

月壤纤维材料研究进展与展望

马鹏程^{1,2}, 郭泽世^{1,2}, 苏秀中³, 赵晨³, 梁存光^{1,2}, 慈雄宇^{1,2}, 邢丹⁴, 郑庆彬⁴

(1. 中国科学院新疆理化技术研究所 环境科学与技术研究室 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049; 3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201100;
4. 香港中文大学(深圳) 理工学院, 深圳 518172)

摘要: 以月球基地建设中结构和功能材料的需求为出发点, 探讨了利用月壤制备纤维并用于月球基地建设的可行性, 总结了目前国内外在月壤纤维制备领域的研究现状。在此基础上分析了月壤纤维在月球基地中用于结构防护、生存和生命保障等领域的独特优势和应用前景, 提出了未来月壤纤维领域应重点研究和突破的关键理论和技术基础, 以期从基础研究和应用需求层面促进月壤纤维这一前瞻性研究领域的发展。

关键词: 月壤; 月壤纤维; 资源原位利用; 月球基地建设

中图分类号: V254

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)05-0532-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220055

引用格式: 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(中英文), 2023, 10(5): 532-543.

Reference format: MA P C, GUO Z S, SU X Z, et al. Progress and perspective of lunar fiber materials[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 532-543.

引言

月球是地球天然的空间站, 也是未来人类进一步探索深空的中转站, 具有无可替代的空间战略价值。此外, 月球蕴含丰富的金属、水、稀有气体(氦-3)等矿产资源, 还具有独特的低重力、高真空、强宇宙辐射等环境资源, 可作为天然的实验室, 为人类发现并验证新的物理和化学现象提供条件^[1-2]。此外, 对月

球的探测和开发可以有效促进一个国家的创新体系建设, 这对推动航空、航天、材料、通信等领域的科技进步具有重要意义。

进入新世纪, 面对新的需求和挑战, 各国纷纷制定了新的探月计划(图1)。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2017年制定了“阿尔

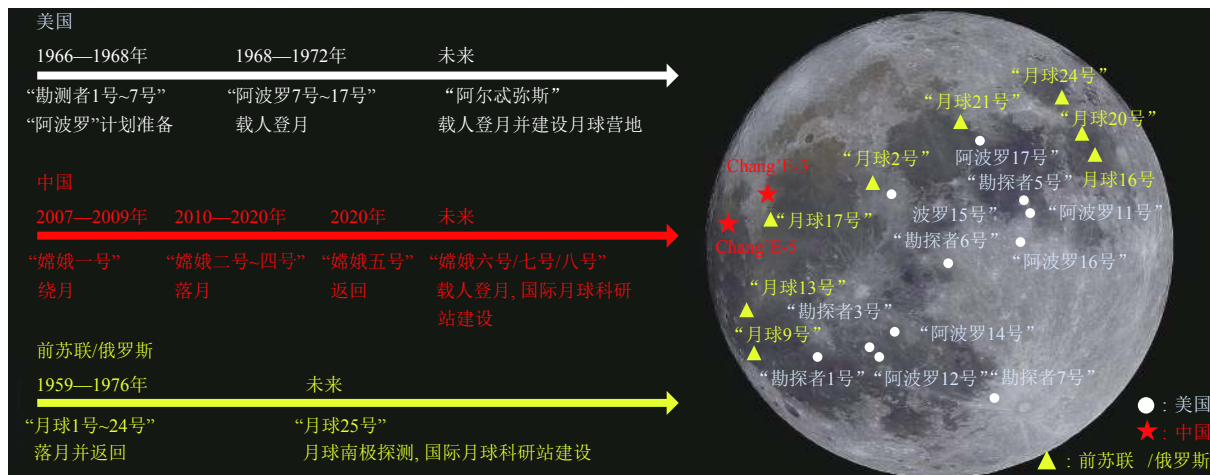


图1 美国、前苏联/俄罗斯和中国的月球探测活动^[3]

Fig. 1 Lunar exploration activities by the USA, the former USSR/Russia and China^[3]

收稿日期: 2022-05-30 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项(2019-JCTD-001); 中国科学院“十四五”规划新兴前沿和未来技术方向项目

忒弥斯”(Artemis)计划,提出了全新的月球可持续探索规划:将于2024年左右实现载人重返月球,建设月球营地(Artemis base camp),并以此为基础对月球资源进行探索和开发^[4]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也提出“月球村”(Moon village)概念^[5],目前正在开展一系列的月球基础设施建设前瞻性研究。中国国家航天局(China National Space Administration, CNSA)于2004年实施了中国的探月工程——“嫦娥计划”,并已完成“绕、落、回”三步走的规划^[6]。其中,“嫦娥四号”实现了人类探测器首次在月球背面软着陆和巡视勘察;“嫦娥五号”成功采样并带回1 731 g月壤样品,使中国成为继美、苏(俄)之后第3个实现月壤样品采集的国家。2021年3月,CNSA和俄罗斯国家航天集团公司联合发布了《关于合作建设国际月球科研站的联合声明》,计划在2036—2045年间,建成综合型的月球科研站^[7]。在经历了20世纪70年代以来一段短暂的“平静期”后,对月球的探测进入了一个新时期,而建设月球基地正在成为这一时期的主要目标,其建设不仅为人类进一步探索、开发和利用月球资源提供了可能,也为探索深空提供了中转站和补给站。

月球基地的建设和运行需要大量的结构和功能材料,这些材料可以通过两种途径获得:一种是从地球运输至月球;另一种是月球资源的原位利用(In-Situ Resource Utilization, ISRU)^[8]。地月之间距离遥远,运输难度大,根据目前的技术水平估算,地月之间的运输成本约为5.0~9.0万美元/kg^[9],同时还会受到货物体积和地球发射窗口等条件限制。因此,从经济效益和工作效率角度分析,将材料从地球转运至月球并非最佳选择。ISRU则通过直接利用月球资源进行基地建设,仅需要将材料成型设备运送至月球,之后即可利用月球资源来进行相应材料的生产和制造。相比之下,ISRU可有效降低地月之间材料运输成本,同时也可减少月球基地对地球的依赖,提升基地的自我运行和维持能力。

对月探测结果表明月球表面覆盖着一层月球土壤(简称月壤),其主要成分包括各种矿物碎屑、玻璃物质等,这与地球表面分布的玄武岩矿石在组成、理化性质等方面较为相近^[10]。目前国内外多个科研小组对月壤的性质进行了研究,探讨直接利用月壤建造月球基地的可行性,开发了多种月壤成型技术,包括真空烧结^[11]、3D打印^[12]、干混/蒸汽喷射^[13]、热压烧结^[14]、数字光处理成型^[15]等技术。

上述研究证实了原位利用月壤建造月球基地的可行性。但是,所制得的材料多是单一相状态,并且月

壤成分复杂,较难控制所得材料的结构和性能。复合材料是由两种或两种以上具有不同成分或结构的材料组成的混合体系,不同组分之间取长补短,使材料具有优异的综合性能^[16]。其组成材料可分为基体和增强相,二者通过结合形成界面以相互连接。基体通常是复合材料体系中的连续相,起到材料成型、传递载荷和保护增强体免受外界损伤的作用;增强相是外界应力的主要承受相,其性能优劣直接决定了复合材料的性能^[16]。

