

基于高性能纤维的空间结构与制造材料*

赵 洋 韩 成

(国防科技大学空天科学学院 新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室 长沙 410073)

摘 要 高性能纤维具有质量轻、强度高、化学稳定性好以及便于结构制造等显著特点, 在空间领域具有重要应用. 其在空间可展开结构中, 凭借低密度与高强度减轻了结构重量、提升了运载效率, 且兼具良好柔韧性与稳定性, 可保障结构在轨可靠运行; 在空间碎片防护结构中, 依靠优异的力学性能与抗冲击能力, 保障航天器在轨安全; 在柔性捕获网方面, 其高强度与韧性确保了捕获操作的可靠安全, 助力轨道资源维护. 随着月壤研究的深入, 其在月壤材料原位制造中展现出潜在应用价值. 结合嫦娥六号月壤最新研究成果, 探讨了月壤纤维制造技术和月球基地建造材料的发展方向. 深入研究高性能纤维在空间领域的应用, 将为空间结构设计制造提供新的思路和方法, 实现空间资源高效利用.

关键词 纤维, 月壤, 空间材料, 空间结构, 原位制造

中图分类号 V11, V45

High Performance Fibers-based Space Structure and Manufacturing Materials

ZHAO Yang HAN Cheng

(Key Laboratory of New Ceramic Fibers and Their Composite Materials, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract High performance fiber has the characteristics of light weight, high strength, good chemical stability, easy structure manufacturing, etc., and has important applications in space field. In the space deployable structure, it reduces the weight of the structure by virtue of low density and high strength, improves the carrying efficiency, and has good flexibility and stability to ensure the reliable operation of the structure in orbit. In the space debris protection structure, it relies on excellent mechanical properties and impact resistance to build a solid defense line for the spacecraft in orbit safety. In terms of flexible capture nets, high strength and toughness ensure reliable and safe capture operations and help maintain track resources. With the deepening of research on lunar soil, it shows potential application value in *in-situ* manufacturing of lunar soil materials. Based on the latest research results of Chang'E-6 lunar soil, the development direction of lunar soil fiber manufacturing technology and lunar base construction materials is discussed. Continuous and in-depth research on the application of high-performance fibers in the

* 国家自然科学基金项目 (52202031) 和中国科协青年人才托举工程项目 (YESS20220672) 共同资助

2024-11-01 收到原稿, 2025-01-02 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

space field will provide new ideas and new methods for the design and manufacture of space structures, and open up new ways for the efficient utilization of space resources.

Key words Fibers, Lunar soil, Space materials, Spatial structure, *In-situ* manufacturing

0 引言

高性能纤维具有直径细 (<100 μm)、长径比高 (>1000)、力学性能优异、化学性质稳定等特殊结构和性质, 在空间结构设计与制造等方面具有重要应用. 2024 年 6 月 4 日, 嫦娥六号探测器在月球背面成功展示了一面五星红旗 (见图 1a^[1]), 由于月球表面环境极为恶劣, 这面五星红旗采用了玄武岩纤维材料, 这种材料具有出色的耐腐蚀、耐高温和耐低温特性. 玄武岩纤维是一种高性能的纤维材料, 来源于玄武岩矿石, 经高温熔融和拉丝工艺制成 (见图 1c^[2]). 该纤维主要由硅、铝、钙、镁、铁和钛的氧化物组成, 不仅具有高强度, 还展现出电绝缘性、耐腐蚀性和耐高温等卓越特性, 在建筑和工程领域得到广泛应用. 近期关于嫦娥六号月壤的研究成果表明, 月壤组分与玄武

岩类似^[3], 未来有望就地取材实现月壤纤维的原位制造, 纤维材料的多功能性质可满足月球基地建设的多种需求^[4,5].

另外, 随着空间活动的日益增加, 可展开式空间结构是解决航天器大型结构需求与火箭发射时尺寸限制之间冲突的关键技术. 中国空间可展开结构经过多年的研究和发展, 实现了在轨展开从一维伸展臂展开、二维平板阵列展开到三维结构展开的跨越式发展, 包含空间机械臂、空间太阳翼、空间大型网状天线等可展开结构应用^[6]. 高性能纤维既具有高强度、高模量等刚性特质, 又具备细直径可编织成型的柔性特质, 近期在可展开结构领域的应用日益增多, 例如, 采用碳纤维复合材料取代传统金属材料, 使用柔性绳索替换刚性构件, 以及利用智能变形复合材料代替驱动电机等. 基于高性能纤维复合材料的可展开结构已

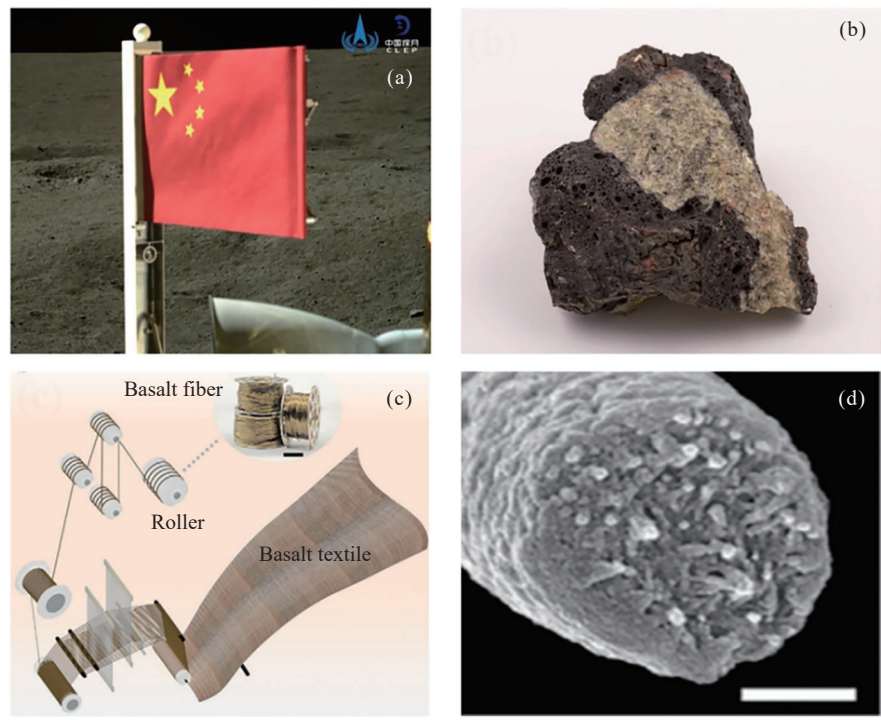


图 1 (a) 嫦娥六号在月球展开的由玄武岩纤维制成的五星红旗, (b) 玄武岩光学照片, (c) 玄武岩纤维制备技术路线, (d) 玄武岩纤维的微观结构

Fig. 1 (a) Five-Starred Red Flag made by basalt fiber in Chang'E-6 mission, (b) photograph of basalt, (c) preparation of basalt fibers, (d) microstructure of basalt fibers

