

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250100.

专题:海洋通信与传感网络

牛学超,陆建佳,陈紫薇,等.轻量化脐带缆设计[J].光通信研究,2025(4):250100.

Niu X C, Lu J J, Chen Z W, et al. Light-weight Umbilical Cable Design [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250100.

轻量化脐带缆设计(特邀)

牛学超¹,陆建佳¹,陈紫薇¹,谢书鸿¹,顾春飞¹,孙杰²,陈珍珍¹,冒兵¹

(1. 中天科技海缆股份有限公司,江苏南通 226010; 2. 浙江中天海工线缆有限公司,浙江温州 325026)

摘要:【目的】脐带缆是海洋科学考察的核心装备之一,通常采用高强度钢丝作为承力单元,然而钢丝密度较高,随着应用水深增加,脐带缆自重占据安全工作载荷的比例增大,超深水应用安全载荷裕度减少。因此需要进行脐带缆轻量化设计。【方法】轻量化脐带缆采用低密度、高硬度的芳纶纤维复合材料(FRP)在其最内层全部取代钢丝,在中间层间隔取代钢丝,最外层保持全钢丝结构来提升整体耐磨性能且有利于海水浸入承力层间隙散热。为了减缓层间磨损,在FRP表面挤塑耐磨层,增加长期使用的耐疲劳性能。【结果】首先,与钢丝脐带缆相比,轻量化脐带缆在空气中单位重量减少30.50%,海水中单位重量减少37.29%,静态使用水深提升27.6%,拓展了脐带缆的应用场景。其次,采用有限元方法对轻量化脐带缆和钢丝脐带缆的刚度、拉伸和散热性能等进行分析对比,发现轻量化脐带缆的拉伸刚度降低了16.7%,弯曲刚度降低了20.0%;两种缆均能达到理论断裂拉伸载荷,两种材料应力均小于断裂强度,此时缆的延伸率均为1.45%;在同等电流的海水环境中,轻量化脐带缆芯温度高0.7℃,相较于钢丝脐带缆增加了2.9%。最后,完成样缆制造,基于常见失效模式进行断裂拉伸测试、交变载荷疲劳测试和张力弯曲疲劳测试,测试结果证实,经历2000次疲劳后,轻量化脐带缆仍具有较高的强度,并且层间磨损较为轻微。【结论】在外径不变的前提下,轻量化脐带缆可以较大幅度地提升应用水深,两种不同特性的承力材料可以同时发挥最大的拉伸性能,经过测试证实轻量化脐带缆具有较高的可靠性。

关键词:脐带缆;遥控潜水器;芳纶纤维复合材料;疲劳测试;超深水应用

中图分类号:TM722

文献标志码:A

Light-weight Umbilical Cable Design

NIU Xuechao¹, LU Jianjia¹, CHEN Ziwei¹, XIE Shuhong¹, GU Chunfei¹, SUN Jie², CHEN Zhenzhen¹, MAO Bing¹

(1. Zhong Tian Technology Submarine Cables Co., Ltd., Nantong 226010, China;