纤维材料是最为常见的复合材料增强相之一,高性能纤维具有优异的比强度、比模量和一些特殊功能,能够有效提升复合材料的综合性能^[17]。在各类纤维中,玄武岩纤维是玄武岩矿石经过熔融和成纤后获得的一种高性能纤维,具有力学性能优异、耐腐蚀性强、工作温度范围大、热导率低等特点,在地球上已被广泛应用于建筑、交通等领域^[18]。月壤与地球玄武岩矿石具有相似的组分与性质,因此,若能类比地球玄武岩纤维的制备,利用月壤控制纤维,并用作月球基地建设中复合材料的增强体,可满足月球基地建设的多种需求。鉴于月壤纤维对月球基地建设的重要意义,本文将对目前月壤纤维的国内外研究现状进行梳理和总结,并对月壤纤维在月球基地建设过程中的应用前景进行展望。

1 月壤纤维及其研究进展

从目前公开的资料来看,主要有来自美国NASA、德国亚琛工业大学(RWTH Aachen University)和中国科学院新疆理化技术研究所研究团队报道了对月壤纤维的研究,时间从20世纪70年代持续至今(图2)。其中,NASA的Ho等^[19]于1979年提出了制备月壤纤维的设想,指出可以直接利用月壤或月壤提取金属后剩余的副产物来制备纤维。其制备过程是先将月壤在太阳能熔炉中熔融并均质化,随后冷却制成玻璃球,然后将这些玻璃球利用另一太阳能熔炉重新熔化,并拉制纤维。这项研究仅停留在理论设计阶段,缺乏相关实验数据支撑。

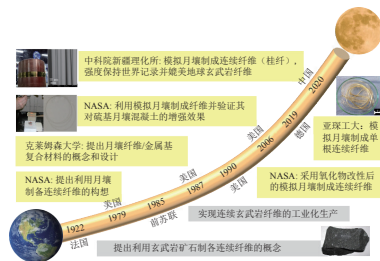


图2 月壤纤维研究和发展历史

Fig. 2 History of research and development of lunar fiber

美国克莱姆森大学(Clemson University) Dalton等^[20]在1987年提交给NASA的一份报告中也提及

利用月壤制备纤维的构想。作者提出利用模拟月壤来进行纤维制备,但并未给出详细的实验过程和具体结果。此外,作者设计了一座可在月面生产月壤纤维的工厂,并提出将月壤纤维和金属进行复合制备纤维增强金属基复合材料。整体来看,早期对月壤纤维的研究仅停留在概念设计阶段,并未进行相关的实验研究。

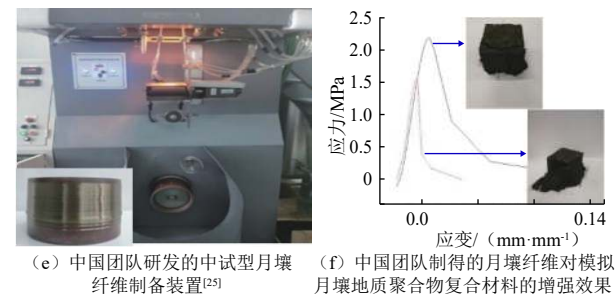
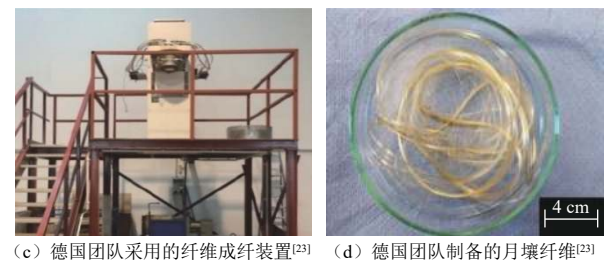
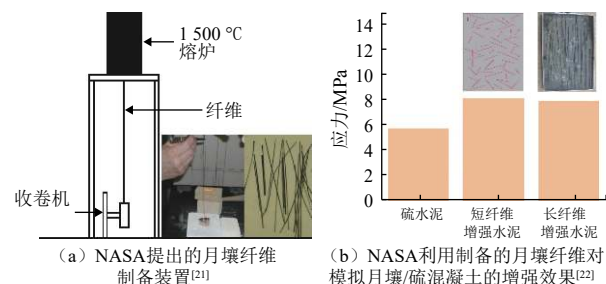
之后,NASA的Tucker等^[21-22]报道了月壤纤维研究成果,科研人员分别利用MLS(Minnesota Lunar Simulant)系列模拟月壤和JSC(Johnson Space Centre)-1模拟月壤(成分见表1)制备了月壤纤维。纤维生产装置由加热炉、单孔坩埚、电源和收卷器等设备组成,如图3(a)所示。研究发现,MLS系列模

拟月壤均无法直接成纤,但在加入8 wt%的氧化硼后,MLS-2可制备出连续纤维,所得纤维的平均强度为413 MPa。作者认为主要原因是氧化硼改善了月壤熔体的黏度,使其适合成纤。采用JSC-1模拟月壤,可制得平均长度为20 cm、直径1 mm的连续纤维(图3(a)),纤维的强度不到1 000 MPa。此外,该设备仅使用单孔漏板,与大规模生产设备(多孔漏板)还有较大差距。研究人员将1 wt%的月壤纤维加入到含硫的模拟月壤混凝土(35 wt%的硫与65 wt%的模拟月壤),混凝土的弯曲强度由5.8 MPa提升至8.3 MPa^[22](图3(b)),表明月壤纤维对于月壤基复合材料具有显著的增强效果。

表1 不同月壤及模拟月壤化学组成(wt%)对比

Table 1 Chemical composition (wt%) of different lunar soil samples and lunar soil simulants

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
MLS-1	43.86	6.32	13.68	13.40	2.60	6.68	10.13	2.12	0.28
MLS-2	48.30	0.03	32.40	0.45	—	0.15	16.00	2.42	0.06
JSC-1	47.71	1.59	15.02	7.35	3.44	9.01	10.42	2.70	0.82
Maria	45.40	3.90	14.90	14.10	—	9.20	11.80	0.60	—
Highlands	45.50	0.60	24.00	5.90	—	7.50	15.90	0.60	—
CLRS-1	48.55	2.08	16.67	11.17 (TFe _x O _y)	—	8.60	7.72	3.23	1.50
Apollo 10084	42.16	7.75	13.60	15.34	—	7.76	11.94	0.47	0.16
Apollo 14163	48.10	1.70	17.40	10.40 (TFe _x O _y)	—	9.40	10.70	0.70	0.55



2017年,在ESA和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)的资助下,来自德国亚琛工业大学的研究团队开展月壤纤维的制备研究^[23]。研究人员以ITALUS-1和ITALUS-2(Institut für Textiltechnik Lunar Simulant)两种模拟月壤为原料(其不同点在于ITALUS-1含有Fe₂O₃,而ITALUS-2含有Fe₃O₄,其它元素成分与“阿波罗”计划的10084样品接近,详见表1),采用玄武岩纤维拉丝设备(图3(c))探究了月壤成纤的可行性。研究发现ITALUS-1样品难以得到连续纤维,而ITALUS-2可连续成纤且过程稳定,所得月壤纤维直径为16 μm。在此基础上,该团队利用Maria和Highlands模拟月壤(见表1)制备了纤维^[24],其中由Highlands样品制成的月壤纤维呈现亮黄色(图3(d)),最小直径为17 μm。上述制备的月壤纤维在形貌上与地球玄武岩纤维相近,但作者仅对其外观形貌进行了描述,未给出月壤纤维的具体性能参数。

近期,来自中国科学院新疆理化技术研究所的科研团队也对月壤成纤行为进行了研究^[25]。研究人员对CLRS-1(Chinese Lunar Regolith Simulant)模拟月壤标样进行研究,发现其成分和地质特性与“阿波罗14号”(Apollo 14)月球样品14163接近(见表1),并