成为航天科技和空间探测领域研究的热点问题。

本文基于高性能纤维在空间结构设计和原位材料制造两个方面的应用需求,综述了近年来高性能纤维在空间可展开结构、空间碎片防护结构、柔性捕获网和月壤材料原位制造等方面的研究进展,重点分析了月壤纤维制造技术,提出了月球基地建造材料的发展方向,以期推进高性能纤维在空间结构设计制造和地外星壤原位利用中的研究与应用。

1 高性能纤维增强的可展开结构

空间可展开结构是一种新型航天器结构,其核心特征在于采用具有高比强度、高比刚度、高几何稳定性以及超低热膨胀系数的材料制成^[7]。在发射阶段,该结构被设计为可折叠收纳形态。发射入轨后,根据地面指挥中心的指令,结构逐步展开,形成大型且复杂的空间结构,并最终锁定以维持其在轨运行状态。采用纤维增强复合材料制造的关键部件,例如太阳帆、折叠天线等,具有更高的强度、柔韧性和可展开

性,能够实现结构的轻量化、紧凑化以及在有限空间的展开和收缩。图 2^[8]显示了常用的复合可展开结构及其空间应用,包括太阳能电池阵列、天线、吊杆、雷达反射器、太阳帆、可展开式散热器和吊杆式仪器等。尤其是,形状记忆聚合物因其显著的大变形能力,在空间可展开结构的应用中展现出巨大的潜力,并正逐步被实际应用。

纤维增强复合材料以其优越的力学承载能力而广受青睐,然而其在主动变形能力和变形恢复能力方面存在一定局限性。近期,随着主动变形技术研究的不断深化,形状记忆复合材料的自恢复力得到显著提升,这使其在空间可展开结构领域展现出广阔的应用前景。图 3 所示^[9]为纤维增强形状记忆复合材料的热-机械变形过程:在玻璃化转变温度 T_g 以上时,对复合材料(起始态)施加外力使其变形,而后冷却并撤去外力约束,变形能被储存下来(变形态);当再次加热至 T_g 以上时,复合材料自动发生形状恢复(恢复态),从而完成从起始态到变形态再到恢复态的变形循环。

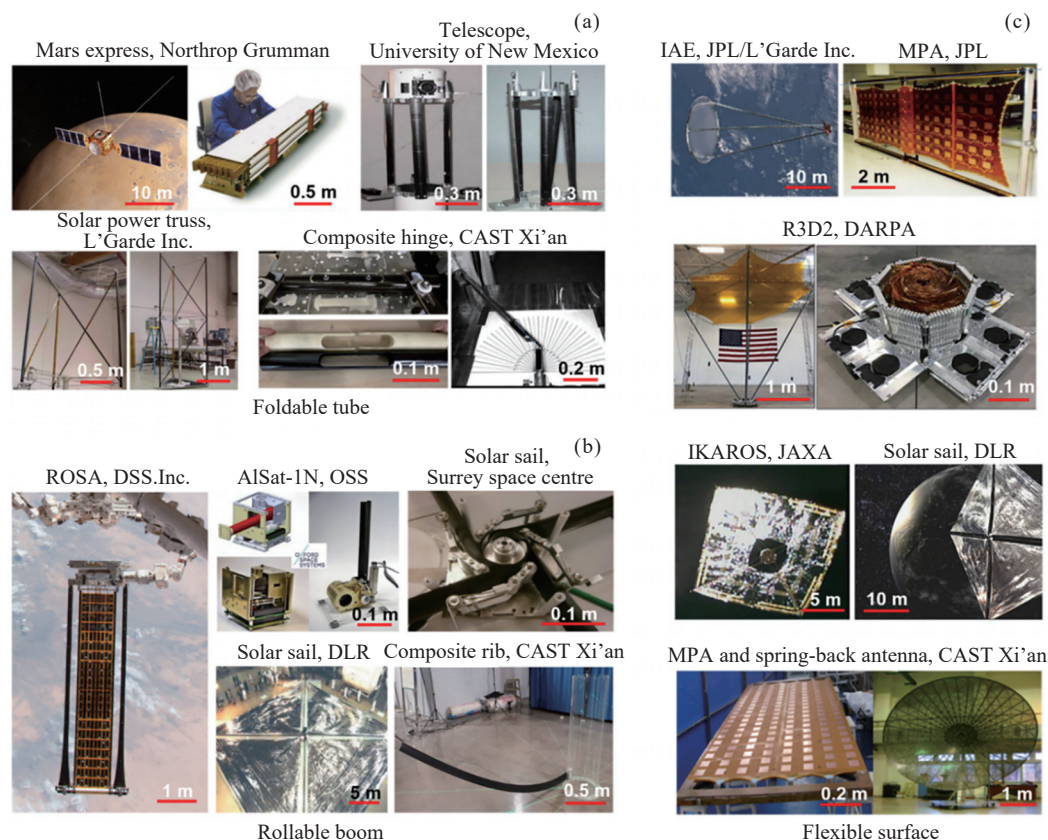


图 2 空间可展开结构的典型应用

Fig. 2 Spatial applications of composite deployable structures

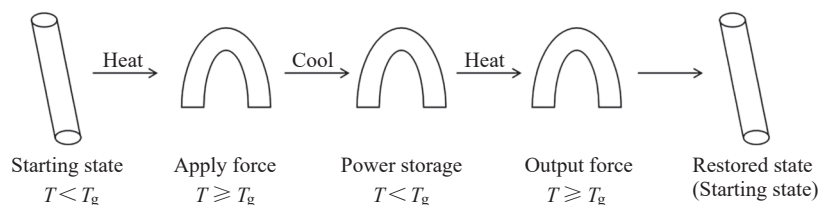


图 3 热响应型形状记忆聚合物基复合材料的纤维增强效应

Fig. 3 Fiber reinforcement effects in thermally responsive shape memory polymer matrix composites

在温度分布不均或有外力作用的环境中, 聚合物基形状记忆材料能够在短时间内实现 10%~100% 的形变. 针对大型空间可展开桁架结构的设计过程, 这种材料因其卓越的强度、刚度和热力学特性而变得至关重要. 将纤维增强聚合物基形状记忆材料应用于桁架结构的关键组件, 例如铰链驱动器和铰接头, 能够有效减少重力和摩擦力对结构的影响, 同时减轻对桁架应力和可恢复形变的不利作用. 这种做法不仅提升了桁架快速展开和收起的效率, 也为设计更轻巧、更大型的空间可展开结构提供了参考.

