

引用格式: CAO Shanshan, GUO Chaoyang, XU Haitao, et al. Fabrication and Experiment of a Small-size Anti-bending Optical Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0506001

曹珊珊,郭朝阳,徐海涛,等.一种小尺寸抗弯曲光纤的制备与性能研究[J].光子学报,2021,50(5):0506001

# 一种小尺寸抗弯曲光纤的制备与性能研究

曹珊珊<sup>1,2</sup>, 郭朝阳<sup>3</sup>, 徐海涛<sup>2</sup>, 油光磊<sup>2</sup>, 刘志忠<sup>2</sup>, 郑加金<sup>1</sup>, 韦玮<sup>1</sup>

(1 南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

(2 中天科技光纤有限公司, 江苏 南通 226009)

(3 中天海洋系统有限公司, 江苏 南通 226010)

**摘要:** 制备了一种外径远小于常规 G.652 光纤的大模场抗弯曲单模光纤。通过设计凹陷包层的预制棒结构,提高光缆光纤的抗弯曲性能,同时保持与 G.652 光纤相似的模场直径。测试结果显示光纤涂层外径为 180  $\mu\text{m}$ 、模场直径为 9.1  $\mu\text{m}$ ,且在 7.5 mm 半径单圈弯曲下,其宏弯损耗低于 0.4 dB @1 550 nm,长期环境性能附加衰减不大于 0.03 dB/km。利用这种新型光纤制备的光缆可节约 44% 的空间,能有效地铺设于拥挤和狭窄的通道中。

**关键词:** 单模光纤; 弯曲损耗; 小尺寸; 抗弯曲; 包层下陷

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215005.0506001

## Fabrication and Experiment of a Small-size Anti-bending Optical Fiber

CAO Shanshan<sup>1,2</sup>, GUO Chaoyang<sup>3</sup>, XU Haitao<sup>2</sup>, YOU Guanglei<sup>2</sup>, LIU Zhizhong<sup>2</sup>,  
ZHENG Jiajin<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>

(1 College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(2 Zhongtian Technology Fibre Optics Co., Ltd, Nantong, Jiangsu 226009, China)

(3 Zhongtian Technology Marine Systems Co., Ltd, Nantong, Jiangsu 226010, China)

**Abstract:** In order to improve anti-bending property and keep the similar model field diameter of G 652, a single-mode, small-size, anti-bending fiber by designing the structure of the optical fiber preform with depressed cladding is proposed. The outer diameter of the fiber is 180  $\mu\text{m}$ , the mode field diameter reaches 9.1  $\mu\text{m}$ , the macrobending loss of the fiber at 1 550 nm is less than 0.4 dB and the long-term environmental performance is not larger than 0.03 dB/km. The cabling results show that the size of the cable can save 44% by using this optical fiber. The optical fiber cable could be used for crowded and narrow channels.

**Key words:** Single-mode fiber; Bending loss; Small-size; Anti-bending; Depressed cladding

**OCIS Codes:** 060.2310; 160.6030; 220.2740; 280.6780

## 0 引言

随着光纤敷设规模的不断增大,同一区域内光纤通道资源日益紧张,光缆逐渐往小尺寸、高密度方向发展。此外,数据中心的大力建设,也使得高密度光缆有了更多的应用需求。利用有限的空间敷设更多的光缆,无疑是一种理想的解决方案,在日本等地甚至出现最多 2 000 芯光纤的光缆产品<sup>[1-2]</sup>。

基金项目:国家重点研发计划(No.2018YFC0308800)

第一作者:曹珊珊(1984—),女,博士研究生,主要研究方向为特种光纤设计、制备及性能表征。Email: caoss@zttcable.com

导师(通讯作者):韦玮(1960—),女,教授,博士,主要研究方向为光电功能材料与器件。Email: weiwei@njupt.edu.cn

收稿日期:2020-11-24;录用日期:2021-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

常用的通信光纤外径为 245  $\mu\text{m}$ , 如果采用更小直径的光纤, 在同等外径下可以制作出更多芯的光缆, 能大大节约空间和管道资源<sup>[3-5]</sup>。日本学者 SUGIZAKI R 等<sup>[6]</sup>设计了一种 W 型小直径光纤, 光纤外径为 125  $\mu\text{m}$ , 但其模场直径为 5  $\mu\text{m}$ , 单圈的宏弯损耗小于 1 dB, 不能与目前常规应用的 G.652 光纤有效匹配。为了保持与常规光纤的良好接续性能, 光纤直径的模场直径不能相差太大, 一般通过改变光纤涂层的方式减小光纤直径<sup>[7]</sup>。2015 年, 美国康宁公司发布了 SMF-28® Ultra 200 光纤, 其外径为 200  $\mu\text{m}$ , 该光纤模场直径 (Mode Field Diameter, MFD) 达到 9.2  $\mu\text{m}$ , 在半径 10 mm 单圈的情况下, 其在 1 550 nm 的宏弯损耗为 0.5 dB<sup>[8]</sup>。2017 年, 苏州大学郝昌平进行了微缆用 Mini-G.652.D 小尺寸光纤的设计与研发, 制备了 MFD 与 G.652 光纤兼容的 200  $\mu\text{m}$  光纤<sup>[9]</sup>。2019 年, 特恩驰公司宁四平等开展了涂覆尺寸对 200  $\mu\text{m}$  光纤性能影响的研究, 对外径典型值 190  $\mu\text{m}$  的光纤开展了各项对比实验<sup>[10]</sup>。2019 年, 日本学者 SATO F 等<sup>[11]</sup>利用 200  $\mu\text{m}$  光纤开发低摩擦高密度微缆, 并可以与 250  $\mu\text{m}$  光纤进行高效熔接, 比常规光缆提高 1.6 倍, 降低安装成本。此外, TSURITANI T 等<sup>[12]</sup>研制了 0.92 km 的高密度光缆并进行场地测试, 没有观测到明显的信号衰减, 验证了该类高密度光缆的实用性。

