

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250010.

专题:海洋通信与传感网络

孙云鹏,胥国祥,许人东,等. 基于细径光纤的海底光缆关键技术研究及验证[J]. 光通信研究, 2025(4): 250010.

Sun Y P, Xu G X, Xu R D, et al. Research and Verification of Key Technologies of Submarine Cable based on Fine Diameter Fiber [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250010.

基于细径光纤的海底光缆关键技术研究及验证(特邀)

孙云鹏,胥国祥,许人东,康慧灵,王 畅,印 炜

(江苏亨通华海科技股份有限公司,江苏 常熟 215500)

摘要:【目的】海底光缆作为全球互联互通的关键载体,承载着99%以上的通信数据流量,随着国际通信业务的持续增长和海洋数字经济的蓬勃发展,跨洋通信容量面临着严峻挑战。目前,随着高阶调制、波分复用(WDM)和偏振复用(PDM)等扩容技术的成熟,传统光纤传输容量瓶颈问题日益显现。200 μm 细径光纤作为新一代空分复用(SDM)光纤,在满足未来皮比特级容量需求的同时能够降低海底光缆系统单比特成本。【方法】文章针对细径光纤关键技术展开研究攻关,结合光纤自身特点建立了细径光纤余长模型,求解了细径光纤海底光缆余长边界条件。同时,利用3因素4水平正交试验设计优化了细径光纤熔接参数,通过定义光纤熔接一次合格率,获得细径光纤最优熔接参数组合。【结果】文章最终完成了细径光纤海底光缆成缆关键技术的开发,细径光纤成缆附加衰减低于0.003 dB/km,实现了成缆附加衰减与可靠性寿命的平衡控制,同时控制细径光纤熔接一次合格率达到90%以上,满足超长距跨洋通信需求。文章所研制海底光缆通过了国际电信联盟-电信标准分局(ITU-T)G.976建议的海底光缆关键性能试验和5 km深海海试试验验证,光透射性能变化远低于0.05 dB。【结论】文章研制的大芯数和低附加损耗细径光纤海底光缆性能指标满足海底光缆通信系统的技术要求,为未来新一代细径光纤海洋通信系统的发展提供了重要技术支持。

关键词:细径光纤;海底光缆;余长模型;海试试验

中图分类号:TN818

文献标志码:A

Research and Verification of Key Technologies of Submarine Cable based on Fine Diameter Fiber

SUN Yunpeng, XU Guoxiang, XU Rendong, KANG Huiling, WANG Chang, YIN Wei

(Jiangsu HMN Technologies Group Co., Ltd., Changshu 215500, China)

Abstract: 【Objective】Submarine cables, as a key enabler of global connectivity, carry over 99% of the world's communication data traffic. With the continuous growth of international communication services and the vigorous development of the marine digital economy, the capacity for transoceanic communication is facing a severe challenge. Currently, with the maturation of capacity-expansion technologies such as higher-order modulation, Wavelength Division Multiplexing (WDM), and Polarization Division Multiplexing (PDM), the bottleneck problem of traditional fiber-optic transmission capacity is becoming increasingly evident. As a new generation of Space Division Multiplexing (SDM) fiber, 200 μm fine diameter fiber can meet the future Pbit capacity demand and reduce the per bit cost of submarine optical cable system. 【Methods】The article focuses on the research and development of key technologies for thin-diameter optical fibers. By leveraging the inherent characteristics of optical fibers, a residual length model for thin-diameter fibers is established, and the boundary conditions for the residual length of thin-diameter fibers in submarine cables are solved. At the same time, the three factor and four level orthogonal experimental design is used to optimize the fusion parameters of fine diameter fiber, and the optimal fusion parameter combination of fine diameter fiber is obtained by defining the one-time qualification rate of fiber fusion. 【Results】Finally, the development of key technologies for the cabling of fine diameter fiber submarine cable is completed. The additional attenuation of fine diameter fiber cabling is less than 0.003 dB/km, which realizes the balance control between the additional attenuation of cabling and the reliability life. At the same time, the one-time qualification rate of fine diameter fiber fusion is controlled to be more than 90%, meeting the requirements of ultra long-distance transoceanic communication. The developed submarine cable has passed the key performance test of submarine cable recommended by International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) G.976 and the 5 km deep sea trial test, and the change of light transmission performance is far less than 0.05 dB. 【Conclusion】The performance indicators of the high fiber count and low additional attenuation fine diameter fiber submarine cable developed in this paper meet the technical requirements of submarine cable communication systems, providing important technical support for the development of the next generation of fine diameter fiber submarine communication systems.

