

太空工作环境中基于有限元法的宇航光纤温度仿真研究

徐昊^{1,2}, 顾庆昌^{1,2}, 杨洪伦³, 高泽仁^{1,2}

(1.安徽省宇航光互连技术重点实验室, 合肥 230051;

2.中国电子科技集团公司 第八研究所, 合肥 230051; 3.深空探测实验室, 合肥 230093)

摘要:为了评估和预测能量传输型宇航石英光纤在太空工作环境(SWE)中的工作性能,对其温度变化情况进行了研究。采用有限元法,设计了宇航光纤热仿真模型,用于分析不同初始温度、多工作循环状态及各运行阶段的宇航石英光纤温度变化,并结合一般和特殊2种工作条件,提出了“运行-冷却”交替的宇航光纤工作模式。实验结果表明:采用不同工作模式,宇航光纤在运行过程中的最高等效温度可降低18.85℃,平均等效温度可降低18.61℃,显著提升了宇航光纤的稳定性和可靠性。

关键词:有限元法;热辐射;石英光纤;光能传输;温度分析

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)02-0095-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temperature simulation research in space working environment for aerospace optical fiber based on finite element approach

XU Hao^{1,2}, GU Qingchang^{1,2}, YANG Honglun³, GAO Zeren^{1,2}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Aerospace Optical Interconnection Technology, Hefei 230051, China;

2. The 8th Research Institute of CETC, Hefei 230051, China; 3. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230093, China)

Abstract: To evaluate and predict the performance of energy-transmitting aerospace quartz optical fibers in the space working environment (SWE), this study investigates their temperature variations. Using the finite element approach, a thermal simulation model for aerospace optical fibers was designed to analyze temperature changes under different initial temperatures, multiple working cycles, and various operational stages. Additionally, an 'operation-cooling' alternating working mode for aerospace optical fibers was proposed, considering both general and special working conditions. The experiment result reveals that the optimal mode within the designed modes can reduce the maximum equivalent temperature by 18.85 °C and the average equivalent temperature by 18.61 °C during operation, significantly enhancing the stability and reliability of aerospace optical fibers.

Key words: finite element approach, heat radiation, silica optical fiber, optical energy transfer, temperature analysis

0 引言

随着宇航探索事业的兴起,用于光能传输的宇航光纤越来越受到产业界和学术界的关注^[1-4]。宇航光纤基于光全内反射几何光学原理设计,具有能量传输密度大、光波传输速度快、抗电磁干扰性强、能量传输损

耗低等特点,因此非常适合用于太空作业任务中的光能量传输过程。根据斯涅尔定律(Snell's Law),射入光线在宇航光纤包层界面上会发生全内反射现象^[5],这是其高效传输光能的基础。石英材料具有储量丰富、开采成本低、纯度可达近100%等优势,成为宇航光纤的首选材料。与其它光纤材料(如塑料、晶体等)相比,石英具有更高的熔点、更优异的折射率特性,并且可通过掺杂不同元素形成具有特定光学特性的光纤^[6]。在各类石英光纤中,宇航用大芯径多模石英光纤表现出优异的机械强度、弯曲性能、抗辐照性能以及较高的光能量损伤阈值和屈服强度;此外,其传输光波长范围较宽(250~2 400 nm),能够满足覆盖近红外光区、可见光区和紫外光区的激光功率传输需求。光纤的数

收稿日期:2024-06-04。

基金项目:深空探测全国重点实验室开放课题(NKLDSE2023B001)资助。

作者简介:徐昊(1994—),男,硕士,助理工程师。

2015年毕业于东北大学机械工程及自动化专业获学士学位,2020年毕业于新加坡国立大学机械工程专业获硕士学位。主要研究方向为宇航光通信、机器智能、航天光互连技术等。