上述研究报道的小直径光纤外径大多是 200  $\mu\text{m}$ , 或是宏弯损耗可以满足半径 10 mm 绕 1 圈的要求, 对于更小尺寸的光纤以及大模场直径宏弯损耗能达到半径 7.5 mm 弯曲要求的光纤并没有更进一步的研究。因此, 研究制备更小尺寸的光纤, 能够进一步减小光缆尺寸, 同时其宏弯损耗能够达到半径 7.5 mm 级别, 又兼具大模场特点, 和常规 G.652 光纤完全兼容具有重要意义。

鉴于此, 本文提出并制备了一种新颖结构的光纤, 采用包层凹陷结构光纤预制棒, 以增加芯层/包层折射率差、降低光纤宏弯损耗并兼具大模场直径设计, 通过改变光纤涂覆层的材料和尺寸, 最终获得了一种直径更小 ( $\Phi 180 \mu\text{m}$ ) 的单模光纤; 研究了涂层直径的变化对光纤强度以及传输性能的影响, 同时制作了不同规格的光缆, 探讨了其尺寸以及强度特性的变化。试验结果表明该小尺寸抗弯曲光纤能够满足高密度光缆铺设的要求。

## 1 光纤设计与制备

### 1.1 小尺寸光纤预制棒设计

光纤损耗主要有吸收损耗、散射损耗及辐射损耗, 其中辐射损耗源于光波导中的模式耦合, 是由光纤的微观随机弯曲造成的, 即宏观弯曲和微观弯曲<sup>[8]</sup>。光纤的宏弯损耗与光纤的弯曲有关, 当光纤弯曲时, 光波会泄露出去, 弯曲半径越小, 光波的泄露越多, 其宏弯损耗越大。对于单模光纤, 其临界弯曲半径  $R_{cs}$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$R_{cs} \approx \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^{\frac{3}{2}}} \left( 2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_c$  为截止波长,  $n_1$  和  $n_2$  为芯层和包层的折射率。对于给定的折射率差、工作波长和截止波长, 有一个临界曲率半径  $R_{cs}$ , 当实际曲率半径达到临界值时, 可以观测到弯曲损耗, 当曲率半径进一步减小到临界值以下时, 弯曲损耗从可以忽略急剧增加到非常大。

目前常规的 G.652 单模光纤属于阶跃型结构, 如图 1(a) 所示, 其芯层为掺锗石英玻璃, 包层为纯石英玻璃。为了提高光纤的抗弯曲性能, 需要在剖面设计上考虑减小微弯曲损耗, 设计上需尽可能增大芯包层折射率差  $\Delta$  和减小纤芯半径, 同时考虑兼容性, 还要求光纤有尽量低的损耗和尽量大的 MFD, 采用凹陷结构不仅可以降低弯曲损耗, 而且可以在保证相对折射率差获得较大数值孔径的同时得到较大 MFD<sup>[14-16]</sup>。

本文设计了一种小尺寸抗弯曲结构光纤, 其从中心到外周依次为①纤芯、②隔断层、③浅掺氟包层、④凹陷包层和⑤外包层, 如图 1(b)。其中芯层、隔断层、浅掺氟包层、凹陷包层相对外包层的折射率差分别为 0.45%, -0.001%, -0.07%, -0.25%, 芯层直径为 9.3  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 125  $\mu\text{m}$ 。

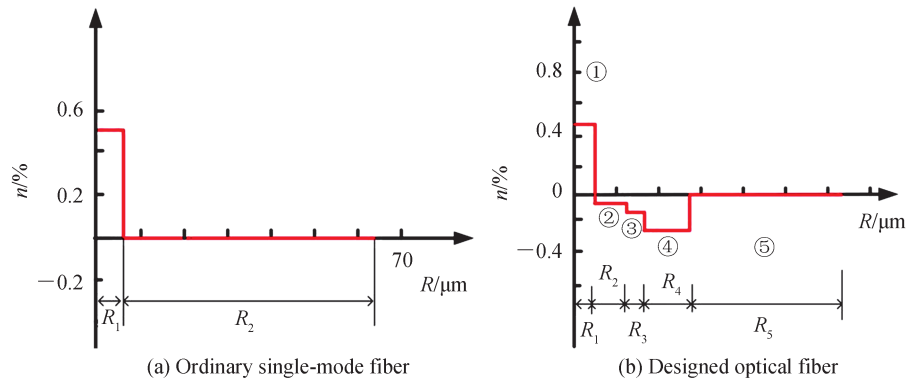


图1 常规G.652光纤与所设计光纤的折射率剖面  
Fig. 1 Refractive index profile distribution of G.652 and designed optical fiber

