

## 面向光纤陀螺发展需求的空芯微结构光纤的弯曲特性研究

顾帅<sup>1</sup>, 皮鹏程<sup>2</sup>, 廉正刚<sup>2\*</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 盛新志<sup>1</sup>, 姜淑琴<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>北京交通大学电子信息工程学院通信与信息系统北京市重点实验室, 北京 100044;<sup>2</sup>武汉长盈通光电技术股份有限公司, 湖北 武汉 430074

**摘要** 空芯微结构光纤的弯曲损耗是决定其能否真正应用到光纤陀螺中的一个核心指标。设计并成功拉制出一款具有超低弯曲损耗的 19 芯空芯光子带隙光纤, 通过与控制的具有相近纤芯直径的空芯反谐振光纤进行对比, 详细探究了空芯微结构光纤弯曲损耗的产生机理, 证明了空芯光子带隙光纤具有更优异的抗弯曲特性。使用对称缠绕法, 在 0.25 cm 的极限弯曲半径下, 实验测量得到的空芯光子带隙光纤的弯曲损耗为每圈  $3.63 \times 10^{-3}$  dB @1624 nm, 这是目前实验报道的空芯微结构光纤在最小弯曲半径下的最低弯曲损耗。面向光纤陀螺的应用需求, 首次实验研究了在不同张力下空芯光子带隙光纤敏感环的插入损耗的变化情况。研究结果显示, 随着绕制张力的增加, 环体插入损耗显著增加, 因此宜在小张力条件下进行空芯光子带隙光纤敏感环的绕制。研究成果对空芯微结构光纤在光纤陀螺领域的实用化进程有着重要的推进作用。

**关键词** 光纤光学; 光纤设计与制作; 光纤测量; 光纤传感; 光纤陀螺

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220966

## 1 引言

空芯微结构光纤将光波约束在空芯中传播, 具有低非线性、低散射、低色散、低损耗、低延迟等优异特性<sup>[1-4]</sup>, 有望解决传统实芯光纤敏感环中存在的背向散射、Faraday 效应、Kerr 效应及 Shupe 效应等问题, 所导致的非互易噪声对光纤陀螺精度及长期稳定性的影响是新一代高精度光纤陀螺研究的热点<sup>[5-7]</sup>。因此, 开发高品质空芯微结构光纤对于我国高精度光纤陀螺的发展具有重要的意义。

目前研究最多的空芯微结构光纤主要分为两类: 一类是基于光子带隙原理导光的空芯光子带隙光纤(HC-PBGF)<sup>[8-10]</sup>, 另一类是基于反谐振反射光波导原理导光的空芯反谐振光纤(HC-ARF)<sup>[11]</sup>。空芯微结构光纤的弯曲特性对于高精度小型化光纤陀螺的应用至关重要。虽然目前 HC-ARFs 的损耗已经降到比传统单模光纤还要低的水平<sup>[12]</sup>, 但其可用弯曲半径很难达到 5 cm 以下<sup>[13]</sup>, 在小的弯曲半径下弯曲损耗较大, 难以满足高精度小型化光纤陀螺的发展需求<sup>[14-15]</sup>。HC-PBGF 基于光子带隙效应导光, 在同等弯曲半径下, 弯曲损耗比 HC-ARFs 低 2~3 个数量级, 理论上在低至毫米量级的弯曲半径下仍能保持相对较低的弯曲损

耗<sup>[16]</sup>。但是在极小弯曲半径(毫米量级)下, 光纤由于形变会产生较大的应力与扭转, 弯曲损耗难以测量, 因此极小弯曲半径下 HC-PBGF 弯曲损耗的实验报道极少。另外, 在光纤陀螺环的绕制过程中, 为了克服弯曲时自身产生的应力而使光纤排列紧凑, 往往需要对光纤施加一定的张力, 目前关于不同张力下 HC-PBGF 弯曲损耗的研究鲜有报道。

本文面向高精度小型化光纤陀螺的发展需求, 设计并拉制了一款低弯曲损耗的 19 芯 HC-PBGF, 通过仿真分析和实验测量, 详细研究了 19 芯 HC-PBGF 弯曲损耗的产生机理, 并与研制的纤芯尺寸接近的单圈 HC-ARF 进行了对比研究。结果表明, HC-PBGF 在 3 cm 弯曲半径下的弯曲损耗比相同纤芯尺寸的单圈 6 管 HC-ARF 的弯曲损耗低了 3 个数量级, 在 0.25 cm 的极限弯曲半径下, 测得 19 芯 HC-PBGF 的弯曲损耗为每圈  $3.63 \times 10^{-3}$  dB @1624 nm, 这是目前实验报道的空芯微结构光纤在最小弯曲半径下的最低弯曲损耗。针对 HC-PBGF 在光纤陀螺中的应用需求, 实验研究了不同绕制张力对 HC-PBGF 陀螺环插入损耗的影响, 首次测量得到了不同绕制张力下 HC-PBGF 陀螺环的环体损耗。

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-07-29; 网络首发日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(12174022)、国家重点研发计划(2020YFB1312802)

