

文章编号: 0258-7025(2009)09-2372-08

# 待熔光子晶体光纤中的热传导特性

付广伟<sup>1,2</sup> 毕卫红<sup>1,2</sup> 金娃<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 燕山大学光电子工程系, 河北 秦皇岛 066004;  
<sup>2</sup> 燕山大学河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 在光子晶体光纤(PCF)的熔接过程中,由于包层空气孔结构的存在,同在熔接过程中存在着潜在的空气孔形变,使得加热过程更为复杂。对待熔的光子晶体光纤的热传导特性进行了研究,以二氧化碳激光作为熔接热源,根据传热学及能量守恒定律建立三维对称的热传导模型,进而对光子晶体光纤熔接的瞬态传热过程进行仿真分析和实验研究。分析表明,该模型可以很好地确定影响光子晶体光纤熔接过程中热传导特性的各个主要因素,为最终确定最佳熔接条件建立理论基础。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 数学模型; 瞬态热传导; 最佳熔接条件

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2372

## Heat Transfer of Fusion Splicing Photonic Crystal Fiber

Fu Guangwei<sup>1,2</sup> Bi Weihong<sup>1,2</sup> Jin Wa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Optoelectronic Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>2</sup> The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** Heat transfer problem is very important in fusion splicing process of photonic crystal fibers (PCF) due to the potential distortion which can be introduced when exposing the structure to high temperature. Such heating is further complicated to internal air-structures of PCF. The heat transfer of fusion splicing PCF and theorize for confirming the optimal fusion splicing conditions are investigated. Based on heat transfer and conservation law of energy, a three-dimensional axisymmetric conductive heat transfer model is built using a CO<sub>2</sub> laser as heat source, the transient heat transfer in fusion splicing process of PCF is simulated in order to avoid collapsing the air holes. Experiments and analysis shows that the heat transfer model may find out heat transfer characteristic of PCF fusion splicing process, and provide theory basis for confirming optimal fusion splicing conditions.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fibers; mathematics model; transient heat transfer; optimal fusion splicing conditions

## 1 引言

光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)是一种新型光纤,也叫微结构光纤(Microstructure optical fiber, MPOFs)或多孔光纤(Holey Fibers)。自1996年问世以来,PCF引起了国内外学者的极大关注<sup>[1]</sup>。它与传统光纤的区别主要是其包层排列有周期性或随机性分布的波长量级的空气孔,也正

是由于这些空气孔的存在,使该种光纤具有很多传统光纤所没有的奇异特性,如散射<sup>[2]</sup>、高非线性<sup>[3]</sup>、高双折射性<sup>[4]</sup>、无尽单模特性和可控色散特性<sup>[5]</sup>等。在过去几年中,人们致力于研究它们的制备和性能,并逐渐将其应用于新颖的光纤设备及光纤传感中<sup>[6-8]</sup>。在未来几十年中,它的应用开发将成为国际光电子行业的热点。

收稿日期: 2008-12-12; 收到修改稿日期: 2009-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(60850001)资助课题。

作者简介: 付广伟(1974—),男,博士研究生,主要从事特种光纤及光纤传感等方面的研究。E-mail: fgw2001@163.com

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士生导师,主要从事特种光纤及光纤传感等方面的研究。

E-mail: bwhong@ysu.edu.cn(通信联系人)

要实现 PCF 的这些应用,需要将光进行有效的耦合,但是,由于空气孔的存在,使得 PCF 的熔接成为一个巨大的挑战,严重阻碍了它的应用。近几年,很多学者对 PCF 熔接进行了研究<sup>[9~21]</sup>,这些文章都是探索使用电弧或激光方法进行熔接,在特定条件下可以实现 PCF 的低损耗熔接,但他们的研究都没有对熔接过程中的热传导问题进行理论探索。也有一些学者对 PCF 的热传导特性进行了研究<sup>[22~25]</sup>,这些研究主要集中在 PCF 的制备过程中,为 PCF 的控制提供了理论基础,但对 PCF 熔接过程中的热传导问题也未见报道。

本文对待熔 PCF 的瞬态热传导问题进行初步的研究,建立了 PCF 的三维瞬态热传导数学模型,用此模型研究了待熔 PCF 的热传导特性,确定影响 PCF 熔接热传导特性的影响因素。