2. Zhejiang Zhong Tian Submarine Cables Co., Ltd., Wenzhou 325026, China)

Abstract: 【Objective】 The umbilical cable is one of the core pieces of equipment for marine scientific exploration. It typically uses high-strength steel wires as the load-bearing elements. However, steel wires have a high density, and as the operating water depth increases, the proportion of the umbilical cable's own weight in the safe working load also increases, reducing the safety margin for ultra-deep water applications. Therefore, there is a need for lightweight design of umbilical cables. 【Methods】 The light-weight umbilical cable replaces steel wires entirely with low-density, high-hardness aramid Fiber Reinforced Polymer Composite Materials (FRP) in its innermost layer. In the middle layer, steel wires are partially replaced at intervals, while the outermost layer maintains a full steel wire structure to enhance overall wear resistance and facilitate heat dissipation through the gaps in the load-bearing layer when seawater seeps in. To mitigate interlayer wear, a wear-resistant layer is extruded on the surface of the FRP, thereby increasing its fatigue resistance for long-term use. 【Results】 Firstly, compared with steel wire umbilical cables, light-weight umbilical cables reduce the unit weight by 30.50% in air and 37.29% in seawater, and increase the static water depth by 27.6%, expanding the application scenarios of umbilical cables. Secondly, the finite element method is used to analyze and compare the stiffness, tensile strength, and heat dissipation performance of lightweight umbilical cables and steel wire umbilical cables. It is found that the tensile stiffness of lightweight umbilical cables is 16.7% lower and the bending stiffness is 20.0% lower. Both types of cables can reach the theoretical fracture tensile load, and the stress of both materials is less than the fracture strength. At this time, the elongation of the cables is 1.45%. Under the same current in seawater, the temperature of the light-weight umbilical cable core is 0.7℃ higher, which is 2.9% higher than the steel wire umbilical cable. Finally, the prototype cable was manufactured and subjected to tensile tests based on common failure modes, as well as tests for fatigue under alternating loads and tension-bending fatigue. The test results confirm that after 2000 cycles of fatigue, the lightweight umbilical cable still has high strength and minimal interlayer wear. 【Conclusion】 Under the premise of unchanged outer diameter, lightweight umbilical cables can significantly increase the application water depth. Two different load-bearing materials with different characteristics can simultaneously exert maximum tensile performance. Through testing, it has been verified that the lightweight umbilical cables have high reliability.

Key words: umbilical cable; remote operated vehicles; FRP; fatigue test; ultra deep water usage

收稿日期:2025-03-19; 修回日期:2025-05-16; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC2805902)

作者简介:牛学超(1988-),男,山东惠民人。工程师,学士,主要研究方向为海光缆和脐带缆研发。

通信作者:牛学超,工程师。E-mail: niuxc@ztt.cn

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

0 引言

随着深海科学考察、地质钻探、深海资源开发及水文探测等活动的日渐增多,有缆遥控潜水器(Remote Operated Vehicles, ROV)等深海装备的作业水深逐渐提高至 6 000 m^[1-4]。超深水应用时,钢丝绳脐带缆由于自重较大,其用于 ROV 吊装及应对波浪和洋流等的安全工作载荷裕度大幅降低^[5],需要进行轻量化设计。

脐带缆轻量化设计一般采用芳纶等高强度纤维或者将高强度纤维与粘合剂制作成复合材料作为承力层,如此能够发挥两种材料性能互补的特点^[6-7]。毛彦东等^[8]通过优化脐带缆截面中的填充构件,在不降低力学性能的前提下实现了填充件减重 14%;邓禹等^[5]对碳纤维和芳纶增强脐带缆等进行轻量化设计和分析,得出碳纤维脐带缆最优,最高减重达 25.1%,但作为对比的脐带缆结构形式不同,对比数据不具普遍性;潘俊等^[9]通过优化玻璃纤维在柔性管上的缠绕角度来降低柔性管截面壁厚,达到减重与降本的目的。

上述研究虽然降低了脐带缆的重量,但也带来了新的问题:即高强度纤维材料在耐候性及防护性方面较为脆弱,需要设计额外的防护结构以防止纤维磕碰、磨损或环境影响等,如此增加了脐带缆的外径,且对缆的散热不利。为了在降低脐带缆重量的同时不增加外径,本文设计了钢丝与芳纶纤维复合材料(Aramid Fiber Reinforced Polymer Composite Materials, FRP)组合的承力轻量化脐带缆,通过与同尺寸钢丝脐带缆在轻量化、力学性能和散热性能等方面进行分析和对比,并针对使用过程主要失效模式进行了测试验证,证实了轻量化脐带缆方案的可行性。

1 轻量化脐带缆结构设计

脐带缆卷绕在绞车上,并随着 ROV 反复收放使用。在使用过程中,脐带缆不仅在绞车上存在缆间磨损,而且在转向轮、牵引装置和 A 架等接触的部位也存在磨损。本文设计的轻量化脐带缆如图 1(a)所示。该轻量化脐带缆由光单元、控制线和动力线等功能部件通过绞合组成脐带缆的缆芯,其中光单元内置的光纤可以为脐带缆温度及应变完整性监测提供通道^[10]。为了保护缆芯并阻止海水入侵,在缆芯外挤制塑料护套。最外层为承力层,分为 3 层,最内层全部缠绕 FRP,为了提升抗磨损性能,每根 FRP 均包覆了耐磨的尼龙材料;中间层缠绕 FRP