通信作者: \*lianzhenggang@yoec.com.cn; \*\*shqlou@bjtu.edu.cn

## 2 光纤结构及特性分析

### 2.1 结构设计及光纤制备

设计并成功拉制了一款导光带覆盖的波长为 1550 nm 的低弯曲损耗的 19 芯 HC-PBGF, 设计结构如图 1(a) 所示, 光纤的结构参数如表 1 所示, 其中  $\Lambda$  为纤芯距离,  $d$  为孔间距,  $t$  为包层壁厚,  $R$  为节点半径,  $d_1$  为包层角直径,  $d_2$  和  $d_3$  为孔角直径。为了降低表面模在弯曲形变下的干扰, 将空气孔的占空比设置为 97.6%<sup>[17]</sup>。本文基于高纯石英玻璃管, 采用管束堆积拉制技术, 成功拉制出此款光纤, 光纤截面的扫描电镜 (SEM) 图如图 1(b) 所示。所拉制光纤的纤芯直径为 32.8  $\mu\text{m}$ , 芯区与包层间的石英壁厚度为 40~75 nm, 大大降低了石英壁产生的表面模对传输

的不利影响。

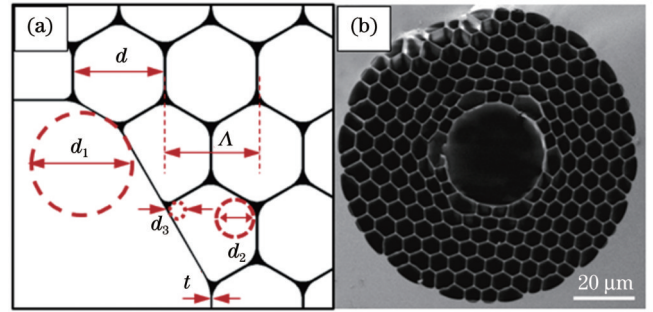


图 1 19 芯 HC-PBGF 的结构。(a) 设计结构的局部图; (b) 制备光纤的截面 SEM 图

Fig. 1 Structure of 19 cell HC-PBGF. (a) Partial diagram of designed structure; (b) SEM image of cross section of prepared fiber

表 1 HC-PBGF 设计结构的参数  
Table 1 Parameters of designed HC-PBGF structure

Parameter	$\Lambda / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	$t / \text{nm}$	$R / \text{nm}$	$d_1 / \mu\text{m}$	$d_2 / \mu\text{m}$	$d_3 / \mu\text{m}$
Value	6.10	6.04	30.5	186	5.82	1.95	1.22

为了探究不同空芯微结构光纤弯曲损耗的产生机理, 对比证明所拉制 HC-PBGF 在抗弯曲特性上的优势, 本文也设计并拉制了一款单圈 6 管的 HC-ARF, 光纤结构如图 2(a) 所示。为了便于比较两者的弯曲损耗特性, HC-ARF 的纤芯直径 ( $D$ ) 被设计与 19 芯 HC-PBGF 相近, 所制备的光纤实际纤芯直径为 34.5  $\mu\text{m}$ 。为了使主导光中心带同样在 1550 nm 附近, 包层壁厚 ( $t$ ) 设置为 553 nm, 包层孔内径 ( $d$ ) 设置为 23.8  $\mu\text{m}$ , 包层孔径与纤芯的直径比高达 0.689, 可实现较好的单模传输, 降低弯曲测量时多模干涉的干扰<sup>[18]</sup>。

有限元法适用于各种复杂结构的光纤特性分析, 计算精度高, 是目前应用范围最广的微结构光纤特性分析方法。本文采用有限元法结合完美匹配层, 对两款空芯光纤的特性进行仿真分析, 根据制备光纤结构的扫描电镜图, 对关键细节参数进行提取, 进而对 HC-PBGF 和 HC-ARF 进行了仿真计算。通过研究平直和弯曲状态下光纤中的模场分布和模式的有效折射率, 进而得到光纤的限制损耗、散射损耗和弯曲损耗。

限制损耗可以通过模式有效折射率的虚部计算得到<sup>[19-20]</sup>:

$$C_L = -8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中:  $C_L$  为限制损耗;  $\lambda$  为光波在真空中的波长;  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部。

表面散射损耗是由玻璃与空气界面的粗糙度引起的, 与光在光纤传输过程中空气-玻璃交界面的场强成正比<sup>[21]</sup>, 可以表示为

$$\alpha_{\text{sc}} = \eta \times F, \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{\text{sc}}$  为表面散射损耗;  $\eta$  为归一化系数;  $F$  为标准化解界面场强, 它的相对强度<sup>[22]</sup>可表示为

$$F = \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\oint |\mathbf{E}|^2 dl}{\iint \mathbf{E} \times \mathbf{H} dA}, \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和真空磁导率;  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  为光纤中传输光的电场和磁场矢量;  $l$  为距离;  $A$  为面积。

对于弯曲状态下的空芯微结构光纤, 可以利用保角变换<sup>[23]</sup>, 将弯曲状态下的空芯微结构光纤等效成平直光纤进行分析, 等效折射率<sup>[24]</sup>近似表示为

