

# 一种红外波段低损耗空芯反谐振光纤的设计与研究

韩颖<sup>1\*</sup>, 董婷婷<sup>1</sup>, 卿源<sup>1</sup>, 宋朋<sup>2</sup>, 朱维震<sup>1</sup>, 周凡迪<sup>1</sup>, 李正然<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>,  
侯蓝田<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;  
2. 济南大学 物理科学与技术学院, 山东 济南 250022)

**摘要:**提出一种红外波段低损耗的空芯反谐振光纤, 石英包层管为半圆半椭圆拼接结构, 采用全矢量有限元法进行设计与研究。半椭圆管的半短长轴与半圆管的半径相等, 将半圆管与半椭圆管进行拼接, 改变半圆的半径以及半椭圆管的半长轴来改变靠近纤芯处的负曲率以及远离纤芯的正曲率, 进而研究包层管的正负曲率对空芯反谐振光纤的损耗特性的影响, 设计应用于 1.5~3.0  $\mu\text{m}$  波段的低损耗空芯反谐振光纤。结果显示负曲率较小正曲率较大时限制损耗效果更好。当靠近纤芯处为圆形半管远离纤芯处为椭圆半管, 圆形半径  $r_y=25 \mu\text{m}$ , 椭圆的半长轴  $r_x=65 \mu\text{m}$ , 半短长轴  $r_z=25 \mu\text{m}$  时, 光纤最低限制损耗在波长 2.1  $\mu\text{m}$  处为  $8.22 \times 10^{-2} \text{ dB/km}$ 。

**关键词:** 红外波段; 空芯反谐振光纤; 负曲率; 限制损耗

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Low loss hollow-core anti-resonant fiber in infrared band

HAN Ying<sup>1\*</sup>, DONG Ting-Ting<sup>1</sup>, QING Yuan<sup>1</sup>, SONG Peng<sup>2</sup>, ZHU Wei-Zhen<sup>1</sup>, ZHOU Fan-Di<sup>1</sup>,  
LI Zheng-Ran<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, HOU Lan-Tian<sup>1</sup>

(1. The key laboratory for special fiber and fiber sensor of Hebei Province, Institute of information science and technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;  
2. School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** A hollow-core anti-resonant fiber is proposed with low confinement loss in infrared band. The cladding tube is a semicircular semi-elliptical splicing structure. The full vector finite element method is used for the simulation. The semi-minor axis of the semi-elliptical tube is equal to the radius of the semicircular tube. A semi-circular tube and a semi-elliptical tube are spliced to form a semi-circular semi-elliptical cladding tube. The negative curvature and the positive curvature are changed by improving the structure parameters of the tube. The purpose of this paper is to study the loss characteristics of the positive and negative curvature of the cladding tube, and to design a low loss hollow core anti-resonant fiber applied in the 1.5~3.0  $\mu\text{m}$  band. The results show that the effect of limiting loss is better when the negative curvature decreases and the positive curvature increases. The lowest confinement loss is  $8.22 \times 10^{-2} \text{ dB/km}$  at the wavelength of 2.1  $\mu\text{m}$  when the semi-circular tube is close to the core and the elliptical tube is far away from the core, as well as the circular radius  $r_y=25 \mu\text{m}$ , the semi-major axis of the ellipse  $r_x=65 \mu\text{m}$ , the semi-minor axis of the ellipse  $r_z=25 \mu\text{m}$ .

**Key words:** infrared band, hollow-core anti-resonant fiber, negative curvature, confinement loss

PACS: 42.25.Dd, 42.70.Km, 42.81.Dp, 42.81.Qb

收稿日期: 2019-09-20, 修回日期: 2019-11-19

Received date: 2019-09-20, Revised date: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61405173, 61971373), 河北省自然科学基金(F2019203549, F2019203440)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61405173, 61971373), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2019203549, F2019203440)

作者简介(Biography): 韩颖(1976—), 女, 天津人, 副教授, 博士学位, 主要研究领域为特种光纤方面. E-mail: hanyingysu@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hanyingysu@163.com

