

一种导向定位的低损耗预制光纤连接插芯设计

孔祥敏 薛凯 赵利军 宋晓帆

Low-loss prefabricated fiber connection ferrule design for guided positioning

KONG Xiangmin, XUE Kai, ZHAO Lijun, SONG Xiaofan

引用本文:

孔祥敏, 薛凯, 赵利军, 等. 一种导向定位的低损耗预制光纤连接插芯设计[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 937–944. DOI: 10.5768/JAO202546.0408002

KONG Xiangmin, XUE Kai, ZHAO Lijun, et al. Low-loss prefabricated fiber connection ferrule design for guided positioning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 937–944. DOI: 10.5768/JAO202546.0408002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0408002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大芯径集束光纤强激光耦合装置设计

Design of strong laser coupling device for large core diameter bunched fiber

应用光学. 2023, 44(6): 1212–1218 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610007>

基于椭圆芯硫系光纤的布里渊应变和温度传感

Brillouin strain and temperature sensing based on elliptical-core chalcogenide fiber

应用光学. 2025, 46(2): 465–472 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0208002>

填充ENZ材料的太赫兹高双折射及近零平坦色散微结构光纤

ENZ material filled microstructured optical fiber with high birefringence and near-zero flattened dispersion at terahertz frequency

应用光学. 2022, 43(5): 1022–1029 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508005>

基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics based on coreless- few mode-coreless optical fiber structure

应用光学. 2022, 43(1): 167–170 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108003>

基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测

Detection of hidden defects of multi-strand carbon fiber composite core conductor based on optical fiber sensing technology

应用光学. 2024, 45(2): 467–474 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208004>

基于光纤相干背向瑞利散射的列车实时定位技术

Real-time positioning technology of train based on optical fiber coherent Rayleigh backscattering

应用光学. 2022, 43(5): 994–1000 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0937-08

引用格式: 孔祥敏, 薛凯, 赵利军, 等. 一种导向定位的低损耗预制光纤连接插芯设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 937-944.

KONG Xiangmin, XUE Kai, ZHAO Lijun, et al. Low-loss prefabricated fiber connection ferrule design for guided positioning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 937-944.



在线阅读

一种导向定位的低损耗预制光纤连接插芯设计

孔祥敏¹, 薛 凯¹, 赵利军¹, 宋晓帆²

(1. 国网山西电力勘测设计研究院有限公司, 山西 太原 030000; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 404100)

摘 要: 为保证精密控制环境下使用预制光纤连接器的可靠通信, 同时满足多模及单模光纤在传输性能上的要求, 设计了一种导向定位的低损耗预制光纤连接插芯。针对光纤插芯插入损耗、倾斜损耗和间隙损耗进行分析, 并通过优化插芯倾角和误差补偿等结构设计, 以及端面涂层材料的匹配选择, 缩减插芯连接损耗; 使用 PIN 导针和导向孔对齐 MT 套管等方式, 实现插芯配对的精准定位。基于 850 nm、1 300 nm 的多模和 1 310 nm、1550 nm 的单模光纤连接损耗, 并使用 BINNA-MTS 3D 干涉仪进行测试。测试结果表明, 预制插芯对接时的损耗平均值在 0.3 dB 及 0.24 dB 左右, 机械性能及环境测试最大损耗增加值为 0.19 dB, 最大值远小于 0.8 dB, 光纤连接插芯端面和对齐性能满足要求。

关键词: 导向定位; 低损耗; 预制光纤; 插芯; 涂层材料

中图分类号: TN87

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0408002

Low-loss prefabricated fiber connection ferrule design for guided positioning

KONG Xiangmin¹, XUE Kai¹, ZHAO Lijun¹, SONG Xiaofan²

(1. State Grid Shanxi Electric Power Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030000, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 404100, China)

Abstract: In order to ensure the reliable communication using prefabricated optical fiber connectors in the precision control environment, and to meet the requirements of multi-mode and single-mode optical fibers in terms of transmission performance, a low-loss prefabricated optical fiber connection ferrule with guided positioning was designed. By analyzing the insertion loss, tilt loss and gap loss of the optical fiber ferrule, two design methods were adopted to reduce the ferrule connection loss: the structural design of the ferrule inclination angle and error compensation, and the matching of the end coating material. Precise positioning of ferrule pairing was achieved by aligning the MT sleeve with the PIN guide pin and guide hole. Based on the connection loss of 850 nm and 1 300 nm multi-mode and 1 310 nm and 1 550 nm single-mode optical fibers, tests were conducted by using the BINNA-MTS 3D interferometer. The results show that the average loss of prefabricated ferrule docking is about 0.3 dB and 0.24 dB, the maximum loss added value of mechanical properties and environmental test is 0.19 dB, and the maximum value is much less than 0.8 dB, which indicates that the end face and alignment performance of the fiber connection ferrule meet the requirements.

