

反谐振空芯光纤技术发展与应

王传瑞¹ 王睿¹ 丁爱娟¹ 陶卓¹
WANG Chuanrui WANG Rui DING Aijuan TAO Zhuo

摘要

面向未来光通信系统大容量、低时延、低损耗的高速传输需求,传统实芯光纤的传输性能已趋近物理理论极限,难以适配下一代光通信技术的发展要求。反谐振空芯光纤(AR-HCF)凭借独特的结构优势,突破了传统实芯光纤的性能桎梏,成为当前光纤通信领域的研究热点与核心发展方向。文章围绕反谐振空芯光纤关键技术展开系统性研究,首先阐述了AR-HCF的基础传输理论,剖析其核心损耗产生机制及低损耗优化方法;其次,将AR-HCF与商用主流实芯光纤的关键传输性能进行对比分析,并详细介绍了其制备工艺与成缆关键技术,结合现有试验数据与现网应用实践,总结了反谐振空芯光纤在传输性能层面的核心优势,梳理了其规模化商用过程中亟待解决的技术难题与工程问题;最后,展望了AR-HCF技术的发展趋势与应用前景,可为下一代高速、低损耗光通信传输技术的研究与工程落地提供参考。

关键词

反谐振空芯光纤;损耗机制;传输指标;工程应用

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.018

0 引言

算力网络、“东数西算”工程、AI大模型等大数据流量业务需要超大带宽、超低时延的光传输技术,光纤作为光传输基础设施,一直备受业界关注。目前广泛应用的实芯光纤,受包层-纤芯实芯结构和玻璃材料本征限制已接近性能极限,而反谐振空芯光纤(anti-resonant hollow-core fiber, AR-HCF)以空气替代实芯石英介质,理论上具备超低时延、超低损耗、超低非线性和超大可用频谱带宽,是突破实芯光纤通信性能瓶颈的重要手段,代表光纤技术发展的未来,也是目前通信行业发展的热点。

1 AR-HCF 基础理论

空芯光纤最初起源于光子晶体光纤概念,前后经历了“光子带隙光纤”^[1]与“反谐振光纤”^[2]两个阶段,“光子带隙光纤”将光子限制在周期性晶格结构的包层带隙中进行传导,但由于空气-玻璃界面的表面散射限制了损耗水平和工作带宽,被证明不适合作为大容量通信光纤使用。2002年,南安普顿大学巴斯团队提出“反谐振光纤”结构,将玻璃毛细管作为光纤导光的谐振器,将谐振波长之间的光限制在毛细管内的空气纤芯中低损传导。

和实芯光纤基于光的全反射理论不同,反谐振空芯光纤的导光理论可类比法布里-珀罗干涉仪中反射率最大时的“反谐振”状态,假设玻璃毛细管为均一壁厚 t 和均一折射率 n 时,

由下式定义的谐振波长的光从毛细管中泄露透射,而谐振波长之间的光被限制在毛细管内进行传导^[3]:

$$\lambda_m = \frac{2t}{m} \sqrt{n^2 - 1}, \quad m = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

为进一步降低损耗,防止光的泄漏,多层反谐振结构^[4]、嵌套管结构^[5]和截断式结构^[6]等被相继提出,目前四单元截断双层嵌套管结构AR-HCF,可达到平均衰减系数 ≤ 0.1 dB/km,最低衰减系数接近0.06 dB/km水平^[6],已远低于G.652D和G.654E光纤,而且AR-HCF以纤芯中的空气作为传输介质,较普通单模光纤提高了光的传输速度和可接收光功率密度,可降低通信时延约1/3,降低非线性系数3~4个数量级,因此在时延、容量和衰减等关键指标上,AR-HCF可满足未来光通信传输要求。