## 2 三维对称瞬态热传导数学模型

在 PCF 热传导特性研究中所采用的 PCF 的结构为:在固体纤芯周围分布有空气孔,图 1 为 PCF 的几何模型示意图。PCF 的外直径为  $100 \sim 200 \mu\text{m}$ ,空气孔以正六边形方式分布,通过改变空气孔直径和空气孔层数来改变几何模型的结构。

采用  $\text{CO}_2$  激光器进行熔接是基于以下几个原因:首先,二氧化硅光纤在波长  $10.6 \mu\text{m}$  处有很高的吸收率,因此,在清洁光纤和熔接两根光纤时, $\text{CO}_2$  激光器是一个理想的选择;其次,比较容易控制激光的形状和激光的能量;在熔接接点激光不会残留任何污染和残留物(不像电弧熔接),用很小的激光能量就能够有效地清理空气孔内的冷凝物,而且可以保证光纤预热时不会发生任何变形。

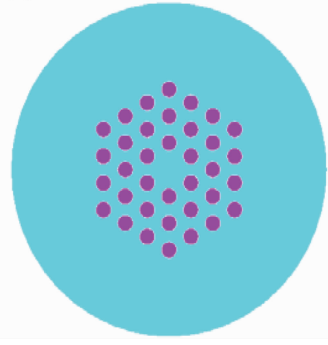


图 1 光子晶体光纤横截面的几何模型

Fig. 1 Schematic of the cross-section model geometry of PCF

PCF 的熔接示意图如图 2 所示,光纤的外径为  $R$ ,熔接能量的输出位置到光纤外径的距离为  $D$ ,为了使待熔光纤两侧受热情况一致,一定要保证  $D$  是相同的。根据传热学和能量守恒定律<sup>[22~26]</sup>,PCF 熔接过程的三维瞬态热传导数学模型可表示为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (1)$$

式中  $T$  为温度, $t$  为时间, $\rho$  为材料的密度, $c_p$  为材料的比热容, $k$  为材料的热导率。

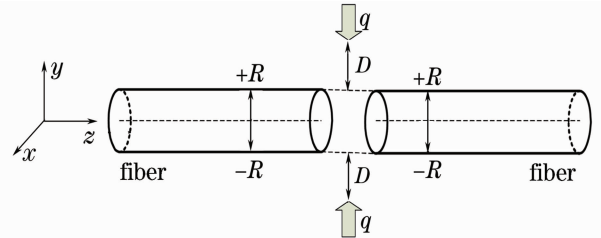


图 2 熔接 PCF 的示意图

Fig. 2 Schematic thermal picture of splicing PCF

边界条件为

$$\begin{cases} -k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q, & r = f(z), & 0 \leq z \leq 300 \mu\text{m}, & t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0, & r = f(z), & 300 \mu\text{m} \leq z \leq \infty, & t > 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0, & r = 0, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $z$  为光纤的轴向坐标, $\mathbf{n}$  为法向量, $q$  为热流密度, $r = f(z)$  表示沿  $z$  方向的光纤表面。

当  $r = f(z), 0 \leq z \leq 300 \mu\text{m}, t > 0$  时, $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q(z)$  表示在光纤表面施加热流  $q$ ;当  $r = f(z), 300 \mu\text{m} \leq z \leq \infty, t > 0$  时, $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$  表示此时在光纤

表面不施加热流;当  $r = 0, t > 0$  时, $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$  表示光纤内部不施加热流。

