

中国3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）

关键技术突破与应用

吴勇强

上海蓝梭电子科技有限公司，上海 201906

摘要： 本文聚焦于3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）关键技术与应用。鉴于其在深海能源、科研、国防等领域的重要性，为突破技术封锁展开研究。在关键技术上，实现了光缆抗蠕变密封、光纤高压穿舱、密封橡胶改性及与金属粘结等技术突破。完成了总体结构设计、材料选型与制造工艺研究。经耐压、密封、光学性能等测试，性能可靠，在陵水25-1气田项目中成功应用。研究成果不仅填补国内空白，还为深海能源开发、海底观测网建设及海洋国防等领域提供有力支撑。

关键词： 脐带缆光连接器（CFT）；关键技术；性能测试；应用案例

Key Technical Breakthroughs and Applications of China's 3000-meter Ultra-deepwater Umbilical Cable Fiber-optic Connector (CFT)

Wu Yongqiang

Shanghai Lansuo Electronic Technology Co., Ltd. Shanghai 201906

Abstract: This article focuses on the key technology and applications of the 3000-meter ultra-deepwater umbilical cable fiber-optic connector (CFT). Given its importance in deep-sea energy, scientific research, defense, and other fields, research has been conducted to break through technological blockades. In terms of key technologies, breakthroughs have been achieved in creep-resistant sealing of optical cables, high-pressure fiber optic cable penetration, modification of sealing rubber, and bonding with metal. The overall structural design, material selection, and manufacturing process research have been completed. After undergoing pressure resistance, sealing, and optical performance tests, the product has proven to be reliable and has been successfully applied in the Lingshui 25-1 gas field project. The research results not only fill a domestic gap but also provide strong support for deep-sea energy development, underwater observation network construction, and marine defense.

Keywords: umbilical cable fiber-optic connector (CFT); key technology; performance testing; application cases

引言

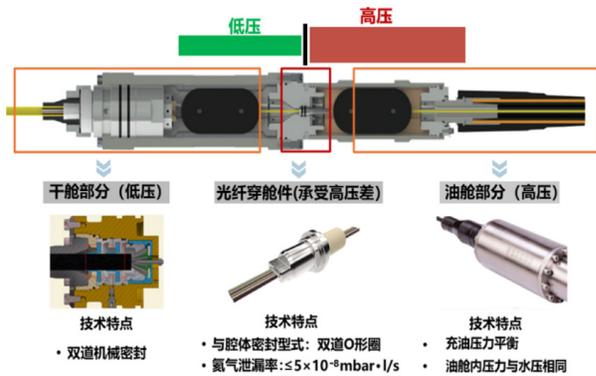
在深海开发领域，3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）至关重要。它是深海能源开采、科研观测及国防建设等的关键装备，实现自主研发对突破技术封锁意义重大。目前，国外在CFT技术上领先，相关企业产品优势显著，占据主要市场。国内虽有进展，但在关键技术、产品性能和可靠性等方面仍存差距，如密封技术、材料性能等问题亟待解决。本研究旨在突破CFT关键技术，实现国产化应用，填补国内空白。通过对密封、穿舱、粘结等关键技术的创新研究，以及产品设计、制造和测试，提升我国在该领域的技术水平，为深海开发提供有力支撑。

一、CFT 技术概述

（一）CFT 的含义

CFT 即超深水脐带缆光连接器，是深海工程中的关键设备。它主要用于连接脐带缆内干式环境光缆和充油缆内湿式环境光缆，实现光缆干式低压环境到深海装备充油高压环境的过渡连

接。在深海能源开发、海底观测网建设、海洋国防等领域，CFT起着稳定传输信号和保障系统运行的关键作用。但该技术研发制造难度大，我国此前依赖进口，后通过自主研发突破了技术封锁，成功应用于陵水25-1气田项目，推动了我国海洋工程技术的发展。



>图1-1 CFT 结构及工作原理

(二) CFT 应用前景

深海领域探索的持续推进，使3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）的应用前景极为广阔。在深海能源开发领域，CFT是关键基础。随着陆地能源渐趋紧张，深海油气资源成为重要战略储备。CFT可在超深水环境下，稳定地为深海油气田勘探、开采设备传输信号，保障设备间的高效通信和精准控制，有力推动深海能源的高效开发，提升能源开采效率。在海底观测网建设方面，CFT不可或缺。通过在海底部署各类传感器，借助CFT技术，能将海量的海洋环境数据实时、稳定地传输至陆地，为海洋生态、地质、气象等多学科研究提供丰富一手资料，助力科学家深入了解海洋变化规律。于海洋国防建设而言，CFT是提升海洋管控能力的重要支撑。它可确保水下监测、通信系统稳定运行，保障信息的可靠传输，进而提升国家的海洋安全防御水平，维护国家海洋权益。