## 引言

红外光纤在材料分析、医疗诊断、工业加工等方面的重要应用使得红外波段光纤有较大的研究价值<sup>[1]</sup>。实芯光纤在红外波段吸收损耗较高,因此红外波段的传输主要应用空芯光纤。传统的红外空芯光纤有金属光纤、混合型光纤、电解质光纤<sup>[2]</sup>。金属光纤和混合型光纤都具有造价高且不易制备等缺点,电解质光纤同样制作复杂且化学稳定性差。为了解决这些问题,俄罗斯科学院提出了包层由一层石英毛细管组成的空芯微结构光纤,实现了波长大于 $3.5\ \mu\text{m}$ 的中红外光的低损耗传输<sup>[3]</sup>。这种单层石英毛细管构成的微结构光纤称之为空芯负曲率光纤。因其包层结构简单容易拉制,同时具有低传输损耗、低非线性和高损伤阈值等优势<sup>[4-8]</sup>,引起越来越多研究人员的兴趣。空芯负曲率光纤的导光机理是反谐振反射,也被称为空芯反谐振光纤。空芯负曲率光纤边界形状的改变有利于降低损耗<sup>[9]</sup>,通过改变圆形包层管的曲率,将其变为曲率较大的椭圆管,可以在宽波长区域上提供低损耗传输<sup>[10]</sup>。为进一步降低传输损耗开展了一些复杂形状的包层管的研究,如:冰激凌筒型包层<sup>[11]</sup>、方形芯曲率边界<sup>[12]</sup>、径向不对称包层<sup>[13]</sup>,以及汪滢莹提出的新型连接管反谐振光纤<sup>[14]</sup>。对于较长的红外波段,材料吸收损耗较高,硫属化物玻璃替代传统的石英玻璃可以降低吸收损耗。在波长小于 $3.5\ \mu\text{m}$ 的红外波段,材料损耗较低可忽略不计<sup>[15]</sup>,因此在小于 $3.5\ \mu\text{m}$ 的红外波段依旧选择二氧化硅作为基底材料。

设计应用于医用波长 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的光纤。采用半圆半椭圆拼接的方式研究包层管曲率变化对空心反谐振光纤传输损耗的影响,寻找影响传输损耗的光纤参数,对其进行优化设计,降低红外波段光纤的传输损耗,从而实现 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的低损耗传输。

## 1 光纤几何结构设计

为了研究空芯反谐振光纤包层管的正负曲率对传输损耗的影响,将圆分为两个半圆,即靠近纤芯的负曲率半圆,远离纤芯的正曲率半圆。将曲率较小的半圆与曲率较大的半椭圆拼接产生两种包层结构:靠近纤芯处为半椭圆远离纤芯处为半圆(半椭圆半圆包层管)、靠近纤芯处为半圆远离纤芯处为半椭圆(半圆半椭圆包层管)。将两种改进结

构与传统结构对比,系统地研究了四种结构的空芯反谐振光纤的损耗特性。四种包层结构空芯反谐振光纤的端面图如图1所示。采用无节点包层结构,因为包层管之间有节点会造成传输带的附加共振<sup>[16]</sup>。所以采用无节点包层结构。

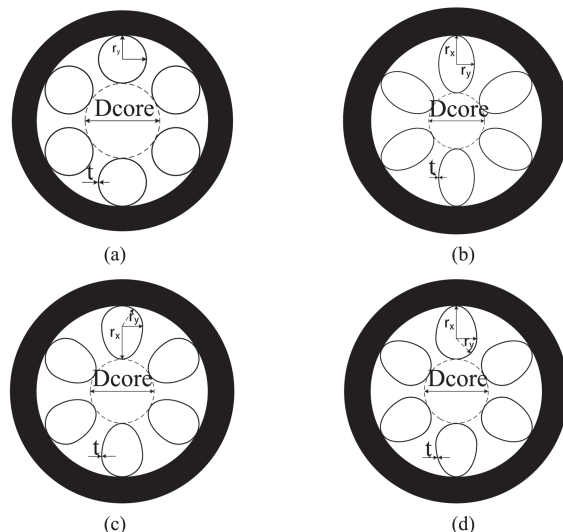


图1 四种包层结构空芯反谐振光纤的端面图 (a) 圆形包层管, (b) 椭圆包层管, (c) 半椭圆半圆包层管, (d) 半圆半椭圆包层管

Fig.1 The geometry of the hollow-core anti-resonant optical fiber with four cladding tube structures (a) circular tube, (b) elliptical tube, (c) semi-elliptical semi-circular tube, (d) semi-circular semi-elliptical tubes