初始条件为

$$T = T_0 = 298 \text{ K}, t = 0, 0 \leq r \leq R. \quad (3)$$

在热传导方程中重点要考虑  $q(x, y, z)$ , 对于细长

结构热传导的一维条件代替三维条件的有效性在文献[27]中已经给出

$$\frac{d^2 c_p}{4k't} \ll 1 \quad (4)$$

式中  $d$  为光纤直径,  $k'$  为消光系数,  $t$  为时间。这个条件决定了光纤内部达到一致温度所需的时间。在

表 1 术语项

Table 1 Nomenclature term

Definition	Value
Specific heat of SiO <sub>2</sub> $c_{\text{SiO}_2} / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	1345
Specific heat of air $c_{\text{air}} / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	1010
Diameter of fiber $d / \mu\text{m}$	100~200
Radius of fiber $R / \mu\text{m}$	50~100
Intensity of CO <sub>2</sub> laser $I / (\text{W}/\text{m}^2)$	see Eq. (5)
Total output laser power $P_{\text{total}} / \text{W}$	0~10
Rate of heat generation from the laser on fiber per unit volume $q / (\text{W}/\text{m}^3)$	see Eq. (6)
Efficiency factor of absorption $Q_{\text{abs}}$	dimensionless, see Eq. (8)
Time $t / \text{s}$	
Temperature $T / \text{K}$	
Beam waist in the $x, y$ direction resp. $w_x, w_y / \mu\text{m}$	approximately 600
Energy absorption rate $W_{\text{abs}} / \text{W}$	see Eq. (7)
Density of fiber $\rho_{\text{SiO}_2} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2200
Density of air $\rho_{\text{air}} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	0.93
Thermal conductivity of fiber $k_{\text{SiO}_2} / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	2.68
Thermal conductivity of air $k_{\text{air}} / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.032

CO<sub>2</sub> 激光束的强度  $I(y, z)$  为近高斯分布(参数的定义如表 1 所示)

$$I(y, z) = \frac{2P_{\text{total}}}{\pi w_y w_z} \exp\left[-\left(\frac{2y^2}{w_y^2} + \frac{2z^2}{w_z^2}\right)\right], \quad (5)$$

由  $q(z)$  的定义<sup>[28]</sup> 可以得到

$$q(z) = \frac{\delta W_{\text{abs}}}{\pi R^2 \delta z}, \quad (6)$$

式中  $W_{\text{abs}}$  为能量的吸收率, 根据光的吸收和散射原理, 可得

$$\delta W_{\text{abs}} = Q_{\text{abs}} \delta z \int_{-R}^{+R} I(y) dy, \quad (7)$$

式中  $Q_{\text{abs}}$  为热量有效吸收系数, 它由光纤的折射率及直径决定

$$Q_{\text{abs}} = W_{\text{abs}} / GI, \quad (8)$$

式中  $G$  为垂直于激光束的光纤表面积。

将(5)式代入到(6)式, 可以得到

$$q(z) = \frac{Q_{\text{abs}} \sqrt{2} P_{\text{total}} \text{erf}\left[d / (\sqrt{2} w_y)\right]}{w_z \pi^{3/2} R^2} \exp\left(-\frac{2z^2}{w_z^2}\right). \quad (9)$$

此条件下, 对于光纤直径小于 200  $\mu\text{m}$ , 熔接时间大于 20 ms 时, 光纤横截面的温差小于 1%, 可以认为光纤的内外温度是一致的, 所以  $q(x, y, z)$  可以用一维分布  $q(z)$  代替, 这样只考虑热流沿光纤轴向方向的分布即可。

采用前面所述的几何模型及普通光纤进行仿真研究空气孔的效应, 在进行熔接时, 要使 PCF 熔接点达到熔接温度, 而又不造成空气孔的塌陷, 需要严格控制熔接能量和加热时间。本文通过对 PCF 进行网格划分进行了有限元仿真。网格划分采用自适应方式划分, 在面上生成三角形, 在三维空间则生成四面体; 边界条件采用纽曼边界条件, 即第二类边界条件; 初始条件在(3)式中给出。在计算中网格划分得越细, 计算结果的可信度也就越高, 也就越接近实际情况。受计算机配置的限制, 在研究中尽可能增加网格的划分精度, 使仿真结果能最大程度上与

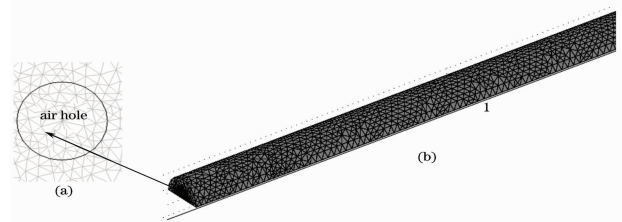


图 3 横截面网格图及内部空气孔的网格

Fig. 3 Schematic mesh picture of the cross-section and air hole of PCF

### 3 计算方法、结果和讨论

实际结果相一致,计算精度一般都能达到 0.001 K。图 3 为 PCF 进行网格划分后熔接点的横截面图及空气孔的网格图,图 3(a)为 PCF 空气孔网格划分图的放大图。

