

文章编号: 0258-7025(2009)11-2966-06

# 光子晶体光纤熔接过程中的空气孔力学特性

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> 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(PCFs)的熔接过程中,熔接能量和加热时间的控制是避免空气孔塌陷的关键所在。应用经典力学理论,提出了一种光子晶体光纤熔接过程中力学特性的数学模型,对熔接过程中光子晶体光纤空气孔的畸变情况及畸变对光纤模场分布变化引起的熔接损耗进行了分析。分析结果表明,通过控制熔接能量和熔接时间可以控制光子晶体光纤空气孔的畸变情况。根据理论分析结果,进行熔接实验,分析空气孔畸变引起的损耗情况。实验结果与理论值有很好的—致性。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 空气孔畸变; 表面张力; 力学特性

**中图分类号** TN929.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL20093611.2966

## Mechanics Characteristic of Air-Hole in Fusion Splicing Process for 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> Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** The control of fusion splicing energy and heating time is a key to avoid air-hole shrinkage in fusion splicing process for photonic crystal fibers (PCFs). A mathematic model of mechanics characteristic in fusion splicing process for PCFs is developed from classical mechanics theory. Furthermore, the distortion of air-hole and fusion splicing loss are analyzed. Experiments and analysis show that distortion of air-hole may be controlled by adjusting fusion splicing energy and heating time. According to theory analysis results, fusion splicing experiment is carried out. The experiment result shows a good consistency with the analyses result.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fibers; air-hole distortion; surface tension; mechanics characteristic

### 1 引 言

光子晶体光纤(PCFs)是一种新型光纤,也叫微结构光纤(MPOFs)或多孔光纤(holey fibers)。自1996年间世以来,PCFs引起了国内外学者的极大关注<sup>[1]</sup>。关于PCFs每年有数百篇文献进行报道,并且这个数量还在不断增加,这显示出PCFs的重要作用和良好的发展前景。在过去几年中,人们致力于研究它们的制备和性能<sup>[2~4]</sup>,并逐渐将其应用于新颖的光纤设备及光纤传感中<sup>[5~8]</sup>。要实现PCFs的这些应用,需要将光进行有效地耦合,但

是,由于空气孔的存在,使得PCFs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PCFs熔接进行了研究<sup>[9~13]</sup>,这些文章都是在特定条件下可以实现PCFs的熔接,但并没有对熔接过程中的空气孔畸变问题进行理论探索。

本课题组已经对熔接中PCFs的热传导特性进行了理论研究,得出了不同光纤达到熔接状态所需的激光能量和加热时间,并给出了定性的分析,定量计算及相关结论。本文在分析PCFs热传导特性的基础上,采用牛顿经典力学理论对熔接过程中的

收稿日期: 2008-12-12; 收到修改稿日期: 2009-01-20

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,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)

PCFs 进行了受力分析,得到了熔接后空气孔的变形情况。通过分析空气孔的变形情况和热传导特性,可以得到最佳的熔接能量和加热时间。

## 2 理论模型

由于熔接过程中 PCFs 中的空气孔存在潜在的变形,因此重点对熔接中的 PCFs 进行力学分析。PCFs 横截面受力分析如图 1 所示。PCFs 的结构为:在固体纤芯周围分布有三层空气孔,PCFs 的外直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,36 个空气孔以正六边形方式分布,空气孔的直径  $d$  为  $4\ \mu\text{m}$ ,孔间距为  $8\ \mu\text{m}$ 。

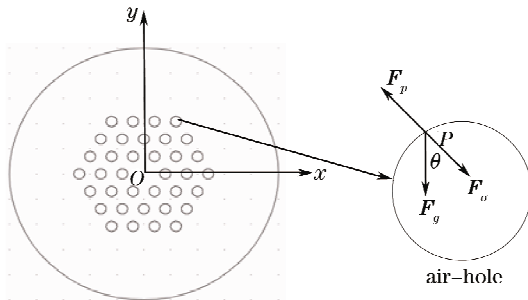


图 1 PCFs 横截面受力分析图

Fig. 1 Schematic mechanic picture for cross section of PCFs

在图 1 中,任取一空气孔上的任意一点  $P$  作受力分析, $P$  点受毛细孔内外压强差所产生的压力  $F_p$ ,PCFs 的表面张力  $F_s$ ,重力  $F_g$  以及温度升高产生的热应力  $F_t$  的共同作用

