

文章编号 1004-924X(2023)24-3540-09

光子晶体与保偏光纤低损耗、高可靠熔接工艺

王晓玲*, 赵亚飞, 刘保林, 张子健, 王琪伟
(北京控制工程研究所, 北京 100094)

摘要:光子晶体光纤利用周期性的空气孔结构实现导光,具有空间辐射不敏感的特性。在光子晶体光纤空间应用中,存在与保偏尾纤熔接损耗大、熔接强度低的问题。本文对光子晶体光纤与保偏光纤熔接工艺进行研究。首先分析了光子晶体光纤和保偏光纤熔接损耗的产生机理,结合有限元仿真获得了熔接损耗与熔接功率和熔接时间的关系,并通过熔接实验对计算结果进行了验证。在此基础上,重点关注了熔接功率和时间对熔接强度的影响,通过实验获得了最优的熔接功率和熔接时间。最后,通过提升光纤端面质量、偏移加热位置、优化熔接参数等方法进一步提升了熔接点质量,实现了低熔接损耗与高熔接强度的平衡。利用优化后的熔接参数开展了光子晶体光纤与保偏光纤熔接实验,实验结果表明,平均熔接损耗达到 0.82 dB 水平,均低于 1 dB,平均熔接强度 139 kpsi,均大于 100 kpsi,满足宇航空间应用的光纤低损耗、高可靠的熔接需求。

关键词:光子晶体光纤;保偏光纤;熔接损耗;熔接强度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233124.3540

Technology of low-loss high-reliability fusion splicing between photonic crystal fiber and polarization-maintaining fiber

WANG Xiaoling*, ZHAO Yafei, LIU Baolin, ZHANG Zijian, WANG Qiwei

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: wangxl824@126.com

Abstract: Photonic crystal fibers (PCFs) use periodic air hole structures to achieve light conduction, which is insensitive to space radiation. However, problems of high splice loss and low splice strength occur when the PCF splices with a PMF in the aerospace field. Therefore, investigating the fusion splicing between the PCF and PMF is crucial. First, the mechanism of splice loss between the PCF and PMF is analyzed. Next, the relationships of the splice loss with splice power and splicing time are derived via finite element simulation. The results are verified through splicing tests. Based on these, the effects of splice power and splice time on the tensile strength of splicing is emphasized, and the optimal splice power and splice time are obtained experimentally. Finally, the splicing quality is further improved by enhancing the quality of the fiber ends, shifting the heating position, multiple heating, and optimizing the splice parameters. The splicing experimental results show that the average splice loss reaches 0.82 dB, both lower than 1 dB, and the average mechanical strength is 139 kpsi, both higher than 100 kpsi. These values satisfy the requirements for low loss and high reliability of fiber fusion splicing in space applications.

收稿日期:2023-06-14;修订日期:2023-07-19.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 62205016)

Key words: Photonic Crystal Fiber (PCF); Polarization-Maintaining Fiber(PMF); splice loss; splice strength

1 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是一种利用周期性的空气孔结构实现导光的新型光纤,具有对辐照不敏感的优点。根据纤芯内部结构的差异,光子晶体光纤可以分为高折射率反射型的普通实芯 PCF 和折射率导引型空芯 PCF^[1],本文所涉及为高折射率反射型实芯 PCF。与传统保偏光纤(Polarization-Maintaining Fiber, PMF)相比,光子晶体光纤能够显著提升光纤陀螺的宇航空间环境适应性,光子晶体光纤绕制的光纤环能够降低其对辐射、温度、磁场等环境影响的敏感性^[2],满足长寿命高可靠卫星的应用需求^[3]。光子晶体光纤陀螺已用于卫星主闭环控制验证,展示出较好应用前景^[4]。

PCF 与 PMF 两种不同热特性的光纤熔接比较困难^[5-6],主要体现在光子晶体光纤在熔接过程中存在工艺参数不合理使得空气孔过度塌陷从而导致较高损耗。目前的研究成果主要集中于 PCF 与单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)的熔接。靳伟等^[7]人研究了不同熔接参数对空气塌陷的影响,利用爱立信熔接机 FSU-975 分别对大模场 PCF 和高非线性 PCF 与 SMF 实现了 0.9 dB 和 1.45 dB 的熔接损耗,提出两种光纤精准对齐与适当加热,即控制加热电流和加热时间是低损耗熔接的关键因素;Chong 等^[8]人利用 CO₂ 激光器实现了 PCF 和 SMF 之间的熔接,两点熔接损耗为 1.3 dB~2.8 dB;M. L. V. Tse 等^[9]人实现了高空气填充率的 PCF 与 SMF 的近 1dB 低损耗熔接。另外光纤间的模场匹配在低损耗熔接中也有所研究,Chen 等^[10]人通过控制孔坍塌和锥度,实现 PCF 与双包层单模光纤(Double-Clad Fiber, DCF)的最佳模场匹配,完成 0.65 dB 的低损耗熔接;Yu 等^[11]人针对模场和直径不匹配的 SMF-28 和超大模场面积 PCF 采用反向拉锥方

