状至中等长条状 |
| 轮廓 | 0.21 | 次棱角状 |
| 平行光 | 0.22 | 棱角状 |
| 体积系数 | 0.3 | 长条状 |
| 比表面积 | 0.5m ² ·g ⁻¹ | 不规则、凹角状 |

月壤的平均密度介于 1.45~1.9g·cm⁻³之间,且随深度的增加而有所增加,可分别用下列双曲线关系和指数关系来表达月壤密度随深度的变化^[9,21]:

$$\rho=1.92\frac{z+12.2}{z+18}$$

(1)

$$\rho=1.39z^{0.056}$$

(2)

其中, ρ 为一定深度的月壤密度(g·cm⁻³), z 为该点所在的月壤深度(cm)。

月壤比重 G (相对密度)指颗粒质量与同体积纯水在 4℃时的质量之比,即

$$G=\frac{m_s}{v_s}=\frac{1}{\frac{\rho_{w1}}{\rho_s}}=\frac{\rho_s}{\rho_{w1}}$$

(3)

其中, ρ_s 为月壤颗粒密度, ρ_{w1} 为纯水在 4℃时的密度。月壤颗粒比重在数值上等于颗粒密度。大部分月壤的比重在 2.3~3.2 之间。

月壤的孔隙比 e 是指月壤中孔隙体积 V_v 与颗粒体积 V_s 之比,即

$$e=\frac{V_v}{V_s}=\frac{G\rho_w}{\rho_d}-1$$

(4)

式中: G 为颗粒的比重; ρ_w 为的 4℃纯水的密度; ρ_d 为月壤的密度。一般 $e<0.6$ 是密实的低压缩性月壤, $e>1.0$ 是疏松的高压缩性月壤。月壤的孔隙率随深度的增加而减小,其平均孔隙率介于 44%~54% 之间^[9]。

黏性月壤的抗剪特性主要通过颗粒间滑动摩擦、凹凸面间镶嵌作用产生的摩擦力 φ 以及颗粒间的相互黏结力 c 组成。其抗剪能力由内摩擦角和黏聚力决定。表 5 为不同位置和深度月壤的内摩擦角和内聚力的最佳估计值^[16]。月壤的压缩性指其在压力作用下体积缩小的特性,由于在一般压力作用下(100~600kPa),月壤颗粒的压缩与月壤的总压缩量之比很微小,可以忽略不计,因此把月壤压缩看作月壤空隙体积的减少。表 6 为不同孔隙比下月壤的平均压缩系数。

采用月壤进行 3D 打印,需要对月壤材料进行加热融化,因此了解月壤的成分和熔点至关重要。月壤中的硅酸盐矿物占大多数月球岩石成分的 90% 以上,氧化物矿物是仅次于硅酸盐的第二大丰富矿物,占某些玄武岩的 20%,还有少部分的稀有矿物。硅酸盐矿物主要包括斜长石、辉石和橄榄石^[22]。其中,斜长石主要是钙长石^[23];辉石主要是普通辉石和高钙辉石,高钙辉石更多^[24]。氧化物矿物主要包括

表 5 不同位置和深度月壤的内摩擦角和黏聚力的最佳估值

Tab.5 Optimal estimation of internal friction angles and cohesion of lunar soil at different locations and depths

| 位置 | 黏聚力/kPa | | 内摩擦角/(°) | | 孔隙比 |
|-----------|-----------|------|----------|-----|-----------|
| | 变化范围 | 平均值 | 变化范围 | 平均值 | |
| 通常值 | 0.1~1 | | 30~50 | | |
| 撞击坑岩墙(坑内) | 0.17~1.0 | | 45~25 | | |
| 撞击坑坡部(坑外) | 0.52~2.7 | | 45~25 | | |
| 平坦底部 | 0.34~1.8 | | 45~25 | | |
| 撞击坑交叠区域: | | | | | |
| 0~15cm | 0.44~0.62 | 0.52 | 41~43 | 42 | 1.07+0.07 |
| 0~30cm | 0.74~1.1 | 0.90 | 44~47 | 46 | 0.96+0.07 |
| 30~60cm | 2.4~3.8 | 3.0 | 52~55 | 54 | 0.78+0.07 |
| 0~60cm | 1.3~1.9 | | 48~51 | | |

表 6 不同孔隙比下月壤的平均压缩系数

Tab.6 Mean compression coefficients of lunar soil at different void ratios

| 月壤参数 | 孔隙比 | | | |
|------------|-------|---------|---------|-------|
| | > 1.3 | 1.3~1.0 | 1.0~0.9 | < 0.9 |
| 压缩系数(1/MP) | > 40 | 20 | 8 | < 3 |

尖晶石和钛铁矿^[25]。稀有矿物有黄铁矿和磷灰石,占比非常少。

其中,斜长石熔点约 1 300℃^[26];而辉石由于成分的差异(尤其是富含钙的辉石成分)的熔化范围很广^[27],有实验证明从 1 150℃开始融化到 1 675℃辉石完全融化^[28];橄榄石熔点约为 1 890℃^[29];尖晶石熔点约为 2 100℃^[30-31];钛铁矿熔点在 1 402~1 500℃之间^[32];黄铁矿熔点为 1 171℃;磷灰石熔点约为 1 650℃^[33]。但各类矿物的熔点会受到压力、微量元素等多因素的影响产生波动,需要更多的实验来测定月球环境下各类矿物的具体熔点。

1.2 模拟月壤制备

前苏联、美国、中国的探月任务获取了一些真实的月壤,但数量极其有限,难以满足地面相关验证实验的需求,因此利用地球原料制备具有成分和特性相同或相近的模拟月壤成为了主要手段。目前,世界各国已成功研制出了数十种模拟月壤^[34],如美国的 JSC、MLS、GRC 等系列模拟月壤,ESA 的 DNA 系列、日本的 MKS、FJS 等系列,中国的 CAS(地球化学研究所)、NAO(国家天文台)、CLRS(地球化学所、国家天文台)、TY(中国空间技术研究院)、BH(北京航空航天大学)、CUG(中国地质大学)、TJ(同济大学)、CAS-IRSM(武汉岩土力学研究所)、CQU(重庆大学)等系列。