徐昊,顾庆昌,杨洪伦,等. 太空工作环境中基于有限元法的宇航光纤温度仿真研究

值孔径(NA)决定了光的最大入射角,而宇航用大芯径多模石英光纤具有较大的数值孔径,可有效减少吸收损耗和散射损耗,提高传输效率。因此,这种光纤特别适合应用于高真空、宽温变、强辐射的复杂太空环境中进行光能传输^[6]。

尽管用于光能传输的宇航石英光纤芯径可以达到 0.1~1 mm,且构成这些光纤的石英材料熔点高达 1 700 ℃,但由于其涂覆层受到材料特性的限制,通常仅适用于温度不超过 150 ℃的环境^[7]。此外,当前的温度加固技术尚不成熟,使用金属镀层作为涂覆层的工艺复杂且成品率低。虽然采用丙烯酸酯、聚酰亚胺、镀碳或橡胶等耐高温材料作为涂覆层能在一定程度上提升光纤的工作温度范围,但在太空工作环境中,仍存在因聚光能量密度超过光纤材料烧蚀阈值而导致烧蚀的风险,这将导致能量传输效率下降,影响系统的正常运行^[8-9]。宇航石英光纤在太空工作环境中的温度变化及其仿真研究对于预测和防止可能出现的烧蚀风险至关重要。本文基于有限元法对宇航光纤进行温度仿真研究,并设计相应的验证实验。同时,提出一种“运行-冷却”交替的工作模式,旨在增强光纤在太空环境中的稳定性和可靠性。

1 环境条件与热学分析

为了评估和预测能量传输型宇航光纤在太空工作环境中的温度变化,本文首先对宇航光纤的环境条件和热交换形式进行分析,并对测试模型进行了验证试验。

1.1 环境条件

太空是一个具有微重力、高真空、大温差和强辐射(包括太阳辐照、离子辐射、射线、原子氧、太阳风和宇宙尘埃等),以及独特磁场等复杂环境条件的空间^[10]。在这样的环境中运行的航天器必须具备极强的环境适应能力,或者通过特定技术来增强其适应性。例如,通过设置温度保护系统可以确保宇航设备的工作环境维持在恒定的水平。

1.2 热控分析

热能交换的主要形式包括热传导、热对流和热辐射。在太空环境中,热辐射是热能交换的主要方式。热辐射是指具有温度的物体向外发射电磁波的过程。根据这一原理,只要物体的温度高于绝对零度(-273.15 ℃),它就能发出热辐射。物体的温度越高,其辐射能力也就越强。对于 2 个或 2 个以上的平面之间的热辐射问题,可以推导出

$$Q=A\varepsilon X\sigma(T_i^4-T_j^4) \quad (1)$$

其中, Q 为 2 个平面之间传递的热量, A 为平面的面积, X 为 2 个平面的角系数, ε 为平面的总发射率, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, T_i 和 T_j 分别为平面 i 和平面 j 的温度。由式(1)可知,热辐射传热过程具有高度非线性特性。

当环境温度较低时,光纤与外部环境之间的温差较大,导致光纤通过热辐射的方式向外界散发热量。在这种情况下,光纤最终会达到一个相对低温的热平衡状态;相反,当外部环境温度较高时,光纤与外部环境之间的温差较小,使得光纤向外发射的热辐射能量减少。这会导致光纤的温度逐渐升高,直到它与周围环境达成一个相对高温的热平衡状态。

1.3 验证试验

热发射率是衡量物体表面通过热辐射形式释放能量相对强度的一个物理量。热吸收率是投射到物体表面上并被该物体吸收的热能与总投射到物体上的热能之比。在空间环境中,光纤的温度变化主要受到 2 个因素的影响:一是光纤在传输光能过程中对能量的吸收(热吸收),二是光纤向太空环境中释放能量的能力(热辐射)。基于此,本文利用有限元仿真软件设计一系列验证实验,旨在评估热发射率和热吸收率这 2 种因素对光纤温度变化的影响。

