

# 月壤原位资源的月球基地3D打印技术

陈 材<sup>1</sup> 张道博<sup>2</sup> 祁俊峰<sup>1</sup> 冯 鹏<sup>2</sup> 左 洋<sup>1</sup>

(1 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

(2 清华大学, 北京 100084)

**文 摘** 月球基地建设面临高真空、强辐射、极端温度等苛刻环境条件和资源受限约束,具有重要的科研价值。针对未来月球科研站的建设需求,本文采取上行资源与月壤原位资源相结合的建设思路,对月球基地构型、建筑构件、设备、能源以及建造方法进行了研究,并对成型工艺及基础性能进行了初步验证。针对建筑物和构筑物外层围护结构施工,提出了一套利用充气气囊、3D打印月壤砖和月壤袋三者结合的新型技术方案,并设计了相应的具有榫卯结构的月壤砖和拱轴线骨架形式的夹芯结构月壤袋。研究表明,内拉+外约束形式制作的月壤袋,拱顶承载力1 kN,构件尺寸误差约9.5%;3D打印月壤混凝土平均抗压强度为31.6 MPa,平均劈裂抗拉强度为2.0 MPa,达到了C20混凝土强度水平。月壤3D打印技术可为月球基地建设提供一种可能的发展途径。

**关键词** 月球基地,月壤,原位资源利用,3D打印

中图分类号:TU528.1

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.007

## 3D Printing Technology of Lunar Base Based on In-situ Resources of Lunar Regolith

CHEN Cai<sup>1</sup> ZHANG Daobo<sup>2</sup> QI Junfeng<sup>1</sup> FENG Peng<sup>2</sup> ZUO Yang<sup>1</sup>

(1 Beijing Spacecrafts Co. Ltd., Beijing 100094)

(2 Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The construction of a lunar base faces harsh environmental conditions such as high vacuum, strong radiation, and extreme temperatures, as well as resource constraints, which holds significant scientific research value. In response to the construction requirements of future lunar research stations, this paper adopts a construction approach that combines upstream resources brought from the earth and in-situ resources available on the moon. And the lunar base configuration, architectural components, equipments, energy sources, and construction methods are investigated, the preliminary validation of the formability and fundamental performance are conducted. For the construction of the buildings and their outer enclosure structures, a novel technical method is proposed by utilizing inflatable membranes, 3D printed lunar regolith bricks and lunar regolith bags, corresponding lunar regolith bricks with mortice and tenon structure as well as sandwich structure lunar regolith bags with arch axis are designed. The results indicate that the lunar regolith bags produced through internal tension and external constraint can withstand a load of 1 000 N, with a component size error of approximately 9.5%. The average compressive strength of 3D printed lunar regolith concrete is 31.6 MPa, and the average tensile strength is 2.0 MPa, reaching the strength level of C20 concrete. This lunar regolith 3D printing technology offers a potential pathway for the construction of lunar bases.

**Key words** Lunar base, Regolith, In-situ resource utilization, 3D printing

### 0 引言

我国嫦娥探月工程已成功完成“绕”“落”“回”三

阶段,2020年12月嫦娥5号实现了月壤采样返回。

2021年6月,中俄联合发布了《国际月球科研站路线

收稿日期:2023-11-17

第一作者简介:陈材,1983年出生,博士,高级工程师,主要从事增材制造及微电子互连技术的研究工作。E-mail:chencaiv529@163.com

图(V1.0)》和《国际月球科研站合作伙伴指南(V1.0)》,正式启动了国际月球科研站的合作。2021年12月探月工程四期立项,明确了我国将在2030年前后研制建设月球科研站基本型的目标。2024年6月25日嫦娥6号实现了月球背面采样返回,共采集月球样品1 935.3 g。深入探测和开发月球、建立月球基地或深空探测中转站,能够促进航天技术从空间探测向空间开发和利用的转变,推动技术革命,带动我国科技水平的全面提升。

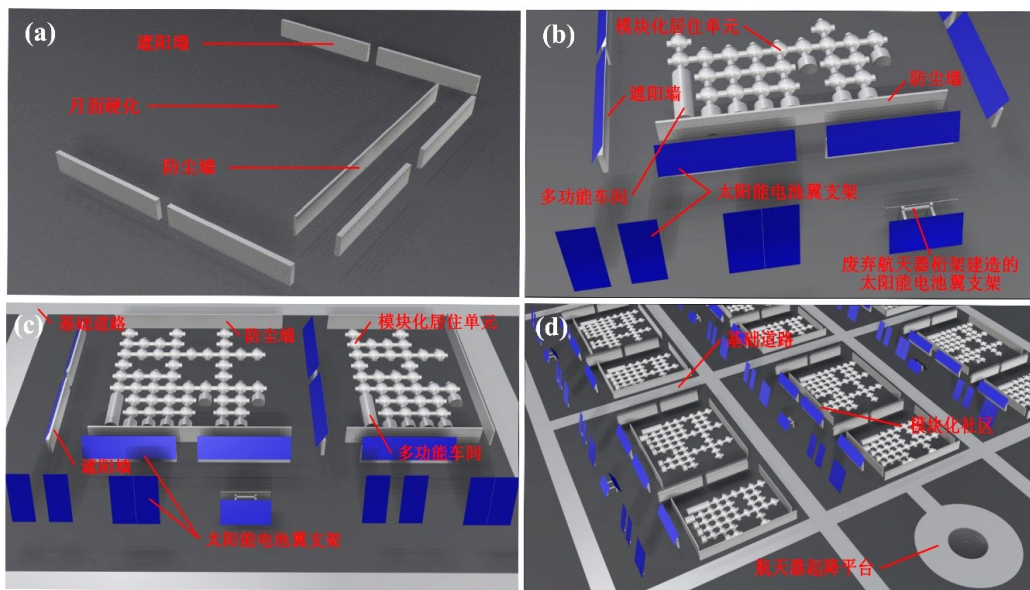
面对月球高真空、微陨石、强辐射和极端温度的环境,基地建筑内部需要密封结构,而建筑外层需要具备耐射线、防陨石撞击和极端温度的围护结构。文献[1]表明,从地球获取的建材运输成本高达50 000~90 000 USD/kg,且以目前有限的运输能力,将严重限制基地的规模和可扩展性。因此,采用月球蕴藏的资源,即原位资源利用是解决高昂成本和基地可持续发展问题的主要途径<sup>[2]</sup>。研究表明,月壤可以作为建筑月球基地的基础材料<sup>[3-30]</sup>。采用月壤3D打印技术,只需携带少量外加剂,即可制造月球基地建造所需的承力和防护部件,并能充分发挥3D打

