

引用本文: 吴广哲, 李伯中, 周红燕, 等. 细径单模光纤的设计与性能研究[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 83–87.

细径单模光纤的设计与性能研究

吴广哲¹, 李伯中¹, 周红燕^{2,3*}, 雷汉林^{2,3}, 张儒依¹, 田照宇¹, 苏晓帆^{2,3}, 吴俊^{2,3*}

(1. 国家电网有限公司 信息通信分公司, 北京 100761;

2. 长飞光纤光缆股份有限公司 光纤光缆先进制造与应用技术全国重点实验室, 武汉 430073; 3. 湖北光谷实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了提升电力光纤复合架空地线(OPGW)的纤芯容量, 研制了 180 μm 细径单模光纤, 从光纤剖面结构设计、优化涂层技术 2 个方面展开研究, 并对 180 μm 细径 OPGW 光缆进行衰减、应力-应变、环境等性能验证。实验结果表明: 180 μm 细径光纤在成缆过程中整体光纤的衰减平稳; 光缆拉伸应力-应变性能以及光缆环境性能满足且优于 OPGW 光缆的电力行业标准要求, 具备稳定可靠性及实际应用可行性。

关键词: 光纤复合架空地线; 180 μm ; 细径光纤; 微弯; 涂料

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0083-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and performance study of fine diameter single mode fiber

WU Guangzhe¹, LI Bozhong¹, ZHOU Hongyan^{2,3*},

LEI Hanlin^{2,3}, ZHANG Ruyi¹, TIAN Zhaoyu¹, SU Xiaofan^{2,3}, WU Jun^{2,3*}

(1. State Grid Corporation of China Information and Communication Branch, Beijing 100761, China;

2. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fibre and

Cable Joint Stock Limited Company(YOFC), Wuhan 430074, China; 3. Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to enhance the core capacity of optical fiber composite overhead ground wire(OPGW), a 180 μm fine diameter single-mode optical fiber was developed. Research was conducted from two aspects: fiber profile structure design and optimized coating technology. The attenuation, stress-strain, and environmental performance of the 180 μm fine diameter OPGW optical cable were verified. The experimental results show that the attenuation of the entire 180 μm fine diameter fiber is stable during the cabling process. The tensile stress-strain performance and environmental performance of optical cables meet and exceed the power industry standard requirements of OPGW cables, and have stable reliability and practical application feasibility.

Key words: optical fiber composite overhead ground wire, 180 μm , fine diameter optical fiber, micro-bending, coating

收稿日期: 2023-09-26。

基金项目: 国家电网有限公司信息通信分公司自行管理科技项目(项目编号: No. 529939220004)资助。

作者简介: 吴广哲(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 任职于国家电网有限公司信息通信分公司, 主要研究方向是电力通信网络建设、超长距光传输、新型光纤光缆和分布式光纤传感技术。获得全国电力行业优秀设计一等奖 1 项, QC 成果二等奖 1 项, 国家电网有限公司信息通信分公司科技进步奖 3 项, 湖北省科技进步奖二等奖 1 项。



* **通信作者 1:** 周红燕(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新型光纤设计及应用。

* **通信作者 2:** 吴俊(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新型光纤设计及应用。

0 引言

国家“十四五”规划中特高压迎来了建设加速期, 随着多条特高压工程陆续开工建设, 通信中继站 T 接光缆改造工程亟需大芯数光纤复合架空地线(OPGW)。为了在原有有限的 OPGW 光缆空间结构中容纳更多的纤芯, 同时维持光缆的外径不变, 研究者们提出了采用新型小外径光纤的解决思路^[1-3]。目前, 200 μm 小外径光纤已在国内外运营商网络中得到了广泛应用, 但更小尺寸的光纤仍有待进一步开发。

光纤光缆行业内开始推出外径为 180 μm 的细径光纤。与常规外径 245 μm 的光纤相比, 其截面积减小了约 46%, 使得在尺寸为 50 mm 的微管中最多可容纳 6 912 芯光纤^[4-5]。当光纤涂覆层变薄时, 其对光纤玻璃

