



工业建筑
Industrial Construction
ISSN 1000-8993, CN 11-2068/TU

《工业建筑》网络首发论文

题目: 基于月面原位资源的月球基地建造技术
作者: 冯鹏, 包查润, 张道博, 岳清瑞, 祁俊峰, 左洋
DOI: 10.13204/j.gyjzG20090813
网络首发日期: 2020-12-10
引用格式: 冯鹏, 包查润, 张道博, 岳清瑞, 祁俊峰, 左洋. 基于月面原位资源的月球基地建造技术. 工业建筑. <https://doi.org/10.13204/j.gyjzG20090813>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于月面原位资源的月球基地建造技术

冯鹏¹ 包查润¹ 张道博¹ 岳清瑞² 祁俊峰³ 左洋³

(1.清华大学, 北京 100084; 2.中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 3.北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

*通信作者 冯鹏, fengpeng@tsinghua.edu.cn

摘要 月球基地建造对人类长期驻月具有重要意义。本文调研了月球基地建造的环境条件和资源条件, 在调研基础上认为充分利用月壤进行原位建造是现实可行的技术方案, 具有方便经济、性能优越等优点。目前基于月壤的建造技术研究主要分为向下挖掘和向上搭建两类, 其中向上搭建技术有不同技术途径, 包括月壤混凝土、月壤烧结、月壤粘接、月壤袋约束等。基于对已有技术的分析, 本文提出一种新的月球基地原位建造方案, 综合利用月壤混凝土打印、月壤袋约束等技术, 进行主要采用原位资源进行自动化建造, 为月面建造提供了一个技术思路。

关键词 月球基地; 原位建造; 月壤混凝土; 月壤袋; 月壤烧结

DOI: 10.13204/j.gyzj.2020090813

CONSTRUCTION TECHNOLOGY FOR LUNAR BASES USING LUNAR IN-SITU RESOURCES

Feng Peng¹ Bao Charun¹ Zhang Daobo¹ Yue Qingrui² Qi Junfeng³ Zuo Yang³

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Central Research Institute of Building and Construction Co. Ltd, MCC, Beijing 100088, China;

3. Beijing Spacecrafts Co. Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract The construction of lunar bases is of great significance for long-term human presence on the moon. In this paper, the environmental and resource conditions regarding lunar base construction are reviewed and investigated. It is demonstrated that the in-situ construction using lunar regolith is a practical and feasible construction scheme provided the advantages including construction convenience and cost efficiency. The existing studies on construction technologies based on lunar regolith can be categorized into two groups: downward excavation and upward construction. In particular, the upward construction employs the different technologies including lunar regolith concrete, lunar regolith sintering, lunar regolith bonding and regolith bags. Based on the review and analysis, a novel lunar in-situ construction scheme is proposed, which comprehensively uses the technologies including 3D printed lunar regolith concrete and regolith bags, so as to realize the automatic construction using in-situ resource. It provides a new technological path for lunar base construction.

Key words lunar base; in-situ construction; lunar regolith concrete; regolith bag; lunar regolith sintering

0 引言

人类探月研究开始于上世纪 60 年代。1964 年 2 月, 美国徘徊者 6 号探测器在月球着陆, 人类首次实现探测器月面软着陆。1969 年 7 月, 美国宇航员阿姆斯特朗与奥尔德林登上月球, 人类首次实现载人登月并首次取回月壤^[1]。21 世纪以来, 各国陆续开展登月和驻月研究。美国 NASA 于 2005 年提出“世纪挑战”(Centennial Challenges), 内容包括 3D 打印空间站、太空机器人等^[2], NASA 又在 2019 年提出“阿尔忒弥斯”计划, 将月球基地建成时间定为 2028 年。俄罗斯在探月计划中也宣布开展月球基地研究^[3], 此外欧洲、日本、韩国和印度等也参加到探月研究中, 月球基地建造成为探月任务中重要的工程需求和技术难题。

基金项目: 国强研究院人工智能与机器人领域通用类自由探索研究项目(2019GQG1004)。

作者简介: 第一作者: 冯鹏, 男, 1977 年出生, 博士, 教授。

网络首发时间: 2020-12-10 11:56:31 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20201209.1340.007.html>

我国于 2004 年启动探月工程，分为“绕”、“落”、“回”三阶段^[4]。2007 年 10 月发射的嫦娥一号使我国实现绕月飞行，2013 年 12 月发射的嫦娥三号使我国实现探测器月面软着陆^[5]，而计划发射的“嫦娥五号”将实现采样返回，完成探月工程第三阶段目标^[6]。随着探月工程三阶段目标基本完成，月球基地建造成为我国推进探月工程的必要需求。

月球基地能够为宇航员驻月生活、科学研究、资源开发提供安全环境，是人类在月球长期生存、不间断观测和试验、月球资源开发的基本保障。同时，深入月球基地建造研究还能够促进空间技术发展^[7]，利用月面高真空、微重力、无磁场等特殊条件和各种月面资源，推进太空材料、空间制造技术、太空机器人等研究，带动国家科技实力全面发展。

月面建造难点体现在环境、资源、运输和技术方案等方面^[8]，月面建造既要克服苛刻的月面环境，也受到月面资源条件和空间运输条件的制约，目前也缺少成熟可靠的技术方案。本文在国内外月面建造条件和建造技术研究的基础上，结合笔者开展的研究，对月球基地原位资源建造技术进行了综述。

1 月面环境条件

月面环境条件与地面环境不同，主要有真空、微重力等 8 个方面，表 1 总结了月球特殊环境特点及其对基地建造可能产生的影响。

表1 月面环境及影响^[9-14]
Table1 Lunar environmental impacts

影响因素	分析	影响
真空	月面无大气	无风荷载（有利） 需要封闭结构
微重力	月球表面重力加速度 $1.62\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	降低自重荷载（有利） 降低结构稳定性 降低振捣密实程度和水泥水化速率
辐射	包括宇宙辐射、月球辐射和二次辐射 宇宙辐射最强，约每年 300mSv 月球地磁场弱，不能屏蔽宇宙辐射 辐射区工作者最大允许辐射量每年 50mSv 一个月球日等于 28 个地球日，昼夜时间长	危害人员健康 影响仪器精度
温度	赤道温度 $95\text{K}\sim 387\text{K}$ ，极地温度 $50\text{K}\sim 200\text{K}$ 温度变化快，最高一小时上升 150K	增加结构温度内力 降低材料耐久性
微陨石	直径 1mm 微流星体通量为 $1.35\times 10^{-3}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 陨石平均速度 $20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 陨石平均密度 $0.5\sim 2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	危害结构安全
月震	平均每年月震 500 次 最大震级里氏 5~6 级	需要抗震措施和结构验算
月尘磨蚀性	月壤风化层颗粒粒径小于 $100\mu\text{m}$ 月尘吸附在建筑表面将造成破坏	需要防尘除尘措施
月尘带电性	月尘带电，其电荷可能来自连接键断裂或太阳风 带电粒子易悬浮，悬浮性质随昼夜交替而改变 太阳高能粒子活动期间（SEPs），负电荷可达到 10^3V	需要防静电措施