国内外学者针对这些模拟月壤的物理力学、热力学特性开展了研究。在物理力学特性方面,Arslan 等^[35]利用直接拉伸装置测定了不同密度下 JSC-1 模拟月壤的拉伸强度;Hasan 等^[36]采用离散元

颗粒流软件模拟了 JSC-1A 模拟月壤在不同相对密度和围压条件下的三轴压缩性能,验证了峰值摩擦角与接触面摩擦角、相对密度和接触面平均有效应力之间关系的经验模型;Long-Fox 等^[37]对 LHS-1 和 LMS-1 模拟月壤的粒径分布、密度、抗剪强度和耐磨性等特性进行了试验研究;蒋明镜等^[38]通过数值模拟和现场实验测试了 TJ-1 模拟月壤承压特性,并采用改进二维离散元方法开展模拟月壤圆锥贯入试验数值模拟,发现在月球低重力环境和颗粒间的黏聚力作用下,月壤比地球土壤有相对低的摩擦力和强度值。贺新星等^[39]测量了 CUG-1A 模拟月壤的化学成分含量以及颗粒粒径分布、密度、相对密度、孔隙率、内聚力、内摩擦角物理力学参数,总体与 Apollo-14 采样点月壤较为相似。

在热力学特性方面,Schreiner 等^[40]在综合分析 100 余种阿波罗真实月壤样品和高温熔融模拟月壤样品数据的基础上,建立了月壤热物理性能模型,分析了月壤成分、热容、熔融潜热、热导率、Gibbs 自由能和生成焓。Fateri 等^[41]研究了 JSC-2 模拟月壤的黏温特性、膨胀烧结曲线和接触角,提出 JSC-2 模拟月壤适合增材制造的温度范围为 1 184~1 248℃。李雯等^[42]分析了模拟月壤的化学成分、光谱吸收特性(吸收曲线)、质量热稳定性(TGA 曲线)及熔点温度(DSC 曲线)等物理属性,用于指导激光熔融成型设备及工艺参数选取。

在月基承载力研究方面,Zou 等^[43]通过开展低重力环境下的地面模拟试验研究,分析了低重力水平对承压模型参数的影响和规律。Lee 等^[44]利用超重力离心机试验,发现重力环境、基础尺寸等因素对月基承载力具有重要影响;Kobayashi 等^[45]通过抛物线飞行器开展了微环境下模拟月壤加载试验,研究了模拟月壤的压缩性、基床系数等物理力学参数的重力效应,并提出了考虑重力水平的承载力计算经

验公式。Xiao等^[46]进一步开展了低重力模拟试验和数值仿真研究,预测了加载速率和低重力水平对月基承载力的耦合效应。这些研究为月球车设计和月面通过性能评估提供了重要理论支撑。

1.3 月壤原位成型技术

月壤成型技术是利用一定的颗粒物处理方法或工艺,使月壤颗粒成型为具备一定几何构型及性能的物体^[5]。目前已探索了多种成型技术,见表7。按照所需温度环境,这些技术可初步划分为:常温成型和高温成型。其中,常温成型包括:月壤混凝土、月壤地质聚合物、D形打印工艺(D-shape)、立体光刻成型(Stereolithography, SLA)等技术。例如,Osio-Norgaard等^[47]研究了模拟月壤氧化镁水泥的配制、加工、硬化状态性能、增材制造的过程,并分析了水的可重复利用性;郭晓潞等^[48]探讨了基于原位利用月球资源研制地聚合物混凝土进行月面建造的可行性;欧空局(ESA)测试了D-shape 真空环境下的成型精度和性能,讨论了面向月面建造的可行性。

立体光刻是当前3D打印工艺中精度最高的技术之一,可以制造出至今为止用模拟月壤打印的零件中分辨率最高的样品^[49-50],适合用于制造小型复杂的几何体。立体光刻打印成型是利用数字光逐层照射借助动态掩膜,按照预先设定的形状使铺在料盘上均匀的一层悬浮液曝光固化,并逐层叠加,形成三维样品。模拟月壤成型中最核心的步骤是悬浮液制备,Altun等^[49]研究了利用立体光刻技术对模拟月壤打印成型的可行性,并测试了打印件的力学、结构和热学性能;Liu等^[51]将CLRS-2模拟月壤粉末与光固化树脂混合制备打印浆料,并分析了模拟物的微观

结构、化学组成、粒度分布和热重特性,成型后进行烧结,测试其平均抗压强度和抗折强度分别达到428.1 MPa和129.5 MPa。Xiao等^[52]通过引入一定比例的水溶液,降低黏度,同时保证了材料性能,较好地解决了高固含量模拟月壤悬浮液难以达到低黏度的问题。Chen等^[53]则采用硅烷偶联剂KH570对CUG-1A粉体进行了改性,以提高CUG-1A月壤3D打印成型件的力学性能。月壤常温成型工艺具有易控制、成型功能件强度高/体积大等优点,但需要添加一定的辅料,原位资源利用率较低。考虑到现阶段地月之间运输成本高、风险大,短时间内这些工艺在月面建造中的应用受到了一定限制,但随着技术迭代和月面建造条件更为成熟时,相关技术预期可有效服役于月面建造、养护和维护等任务。

高温成型主要是通过激光、微波、太阳能聚光、等离子体烧结、铝热反应等手段,对月壤进行高温烧结或熔融从而成型^[34,42,54],如图1所示。Meurissea等^[34]验证了仅仅利用聚焦的太阳光逐层烧结月壤的可行性,并使用太阳能聚光板和聚焦氙灯打印了模拟月壤的建造砖块,抗压强度低于5 MPa。Fateri等^[55]使用太阳能模拟器,实现了在常温和真空条件下的逐层烧结,并测试得到不同的物理和化学特性。国内钱学森实验室^[56-57]搭建了选择性激光熔融模拟月壤实验系统,并测试了激光功率、扫描速度、首层粉末厚度等成型工艺参数对打印性能的影响。哈工大研究团队^[58]搭建了太阳能聚光烧结的原型系统,建立了以菲涅尔透镜作为聚光器的模拟月壤熔覆成型传热模型,开展熔覆成型实验。

