

论 文



模拟月壤制备连续纤维的可行性研究

邢丹^{1,2}, 蔥雄宇¹, 郭泽世^{1,2}, 岳秀^{1,2}, 郝斌^{1,2}, 梁存光^{1,2}, 顾轶卓³, 陈涛⁴, 王瑞⁵, 马鹏程^{1,2*}

- 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研究中心, 北京 100049;
- 3. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100083;
- 4. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201;
- 5. 中科瑞丽分离科技无锡有限公司, 无锡 214001
- * E-mail: mapc@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2020-03-31; 接受日期: 2020-05-15; 网络版发表日期: 2020-08-24

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(编号: 2019-JCTD-001)、中国科学院"十三五"规划重点培育方向(编号: 2016PY005)和新疆维吾尔自治区"天山雪松计划"(编号: 2018XS07)资助项目

摘要 月球基地建设是人类开展深空探测的初步任务,原位利用月球资源对于实现月球基地建设具有重要意义.本文以月球基地建设中对高性能材料的需求为出发点,研究了模拟月壤的组成、晶相结构、熔融特征和成纤行为.研究结果表明,月壤与地球玄武岩矿石具有相近的化学成分和矿物相组成,模拟月壤在1332°C完全熔融并在淬冷后转化为非晶态玻璃体.采用熔融-牵引法获得了单丝拉伸强度超过1400 MPa的月壤基连续纤维,该强度接近目前商业化的玄武岩纤维.研究结果证实原位利用月壤制备连续纤维具有一定的可行性,基于月壤纤维增强的复合材料有望为未来月球基地建设提供原材料保障.

关键词 模拟月壤,玄武岩,连续纤维,月球基地建设

1 引言

月球是离地球最近的天体,是人类唯一、可靠且稳定的"天然空间站",也是人类走出地球、开展深空探测的起点^[1,2].因此,月球探测是人类了解宇宙、认识太阳系、探索地球及其他自然天体形成与演化、获取更多未知宇宙奥秘的重要手段,探月工程能有效地提升一个国家航空、航天、材料、通信等诸多领域的科技水平^[3].随着月球探测工作的深入发展,月球基地

建设成为国内外众多月球探测方案和开发计划的重要目标,月球基地将为载人登月任务以及人类移居月球的梦想提供保障^[4].

月球基地建设需要大量的结构和功能材料,这些材料可通过两种途径获得: (1) 从地球运送到月球; (2) 利用月球资源就地取材,实现材料的原位利用. 就第一种方案来讲,材料的运输成本十分高昂: 根据目前的技术水平估算,把1 kg材料运输到月球所需要的成本约为5.0~9.0万美元^[5-7]. 因此从经济效益方面考虑,这并

引用格式: 邢丹, 蒽雄宇, 郭泽世, 等. 模拟月壤制备连续纤维的可行性研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 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 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1625–1633, doi: 10.1360/SST-2020-0141

© 2020 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

不是一个行之有效的方法. 相比之下, 月球资源原位利用能从根本上解决材料运输成本高昂的问题, 在月球基地建设过程中值得考虑. 载人登月、无人探测器、环月卫星遥感等观测结果表明, 月球表面除了山脉、撞击坑外, 还覆盖着一层月球土壤(简称月壤)^[8]. 月壤主要成分包括橄榄石、斜长石、辉石、尖晶石、钛铁矿等碎屑, 角砾岩碎屑、各种玻璃物质、黏合集块岩、陨石碎片等^[9,10], 这些矿物组成与地球表面分布的玄武岩矿石较为相近.

目前国内外多个科研组对月壤或模拟月壤样品进 行了研究, 探讨了采用月壤制备结构材料用于建设月 球基地的可行性. 如美国田纳西大学Taylor和Meek[11] 研究了Apollo-17号带回的月壤物理性质、并对其进行 了微波烧结实验. 研究结果表明, 月球风化层中含有 的铁元素促进了月壤和微波辐射之间的耦合作用、可 有效提高烧结产物的黏附力和强度、使月壤易于成型 并有望成为月球就地利用的最佳资源. 德国亚琛应用 技术大学Fateri和Gebhardt^[12]采用激光选区熔化技术 对月球风化层模拟物进行处理、通过工艺优化制备出 一系列不同几何形状的物件(齿轮、螺帽等), 证实了 激光熔化技术用于月球原位资源增材制造工程器件的 可行性,从而有望在月球上实现现场制造,中国科学院 重庆绿色智能技术研究院段宣明课题组[13]针对月球 表面的太空环境, 采用真空烧结技术处理模拟月壤, 并 研究了所得材料的热学性质. 研究发现, 在真空1100°C 下烧结月壤可得到密度为1.19 g/cm3的多孔材料, 其导 热系数(0.265 W/(m·K))远低于混凝土(1.461 W/(m·K)) 和其他月球资源衍生的结构材料(2.000 W/(m·K)),可 被用作月球基地建设的保温隔热材料. 近期, 美国国 家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)推出"重返月球"项目, 计划在2040年 之前建立永久性月球基地、并在月球资源原位利用方 面部署了诸多前瞻性研究课题[14].