2 AR-HCF 特性

2.1 损耗机制

损耗是光纤最主要的性能,和实芯光纤相同,AR-HCF的损耗也可以分为内部固有和外部影响两个类别,表1分析汇总了AR-HCF固有损耗和外部损耗的分类、成因和目前主要解决办法。固有损耗是目前AR-HCF技术研究的重点,而限制损耗是固有损耗中最主要的因素,也是AR-HCF结构设计的关键。几乎所有的固有损耗可以通过增大纤芯尺寸来降低,但提高纤芯尺寸,又会降低光纤的单模特性,因此合理的包层结构才能在降低损耗的同时,抑制高阶模式的传输。

1. 中通服咨询设计研究院有限公司 江苏南京 210019

而外部损耗的降低主要方法为改进制造工艺，提高光纤和光缆的机械性能、环境性能等方面，也是未来规模化生产应用需要面对的问题。

表 1 AR-HCF 固有损耗和外部损耗的分类、成因和目前主要解决办法

类别	损耗类别	成因	解决办法
固有损耗	限制损耗	光在纤芯与包层边界无法实现全反射，造成一定的“泄露”	增加纤芯尺寸；添加反谐振层；增加嵌套管
	材料吸收损耗 ^[7-8]	1. 玻璃材料及制备时引入的杂质对波导的吸收 2. 纤芯内的空气或其他气体对部分波长光的吸收	1. 减少玻璃管壁厚；增大纤芯尺寸 2. 增加去 OH ⁻ 工艺，减少气体吸收
	体散射损耗 ^[9]	玻璃材料和纤芯中固有的瑞利散射	影响较小
	表面散射损耗 ^[10]	光纤内部气体和玻璃界面间的固有粗糙度引发的吸收和散射	改进制造工艺
	微弯损耗 ^[11-12]	光纤轴线发生微小位移（nm 级），引发额外损耗和偏振模色散	1. 增大光纤和涂覆直径，增强光纤强度 2. 光纤外部增加软性涂层，减少外部振动 3. 避免使用易受微弯损耗影响的波段
外部损耗	形变损耗	由于 AR-HCF 光纤为非简单圆柱体对称结构，横向和纵向结构变形可引发损耗	提高光纤一致性
	宏弯损耗	光纤弯曲（mm 级别）导致光的传输路径不能保持直线，引入的额外损耗	在成缆和使用中保证光纤的合理弯曲半径

2.2 AR-HCF 主要性能参数

除衰耗性能外，光纤的工作波段、模场直径、有效面积、几何尺寸、截止波长、高阶模式抑制比、瑞利散射、色度色散（CD）、偏振模色散（PMD）等指标对未来光通信技术发展，也非常重要。表 2 对 G.652D/654E 光纤和 AR-HCF 各项关键指标进行了对比。除 PMD 性能外，AR-HCF 各项指标均优于现网 G.652D 或者 G.654E 光纤，而且瑞利散射等指标，通过工艺改进，还有后期进一步提升的可能。因此，未来传输系统需要向高功率、高阶调制、超宽谱的方向持续发展，各种核心光电器件都需要随之改变。

表 2 G.652D/654E 光纤和 AR-HCF 各项关键指标对比

指标	G.652D/654E 等光纤	AR-HCF
支持工作波段	常用 C 和 L 波段	600~2 200 nm 的近红外波
模场直径	G.652D 约 9 μm G.654E 约 12.5 μm	根据不同结构计算
有效面积	G.652D 80 μm ² G.654E 130 μm ²	目前约 240~500 μm ²
几何尺寸	纤芯直径 9 μm，包层直径 125 μm，涂覆后 250 μm	目前纤芯直径约 20~30 μm
截止波长和高阶模式	G.652D 1 460 nm， G.654E 1 500 nm，单模	无截止波长，准单模
瑞利散射	约 -72 dB/m	约 -100 dB/m
色度色散 CD	1 550 nm 约 17 ps/(nm·km)	2~3 ps/(nm·km)
偏振模色散 PMD	约 0.1 ps /km1/2	约 0.4~0.6 ps/km1/2

