

激光与光电子学进展

太空制造超低损耗光纤的机理及可行性初探

余至轩¹, 季嘉雯^{2,3}, 王功^{2,3*}

¹武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072;

²中国科学院空间应用工程与技术中心太空制造技术重点实验室, 北京 100094;

³中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京 100049

摘要 氟化物 ZBLAN 玻璃光纤在军事、通信、医疗等领域具有重要应用价值, 超低损耗光纤的制备已成为大国竞争的战略关键技术。ZBLAN 玻璃熔融冷却过程易出现析晶, 其内部多发的结晶区域会引起光传输的散射, 导致玻璃光纤实际损耗比理论损耗高 2~3 个数量级, 极大限制了其应用。因此, 超低损耗 ZBLAN 玻璃光纤的制备成为光纤领域的一大挑战。空间微重力环境可抑制重力引起的熔体组分对流, 大幅降低熔体成核和微晶生长的速度以及 ZBLAN 玻璃材料凝固过程中的析晶程度, 进而降低材料的光学损耗。美国航空航天局在国际空间站已经开展多轮光纤制造技术的相关试验, 随着我国空间站的建成运行, 在微重力环境中制造氟化物光纤已经具备了初步可行性。概述了国内外太空制造光纤的主要研究进展, 着重介绍了微重力环境下超低损耗氟化物光纤的制备原理, 探讨了特种光纤“太空制造-地面应用”的可行性。该研究为我国太空制造水平的提升、航天科技应用领域的拓展提供了技术参考。

关键词 材料; 氟化物光纤; 超低损耗; 析晶; 微重力环境; 太空制造

中图分类号 O756 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516018

Preliminary Study on Mechanism and Feasibility of Manufacturing Ultra-Low Loss Optical Fiber in Space

Yu Zhixuan¹, Ji Jiawen^{2,3}, Wang Gong^{2,3*}

¹*School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;*

²*Key Laboratory of Space Manufacturing Technology, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

³*School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Fluoride ZBLAN glass fiber has crucial application values in the military, communication, medical and other fields, and the fabrication of ultra-low loss fibers has become a strategic key technology in great power competition. However, the ZBLAN glass crystallization is easy to occur during the melting and cooling process, and the multiple crystallization areas in the fiber will cause the scattering of light transmission, resulting in an actual loss of glass fiber that is 2-3 orders of magnitude higher than the theoretical loss, severely limiting its application value. Therefore, preparing ultra-low loss ZBLAN glass fibers has become a major challenge in optical fibers. The microgravity environment in space can inhibit the convection of melt components caused by gravity, greatly reducing the rate of melt nucleation and crystallite growth and the degree of crystallization during the solidification of ZBLAN glass materials, thereby reducing the optical loss of the material. The National Aeronautics and Space Administration has already conducted several optical fiber manufacturing technology experiments on the international space station. With the completion and operation of China's space station, it is preliminarily feasible to manufacture space fluoride fiber in microgravity. This paper summarizes the main research progress on domestic and overseas space optical fiber manufacturing, introduces the influence of the microgravity environment on the manufacturing of ultra-low loss fluoride fiber and discusses the feasibility of "made in orbit-used on ground" of special optical fibers. This research provides a technical reference for improving the Chinese space manufacturing level and expanding the application field of space science and technology.

Key words materials; fluoride fiber; ultra-low loss; crystallization; microgravity environment; space manufacturing

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-02; 录用日期: 2022-06-09

通信作者: *wanggong@csu.ac.cn

1 引言

氟化物 ZBLAN 光纤在可见光到中红外波段具有极高的光透过性,是实现远距离无基站通信最具前景的超低损耗光纤材料。此外,ZBLAN 玻璃光纤在红外激光定向对抗、中红外光纤激光器、超连续谱光源、临床手术等领域具有重要的应用价值。相比硅系玻璃光纤,氟化物光纤具有较高的激光损伤阈值,是目前研制高功率中红外光纤激光光源常用的增益介质之一^[1]。就光纤本身的特性而言,波长、带宽、传输质量、纤维的长度和坚固性以及制造的难易程度都决定了其价格和具体应用^[2-5]。

如何实现氟化物光纤的超低损耗制备成为光纤领域的一大挑战。相关研究表明,微重力环境下氟化物玻璃材料凝固过程的析晶程度要远小于地面环境,在太空环境制备的氟化物光纤性能有望获得跨越性提升^[6]。同时,氟化物光纤在地面的应用价值极高,因此,通过天地输运实现“太空制造-地面应用”具有可观的经济价值和战略意义。

