

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250128.

专题: 智算中心光网络算网融合关键技术

罗文勇, 杜城, 王雅琴, 等. 通信用空芯光纤技术发展与应用挑战[J]. 光通信研究, 2026(4): 67-75.

Luo W Y, Du C, Wang Y Q, et al. Development and Challenges of Hollow-Core Optical Fiber Technologies for Communications[J]. Study on Optical Communications, 2026(4): 67-75.

通信用空芯光纤技术发展与应用挑战

罗文勇^{1,2}, 杜城², 王雅琴^{1,2}, 栾艳彩², 罗鸣³, 王健¹

(1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心、光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 烽火通信科技股份有限公司, 武汉 430205; 3. 中国信息通信科技集团有限公司 光通信技术和网络全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 空芯光纤(HCF)已成为当前研究的热点,其超低损耗、超低非线性及超低时延等特性吸引了诸多研究者的目光,国内运营商等也在积极开展诸多试点工程以推进 HCF 通信系统技术的研究。但是,由于 HCF 本身的机理特性,其在长度精确测量、长时间工作寿命和现场环境下高稳定工作状态等方面仍存在诸多隐忧,这些问题将会对其实际通信系统工程应用带来挑战。HCF 技术对通信系统技术的革新需要更好地解决好这些挑战。这将是一个长期的工作,需要从诸如数据中心短距互连等特定通信场景应用出发夯实基础。

关键词: 光纤; 反谐振空芯光纤; 低损耗; 长度测量; 运行寿命

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Development and Challenges of Hollow-Core Optical Fiber Technologies for Communications

LUO Wenyong^{1,2}, DU Cheng², WANG Yaqin^{1,2}, LUAN Yancai², LUO Ming³, WANG Jian¹

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Fiber Home Communications Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China; 3. State Key Laboratory of Optical Communication Technology and Networks, China Information Communication Technology Group Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Hollow-Core Optical Fiber (HCF) has emerged as a prominent research hotspot, drawing considerable attention from researchers worldwide due to its exceptional properties, including ultra-low loss, ultra-low nonlinearity, and ultra-low delay. Domestic telecommunication operators and institutions are actively deploying projects to advance the development of hollow-core fiber-based communication systems. However, inherent mechanistic challenges associated with HCF, such as precise length measurement, long-term operational durability, and high-stability performance under real-world environmental conditions, raise critical concerns. These issues pose substantial barriers to the practical implementation of HCF in large-scale communication infrastructure. To harness the transformative potential of HCF technology for communication systems, efforts must be made to address these challenges systematically. This endeavor is anticipated to be a long process, requiring foundational advancements in specific application scenarios, such as short-reach interconnects within data centers.

Key words: optical fiber; anti-resonant HCF; low loss; length measurement; operational lifespan

0 引 言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)因其灵活结构设计和优异性能,作为新一代光纤技术一直受到研究者关注。PCF 的种类很多,在多个领域均有领先应用,例如可用于超连续光谱的高非线性 PCF、可用于实现具有优良温度性能光纤光栅的柚子型 PCF 等。但其广泛应用仍未能取得实质性进展。新型空芯光纤(Hollow-Core Optical Fiber,

HCF)技术的出现有望实现突破。

HCF 通过特定的包层结构将光限制在空气纤芯中传输,从根本上改变了光的传输方式,避免了传统石英玻璃光纤受材料本征限制带来的问题,可以实现更低衰减。由于光在 HCF 的中空中传输,其相比传统石英芯光纤,光信号的传输时延降低约 1/3;在非线性效应上,空气的低非线性折射率系数使得 HCF 具有超低非线性;另外, HCF 在色散等方面也表现出色。这些特性使得 HCF 在光通信、高功

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-06-16; 纸质出版日期: 2026-08-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(62125503); 国家自然科学基金资助项目(62261160388); 湖北省自然科学基金创新群体资助项目(2023AFA028); 湖北省技术创新计划重大科技资助项目(2024BAA001)

作者简介: 罗文勇(1980-),男,湖北仙桃人。正高级工程师,博士,主要研究方向为新型光通信光纤与通信系统。

通讯作者: 王健,教授。E-mail: jwang@hust.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

率激光传输和光与物质相互作用等领域展现出巨大的应用潜力。

然而,HCF 在实际应用中仍面临包括熔接和产业链完备性等诸多挑战^[1]。由于其本身的机理特性,HCF 的空气孔传输带来的瑞利散射极低,传统光时域反射仪(Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR)技术无法有效应用。这使其难以依赖现有技术实现长度的精确测量,在精确成缆和布线施工时面临工艺挑战。由于 HCF 极度依赖空气孔的形态与结构,但是组成空气孔的石英壁较薄,易受外界环境影响加速破损或变形,导致其存在工作寿命的时限问题,并且存在高低温环境等现场复杂环境下传输性能保持稳定的问题,使其工程应用也存在挑战。这些都还需开展相关研究推进其在特定场景中的应用。

1 HCF 技术概述

1.1 HCF 的结构与原理

传统光纤通常以实心的石英玻璃等材料作为纤芯,而 HCF 的中心是由空气或其他气体构成的空心区域,光主要在这个空心区域中传输。HCF 的光传输原理主要基于两种效应:光子带隙效应和反谐振效应,由此可将其分为光子带隙空芯光纤(Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber, HC-PBF)和反谐振空芯光纤(Hollow-Core Anti-Resonant Fiber, HC-ARF)。

