

文章编号 1004-924X(2023)03-0313-09

水下湿插拔接触式光纤耦合设计与性能分析

谈 琪^{1,2}, 孟浩然^{1*}, 殷建平^{3*}, 杨 鹏¹, 郝寅雷⁴, 赵纯玉⁵

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

4. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027;

5. 吉林江机特种工业有限公司, 吉林 长春 132021)

摘要:水下连接器是水下观测网的关键零部件,采用油液密封方式实现低损耗连接,但该方式会导致光连接结构复杂、工程研制难度大。为解决此问题,对比陆基光纤网络的连接方式,提出接触式光纤连接器水下原位湿插拔的方案。基于水体吸收特性、朗伯-比尔定律以及液体的表面张力等理论进行原理分析,在光纤端面形成厚度在 5 μm 以内的水膜且该厚度水膜对 1 310, 1 550 nm 波段的吸收损耗可忽略不计;然后,以 1 550 nm 波段为例,对光纤在空气、水、硅油的耦合损耗情况进行实验分析,并利用设计的光插针结构进行性能验证。实验数据显示,光纤水下原位湿插拔的平均损耗为 0.17 dB,光插针的原位湿插拔平均损耗为 0.23 dB。由此表明,接触式光纤耦合设计能够满足水下湿插拔的低损耗连接要求。本文为水下光纤湿插拔连接器领域提供了新思路,提出在确保水体清洁的情况下可直接进行水下原位湿插拔的设计方案,有望打破国外以油液密封方式建立的技术垄断。

关 键 词:水下连接器;湿插拔;水体吸收特性;光纤耦合;性能分析

中图分类号: TN929.11; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233103.0313

Design and performance analysis of contact fiber-coupled of underwater wet-mateable connector

TAN Qi^{1,2}, MENG Haoran^{1*}, YIN Jianping^{3*}, YANG Peng¹, HAO Yinlei⁴, ZHAO Chunyu⁵

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

4. College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

5. Jilin Jiangji Special Industries Co. Ltd, Changchun 132021, China)

* Corresponding author, E-mail: ranokok@gmail.com; yjp@scsio.ac.cn

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-02-01.

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目 (No. YJKYYQ20190053); 中科院重点部署项目 (No. E0105YZQ1, No. E11572BZQ0)

Abstract: Underwater connector is an important part of the seafloor observation. Currently, the oil-filled sealing structure is complicated and it's hard to design in project. To solve this problem, contrast the connection mode of the land-based fiber network, we presented a novel design for the contact fiber-coupled based on underwater wet-mateable the fiber connector. First, based on the analysis of Beer-Lambert law, water absorption properties and surface tension of liquid theory, we identified the ability to form the water film thickness within $5\text{ }\mu\text{m}$ at the optical fiber end faces. This thin layer water exhibit negligible absorption of the 1 310/1 550 nm because of the absorption loss can be kept within the predefined target range. The study was conducted that the loss analyses is summarized by using optic fiber in air, water, and oil based on 1 550 nm. Finally, we designed the novel optical structure based on this idea and analyzed their transmission performance. The results showed that the summary of the transmission loss is 0.17 dB and the loss measurement in the new fiber connector is 0.23 dB. The findings show that the design of the contact fiber-coupled of underwater wet-mateable is meeting the low loss requirements. Therefor, we can directly implement in-situ wet-mate interconnects in the water rather than the silicone oil based on the surface cleaning. This paper provides a new design for the optical lines in underwater wet-mate connector. This idea is expected to break the Intellectual property that built upon the work of the sealing technique of the oil-filled.