印技术近净自由成形的优势,节约成本。NASA和ESA等基于月壤原位资源,研究了微波/激光烧结、D-Shape、Contour Crafting等3D打印技术建造月球基地,已经取得一定进展<sup>[4-14]</sup>。近几年我国在月壤原位资源利用方面的研究逐步增多<sup>[15-30]</sup>,开展了如月球基地方案规划、月壤激光/微波/太阳能烧结、月壤混凝土开发等研究工作。总体来说,月球基地构型与建造途径处于研究讨论阶段,尚缺乏系统性的理论研究,工程验证仍有待开展。

基于此,本文提出基于月壤3D打印的月球基地总体设计方案和具体建造技术,并开展月壤3D打印初步试验,拟对推进我国月球科研站建设具有借鉴意义。

### 1 月球基地总体设计

根据建造类型,月基大型设施可分为场地、建筑物和构筑物三大类。其中,场地是建造建筑物和构筑物的基础,建筑物(如居住基地)和构筑物(如设备停放棚)是月基大型设施的主体部分。月基大型设施按功能又可具体分为遮阳墙、防尘墙、太阳翼支架、多功能车间、模块化居住单元、基础道路、航天器起降平台等七大部分。



注:(a)初期;(b)中期;(c)后期;(d)远期。

图1 月基大型设施设计方案及按阶段建设规划图

Fig. 1 Design scheme and construction plan for lunar base

场地包括基础道路和航天器起降平台,属支持性设施。基础道路平整硬化,可以减少带静电月尘对机械设备的影 响,提高月球车的运动速度和效率。航天器起降平台用于基地起降航天器,提供合适的起降条件。激光烧结、微波烧结等3D打印技术可用于道路铺设及地基施工<sup>[23,27]</sup>。

大型建筑物主要为所设计的模块化居住单元和多功能车间,可为宇航员提供适宜的生活工作环境,

包括维持稳定的室内温度、隔绝宇宙射线辐射和防护微陨石撞击等。

大型构筑物中遮阳墙可减弱强辐射对设备和人体的伤害,避免建筑向阳面和背阳面的显著温差应力,从而提高建筑耐久性。防尘墙能够有效阻挡带静电月尘侵入精密设备及月基结构薄弱部位,保证基地的正常运行。太阳翼支架起到固定支撑太阳翼的作用,支架基础部分可以利用月壤3D打印技术建造。

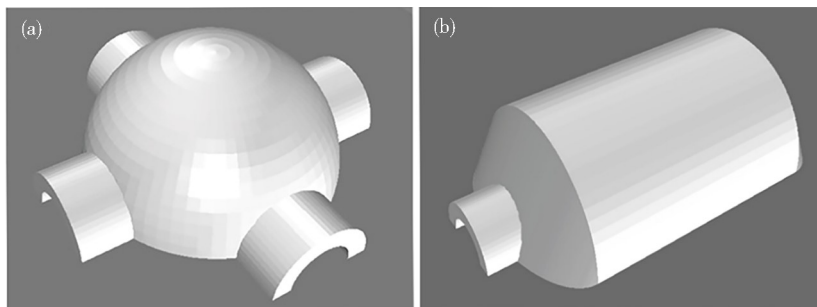
按照月基大型设施的需求优先次序及建造难易程度,可分四个阶段逐步建设。初期,硬化路面及建筑物地基,并建造早期遮阳墙、防尘墙;中期,建造多功能车间、模块化居住单元和太阳翼支架,支撑宇航员的短期(三个月以内)居住需求;后期,建设航天器起降平台,扩建月基大型设施,满足宇航员的长期(一年以上)居住,形成月基小型社区;远景阶段,持续扩建月球基地社区,形成大型社区集落,满足百名以上基地人员的半永久或永久居住,拥有一定的自生产能力,能够自给自足。

## 2 月球基地3D打印技术研究

针对月球基地建筑物及构筑物的3D打印,采用组合式建造方法,综合利用充气气囊、月壤袋、月壤砖等结构进行建造。以充气气囊作为内部支撑结构,同时提供人类工作生活所需的温度、大气压等适宜环境;将月壤填充至特制柔性编织袋,制作成月壤袋,作为月基大型设施的主体结构;采用月壤混凝土打印月壤砖,堆砌形成地基、外围维护等辅助结构,从而实现月基大型设施的建造。下面从结构选型、

设备需求、建造流程等方面进行具体分析。

从结构选型考虑,由于月壤砖由月壤混凝土打印形成,呈现抗压不抗拉的特点;月壤袋为编织袋约束内部月壤的夹芯结构,内部月壤材料主要承受剪力和压力,外部编织袋主要承受拉力和弯矩,具有较好抗压性能的同时能够承受一定的拉力,因此,应尽量避免抗拉或抗弯构件的结构形式。而壳体结构在外部荷载作用下的受力状态主要为双向受压,且能以较小的构件厚度覆盖大跨度空间,适合作为月基大型设施一体式的大跨结构。针对于模块化居住单元和多功能车间的特点,分别采用如图2所示的球面壳和圆柱壳结构形式,相互之间通过连接通道进行连接,拱形弧面(球状)结构形式在热交换、力学性能等方面具有较大的优势,月壤袋内部由于存在天然极小的空隙结构,有利于形成一种高效隔热形式。多功能车间能够根据空间使用情况在纵向和横向上调整建筑面积,适用于机械设备存放和工作试验,而居住单元采用球面形设计,具有旋转对称性,兼顾了居住舒适度和面积可调性。