HC-PBF 的导光原理基于光子带隙效应。如图 1 所示,在 HC-PBF 中,包层的周期性微结构形成了光子晶体,当光信号进入光纤的空气纤芯后,由于包层光子晶体结构的光子带隙作用,特定频率的光无法在包层中传播,从而被限制在空气纤芯内传输。这种光纤能够实现单模传输,并且可以通过调整包层的微结构参数,如空气孔的大小、间距和排列方式等,精确控制光子带隙的范围和特性,进而实现对不同波长光的有效传输。

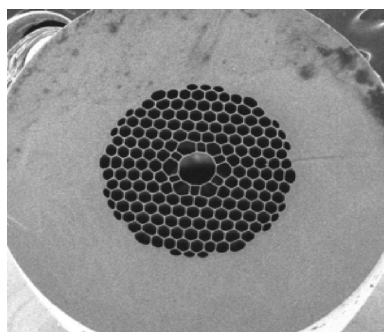


图 1 HC-PBF^[2]

HC-ARF 则基于反谐振效应实现光的传输。如图 2 所示,其包层通常由多个同心的石英环嵌套组成。通过调节石英环的壁厚,使得在特定波长下,光在包层中的传播受到强烈抑制,被限制在中间的空气纤芯中传输。具体来说,当光的波长满足反谐振条件时,光在包层界面处的反射率极高,光几乎无法进入包层,而是在空气纤芯中传播。其传输波长 λ_m 可表示为^[3]

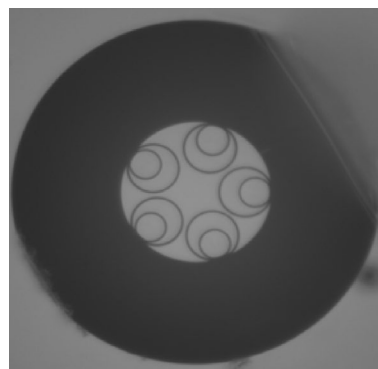


图 2 HC-ARF

$$\lambda_m = 2t\sqrt{n_{\text{glass}}^2 - n_{\text{air}}^2}/m, \quad (1)$$

式中: t 为石英壁厚度; n_{glass} 为石英折射率; n_{air} 为空气折射率; m 为一个正整数。当 λ_m 满足谐振条件时,光被泄漏;不满足谐振条件时,光被限制在纤芯中传输。

与 HC-PBF 相比,HC-ARF 具有更宽的导光通带,能够在更广泛的波长范围内实现光的有效传输。

1.2 HCF 发展历程

2002 年,英国巴斯大学的 Russell 教授和 Benabid 教授等人提出了一种 HCF 技术,也称为 HC-PBF^[4]。由于 HC-PBF 存在较大的纤芯内表面散射损耗,难以将其衰减降低到 1 dB/km 以下,其后发展出具有空气孔大小不规则周期排布的新型带隙 HCF,因其端面结构类似日本传统 Kagome 编织图案,也称为 Kagome 光纤^[5]。但这种 HCF 的导光机理是否可以用带隙理论解释,一直存在争议。

2008 年,Lunt 等人利用反谐振反射光波导(Antiresonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW)模型,通过反谐振反射机制构建了新的 HCF 导光原理和特性模型,对 Kagome 光纤的传输机理进行了新的诠释。基于这一新的导光机理,这一类型的光纤被命名为 HC-ARF^[6]。

2013 年,人们发现相比正曲率的纤芯结构,负曲率纤芯结构能获得更低的损耗^[7],如图 3(a)所示。在此基础上,负曲率单层圆管无节点 HC-ARF

被提出,推动 HCF 的发展进入新的轨道。其后,从 2017 年到 2024 年,北京工业大学和南安普顿大学等机构研究人员进行了诸多 HC-ARF 的探索。图 3 所示为负曲率结构及近年来几种低衰减 HCF 典型结构图。图 3(b)所示为 2024 年 Chen 等人将 1 550 nm 波段的 HC-ARF 衰减从 1.0 以上降低到 0.1 dB/km 的水平^[8];图 3(c)和图 3(d)所示分别为 2025 年衰减达 0.052 dB/km 的 HCF^[9]和衰减优于 0.05 dB/km 的 HCF 的研究报道^[10]。但是在长距离大容量通信系统测试中,CO₂ 吸收峰成为影响 C+L 波段传输的因素,其带来的吸收损耗会增加到近 0.4 dB/km^[11]。

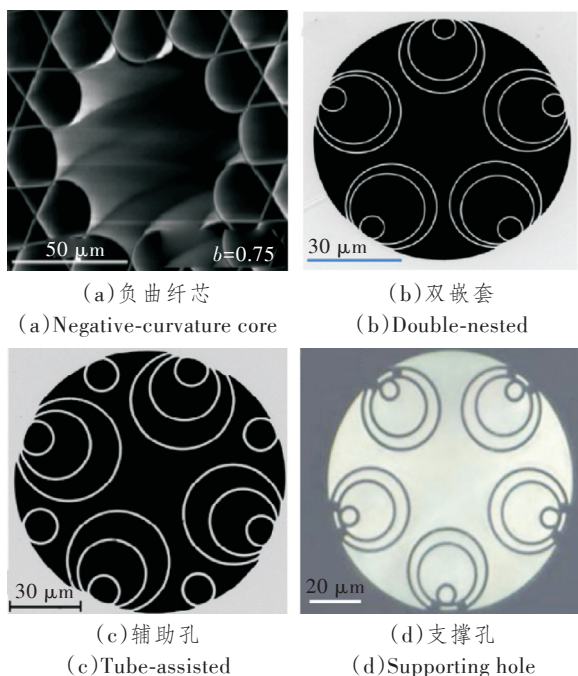


图 3 HC-ARF 的典型结构图^[7-10]