1.3.1 理论分析

由式(1)可知,光纤的温升与热量的关系为

$$Q=mC\Delta T \quad (2)$$

其中, m 为光纤的质量, C 为光纤的比热容, ΔT 为光纤的温度变化量。

光纤温度受能量流动过程中吸收的能量 Q_1 和热辐射的能量 Q_2 共同影响,即

$$\Delta T=(Q_1+Q_2)m^{-1}C^{-1} \quad (3)$$

在能量流动过程中,假设光纤以一个恒定比率吸收能量, Q_1 是一个固定的正值,而热辐射能量 Q_2 则作为变量负值存在。具体地,当光纤的温度低于周围环境温度时,它向外散发的热辐射能量较低,此时 Q_2 的绝对值较小,光纤的温度会上升;相反,当光纤温度高于周围环境温度时,光纤会向外散发更多的辐射能量,使得 Q_2 的绝对值增大。在这种情况下,如果 Q_1 大于 Q_2 的绝对值,则光纤的温度将继续上升;反之,如果 Q_1 小于 Q_2 的绝对值,光纤的温度将会下降。最终,当吸收的能量与辐射出去的能量达到平衡时,即 Q_1 等于 Q_2 的绝对值,光纤的温度将趋于稳定,系统将进入热平衡状态。

1.3.2 材料参数

本文验证试验中,采用密度为 $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、长度为 100 mm 、直径为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 的宇航石英光纤,其比热容参数设为 $0.772 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,热导率参数设为 $1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

1.3.3 无散热状态温度仿真

在不考虑散热的情况下,假设输入功率为 13.3 mW ,宇航石英光纤对能量的吸收率为 1% ,可以通过温度仿真获得光纤在连续工作 20 min 时的温度变化情况。为便与同理论计算结果作比较,在仿真中将光纤初始温度设为 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,当光纤连续工作 20 min 后,仿真结果显示光纤温度为 $11.715 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.4 无散热状态模型验证

为评估验证试验中温度仿真结果的可靠性,本文将无散热状态下光纤温度模型理论计算结果与仿真模拟结果进行对比。通过理论计算,光纤质量约为 $1.769\times 10^{-2} \text{ g}$,当光纤的传输功率为 13.3 mW ,能量吸收率为 1% ,连续工作 20 min 时,光纤的温度变化量为

$$\Delta T=Q_1m^{-1}C^{-1}=11.680 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

在未考虑散热的理想情况下,理论计算得到的温度为 $11.680 \text{ }^{\circ}\text{C}$,而仿真结果显示温度为 $11.715 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两者之间的误差通过计算得出约 0.30% ,因而准确度约 99.70% ,这表明该仿真模型具有较高的模拟精度。

2 仿真试验及结果讨论

本仿真试验将在输入功率为 800 mW 、持续运行 20 min 的限制条件下,针对宇航石英光纤在正常工况与极端工况下的温度场分布特征及热管理效能开展系统性研究。通过对比分析 2 种工作状态下的光纤芯部温升曲线、表面散热速率以及整体温度梯度变化,评估现有冷却系统的热调控能力。为便于分析,设定宇航光纤的工作环境具备一定的温度控制条件,并以工作环境温度为 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 来进行以下仿真与评估。仿真试验基本参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真试验基本参数

直径/ μm	长度/ mm	工作环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$
200	100	60	60

2.1 正常工作条件下的热仿真

正常工作条件下,宇航光纤在开机运行阶段既存在热吸收也存在热辐射。设定该工况下光纤的热辐射发射率为 0.8 。通过仿真发现,当光纤的热量吸收率为 1% 时,在进入工作状态后,光纤吸收的热量大于通过热辐射向外发散的热量,因此光纤温度逐步升高。随

着光纤温度的逐渐升高,其热辐射能量也随之增大,直至 3 min 内温度上升到 $69.957 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光纤的升温速率开始变慢。开机运行 20 min 后,温度稳定在约 $69.959 \text{ }^{\circ}\text{C}$,基本不再上升,这表明系统已达到热平衡状态。

