

光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案

郭铁英^{1, 2} 娄淑琴^{1, 2} 李宏雷^{1, 2} 姚磊^{1, 2} 简水生^{1, 2}

(¹ 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; ² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 提出了一种利用传统电弧熔接机实现光子晶体光纤(PCF)与单模光纤(SMF)低损耗熔接的新方案。方案结合实验测量与理论计算,首先通过改变熔接时间、熔接电流等参量,考察了不同熔接功率对 PCF 端面气孔结构的影响。由此计算了 PCF 端面模场分布的相应变化,并根据两光纤端面模场的重叠积分计算了相应的熔接损耗,从而确定出对应低熔接损耗的熔接功率区间。综合考虑熔接强度等要求,反向选取了合理的熔接参量范围,实现了 PCF-SMF 之间低损耗、高强度的熔接。提出的熔接方案使熔接过程中 PCF 包层气孔的收缩变化、该变化对两光纤接合匹配度的影响等问题清晰化,克服了以往 PCF-SMF 熔接中难以设定合理熔接参量的问题,有效地提高了熔接效率和熔接质量。

关键词 光子晶体光纤; 电弧熔接; 熔接参量; 气孔结构; 低熔接损耗

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0511

Low Loss Arc Fusion Splice of Photonic Crystal Fibers

Guo Tieying^{1,2} Lou Shuqin^{1,2} Li Honglei^{1,2} Yao Lei^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

¹ Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A fusion scheme is proposed for achieving low-loss splice between photonic crystal fiber (PCF) and single-mode fiber(SMF) using conventional arc fusion splicer. Experimental measurements and theoretical calculations are both involved in this scheme. Firstly, how PCF's air-hole structures varied along with the applied fusion power was observed by changing fusion parameters, such as fusion time and current. Then the mode distributions at the fiber tips and the corresponding splice loss between the two fibers were calculated, and the fusion power range for low splice loss was thus deduced. In return, the optimal sets of fusion splice parameters were determined and low-loss high-strength splicing between the PCF and SMF was achieved. The uncertainties, like the extent of hole contraction of the PCF and its effect on the matching between the two fibers are cleared up in this scheme. Also, the fusion efficiency and quality are both improved owing to the scheme's effectivity in determining an optimized set of fusion parameters for splicing PCF to SMF.

Key words photonic crystal fiber; arc fusion splicing; fusion parameters; hole structure; low splice loss

1 引言

光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)自 1996 年问世^[1]以来,以其独特的性质和设计自由度^[2~5],成为光纤研究领域中的一个新亮点,有效地

拓展了光纤的研究方向和应用范畴。目前已在光通信、非线性光纤光学,高性能光纤器件以及传感等众多领域获得了广泛的应用^[6~12]。然而 PCF 独特的“气孔-石英”结构,在赋予其奇异特性的同时,也增

收稿日期: 2008-04-07; **收到修改稿日期**: 2008-06-30

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z258)资助课题。

作者简介: 郭铁英(1981-),女,博士研究生,主要从事光纤通信、光子晶体光纤和光器件等方面的研究。

E-mail: enmien_g@yahoo.com.cn

导师简介: 简水生(1929-),男,中科院院士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件和光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

加了与其它光纤或器件接续的难度。针对光子晶体光纤与传统单模光纤(SMF)、以及不同光子晶体光纤之间的接续难题,很多研究机构纷纷提出解决方案,包括利用熔接机、CO₂ 激光器^[13~15]、梯度折射率透镜(graded-index, GRIN)^[16]或者引入中介光纤(intermediate fiber)^[17]等进行直接或间接的接合,这些方案均存在一些问题,或成本过高,或系统复杂,又或限定了光纤结构等。本文根据实验室现有的电弧熔接机,提出了一种有广泛应用范围的、简单易行的熔接方案。