在各项环境因素中，真空和微重力的影响最大，二者将影响月球基地设计建造全过程，此外，月面辐射、极端温度和微陨石等也对月球基地设计和建造有较大影响。月面建造环境严苛，严重危害宇航员生命安全，采用人工建造的难度较大，因此月球基地需要大量自动化建造技术的支持。

2 月面资源条件

由于太空运输成本的高昂，月面建造普遍采用原位资源建造技术（ISRU）为主、地球运输材料为辅的建造方案^{[15][16]}，因此分析月面资源尤为重要。目前常规的月面原位资源有月壤、月岩，和从月岩中加工提取的金属等，此外验证月面存在水冰资源的工作仍在进行。

2.1 月壤

月壤是指月球表面风化层中粒径小于 10mm 的风化物，厚度一般为 $4\sim 5\text{m}$ ，在较为古老的地质区域可达 $10\sim 15\text{m}$ 。其颗粒细密，平均粒径约 $100\mu\text{m}$ ^[15]。月壤成分与其所在区域的月岩成分密切相关，

基本包括矿物碎屑（辉石、橄榄石、斜长石、钛铁矿等），原始结晶岩碎屑（玄武岩、斜长岩等），角砾岩碎屑，玻璃，粘合集块岩，陨石碎屑（陨硫铁、橄榄石、辉石、锥纹石等），化学成分主要是二氧化硅、氧化钛、氧化铝、氧化铁、氧化铝、氧化钙等^[17]。月壤的力学性能自上世纪 70 年代开始被研究，其经典土力学性能指标如表 2 所示：

表2 月壤力学性能^[15]
Table2 Mechanical properties of lunar regolith

材料参数	参数取值
平均密度/g·cm ⁻³	1.7
最大密度/g·cm ⁻³	1.9
孔隙率/%	45
粘聚力/kN·m ⁻²	0.1~1.0
内摩擦角/°	30~50



图 1 CUG 系列 (0~25μm) 模拟月壤
Fig.1 CUG series (0~25μm) simulated lunar regolith

月壤是最主要的原位资源，未经处理的月壤主要用于建筑表面覆土，用来维持温度、屏蔽辐射和抵抗陨石冲击，固化的月壤可以作为结构材料。NASA 开展了月壤热力学性能、防辐射性能等研究，测量了阿波罗计划月壤样品的导热系数^[18]、比热容^[19]、反射率^[20]等。目前月壤性能研究尚有不足，例如基于研究得到的保温覆土厚度没有统一结论，且差异较大，模拟结果在 30cm^[21]、4m^[22]、15m^[23]间不等。

2.2 月岩

月岩的主要矿物成分是辉石、橄榄石、斜长石、钛铁矿和尖晶石，其中辉石和斜长石可以提供 CaO，但对水泥强度起主要作用的 C₃S 和 C₂S 在月面矿物中含量较低^[24]。月岩可以直接作为结构材料如混凝土骨料，也可以制备玄武岩纤维和玄武岩筋材等。

2.3 水冰

目前没有直接观测或获取到月面水冰资源，但通过光谱探测等手段证明月球很可能具有水冰资源，为月面建筑用水提供了可能性^[25]。水资源探索方面，NASA 的月球轨道飞行器探测结果表面月球永久阴影区内有水冰资源^[26]，月壤样本分析也表面月球内部含有水^[27]。需要指出的是，现阶段水资源探索只是为未来月面的生产生活提供取水的可能性，但与之对应的经济性及其可靠性仍有待后续论证。

2.4 金属

月面元素质量丰度最高的前七种元素依次为氧、硅、铝、钙、铁、镁、钛。在月面所有元素中，铁、铝、硅、镁、钛、镍，以及微量元素铬、锰、钼、钒等可以作为原位制造合金的原材料，但其他常用于合金的元素如碳等储量不高^[28]。

在月面资源中，月壤是最容易获得的原位资源，利用月壤进行建造既是充分利用原位资源的可行之举，也是防治月面扬尘问题的必要措施。

3 月面建造技术研究现状

基于上述环境条件和资源条件，各国从上世纪 90 年代开始对月球基地原位资源建造开展了一系列研究，技术方案不断更新完善。基于月壤的建造技术主要分为向下挖掘和向上搭建两方面，其中向上搭建的技术包括月壤混凝土、月壤烧结、月壤粘接、月壤袋约束等。

3.1 挖掘建造技术

月面挖掘建造是指在月面采用挖掘等技术方式，建造地下或半地下式月球基地。例如 ESA 提出半地下式月球基地方案^[29]，原位资源占比超过 90%^[30]。NASA 曾提出在熔岩管中建立月球基地^[31]，Angelis^[32]认为熔岩管中温度稳定，辐射剂量在安全范围，避免了大部分环境问题。Boldoghy 等^[23]提出将月球基地建立在山谷中，依靠两侧岩石墙和顶部砖石拱顶和覆土屏蔽辐射和微陨石，山谷中温度变化也较小。Toth^[33]对山谷基地结构进行了有限元模拟，验证了结构抗冲击荷载能力。笔者也提出了一种半地下式月球基地建造方案，如图 2 所示，使用月壤袋进行基坑支护。