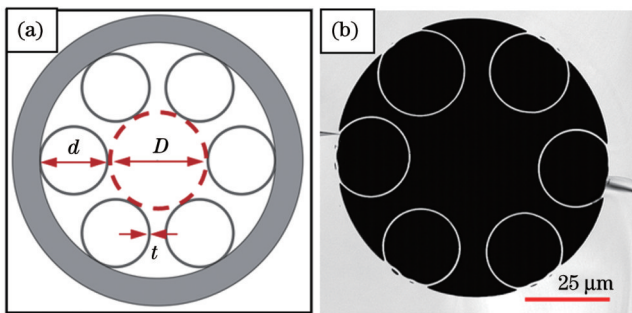


图 2 单圈 6 管 HC-ARF 的结构。(a) 设计结构的局部图; (b) 制备光纤的截面 SEM 图

Fig. 2 Structure of single ring 6-tube HC-ARF. (a) Partial diagram of designed structure; (b) SEM image of cross section of prepared fiber

### 2.2 仿真分析

为了详细探究不同空芯微结构光纤弯曲损耗产生的机理, 对研制的两款光纤在平直和弯曲状态下的限制损耗 (CL)、表面散射损耗 (SSL) 进行了计算仿真。

$n_{eq}(x, y) = n(x, y) [1 + (x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta) / R_1]$ , (4)  
 式中:  $n_{eq}(x, y)$  为等效折射率;  $(x, y)$  为光纤横截面的坐标;  $n(x, y)$  为平直状态下的空芯微结构光纤的有效折射率分布;  $R_1$  为朝向  $+x$  轴的弯曲半径;  $\theta$  为弯曲方向与  $+x$  轴的夹角。

在真实光纤拉制过程中需要充入气压以保持中间体结构不塌缩, 这会导致纤芯膨胀呈圆形且纤芯 6 个角上的晶格会过度膨胀, 与理想的正六边形蜂窝晶格结构相比产生一定畸变。这种畸变会导致仿真结果与实验结果产生偏差<sup>[25]</sup>。为了修正这种偏差, 本文借助图像处理算法对光纤仿真结构进行修正。首先把高清的光纤 SEM 截面图进行高斯滤波, 再进行二值转换。其次对二值图像进行边缘检测, 利用平滑算法对检测完的边缘图像进行简单平滑处理。然后利用中心定位算法求出空气孔的中心位置, 以中心点为起始点, 利用

膨胀算法求出光纤节点的位置。接着根据质量守恒原理, 利用高清 SEM 图中提取得到的壁厚、晶格间距、纤芯大小等参数, 对光纤截面进行重建。最后对多组端面进行处理, 舍弃重大误差数据, 对整体数据进行平均优化, 得到准确的光纤实际端面图, 将重建的光纤端面图输入到有限元模型中, 结合完美匹配边界条件, 对实际光纤特性进行仿真分析。

最终仿真计算得到光纤在平直状态下的散射和限制损耗, 结果如图 3 所示, 其中 cl 为限制损耗, ssl 为散射损耗。图 3 中的曲线为实验测量的 5 m 长 HC-PBGF 和 HC-ARF 的传输光谱, 点线为仿真得到的损耗谱。HC-PBGF 的导光带在 1250~1700 nm 范围内, HC-ARF 的导光带在 1162~1700 nm 范围内, 测量得到的导光带与仿真所得的低损耗传输匹配较好, 验证了仿真结构的正确性。

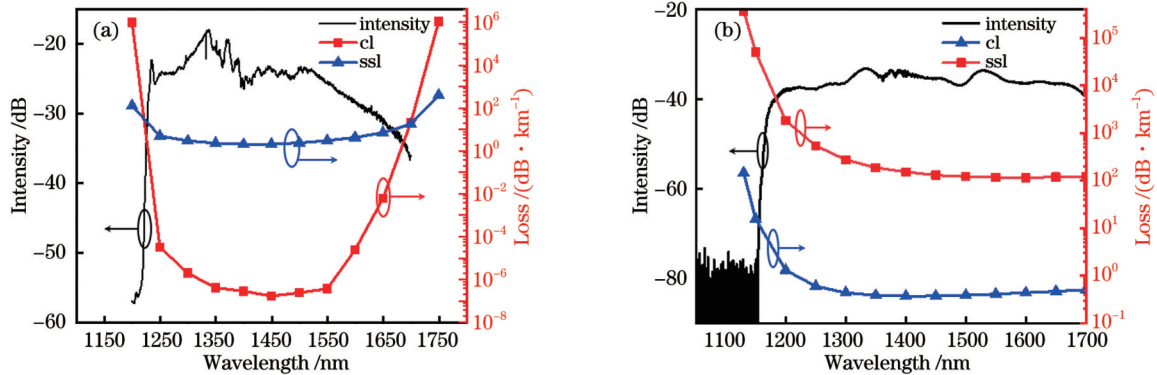


图 3 5 m 长光纤在平直状态下的传输光谱与损耗谱。(a) HC-PBGF; (b) HC-ARF

Fig. 3 Transmission spectra and loss spectra of 5 m long fiber in flat state. (a) HC-PBGF; (b) HC-ARF

对于 HC-PBGF, 由图 3(a) 所示仿真结果可以看出, 在低损耗传输区域即 1250~1650 nm 波段内, 散射损耗比限制损耗高 6~7 个数量级, 此时光纤的传输损耗主要由散射损耗决定。而在导光带边缘, 即在 1200 nm 和 1700 nm 附近, 光纤限制损耗急剧增大, 增速远大于散射损耗的增大速率, 此时传输损耗主要由限制损耗决定。这也可以从测量的光谱强度变化曲线中观察到, 此时导光带边缘的光强急剧下降。一般 19 芯 HC-PBGF 的传输带宽在 200 nm 左右<sup>[16]</sup>, 这得益于高的占空比, 此款光纤实现了 450 nm (1250~1700 nm) 的传输带宽。