对于传统的实心光纤,模场失配损耗[由初始结构决定,等效于两光纤端面对接(butt-coupled)时的损耗]是两光纤熔接损耗的理论极小值。而对于光

子晶体光纤的熔接则不然。PCF 内部包含大量气孔,其热特性与实心光纤有很大差别,其气孔结构在熔接过程中是不断变化的,这也意味着其端面模场与另一侧光纤的匹配度不再取决于初始的结构,而是随熔接过程而变化的。因此 PCF 的熔接损耗在更大程度上将取决于熔接参量的选取,而如何选取合适的熔接参量,是实现光子晶体光纤高质量熔接中最大的难点之一。在接下来的内容中,结合具体的熔接实验,对此进行了深入的探讨与分析。

2 PCF 与 SMF 的熔接

两光纤的熔接损耗可由模场的重叠积分^[18,19]计算得到

$$L(\text{dB}) = -10 \lg \left\{ \frac{\left[\iint E_1(x_2, y_2) E_2(x_2, y_2) dx_2 dy_2 \right]^2}{\iint E_1^2(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \iint E_2^2(x_2, y_2) dx_2 dy_2} \right\}, \quad (1)$$

式中 $E_1(x_1, y_1)$, $E_2(x_2, y_2)$ 分别表示两侧光纤的端面模场, $E_1(x_2, y_2)$ 表示光纤 1 到达光纤 2 端面的场,当两光纤完全对准(无横向偏移、轴向倾斜等)时, $E_1(x_2, y_2) = E_1(x_1, y_1)$ 。在以下内容中认为 PCF-SMF 均精确校准。大量熔接实验表明,在熔接过程中 PCF 包层气孔结构将不可避免地发生改变^[20, 21],它与另一侧 SMF 模场的重叠积分即二者熔接损耗的理论值是随熔接过程而变化的。显然,这些改变与熔接电流、熔接时间等参量密切相关。在以往的实验中,往往要进行几十次的实验,将各熔接参量逐一微调并作多种组合,试图找到最合适的一组参量实现低损耗的 PCF-SMF 熔接。显然,实验过程耗时耗力,而且往往难以取得理想的结果。由此,本文提出了一种有效的熔接方案:首先,并不进行两光纤熔接,而是利用熔接机观察不同熔接功率下 PCF 端面气孔的相应变化并测量其数值,由此可计算出 PCF 端面基模场分布及其与 SMF 模场的重叠积分,从而可以找到熔接损耗与熔接功率的对应关系。根据低损耗对应的熔接功率区间就可以选择出合理的熔接电流、熔接时间等参量,利用这些参量进行 PCF-SMF 熔接,损耗可大幅度降低,且熔接过程相对大大简化。以图 1 所示光子晶体光纤为例,具体介绍这一熔接方案。

图 1 为熔接所用 PCF 截面显微照片。其包层以三角格子方式排列着两种尺寸的空气孔。图 2 给出了其基模电场分布(波长 1550 nm 处)。x 方向

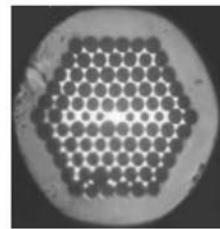


图 1 PCF 截面图

Fig. 1 Cross section of the PCF



图 2 PCF 的基模电场分布(1550 nm)

Fig. 2 PCF's fundamental-mode field distribution at 1550 nm

(横向)由于小孔的存在对场的约束相对较弱,场分布宽于 y 方向(纵向),即 $\omega_x > \omega_y$, ω_x 、 ω_y 分别为 x、y 方向的有效模场直径(MFD)。利用有限元算法^[22,23]计算了 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处两光纤的模场分布,并由(1)式得出了初始 PCF 与 SMF 模场失配所导致的熔接损耗为 0.1 dB。

2.1 不同熔接功率下 PCF 气孔结构的变化

实验选用的电弧熔接机为 Ericsson FSU-975 型光纤熔接机,该熔接机功能强大,可根据模式耦合理

论和热像处理技术对熔接损耗进行高精度估算。其熔接过程包括四步：预熔阶段(端面清洁)、熔接阶段1(预热,端面软化)、阶段2(真正实现熔接)以及阶段3(退火,释放接头热应力)。对于传统的实心单模光纤,通常由熔接机的自动熔接模式即可实现低损耗($L < 0.01$ dB)熔接。而对于结构特殊的多孔 PCF,其热特性、透光率等与 SMF 有很大差别,自动模式不再适用,熔接程序也需作大量修改。采用手动操作模式,并选择热芯校准工艺进行 PCF-SMF 熔接。