法,精确控制光纤外径和模场轮廓,实现低于 0.5 dB 的低损耗熔接,其熔接强度约为 58.2 kpsi。可以看到,目前公开报道的 PCF 和 SMF 之间的熔接损耗一般都大于 0.9 dB,并且少有 PCF 和 PMF 之间熔接的研究。而除了熔接损耗之外,在航天器等对可靠性要求极为严苛的应用领域,对于熔接点的熔接强度也提出了更高的要求,而现有文献中还未见有针对 PCF 与 PMF 的熔接强度的可靠性数据验证。在实际熔接过程中,高熔接强度往往与低熔接损耗相互制约,因此亟需进行光子晶体光纤与保偏光纤低损耗、高可靠熔接工艺的研究,以满足宇航光纤陀螺产品中光子晶体光纤环替代传统保偏光纤环,需应用此熔接工艺的迫切需求。

2 光子晶体光纤的熔接机理研究

2.1 熔接损耗的产生机理

光子晶体光纤与保偏光纤的熔接损耗的主要成因是波导间结构参数不匹配导致的。产生这种不匹配的因素有三,一是由于波导端面对准过程中产生横向偏移和角度倾斜等情况导致的非本征损耗,该损耗由熔接设备的位移精度决定;二是由光子晶体光纤与保偏光纤之间的模场分布不同引起的模场失配损耗;三是由熔接时的高温导致光纤结构变化引起的限制损耗。本文将分别进行理论分析。

2.1.1 非本征损耗

光纤熔接过程中,非本征损耗取决于熔接设备的精度。当熔接设备产生位移误差时,会导致光纤模场匹配产生误差,如图 1 所示。其中,阴影面积为能够正常传输的光斑面积,光纤的模场半径用 R 表示,熔接设备的误差为 d ,则非本征损耗可以表示为^[12]:

$$\Gamma_{\text{Loss}} = -10 \log \left[1 - \frac{2 \arcsin(d/2R)}{\pi} - \frac{d \sqrt{R^2 - d^2/4}}{\pi R^2} \right]. \quad (1)$$

经过计算,当熔接设备产生位移误差 $< 0.2 \mu\text{m}$ 时,非本征损耗小于 0.1 dB。根据熔接设备

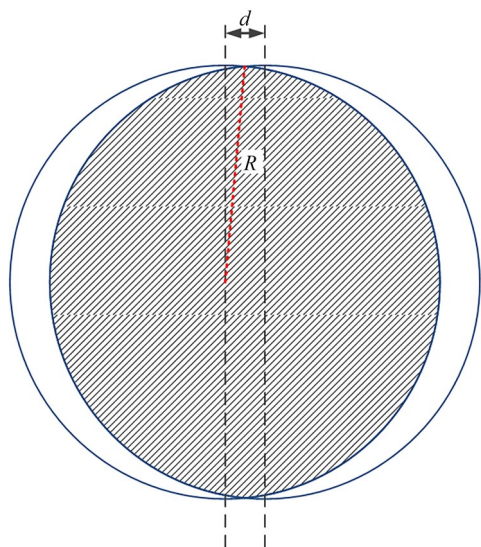


图1 熔接非本征损耗示意图

Fig. 1 Extrinsic splice loss

的使用手册可知,熔接机的位移误差 $<0.1\ \mu\text{m}$,在光子晶体光纤与保偏光纤熔接时非本征损耗可以忽略。

2.1.2 模场失配损耗

目前光纤陀螺与光纤环连接的尾纤为保偏光纤,光子晶体光纤与这种光纤的端面图像如图2所示。

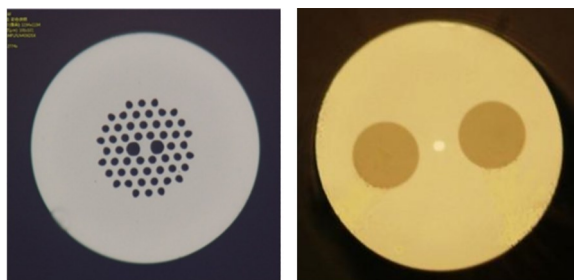


图2 光子晶体光纤端面与保偏光纤端面图像

Fig. 2 PCF end face and PMF end face

当光子晶体光纤与这种保偏光纤熔接时,由于两种光纤的模场分布不一致,会在熔点产生由于模场失配导致的损耗,模场失配损耗表达式为^[13]:

$$\Gamma_{\text{Loss}} = -10 \log \left[\frac{2\omega_{\text{PMF}}\omega_{\text{PCF}}}{\omega_{\text{PMF}}^2 + \omega_{\text{PCF}}^2} \right]^2, \quad (2)$$

其中, ω_{PMF} 和 ω_{PCF} 分别是光纤和光子晶体光纤的模场直径。这里将光纤的基模模场分布近似为高斯型,模场直径采用最广泛使用的定义,即电

场强度下降到峰值的 $1/e$ 时的光斑直径。光子晶体光纤模场失配损耗的变化是由于光纤空气孔的形变导致的,需要对光子晶体光纤熔接过程中的形变进行分析。

2.1.3 限制损耗

限制损耗是由于光子晶体光纤包层空气孔层数有限性导致的模式泄露,代表了光子晶体光纤对传输光的约束能力,与光纤空气孔形状、大小、排布方式和传输波长相关。通常经过设计的光子晶体光纤的限制损耗在光纤的总传输损耗中只占很小的一部分,远远小于材料吸收损耗和拉制结构不完美导致的损耗。

在光纤熔接过程中,由于光子晶体光纤的包层是由石英和空气孔交替叠加而形成的,当光子晶体光纤被加热到超过软化温度时,其表面张力(γ)会克服光纤粘度(η)而使得空气孔塌陷。塌陷速率可由式(3)表示^[14]:

$$V = \frac{\gamma}{\eta}. \quad (3)$$

在熔接温度范围内,光纤的表面张力对温度并不敏感,但其粘度则随着温度的上升很快的下降,所以光子晶体光纤在接续时特别容易形成空气孔的塌陷,导致光纤的形变,此时光纤的限制损耗会显著增加。

光子晶体光纤的限制损耗可以通过计算光纤的有效折射率得到,两者之间的关系为^[15]:

$$L_c = -\frac{20}{\ln 10} \text{Im}[\beta], \quad (4)$$

其中:传播常数 $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$, k_0 为波数, n_{eff} 为光纤的有效折射率。

与模场失配损耗一样,光子晶体光纤限制损耗的变化也是由于光纤空气孔的形变导致的,需要对光子晶体光纤熔接过程中的形变进行分析,根据形变后的结构计算有效折射率来获取限制损耗的变化。

2.2 光子晶体光纤熔接中的模场变化

根据理论分析可知,光子晶体光纤与保偏光纤熔接时的损耗主要来自模场失配损耗和限制损耗,这两个损耗主要与光子晶体光纤在熔接过程中模场的变化有关,而光子晶体光纤的模场主要与光纤的结构相关。为了对熔接损耗进行计算,采用有限元的方法对型号为PMPCF-1550-100/135的光子晶体光纤受热后的结构变形进行