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_t, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{F}$  为  $P$  点所受到的合力。

根据 ANSYS11.0 对 PCF-1550-7 的热应力模拟在温度达到  $1700\sim 2500\ \text{K}$  左右时,光纤产生的热应力很小,由热应力造成的空气孔的畸变约在  $10^{-6}\ \mu\text{m}$  量级,可以忽略。

在熔接过程中,待熔 PCFs 的空气孔与外部大气相通,内压强处处相等,  $F_p = 0$ 。在熔接过程中,光纤主要受到重力  $F_g$  和表面张力  $F_s$  的作用,则

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_g. \quad (2)$$

将  $P$  点看作一个小体元,把  $P$  点所受的力进行分解

$$F_x = \sigma \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) r \sin \theta dz d\varphi, \quad (3)$$

$$F_y = \left[ \rho g (R - y) + \sigma \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) \cos \theta \right] r dz d\varphi, \quad (4)$$

式中  $\sigma$  为表面张力系数, $\rho$  为二氧化硅的密度, $R$  为光纤半径, $r$  为孔半径, $g$  为重力加速度。

由经典力学原理得到  $P$  点在  $x$  方向和  $y$  方向的变形距离  $S_x, S_y$  分别为

$$\frac{\partial^2 S_x}{\partial t^2} = \frac{F_x}{\eta m}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 S_y}{\partial t^2} = \frac{F_y}{\eta m}, \quad (6)$$

式中  $\eta$  为二氧化硅光纤的粘性系数, $m$  为质量。

再根据畸变的初始条件:

$$S_x = 0, S_y = 0, \quad t = 0 \quad (7)$$

得到 PCFs 内孔的变形距离为

$$S = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\eta m} t^2, \quad (8)$$

式中  $t$  为熔接时间。

由 Eyring 分子动力理论<sup>[14]</sup>可知

$$\eta = \frac{h \rho N_A}{M} \exp\left(-\frac{E_0}{R'T}\right), \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{0.3}{N_A^{1/3}} \left(\frac{\rho}{M}\right)^{2/3}, \quad (10)$$

式中  $M$  为二氧化硅玻璃的分子量, $h$  为普朗克常数, $N_A$  为阿弗加德罗常数, $R'$  为摩尔气体常数, $E_0$  为二氧化硅玻璃的活化能, $T$  为温度,在熔接过程中是时间的函数。

由于每个空气孔所处的位置不同,使得每个空气孔边界上的每个点所受到的重力影响不同,同一个空气孔每个点的表面张力的方向也不相同。用有限元法将光纤分为很多个小体元,通过力学仿真得到了空气孔的变形,通过改变划分的网格的数量可以控制计算的精度。

## 3 数值及仿真结果

为了研究 PCFs 熔接过程中空气孔的畸变情况,将建立好 PCFs 的力学模型进行有限元仿真。采用的 PCFs 几何模型如图 1 所示,取两组不同参数进行研究。PCF-1550-7:PCFs 的外直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,空气孔的直径  $d$  为  $1.32\ \mu\text{m}$ ,孔间距为  $3\ \mu\text{m}$ ,空气孔层数为 7 层;PCF-1550-3:PCFs 的外直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,空气孔的直径  $d$  为  $4\ \mu\text{m}$ ,孔间距为  $8\ \mu\text{m}$ ,空气孔层数为 3 层。材料均采用石英材料。

PCFs 和传统单模光纤 (SMFs) 间熔接损耗的理论估算公式在参考文献[15]中已经给出,在理论计算中采用有限元分析的方法只计算 PCFs 由于空气孔畸变引起的模场失配损耗,认为待熔的光纤是完全对准的。熔接损耗的实验测量采用以下的方式:首先用  $1550\ \text{nm}$  的激光光源输入到一定长度的 SMFs,用光功率计测量此时的光功率;然后将被熔的 PCFs 与这段 SMFs 进行熔接,并测量此时 PCFs

另一端的输出光功率;接下来在相同的熔接条件下将 PCFs 的另一端与另一段 SMFs 进行熔接(此段 SMFs 的长度一定要与第一段 SMFs 的长度相同),并测量此时的输出光功率;最后利用各测量光功率之间的关系计算出第二个熔接点的熔接损耗。此测量系统的测量精度可以精确到 0.01 dB,要比参考文献[16]中的测量精度高。

