



·强激光物理与技术·

套管辅助法测量异型预制棒折射率分布*

姜 蕾, 陈 艺, 代江云, 刘 念, 吕嘉坤, 张立华,
李 芳, 贺红磊, 高 聪, 沈昌乐

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 基于光束扫描法的光纤预制棒折射率测试仪主要适用于直径和长度在一定范围内的圆柱形样品折射率分布的测试。提出一种套管辅助法可实现更短长度、更细直径和变直径样品的折射率测试。该方法将待测样品居中放置于一个尺寸符合测试要求的圆柱形套管内,并在套管内注入折射率匹配油,使其没过待测样品后按常规步骤进行测试。对比实验结果表明,套管辅助法与直接测量法的偏差与仪器的测量误差相当。采用套管法,获得了预制棒拉丝终止后变径区不同位置折射率的径向分布,可为拉丝过程的研究提供参考。

关键词: 套管辅助法;异型预制棒;折射率;光束扫描法;光纤材料

中图分类号: O43

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220233

Measurement of refractive index profile of special-shaped preform by sleeve-assistant method

Jiang Lei, Chen Yi, Dai Jianguyun, Liu Nian, Lü Jiakun, Zhang Lihua,
Li Fang, He Honglei, Gao Cong, Shen Changle

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The refractive index profile of optical fiber preform can be measured by beam scanning method. Due to the requirements of the refractometer for the length, diameter and shape of preforms, the refractive index profile of special-shaped preforms cannot be measured directly. Thus the sleeve-assistant method is produced. A quartz sleeve is needed to expand the measuring range of the refractometer. The refractive index profile of the same round preform is measured directly by refractometer and by sleeve-assistant method respectively. And the results obtained are consistent, confirming the accuracy of the sleeve-assistant method. The refractive index profiles of the neck-down region of the preform measured confirm that the sleeve-assistant method can improve the test ability of refractometer.

Key words: sleeve-assistant method, special-shaped preform, refractive index, beam scanning method, optical fiber material

光纤在通信^[1-2]、传感器^[3-5]、医学^[6-7]、工业制造^[8-9]、国防军事^[10-11]等领域具有广阔的应用前景,其折射率分布是光纤的基本参数之一,它反映了光纤的几何尺寸、数值孔径、传输模式数量、光场强度分布等,是光纤材料制备过程中工艺优化及光纤性能评价的重要依据。光纤折射率分布取决于预制棒的折射率分布,因此,准确、无损、便捷地测量预制棒折射率分布十分必要。目前,常用的折射率测量方法包括近场法^[12-13]、反射法^[14-15]、干涉法^[16-17]、原子力蚀刻法^[18]、聚焦法^[19]、光束扫描法^[20]等。其中光束扫描法是一种无损测量方法,且测试过程简捷快速,测量精度较高,被广泛用于光纤预制棒折射率测试。由于样品池及其密封圈尺寸的限制,基于光束扫描法的光纤预制棒折射率测试仪主要用于一定直径和长度范围内的圆柱形样品的折射率分布测试。光纤材料性能及其制备的研究对折射率测试仪适用范围提出了新的要求:在变芯包比光纤、复合功能光纤等特定的研究过程中,需要测试更短长度、更细直径和变直径样品的折射率分布;拉丝过程的研究中,需要对颈缩锥区域折射率分布进行测试,获得其包层及芯区轮廓的演化等基础数据。因此,扩展折射率测试仪适用范围十分必要。