四种光纤纤芯直径相同,  $D_{\text{core}}=77\ \mu\text{m}$ , 包层管的厚度相同,  $t=0.7\ \mu\text{m}$ , 椭圆半长轴为 $r_x$ , 椭圆半短轴为 $r_y$ , 圆的半径与椭圆半短轴相等。在全文中 $D_{\text{core}}$ 与 $t$ 都是定值, 不作为变量, 而 $r_x$ 与 $r_y$ 作为变量进行研究。芯直径定义为可以内切在芯内的圆的最大直径, 如图1的虚线圆所示。选择壁厚 $t$ 产生大约以 $2.8\ \mu\text{m}$ 为中心的第二个反谐振透射带。最典型的空芯反谐振光纤是六个无节点的圆形反谐振管, 如图1(a)所示。图1(b)是已经研究过的椭圆包层管。图1(c)与图1(d)是改进的两种结构, 半椭圆管与半圆管拼接。对四种光纤结构进行模拟研究, 探究靠近纤芯处的曲率变化以及远离纤芯处的曲率变化对传输损耗的影响。

## 2 数值模拟和结果分析

该研究采用全矢量有限元法进行数值模拟。图1中黑色区域为二氧化硅材料, 白色区域为空气, 空气的有效折射率 $n_{\text{air}}=1$ 。二氧化硅的折射率受波

长影响。用 Sellmeier 公式(1)求解<sup>[17]</sup>:

$$n_{\text{silica}}^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}, \quad (1)$$

其中  $\lambda_j$  是第  $j$  个谐振波长,  $B_j$  是第  $j$  个谐振波长的强度。通常采用前三项, 参数如表 1 所示。

表 1 Sellmeier 公式参数

Table 1 The parameter of Sellmeier

$B_1=0.6961663$	$B_2=0.4079426$	$B_3=0.8974794$
$\lambda_1=0.0684043$	$\lambda_2=0.1162414$	$\lambda_3=9.896161$

为了准确地模拟光纤的泄漏损耗, 在光纤域外使用了完美匹配层(PML), 以减小模拟窗口的尺寸, 并且根据先前的研究<sup>[18]</sup>优化了网格尺寸和 PML 参数。

## 2.1 限制损耗

图 1 中的四种结构模拟结果如图 2 所示。纤芯直径  $D_{\text{core}}=77 \mu\text{m}$ , 包层管厚度  $t=0.7 \mu\text{m}$ , 椭圆半长轴  $r_x=40 \mu\text{m}$ , 圆半径以及椭圆半短轴  $r_y=25 \mu\text{m}$ 。不同包层管的损耗用不同的曲线样式进行区分, 圆形包层管是划线, 椭圆包层管是实线, 半圆半椭圆包

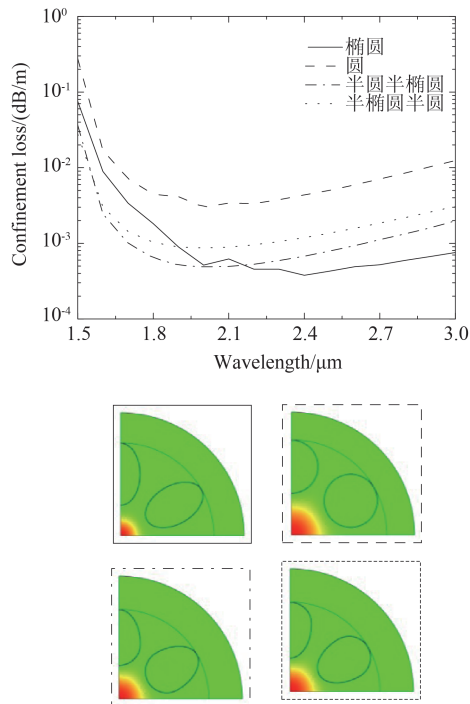


图 2 四种包层结构空芯反谐振光纤的限制损耗(左); 四种包层结构基模的模场图(右); 包层管参数  $r_x=40 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$

Fig. 2 Confinement loss of hollow-core anti-resonant fibers (left) and mode profile (right) with four cladding structures, the parameters of cladding tubes,  $r_x=40 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$