聚合物复合材料在展开之前存在长期收拢状态, 由于聚合物本身的黏弹性或塑性特性引起材料性能变化, 导致应力松弛和塑性应变的积累, 从而降低展开能力或者带来展开精度方面的问题. 高应变复合材料^[8,10]作为一种新型复合材料, 在其制备过程中通常采用刚性碳纤维或玻璃纤维来增强热固性环氧树脂基体. 这类材料的独特之处在于可将高刚度与大应变的特性结合, 显著的应变响应可由基体材料相对于嵌入的刚性纤维力学变形所引发. 这种特性使得高应变复合材料能够在高应变状态下长期保持其形状, 而不损失储存的应变能. 一旦进入轨道, 这些材料可以根据需要展开, 形成大型结构, 展现出在空间应用领域的巨大潜力. 随着空间可展开结构尺寸的增加, 对于具有高模量、低密度和低膨胀系数的高应变复合材料的需求日益增长, 其逐渐成为应用的主流和发展趋势. 未来空间可展开结构领域的主要发展趋势将集中在以下几个方面: 关注大型空间可展开结构与在轨服务设施的一体化设计; 探索以智能材料为代表的新型材料在空间可展开结构中的应用, 并致力于对其进行轻量化设计; 进行大型空间可展开结构的地面测试与验证. 这些研究将共同推动空间可展开结构技术的进步.

2 高性能纤维空间碎片防护结构

随着人类空间活动的增加, 尤其是卫星发射和空间站的建设, 空间碎片的数量也在不断增加, 这对航天器的安全构成了严重威胁, 迄今已记录发生了超过 240 起航天事故, 这些事件产生了大量空间碎片^[11]. 围绕地球高速旋转的空间碎片形成一个类似于小行星带的空间碎片环, 对在轨飞行器产生较大威胁, 图 4 所示^[11]为典型的空天飞行器撞击受损情况. 针对在轨航天器的空间碎片防护, 对于尺寸较大 (>10 cm) 的空间碎片, 通常可以进行主动预警规避, 而对于尺寸较小的危险碎片 (1~10 cm) 和微小碎片 (<1 cm), 则需要采取被动防护措施以保证航天器的安全. 如何使空间碎片撞击时的动能分散、尺寸减小, 是当前空间碎片防护研究的主要方向^[12].

高性能纤维填充的空间碎片防护结构采用不同的纤维、基体和编织方法组合制备, 尤其适用于小型空间碎片防护. 在国际航天器空间碎片防护领域, 所采用的防护材料主要包括铝板、Nextel 纤维布、Kevlar 纤维布以及 Beta 布等^[13]. 特别是 Nextel/Kevlar 纤维增强防护结构, 因其出色的防护性能, 被广泛应用于国际空间站的防护措施中 (见图 5^[13]), 该结构中 Nextel 陶瓷纤维层在前, 其高模特性有利于彻底破碎撞击粒子; Kevlar 纤维层在后, 其高强特性有利于缓冲拦截碎片云^[14].

基于中国自主研发的高性能纤维材料, 进行碳化硅纤维和玄武岩纤维布填充式空间碎片防护结构及其防护机理的研究^[15]. 针对航天器未来面临的防护需求, 完成了对空间碎片风险的评估工作, 并进行了部分防护设计的研究. 中国依托自主研发的高性能碳化硅陶瓷纤维技术, 进行了碳化硅纤维增强型 Whipple 防护结构的设计及其在超高速撞击条件下的实验研究, 结果表明国产碳化硅纤维防护性能达到

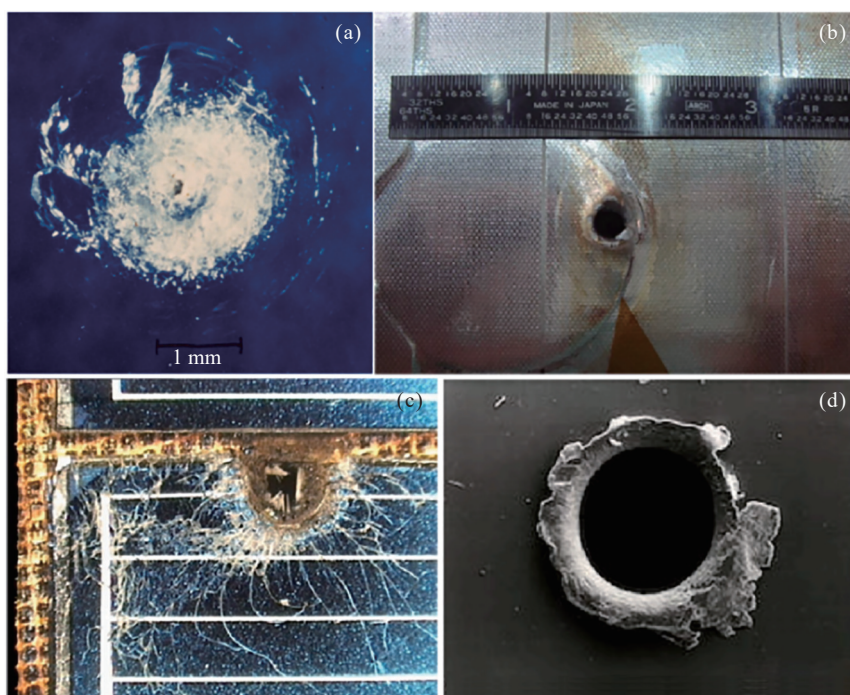


图 4 航天器空间碎片典型损伤. (a) STS-7 任务期间微流星体在挑战者号航天飞机前窗表面留下的陨石坑, (b) 航天飞机奋进号散热器在 STS-118 期间表面损坏, (c) 哈勃空间望远镜太阳能阵列的穿透前视图, (d) SMM 航天器体损伤

Fig. 4 Typical spacecraft damages causing by space debris. (a) The crater left by a micrometeoroid on the surface of the front window of the Space Shuttle Challenger during the STS-7 mission, (b) Space Shuttle Endeavour radiator surface damage during STS-118, (c) penetrating front view of the Hubble Space Telescope solar array, (d) SMM (Solar Maximum Mission) spacecraft body damage

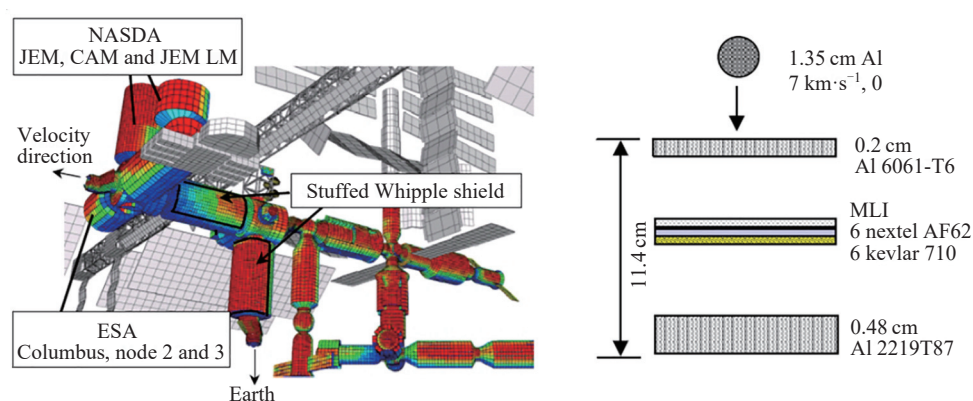


图 5 国际空间站采用的 Nextel/Kevlar 纤维填充式空间碎片防护结构

Fig. 5 Nextel/Kevlar enhanced Whipple shield configurations on ISS

NASA 应用的 Nextel 纤维同类防护结构水平^[16,17]. 碳化硅陶瓷纤维具有轻质、高模、耐高温特性, 将其用作空间碎片防护结构的填充层, 可较大幅度地破碎、拦截二次碎片, 并显著分散和吸收二次碎片的能量, 从而提升防护性能。