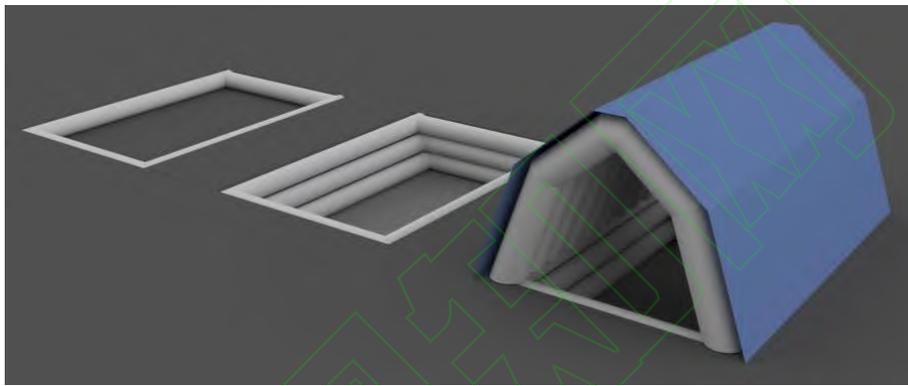


图 2 半地下式月球基地
Fig.2 Semi-underground lunar base

在挖掘方法研究中，Bernold^[34]指出低重力环境将对常规挖掘方法造成不便，Dick^[35]认为爆破是月面最有效的常规挖掘方法，因此常规挖掘技术不适合月球环境，月面挖掘需要研发特殊挖掘技术。学者针对不同应用场景提出多种挖掘技术。如 Ruess^[15]出正压吸尘器，使用高压气体收集表层月壤，能够有效降低月壤挖掘过程的扬尘问题，Nekoovaght^[36]提出使用微波在岩石表面制造微裂纹，降低挖掘能量需求，从而降低运输质量和成本，Covey^[37]提出电磁式挖掘装置，吸引铁镍颗粒和磁铁矿颗粒等，通过精确调整电磁脉冲时间，能够将非磁性物质随磁性部分共同挖掘。这些方法能够适应月面环境，但应用场景各有侧重，实际可能需要多种方法协同使用。

3.2 月壤混凝土固化及 3D 打印技术

月壤混凝土固化及打印是采用月壤水泥基材料进行 3D 打印的建造技术。混凝土打印需要材料满足特定性能，提高原位资源占比，还需要打印工艺满足结构稳定和精度要求，并能适应月面环境。

在材料方面，挤出过程要求材料具有可泵送性、可打印性和可建造性，其中可打印性是指材料挤出后维持形状的能力^[38]，可建造性是指底层材料局部屈服应力大于重力应力，这也要求打印速度、单层打印时间、打印层高满足一定的关系^[39]。研究人员提出多种适合挤出打印的水泥，如铝酸盐水泥与传统硅酸盐水泥混合^[40]、快硬硫铝酸盐水泥^[41]等，早期强度可达到要求。此外 NASA 提出用硫作为无水固化剂，加热后冷却形成硫混凝土。硫在月面元素重量丰度中排第 11 位，可以通过克劳斯反应制备硫、水和氧气^[24]。硫混凝土不需要长期养护，适合月球基地使用^[42]。NASA 试验表明，硫混凝土抗冲击性能有待提高^[43]。郭晓潞等经过调研认为月壤混凝土具有良好的耐极端环境性能，并能满足月球环境的施工需求^[44]。

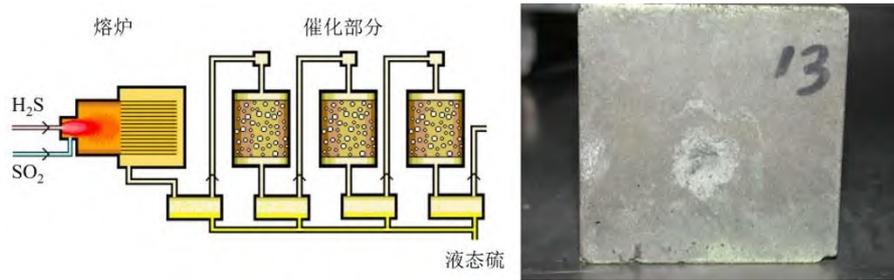


图3 月面制硫工艺^[24]、冲击荷载试验后的硫混凝土试块^[43]
Fig.3 Sulfur production process and sulfur concrete sample (after hypervelocity impact testing)

在打印工艺方面，当前研究的基本思路是月壤材料通过喷头逐层挤出形成结构。目前提出了多种创新方法，如轮廓打印^{[45][46]}、滑动成型^[47]、模板打印^[48]等。轮廓打印（Contour Crafting）是打印构件轮廓，再在内部浇筑混凝土，该方法施工方便，无层间粘接问题^{[45][46]}，轮廓打印设备概念图如图4所示，一台轮廓打印机器人正在使用月壤混凝土打印拱形结构。滑动成型是使打印头沿构件方向滑动打印，优点是可以在常规钢筋笼上施工^[47]。模板打印是先打印模板或钢筋网，再浇筑或打印混凝土，这种方法解决了传统模板施工中形状自由度低的问题^[48]，也可以布置钢筋加固结构^[49]。

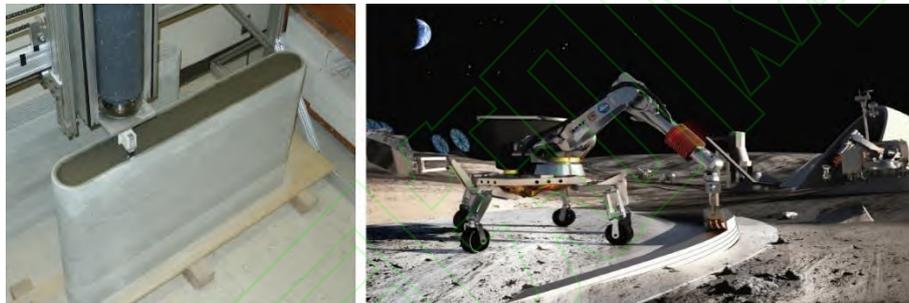


图4 NASA 轮廓打印试件及设备概念图^[46]
Fig.4 NASA contour crafting sample and envisioned equipment

月壤混凝土打印的技术优势包括结构自由度高，复杂构件建造成本降低，提高材料效率^[50]，实现更多功能，同时便于使用功能梯度材料进行建造^[51]。

混凝土打印的技术难点主要包括混凝土月面水化问题、加固增强问题、层间性能问题等。

1) 月面的微重力环境会影响水泥颗粒的均匀固结和水化^[45]，真空环境会使水迅速挥发，造成混凝土水化出现问题。针对这一问题，目前研究提出干拌加蒸汽喷湿法（DMSI）、无水硫月壤混合法（WSRM）等。DMSI 法使用高温高压蒸汽撞击水泥颗粒，增加水化速度，与传统湿拌法相比水泥用量低、水化时间短、强度高、和易性好^[52]。WSRM 法即硫固化法，早期强度高，耐酸、盐腐蚀性好^[45]。