吴广哲,李伯中,周红燕,等: 细径单模光纤的设计与性能研究

部分的保护能力会减弱。特别是在光纤成缆后,若在低温环境中使用,光缆外层的套管可能会因收缩而挤压光纤。为了确保在各种复杂环境下光纤能够正常工作,外径减小后的光纤必须具备出色的微弯性能。本文设计一种 180 μm 细径(G.657.A2)光纤的剖面结构,并优化其涂覆技术。

1 光纤微弯性能研究

光纤的微弯损耗是指光纤径向受到侧压影响而产生极微小的弯曲,它会造成光信号辐射泄露,从而导致光纤传输损耗增大。光纤的微弯损耗与光纤参数息息相关,常用式(1)表示。

$$\gamma=N\langle h^2\rangle\frac{a^4}{b^6\Delta^3}\left(\frac{E}{E_t}\right)^{3/2}\tag{1}$$

其中,γ是微弯导致的损耗,N是单位长度内随机微小形变的数量,h是单位长度内微小形变的平均高度差异,⟨⟩表示统计平均符号,a是纤芯半径,b是光纤外半径,Δ是光纤的相对折射率差,E是内涂层的杨氏模量,E_t是光纤的杨氏模量。

由式(1)可知,要降低光纤的微弯损耗,则需要合理设计光纤尺寸和折射率分布(a,b,Δ),同时降低光纤内涂层的杨氏模量E。因此,为了改善细径光纤的微弯性能,本文从细径光纤的剖面波导设计和涂覆技术优化这2个方面展开研究。

1.1 细径光纤的剖面波导设计

常规光纤设计主要通过减小光纤芯层直径、增加光纤芯包层有效折射率差值的方法改善光纤的微弯性能。其中,减小光纤芯层直径会直接影响光纤的模场直径,进而影响光纤与常规光纤的熔接损耗。为优化单模弯曲不敏感光纤的弯曲性能,目前的常规设计在光纤内包层和外包层中间位置增设了一个下陷包层,从而可以在一定程度上增加光纤芯包层有效折射率差。因此,为了改善细径光纤的弯曲性能,并平衡光纤模场直径、宏弯损耗、微弯损耗等参数,本文研制的180 μm G.657.A2 光纤采用下陷辅助包层设计,其示意图如图1所示。

在进行细径光纤剖面设计时,下陷包层设计对光纤下陷的深度和宽度也存在一定的限制要求。若下陷过浅或过窄,则对光纤弯曲性能提升不明显;若下陷过深或过宽,则不利于光纤的各参数平衡。为了保证细径光纤具有合适的模场直径和良好的弯曲性能,下陷内包层宽度与深度设计十分关键。不同下陷深度和

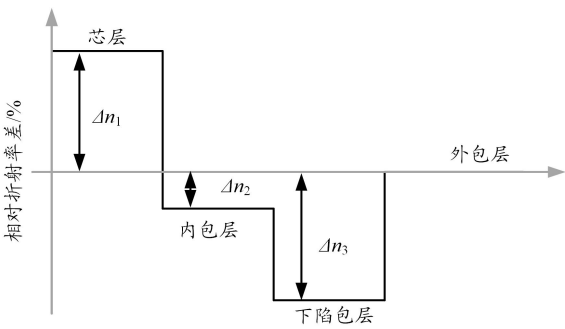


图1 180 μm G.657.A2 光纤折射率剖面设计示意图

宽度对应不同的下陷包层体积,增大下陷包层体积更有利于将光信号束缚在光纤芯层部分,进而降低弯曲对光信号传输的影响。为兼顾光纤弯曲性能和制备工艺成本,本文设计了2种不同下陷包层体积的细径光纤A和B,其中光纤B的下陷包层体积相较于光纤A(参考光纤)增加了30%。

光纤A和光纤B的折射率剖面 and 几何参数如表1所示。本文按照表1参数值制备光纤,并测试光纤的各项性能参数。其中,光学参数、宏弯损耗、微弯损耗等主要性能参数如表2所示。