图 3 为电弧熔接示意图。电极按照熔接时间、熔接电流等参量的不同设置对光纤进行不同强度的弧光放电。简便起见,只利用一个熔接阶段执行放电操作,来观察和测量 PCF 包层气孔随熔接参量的具体变化。熔接机参量设置如下:预熔电流和时间分别设为 10 mA,0.3 s,熔接 1~3 阶段时间均设为零,即不启动熔接阶段 1~3,只有预熔电弧工作。

以此电弧(强度为 10 mA,0.3 s/次)对光纤接头进行连续、多次放电,记录 PCF 端面气孔的变化。图 4 给出了 PCF 包层大孔直径 d_1 ,小孔直径 d_2 随放电次数 n 的变化规律。图 4 中点(\cdot)数据记录了孔径的六组实验测量值,星号($*$)数据为六组数值的平均值,曲线为平均值的拟合结果。大孔最大测量误差为 $0.36 \mu\text{m}$,小孔最大测量误差为 $0.27 \mu\text{m}$ 。

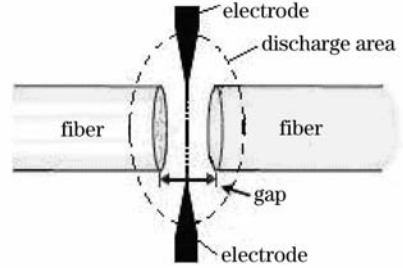


图 3 电弧熔接光纤示意图

Fig. 3 Splicing two fibers with arc discharge

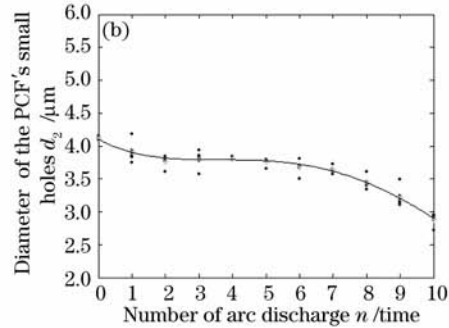
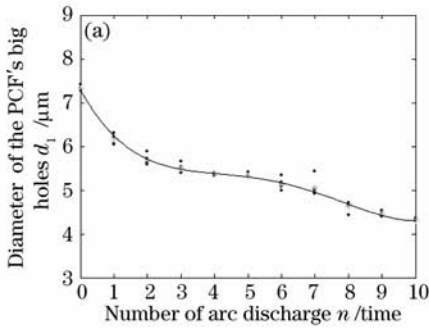


图 4 PCF 大孔、小孔平均直径随放电次数 n 的变化,放电电流 10 mA,放电时间 0.3 s/次

Fig. 4 Diameters (average value) of the holes in PCF against the times of arc discharges, n . The discharge current is 10 mA and runs for 0.3 s each time

由图 4 可见,在熔接机电弧放电作用下,PCF 包层的大、小孔变化率并不一致。经一次(10 mA/0.3 s)放电后,平均大孔尺寸减小近 $1 \mu\text{m}$,而小孔仅减小约 $0.2 \mu\text{m}$ 。此时 PCF 导模场分布与其初始

分布将有显著差异。这也进一步说明 PCF-SMF 之间的熔接损耗很大程度上取决于熔接参量的设置,是随熔接过程而不断变化的。由图 4 数据,利用有限元算法^[22,23]理论计算了 1550 nm 处 PCF 横、纵向