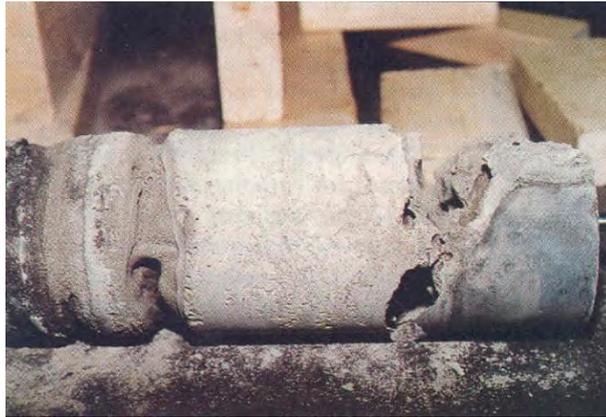


图5 NASA 微重力环境制备的混凝土^[45]
Fig.5 NASA concrete sample prepared in microgravity environment

2) 受打印过程限制, 打印构件的破坏主要是拉伸强度与抗压强度之比较低, 极限拉伸应变较低, 目前研究提出多种加固方法改善破坏行为。加固方法包括布置钢筋、掺加纤维等。布置钢筋包括轮廓打印^[43]、双侧打印^[53]、分段打印并粘接外部钢筋^[54]、钢丝外包裹混凝土协同打印^[55]、预应力钢筋^[56]等, 布置钢筋加固方法可以使用机器人自动完成, 提高自动化建造能力^[57], 适合月面建造。掺加纤维即使用工程水泥基复合材料 (ECC) 或超高性能纤维混凝土 (UHPFRC)^[58], 但纤维对打印材料的工作性影响较大。此外还可以通过结构设计避免构件受拉, 如建造穹顶结构^[59]等, 月球基地可以综合利用以上方法加固结构。

3) 由于材料需要在极短时间内从可泵送的液态转变为能够承受自身重量的准固态, 在分层打印过程中前一层的稠度迅速增加, 阻碍了下一层材料在界面处的流动, 造成层间性能出现问题。层间粘接效果差会导致构件强度降低、耐久性差等问题^[60], 目前提高层间强度的方法有在层间铺设水泥砂浆^[61]、通过异形喷头增加层间接触面积和机械咬合等^[62]。

3.3 月壤烧结及拼装技术

月壤烧结及拼装技术是采用激光等方法加热月壤, 使月壤在高温下烧结固化形成月壤砖, 再进行拼装的建造技术。

针对烧结技术, 当前研究已经验证了激光、太阳能、微波、铝热反应等烧结方法的可行性, 月壤砖的抗压强度有待进一步测试。激光烧结技术在 NASA 获得了系统研究, 提出月壤在 610℃ 时开始玻璃化转变, 1100℃ 时完全熔化, 激光能量密度为 2.12J mm^{-2} 时烧结效果最好, 液相扩散和固体开裂情况最少^[63]。宋蕾等研究了真空环境对模拟月壤激光烧结的影响, 提出真空环境下低温相组分更易形成和蒸发, 引起烧结体密度先增大后减小, 从而可能降低成品力学性能^[64]。Khoshnevis 还提出选择性抑制烧结 (SIS) 和选择性分离烧结 (SSS), 选择性抑制烧结是同时烧结大量月壤, 并使用抑制剂抑制月壤砖边缘烧结 (如图 6 白色区域) 的技术, 可以快速制备大量榫卯结构的月壤砖^[65]。选择性分离烧结是逐层铺设烧结材料和抑制剂进行烧结的技术, 相关设备概念图如图 6 所示, 该设备可以在月面原位烧结带有自锁结构的瓷砖, 建造着陆平台^[66]。

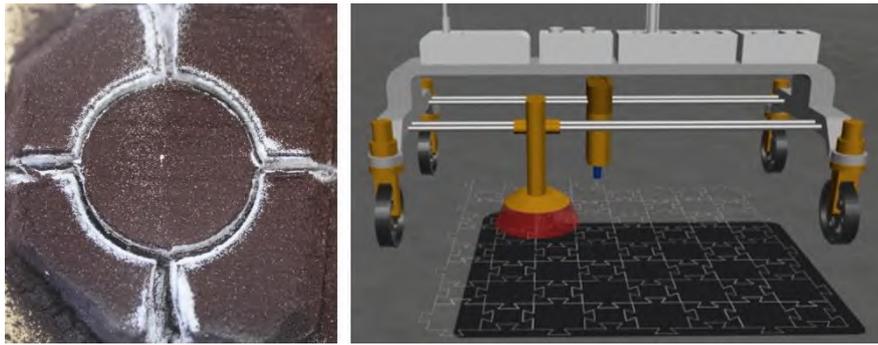


图6 Khoshnevis 选择性抑制烧结成品、选择性分离烧结设备概念图^{[65][66]}
Fig.6 SIS sample and visioned SSS equipment (proposed by Khoshnevis)

其他烧结固化技术也有相应试验研究。Nakamura 等^[67]提出太阳能直接烧结技术，使用集中器阵列收集太阳能，用非成像光学元件或水蒸气完成烧结。这种方法不消耗外部能源，还可以制备氧气^[68]。Taylor 等^[79]提出微波烧结技术，他们认为月壤成分与微波加热方法高度匹配，并通过阿波罗计划采集的月壤进行烧结试验，验证了微波能使月壤产生“瞬态液相”，使局部迅速升温实现烧结。Allan 等^[70]认为月壤介电性能是微波烧结的控制因素，并进行了烧结试验。这项技术对月壤特性需求较高，不同性能的月壤烧结效果不同，对试验验证和实际应用有一定阻碍。ESA 提出太阳光或聚焦氙气灯烧结技术，是目前唯一进行月壤模拟物抗压强度试验的研究，但抗压强度较低^[71]。Corrias 等提出自蔓延高温合成 (SHS) 技术，以镁或铝作为还原剂，以 FeTiO_3 或 Fe_2O_3 作为添加剂，固化后抗压强度可以达到 25MPa ^[72]。除了逐点或逐区域烧结，还有将月壤完全融化的熔铸固化技术^[73]，这种方法固化强度最高，但耗能最多，如 NASA 使用熔融月壤拔出的方法制作月壤纤维，或熔融制作月壤增强筋，用于加固混凝土，可以降低地面发射成本^[43]；邢丹等采用熔融牵引法制成了单丝抗拉强度超过 1400MPa 的月壤基连续纤维，验证了使用月壤原位制备连续纤维的可行性^[74]。