### 1.2 数值模拟

针对所设计的小尺寸光纤结构,建立了有限元模型,根据式(2)<sup>[17]</sup>计算出不同弯曲半径下光纤的衰减损耗。

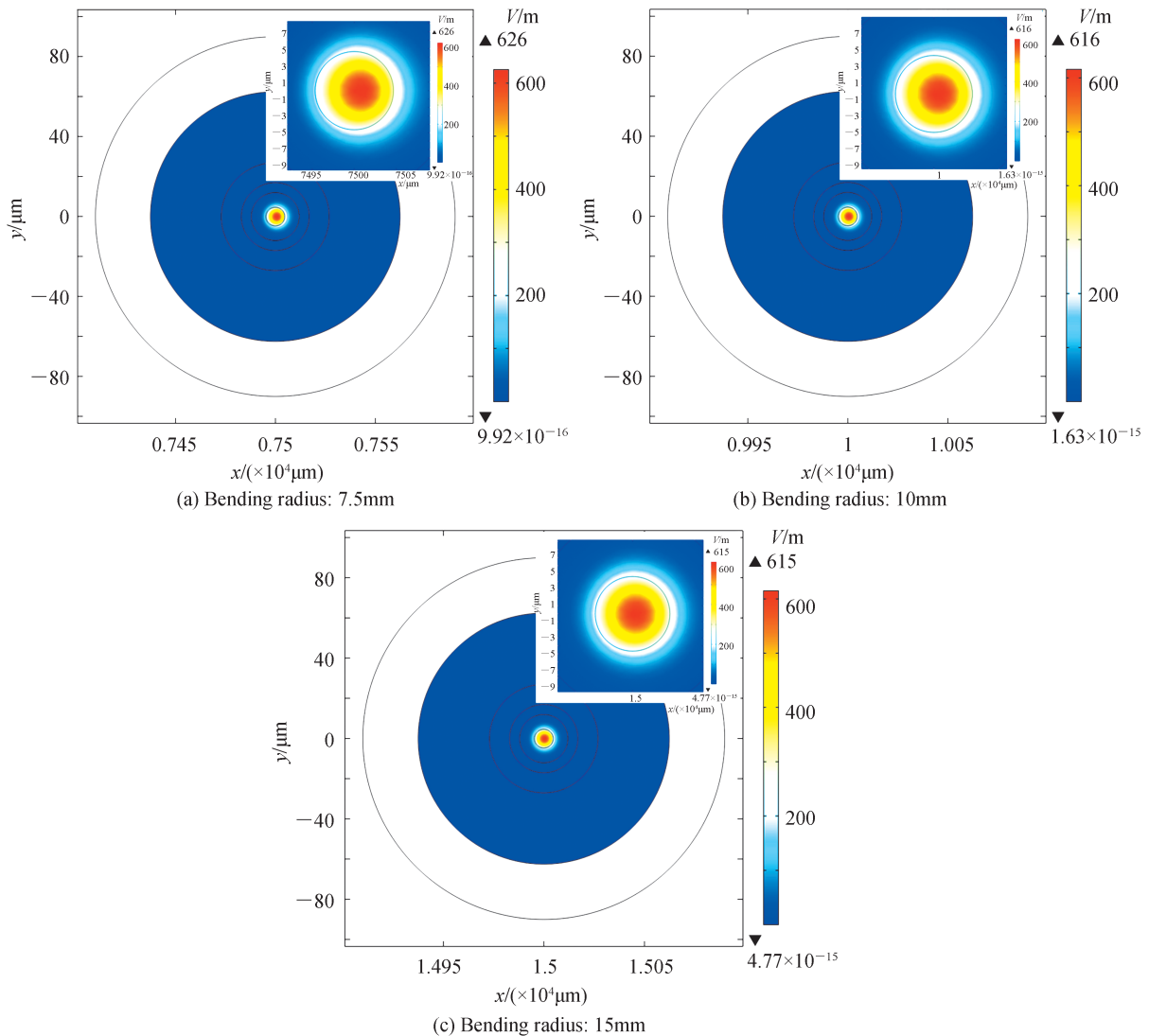


图2 所设计光纤在不同弯曲半径下的场分布  
Fig. 2 Filed distribution for different bending radius

$$CL = -\frac{20\pi}{\ln 10} \cdot \kappa_0 \cdot I_m \left( \frac{\beta}{\kappa_0} \right) \quad (2)$$