图3 国内外不同科研团队制备的月壤纤维及其应用研究成果
Fig. 3 Summary on the preparation of lunar soil fiber and corresponding applications achieved by various research teams

与地球玄武岩矿石具有类似的矿物组成, 该月壤模拟物中SiO₂含量较低, Al₂O₃和MgO含量较高。低含量SiO₂有利于降低月壤熔体的黏度, 而Al₂O₃和MgO成分有利于月壤熔体形成性能稳定的连续纤维。热失重和差示扫描量热分析结果表明, 该模拟物的完全融化温度为1 332 °C, 最高析晶温度为1 031 °C。根据以上结果, 并结合团队前期在玄武岩纤维领域的研究积累, 科研人员采用自行搭建的拉丝装置(图3(e))成功获得一束包含50根的连续月壤纤维。所得纤维外观均呈现光滑的圆柱结构且直径可调, 其中以4.0 m/s拉丝速度制备的纤维拉伸强度为1 438 MPa(平均直径12.8 μm), 接近地球上商业化的玄武岩纤维。将月壤纤维(0.8 wt%)加入到模拟月壤中, 利用氢氧化钠和硅酸钠水溶液激活月壤固化交联反应, 并在月昼温度(106 °C)和低真空环境(0.1 atm)下进行固化, 所得复合材料的压缩强度由1.6 MPa提升至2.2 MPa, 且材料在破坏后结构保持较为完整(图3(f))。该研究更进一步证实月壤纤维可有效增强月壤颗粒的力学性能和结构完整性。

中国团队制得的月壤纤维在目前国内外公开报道的所有纤维中具有最高的拉伸强度, 主要归因于团队以熔体成纤机理为基础, 对月壤成纤过程进行了有效调控, 此研究也证实了规模化制备月壤纤维的可行性。最重要的是, 该研究给出了一套从理论到实际制备月壤纤维的方案, 即通过对月壤的化学成分、物相结构等特性进行分析来指导成纤过程, 为未来不同月壤成分乃至月球环境下制备纤维提供了新的思路。

表2总结了目前国际上对月壤纤维的研究成果。总体来讲该领域的研究均处于起步阶段。从纤维制备技术层面来讲, 国内外研究人员所采用的纤维制备方案具有一定的相似性: 首先将月壤加热熔融, 然后采用熔体牵引法并通过漏孔(嘴)成型, 最后通过机械牵引而获得连续纤维。有所不同的是: 美国和德国团队所使用的是单孔坩埚, 仅能制备出单根纤维; 中国团队凭借其多年在玄武岩纤维领域的研究基础, 克服了成纤装置温度分布不均、熔体易析晶等困难, 使用多孔漏板制备出一束含多根连续月壤纤维, 极大地提高了单位时间的纤维产量。不同的技术成熟度也导致了纤维性能存在差异: 如美国和德国团队所制得的纤维直径较大, 力学性能不超过1 000 MPa, 而中国团队制得的纤维直径、强度等可控且接近目前地球玄武岩纤维, 这也进一步证实成纤过程中的技术诀窍(Know-how)对月壤纤维的性能有着显著的影响。

表 2 月壤纤维的研究成果总结

Table 2 Summary of research achievements on lunar soil fiber

团队	美国NASA		德国亚琛工业大学		中国科学院新疆理化技术研究所		
模拟月壤	MLS-2	JSC-1	ITALUS-1/2	Highlands	CLRS-1		
一次成纤根数	1	1	—	—	50		
纤维种类	连续	短切	连续	连续	连续或短切, 且直径可调		
纤维直径/ μm	45.0	1 000	12.0/16.0	17.0	8.4	9.5	12.8
纤维强度/ MPa	413	<1 000	—	—	1 043	1 223	1 438

注: —表示无或未见报道。

2 月壤纤维利用前景

月壤纤维在月球基地建设中可用于结构材料、生存和生命保障等领域, 不同领域中存在差异化的应用场景和功能要求, 而纤维材料的多功能性质为满足月球基地建设过程中对结构材料、生存和生命保障等领域的需求提供了有效方案(图4)。

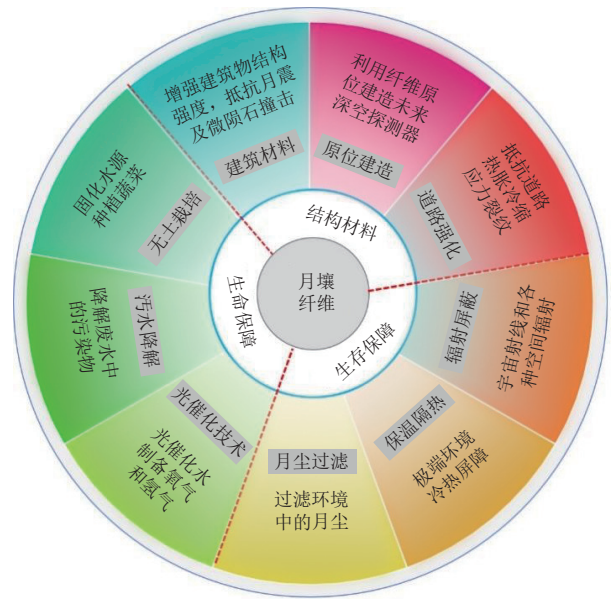


图 4 月壤纤维在月球基地建设中的潜在应用领域

Fig. 4 Potential applications of lunar fiber for lunar base construction

2.1 建筑材料

月球没有大气层保护, 气压约为 3×10^{-13} kPa^[3], 极端的高真空会导致传统材料脱气并产生挥发物, 从而加速材料的老化。同时, 宇航员生存需要氧气, 导致基地内外存在较大的压差。因此, 月球基地建设所用材料应具有优异的力学性能。从这一点考虑, 纤维增强复合材料可满足上述需求。如同济大学郭晓滢等^[26]对玄武岩纤维增强砂浆的性能进行了研究。结果表

明,与未引入玄武岩纤维的砂浆相比,添加纤维的砂浆经过28 d固化后具有更高的抗压和抗弯强度。当纤维添加量为0.3 vol%时,砂浆的断裂应变和应力比对照组分别提高了32.3%和45.8%。来自俄罗斯南乌拉尔国立大学(South Ural State University)的Orlov等^[27]也发现玄武岩纤维适合用于增强水泥基材料,可使水泥的抗弯强度提高1.5倍。因此月壤纤维可为月球基地建设提供性能优异的结构增强原材料。

其次,月球重力仅为地球的1/6左右^[3],这种低重力环境对材料本身性质影响较小,但会显著影响材料的制备过程^[28],如多相流体的流动过程、凝固过程中的传质和传热等,这些因素会导致材料的微观结构发生变化,进而影响材料的宏观性能。因此利用ISRU技术制备材料,必须考虑低重力对材料制备过程的影响。NASA的Curreri等^[29]研究了重力环境对玻璃态物质成纤的影响,发现在月球低重力环境下玻璃纤维可直接成纤,且在相同的工艺参数下,制得的纤维直径更小。根据玻璃纤维的“尺寸效应”原理,直径越小意味着出现缺陷的概率越小,这会提高纤维的力学性能。因此,月球低重力环境有利于提高月壤纤维的力学性能。