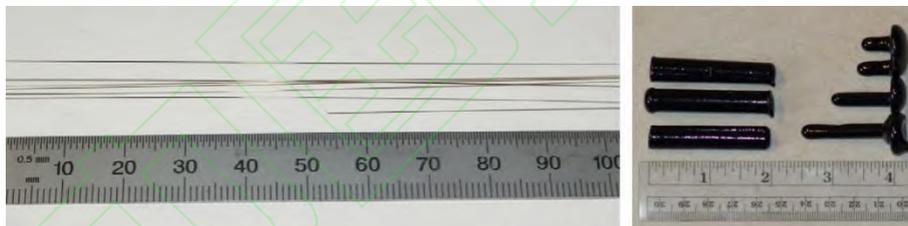


图7 NASA 月壤纤维及月壤增强筋^[43]
Fig.7 NASA Glass fiber and glass rebar

月壤砖烧结完成后还需要进行拼装，Zhou 等^[75]设计了一种月面建造机器人 CSM，能够实现月壤砖自动化烧结和拼装，目前已经完成了月球基地缩尺建造试验。徐卫国等^[76]设计了一种机械臂自动砌筑系统，能够拼装砌块并在层间涂抹砂浆，实现异型墙体的砌筑。

月壤烧结及拼装的技术优势包括砌块品控好，形状自由度高，建造过程自动化程度高等。月壤砖在封闭环境内生产，可以采用充保护气体、加压、振捣密实等方法提高质量，还可以设计多孔、榫卯结构，拼装多种结构形式，减轻自重和粘接材料用量^[77]，满足更多建筑需求。月壤烧结的技术难点包括烧结难度大，耗能高，强度低。NASA 激光烧结所使用的激光功率为 50W ，送粉速度仅 12.36g min^{-1} ^[63]，烧结每吨月壤的能耗约 156kWh ，烧结后月壤块没有宏观缺陷，但缺少抗压强度测试^[72]。ESA 烧结后月壤砖抗压强度仅 5MPa ，孔隙率较高，层间结合较弱^[71]。此外月面温差大，造成较大的温度应力，月壤砖表面易脆性开裂，且开裂结构难以修复，采用原位烧结时难以控制温度^[78]。

3.4 月壤粘接技术

粉末粘接技术 (D-shape) 运用于月面建造最早由 ESA 提出，使用胶结剂对月壤粉末逐层粘接形成结构。ESA 已经通过真空试验验证了胶结剂能够在真空环境中避免蒸发和冻结。ESA 同时设计了

基于 D-shape 技术的月球基地结构方案，结构内部为充气气囊，外部为月壤粘接结构，厚 1.5m，由两台机器人进行无人建造^[29]。Roedel 等^[79]还提出生物固化技术，使用蛋白质粘接固化月壤，固化后抗压强度最高可达 12MPa。

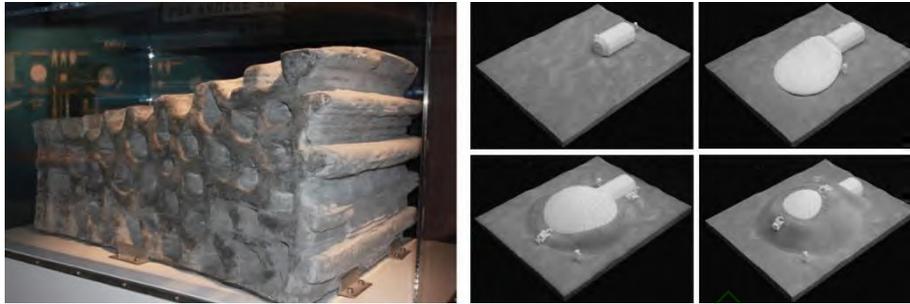


图 8 ESA D-shape 打印成品及结构效果图^[29]
Fig.8 ESA D-shape sample and structural rendering

月壤粘接的技术优势是构件自由度高，未被粘接的颗粒在成型过程中可以充当临时支撑，使这种技术能够生产具有悬臂部分的构件，此外月壤粘接技术可以实现较高的成型精度^[80]。月壤粘接的技术难点包括胶结剂用量较大，建造成本提高，逐层粘接粉末或生物固化的粘接速度都比较低，难以大规模建造，生物粘接在真空和极端温度环境下的可行性也有待验证。

3.5 月壤袋约束技术

月壤袋约束是使用柔性编织袋装填月壤形成结构的建造技术。NASA 针对材料、装填、结构等方面均开展了相关研究。其在众多材料中发现聚酯液晶聚合物（Polyester liquid crystal polymer, VECTRANT[™]）在抗拉强度、抗弯折性能等测试中表现最优；同时 NASA 设计了一种月壤袋装填系统，如图 9a 所示，使用螺杆装置挤出月壤，以获得较好的密实性和成型效果；在结构方面，NASA 提出多个月壤袋顶部连接的拱结构，均取得了不错的成型效果^[81]。笔者也开展了月壤袋研究，对月壤袋结构成型效果和承载能力进行了优化。除了结构建造，月壤袋还可用于结构修复，例如 Soleymani^[82]提出使用机器人和小型编织袋对结构进行临时性修复。



图 9 (a) NASA 月壤袋装填系统^[81]；(b) NASA 月壤袋试件^[81]；(c) 笔者的月壤袋试件
Fig.9 (a) NASA regolith bag filling system, (b) NASA regolith bag specimen, (c) regolith bag specimen made by the authors

月壤袋约束的技术优势包括建造耗能低、发射质量轻，若能通过合理设计和创新工艺使结构达到承载力要求，月壤袋技术将有希望成为最经济方便的月面建造技术。月壤袋约束的技术难点是抗压强度低，现有固化强度作为主体结构可能无法满足设计要求。此外现有施工工艺需要大量人工操作，自动化程度最低。