* 收稿日期:2022-07-23; 修订日期:2022-11-12

联系方式:姜 蕾, frc2003@163.com。

通信作者:沈昌乐, shenchangle@caep.cn。

本文采用的预制棒折射率分布测试仪,由于样品池及密封圈大小、预制棒抓手移动位置等因素的限制,只能测量直径在 5~37 mm、长度大于 250 mm 的圆柱形预制棒。通过制作一个下端封口的石英玻璃套管,其长度及直径满足仪器测量范围,将待测样品居中放置于圆柱形套管内,使待测截面距套管底部距离大于 250 mm,在套管内注入折射率匹配油,使其没过待测样品后,测试套管内待测截面折射率径向分布。对比实验结果表明套管辅助法与直接测量法的偏差与仪器的测量误差相当。采用套管法,获得了预制棒拉丝终止后变径区不同位置折射率的径向分布,可为拉丝过程的研究提供参考。

1 原理

光纤预制棒制备过程中,缓冲层和芯层在衬管内逐层沉积,最后在高温下熔缩成实心棒,故折射率分布沿径向对称,可将其截面看成由许多足够薄的圆环组成,同一圆环内折射率可视为不变,不同圆环间的折射率不同。同时移动激光器和探测器的位置,使激光器发出的光束从石英玻璃材质的样品池一侧边缘开始向另一侧扫描,并在观察平面上探测光斑位置,为了降低光束在界面的反射及偏折角,提高信号强度及探测效率,在样品池中装入折射率与石英玻璃相近的匹配油。当光束扫描到预制棒最外层圆环时,光束发生偏折,光斑位置突变,由此可测得预制棒直径。此时的光束通过预制棒的光路如图 1 红色实线所示,可得最外层圆环折射率为

$$n_1 = n_0 \sin i_1 / \sin i_2 \quad (1)$$

式中: n_0 为匹配油折射率; i_1 为光束入射角; i_2 为折射角。入射角与折射角大小不能直接测得,可根据简单的几何关系推得

$$\sin i_1 = h_1 / r \quad (2)$$

$$r \sin i_1 = l \sin^2 (i_1 - i_2) + h_2 \cos^2 (i_1 - i_2) \quad (3)$$

式中: r 为预制棒半径; h_1 为入射光束位置; h_2 为观察平面上出射光斑位置; l 为观察平面距样品池中心的距离。 h_1, h_2 为仪器测量值; r, n_0, l 为已知值,代入数据对上述公式进行求解,即可求出最外层圆环折射率 n_1 。

光束继续扫描,会依次经过最外层和第二层圆环,如图 1 红色虚线所示,圆环厚度可由预制棒直径和划分层数得出,根据出射光斑位置和上一次探测得到的最外层圆环折射率可算出光束在第二层圆环的折射点,即可得到第二层圆环的折射率。依次类推,通过移动入射光束可得到多组测量数据,即可计算出每一层圆环的折射率,这一计算过程由计算机自动完成,最终得到预制棒的折射率分布曲线。

2 实验

本文设计了一种套管辅助法用于辅助测量不满足设备测量要求的样品,如图 2 所示。套管直径与样品池密封圈匹配,长度大于待测样品最大长度,底部为锥形密封,便于居中稳固待测样品,顶部通过聚四氟乙烯夹具固定并准直预制棒。套管的材质为与样品池壁相同的石英玻璃,其折射率为 1.4571,对信号光吸收弱。在套管内注入仪器原装匹配油,其折射率与石英玻璃折射率相近,在室温下为 1.4591,可以有效降低界面反射,且对探测光的吸收很小,不影响仪器的测量系统光路。

为了检验套管辅助法测量的准确性,我们选取购买的符合设备标准测试要求的 G.652D 光纤预制棒,分别采取直接测量法和套管辅助法测量该预制棒距底端 400 mm 截面的折