### 3.1 PCF 空气孔效应的分析

采用 SiO<sub>2</sub> 光子晶体光纤,其熔点为(1700±5) K,熔接 PCF 既要求熔接区域的温度能够达到熔点,又不能太高,造成空气孔的塌陷,而且为了得到熔接质量较好的 PCF 需要纤芯及包层同时达到熔点,由传热学理论可以知道,只要横截面包层与纤芯的温差小于 1%,就可以认为它们达到了统一的温度。另外,由于激光能量在光纤长度方向呈高斯曲线分布,所以必须对光纤进行三维仿真。为了减少计算量,同时避免由于边界尖锐造成的划分网格误差,对有限长光纤的 1/2 模型进行了三维仿真,研究 PCF 中空气孔的效应及熔接条件的控制。

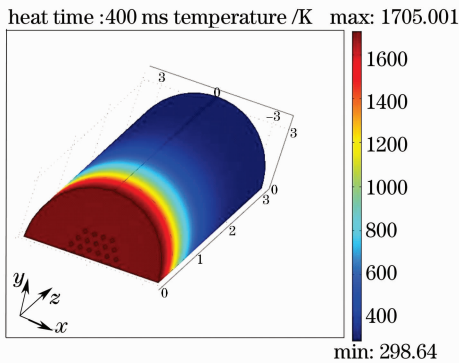


图 4 图 1 所示几何模型的热传导仿真结果  
Fig. 4 Simulated heat transfer results of Fig. 1

图 4 为图 1 所示几何模型的热传导仿真结果,光纤的长度为 3 mm,不同灰度代表光纤不同位置的温度分布。从图中可以看出,热量集中分布在加热区,在长度大于 1.5 mm 的区域,温度就已接近 298 K,而且在光纤横截面上沿光纤径向的温度分布几乎是相同的。图 5 为对图 4 的光纤表面沿 z 轴长度方向 0~3 mm 提取等间距 200 个点的温度值得到的长度方向的温度分布图。从图中可以看出:长度方向上的温度分布呈高斯分布,与能量分布相符。另外,可以看到光纤的末端为初始温度 298 K,由此可知 3 mm 长度不会影响光纤横截面的温度分布,不会影响仿真结果的正确性。

图 6 为图 1 所示几何模型达到熔接条件时的横截面等温线分布图,熔接时间为 400 ms,激光功率为 1.5 W。从图中可以看出,等温线是沿半径方向分布的,两等温线之间几乎为等距,只是在有空气孔

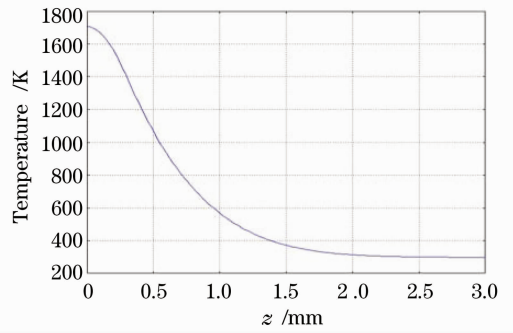


图 5 光纤长度方向的外表面温度分布图  
Fig. 5 Temperature profile as a function of length for PCF

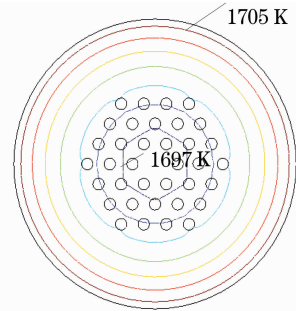


图 6 图 1 所示光纤横截面(等温线图等温线温差为 1 K)  
Fig. 6 Temperature contour plot for the cross-section of PCF at time 400 ms, contour lines every 1 K  
存在的地方会出现温度的变化。由此可以看出空气孔会影响温度分布,但并不会发生突变。光纤横截面的内外温差只有 8 K,小于 1%,且达到了二氧化硅的熔点,符合熔接条件。