3.6 其他月壤建造技术

除了以上基于月壤挖掘和固化的建造技术，还有学者提出了膜结构、框架结构、穹顶结构等，其技术方案中也部分使用了月壤材料。Vanderbilt^[83]和 Chow^[84]最早提出充气膜结构，表面覆盖月壤。Matsumoto^[85]认为充气膜结构较大时，膜材料应力水平过高，因此提出了月壤预应力混凝土结构，采

用模块化设计理念，满足多样的结构使用需求。Malla^[86]提出框架覆膜结构，主体使用铝制桁架，表面覆土，并进行了结构动力学分析，证明表面覆土显著降低结构自振频率。Bernold^[87]等进一步提出镁框架月壤袋结构，使用更易开采的镁作为框架，外层覆土使用月壤袋施工。NASA 还考虑使用充气混凝土穹顶结构（Binishell），这种结构使用充气气囊作为混凝土模板，建造过程简单，地面建造技术成熟^[47]。这些建造技术的可行性和经济性有待进一步研究。

基于上述建造技术可以看出，月壤固化是利用月壤进行建造的关键技术，部分月壤固化方法的固化强度和能耗对比如表 3 所示，其中月壤熔铸的固化强度最高，同时单位耗能最大，月壤袋约束的单位能耗和发射质量都较小，固化强度较低。

表3 月壤固化方案对比^[72,73,79,81]

Table3 Comparisons of lunar regolith solidification schemes

固化方案	抗压强度/MPa		单位能耗/kWh·T ⁻¹	发射质量/kg·T ⁻¹
激光、微波烧结	7.6	156	--	--
熔铸	538	360	--	--
熔融硫烧结	24	38	250~350	260
镁 SHS 烧结	10.2	--	230	80~220
铝 SHS 烧结	13.8	--	3	
生物粘接	6.3~12.5	--		
月壤袋约束	2~3	--		

注：“--”表示数值较小，可以忽略。

月球基地建造尚未形成成熟统一的技术方案，仍需针对月面环境和资源条件进行大量创新和研究。

4 新型月面建造技术方案

基于现有月面建造方案的调研分析，结合我国月球探索整体规划和月面资源使用需求，本文提出一种月面原位资源建造方案，涵盖月球基地不同建筑类型的建造规划。

建筑物与构筑物施工采用月壤砖、月壤袋与充气气囊组合利用方案。月壤砖使用月壤混凝土 3D 打印技术制成，作为主体结构构件；月壤袋由柔性编织袋填充月壤制成，作为主体和围护结构；充气气囊采用自动充气展开技术，形成内部支撑结构；月壤砖和月壤袋等构件均使用机械臂进行拼装。考虑到月面建造特点，本方案在材料上使用月面容易获得的月壤作为主要建筑材料，搭配从地球发射的充气气囊、月壤袋等轻质辅助材料，施工上使用生产过程自动化程度高的月壤砖、月壤袋作为主体结构、充气气囊作为施工过程中内部支撑，满足原位资源建造和自动化建造的需求。目前充气气囊和机械臂拼装技术比较成熟；混凝土打印技术已有大量研究，普通混凝土打印已经得到大量应用，但在月壤材料性能、月面打印设备等方面还需要一定研究；月壤袋技术原理简单，技术风险较低，但在性能和自动化方面也需要进一步验证。

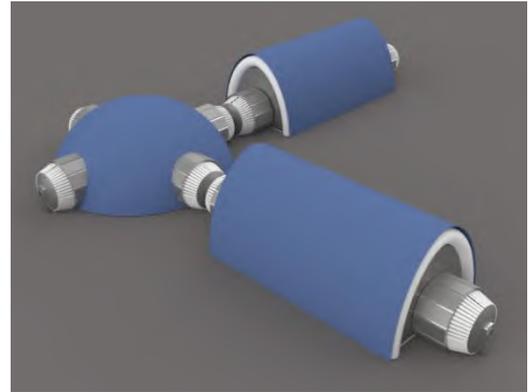
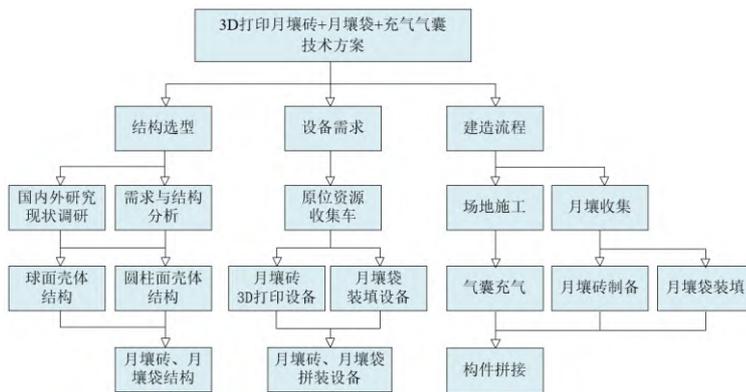


图 10 月球基地技术方案及结构效果图
Fig.10 Technical scheme and structural rendering of lunar base

场地施工采用激光烧结、微波烧结与振捣密实综合利用方案。场地的施工特点包括作业面积大、连续性强、平整度要求高，根据不同场地需求和月面环境特点，综合利用三种固化方法。激光烧结在三种方法中精度最高，但能耗较大，效率较低，适用于制备月壤地砖及处理具有较高固化需求的小范围场地，如着陆平台等；微波烧结连续性好，可用于道路施工；振捣密实即利用机械振捣压实月壤，可用于区域防尘和大量场地预处理等。

5 结 论

本文总结了月球基地建造的环境条件和资源条件，在此基础上本文认为基于月壤的原位资源建造是较为现实可行的技术方案，进而对月壤建造技术进行了调研和对比，包括挖掘建造和多种固化搭建技术等。在当前研究中，成熟统一的技术方案尚未形成，仍需开展大量研究与创新。根据现有建造条件和建造技术调研，本文提出一种新型月面原位资源建造方案，综合利用月壤混凝土打印、月壤袋约束、激光烧结和微波烧结等技术，该技术方案大量使用原位资源，降低发射成本，同时自动化程度高，可实施性强。

当前月球基地建造技术存在两个关键技术问题，一是月壤原位利用技术研究，需要在现有研究基础上提高固化强度和原位资源占比，降低建造能耗，并结合建筑设计对技术细节进行完善；二是无人建造技术研究，考虑到环境条件的特殊性，建造过程应该实现无人建造，并验证真空微重力环境下的技术可行性。目前世界各国正积极推进探月计划，月球基地建造成为各国探月计划的研究重点，若能在以上关键技术中实现突破，将推动月面建造技术不断发展，最终实现我国登月驻月的伟大构想。