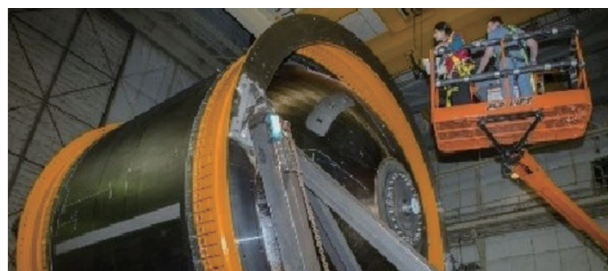
最后,月面存在月震及陨石^[3],可能会对基地的结构造成破坏。因此月球基地的建设材料必须具有较好的抗冲击特性。东南大学吴刚等^[30]研究了纤维加固圆形柱混凝土的抗震性能,发现将玄武岩纤维束缠绕加固在试样中,可使其最大载荷从425 kN提升至669 kN,同时极限位移由7 mm增大至57.4 mm,侧向位移角由0.01增大至0.072(侧向位移角定义为极限位移和柱有效高度的比值),纤维的引入实现了对混凝土的有效约束,抑制了剪切破坏过程,从而可以有效提高混凝土圆柱的抗震性能。

总的来说,月球所处的极端环境要求月球基地建设材料必须具有优异的性能,包括抗压强度、抗弯曲强度以及抗震特性等,这才能保证基地安全稳定运行。使用性能优异的纤维增强复合材料作为建筑材料,可为月球基地提供更加充分的保障。

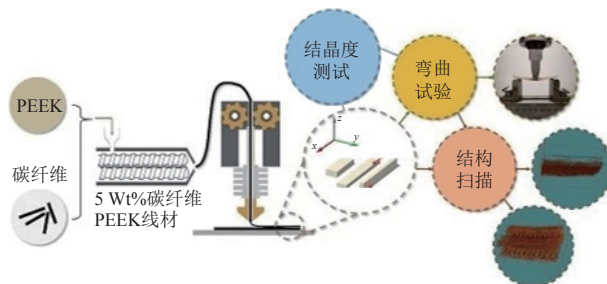
2.2 原位建造

除了作为探索月球的立足点,月球基地还可以作为探索深空的中转站甚至太空工厂。美国“阿尔忒弥斯”计划就将月球营地视为为下一步探索火星的“垫脚石”。由于月球具有较小的引力,因此,从月球直接发射探测器甚至飞船可以使用更少的燃料。同时,月球没有大气层,发射窗口不受天气等客观条件的限制,这将会极大提高发射效率。此外,在地球设计制造的探测器或飞船会受到重力限制,而在月面的低重力或

者月球轨道的微重力环境下可以制造出体积更大、结构更优异的飞行器,使其更适于宇宙环境和深空探索。月球基地可作为太空工厂,原位建造飞行器并实现直接在月球发射具有独特的优势。而建造飞行器需要大量性能优异的结构和功能材料。目前在地面上,纤维增强复合材料已被广泛应用于火箭部件(图5(a))、飞机机身及太空站站体等领域^[31]。如西安航天复合材料研究所廖英强等^[32]研制了一种全复合材料卫星天线承力筒。所制备的复合材料拉伸强度为771 MPa,拉伸模量为118 GPa。相较于传统的铝质承力筒,复合材料体系减重40%,在-170~120℃温度下经过24 h及6.5个高低温循环后发现产品无开裂和变形。由于复合材料具有高的比强度、比模量、可设计性强、尺寸稳定性好等优点,目前国内外航天飞行器材料已开始使用复合材料来替代传统的金属材料^[33]。来自中国科学院空间应用工程与技术中心的王功等采用^[34]垂直3D打印技术制备了短切纤维增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料(图5(b)),所制备的复合材料的抗弯强度约146 MPa,与利用模压法制备的材料性能相似,这一研究提供了一种低成本方法来制造具有可定制纤维取向的3D打印复合材料技术,展示了空间3D打印纤维增强复合材料的独特优势。



(a) 利用纤维增强复合材料制备的航天用低温储箱^[32]



(b) 3D打印短切纤维增强复合材料^[34],将碳纤维与PEEK树脂混合挤出制备3D打印线材,之后可进一步打印制成复合材料

图5 纤维增强复合材料在航天结构材料中的应用
Fig. 5 Application of fiber-reinforced composites in spacecraft structural materials

纤维增强复合材料是未来航空航天用材料的发展趋势。月壤纤维可为月面原位制造飞行器提供性能优异的纤维材料,与基体复合后可用于飞行器结构件的

制备和组装; 可以将制成的月壤纤维复合材料发送到各级轨道上在轨组装, 为建设大型空间站体提供关键原材料; 可也将纤维作为增强体加入树脂中, 利用 3D 打印等各种手段可制备定制化的零件, 用于空间站和深空探测器的建设和维护。

2.3 道路强化

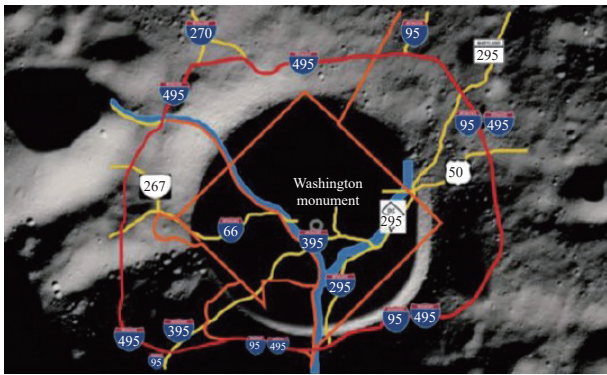
未来对月球的开发将不仅局限于某个特定的区域, 而是多点式对整个月球进行综合开发和利用。月球直径约 3 476 km, 每个开发点之间的距离在 km 级别。图 6 (a) 是月球南极的沙克尔顿环形山与美国华盛顿山公路网的对比, 可以看出月球地理规模较大^[4], 因此, 每个开发点之间势必需要通过道路相连, 以便于相互之间沟通和交流。但是, 月球表面存在极端的温差, 这样的冷热循环会严重威胁道路的质量及寿命。因此, 月球道路用材料必须具有优异的热稳定性。在地球上, 玄武岩纤维已被应用于道路建设。如长安大学傅珍等^[35]研究了玄武岩纤维对沥青混合料路用性能的影响, 发现玄武岩纤维可以改善沥青混合料的低温抗裂性; 经短期老化和长期老化后玄武岩纤维沥青混合料水稳定性能提高, 且玄武岩纤维显著降低了试样的未冻融劈裂强度。类似地, 可以利用月壤纤

维建设耐大温差循环的月球道路。中国科学院地球化学研究所唐红等^[36]通过微波技术直接烧结模拟月壤, 制备出力学性能优异的块体材料 (图 6 (b)), 其最大压缩强度高达 74.0 MPa。将月壤纤维与月壤混合后, 直接铺粉并利用微波烧结制成道路, 这一策略有望进一步提升月壤烧结路面的压缩强度及热稳定性。

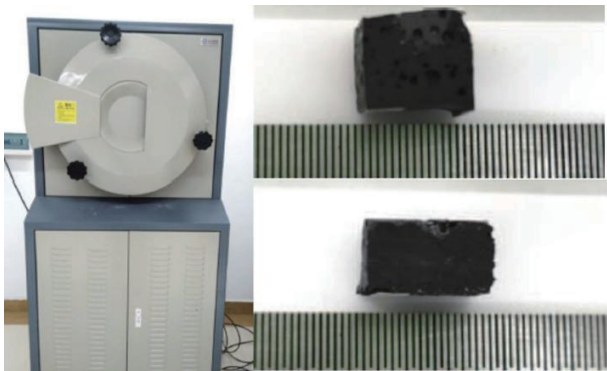
2.4 辐射屏蔽

月球上的辐射环境较为复杂, 除了宇宙射线、太阳粒子以外, 还有放射性核素产生的各类射线和电磁波^[3]。地球的地磁场和大气层为地球上的生命生存提供了保护。然而, 月球上没有全球性磁场, 也没有大气, 强烈的辐射会对人类和各种元器件产生辐射损伤。