2.2 极端工作条件下的热仿真

在极端工作条件下,受太空作业环境影响,当宇宙尘埃、空间碎片等空间物质附着在装置表面时,会引发宇航光纤热控物理性能指标的变化。例如,光纤的热辐射发射率可能会减小。因此,在极端工作条件下,需考虑宇航光纤的温升效应^[10]。假设在这种情况下,光纤的热辐射发射率为 0.4 ,且当热量吸收率达到 5% 时,由于光纤吸收的热量增加而向外辐射的热量减少,连续工作将导致光纤温度大幅升高。根据温度仿真结果,连续工作 20 min 后,宇航光纤本体的最高温度达到了 $143.640 \text{ }^{\circ}\text{C}$,已接近光纤涂层材料的烧蚀阈值,当光纤的热辐射发射率继续减小或热吸收率继续增大,则宇航光纤本体最高温度会进一步升高并突破阈值。为了避免因连续高温工作导致宇航光纤失效的风险,需要设置停机冷却阶段。仿真模型显示,经过大约 3 min 的停机冷却,光纤本体的最高温度可恢复至约 $60.034 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 连续工作状况的评估

在研究过程中,为了对宇航光纤在不同初始温度和环境温度下,多工作循环状态内各个阶段的温度进行准确分析与评估,本文设计了一个宇航光纤温度评估预测模型。该模型基于有限元仿真软件构建,模型运算求解逻辑示意图如图 1 所示。首先,在有限元仿真软件中设定材料的密度、热导率、比热容、热发射率、热吸收率和接收光功率等条件后。接着,向预测模型输入给定的光纤初始温度和外界环境温度。在设定好所有必要的条件和参数后,宇航光纤温度评估预测模型开始运算处理。模型通过有限元方法模拟光纤在光能量传输过程中的温度变化情况。经过运算处理,模型输出相应的温度变化情况结果。这些结果可以清晰地显示光纤在不同初始温度和环境温度下,多工作循环状态内各个阶段的温度变化情况。

3.1 一般连续工况分析与评估

在标准环境条件下连续工作时,即使吸收率增加至 2% ,即在 800 mW 的输入功率下光纤吸收 16 mW 的能量,宇航石英光纤也仅需大约 2 min 即可达到热平衡状态。一般连续工况下部分时间点温度变化的具体情况如表 2 所示。

徐昊,顾庆昌,杨洪伦,等. 太空工作环境中基于有限元法的宇航光纤温度仿真研究

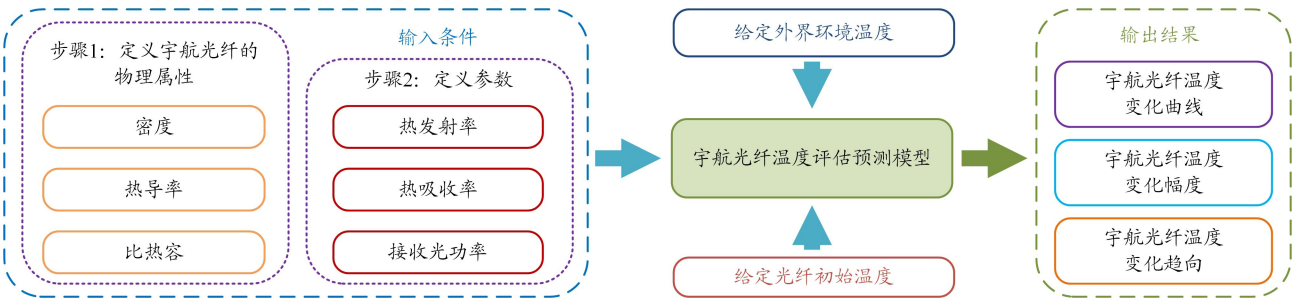


图 1 宇航光纤温度评估预测模型运算求解逻辑示意图

当温度不再随时间变化而变化时即可认为已实现热稳态。达到热稳态后,宇航光纤本体最高温度约为79.135 ℃,最低温度约为 78.738 ℃。鉴于在这种条件下,宇航光纤能够实现吸热与散热的平衡,并且其热稳态温度保持在合理范围内。由此可知,在一般连续工作条件下,该光纤能够在太空工作环境中连续稳定地工作。