注:(a)模块化居住单元;(b)多功能车间。

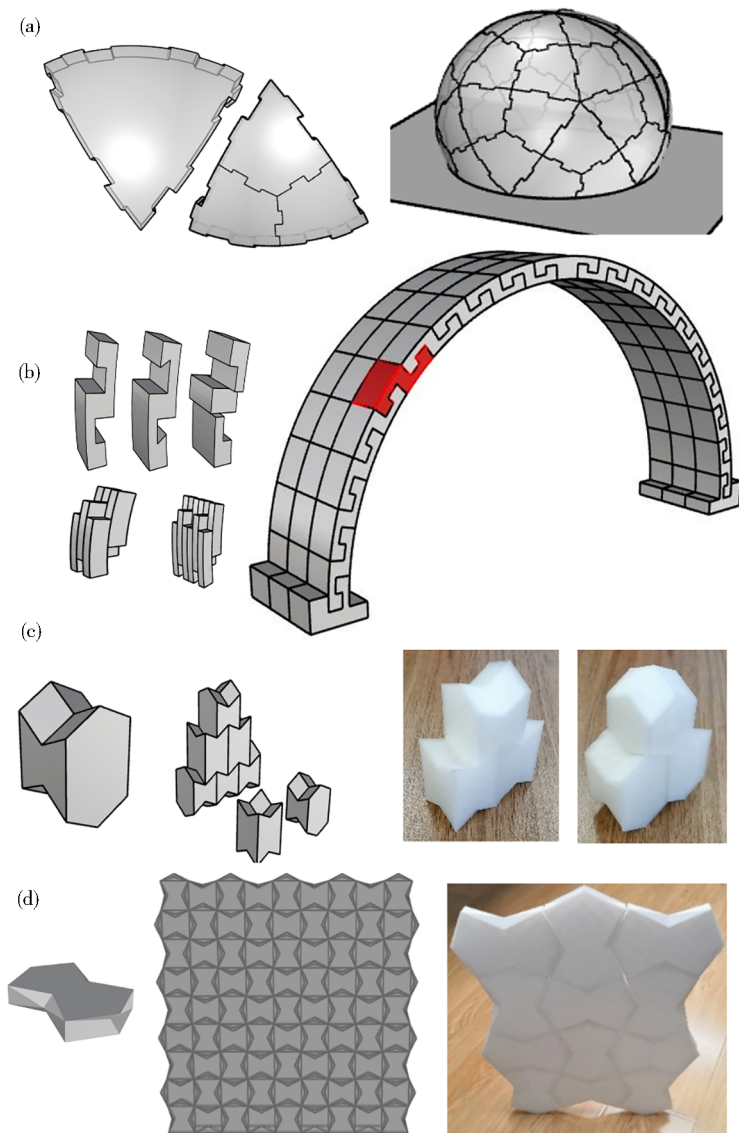
图2 月基大型设施的结构形式

Fig. 2 Configuration of large-scale facilities for the lunar base

对于模块化居住单元,考虑采用同种形状砌块拼接成球面壳体,砌块需要具有可打印性、可安装性、可自锁性,易于施工和拼接。选择能够实现单种图形球面密铺的正二十面体作为基础,设计了图3(a)中2种砌块:第一种砌块为正二十面体由外接球球心向球面投影所得的壳体单元,砌块边缘设计榫卯结构提供约束,砌块无明显易局部破坏区域,砌块尺寸约为3 m;第二种砌块是在砌块一的基础上进一步切分,使得每块砌块的尺寸约为2 m,制造难度降低,适用性更高。

对于多功能车间,面向圆柱面壳体设计了2类共5种榫卯结构砌块,见图3(b)。定义径向方向为圆柱面壳体的轴向方向、拱面面内外方向为圆柱面壳体截面的内外侧方向。第一类是采用内外扣的榫卯结构,细分为平端头、斜端头及局部侧移3种构型。平端头砌块可沿径向或拱面外侧方向拼装,安装灵活

度较大,对3D打印精度和机械臂的施工精度要求较低。斜面端头能更有效地限制砌块在弯矩作用下向截面外的滑出,防止拱脚向外滑移或从跨中拔出,但对成型精度要求更高,特别是斜面端头之间需良好契合才能实现理想的稳固。侧移设计增加了两榫之间的榫卯部位,加强了圆柱面壳体的整体性。此3种砌块由于存在榫卯部位的分割,拱面方向高度减半,存在剪切破坏和弯曲破坏的风险,但沿径向方向没有被削弱,具有良好的抗侧刚度。但由于拼接方向的原因,平端头砌块存在壳体跨中受集中荷载作用下导致砌块沿拱面面外方向滑脱的情况,而斜端头砌块能够有效避免拱面面外与面内方向的分离。局部侧移砌块在平端头砌块基础上增加了径向设计,避免了平端头砌块和斜端头砌块相邻两榫拱之间无约束的问题。在施工方面,上述3种砌块不需要外加支撑或辅助机械臂,能够依靠砌块之间的约束作用



注:(a)球面壳体砌块设计;(b)柱面壳体砌块设计;(c)梁柱砌块设计;(d)墙板砌块设计。

图3 模块化居住单元结构设计

Fig. 3 Structural design of modular residential unit

仅通过堆砌机械臂完成拼装过程。综上,内外扣榫卯砌块优点是打印方便,拼装容易,对精度要求不高,施工过程简单,其中局部侧移砌块由于榫间榫卯使整体性能更优。另一类是采用卡槽式的榫卯结构。砌块A为单榫,通过三层错动实现卡槽固定连接,拼装中两个砌块可以沿拱面面外方向推进,对机械臂的施工精度要求较低,但对3D打印精度有一定要求,需要支撑结构。砌块B形状上等同于2个砌块A,通过五层错动实现卡槽榫卯,提高了径向方向相邻砌块间的连接作用。此2种砌块由于存在榫卯部位的分割,径向方向高度减半,可能存在剪切破坏和弯曲破坏的风险,但沿拱面方向没有被削弱,具有良好的面内抗侧刚度。但由于砌块拼接方向的原因,砌块之间无法提供有效约束,接头处仅有摩擦力,容易形成局部转动,可能存在由于壳体跨中受集中荷