针对航天器空间碎片防护的需求, 新型防护材料

和防护结构的性能正逐步提升, 并且正在向多功能化发展, 包括可展开性、结构整合性以及抗空间辐射等特性. 研发新型更加轻质、更高性能的纤维材料, 将会给航天器防护结构的设计与性能提升带来显著增益. 例如, 碳纳米管以其具备轻质、高强度、高模量、高导电性和高导热性等卓越性能而著称^[18]. 理论分析

表明,碳纳米管具备极高的力学性能、电学性能和热学性能,被视作制造新一代高性能纤维的理想材料.近期,北京大学的研究小组成功合成了一种动态强度超高碳纳米管纤维^[19],其性能指标显著优于现有的高性能纤维.值得注意的是,在高应变率或弹道冲击环境下,这种高强度碳纳米管纤维表现出卓越的动态强度和冲击吸收能力,为冲击防护领域的发展提供了材料选择.鉴于中国在载人航天和深空探测领域的实践与任务规划,高性能纤维及其防护结构的发展和工程应用可以作为我们未来的长期发展目标.

3 高性能纤维柔性捕获网

主动式空间碎片移除技术 (Active Debris Removal, ADR),尤其是针对地球静止轨道上废弃卫星的清理工作,已经成为航天领域中的热点议题之一.随着空间碎片数量的不断增加,这些废弃卫星对在轨航天器构成了严重威胁,因此亟需开发有效的 ADR 技术^[20,21]. NASA 空间碎片计划负责人 Johnson^[22] 在一份空间态势感知的会议报告中分析认为,从 2020 年起每年清除 5~20 个大型空间碎片 (>10 cm) 将会对改善空间碎片环境产生显著效用,并提出为了更好地限制未来碎片数量的增长,应考虑积极主动清除轨道现有物体.

柔性捕获网是一种设计用于捕捉目标物体的柔软网状结构^[23],通常由柔软、弹性的材料制成,可在空间或其他环境中展开并捕获目标物体,在空间碎片主动清除任务中具有良好应用前景.欧洲航空航天局 (ESA)2002 年提出了 ROGER 项目^[24],其目标是通过

绳索连接的机械臂和网状装置对失效卫星进行捕获并执行移除操作,如图 6(a) 所示^[24].虽然该项目在 2003 年被终止,但其提出的空间绳网捕获研究热潮一直持续到现在;在 ESA 的 RemoveDEBRIS 项目^[25,26]中,采用了与之前概念相似的技术,并在轨道上初步验证了利用绳网捕获模拟目标的可行性.如图 6(b) 所示^[27],在主动段过载期间,绳网以收拢折叠的方式存储,一旦入轨并需要捕获目标时,首先解锁网包,而后利用发射机构和牵引质量块展开绳网,构建一个具有一定捕获面积的柔性大网以捕获目标卫星.捕获成功后,通过收口机构拉紧网口以完成捕获过程.随后,机动平台通过系绳与目标卫星相连,构成绳系结构,进而牵引目标卫星进行离轨操作.

绳网在执行撞击和拖曳等任务时,必须具备轻质且高强度的特性.为便于绳网的加工、折叠和储存,并且防止在操作过程中发生缠绕,绳网材料还需具备柔软和光滑的属性.此外,考虑到空间环境的严苛条件,绳网材料还应具备耐极端温度、抗强辐射、抗剪切力和良好的绝缘性能等特性,对空间绳网材料性能要求较高.具备轻质、高强、高模、结构稳定、可编织成型等特性的高性能纤维,例如 Zylon (聚对苯基苯并二恶唑纤维, PBO)、Dyneema (超高分子量聚乙烯纤维, UHMw-PE)、Kevlar (芳纶纤维)、Vectran (聚芳酯纤维) 等,可作为空间绳网的备选材料^[28].除了前述的纤维材料之外,全球范围内已投入工程应用的高性能纤维还包括聚酰亚胺纤维 (PI)、碳纤维、玄武岩纤维以及芳纶纤维等多种材料.其中,芳纶纤维根据其化学结构的不同,可进一步细分为间位芳纶纤维 (例如国外 Kevlar29, 国内称为芳纶 1313) 和对位芳

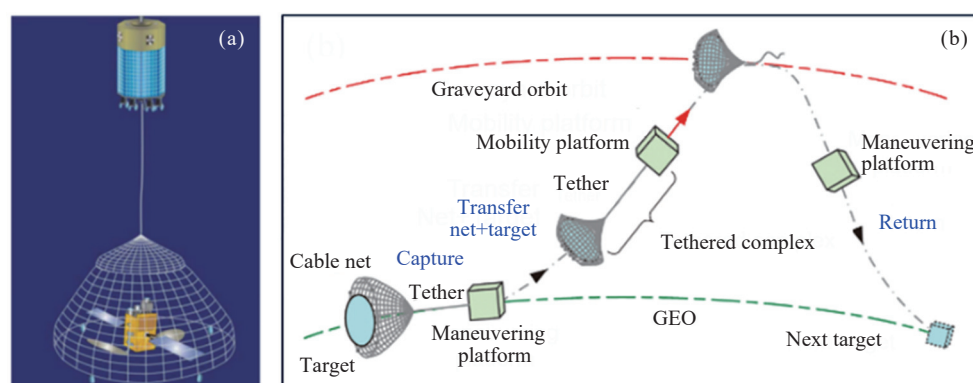


图 6 ROGER 空间绳网捕获任务 (a) 与空间捕获系统工作过程 (b)

Fig. 6 ROGER with net capture mission (a), and space capture system working process (b)

纶纤维 (例如国外 Kevlar49, 国内称为芳纶 1414). 除此之外, 杂环芳纶 (也称为芳纶Ⅲ) 也是高性能纤维家族中的一员, 具体性能比较见表 1^[27].