Key words: guiding positioning; low loss; prefabricated fibers; ferrule; coating materials

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-07-30

基金项目: 国网公司基金项目 (5200-202156079A)

作者简介: 孔祥敏 (1982—), 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化研究。E-mail: 45354217@qq.com

通信作者: 宋晓帆 (1989—), 博士, 主要从事电力系统及其自动化研究。E-mail: sxf810118@sina.com

引言

预制光纤连接器作为光通信网络中关键的无源互连组件,其设计需兼顾高连接密度、低插入损耗、小型化结构以及良好的可维护性,以满足高速率、集约化和高可靠性传输系统对连接性能的严格要求。随着数据中心和通信网络的不断扩张,对连接器的高密度布局需求不断增加,预制光纤连接插芯的设计致力于优化光学性能,包括降低插入损耗,提高回波损耗等。通过精确控制光学元件的制造工艺,采用优质材料,并进行精密的光学仿真,以确保连接器在高密度布局下依然能够保持卓越的光学性能,并满足长期使用和频繁连接的要求,延迟光学元件的老化^[1]等。

近年来,光纤连接的相关研究也在进行。段劭琛等^[2]研究人员利用光学连续波反射计(optical continuous-wave reflectometer, OCWR)与光学低相干反射计(optical low-coherence reflectometer, OLCR)构建了多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗测量系统。GONDA T等人^[3]采用40 Gb/s信号传输试验确认了多芯光纤(multi-core fiber, MCF)连接器的稳定接续能力。MATSUI T等人^[4]探讨了弱耦合多芯光纤连接的优势。张新立等人^[5]针对高功率光纤激光系统中光纤对接端面产生水雾凝结的问题,提出了一种防潮密封型光纤连接器。作为实现静止平台与转动平台间光纤传输的重要设备^[6],光纤旋转连接器^[7]在光传输上具有传输容量大、抗电磁干扰等特点,在各领域也受到广泛应用。赵振刚等人^[8]设计了一种由双合透镜和TEC光纤构成的大光斑离轴式光纤旋转连接器。此外,关于光纤连接器的表面降噪^[9]、焊点性能^[10]、耦合特性^[11-16]、热效应^[17]等均有研究。

在高速通信和数据传输领域,任何微小的偏差或不准确的对准都可能导致光信号的损失和衰减,影响通信系统的性能和稳定性。因此,本文设计了一种附带PIN导针和导向孔的插芯,通过采用插芯端面和插芯纤芯倾角研磨,添加涂层材料以及对准精度补偿方式实现光纤插入对接时的损耗降低,并解决插芯配对定位和空气间隙损耗问题,最大程度地减小光信号的传输损耗,提高通信系统的可靠性和性能。同时,这种设计还能够减少安装和维护过程中的误差,降低光纤连接器的维护成本,为光通信和数据传输系统的长期稳定

运行提供保障。

1 预制光纤连接插芯设计

1.1 光纤连接器损耗分析

光纤连接器中,单模光纤(single mode fiber, SMF)和多模光纤(multi-mode fiber, MMF)是两种主要的光纤类型,它们的主要区别在于芯径大小、模式数量、传输距离和数据传输速率。单模光纤的芯径通常在 $8.3\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间,由于芯径小,只允许一种模式,即一种光的传播路径通过。多模光纤的芯径通常在 $50\ \mu\text{m}\sim 62.5\ \mu\text{m}$ 之间,由于芯径大,允许多种模式通过。光纤连接器被广泛应用在电力及通信工程中,其连接插入需满足传输性能要求。对于单模和多模光纤连接器,其插入损耗的性能要求为:1) 4/8芯, $\leq 0.6\ \text{dB}$; 2) 12/24芯, $\leq 0.8\ \text{dB}$ 。

影响光纤连接器损耗的因素主要有光纤端面质量、连接器的对接精度、光纤类型、连接器的使用情况和环境因素等,而光纤端面质量和连接器对接精度可以通过制造工艺进行改善。光纤端面质量因素是指影响光纤端面质量的污染、划痕和凹凸不平等,都会增大插损。连接器的对接精度包括端面的垂直度、光纤芯部的对准度等^[18-19]。

如果对接精度差,会导致光的传输损失增大。而错位对接损耗就是因两根光纤端部的轴向或径向错位造成的对接精度降低,从而导致的损耗,如图1所示为光纤纤芯的横向错位,图2为纤芯的径向错位示意图。

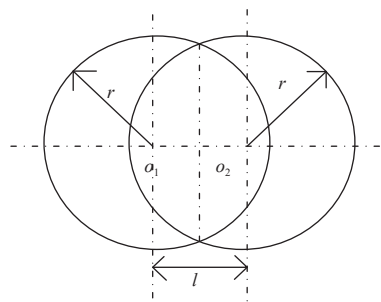


图1 光纤连接横向错位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transverse dislocation of optical fiber connection