不同于 HC-PBGF, 如图 3(b) 所示, HC-ARF 的限制损耗在整个导光带上比散射损耗高出 2 个数量级。这是由于 HC-ARF 包层结构更加简单, 相比于 HC-PBGF, HC-ARF 对纤芯能量的束缚作用较弱, 因此限制损耗较大。同时单圈 HC-ARF 采用无节点包层和负曲率纤芯的设计, 大大减少了纤芯能量场与石英壁的重合面积, 因此散射损耗得到一定的降低。导光带边缘 1150 nm 处属于 HC-ARF 的谐振区, 此时的包层石英壁失去对纤芯能量的束缚作用, 因此限制损耗与散射损耗都急剧增大, 从传输光谱可以明显观察到光

强在此波段急剧下降。

当光纤处于弯曲状态, 光纤的损耗将比平直状态的损耗高, 由此带来的损耗增加量通常用弯曲损耗来描述, 这里弯曲损耗主要包含弯曲状态下散射损耗和限制损耗的增加量。仿真计算得到两种空芯微结构光纤的弯曲变化情况, 结果如图 4 所示。在较大的弯曲半径下, 从图 4(b) 可以看出, 两款空芯微结构光纤基模的能量仍很好地被束缚在纤芯中。此时光纤的弯曲损耗与直线平直状态下的传输损耗接近。随着弯曲半径的减小, 散射损耗的增加比较缓慢。当光纤弯曲到临界弯曲半径时, 原有波导结构对模式的束缚条件遭到破坏, 导致限制损耗急剧增加。因此在弯曲状态下, 对空芯微结构光纤的弯曲损耗起决定性作用的是限制损耗。

由图 4 可知, 对于 HC-PBGF, 当弯曲半径降低到 1 cm 附近时, 限制损耗开始急剧增大, 散射损耗的变化并不显著, 因此影响弯曲损耗的主要是限制损耗。随着弯曲半径继续减小, 从弯曲半径为 0.5 cm 时的场分布可以看出, 此时基模的模场已经发生严重偏移, 但没有与周围石英壁的介质模式发生耦合。得益于 HC-PBGF 对纤芯能量较强的束缚能力, HC-PBGF 的弯曲

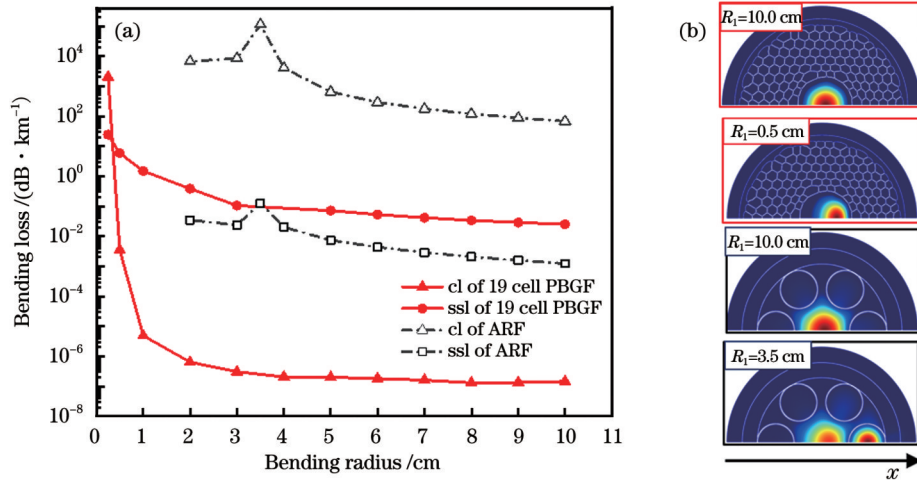


图 4 在 1550 nm 波长处, HC-PBGF 与 HC-ARF 光纤在不同弯曲半径下的弯曲损耗和基模的模场分布, 黑色箭头表示光纤的弯曲方向。(a) 弯曲损耗; (b) 基模的模场分布

Fig. 4 Bending losses and mode field distributions of fundamental modes of HC-PBGF and HC-ARF fiber under different bending radii at wavelength of 1550 nm with bending direction of fiber shown by black arrow. (a) Bending losses; (b) mode field distributions of fundamental modes

损耗在 1 cm 附近才有明显的增加。HC-PBGF 在小弯曲半径下的弯曲损耗比 HC-ARF 低了 2~3 个数量级。

而对于 HC-ARF, 其限制损耗在弯曲半径 3.5 cm 处出现峰值, 之后的弯曲损耗比平直状态下高出 2~3 个数量级。由弯曲半径为 3.5 cm 时的模场分布图可以看出, 此时的纤芯基模与包层基模达到相位匹配, 纤芯的能量严重泄漏到包层中, 从而产生了损耗峰。仿真结果证明了 HC-PBGF 比 HC-ARF 有着更强的抗弯曲特性, 临界弯曲半径在 1 cm 附近, 更适用于光纤陀螺。