上述研究虽然在一定程度上取得了进步,展示了原位利用月壤建造月球基地的可行性,但不可否认由于月壤成分复杂,在烧结或熔融过程中会发生一系列物理、化学变化;由于烧结条件较难控制,使得烧结产物普遍存在强度较低的问题,如美国阿拉巴马大学Toutanji等人^[15]以能够从月球硫铁矿中提取出硫为前提,将熔融硫磺与模拟月壤以一定比例进行混合,制备出硫磺混凝土材料,但材料的抗压强度仅为31.0 MPa,

是目前使用的高强混凝土强度^[16]的1/2左右. 另外, 月球表面环境与地球大不相同, 昼夜温差可达300°C, 月面温度剧烈变化对材料的力学性能提出更高的要求. 月球基地还要应对来自太阳风、微陨石撞击及宇宙射线辐射的威胁^[17], 这些综合因素使得单一烧结材料很难满足月球基地建设中对结构增强材料性能的要求.

复合材料是由基体和增强相组成的二元或多元混 杂体系,组成材料在性能上互相取长补短,产生协同效 应, 使得复合材料综合性能优于原组成材料而满足各 种不同的要求, 复合材料构建月球基地具有一定的优 势、如质轻、强度高、对小型陨石颗粒撞击有一定的 防护力、便于模块化制作、易于装配和维护等[18]. 增 强体是复合材料的关键组成部分, 在复合材料中起着 增加强度和改善性能的作用, 纤维被广泛用作复合材 料的增强体。在诸多的纤维产品中、玄武岩纤维是一 种以玄武岩矿石为原料, 经高温熔融后迅速拉制而成 的纤维材料, 其生产过程简单, 无需加入任何添加剂, 并且环境友好、无污染物排放. 玄武岩纤维具有一系 列优异性能、如突出的力学性能、使用温度范围广、 耐酸碱腐蚀, 此外还有绝缘性好、绝热隔音等优异性 能[19~21]. 目前, 在地球上玄武岩纤维已被广泛用作复 合材料增强体, 如在建筑业、桥梁工业、混凝土构件 中采用连续玄武岩纤维代替钢筋,不仅提升了结构的 力学性能、延性、耐高温性能, 还解决了传统混凝土 钢筋不耐腐蚀的问题[22,23].

月球表面广泛分布有大量玄武岩质月壤^[8],若能原位利用月壤制备连续纤维并用作月球基地建设中基体材料的增强体,不仅能实现月球资源的就地利用、降低成本,还有望满足月球基地建设对所需结构材料性能的要求.本文以模拟月壤为研究对象,通过分析样品的组成、结构、热学行为,探究了模拟月壤用于制备连续纤维的可行性,并对所得纤维的力学性能进行了分析,展望了材料用于月球基地建设的前景.

2 实验

2.1 实验原料

本研究所使用的模拟月壤样品(CAS-1)由中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心提供.该样品是以吉林省长白山地区火山渣为初始物质(含20%~40%的玻璃物质),在进行除杂、粉碎、研磨等一

系列加工后制备而成.模拟月壤样品与Apollo-14号采集的月壤具有相似的化学和矿物相组成^[24,25].此外,还选取国内华北(河北蔚县)、东北(黑龙江牡丹江)、西南(贵州水城)和西北(新疆乌鲁木齐)地区的4种地球玄武岩矿石,对其化学组成进行分析并与模拟月壤、真实月壤的成分进行对比,探讨地球玄武岩与月海玄武岩的差异.

2.2 实验方法

实验采用两步法制备月壤基连续纤维. 首先将盛有模拟月壤样品(250.0 g)的刚玉坩埚置于高温熔料炉中,以5°C/min升温速率从室温升温至1200°C,然后以2°C/min升温速率继续升温至1500°C并保温2 h以实现样品中各个组分的均质化,此时样品中的各种晶相完全熔融,随后将熔融体用水快速冷却得到不含结晶相的月壤玻璃体. 连续纤维的制备过程及所用设备如图1所示. 将月壤玻璃体粉碎后分批次加入到连续纤维拉丝熔炉中,在1400°C下保温0.5 h,待熔融液从铂铑合金漏板孔中流出后,用牵引棒牵引将其绕在拉丝机上,通过控制拉丝机转速得到具有不同直径的连续纤维. 纤维在制备过程中表面涂覆去离子水以方便纤维集束和成卷.