图 2 为 PCF-1550-7 在熔接能量为 1.39 W,加热时间分别为 500,560,590 和 620 ms 时空气孔畸变的仿真结果,黑色表示畸变前的空气孔的位置和大小,白色表示畸变后的空气孔位置和大小。从图

2 中可以看出,在 1.39 W 熔接能量的作用下,对于此几何模型温度达到 1705 K 的加热时间为 480 ms,在加热时间为 500 ms 时,空气孔的畸变仍然很小,但随着加热时间的不断增加空气孔的畸变将不断增大,并且空气孔的圆心将沿着径向向纤芯收缩,而且每层不同空气孔向纤芯方向收缩的位移几乎是相同的,空气孔仍然保持着正六边形的排列;在加热时间增加到 620 ms 时,空气孔已完全塌陷,此时被熔光纤的温度达到 2400 K 左右,接近二氧化硅材料的气化点。同参考文献[6]中图 2 进行比较,发现空气孔的畸变趋势很相似。

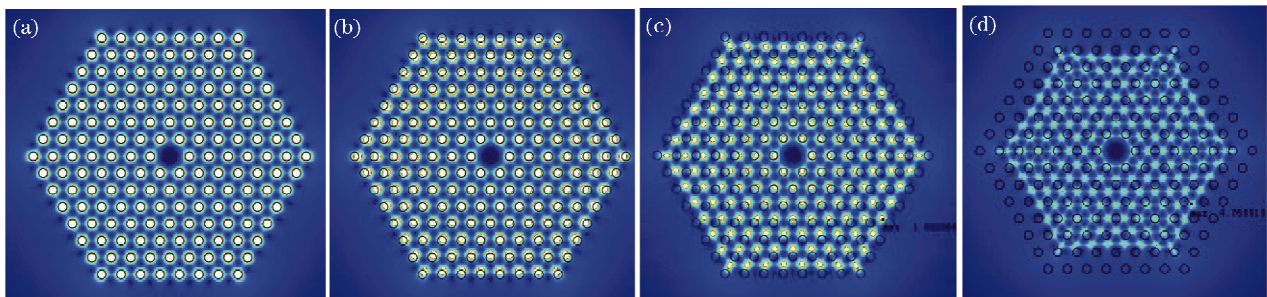


图 2 熔接能量为 1.39 W,加热时间分别为 500 ms(a),560 ms(b),590 ms(c),620 ms(d)时 PCF-1550-7 的空气孔畸变仿真结果

Fig. 2 Distortion results of air-hole for PCF-1550-7 with fusion splicing energy 1.39 W and heating time 500 ms(a), 560 ms(b), 590 ms(c), 620 ms(d) respectively

图 3 为 PCF-1550-7 在不同熔接能量情况下,空气孔畸变随加热时间变化的仿真结果。图中 1.39 W 的曲线为图 2 在不同加热时间下的空气孔畸变情况。由图 3 中可见在不同的加热能量作用下,空气孔产生畸变的加热时间是不同的,在未发生畸变或畸变较小时光纤的温度均在 1705 K 以下;随着加热能量的增加,空气孔畸变的梯度将不断减小,

根据此现象可以选择一组较小熔接能量和较长加热时间进行熔接,但是较长的加热时间又会造成热量在熔接过程中过多地沿光纤轴向传递,因此熔接时要选择一组较小的熔接能量或较短的熔接时间为熔接条件。

选用外径为 125  $\mu\text{m}$ ,模场半径为 5.2  $\mu\text{m}$  的 SMFs 同 PCF-1550-7 进行熔接损耗的数值计算,计算中忽略对准偏差引起的损耗。图 4 为 PCF-1550-7 在熔接能量为 1.39 W 时,熔接损耗和空气孔畸变随熔接时间的变化关系,菱形为空气孔畸变随熔接时间的变化关系,三角形为空气孔畸变引起的熔接损耗的理论值随熔接时间的变化关系,方形为熔接损耗的实验值,熔接实验中加热时间分别为 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 575, 585, 595 和 605 ms。从图中可见,对于熔接时间小于 500 ms 时,由空气孔畸变引起的熔接损耗很小,但实际熔接损耗却很大,这种现象可能是由于模场失配损耗和变迁损耗造成的<sup>[17]</sup>。随着加热时间的增加,PCFs 空气孔的畸变将迅速增加,其模场分布引起的熔接损耗也随之迅速减小,造成这种现象的原因有二:1) 由于空气孔的畸变致使 PCFs 的模场分布逐渐同