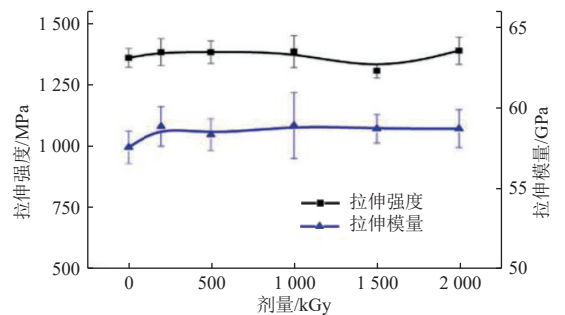
在月球基地的建设过程中, 可以用月壤来建立保护屏障, 以减少辐射带来的危害。而纤维材料具有较好的耐辐射特性以及较大的长径比和比表面积, 可在辐射环境中保持良好的性能以及更有效地屏蔽电磁辐射。如北京航空航天大学的顾轶卓等^[37]发现在经受 2 000 kGy (Gy 为辐射吸收剂量单位) 剂量以下的 γ 射线辐照后, 玄武岩纤维增强复合材料的力学性能基本保持不变。与其它文献报道的复合材料相比, 玄武岩纤维增强的复合材料具有较好的耐辐照性能 (图 7 (a))。乌克兰学者 Zorla^[38]对掺有不同比例含硼纤维混凝土样品的 γ 射线和中子衰减参数进行了评估, 与普通混凝土相比, 添加含硼纤维的混凝土复合材料可有效对 γ 射线进行屏蔽。杨中甲等^[39]发明了一种含 Fe、Mn 等重核元素的纤维复合材料, 材料对高能电离辐射具有很好的吸收和散射作用。中国科学院新疆理化技术研究所的常潮等^[40]前期通过在纤维织物表面原位生长碳纳米材料, 并制备了相应的纤维增强复合材料。复合体系中具有 nm- μ m 多层结构, 提高了电磁波在材料内部的多重反射几率, 使得纳米复合材料具有较好的电磁屏蔽性能 (图 7 (b)), 材料的电磁屏蔽性能随着织物层数的增加而提高 (图 7 (c)), 其中 3 层织物的总屏蔽效能值达到 40.0 dB, 可以满足民用领域应用要求。



(a) 月球南极的沙克尔顿环形山与美国华盛顿山公路网的等比例对比^[4]



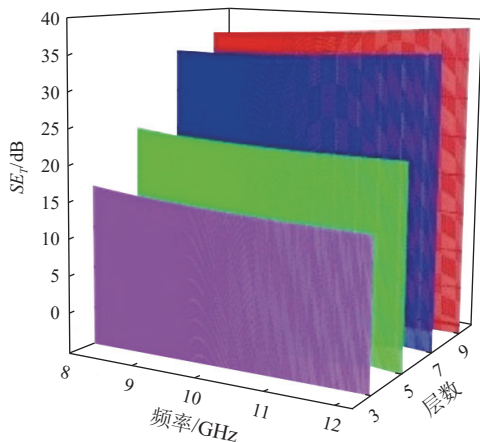
(b) 采用微波烧结技术制备的模拟月壤块体材料^[36]



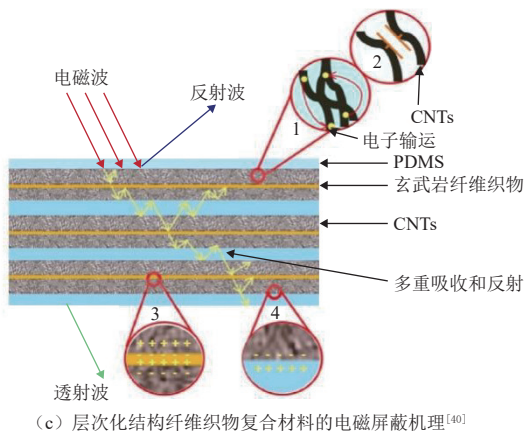
(a) 玄武岩纤维增强复合材料在 γ 射线辐照后的拉伸性能变化^[37]

图 6 月壤在月球基地道路建设中可能的应用场景

Fig. 6 Possible application of lunar soil in lunar road construction



(b) 不同层数纤维织物复合材料的总屏蔽效能值^[40]



(c) 层次化结构纤维织物复合材料的电磁屏蔽机理^[40]

图7 玄武岩纤维增强复合材料的耐辐射及辐射屏蔽性能

Fig. 7 Radiation resistance and shielding properties of basalt fiber reinforced composites

以月壤作为原材料生产月壤纤维材料,通过上述文献中的表面改性技术或者制备方法,对月壤纤维进行处理,使其具备相当的辐射屏蔽能力,有望满足月球基地建设中辐射屏蔽的需求。

2.5 保温隔热

月球具有极端的温差环境,月面平均温度变化范围约在 $-171\sim 111\text{ }^{\circ}\text{C}$,这会导致材料显著的热膨胀/收缩,加速材料的失效,也增加了材料装配难度^[3]。同时,极端的高/低温也会威胁宇航员的生命安全^[41-42]。因此,月球基地建设所使用的材料应具有较低的热胀系数和热导率^[18,43]。而月壤纤维属于玻璃体,导热系数较低,此外,可以将月壤纤维制成岩棉材料,从而获得保温效果更好的功能材料^[18]。同时也可采用反射式多层隔热材料(如纳米气凝胶、类纤维毡等)来阻断导热和辐射传热路径^[44]。

气凝胶是目前热导率最低的固态材料,其室温真空热导率可达 $0.001\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[45]。但纯气凝胶材料力学性能不佳,难以满足结构刚性要求。目前,已经推

广使用的纳米气凝胶材料都以气凝胶-纤维复合材料为主。NASA Ames研究中心的Cunnington等^[46]使用二氧化硅气凝胶和硅酸铝纤维制成复合材料,其导热系数比单一气凝胶降低50%以上,同时提高了材料的力学性能。同时,该团队还开发出陶瓷纤维-气凝胶复合隔热瓦,将其应用在航天飞机隔热材料上,比原有的隔热性能提高10~100倍。

同时,各类纤维隔热毡也已经应用在航天航空领域,如玄武岩纤维毡已应用在中国研发的超音速飞行器电子设备热防护层^[47]。玄武岩纤维使用温度范围为 $-260\sim 880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[48],月壤纤维应与玄武岩纤维性质相同,因此在月表温度变化范围内,月壤纤维的强度变化不大,符合月面环境极端冷/热环境的使用要求。意大利佩鲁贾大学Elisa^[49]等通过对比几种不同建筑材料的导热性(图8),发现玄武岩纤维的热导率为 $0.031\sim 0.034\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是常见保温材料中热导率最低的材料,这主要是由于玄武岩纤维的微观纤维结构和宏观直径较小所致。

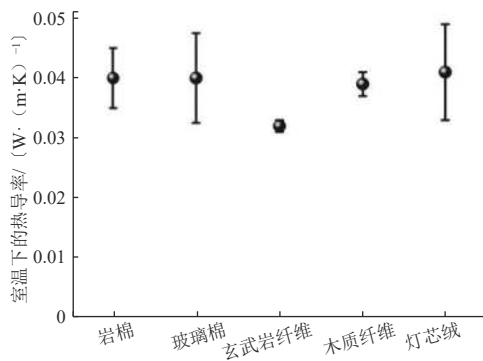


图8 不同纤维材料的热导率对比^[49]