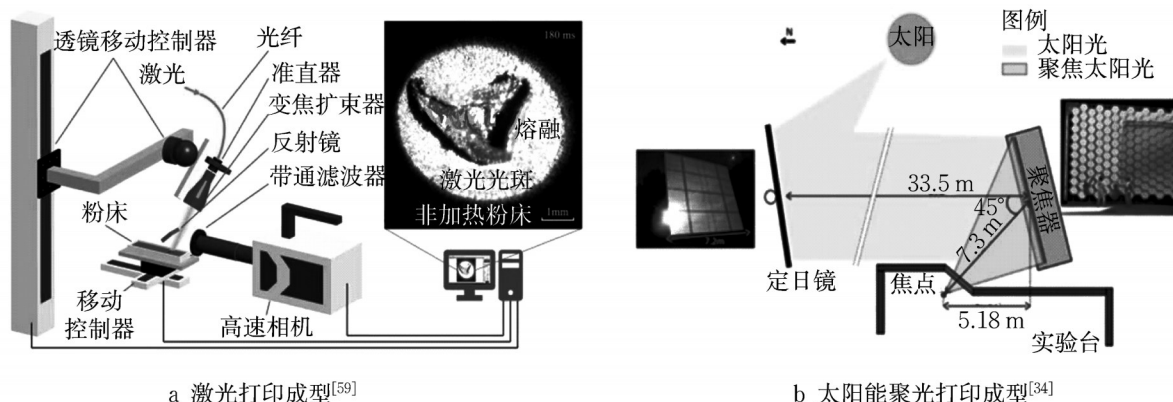


图1 月壤高温成型原理

Fig.1 Additive manufacturing principles of lunar soil under high temperature environments

高温成型技术依赖于对月壤力性能、热物理性能的深入研究,并形成适应于月面复杂环境下的工

艺,才能制备符合建造要求的材料。学者们对高温成型的热力性能开展了研究。Meurisse等^[60]对JSC-

1A 与 DNA 模拟月壤烧结并分析长石种类和钛铁矿含量对烧结质量的影响,并测试了烧结功能件的最高抗压强度。Fateri 等^[55]研究了微波烧结 JSC-2A 模拟月壤过程对成型件孔隙率、微结构、晶相演化、机械性能和宏观裂缝产生的影响。Zhang 等^[61]使用放电等离子方法烧结 FJS-1 模拟月壤,并研究了矿物相在烧结过程中的组分与微结构变化、加压对烧结的影响以及测试了成型件的弹性模量和硬度。

月面特殊环境对高温成型性能也有影响。Song 等^[62]研究 CLRS-1 模拟月壤在真空环境下的孔隙形成机制和热导率变化规律,通过多阶段烧结得到成型件。Meurisse 等^[60]分析了 JSC-2 模拟月壤在真空/空气环境下的烧结相组成及成型件性能影响,发现真空烧结中模拟月壤中橄榄石与斜长石品粒长大、

黏接良好,空气烧结中氧气作用阻碍了晶粒生长与黏结。Dominguez 等^[63]通过真空烧结实验和模拟实验,研究了熔融模拟月壤在真空环境下沿壁面向上迁移的特殊现象,揭示了爬升的主要驱动力为热毛细力。相关的研究为开展月面高真空环境下对月壤烧融成型工艺的研究提供了理论基础。

总体而言,高温成型无需辅料添加,因此备受青睐。但高温成型技术也依赖于高温设备或储能设备,所以太阳能聚光成型技术利用月面光照这一固有资源,充分发挥了就地取材、原位利用优势,是近期内月面建造工程任务的关键技术之一,但考虑到月壤组分多样、粒径范围大、月面环境复杂等因素,当前太阳能聚光烧结的成型机理和工艺参数仍需要进一步探索。

表 7 不同月壤成型工艺对比

Tab.7 Comparison of different additive manufacturing techniques of lunar soil

| 月壤打印工艺 | 材料挤压 喷射工艺 | 粉床融合烧结工艺 (太阳光/激光烧结) | 激光网络成型 熔融挤出工艺 | 选择性 微波烧结 | 立体印刷成型 数字光处理 |
|-----------------|---|---------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 能量消耗 | 20~50Kwh·m ⁻³ | 20~50Kwh·m ⁻³ | 2 300Kwh·m ⁻³ | 500Kwh·m ⁻³ | 50Kwh·m ⁻³ |
| 耗材 (每 100kg) | 25~35Kg 黏合剂用于膏 体/粉末分布的惰性气体 | 直接烧结或添加少量黏 合剂 | 用于膏体/粉末分布的 惰性气体 | 直接烧结或添加少量黏 合剂 | 15~30Kg 光聚合物 |
| 打印速度 | 6~12 m·min ⁻¹ | 3 m·min ⁻¹ | 1.2m·min ⁻¹ | 未报告 | 未报告 |
| 打印精度 | 0.5~3.2mm | 0.2mm | 1.65 mm | 10~20mm | 0.02 mm |
| 抗压能力 | 20~50 MPa | 22~35MPa | 未报告 | 未报告 | 未报告 |
| 辅助条件 | 需要惰性气体 | / | 需要惰性气体 | / | / |
| 特点 | 能耗低 耗材较多 需要惰性气体 打印速度很快 打印精度较高 | 能耗低 耗材很少 打印速度较快 打印精度较高 | 能耗极高 需要惰性气体 打印速度较慢 打印精度较低 | 能耗较高 耗材很少 打印精度很低 | 能耗低 耗材较多 打印精度很高 |

2 月球基地智能建造方案与技术

2.1 月球基地建设构想的 3 个发展阶段

早在上世纪 80 年代,全球科学家就开始了月面建筑方案的构想,经历了 3 个发展阶段:①在地球上制造预集成罐体,并运送至月面拼接;②在地球上预制充气装置,并在月球部署;③在充气膜结构基础上,利用月壤原位建造技术实现抗辐射、耐高温覆层。

阶段 1 为预置集成式^[64]。并不需要复杂的月球资源利用基础,对于月球的地形环境也无太高要求,适用于月球基地建设的初期阶段。其形态结构与内部功能集成紧密,多采用模块化设计,代表案例有 LS3 月球前哨站^[65]和哈伯特月球基地概念方案^[66]。阶段 2 为预制装配、月表组装式,这种模式的特点是:受运载火箭的尺寸和运力的限制比较小,通常可