表 2 宇航光纤本体一般连续工况下部分时间点温度值记录

时间/min	温度/℃		
	最大值	最小值	平均值
0.5	75.039	74.669	74.694
1	78.264	77.870	77.898
2	79.095	78.727	78.699
2.5	79.133	78.736	78.758
5	79.135	78.738	78.766
10	79.135	78.738	78.766
15	79.135	78.738	78.766
20	79.135	78.738	78.766

3.2 特殊连续工况分析与评估

由于特殊条件下光纤发射率降低,根据表 1 的宇航石英光纤参数,在吸收率增大到 10%,即输入功率为 800 mW 时,光纤将吸收 80 mW 的能量。仿真结果显示,在这种连续工作条件下,尽管光纤能够达到热平衡状态,其热稳态温度却维持在一个较高的区间,约为 195.320 ℃。为了避免长期高温运行对光纤性能的影响,针对上述分析中提到的在极端环境条件下热稳态温度较高的问题,本文提出一种“运行-冷却”交替的宇航光纤工作模式,如表 3 所示。在开机运行阶段,光纤同时进行吸热与散热;而在停机冷却阶段,则仅进行散热过程,不存在吸热现象。

基于提出的“运行-冷却”交替的宇航光纤工作模式,针对宇航光纤在特殊连续工况下的应用,本文又设

表 3 “运行-冷却”交替的宇航光纤工作模式

工作阶段	工作状态	吸热或散热情况
运行	开机	存在热吸收
		存在热辐射
冷却	停机	不存在热吸收
		存在热辐射

计了 4 种相应的工作模式。根据仿真结果,各工作模式下,经历多次循环后的稳态温度分布情况如表 4 所示。可以看出,在运行过程中,最高温度值最大的是模式 1,平均温度值最高的是模式 2,运行效率最高的是模式 4。

表 4 特殊连续工况下不同“运行-冷却”循环模式的宇航光纤在多次循环后稳态温度值

模式	状态	最高温度/℃	平均温度/℃	运行效率/%
模式 1	运行 180 s	143.580	142.580	60.0
	冷却 120 s	64.619	64.610	
模式 2	运行 120 s	140.360	142.990	66.7
	冷却 60 s	78.058	78.000	
模式 3	运行 90 s	141.470	140.390	60.0
	冷却 60 s	77.782	77.723	
模式 4	运行 90 s	142.180	141.100	75.0
	冷却 30 s	96.879	96.701	

在特殊连续工况下,为了比较宇航光纤在不同工作模式中的表现,可以评估其各模式的冷却性能。根据式(5)和式(6),定义了以下 2 个评价指标:

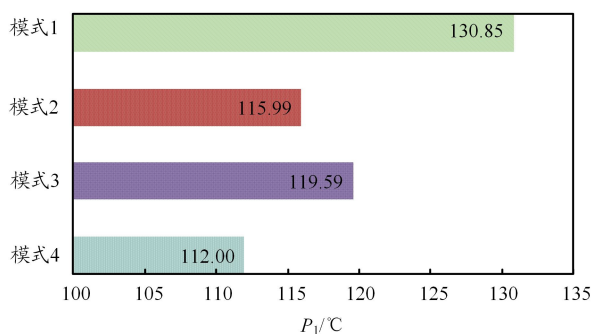
$$P_1=C_{1A}t_A(t_A+t_B)^{-1}+C_{1B}t_B(t_A+t_B)^{-1} \tag{5}$$