和镀锌钢丝,采用间隙组合的方式以减少最外层钢丝对 FRP 的直接挤压;最外层全部缠绕镀锌钢丝,该层钢丝在缠绕时采用预成型和后成型工艺使得钢丝服帖,无需增加额外的保护层,如此设计一方面提升了脐带缆在绞车及与船载设备接触的耐磨损性能,另一方面也使得海水可以浸入承力层,从而降低缆芯发热时的温度。为了便于对比,设计相同结构和尺寸但承力层全部采用钢丝的脐带缆如图 1(b)所示。通过计算将两者的重量、载荷、弯曲半径和静态应用水深等性能指标做对比,结果如表 1 所示。

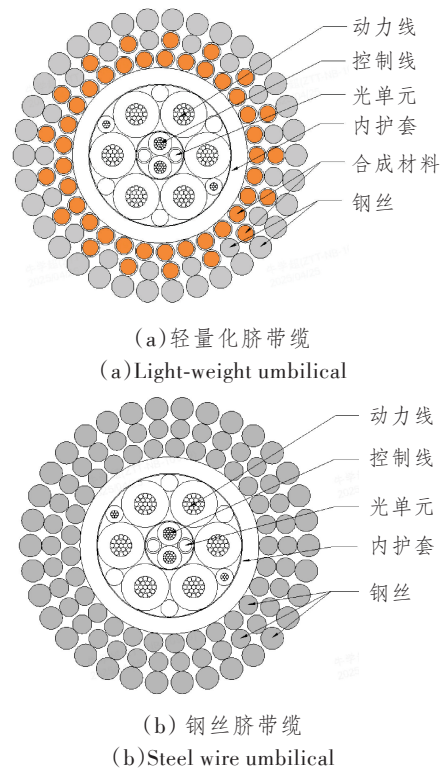


图 1 轻量化脐带缆和钢丝脐带缆结构示意图
Figure 1 Light-weight umbilical and steel wire umbilical structure diagram

表 1 轻量化脐带缆与钢丝脐带缆技术指标对比
Table 1 Comparison of technical indicators between light-weight umbilical and steel wire umbilical

| 序号 | 项目 | 轻量化脐带缆 | 钢丝脐带缆 |
|----|-------------|--------|-------|
| 1 | 外径/mm | 39.5 | 39.5 |
| 2 | 空气中单位重量/g/m | 4 010 | 5 770 |
| 3 | 海水中单位重量/g/m | 2 960 | 4 720 |
| 4 | 断裂拉伸载荷/kN | 880 | 1 100 |
| 5 | 安全工作载荷/kN | 220 | 275 |
| 6 | 最小弯曲半径/mm | 700 | 700 |
| 7 | 无载荷静态使用水深/m | 7 432 | 5 826 |

通过上述比较可知,轻量化脐带缆在保持外径和弯曲半径不变的前提下:①空气中单位重量减少

30.50%，海水中单位重量减少 37.29%；②无额外重量负载下，脐带缆静态使用水深提升 27.6%。如此拓展了轻量化脐带缆的应用水深和负载水平，可以满足更多样化的科考需求。

2 轻量化脐带缆性能分析

由于轻量化脐带缆使用 FRP 与钢丝共同承力，芳纶纤维和钢丝的破断强度、弹性模量和散热系数等参数存在差异，为了掌握两种不同材料混合使用时的特性，本文针对轻量化脐带缆和钢丝铠装缆进行刚度、拉伸以及散热分析对比。

2.1 刚度分析

表 1 中重量和载荷等指标反映了轻量化脐带缆的静态性能指标，在实际使用过程中需关注轻量化脐带缆的动态性能。而拉伸、弯曲和扭转是脐带缆实际应用时的基础变形形式，拉伸刚度、扭转刚度及弯曲刚度反映了缆抵抗变形的能力^[11]。本文分别计算了轻量化脐带缆和钢丝脐带缆的刚度，分析了两者存在的差异。为了简化计算，将 FRP 基于测试数据等效为均质的模型。建立轻量化脐带缆和钢丝脐带缆的有限元模型，使用的材料属性如表 2 所示，得到两者拉伸刚度、弯曲刚度以及扭转刚度的结果如表 3 所示。