采用电感耦合等离子发射光谱(ICP-OES, Vista-PRO, Varian, 美国)测试样品中所含元素, 测试时用氢 氟酸和高氯酸消解待测样品并配置成特定体积的溶

液,通过测定溶液中不同元素的含量,经计算得到样品中相应元素及氧化物的质量百分比;采用X-射线衍射仪(XRD, D8 X, Bruker,德国)分析样品中的晶体及矿物相组成结构;采用同步热分析仪(STA449F3, Netzch,德国)研究不同温度下样品的质量及热流变化情况,进而分析样品随温度变化而发生的物理化学过程,测试条件设置为温度从室温至1400°C,空气气氛下加热速率10°C/min,气氛流速100 mL/min;采用扫描电子显微镜(SEM, XL, Phenom,荷兰)表征模拟月壤及纤维的形貌;采用纤维强度仪(XQ-1A,上海新纤仪器)测试单根纤维的拉伸强度,测试依据ASTM C1557-14标准,其中样品标距和加载速率分别为25.0 mm和2.0 mm/min.每组测试保证至少有30个有效数据,并采用双参数Weibull模型[26,27]对得到的数据进行统计学分析,以评价纤维的强度分布情况.

3 结果与讨论

3.1 模拟月壤与玄武岩矿石的成分

为表述方便,通常以氧化物组成来描述各种矿石的化学组成,因此,在本研究中采用类似的方法来探究模拟月壤的化学成分.表1为测得的模拟月壤的化学组成,将其与Apollo-14号飞船采集的真实月壤样品(Apollo-14,采自月球雨海盆地,主要成分为月海玄武岩)^[24]以及国内4种玄武岩矿石的化学成分进行了对

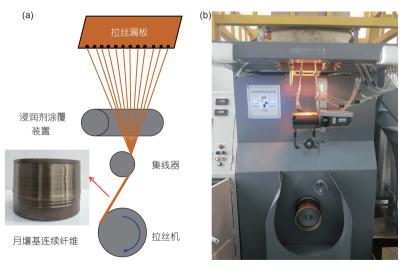


图 1 (网络版彩图)月壤基连续纤维的制备过程示意图(a)和所用设备实物图(b)

Figure 1 (Color online) Schematic illustration showing the preparation of lunar soil-based continuous fibre (a) and the equipment used in this study (b).

	表 1	模拟月壤与不同地区玄武岩矿石的化学成分(水	vt%
--	-----	-----------------------	-----

Table 1 Chemical composition of lunar soil, simulant and basalt ores from different areas in China (w	Table 1	Chemical composition of	of lunar soil	simulant and ba	salt ores from differen	nt areas in China	(wt%)
--	---------	-------------------------	---------------	-----------------	-------------------------	-------------------	-------

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_xO_y	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K_2O	P_2O_5	MnO	其他
模拟月壤	48.55	16.67	11.17	7.72	8.60	3.23	2.08	1.50	0.34	0.14	0.05
Apollo-14 ^[24]	48.10	17.40	10.40	10.70	9.40	0.70	1.70	0.55	0.51	0.14	_
河北蔚县	52.77	14.70	9.58	9.63	6.57	4.33	1.24	0.83	0.23	0.13	0.06
黑龙江牡丹江	53.59	14.47	10.34	8.89	4.73	4.41	1.58	1.54	0.32	0.13	0.03
贵州六盘水	51.92	12.41	14.01	9.31	4.73	2.30	3.37	1.02	0.37	0.19	0.05
新疆乌鲁木齐	53.72	13.15	10.26	7.67	5.65	5.19	1.37	2.59	0.18	0.22	0.04

比. 从表1可以看出, 模拟月壤中最主要的成分为SiO₂, 质量分数为48.55%, 其次是Al₂O₃, Fe₂O₂以及碱金属和 碱土金属的氧化物.对比模拟月壤与Apollo-14号飞船 采集的真实月壤的化学成分, 发现月海玄武岩与模拟 月壤中主要成分之间的差异并不大. 与4种地球玄武 岩矿石相比、模拟月壤中SiO。含量相对较低、而Al₂O。 和MgO含量较高、其中贵州六盘水地区玄武岩矿石中 Fe,O,和TiO,含量显著高于月壤和其他矿石,表明峨眉 山系玄武岩矿石本身高铁、高钛的地球化学特征[28]. SiO₂作为玄武岩纤维主要成分^[27], 其含量减少有利于 降低熔体黏度; Al₂O₃含量升高有利于得到连续、稳定 的纤维: 而MgO含量增加有利于原料的熔化和制取较 细的纤维[29]。此外,模拟月壤的化学成分符合我们前 期建成的中国玄武岩纤维材料大数据库[30]中各种玄 武岩纤维氧化物的组成范围, 因此预测模拟月壤熔融 体具有较好的成纤特征, 有望通过高温熔融-机械牵引 法来制备连续纤维.