单模光纤的错位损耗估算公式为

$$L_d = -10 \times \lg 10 [1 - K_d (\frac{l}{r})^2] \quad (1)$$

式中: K_d 为光纤错位损耗系数; l 为两个光纤之间

径向或横向的错位距离; r 为光纤模场半径。

多模光纤的错位损耗公式为

$$L_n = -10 \times \lg 10 \left(1 - \frac{2l}{\pi r} \right) \quad (2)$$

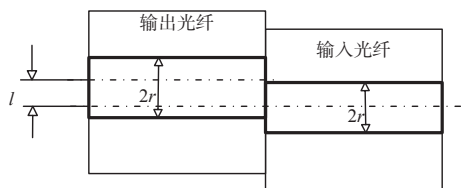


图2 光纤连接径向错位示意图

Fig.2 Schematic diagram of radial dislocation of optical fiber connection

在设计预制光纤连接器时, 光纤连接端面角度切斜也会导致光信号在连接器接触面上非理想位置的传输效率下降, 引起插入损耗的增加。这种光纤倾斜造成的损耗是由于光纤连接器插入过程中, 光纤端面存在的倾斜角度导致光信号在连接器接触面上的传输路径发生偏移, 产生反射和散射, 从而增加了插入损耗。并且, 倾斜角度也会使得光纤的模式耦合效率下降, 部分光信号不能有效传输到接收端。根据式(3)和式(4), 可以得到单模和多模预制光纤纤芯倾斜连接损耗。

$$L_q = K_\alpha \left(\frac{\alpha}{\sqrt{2\Delta}} \right)^2 \quad (3)$$

$$L_m = -10 \lg \left(1 - 0.36 \frac{\alpha^2}{\Delta} \right) \quad (4)$$

式中: α 为预制光纤插拔连接器连接时, 阴插头与阳插头端面上的纤芯倾角; K_α 为倾斜角度的损耗系数; Δ 为光纤折射率系数。

从式(4)中可以看出, 损耗与倾斜角度的平方成正比, 当光纤端面倾斜角度 α 越大, 其计算式中 α^2/Δ 也越大, 导致损耗增加, 且单模光纤纤芯倾斜损耗受倾角的影响远比多模光纤的大。因此, 在光纤连接器的设计中, 控制光纤倾角在合理范围内是保证低损耗连接的关键。

另外, 光纤耦合时存在的间隙也会产生连接损耗, 计算公式如式(5)所示:

$$L_t = \frac{(1 - R_0)^2 A}{(1 - AR_0)^2 + 4AR_0 \sin^2(2\pi nS/\lambda)} \quad (5)$$

式中: $A = \left[\left(\frac{\lambda S}{2\pi n r^2} \right)^2 + 1 \right]^{-1}$; $R_0 = \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2$; n 为间隙中的折射率; n_1 为光纤芯折射率; S 为光纤端部之间的间隙宽度; λ 和 r 分别为透射光的波长和模场半径。

1.2 插芯体及 PIN 导针设计

采用端面压接式插芯体, 装入连接器后插损小, 可插接芯数多, 且后续运维也方便。设计的插芯体由一个包含预制 PIN 导向针的公插头、一个在端面上带有导向孔的母插头, 外部由连接插头的适配器组成。在插头内, 光纤固定在 MT(mechanically transferable) 套管的光纤孔中, 当一个插头连接到另一个插头时, 两个插头间的精准定位可通过使用 PIN 导针和导孔与相对应的 MT 套管对齐来实现。排列的光纤与两个导向孔以亚微米级准确对齐, 且每根光纤均以 $6 \mu\text{m}$ 以内的长度突出 MT 套管端面。

1.2.1 插芯端面角度抛光设计

为了减少使用垂直抛光端的光纤插芯连接中的菲涅耳反射, 需要对插芯体按照一定倾斜角度进行抛光, 并采用精工研磨机研磨端面。对于单模光纤插芯, 其回波损耗要求大于 40 dB。回波损耗的计算公式如式(6)和式(7)所示:

$$R_L = -10 \times \lg(R) \quad (6)$$

$$R = R_{in} e^{[-(\frac{\pi n_2 r^2 \theta}{\lambda})^2]} \quad (7)$$

式中: R 为光纤端面实际反射功率比; R_{in} 为垂直入射情况下的菲涅耳反射系数; n_2 为光纤外部介质(通常是空气或连接器图层材料)的折射率; λ 为光波长; θ 为插芯端面倾角。

在一般情况下, 外部介质折射率需要保持与光纤芯一致以减少损耗, 折射率在 1.445~1.465 之间, 且单模光纤使用 1310 nm 光波长较适宜, 计算得到插芯端面角度应控制在 $7.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 之间。

1.2.2 光纤纤芯倾角研磨设计

根据式(3)和式(4)对单模和多模的预制光纤纤芯倾角产生的连接损耗计算结果, 最大控制纤芯倾角不超过 0.4° , 这样可以保证连接损耗不超过 0.1 dB。

1.2.3 对准偏移误差补偿设计

由于基于间隙的 MT 连接结构比常规光纤连接器更复杂, 当 MT 套管就位时, 会导致短套管轴方向的芯线位置偏移。除了这种配合力导致的偏移外, PIN 导针与导向孔之间的间隙也会导致这种偏移, 而这种错位也会导致连接损耗的增加, 如式(1)和式(2)所示。因此本文设计了一种可补偿偏移的插芯, 通过考虑配对插芯的导向中出现的偏移误差, 并在导向孔直径、导向孔间距、PIN 导针直径等尺寸设计中补偿短套管轴方