载作用导致砌块沿拱面方向滑脱的情况。

图3(c)和(d)中分别示出了梁柱砌块和墙板砌块设计,分别作为承重柱体和遮阳墙/防尘墙的建筑基础构件。结构安装相对简单,对3D打印精度和机械臂的施工精度要求一般。其中墙板砌块垂直墙面的承载力较弱,还需进一步优化。图中采用FDM工艺打印了塑料件验证了拼装性。

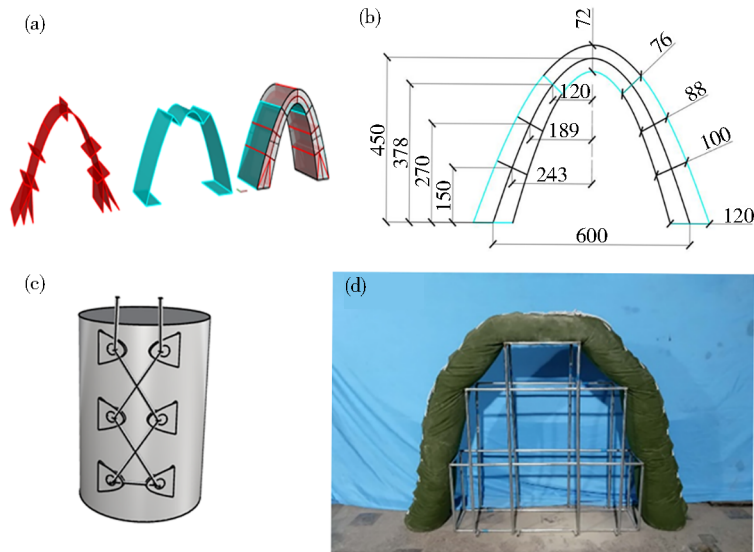
月壤袋为编织袋约束内部月壤的夹芯结构,结构骨架为拱轴线形式,月壤袋设计及实物如图4所示,拱高450 mm,拱脚跨600 mm,截断面最大宽度120 mm,最小宽度72 mm,沿纵向方向长300 mm,设计容积30.16 L。考虑到月壤袋对于可建造性、尺寸精度、强度性能等需求,将袋体分为三部分组件:表皮(灰色)、连接(绿色)、内拉(红色),三部分组件彼此缝合在一起。其中表皮作为月壤袋外围结构,用于约束内部月壤,连接位

于受拉侧,用于加强结构的受拉性能,内拉连接在袋子内部,用于控制结构关键变形。

缝制了锦纶布料的月壤袋,内部采用细砂(密度约 $1\ 500\ \text{kg}/\text{m}^3$ )填充,实际填装质量 $54\ \text{kg}$ 。在整个缝制、装填、封闭、加载过程中,内拉未出现破坏,对于限制月壤袋的变形发挥了一定作用,但无内拉部位的变形较大,内拉布置还需要进一步优化调整。为增强月壤袋的力学性能,采用后张法增加外部约束,对比测试了约束前后月壤袋的尺寸、拱顶承载力,外部无约束月壤袋拱顶中心高度 $300\ \text{mm}$ ,柱脚中心距 $550\ \text{mm}$ ,拱顶承载力 $100\ \text{N}$ ;外部约束后月壤袋拱顶中心高度 $440\ \text{mm}$ ,柱脚中心距 $580\ \text{mm}$ ,拱顶承载力 $1\ \text{kN}$ ,增加外部约束后月壤袋承载能力显著提升,构件尺寸误差约为 $9.5\%$ 。初步验证了内拉+外约束制作月壤袋的技术可行性。

从设备需求分析,所需设备包括月壤运输车、月壤3D打印系统、月壤袋填充设备和拼装机械臂。月

壤运输车,用于采集和运输月壤,配置太阳能或核能用于驱动,保证月壤打印时所需的持续供料。月壤3D打印系统用于打印月壤砖,由月壤筛选、月壤搅拌、月壤泵送和打印设备等部件组成。打印设备主要由三轴移动桁架式或多轴机械臂式组成,并针对月面环境做适应性改造,其中混凝土3D打印设备需考虑混凝土料成形及固化过程的可控环境,由于受月面能源和设备尺寸等限制,打印的月壤砖尺寸不宜过大,主要打印小型构件。月壤袋填充设备,用于将月壤填充到由地面运送的特制柔性月壤袋中,袋体采用适应月面环境的优异材料如凯夫拉纤维等。月壤袋填充设备应满足建造所需的高度和跨度,填充月壤时需要振捣压实,并配备密封组件将填充完的月壤袋进行封口处理。拼装机械臂负责拾取月壤袋或月壤砖,送至预设位置沿设计路径进行拼装,完成月基大型设施壳体的建造。