3.2 月壤与玄武岩矿石矿物相结构分析

更进一步,我们对不同样品的矿物相结构进行了分析,图2为模拟月壤和不同地区玄武岩矿石的XRD 谱图.可以看出模拟月壤含有多种晶相结构,对出现的衍射峰进行分析,确定样品中含有钠长石、钙长石、辉石、透辉石、橄榄石等硅酸盐晶体结构^[31]. Apollo-14号飞船着陆在月球雨海盆地溅射物堆积形成的山脊上,这些地区采集的月壤样品主要以长石和辉石为主^[32]. 因此,模拟月壤的矿物相组成及晶型与Apollo-14号所采集的真实月壤样品较为接近. 对比模拟月壤与4种典型玄武岩矿石的XRD发现,材料中的矿物组成基本相似,只是在模拟月壤中没有发现石英,而贵州六盘水和新疆乌鲁木齐的玄武岩矿石中存在石

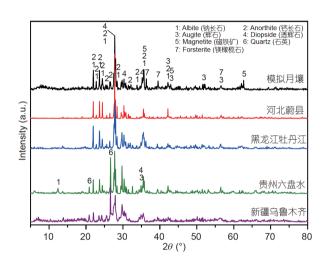


图 2 (网络版彩图)模拟月壤和不同地区玄武岩矿石的 XRD谱图

Figure 2 (Color online) XRD patterns of lunar soil simulant and basalt ores from different areas in China.

英晶体结构, 这与玄武岩矿石形成的地质结构有关.

3.3 模拟月壤的热力学行为

采用同步热分析研究模拟月壤在加热熔化过程中发生的物理化学反应,结果如图3所示.从热重(TG)曲线上看,样品在室温至570°C范围有0.55%的失重,主要为样品吸附水分挥发以及盐类水合物矿物分解而导致的失重;在570°C~1061°C范围有0.30%的增重,主要为样品中磁铁矿相等在空气氛围被氧化增重;在1061°C~1400°C范围有0.58%的失重,主要为样品中盐类矿物分解失重.与TG曲线相对应,样品的差式扫描量热(DSC)曲线出现了3个吸热峰和2个放热峰.第1个吸热峰(峰值约为97°C)是由样品本身吸附的水分挥发引起的;第2个吸热峰(峰值约为780°C)主要为样品熔融吸热,表明在该温度附近样品开始熔化,液相开始出

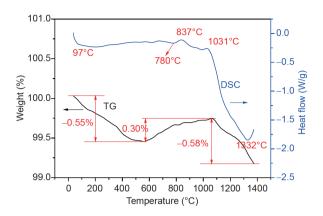


图 3 (网络版彩图)模拟月壤的热重-差式扫描量热(TG-DSC)曲线

Figure 3 (Color online) TG-DSC curve of lunar soil simulant.

现;第3个吸热峰(峰值约为1332°C)主要为样品熔融吸热以及样品中盐类矿物分解吸热,且当温度超过1332°C,再无吸热放热峰出现,表明样品已完全熔化.另外,DSC曲线上出现的第1个放热峰(峰值约为837°C)主要为样品中磁铁矿相等氧化放热;第2个放热峰(峰值约为1031°C)主要为样品析晶放热,在该温度下,熔化的样品由于化学键的断裂和重组而形成新的化合物,这些化合物分子聚集后形成晶核,当达到一定大小后出

现独立晶相,即析出晶体^[33],因此该温度为月壤样品的最高析晶温度.通过DSC曲线可以确定模拟月壤样品的初始熔融温度为780°C、最高析晶温度为1031°C、完全熔化温度为1332°C.这些热力学参数与玄武岩矿石熔化制备纤维过程的参数相似.因此通过这些参数的调整有望利用模拟月壤来制备连续纤维,即样品熔化温度要高于1332°C、纤维成型温度(即拉丝漏板温度)应比析晶温度高80°C左右^[34],否则纤维拉丝过程中将会有晶体析出并导致纤维断丝