了仿真。在特定加热功率下,光子晶体光纤模场分布随熔接时间的变化如图 3 所示。

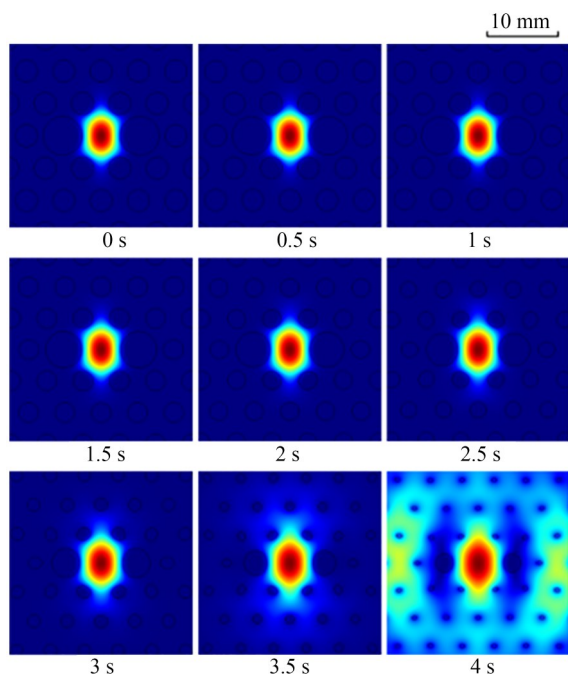


图 3 光子晶体光纤模场分布随熔接时间的变化

Fig. 3 Variation of PCF mode field distribution with splice time

从仿真结果可以看出,随着熔接时间的增加,光子晶体光纤的空气孔逐渐减小并最终闭合,在熔接过程中包层空气孔有向内收缩的趋势;光子晶体光纤模场分布随熔接时间的延长呈现逐渐增大的趋势,并且可以明显看出模式泄露随着熔接时间的增加而愈发严重。

2.3 熔接损耗计算与试验验证

根据光子晶体光纤模场分布情况,可以分别计算模场失配损耗及熔点限制损耗。其中模场失配损耗与熔接功率的关系如图 4 所示。随着熔接时间的增加,模场失配损耗先是逐渐下降,最小损耗在 0.68 dB 附近,随后损耗开始迅速增大,最大模场失配损耗在 2~2.5 dB 左右。不同熔接功率下模场失配损耗的变化趋势相同,变化的进程随功率的增加而加快。

熔点限制损耗仿真结果如图 5 所示。在熔接开始后光子晶体光纤的塌缩对熔点限制损耗的影响几乎为 0,只有当光纤的空气孔接近完全闭合的时候才出现明显增大。

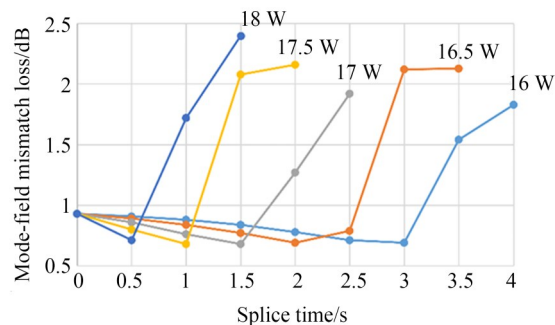


图 4 熔点模场失配损耗与熔接功率和熔接时间关系图

Fig. 4 Relationship between PCF mode field mismatch loss and splice power and splice time

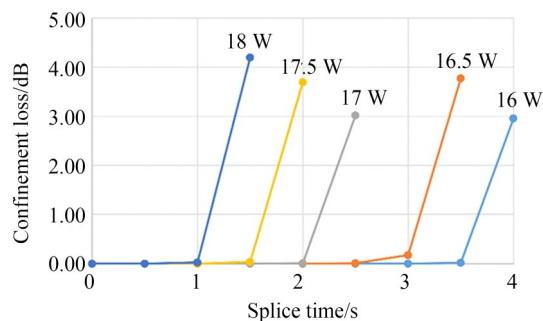


图 5 熔点限制损耗与熔接功率和熔接时间关系图

Fig. 5 Relationship between PCF melting point confinement loss and splice power and splice time

将计算得到的模场失配损耗和限制损耗相加,可以得到光子晶体光纤与保偏光纤熔接损耗同熔接功率和熔接时间的关系模型,如图 6 所示。在不同熔接功率下,熔点损耗的变化趋势相同,均是先缓慢下降,即在熔接的开始阶段光子晶体光纤空气孔的轻微塌缩能够促进两种光纤间的模场匹配;随着熔接时间的增加,光子晶体光纤

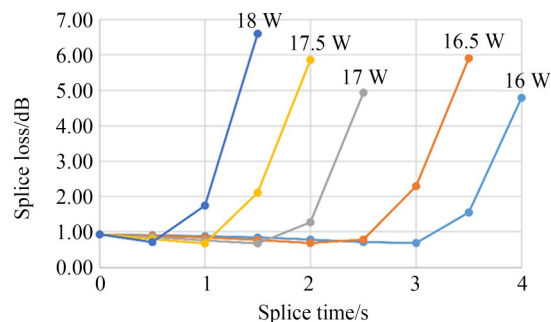


图 6 熔点损耗与熔接功率和熔接时间关系图

Fig. 6 Relationship between PCF melting point loss and splice power and splice time

的模场逐渐变大,耦合损耗开始增加;最后当熔接时间足够长时,空气孔区域闭合,限制损耗变成熔点损耗的主要组成部分。熔接功率的增大或者减小能够加快或者减缓上述过程的发生。