### 3 实验结果

#### 3.1 弯曲特性测量

为了进一步验证所拉制的 HC-PBGF 的弯曲特性, 对 HC-PBGF 在不同弯曲半径下的弯曲损耗变化进行实验测量, 所用的实验装置如图 5 所示, 其中 OSA 为光谱仪, SMF 为单模光纤, HCF 为空芯光纤。超连续光源的激光由单模光纤的尾纤引出, 经过熔接机对准耦合到空芯光纤内, 对于 90 m 长的 HC-PBGF, 其中

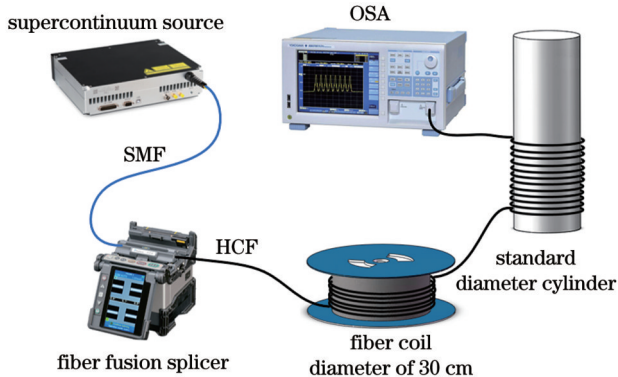


图 5 弯曲损耗测试装置图

Fig. 5 Diagram of bending loss test device

的 60 m 光纤被缠绕在直径为 30 cm 的大线盘上, 以消除 HC-PBGF 的扰模, 使光纤模式达到稳定, 从而提高测量的精度。剩余光纤被分别紧绕到半径 ( $R'$ ) 为 5.00、4.00、3.50、3.00、1.00、0.25 cm 的圆柱体上, 光纤的输出被接入到光谱仪上。通过测量光纤弯曲前的光谱功率  $P(\lambda')$  与弯曲后的光谱功率  $P_b(\lambda')$ , 可求得 HC-PBGF 在弯曲半径  $R_b$  下的弯曲损耗  $\alpha(\lambda')$ :

$$\alpha(\lambda') = -\frac{10}{L} \lg \frac{P_b(\lambda')}{P(\lambda')}, \quad (5)$$

式中:  $L$  为弯曲的光纤长度;  $\lambda'$  为被测波长。

测量发现, 当光纤弯曲到 1.00 cm 和 0.25 cm 小弯曲半径时, 光纤本身会产生较大应力, 导致测量困难。因此, 本文采用了两级对称绕法, 每 100 圈固定一次, 然后改变缠绕方向, 共缠绕 400 圈, 这样可以使缠绕时产生的扭转相互抵消。实验所测结果如图 6 所示。

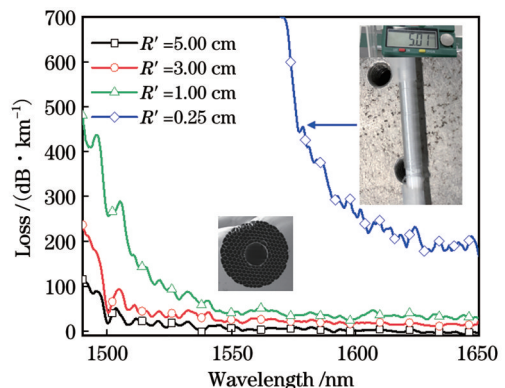


图 6 不同弯曲半径下测得的 HC-PBGF 的弯曲损耗谱, 插图 为缠绕在直径为 0.5 cm 的石英棒上的光纤实物图

Fig. 6 Bending loss spectra of HC-PBGF measured at different bending radii with optical fiber wrapped around quartz rod with diameter of 0.5 cm shown in inset

从图 6 可以看出,当 HC-PBGF 的弯曲半径大于 1 cm 时,弯曲损耗随着弯曲半径的减小缓慢增加。以 1624 nm 波长处的弯曲损耗为例,5.00、3.00、1.00 cm 弯曲半径下的弯曲损耗分别为 1.38 dB/km (每圈  $0.42 \times 10^{-3}$  dB)、11.74 dB/km (每圈  $2.13 \times 10^{-3}$  dB) 和 23.29 dB/km (每圈  $1.39 \times 10^{-3}$  dB)。而当弯曲半径小于 1.00 cm 时,弯曲损耗急剧增加。例如在 0.25 cm 的极小弯曲半径下,1624 nm 处的弯曲损耗迅速增加到 231.58 dB/km (每圈  $3.63 \times 10^{-3}$  dB)。在低于临界弯曲半径时,导光带短波长边缘处的弯曲损耗的缩减更加剧烈。例如当 1520 nm 处的弯曲半径由 1.00 cm 降低到 0.25 cm 时,弯曲损耗增加了 2176 dB/km,增加量是 1624 nm 处的 9.76 倍。因此在设计光纤时应使工作波长远离导光带的短波长边缘。此实验结果与第 2 节的仿真结果一致,证明了弯曲半径 1.00 cm 是此 HC-PBGF 的一个临界弯曲半径,弯曲半径小于此值时弯曲损耗会急剧上升。同时也实验证明了 HC-PBGF 有着极强的抗弯曲特性。