Figure 3 Typical structure diagram of HC-ARF

1.3 HCF 的主要特性

HCF 最显著的特性之一便是其超低损耗。传统石英光纤尽管在通信领域取得了巨大成功,但其损耗已接近材料本征极限。而 HCF 由于光在空气纤芯中传输,避免了材料对光的吸收和散射损耗。近年来,随着技术的不断突破,HCF 的损耗得到了显著降低,如多层嵌套型 HC-ARF 的损耗已降低至优于 0.08 dB/km@1 550 nm,超越了传统石英玻璃光纤 0.14 dB/km@1 550 nm 的损耗极限。这种超低损耗特性使得光信号在 HCF 中能够传输更远的距离,从而减少了信号中继站的数量。

HCF 具有超低非线性特性。在传统的石英光纤中,由于光与石英材料的相互作用较强,当光功率较高时,容易产生非线性效应,如克尔效应和受激拉

曼散射等。这些非线性效应会导致光信号的失真和串扰,限制了光通信系统的传输容量和距离。而在 HCF 中光主要在空气纤芯中传播,空气的非线性折射率系数远低于石英材料,使得 HCF 的非线性效应比常规光纤低 3~4 个数量级。这意味着在 HCF 中可以传输更高功率的光信号,而不会产生明显的非线性失真。以 128 正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 高阶调制及高功率放大器技术为例,HCF 的超低非线性特性可大幅提高入纤光功率,预期至少可将系统容量及传输距离提升 2 倍以上。在高功率激光传输领域,超低非线性特性也使得 HCF 能够更有效地传输高功率激光,避免了因非线性效应导致的激光能量损失和光束质量下降。

HCF 还具有超低时延特性。根据光的传播原理,光在介质中的传播速度 v 与介质的折射率 n 成反比,即 $v=c/n$,式中, c 为真空中的光速。空气的折射率约为 1,而石英光纤纤芯的折射率通常在 1.45~1.50 之间,这使得与传统石英光纤相比,光在 HCF 中的传输时延从约 5.00 下降至 3.46 $\mu\text{s}/\text{km}$ 。在数据中心互连中,低时延能够提高数据传输的效率,加快数据处理速度,提升整个数据中心的性能。

HCF 结构灵活设计的特点有助于其拓宽传输波段,从而加快在通信领域的应用进程。通过控制嵌套环壁厚 t ,使其在约 0.5 μm 时,可将 HCF 的反谐振传输带落在第 1 谐振带,从而能够支持多种光波段的传输,如 O、S、E、C、L 和 U 等波段。这种宽带传输特性使得 HCF 在波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 通信系统中具有很大的优势,可以实现更高容量的通信传输^[12]。

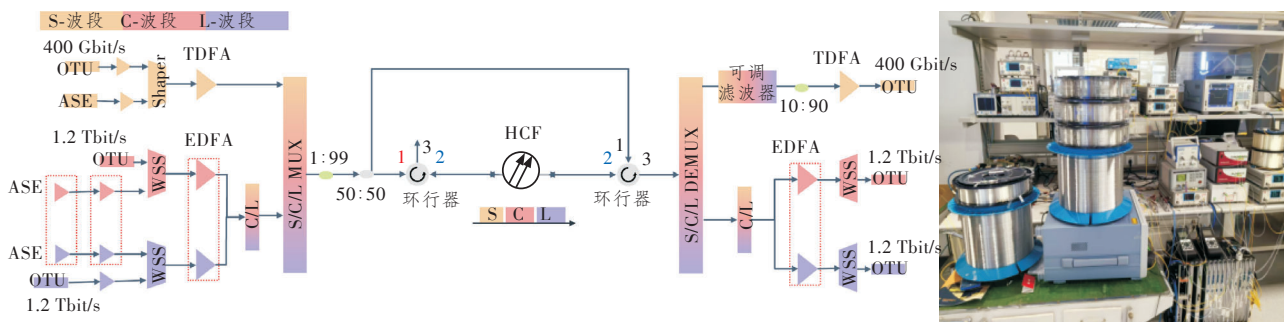
2 HCF 的通信应用进展

2020 年,南安普顿大学的产业化子公司 Lumenisity 推出基于 HC-ARF 的光缆跳线,通过特别设计的封装接头,可以实现低损耗和较高可靠的便利接续。2022 年,微软收购了 Lumenisity,并在 2024 年 11 月,宣布计划在 24 个月内部署 15 000 km HCF;2024 年 2 月,西班牙电信运营商 Lyntia Networks 与诺基亚、OFS 和 Interxion 合作,在马德里总部附近的真实环境中进行了 HCF 现场试验,在 1 386 km 的链路上,往返延迟降低了 4.287 μs 。

国内运营商已在积极开展 HCF 通信系统技术的试点工程。2024 年 5 月,烽火通信联合鹏城实验室、中国移动和光通信技术和网络全国重点实验室

等部署了基于 HCF 的超大容量实时传输系统,实现了 19.65 THz 超宽带 S+C+L 波段实时传输,单纤双向同波长传输最大传输容量超 270 Tbit/s,对