层管是点划线, 半椭圆半圆包层管是点线, 四种包层结构纤芯基模的模场图如图 2 右侧所示, 模场图的边框线条样式与损耗曲线的样式一一对应。模拟结果显示, 靠近纤芯的曲率增大、远离纤芯的曲率增大、两端曲率都增大三者都可以减少损耗, 这是因为任何一端曲率增大都可以改变纤芯基模与包层管模式的有效折射率的差值, 增加纤芯与包层管的模式不匹配, 进而更好地抑制耦合。在小于  $1.9 \mu\text{m}$  的较短波长处, 半圆半椭圆管包层结构的损耗最低。在大于  $2.2 \mu\text{m}$  的长波处, 椭圆管包层结构的损耗最低。

由于半圆管替代半椭圆管之后, 包层管径向长度变小, 光纤尺寸变小。为对比两种改进结构与椭圆包层管结构在限制损耗方面的优势, 研究曲率对光纤损耗的影响。将两种改进的包层管的径向长度变大, 即半圆管半径不变, 半椭圆管半长轴增加, 让椭圆径向长度与两种改进的包层管的径向长度相等, 三种结构光纤尺寸相等。模拟结果如图 3 所示。椭圆包层管  $r_x=40 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ , 半椭圆半圆包层管以及半圆半椭圆包层管的半长轴  $r_x=55 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ , 此时三种包层管的面积相等, 径向长度相等, 光纤端面直径相同。

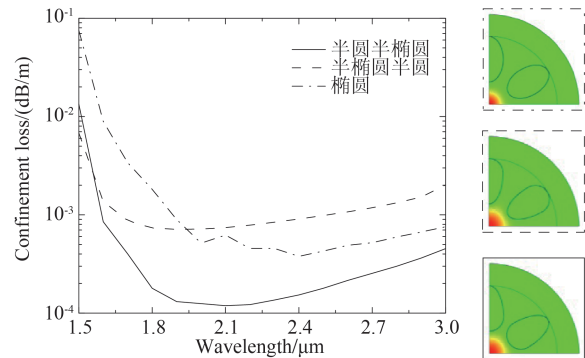


图 3 三种包层结构空芯反谐振光纤的限制损耗(左); 三种结构基模的模场图(右); 椭圆管  $r_x=40 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ ; 两种改进的管  $r_x=55 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$

Fig. 3 Confinement loss of hollow-core anti-resonant fibers (left) and mode profiles (right) with three cladding structures, elliptical tube,  $r_x=40 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ , two improved tubes  $r_x=55 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$

限制损耗模拟结果如图 3 左侧所示, 基模的模场图如图 3 右侧所示。模拟结果通过三条曲线对比显示, 径向长度增加之后半圆半椭圆结构在  $1.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$  损耗降低, 整个波段损耗都比椭圆包层管低, 而半椭圆半圆管在大于  $2.0 \mu\text{m}$  时损耗升高。因



为三种结构在径向长度与光纤尺寸相等的情况下,半圆半椭圆管在靠近纤芯处曲率小,导致间隙是最小的,更少的光泄露出去,因此损耗最低。而半椭圆半圆管光纤结构,半椭圆径向变长,导致靠近纤芯的部分曲率变大,管间隙变大,更多的光泄露出去,因此损耗变大。

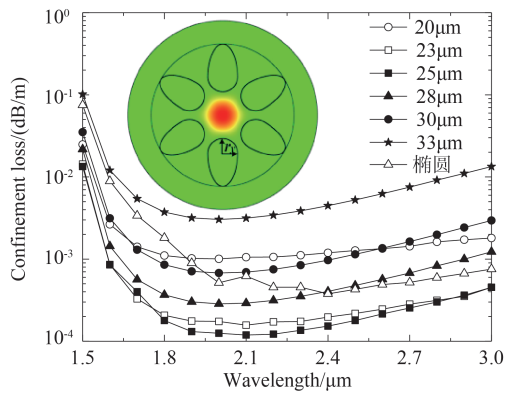


图4 不同 $r_y$ 条件下的半圆半椭圆包层管的限制损耗  
Fig. 4 Confinement loss of semicircular semi-elliptical cladding tubes in different  $r_y$  conditions

接下来对两种改进管分别进行研究寻找最优条件。半圆半椭圆管靠近纤芯的曲率改变,即半圆的半径 $r_y$ 同时也是半椭圆的半短长轴 $r_y$ 改变,研究靠近纤芯曲率变化对限制损耗的影响。令 $r_y$ 分别在 $20\ \mu\text{m}$ 、 $23\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $28\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $33\ \mu\text{m}$ 的条件下,模拟光纤的传输损耗。模拟结果如图4所示,不同的长度对应不同符号的曲线,空芯三角形为椭圆的传输损耗,插图为波长 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $r_x=55\ \mu\text{m}$ 、 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 的半圆半椭圆模场图,结果显示在 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 时损耗最低。表明在 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 是曲率最优的情况,也是间隙最优的情况,在保证无附加共振的情况下最少的光泄露。