图 7 为图 1 所示几何模型达到熔接条件的径向分布曲线,从图中可以看出空气孔的效应。空气孔内的温度分布几乎呈线性,且有较大的温度梯度,相对而言,空气孔间硅层的温度梯度非常小。这是因为空气的热传导率远远小于二氧化硅的热传导率,空气对于热量的传递起了一个阻碍作用。

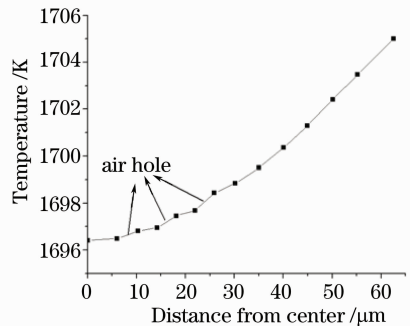


图 7 半径方向的温度分布曲线  
Fig. 7 Radial temperature curve at 300 ms  
为了进一步分析熔接过程空气孔热传导作用,对三种不同结构的 PCF 和普通光纤的加热过程进

行了仿真。为了获得明显的对比结果,采用了大激光功率和短加热时间,结果如图 8 所示。从图中可以看出,PCF 的外部温度均高于普通光纤,对于 PCF,空气孔半径越大即空气孔所占比例越大,PCF 外部温度越高,这主要也是由空气孔的阻碍作用造成的;在时间大于 1 ms 时,整个 PCF 的温度均高于普通光纤(温度升高比普通光纤快)。起初,人们认为空气的热传导率比较低,所以空气孔的存在会阻碍热量的向内传递,如图 7 分析。结果表明,虽然空气的热传导率比较低,但是空气的比热容及密度都比较小,相同的热量,空气升高的温度大于二氧化硅,造成含有较少二氧化硅的空气层温度整体大于普通光纤;另外,由于空气的热扩散率大于二氧化硅,造成了 PCF 内部有比预想更快的动态反应,而且空气孔的温度比二氧化硅更易趋于稳态,基于这个原因,可以认为空气孔的热传导处于一种伪稳态状态,因此空气孔内部的辐射热传导可以忽略。在加热时间小于等于 1 ms 时,孔径为 1.6  $\mu\text{m}$  的 PCF 的纤芯温度低于普通光纤,这个结果表明,存在空气分数较低的情况,其在加热过程中会出现这样一个过程,空气的热阻碍作用超过了较少的传热物质及空气热扩散率所造成的影响,引起光纤中心较缓慢的加热。

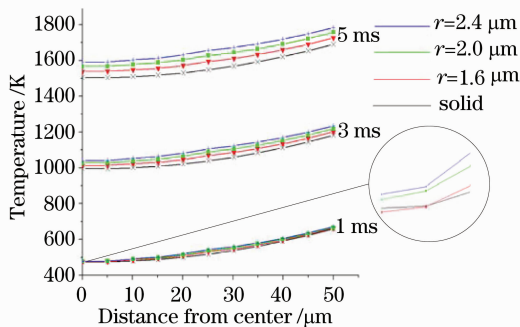


图 8 不同空气孔半径 PCF 和普通光纤在不同加热时间的温度对比曲线

Fig. 8 Temperature profiles at different heating times, comparison of the air-structured PCF

### 3.2 影响待熔 PCF 热传导特性因素的分析

为了分析影响待熔 PCF 热传导特性的因素,分别对 PCF 的孔间距、孔半径、层数、半径进行仿真研究,结果如图 9~13 所示。在所有的分析中,加热时间均为 400 ms,寻找当温度达到 1705 K 时所需的激光能量同上述影响因素的关系。

图 9 为不同结构 PCF 熔接能量随孔间距  $\Lambda$  的变化关系。从图中可以看出包层空气孔间距  $\Lambda$  对

熔接能量的影响几乎为零。

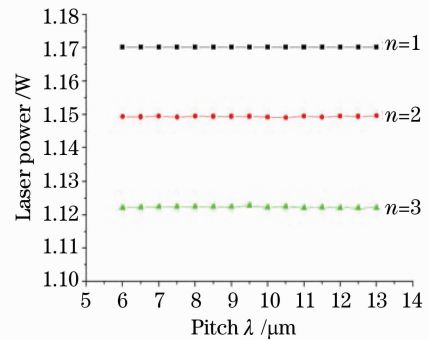


图 9 不同结构 PCF 熔接能量随孔间距  $\Lambda$  的变化关系

Fig. 9 Variation of fusion splicing energy as a function of pitch  $\Lambda$  at different rings  $n$