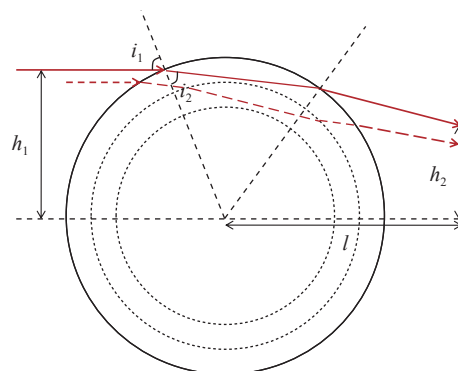


Fig. 1 Measuring principle of refractive-index profile of preform

图 1 预制棒折射率测量原理图

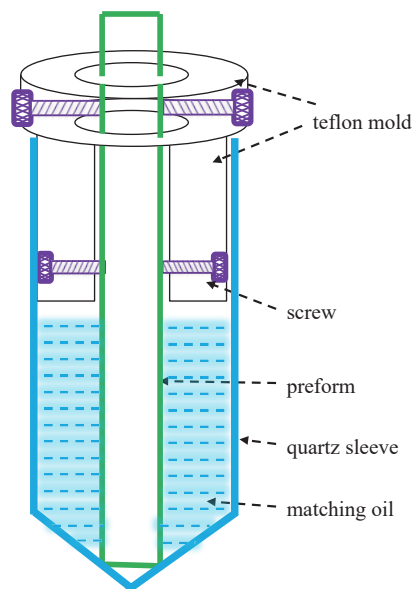


Fig. 2 Diagrammatic sketch of sleeve-assistant method

图 2 套管辅助法示意图

射率分布。光束位移取值间隔均选取 $5\ \mu\text{m}$ ，将两种方法测得的折射率分布曲线进行对比，结果如图 3(a) 所示。图中蓝线为仪器直接测得的折射率分布曲线，红线为套管辅助法测得的同一截面的折射率分布曲线。由图可知，两种测试方法所得折射率曲线几乎完全重合，两种方法测得的折射率绝对值的差异如图 3(b) 所示，包层折射率平均差值为 10^{-5} 量级，除个别测试点外纤芯折射率差值在 0.0002 以内，与该折射率测量仪的测试固有误差 0.0002 相当，这表明套管辅助法与直接测量法结果一致，证实了套管辅助法的可行性。测试过程中，由于折射率测量仪可选择的光束步进距离总是大于光斑大小，故多次测量时光束照射的径向位置的微小差异即会带来不同的测量结果，尤其对于纤芯折射率分布复杂的预制棒，测试差异更大。此外，预制棒在套管中是否居中、套管的竖直度、计算机对数据的近似处理等因素也会造成实验结果的偏差。故用套管辅助法实际测量时，可对同一截面进行多次测量取其平均值，以减小随机误差，提高测量精度。

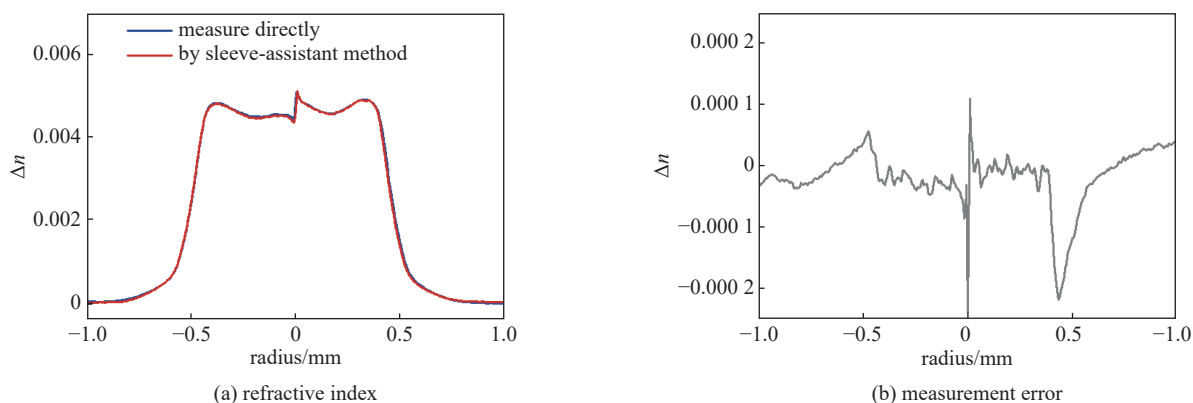


Fig. 3 Refractive index profiles of preform measured by refractometer directly and by sleeve-assistant method and measurement error