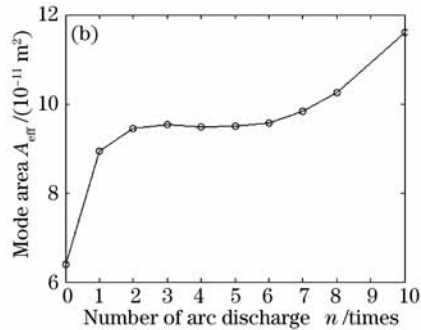
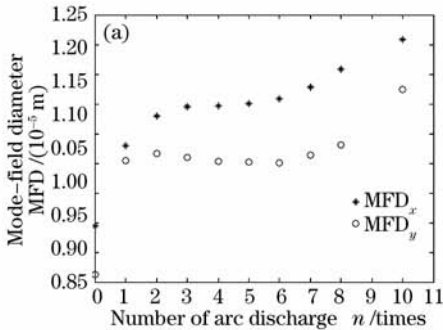


图 5 (a) PCF 横、纵向模场直径 ω_x (MFD_x), ω_y (MFD_y) 以及 (b) 模场有效面积 A_{eff} 随放电次数 n 的变化,放电电流 10 mA,0.3 s/次

Fig. 5 (a) Modefield diameters, MFD in x and y directions and (b) effective mode area A_{eff} , as functions of n , the times of arc discharges. The discharge current is 10 mA and runs for 0.3 s each time

模场直径 ω_x (MFD_x), ω_y (MFD_y) 以及有效模场面积 A_{eff} 随放电次数 (10 mA, 0.3 s/次) 的变化曲线, 如图 5 所示。经过电弧放电, PCF 横、纵向模场直径以及模场面积均较初始值显著增大。显然这是由于 PCF 包层气孔尺寸收缩, 对芯区光场的限制能力减弱, 导致场向包层扩散。由图 5(b), 经两次放电后, A_{eff} 较初始值提高了近 $30 \mu\text{m}^2$ 。而在累计 4 次放电后, 模场面积呈略减趋势, 这是由于 A_{eff} 的大小不仅依赖于气孔结构, 同时也依赖于光纤外径。随着放电次数的累加, PCF 内部气孔逐渐收缩, 使整个光纤尺寸减小, 从而有效面积也相应减小。经四次累加放电得到的光纤结构使此时的 A_{eff} 略小于前次放电结果, 而此后继续放电, 孔进一步收缩, 更多的能量将扩散到包层中, 这对 A_{eff} 的增大作用超过了光纤外径减小带来的缩减影响, 因而此后 A_{eff} 仍将继续增大。

由气孔尺寸变化的数据可计算出不同放电功率下 PCF 的基模场分布, 从而可以由 (1) 式计算出 PCF-SMF 模场的重叠积分即二者熔接损耗理论值与放电功率的对应关系, 如图 6 所示。可见, 经一次放电 (10 mA, 0.3 s/次), 理论上计算的熔接损耗取得了接近于零的最低值, 即此时的 PCF 模场与 SMF 取得了最佳匹配。此后继续放电熔接损耗略有增加, 在累计放电 3~5 次的区间, 熔接损耗均处于约 0.02 dB 的较低水平, 当累计放电超过 6 次后, 计算的熔接损耗随放电次数的继续增加而大幅度增加。值得注意的是, 不同于传统光纤, 在 PCF 熔接中, 初始两光纤的模场失配引起的对接损耗 (butt-coupled loss) 不再是二者熔接损耗的理论最小值, 由图 6, 累计放电 1~8 次的熔接条件范围内, 计算的熔接损耗值均低于初始的 0.1 dB 的对接损耗。

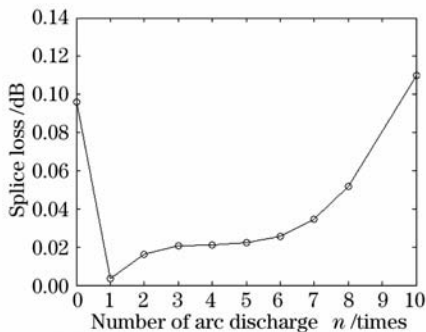


图 6 PCF-SMF 熔接损耗理论计算值随放电次数 n 的变化, 放电电流 10 mA, 0.3 s/次

Fig. 6 Numerically calculated splice loss versus the times of arc discharges, n . The discharge current is 10 mA and runs for 0.3 s each time