将 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 固定不变,研究远离纤芯的正曲率变化,即 $r_x$ 改变对光纤损耗的影响。设置 $r_x$ 分别为 $55\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ 、 $65\ \mu\text{m}$ 、 $70\ \mu\text{m}$ 、 $75\ \mu\text{m}$ ,模拟光纤的限制损耗,模拟结果如图5所示。不同长度的 $r_x$ 对应不同标识的曲线,椭圆损耗用黑色五角星表示,插图为波长 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 、 $r_x=65\ \mu\text{m}$ 的模场图。发现 $r_y$ 不变的情况下,径向改变损耗都低于椭圆管,说明在半圆半椭圆结构下,靠近纤芯的负曲率是影响传输损耗的主要因素。在小于 $1.8\ \mu\text{m}$ 的短波处损耗基本重合,在大于 $1.8\ \mu\text{m}$ 时损耗曲线分开,但相差不大。在 $r_x=65\ \mu\text{m}$ 时损耗最低,此时波长为 $2.1\ \mu\text{m}$ 损耗为 $8.22\times 10^{-2}\ \text{dB/km}$ ,此时损耗远低于其他

结构。半圆半椭圆管结构是四种结构中的最优结构,因为可以在保证负曲率最优,也就是泄露最少的情况下,通过改变正曲率增加抑制耦合。而椭圆管在调整抑制耦合的情况下间隙也随之变化,此时两个变量同时变化最优条件也是相对的。

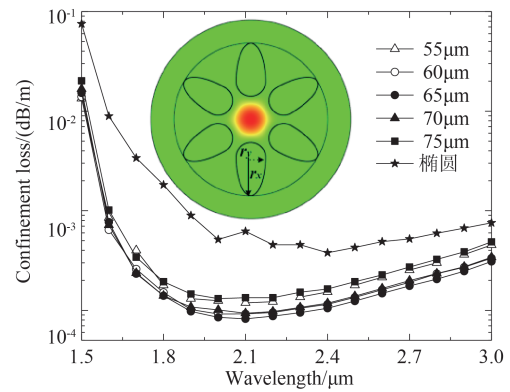


图5 不同 $r_x$ 条件下的半圆半椭圆包层管的限制损耗  
Fig. 5 Confinement loss of semicircular semi-elliptical cladding tubes in different  $r_x$  conditions

研究半椭圆半圆包层结构的损耗特性,通过改变椭圆长轴半轴 $r_x$ 改变负曲率, $r_x$ 分别为 $40\ \mu\text{m}$ 、 $45\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 、 $55\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ ,模拟光纤的限制损耗,模拟结果如图6所示,不同的 $r_x$ 用不同的标识表示,黑色五角星标识为椭圆损耗,插图为 $r_y=25\ \mu\text{m}$ 、 $r_x=50\ \mu\text{m}$ ,波长为 $1.9\ \mu\text{m}$ 的模场图。对比结果显示半椭圆半圆包层管在长轴半轴为 $50\ \mu\text{m}$ 时光纤损耗最低,但是总体差距不大,并且短波处损耗较低长波处损耗相对较高。主要是因为长轴变长,曲率变大,间隙变大,光纤尺寸变大。在增加包层面积时抑制耦合增强,但是泄露也增强,所以整体损耗变化不明显。因此半圆半椭圆管与半椭圆半圆管相

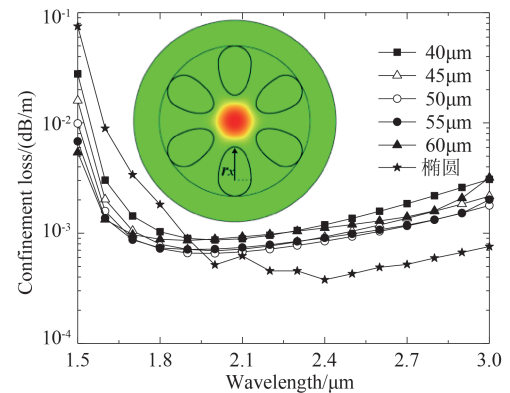


图6 不同 $r_x$ 条件下的半椭圆半圆包层管的限制损耗  
Fig. 6 Confinement loss of semi-elliptical semicircular cladding tubes in different  $r_x$  conditions