Key words: fine diameter fiber; submarine cable; excess fiber length model; sea trial

收稿日期:2025-01-13; 修回日期:2025-01-14; 纸质出版日期:2025-08-10

作者简介:孙云鹏(1995-),男,河北衡水人。工程师,硕士,主要研究方向为海底光缆通信系统。

通信作者:孙云鹏,工程师。E-mail:756325614@qq.com

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

0 引言

海底光缆可用于陆地与岛屿、岛屿与岛屿之间的短距离通信及洲际之间超长距跨洋通信,以其通信容量大、传输质量高和抗干扰能力强等优异特性在通信互联和科学研究等领域发挥着重要作用,是现代全球信息网络的核心组成部分^[1]。当前,随着物联网(Internet of Things, IoT)、云计算和第五/六代移动通信技术(5/6th Generation Mobile Communication Technology, 5G/6G)产业的高速发展,全球各区域间信息连接和交互量剧增,对数据传输容量的需求呈爆发式增长,海底光缆通信容量面临着严峻挑战。目前,海底光缆采用的 250 μm 直径常规单模光纤存在成本控制和容量提升的对立矛盾,难以突破两者的限制。因此,在未来皮比特级容量需求的背景下,基于 200 μm 细径光纤的新一代空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术将成为海底光缆通信系统的发展趋势,为海底光缆的“容量危机”提供了重要解决方案^[2]。

表1 细径光纤海底光缆主要技术指标

Table 1 Main technical specification of fine diameter fiber submarine cable

项目	标称值	项目	标称值
最大光纤芯数/芯	48 (200 μm)	标称永久拉力负荷/kN	30
光单元外径/mm	3.2	导体直流电阻@3 $^{\circ}\text{C}/\Omega/\text{km}$	<0.9
海底光缆外径/mm	18	绝缘电阻/ $\text{G}\Omega\cdot\text{km}$	>100
最小断裂负荷/kN	95	最大工作电压/kV	20
标称瞬时拉力负荷/kN	75	最大适用水深/m	8 000
标称工作拉力负荷/kN	45		

1.2 细径光纤余长模型与边界条件计算

光纤余长是保证海底光缆 25 年服役期间光纤机械性能可靠性和传输性能稳定性的关键参数。因此,本节结合细径光纤的自身特点建立了细径光纤余长模型,并对海底光缆中的边界条件进行了计算。

光纤的机械性能是关系到海底光缆系统可靠性的重要因素,其寿命 $T_{\text{寿命}}$ 为^[4]

$$T_{\text{寿命}} = t_{\text{proof}} \left\{ \left[1 - \frac{\ln(1-F)}{N \times L \times N_p} \right]^{\frac{n-2}{m}} - 1 \right\} \left(\frac{\epsilon_{\text{proof}}}{\epsilon} \right)^n, \quad (1)$$

式中: t_{proof} 和 ϵ_{proof} 分别为光纤筛选时间与筛选应变; F 为失效概率; $N \times L$ 为研制样品光纤总长度(N 为光单元中的光纤芯数, L 为研制的样品长度); N_p 为筛选断裂率; n 和 m 分别为光纤应力腐蚀参数和威布尔斜率; ϵ 为光纤最大允许应变。上述参数均与细径光纤相关。本文采用的细径光纤试验参数由光纤机械性能试验确定,参数包括: t_{proof} 、 ϵ_{proof} 、 N_p 、 n 和 m 等。

本文结合细径光纤的自身结构和特点,开发了细径光纤成缆过程中的关键技术,研制出大芯数和低附加损耗特性的细径光纤海底光缆。本文重点建立细径光纤余长模型,计算细径光纤的余长边界条件,实现成缆附加衰减与可靠性寿命的平衡控制,同时制定细径光纤海底光缆的试验方案,结合型式试验结果和深海海试结果,确定了细径光纤海底光缆的性能指标满足海底光缆通信系统的技术要求。

1 细径光纤海底光缆关键技术研究

1.1 细径光纤海底光缆结构及主要技术指标

本文设计的细径光纤海底光缆主要由不锈钢松套管、不等径内铠钢丝、金属铜馈电导体和高密度聚乙烯绝缘层组成,不锈钢松套管内填充高性能触变性吸氢阻水纤膏与光纤共同组成光单元^[3]。本文设计研制的细径光纤海底光缆光单元可容纳多达 48 芯光纤,同种光单元尺寸下,相较于 250 μm 常规光纤,数量提升了 1.5 倍。细径光纤海底光缆主要技术指标如表 1 所示。