式中,CL为衰减损耗, $\kappa_0$ 为真空波数, $\beta$ 为波导常数, $I_m$ 指虚部。

图2为不同弯曲半径下(7.5 mm, 10 mm和15 mm)新型光纤的场强分布。可以看到,随着弯曲半径的减小,其场强偏转的角度逐渐增大,光路偏移中心的程度逐渐增加,表明更多的能量外泄,损耗增加。如表1所示,根据式(2)计算得到弯曲半径从15 mm变化到7.5 mm时的衰减损耗值逐渐增大,但其衰减值均不大,可满足实际应用要求。

### 1.3 小尺寸光纤制备

光纤芯棒采用轴向气相沉积法(Vapour Axial Deposition, VAD)制备,凹陷包层和外包层均采用外部化学气相沉积法(Outside Vapor Deposition, OVD)制备,通过VAD工艺制备出芯棒粉末体后,通过脱羟与玻璃化的过程,形成透明体后将其延伸制成芯棒,采用OVD工艺制备掺氟包层制作成套管与芯棒组合,外部再沉积外包层粉末体,再经历脱羟和玻璃化过程形成透明光棒,实现设计的折射率剖面。

采用中天科技光纤有限公司的27 m高光纤维拉丝塔将所制备的光纤预制棒拉制成光纤,拉丝塔从上到下的过程为:1)将高温电阻炉加热到2 200℃,光纤预制棒锥部熔融形成液滴状料头出炉;2)控制料头变细后依次经过退火装置(1~2 m)、丝径实时监测装置、冷却系统(4~6 m)、涂覆装置(德国Zeidl公司wet-on-dry系列)、固化系统(紫外固化系统),拉丝速度1 200~1 600 m/min,涂层直径调控在180  $\mu\text{m}$ ;3)将固化后的光纤收绕到线盘上。

### 1.4 小尺寸光纤测试与表征

不同样品的折射率剖面使用光纤预制棒折射率分析仪(PhotonKinetics, PK2600)来测量;样品光纤的涂覆层几何尺寸选用几何尺寸测试仪(PhotonKinetics, PK2400)测试;微观形貌采用基恩士VHX系列电子显微镜进行表征;光纤的损耗采用美国PK公司的OTDR8000型光时域测试仪(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)进行测试,测试精确为0.001 dB/km;光纤的模场直径采用美国PK公司的多参数测试仪(PhotonKinetics, PK2200)测试;宏弯损耗采用美国PK公司的色散测试仪(PhotonKinetics, PK2800)测试,表征待测试光纤在施加弯曲前、后的注入功率变化,计算出宏弯损耗结果;样品光纤的老化实验采用爱斯佩克环境试验箱,将待测光纤样品2.1 km绕在300 mm直径的光纤盘后脱卸下来,使其处于松散不受力状态,检测光纤在不同环境条件下损耗的附加情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光纤几何尺寸测量

图3是三种不同外径(245  $\mu\text{m}$ 、197  $\mu\text{m}$ 、179  $\mu\text{m}$ )光纤的微观形貌照片。三种光纤样品的芯/包层结构采用相同的折射率设计,同一台拉丝设备,制备出的光纤样品涂层分布均匀,在光学显微镜下无涂层内部气泡或表面缺陷,石英部分位于涂层中央,直径为~125  $\mu\text{m}$ ;当涂层直径从245  $\mu\text{m}$ 减少至179  $\mu\text{m}$ 时,没有出现涂