Fig. 8 Comparison of thermal conductivity of different fiber materials^[49]

基于月壤纤维与玄武岩纤维成分接近的特点,可将月壤纤维及其复合材料应用于月面极端冷/热环境的保温隔热中。结合无机纤维的耐候性、优异的隔热保温性和降噪性能,将气凝胶和月壤纤维进行复合制备月壤纤维-气凝胶复合材料。通过这种多层复合隔热材料的设计,可阻断导热和减少辐射传热路径,既可以保证气凝胶-月壤纤维复合材料的力学性能,又可以充分利用气凝胶和月壤纤维低热导率的特点,克服月面极端冷/热环境的隔热保温难题。

2.6 月尘过滤

月壤颗粒物大部分直径在1 mm以下,其中直径小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒被称为月尘(约占月壤颗粒的10%~20%)^[50]。在月面上,由于光电效应和太阳风辐照作用,月尘能够保持长时间带电。着陆器着陆、人员和

装备移动时, 均会造成月尘漂浮, 而漂浮的带电月尘会导致设备故障。历次Apollo登月任务均发现, 月尘对宇航员防护服具有严重的磨损作用^[51]。国内外科学家已对宇航服除尘问题做了许多研究, 目前主流的除尘方法是“电帘除尘法”。20世纪70年代, Aoyoma^[52]对电帘除尘技术进行研究, 发现该技术可以通过非接触式的方法去除尘埃, 其原理是利用月尘粒子所带电荷, 使其平行或逆着电场方向移动来实现除尘效果。美国波音公司Kavya等^[53]在真实太空服织物上原位生长碳纳米材料, 研究了月尘在织物上的附着情况。研究结果表明该织物可以有效去除直径50~70 μm的模拟月尘, 除尘率可达97%, 且多次循环测试后除尘效果稳定(图9)。值得一提的是, 图中红色圆圈标注的位置是在多次循环测试后的结果。可以看到, 与少量循环测试的结果相比覆盖面积增大。这主要是由于当灰尘量较大时灰尘颗粒由于静电吸附等颗粒间相互作用发生聚集, 导致多次循环后有部分聚集颗粒没有被完全清除。但作者在后续实验中观察到当新灰尘再次覆盖聚集的黏性灰尘后, 其可以再次被清除。

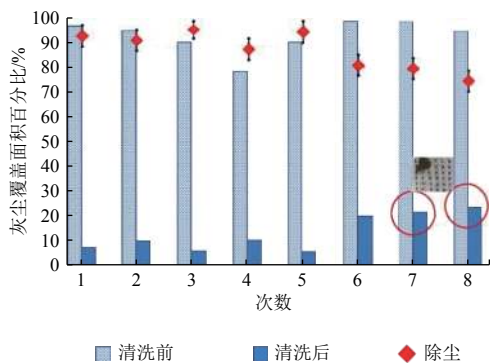


图9 碳纳米管-纤维复合材料的静态除尘效果^[53]

Fig. 9 Static dust removal effect of carbon nanotube/fiber composites^[53]

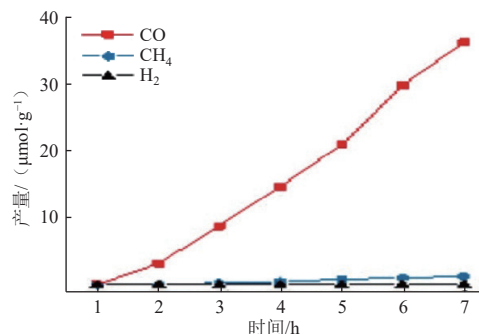
以上研究均已说明利用纤维织物作为宇航服外层面料, 并结合电帘技术可以达到月面除尘效果。月壤纤维具有优异的耐磨性、抗冲击性和抗静电特性, 将月壤纤维作为宇航服的外层织物, 可减少月尘因静电作用而大量粘附到宇航服上的风险, 同时具备月尘过滤效果。若是为了进一步提升纤维去除月尘颗粒的能力, 则可采用化学沉积或电镀法在纤维表面形成导电薄膜, 之后便可以利用“电帘除尘”法去除沉积到纤维织物表面或者内部的颗粒物。此类功能型月壤纤维用于宇航服外层织物, 将会更有利于宇航员在月面开展各种活动。

2.7 光催化分解水及污染物降解

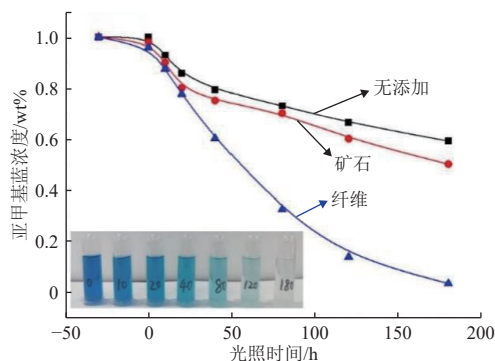
月球与地球不同, 没有一个可供人类呼吸的含氧

环境^[3]。因此, 建立月球基地必须考虑氧气的供给。据粗略估算, 月球基地仅用于生命维持所需的氧气就要10 t/人/年^[54-56]。氧气作为人类未来在月球上生存的必要需求, 对其制备方法的研究是保障月球基地建设的重要基础。月球上含有大量的水冰资源和充足的太阳光照^[3], 如果能够直接利用月球上的这些资源进行光催化水得到氢气和氧气, 不仅解决了月球上可用能源紧缺的问题, 而且对月球基地人员保障工作意义重大。

大量实验结果证明: 二氧化钛(TiO₂)是一种很好的光催化材料, 在太阳光照射下会产生光生电子和空穴, 可分解水制取氢气和氧气。对真实月壤样品的分析表明, 月球表面有大量高钛类月海玄武岩, 这为直接利用太阳光进行光催化反应提供了可能。近期, 南京大学邹志刚等^[10]对“嫦娥五号”采回的月壤进行了分析, 发现其含有钛铁矿、氧化钛以及多种铁基化合物, 可作为催化材料用于光伏电解水、光催化水分解、光催化CO₂还原等反应(图10(a))。



(a) 月壤直接用于催化CO₂还原反应^[10]



(b) 月壤纤维对亚甲基蓝的降解效果

图10 月壤及月壤纤维的光催化效果

Fig. 10 Photocatalytic effect of lunar soil and lunar fiber

此外, 本实验室初步研究发现, 将模拟月壤制成纤维后, 样品中的钛元素的存在状态发生了改变, 在太阳光照射下能够产生光生电子和空穴。产生的光生电子与空穴具有很强的化学活性, 可以对水中的有机污染物亚甲基蓝进行催化降解。由于纤维具有更高的

比表面积与催化效果,降解效率高于同样条件下直接使用月壤颗粒的降解效果(图10(b)),相关结果正在整理待发表。

2.8 无土栽培

中国探月工程总设计师吴伟仁院士指出,在月球现有自然环境下种植植物并不现实,但不排除未来在月球科研站进行人工培植的可能,为月球科研站日常生活以及太空移民提供保障。近期,来自佛罗里达大学(University of Florida)的Paul等^[57]利用真实月壤为基质,加入营养液后成功种植拟南芥,证实了月壤可以作为植物的种植基质。但是,研究人员发现利用月壤作为基质种植植物的结果并不理想,植物均出现发育缓慢的现象,且很多都表现出严重的胁迫形态。此外,生长在月球土壤中的所有植物都在离子胁迫下差异化表达基因,这种现象可能是月壤具有的高度离子性及富含纳米铁所造成的。