将细径光纤的试验参数代入式(1),得到细径光纤海底光缆在不同工况下,失效概率 F 与最大允许应变 ϵ 之间的关系如图 1 所示。国际光纤厂商认为 F 应低于 10^{-9} 。由图可知,该 F 下细径光纤海底光缆的 ϵ 分别为 0.374%、0.518% 和 0.601%。再结

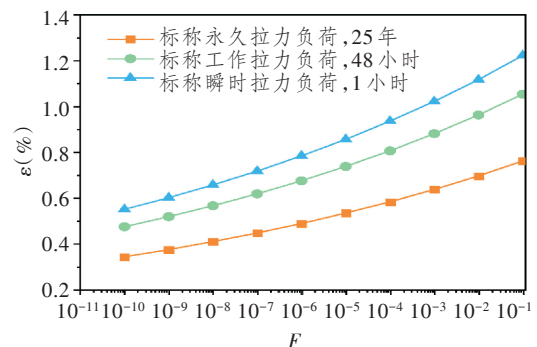


图1 不同工况下细径光纤允许应变 ϵ 与失效概率 F 的关系

Figure 1 Allowable strain ϵ and failure probability F of fine diameter fiber under different conditions

合细径光纤海底光缆的应力-应变曲线可以得到标称瞬时拉力负荷(1小时)工况下的要求最严苛,所需最小余长 ϵ_{\min} 为 0.068%。

光纤传输损耗是关系到海底光缆系统稳定性的重要因素。一般来说,光纤传输损耗包括:吸收损

$$\begin{cases} Loss = 10\lg(\exp(2\alpha_0 L)) \\ 2\alpha_0 = \frac{2\kappa^2}{\beta V^2 K_1^2(\gamma a)} \int_0^\infty \frac{\exp[-a(\gamma^2 + \xi^2)^{1/2}]}{(\gamma^2 + \xi^2)^{1/2}} \cdot \frac{A_i[X_2(0, \xi)]}{B_i[X_a(0, \xi)]} \cdot \frac{x_2^{1/2} x_3^{1/2}}{x_2 \cos^2(\theta(\xi)) + x_3 \sin^2(\theta(\xi))} d\xi \end{cases}, \quad (2)$$

式中: α_0 为光纤弯曲损耗系数; κ 、 γ 和 V 分别为归一化相位常数、轴向归一化常数和归一化频率; β 为轴向传播常数; K_1 为贝塞尔函数; a 为纤芯半径; ξ 为傅里叶变换的共轭变量; A_i 和 B_i 为艾里函数。

式(2)中的函数 $X_q(x, \xi)$ 、 x_q 和 $\theta(\xi)$ 可表示为

$$\begin{cases} X_q(x, \xi) = \left(\frac{R}{2k^2 n_q^2}\right)^{2/3} \left[\beta_0^2 + \xi^2 - k^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2x}{R}\right)\right] \\ x_q = \left(\frac{2k^2 n_q^2}{R}\right)^{2/3} \cdot [-X_q(b, \xi)] \\ \theta(\xi) = 2[-X(b, \xi)]^{3/2} + \frac{\pi}{4} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: R 为曲率半径; k 为真空中的波数; n_q 为 q 区折射率, q 为 2 或 3, 分别代表包层或涂覆层; β_0 为光纤未扰动时的基模传输常数; b 为包层半径。

本文采用的细径光纤结构参数如表 2 所示,将表中参数代入式(2)和式(3),得到细径光纤弯曲损耗 $Loss$ 与曲率半径 R 的关系如图 2 所示。

表 2 细径光纤结构参数

参数	典型值
纤芯直径/ μm	8.7
模场直径@1 550 nm/ μm	10.4
包层直径/ μm	125
涂覆层直径/ μm	205
相对折射率差(%)	0.37

为保证细径光纤海底光缆在服役期间的传输性能,需要控制由弯曲引起的光纤辐射损耗 $Loss$ 低于 10^{-4} dB/km,由图 2 可知,光纤曲率半径 R 不应低于 31 mm。