表1 180 μm G.657.A2 光纤折射率剖面 and 几何参数

光纤剖面设计参数	光纤 A	光纤 B
芯层直径/μm	6.75	6.78
芯层折射率 Δn ₁ /%	0.304	0.309
内包层直径/μm	20.1	18.2
内包层折射率 Δn ₂ /%	-0.09	-0.08
下陷包层直径/μm	43.5	45.9
下陷包层折射率 Δn ₃ /%	-0.33	-0.36
外包层直径/μm	125	125
外包层折射率 Δn/%	0	0
涂覆层内层直径/μm	153.8	152.1
涂覆层外层外径/μm	183.8	181.7

不同外径及下陷包层体积下的光纤微弯损耗谱曲线图如图2所示。可以看出,当外径为245 μm时,相较于G.652光纤,G.657.A2光纤(采用下陷包层结构)在微弯性能上表现出了显著的改善。当G.657.A2光纤的涂覆层外径从245 μm逐渐减小到200、180 μm时,其微弯损耗显著增加;而在180 μm G.657.A2光纤基础上,当下陷包层体积增加30%时,微弯性能得到

表 2 180 μm G.657.A2 光纤主要性能参数

光纤性能参数	光纤 A	光纤 B	ITU-T G.657.A2
模场直径(MFD)@1 310 nm/μm	8.99	9.09	8.2~9.6
光缆截止波长/nm	1 190	1 180	≤1260
零色散波长/nm	1 318	1 312	1 300~1 324
零色散斜率/[ps/(nm ² ·km)]	0.089	0.087	≤0.092
衰减系数 @1 310 nm/(dB/km)	0.321	0.318	≤0.40
衰减系数 @1 383 nm/(dB/km)	0.286	0.278	≤0.40
衰减系数 @1 550 nm/(dB/km)	0.183	0.184	≤0.30
衰减系数 @1 625 nm/(dB/km)	0.198	0.198	≤0.40
宏弯损耗(弯曲半径 R15mm-10 圈)@1 550 nm/dB	0.015	0.005	0.03
宏弯损耗(弯曲半径 R15mm-10 圈)@1 625 nm/dB	0.057	0.027	0.1
宏弯损耗(弯曲半径 R10mm-1 圈)@1 550 nm/dB	0.042	0.032	0.1
宏弯损耗(弯曲半径 R10mm-1 圈)@1 625 nm/dB	0.073	0.062	0.2
宏弯损耗(弯曲半径 R7.5mm-1 圈)@1 550 nm/dB	0.13	0.08	0.5
宏弯损耗(弯曲半径 R7.5mm-1 圈)@1 625 nm/dB	0.42	0.19	1.0
微弯性能 @1 550 nm/(dB/km)	2.4	1.7	—

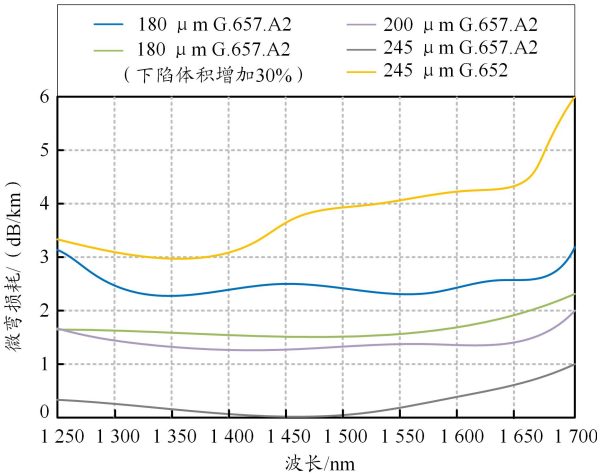


图 2 不同外径及下陷包层体积下的光纤微弯损耗谱曲线

了一定程度的改善。因此,本文研制的 180 μm G.657.A2 光纤采用光纤 B 的折射率剖面 and 几何参数设计值进行制棒并拉丝制备。

1.2 涂覆技术优化

虽然石英光纤本身对温度变化不敏感,但在极端低温环境下,为确保光纤传输性能的稳定,光纤涂层的性能则显得尤为重要。涂覆层材料是折射率比石英玻璃大且弹性模量较低的聚合物,如热固性硅树脂液体、紫外光固化丙烯酸脂液体以及聚氨基甲酸乙酯等。在低温条件下,光纤涂层材料在光缆中会发生收缩,进而引发光纤微弯损耗的增加,导致光纤衰减加剧。因此,要适用于各种复杂甚至极寒低温环境,需要进一步优化细径光纤的涂覆技术来改善光纤的微弯性能。结合式(1)可知,降低微弯损耗最直接的方式就是采用低杨氏模量的内层涂料。内涂层具有尽量低的杨氏模量,在受力时能够吸收应力,提供足够的缓冲效果,从而对光纤起到更好的保护作用,使减小后的光纤外径在严苛的使用环境下也能保持优异的微弯性能。