以实现更大体积的月面建筑空间。这些可在月面部署的展开结构在地球上完成建造,并经过充分调试,当其被火箭运送到月面后,可以实现自动或半自动的组装和部署。代表案例有充气环形基地概念方案(Inflated-torus concept)^[67]和 TRIGON 变换机器人基础设施生成网格系统(Transformable Robotic Infrastructure-Generating Object Network)^[68]。月面建造方案第 3 阶段的兴起来自于原位建造技术。月面原位建造技术是指以高效利用月球原位资源作为主要建筑材料的建设技术。主要是通过对风化层月壤进行开采、加工和处理,转化为增材制造所需原料。月面原位建造技术依赖于多项关键技术,如卫星探测月壤、月壤开采、月壤优选、基地选址、月壤打印等。代表案例有 Sinterhub 方案^[69]以及“中国超级梅森(Chinese Super Mason)”方案^[70]。

2.2 月面原位建造方案

“原位建造驱动式,整合部分地球组件”的建造方式是减轻火箭发射重量、实现月球基地大规模建造的有效方案,是月球基地可持续发展的重要方式。本文选取了这一建造方式下的 3 个方案概念,由

NASA 马歇尔空间飞行中心提出的 Sinterhub 方案^[69];由欧空局(ESA)和福斯特提出的月球前哨站设计构想^[71];以及华中科技大学提出的“中国超级梅森”方案^[70]。作者构建了一套评价指标,对这 3 个方案的优劣进行了评估,见表 8。

表 8 不同方案特点对比
Tab.8 Comparison of different lunar construction schemes

| 评价指标 | Sinterhub 方案 (NASA) | | 月球前哨站方案 (ESA&Foster)) | | 中国超级梅森方案 (华中科技大学) | |
|--------------------|------------------------|---|--------------------------|---|----------------------|--|
| | 得分 | 特点 | 得分 | 特点 | 得分 | 特点 |
| 原位建造工艺 | 4/5 | 选择性微波烧结技术,微波的穿透性能形成致密性好的结构 | 4/5 | 选择性微波烧结技术,微波的穿透性能形成致密性好的结构 | 4/5 | 高温蒸压成型,形成的结构紧实致密 |
| 形成单位质量结构的能量消耗 | 3/5 | 600Kwh·m ⁻³ ,微波烧结工艺的能量消耗较大,但低于高温蒸压 | 3/5 | 600Kwh·m ⁻³ ,微波烧结工艺的能量消耗较大,但低于高温蒸压 | 1/5 | 需要在 195℃、1.4MPa 条件下蒸压 8h,每次蒸压体积大约为 10cm ³ |
| 单位质量混合材料中月壤与地球材料比例 | 5/5 | 不需要地球材料 | 5/5 | 不需要地球材料 | 3/5 | 单位质量混合材料中含有 10%Ca(OH) ₂ |
| 工程建造难度 | 3/5 | 先展开充气膜,然后在上面铺设月壤实现烧结 | 3/5 | 先展开充气膜,然后在上面铺设月壤实现烧结 | 1/5 | 先蒸压月壤砖,然后由机械臂砌筑,施工中的精确定位问题需要解决 |
| 形成的空间大小 | 4/5 | 可以形成较大空间,但需要大尺寸机器人 | 4/5 | 微波烧结机器人可以爬上充气膜,可以形成较大空间 | 2/5 | 受砌筑机器人尺寸限制,形成的空间较小 |
| 需要预先发射的系统 | 2/5 | 充气膜腔体,大型太阳能驱动的微波烧结机器人 | 4/5 | 充气膜腔体,小型太阳能驱动的微波烧结机器人 | 3/5 | 充气膜腔体,砌筑机器人,高温蒸压成型设备 |
| 能量获取方式 | 3/5 | 太阳能 | 3/5 | 太阳能 | 4/5 | 太阳能及核燃料 |
| 总评分 | | 24/35 | | 26/35 | | 18/35 |

以上分析得出,采用充气膜展开并铺设月壤的方式可以提供大尺度的空间并可以适应月壤的 3D 打印原位建造,在原位建造方案中具有优势。

2.3 月球基地建造环境约束

月球基地需要选在水源、陨石坑附近、阳光照区之内,保证生命、生活、工作、探测和建设月球基地之需^[72]。因此月球基地建造应首先考虑以下 3 个要素:

(1) 水源丰富:拥有水冰和水源等,用于制作发射燃料等

(2) 光照充足:阳光照射时间长,有利于太阳能持续获取能源。

(3) 地形适宜:具有地形优势,便于飞行器起降,有小月坑减小基地建造难度。

月球基地建造有 4 种预选位置:

(1) 月球赤道:氦-3 可以作为核原料提供电能,月球赤道地区的氦-3 浓度可能更高。赤道地区在月外交通中也有优势——由于月球运行缓慢,发射角度很小,更利于发射。但是赤道温差大,夜间时间较长,无法持续获得太阳光照。

(2) 月球极地:月球靠近两极的一些陨石坑、阴影区域可能存在丰富的水冰和水源^[73]。一些地区始终暴露在阳光下^[74],因此在极地建设发电站可持续获得电能。

(3) 月球背面:对于大型射电望远镜来说,月球

背面也是一个很好的位置,因为它对地球具有很好的屏蔽效果^[75]。由于缺乏大气层,这个位置也适合光学望远镜观测太空和宇宙。

(4) 月球熔岩管洞:熔岩管洞作为地下洞穴,可以防辐射以及陨石的威胁,并且管洞的顶部结构在月震的作用下非常稳定^[76]。地下洞穴的温度比较恒,减少了月球基地应对极端温度的压力。

综合以上分析,月球基地适宜建设在以下 5 个点位,对比见表 9。

月面遍布小型月坑,最小的月坑仅有 10 余厘米,我们需要选择形状规则、直径大约为 5-10 米的月坑进行建设。同时,为了使极地具有良好的可拓展性,尽量大趋势较为均匀,然后选择月坑均匀分布的区域,在便于运输的同时,也能有良好的适应性。