由于光纤余长的存在,海底光缆中的光纤通常以弯曲的状态沿径向分布在光单元中,光纤最小曲率半径 ρ_{\min} 与余长 ϵ_1 的关系可以通过式(4)计算^[7]。因此,可以得到细径光纤海底光缆的最大余长 $\epsilon_{\max} = 0.159\%$ 。

耗、散射损耗和辐射损耗^[5]。吸收损耗和散射损耗为光纤固有损耗,由光纤波导结构决定,辐射损耗主要指弯曲损耗,在海底光缆中主要与余长设计相关。海底光缆中由光纤余长引起的弯曲损耗 $Loss$ 可表示为^[6]

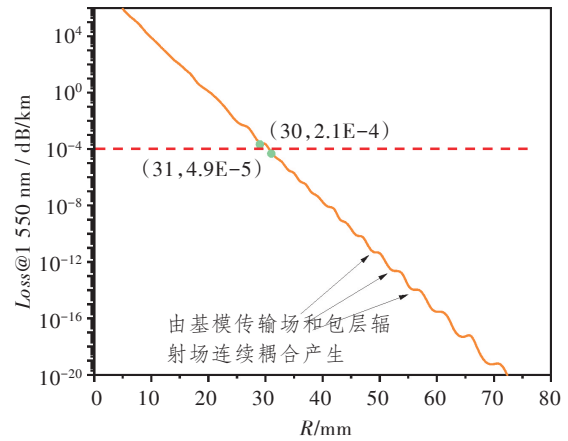


图 2 细径光纤弯曲损耗 $Loss$ 与曲率半径 R 的关系
Figure 2 Relationship between fine diameter fiber bend loss $Loss$ and curvature radius R

$$\begin{cases} \epsilon_1 \approx (1 + k_a^2)^{1/2} \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{k_a}{\sqrt{1 + k_a^2}} \right)^2 \right] - 1 \\ k_a = \frac{2\pi R_e}{P_h} \\ \rho_{\min} = \frac{P_h^2}{(2\pi)^2 R} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: k_a 为等效节径比; R_e 为光单元等效半径; P_h 为节距。

1.3 细径光纤熔接技术

光纤熔接技术流程包括:涂层热剥除、超声波清洗、端面切割、光纤熔接和熔接点涂覆^[8],涉及到的设备如表 3 所示。对于细径光纤,本文采用 210 μm 专用光纤夹具和 230 μm 涂覆模具。

细径光纤熔接技术的重点是实现高强度和低插损的光纤熔接,以满足海底光缆通信系统的稳定可靠运行。除光纤结构参数外,光纤熔接的主要参数包括:放电时间、放电功率增量和重叠量。本文采用正交试验设计^[9],结合工艺过程中的典型取值范围,定义光纤熔接插损低于 0.1 dB 并且通过 200 kpsi 张力筛选为熔接一次合格,正交试验设计方案及结

果如表4和表5所示。

表3 细径光纤熔接设备

Table 3 Fine diameter fiber fusion equipment

设备名称	功能
热剥除	剥除光纤涂覆层
清洗机	清洗光纤包层
切割刀	切割光纤端面
熔接机	熔接光纤
涂覆机	熔接点涂覆保护
光纤夹具	夹持光纤
涂覆模具	定型涂覆尺寸

表4 熔接参数正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal experimental design scheme and results of fusion parameters

试验编号	放电时间 (A)/ms	放电功率增量 (B)/bit	重叠量 (C)/μm	合格率 (%)
1	1	1	1	78
2	1	2	2	84
3	1	3	3	80
4	1	4	4	75
5	2	1	2	85
6	2	2	1	86
7	2	3	4	86
8	2	4	3	88
9	3	1	3	90
10	3	2	4	93
11	3	3	1	88
12	3	4	2	86
13	4	1	4	80
14	4	2	3	86
15	4	3	2	83
16	4	4	1	80

表5 熔接参数正交试验统计结果

Table 5 Orthogonal experimental design statistical results of fusion parameters

统计时间	A/ms	B/bit	C/μm
\bar{K}_1	106	111	111
\bar{K}_2	115	116	113
\bar{K}_3	119	112	115
\bar{K}_4	110	110	111
极差	13	7	4

注： $\bar{K}_1 \sim \bar{K}_4$ 为1~4水平试验指标总和，数值越大表明该水平越好；极差表示各因素对结果的影响程度，极差越大表明该因素对结果的影响越显著，即放电时间的影响最显著。