3.4 月壤基连续纤维形貌分析

通过对模拟月壤组成、结构及热学性能进行分析,预测该模拟月壤可用于制备连续纤维,依据3.3节中确定的热力学参数,我们设定炉腔温度1400°C、漏板温度1110°C进行拉丝,获得3种不同直径的月壤基连续纤维.图4为模拟月壤和拉丝速度分别为4,8,10 m/s所制备的月壤基连续纤维在不同放大倍数下的SEM照片.从图中可见模拟月壤样品(图4(a)和(b))呈现形状不规则的颗粒状,具有典型的研磨形成的颗粒特征,并伴随有边缘锋利的碎片和大小不一的孔洞,孔洞中填充有尺寸较小的颗粒.孔洞的存在主要是由于模拟月壤初始物质取自火山渣,呈现蜂巢或泡沫状结

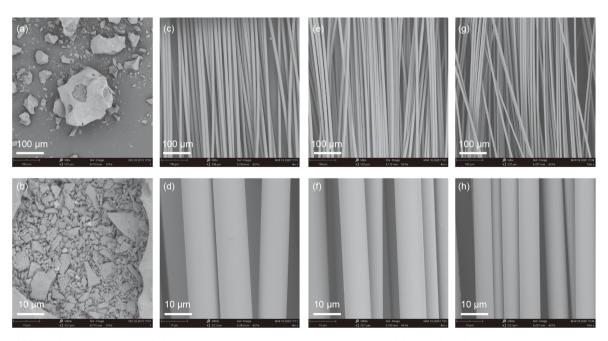


图 4 模拟月壤(a), (b)和拉丝速度为4 m/s (c), (d), 8 m/s (e), (f), 10 m/s (g), (h)制备的月壤基连续纤维的SEM照片 Figure 4 SEM images showing the morphologies of lunar soil simulant (a), (b) and corresponding fibres obtained at 4 m/s (c), (d), 8 m/s (e), (f), 10 m/s (g), (h) under different magnification.

构^[24],样品经过破碎、研磨等过程后仍然保持火山渣的特征.不同拉丝速度下制备的月壤基连续纤维(图4 (c)~(h))外表均呈现光滑的圆柱状结构,这是因为纤维在成纤过程中矿石熔融体在表面张力的作用下收缩成体积最小的圆形并在快速冷却凝固时保持此形状.对不同拉丝速度下纤维的直径进行统计分析(结果见表2),发现纤维直径随拉丝速度的增加逐渐减小,这是由于在纤维成型过程中熔融体经历了一个同时伴随有凝固和外力牵引而变长、变细的过程^[35],在这一过程中拉丝速度越快,单位时间内拉出的纤维越长,纤维的直径就会越小.

3.5 月壤基连续纤维相结构分析

进一步,我们对制备得到的月壤基连续纤维的相结构进行了分析,结果如图5所示。可以看出,三种不同直径的连续纤维XRD谱图基本相似,均未出现明显的衍射峰,仅在20为20°~30°之间有一个微弱的包峰,这是玻璃态物质的典型特征,说明月壤经高温熔融成纤后由多种晶态转变为非晶态。在制备连续纤维的过程中,模拟月壤中的矿物组分随温度升高而逐渐熔化,晶体的有序结构被破坏,形成近程有序、远程无序的玻璃态,连续纤维是由熔融体迅速冷却凝固而形成的,因此保持了熔融体的无定型状态。

3.6 月壤基连续纤维力学性能分析

原位利用月壤生产的连续纤维能否被应用于月球基地建设,很大程度上取决于纤维的力学性能. 因此,我们对不同拉丝速度下制备的月壤基连续纤维力学性能进行分析,结果如表2所示. 可以看出,纤维的直径、拉伸强度和Weibull模量均随拉丝速度的增加而减小,断裂伸长率在1.50%~2.12%之间波动. 根据XRD分析结果可知,连续纤维为非晶结构,其原子呈长程无序排列且尽可能致密堆积形成致密随机堆垛结构. 这种堆垛结构的紧密化程度在很大程度上决定了材料力学

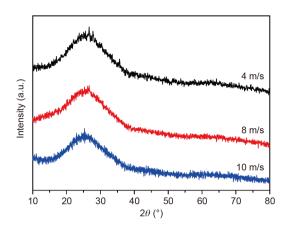


图 5 (网络版彩图)不同拉丝速度下制备的月壤基连续纤维的XRD谱图

Figure 5 (Color online) XRD patterns of lunar soil-based continuous fibre spun at different speed.