Key words: underwater connector; wet-mateable; water absorption properties; fiber-coupling; performance analysis

1 引言

近年来,随着陆地资源开发的日益饱和,各国的目光逐渐转向海洋领域。对于探索和研究海洋的水下技术装备而言,整体式布放的难度高、成本大,所以水下连接器作为水下观测网^[1-2]、海洋资源开发^[3]以及深海科研平台^[4]等大型海洋工程^[5]的“关节”,成为不可替代的关键零部件^[6]。

在第二次世界大战之前,水下系统的连接还不需要专用的水下连接器,直到 20 世纪 50 年代,在军事和海上石油勘探等技术的推动下,陆地干插拔的电连接器成功运用于水下系统的连接单元。20 世纪 60 年代油液平衡结构被提出^[7],在原有基础上研制出可靠性高、深海可插拔的充油式电连接器,通过填充绝缘油确保插拔过程中海水的绝对隔绝。随着湿插拔连接器技术的蓬勃发展,为满足传输带宽、效率以及安全性等方面不断提高的需求,在 20 世纪 80 年代人们利用光纤技术研制出湿插拔光纤连接器。20 世纪 90 年代,ODI,SEACON 等公司结合光电技术开发出光电混合湿插拔连接器^[8]。目前,水下连接器主要以 Rolling-Seal,Hydralight 和 I-CONN 等高性能产品为主,国外公司不仅占据了 90% 以上的国际市场,而且在该领域建立了完善的知识产权体

系。由于湿插拔连接器研制涉及多学科交叉,难度大、成本高,再加上国内研发起步晚,时间短,中航光电、中科院沈阳自动化研究所、中天科技^[9]等单位的产品性能与国外仍存在较大差距^[10-11]。差距主要体现在湿插拔连接器的结构设计和密封方式等方面^[12],但核心理念都是将连接单元用填充油包裹,使触点在湿插拔过程中与外界环境隔绝(油液密封),从而实现水下湿插拔的高性能连接。现阶段油液密封大多采用硅油进行填充。硅油填充不仅能够在水导体环境中保证电传输的绝缘稳定,而且具有优良介质波导特性。光传输中水体对 1 300~1 600 nm 波段的光吸收系数极高,为了降低损耗,利用其高折射率、高透过率实现低损耗连接。但从实际情况出发,水下设备结构空间非常有限,额外填充硅油的光连接方式增加了机械结构的复杂性和设备的研制难度。

通过分析水下观测网通常使用的单模光纤,要想实现单模光纤之间的低损耗连接,其端面间隙必须控制在 μm 量级。由水体的光吸收曲线发现,其吸收系数是基于 m 级厚度测定,经朗伯-比尔定律分析,光对于水膜厚度在 μm 级的吸收是 m 级的 10^{-6} 倍;由水的表面张力理论分析可得,在光纤端面能够以较小的插拔力形成厚度在 μm 量级的水层且无需考虑水膜表面层作用力的

影响。

考虑到陆基光纤通信均在空气中实现光纤网络的构建,在空气中即可实现低损耗连接,而水体作为水下连接器的插拔环境,其折射率较空气更大,能够减少因菲涅尔反射造成的损耗。因此,在确保连接腔内水清洁的情况下,光连接用于水下观测网,有望将水直接作为填充介质实现低损耗连接,从而不必使用硅油。本文提出一种接触式光纤原位湿插拔方案,将水代替硅油直接作为连接介质。首先从朗伯-比尔定律、水的表面张力等方面进行理论分析,然后利用空气、水、硅油这3种传输介质进行原位湿插拔测量验证,测量结果与理论相符,最后使用设计的光插针进行原位湿插拔性能测试,测试数据满足水下湿插拔的低损耗要求,为水下连接器的研制提供一个新方法。

2 原理

2.1 接触式光纤耦合效率模型

水下光纤连接器主要分为接触式耦合和扩展光束耦合两种实现方式^[13]。其中,扩展光束耦合^[14]指的是通过透镜将光纤输出光进行扩束然后重新聚焦到接收光纤的方法,如图1所示。虽然扩束型耦合能够保护光纤端面因频繁插拔造成的端面污染,但透镜像差^[15]导致其功率损耗高于接触式耦合,因此目前主要采用接触式光纤连接器。