由表5可知，对细径光纤熔接一次合格率的影响由大到小依次为：放电时间>放电功率增量>重叠量，最优参数组合为A3B2C3。

依照最优参数组合进行熔接工艺验证，共两组试验，每组100个样本，结果如图3所示。由图可知，该参数组合下的两组试验结果中光纤熔接合格率分别为95%和94%，两组试验结果差异性较小，具有可重复性。

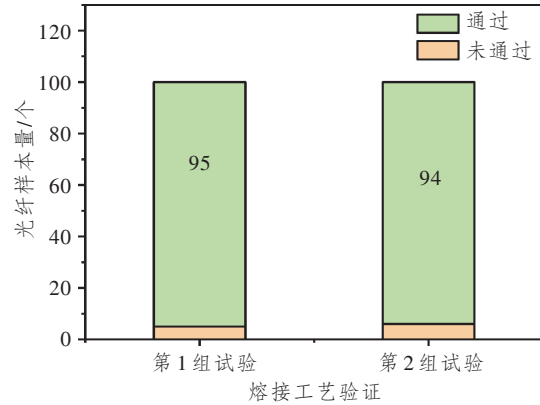


图3 最优参数组合下的光纤熔接合格率

Figure 3 Qualified rate of fiber fusion under optimal parameter combination

2 细径光纤海底光缆试验验证

2.1 细径光纤海底光缆研制结果

细径光纤海底光缆研制过程中经历的工艺生产流程主要为：光纤着色打环、不锈钢光单元焊接、铜丝铠装与铜管焊接和绝缘挤塑等，本次研制样品采用48芯光纤，样品总长度为15 km。在不锈钢光单元焊接工序后，取5 m长光单元样品测试光纤余长，结果如图4所示。通过工艺调试验证，细径光纤海底光缆余长分布在[0.8, 1.2]‰范围内，满足理论设计值。

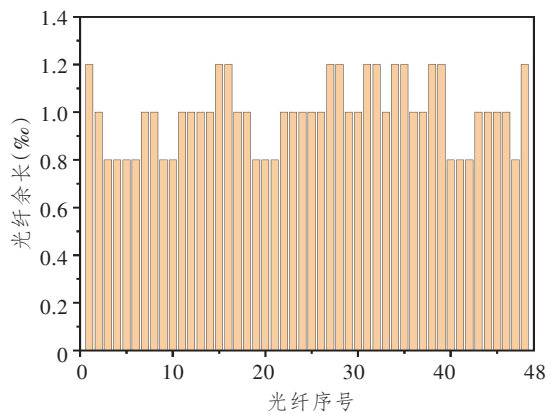
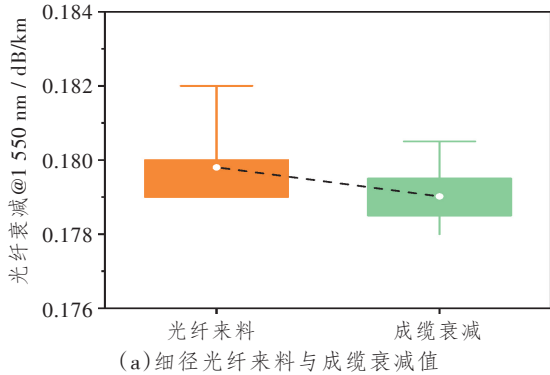


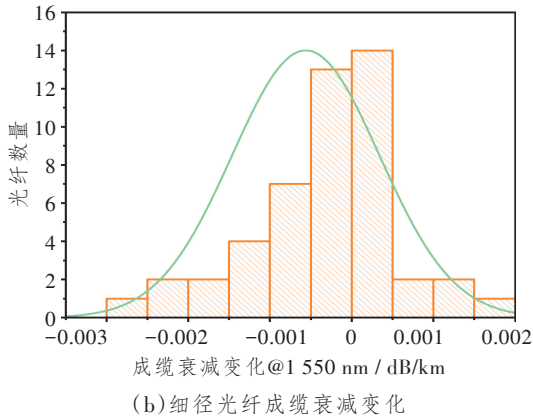
图4 细径光纤海底光缆余长值

Figure 4 Excess fiber length of fine diameter submarine cable

同时,跟踪测试各工序完成后的光纤衰减系数和色散系数等光学性能,记录制程过程中细径光纤的关键性能变化,如图5和图6所示,统计结果如表6所示。由图和表可知,48芯细径光纤成缆后的衰减系数和色散系数都呈现出稳定的特点,通过设定细径光纤余长边界条件及工艺控制,得到低于0.003 dB/km的超低附加衰减,最大值仅为17.271 ps/(nm·km)的光纤色散系数同样满足海底光缆系统传输对色散的性能指标要求^[10]。