美国是较早开展微重力环境下氟化物光纤制造技术研究的国家,美国航空航天局(NASA)已多次在国际空间站(ISS)开展光纤在轨制造技术的试验,在其支持下 FOMS 和 Made In Space 两家机构在国际空间站上已经完成了氟化物光纤的拉制验证,并初步证明太空制造氟化物光纤损耗相较于地面同类产品可降低 2 个数量级^[7]。相比而言,我国在该领域的研究还处于起步阶段。

2 氟化物光纤地面制造工艺的瓶颈

地面环境下制备超低损耗氟化物光纤的难度较大,且氟化物光纤能达到的光损耗水平仅为 50~100 dB/km,比理论损耗高 2~3 个数量级,极大限制了其在各大领域的应用,如图 1 所示。图 2 为在地面环境和微重力环境下制备的氟化物光纤表面形态。

氟化物光纤在地面制备一般使用预制棒-光纤法,第一步是预制棒的制造,第二步则是将预制棒拉制成光纤,该过程利用重力拉动一段加热的预制棒直到获得精确直径的拉伸纤维^[10]。氟化物光纤在拉制过程中

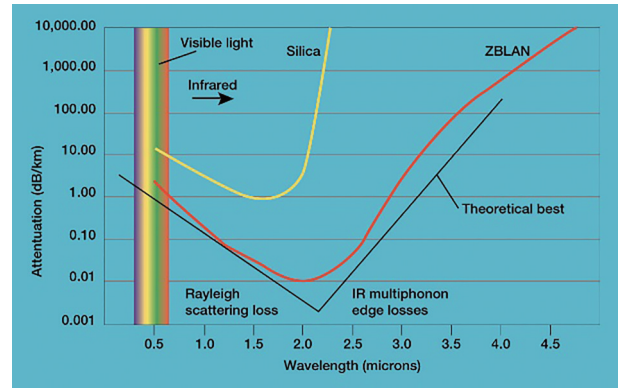


图 1 氟化物光纤的损耗图^[8]

Fig. 1 Loss diagram of the fluoride fiber^[8]

会累积一些缺陷,光纤的损耗^[11]可表示为

$$\alpha_{\text{Total}} = \alpha_{\text{UV}} + \alpha_{\text{IR}} + \alpha_{\text{RSC}} + \alpha_{\text{Brillouin}} + \alpha_{\text{Raman}} + \alpha_{\text{Absorption}} + \alpha_{\text{Processing}} + \alpha_{\text{Bending}} + \alpha_{\text{Defects}}, \quad (1)$$

式中: α_{UV} 为紫外波段的损耗; α_{IR} 为红外波段的损耗; α_{RSC} 为瑞利散射的损耗; $\alpha_{\text{Brillouin}}$ 为布里渊散射的损耗; α_{Raman} 为拉曼散射的损耗; $\alpha_{\text{Absorption}}$ 为吸收损耗; $\alpha_{\text{Processing}}$ 为对接损耗; α_{Bending} 为弯曲损耗; α_{Defects} 为地面制造的固有缺陷损耗。氟化物光纤的损耗主要来自本征/理论损耗、吸收和工艺损耗、缺陷损耗三大类。

本征损耗指的是由光纤材料引入的吸收效应,表现在紫外波段、红外波段、瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射,通常在一定波长范围内有较小的损耗传输范围。本征损耗由材料特性决定,氟化物光纤的本征损耗极低,可以忽略不计。

吸收和工艺损耗指的是除了材料的固有损耗之外,在制造过程中引发的损耗,包括吸收损耗、对接损耗和弯曲损耗,由原材料纯度和制备工艺环境决定。现有技术能实现氟化物原材料杂质含量和环境水氧含量都满足超低损耗氟化物光纤的制备需求。

缺陷损耗主要来源于光纤拉制过程中,受重力影响熔体组分对流导致的析晶所产生的散射,哪怕是光纤中的微小结晶,也有可能造成较大的损耗(单位为 dB/km),且这种损耗是地面工艺无法完全消除的,也是目前工业上制造的最优 ZBLAN 光纤性能无法超过硅光纤的最主要原因。