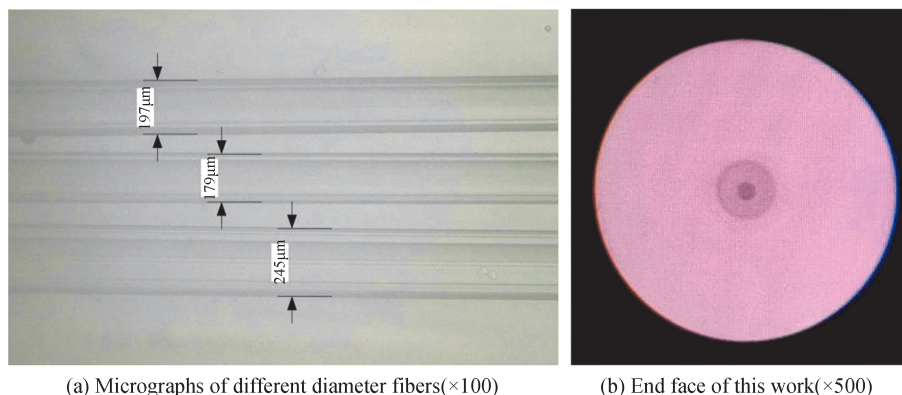


图3 三种不同直径光纤的微观照片  
Fig.3 Microphoto graphs of three different diameter fibers



层几何尺寸均匀性的问题。

## 2.2 模场直径对接续损耗的影响

图4是常规单模光纤 G.652 和新设计光纤的光斑端面照片,从图形上看两者中心光斑没有明显区别。

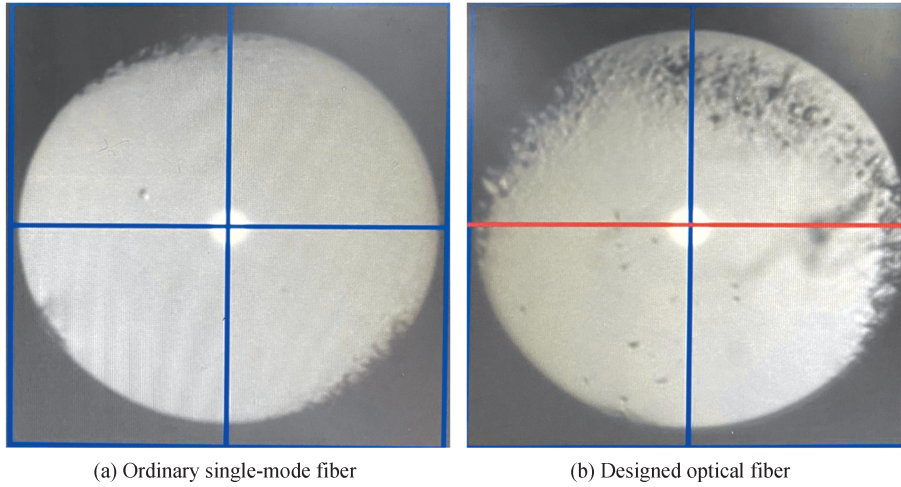


图4 常规 G.652 光纤与设计光纤光斑端面比较

Fig. 4 Spot end faces of ordinary single-mode fiber G.652 and designed optical fiber

当两个模场直径不同的光纤接续时,由于模场直径的不同而引起的损耗可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\alpha_{\text{mfd}} = -20 \lg \left( \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right) \quad (3)$$

式中,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为两种光纤的模场直径。  $\omega_1 - \omega_2$  是两种光纤的模场直径差值,  $\omega_1$  取常规单模光纤的模场直径中值  $9.2 \mu\text{m}$ , 图5是模场直径差值  $\omega_1 - \omega_2$  与接续损耗的关系曲线。

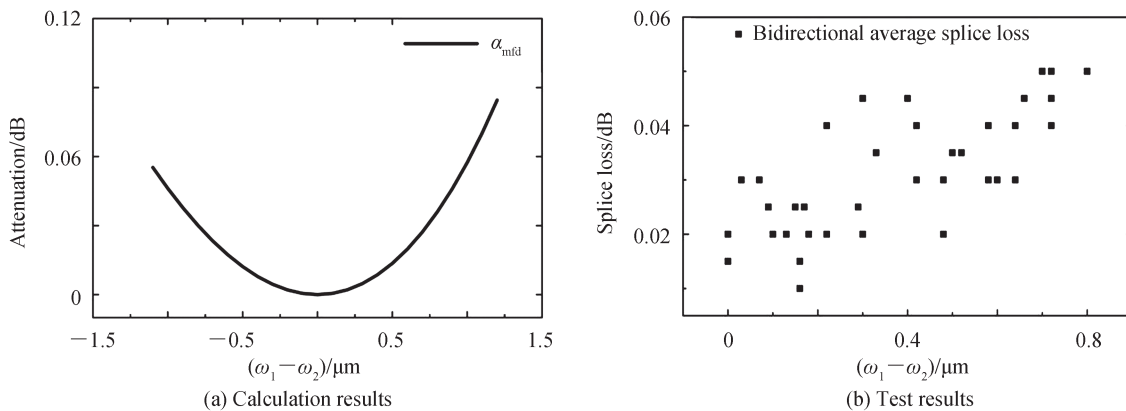


图5 模场直径差值  $\omega_1 - \omega_2$  与接续损耗的关系

Fig.5 Relationship between  $\omega_1 - \omega_2$  and connection attenuation of two fibers

从图5(a)看出,当两根光纤的模场直径完全一致,理论上由模场直径的不匹配导致的接续损耗为零,随着两根光纤的模场直径差值越来越大,其导致的接续损耗也随之增加。当  $\omega_2$  的模场直径为  $8.6 \sim 9.8 \mu\text{m}$ , 由模场直径带来的接续损耗理论计算结果在  $0.02 \text{ dB/km}$  以下。

新设计的大模场直径光纤,测试结果显示 MFD 中值在  $9.12 \mu\text{m}$ , 与常规 G.652 单模光纤接续,按照中位值  $9.2 \mu\text{m}$  考虑,两种光纤之间的理论接续损耗为  $0.0005 \text{ dB}$ 。按照  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  的容差考虑,将样品光纤与 MFD 在  $8.8 \sim 9.6 \mu\text{m}$  之间的 G.652 单模光纤做熔接测试,测试结果见图5(b),可以看出,随着两端光纤 MFD 差值的增加,双向平均损耗也呈现增长的趋势;新设计光纤与常规单模光纤对接,双向平均损耗最小值在  $0.01 \text{ dB}$ ,最大值为  $0.05 \text{ dB}$ ,当两者 MFD 差值在  $0.3 \mu\text{m}$  以内,双向平均接续损耗  $94\%$  的概率在  $0.03 \text{ dB}$  以