参考文献

- [1] 张弛. 冷战中的美苏载人登月竞赛[D]. 陕西师范大学, 2011.
- [2] Comstock D, Petro A. NASA's Centennial Challenges contributions to ISRU[C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2009: 1205.
- [3] 鲁暘筱懿, 平劲松, V. Shevchenko. 俄罗斯“月球-全球”和“月球-资源”探月任务[J]. 航天器工程, 2013, 22(04): 103-108.
- [4] 年中国的航天[J]. 航天器工程, 2006(04): 1-6.
- [5] 欧阳自远. 嫦娥四号月背软着陆的重大意义[J]. 世界科学, 2019(03): 28-30.
- [6] 嫦娥五号将于今年年底发射[J]. 红外, 2019, 40(01): 50.
- [7] 于登云, 葛之江, 王乃东, 肖林, 林宗坚. 月球基地结构形式设想[J]. 宇航学报, 2012, 33(12): 1840-1844.
- [8] 丁烈云, 徐捷, 骆汉宾, 蔡礼雄. 月面建造工程的挑战与研究进展[J]. 载人航天, 2019, 25(03): 277-285.
- [9] Benaroya H, Bernold L. Engineering of lunar bases[J]. Acta Astronautica, 2008, 62(4-5): 277-299.
- [10] Mottaghi S, Benaroya H. Design of a lunar surface structure. I: design configuration and thermal analysis[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2014, 28(1): 04014052.
- [11] Vrakking V R, Guo J, Schubert D. Design of a Deployable Structure for a Lunar Greenhouse Module[C]//43rd International Conference on Environmental Systems. 2013: 3352.
- [12] Chandran S B R, Rajesh S R, Abraham A, et al. SEP events and wake region lunar dust charging with grain radii[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(1): 483-489.
- [13] Criswell D R. Lunar dust motion[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1972, 3: 2671.

- [14] Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, et al. The global surface temperatures of the moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment[J]. *Icarus*, 2017, 283: 300-325.
- [15] Ruess F, Zacny K, Braun B. Lunar In-Situ Resource Utilization: Regolith Bags Automated Filling Technology[C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. 2008: 7678.
- [16] Benaroya H, Indyk S, Mottaghi S. Advanced systems concept for autonomous construction and self-repair of lunar surface ISRU structures[M]//Moon. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 641-660.
- [17] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 中国宇航出版社, 2005
- [18] Keihm S J, Peters K, Langseth M G, et al. Apollo 15 measurement of lunar surface brightness temperatures thermal conductivity of the upper 1 1/2 meters of regolith[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(3): 337-351.
- [19] 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]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1973, 4: 2481.
- [20] 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]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1972, 3: 3069.
- [21] Vaniman D, Reedy R, Heiken G, et al. The lunar environment[J]. *The lunar Sourcebook*, CUP, 1991: 27-60.
- [22] Jolly S D, Happel J, Sture S. Design and construction of shielded lunar outpost[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1994, 7(4): 417-434.
- [23] Boldoghy B, Kummert J, Varga T, et al. Practical realization of covering lunar buildings for ensure levelled temperature environment[C]//Lunar and Planetary Science Conference. 2007, 38: 1380.
- [24] Toutanji H, Glenn-Loper B, Schrayshuen B. Strength and durability performance of waterless lunar concrete[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2005: 1436.
- [25] Anand M. Lunar water: a brief review[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2010, 107(1): 65-73.
- [26] Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C, et al. Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4175-4195.
- [27] Boyce J W, Liu Y, Rossman G R, et al. Lunar apatite with terrestrial volatile abundances[J]. *Nature*, 2010, 466(7305): 466.
- [28] Ruess F, Schaenzlin J, Benaroya H. Structural design of a lunar habitat[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2006, 19(3): 133-157.
- [29] 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.
- [30] Hou X, Ding T, Chen T, et al. Constitutive properties of irregularly shaped lunar soil simulant particles[J]. *Powder technology*, 2019, 346: 137-149.
- [31] Horz F. Lava tubes-potential shelters for habitats[C]//Lunar bases and space activities of the 21st century. 1985: 405-412.
- [32] Angelis D G, Wilson J W, Cloudsley M S, et al. Lunar lava tube radiation safety analysis[J]. *Journal of radiation research*, 2002, 43(Suppl): S41-S45.
- [33] Tóth A R, Bagi K. Analysis of a Lunar Base Structure Using the Discrete-Element Method[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 24(3): 397-401.
- [34] Bernold L E. Experimental studies on mechanics of lunar excavation[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1991, 4(1): 9-22.
- [35] Dick R D, Fournery W L, Goodings D J, et al. Use of Explosives on the Moon[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1992, 5(1): 59-69.
- [36] Nekoovaght P, Gharib N, Hassani F. Microwave assisted rock breakage for space mining[C]//ASCE's Aerospace Division, the 14th Earth and Space Conference. St. Louis, USA. 2014.
- [37] Covey S D. An Electromagnetic Asteroid Regolith Excavator—Preliminary Results[M]//Earth and Space 2016: Engineering for Extreme Environments. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016: 523-529.
- [38] Wangler T, Roussel N, Bos F P, et al. Digital concrete: a review[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105780.
- [39] Wangler T, Lloret E, Reiter L, et al. Digital concrete: opportunities and challenges[J]. *RILEM Technical Letters*, 2016, 1: 67-75.
- [40] Shakor P, Sanjayan J, Nazari A, et al. Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 398-409.
- [41] 简喜强, 张涛, 霍亮, 等. 水泥基建筑 3D 打印材料的制备及应用研究[C]//中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品分会第九届理事会成立大会暨第十届全国高性能混凝土学术研讨会, 2015.
- [42] Grugel R N, Toutanji H. Sulfur “concrete” for lunar applications—Sublimation concerns[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1): 103-112.
- [43] Fiske M R, McGregor W, Pope R, et al. Lunar In Situ Materials - Based Surface Structure Technology Development Efforts at NASA/MSFC[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2007, 880(1): 871-877.
- [44] 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 (03) : 209-217.
- [45] 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. 2005: 538.
- [46] Khoshnevis B, Carlson A, Leach N, et al. Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure build-up[J]. 2016.
- [47] Lloret Fritschi E, Reiter L, Wangler T, et al. Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork-inline measurement and control[J]. *HPC/CIC Tromsø 2017*, 2017: Paper no. 27.
- [48] Duballet R, Dirrenberger J, Baverel O. Space truss masonry walls with robotic mortar extrusion[C]//Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2018, 2018(7): 1-7.
- [49] Hack N, Wangler T, Mata-Falcón J, et al. Mesh mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork[C]//Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), Paper. 2017 (19).
- [50] Gosselin C, Duballet R, Roux P, et al. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders[J]. *Materials & Design*, 2016, 100: 102-109.
- [51] Duballet R, Gosselin C, Roux P. Additive manufacturing and multi-objective optimization of graded polystyrene aggregate concrete structures[M]//Modelling Behaviour. Springer, Cham, 2015: 225-235.
- [52] Lin T D. Lunar concrete made with the dry-mix/steam-injection method[J]. *SPACEV*, 1996, 1: 552-599.
- [53] Scott C. Chinese construction company 3D prints an entire two-story house on-site in 45 days[J]. *3dprint.com*, 2016.
- [54] Asprone D, Auricchio F, Menna C, et al. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 218-231.
- [55] Bos F P, Ahmed Z Y, Wolfs R J M, et al. 3D printing concrete with reinforcement[M]//High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Springer, Cham, 2018: 2484-2493.