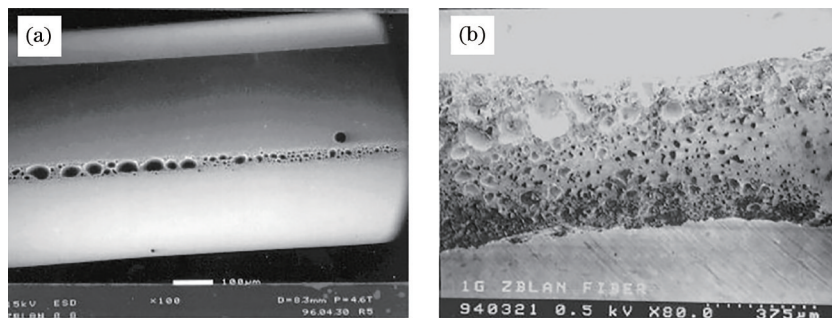


图 2 氟化物玻璃光纤的表面形态。(a)地面环境;(b)微重力环境^[9]

Fig. 2 Surface morphology of fluoride fiber. (a) Terrestrial environment; (b) microgravity environment^[9]

因此,如何克服重力下析晶造成的缺陷损耗,是实现超低损耗氟化物光纤制备的一大挑战。

3 国内外研究现状

国际上能实现高质量氟化物光纤生产的厂家有美国的 Thorlabs 公司、日本的 Fiberlabs 公司和法国的 Le Verre Fluore(LVF)公司,这些公司几乎垄断了国际上高性能氟化物光纤的供应链。但受限于地面工艺技术的限制,目前还无法完全抑制玻璃的析晶,制造的氟化物光纤整体损耗偏高,损伤阈值偏低,且制备成本昂贵。现阶段还未出现能高质量传输百瓦级中红外激光的光纤。图 3 为地面环境下制备的氟化物光纤损耗曲线。

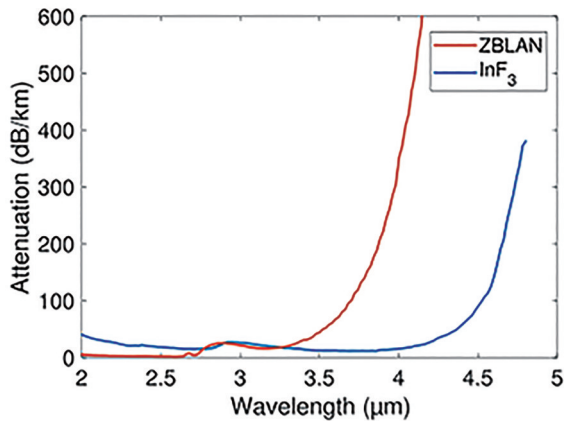


图 3 地面环境下制备的氟化物光纤^[12]

Fig. 3 Fluoride fibres prepared in terrestrial environment^[12]

20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初期,NASA 已进行了多次氟化物光纤制备失重实验。结果表明,在低重力环境下氟化物光纤没有结晶迹象,而在重力条件下氟化物光纤内部产生了大量的晶体^[13]。其中最为经典的实验就是 1994 年 NASA 在 KC-135 抛物线飞机上拉制氟化物光纤。实验结果表明,在微重力条件下,ZBLAN 光纤中的结晶受到明显抑制。此外,利用探空火箭微重力条件拉制的 ZBLAN 光纤也能得到类似的结论^[14]。该实验将 20 个样品带上 KC-135 抛物线飞机,在飞行过程中的微重力时间段内多次加热纤维,将其与地面同等加热条件下获得的对照组进行对比,并用扫描电子显微镜(SEM)观察结晶情况。将 400 °C 下加热 20 s 作为一个标准流程,多次重复该流程直到纤维完全制成,地面 20 个对照组除重力水平外,加热时间、加热间隔、加热温度与实验组保持一致^[15]。用 SEM 对样品进行分析,在微重力和常规重力下拉制的纤维 SEM 图片如图 4 所示。其中:图 4(a)和图 4(b)为常规重力下拉制的 ZBLAN 纤维和断裂面的 SEM 图片;图 4(c)和图 4(d)为微重力下拉制的 ZBLAN 纤维和断裂面的 SEM 图片。可以发现,常规重力下拉制的样品普遍存在析晶现象,而微重力条件下拉制的样品却很少出现析晶现象。