向的误差。

以多模 12 芯插芯体设计为例,插入损耗不超过 0.8 dB,选择的典型光纤模场半径为 $31.25\text{ }\mu\text{m}$,根据式(2)可以得到纤芯错位应小于 $8.2583\text{ }\mu\text{m}$ 。而纤芯错位往往是由于插头的导向机构引起的,横向偏移占主要部分。通过组合每个插头的光纤偏心率,可以获得每个配对光纤对之间的横向偏移。第 i 对对接光纤对之间的横向偏移量用式(8)表示为

$$d_i = \sqrt{x_{\Delta i}^2 + y_{\Delta i}^2} \quad (8)$$

式中: $x_{\Delta i}$ 为短套管方向偏移; $y_{\Delta i}$ 为长套管方向偏移。

在轴方向上设计增加一个对准偏移误差补偿量,这样轴方向的偏移计算是由 3 部分构成:插头导向机构偏移、光纤偏心率向量偏移和对准误差补偿。

因此,我们设计了两种插芯体,分别为单模和多模光纤插芯体,其具体的设计尺寸及结构如图 3 所示(单位: mm)。其中带 PIN 导向针和导向孔的插芯体结构示意图如图 4 所示。另外,图 5 详细展示了 MT 插芯和 PIN 导向针的具体设计参数及结构。

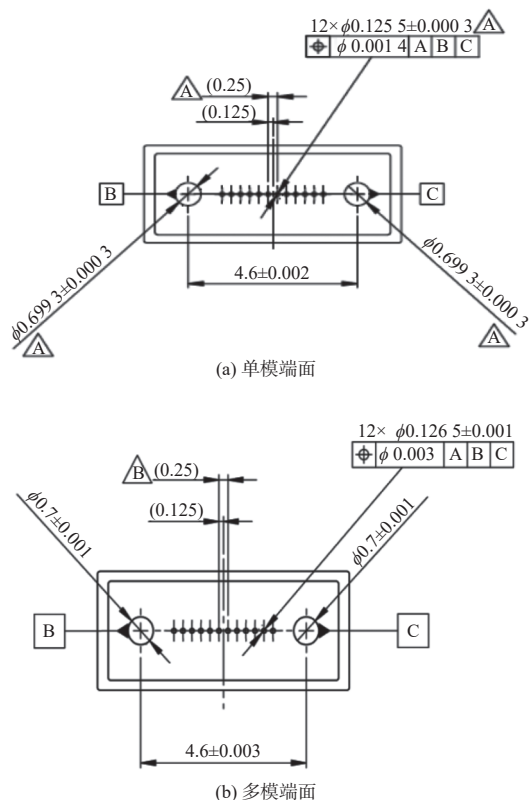


图 3 单模及多模端面连接式 MT 插芯体

Fig. 3 Single-mode and multi-mode face-connected MT ferrule

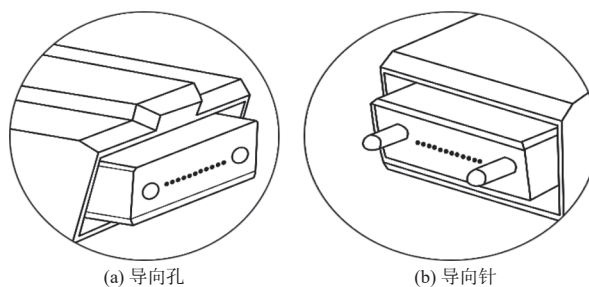


图 4 带 PIN 导向针和导向孔的插芯体示意图

Fig. 4 Schematic diagram of insert with PIN guide pin and guide hole

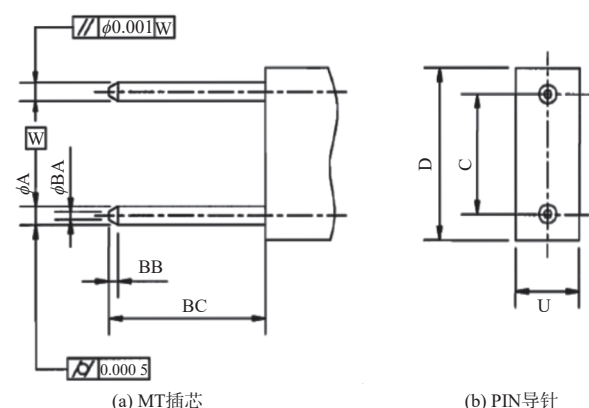


图 5 MT 插芯和 PIN 导向针设计结构

Fig. 5 MT insert PIN guide pin design structure

图 3 中标识的为插芯体 PIN 导向针和 PIN 导向针孔的直径和公差数值,以及光纤孔的内径和公差数值。图 3 中以单排 12 芯阵列为例,设计出了精工工艺制造需要的带公差数值的各个尺寸,其中插芯 PIN 导向针的设计参数如表 1 所示。