表 2 脐带缆材料属性

Table 2 Umbilical cable material properties

| 项目 | FRP | 钢丝 |
|----------------------|-------|-------|
| 破断强度/MPa | 1 500 | 1 960 |
| 屈服强度/MPa | 1 300 | 1 700 |
| 弹性模量/GPa | 125 | 195 |
| 泊松比 | 0.29 | 0.25 |
| 密度/kg/m ³ | 1 400 | 7 800 |
| 散热系数/W/m/K | 0.1 | 50.0 |

表 3 轻量化脐带缆与钢丝脐带缆刚度

Table 3 Stiffness of light-weight umbilical and steel wire umbilical

| 项目 | 轻量化脐带缆 | 钢丝脐带缆 |
|------------------------|--------|-------|
| 拉伸刚度/MN | 83.20 | 97.07 |
| 弯曲刚度/kN·m ² | 0.04 | 0.05 |
| 扭转刚度/kN·m ² | 2.79 | 3.14 |

由表 3 可知，①钢丝脐带缆由于承力材料的一致性以及强度较高，相较于轻量化脐带缆，拉伸刚度提高 16.7%，表现为在抵抗拉伸载荷时性能更优；②轻量化脐带缆弯曲刚度降低 20.0%，表现为在动态应用时有更好的顺应性。

2.2 拉伸分析

由于钢丝和 FRP 的强度和延伸率的不同，在承受相同拉伸载荷时，可能出现延伸率较低的钢丝先断裂、延伸率较高的 FRP 后断裂的现象，如此将导致脐带缆整体断裂载荷小于理论的断裂拉伸载荷。针对这种情况，分别对轻量化脐带缆和钢丝脐带缆施加理论断裂拉伸载荷进行拉伸分析，以掌握承力层的钢丝和 FRP 在理论断裂拉伸载荷下的应力大小以及轻量化脐带缆和钢丝脐带缆分别在理论断裂拉伸载荷下的应变。应力图如图 2 所示，拉伸应变曲线如图 3 所示。

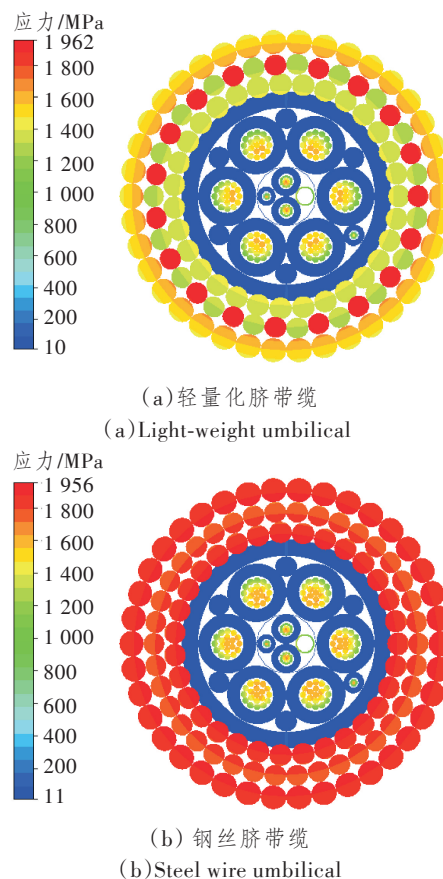


图 2 轻量化脐带缆与钢丝脐带缆断裂拉伸载荷下的应力图

Figure 2 Stress diagram for light-weight umbilical and steel wire umbilical under fracture tensile load

通过计算得知，轻量化脐带缆在理论断裂拉伸载荷下，内层和中间层的 FRP 应力约在 1 450 MPa，中间层和外层钢丝应力约在 1 650~1 750 MPa，均小于理论破断应力；而且整根缆达到了理论断裂载荷 880 kN，此时应变约为 1.45%；在此过程并未出现延伸率低的钢丝先断裂导致整根缆无法达到理论断裂载荷的情况。钢丝脐带缆在理论断裂拉伸载荷下，内层、中间层和外层钢丝应力约在 1 650~1 750 MPa，