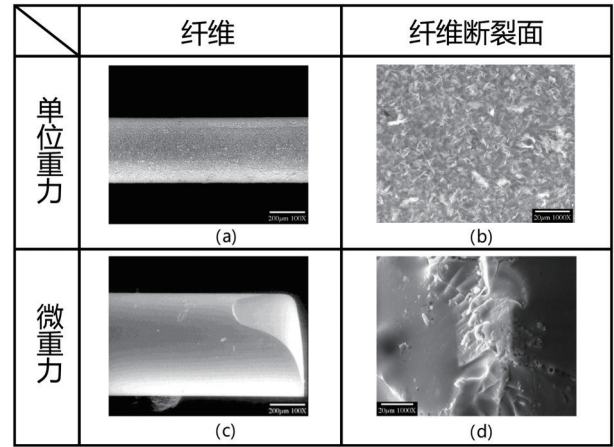


图 4 不同情况下制备的光纤。(a)常规重力下制备的 ZBLAN 纤维;(b)常规重力下纤维的断裂面;(c)微重力下制备的 ZBLAN 纤维;(d)微重力下纤维的断裂面^[16]

Fig. 4 Fibres prepared under different conditions. (a) ZBLAN fiber prepared under conventional gravity; (b) fracture surface of fiber under conventional gravity; (c) ZBLAN fiber prepared under microgravity; (d) fracture surface of fiber under microgravity^[16]

2016 年,NASA 先后与 FOMS、Physical Optics Corporation、Apsidal 和 DSTAR 公司签订了多个太空光纤制造相关合同^[17-20],Made In Space 公司也分别在 2017 年和 2019 年启动了内部资助的太空制造 ZBLAN 光纤示范任务^[21-22]。2019 年,FOMS 公司报道了在国际空间站拉制的高质量 ZBLAN 光纤,比地面生产的光纤表现出更好的组分均匀性^[23],如图 5 所示。其中,左侧为微重力环境下制造的光纤,右侧为地面制造的光纤。目前,Flawless Photonics 公司正在卢森堡开发 ZBLAN 光纤的太空生产系统^[16]。现阶段,由于技术保密及其他原因,氟化物光纤的空间制造进展报道比预期更慢。

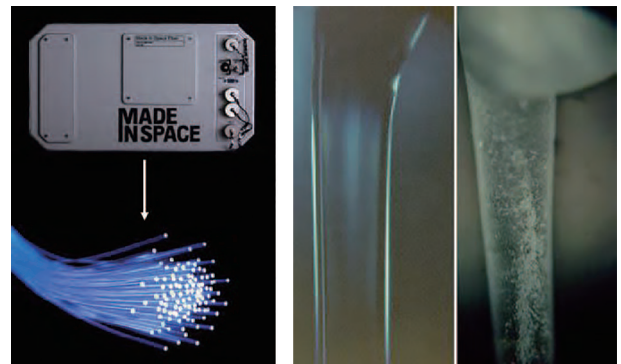


图 5 氟化物光纤的拉制图^[23]

Fig. 5 Drawing diagram of the fluoride fiber^[23]

Made In Space 公司在 2017 年 12 月将第一台光纤制造设备送往国际空间站,如图 6 所示。自此之后,国际空间站又先后增加了多个光纤制造任务。该公司目前正在积极与 Thorlabs 等公司合作,以深入分析太空

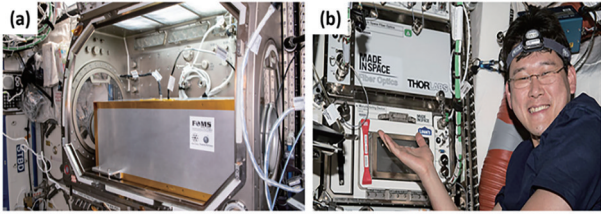


图 6 ISS 部署的光纤在轨制造设备。(a) FOMS;
(b) Made In Space^[24]

Fig. 6 Fiber on-orbit manufacturing facility deployed by ISS.
(a) FOMS; (b) Made In Space^[24]

生产 ZBLAN 光纤的全部特点和优势^[24]。此外,2015 年初创的小型公司 FOMS 在 2016 年就获得了 NASA 的资助,用于开展氟化物光纤在轨制造技术的研究,并于 2019 年 4 月顺利将研制的载荷送入太空,该设备名为轨道远程制造的空间设施或 SpaceFORM。Flawless Photonics 是一家 2017 年成立的小型公司,于 2019 年完成了首个光纤制造载荷的发射,并致力于建立首个可盈利的在轨光纤制造供应链,应用领域包括激光、传感器、医疗设备和数据通信等。