下,可以实现两者良好的兼容性;实际测试接续损耗结果高于理论计算,同一个MFD差值会对应不同的接续损耗,测试结果存在波动的点,这些是因为实际测试中接续损耗是多参数综合影响的结果,MFD差值并不是接续损耗唯一影响因素。

### 2.3 光纤弯曲损耗测试

表1是常规的G.652光纤、G.657.A2光纤和新型结构光纤的宏弯损耗、截止波长测试结果。G.657.A2和新设计光纤的截止波长处于同一水平,宏弯损耗在不同的测试条件下都表现出比G.652光纤更低的结果。

表1 不同光纤的宏弯损耗、截止波长性能对比  
Table 1 Comparison of optical fiber macrobending loss and cutoff wavelength

Fiber type	Macrobending loss@1550 nm (dB, 1 turn $\phi$ 15 mm)	Macrobending loss @1625 nm (dB, 1 turn $\phi$ 15 mm)	Macrobending loss @1550 nm (dB, 1 turn $\phi$ 20 mm)	Macrobending loss @1625 nm (dB, 1 turn $\phi$ 20 mm)	Macrobending loss @1550 nm (dB, 10 turns $\phi$ 30 mm)	Macrobending loss@1625 nm (dB, 10 turns $\phi$ 30 mm)	$\lambda_{cc}/\text{nm}$
G.652	2.300	3.749	0.694	1.421	0.045	0.176	1 221
G.657.A2	0.139	0.321	0.034	0.108	0.008	0.032	1 236
Designed optical fiber	0.035	0.068	0.008	0.021	0.023	0.071	1 242
Theoretical calculating value	$1.8 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$0.35 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-7}$	$2.43 \times 10^{-6}$	/

由表1可知,随着圈径的缩小,新型结构光纤仿真模拟与实测结果都在增大,变化趋势相符合。由于仿真模拟只考虑了光纤的几何原因所导致的光纤衰减变化,忽略了其他因素的影响,因此其计算结果小于实测结果。随着光纤弯曲圈径的缩小,G.657.A2、新型光纤与G.652光纤之间的宏弯损耗绝对差距增大;尤其是在 $\phi$ 15 mm单圈条件下,光纤的宏弯损耗由G.652光纤的2.300 dB@1550 nm,降低至新型光纤的0.035 dB@1550 nm,降低了约两个数量级。新型光纤的宏弯损耗基本上与G.657.A2在同一水平,但在不同的测试条件下表现出一些差异性:在弯曲圈径 $\phi$ 20 mm、 $\phi$ 15 mm小圈径条件下,新型光纤的宏弯损耗优于G.657.A2光纤;但在 $\phi$ 30 mm的大圈径条件下,新型光纤的宏弯损耗明显高于G.657.A2的数值。导致这些差异的原因主要是由于常规G.657.A2光纤主要采用的是下陷内包层结构设计,在一定程度上可改善光纤在大弯曲半径下的宏弯性能,但当光纤的弯曲半径继续下降,降低到小于或等于10 mm时,则弯曲损耗很难减少。本文设计的新型结构光纤采用的是芯层外设计隔断层、浅掺氟包层、外下陷包层的结构,通过外下陷包层进一步优化了不同圈径下的宏弯性能;隔断层有效地避免芯层的锗和掺氟层的氟元素互相扩散,确保下陷层氟元素的稳定性;浅掺氟包层改进了大弯曲半径下的弯曲特性,但浅掺氟包层相比下陷内包层,掺氟深度较浅,在多圈大弯曲半径下对光的束缚能力较弱,从而导致在 $\phi$ 30 mm的大弯曲圈径条件下,新型光纤的宏弯损耗明显高于G.657.A2的数值。

### 2.4 涂层厚度对光纤性能的影响

#### 2.4.1 强度测试

光纤是由内部的石英层和外表的涂覆层构成,光纤的强度主要依靠石英层来实现。由于石英层的模量约为70 GPa,而外涂覆层的模量约为0.6 GPa,因此涂覆层对光纤强度的影响可以忽略不计,但这并不意味着涂层直径可以持续的下降。石英纤维是脆性材料,当从高温快速冷却到室温导致光纤存在大量的应力,表面出现大量的微裂纹,如果没有涂覆层保护,直接在空气中裸露会导致表面缺陷扩大,局部应力集中,强度急剧下降;此外,涂覆层可以隔绝空气中的水和外力对表面微裂纹的作用,确保光纤的强度。当涂层直径下降到一定的范围时,会导致保护不足带来的弯曲损耗急剧上升,进一步产生弯曲脆断。图6是不同涂层直径光纤与抗拉强度之间的关系曲线。