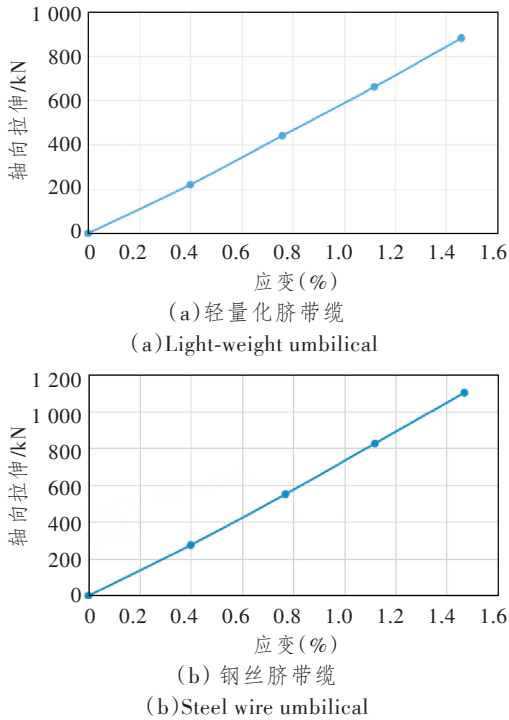


图3 轻量化脐带缆与钢丝脐带缆在断裂拉伸载荷下的应变曲线

Figure 3 The strain curves of light-weight umbilical cable and steel wire umbilical cable under tensile loads leading to fracture

与轻量化脐带缆相似;此时整根缆达到了理论断裂载荷 1 100 kN,应变约为 1.45%,也与轻量化脐带缆相似。

由此可知,①虽然钢丝和 FRP 延伸率不同,但轻量化脐带缆可以达到理论的断裂力值,并不会出现延伸率较低的材料先断裂从而导致整根缆的断裂载荷小于理论值;②轻量化脐带缆与钢丝脐带缆在理论断裂载荷下的应变相同,并不会因为使用了延伸率较高的 FRP 而导致整根缆的延伸率增加。

2.3 散热分析

由于 FRP 散热系数相对于钢丝较低,因此在相同载流量下,轻量化脐带缆的散热更为困难。虽然轻量化脐带缆的承力层外无包覆,海上可直接接触内护套,有利于缆芯的散热,但仍需进行量化分析。建立轻量化脐带缆以及钢丝脐带缆模型,将其置于海水环境,海水温度设置为 20℃,在脐带缆周围及承力层间隙填充海水。分别为脐带缆外层 6 根动力线两路三相交流电回路施加 20 A 电流,计算在静水状态下(即承力层间隙和周围海水温度会提升,不会有维持恒定的温度)缆芯的发热情况,计算结果如图 4 所示。

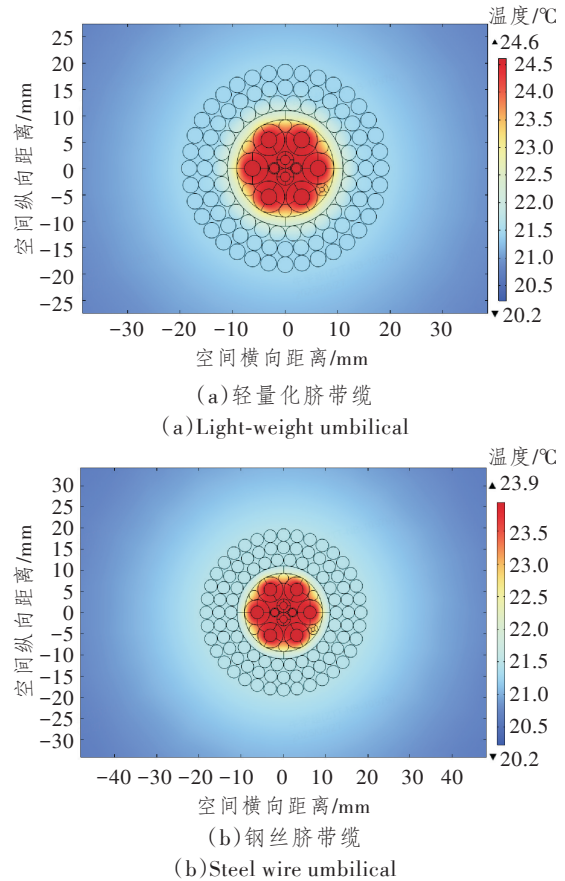


图4 轻量化脐带缆与钢丝脐带缆热场图

Figure 4 The thermal field diagram of the Light-weight umbilical and steel wire umbilical