截止目前,我国尚未展开氟化物光纤在轨制造方面的实质研究。但鉴于国际空间站退役时间临近,氟化物光纤太空制造技术研究必将会显著受限,而我国的空间站刚开始服役,为该技术的研究提供了极佳的发展机遇,完全可以借助美国在该领域已有的研究成果,推进本国氟化物光纤太空制造项目的部署并建立在该领域的技术优势,达到国际领先水准。

4 微重力下超低损耗光纤拉制的机理

目前,氟化物光纤制造遇到的瓶颈是在光纤拉制时难以避免的析晶问题,即使存在极少的微晶也会引起较高水平的光损耗。原因是现有地面工艺无法完全避免氟化物光纤拉制温度范围较小且控制温度下黏度较低的问题^[25]。而在微重力环境下拉制光纤,可以有效抑制重力引起的熔体组分对流,大幅降低熔体成核和微晶生长速度。主要表现在以下几个方面。

1) 在空间微重力环境中表面现象起主要作用,而在空间产生更大面积稳定的液态区,如大尺寸的球形液滴、泡以及大面积的液膜和液态金属镜面。

2) 重力引起的组分对流消失。在地面上重力引起不同密度的材料组分自然对流对生产工艺过程中传热、传质和相分离有很大影响,空间环境抑制了自然对流后,可根据新的方式安排材料的加工工艺。

3) 微重力环境能显著增强由热毛细效应、浓度毛细效应和表面活性物质引起的对流作用。

4) 微重力环境能扩展热力学、流体动力学等过程对于单相和多相流体系统受扰动时的稳定性区域。

5) 微重力环境下相变过程的特征可能有明显改变,有望在空间生产出其相成分与地面产品区别明显

的各种合金。

6) 微重力环境能容易实现各种材料的无容器加工(如悬浮法),为生产高纯度材料、降低非均匀结晶情况以及采用熔体过冷法生产非晶态金属等提供新的途径^[26]。

综上所述,重力水平影响了熔体组分之间的自然对流,即材料熔融后,密度高的组分容易下沉、密度低的组分容易上升,从而引起材料内部的组分对流。玻璃熔体已被证明在微重力下表现出剪切变稀行为,即假塑性,而熔体中剪切率下降会导致黏度的增大^[9],从而使材料的黏度增加了一个数量级^[16]。黏度是唯一可直接测量的动力学参数。在 Turnbull 和 Fisher^[27]对结晶的经典处理中,成核率 I 和晶体生长率 U 都与黏度 η 成反比。Turnbull-Fisher 方程^[27]可表示为

$$I = \frac{k_n}{\eta} \exp \left[- \frac{b\alpha^3 \beta}{T_r (\Delta T_r)^2} \right] \rightarrow I \propto \frac{1}{\eta}, \quad (2)$$

$$U = \frac{k'_n}{\eta} [1 - \exp(-\beta \Delta T_r)] \rightarrow U \propto \frac{1}{\eta}, \quad (3)$$

式中: \propto 为正比例符号; $\Delta T_r = (T_m - T)/T_m$; T_m 为熔化温度; T 为绝对温度; k_n, k'_n 为热力学常数; b 为核形状系数; α 为无量纲常数,与液晶界面张力有关; β 为融合熵。成核率 I 和晶体生长率 U 可以看作与黏度 η 有关的函数^[16],即

$$I = I(\eta), \quad (4)$$

$$U = U(\eta). \quad (5)$$

在给定的温度下,晶体生长速度和成核速率随着时间的推移是恒定的。对于这样的情况,Uhlmann^[28]将其描述为成核率、增长率的三次方和时间四次方的函数,在时间 t 内结晶的体积分数 X 可表示为

$$X = \frac{\pi}{3} IU^3 t^4. \quad (6)$$

综上所述:重力水平的下降会使熔体剪切率下降,而剪切率与黏度呈相反的变化趋势,从而引起熔体黏度增大;Turnbull-Fisher 方程显示晶体的成核率和晶体生长率均与黏度成反比关系,而 Uhlmann 方程显示结晶度 X 是与 I, U 相关的函数。这也解释了为什么重力水平下降会引起光纤拉制过程中材料黏度升高以及最终结晶度的降低。微重力抑制析晶的原理如图 7 所示。