注:(a)表皮、连接及内拉构型;(b)尺寸设计;(c)后张法外部约束示意;(d)填充后实物。

图4 月壤袋

Fig. 4 Lunar regolith bag

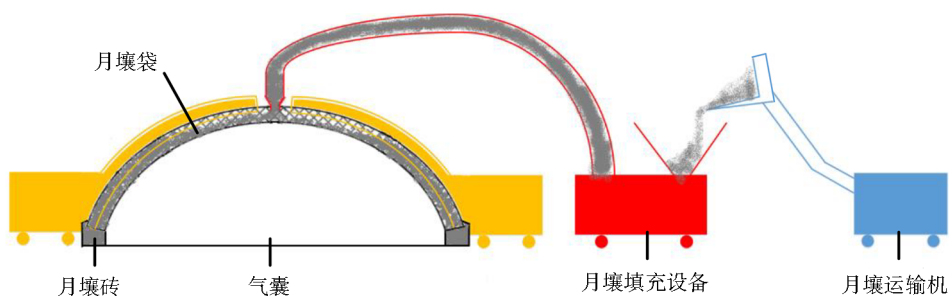


图5 月壤袋填充设备示意图

Fig. 5 Schematic diagram of regolith bag filling equipment

从建造流程分析,建造过程分为六个步骤:场地施工、气闸舱安放、气囊充气、月壤袋制作、月壤砖3D打印、结构拼装。首先通过对建设场地进行平整和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第1期

基础施工,气闸舱可取自到达月面的废弃航天器,采用弹射或者机械运输的方式安放到指定位置,向保存在气闸舱内的气囊充气,充气成型为半圆柱状或

半球状。月壤3D打印系统同步打印月壤砖,作为大型设施的中层壳体及地基等辅助部位,月壤填充设备充分填充的月壤袋被机械臂铺覆在气囊外围,作

为壳体的主体承重结构。可以在月壤袋表面喷洒适量黏结剂,用于增强层间连接从而进一步提高整体性。

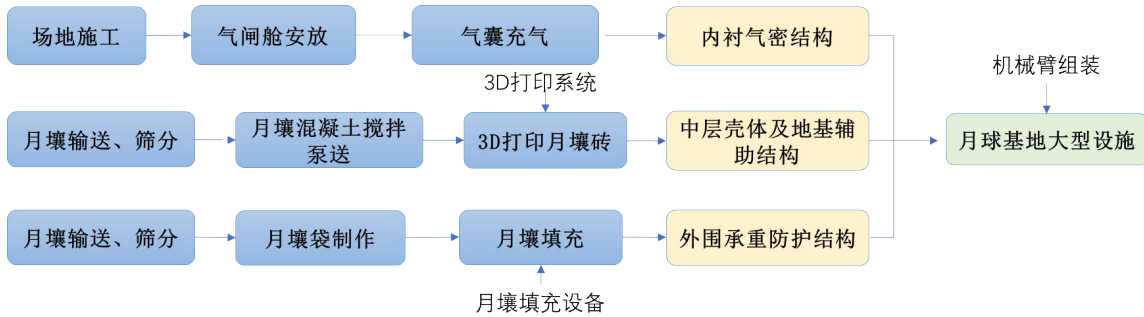


图6 月基大型设施建造流程

Fig. 6 Construction process of large-scale facilities for the lunar base

能源方面,可采用化学储能能、核能、太阳能等能源。空间核能应用方面已有大量研究,如美国的SP-100布雷顿能量系统(113.9 kW),应用于火星表面的核反应堆 MSR 系统(100 kW)等;俄罗斯和日本在月球表面或火星表面应用的核反应堆,功率达到几十至几百千瓦。综合运用化学储能能、核能、太阳能等能源,建议以核能为主,解决月基大型设施3D打印的能源需求。

从关键环节上考虑,月基大型设施建造设备需满足月面1/6重力、高真空、大温变、强辐照等环境以及低能耗要求。月壤砖和月壤袋需要保证成型尺寸及精度、构件强度、耐久性等要求。月壤袋跨度尺寸可能达到十米量级,精度由地面制作时进行保证。月壤砖成型尺寸达米级左右,打印精度需满足拼装需求。参照地面建筑构件的强度要求,月壤袋及月壤砖抗压强度需达到40 MPa以上,抗拉强度需达到2 MPa以上。在耐久性方面,由于试件暴露于月面环境下,主要受到大温差及冲击作用,按照使用年限30 a进行设计,需要保证试件在-200~150 °C可经受约20 000个月面温差循环。对月壤袋、月壤砖进行重锤冲击试验,模拟月面陨石撞击的极端情况,测定在月面100 a一遇陨石冲击能量作用下,保证月面设施的正常服役。对于成型壳体进行防隔热、抗辐照等评价,实现基本的围护及防护作用。

综上,针对月基大型设施3D打印建筑物或构筑物建造,采用充气气囊、3D打印月壤砖和月壤袋混合使用的方案,具有可实施性强、技术成熟度较高的优势。充气气囊技术在国内均有研究,技术成熟度较高。月壤3D打印技术的核心是采用粉末黏结或混凝土挤出技术,可以制造出带有锁扣形式的月壤砖。目前地面混凝土3D打印技术已较为成熟,主要问题集中在月壤固化材料设计、月面3D打印工艺与装备、月壤砖的可靠性等方面,还需要进行大量研究。对于月壤袋技

术,原理是采用高强外包装袋对内部松散材料进行包裹,以达到良好的整体抗压能力。技术风险较低,核心是需要选择适应月面环境的月壤袋材料。

### 3 月壤样件打印及性能测试

#### 3.1 月壤混凝土配置

试验所用的CUG-1A模拟月壤表观干燥,颗粒棱角明显。平均粒径为72 μm,不均匀系数为16.0,曲率系数为1.2;颗粒比重为3.1~3.2;平均密度为1.66 g/cm<sup>3</sup>;内摩擦角42°~54°;黏聚力很小,为0.52~3.00 kPa。将模拟月壤与几种典型矿物掺合料的组成和物理性质进行对比,见表1和表2。

表1 模拟月壤和矿物掺合料的组成

Tab. 1 Composition of simulated lunar regolith and mineral admixtures

氧化物	月壤 /%	粉煤灰/%		磨细矿 渣/%	硅粉 /%	水泥 /%
		低钙	高钙			
SiO <sub>2</sub>	48.32	48	40	36	97	20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.01	27	18	9	2	5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5	9	8	1	0.1	4
MgO	6.95	2	4	11	0.1	1
CaO	7.39	3	20	40	0	64
Na <sub>2</sub> O	0.19	1	0	0	0	0.2
K <sub>2</sub> O	2.12	4	0	0	0	0.5