(三) CFT 研制的意义

3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）的研制具有多方面重要的必要性和意义，主要体现在保障国家安全、顺应国家政策以及推动产业升级三个关键层面。

1. 保障国家能源和国防安全

在深海资源开发领域，石油与天然气行业对海底通信系统的性能和稳定性要求极高，CFT技术作为深海作业中不可或缺的技术支撑，其光纤连接的可靠性对海底通信系统的稳定运行至关重要。过去我国在该技术上依赖国外供应商，而CFT技术涉及军事敏感领域，国外的技术封锁和供应链中断，严重威胁海底通信系统建设与维护，可能导致深海油气项目停滞，对国家能源安全和海洋资源开发构成严峻挑战。因此，自主研发CFT技术，掌握核心科技，对保障海洋资源开发独立性、维护国家海洋权益和国防安全意义重大。

2. 契合国家政策导向

国家高度重视深海通信技术，出台了一系列支持政策。2024年政府工作报告提出大力发展海洋经济、建设海洋强国；科技部发布的国家重点研发计划，明确支持“深海和极地关键技术与装备”专项。这些政策为CFT技术研发提供了有力的政策支持和引导，鼓励加大研发投入，推动产学研结合，加速技术突破和产业化进程。

3. 推动产业升级与提升竞争力

CFT技术是水下脐带缆系统的核心，实现其本地化研发和生产，有助于企业从产品供应商向综合系统解决方案服务商转变，

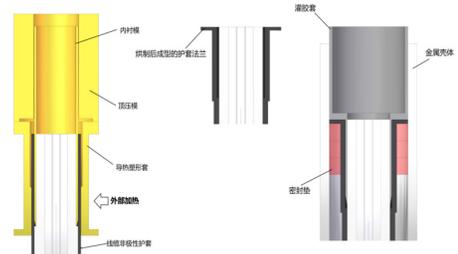
提升高端制造能力，推动产业向高层次发展。产业升级能够激发技术创新，促进产业集群形成，优化资源配置，带动产业链协同发展，吸引高端人才和投资，提升区域经济竞争力和产业多元化水平，增强企业在国内外市场的竞争力，实现可持续发展。

二、超深水脐带缆光连接器关键技术

在3000米级超深水脐带缆光连接器（CFT）的研发中，攻克了三项关键技术，为其在深海环境稳定运行奠定基础。

(一) 光缆抗蠕变密封技术

为解决脐带光缆在深海长期受压导致的密封问题，设计了独特工艺和结构。采用护套“烘制法兰”工艺，给光缆护套整形并引入刚性金属套支撑，防止密封件因护套蠕变失效，还通过特种硫化封装解决非极性护套材料硫化难题。同时，设计多级层叠式组合密封结构，内部



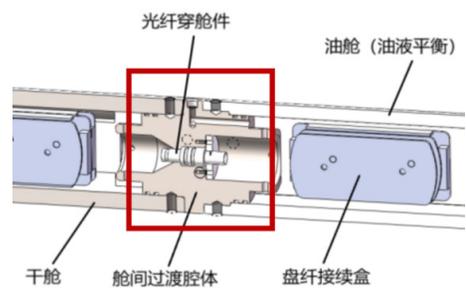
>图2-1 烘制法兰机械压紧式密封工艺

部用V型密封圈增加密封接触面积和自密封功能，外部采用“密封垫片-PEEK斜面衬垫环”结构加强气液阻隔。此外，利用COMSOL软件和蠕变理论预测光缆在深海环境的蠕变寿命，保障25年使用需求。

(二) 光纤高压穿舱技术

光纤穿舱件位于CFT干舱和油舱间，承受巨大压力差，还需保护易弯折的光纤。为此设计单个“中”字型结构穿舱件，中部两道密封圈实现腔体密封，轴向均布16芯光纤穿舱孔，两端设缓冲孔避免应力集中，并借助有限元分析优化结构，确保3000米深海工作安全。