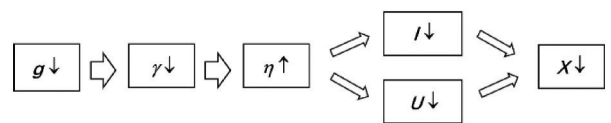


图 7 微重力抑制析晶的原理^[29]

Fig. 7 Principle of microgravity inhibiting crystallization^[29]

5 可行性分析

目前,以中国科学院为代表的少数单位在各类预

研项目的支持下在氟化物光纤制造方面已取得了初步结果。氟化物光纤的太空制造仍需要开展大量基础研究及关键技术攻关,以突破低功耗、小型化在轨制造载荷研制关键技术,建立太空制造系列标准与规范,构建模块化、智能化原位制造技术方法,形成空间站应用、月球探测及深空探测过程中的原位制造能力。

首先开展空间微重力环境下氟化物玻璃结晶行为的研究,通过地面的低 Bond 系数试验和微重力试验,解析微重力对熔体黏度、组分输运特性、热毛细效应、表面张力效应的影响机制,建立重力水平与晶体成核密度、生长速度、结晶度、光衰减系数关系的理论模型。然后突破微重力环境诱导下多因素耦合的氟化物光纤精确拉制技术,并提出适用于微重力环境的光纤制造工艺方案,如图 8 所示。开展近零缺陷超低损耗氟化物光纤在轨制造技术验证,推动太空制造产品在地面相关领域的试应用,为其他光学材料、半导体材料微重力环境下的结晶控制提供参考。

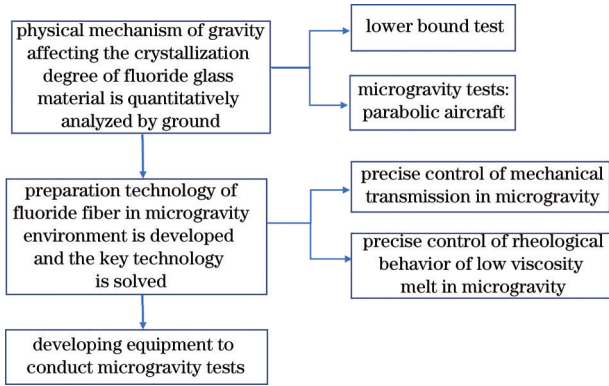


图 8 氟化物光纤太空制造项目的研究方案
Fig. 8 Research scheme of the fluoride fiber space manufacturing project

天舟货运飞船搭载科学技术实验公开面向社会征集应用项目,空间站核心舱与货运飞船的在轨状态如图 9 所示。未来该项目将提供免费的搭载机会进行在轨实验验证。支持的搭载载荷质量一般不超过 30 kg,高度不超过 30 cm,飞船可提供一路 100 V 的供电,功



图 9 空间站核心舱与货运飞船在轨状态
Fig. 9 Status of the space station core module and cargo spacecraft in orbit

率不超过 500 W,同时提供多路指令和遥测信号接口。

完成初步的技术验证并建立空间站后,相关科研团队可以在有人照料的长期微重力环境下充分开展舱内及舱外制造、组装等研究及试应用。未来基于我国空间站实验柜的资源包络,可以上行在轨常驻的光纤制造载荷,进一步优化氟化物光纤在微重力环境下的工艺流程,提升光纤的产能和性能指标,达到地面高价值场景的应用标准。NASA 暂行的上下行规则与费用如图 10 所示。可以发现,资源上行的价格为每千克 \$3000,资源下行的价格为每千克 \$6000,而每米 ZBLAN 的售价为 \$175~\$1000,具体价格取决于光纤的质量,1 kg 的 ZBLAN 预制棒晶体可以产生 2.2 km 长的光纤,每千克预期收益达到 \$385000~\$2200000,远高于天地往返成本,因此在太空中制备 ZBLAN 光纤不仅有研究价值,也极具商业化前景^[30]。