2.4 月面栖居地的建筑概念设计

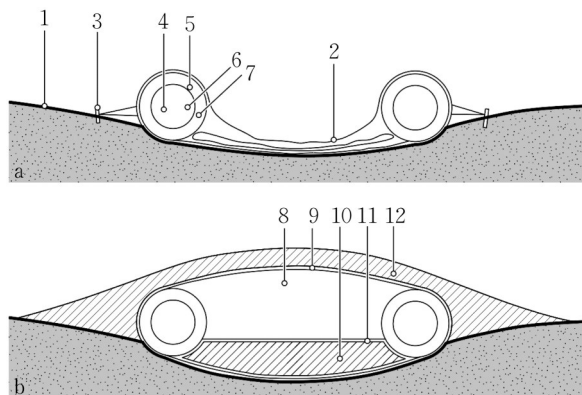
本文的设计思路基于 Chow 和 Lin 提出的压力膜结构^[77],如图 3 所示。由双层膜结构构成,膜内填充结构泡沫。加压环面形状的下部结构提供边缘支撑。保护层由表土覆盖层提供。在此设计中,地面需要进行预整形,并在其上铺开来,然后在膜内填充月壤以给结构加压。之后再给中间的腔室加压,同时在底部填充压实土壤以提供稳定性和平坦的地面。因此,在此基础上,本文基于原位建造方法,提出了响应式的月球基地设计流程,主要有以下改进

与深化:

(1) 建筑空间的环境响应式优化:该方案依赖地形进行基地建构,本文首先通过基地优选选择适合尺寸与深度的月坑,便于预处理的充气膜结构的展开;其次,通过土方量与表面的优化使得机器施工量和土地平整度达到平衡。

(2) 月面建筑的结构优化:原有结构仅用薄膜支撑,抗撞击能力弱,本方案提出了基于月壤原位3D打印技术的多层蜂窝薄壳结构,可以抵御月面微陨石的冲击,从而保护宇航员和相关科学设施的安全。

(3) 建设材料的原位利用:本方案提出了一种新型的月壤3D打印流程,可以以一种效率高、月壤利用率高、所需能量较少的方式进行连续3D打印。



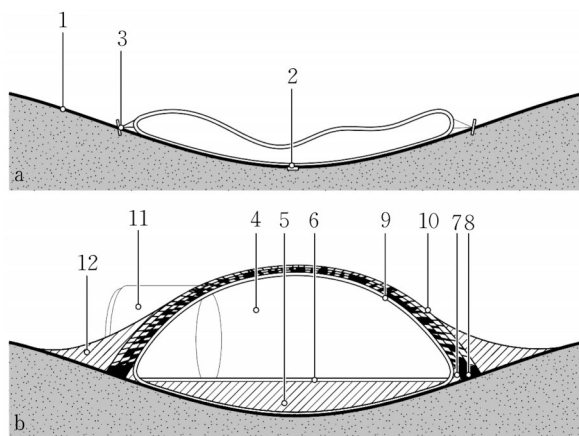
1. 挖掘并整理地面至所需深度;2. 在准备好的地面上铺设结构;3. 在延展位置固定结构;4. 对环形梁内部进行加压,使其成圆形;5. 用空气或适当的气体充填空隙;6. 安装气闸和其他穿透件;7. 通过注射口喷射结构泡沫;8. 对SSMS内部加压;9. 在膜之间的空隙中充入空气或适当的气体,然后喷射结构泡沫;10. 用压实的土壤填充袋子。11. 铺设地板。12. 放置土壤覆盖层。

图2 Chow和Lin的提出的压力膜结构^[77]

Fig.2 Pressure membrane structure proposed by Chow and Lin

3 关键科学挑战

(1) 多尺度环境感知与高精度资源勘测关键技术
在资源勘查方面,月球表面的月壤、光照、水冰、氦-3等资源可以为月面建造提供原料、能源等支撑,月球表面/浅层的熔岩管等地质环境可以为月面建造提供天然的防御屏障,这些资源的勘测可以为月面建造提供重要支撑。如何针对月面各项原位资源进行精细勘查,以支撑高性能、可持续月面建造是当前关注的重点方向之一。首先,开发多传感器融合技术,以提高月面不同尺度环境下的感知精度,结合卫星遥感、月球车和地面传感器的数据,实现对月球



1. 选区的月坑地形检测与整平;2. 气囊底部固定,以使其与地面贴合;3. 气囊周边固定;4. 气囊充气膨胀;5. 内部月壤填充,稳定气囊;6. 内部月壤整平压实;7. 气囊端部填充月壤为底座打印提供支撑;8. 底座打印;9. 气囊扫描;10. 3D打印三层蜂窝结构;11. 外部气密入口安装;12. 地面部分月壤覆盖紧固

图3 本文提出的结构

Fig.3 Lunar structure proposed in this paper

表面环境的全方位感知;其次,研究智能算法和大数据分析技术,以提升月球资源勘测的效率和精度,特别是在复杂地形和极端环境条件下的资源探测。

(2) 科学和工程要素约束的月球科研站选址

在选址方面,科学目标的实现和工程安全要素的约束是实现月球科研站选址的重要参考。月球科研站科学目标包括月球考古、巡天揭秘、日地联系、科学实验、资源利用等^[4],选址时需要考虑月球内部构造观测、水资源分布、对地对日对宇宙观测、原位资源利用等科学任务的实施。工程约束包括着陆区地形平坦、月基承载安全、原位资源自给自足、适宜开展大面积建造等,考虑科学价值和工程安全多因素约束的月面建造综合选址是未来重要研究方向。有必要尽快开展适宜月面建造的候选点选址工作,服务未来月面工程的选址、设计和建造。

(3) 月表复杂环境下月基承载性能对月球建造影响

月壤的力学行为强依赖于重力环境和有效应力状态,现有研究表明模拟月壤在低应力状态下具有高剪胀角^[78]、非线性流变^[79]、高流动性^[80]等特点,其变形破坏特性与地面环境存在明显差异,因此,需研究月表复杂环境下(低重力、高真空、强辐射、极端温差等)月基的承载性能和破坏模式,充分认识月面建造结构物与月基的相互作用关系;其次,弱重力效应是决定月层承载性能的关键影响因素,常规1g重力环境下承载力计算方法难以适用月表低重力环境^[44,81],因此需建立考虑月表重力效应的月基承载