3 AR-HCF 制备及成缆技术

相较实芯光纤，AR-HCF 的制备方法也发生了重大变革，基于气相沉积的预制棒生产过程可能会被完全抛弃。根据目前国内外领先的空芯光纤制造商生产情况，不需要沉积设备，通过外购玻璃管进行堆叠、焊接、切割等机械方法就可以制作 AR-HCF 微结构预制棒。光纤生产的难点集中在拉丝过程，空芯光纤的非简单对称多孔结构，使得其拉丝过程中受力学和热学效应影响更大，对理论和工程经验要求更高。

AR-HCF 成缆可采用现有缆型，目前在用的空芯光缆均在单根松套管内放置 1~2 芯 AR-HCF，多用 G.652D/G.654E 和 AR-HCF 混纤的 GYTS 光缆结构^[13]，成缆附加损耗、拉伸、压扁、反复弯曲、冲击、扭转、高低温循环等机械性能和环境性能，基本满足现行行标要求。但是目前 AR-HCF 不适用于紧套结构，会带来较大的附加损耗，同时由于 AR-HCF 光纤尺寸和弯曲半径普遍较实芯光纤大，按现行层绞式光缆行标规定的松套管尺寸和壁厚，单根松套管内可以容纳的 AR-HCF 数量会变少，因此对于大芯数 AR-HCF 光缆，松套管尺寸需重新测量计算，且为了增强对 AR-HCF 光纤的保护，厂家会增加纤膏和缆膏填充，因此 AR-HCF 光缆直径和重量会相应增大，增加在小孔径通信管道内的穿放难度。

4 AR-HCF 应用分析

4.1 应用情况

2021 年，Lumenisity 公司与伦敦证交所合作，铺设了 10 km 空芯光纤，并实现了 10 Gbit/s 传输验证，是全球首个空芯光纤现网传输。2024 年国内各运营商纷纷开展空芯光纤的传输技术试验网建设，验证空芯光纤在单波 800 Gbit/s 和 1.2 Tbit/s，100 Tbit/s 以上容量传输系统中的

性能。2025 年,空芯光纤进入“商用元年”,7 月中国移动使用长飞光纤产品宣布全球首条空芯光纤商用^[14],10 月中国联通使用亨通光电产品投入运营空芯光纤线路^[15]。截至 2025 年 10 月,中国电信已三次商用采购空芯光纤,中国移动广东公司和宁夏公司也分别完成空芯光纤招标采购。在供应商方面,长飞光纤宣称已具备空芯光纤规模化量产能力,并提供工程熔接服务,亨通光电、中天科技、烽火通信等主要厂家也宣布完成空芯光纤研发生产基地建设,具备大规模供货能力。

反谐振空芯光纤的性能也在不断得到验证,2024 年 5 月中国移动联合暨南大学、北京大学和烽火通信,完成了全球首个 202.1 Tbit/s 同时同频全双工空芯光纤传输实验^[16],同年烽火通信、武邮国重和鹏城实验室进一步扩充了 S 波段,将传输容量提高至 270 Tbit/s,验证了 AR-HCF 的大容量传输性能。2025 年 10 月,中国电信联合长飞光纤、华为和广东工业大学在实验室环境中,采用 EDFA(掺铒光纤放大器)的极简放大配置,实现了单波 800 Gbit/s 速率下 611.9 km、单波 1.2 Tbit/s 速率下 436.1 km 的单跨无中继传输^[17],证明了 AR-HCF 在长距离高速传输领域的巨大应用潜力。

4.2 规模应用面临的问题

空芯光纤实现大规模应用还面临成本压力、标准化和技术突破等问题。

根据近批次国内运营商空芯光纤采购结果,空芯光纤价格在 30 000 元/芯公里水平,与 G.652D 光纤 30 元/芯公里, G.654E 光纤 150 元/芯公里相比,差异巨大。空芯光纤的价格取决于应用规模 and 市场竞争,目前 400 Gbit/s 传输系统逐渐开始规模商用,800 Gbit/s 和 1.2 Tbit/s 系统还在开发过程中, G.654E 和 C+L 光纤基本可以满足行业应用要求,空芯光纤的需求不够急迫,优势还不能全部发挥,更多的是应用于高端的低时延场景。