图 10 为 PCF 的半径  $R$  不变的情况下,熔接能量随空气孔半径的变化关系。从图中可以看出对于每种结构的 PCF,熔接能量随孔半径的增加而减小;从图中还可以看出熔接能量受层数的影响还是比较大的,随着层数的增加熔接能量随空气孔半径的变化趋势将逐渐增大,当层数增加到 5 层时,熔接能量的变化量将达到 0.4 W,因此下面给出光纤层数对熔接能量的影响情况。

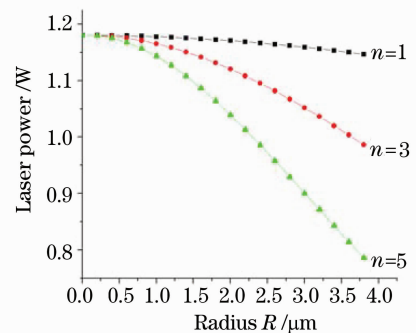


图 10 PCF 半径  $R$  不变的情况下,能量随空气孔半径的变化关系

Fig. 10 Variation of fusion splicing energy as a function of radius airhole at the same  $R$

图 11 为空气孔在 PCF 中所占比例相同的情况下,熔接能量随空气孔层数的变化关系。从图中可以看出熔接能量随空气孔层数的增加而减小。而在 K. Lyttikainen 的文章<sup>[19]</sup>中采用 3 层空气孔结构的 PCF,通过改变空气孔半径来研究 PCF 的热传导特性,他们并没有考虑空气孔层数和 PCF 半径对空气孔分数的影响。

图 12 为 PCF 的半径  $R$  不变的情况下,熔接能

量随空气孔层数的变化关系,从图中可以看出对于不同空气孔半径的 PCF,熔接能量随空气孔层数的增加而减小。

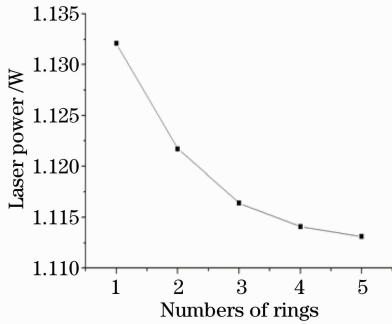


图 11 空气孔在 PCF 中所占比例相同的情况下熔接能量随空气孔层数的变化关系

Fig. 11 Variation of fusion splicing energy as a function of rings  $n$  at same air-hole proportion

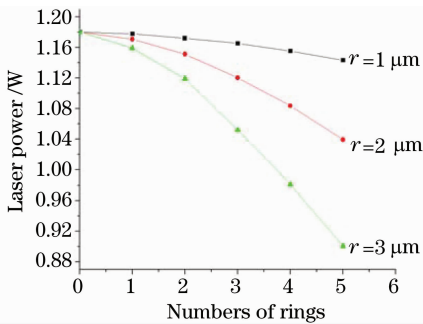


图 12 PCF 半径  $R$  不变的情况下熔接能量随空气孔层数的变化关系

Fig. 12 Variation of fusion splicing energy as a function of rings at the same  $R$

图 13 为熔接能量随 PCF 半径  $R$  的变化关系,从图中可以看出熔接能量随  $R$  的增加而线性增加,而且相对于空气孔半径和层数,它对熔接能量的影响较大,半径为  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ,当 PCF 外表面的温度达到  $1705 \text{ K}$  时,所需的激光能量将从  $1.1 \text{ W}$  增加到  $2.3 \text{ W}$ 。