影响单模光纤之间接触式连接耦合效率的首要问题是光纤之间因横向错位 x_0 、轴向错位 z 、

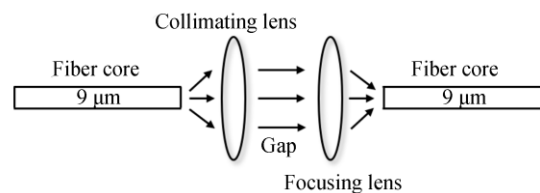


图1 扩展光束型光纤连接器原理

Fig. 1 Schematic diagram of beam-expanded optical fiber connector

角向错位 θ 等因素造成的耦合损耗。整体耦合损耗可表示为^[16]:

$$\eta = \exp \left(-\kappa \left\{ \frac{x_0^2}{2} \left(\frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_0^2} \right) + \pi \theta^2 \left[\frac{(\omega_1^2(z) + \omega_0^2)}{2\lambda^2} \right] - \frac{x_0 \theta}{\omega_1} \right\} \right), \quad (1)$$

其中:

$$\kappa = \frac{4\omega_1^2\omega_0^2}{(\omega_1^2 + \omega_0^2) + \frac{\lambda^2 z^2}{n\pi^2}}, \quad (2)$$

$$\omega_1^2(z) = \omega_1^2 \left(1 + \frac{\lambda z}{n\pi^2 \omega_1^2} \right), \quad (3)$$

式中: ω_0, ω_1 分别为传输光纤和接收光纤的模场半径, λ 代表传输波长。

2.2 介质在不考虑吸收情况的耦合损耗

利用2.1节的光纤耦合效率模型,以 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $2\omega_0 = 2\omega_1 = 10 \mu\text{m}$ 为例,在不考虑介质吸收的情况下,对空气($n=1$)、水($n=1.33$)和硅油($n=1.4$)3种介质进行横向、轴向及角向的单一对准误差分析,即考虑一种误差时,其余两种误差为零。分析结果如图2所示,由图2(a)可

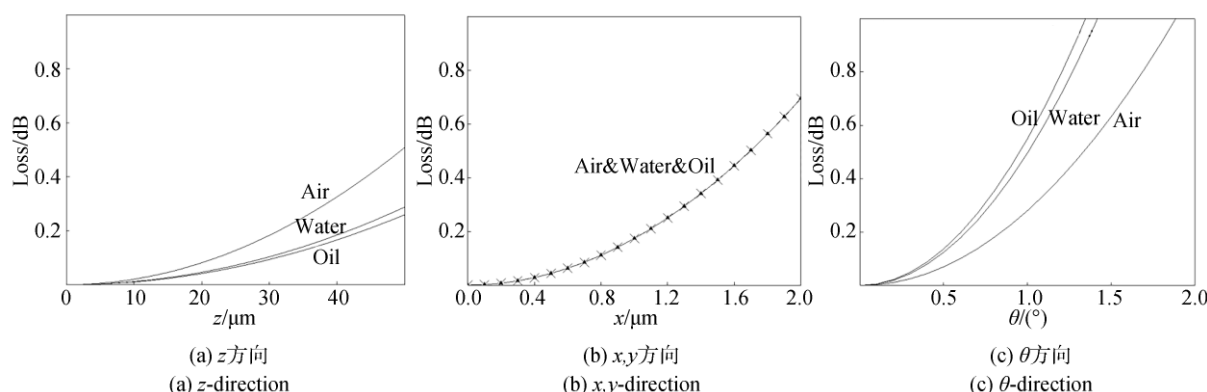


图2 不同方向对准误差损耗曲线

Fig. 2 Loss curves caused by alignment errors in different directions

知,相同错位误差下,水和硅油介质的损耗低于空气。相比以空气为介质的连接形式,水和硅油折射率更高,增大了光纤的数值孔径,提升了光纤捕捉光线的能力。故在不考虑吸收的情况下,3种介质的耦合效率关系为: $\eta_{\text{硅油}} > \eta_{\text{水}} > \eta_{\text{空气}}$ 。因此,直接用水作为传输介质的效率高于空气,且水介质与硅油的折射率相近,在不考虑其他因素的情况下,耦合效率差异较小。