力计算模型,制作月表范围内月面建造候选区的承载力分布图,为月球建造活动开展提供科学支撑。

(4) 月面无外源性物质原位3D打印成型关键技术

月壤具备量大、无毒、易于开采等特点,被普遍认为是月面建造的重要潜在资源,但很多月壤打印成型技术都依赖于加入一定的黏结剂等辅助物质。如何减少对地球外供物质的依赖是支撑月面建造可持续发展的主要方向之一,尤其是建立月面完全无外源性物质的原位3D打印成型技术,是充分开发、利用月球的基础。首先,研究适应月球低重力、真空环境和极端温度变化的3D打印设备和技术,确保在月面环境中的稳定性和可靠性;再次,探索高效能和低能耗的打印技术,例如大范围太阳能聚光和储能技术,以提高月面建筑和基础设施的建造效率。这些研究将为月球基地的建设和长期驻留提供重要的技术支持。

(5) 自主无人“充气折展一层叠推土—烧结固化”太空建造方案

在月壤原位利用与自主无人太空建造方面,采用“原位建造驱动式,整合部分地球组件”的建造方式,是目前可行性最强、可靠度最高的月面建造方案,该方案既可以满足月面极端环境气密性要求,也可以抵御月表微陨石等外部因素的冲击,是未来月球基地建设的重要方向。首先,应研究轻质可展结构的充气折展机理;其次,应研发月壤开采、搬运、堆垒自主作业机器人,例如可变构型月面“勘探—开采—处理—烧结一体”月球车;再者,应研究月壤覆层结构多材料拓扑优化设计方法与协调受力机制,以确定覆土层厚度、烧结区域面积,从而提高月面建造效率。这些研究将为月球基地自主无人建造提供重要技术支持。

4 结语

月面建造是人类探测、利用、开发月球的发展方向。围绕用什么建的关键科学问题,利用月壤成型开展月面建造已成为主要方式,当前月壤成型也形成了常温成型、高温成型等不同的技术方式,但不同的成型方式在原位资源利用率、成型性能、技术难度等方面存在区别,本文重点对不同技术的优缺点进行了归纳和总结。围绕怎么建的关键科学问题,回顾了月球基地建造方案构想发展历程,对比分析了不同建造方案的特点,认为采用充气膜展开并铺设和烧结月壤的方式是最适宜月球基地建造的技术方

案,并给出了月球基地建造所需的环境要素及其约束。最后,总结了从资源勘测、月基承载安全、原位熔融成型、太空建造方案、建造科学选址等方面总结了月球资源原位利用及月球科研站建造面临的关键技术挑战。

作者贡献声明:

童小华:论文框架指导,论文写作与修改;
袁烽:图表制作,论文写作与修改;
郑虎:论文写作与修改;
晏雄锋:图表制作,论文写作与修改;
王超:图表制作,论文写作与修改;
谢欢:论文修改,论文校审;
许雄:论文修改;
徐聿升:论文修改;
陈鹏:论文修改;
魏超:论文修改。

参考文献:

- [1] CREECH S, GUIDI J, ELBURN D. Artemis: an overview of NASA's activities to return humans to the Moon [C]//2022 IEEE Aerospace Conference (aero). Big Sky: IEEE, 2022: 1-7.
- [2] 吴伟仁, 张哲, 敖显泽, 等. 深空物质资源利用现状与展望 [J]. 科技导报, 2023, 41(19): 6.
WU Weiren, ZHANG Zhe, AO Xianze, *et al.* Current status and prospect of deep space material resources utilization [J]. Science and Technology Bulletin, 2023, 41(19): 6.
- [3] 刘建忠, 李雄耀, 朱凯, 等. 月球原位资源利用及关键科学与技术问题 [J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 907.
LIU Jianzhong, LI Xiongyao, ZHU Kai, *et al.* Utilization of lunar in-situ resources and key scientific and technological issues [J]. China Science Foundation, 2022, 36(6): 907.
- [4] 裴照宇, 王琼, 姜生元, 等. 面向月球科研站的原位资源利用活动展望 [J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 9.
PEI Zhaoyu, WANG Qiong, JIANG Shengyuan, *et al.* Prospects of in situ resource utilization activities for lunar research stations [J]. Prospective Science and Technology, 2024, 3(1): 9.
- [5] 丁烈云, 周诚, 高玉月, 等. 地外建造研究进展与科学技术挑战 [J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 26.
DING Lieyun, ZHOU Cheng, GAO Yuyue, *et al.* Progress of off-site construction research and scientific and technological challenges [J]. Journal of Civil Engineering, 2024, 57(6): 26.
- [6] FATERI M, GEBHARDT A, KHOSRAVI M. Experimental investigation of selective laser melting of lunar regolith for in-situ applications [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. San Diego: ASME, 2013:1-6