综合分析, 目前在柔性捕获网的选材方面, 难以找到同时满足高强度、低密度、耐高温低温、抗强辐射、耐热氧、柔软光滑等特性的高性能纤维材料. PI 纤维耐原子氧能力弱, 碳纤维、玄武岩纤维柔韧性不足, PBO、芳纶纤维的抗辐照性能不足, UHMw-PE 长期使用耐温等级不足. 在评估环境适应性和力学性能等关键因素后, 对于低地球轨道的应用, 芳纶Ⅲ纤维是一个合适的选择. 而在高地球轨道且无原子氧的环境中, 聚酰亚胺纤维 (PI) 或芳纶Ⅲ纤维则成为更佳的选择. 未来可根据不同的使用场景和环境条件等因素进行组成结构设计, 进一步优化材料的综合性能.

4 月壤制造与月壤纤维

月球作为地球的自然卫星, 不仅是一个潜在的空间站, 也是人类未来深入探索宇宙的重要中转基地, 具有不可替代的战略意义. 月球表面含有丰富的金属、水资源以及稀有气体等矿物资源, 并且提供了低重力、高真空和强烈空间辐射等独特的环境条件. 这些资源和条件对于科学研究和空间探索具有极高的价值, 为未来月球基地建设提供了必要条件^[29]. 对于月球表面覆盖的月壤, 可以作为丰富的资源进行原位利用, 支撑月球基地的建设.

已有研究对嫦娥六号带回的月壤样本^[3](见图

7^[3]) 进行了分析, 结果显示斜长石的比例显著上升, 而橄榄石的比例大幅下降, 这表明采样区域的月壤受到非玄武质成分的显著影响. 嫦娥六号采集的月球岩石样本主要包括玄武岩、角砾岩、凝灰岩、浅色岩石和玻璃质材料. 在这些样本中, 玄武岩碎片量占总样本量的 30%~40%, 橄榄石的含量则相对较少. 分析研究不同区域的月壤成分也有助于对月球资源进一步开发和利用. 如何有效利用月壤并用于月球基地建设是目前月球资源利用领域的研究热点.

月壤资源的原位利用技术研究正在不断推进中, 已取得一系列进展. 月壤的原位成型制造技术主要分为烧结成型、黏结成型和增材制造三大类^[30]. ① 烧结成型^[31] 是通过加热使粉体胚料产生颗粒黏结, 使材料具有较为致密的结构及良好的力学性能, 但烧结设备较为复杂, 烧结样品较小, 可用于将月壤制备生成特定应用的结构部件. ② 黏结成型技术通过使用喷墨打印头将黏合剂精确喷射到粉末材料中, 实现在选定区域内粉末层的黏接. 每一层粉末通过黏合剂的渗透与之前的层相互结合, 形成一体. 通过这种逐层叠加的方式, 最终构建出三维结构. 该技术适用于大规模生产, 尤其是对材料力学性能要求不是特别高的场合. ③ 增材制造技术 (3D 打印技术), 基于三维数字模型, 采用逐层构建的方法制造三维构件. 这种技术代表了一种现代的制造工艺, 与常规制造技术不同, 其不需要模具来形成产品. 增材制造通过使用高能热源快速加热粉末材料, 使其熔化后再凝固, 直接制造出复杂的几何结构. 3D 打印技术近年来在载人航天等领域中的研究得到快速发展, 在月球原位资源利用

表 1 常用高性能纤维性能比较
Table 1 Performance comparison of common high performance fibers

材料类型	断裂强度/GPa	模量/GPa	断裂伸长率/(%)	线密度/(g·m ⁻¹)	使用温度/℃	抗辐照性
PI	3.0~3.5	120~140	2	1.41	200~300	优良
PBO	58	180	3.5	1.54~1.56	300	一般
UHMw-PE	3.2	99	3.7	0.97	<80	优良
聚芳酯纤维	2.6~3.0	72~85	2~5	1.41	250	一般
碳纤维	3~7.0	230~600	1~2	1.76~1.82	600	优良
玄武岩纤维	3~4.84	91~110	2~3.2	2.65~3.05	700	优良
Kevlar29	2.76	63	4	1.44	250	弱
Kevlar49	3.5	124	2.4	1.44	250	弱
芳纶Ⅲ	4.2~5.0	130~155	3.2~4.1	1.43~1.45	270	弱

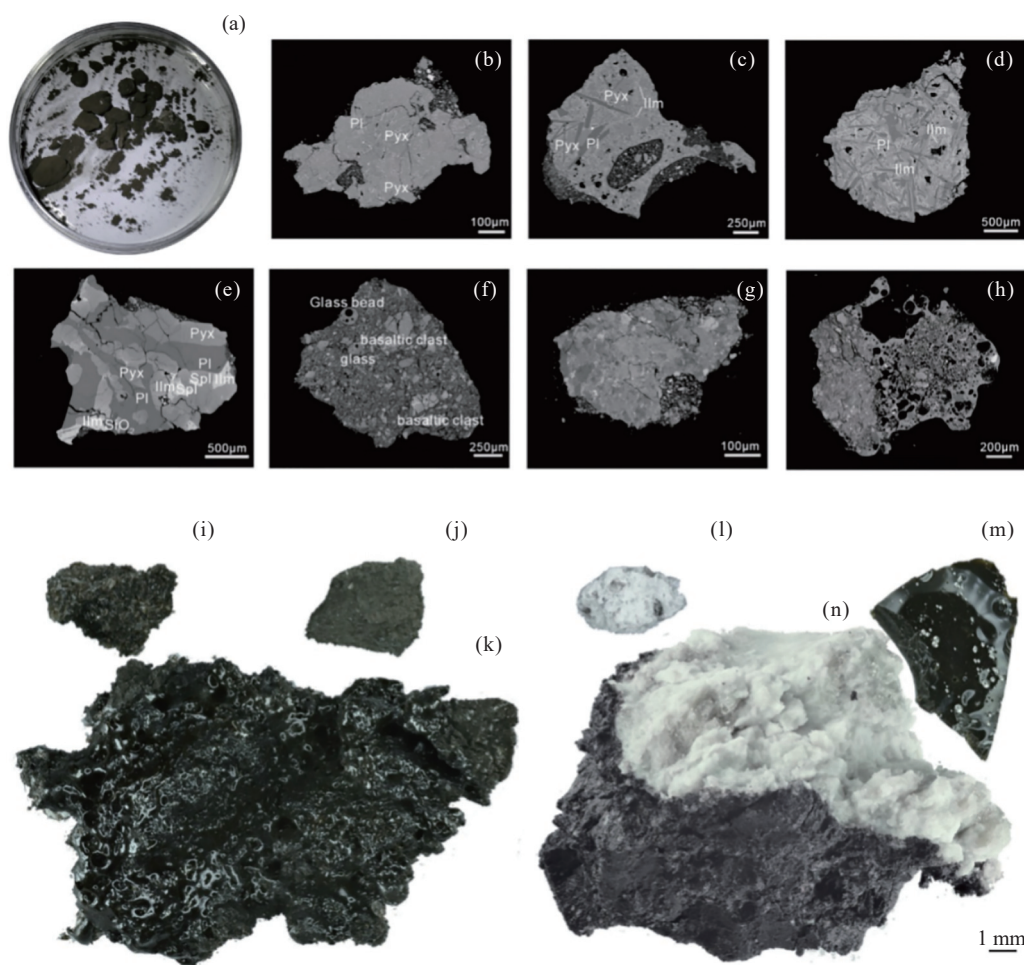


图 7 嫦娥六号带回的代表性样本. (a) 从嫦娥六号采集的样品中筛选出的部分直径超过 1 mm 的岩石碎片, (b)~(e) 不同结构特征的玄武岩碎片, (f)(g) 角砾岩, (h) 黏结岩的背散射电子图像, (i)(j) 典型的玄武岩, (k) 黏结岩, (l) 浅色岩石碎片, (m)(n) 玻璃质材料的显微照片