图 2(b)和图 2(c)结合高斯光束能量分布特点进行分析,当错位误差较小时,损耗相对平缓;当错位误差超过某个范围时,其损耗程度迅速增大,横向和角向错位的损耗影响较轴向错位更大,因此在实际加工时应当优先控制横向和角向错位带来的误差。目前,ODI,SEACON 等公司的产品中光连接以插入损耗 $<0.5 \text{ dB}$ ^[17]作为评价标准,角向误差需控制在 0.5° 以内,横向错位误差需控制在 $0.8 \mu\text{m}$ 以内,径向误差需控制在 $20 \mu\text{m}$ 以内。

由于光连接器在水下对接过程中十分受限,很难完成 μm 量级精度的对准,故在设计连接结构的时候需要多级定位结构来辅助对准。虽然轴向误差容限相对较大,但两端面之间会形成一层异于纤芯介质折射率的间隙,所以在满足对准

条件下,需进一步考虑介质本身对耦合效率的影响。

2.3 接触式光纤耦合介质对光束传输的影响

2.3.1 水下湿插拔介质对光传输的吸收影响

由于加工误差的存在,两端面间会形成一层异于纤芯介质折射率的间隙。要想实现水下原位低损耗传输,除了间隙厚度需控制在 μm 量级,还需额外考虑水体对光传输的吸收影响^[18]。由水体的吸收光谱曲线可知^[19],水体对于 1310 nm 和 1550 nm 波段的吸收系数极大,想要实现水下湿插拔的低损耗传输,必须考虑水体的吸收特性。由朗伯-比尔定律可知,水体的吸收率与水体吸收系数和水体厚度有关,表达式如下:

$$I = I_0 e^{-\alpha L}, \quad (4)$$

式中: I_0 表示入射光强, L 表示光束垂直通过介质层的厚度, α 为介质对传输波长的吸收系数,吸收系数与水体环境和传输波段均有关。湿插拔光连接器工作的深海环境,其水体主要由无机盐和部分沉积物颗粒组成。其中,颗粒物极易引起耦合端面损伤,进而影响光连接器的传输效率和使用寿命,故必须通过密封和端面清洁等辅助结构过滤颗粒物,以减少对光纤耦合传输的影响。水和无机盐对光的吸收情况^[20]由表 1 所示。

表 1 海水中主要盐类对光的吸收特性

Tab. 1 Light absorption characteristics of major salts in seawater

Method	Wavelength/nm			Component	
	1 500~9 000	9 400	10 200	Water	All salts
Absorption percent/%	~0	1.9	2.9	~97	~3

由表 1 可知,海水中主要盐类在短波区域的吸收特性的活跃度较低,而且矿物盐及其离子形成的吸收带远低于水本身的吸收带强度,整体吸收也仅占总吸收的 3%,因此,在短波红外区域其盐度对光本身的传输影响可以忽略不计。对现有数据进行对比^[19,21],在该区域纯海水的光衰减与纯水的极为相似,对比结果如图 3 所示。

由图 3 和式(4)可知,不同水体对不同波段的光的吸收程度不一样^[22-23],且随着透射厚度的增加其差异性也愈加明显。以 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 在纯水($\alpha=1113.1924 \text{ m}^{-1}$)中传输为例,经计算 $20 \mu\text{m}$ 厚度时额外吸收损耗大约为 0.2 dB ,对总体损耗

影响偏大,因此需进一步减弱水体吸收的影响。若能将水层厚度控制在 $5 \mu\text{m}$ 以内,则吸收率可以控制在 1% 以内,可近似认为水体的吸收忽略不计。

虽然光纤长时间与水体接触会产生“氢损”效应^[24],但随着光纤技术的不断发展,可利用纯硅芯等特种光纤来降低水体带来的氢气损耗。目前,以美国康宁、日本住友电气为首的制造商均已实现深海低氢损纯硅芯光纤产品的商业化^[25]。