这意味着对于某些结构的 PCF, 熔接所导致的气孔结构的收缩变化也有改善两侧光纤模场匹配度的有利一面, 合理利用可有效降低接续损耗。

2.2 选取 PCF-SMF“低损耗熔接功率区间”

由 2.1 节分析, 得到 PCF-SMF 熔接损耗与电弧放电次数即熔接功率的对应关系 (图 6)。此处, 提出以 (熔接电流)² × (熔接时间) 来计算熔接功率的假设。需要指出, 实际的熔接功率并不能由此计算, 实际上, 在熔接过程中光纤累积受热功率无法精确计算得到, 它与各阶段的放电参量, 待熔光纤尺寸、结构及材料, 端面与电极距离以及端面间距等诸多因素都有关。然而本文需要的并非实际熔接功率的准确数值, 由于实际的 PCF-SMF 熔接过程与放电测试过程两者其它条件均相同, 只有放电电流和时间不同, 因此认为可以以 (熔接电流)² × (熔接时间) 衡量出熔接功率的强度区间。由图 6 找到低熔接损耗对应的熔接功率区间, 再根据“熔接功率 = (熔接电流)² × (熔接时间)”, 就可以反向选择熔接电流和熔接时间的合理取值范围, 用于指导实际的光纤熔接。

在选择功率区间时, 不仅需要考虑低损耗的限制, 还需考虑熔接强度等实际要求。由图 6, PCF-SMF 熔接损耗的理论最小值出现在 1 次放电后, 然而大量实验表明, 虽然此时计算的损耗最低, 但此功率水平过低, 两光纤根本无法实现熔融连接。同样, 两次累计放电后的情况与此相同。而在电极累计放电 3~5 次 (10 mA, 0.3 s/次) 的功率范围内, PCF-SMF 熔接损耗均处于 0.02 dB 的较低水平, 而且熔接强度也可满足要求。因此, 选定 PCF-SMF 低损耗、高强度的熔接功率区间, 即为电极累计放电 3~5 次 (10 mA, 0.3 s/次) 的功率区间。

2.3 熔接参量的选取

选取低损耗熔接功率区间, 即可由此来确定合理的熔接参量, 用以实现 PCF-SMF 的低损耗熔接。由以往大量实验的经验, 熔接程序中最关键的参量是熔接阶段 2 的电流和时间 (分别记为 I_2 和 t_2), 这是将两光纤真正“熔接”成为一体的熔接参量。而阶段 1 (t_1 和 I_1) 和阶段 3 (t_3 和 I_3) 参量的影响相对较小, 固定 I_2 和 t_2 , 当 t_1/I_1 、 t_3/I_3 分别在 $0.1 \text{ s} \pm 0.05 \text{ s} / 5 \text{ mA} \pm 1 \text{ mA}$ 、 $1.2 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s} / 8.5 \text{ mA} \pm 1 \text{ mA}$ 范围内变化时, 最终的 PCF-SMF 熔接结果差别不大, 因此选定 $t_1/I_1 = 0.1 \text{ s} / 5 \text{ mA}$ 、 $t_3/I_3 = 1.2 \text{ s} / 8.5 \text{ mA}$ 。由“熔接功率 = (熔接电流)² × (熔接时间)”, 可以估算出熔接 1、3 两阶段累计功率为 0.107 mW, 而低损

耗熔接对应的总功率区间为 $[0.09 \text{ mW}, 0.15 \text{ mW}]$ ，由此推知熔接阶段 2 的功率应小于 0.043 mW 。考虑到熔接强度的要求， I_2 和 t_2 的取值应分别高于 8 mA 和 0.4 s 。由此，可以在较宽泛的范围内选取 I_2 和 t_2 参量，如 $I_2 = 8.5 \text{ mA}$ ， $0.4 \text{ s} < t_2 < 0.59 \text{ s}$ ； $I_2 = 9 \text{ mA}$ ， $0.4 \text{ s} < t_2 < 0.53 \text{ s}$ ； $t_2 = 0.4 \text{ s}$ ， $8 \text{ mA} < I_2 < 10.3 \text{ mA}$ ； $t_2 = 0.5 \text{ s}$ ， $8 \text{ mA} < I_2 < 9.2 \text{ mA}$ 等等多种组合方式，均可满足低损耗熔接功率要求。