标准化和规范化问题非常重要。首先,空芯光纤技术还处于发展阶段,不同厂家的技术路线、产品规格和性能指标等还存在差异,制定统一的产品标准,实现不同厂家产品间的兼容和互通,对空芯光纤应用非常重要。其次,由于空芯光纤特殊的结构,空芯光纤的安装和使用还需规范,例如光缆的尺寸和弯曲半径可能需要更大的敷设场地和管孔尺寸;特殊的密封工艺,避免水汽侵蚀,延长使用寿命等,需根据产品特性做进一步的研究。最后,传输设备的接口参数和传输协议等需标准,应尽量做到向下兼容,避免牵扯过多设备改造增加建网成本。

测量和熔接等关键技术需要突破,产品工艺还需改进。由于空芯光纤的背向瑞利散射较小和准单模特性,传统的 OTDR 测量精度不足且易受模式和噪声干扰^[18],目前空芯光纤的长距离测量精度问题还无法完全解决。同样光纤的微

结构也增大了熔接难度,在熔接时存在毛细管塌陷和芯径不匹配等问题,根据 2024 年中国移动试验网熔接结果,空芯-空芯熔接损耗最低 0.05 dB,空芯-实芯最低 0.3 dB,较现网 G.652D 和 G.654E 光纤熔接损耗还存在一定差距。同时在工程验证过程中,还发现空芯光纤易受温度、气压、水汽和 CO₂ 等干扰,影响其传输性能和使用寿命,因此空芯光纤的涂覆、OH- 操作、惰性气体清洗及拉丝一致性等工艺还需进一步改进。

5 展望

AR-HCF 光纤技术是光通信未来十年关键技术之一,为下一代光传输系统提供底座。目前,空芯光纤正处于研发和验证阶段,可以预见,在经过目前密集的性能试验后,未来 3~5 年内空芯光纤发展将会进入一段潜伏平静期,主要应用于数据中心互联、证券交易等低时延高价值场景,受价格限制不会大范围铺开;但随着技术和配套产业成熟,空芯光纤将逐步替代普通单模光纤在长距离骨干网中规模应用,出现空芯光纤和普通单模光纤长期共存的局面;远期来看,在理论和工艺技术大范围普及后,空芯光纤生产门槛不高,且空芯光纤原材料便宜,能耗等生产成本更低,因此必然会全面替代实芯光纤,成为未来光通信基础设施的基石。

参考文献:

- [1]Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 21(19): 1547-1549.
- [2]Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Stimulated raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. Science, 2002, 298: 399-402.
- [3]Gérôme F, Jamier R, Auguste J-L, et al. Simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35: 1157-1159.
- [4]Wang Yingying, Ding Wei. Confinement loss in hollow-core negative curvature fiber: a multi-layered model[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33122-33133.
- [5]Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1853-1856.
- [6]Gao Shoufei, Sun Yizhi, Chen Hao, et al. Four-fold truncated double-nested anti-resonant hollow-core fiber for ultralow loss and robust single mode operation[J]. Optica, 2025, 12(1): 45-52.
- [7]Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1996, 203: 19-26.
- [8]Bredol M, Leers D, Bosselaar L, et al. Improved model for OH absorption in optical fibers[J]. Journal of Lightwave