在密封方法上，高压湿端用树脂弹性复合灌封密封并缓冲应力，低压干端用玻璃烧结刚性灌封阻隔纵向压力。同样通过COMSOL软件和蠕变理论对穿舱件进行蠕变寿命预测，确保满足25年使用要求。



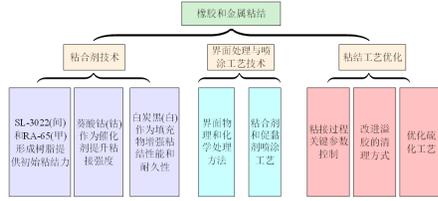
>图2-2 CFT 光纤穿舱件安装位置

(三) 密封橡胶的改性及与金属粘接技术

为使密封橡胶适应深海环境，先结合性能测试实验改进橡胶配方、优化制造工艺，通过水压、疲劳和加速老化试验，利用ABAQUS软件构建本构模型，探索优化和抗疲劳措施，并预测其蠕变、疲劳和老化寿命。在粘接技术方面，研究“间-甲-白-钻”粘体系确定黏合剂，再研究界面处理方法、喷涂工艺和粘接处理工艺，提高橡胶与金属的粘接性能，确保粘接层强度和稳

定性。

这三项关键技术从不同方面提升了CFT的性能和可靠性，解决了深海应用的难题，为我国在超深水脐带缆光纤连接器领域实现自主研发和应用提供了核心技术支撑，使CFT能更好地服务于深海能源开发、海底观测等海洋工程。



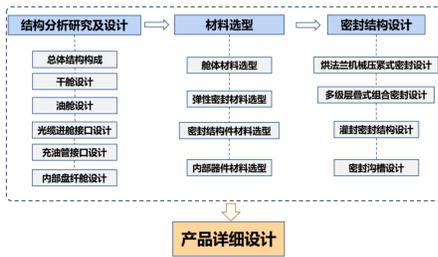
> 图2-3 密封橡胶与金属粘接技术研究思路

三、超深水脐带缆光纤连接器设计与制造

超深水脐带缆光纤连接器(CFT)的设计与制造是一项复杂且极具挑战性的工作，涉及总体结构设计、材料选型以及制造工艺等多个关键环节。

(一) 总体结构

CFT产品的主体结构由干、湿两个舱段组成。首先，依据该产品在UTA/UTH中的布放空间位置、充油管接口的材料和结构尺寸确定舱体材料及外形结构尺寸，并确认产品的安装方式，并以此作为设计依据；其次，按照材料选型及壳体外形尺寸通过仿真校核确定产品的壁厚及相应结构；第三，针对相关的标准



> 图3-1 产品的总体技术路线图

设置密封结构并确定密封弹性件及结构件的材料；第四，完成内部器件的材料选型；第五，细化部件设计，特别是密封结构设计。

本产品应用深度大，应用年限长，产品长期在海水环境下能够稳定工作是研制核心，其关键技术是光缆密封技术和光纤密封穿舱技术，产品的总体技术路线详见下图。

(二) 详细设计

1. 光缆密封设计

本项目采用HDPE护套的16芯单模光缆，因其为非极性材料，光缆进舱处采用多道多层组合密封结构。通过护套“烘制法兰”工艺，套入刚性金属套筒，防止护套蠕变导致密封失效。设计多级层叠式组合密封垫，增强密封效果。利用特种硫化封装，使光缆护套与金属壳体形成一体化密封缓冲结构。在光缆进干舱处，对光纤复合灌封，避免气液泄漏，确保整体密封可靠性。

2. 光纤穿舱设计

光纤穿舱件位于干、油舱间，承受较大压力差，且

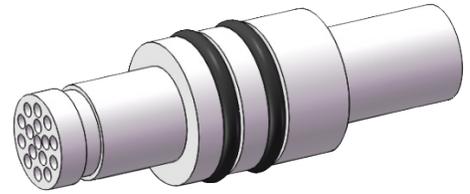


> 图3-2 光缆特种硫化封装

要保护易弯折的光纤。其采用“中”字型结构，中部两道密封圈实现腔体密封，轴向均布16芯穿舱孔，两端设台阶孔缓冲应力。进行力学仿真和强度校核，保证在45MPa单侧压力下安全。采用复合特种灌封，油液压力端弹性灌封缓冲应力，干端刚性灌封阻隔纵向压力。