当光纤外径从 200 μm(内涂层直径为 165 μm,杨氏模量为 0.38 MPa)减小到 180 μm 时,主要的挑战在于确保内涂层具有适当的厚度和性质,以便既能有效地形成缓冲层来防止微弯曲,又能保持外涂层有足够的厚度来提供必要的机械保护。基于前期的研究,本文探讨了 200 μm G.657.A2 光纤的微弯曲敏感性与内涂层杨氏模量之间的关系,并将微弯敏感性归一化为内涂层杨氏模量为 0.38 MPa 时光纤的敏感性,如图 3 所示。可以看出,随着内层涂料杨氏模量从 0.38 MPa 降至 0.18 MPa,光纤的微弯敏感性显著降低,其降幅接近一半,这一变化有效地平衡了内涂层直径减小所带来的影响。因此,可以将内涂层直径减小到 150 μm,外涂层的厚度减小到 15 μm,从而达到 180 μm 的双涂层总直径。理论结果与实验数据吻合较好。

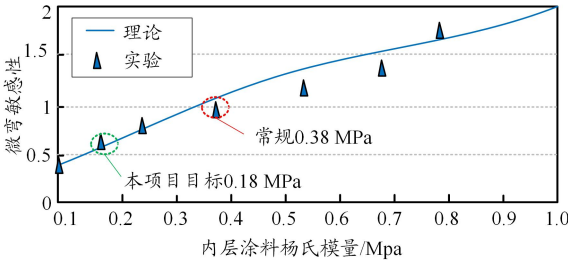


图 3 光纤内层涂料的杨氏模量与微弯的关系

通过使用 IEC-62221 文件中的方法 B 实际测试评估比较了 180 μm G.657.A2 光纤(内层杨氏模量分别为 0.18、0.38 MPa 以及 200 μm G.657.A2 光纤(内层

吴广哲,李伯中,周红燕,等: 细径单模光纤的设计与性能研究

杨氏模量为 0.38 MPa)的微弯损耗,如图4 所示。可以看出,引入优化涂覆技术后,180 μm G.657.A2 光纤的微弯性能得到了显著提升,其在复杂环境中更加稳定可靠。

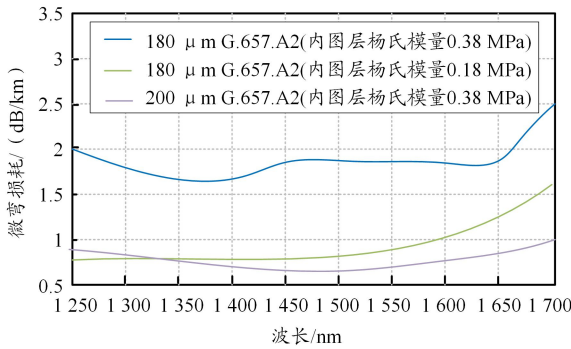


图 4 涂覆技术改善后的细径光纤微弯损耗谱曲线

2 180 μm G.657.A2 光纤性能研究

2.1 机械性能

在减少光纤涂覆层厚度后,其剥离性、抗拉强度和疲劳性能等技术指标必须满足相关要求。本文对 180 μm G.657.A2 光纤的涂覆层剥离力、动态疲劳参数等机械性能参数进行了测试,其性能参数如表 3 所示。可以看出,即使涂覆层厚度变薄,光纤的机械性能仍然满足 GB/T 9771.7 技术指标要求。当 180 μm G.657.A2 光纤标距长度为 0.5 m 时,其抗拉强度分布完全满足 IEC 60793-1-31 中规定的光纤老化前最低抗拉强度要求,即在威布尔概率水平为 15%时抗拉强度大于 3.14 GPa,在威布尔概率水平为 50%时抗拉强度大于 3.80 GPa。