- [7] 冯鹏, 包查润, 张道博, 等. 基于月面原位资源的月球基地建设技术[J]. 工业建筑, 2021, 51(1): 169.
FENG Peng, BAO Charun, ZHANG Daobo, *et al.* Lunar base construction technology based on in-situ resources on the lunar surface[J]. Industrial Building, 2021, 51(1): 169.
- [8] MCKAY D S, HEIKEN G, BASU A, *et al.* The lunar regolith[J]. Lunar Sourcebook, 1991, 567: 285.
- [9] CARRIER III W D. Lunar soil grain size distribution[J]. The Moon, 1973, 6(3): 250.
- [10] SOMRIT C, NAKAGAWA M. Simulation of agglutinates formation [C]//Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment. Houston: ASCE, 2006: 1-7.
- [11] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
OUYANG Ziyuan. Introduction to lunar science [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005.
- [12] BASU A, RIEGSECKER S E. Reliability of calculating average soil composition of Apollo landing sites [J]. New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed, Geophysical, and Sample Datasets, 1998(1): 20.
- [13] LI C, HU H, YANG M F, *et al.* Characteristics of the lunar samples returned by the Chang' E-5 mission [J]. National Science Review, 2022, 9(2): 188.
- [14] CAO K, DONG M, SHE Z, *et al.* A novel method for simultaneous analysis of particle size and mineralogy for Chang' E-5 lunar soil with minimum sample consumption[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(9): 1704.
- [15] SCHMITT H H, HEIKEN G, VANIMAN D, *et al.* Lunar sourcebook: a user's guide to the moon [M]. New York: Cambridge University Press, 1991.
- [16] GROMOV V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils[M]. Dordrecht: Springer, 1999.
- [17] 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.
- [18] HEYWOOD H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057, 72. [C]//Proceedings of the 2nd Lunar Science Conference. Houston: [s.n.], 1971: 1989-2001.
- [19] MAHMOOD A, MITCHELL J K, CARRIER III W D. Grain orientation in lunar soil [C]//Proceedings of the 5th Lunar Science Conference, Houston, Texas. New York: Press Pergamon Inc., 1974: 2347-2354.
- [20] CADENHEAD D A, BROWN M G, RICE D K, *et al.* Some surface area and porosity characterizations of lunar soils [C]//Proceedings of the 8th Lunar Science Conference, Houston, Texas. New York: Press Pergamon Inc., 1977: 1291-1303.
- [21] SHKURATOV Y G, BONDARENKO N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data[J]. ICARUS, 2001, 149(2): 329.
- [22] 李婵, 刘福江, 郑小坡, 等. 月表虹湾地区辉石及橄榄石含量反演[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013, 43(11): 1387.
LI Chan, LIU Fujiang, ZHENG Xiaopo, *et al.* Inversion of pyroxene and olivine content in Hongwan area on the lunar surface [J]. Science in China: Physics, Mechanics, Astronomy, 2013, 43(11): 1387.
- [23] PAPIKE J J, SIMON S B, LAUL J C. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 761.
- [24] 蔡伟, 李少林, 卢瑜, 等. 月球澄海玄武岩矿物成分研究[J]. 天文学报, 2018, 59(6): 51.
CAI Wei, LI Shaolin, LU Yu, *et al.* Study on the mineral composition of lunar Chenghai basalt [J]. Astronomical Journal, 2018, 59(6): 51.
- [25] 吴昭昀. 月球反射光谱学及应用[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 74.
WU Yunzhao. Lunar reflectance spectroscopy and applications [J]. Geological Frontiers, 2014, 21(6): 74.
- [26] KEULEN N, GARDE A A, JÖRGART T. Shock melting of K-feldspar and interlacing with cataclastically deformed plagioclase in granitic rocks at Toqquasap Nunaa, southern West Greenland: implications for the genesis of the Maniitsoq structure[J]. Tectonophysics, 2015, 662: 328.
- [27] WARREN P H, RUBIN A E. Pyroxene-selective impact smelting in ureilites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(17): 5109.
- [28] LAMBART S, BAKER M B, STOLPER E M. The role of pyroxenite in basalt genesis: Melt-PX, a melting parameterization for mantle pyroxenites between 0.9 and 5 GPa [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(8): 5708.
- [29] 靳亲国. 河南橄榄石的生产加工及开发应用[J]. 耐火材料, 2003, 37(2): 117.
JIN Qinguo. Production, processing and application of olivine in Henan [J]. Refractories, 2003, 37(2): 117.
- [30] 荆桂花, 肖国庆. 镁铝尖晶石基耐火材料的最新研究进展[J]. 耐火材料, 2004, 38(5): 347.
JING Guihua, XIAO Guoqing. Recent research progress on magnesium-aluminum spinel-based refractories [J]. Refractories, 2004, 38(5): 347.
- [31] 贺智勇, 洪彦若, 李林, 等. 氧化锆对刚玉-尖晶石浇注料热震稳定性的影响[J]. 耐火材料, 2004, 38(2): 73.
HE Zhiyong, HONG Yanruo, LI Lin, *et al.* Influence of zirconium oxide on the thermal shock stability of corundum-spinel castables [J]. Refractories, 2004, 38(2): 73.
- [32] LIU L, LI Z, LI W, *et al.* The melting characteristics of Vietnamese ilmenite and manganese ores used in chemical looping combustion [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 90: 102792.
- [33] 田键, 汤钊, 胡攀, 等. 羟基磷灰石复合及掺杂改性研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(4): 55.
TIAN Jian, TANG Fan, HU Pan, *et al.* Progress of hydroxyapatite composite and doping modification [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2021, 42(4): 55.
- [34] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, *et al.* Solar 3D