HCF 的低损耗、超低非线性及超低背向散射等特性进行了验证^[13],该传输系统架构如图 4 所示。



注: TDFA 为掺铥光纤放大器;EDFA 为掺铒光纤放大器;WSS 为波长选择开关;ASE 为放大自发辐射;OTU 为光转换单元。

图 4 HCF 多波段实时传输系统

Figure 4 Real-time multi-band transmission system based on HCF

2024 年 12 月 4 日,中国移动研究院举办了“中国移动空芯光纤技术成果发布及研讨会”,发布了采用 4 单元截断型双层嵌套结构的新型 HC-ARF,在 1 550 nm 具备 0.10 dB/km 超低损耗和 2.6 万倍高阶模抑制比,在深圳龙岗—东莞凤岗基于 HCF 完成了 160 波 $\times$ 800 Gbit/s 的传输系统技术试验;在实验室基于 HCF 完成了 S+C+L 超宽谱同波长单纤双向 377.6 Tbit/s 百公里传输,将现有单纤容量纪录提升了超过 1.5 倍。

2024 年,中国电信采购网发布《中国电信浙江公司 2024 年 HCF 光缆现场试验项目资格预审公告》,首次采购长度 95 皮长公里 HCF,开展了全球首个单波 1.2 Tbit/s、单向超 100 Tbit/s 和传输距离达 20 km 的 HCF 光缆传输系统现网示范工程。中国联通联合长飞和领先科技等产业链实现了基于 10.2 km HCF 的 32×1.2 Tbit/s 传输容量。

在应用拓展方面,2024 年,中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室与罗素先进光波科学中心团队在基于 HC-ARF 的蓝移孤子研究中取得进展。他们通过理论和实验相结合,揭示了蓝移孤子的谱宽调控规律遵循孤子面积理论。通过改变 HC-ARF 中的气压和入射脉冲能量,获得了中心波长调谐范围为 900~650 nm、带宽调谐范围为 100~180 nm(700 nm 波长处)的可调谐超快脉冲^[14]。

HCF 的低损耗和低色散特性,还使其有可能成为量子通信中光量子信号的传输介质。通过在 HCF 中传输单光子或纠缠光子对,可以实现量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)和量子隐形传态等,有望为量子通信的发展提供新的技术途

径。2025 年,有报道称,在 101.6 km HCF 线路上实验验证了经典光传输网络与 QKD 的共存,在经典信号功率超过 20 dBm 条件下实现了安全密钥分发,验证了 HCF 同时承载大容量经典通信与量子安全传输的可行性^[15]。

3 HCF 技术面临的挑战

3.1 长度精确测量难题

3.1.1 测量原理局限性

常用的光纤衰减测量方法有剪断法、背向散射法和插入损耗法。背向散射法已有专门的 OTDR 仪表,是生产车间和施工现场的必备仪表。背向散射法是基于光纤中的散射原理而发明的一种测量方法。利用该方法不仅可测出光纤衰减系数,而且还可判定衰减沿光纤的均匀性、光学连续性、物理缺陷、连接损耗和光纤长度^[16]。

在传统光纤长度测量中,采用的 OTDR 测量原理是基于光纤的背向散射现象。当光信号注入光纤后,部分光会发生背向散射,OTDR 通过检测这些背向散射光的时间延迟和强度变化来计算光纤的长度和损耗分布。在 HCF 中,由于光主要在空气纤芯中传输,空气的背向散射系数远低于传统光纤的石英材料,这使得 OTDR 接收到的背向散射光信号极其微弱,严重影响了测量的准确性和可靠性。

根据 OTDR 的测量原理,其测量精度与背向散射光的强度密切相关。背向散射光强度过低时,测量结果容易受到噪声的干扰,导致测量误差增大。当背向散射光强度低于 OTDR 的检测阈值时,可能无法准确检测到背向散射信号,从而无法实现对 HCF 长度的有效测量。另外,HCF 的特殊结构也

可能导致光在传输过程中的模式耦合和散射特性发生变化,进一步增加了基于传统 OTDR 原理测量的复杂性。

在 HC-ARF 中,根据 ARROW 理论和限制耦合理论^[17],如图 5 所示,存在着纤芯模式、包层模式和界面散射模式等 3 种模式^[18]。这使得通过测量时延来精确计算光纤长度较为困难。

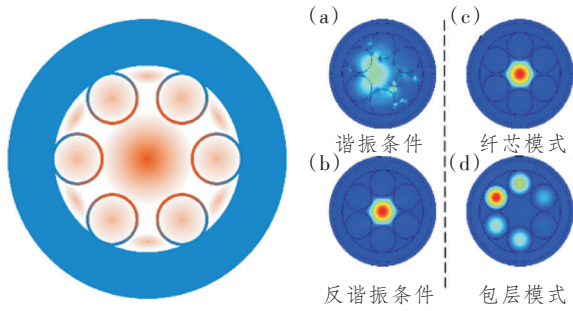


图 5 HC-ARF 中光传输的模式

Figure 5 Modes of optical transmission in HC-ARF

由于多种模式的存在,在 HC-ARF 中传输的光在 1 550 nm 仍存在约 3 ps/nm/km 左右的色散,且当外界环境影响光纤状态造成模式波动时,其色散会发生细小的变化。这使得当前 HC-ARF 的长度更为依赖光纤拉丝塔和筛选复绕机的卷绕计米。而通过光谱仪或光功率计来测量 HC-ARF 的衰减时,需通过手工精确测量切割下来的光纤长度,从而较为准确的计算光纤衰减。业界也有研究通过向 HCF 内注入气体,从而提升瑞利散射,进而实现公里级长度的测量^[19]。在实际系统搭建中,我们采用两端熔接单模光纤的方式,从而实现通过 OTDR 进行 HCF 的衰减和长度测量,其 OTDR 测试曲线如图 6 所示。