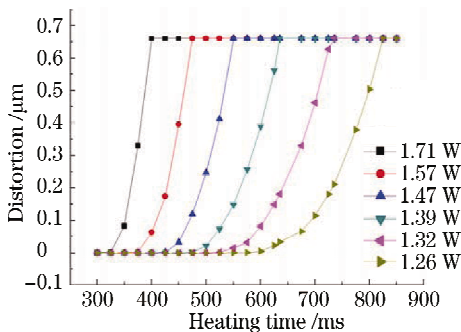


图 3 PCF-1550-7 在不同熔接能量下,空气孔畸变随加热时间的仿真结果

Fig. 3 Distortion results of air-hole for PCF-1550-7 as a function of heating time  $t$  at different fusion splicing energy

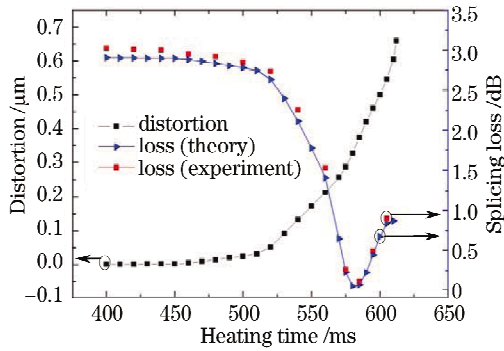


图 4 PCF-1550-7 在熔接能量为 1.39 W 时,熔接损耗和空气孔畸变随熔接时间的变化关系

Fig. 4 Relation of fusion splicing loss and air-hole distortion for PCF-1550-7 as a function of heating time with fusion splicing energy 1.39 W SMFs 的模场分布达到一致;2)随着加热时间的增加,熔接热量将沿着 PCFs 的轴向传递增加,致使变

迁损耗减小<sup>[17]</sup>。在熔接时间大约为 575 ms 时达到最小,此时 PCFs 和 SMFs 的模场分布是一致的,而且熔接的变迁长度也达到一个较理想的长度。随后熔接损耗又将增加,这是由模场失配损耗和变迁损耗引起的。

为了验证此力学模型计算 PCFs 熔接过程中空气孔畸变情况的准确性,选用上面相同的普通单模光纤同 PCF-1550-3 进行熔接实验。首先进行仿真研究,得出 PCFs 在不同熔接能量作用下,空气孔畸变随加热时间的变化关系,选择一个较好的熔接能量,并计算此处熔接能量作用下空气孔畸变引起的熔接损耗理论值。用此熔接能量进行熔接实验,熔接时间分别为 400,420,440,460,480,500,520,540,560,580 和 600 ms,分别测量其熔接损耗。图 5 为在熔接能量为 1.25 W,加热时间分别为 400,500,560 和 610 ms 时 PCFs 的空气孔畸变仿真结果。

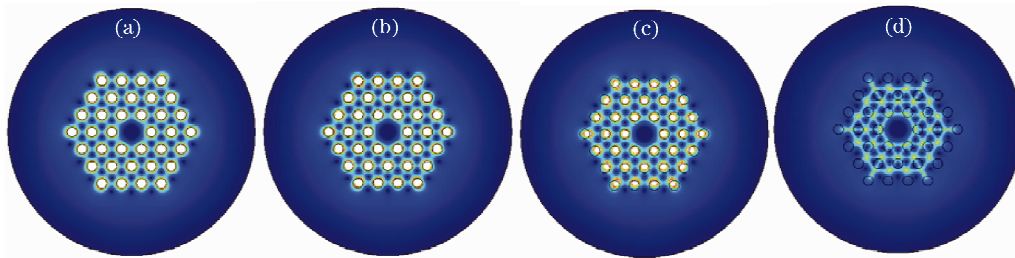


图 5 在熔接能量为 1.25 W,加热时间分别为 400 ms(a),500 ms(b),560 ms(c),610 ms(d)时 PCF-1550-3 的空气孔畸变的仿真结果

Fig. 5 Distortion results of air-hole for PCF-1550-3 with fusion splicing energy 1.25 W and heating time 400 ms(a), 500 ms(b), 560 ms(c), 610 ms(d) respectively