性能. 紧密化程度越高, 材料抵抗变形的能力就越强, 力学性能越好^[36]. 冷却速率在很大程度上决定了材料中原子堆垛的紧密化程度, 对于上述连续纤维, 拉丝速度越小, 得到的纤维直径越大, 单根纤维从外到内的冷却速率越小, 这样纤维中的原子有更长的时间进行紧密化程度排列, 使得纤维的宏观拉伸强度较高.

此外,图6还对比了三种不同拉丝速度制备得到连续纤维拉伸强度的Weibull分布,可以看出,拉丝速度为4,8,10 m/s制备的月壤基连续纤维的强度分布范围分别为1012~1955,763~1786,554~1964 MPa,其中4 m/s拉丝速度下制备的月壤基连续纤维的强度分布更加均匀,并且材料的Weibull模量也较高,表明纤维表面缺陷位置更加均匀,这主要是因为在较慢拉丝速度下得到的纤维形成的结构紧密化程度较高,出现"致命"缺陷的概率较小^[26,27].

根据我们前期建成的全国玄武岩纤维材料大数据库发现,目前国内商业化玄武岩纤维拉伸强度在2000 MPa左右^[30].为了避免纤维在生产过程中受到破

表 2 不同拉丝速度下制备的月壤基连续纤维的力学性能

Table 2 Mechanical properties of lunar soil-based continuous fibre obtained at different spinning speed

拉丝速度 (m/s)	纤维直径 (μm)	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	Weibull模量
4	12.8±0.6	1438±323	2.12±0.05	4.80
8	9.5±0.7	1223±330	1.50 ± 0.05	3.92
10	8.4±0.4	1043±295	1.62 ± 0.04	3.74

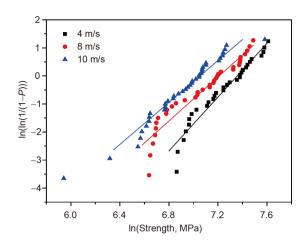


图 6 (网络版彩图)不同拉丝速度下制备的月壤基连续纤维拉伸强度的Weibull分布情况

Figure 6 (Color online) Weibull distribution of tensile strength for lunar soil-based continuous fibre spinning at different speed.

坏, 通常在纤维成型后涂覆有机浸润剂, 这可以使纤维的强度提升15%以上^[27]. 我们预测基于月壤的连续纤维在涂覆浸润剂后, 力学性能接近商业化玄武岩纤维. 因此, 月壤基连续纤维有望通过与月壤的有效复合制备结构材料, 并用于月球基地建设.

4 结论与展望

本文研究了模拟月壤的组成、矿物相结构和热学特征,发现月壤的这些特性与地球玄武岩矿石相近,且具有与地球玄武岩矿石类似的成纤行为,材料在高温淬冷条件下由多种晶态转化为非晶态玻璃体.在此研究基础上以模拟月壤为原料,通过熔融-牵引法获得了拉伸强度超过1400 MPa的月壤基连续纤维,该数值接近目前商业化的玄武岩纤维(不含浸润剂).

本研究结果证实以月壤为原料通过熔融-拉丝可获得连续纤维,所得纤维材料有望通过复合技术实现月壤复合材料的制备. 虽然本项目只是一个初步的可行性探索研究,但结果对于原位利用月球资源开发结构和功能材料并用于月球基地建设具有重要的参考价值. 未来研究计划将针对月球的特殊环境(昼夜温差大、高真空、低重力等),研究环境温度对月壤纤维强度、模量、断裂伸长率等力学参数的影响和低重力条件下纤维的成纤特性,以及纤维制备过程中的能耗、成纤设备的设计和系统集成、月壤纤维与基体之间表界面相互作用等,这些都将是人类实现月球基地建设的挑战性课题.

致谢 感谢中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心、贵州中科玄武岩纤维孵化研究院有限公司、贵州石鑫玄武岩科技有限公司、营口建科玄武岩纤维研究所、乌鲁木齐鑫宝矿山开发中心、中铁二十一局集团第一工程有限公司、河北蔚县新源玄武岩矿业有限公司等单位提供样品以及对本研究的大力支持.

参考文献.