2.4 实验验证分析及结果

2.2 及 2.3 节详细介绍了“选取低损耗熔接功率区间”进而由此选取合理熔接参量的熔接方案。为验证该方案的可行性，进行了如下 PCF-SMF 的熔接实验： $t_1/I_1 = 0.1 \text{ s}/5 \text{ mA}$ ， $t_3/I_3 = 1.2 \text{ s}/8.5 \text{ mA}$ ，1) 固定 $t_2 = 0.4 \text{ s}$ ，在 $[2 \text{ mA}, 15 \text{ mA}]$ 内变化 I_2 (增幅 1 mA)；2) 固定 $I_2 = 10 \text{ mA}$ ，在 $[0.3 \text{ s}, 1 \text{ s}]$ 内变化 t_2 (增幅 0.1 s)；共得出 20 组实验结果如图 7 所示 ($I_2 = 10 \text{ mA}$ ， $t_2 = 1 \text{ s}$ 对应损耗超过图 7 纵轴范围)。

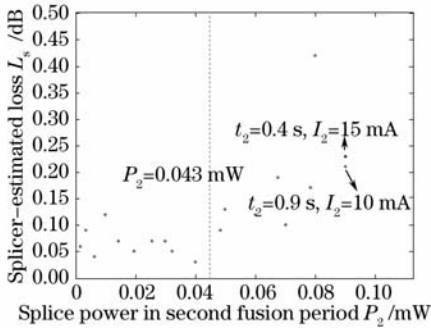


图 7 熔接机给出的估算损耗 (L_s) 与熔接阶段 2 的熔接功率 (P_2) 的对应关系

Fig. 7 Experimentally obtained splice losses between PCF and SMF versus the splice power P_2 applied in the second fusion period two

以熔接阶段 2 功率 $P_2 = 0.043 \text{ mW}$ 为分界线 (图中虚线)，当 $I_2^2 \times t_2$ 低于此值时，熔接机给出的估算损耗 (L_s ，熔接机自动估值) 基本处于较低水平 ($L < 0.1 \text{ dB}$)，只有一组例外，此时 $t_2 = 0.4 \text{ s}$ ， $I_2 = 5 \text{ mA}$ ，损耗约 0.12 dB ，接点强度非常低；而当功率高于 0.043 mW 时，熔接机给出的估算损耗整体水平显著提高，均超过了 0.1 dB 。这不仅验证了功率区间选取的正确性，更有力地验证了上述熔接方案的有效性，同时，以 (熔接电流) $^2 \times$ (熔接时间) 度量熔接功率的可行性也得到了证实。需要再次指出的是，光纤的高质量熔接不仅要求高的耦合效率，还要求高的熔接强度。这意味着在设置熔接参量时，既要考虑低损耗熔接功率区间的限制，同时又要兼顾

熔接强度的要求，即熔接阶段 2 的电流 (或此阶段熔接功率) 不能过低，否则两光纤末端不能充分软化接合，严重影响熔接结果。例如，当 $I_2^2 \times t_2 < 0.03 \text{ mW}$ 时，光纤熔接强度很差，接头极其脆弱易断。这也是在 2.3 节参量选取时选择 $I_2 > 8 \text{ mA}$ ， $t_2 > 0.4 \text{ s}$ 的原因。