$$P_2=C_{2A}t_A(t_A+t_B)^{-1}+C_{2B}t_B(t_A+t_B)^{-1} \tag{6}$$

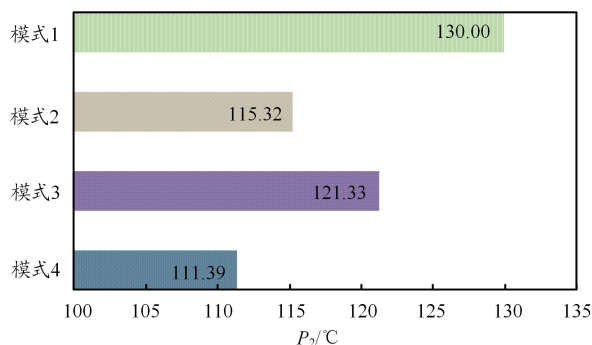
其中, P_1 为最高等效温度, P_2 为平均等效温度, t_A 和 t_B 分别为运行和冷却阶段时间, C_{1A} 和 C_{1B} 分别为运行和冷

却阶段的稳态最高温度, C_{2A} 和 C_{2B} 为相应的平均温度。

不同模式下的 P_1 和 P_2 值的对比情况如图 2 所示。可以看出,相比于模式 1,模式 4 的最高等效温度降低 18.85 °C,平均等效温度降低 18.61 °C。说明通过应用“运行-冷却”交替的工作模式 4,能够更有效地降低宇航光纤达到的热平衡温度。由于通过调节运行阶段与冷却阶段的时间比例可以直接且有效地干预宇航光纤的热平衡状态温度,因此,关于最优的工作模式时间比例仍有待在后续的研究中进一步探索。



(a) 不同模式下的 P_1 值



(b) 不同模式下的 P_2 值

图 2 不同“运行-冷却”交替工作模式下的 P_1 和 P_2 值对比情况

4 结束语

本文首次基于太空工作环境温度,对宇航用大芯

径多模石英光纤进行了热分析,并提出了相关验证试验的设计。仿真分析显示,在一般工况下,宇航石英光纤能够连续稳定地工作;而在特殊工况下,当光纤的能量吸收率增加且其热辐射发射率降低时,则建议采用间歇工作模式。因此,本文提出了一种“运行-冷却”交替的工作模式,旨在有效避免光纤长期处于高温连续工作的状态。此外,通过使用有限元仿真软件,本文设计了针对宇航光纤的热仿真模型。实验验证表明,该模型可准确预测给定环境温度及初始条件下光纤各工作阶段的温度场分布,并实现循环工况的定量分析。针对宇航石英光纤的仿真研究,首次系统揭示了其在太空环境中的温度响应特性,为空间光器件的热设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 田少平,李运泽,刘佳,等. 高强太阳光无线能量传输能量供给平台设计[J]. 航空动力学报,2016,31(10):2472-2478.
- [2] 郭孟月. 高强太阳光能柔性传输系统的研究[D]. 南京:东南大学,2022.
- [3] LEVERONE F, PINIA M, CERVONE A, et al. Solar energy harvesting on-board small satellites[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 954-972.
- [4] LI X, FAN G, ZHANG Y, et al. A fresnel concentrator with fiber-optic bundle based space solar power satellite design[J]. Acta Astronautica, 2018, 153: 122-129.
- [5] 路永涛. 传能光纤仿真研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.
- [6] 陈冀景. 基于石英光纤材料的发展历程以及当今基于石英光纤材料从事研究和进展方向概述[J]. 科技创新与应用,2018(25):89-90.
- [7] 贾宝楠. 基于二氧化硅的功能材料设计和物性研究[D]. 北京:北京邮电大学,2021.
- [8] 高杨,赵兴海,赵翔,等. 石英光纤的传能效率、损伤阈值和损伤积累效应研究[J]. 探测与控制学报,2009,31(1):1-4.
- [9] 胡鹰石. 石英光纤热致损伤的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2022.
- [10] 邵冲云,于春雷,胡丽丽. 面向空间应用耐辐照有源光纤研究进展[J]. 中国激光,2020,47(5):1-29.