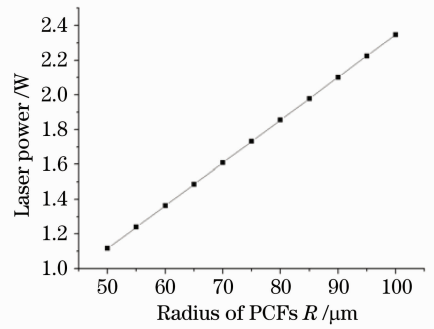


图 13 熔接能量随 PCF 半径  $R$  的变化关系

Fig. 13 Variation of fusion splicing energy as a function of  $R$

### 4 实验分析

为了验证仿真研究的正确性,采用图 12 中  $n=3, r$  分别为  $1.0 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}, 3.0 \mu\text{m}$  时的理论能量值,对三种结构的 PCF (空气孔层数均为 3 层,空气孔半径分别为  $1.0 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}, 3.0 \mu\text{m}$ ) 进行加热实验,加热时间均为  $400 \text{ ms}$ ,每种 PCF 进行 10 次实验测量取平均值。实验装置示意图如图 14 所示。实验中采用最大功率为  $20 \text{ W}$  的二氧化碳激光器,首先用 ZnSe 透镜 1(焦距为  $150 \text{ mm}$ )将激光耦合到  $1 \times 2$  光纤耦合器的空芯传能光纤 1 中,空芯传能光纤 2 和 3 的长度都是  $1 \text{ m}$ ;当光源输出功率调到  $10 \text{ W}$  时,经耦合器分光后,得到两个能量相等激光束,,输出功率分别为  $4.01 \text{ W}$  和  $4.02 \text{ W}$ ;传能光纤输出的激光束分别经规格相同的 ZnSe 透镜 2 和 3(焦距均为  $40 \text{ mm}$ )会聚到 PCF 表面进行加热实验,这里透镜 2 和 3 主要作用是调整会聚到 PCF 表面激光束的大小;激光束大小的调整通过控制系统和步进电机控制透镜 2 和 3 在  $y$  方向上移动实现。实验中激光束的大小均控制在  $500 \sim 600 \mu\text{m}$  之间。实验中的温度使用德国欧普士 IR Plus2000 红外测温仪进行测量,测温仪可测量范围为  $873 \sim 2273 \text{ K}$ ,精度为  $\pm 0.5\%$ ,重复精度为  $\pm 0.25\%$ 。由于实验中

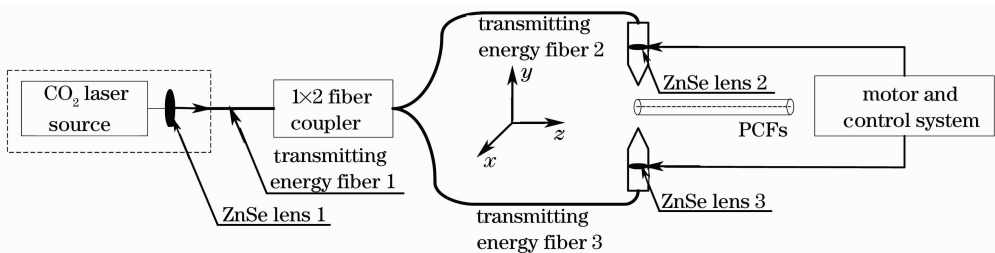


图 14 PCF 加热实验装置

Fig. 14 Heating experimental device of PCF

加热时间是毫秒级的,所以在温度测量中不能使用人工控制测温仪,实验中使用自制一个简单的自动控制系统控制测温仪的起始时间,使测量误差达到最小。实验结果如图 15 所示。

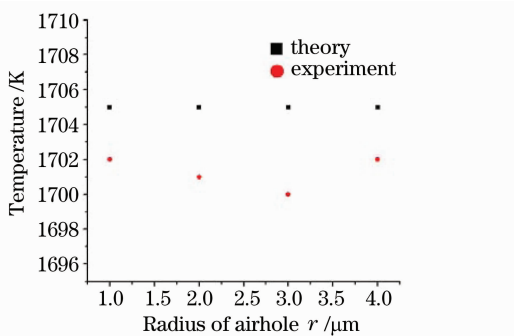


图 15 理论结果和实验结果的对比

Fig. 15 Comparison of theory results with experiment results

从实验结果可以看出理论值和实验值基本符合,最大误差为 5 K,不会影响熔接结果。造成实验结果和理论值的误差主要有以下原因:1)理论计算的量值和实际激光输出功率的误差,原因是实验中使用的激光器输出功率只能控制在 0.01 W;2)红外测温仪的测量精度和测量时间的影响;3)理论计算时激光束的大小同实际激光束的大小存在着微小偏差;4)有限元计算时,网格的划分精度达不到实际光纤的精度,因此热传导会存在偏差。