	Resources	Reimbursable Value	Annual ISS Resources	Maximum Allowed per Company per Year
Available Immediately	Upmass (Passive Cargo)	\$3,000 per kg	175 kg	50 kg in a form factor of single CTBE's
	Trash Disposal (Passive Cargo)	\$3,000 per kg	175 kg	50 kg
	Downmass (Passive Cargo)	\$6,000 per kg	125 kg	35 kg
	Conditioned Cargo (Round Trip)	\$13,500 per kg	Not available at this time	--
	Powered Cargo (Round Trip)	\$18,000 per kg	Not available at this time	--
	ISS Expedition Crew	\$17,500 per kg	90 hrs	25 hrs
Available for Private Astronaut Missions	Regenerative Life Support and Toilet	\$11,250 per crew per day	Available as needed	--
	Crew Supplies (Food, air, crew provisions, supplies, medical kit, exercise equipment, etc.)	\$22,500 per crew per day	Available as needed	--
	Stowage	\$105 per CTBE per day	Available as needed	--
	Power	\$42 per kWh	Available as needed	--
	Data Downlink	\$50 per GB	Available as needed	--

图 10 NASA 暂行的上下行规则与费用
Fig. 10 NASA's provisional up and down rules and fees

NASA 低轨商业化版图如图 11 所示。可以发现,随着以光纤在轨制造为例的低轨制造商业模式的不断发展,未来有望在空间站进行更多高附加值产品的生产和制造,并运回地面进行应用,但这也取决于很多因素,包括上行政策、载荷设计要求以及任务属性等。

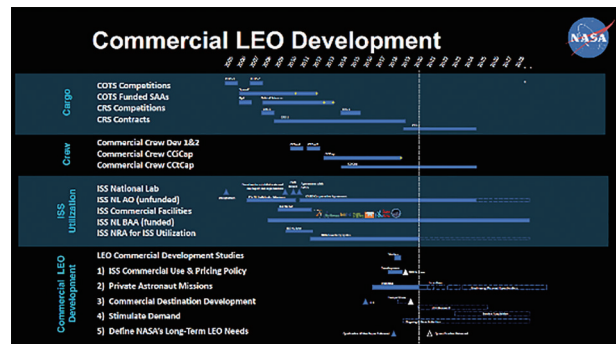


图 11 NASA 低轨商业化版图
Fig. 11 Commercialization of NASA's low-orbit

6 结 论

随着我国空间站的建成运行以及货运飞船提供的上行资源,低轨制造技术也有了重要的验证平台。首先,介绍了氟化物光纤的优势和应用场景,并结合地面

工艺分析了超低损耗氟化物光纤制备的难点。然后,基于国外的相关在轨研究,重点分析了微重力环境下氟化物光纤制备的优势,通过理论模式初步探究了制备光纤过程中抑制析晶的可能因素。最后,提出了面向超低损耗氟化物光纤的在轨研究方案以及工程化可行性分析,拟开展包括微重力环境下拉丝机械传动精确控制技术和氟化物熔体流变行为精确控制技术,之后还将进行原理样机的研制以及微重力环境下的验证实验。本研究为我国超低损耗氟化物光纤的制备提供了一种新的技术途径,对于促进我国光纤制造水平的提升、拓展航天科技的应用领域、构建“在轨制造-地面应用”的太空经济新模式具有重要意义,且能有效提升我国战略性关键材料制造技术能力及产品性能。