应用同样的测量方法,将 10 m 长的 HC-ARF 直接缠绕到半径为 5.0、4.0、3.5、3.0 cm 的圆柱体上,对研制的 HC-ARF 的弯曲损耗进行了测量,测量结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,HC-ARF 的整体弯曲损耗比 HC-PBGF 高 2~3 个数量级。例如在 1624 nm 处,HC-ARF 在弯曲半径为 5.0、4.0、3.5、3.0 cm 时的弯曲损耗分别高达  $0.64 \times 10^3$  dB/km (每圈 1.93 dB)、 $2.48 \times 10^3$  dB/km (每圈 9.35 dB)、 $5.51 \times 10^3$  dB/km (每圈 23.7 dB) 和  $19.15 \times 10^3$  dB/km (每圈 96.3 dB)。在弯曲半径减小的过程中,导光带短波长边缘处的弯曲损耗的缩减比 HC-PBGF 更加剧烈。纤芯能量与包层模式耦合,导致出现 HC-ARF 高的弯曲损耗峰。在图 7 所示实验结果中可以清晰观察到损耗峰的存在。例如,当弯曲半径为 5 cm 时,1300 nm 波长附近处出现了第一个损耗峰,随着弯曲半径的减小,损耗峰的位置逐渐向长波长方向移动。当弯曲半径为 3 cm 时,弯曲损耗峰的位置移到 1600 nm 附近。损耗峰的存在带来了巨大的弯曲损耗,大大缩小了可用的低损耗带宽。这就

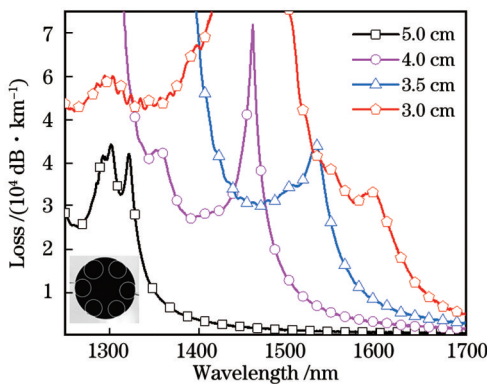


图 7 HC-ARF 的弯曲损耗谱

Fig. 7 Bending loss spectra of HC-ARF

导致单圈 HC-ARF 大多只能工作在大于数十厘米的弯曲半径下。因此,从弯曲损耗的角度看,HC-PBGF 比 HC-ARF 更适用于高精度小型化光纤陀螺。

### 3.2 绕环张力对环体插入损耗的影响

光纤陀螺的应用对光纤抗弯曲特性的要求较高。光纤陀螺一般要求小型化<sup>[26-27]</sup>,通常被绕制成百上千圈以提高精度。为了使光纤排列紧密以满足小型化需求,光纤陀螺的绕环机需要在绕环过程中施加不同的张力。不同于实心光纤,张力会使空芯微结构光纤产生更大的结构形变,是造成环体插入损耗增加的不可忽略的因素。不同张力下的 HC-PBGF 复杂的弯曲特性变化很难通过理论仿真的方法进行评估,因此开展空芯微结构光纤环插入损耗的张力实验研究对深入分析其光学特性具有指导意义,有助于推动空芯微结构光纤在陀螺上的应用。因此本文实验研究了光纤陀螺环在不同绕制张力下的环体插入损耗。

首先利用光纤陀螺绕环机依次施加不同张力,将 90 m 长 HC-PBGF 紧密绕制在直径为 10 cm 的陀螺环骨架上。然后依次采用截断法测得单位长度的环体损耗,减去无应力下的环体损耗,即可得到张力诱导的环体插入损耗。所得环体插入损耗随张力的变化如表 2 所示。本文在 1550 nm 附近测得三组数据并取平均值,以保证测量值的准确性。由表 2 中数据可知,在 1550 nm 处,施加了 0.1 N 张力后的环体插入损耗略微增加,张力带来的环体插入损耗为 3.69 dB/km。在张力增加到 0.5 N 后,环体插入损耗增加明显,达到了 16.43 dB/km。当施加的张力高达 0.9 N 时,张力带来的弯曲损耗急剧增加。此时张力所带来的插入损耗高达 70.15 dB/km。以上实验结果证明,当光纤在绕环时,绕制张力会引入额外的插入损耗,并随着绕制张力的增加,插入损耗增加显著。

表 2 张力引起的 HC-PBGF 环体插入损耗

Table 2 Tension-induced HC-PBGF loop insertion loss

Wavelength / nm	Gyro loop insertion loss / (dB · km <sup>-1</sup> )		
	Tension of 0.1 N	Tension of 0.5 N	Tension of 0.9 N
1549.6	3.93	16.65	71.40
1550.0	3.52	16.34	70.01
1550.4	3.61	16.31	69.04
Average value	3.69	16.43	70.15

在 1550 nm 波长处,当 HC-PBGF 弯曲到 0.25 cm 弯曲半径时,弯曲损耗实际测量的结果为仿真结果的三倍。这是因为光纤在小弯曲半径下自身会产生一定的应力形变,此时为了克服应力并使光纤紧密缠绕,需要增加绕制张力,这会带来额外的弯曲损耗。在小的弯曲半径下,光纤结构会发生形变,从而使 HC-PBGF 中的晶格节点、石英壁的折射率和波导结构产生变化。光纤