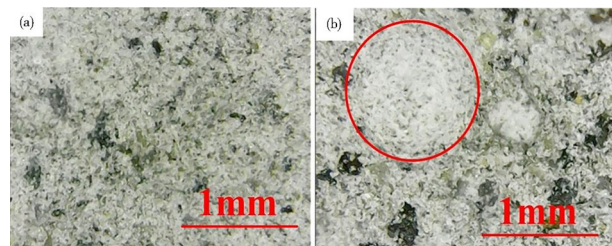
表2 月壤和矿物掺合料的物理性质

Tab. 2 Physical properties of lunar regolith and mineral admixtures

掺合料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	粒径范围/μm	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
月壤	2.94	20~600	/
粉煤灰	2.1	1~100	350
磨细矿渣	2.9	3~100	450
硅粉	2.2	0.01~0.2	20 000
水泥	3.15	0.5~100	350

由表1、表2可以看出,月壤材料与普通混凝土中的矿物掺合料具有相类似的组成和物理性质,其粒径相比研磨后的矿渣等略大,有可能将月壤作为活性矿物掺合料,配置月壤混凝土制备。

为确定月壤添加激发剂后能否硬化,进行了碱激发月壤水化活性的对照试验,试件(1)配比为250 g月壤和100 g水;试件(2)配比为250 g月壤、94 g水和10 g硅酸钠溶液(40%质量分数),将混合后的材料置于室温条件下14 d自然养护。成型情况发现,二种配比下的材料养护后均形成固体。



注:(a)月壤+水;(b)月壤+水+硅酸钠溶液。

图7 碱激发对月壤水化影响的光学显微照片

Fig. 7 Optical micrograph of the effect of alkaline excitation on lunar soil hydration

从剖切面的光学显微照片可以看出,对于试件(1)[图7(a)],能观测到完整月壤颗粒,堆积较为松散,无硬化水泥浆体的存在;对于添加硅酸钠激发剂的试件(2)[图7(b)],可观察到月壤颗粒骨料间隙被白色条状

或圆状区域的硬化水泥浆体(水化硅酸钙CSH)填充,起到连接骨料和填充空隙的作用,促使月壤颗粒骨料黏结固化。说明硅酸钠能够作为一种激发剂促进月壤的水化反应。综上,确认了模拟月壤通过碱激发能够发生部分水化反应,可形成月壤混凝土。

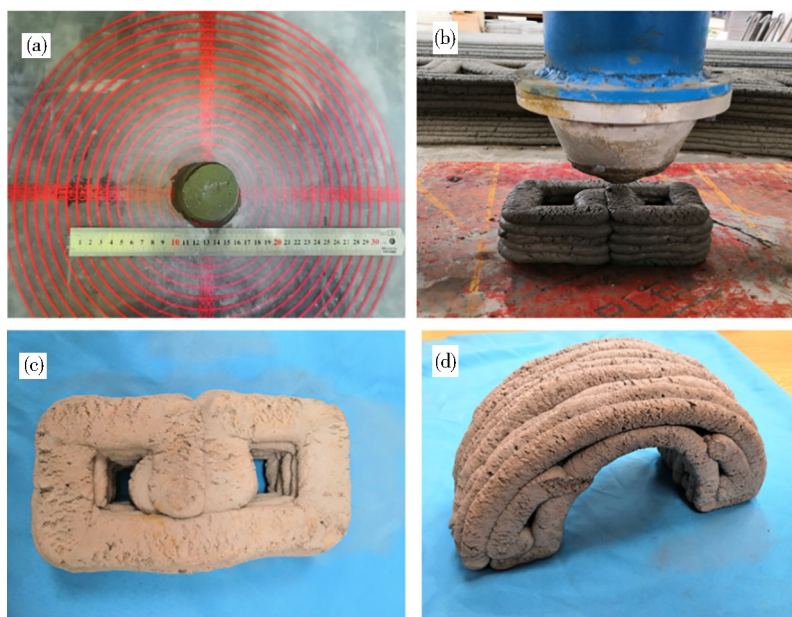
为测试月壤混凝土3D打印工艺性,选取经筛选粒径小于2 mm的模拟月壤、P·O 42.5硅酸盐水泥、纯净水、浓度45%的SIKA聚羧酸减水剂、浓度40%的硅酸钠溶液配置月壤混凝土100 kg,配比如表3所示。

表3 月壤混凝土配比

Tab. 3 The concrete proportions of lunar regolith

材料	含量/kg	材料	含量/kg
模拟月壤	51	减水剂	0.2
水泥	23	硅酸钠溶液	1.8
水	24		

月壤混凝土搅拌均匀后测试其可打印性,须能顺利挤出,且不发生明显流动和塌落。测试方法为水泥净浆流动度测试,采用上口直径36 mm、下口直径60 mm、高度60 mm的内壁光滑金属圆模,装入搅拌后的月壤混凝土,取出金属圆模,模拟其挤出状态,测量其自由流淌的最大直径。经测试,月壤混凝土净浆流动距离为62 mm,塌落度较小,外表光泽度良好,初步具备可打印的状态。