- Technology, 1990,8(11):1536-1540.
- [9]Numkam Fokoua E, Michaud-Belleau V, Genest J, et al. Theoretical analysis of backscattering in hollow-core antiresonant fibers[J]. APL Photonics, 2021, 6: 096106.
- [10]Jackle J, Kawasaki K. Intrinsic roughness of glass surfaces[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1995, 7(23): 4431-4436.
- [11]Gardner W B. Microbending loss in optical fibers[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(2): 457-476.
- [12]Marcuse D. Microbending losses of single-mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers[J]. The Bell System Technical Journal, 1976, 55(7): 937-955.
- [13]中国移动通信集团有限公司. 中国移动开通全球首个 800G 空芯光纤传输技术试验网 [EB/OL].(2024-06-06)[2026-05-29].https://www.10086.cn/aboutus/news/groupnews/index_detail_50009.html.
- [14]中国移动官方. 全国首条空芯光纤正式商用! 中国移动在深圳点亮“光速”新未来 [EB/OL].(2025-08-05)[2026-05-29].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1839690316778282618&wfr=spider&for=pc>.
- [15]亨通集团有限公司. 亨通光电联合中国联通成功部署中国联通首条商用空芯光缆线路 [EB/OL].(2025-10-30)[2026-05-29].<https://www.hengtonggroup.com/en/home/news/detail/id/401>.
- [16]通信世界网. 中国移动携手暨南大学、烽火通信、北京大学在 OFC 2024 发表全球首个基于空芯光纤的超 200 Tb/s 实时传输研究成果 [EB/OL].(2024-03-11)[2026-05-29].<https://www.c114.com.cn/news/118/a1263271.html>.
- [17]中国电信官网. 中国电信实现 800G/1.2T 空芯光纤超长距无中继传输突破 [EB/OL].(2025-10-30)[2026-05-29].<http://www.chinatelecom.com.cn/ct/news/gdxw/162285.html>.
- [18]Wei Xuhao, Shi Bo, Richardson D J,et al. Distributed characterization of low-loss hollow core fibers using EDFA-assisted low-cost OTDR instrument[C/OL]// 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC).Piscataway:IEEE,2023[2026-05-29].<https://ieeexplore.ieee.org/document/10117143>.DOI:10.1364/OFC.2023.W1C.4.

【作者简介】

王传瑞（1981—），男，江苏徐州人，硕士研究生，高级工程师，研究方向：骨干光缆网规划咨询、光纤光缆技术。

（收稿日期：2025-11-05 修回日期：2026-06-09）

（上接第 85 页）

- [8]董佳,齐博,马昌喜,等.基于组合算法的易腐货物多式联运路径优化[J].兰州交通大学学报,2022,41(1):40-51.
- [9]李孟良,王喜富,孙全欣,等.基于鲁棒优化的应急物资多式联运调配策略研究[J].铁道学报,2017,39(7):1-9.
- [10]邓明君,代玉珍,李响.需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化[J].工业工程,2023,26(4):104-113.
- [11]张旭,袁旭梅,降亚迪.需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J].系统工程理论与实践,2021,41(10):2609-2620.
- [12]蒋琦玮,林艺,冯芬玲.模糊时间下考虑碳税值变化的多式联运路径优化问题研究[J].工业技术经济,2020,39(4):81-88.
- [13]杨喆,邓立宝,狄原竹,等.基于模糊需求和模糊运输时间的多式联运路径优化[J].控制理论与应用,2024,41(6):967-976.
- [14]户佐安,蔡佳,罗涸.混合不确定条件下多式联运路径优化[J].北京交通大学学报,2023,47(6):32-40.
- [15]李珺,杨斌,朱小林.混合不确定条件下绿色多式联运路径优化[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(4):13-19.
- [16]万杰,龙云飞,陈星瀚.基于改进烟花算法的中俄商品多式联运路径优化[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(3):291-298.
- [17]陈汨梨,赵孝进,邓夕贵,等.不确定条件下的多式联运路径优化[J].公路交通科技,2021,38(1):143-158.
- [18]耿娜娜,何燕,高海瑛,等.不确定条件下的物流运输路径优化研究:以中欧班列多式联运为例[J].物流工程与管理,2021,43(10):112-115.

【作者简介】

林燕奎（1973—），男，广东南雄人，本科，研究员，研究方向：食品安全及其信息化。

黄锦云（1984—），女，广东云浮人，本科，工程师，研究方向：食品安全及其信息化。

郑文丽（1975—），女，广东汕头人，本科，高级工程师，研究方向：进出口贸易便利化及信息化。

蔡伊娜（1979—），通信作者(email:1530210935@qq.com)，女，广东汕头人，本科，研究员，研究方向：食品安全及其信息化。

（收稿日期：2025-11-28 修回日期：2026-06-17）