- 1 Ouyang Z Y, Zou Y L, Li C L, et al. Lunar exploration and containable development for human society (in Chinese). Bull Miner Petrol Geochem, 2003, 22: 328–333 [欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球探测与人类社会的可持续发展. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22: 328–333]
- 2 Ye P J, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China (in Chinese). Deep Space Explor, 2007, 5: 1–6 [叶培建, 彭兢. 深空探测与我国 深空探测展望. 深空探测研究, 2007, 5: 1–6]
- 3 Duan J F, Zhang Y, Cao J F, et al. A summary of orbit determination technology for Chinese lunar exploration project (in Chinese). J Deep Space Explor, 2019, 6: 203–209 [段建锋, 张宇, 曹建峰, 等. 中国月球探测任务轨道确定技术及发展综述. 深空探测学报, 2019, 6: 203–209]
- 4 Yuan Y, Zhao C, Hu Z Y. Prospect of lunar base construction schem (in Chinese). J Deep Space Explor, 2018, 5: 374–381 [袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想. 深空探测学报, 2018, 5: 374–381]
- 5 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 (in Chinese). Acta Mineral Sin, 2009, 29: 229–234 [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. 矿物学报, 2009, 29: 229–234]
- 6 Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe (in Chinese). Sci Sin-Tech, 2014, 44: 543–558 [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. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 543–558]
- 7 Ding L Y, Xu J, Luo H B, et al. Lunar construction: Challenges and research progress (in Chinese). Manned Space, 2019, 25: 277–285 [丁烈云,

- 徐捷, 骆汉宾, 等. 月面建造工程的挑战与研究进展. 载人航天, 2019, 25: 277-285]
- 8 Zheng Y C, Ouyang Z Y, Wang S J, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith (in Chinese). J Mineral Petrol, 2004, 24: 14–19 [郑 永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质. 矿物岩石, 2004, 24: 14–19]
- 9 Li C, Su Y, Pettinelli E, et al. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar. Sci Adv, 2020, 6: eaay6898
- 10 Ma Y Q, Peng S, Wen B, et al. Experimental research of precise terrain occlusion prediction algorithm based on image sequences of the Chang'E-4 lunar rover (in Chinese). Sci Sin-Tech, 2020, 50: 54–68 [马友青, 彭松, 温博, 等. 基于嫦娥四号月球车图像的地形遮挡高精度预报试验研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 54–68]
- 11 Taylor L A, Meek T T. Microwave sintering of lunar soil: Properties, theory, and practice. J Aerosp Eng, 2005, 18: 188–196
- 12 Fateri M, Gebhardt A. Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications. Int J Appl Ceram Tech, 2015, 12: 46–52
- 13 Song L, Xu J, Fan S, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: Pore-forming and thermal conductivity. Ceram Int, 2019, 45: 3627–3633
- 14 Naser M Z. Extraterrestrial construction materials. Prog Mater Sci, 2019, 105: 100577
- 15 Toutanji H A, Evans S, Grugel R N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments. Construction Building Mater, 2012, 29: 444-448
- 16 Zhao S Q. Preparation of high strength concrete and analysis of its mechanical properties (in Chinese). Tech Market, 2019, 26: 52–54 [赵书勤. 高强混凝土的制备及其力学性能分析. 技术应用, 2019, 26: 52–54]
- 17 Song L, Xu J, Tang H, et al. Research progress of simulated lunar soil molding (in Chinese). Acta Mineral Sin, 2020, 1: 47–57 [宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状. 矿物学报, 2020, 1: 47–57]
- 18 Yu D Y, Ge Z J, Wang N D, et al. Supposal for structure form of lunar base (in Chinese). J Astronaut, 2012, 33: 1840–1844 [于登云, 葛之江, 王 乃东, 等. 月球基地结构形式设想. 宇航学报, 2012, 33: 1840–1844]
- 19 Jamshaid H, Mishra R. A green material from rock: Basalt fiber—A review. J Textile Inst, 2016, 107: 923-937
- 20 Li M, Chen H S, Wang J L, et al. Properties and applications of continuous basalt fiber (in Chinese). J Chin Ceram Soc, 2010, 4: 876–881 [李萌, 陈宏书, 王结良, 等. 玄武岩连续纤维材料的性能及其应用. 硅酸盐通报, 2010, 4: 876–881]
- 21 Dhand V, Mittal G, Rhee K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. Compos Part B-Eng, 2015, 73: 166-180
- 22 Branston J, Das S, Kenno S Y, et al. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. Construct Build Mater, 2016, 124: 878-886
- 23 Fiore V, Scalici T, Di Bella G, et al. A review on basalt fibre and its composites. Compos Part B-Eng, 2015, 74: 74-94
- 24 Zheng Y, Wang S, Ouyang Z, et al. CAS-1 lunar soil simulant. Adv Space Res, 2009, 43: 448-454
- 25 Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-1 lunar soil stimulant (in Chinese). Acta Mineral Sin, 2007, 27: 571–578 [郑永春, 王世杰, 欧阳自远, 等. CAS-1模拟月壤. 矿物学报, 2007, 27: 571–578]
- Zafeiropoulos N E, Baillie C A. A study of the effect of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part II. Application of Weibull statistics. Compos Part A-Appl Sci Manuf, 2007, 38: 629–638
- 27 Xing D, Xi X Y, Ma P C. Factors governing the tensile strength of basalt fibre. Compos Part A-Appl Sci Manuf, 2019, 119: 127–133
- 28 Yan Z F, Huang Z L, Cheng L J, et al. Heterogeneity of source for Emeishan high-Ti basalts (in Chinese). J Mineral Petrol, 2007, 27: 60–65 [严再飞, 黄智龙, 程礼军, 等. 峨眉山高钛玄武岩物源的不均一性研究. 矿物岩石, 2007, 27: 60–65]
- 29 Liang L, Liang Y F. The research on physicochemical properties of the basalt fiber. Glass Fiber, 2006, 1: 15-19
- 30 Ma P C, Xing D, Xi X Y, et al. Big data of basalt fibre produced in China (in Chinase). China Computer Software Copyright Registration No.: 3146131. http://222.82.250.216:8088/, 2020-03-28 [马鹏程, 邢丹, 蒽雄宇, 等. 中国玄武岩纤维材料大数据库. 计算机软件著作权, 登记号: 3146131. http://222.82.250.216:8088/, 2020-03-28]
- 31 Lin C G, Zhai S M, Li Z B, et al. Physiochemical properties and crystallization behavior of GeS₂-In₂S₃ chalcogenide glasses (in Chinese). Acta Phys Sin, 2015, 64: 054208 [林常规, 翟素敏, 李卓斌, 等. GeS₂-In₂S₃硫系玻璃的物化性质与晶化行为研究. 物理学报, 2015, 64: 054208]
- 32 Taylor P A, Kahanpää H, Weng W, et al. On pressure measurement and seasonal pressure variations during the Phoenix mission. J Geophys Res, 2010, 115: E02002
- 33 Tong Q, Fan T, Wang H M, et al. Study on morphology and melting crystallization characteristics of basalt (in Chinese). Chin Non-Metal Miner Ind, 2013, 6: 27–29 [童庆、樊霆、王浩明、等. 玄武岩特征及熔融析晶性能研究. 中国非金属矿工业导刊, 2013, 6: 27–29]
- 34 Fan T, Tong Q, Ye W L, et al. Composition morphology and melting crystallization characteristics of basalt fibre mineral (in Chinese). J Central South Univ (Sci Tech), 2013, 44: 4307–4311 [樊霆, 童庆, 叶文玲, 等. 玄武岩纤维矿物组成形态及熔融析晶特性. 中南大学学报(自然科学