2.3.2 光纤端面间厚度的表面张力

因水的表面张力比较大,要想在端面形成厚

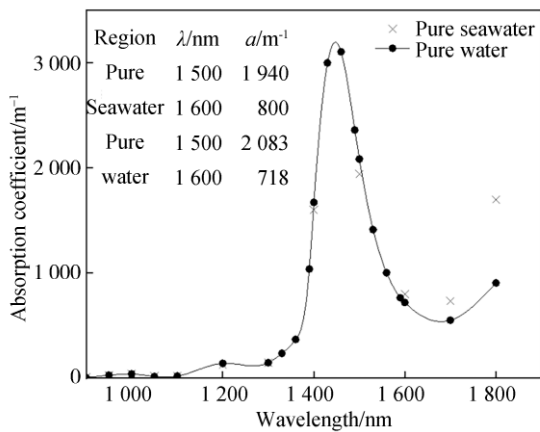


图3 纯水和纯海水的光吸收系数曲线

Fig. 3 Light absorption coefficients of pure water and seawater

度在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内的水层(多余的水会从套管排出),就必须考虑在插拔过程中克服张力所需的外界插拔力。由于水的分子层厚度在 $10^{-9}\sim 10^{-10}\text{ m}$,故形成厚度在 μm 量级的水层时可忽略分子间作用力带来的额外影响。由拉普拉斯公式:

$$p_{\text{ad}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \approx \frac{2\sigma}{R}. \quad (5)$$

以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 厚度为例,经计算形成厚度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的水层需克服附加的压强约为 $2.88 \times 10^4\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (水的表面张力系数取 $\sigma=0.072\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$),单模光纤的端面直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,所需外界力约为 $3.54 \times 10^{-4}\text{ N}$ 。由于光纤端面接触面积较小、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的厚度不涉及分子间作用力,在插拔过程中能形成厚度在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内的水层,故利用弹簧施加一个合适的预紧力,既可以避免光纤端面发生弹光效应,又可以使接触式耦合达到理论上的紧密贴合^[26]。

综上所述,通过水体吸收特性、朗伯-比尔定律以及表面张力等理论分析,结果显示在端面能形成厚度在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内的水层,该厚度水体的吸收损耗在 1% 以内,结合特种光纤制造、连接器密封和端面清洁等其他技术,水体给光纤带来的额外损耗可以控制在一个较低的范围内。因此,水体能直接作为填充介质实现原位湿插拔,而不必额外填充硅油。

3 实验与结果

3.1 实验装置与方案

为验证上述理论分析结果,实验分别选择空气、水和硅油进行光纤原位湿插拔的传输损耗测量。根据实验原理搭建的测量系统如图4所示。其中,输入为 $1\text{ }550\text{ nm}$ 光纤光源(型号:JW3109),光纤采用电信级 FC-PC 单模光纤,即光纤端面仅经过出厂研磨,无镀膜、拉锥、加透镜等其他特殊处理;连接器是 FC-FC 光纤连接器,连接器设有套管可将多余填充液排出,接收端是高精度光功率计(型号:PM100A)。

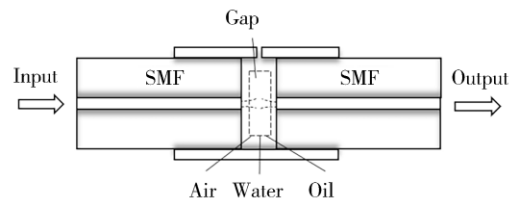


图4 接触式光纤耦合测量装置原理

Fig. 4 Schematic of measurement setup for contact fiber-coupled measurement

经检测,光源输出功率的平均值 $\bar{P}_i=303\text{ }\mu\text{W}$ 。在恒功率条件下分别在空气、水、硅油(PMX-200)中原位插拔 20 次。

3.2 实验结果与分析

利用测量的实验数据计算光纤原位湿插拔的相对损耗,得到:

$$y_{(\text{dB})} = 10 \times \lg \left(\frac{\bar{p}_i}{p_{\text{out}}} \right), \quad (6)$$