表 1 MT 插芯 PIN 导向针参数

Table 1 MT insert PIN guide pin parameters mm

标记	最小值	最大值
A	0.6985	0.6990
C	4.5995	4.6005
D	6.3	6.5
U	2.4	2.5
BA	0.2	0.4
BB	0.2	0.5
BC	6.0	6.5

1.3 插芯端面涂层材料设计

通过式(5)计算耦合光纤模型之间的连接损耗,损耗 T 值受到耦合光纤间隙折射率与光纤纤芯折射率差值的影响较大。正常情况下,公插头与母插头对接时,光纤耦合间隙为空气间隙,而空气折射率会随着气压、温度的不同而变化,且大气成

分本身的比例也无法得出确切的数据,这就使得空气折射率的计算公式较复杂,可近似为式(9):

$$n-1 = \frac{79 \times 10^{-6}}{T} \left(p + \frac{4800e}{T} \right) \quad (9)$$

式中: T 为温度,单位为 K; p 为压强,单位为 hPa; e 为水汽压,单位为 hPa。

通过代入标准温度和标准大气压、水汽压的值,可计算出空气折射率接近 1。但是光纤折射率与 1 相差较多,因此从式(5)计算结果可以看出,若光纤耦合间隙为空气,光纤连接损耗将会很大,且会发生菲涅耳反射现象。

为了在连接 MT 套管端面时,光纤耦合间的连接损耗尽可能降低,设计的插芯端面需要进行涂层材料的工艺加工。耦合光纤的间隙可填充与光纤折射率匹配的材料,并且计算的 L_1 值表明,端面涂层的材料层越薄,连接损耗越小。将接近光纤折射率的匹配材料涂抹在 MT 套管端面,形成耦合光纤间隙涂层。

在涂层材料选择上,针对不同单模与多模光纤连接器插芯,可设计不同的匹配材料。例如,1310 nm 波长的光纤折射率在 1.448 左右,可采用折射率在 1.443~1.448 之间的丙烯酸硅酮聚合物作为光纤折射率匹配材料。从丙烯酸硅酮聚合物本身分析,其具有优异的化学稳定性,能抵抗湿气、氧气及多种化学物质的侵蚀,且这种材料在高温、高湿及低温环境下能保持物理和化学特性较低的变化,增加光纤连接器的稳定性。

在形成折射率涂层方法上,采取液体凝固体方式。首先,将适量的液体折射率材料滴在 MT 套管末端,通过套管固定装置固定。接着,将一个带有矩形孔的垫片置于套圈中心。该矩形孔的面积等于 MT 套管端面的面积,并且垫片的厚度控制了该折射率材料层的厚度。最后,用紫外光照射套圈的端面,同时将透明玻璃板压在垫片上,用以固化端面涂层材料。这样,该折射率材料覆盖了 MT 套管除 PIN 导向孔外的整个表面。

1.4 导向精准定位设计方案

为了保障两个插头的精确匹配,运用“MT 套圈对准”、“PIN 导针与导孔的灵活配合”的方法,从而实施高精度的定位连接技术。

预制光纤连接器插芯 MT 与其外壳之间通过弹簧连接,具有轴向位移量和 360°圆周径向摆动,当光纤连接器 PIN 导向针的公插芯插入导向孔的母插芯进行精密接触时,将实现轴向和径向可浮

动交会对接。主要结构设计图如图 6 所示。

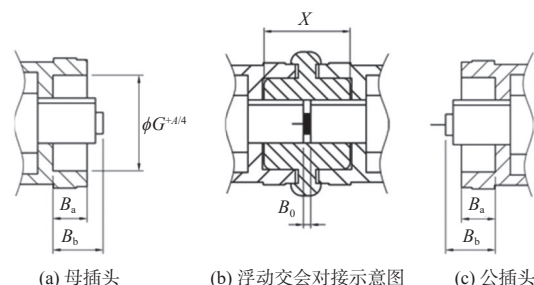


图 6 公、母插头及浮动交会对接结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of male and female plugs and floating rendezvous and docking structure

图 6 中左侧为带导向孔的母插头,右侧为带 PIN 导向针的公插芯,中间为公母插头浮动对接示意图。其中,母插头外壳前端内侧有一个内凹进去的 U 型孔,外径为 $\phi G^{+A/4}$,深度为 B_a ,而公插头外壳前端内侧有一个外凸出来的 U 型块。一旦公插芯与母插芯浮动交会对接不顺畅,需要调整包络插芯的高密度光纤连接器外壳姿态时,U 型块与光纤连接器外壳接触部位的两侧各有一条缝隙,可以确保光纤连接器外壳整体具备轴向移动时有一定的位移量,同时 T 型孔两侧的标准圆弧又要始终迫使高密度集束光纤连接器整体处于中心位置,通过柔性连接设计确保 PIN 导向针公插头与 PIN 导针孔的母插头完成径向和轴向适度浮动的交会对接,最终实现导向精准定位连接。