的外径越大、弯曲的半径越小,张力的影响就会越大。一般情况下,HC-ARF 的外径比带隙大得多。例如,采用相同尺寸的中间体和外套管控制的两款光纤有着相似的纤芯尺寸,同样在 1550 nm 处导光。其中 HC-PBGF 的裸纤直径为 160  $\mu\text{m}$ ,而 HC-ARF 的裸纤直径为 250  $\mu\text{m}$ ,是 HC-PBGF 的 1.6 倍。HC-ARF 的结构没有密集晶格节点的支撑,因此在弯曲时更易产生形变,导致高损耗区向长波长方向移动,同时也会导致基模模场面积改变和双折射的产生,由此造成的模式不匹配同样会增加光纤的损耗。这也是 HC-ARF 有着更大弯曲损耗的一个原因。由以上结果可知,减小弯曲时施加的张力可以有效减小应力形变,从而减小绕制带来的额外损耗。特别是在绕制 HC-PBGF 陀螺环时,需要在保持环体紧凑的情况下尽可能地减小绕制张力。

## 4 结 论

设计和拉制了纤芯尺寸接近的 19 芯 HC-PBGF 和 HC-ARF,其中 19 芯 HC-PBGF 的占空比高达 97.6%,拉制的 HC-ARF 包层纤芯比高达 0.689,具有较好的单模传输特性。在弯曲半径为 3 cm 时,实验测得 HC-PBGF 的弯曲损耗比相同纤芯尺寸的 HC-ARF 低了 3 个数量级。使用两级对称绕法,成功测得了弯曲半径低至 0.25 cm 的 HC-PBGF 的弯曲损耗,波长 1064 nm 处的弯曲损耗为每圈  $3.63 \times 10^{-3}$  dB。研究结果证明 HC-PBGF 比 HC-ARF 有着更强的抗弯特性,更适用于高精度小型化光纤陀螺。首次实验测量了不同张力下的 HC-PBGF 陀螺环的插入损耗,证明了 HC-PBGF 的插入损耗与张力正相关。为了减小绕环过程中张力引起的环体损耗的增加量,HC-PBGF 陀螺环应在小张力情况下进行绕制。研究成果对推进空芯光纤在光纤陀螺中的应用有着重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, et al. Hollow-core fibers for high power pulse delivery[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [2] Beaudou B, Gerôme F, Wang Y Y, et al. Millijoule laser pulse delivery for spark ignition through kagome hollow-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1430-1432.
- [3] Mousavi S A, Mulvad H C H, Wheeler N V, et al. Nonlinear dynamic of picosecond pulse propagation in atmospheric air-filled hollow core fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8866-8882.
- [4] 王鑫, 姜淑琴, 廉正刚, 等. 空芯光子带隙光纤色散特性的实验研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194212.  
Wang X, Lou S Q, Lian Z G, et al. Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194212.
- [5] 冯丽爽, 焦洪臣, 李慧, 等. 空芯光子晶体光纤谐振式光学陀螺技术[C]//2016 年光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会论文集. 北京: 中国惯性技术学会, 2016.  
Feng L S, Jiao H C, Li H, et al. Hollow core photonic crystal fiber resonant optical gyro technology[C]//Proceedings of the 2016 Symposium on Optical Gyroscope and System Technology Development and Application. Beijing: Chinese Society of Inertia Technology, 2016.
- [6] 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.
- [7] Suo X X, Yu H C, Li J, et al. Transmissive resonant fiber-optic gyroscope employing Kagome hollow-core photonic crystal fiber resonator[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2227-2230.
- [8] Knight J C, Russell P S J. Applied optics: new ways to guide light [J]. *Science*, 2002, 296(5566): 276-277.
- [9] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [10] Knight J C. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [11] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [12] Sakr H, Bradley T D, Jasion G T, et al. Hollow core NANFs with five nested tubes and record low loss at 850, 1060, 1300 and 1625 nm[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [13] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [14] Carter R M, Yu F, Wadsworth W J, et al. Measurement of resonant bend loss in anti-resonant hollow core optical fiber[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20612-20621.
- [15] Gu S, Wang X, Yan S B, et al. Low bending loss single-mode hollow-core anti-resonant fiber with multi-size tubes[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, June 6-11, 2021, Washington, DC. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: F4C.5.
- [16] Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 315-340.
- [17] Amezcua-Correa R, Gerôme F, Leon-Saval S G, et al. Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [18] Uebel P, Günendi M C, Frosz M H, et al. Broadband robustly single-mode hollow-core PCF by resonant filtering of higher-order modes[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1961-1964.
- [19] Petermann K, Kuhne R. Upper and lower limits for the microbending loss in arbitrary single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(1): 2-7.
- [20] Roberts P J, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [21] Fokoua E N, Sandoghchi S R, Chen Y, et al. Accurate modelling of fabricated hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23117-23132.
- [22] Roberts P J, Williams D P, Mangan B J, et al. Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 8277-8285.
- [23] Heiblum M, Harris J. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(2): 75-83.
- [24] Frosz M H, Roth P, Günendi M C, et al. Analytical formulation for the bend loss in single-ring hollow-core photonic crystal fibers [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 88-91.
- [25] Fokoua E N, Richardson D J, Poletti F. Impact of structural distortions on the performance of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2735-44.
- [26] 李汉钊, 钱伟文, 刘路, 等. 谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0901002.