经过计算可知,轻量化脐带缆在 20 A 电流下,缆芯内部最高温度为 24.6℃。相较于钢丝脐带缆在 20 A 电流下缆芯内部的最高温度 23.9℃,温度提升了 2.9%,说明轻量化脐带缆会导致散热难度增加,但增加幅度不大。由于脐带缆属于定制化设计,导体选型和传输功率计算需考虑这一情况。

3 轻量化脐带缆机械性能测试

脐带缆在使用时除了承受 ROV 及自身重量外,还经受波浪和洋流等环境载荷以及母船升沉带来的动态冲击载荷,长期使用将面临疲劳及磨损等。万步炎等^[7]将脐带缆使用过程中的主要失效形式总结为拉伸过载破断、疲劳损伤和摩擦磨损等。为了验证轻量化脐带缆的机械性能及长期可靠性,尤其是 FRP 与钢丝混合铠装的可行性及可靠性,本文制造了轻量化脐带缆样品,并基于主要的失效模式进行了断裂拉伸测试、交变载荷疲劳测试和张力弯曲载荷疲劳测试。

3.1 断裂拉伸测试

拉伸性能是脐带缆保证 ROV 安全回收与布放的最重要的性能,由于脐带缆由多种材料组合而成,

在不同载荷下内部单元存在复杂的接触、摩擦及滑移效应,整体呈现出非线性特点^[12]。根据 Cigre 623^[13] 拉伸测试方法,采用卧式拉力试验机对样缆进行断裂拉伸测试,测试过程分别在 400 和 650 kN 进行加载以检验 FRP 是否会先出现蠕变断裂,断裂拉伸测试结果如图 5 所示。

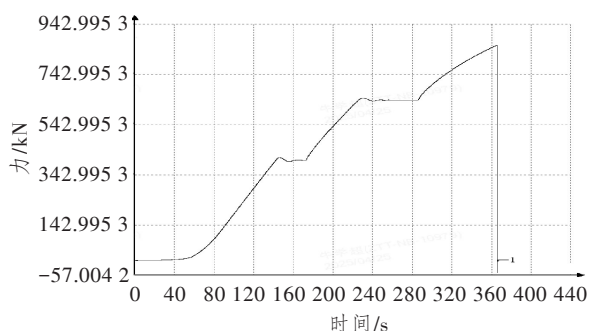


图 5 断裂拉伸测试曲线

Figure 5 Fracture tensile test curve

脐带缆最终断裂发生在终端承力装置的根部,表现为部分 FRP 和钢丝出现断裂,破断拉力为 863.8 kN,这与理论计算值 880 kN 差异较小,仅为 1.8%。这证实了轻量化脐带缆并不会因为采用 FRP 和钢丝两种延伸率和强度不同的材料而导致部分材料先断裂,进而导致实际断裂载荷小于理论断裂载荷。

3.2 交变载荷疲劳试验

海上作业时波浪及母船升沉运动给脐带缆带来了冲击载荷,长期反复作用下,脐带缆中的钢丝和铜导体等金属部件将出现疲劳损伤,最终破坏结构的完整性^[14]。而且冲击越剧烈,应力幅的增加和寿命的减少越明显。这将导致即使脐带缆承受的拉力小于安全工作载荷也有可能发生断裂。因此交变载荷疲劳性能是脐带缆长期使用的关键性能之一。按照 3.1 节中的拉伸测试方法,将交变载荷最大载荷选定为安全工作载荷 220 kN,最小载荷选定为 50% 安全工作载荷,即 110 kN。考虑脐带缆实际使用寿命,本次测试共进行了 2 000 次,试验过程曲线如图 6 所示。