此外，相同的熔接功率水平下，小 I_2 ，大 t_2 相对于大 I_2 ，小 t_2 熔接有更好的熔接结果。例如当 I_2/t_2 分别为 $15 \text{ mA}/0.4 \text{ s}$ 以及 $10 \text{ mA}/0.9 \text{ s}$ 时，功率均为 $P = 0.09 \text{ mW}$ ，但前者对应的熔接机估算损耗大于后者，如图 7 中标注，接头质量也相对较差。这是由 PCF 的“空气-石英”结构所决定的。空气孔的存在导致 PCF 包层等效导热系数降低，外围向芯区导热的速度比实心光纤要慢，因此以相对长时间的小电流加热更有助于使光纤横向各部分受热均匀，带来更好的熔接结果。因此在选取最优化熔接参量组合时，应尽量选择相对小的 I_2 和相对长的 t_2 。此外，图 7 中熔接机给出的估算损耗值较图 6 的计算值高出很多，这是由于计算中忽略了各种不完美因素，只考虑了两光纤模场失配所导致的损耗。而实际上，两光纤的失校准、端面不完美、光纤结构的不完美等等因素在具体的熔接操作中难以避免，从而导致实际的熔接损耗大大增加。目前光子晶体光纤的端面校准以及端面切割技术仍是该领域的技术空白，本文实验均沿用传统实心光纤的相应技术，这对熔接质量有很大的影响。

3 结 论

PCF 的进一步发展及其实用化进程的推进要求尽快解决 PCF 与传统光纤以及各种设备、器件的接续问题。本文提出了一种利用电弧熔接机实现 PCF-SMF 低损耗熔接的新方案，通过观察不同熔接条件下 PCF 气孔结构的变化，结合理论计算，可找到低熔接损耗对应的熔接功率区间，从而可由此确定合理的熔接参量范围，用以实现 PCF-SMF 低损耗高强度熔接。这一方案的有效性在后续实验中得到充分验证。它克服了以往熔接中难以选取合理熔接参量以降低熔接损耗的问题，大大提高了熔接效率和熔接质量，可被广泛用于其它多种结构的 PCF 熔接。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*, All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt.*

- Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
 - 3 P. S. J. Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
 - 4 K. Saitoh, N. Florous, M. Koshiba. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8365~8371
 - 5 F. Zhang, X. Liu, M. Zhang *et al.*. A novel design for single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1550 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**: 260~263
 - 6 Wei Yanfen, Zhang Xia, Xu Yongzhao *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 414~418
卫艳芬, 张霞, 徐永钊等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414~418
 - 7 Maeda J, Yoshida M. Photonic crystal fiber amplifiers[C]. Proc. OFC 2005, 2005. OFB1
 - 8 K. Li, Y. Wang, W. Zhao *et al.*. High power single-mode large-mode-area photonic crystal fiber laser with improved Fabry-Perot cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**: 522~524
 - 9 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
 - 10 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. Westbrook *et al.*. Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**: 698~713
 - 11 Y. P. Wang, L. Xiao, D. N. Wang *et al.*. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 3414~3416
 - 12 W. N. Macpherson, M. J. Gander, R. Mcbride *et al.*. Remotely addressed optical fibre curvature sensor using multicore photonic crystal fibre[J]. *Opt Commun.*, 2001, **193**: 97~104
 - 13 B. Bourliaguet, Claude Paré, Frédéric Émond *et al.*. Microstructured fiber splicing[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25): 3412~3417
 - 14 J. H. Chong, M. K. Rao, Y. Zhu *et al.*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO₂ laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**: 942~944
 - 15 J. H. Chong, M. K. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**: 1365~1370
 - 16 A. D. Yablon, R. T. Bise. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses[J]. *Photo. Tech. Lett.*, 2005, **17**(1): 118~120
 - 17 S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, N. Y. Joly *et al.*. Splice-free interfacing of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1629~1631
 - 18 C. M. Miller. Optical Fiber Splices and Connectors[M]. New York: Marcel Dekker, 1986
 - 19 S. G. Krivoshlykov, E. G. Sauter. Mode coupling between two waveguides with offset, tilt and gap using quantum theoretical methods[J]. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1987, **20**: 3805~3823
 - 20 Jesper Lægsgaard, Anders Bjarklev. Reduction of coupling loss to photonic crystal fibers by controlled hole collapse: a numerical study[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**: 431~435
 - 21 J. K. Mackenzie, R. Shuttleworth. A phenomenological theory of sintering[C]. *Proc. Phys. Soc. London B*, 1949, **62**: 833~852
 - 22 F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux *et al.*. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(2): 181~191
 - 23 Koshiba M. Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2002, **E85-C**(4): 881~888