其中 p_{out} 为功率计测量值。所有数据经过变换,结果如图5所示。图5为3组20次测量结果的平均值,然后通过平均值和对应的标准差(Standard Deviation, SD)来评估测量结果。相关参数如表2所示。

经计算,测量数据整体服从正态分布。由表2可知,由于光纤盘绕方式以及人为操作等因素会造成测量数据产生一定程度的波动,但数据整体服从 $\bar{p}_{\text{out}}(\text{air}) < \bar{p}_{\text{out}}(\text{water}) < \bar{p}_{\text{out}}(\text{oil})$,水体的功率损耗介于空气与硅油之间,相对平均损耗为 0.17 dB ,测试结果符合第2节结论,证明水体能直接作为填充介质实现原位湿插拔,不必额外填充硅油。

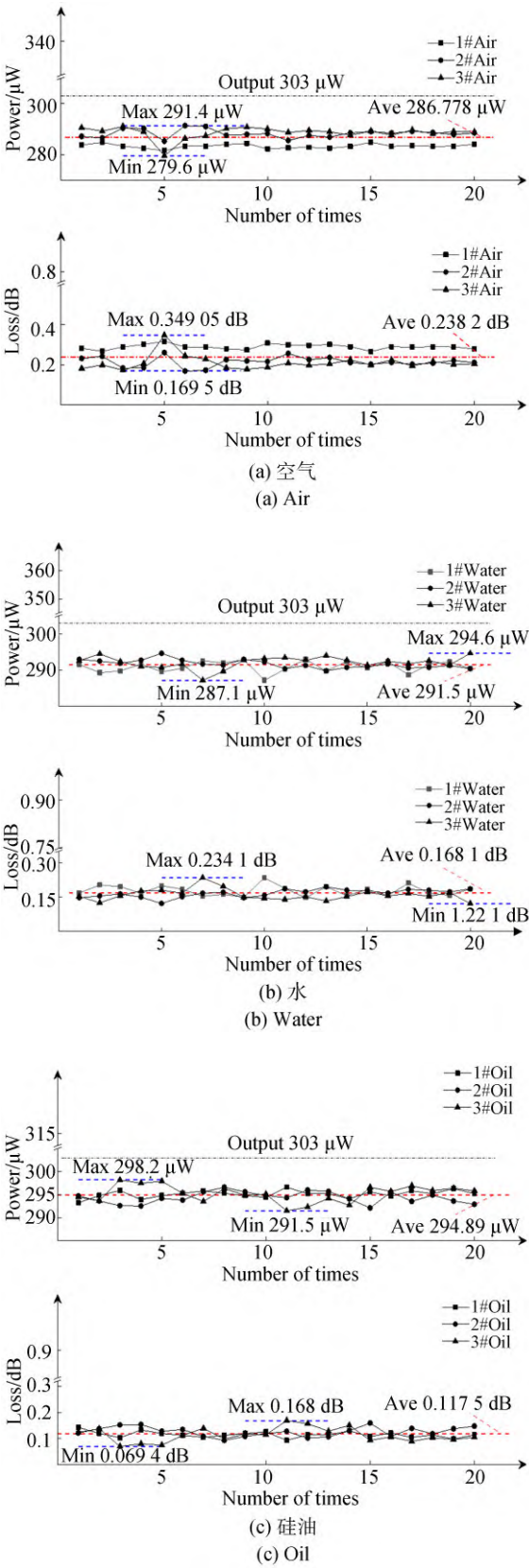


图 5 不同介质下的功率损耗
Fig. 5 Power loss in different media

表 2 不同介质下光纤测量数据

Tab. 2 Measured data in different media using different fibers

Number	Medium	Average/ μW	SD
Fiber 1#	Air	283.385	0.828 6
	Water	290.835	1.573 6
	Oil	295.105	0.815 9
Fiber 2#	Air	288.330	1.645 4
	Water	291.605	1.177 6
	Oil	295.105	0.815 9
Fiber 3#	Air	288.620	2.438 2
	Water	292.060	1.703 1
	Oil	295.240	1.857 4