- [56] Lim S, Buswell R A, Le T T, et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes[J]. *Automation in construction*, 2012, 21: 262-268.
- [57] Pfändler P, Wangler T, Mata-Falcón J, et al. Potentials of Steel Fibres for Mesh Mould Elements[C]//RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer, Cham, 2018: 207-216.
- [58] Bao Y, Xu M, Soltan D, et al. Three-Dimensional Printing Multifunctional Engineered Cementitious Composites (ECC) for Structural Elements[C]//RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer, Cham, 2018: 115-128.
- [59] Costanzi C B, Ahmed Z Y, Schipper H R, et al. 3D Printing concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure[J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 395-404.
- [60] Van Der Putten J, De Schutter G, Van Tittelboom K. The effect of print parameters on the (micro) structure of 3D printed cementitious materials[C]//RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer, Cham, 2018: 234-244.
- [61] Marchment T, Sanjayan J, Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification[J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107684.
- [62] Zareiyani B, Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete[J]. *Automation in Construction*, 2017, 83: 212-221.
- [63] Krishna Balla V, Roberson L B, O'Connor G W, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2012, 18(6): 451-457.
- [64] 宋蕾, 徐佼, 唐红, 范树迁, 刘建忠, 李雄耀, 刘基权. 模拟月壤成型研究现状[J]. *矿物学报*, 2020, 40(01): 47-57.
- [65] Khoshnevis B, Zhang J, Fateri M, et al. Ceramics 3D printing by selective inhibition sintering[C]//Solid Free Form Symposium (SFF). 2014.
- [66] Khoshnevis B, Carlson A, Thangavelu M. ISRU-based robotic construction technologies for lunar and martian infrastructures[J]. 2017.
- [67] Nakamura T, Senior C L. Solar thermal power for lunar materials processing[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2008, 21(2): 91-101.
- [68] Nakamura T, Smith B. Solar power system for lunar ISRU applications[C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010: 1162.
- [69] Taylor L A, Meek T T. Microwave sintering of lunar soil: properties, theory, and practice[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(3): 188-196.
- [70] Allan S, Braunstein J, Baranova I, et al. Computational modeling and experimental microwave processing of JSC-1A lunar simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 26(1): 143-151.
- [71] Meuris A, Makaya A, Willsch C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800-810.
- [72] Corrias G, Licheri R, Orrù R, et al. Self-propagating high-temperature reactions for the fabrication of Lunar and Martian physical assets[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 70: 69-76.
- [73] Happel J A. Indigenous materials for lunar construction[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1993, 46(6): 313-325.
- [74] 邢丹, 葱雄宇, 郭泽世, 岳秀, 郝斌, 梁存光, 顾轶卓, 陈涛, 王瑞, 马鹏程. 模拟月壤制备连续纤维的可行性研究[J/OL]. *中国科学: 技术科学*: 1-9[2020-10-22].
- [75] 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.
- [76] 罗丹, 徐卫国. 参数化砖墙的新型建造方法研究[J]. *建筑技艺*, 2017(07): 110-112.
- [77] Bassler J, Bodiford M, Hammond M, et al. In Situ Fabrication and Repair (ISFR) Technologies; New Challenges for Exploration[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006: 350.
- [78] Thangavelu M, Adhikari P. MPIT: Minimally Processed ISRU Technology Structures for Rapid Extraterrestrial Settlement Infrastructure Development[C]//AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. 2017: 5208.
- [79] Roedel H, Lepech M D, Loftus D J. Protein-regolith composites for space construction[J]. *Earth and Space*, 2014, 2014: 291-300.
- [80] Xia M, Nematollahi B, Sanjayan J. Compressive strength and dimensional accuracy of portland cement mortar made using powder-based 3D printing for construction applications[C]//RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer, Cham, 2018: 245-254.
- [81] Smithers G A, Nehls M K, Hovater M A, et al. A one-piece lunar regolith bag garage prototype[J]. 2007.
- [82] Soleymani T, Trianni V, Bonani M, et al. Autonomous construction with compliant building material[M]//Intelligent Autonomous Systems 13. Springer, Cham, 2016: 1371-1388.
- [83] Vanderbilt M D, Criswell M E, Sadeh W Z. Structures for a lunar base[C]//Engineering, construction, and operations in space. ASCE, 1988: 352-361.
- [84] Chow P Y, Lin T Y. Structures for the Moon[C]//Engineering, construction, and operations in space. ASCE, 1988: 362-374.
- [85] Matsumoto S, Namba H, Kai Y, et al. Concrete structure construction on the Moon[J]. 1992.
- [86] Malla R B, Chaudhuri D. Dynamic analysis of a 3-D frame-membrane lunar structure subjected to impact[J]. *Earth & Space*, 2008: 1-10.
- [87] Bernold L E, Benaroya H. Early Lunar Structures, Engineering[J]. *Encyclopedia of Lunar Science*, 2018: 1-9.