3. 油管接口设计

油舱终端需适配1-4根PBOF充油管输出，并与MK II充油管接



> 图3-3 CFT 光纤穿舱件结构示意图

口匹配。因此将油舱终端设计为可更换拆卸的端盖，径向两道密封与舱体密封。根据使用需求，可设置1-4个充油管出口，出口尺寸严格按照MK II相关技术文件设计，满足实际使用要求。

4. 盘纤及熔接设计

光纤穿舱件两端引出的光纤，分别在干舱、油舱与脐带光缆及充油管侧光纤在熔纤盒中熔接。熔纤盒除固定熔接管外，还整理余长光纤。两处熔纤盒均为双层结构，这种设计优化了光纤在器件中的排布，有利于提高空间利用率和信号传输稳定性。

(三) 材料选型

材料的选择直接关系到CFT在深海恶劣环境中的性能和使用寿命。舱体材料选用S32750超双相不锈钢，这种材料具备良好的抗压、耐腐蚀性能，能够承受深海的高水压和海水的侵蚀。内部器件材料的选型也极为关键，需根据各器件的功能和工作环境要求，选择具有相应特性的材料，以保障CFT整体性能的可靠性。例如，对于密封材料，选用氟橡胶，其密封性能良好，能有效应对深海环境中的压力和腐蚀。

(四) 制造工艺

零部件加工工艺是CFT制造的重要环节。在加工过程中，对精度要求极高，需采用先进的加工设备和工艺方法，确保每个零部件的尺寸精度和表面质量符合设计要求。例如，光纤穿舱件的加工，其复杂的结构和高精度的要求，需要通过精密加工技术来实现。装配与调试工艺同样不容忽视，装配过程严格按照工艺流程进行，确保各个零部件的安装位置准确无误。调试阶段，对CFT的各项性能进行全面检测和调整，如密封性能、光学性能等，确保产品达到设计标准，能够在深海环境中稳定可靠地运行。

四、CFT性能测试与应用实践

(一) CFT性能测试

1. 性能测试指标与方法

CFT性能测试涵盖多方面关键指标与对应方法。耐压性能测试模拟深海高压环境，检测产品在规定压力下的结构完整性，通过专用压力设备施加压力并观察是否有损坏、变形等。密封性能测试以氦气泄漏率为指标，采用高精度检测设备，检测产品是否有泄漏，确保满足 $\leq 5 \times 10^{-8}$ mbarl/s的氦气泄漏率要求。光学性能测试则针对插入损耗、串扰等参数，使用专业光学检测仪器在1310/1550/1625nm波长下测量，保证信号传输的低损耗和稳定

性,各项测试共同保障 CFT 能在深海稳定可靠运行。

2. 测试数据分析与结论

对 CFT 本地化设计产品与 Siemens、TeledyneODI、TE Seacon 产品的测试数据进行对比。在工作温度上,本地化设计为 -10°C -50°C ,与部分国外产品接近。工作水深方面,本地化设计 ≥ 3000 米,国外产品 ≥ 4000 米。设计寿命本地化设计 ≥ 25 年,国外多为 ≥ 30 年。插入损耗、串扰等光学性能指标,本地化设计与国外产品相当,均能满足 $\leq 0.25\text{dB}$ (穿舱本体)、 $\leq 0.1\text{dB}$ (熔接接头)、 $\leq -60\text{dB}$ (串扰)的要求。整体来看,本地化设计产品性能有竞争力,但在部分指标上与国外仍有差距,如表 4-1。

表 4-1 国内外 CFT 技术参数对比

性能指标	本地化设计	Siemens	Teledyne ODI	TE Seacon
工作温度	-10°C -50°C	-4°C -50°C	-10°C -50°C	-5°C -40°C
工作水深	$\geq 3000\text{m}$	$\geq 4000\text{m}$	$\geq 4500\text{m}$	$\geq 4000\text{m}$
设计寿命	≥ 25 年	≥ 30 年	≥ 25 年	≥ 25 年
插入损耗—穿舱本体 @1310/1550/1625nm	$\leq 0.25\text{dB}$	$\leq 0.25\text{dB}$	$\leq 0.25\text{dB}$	$\leq 0.25\text{dB}$
插入损耗—熔接接头 @1310/1550/1625nm	$\leq 0.1\text{dB}$	$\leq 0.05\text{dB}$	$\leq 0.1\text{dB}$	$\leq 0.05\text{dB}$
串扰—每个光路 @1310/1550/1625nm	$\leq -60\text{dB}$	$\leq -60\text{dB}$	$\leq -60\text{dB}$	$\leq -60\text{dB}$
最大光纤芯数	32 芯	48 芯	8 芯	32 芯
壳体材料	S32750 超双相不锈钢	SSDS	Ti GR2/316L	Ti GR2/316L
密封材料	氟橡胶	丁腈橡胶	丁腈橡胶	丁腈橡胶 / 氟橡胶
抗拉强度	$\geq 2500\text{N}$	$\geq 2500\text{N}$	$\geq 2500\text{N}$	$\geq 2500\text{N}$