参 考 文 献

- [1] 贾志旭, 郭晓慧, 焦亚东, 等. 基于特种玻璃光纤的中红外拉曼激光器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101004.
Jia Z X, Guo X H, Jiao Y D, et al. Progress on mid-infrared Raman lasers based on special glass fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101004.
- [2] Boehm L, Chung K H, Crichton S N, et al. Crystallization and phase separation in fluoride glasses[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 0843: 10-20.
- [3] Tran D, Sigel G, Bendow B. Heavy metal fluoride glasses and fibers: a review[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(5): 566-586.
- [4] Bansal N P, Doremus R H, Bruce A J, et al. Crystallization of fluorozirconate glasses[J]. Materials Research Bulletin, 1984, 19(5): 577-590.
- [5] Yang L Y, Li Y, Zhang B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration[J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1061-1065.
- [6] Werner D. FOMS reports high-quality ZBLAN production on ISS[EB/OL]. [2022-04-05]. <https://spacenews.com/foms-reports-high-quality-zblan-production-on-iss/>.
- [7] Optical fiber manufacturing: gravity-free optical fiber manufacturing breaks earthly limitations[EB/OL]. [2022-04-05]. <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/research/article/16556282/optical-fiber-manufacturing-gravityfree-optical-fiber-manufacturing-breaks-earthly-limitations>.
- [8] ZBLAN continues to show promise[EB/OL]. (1998-02-05)[2022-04-05]. https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/1998/msad05feb98_1.
- [9] Ethridge E C, Tucker D S, Kaukler W, et al. Mechanisms for the crystallization of ZBLAN[EB/OL]. [2022-04-01]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030060502/downloads/20030060502.pdf>.
- [10] 杨中民, 陈东丹, 唐国武. 复合玻璃光纤[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2021.
Yang Z M, Chen D D, Tang G W. Combined glass optical fiber[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2021.
- [11] France P W, Drexhage M G, Parker J M, et al. Fluoride glass optical fibres[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990.
- [12] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, et al. Emission beyond 4 μm and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride (InF₃) fiber[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1926-1929.
- [13] Advertise on Parabolic Arc. NASA selects SBIR projects to enhance manufacturing on ISS[EB/OL]. [2022-04-05]. <http://www.parabolicarc.com/2016/05/07/iss-sbirs/>.
- [14] Tucker D S, Smith G A, Workman G L, et al. Effects of microgravity on ZBLAN optical fibers utilizing a sounding rocket[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2809: 23-32.
- [15] Workman G, Smith G A, O'Brien S, et al. ZBLAN microgravity study[EB/OL]. (1995-04-01)[2022-04-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960054007>.
- [16] Tucker D S, Ethridge E C, Smith G A, et al. Effects of gravity on ZBLAN glass crystallization[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2004, 1027: 129-137.
- [17] Cision. NASA awards physical optics corporation additional \$4M contract for zero gravity optical fibers[EB/OL]. [2022-04-05]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/nasa-awards-physical-optics-corporation-additional-4m-contract-for-zero-gravity-optical-fibers-300901671.html>.
- [18] NASA. NASA selects proposals for in-space development of projects including optical fibers and stem cells and a plan to enable a low-earth orbit economy[EB/OL]. (2020-04-08)[2022-04-03]. <https://www.nasa.gov/leo-economy/nasa-selects-for-projects-optical-fibers-stem-cells-enable-low-earth-orbit-economy>.
- [19] SPIE. Companies race to manufacture ZBLAN optical fiber in the microgravity environment of low-earth orbit[EB/OL]. (2021-01-01)[2022-04-04]. <https://spie.org/news/photronics-focus/janfeb-2021/competing-for-space?SSO=1>.
- [20] Space. In-space manufacturing is about to get a big test[EB/OL]. (2017-12-11)[2022-04-04]. <https://www.space.com/39039-made-in-space-off-earth-manufacturing-test.html>.
- [21] Space. Made in space to step up off-earth production of valuable optical fiber[EB/OL]. (2019-09-09)[2022-04-03]. <https://www.space.com/made-in-space-second-zblan-optical-fiber-space-factory.html>.
- [22] Spacenews. FOMS reports high-quality ZBLAN production on ISS[EB/OL]. (2019-11-07)[2022-04-01]. <https://spacenews.com/foms-reports-high-quality-zblan-production-on-iss/>.
- [23] Flawless Photonics. Space manufacturing platform[EB/OL]. [2022-04-05]. <https://www.flawlessphotonics.com/>.
- [24] NASA. Made in space-building a better optical fiber[EB/OL]. (2019-03-06)[2022-04-05]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/b4h-3rd/eds-mis-building-better-optical-fiber/.

- [25] Starodubov D, Ganley J, Tucker D. ZBLAN fibers: from zero gravity test to orbital manufacture[C]//Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology 2014, July 13-17, 2014, Seattle, Washington, USA. Washington, D.C.: OSA, 2014:AM4A.2.
- [26] 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 50.
Hu W R, Xu S C. Microgravity fluid mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 50.
- [27] Turnbull D, Fisher J C. Rate of nucleation in condensed systems[J]. The Journal of Chemical Physics, 1949, 17 (1): 71-73.
- [28] Uhlmann D R. A kinetic treatment of glass formation[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1972, 7(4): 337-348.
- [29] 西北轻工业学院. 玻璃工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
Northwest Institute of Light Industry. Glass technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [30] Crane K W, Corbin B A, Lal B, et al. Market analysis of a privately owned and operated space station[M]. Washington, D.C.: IDA Science and Technology Policy Institute, 2017: 64-69.