2 实验测试与结果分析

2.1 测试平台

预制光纤连接器插入损耗测试链路图如图 7 所示。将两个被测插头插芯对接并与多通道光功率计相连,即形成连接损耗测试平台。其中,光源需具备稳定光功率输出和适当的波长,波长 850 nm 和 1300 nm 用于多模光纤,波长 1310 nm 和 1550 nm 用于单模光纤,功率稳定性 ≤ 0.05 dB,光谱宽度在

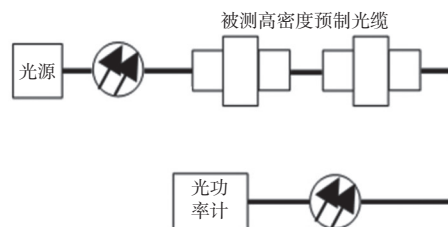


图 7 预制光纤连接器插入损耗测试链路图

Fig. 7 Link diagram of insertion loss test of prefabricated fiber optic connectors

1 nm 内,输出功率 ≥ -10 dBm。光功率计用于测量光纤连接器的插入损耗,测量范围在 -70 dBm $\sim +10$ dBm 之间,测量精度可选 ± 0.15 dB,分辨率为 0.01 dB,可测量的波长范围为 800 nm $\sim 1\,700$ nm。

2.2 测试结果

对于典型类型的两种峰值点波长为 850 nm 和 $1\,300$ nm 的多模光纤,在预制光纤连接器插接时, $1\sim 12$ 芯每根芯的插入损耗测试结果如图 8(a)所示。对单模光纤,测试峰值点波长为 $1\,310$ nm 和 $1\,550$ nm 两种类型,其 $1\sim 12$ 芯每根芯线插入损耗测试结果如图 8(b)所示。从图 8(a)中可以看出,多模光纤插入损耗值在 -0.2 dB ~ -0.4 dB 间浮动,平均值为 -0.32 dB(对应波长 850 nm)和 -0.29 dB(对应波长 $1\,300$ nm),而波长大的光纤连接损耗普遍小一些。光纤预制连接器插接时损耗值的最大值分别为 -0.39 dB(对应波长 850 nm)和 -0.36 dB(对应波长 $1\,300$ nm),均满足多模光纤插入损耗的基本要求,且损耗值远远小于要求值。从图 8(b)中可以看出,单模光纤插入损耗值在 -0.1 dB ~ -0.4 dB 间浮动,两种波长类型的光纤插入损耗平均值较小,分别为 -0.25 dB 和 -0.23 dB,最大值分别为 -0.36 dB 和 -0.31 dB,均远远小于基本要求值。测试结果验证了所设计的预制光纤连接器的低损耗性能。

以上为常态环境下光纤连接器的损耗情况,但工程中长期应用、长途运输或意外跌落撞击等不同环境下,预制光纤连接器的性能表现尤为重要。为了评估连接器在不同环境下的性能,进行了机械性能及环境试验测试,结果如表 2 所示。检

验环境条件在温度 $19^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $30\%\sim 35\%$ 的室内环境下,试验仪表采用光跳线测试系统(MAP-230B 型号),温度试验条件主要采用(GTH-408-60-CP)恒温试验箱、(GTH-150-60-CP-SD)恒温恒湿试验机、(MHU-225SR)恒温恒湿试验箱以及恒温恒湿箱(ETH-408-40-CP-SD)几种仪器实现,而针对冲击碰撞以及振动试验采用(CP-100)冲击碰撞试验台和电动振动试验系统(D-600-5/super)。

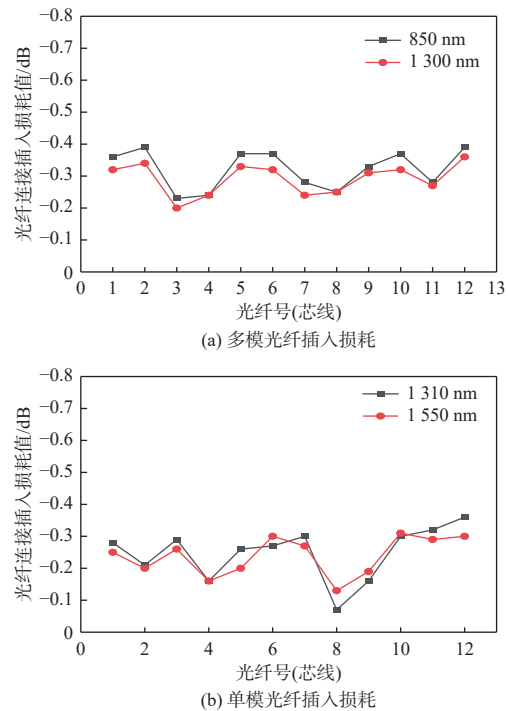


图 8 预制光纤连接器插入损耗性能
Fig. 8 Insertion loss performance of prefabricated fiber optic connectors