比更有优势。

## 2.2 弯曲损耗

对光纤的弯曲特性进行研究,模拟改进光纤结构的弯曲损耗。弯曲损耗通过公式(2)求解:

$$n_b = n(x,y)e^{(x/R_b)} \quad (2)$$

其中  $R_b$  是弯曲半径,  $x$  是弯曲方向,  $n(x,y)$  是直光纤的有效折射率,  $n_b$  是弯曲之后的有效折射率。图 7 左端描述了计算的半圆半椭圆包层管结构的弯曲损耗与弯曲半径的关系,波长  $1.9 \mu\text{m}$ , 弯曲半径在  $5\sim 40 \text{ cm}$ ,  $r_x=65 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ 。两条不同样式的曲线分别表示不同的弯曲方向,实线表示向  $x$  轴弯曲,划线表示向  $y$  轴弯曲。图 7 右端是  $x$  轴、 $y$  轴两种弯曲方向的模场图,从光斑位置可以看出弯曲方向为  $x$  轴正半轴和  $y$  轴正半轴。从图中可以看出,两个弯曲曲线并没有完全重合,因为向  $x$  轴弯曲时,是在管间隙的位置,因此弯曲半径较大的时候损耗依旧较大。而向  $y$  轴弯曲,是在包层管的位置,在反谐振和抑制耦合的共同作用下,限制损耗在半径较大的时候损耗变小。

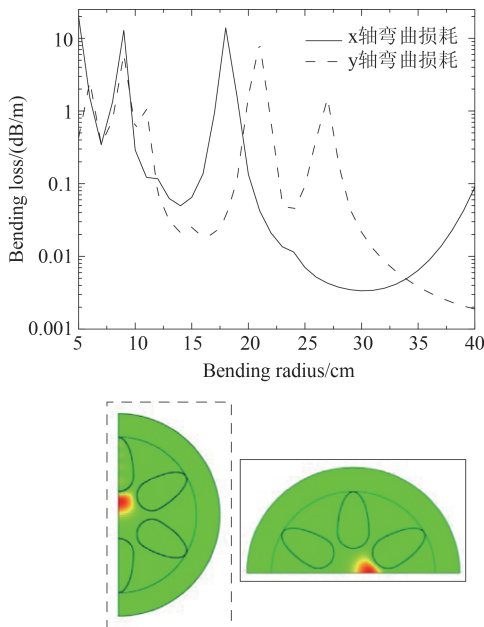


图 7 半圆半椭圆包层管结构两种方向的弯曲损耗与弯曲半径的函数关系(左);两种方向的模场图(右)

Fig. 7 The bending loss as a function of the bending radius (left) and the mode field (right) in two directions of a semicircular semi-elliptical cladding tubes structure

接下来,研究两种改进光纤结构的弯曲损耗。两种改进结构向  $y$  轴弯曲,弯曲半径  $5\sim 40 \text{ cm}$ , 波长为  $1.9 \mu\text{m}$ 。半圆半椭圆包层管  $r_x=65 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ , 半

椭圆半圆包层管  $r_x=50 \mu\text{m}$ ,  $r_y=25 \mu\text{m}$ 。模拟结果如图 8 所示。图 8 左侧描述了半圆半椭圆包层管结构与半椭圆半圆包层管结构的弯曲损耗与弯曲半径的函数关系,黑色划线为半圆半椭圆包层管,实线为半椭圆半圆包层管。图中结果显示半圆半椭圆包层管的整体弯曲损耗都较小,主要因为半圆半椭圆管的负曲率大,间隙小,同时半圆半椭圆结构抑制耦合能力强,因此弯曲损耗小。图 8 右侧为两种改进结构向  $y$  轴弯曲的模场图。通过光斑的位置,可以判断是向  $y$  轴的正半轴弯曲。