Fig. 7 Typical images of Chang'E-6 returned samples. (a) Fragments larger than 1 mm, (b)~(e) basaltic fragments with different structural characteristics, (f)(g) breccia, (h) binder rock backscatter images, (i)(j) typical basalts, (k) bonding rocks, (l) light-colored cuttings, (m)(n) glassy materials

领域具有良好的应用前景^[32,33].

4.1 月壤 3D 打印制造

如图 8 所示^[34], 月球基地建筑可以采用预制组装和 3D 打印两种方式建造, 在预制组装中, 混凝土块通过焊接或者黏结形成建筑结构, 而通过 3D 打印, 可以直接喷射混凝土或黏合剂实现一步构筑. 目前, 有研究利用模拟月壤, 经过 D-Shape 微挤出式墨水 3D 打印、激光增材制造、数字光固化等增材制造工艺, 已成功实现模拟月壤原料的打印成型^[35], 验证了 3D 打印技术在未来月球原位制造中的可行性.

Liu 等^[36]通过数字光处理技术 (DLP), 将 CLRS-2 模拟月壤与光固化树脂混合, 制备出适合 3D 打印的

浆料, 并展现出了良好的成型效果. 在 Goulas 等^[37]针对模拟月壤的选区激光熔化 (SLM) 技术研究中, 首先确定了粉末粒径、激光光束直径和最小层厚的最佳工艺参数范围, 确保材料在激光熔化过程中能够充分熔化且粉末能够均匀填充, 成功实现模拟月壤粉末材料的多层结构制造. 随后继续研究了模拟月壤及火星土壤材料的光学吸收特性、高温稳定性以及粉末颗粒内部孔隙结构对成型质量的影响, 结果表明月壤相比火壤更适合粉末熔合成形^[38]. 尽管如此, 通过选区激光熔化技术制造的模拟月壤样品普遍面临着存在孔隙、裂纹和疏松等质量问题^[39]. 月壤增材制造的关键要素涵盖了激光参数的优化、粉末床的质量控制以

及熔池质量的提升. 这表明对于月壤材料的现场 3D 打印成形技术及其参数选择, 仍需开展进一步的深入研究. 中国正在积极推进探月工程, 利用空间 3D 打印技术为月球原位建造提供技术支撑显得尤为重要. 开展模拟空间环境条件下的高性能聚合物、复合材料、无机非金属材料以及大尺寸多自由度结构的 3D 打印技术与设备的研究, 对于推进空间制造技术的应用至关重要.

4.2 月壤纤维

利用月壤进行原位开发成型技术的研究, 证实了在月球上建设基地的可能性. 然而, 目前制备的材料大多是单一相态, 且由于月壤成分的复杂性, 材料结构和性能的调控存在一定难度. 纤维材料是复合材料中最常见的增强相之一, 特别是高性能纤维, 其出色的比强度、比模量和独特性能, 能够显著提高复合材料的综合性能. 在众多纤维材料中, 玄武岩纤维作为一种高性能纤维, 由玄武岩矿石经过高温熔融和成纤

工艺制成, 因其卓越的力学性能、强耐腐蚀性、宽广的工作温度范围和低热导率等特性, 已被广泛应用于建筑和工程领域^[40]. 图 9 所示^[41] 为利用月壤制备纤维并将纤维材料用于月球基地建设的方案. 鉴于月壤与地球上玄武岩矿石在组成和性质上的相似性, 可以仿照地球上玄武岩纤维的生产技术, 将月壤加工成纤维状材料, 用作月球基地建设中复合材料的增强体^[41]. 这种方法不仅能够实现月壤资源的原位利用, 还能为月球基地提供所需高性能结构材料.

根据目前公开的资料^[4,41], 月壤纤维的研究进展显示, 国际上美国国家航空航天局 NASA、德国亚琛工业大学以及国内中国科学院新疆理化技术研究所和东华大学等单位均对月壤纤维进行了研究. NASA 于 1979 年提出相关概念^[42], 即利用月壤或从月壤中提取金属后剩余的副产品直接制造纤维, 在后续研究中, 利用模拟月壤成功制成纤维, 并验证了其对硫基月壤混凝土的增强效果^[42]. 中国科学院新疆理化技术