利用 CO₂ 激光熔接机进行熔接试验,熔接参数参考仿真结果,试验结果如图 7 所示,橙色线为仿真结果(彩图见期刊电子版)。可以看到,熔接损耗随时间的变化规律与仿真结果一致,说明上述熔接损耗的理论模型较为准确,可以有效地反应熔接过程中损耗的变化,可利用该规律对熔接损耗进行优化。

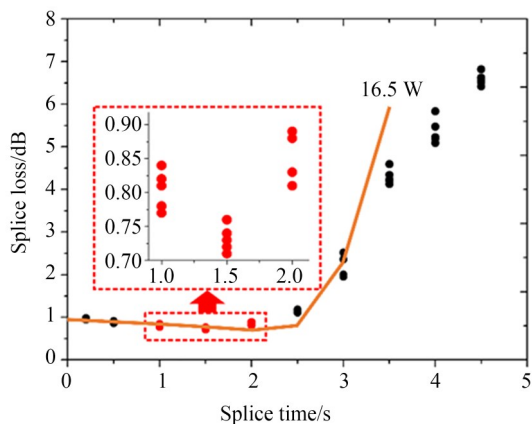


图 7 光纤熔接损耗

Fig. 7 PCF splice loss

2.4 熔接强度

2.4.1 熔接强度衡量指标

光子晶体光纤由熔融状态下的二氧化硅拉制而成,引起脆性材料断裂的主要因素是最大拉应力,因此当材料所受拉应力达到材料单向拉伸断裂时的最大拉应力时,就会引起材料的断裂。在衡量熔接强度时,通常采用 kpsi 作为衡量熔点能够承受压强的单位, kpsi 是指磅力/平方英寸,与标准单位的换算关系为 1 kpsi=6.895 MPa。一般光纤张力筛选为 100 kpsi,熔点能够承受的抗拉强度应在 100 kpsi 以上,即高于 0.7 GPa。

2.4.2 熔接强度摸底试验

通过建立光子晶体光纤和保偏光纤的熔接损耗模型,能够确定针对这两种光纤熔接损耗的最优参数。但是采用此时的熔接参数未必能够得到最优的熔接强度。对每组熔接参数进行 5 次试验,获取不同熔接参数下的熔接强度,并综合

考虑熔接损耗的影响确定最优熔接参数。熔接强度可以通过专用的测试设备进行测试。测试设备通过对光纤逐渐施加拉力直至光纤断裂,记录断裂瞬间对光纤施加的拉力,最终通过测得的拉力和光纤的横截面积计算光纤的抗拉强度。

在熔接过程中,光纤处于高温环境,而光纤材料的黏度随温度的升高呈指数下降,此时在光纤表面张力的驱动下,待熔接的两光纤端面逐渐熔合为一体。熔融石英的黏度取决于环境温度,与熔接功率直接相关;熔合过程中微裂纹的修复与熔接时间相关。从光纤熔接的物理机理上看,熔接功率和时间是影响熔接强度的主要因素。图 8 所示是光子晶体光纤和保偏光纤的熔接损耗与强度随熔接时间的变化。从图中可以看出,当熔接时间不大于 1.5 s 时,熔接强度随熔接时间的增长而迅速增加,而熔接损耗缓慢下降;当熔接时间大于 1.5 s 时,熔接强度的增加速度逐渐减缓,并在 2.5 s 时达到峰值,而这一过程中熔接损耗逐渐上升;直到 4.5 s 时熔接强度基本平稳,而熔接损耗快速上升。由此得到光纤熔接时间选择 1.5 s 左右较为合适。

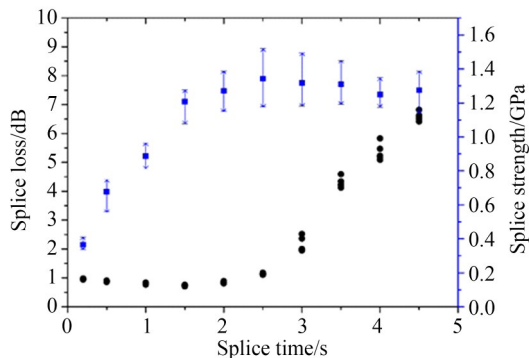


图 8 光子晶体光纤和保偏光纤熔接损耗与强度与熔接时间的关系

Fig. 8 Relationship between splice loss and splice strength and splice time of PCF and PMF