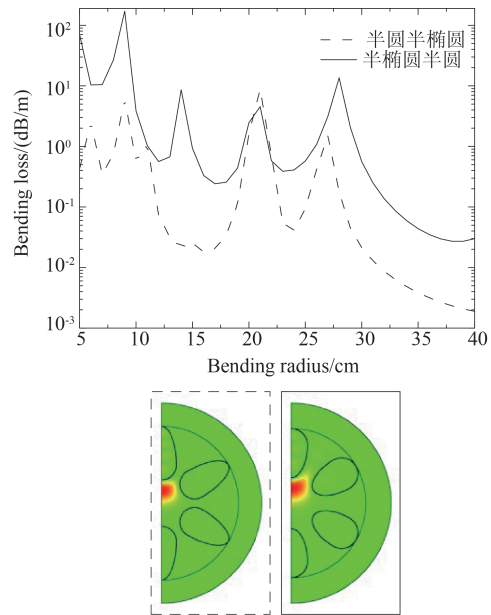


图 8 两种改进结构的弯曲损耗与弯曲半径的函数关系(左);两种结构的模场图(右)

Fig. 8 The bending loss as a function of the bending radius (left) and the mode field diagram (right) for two improved structures

## 2.3 单模特性

为了更好地研究半圆半椭圆管光纤的单模特性,模拟光纤基模、高阶模的有效折射率和限制损耗,模拟结果如图 9(a)和(b)所示。基模为  $LP_{01}$  模,高阶模式为  $LP_{11}$  模和  $LP_{21}$  模,模场图如图 9(d)所示,不同模场图的边框样式对应不同模式的曲线。该图显示基模具有比高阶模式更高的有效折射率。较高的模式有效折射率导致较高的入射角和芯与包层界面处的较好反射<sup>[19]</sup>。因此,基模具有最低的限制损失,如图 9(b)所示。在图 9(c)中,绘制了高阶模消光比(HOMER)。HOMER 定义为具有最低损耗的高阶模的限制损耗与基模的限制损耗之间的比值<sup>[20]</sup>。它给出了光纤的单模特性的判断依据。

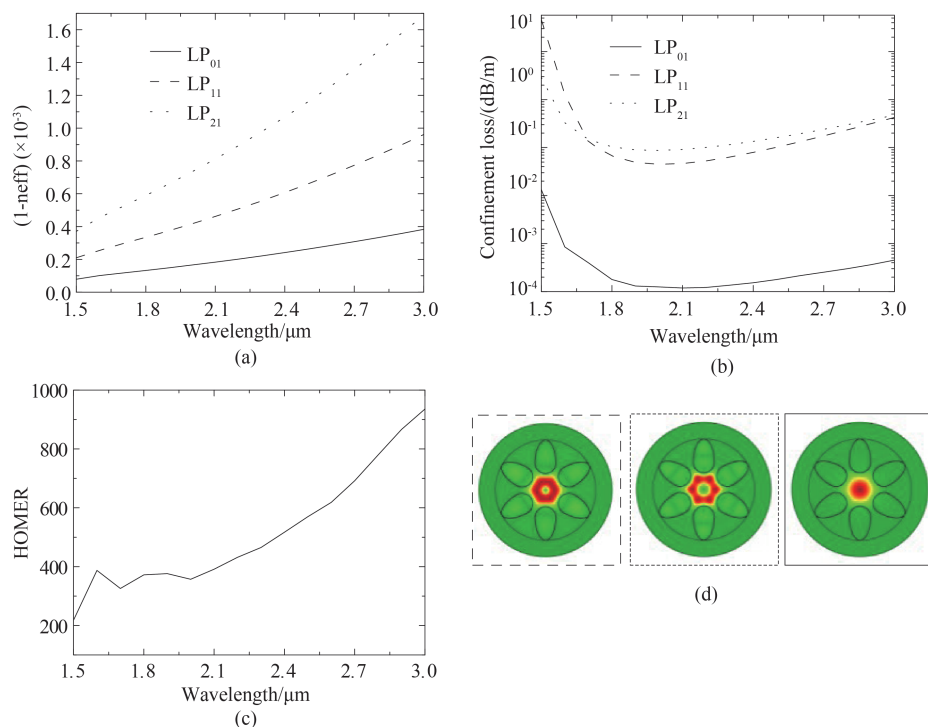


图9 半圆半椭圆结构的(a)有效折射率,(b)限制损耗,(c)高阶模消光比,(d)纤芯模式的模场图

Fig.9 Wavelength dependence of (a) the effective index, (b) confinement loss of the fundamental mode ( $LP_{01}$ ) and two higher-order modes ( $LP_{11}$  and  $LP_{21}$ ), (c) HOMER, and (d) mode profiles