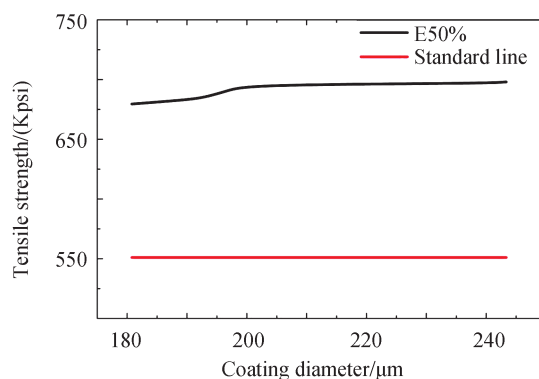


图6 不同涂层直径与抗拉强度的关系

Fig.6 Relationship between coating diameter and tensile strength

从图6可以看出,当涂层直径在180~245 μm之间变化时,在威布尔水平为50%条件下的拉伸强度均高于标准要求基线551 kpsi(1 kpsi=6.895×10<sup>6</sup>Pa)。当涂层直径为200 μm时,拉伸强度为695.7 kpsi,当涂层直径为245 μm时下降2.3 kpsi,约为0.015 GPa,基本持平。当外涂层直径从245 μm下降到180 μm时,光纤的拉伸强度由698 kpsi减少至679.5 kpsi,下降了18.5 kpsi,约为0.127 GPa,变动幅度2.6%,该变动幅度在测试误差范围内,对光纤性能基本不产生影响。

#### 2.4.2 环境性能测试

表2给出了不同涂层厚度光纤的环境耐受性能比较。基于光纤在不同的外部环境的应用,本文采用湿热(温度85℃,湿度85%,30天)、干热(温度85℃,30天)、浸水(温度23℃±5℃,30天)、高低温循环(-60℃~85℃,2个温度循环)等环境条件。

表2 不同涂层厚度光纤的环境性能对比

Table 2 Comparison of environmental performance of optical fiber with different coating thickness

Fiber type	Damp heat(85℃, 85%, 30d)		Dry heat(85℃, 30d)		Change of temperature (-60℃~85℃, 2 cycles)		Water immersion(23℃ ±5℃, 30d)	
	@1550nm	@1625nm	@1550nm	@1625nm	@1550nm	@1625nm	@1550nm	@1625nm
	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )	/(dB·km <sup>-1</sup> )
Φ245μm	0.011	0.018	0.008	0.016	0.007	0.013	0.002	0.004
φ180μm	0.007	0.012	0.007	0.008	0.006	0.011	0.003	0.004

由表2可以看出,在湿热、干热、浸水、高低温循环条件下,常规Φ245μm光纤和新设计结构Φ180μm光纤在四种实验下的1550 nm波段和1625 nm波段附加损耗上升都维持在较低的水平,满足在该环境下应用的要求;湿热实验在四种实验中的附加衰减值最高,浸水实验的附加衰减值最低;1550 nm波段的附加衰减略低于1625 nm波段;在同一实验条件下,Φ180 μm光纤的环境实验附加损耗上升幅度较小,表明该新型光纤通过掺氟实现了折射率剖面结构的优化,所带来的弯曲性能改善弥补了涂层厚度下降所导致的微弯损耗上升,传输特性具备良好的温度稳定性。

#### 2.4.3 成缆

按照常规光缆的结构和性能要求,采用自行制备的三种光纤:Φ180 μm、Φ200 μm和Φ245 μm光纤开展了成缆对比试验,结果如表3所示。从表3可知,使用Φ180 μm光纤,可以显著地减低光纤微缆的尺寸。其Φ180 μm可比Φ245 μm光纤降低44%的空间尺寸。极大地提高了管道的容纤量,在相同的管道空间内可以安装更大容量的光缆,从而满足更高的带宽需求,能够更好地满足未来数据中心的扩展和5G光网络对主干光缆的需求。

表3 三种光纤( $\Phi 245\ \mu\text{m}$ 、 $\Phi 200\ \mu\text{m}$ 和 $\Phi 180\ \mu\text{m}$ )的微缆尺寸比较  
 Table 3 Comparison between micro cable fibers of  $\Phi 245\ \mu\text{m}$ ,  $\Phi 200\ \mu\text{m}$  and  $\Phi 180\ \mu\text{m}$

Fiber Count in the cable	Diameter of micro-cable with $\Phi 245\ \mu\text{m}$ fibers /mm	Diameter of micro-cable with $\Phi 200\ \mu\text{m}$ fibers /mm	Diameter of micro-cable with $\Phi 180\ \mu\text{m}$ fibers /mm
144	9.5	7.5	5.3