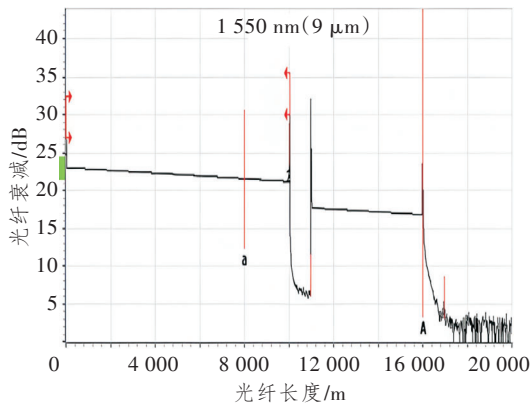


图 6 HCF 两端熔接单模光纤后 OTDR 测试曲线

Figure 6 OTDR test curve for HCF fusion-spliced to single-mode fiber at both ends

3.1.2 环境因素影响

HCF 的长度测量精度还受到环境因素的显著影响。温度的变化会导致 HCF 的材料和结构发生微小的热胀冷缩,从而改变光纤的长度和折射率分布。对于一些高精度的光纤传感和通信应用,这种因温度变化引起的长度变化可能会导致测量误差超出允许范围。根据热胀冷缩原理,光纤材料的长度变化与温度变化之间存在线性关系,其热膨胀系数决定了长度变化的程度。不同类型的 HCF 由于材料和结构的差异,其热膨胀系数也有所不同,这使得在不同温度环境下,HCF 的长度变化特性难以准确预测和补偿。

气压的变化同样会对 HCF 的长度测量产生影响。HCF 的空气纤芯与外界环境存在气压差,当外界气压发生变化时,尤其是在长时间拉制 HCF 时,空气纤芯的气压也会相应改变,进而导致空气的折射率发生变化。HCF 纤芯折射率 n_{air} 可表示为^[20]

$$n_{\text{air}} = 1 + \delta(P, T), \delta \propto P/T, \quad (2)$$

式中: P 为气压; T 为温度。有实验表明,当 P 从 1 013 hPa 的标准大气压降至约 500 hPa 的高海拔环境大气压时,HCF 的群折射率变化 $\Delta n_g \approx 1 \times 10^{-6}$ 。这会导致 1 km 光纤的时延误差达 3.3 ps,其对应 1 km 的长度测量误差约 0.5 mm。

3.2 长时间工作寿命隐忧

HCF 的长时间工作寿命受到其材料和结构的显著影响。石英材料理论断裂应力 σ 根据格里菲斯理论可表示为^[21]

$$\sigma = \left(\frac{2Er}{\pi L} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量; r 为单位面积的表面能; L 为裂纹长度。对于石英光纤而言,由于其脆性特征,必然存在着微小裂纹,称为格里菲斯裂纹,其会使局部应力扩大为总施加应力的 10 倍乃至 100 倍以上,从而导致其实际强度比理论预计的要低 1~3 个数量级。如定义强度衰减倍数为理论强度与实际强度的比值,如图 7 所示,对于原子间距 $d=2 \times 10^{-10}$ m 的石英材料,随着裂纹尺寸的增加,强度衰减倍数将迅速上升。裂纹长度 $L=0.5 \mu\text{m}$ 的裂纹即可使断裂强度降低到理论强度的 0.5%^[22]。

目前光纤光缆行业通常用光纤断裂累积概率的威泊分布来表征光纤的强度,即:一定长度的光纤,在应力 σ 的作用下,光纤的断裂累积概率可用威泊分布表示为^[23]

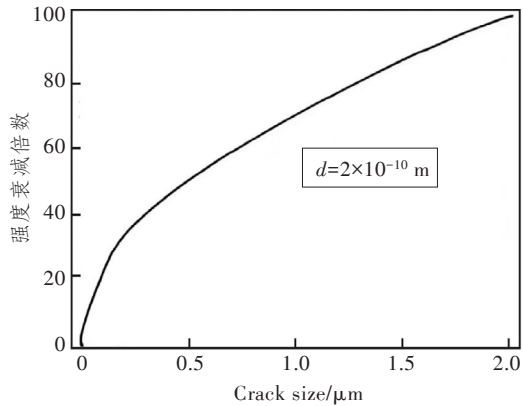


图7 光纤理论断裂强度与裂纹尺寸的关系曲线^[22]
Figure 7 Relationship curve of theoretical fracture strength of optical fiber vs. crack size

$$F(L, \sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (4)$$

式中: F 为 $\leq \sigma$ 的应力下光纤断裂的累积概率; σ_0 为在“标距”长度 L_0 下测得的, 与 e^{-1} 或 36.8% 的累积概率相对应的强度; L_0 、 σ_0 和 m 均为常数。对于直径为 125 μm 的传统石英光纤而言, 一般要求其寿命达到 30 年左右, 目前所做极端试验推算的高可靠光纤的寿命可达 60 年左右。