表 3 180 μm G.657.A2 光纤剥离力及动态疲劳参数对比

机械性能 参数	GB/T 9771.7 技术指标	不同外径光纤测试值		
		180 μm	200 μm	245 μm
		G.657.A2	G.657.A2	G.657.A2
涂覆层剥离力 (平均值)/N	1.0~5.0	1.1	1.1	2
涂覆层剥离力 (峰值)/N	1.0~8.9	1.7	1.8	2.4
动态疲劳参数 n_0	≥ 20	22.8	23	24

2.2 熔接性能

在实际应用场景中,会涉及到外径为 180 μm 的光纤与常规外径分别为 245、200 μm 的光纤之间的熔接。在进行熔接时,选用熔接机的 G.657 光纤熔接模

式,并采用光时域反射仪(OTDR)进行双向测试,以评估熔接质量,结果如表 4 所示。可以看出,在 1 550 nm 波长处,180 μm /180 μm 光纤熔接点的平均损耗约 0.020 dB,180 μm /200 μm 和 180 μm /245 μm 涂层光纤熔接点的平均损耗为 0.025 dB。因此,180 μm 的光纤与常规外径分别为 245、200 μm 光纤均有较好的兼容性。

表 4 180 μm G.657.A2 光纤的熔接性能

光纤熔接方式	平均损耗值/dB		最大损耗值/dB	
	波长为	波长为	波长为	波长为
	1 310 nm	1 550 nm	1 310 nm	1 550 nm
180 μm /180 μm	0.021	0.020	0.050	0.013
180 μm /200 μm	0.023	0.025	0.059	0.055
180 μm /245 μm	0.024	0.025	0.056	0.055

3 光缆性能研究

为验证 180 μm G.657.A2 光纤的 OPGW 成缆性能,本文基于 180 μm G.657.A2 光纤制备了 OPGW 试验光缆,并对其进行了光纤成缆衰减变化、光缆应力-应变试验及光缆环境性能等研究。

OPGW 光缆的成缆工艺流程包括裸光纤着色、光纤单元制作以及成缆,成缆制备过程严格按照电力行业标准^[9]执行。该 OPGW 试验光缆为 48 芯常规层绞结构,型号为:OPGW-48B6-150[176.5;94.3],长度为 1.5 km。其中,中心加强芯为 20.3%AS 铝包钢线(直径为 3.40 mm),内绞合层为 4 根 20.3%AS 铝包钢线(直径为 3.30 mm)和 2 根 24 芯不锈钢管光纤单元,外绞合层为 12 根 20.3%AS 铝包钢线(直径为 3.30 mm)。

3.1 光纤成缆衰减变化

本文监测了成缆过程中光纤衰减系数的变化。为排除设备因素,使光纤的复测和各工序的光纤检测具有统一性,光纤的衰减值检测仪表均采用同一台 OTDR 检测。OPGW 成缆过程中,光纤在不同波长处的光纤衰减变化如图 5 所示。可以看出,光纤的衰减在成缆过程中趋于平稳状态,成缆后 1 310 nm 和 1 550 nm 波长处的光纤衰减变化幅度均不超过 0.002 dB/km。因此,180 μm G.657.A2 光纤在 OPGW 成缆过程中性能稳定可靠,成缆后衰减性能满足电力行业标准要求^[9]。