从图9(c)中,高阶模消光比在整个波段范围内相对较高,确保光纤的单模传输。最高的高阶模消光比的值在  $3 \mu\text{m}$  为 936。图9(c)中在  $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$  之间有一个小峰值,是因为两个高阶模  $LP_{11}$  和  $LP_{21}$  在限制损耗的交点,导致高阶模损耗都较高,基模的单模特性较好。

### 3 结论

综上所述,研究了空芯反谐振光纤包层管的正负曲率变化对传输损耗的影响,采用有限元的方法对四种光纤结构进行模拟。结果显示,在一定范围内增大正曲率,减小负曲率,可得到更小的限制损耗。证明了半圆半椭圆管与其他三种结构相比在红外波段具有更好的传输性能。同时证明了,半圆半椭圆结构也具有较好的抗弯曲特性和单模特性。并确定了在无嵌套管的情况下,实现在  $2.1 \mu\text{m}$  波长处  $8.22 \times 10^{-2} \text{ dB/km}$  的低损耗结构以及低弯曲损耗。

### References

[1] HOU Zhi-Yun, HONG Wen-Xue, ZHAO Bing, *et al.* The characteristics of the new wide-band mid-infrared optical fiber [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (侯峙云, 洪文学, 赵兵, 等. 一种创新结构宽波段中红外空芯光纤的设计与研究. *红外与毫米波学报*) 2013, **32**(1):28-31.

[2] HAN Shu-Min, ZHOU Gui-Yao, HOU Lan-Tian, *et al.* Progress in research on infrared hollow optical fiber [J]. *Materials Reviews*, (韩树民, 周桂耀, 侯蓝田, 等. 红外空芯传能光纤的研究进展. *材料导报*) 2002, **16**(6): 35-38.

[3] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, *et al.* Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $> 3.5 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2):1441-1448.

[4] Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476-1478.

[5] Broeng J, Barkou S E, Søndergaard T, *et al.* Analysis of air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(2):96-98.

[6] Pearce G, Pottage J, Bird D, *et al.* Hollow-core PCF for guidance in the mid to far infra-red [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(18):6937-6946.

[7] Goncharenko I A, Marsin'yak M, Konoiko A I, *et al.* Optimization of the structure of an optical vectoral bend and stress sensor based on a three-core microstructured fiber [J]. *Measurement Techniques*, 2013, **56**(1):65-71.

[8] Menyuk C R, Hu J. Leakage loss and bandgap analysis in air-core photonic bandgap fiber for nonsilica glasses [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2):339-349.

[9] WANG Ying-Ying, Couny F, Roberts P J, *et al.* Low loss broadband transmission in optimized core-shape Kagome hollow-core PCF [C]. San Jose, USA. 2010:1-2.

[10] Chaudhuri S, Van Putten L, Poletti F, *et al.* Low loss

- transmission in negative curvature optical fibers with elliptical capillary tubes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(18):4228–4231.
- [11] YU Fei, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss (34 dB/km) silica hollow core fiber for the 3  $\mu\text{m}$  spectral region [C]. Colorado Springs, USA. 2012:17–20.
- [12] YANG Chen, Saleh M F, Joly N Y, *et al.* Low-loss single-mode negatively curved square-core hollow fibers [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(7):1285–1288.
- [13] YU Tao-Ying, LIU Xue-Song, FAN Zhong-Wei. Hollow core antiresonant fiber with radially asymmetric nodeless claddings [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **10**(1): 1–1.
- [14] GAO Shou-Fei, WANG Ying-Ying, DING Wei, *et al.* Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 2828–2833.
- [15] WEI Cheng-Li, Jonathan H, Menyuk C R. Comparison of loss in silica and chalcogenide negative curvature fibers as the wavelength varies [J]. *Frontiers in Physics*, 2016, **4**(24):30–39.
- [16] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, *et al.* Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8):9514–9519.
- [17] ZHANG Jiang-Bin, WANG Ze-Feng, CHEN Jin-Bao. Simulations of negative curvature hollow-core fiber [C]. Shang Hai, China, 2014.
- [18] Habib M S, Bang O, Bache M. Low-loss hollow-core silica fibers with adjacent nested anti-resonant tubes [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(13):17394 – 17406.
- [19] Hasan M, Akhmediev N, Chang W. Positive and negative curvatures nested in an antiresonant hollow-core fiber [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(4):703–706.
- [20] Habib M, Antoniolopez J, Markos C, *et al.* Single-mode low loss hollow-core anti-resonant fiber designs [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(4):3824–3836.