岩棉是由玄武岩矿石通过熔融离心工艺制备的纤维材料,常作为基质用于无土栽培。岩棉容重仅为 $0.08\sim 0.10\text{ kg/m}^3$,质地轻,吸水力强,排渗性好,不必要安装输氧装置^[58]。岩棉本身不吸收任何营养和水分,营养物质通过岩棉直达作物根系,可为植物方便快捷地调节肥料浓度。

上述结果均表明,月壤并不是理想的植物种植基质,必须对其进行改性以实现更好的效果。因此,可以将月壤纤维进行短切,或将月壤经熔融离心后制成短纤并压制成型,即可得到月壤岩棉,并用于无土栽培,可以使植物更好地生长。

3 结束语

近年来对月球的探测受到了世界各国的广泛关注,月球基地建设也被提上研究日程。原位利用月球资源可以有效降低月球基地建设成本以及基地对地球资源的依赖性。月球表面含有大量的月壤材料,利用月壤制备纤维并开发相应的纤维增强复合材料体系,为建造月球基地提供了一种新的材料解决方案。本文总结了多个研究团队在月壤纤维领域的研究进展,探讨了采用月壤并结合熔体牵引成纤技术来制备月壤纤维的可行性,可实现对水泥/月壤基体的有效增强等,从而为月球基地中宇航员的生命和生存保障等提供结构和功能材料。

但需要指出的是目前国内外对月壤纤维的研究仍处于起步阶段,仅是通过实验验证了利用月壤拉制纤维的可行性,但对于成纤过程及条件控制等基础研究和认识还不是很完善,特别是月球环境对成纤的影响

也不是很明确。其中,最主要的区别是月面重力仅有地球的1/6,且月面处于高真空环境中,这些都会影响月壤熔体的流动和扩散特性,进而影响月壤熔体的成纤特性。而对于月壤纤维的应用,目前研究成果均证实月壤纤维对水泥等建筑材料具有增强效果,为纤维未来的应用奠定基础。但是,如何实现在月面条件下实现月壤纤维的连续制备还需要克服一系列工程和技术难题。因此,在这一充满挑战的研究领域,需要更多来自技术和工程领域的科研人员进行深入的探索 and 协同攻关。

参 考 文 献

- [1] 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(中英文),2015,2(4):291-301.
JIANG S Y, SHEN Y, WU X, et al. Technical schemes of investigation and in-situ utilization for lunar surface generalized resource[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(4): 291-301.
- [2] 李嘉威,宗克清,何琦,等. 模拟月壤样品主微量元素的ICP-MS准确测试[J]. 南京大学学报(自然科学),2021,57(6):944-956.
LI J W, ZONG K Q, HE Q, et al. Accurate determination of major and trace elements of lunar soil simulant by ICP-MS[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021, 57(6): 944-956.
- [3] GUO Z S, XING D, MA P C, et al. Production of fibres from lunar soil: feasibility, applicability and future perspectives[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4: 923-937.
- [4] National Aeronautics and Space Administration. Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview [EB/OL]. (2020) [2022-05-30]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis_plan-20200921.pdf.
- [5] European Space Agency. Moon village [EB/OL]. (2016) [2022-05-30]. https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2016/Moon_Village.
- [6] 裴照宇,刘继忠,王倩,等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. *科学通报*, 2020, 65(24): 2577-2586.
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [7] China National Space Administration. International Lunar Research Station (ILRS) guide for partnership [EB/OL]. (2021) [2022-05-30]. <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465645/n6465648/c6812150/content.html>.
- [8] NASER M Z, CHEHAB A I. Materials and design concepts for space-resilient structures[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 98: 74-90.
- [9] 叶培建,黄江川,孙泽洲,等. 中国月球探测器发展历程和经验初探[J]. *中国科学:技术科学*, 2014, 44(6): 543-558.
YE P J, HUANG J C, SUN Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(6): 543-558.
- [10] YAO Y F, WANG L, ZHU X, et al. Extraterrestrial photosynthesis by Chang'E-5 lunar soil[EB/OL]. (2022)[2022-05-30]. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.011>.
- [11] SONG L, XU J, FAN S Q, et al. Vacuum sintered lunar regolith

- simulant:pore-forming and thermal conductivity[J]. *Ceramics International*, 2019, 45: 3627-3633.
- [12] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, 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.
- [13] WILHELM S, CURBACH M. Manufacturing of lunar concrete by steam[C]//Proceedings of Earth and Space 2014. Reston: American Society of Civil Engineers. St. Louis, MO: [s. n.], 2015: 274-82.
- [14] INDYK S J, BENAROYA H. A structural assessment of unrefined sintered lunar regolith simulant[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 517-536.
- [15] DOU R, TANG W Z, WANG L, et al. Sintering of lunar regolith structures fabricated via digital light processing[J]. *Ceramics International*, 2019, 45: 17210-172105.
- [16] HULL D, CLYNE T W. An introduction to composite materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 5-10.
- [17] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Composites Part B*, 2015, 74: 74-94.
- [18] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering[J]. *Composite Structures*, 2019, 214: 246-263.
- [19] HO D, SOBON L E. Extraterrestrial fiberglass production using solar energy: 79N32237[R]. Washington, D. C., United States: National Aeronautics and Space Administration, 1979.
- [20] DALTON R, NICHOLS T. Lunar fiberglass: properties and process design[R]. Washington, D. C., United States: National Aeronautics and Space Administration, 1987.
- [21] TUCKER D S, ETHRIDGE E C. Processing glass fiber from Moon/Mars resources[C]//Proceedings of Sixth International Conference and Exposition on Engineering, Construction, and Operations in Space. Reston: American Society of Civil Engineers, 1998: 290-300.
- [22] TOUTANJI H, SCHRAYSHUEN B, HAN M. New glass fiber reinforced concrete for extraterrestrial application[C]//Proceedings of Earth and Space 2006. Reston: American Society of Civil Engineers, 2006: 1-18.
- [23] PICO D, LÜKING A, BLAY S Á, et al. Moon basalt fiber-preliminary feasibility study: 221107325[R]. Aachen, Germany: Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen Universit, 2017.
- [24] BECKER T, LÜKING A, MEINERT T, et al. Moonfibre -fibres from lunar regolith[C]//Proceedings of the 2nd Sino-German Workshop on 3D Printing in Space. Berlin: [s.n.], 2019.
- [25] 邢丹, 葱雄宇, 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.
- XING D, XI X Y, GUO Z S, et al. Study on the feasibility of preparing a continuous fibre using lunar soil simulant[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(12): 1625-1633.
- [26] 郭晓璐, 黄加宝, 章红梅. 纤维增强粉煤灰-钢渣基地聚合物耐高温性能[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(4): 530-537.
- GUO X L, HUANG J B, ZHANG H M. High temperature resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(4): 530-537.
- [27] ORLOV A A, CHERNYKH T N, SASHINA A V, et al. Study on basalt fiber parameters affecting fiber-reinforced mortar[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 71: 012015.
- [28] 赵建福, 解京昌, 林海, 等. 不同重力条件下气/液两相流实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(3): 367-369.
- ZHAO J F, XIE J C, LIN H, et al. Experimental study on two-phase gas-liquid flow patterns at different gravity conditions[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(3): 367-369.
- [29] TUCKER D S, ETHRIDGE E C, CURREIR P. Glass fiber processing for the Moon/Mars program: Center director's discretionary fund final report: NASA-TM-108379[R]. Washington, D. C., United States: National Aeronautics and Space Administration, 1992.
- [30] 吴刚, 魏洋, 蒋剑彪, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究[J]. *工业建筑*, 2007, 37(6): 19-23.
- WU G, WEI Y, JIANG J B, et al. Comparative study on seismic performance of circular concrete columns strengthened with BFRP and CFRP composites[J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(6): 19-23.
- [31] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1-12.
- DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-12.
- [32] 廖英强, 曾金芳. 一种全复合材料卫星天线承力筒的研制[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(2): 83-88.
- LIAO Y Q, ZENG J F. Development of all-composite bearing cylinder for satellite antenna[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2015, 36(2): 83-88.
- [33] 赵云峰, 潘玲英. 航天先进结构复合材料及制造技术研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(4): 29-36.
- ZHAO Y F, PAN L Y. Research progress of aerospace advanced polymer matrix composites and manufacturing technology[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2021, 51(4): 29-36.
- [34] LI Q S, ZHAO W, LI Y X. Flexural properties and fracture behavior of CF/PEEK in orthogonal building orientation by FDM: microstructure and mechanism[J]. *Polymers*, 2019, 11(4): 656.
- [35] 傅珍, 黄振, 马峰. 玄武岩纤维对老化沥青混合料路用性能的影响[J]. *材料导报*, 2016, 30(2): 118-122.
- FU Z, HUANG Z, MA F. Effect of basalt fiber on the road performance of aged asphalt mixture[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(2): 118-122.
- [36] ZHOU C J, TANG H, LI X Y, et al. Effects of ilmenite on the properties of microwave-sintered lunar regolith simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(6): 06021006.
- [37] LI R, GU Y Z, YANG Z J, et al. Effect of g irradiation on the properties of basalt fiber reinforced epoxy resin matrix composite[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 466: 100-107.
- [38] ZORLA E, IPBÜKER C, BILAND A, et al. Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 313: 306-318.
- [39] 杨中甲, 李然, 顾颖卓, 等. 一种防电离辐射的纤维增强树脂基复合材料及其制备方法[P]. 中国: CN106009511A, 2016-10-12.
- [40] CHANG C, YUE X, HAO B, et al. Direct growth of carbon nanotubes on basalt fiber for the application of electromagnetic interference shielding[J]. *Carbon*, 2020, 167: 31-39.
- [41] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(5): 405-416.
- WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration

- program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 405-416.
- [42] DE ROSA D, BUSSEY B, CAHILL J T, et al. Characterisation of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74(1): 224-246.
- [43] 于登云, 邱家稳, 向艳超. 深空极端热环境下热控材料研究现状与发展趋势[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(5): 447-453.
- YU D Y, QIU J W, XIANG Y C. Research status and development trend of thermal control materials in deep space extreme thermal environment[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(5): 447-453.
- [44] 张鹏飞, 梁龙, 陶积柏, 等. 深空环境下热防护材料的研究及应用进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(1): 77-82.
- ZHANG P F, LIANG L, TAO J B, et al. Research and development of thermal protection materials applied in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(1): 77-82.
- [45] 艾素芬, 向艳超, 雷尧飞, 等. 火星车低密度纳米气凝胶隔热材料制备及性能研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(5): 466-473.
- AI S F, XIANG Y C, LIE X F, et al. Preparation and characterization of ultra-low density nano-aerogel insulation materials for mars rover[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(5): 466-473.
- [46] CUNNINGTON G R, LEE S C, WHITE S M. Radiative properties of fiber-reinforced aerogel: theory versus experiment[J]. *Journal of Thermophysics and Heat transfer*, 1998, 12(1): 17-22.
- [47] 崔泰航, 白雪松. 隔热材料在超音速飞行器设备热防护设计中的应用研究[C]//中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会议论文集—S06材料、工艺与制造技术. 洛阳: 中国航天第三专业信息网, 2018: 216-225.
- [48] 林希宁, 张凤林, 周玉梅. 玄武岩纤维及其复合材料的研究进展[J]. *玻璃纤维*, 2013(2): 39-44.
- LIN X N, ZHANG F L, ZHOU Y M. Progress of research on basalt fiber and composites[J]. *Fiber Glass*, 2013(2): 39-44.
- [49] ELISA M, ELISA B, FABRIZIO A. Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization[J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 421-432.
- [50] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 151-168.
- [51] GAIER J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions: NASA/TM-2005-213610/REV1[R]. Washington, D. C., United States: National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [52] AOYOMA M, MASUDA S. Characteristics of electric dust collector based on electric curtain[C]// Proceedings of the General Conference of the Institute of Electronic Engineers. Japan: [s. n.], 1971.
- [53] MANYAPU K, PELTZ L, LEON P, et al. Spacesuit dust mitigation-study in vacuum settings using carbon nanotube fibers with electric fields[C]//2020 International Conference on Environmental Systems. Sydney: [s. n.], 2020.
- [54] SCHRUNK D, SHARPE B, COOPER B, et al. The moon resources: future development and colonization Appendix E[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons, 1999: 61-112.
- [55] TAYLOR L A, CARRIER W D. Oxygen production on the moon: an overview and evaluation: 91N26034[R]. Washington, D. C., United States: National Aeronautics and Space Administration, 1991.
- [56] DUKE M, HOFFMAN S, SNOOK K. The lunar surface reference mission: a description of human and robotic surface activities: NASA/TP-2003-210793[R]. Washington DC, United States: National Aeronautics and Space Administration, 2003.
- [57] PAUL A L, ELARDO S M, ERL R. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration[J]. *Communications Biology*, 2022, 5(1): 382.
- [58] 崔国庆. 岩棉无土栽培灌溉策略的制定与生长调控技术[J]. *农业工程技术*, 2019, 39(7): 24-29.
- CUI G Q. Development of irrigation strategy and growth control technology for rockwool soilless cultivation[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2019, 39(7): 24-29.

作者简介:

马鹏程(1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 高性能纤维材料、空间资源原位利用、高效分离材料等前沿交叉学科领域。
通信地址: 新疆乌鲁木齐市北京南路40-1号, 中国科学院新疆理化技术研究所(830011)
电话: (0086)991-6992225
E-mail: mapc@ms.xjb.ac.cn

Progress and Perspect of Lunar Fiber Materials

MA Pengcheng^{1,2}, GUO Zeshi^{1,2}, SU Xiuzhong³, ZHAO Chen³, LIANG Cunguang^{1,2},
XI Xiongyu^{1,2}, XING Dan⁴, ZHENG Qingbin⁴

(1. Laboratory of Environmental Science and Technology, The Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China.;

2. College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.;

3. Aerospace Engineering Shanghai, Shanghai 201100, China.;

4. School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518172, China)

Abstract: Based on the requirements on the structural and functional materials used for the construction of lunar base, this paper discusses the feasibility of using lunar soil to prepare corresponding fibers to achieve this ambitious goal, and the latest progress in this field is reviewed. The unique advantages and application prospects of lunar soil fibers for structural protection, survival and life support in the lunar bases are then analyzed. Finally, theoretical and technological issues for future research and breakthroughs in the development of lunar fibers are proposed, in an effort to promote the prosperity of this promising field in both fundamental and applied research.

Keywords: lunar soil; lunar fiber; in-situ resource utilization; lunar base construction

Highlights:

- Feasibility of using lunar soil for the production of continuous fiber is described.
- Progress in the lunar fiber home and abroad is reviewed.
- Concept on the construction of lunar base using lunar fiber-reinforced composites is proposed.
- The prospect of functionality and application of lunar fiber is discussed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]