图 6 为 PCF-1550-3 在不同熔接能量情况下,空气孔畸变随加热时间变化的仿真结果。图中 1.25 W 的曲线为图 5 在不同加热时间下的空气孔畸变情况。此结果与图 3 的结果比较可以发现,在

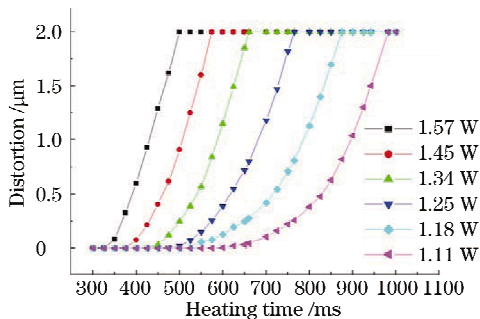


图 6 PCF-1550-3 在不同熔接能量作用下,空气孔畸变随加热时间的仿真结果

Fig. 6 Distortion results of air-hole for PCF-1550-3 as a function of heating time with different fusion splicing energy

不同的加热能量作用下,空气孔产生畸变随加热时间的变化趋势几乎是相同的,都有一段畸变较小可控加热时间;对于每个加热能量,PCF-1550-3 的空气孔畸变速度要比 PCF-1550-7 的缓慢,也就是变化梯度较小。这种现象的原因可能有 3 点:1)PCFs 层数的影响;2)重力的影响;3)表面张力的影响。

图 7 为 PCF-1550-7 在只有重力作用下,加热能量为 1.39 W,加热时间分别为 550 ms 和 620 ms 时空气孔的畸变情况。为了更明显说明重力的影响,将仿真结果图放大,图 7 中(a)的结果只是部分空气孔的畸变情况,此时空气孔的畸变和位移都非常小;图 7 中(b)的加热时间是 620 ms,此时空气孔已经完全塌陷,结果在图 2 的(d)中已经给出,但只在重力的作用下,空气孔的畸变最大也只能达到  $10^{-5}$  μm 量级,由此可以看出重力对空气孔畸变的影响非常小。由于重力对空气孔的畸变影响非常小,在力学分析范围内 PCFs 空气孔层数的变化只

是影响了光纤的重量,因此空气孔层数对空气孔畸变的影响也是非常小的,通过3层和7层结构的对比研究层数对空气孔畸变的影响最大也只能达到 $10^{-6}$   $\mu\text{m}$ 量级。综合图2,5,7的结果可以得出结

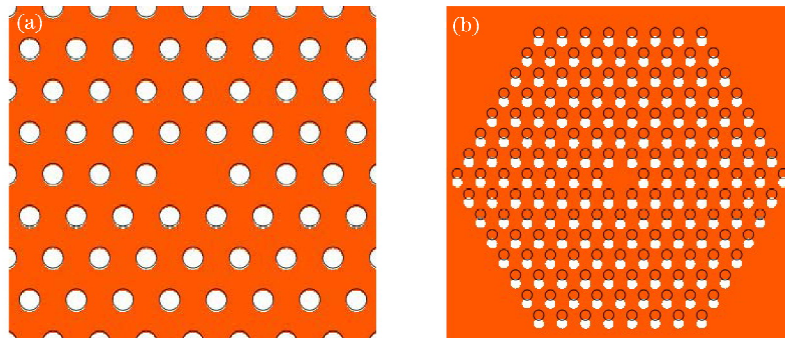


图7 PCF-1550-7空气孔在重力作用下,加热时间分别为550 ms(a)和620 ms(b)时空气孔畸变情况

Fig. 7 Distortion results of air-hole for PCF-1550-7 with heating time 550 ms (a) and 620 ms (b) affected by gravity

图8为空气孔畸变和熔接损耗随熔接时间的变化关系,菱形为空气孔畸变随熔接时间的变化关系,三角形为空气孔畸变引起的熔接损耗的理论值随熔接时间的变化关系,方形为熔接损耗的实验值。由于实验中使用的光纤模场分布非常接近,因此模场失配引起的损耗非常小。从图中可见当熔接时间大于550 ms时,空气孔的畸变开始急剧增加,熔接损耗也随之急剧增加,在这里熔接损耗的理论值忽略了对准偏差引起的损耗。从图中还可见实验值和理论值有很好的—致性,只要把熔接时间控制在400~460 ms之间,就可以严格控制熔接过程空气孔的畸变,空气孔畸变引起的熔接损耗可以忽略不计。