为实现与传统石英光纤相当的强度, 目前 HC-ARF 石英包层的壁厚通常也达到了 60 μm 以上。但是, HCF 的多嵌套管结构也增加了其长时间工作的复杂性。根据反谐振理论计算, 即使 HC-ARF 的石英包层部分仍完好, 但如果嵌套环壁发生断裂, 则反谐振效应将受到严重影响, 造成衰减增大, 乃至无法传递光信号。目前用于通信波段 HC-ARF 的嵌套环壁厚通常有 0.5、1.0 和 2.0 μm 等 3 种类型。由式(3)和式(4)可知, 石英材料理论断裂应力 σ 与单位面积的表面能 r 呈正相关, 表面能 r 与对应石英材料的厚度呈正相关。因此, 对于石英环壁厚为 1.0 μm 左右的 HC-ARF, σ 相比常规石英光纤至少要小 10 倍以上。对应的, 当处于同一应力时, HC-ARF 的断裂时间相比常规石英光纤将会大幅减少。由于微裂纹的生长是一个先慢后快的过程, 这意味着当 HCF 工作一定时间后, 其后续失效有可能是在某个不可预知的时间段快速发生的状态。这对于其工程应用形成了较大的挑战。

3.3 现场环境下高稳定工作状态挑战

HCF 在实际应用中面临着环境侵蚀的风险, 这对其长时间工作寿命构成了严重威胁。水汽是影响 HCF 性能的重要环境因素之一。HCF 的空气纤芯

与外界环境存在一定的连通性, 水汽容易进入光纤内部。如图 8 所示, 当水汽进入 HCF 后, 会在光纤内部形成水膜。水对光具有较强的吸收作用, 会导致光信号的衰减增加, 从而降低光纤的传输性能。水汽还可能与光纤的材料发生水解反应, 促生微裂纹, 进而影响光纤的结构和性能。在高温高湿的环境下, 水解反应会加速进行, 使光纤的损耗迅速增加, 严重影响其长时间工作寿命。

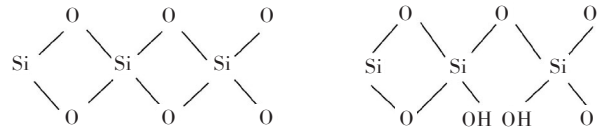


图8 石英玻璃分子结构和 OH 离子对 SiO₂ 分子的损害^[24]

Figure 8 Molecular structure of silica glass and damage of OH⁻ ions to SiO₂ molecules

由于 HC-ARF 的长度难以精确测量, 因此在成缆时的余长精确控制成为难题。这使其在现场环境下稳定工作面临挑战。由于 HCF 的嵌套管壁较薄, 通常在几微米甚至更薄, 这使得其更易受外界应力而挤压变形。在实际的铺设和使用过程中, 光纤可能会受到拉伸、弯曲和挤压等外力作用。受机理限制, 在弯曲情况下, HC-ARF 的弯曲半径不能过小, 否则会导致光信号的泄漏和传输性能的下降。传统石英光纤在弯曲半径为几毫米时仍能保持较好传输性能, 而 HCF 的最小弯曲半径通常需在几十毫米以上, 这给实际工程的铺设和安装提出了更高要求, 也对 HC-ARF 的余长控制提出了更高要求。

4 HC-ARF 技术的进一步发展方向

4.1 新型测量技术研发

针对 HCF 长度精确测量难题, 积极探索新型测量技术至关重要。

基于光学频率域反射 (Optical Frequency-Domain Reflectometry, OFDR) 技术的改进是一个重要方向。OFDR 技术虽然也基于瑞利散射, 但具有空间分辨率高、动态范围大和测试灵敏度高等特点。目前一些较短尺度的 HCF, 采用 OFDR 技术测量 HCF 长度时, 通过优化光源的扫频范围和相干检测算法, 可以将测量精度提高到厘米量级甚至更高。但是, 当 HCF 的长度达到百米乃至千米量级以上时, 当前的 OFDR 技术仍难以有效避免信噪比过低的问题, 其技术还需进一步发展^[25]。

采用布里渊光时域分析 (Brillouin Optical Time-

Domain Analysis, BOTDA)也是一个方向。利用布里渊散射频移与温度和应变的依赖关系,通过分布式传感反推光纤长度,可实现公里级长度测量, HCF 的布里渊增益谱与传统光纤差异显著,需发展高功率泵浦光源^[26],并降低成本。

利用飞秒激光频率梳的相干性,通过干涉条纹相位解调精确测量光程差,可以实现微米级高精度测量,适合短距离的 HCF 特定场景应用^[27]。

在短距离实验室环境使用光脉冲飞行时间(Time-of-Flight, ToF)法也是一个可行的办法,通过直接测量光脉冲往返时间,可在 1 km 以内的 HCF 实现±1 mm 的测量精度^[28]。有研究结合气压变化探究光纤内气压变化特性,从而更好判断 HCF

充气控制,提升测量精度。HCF 损耗降低后应用潜力大幅提升,但其光电特性依赖纤芯与包层气孔内气体压强和组分,通过开发基于 OTDR 的新型分布式检测技术,可实现长距离 HCF 充气过程中内部压强分布演化的测量^[29]。

也可将上述方法进行结合,例如 OFDR、ToF 测量和光谱干涉等结合起来来进行 HCF 的长度和色散的测量。通过借助高功率的窄线宽单频激光器,可实现 11 km HCF 长度和色散的精确测量^[30]。