3 光子晶体光纤熔接工艺试验

3.1 熔接方案

在实际熔接过程中,由于光纤表面在预处理和熔接过程中受到污染,在杂质离子和加热温度的作用下二氧化硅分子会发生重新定向排布,形成结晶。在结晶处,光纤的强度会显著下降。为了进一

步提高光纤的熔接强度,需要选择清洁度更高的熔接加热源。目前常用的加热源如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,在使用一段时间后,采用电极放电熔接和石墨丝加热熔接不可避免地引入污染,导致光纤熔接强度下降。因此,为了提高光纤熔接强度和可靠性,采用 CO₂激光器作为熔接加热源。CO₂激光为清洁热源,无任何杂质污染,且光纤表面主动吸收激光并稳定热传导,熔接表面光滑,无裂缝,可有效提高光纤熔接可靠性。本次试验采用 CO₂激光器作为熔接加热源。

光纤端面质量取决于光纤端面的切割角度。光纤端面质量影响熔接质量。采用拉切式光纤切割刀替代传统压切式切割刀,可明显提高光纤端面切割角度,如表 2 所示。

表 1 加热源特点对比表

Tab. 1 Comparison of heating source characteristics

加热方法	优势	劣势
电极放电	无需气体	电极老化后会在光纤表层沉积污染物
石墨丝加热	无需高压	1. 石墨丝老化后极易污染光纤表面 2. 频繁更换石墨丝 3. 惰性气体防止过快氧化
CO ₂ 激光器	最清洁的热源,不会在光纤表层镀上金属氧化物	要考虑激光器安全防护

表 2 光纤端面切割刀切割光纤质量对比表

Tab.2 Quality comparison of fiber cutting with fiber cleaver

切割刀类型	拉切式	压切式
切割原理	利用金刚石刀片在光纤表面划出印痕,并采用拉光纤(应用磁力、弹力或其他外力)的方式将光纤拉断,得到平整且垂直于中轴线的端面	利用金刚石刀片在光纤表面划出印痕,并将光纤压断,得到平整且垂直于轴线的端面
切割方法	拉切时,光纤在一定拉力下,刀片垂直光纤切割	压切时,存在光纤微弯曲,切割光纤端面角度较大
切割角度	≤0.5°	0.5°~1.5°

采用藤仓公司生产的 LZM 系列 CO₂熔接机进行光子晶体光纤与保偏光纤熔接。试验方案如图 9 所示。

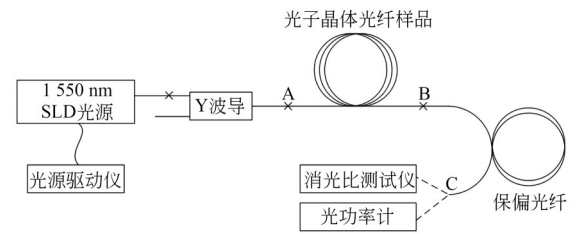


图 9 光子晶体光纤熔接示意图
Fig. 9 Schematic diagram of PCF fusion splicing

试验的 1 550 nmSLD 光源由光源驱动仪驱动,设置驱动电流;光源输出尾纤与 Y 波导输入尾纤熔接,并记录另一端输出尾纤 A 点处的光功率 PA;随后熔接光子晶体光纤及保偏光纤,分别记录 B 点和 C 点的光功率 PB 和 PC,光纤较短自身损耗忽略不计,两个熔接点的损耗分别 Loss(A)=PB-PA, Loss(B)=PC-PB。当熔接参数最优后测试熔点抗拉强度。

3.2 熔接参数试验

在理论分析得到的初步参数基础上,进一步针对熔接加热源的位置以及追加加热情况进行针对性的试验,得到最优的熔接参数。

3.2.1 加热位置试验

在熔接过程中,由于光子晶体光纤空气孔结构的存在,光子晶体光纤要比保偏光纤软化温度低,在熔接时先形成空气孔塌陷。如果熔接时温度过于高,会造成严重的塌陷从而产生损耗值随之增大。

为了尽可能降低光纤熔接损耗,理论上最优的熔接方法是将加热位置向更靠近熊猫保偏光纤一侧,从而有效降低光子晶体光纤的形变,加热区域示意图如图 10 所示。

在实际熔接过程中,通过改变加热区域的位置,得到熔点质量如表 3 所示。相同的熔接参数,当加热位置在保偏光纤和光子晶体光纤连接端面时,具有较低的熔接损耗;当加热位置偏移在保偏光纤侧时,熔接热量在光子晶体侧更少,熔接损耗相应更低;当加热位置偏移在光子晶体光纤侧时,空气孔塌陷较多导致损耗迅速增加,但试验显示熔接强度均未达到 100 kpsi。