(a) Incoming and cabling attenuation of fine diameter fiber



(b) Attenuation variation of fine diameter fiber

图5 细径光纤成缆过程中衰减变化

Figure 5 Attenuation changes of fine diameter fiber during cabling

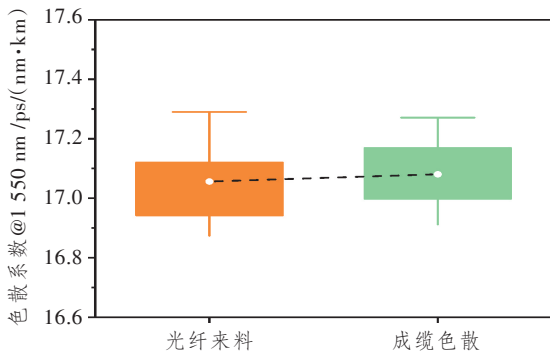


图6 细径光纤成缆过程中色散变化

Figure 6 Chromatic dispersion variation of fine diameter fiber during cabling

表6 细径光纤成缆性能结果

Table 6 Cabling performance results of fine diameter fiber

性能指标	成缆结果		成缆最大附加值
	最小值	最大值	
衰减系数@ 1 550 nm/ dB/km	0.178	0.181	0.002
色散系数@ 1 550 nm/ ps/(nm·km)	16.912	17.271	0.211

2.2 细径光纤海底光缆关键性能试验

本节为验证细径光纤海底光缆在生产制造、过程运输和施工维护等过程中可以满足机械性能和光电性能等指标,保证其在25年寿命内的正常服役期限,参照国际电信联盟-电信标准分局(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)G.976-2014^[11]和中华人民共和国国家军用标准4489A-2021^[12]的试验方法和接受标准进行测试和验收,试验项目和试验结果如表7所示。由表可知,细径光纤在各项试验中都具有稳定的光学性能,均优于标准所规定的技术指标。

表7 细径光纤海底光缆关键性能试验

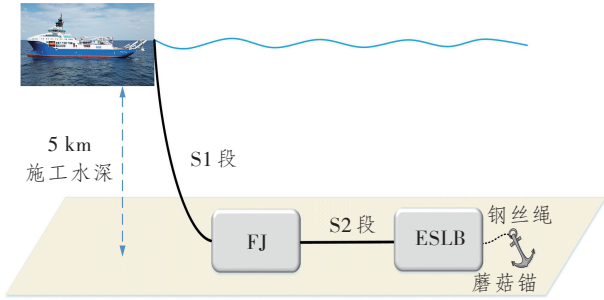
Table 7 Key performance test of fine diameter fiber submarine cable

试验项目	接受标准	最大差值
限制综合拉伸试验		0.017
最小化扭矩拉伸试验		0.007
机械疲劳试验		0.012
过滑轮试验	整个试验期间, 光透射性能变化≤ 0.05 dB	0.006
耐压扁试验		0.001
耐冲击试验		0
耐挠曲试验		0.001
温度循环试验		0.001

2.3 细径光纤海底光缆海试试验

为验证该缆型可以满足实际深海环境条件下的施工作业需求,在印度洋马累东南方向海域成功开展了细径光纤海底光缆5 km水深海试试验。本次试验系统链路如图7(a)所示,两段样缆均为轻型有中继海底光缆,段号分别为S1和S2,由直通接头盒(Factory Joint, FJ)连接,并通过环回接头盒(Earth Switching Loopback Box, ESLB)形成回路,试验缆总长为15 km,如图7(b)所示。整个试验过程包括:敷设阶段、静置阶段(6小时)和回收阶段,对细径光纤海底光缆各个阶段的衰减和色散系数进行测试,测试结果如图8所示。由图可知,在整个海试阶