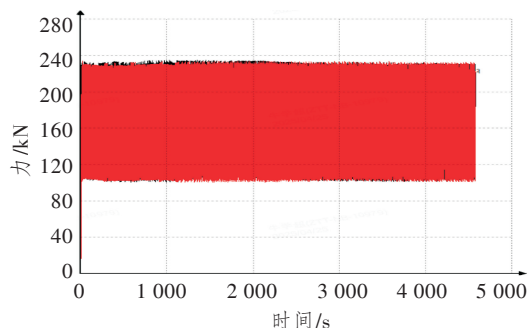


图 6 交变载荷疲劳测试曲线

Figure 6 Alternating load fatigue test curve

在历经了 2 000 次交变载荷疲劳测试后,缆芯光电性能正常,承力层表面情况良好,并未出现打扭变形等情况。交变载荷疲劳测试结束后,进行断裂拉伸测试,脐带缆最终破断力值达到 828.9 kN,相较未经过交变载荷疲劳测试的脐带缆下降了 4.0%。但考虑脐带缆本就数千次的使用寿命,在经历 2 000 次疲劳测试后轻量化脐带缆仍具有较高强度,可以说明在应对长期的冲击载荷时有良好的表现。

3.3 张力弯曲载荷疲劳测试

脐带缆收卷在绞车上,每次布放和回收,脐带缆都在绞车、A 架和转向轮等位置承受拉力下的弯曲,承力单元之间产生挤压和磨损,这些都会对脐带缆钢丝及 FRP 产生损伤,因此脐带缆张力弯曲载荷疲劳性能也是长期使用的关键性能之一。利用自主研发的负载疲劳试验机^[15]对脐带缆施加 220 kN 的安全工作载荷,然后在弯曲半径为 700 mm 的盘具上模拟绞车进行往返式收卷运动,本次测试设定为 2 000 次。试验后,对样缆进行解剖观察 FRP 和钢丝的磨损情况,结果如图 7 所示。

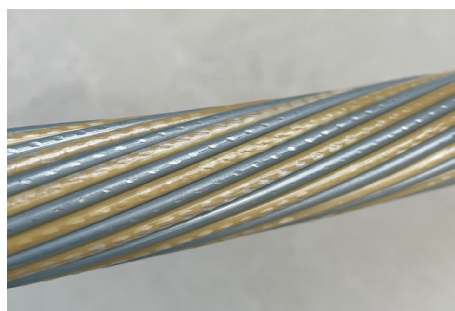


图 7 铠装层内部磨损情况

Figure 7 Wear and tear inside the armor layer

试验结果显示,试验后脐带缆表面完整未发生打扭变形等现象。解剖发现 FRP 和钢丝表面均出现了层间磨损痕迹,两种材料的磨损深度相似,其中 FRP 表面的尼龙耐磨层尚未完全磨穿。FRP 与钢丝间隙承力的结构仍然稳定,FRP 没有在挤压弯曲作用下出现破坏。这表明轻量化脐带缆在反复收卷过程中具有较高的可靠性和稳定性。

4 结束语

针对传统钢丝脐带缆无法超深水应用的难题,本文在不增加脐带缆外径且不降低耐磨性能的前提下,采用低密度 FRP 替代部分钢丝设计了新型轻量化脐带缆,实现了脐带缆在空气中重量降低 30.50%,应用水深提升 27.6%,以此拓展了脐带缆的使用范围。针对 FRP 和钢丝强度和延伸率等的

不同,可能导致的拉伸过程延伸率较低的材料先断裂而导致整根缆的断裂载荷低于理论值的情况,本文开展了仿真分析证实轻量化脐带缆可以达到理论断裂载荷,此时FRP和钢丝的应力均小于材料断裂强度,而且并未发生轻量化脐带缆由于采用FRP使得整根缆的应变增加。针对FRP散热系数较低,导致脐带缆散热困难,经过计算得知在20A的电流下,轻量化脐带缆缆芯最高温度提升了2.9%。最后基于实际应用过程常见失效模式,本文开展了实物样缆机械性能及疲劳测试,验证了轻量化脐带缆的可靠性。

参考文献:

- [1] 赵羿羽,孟德鑫,王传荣,等.我国深海装备技术发展研究[J].船舶工程,2024,46(7):128-135.
Zhao Y Y, Meng D X, Wang C R, et al. Research on the Development of Deep-sea Equipment Technology in China[J]. Ship Engineering, 2024, 46(7): 128-135.
- [2] 高欢,谢书鸿,潘盼.海洋工程用脐带缆技术[J].电线电缆,2024(2):11-20.
Gao H, Xie S H, Pan P. Technologies of Umbilical for Ocean Engineering[J]. Wire & Cable, 2024(2): 11-20.
- [3] 杨锦坤,孔敏,杨扬,等.国内外海洋科考现状及发展趋势[J].船舶,2024,35(6):15-28.
Yang J K, Kong M, Yang Y, et al. The Present Situation and Development Trend of Marine Scientific Research at Home and Abroad[J]. Ship & Boat, 2024, 35(6): 15-28.
- [4] 陈旭光,寇海磊,牛小东,等.深海水下技术装备发展研究[J].中国工程科学,2024,26(2):1-14.
Chen X G, Kou H L, Niu X D, et al. Development of Deep-sea Underwater Technology and Equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 1-14.
- [5] 邓禹,夏辉,高建东,等.脐带缆轻量化设计及其力学性能[J].船舶工程,2022,44(3):150-157.
Deng Y, Xia H, Gao J D, et al. Lightweight and Mechanical Properties of Umbilical Cable[J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 150-157.
- [6] 白冰,张晓健,王磊,等.复合材料在深海管道中的应用[J].化工管理,2021(33):187-188.
Bai B, Zhang X J, Wang L, et al. Application of Composites in Deep-sea Pipelines[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(33): 187-188.
- [7] 万步炎,彭奋飞,金永平,等.海洋探测装备收放缆力学性能研究综述[J].中国机械工程,2024,35(9):1521-1533.
Wan B Y, Peng F F, Jin Y P, et al. A Review of Mechanics Property Studies of Retracting and Releasing Cables for Marine Exploration Equipment[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(9): 1521-1533.
- [8] 毛彦东,杨志勋,阎军,等.脐带缆截面填充构件拓扑优化轻量化设计[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(3):421-428.
Mao Y D, Yang Z X, Yan J, et al. Topology Optimization and Lightweight Design of Filling Bodies in the Cross-section of Umbilical Cables[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(3): 421-428.
- [9] 潘俊,颜廷俊,李鹏,等.基于失效模式的深海玻纤增强柔性管截面设计[J].工程塑料应用,2017,45(11):60-65.
Pan J, Yan T J, Li P, et al. Cross Section Design of Glass Fiber Reinforced Flexible Pipe in Deep Sea based on Failure Mode[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11): 60-65.
- [10] 冯奕军,徐浩.基于光纤温度传感的光缆外层断股高精度监测[J].光通信研究,2023(3):46-52.
Feng Y J, Xu H. High Accuracy Monitoring of Outer Strand Breakage of Optical Cable based on Optical Fiber Temperature Sensing[J]. Study on Optical Communications, 2023(3): 46-52.
- [11] 刘子惠,胡凯,郑新龙,等.海底光纤复合缆机械损伤有限元仿真分析综述[J].光通信研究,2023(2):45-54.
Liu Z H, Hu K, Zheng X L, et al. Overview of Finite Element Simulation Analysis for Mechanical Damage of Submarine Optical Fiber Composite Power Cable[J]. Study on Optical Communications, 2023(2): 45-54.
- [12] 牛学超,祝庆斌,潘盼,等.钢管脐带缆扭转平衡设计[J].海洋工程,2020,38(6):151-157.
Niu X C, Zhu Q B, Pan P, et al. Torque Balance Design of Steel Tube Umbilical Cable[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(6): 151-157.
- [13] Cigre 623-2015, Recommendations for Mechanical Testing of Submarine Cables[s].
- [14] 杨志勋.脐带缆结构设计与分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2012.
Yang Z X. Research on Umbilical Structure Design and Analysis Method[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2012.
- [15] 蔡炳余,费颖杰,张建民,等.海缆测试装置:中国,4951693[P].2022-02-22.
Cai B Y, Fei Y J, Zhang J M, et al. A Submarine Test Equipment: China, 4951693[P]. 2022-02-22.