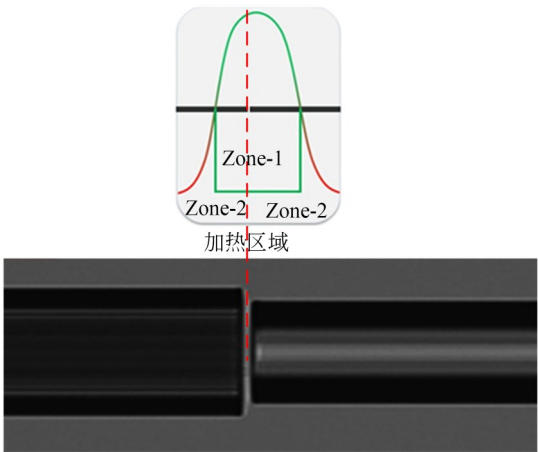


图 10 光子晶体光纤与保偏光纤熔接加热区域示意图
Fig. 10 Splicing heating area of PCF and PMF

表 3 加热位置试验记录表

Tab. 3 Record form of heating position experiment

序号	加热区域位置	损耗/dB	抗拉强度 (>100 kpsi)
1	偏移保偏侧 $50\text{ }\mu\text{m}$	0.75	86
2	偏移保偏侧 $25\text{ }\mu\text{m}$	0.83	90
3	中心	0.85	95
4	偏光子晶体侧 $25\text{ }\mu\text{m}$	1.0	80
5	偏光子晶体侧 $50\text{ }\mu\text{m}$	1.24	74

3. 2. 2 追加加热试验

为了进一步提高抗拉强度,需要在光纤熔接后,再对熔点进行降低加热功率的追加加热。试验结果如表 4 所示。在试验中 10 bit 对应 300 mW 激光熔接功率。当追加通光-20 bit(相对原加热功率降低值),光纤抗拉强度显著提升,但熔接损耗波动较大;追加通光-40 bit,光子晶体光纤无明显塌陷,对熔接强度提升不显著;最终确认追加通光-30 bit,一般通光 2~3 次。

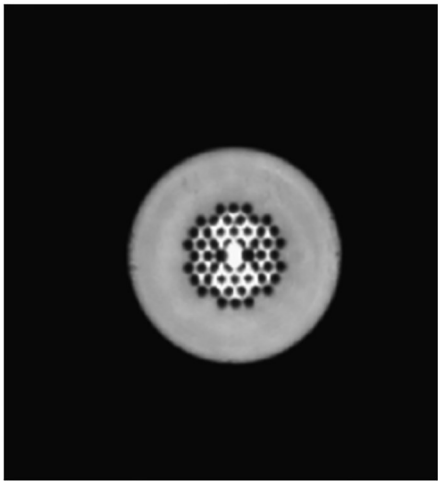
3. 2. 3 试验结果

采用试验得到的熔接参数进行多次熔接试验,熔点平均损耗为 0.82 dB、最大值不超过 1.0 dB,平均熔接抗拉强度达到 139 kpsi、最小值不低于 100 kpsi,如表 5 所示,满足光纤陀螺熔接损耗小于 1.0 dB、熔点抗拉强度大于 100 kpsi 的使用要求。熔接对轴过程中光子晶体光纤端面图以及熔接完成后熔点照片如图 11 所示。

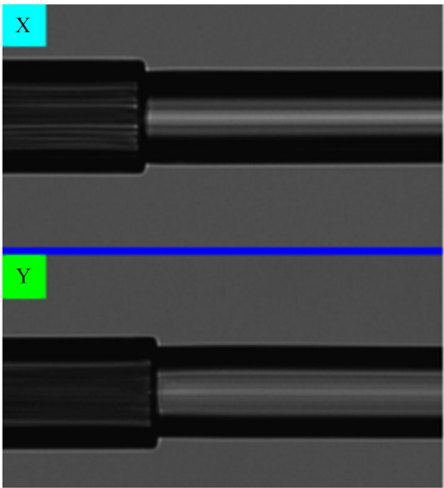
表 4 熔接再加热试验记录表

Tab. 4 Record form of splicing reheating test

序号	熔点		追加通光情况	
	损耗/dB	抗拉强度/kpsi	次数	通光强度/bit
1	0.8	<100	1	-20
2	1.2	150	2	-20
3	0.83	110	2	-30
4	0.91	140	3	-30
5	1.1	160	4	-30
6	0.78	<100	4	-40
7	0.9	<100	5	-40