注:(a)月壤混凝土流动性测试;(b)打印过程;(c)月壤混凝土空心砌块;(d)月壤混凝土拱形结构。

图8 月壤混凝土3D打印工艺

Fig. 8 3D printing technology of lunar soil concrete

采用某国产混凝土3D打印机,打印了一个空心砌块和一个拱形壳结构。单道打印宽度约为25 mm、高12 mm。打印的月壤混凝土试件如图8(c)、8(d)所示,试

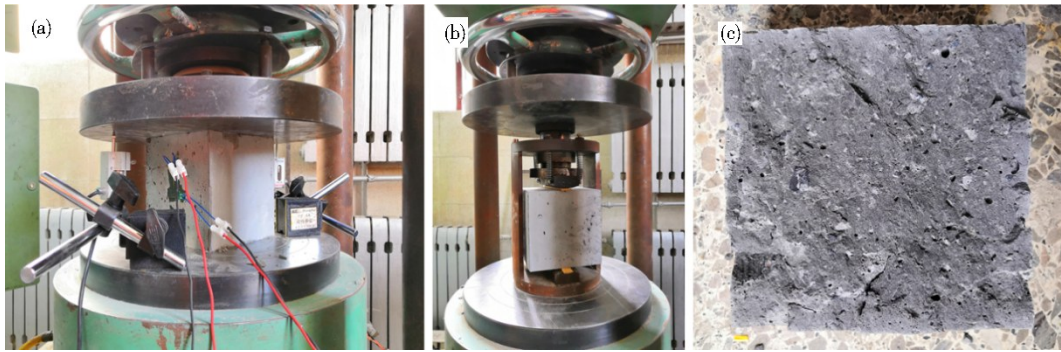
件外形完好,养护后具备一定的强度及刚度,测量发现,拱形壳结构的尺寸精度较好,相对误差在4%以内,而空心砌块尺寸相对误差约为20%。除由流动性及重力

造成的塌落外,摆放角度、路径补偿不当也是造成尺寸误差大的原因。因此,针对具体结构的3D打印,需要结合混凝土的流动性能,对打印参数进一步优化。

### 3.2 月壤混凝土性能测试

将月壤混凝土浇入立方体模具内,根据GB/T 50081—2019中规定的条件养护28 d,制备成6个150 mm × 150 mm × 150 mm的立方体标准试件,分别进行抗压强度和劈裂抗拉强度测试。测试环境为室温17 °C、湿度50%,采用YEJ-2000型液压压力试验机,如图9所示。测试过程中均匀加载,加载速度每秒0.5 MPa。试验测定的抗压、劈裂抗拉强度计算结果分别见表4、表5。由表可知,所配置的月壤混凝土

平均抗压强度为31.6 MPa;劈裂抗拉强度平均值为2.0 MPa,根据普通混凝土试验结果回归统计,基本达到了C20混凝土强度水平,满足一般的建筑材料性能要求。文献[26]中总结了采用模拟月壤配置的混凝土力学抗压强度,基本分布在5~31 MPa水平;LIN T D等<sup>[14]</sup>利用Apollo 16月壤样品配制的月球混凝土,蒸气养护后砂浆抗压强度达75.7 MPa,反复暴露于真空后的剩余强度大于80%。研究表明<sup>[25]</sup>,在月球1/6重力环境中,抗压强度相当于地球上同类材料强度的90%,重力对月球混凝土的影响不大。暴露于真空中的混凝土灰浆强度并未降低,但是真空环境下干燥收缩量较大,容易出现干燥裂纹。



注:(a)抗压加载图;(b)劈裂抗拉加载图;(c)劈裂抗拉试验破坏断面图。

图9 月壤混凝土性能测试

Fig. 9 Performance test of lunar soil concrete

表4 抗压强度试验数据

Tab. 4 Test data of compressive strength

抗压试件	面积 /mm <sup>2</sup>	破坏荷载 /kN	抗压强度/MPa	平均值 /MPa
1#	22 500	685.1	30.5	31.6
2#	22 500	727.9	32.4	
3#	22 500	718.9	32.0	

表5 劈裂抗拉强度试验数据

Tab. 5 Test data of splitting tensile strength

劈裂试件	面积 /mm <sup>2</sup>	劈裂荷载 /kN	劈裂强度 /MPa	平均值 /MPa
1	22 500	73.5	2.1	2.0
2	22 500	70	2.0	
3	22 500	72	2.0	

图9(c)为月壤混凝土劈裂抗拉试件破坏断面照片,可见断面内部存在孔洞缺陷,孔洞产生的成因在于月壤混凝土流动性小,振捣不够充分。由于月壤混凝土中没有粗骨料的存在,劈裂断面上无常见混凝土的粗骨料劈裂发生。由于月壤混凝土没有骨料,与常规混凝土相比性能略低。粗骨料比水化产物的胶结抗拉性能更为优异,因此导致了月壤混凝土

的劈裂抗拉性能低于相同抗压强度普通混凝土的劈裂抗拉性能。

上述研究表明,将月壤作为主要材料,制备月壤混凝土,进行大型设施3D打印具有一定可行性,但其强度有待提高,耐久性需要进一步研究。

### 4 结论

(1)针对未来月球科研站建设,提出了基于月壤3D打印的月基大型设施总体构想。根据建造类型,月基大型设施可分为场地、建筑物和构筑物三大类。按功能又具体分为遮阳墙、防尘墙、太阳翼支架、多功能车间、模块化居住单元、基础道路、航天器起降平台等七大部分。针对月球基地建筑物和构筑物建造创新性地提出了一套综合利用充气气囊、3D打印月壤砖和月壤袋的技术方案。

(2)针对建筑物和构筑物中的球面壳体、圆柱壳体、梁柱和墙板等不同建筑形式,设计了相应的榫卯结构月壤砖,结构简单、拼装方便;月壤袋采用高强外包装袋对内部松散月壤进行包裹,设计了拱轴线的骨架结构,采用内拉+外约束形式控制结构关键变形。

(3)验证了月壤在碱激发作用下的水化反应,配置了适合3D打印的月壤混凝土,平均抗压强度为



31.6 MPa, 平均劈裂抗拉强度为 2.0 MPa, 达到了 C20 混凝土强度水平; 以内拉+外约束形式制作的月壤袋, 拱顶承载力 1 kN, 构件尺寸误差约 9.5%, 整体抗压能力较好。

(4) 基于以上研究, 初步验证了月壤原位资源 3D 打印建造月基大型设施的技术可行性。但目前研究仍然存在月壤混凝土强度较低、原位资源利用率不高等问题, 月壤袋的材料及填充工艺、月壤混凝土性能、月面环境下的成型工艺与装备、月面服役环境下的可靠性评价等方面有待进一步研究与优化。