(二) CFT 在陵水 25-1 气田项目中的应用

1. 应用背景

陵水 25-1 气田位于南海北部琼东南盆地乐东凹陷东北部,距三亚约 132km,在陵水 17-2 半潜平台西南约 70km 处,水深 890-970m。该项目 CFT 原由贝克休斯采购自英国西门子公司,但因英方出口管制未获批,其于 2023 年 9 月 14 日申诉。即便获批,最早 2024 年 3 月 25 日才能发货,这使工期紧张且影响其他项目,给 2024 年 9 月 30 日投产带来风险,因此寻求 CFT 本地化解决方案势在必行,这也是本研发的最初的动力。

2. 应用效果分析

在实际应用过程中,CFT 展现出了良好的性能和可靠性。在耐压方面,成功经受住了气田所在海域约 900 米水深的耐压考验,未出现任何结构损坏或性能下降的情况。这得益于其优化的结构设计和高性能的材料选择,能够有效抵御海水的巨大压力。在密封性能上,氦气泄漏率始终保持在极低水平,确保了内部设

备的干燥和安全,防止了海水的侵入。先进的密封技术和工艺保证了 CFT 在复杂海洋环境下的密封性,为信号

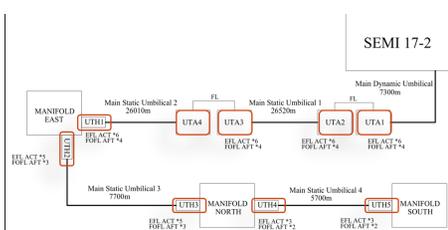


图 4-1 陵水 25-1 气田开发工程项目脐带缆 CFT 需求情况

传输提供了稳定的环境。在光学性能方面,稳定地实现了光信号的低损耗传输,保证了数据的准确和及时传输,满足了气田生产和监测的需求。

通过在陵水 25-1 气田项目中的实际应用,CFT 的性能和可靠性得到了充分验证。这不仅为该气田的开发和生产提供了有力支持,也为国产 CFT 在其他深海项目中的推广应用积累了宝贵经验。未来,随着技术的不断进步和完善,国产 CFT 有望在更多深海领域发挥重要作用,为我国的深海开发事业做出更大贡献。

五、结论与展望

在 3000 米级超深水脐带缆光连接器 (CFT) 的研究中,我国成功突破关键技术。研发出烘制法兰工艺及组合密封结构解决密封难题,创新光纤隔离密封方法实现低损穿舱,优化橡胶配方及粘结工艺提升密封性能。产品经测试符合标准,获 DNV 认证并应用于陵水 25-1 气田项目,打破国外技术垄断。

展望未来,CFT 技术将朝着更高性能、更深海应用发展,提升耐压、密封和光学性能。同时拓展应用领域,在深海能源开发、海底观测网建设和海洋国防等领域发挥更大作用。建议持续加大研发投入,加强产学研合作,培养专业人才,完善产业链,推动我国海洋工程技术迈向新高度。

参考文献

- [1]Kim Y K.Optical Waveguide Technology and Applications[M]. IntechOpen: 2024-09-11. DOI:10.5772/INTECHOPEN.114644.
- [2]Yang Z ,Shen J Yan C , et al. Failure analysis and numerical drive structure optimization design of Cr12Mo1V1 electrical connection die [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 160 108211-.
- [3]Sun G ,Shan B ,Kang J , et al. Flexural behavior of steel-UHPC composite beams with different connectors in negative moment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 216 108617-.
- [4]Liang L T ,Cheng X ,Yu M , et al. Design of efficient and compact adiabatic couplers based on adiabatic mode evolutions [J]. Optics and Laser Technology, 2024, 174 110659-.
- [5]Yamazaki K ,Nozaki K ,Matsuura Y , et al. Wiring connector-terminated cables based on manipulation planning with collision-free EMD net [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 175 104673-.