### 3 结论

本文研制了一种新型小尺寸抗弯曲光纤,该光纤从中心到外周依次为纤芯、隔断层、浅掺氟包层、凹陷包层和外包层。该结构光纤的芯棒采用轴向气相沉积法制备,凹陷包层和外包层均采用外部化学气相沉积法制备,并采用27 m拉丝塔将预制棒拉丝,得到外径为 $180\ \mu\text{m}$ 、模场直径为 $9.1\ \mu\text{m}$ 的新型光纤。测试结果表明,新光纤的宏弯损耗较G.652光纤降低了约两个数量级,减少至 $0.035\ \text{dB}@1\ 550\ \text{nm}$ ,且四种环境性能实验结果最高不超过 $0.02\ \text{dB/km}$ 。新型光纤与常规单模光纤对接,双向平均损耗最小值为 $0.01\ \text{dB}$ ,最大值为 $0.05\ \text{dB}$ ,接续损耗低,两种光纤完全兼容。本文制备的光纤成缆后,与同等芯数的常规光缆相比,其几何尺寸下降了44%,可满足高密度光缆在5G、数据中心的应用要求。

#### 参考文献

- [1] HOGARI K, YAMADA Y, TOGE K. Novel optical fiber cables with ultrahigh density [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(17):3104-3109.
- [2] SATO F, TAKAMI M, MASAKAZU T, et al. Design of ultra-high-density 2000-optical fiber cable with pliable 8-fiber ribbons for underground deployment[J]. Sei Technical Review, 2015:22-26.
- [3] XIA Zhilang, ZHOU Jianjun, LI Zhanan, et al. On the development and application of microtubule and microcable technology[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(5): 139-140.  
夏志朗,周建军,李展安,等.微管微缆技术的发展及应用[J].通信电源技术,2019,36(5):139-140.
- [4] ZHOU Juan, XIE Shuhong, CHEN Jianfei, et al. High fiber density and small diameter air blowing micro cable and pipeline capacity analysis[J].Modern Transmission,2018, 186(6):43-46.  
周娟,谢书鸿,陈建飞,等.高密度小外径气吹微型光缆及管道容量分析[J].现代传输,2018, 186(6):43-46.
- [5] GRIFFIOEN W, GREVEN W, POTHOF T. A new fiber optic life for old ducts[C]. 51st International Wire & Cable Symposium, 2002: 244-250.
- [6] SUGIZAKI R, MORIMOTO M, SUEMATSU K, et al. Bend Insensitive small diameter fibers for optical interconnection systems [C]. OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008,(1-3):25-27.
- [7] KOBAYASHI K. Study of microbending loss in thin coated fibers and fiber ribbons [C]. International Wire & Cable Symposium, 1993: 386-392.
- [8] JAY J A. An overview of macrobending and microbending of optical fibers[EB/OL]. <http://www.corning.com>.
- [9] HAO Changping. Design and development of small size-mode fiber with mini - G.652.D in micro cable [D]. Suzhou: Soochow University, 2017.  
郝昌平.微缆用Mini-G.652.D小尺寸单模光纤的设计与开发[D].苏州:苏州大学,2017.
- [10] NING Siping, DUAN Linlin, WANG Bin. Study of  $200\ \mu\text{m}$  fiber character impacted by coating diameter [J].Optical Communication Technology, 2019, 43 (10): 11-15.  
宁四平,段琳琳,王彬.涂覆尺寸对 $200\ \mu\text{m}$ 光纤性能影响的研究[J].光通信技术,2019, 43(10):11-15.
- [11] SATO F, SUZUKI Y, TAKAMI M, et al. Ultra-high-density microduct optical cable with  $200\ \mu\text{m}$  freeform ribbons for air-blown installation[J]. Sei Technical Review, 2019,89:17-21.
- [12] TSURITANI T, SOMA D, WAKAYAMA Y, et al. Field test of installed high-density optical fiber cable with multi-core fibers toward practical deployment[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2019.
- [13] SENIOR J M. Optical fiber communications: principles and practice [M]. 3rd Edition. England: Pearson Education Limited, 2009: 100-101.
- [14] CAO Shanshan, GUO Chaoyang, WANG Zhen, et al. Structure design and bending loss of a novel fiber for low temperature environment [J]. Acta Photonica Sinica, 2019,48(11):1148018.  
曹珊珊,郭朝阳,王震,等.用于极寒温度的特种光纤的结构与弯曲损耗研究[J].光子学报,2019, 48(11):1148018.
- [15] CAO Shanshan, GUO Chaoyang, ZHANG Xu, et al. Design and experimental verification of a novel optical fiber for the full ocean depth communication[J]. Optics Communications, 2021,478:126398.
- [16] SHE Shengfei, LIU Bo, CHANG Chang, et al.Characterization and properties of large-core fluorine-doped fibers based



- on Depressed inner cladding design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148013.  
折胜飞,刘波,常畅等.基于下陷内包层设计的大芯径掺氟光纤表征及性能[J].*光子学报*,2019,48(11):1148013.
- [17] WANG X, LOU S, LU W. Bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core[J]. *Applied Optics*, 2013;52(18):4323-4328.
- [18] SONG Zhituo, SONG Wen. The compatibility of fiber optic cable links composed of different types single-mode fiber[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2011, (1):23-27.  
宋志佗,宋文.不同单模光纤组成的光缆链路的兼容性[J].*光纤与电缆及其应用技术*, 2011,(1):23-27.