图 3 直接测量和套管辅助测量预制棒折射率分布及测量误差

套管辅助法可实现更短长度、更细直径和变直径样品的折射率测试。我们用套管辅助法测量了通用 G.652D 光纤预制棒颈缩锥区域的 3 个不同截面的折射率分布曲线。预制棒颈缩锥区域为预制棒拉丝后底部留下的锥形结构，预制棒折射率轴向分布相同，测量颈缩锥区的不同位置可以得到预制棒在拉丝逐渐变细过程中折射率的分布。实验中每个截面轴向间隔 $8\ \text{mm}$ ，截面直径依次增大，结果如图 4(a) 所示。实验中将样品池壁（也即石英玻璃）的折射率设定为 0，曲线从左至中心各段分别为测得的样品池壁、样品池中匹配油、套管壁、套管内匹配油、预制棒包层、预制棒纤芯折射率，三个截面折射率分布曲线仅在预制棒包层及纤芯部分存在差异，其余部分均完美重合，证实了实验结果的可重复性。将三条曲线纤芯部分折射率曲线放大后如图 4(b) 所示，折射率测量值近乎相等，仅因纤芯直径不同存在横向分布差异。通过对颈缩锥区三个截面的测量，验证了套管辅助法可以测量直径小于 $5\ \text{mm}$ 、长度小于 $250\ \text{mm}$ 的预制棒折射率分布，证实了该方法可扩展仪器测试范围、满足实际测试需求。实验结果表明 GDF 预制棒在拉伸过程中折射率分布近乎不变，对于有源光纤预制棒，也可用套管辅助法测试拉丝终止后颈缩锥区不同位置折射率的径向分布，为拉丝过程的研究提供参考。同理，套管辅助法也可测量变径预制棒的折射率分布，但对于非旋转对称的预制棒如八边形预制棒、四边形预制棒等，光路原理图不再满足，需更换与外包

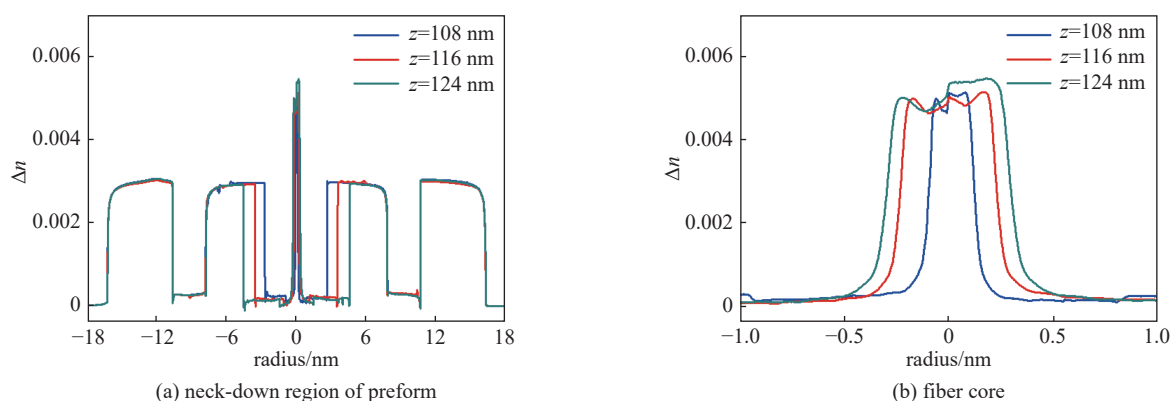


Fig. 4 Refractive index profiles of the neck-down region of preform and fiber core measured by sleeve-assistant method