#### 参考文献

- [1] DUKE M B, BLAIR B R, DIAZ J. Lunar resource utilization: Implications for commerce and exploration [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(11): 2413-2419.
- [2] GOOD J, GILLEY S, MCLEMORE C, et al. Fabrication capabilities utilizing in situ materials [C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition, San Diego, California, 2008: 7854.
- [3] WILHELM S, CURBACH M. Review of possible mineral materials and production techniques for a building material on the moon [J]. *Structural Concrete*, 2014, 15(3): 419-428.
- [4] MONTES C, BROUSSARD K, GONGRE M, et al. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1212-1221.
- [5] GRUGEL R N, TOUTANJI H. Sulfur "concrete" for lunar applications—sublimation concerns [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1): 103-112.
- [6] 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.
- [7] KRISHNA B 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.
- [8] DAVIS G, MONTES C, EKLUND S. Preparation of lunar regolith based geopolymer cement under heat and vacuum [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1872-1885.
- [9] FAIERSON E J, LOGAN K V, STEWART B K, et al. Demonstration of concept for fabrication of lunar physical assets utilizing lunar regolith simulant and a geothermite reaction [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67(1-2): 38-45.
- [10] 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.
- [11] KHOSHNEVIS B, YUAN X, ZAHIRI B, et al. Construction by contour crafting using sulfur concrete with planetary applications [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(5): 848-856.
- [12] BUKKAPATNAM S, CLARK B. Dynamic modeling and monitoring of contour crafting—An extrusion-based layered manufacturing process [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 129(1): 135-142.
- [13] GUALTIERI T, BANDYOPADHYAY A. Compressive deformation of porous lunar regolith [J]. *Materials Letters*, 2015, 143: 276-278.
- [14] LIN W M, LIN T D, HWANG C, et al. A fundamental study on hydration of cement with steam [J]. *ACI Material Journal*, 1998, 95(1): 37-49.
- [15] 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 Z J, GUO L L, LIANG L, et al. Configuration and construction process of manned lunar base [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 23-30.
- [16] 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想 [J]. *深空探测学报*, 2018, 5(4): 374-381.
- YUAN Y, ZHAO C, HU Z Y. Prospect of lunar base construction scheme [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 374-381.
- [17] 于登云, 葛之江, 王乃东, 等. 月球基地结构形式设想 [J]. *宇航学报*, 2012, 33(12): 1840-1844.
- YU D Y, GE Z J, WANG N D, et al. Supposal for structure form of lunar base [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(12): 1840-1844.
- [18] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想 [J]. *矿物学报*, 2009, 29(2): 229-234.
- TANG H, WANG S J, LI X Y, et al. A preliminary design for producing construction materials for the lunar base: Microwave sintering ilmenite of lunar soil [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(2): 229-234.
- [19] ZHOU S, YANG Z, ZHANG R, et al. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 189: 90-98.
- [20] 王丽爽. 高温烧结与 SLM 成型 CLRS-1 模拟月壤及样品性能表征 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG L S. High-temperature Sintering and SLM Molding CLRS-1 Simulated Lunar Soil and Characterizing the Sample Performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] 沈天闰, 全晓军, 姚伟. 毫米级大光斑熔融月壤粉末床的原位观测研究 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(6): 58-65.
- SHEN T R, QUAN X J, YAO W. In-situ observation of lunar regolith powder bed melting by a millimeter-scale laser spot [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(6): 58-65.

[22] 刘祎炜,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):66-73.

LIU Y W, ZHANG X, WANG C, et al. 3D printing densification of lunar regolith simulant [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(6):66-73.

[23] 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): 575-580.

WANG C, ZHANG G, LYU X C, et al. Experimental study of the parameters of laser melting molding process with regard to simulated lunar soil [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(5): 575-580.

[24] 郭晓潞,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):209-217.

GUO X L, XIONG G Y, WANG Z H. A conception of geopolymer-based lunar soil concrete and its in-situ construction by 3D printing[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(3): 209-217.

[25] 李丽华,唐辉明,刘数华,等. 月球混凝土研究进展[J]. 混凝土,2011(9):12-14.

LI L H, TANG H M, LIU S H, et al. Review on lunar concrete[J]. Concrete, 2011(9):12-14.

[26] 孙晓燕,叶柏兴,王海龙,等. 基于月壤成分和月球环境的3D打印混凝土结构可行性分析[J]. 混凝土,2021(3):23-26.

SUN X Y, YE B X, WANG H L, et al. Feasibility analysis

of 3D printed concrete structure based on lunar soil composition and lunar environment[J]. Concrete, 2021(3):23-26.

[27] 周思齐,张荣荣,杨湛宁,等. 3D打印模拟月壤道路材料制备与性能研究[J]. 中国公路学报,2022,35(8):105-117.

ZHOU S Q, ZHANG R R, YANG Z N, et al. Preparation and performance evaluation on 3D printed road material based on lunar soil simulant [J]. China J. Highw. Transp., 2022, 35(8):105-117.

[28] 周兆曦,马芹永. 模拟月壤地聚合物的力学特性及固化机理[J]. 安徽理工大学学报,2021,41(5):42-48.

ZHOU Z X, MA Q Y. Mechanical properties and solidification mechanism of geopolymer in simulated lunar soil [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 41(5):42-48.

[29] 汪寒艳,马芹永. 水玻璃固化模拟月壤抗压强度增长机理分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(11):4516-4523.

WANG H Y, MA Q Y. Analysis on the mechanism of compressive strength growth of simulated lunar soil solidified by sodium silicate[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4516-4523.

[30] 蔡建国,张骞,王立武,等. 月壤原位成型技术及其结构体系研究[J]. 工业建筑,2021,51(6):42-47.

CAI J G, ZHANG Q, WANG L W, et al. Research on in-situ forming technique of the lunar soil and its structure system [J]. Industrial Construction, 2021, 51(6):42-47.