## 5 结 论

利用热传导理论和粒子的吸收及散射理论建立 PCF 结构参数的热传导模型,利用此模型对含有正六边形空气孔的对称结构的 PCF 和普通光纤进行热传导特性仿真研究,得到了熔接时各种光纤的温度分布图,通过对比得到了空气孔在加热过程中的热传导效应。空气孔有两个作用:一是阻碍作用,二是空气的热扩散率比较大,使得在空气分数不是很低的情况下,PCF 纤芯有比预想更快的动态反应。进而利用此模型研究了正六边形 PCF 熔接过程中结构参数对热传导特性的影响,利用此研究结果可以计算出 PCF 熔接时所需的能量。同时此模型也可以用来研究其他结构的 PCF 在熔接过程中的热传导特性。

## 参 考 文 献

1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549

2 A. Ferrando, E. Silvestre, P. Andres. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 687~697

3 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66  
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66

4 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562  
龚桃荣,延凤平,王琳等. 高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562

5 Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibres [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(11): 2811~2817  
李曙光,刘晓东,侯蓝田. 光子晶体光纤的导波模式与色散特性[J]. *物理学报*, 2003, **52**(11): 2811~2817

6 Wang Qinyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606  
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606

7 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258  
邓洪有,饶云江,冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258

8 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjian *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20  
段德稳,朱涛,饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小形变本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20

9 J. T. Lizier, G. E. Town. Splice losses in holey optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8): 794~796

10 Y. L. Hoo, W. Jin, J. Ju *et al.*. Loss analysis of single-mode fiber/photonic-crystal fiber splice[J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2004, **40**(5): 378~380

11 K. Nakajima, K. Hogari, J. Zhou *et al.*. Hole-assisted fiber design for small bending and splice losses[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1737~1739

12 O. Frazao, J. P. Carvalho, H. M. Salgado. Low-loss splice in a microstructured fibre using a conventional fusion splicer [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2005, **46**(2): 172~174

13 B. Bourliaguet, C. Paré, F. émond *et al.*. Microstructured fiber splicing[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25): 3412~3417

14 B. H. Park, J. Kim, U. C. Paek *et al.*. The optimum fusion splicing conditions for a large mode area photonic crystal fiber[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2005, **E88**-C(5): 883~888

15 J. H. Chong, M. K. Rao, Y. Zhu *et al.*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO<sub>2</sub> laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 942~944

16 J. H. Chong, M. K. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1365~1370

17 A. D. Yablon R. T. Bise. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 118~120

18 T. P. Hansen, J. Broeng, C. Jakobsen *et al.*. Air-guiding photonic bandgap fibers: Spectral properties, macrobending loss, and practical handling[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 11~15

- 19 F. Benabid, F. Couny, J. C. Knight *et al.*. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, **434**(7032): 488~491
- 20 R. Thapa, K. Knabe, K. L. Corwin *et al.*. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9576~9583
- 21 L. M. Xiao, W. Jin, M. S. Demokan. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(2): 115~117
- 22 K. Lyytikainen, J. Zagari, G. Barton *et al.*. Heat transfer within a microstructured polymer optical fibre perform [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, **12**: S255~S265
- 23 Francisco R. Villatoro, Pablo Udias de la Mora. Numerical analysis of the heat transfer within photonic crystal fibre performs [C]. *SPIE*, 2005, **5840**: 397~408
- 24 S. C. Xue, L. Poladian, G. W. Barton *et al.*. Radiative heat transfer in preforms for microstructured optical fibres [J]. *J. Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**: 1569~1576
- 25 S. C. Xue, R. Lwin, G. W. Barton *et al.*. Transient heating of PMMA preforms for microstructured optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(5): 1177~1183
- 26 A. M. Bianchi, Y. Fautrelle, J. Etay. Transferts Thermiques [M]. Wang Xiaodong transl., Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008. 1~113  
安娜-玛丽娅·比安什, 伊夫·福泰勒, 雅克琳娜·埃黛., 传热学 [M]. 王晓东译 大连:大连理工大学出版社, 2008. 1~113
- 27 G. E. Myers. Analytical Methods in Conduction Heat Transfer [M]. New York: McGraw Hill, Inc., 1971. 1~29
- 28 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983. 57~180