3.2 光缆应力-应变试验

本文参照电力行业标准^[9]对该试验 OPGW 光缆进

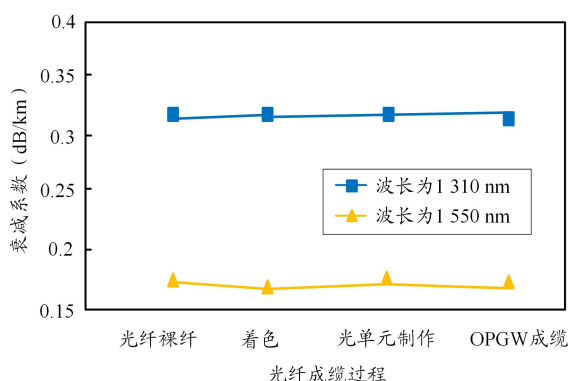


图5 OPGW 成缆过程中光纤在 1310 nm 和 1550 nm 处光纤衰减变化

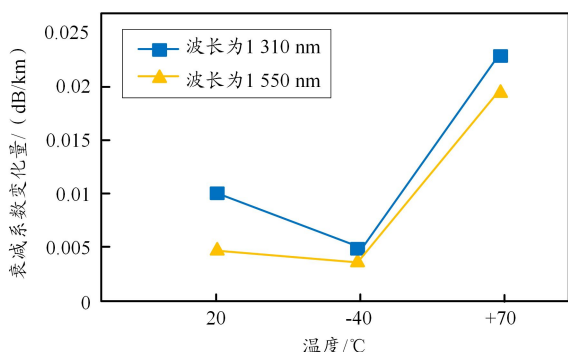


图6 OPGW 光缆温度循环试验

行了拉伸应力-应变性能试验。试验结果表明:在拉伸至 40% RTS 时,光纤无明显应变,且无明显附加衰减;在 60% RTS 时,光纤应变 $\leq 0.25\%$,光纤附加衰减 ≤ 0.05 dB。拉力取消后,光纤无明显残余附加衰减,其结果均优于标准要求^[6]。

3.3 光缆环境性能

由于 OPGW 光缆属于室外缆,南北气候差异大,南方的高温及北方的极寒环境对光缆在不同复杂温度环境下的长期稳定运行提出了考验。依据标准^[6]要求对 OPGW 光缆进行温度循环试验,其衰减变化如图 6 所示。可以看出,该试验 OPGW 光缆在 1310 nm 和 1550 nm 波长处衰减系数变化均不超过 0.03 dB/km,优

于电力行业标准规定的要求(“相对于 20 °C 时的附加衰减不应大于 0.1 dB/km”),此项测试是保障 OPGW 光缆安全服役的关键。

4 结束语

针对电力通信中继站“T 接”和通信终端接入网中光纤信道紧张的问题,以及大芯数 OPGW 光缆的迫切需求,本文研制了 180 μm G.657.A2 光纤以提升光缆中的纤芯密度。设计了 180 μm G.657.A2 光纤的剖面结构,优化了其涂覆技术,并通过光纤成缆衰减变化、光缆应力-应变试验及光缆环境性能的试验,充分验证了 180 μm G.657.A2 光纤在 OPGW 光缆中的稳定可靠性和实际应用可行性。同时,细径抗弯单模光纤凭借其减少涂覆层厚度和材料用量的特性,显著提升了环境友好性,为实现“双碳”目标贡献了重要力量。随着未来光纤高密度的需求不断提升,光纤小型化将会是光纤技术发展的趋势,新型细径光纤技术及其应用将会更加深入。

参考文献:

- [1] 方跃生,曾凡兴. OPGW 应用领域技术发展趋势[J]. 光通信研究,2014 (6):48-51.
- [2] 方跃生,陈皓,曾凡兴. 光纤技术发展及其在电力通信中的应用[J]. 电力信息与通信技术,2014,12(8):20-26
- [3] 徐拥军,曹裕群,刘勇,等. $\varnothing 200 \mu\text{m}$ 小尺寸光纤在 OPGW 中的应用[J]. 电力信息与通信技术,2014,12(11):121-126.
- [4] SILLARD P, AMEZCUA-CORREA A, MENTZLER C, et al. Reduced-coated fibers and micro-duct cables[C]//2022 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), March 06-10, 2022, San Diego, CA. New York: ACM, 2022: 1-3.
- [5] LI M J, ABEDIJABERI A, NIU W, et al. Reduced coating diameter fibers for high density cables [C]//2022 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), March 06-10, 2022, San Diego, CA. New York: ACM, 2022: 1-3.
- [6] 中国电力企业联合会. 光纤复合架空地线;DL/T 832-2016 [S]. 北京: 中国电力出版社,2016:1-1.