表 2 光源测试波长在 850 nm 的预制光纤连接器机械及环境对损耗的影响

Table 2 Mechanical and environmental effects on loss of prefabricated fiber connectors with source test wavelength of 850 nm		机械与环境测试项目	测试结果
序号	测试项目	试验环境及相关参数	插入损耗变化量/dB
1	机械重复性试验	500次(插拔次数)	0 ~ 0.12
2	振动(正弦)试验	10 Hz ~ 500 Hz	0.05 ~ 0.17
3	冲击试验	980 m/s ² , 重复冲击8次	0.02 ~ 0.19
4	低温试验	低温温度 -40°C , 持续时间96 h, 温度变化速率不大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 从 -40°C $\sim$ 室温并恢复1 h	0 ~ 0.1
5	高温试验	高温温度 80°C , 持续时间96 h, 温度变化速率不大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 从 80°C $\sim$ 室温并恢复	0 ~ 0.11
6	耐湿试验	温度 $+30^{\circ}\text{C}\sim (+60\pm 2)^{\circ}\text{C}$, 湿度90% $\sim 95\%$, 持续时间4 d, 恢复至室温2 h	0 ~ 0.09
7	温度循环试验	$-40^{\circ}\text{C}\sim +80^{\circ}\text{C}$, 保持30 min, 温度变化速率不大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 循环5次, 恢复至室温1 h	0 ~ 0.09

通过上述各项机械性能及环境测试结果可以看出,机械性能测试中,机械重复性耐久试验结果

表明,在多次插拔过程中,连接器性能依然保持稳定,插入损耗增加不显著,并且在试验中端面涂层

材料在多次插拔和机械振动条件下,表现出良好的附着力和耐磨性,可确保光纤端面在长期使用过程中保持光滑和完整,进一步减少了插入损耗的波动。振动测试以模拟连接器在运输和实际使用中的振动环境,结果介于 0.05 dB~0.17 dB 之间,虽有一定幅度的变化,但整体损耗增加量在可接受范围内。而冲击试验结果发现,较之其他机械性能测试,冲击和撞击会对连接器造成较大的损耗变化量,不过连接器的损耗最大增加量也在可控范围内。在温度和湿度相关测试中,连接器均保持较好的性能,与机械性能测试相比,其变化值更小,这是由于涂层材料对温湿度的抵抗性较强,能有效保护光纤端面,防止由于温度变化和湿气侵蚀引起的物理变形和化学反应,可保持光纤连接的低损耗特性和稳定性。

另外,使用 BINNA-MTS 自动光纤端面 3D 干涉仪对多模端面纤芯和单模端面纤芯进行检测,得到的分析图像如图 9 所示。

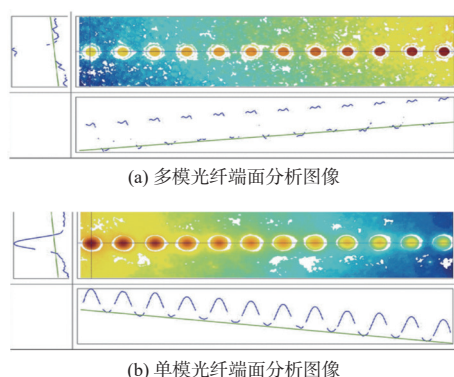


图 9 预制光纤端面干涉仪检测图像

Fig. 9 Detection images of prefabricated fiber end face interferometer

图 9 显示了通过 3D 干涉仪生成的预制光纤端面的三维表面拓扑图,其中分析图像主要用于评估光纤端面的平整度、纤芯直径以及纤芯与光纤外径间的相对偏心度。经干涉仪检测图像分析,多模和单模光纤端面的平整度良好,没有明显的凹陷和凸起,端面光滑。其中,多模光纤端面纤芯倾角为 $-0.07^{\circ}\sim-0.00^{\circ}$,插芯端面倾角为 $-0.07^{\circ}\sim-0.05^{\circ}$;单模光纤端面纤芯倾角为 $-0.05^{\circ}\sim-0.00^{\circ}$,插芯端面倾角为 7.97° 。这些倾角数据均在符合要求值范围内,可确保插入损耗的最小化,并且相对偏心度也在允许的公差范围内,确保高效的光信号耦合和传输的稳定性。

3 结论

本文分析并设计了一种导向精准定位的低损耗预制光纤连接插芯,对其光纤连接损耗的原理进行分析和理论推导,进而采用倾角研磨、对准精度补偿和材料涂层等方式设计可实现低插入损耗的插芯体。测试结果表明:两种典型多模光纤连接损耗的平均绝对值分别为 0.32 dB 和 0.29 dB,单模光纤连接损耗分别为 0.25 dB 和 0.23 dB,远小于 0.8 dB,且通过机械重复性、振动及温湿度环境变化测试,插入损耗变化量在 0.19 dB 以内,所设计的预制光纤插芯可有效降低插入损耗,保证了光信号的高效传输,为光纤连接的设计和应用提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 石颌,孔维相,袁晨翔,等. 基于统计检验的光电耦合器寿命预测模型研究[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(4): 68-74.
SHI Jie, KONG Weixiang, YUAN Chenxiang, et al. Research on life prediction model of optocoupler based on normal test[J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(4): 68-74.
- [2] 段劭琛,杨世泰,陈意坚,等. 多芯光纤活动连接器光学性能评价[J]. 光学精密工程, 2023, 31(10): 1454-1463.
DUAN Shaochen, YANG Shitai, CHEN Yijian, et al. Optical performance evaluation of multi-core fiber connectors[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(10): 1454-1463.
- [3] GONDA T, IMAMURA K, TSUKAMOTO M, et al. Design of multicore fiber having upgradability from standard single-mode fibers and its application[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 396-403.
- [4] MATSUI T, PONDILLO P L, NAKAJIMA K. Weakly coupled multicore fiber technology, deployment, and systems[J]. Proceedings of the IEEE, 110(11): 1772-1785.
- [5] 张新立,唐群植,伍浩成,等. 防潮密封型光纤连接器[J]. 光电工程, 2020, 47(12): 78-84.
ZHANG Xinli, TANG Qunzhi, WU Haocheng, et al. Moisture-proof seal optical fiber connector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(12): 78-84.
- [6] 宋巍,谢友金,李治国,等. 基于光纤旋转连接器的光纤耦合效率研究[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 104-115.
SONG Wei, XIE Youjin, LI Zhiguo, et al. Research on coupling efficiency based on fiber optic rotary joints[J].

- Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11): 104-115.
- [7] 赵振刚, 王思飞, 段绍锋, 等. 大光斑离轴式光纤旋转连接器的耦合性能[J]. 光学精密工程, 2023, 31(10): 1443-1453.
- ZHAO Zhengang, WANG Sifei, DUAN Shaofeng, et al. Coupling performance of large spot off-axis fiber optic rotary joint[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(10): 1443-1453.
- [8] 张群, 钱建国, 刘一. 一种光纤旋转连接器的设计改进[J]. 现代雷达, 2020, 42(2): 80-84.
- ZHANG Qun, QIAN Jianguo, LIU Yi. Design improvement of fiber optic rotary joint[J]. Modern Radar, 2020, 42(2): 80-84.
- [9] 陈博恒, 王馨雨, 许学彬, 等. 基于优化 ELM 的光纤连接器表面自识别降噪技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 169-178.
- CHEN Bohuan, WANG Xinyu, XU Xuebin, et al. Optical fiber connector surface self-identification noise reduction-technology based on optimized ELM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 169-178.
- [10] 吴丰顺, 许晓珊, 周龙早, 等. 热循环条件下光纤连接器金锡焊点性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 51-56.
- WU Fengshun, XU Xiaoshan, ZHOU Longzao, et al. Study on performance of gold-tin solder joint of fiber optic connector under thermal cycling condition[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 51-56.
- [11] 谢艳秋, 武保剑, 文峰. 少模光纤中折射率微扰对模式消光比的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 54-59.
- XIE Yanqiu, WU Baojian, WEN Feng. Influence of refractive index perturbation on mode extinction ratio in few-mode fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 54-59.
- [12] 谈琪, 孟浩然, 殷建平, 等. 水下湿插拔接触式光纤耦合设计与性能分析[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 313-321.
- TAN Qi, MENG Haoran, YIN Jianping, et al. Design and performance analysis of contact fiber-coupled of underwater wet-mateable connector[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(3): 313-321.
- [13] 王胜意, 丁哲文, 郑祥亮, 等. 基于双芯光子晶体光纤的耦合器设计方法研究[J]. 光学学报, 2024, 53(5): 60-68.
- WANG Shengyi, DING Zhewen, ZHENG Xiangliang, et al. Design method of coupler based on dual-core photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 53(5): 60-68.
- [14] 冯新凯, 陈怀熹, 陈家颖, 等. 光纤耦合周期极化铌酸锂薄膜波导器件的研究[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 126-131.
- FENG Xinkai, CHEN Huaixi, CHEN Jiaying, et al. Study of fiber-coupled periodically poled lithium niobate thin film waveguide devices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(22): 126-131.
- [15] 董贤, 谢友航, 武创, 等. 强耦合七芯光纤超模式布拉格光栅及其温度和应变响应特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 213-218.
- DONG Xian, XIE Youhang, WU Chuang, et al. Super-mode Bragg grating inscribed in a strongly coupled seven-core fiber and its response characteristics to temperature and strain[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 213-218.
- [16] 于溪畅, 高世杰, 吴佳彬, 等. 基于 MPLC 提高空间光-单模光纤耦合效率技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 219-227.
- YU Xichang, GAO Shijie, WU Jiabin, et al. Research on MPLC-based technology to improve the coupling efficiency of spatial optical-single-mode fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 219-227.
- [17] 章曦, 李平雪, 董雪岩, 等. 万瓦级光纤连接器参数设计及热效应数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 254-263.
- ZHANG Xi, LI Pingxue, DONG Xueyan, et al. Parameter design and thermal effect numerical simulation of 10 kW fiber connector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 254-263.
- [18] NAGASE R. Optical connectivities for multicore fiber[C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. San Diego, California: Optica Publishing Group, 2020: 876-879.
- [19] MORISHIMA T, MANABE K, TOYOKAWA S, et al. Simple-structure low-loss multi-core fiber LC connector using an align-by-contact method[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9157-9164.