图 4 套管辅助法测量预制棒颈缩锥区折射率分布和纤芯折射率分布

层折射率相同的匹配油,才能得到准确的芯区折射率分布。

3 结 论

本文在光束扫描法的基础上,基于实际需求提出了套管辅助法来扩展仪器的测量能力,可实现更短长度、更细直径和变直径样品的折射率测试。通过仪器直接测量和套管辅助测量通用 G.652D 光纤预制棒截面的结果对比,证实了套管辅助法测量折射率的可行性。采用套管辅助法测量了 G.652D 光纤预制棒颈缩锥区的 3 个横截面,得到了相似的折射率分布曲线,进一步验证了该方法能满足异形样品测试的实际需求。套管辅助法易于实现,操作简单,结果可靠,可快速获得异型预制棒的折射率分布,能为新型光纤材料制备工艺的研究提供帮助。

参考文献:

- [1] Rein M, Favro V D, Hou C, et al. Diode fibres for fabric-based optical communications[J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 214-218.
- [2] Li Xuejun, Mou Jun, Xiong Li, et al. Fractional-order double-ring erbium-doped fiber laser chaotic system and its application on image encryption[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107074.
- [3] Huang Fengqin, Chen Tao, Si Jinhai, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 233-237.
- [4] Yu Junliang, Feng Guoying, Zhou Shouhuan. MZI fiber optic sensor based on single-ended temperature and refractive index detection[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 091005.
- [5] Nakazaki Y, Yamashita S. Fast and wide tuning range wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8310-8318.
- [6] Khalkhal E, Rezaei-Tavirani M, Zali M R, et al. The evaluation of laser application in surgery: a review article[J]. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 2019, 10(s1): S104-S111.
- [7] Borrego-Varillas R, Nenov A, Ganzer L, et al. Two-dimensional UV spectroscopy: a new insight into the structure and dynamics of biomolecules[J]. *Chemical Science*, 2019, 10(43): 9907-9921.
- [8] Kawahito Y, Terajima T, Kimura H, et al. High-power fiber laser welding and its application to metallic glass $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ [J]. *Materials Science and Engineering:B*, 2008, 148(1/3): 105-109.
- [9] Beecroft M. Digital interlooping: 3D printing of weft-knitted textile-based tubular structures using selective laser sintering of nylon powder[J]. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 2019, 12(2): 218-224.
- [10] Kaushal H, Kaddoum G. Applications of lasers for tactical military operations[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 20736-20753.
- [11] Hecht J. High-power fiber lasers[J]. *Optics and Photonics News*, 2018, 29(10): 30-37.
- [12] Stewart W J. Technique for measuring the refractive index profiles of graded optical fibers[C]//*Proceedings of Conf 100e*. Tokyo, Japan, 1977: 395.
- [13] Hotate K, Koshi O. Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of a single-mode optical fiber from its exit-radiation pattern[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(19): 3265-3271.
- [14] Eickhoff W, Weidel E. Measuring method for the refractive index profile of optical glass fibres[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1975, 7(2): 109-113.
- [15] Ikeda M, Tateda M, Yoshikiyo H. Refractive index profile of a graded index fiber: measurement by a reflection method[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(4): 814-815.
- [16] Li Min, Song Wuzhou, Zhan Wei, et al. Measurement of optical fiber refractive index distribution based on white light scanning interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50: 0406004.
- [17] Koike Y, Ishigure T, Nihei E. High-bandwidth graded-index polymer optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1475-1489.
- [18] Huntington S T, Mulvaney P, Roberts A, et al. Atomic force microscopy for the determination of refractive index profiles of optical fibers and waveguides: a quantitative study[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(6): 2730-2734.
- [19] Marcuse D. Refractive index determination by the focusing method[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(1): 9-13.
- [20] Zhou Hongying, Chen Jiabi, Hu Qunhua, et al. Investigation of scan to measure the distributing of refraction ratio of section plane[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(s1): 159-161.