(a) 熔接对轴过程中光子晶体光纤端面图
(a) PCF end face diagram during splicing alignment process



(b) 熔接完成后熔点照片
(b) Photo of melting point after splicing completion

图 11 熔接试验过程

Fig. 11 Fusion test process of PCF and PMF

表 5 熔接试验记录表
Tab. 5 Record form of splicing test

序号	损耗(≤1 dB)	抗拉强度(>100 kpsi)
1	0.9	154
2	0.81	134
3	0.73	160
4	0.85	140
5	0.89	145
6	0.75	122
7	0.72	116
8	0.92	177
9	0.76	110
10	0.86	137

参考文献:

[1] 李晋, 闫浩, 孟杰. 光子晶体光纤气体吸收光谱探测技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10): 2316-2329.
LI J, YAN H, MENG J. Research progress of gas absorption spectrum detection technology based on photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2316-2329. (in Chinese)

[2] MA P, SONG N, JIN J, *et al.* Birefringence sensitivity to temperature of polarization maintaining photonic crystal fibers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1829-1833.

[3] 郑辛, 吴衍记, 于怀勇. 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 1-8.
ZHENG X, WU Y J, YU H Y. Key technology & application status of the photonic crystal fiber used in fiber optic gyroscope [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(6): 1-8. (in Chinese)

[4] 徐小斌, 王晓阳, 高福宇, 等. 光子晶体光纤陀螺技术及其首次空间试验[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 1-7.
XU X B, WANG X Y, GAO F Y, *et al.* Photonic crystal fiber-optic gyroscope technology and its first space experiment [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(1): 1-7. (in Chinese)

[5] 奚小明, 陈子伦, 刘诗尧, 等. 光子晶体光纤与普通光纤的耦合熔接[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 202-205.
XI X M, CHEN Z L, LIU S Y, *et al.* Coupling and fusion splicing of photonic crystal fibers with

4 结 论

本文在分析光子晶体光纤熔接机理的基础上,建立了熔接损耗和熔接强度同熔接功率和熔接时间的关系模型,给出了光子晶体光纤同保偏光纤熔接的熔接参数,在此基础上探索了提升光纤端面质量、偏移加热源位置、追加加热对熔接质量的影响。多次熔接结果表明,平均熔接损耗达到 0.82 dB,平均熔接强度达到 139 kpsi,能够满足宇航高可靠产品的应用需求。

conventional fibers[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 202-205. (in Chinese)

[6] 冯迪, 赵正琪, 房启蒙, 等. 光子晶体光纤端面研磨损伤的分析[J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2895-2903.
FENG D, ZHAO Z Q, FANG Q M, *et al.* Analysis of end face damage in lapping for photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2895-2903. (in Chinese)

[7] XIAO L, DEMOKAN M S, JIN W, *et al.* Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect[J]. *Journal of lightwave technology*, 2007, 25(11): 3563-3574.

[8] CHONG J H, RAO M. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(12): 1365.

[9] TSE M L V, TAM H Y, FU L B, *et al.* Fusion splicing holey fibers and single-mode fibers: a simple method to reduce loss and increase strength[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 21(3): 164-166.

[10] CHEN Z L, XI X M, ZHANG W J, *et al.* Low-loss fusion splicing photonic crystal fibers and double cladding fibers by controlled hole collapse and tapering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(24): 3744-3747.

[11] YU R W, WANG C Y, BENABID F, *et al.* Robust mode matching between structurally dissimilar optical fiber waveguides [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(3): 857-863.

- [12] MEUNIER J P, HOSAIN S I. An efficient model for splice loss evaluation in single-mode graded-index fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(11): 1457-1463.
- [13] ISHIKURA A, KATO Y, OYANAGI T, *et al.* Loss factors analysis for single-mode fiber splicing without care axis alignment [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(4): 577-583.
- [14] YABLON A D, BISE R T. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 118-120.
- [15] SAITOH K, KOSHIBA M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(10): 1384-1386.

作者简介:



王晓玲(1972—),女,陕西合阳人,高级工程师,2007年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光纤陀螺及惯性导航系统相关工艺技术研究。
E-mail: wangxl824@126.com