- 版), 2013, 44: 4307-4311]
- 35 Zhang Y Z, Zhang Z Q, Xing H W, et al. Research progress on the fiberization mechanism of molten slags (in Chinese). Iron Steel, 2015, 50: 82–85 [张玉柱, 张遵乾, 邢宏伟, 等. 熔渣纤维化机理研究进展. 钢铁, 2015, 50: 82–85]
- 36 Wang W H. The nature and properties of amorphous matter (in Chinese). Prog Phys, 2013, 33: 177–351 [汪卫华. 非晶态物质的本质和特性. 物理学进展, 2013, 33: 177–351]

Study on the feasibility of preparing a continuous fibre using lunar soil simulant

XING Dan^{1,2}, XI XiongYu¹, GUO ZeShi^{1,2}, YUE Xiu^{1,2}, HAO Bin^{1,2}, LIANG CunGuang^{1,2}, GU YiZhuo³, CHEN Tao⁴, WANG Rui⁵ & MA PengCheng^{1,2}

The construction of a lunar base is considered to be a giant step for the deep-space exploration by human beings. The *in situ* utilization of lunar resource is essential for the realization of this ambitious plan. In this study, the composition, crystal structure, melting, and fiberization behaviors of lunar soil simulant were investigated in an effort to develop a continuous fibre to address the material requirements for building a lunar base. The results showed that the chemical and mineral composition of the lunar soil simulant were similar to those of basalt roes on the Earth, and the material could be completely melted at 1332°C. The crystal structure of the simulant was homogenized and transformed into the amorphous glass state when the melted material was quenched by water. Using a fibre spinning facility, continuous filaments were obtained using the melted lunar soil simulant as the raw material. The obtained fibre showed the tensile strength of more than 1400 MPa, which is comparable with that of a commercial basalt fibre. These results confirmed the feasibility of using lunar soil to prepare a continuous fibre for the construction of a lunar base.

lunar soil simulant, basalt, continuous fibre, lunar base construction

doi: 10.1360/SST-2020-0141

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 Center of Material Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100083, China;

⁴ Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

⁵ CAS-Realnm Separation Science and Technology Company, Wuxi 214001, China