Li H Z, Qian W W, Liu L, et al. Analysis and optimization of angle random walk of resonant fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0901002.

[27] 雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研

究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0106002.

Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Out-of-lock frequency-tracking control of resonant fiber-optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0106002.

## Research on Bending Characteristics of Hollow-Core Micro-Structured Fibers for Development of Fiber Optic Gyroscopes

Gu Shuai<sup>1</sup>, Pi Pengcheng<sup>2</sup>, Lian Zhenggang<sup>2\*</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Sheng Xinzhi<sup>1</sup>, Lou Shuqin<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Communication and Information System, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

<sup>2</sup>Yangtze Optical Electronic Company, Wuhan 430074, Hubei, China

### Abstract

**Objective** Confining light in air- and hollow-core microstructured fibers has many advantages such as low nonlinearity, low scattering, low dispersion, low loss, and low delay that are expected to break through the limits of fiber optic gyroscopes caused by the backscattering, Faraday effect, Kerr effect, and Shupe effect. They have become a hot topic in the research on a new generation of high-precision fiber optic gyroscopes. At small bending radii (on the order of millimeters), the optical fiber generates large stress and torsion owing to deformation, making it difficult to measure the bending loss. Therefore, there are few experimental reports on the bending loss of hollow-core photonic bandgap fiber (HC-PBGF) under an extremely small bending radius. In addition, in the winding process of the fiber optic gyro ring, to overcome the stress during bending and make the optical fibers compact, it is often necessary to apply a certain tension that would also increase bending loss. Therefore, it is of great significance for the development of high-precision fiber optic gyroscopes to research the bending loss of hollow-core microstructure fibers.

**Methods** Hollow-core microstructured fibers are mainly divided into HC-PBGFs and hollow-core anti-resonant fibers (HC-ARFs). In this study, these two hollow-core microstructured fibers with excellent performance are drawn using the stack and draw technology. The finite element method combined with a perfect matching layer is used to simulate the scattering and confinement losses of two hollow-core fibers in straight and bent states. In the bending loss measurement, the light of the supercontinuum source is drawn out through the pigtail of the single-mode fiber and coupled into the hollow-core fiber through the fusion splicer. Optical fibers are wound onto cylinders with different bending radii, and the output of the optical fibers is connected to the spectrometer. The bending loss is determined by the difference in the spectra before and after bending. Furthermore, the HC-PBGF is tightly wound on the gyro ring skeleton by applying different tensions in turn with a fiber optic gyro winding machine, and the bending loss is measured using the truncation method.

**Results and Discussions** Two types of hollow-core microstructured fibers propagating mainly at a wavelength of 1550 nm are successfully fabricated. The duty ratio of the HC-PBGF is as high as 97.6%, its core diameter is 32.8  $\mu\text{m}$ , and the thickness of the lattice wall is between 40 nm and 75 nm. As for the fabricated HC-ARF, the core diameter, wall thickness of the cladding, and inner diameter of the cladding tube are 34.5  $\mu\text{m}$ , 553 nm, and 23.8  $\mu\text{m}$ , respectively. In terms of the simulated results, the bending loss of the HC-PBGF is 2–3 orders of magnitude lower than that of the HC-ARF at small bending radii (Fig. 4). The confinement loss of the PBGF begins to increase sharply when the bending radius is reduced to 1 cm, and the mode field of the fundamental mode shifts severely, but no coupling exists between the wall dielectric mode and the core fundamental mode. For the HC-ARF, the core and cladding modes achieve phase matching when the bending radius is 3.5 cm and the energy of the core leaks into the cladding. The experimental results show that in the wavelength of 1624 nm, the bending losses of the PBGF under bending radii of 5 cm, 3 cm, and 1 cm are 1.38 dB/km, 11.74 dB/km, and 23.29 dB/km, respectively. When the bending radius is less than 1 cm, the bending loss increases significantly. For example, at an extremely small bending radius of 0.25 cm, the bending loss at 1624 nm rapidly increases to 231.58 dB/km (Fig. 6). However, the bending loss of the HC-ARF is 2–3 orders of magnitude higher than that of the HC-PBGF (Fig. 7). At the wavelength of 1550 nm, after applying stresses of 0.1 N, 0.5 N, and 0.9 N using the fiber gyro loop winding machine, the ring losses increase by 3.69 dB/km, 16.43 dB/km, and 70.15 dB/km, respectively.

**Conclusions** This study proves that the HC-PBGF has a better bending resistance than the HC-ARF. By using the bipolar symmetric winding method, the bending loss of the HC-PBGF at an extremely tight bending radius of 0.25 cm is successfully measured, which is 231.58 dB/km @1624 nm. This is the current lowest bend loss reported for such a tight bending radius. Furthermore, the losses of the HC-PBGF loop under different winding tensions are measured for the first time oriented to the application of a fiber optic gyro. The results show that the losses of the HC-PBGF loop increase significantly as the winding tension increases. Therefore, the winding of the HC-PBGF loop should be performed under small tensions. The research results are of great significance for promoting the application of hollow-core microstructured fibers in fiber optic gyros.

**Key words** fiber optics; fiber design and fabrication; fiber measurement; fiber sensor; fiber optic gyro