这些方法的适用场景如表 1 所示,与现有实心光纤的工程技术相比在实用性上还有较大差距,还需进一步开展研究。

表 1 几种光纤长度测量方法比较

Table 1 Comparison of various optical fiber length measurement methods

方法	测量范围	精度/分辨率	适用场景
OTDR	1~100 km	±0.1 m	长距离、现场部署(传统方法)。
ToF	<1 km	±1 mm	实验室短距离高精度。
干涉法	<100 m	±1 μm	超短距离校准、缺陷检测。
OFDR	<1 km	1 mm	分布式测量、高分辨率缺陷定位。
BOTDA	1~10 km	±0.05%	特殊需求(需散射支持)。

4.2 标准制定与完善

制定统一的 HCF 产品、测试方法和应用要求等标准,对于推动 HCF 技术的发展和应用至关重要。目前,HCF 技术尚处于发展阶段,不同厂家生产的 HCF 在结构和性能等方面存在差异,缺乏统一的标准规范。这不仅给 HCF 的生产制造带来了困难,也影响了其在实际应用中的兼容性和互换性。制定统一的产品标准,明确 HCF 的结构参数和性能指标等要求,有助于规范市场,提高产品质量,促进产业的健康发展。

在测试方法标准方面,由于 HCF 的特殊结构和传输特性,传统的光纤测试方法难以满足其测试需求,需要制定专门的测试方法标准,如针对 HCF 长度精确测量的标准方法,解决 OTDR 等传统测量方法在 HCF 测量中存在的问题;制定 HCF 损耗、非线性和时延等性能指标的测试标准,确保测试结果的准确性和可比性。

应用标准的制定同样不可或缺。不同的应用场景对 HCF 的性能要求各异,如在高速光通信,应考虑制定在更高功率传输下 HCF 与现有通信设备的接口标准和传输协议标准等,确保 HCF 能够与现有通信网络无缝对接。

4.3 应用场景拓展与优化

在数据中心等短距互联场景中,HCF 能够有效发挥其特性,并降低其应用风险。HCF 的超低时延特性能够显著提高数据中心内部和之间的数据传输速度。HCF 相比传统石英光纤,其传输时延从约 5.00 下降至 3.46 μs/km,降低了约 1/3,这使得数据能够更快地在服务器之间传输,减少了数据处理的延迟,提高了业务响应速度。

HCF 的低损耗特性减少信号失真和误码率,提高了数据中心的整体性能。在高频交易场景中,每毫秒的延迟都可能导致巨大的经济损失,HCF 的低时延特性能够满足高频交易对时间精度的严格要求,能为金融机构提供更快速和更准确的交易服务。

为充分发挥 HCF 在数据中心短距互联中的优势,还需要解决一些关键问题。例如当期数据中心采用的普遍为多模光模块与多模光纤,需优化 HCF 的泄露波导模式以减少对有效信号的影响,发展 850 nm 衰减可达 0.33 dB/km 的覆盖多模波段的 HC-ARF^[31]。当前长距离的数据中心互联中广泛使用的是传统石英光纤。要实现 HCF 的应用,需研发新型的连接器和适配器,实现 HCF 与现有设备的无缝对接。另外还需要优化 HCF 的熔接技术,提高熔接的质量和稳定性,降低熔接损耗。通过

采用先进的熔接工艺和设备,如自动化熔接机和高精度熔接控制技术,可将 HCF 的熔接损耗降低到 0.1 dB 以下,以满足数据中心在实际工程应用时的要求。

结合实际维护,还需加强对 HCF 在数据中心等环境下的性能监测和维护。可以采用分布式光纤传感技术,结合单模光纤与 HCF 双纤同管的同步铺设,对 HCF 受外界应力等情况进行实时监测,一旦发现异常,及时采取措施处理。

5 结束语

HCF 作为一种新型光纤,凭借其独特的结构和导光原理,展现出了卓越的性能优势,已在高速光通信和高功率激光传输等多个领域展现出广阔的应用前景。但通信用 HCF 技术在实际应用中仍面临包括长度精确测量、长时间工作寿命和现场环境下高稳定工作等从机理出发面临的挑战。在数据中心等短距应用场景,HCF 的超低损耗、超低时延和超低非线性可以得到有效发挥,同时可有效控制其机理带来的相关问题。通过在短距应用场景的规模应用,将能进一步推动通信用 HCF 技术的发展,从而为其更广泛应用奠定良好基础。

参考文献:

- [1] 李萍,陈伟.空芯反谐振光纤长距离通信的机遇与挑战[J].光通信研究,2023(2):1-8.
Li P, Chen W. Opportunity and Challenge for Hollow Core Anti Resonant Optical Fiber in the Long-Distance Telecommunication[J]. Study on Optical Communications, 2023(2): 1-8.
- [2] Song N, Wu C, Luo W, et al. High Strength Fusion Splicing of Hollow Core Photonic Crystal Fiber and Single-Mode Fiber by Large Offset Reheating[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 32: 106-110.
- [3] Belardi W, Knight J C. Effect of Core Boundary Curvature on the Confinement Losses of Hollow Antiresonant Fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21912.
- [4] 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.
- [5] Luan F, George A K, Hedley T D, et al. All-Solid Photonic Bandgap Fiber[J]. Optics Letters, 2004, 29(20): 2369-2371.
- [6] Lunt E J, Measor P, Phillips B S, et al. Improving Solid to Hollow Core Transmission for Integrated AR-ROW Waveguides[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20981.
- [7] Debord B, Alharbi M, Bradley T, et al. Hypocycloid-Shaped Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Part I: Arc Curvature Effect on Confinement Loss[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28597.
- [8] Chen Y, Petrovich M N, Numkam Fokoua E, et al. Hollow Core DNANF Optical Fiber with <0.11 dB/km Loss [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, CA, US: Optica Publishing Group, 2024: Th4A.8.
- [9] Gao S, Chen H, Xiong Y, et al. 40 km, 0.052 dB/km and 83 km, 0.076 dB/km in Interstitial-Tube-Assisted Hollow-Core Fibre [C]//2025 European Conference on Optical Communications (ECOC). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2025: 11263318.
- [10] Ding Y, Li P, Chen G, et al. Support Tube Hollow-Core Fiber with 0.05 dB/km Attenuation [C]//2025 European Conference on Optical Communications (ECOC). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2025: 11263260.
- [11] Ge D, Xiong Y, Zuo M, et al. Field Trial of CO₂ Absorption Impact on Coherent Transmission over 36.8 km Deployed AR-HCFS [C]//2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2025: 11046379.
- [12] Zhang X, Niu Q, Du C, et al. Three-Layer Negative Curvature Hollow Core Anti-Resonant Fiber with Low-Loss, Low Dispersion and High Manufacturing Tolerance in S + C + L Band[J]. Optical Fiber Technology, 2025, 95: 104447.
- [13] Ge D, Xiong Y, Wu Y, et al. First Penalty-Free Real-Time Co-Frequency Co-Time Full-Duplex Optical Fiber Transmission with 202.1 Tb/s Net Capacity Enabled by Hollow-Core 5-Element NANF [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego California: Optica Publishing Group, 2024: M3J.2.
- [14] Liu D, Huang Z, Pan J, et al. Spectral Bandwidth Tuning of Photoionization-Induced Blue-Shifted Solitons in Gas-Filled Hollow-Core Anti-Resonant Fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2024, 30(6): 5100209.
- [15] Kong W, Dou T, Zhang L, et al. Experimental Coexistence of Quantum Key Distribution and High-Power Classical Communication over 101.6 km Hollow-Core Fiber[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2025, 17(10): 914-924.

- [16] 赵梓森. 光纤通信技术概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Zhao Z. S. Introduction to Optical Fiber Communication Technology [M]. Beijing, China: Science Press, 2012.
- [17] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, et al. Ultralow Transmission Loss in Inhibited-Coupling Guiding Hollow Fibers[J]. Optica, 2017, 4(2): 209.
- [18] Deng A, Hasan I, Wang Y, et al. Analyzing Mode Index Mismatch and Field Overlap for Light Guidance in Negative-Curvature Fibers[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27974–27988.
- [19] Slavík R, Numkam Fokoua E R, Bradley T D, et al. Optical Time Domain Backscattering of Antiresonant Hollow Core Fibers[J]. Optics Express, 2022, 30(17): 31310–31321.
- [20] Lægsgaard J, Roberts P J. Influence of Air Pressure on Soliton Formation in Hollow-Core Photonic Bandgap Fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(9): 1795.
- [21] Feng D. Metal Physics [M]. Beijing, China: Science Press, 1999.
- [22] 李殿军, 李世明, 孟范江. 光纤端面的断裂机理及制备方法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2362–2368.
Li D J, Li S M, Meng F J. Fracture Mechanism of Fiber Terminal-Faces and Their Fabrication[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2362–2368.
- [23] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.
Chen B Y. Design and Manufacturing of Optical Fiber and Cable[M]. Hangzhou, China: Zhejiang University Press, 2016.
- [24] 赵梓森, 李诗愈, 唐仁杰等. 中国材料工程大典第12卷第10篇通信光纤材料及其工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Zhao Z S, Li S Y, et al. Volume 12, Part 10 of China Materials Engineering: Communication Optical Fiber Materials and Processes [M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2006.
- [25] Michaud-Belleau V, Fokoua E N, Bradley T D, et al. Backscattering in Antiresonant Hollow-Core Fibers: Over 40 dB Lower than in Standard Optical Fibers[J]. Optica, 2021, 8(2): 216.
- [26] Dunagin R E, Mears R, Bueno-Baques D, et al. Low Spontaneous Brillouin Scattering in Anti-Resonant Hollow-Core Fibers in GHz Frequency Range [J]. APL Photonics, 2025, 10(12): 121303.
- [27] Feng Z, Marra G, Zhang X, et al. Stable Optical Frequency Comb Distribution Enabled by Hollow-Core Fibers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(11): 2200167.
- [28] Wang Y Y, Wheeler N V, Couny F, et al. Low Loss Broadband Transmission in Hypocycloid-Core Kagome Hollow-Core Photonic Crystal Fiber [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 669–671.
- [29] Elistratova E, Kelly T W, Davidson I A, et al. Distributed Measurement and Modified Navier-Stokes Model of Gas Pressure Profile Evolution in Hollow-Core Antiresonant Fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2024, 30(6): 4301110.
- [30] Liu Q, Huang J, Wang J, et al. High-Precision and Synchronous Measurement of Fiber Length and Dispersion Using Optical Frequency Comb-based Time-Delay Dispersion Interferometry [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1004613.
- [31] Adamu A I, Hassan M R A, Chen Y, et al. 10.9 km Hollow Core Double Nested Antiresonant Nodeless Fiber (DNANF) with 0.33 dB/km Loss at 850 nm[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego, CA, US: Optica Publishing Group, 2024: M3J. 1.