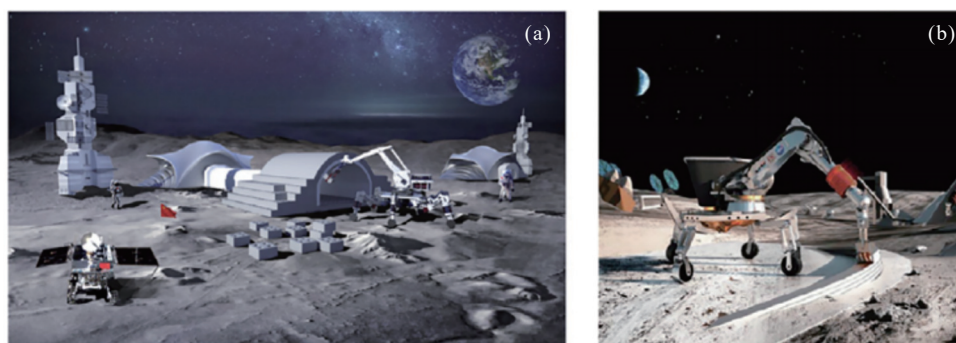


图 8 月球基地建设 3D 打印制造

Fig. 8 Lunar dwelling building by 3D printing

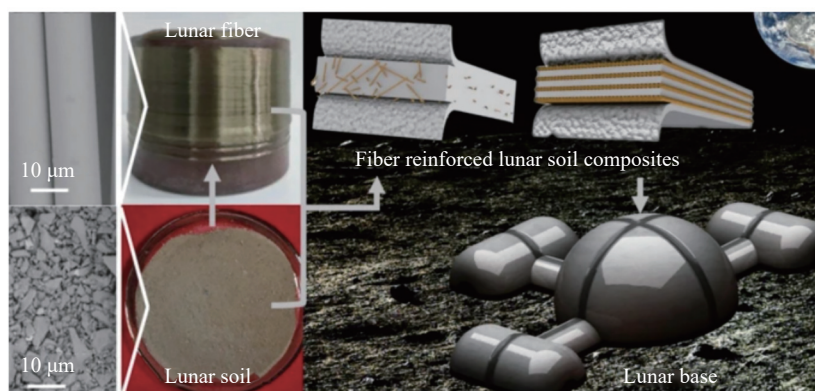


图 9 利用月壤制备纤维并将所得材料用于月球基地建设的方案

Fig. 9 Preparation of lunar soil fibers for the construction of lunar bases

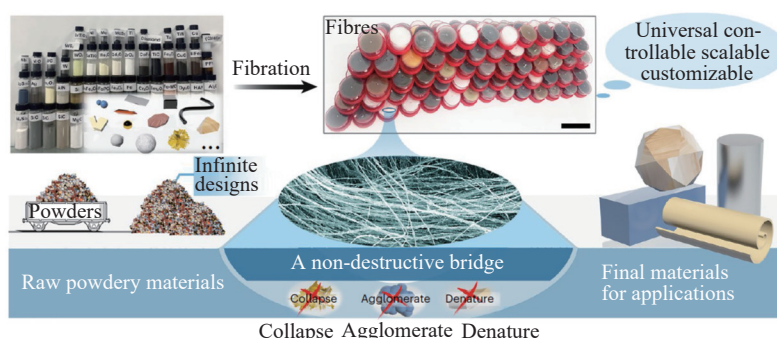


图 10 粉末原料直接构筑纤维材料

Fig. 10 Fibration of powder materials

研究所的研究团队^[5]深入研究了月壤的成纤特性,并在玄武岩纤维制备技术基础上,利用自行设计的拉丝设备成功制备了一组包含 50 根连续月壤的纤维束,其拉伸强度接近地球上商业玄武岩纤维的水平^[25]。将月壤纤维加入模拟月壤中,通过交联固化制备的复合材料,其抗压强度从 1.6 MPa 增加到 2.2 MPa,并且在材料破坏后,结构仍然保持了较好的完整性,验证了月壤纤维在增强月壤颗粒的力学性能和结构完整性方面的潜力,为月球基地建设提供了重要的材料支持^[25]。近期 Wang 等^[43]采用二维纤维素作为介质负载粉末颗粒,并利用二维纤维素的自收缩驱动粉末颗粒卷曲生成纤维结构。研究利用该方法制备展示了 120 多种纤维样品,包括不同无机粉末制备的纤维材料,以及不同直径、相貌的纤维材料,结果显示该方法利用粉末颗粒制备纤维材料具有较好的普适性(见图 10^[43])。这种粉末材料纤维化的通用方法,有望为月壤纤维的制备提供一种新的研究思路。

5 结论

高性能纤维具有质量轻、强度高、化学稳定性好以及便于结构制造等特点,在空间可展开结构、柔性捕获网、空间碎片防护和月壤材料原位制造等方面有很好的应用与发展前景。为推进高性能纤维在空间结构设计制造和地外星壤原位利用中的研究与应用,未来可在以下方面开展进一步研究。

高性能纤维既具有高强度、高模量等刚性特质,又具备细直径可编织成型的柔性特质,在空间可展开结构、柔性捕获网、空间碎片防护等方面受到广泛关注。以智能纤维为代表的新材料在空间可展开结构

(柔性捕获网)中的应用及其轻量化设计,是该领域未来发展的主要方向。

建设月球基地已经成为全球多个国家月球探测和开发计划中的核心目标之一。月球基地的建设依赖于多种结构性和功能性材料,月球表面丰富的月壤资源为此提供了可能。当前,如何高效利用月壤资源支持月球基地建设,已成为月球资源开发领域的研究焦点。在月球原位生产月壤纤维及其增强复合材料,为月球基地建设提供了新的途径。月壤纤维的高效制备和性能提升是未来月球基地建设须解决的关键问题。

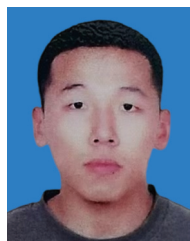
参考文献

- [1] Chang 6 complete sampling ascenders from month back into the rings on take-off track (2024-06-04) [N/OL]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10543020/content.html> (嫦娥六号完成采样上升器从月背起飞进入预定环月轨道[N/OL](2024-06-04). <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10543020/content.html>)
- [2] LI, GUO, FU F, *et al.* Triboelectric basalt textiles efficiently operating within an ultrawide temperature range[J]. *Advanced Materials*, 2024, **36**(28): 2401359
- [3] LI, HU H, YANG, *et al.* Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(11): nwae328
- [4] MA Pengcheng, GUO Zeshi, SU Xiuzhong, *et al.* Progress and perspective of lunar fiber materials[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(5): 532-543 (马鹏程, 郭泽世, 苏秀中, 等. 月壤纤维材料研究进展与展望[J]. 深空探测学报, 2023, **10**(5): 532-543)
- [5] XING Dan, XI Xiongyu, GUO Zeshi, *et al.* Study on the feasibility of preparing a continuous fibre using lunar soil simulant[J]. *Science in China: Technical Sciences*, 2020, **50**(12): 1625-1633 (邢丹, 苾雄宇, 郭泽世, 等. 模拟月壤制备连续纤维的可行性研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, **50**(12): 1625-1633)
- [6] MA X F, LI T J, MA J Y, *et al.* Recent advances in space-