段细径光纤的衰减变化 ≤ 0.001 dB/km,色散系数在 [16.791, 16.852] ps/(nm·km)范围内波动,满足海底光缆通信系统的施工需求。



(a) 细径光纤海底光缆海试链路图

(a) Sea trial link diagram of fine diameter fiber submarine cable



(b) 细径光纤海底光缆

(b) Fine diameter fiber submarine cable

图7 5 km 深海海试试验

Figure 7 5 km water depth sea trial test

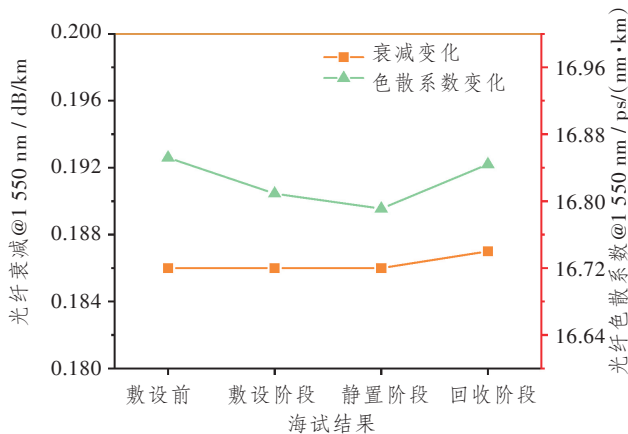


图8 5 km 深海海试结果

Figure 8 The result of 5 km water depth sea trial

3 结束语

本文攻克了细径光纤成缆过程中的关键技术,设计研制出一种大芯数和低附加损耗细径光纤海底光缆,较常规 250 μm 光纤海底光缆传输容量提升了 1.5 倍。通过建立细径光纤余长模型,求解边界

条件,实现细径光纤成缆附加衰减与可靠性寿命的平衡控制,同时利用正交试验法优化熔接工艺,得到细径光纤的最优熔接参数组合。试制样品通过关键性能试验和 5 km 深海海试试验,性能指标满足海底光缆通信系统技术要求,为未来新一代细径光纤海洋通信系统的发展提供了重要技术支撑。

参考文献:

- [1] Wang T, Moran B, Zukerman M. Capacity-aware Undersea Cable System Design[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(8): 2648–2656.
- [2] Matsui T, Sagae Y, Yamada Y, et al. High Figure-of-Merit Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter for Long-haul and Wide-band Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(11): 4124–4131.
- [3] Stolov A A, Simoff D A, Li J, et al. Behavior of Specialty Optical Fibers in Crude Oil Environment [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38 (14) : 3759–3768.
- [4] 于丽君. 光纤机械可靠性及寿命研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2017.
Yu L J. Study on Mechanical Reliability and Life of Optical Fiber[D]. Wuhan, China: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2017.
- [5] 王帅奇. 光纤宏弯低频振动传感器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
Wang S Q. Research on Low Frequency Vibration Sensor based on Optical Fiber Macro Bending [D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2022.
- [6] 茶映鹏, 彭星玲, 张华, 等. 单模光纤宏弯损耗理论与实验研究[J]. 光通信研究, 2016(5): 43–45.
Cha Y P, Peng X L, Zhang H, et al. Theoretical and Experimental Study of Macrobending Loss of the Single-mode Fiber[J]. Study on Optical Communications, 2016(5): 43–45.
- [7] Andreev V A, Gavryushin S A, Popov B V, et al. Statistical Characteristics of Excess Fiber Length in Loose Tubes of Optical Cable [C]//Optical Technologies for Telecommunications 2016. Samara, Russian: SPIE, 2017: 103421G.
- [8] 马玉洲, 龙娅, 单联洁, 等. 超小型光纤陀螺用超细径光纤熔接工艺技术研究[J]. 航天制造技术, 2022(5): 55–58.
Ma Y Z, Long Y, Shan L J, et al. Research on Ultra-fine Diameter Fiber Fusion Technology for Ultra-small Fiber Optic Gyroscope[J]. Aerospace Manu-

- facturing Technology, 2022(5): 55-58.
- [9] 伍鹏宇, 唐福农, 裴劲. 正交试验设计方法在工艺方案设计中的应用[J]. 兵工自动化, 2024, 43(5): 17-20.
Wu P Y, Tang F N, Pei J. Application of Orthogonal Experimental Design Method in Process Scheme Design[J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43(5): 17-20.
- [10] ITU-T G. 652-2016, Characteristics of a Single-mode Optical Fibre and Cable [S].
- [11] ITU-T G. 976-2014, Test Method Applicable to Optical Fibre Submarine Cable Systems [S].
- [12] GJB 4489A-2021, 海底光缆通用规范[S].
GJB 4489A-2021, General Specification for Submarine Optical Fiber Cable[S].