- printing of lunar regolith [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800.
- [35] ARSLAN H, BATISTE S, STURE S. Tensile Strength Properties of Lunar Soil Simulant JSC-1 [C]//Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior. Denver: ASCE, 2007: 1-8.
- [36] HASAN A, ALSHIBLI K A. Discrete element modeling of strength properties of Johnson Space Center (JSC-1A) lunar regolith simulant [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 23(3): 157.
- [37] LONG FOX J M, LANDSMAN Z A, EASTER P B, *et al.* Geomechanical properties of lunar regolith simulants LHS-1 and LMS-1 [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(12): 5400.
- [38] 蒋明镜, 奚邦禄, 孙德安, 等. TJ-1 模拟月壤承载特性物理模型试验研究 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(2): 167.
- JIANG Mingjing, XI Banglu, SUN De'an, *et al.* Experimental study on physical modeling of TJ-1 simulating the bearing characteristics of lunar soil [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2016, 44(2): 167.
- [39] 贺新星, 肖龙, 黄俊, 等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤 [J]. *地质科技情报*, 2011, 30(4): 137.
- HE Xinxing, XIAO Long, HUANG Jun, *et al.* Progress of simulated moon soil and CUG-1A simulated moon soil [J]. *Geoscience Intelligence*, 2011, 30(4): 137.
- [40] SCHREINER S S, DOMINGUEZ J A, SIBILLE L, *et al.* Thermophysical property models for lunar regolith [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(5): 1209.
- [41] FATERI M, PITIKARIS S, SPERL M. Investigation on wetting and melting behavior of lunar regolith simulant for additive manufacturing application [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2019, 31: 161.
- [42] 李雯, 徐可宁, 黄勇, 等. 基于 SLM 的模拟月壤原位成形技术 [J]. *北京航空航天大学学报*. 2019, 45(10): 1931.
- LI Wen, XU Koning, HUANG Yong, *et al.* SLM-based in-situ molding of simulated lunar soil [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(10): 1931.
- [43] ZOU M, FAN S, SHI R, *et al.* Effect of gravity on the mechanical properties of lunar regolith tested using a low gravity simulation device [J]. *Journal of Terramechanics*, 2015, 60: 11.
- [44] LEE H R, PARK H J, KIM D S. Bearing capacity of shallow footings in simulated lunar environments using centrifuge tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(7): 04018042.
- [45] KOBAYASHI T, OCHIAI H, SUYAMA Y, *et al.* Bearing capacity of shallow foundations in a low gravity environment [J]. *Soils and foundations*, 2009, 49(1): 115.
- [46] XIAO S, CHENG X, HOU M, *et al.* Analysis of experimental results on the bearing capacity of sand in low-gravity conditions [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, 34(2): 16.
- [47] OSIO-NORGAARD J, HAYES A C, WHITING G L. Sintering of 3D printable simulated lunar regolith magnesium oxychloride cements [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 183: 227.
- [48] 郭晓璐, 熊归砚, 王志浩. 地聚合物基月球混凝土及其 3D 打印原位建造设想 [J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(3): 209.
- GUO Xiaolu, XIONG Guiyan, WANG Zhihao. Geopolymer-based lunar concrete and its 3D printed in-situ construction [J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2020, 37(3): 209.
- [49] ALTUN A A, ERTL F, MARECHAL M, *et al.* Additive manufacturing of lunar regolith structures [J]. *Open Ceramics*, 2021(5): 100058.
- [50] WANG C, GONG H, WEI W, *et al.* Vat photopolymerization of low-titanium lunar regolith simulant for optimal mechanical performance [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(20): 29752.
- [51] LIU M, TANG W, DUAN W, *et al.* Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5829.
- [52] XIAO C, ZHENG K, CHEN S, *et al.* Additive manufacturing of high solid content lunar regolith simulant paste based on vat photopolymerization and the effect of water addition on paste retention properties [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 71: 103607.
- [53] CHEN H, NIE G, LI Y, *et al.* Improving relative density and mechanical strength of lunar regolith structures via DLP-stereolithography integrated with powder surface modification process [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(18): 26874.
- [54] YUAN P F, ZHOU X, WU H, *et al.* Robotic 3D printed lunar bionic architecture based on lunar regolith selective laser sintering technology [J]. *Architectural Intelligence*, 2022, 1(1): 14.
- [55] FATERI M, MEURISSE A, SPERL M, *et al.* Solar sintering for lunar additive manufacturing [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(6): 04019101.
- [56] 王超, 张光, 吕晓辰, 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.
- WANG Chao, ZHANG Guang, LÜ Xiaochen, *et al.* A preliminary investigation of laser melt molding process parameters for simulating lunar soil [J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2021, 38(5): 575.
- [57] 刘伟伟, 张弦, 王超, 等. 模拟月壤 3D 打印致密化成型研究 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(6): 66.
- LIU Yiwei, ZHANG Qin, WANG Chao, *et al.* Densification and molding of simulated lunar soil by 3D printing [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(6): 66.
- [58] 王锐. 月壤资源太阳光 3D 打印工程材料化利用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG R. Research on the materialization of moon soil resources for sunlight 3D printing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

- [59] SHEN T, YAO W, QUAN X. In-situ visualization of powder wrapping behavior in millimeter-scale-beam lunar regolith powder bed fusion [J]. *Powder Technology*, 2023, 425: 118552.
- [60] MEURISSEA, BELTZUNGJ C, KOLBEM, et al. Influence of mineral composition on sintering lunar regolith[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(4): 04017014.
- [61] ZHANG X, KHEDMATI M, KIM Y R, et al. Microstructure evolution during spark plasma sintering of FJS-1 lunar soil simulant[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, 103(2): 899.
- [62] SONG L, XU J, FAN S, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: Pore-forming and thermal conductivity[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(3): 3627.
- [63] DOMINGUEZ J A, WHITLOW J. Upwards migration phenomenon on molten lunar regolith: New challenges and prospects for ISRU[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(7): 2220.
- [64] TRAVITZKY N, BONET A, DERMEIK B, et al. Additive manufacturing of ceramic - based materials [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(6): 729.
- [65] KHOSHNEVIS B, BODIFORD M, BURKS K, et al. Lunar Contour Crafting-A Novel Technique for ISRU-Based Habitat Development [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.Reno: AIAA, 2004 :2005-2424.
- [66] LIN T D, SENSENEY J A, ARP L D, et al. Concrete lunar base investigation [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1989, 2(1): 10.
- [67] FISKE M, EDMUNSON J. Additive construction with mobile emplacement (ACME) 3D printing structures with in-situ resources[R]. Washington D C: NASA, 2017..
- [68] HOWE A, GIBSON I. MOBITAT2: A mobile habitat based on the trigon construction system[C]//Space 2006. San Jose: AIAA, 2006: 1-23.
- [69] ROUSEK T, ERIKSSON K, DOULE O. SinterHab [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 74: 98.
- [70] 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.
- [71] CECCANTI F, DINI E, DE KESTELIER X, et al. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil [C]//Proceeding of the 61st International Astronautical Congress IAC. Prague:IAF,2010:1-9.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] MAGOFFIN M, GARVEY J. Lunar glass production using concentrated solar energy [C]//Space Programs and Technologies Conference. Huntsville:AIAA,1990:3752-3572.
- [75] NAKAMURA T, VAN PELT A D, GUSTAFSON R J, et al. Solar thermal power system for oxygen production from lunar regolith[C]//AIP Conference Proceedings. Washington D C:American Institute of Physics, 2008, 969(1): 178-185.
- [76] HINTZE P, CURRAN J, BACK T. Lunar surface stabilization via sintering or the use of heat cured polymers [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA , 2009:1015-1015.
- [77] CHOW P Y, LIN T Y. Structural engineer's concept of lunar structures [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1989, 2(1): 1.
- [78] STURE S, COSTES N C, MCTIGUE D F. Mechanics of granular materials at very low effective stress levels[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1998, 11(3): 67.
- [79] CHENG X, XIAO S, CAO A S, et al. A review and analysis of granular shear experiments under low effective stress conditions[J]. *Granular Matter*, 2019, 21: 1.
- [80] HUANG Y, MAO W. First results derived from a drop-tower testing system for granular flow in a microgravity environment [J]. *Landslides*, 2013(10): 493.
- [81] NIKSIRAT P, DACA A, SKONIECZNY K. The effects of reduced-gravity on planetary rover mobility [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, 39(7): 797.