- deployable structures in China[J]. *Engineering*, 2022, **17**(10): 207-219
- [7] WANG B, ZHU J C, ZHONG S C, *et al.* Space deployable mechanics: a review of structures and smart driving[J]. *Materials & Design*, 2024, **237**: 112557
- [8] MA X F, AN N, CONG Q, *et al.* Design, modeling, and manufacturing of high strain composites for space deployable structures[J]. *Communications Engineering*, 2024, **3**(1): 78
- [9] LENG Jinsong, LAN Xin, LIU Yanju, *et al.* Shape memory polymer composites and their applications in space deployable structures[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(4): 950-956 (冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用[J]. *宇航学报*, 2010, **31**(4): 950-956)
- [10] JIA Wenwen, PU Hailing, LIU Ying, *et al.* Application and development of stiff matrix high strain composites in deployable space structures[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, **53**(2): 14-21 (贾文文, 濮海玲, 刘颖, 等. 刚性基体高应变复合材料在空间可展结构中的应用及发展[J]. *宇航材料工艺*, 2023, **53**(2): 14-21)
- [11] SVOTINA V V. Spacecraft protection against man-made and natural space debris particles[J]. *Acta Astronautica*, 2024, **225**: 538-555
- [12] CHEN Y, TANG Q Y, HE Q G, *et al.* Review on hypervelocity impact of advanced space debris protection shields[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, **200**: 111874
- [13] Christiansen E L, Kerr J H. Flexible and deployable meteoroid/debris shielding for spacecraft[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, **23**(1): 125-136
- [14] PAI A, DIVAKARAN R, ANAND S, *et al.* Advances in the Whipple shield design and development: a brief review[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2022, **8**(1): 20-38
- [15] HAN Zengyao, PANG Baojun. Review of recent development of space debris protection research[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, **29**(4): 369-378 (韩增尧, 庞宝君. 空间碎片防护研究最新进展[J]. *航天器环境工程*, 2012, **29**(4): 369-378)
- [16] GOU Haitao, WANG Yingde, YAN Jun, *et al.* Experimental study of hypervelocity impact on an advanced composite Fibric stuffed Whipple shield[C]//Wuhan: the Space Materials Committee, Chinese Society of Space Research, 2012 (苟海涛, 王应德, 闫军, 等. 一种高性能复合织物填充防护结构撞击极限研究和防护机理分析[C]//武汉: 中国空间科学学会空间材料专业委员会, 2012)
- [17] WU N, LIU S K, ZHANG X S, *et al.* Progress on space materials science in China: debris shielding fibrous materials and high specific energy lithium sulfur batteries[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 803-811
- [18] BAI Y X, YUE H J, WANG J, *et al.* Super-durable ultralong carbon nanotubes[J]. *Science*, 2020, **369**(6507): 1104-1106
- [19] ZHANG X S, LEI X D, JIA X Z, *et al.* Carbon nanotube fibers with dynamic strength up to 14 GPa[J]. *Science*, 2024, **384**(6702): 1318-1323
- [20] SHAN M H, GUO J, GILL E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods[J]. *Progress in Aerospace Science*, 2016, **80**: 18-32
- [21] SVOTINA V V. Spacecraft protection against man-made and natural space debris particles[J]. *Acta Astronautica*, 2024, **225**: 538-555
- [22] JOHNSON N L. Debris removal: an opportunity for cooperative research[C]//Proceedings of Space Situational Awareness Conference. Washington: NASA, 2007
- [23] TANG C, DENG Y Q, BAI Z F, *et al.* Dynamics analysis of space netted pocket system capturing non-cooperative target[J]. *Applied Sciences*, 2023, **13**(18): 10377
- [24] BISCHOF B, KERSTEIN L, STARKE J, *et al.* ROGER-robotic geostationary orbit restorer[C]//54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Bremen, Germany: IAC, 2003
- [25] FORSHAW J L, AGLIETTI G S, FELLOWES S, *et al.* The active space debris removal mission RemoveDebris. Part 1: from concept to launch[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **168**: 293-309
- [26] AGLIETTI G S, TAYLOR B, FELLOWES S, *et al.* The active space debris removal mission RemoveDebris. Part 2: in orbit operations[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **168**: 310-322
- [27] XU Wangjing, WANG Liwu, TANG Mingzhang, *et al.* Design and development of space net for capture system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, **30**(2): 54-59 (许望晶, 王立武, 唐明章, 等. 空间抓捕系统绳网的设计与研制[J]. *航天器工程*, 2021, **30**(2): 54-59)
- [28] BENVENUTO R, CARTA R. Active debris removal system based on tethered-nets: experimental results[C]//9th Pegasus-AIAA Aerospace Student Conference. Milano, Italy: AIAA, 2013
- [29] JIANG Shengyuan, SHEN Yi, WU Xiang, *et al.* Technical schemes of investigation and in-situ utilization for lunar surface generalized resources[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, **2**(4): 291-301 (姜生元, 沈毅, 吴湘, 等. 月面广义资源探测及其原位利用技术构想[J]. *深空探测学报*, 2015, **2**(4): 291-301)
- [30] LIU C, LI Y, ZHOU W, *et al.* In-situ forming technology of lunar/martian soil simulant[J]. *Materials Reports*, 2022, **36**(22): 22050122 (刘琛, 李勇, 周文, 等. 模拟月/火星壤的原位成型技术研究进展[J]. *材料导报*, 2022, **36**(22): 22050122)
- [31] ZHAO H, MENG L, LI S Y, *et al.* Development of lunar regolith composite and structure via laser-assisted sintering[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, **17**(1): 6-18
- [32] LEACH N. 3D printing in space[J]. *Architectural Design*, 2014, **84**: 108-113
- [33] GHIDINI T, GRASSO M, GUMPINGER J, *et al.* Additive manufacturing in the new space economy: current achievements and future perspectives[J]. *Progress in*

- Aerospace Sciences*, 2023, **142**: 100959
- [34] ZHOU C, GAO Y Y, ZHOU Y, *et al.* Properties and characteristics of regolith-based materials for extraterrestrial construction[J]. *Engineering*, 2024, **37**(6): 159-181
- [35] WU Lingzhi, YIN Haiqing, ZHANG Cong, *et al.* Research status of additive manufacturing lunar in-situ forming technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(6): 99-107 (吴灵芝, 尹海清, 张聪, 等. 增材制造月壤原位成形技术的研究现状 [J]. *矿产综合利用*, 2023(6): 99-107)
- [36] LIU M, TANG W Z, DUAN W Y, *et al.* Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2019, **45**(5): 5829-5836
- [37] GOULAS A, FRIEL R J. 3D printing with moondust[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, **22**(6): 864-870
- [38] GOULAS A, BINNER J G P, HARRIS R A, *et al.* Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in-situ resource utilisation based 3D printing[J]. *Applied Materials Today*, 2017, **6**: 54-61
- [39] LI Wen, XU Kening, HUANG Yong, *et al.* In-situ forming of lunar regolith simulant via selective laser melting[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, **45**(10): 1931-1937 (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): 1931-1937)
- [40] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering[J]. *Composite Structures*, 2019, **214**: 246-263
- [41] GUO Z S, XING D, XI X Y, *et al.* Production of Fibres from lunar soil: feasibility, applicability and future perspectives[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, **4**(5): 923-937
- [42] HO D, SOBON L E. Extraterrestrial Fiberglass Production Using Solar Energy[R]. NASA, 1979: 225-232
- [43] WANG H W, ZENG C, WANG C, *et al.* Fibration of powdery materials[J]. *Nature Materials*, 2024, **23**(5): 596-603

作者简介



赵 洋 男, 2002 年 4 月出生于辽宁省辽阳市, 国防科技大学空天科学学院硕士研究生, 主要研究方向为陶瓷纤维与先驱体及其应用。
E-mail: 861165623@qq.com



韩 成 (通信作者) 男, 1991 年 7 月出生于安徽省阜阳市, 现为国防科技大学空天科学学院副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为新型陶瓷纤维、先进复合材料等。
E-mail: hancheng@nudt.edu.cn