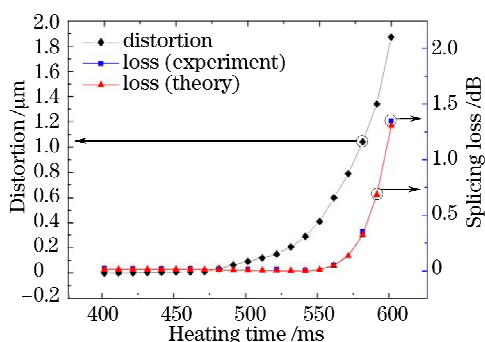


图8 PCF-1550-3的空气孔畸变和熔接损耗随熔接时间的变化关系

Fig. 8 Relation of fusion splicing loss and air-hole distortion as a function of heating time for PCF-1550-3

由图4和图8对比可见,熔接损耗的理论值和实验值存在一定偏差,这主要是由于在理论计算时忽略对准偏差对熔接损耗的影响,只有模场匹配情况对熔接损耗的影响;而实验值引入了对准偏差和测量系统对熔接损耗的影响。

论:在熔接过程中影响空气孔畸变的因素只有空气孔的表面张力,由于重力的影响非常小,所以才出现图5和图7的现象,各层空气孔的中心位置都沿径向向里收缩,基本上保持了畸变前的排列情况。

## 4 结 论

利用材料力学性质和热传导理论建立了PCFs结构参数与熔接参数的相互关系,在已知PCFs结构参数的前提下,利用该理论可以计算出PCFs熔接过程中空气孔的畸变情况,进而可以确定一组较好的熔接能量和熔接时间,从而控制熔接过程空气孔的畸变。理论研究结果表明主要影响空气孔畸变的因素只有空气孔的表面张力,重力和空气孔层数对畸变的最大影响也只是 $10^{-5}$   $\mu\text{m}$ 量级的。熔接实验结果同理论研究具有很好的一致性,对于模场匹配的PCFs和SMFs的熔接通过严格避免PCFs空气孔的塌陷,可以得到较好的低损耗熔接;对于小纤芯的PCFs和SMFs的熔接通过严格控制PCFs空气孔的塌陷程度也可以实现低损耗熔接。同时此理论也可以用来计算其他结构的PCFs在熔接过程中的空气孔畸变情况。

## 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 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
- 3 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
- 4 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539~542

- 吴 铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 539~542
- 5 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on dispersion compensation of 10 Gb/s clock signal using photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1221~1224
- 杨广强, 张 霞, 任晓敏等. 利用光子晶体光纤实现 10 Gb/s 光传输系统的色散补偿[J]. 中国激光, 2005, **32**(9): 1221~1224
- 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型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 17~20
- 9 Limin Xiao, Wei Jin, M. S. Demokan *et al.*. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 9014~9022
- 10 Zhang Wei, Zhang Lei, Chen Shi *et al.*. Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1389~1392
- 张 巍, 张 磊, 陈 实等. 高非线性光子晶体光纤与单模光纤低损耗熔接实验[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1389~1392
- 11 Limin Xiao, Wei 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
- 12 J. T. Lizier, G. E. Town. Splice losses in holey optical fibers [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2001, **13**(8): 794~796
- 13 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
- 14 Zhou Guiyao, Hou Zhiyun, Li Shuguang *et al.*. Analysis of the shrinkage in size of air hole s in different sections during the fabrication of micro structured fibre [J]. *Acta Physic Sinica*, 2007, **56**(11): 6486~6489
- 周桂耀, 侯峙云, 李曙光等. 微结构光纤制备过程中不同位置空气孔的畸变量分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(11): 6486~6489
- 15 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 806~811
- 方 宏, 娄淑琴, 任国斌等. 光子晶体光纤接续损耗的理论分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 806~811
- 16 B. Bourliaguet, C. Paré, F. émond *et al.*. Microstructured fiber splicing [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25): 3412~3417
- 17 K. Shiraiishi, Y. Aizawa, S. Kawakami. Beam expanding fiber using thermal diffusion of the dopant [J]. *J. Lightw. Technol.*, 1990, **8**(8): 1151~1161