3.3 光插针设计与测试

深水原位湿插拔方案虽然合理可行,但考虑到本方案在深海应用的实用性和可靠性,仍需解决光纤氢损效应和泥沙颗粒物给本方案带来的影响。虽然氢损效应可以采用光纤去掺杂、氦处理等现有手段进行优化,但泥沙颗粒物则必须去除,以确保腔内水体的清洁。因此,原位光耦合的结构大致可分为密封结构、端面清洁结构和低损耗对准结构。密封结构如图 6 所示,连接器未连接时,其外壳上固定的刚体孔与移动滑块上光插针通道孔错位,实现分离时的独立密封。当插入对接时,通过制动杆的斜面设计推动滑块向上移动,配合弹簧将刚体孔与滑块孔组成传输通道。该结构能够实现插拔过程中动态密封,给光连接单元提供一个清洁、稳定的对接环境。

虽然密封结构能提供一个清洁的耦合环境,但实际应用中仍存在少数颗粒物进入结构内部。

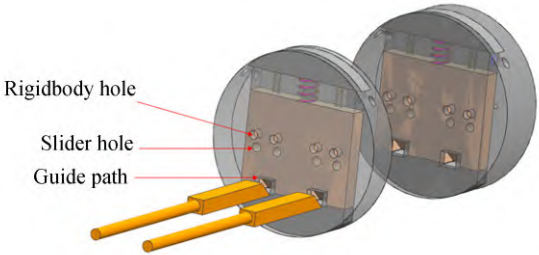


图 6 密封结构
Fig. 6 Seal structure

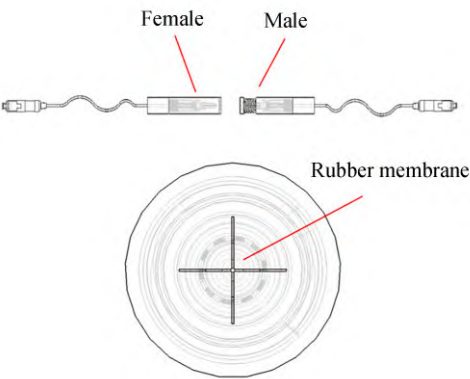


图 7 端面清洁结构
Fig. 7 Structure of face clean

如图 7 所示,在公头和母头插针前端设有十字开口的氟橡胶膜,并在开口处设有向中心的挤压力。在插拔过程中公头橡胶膜和母头橡胶膜接触并挤压,通过橡胶的柔性挤压防止剩余颗粒物对耦合端面的污染。

因此在确保水清洁的情况下,最重要的就是光插针的低损耗对准结构。插针主体结构如图 8 所示,光插针主体由公头插针和母头插针组成。研磨后的跳线端面与陶瓷插芯尾部凹槽组合成光纤,分别将其黏合在两头钢座内;公头插针外部和母头插座内部成倒角设计,使水下湿插拔时公头插针进入母头插座时插入角更大,公头和母头外壳形成一级对准。然后,公头和母头在陶瓷套管里紧密结合实现二级对准。插拔过程中,弹簧压缩产生弹力使陶瓷插芯紧密贴合,进而实现内部光纤的低损耗对接。

最后,对设计的光插针进行性能测试,测试数据如图 9 所示。

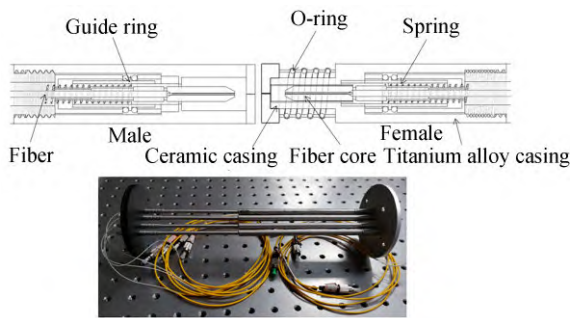


图 8 光插针的原理与实物
Fig. 8 Schematic diagram and physical picture of optical channel

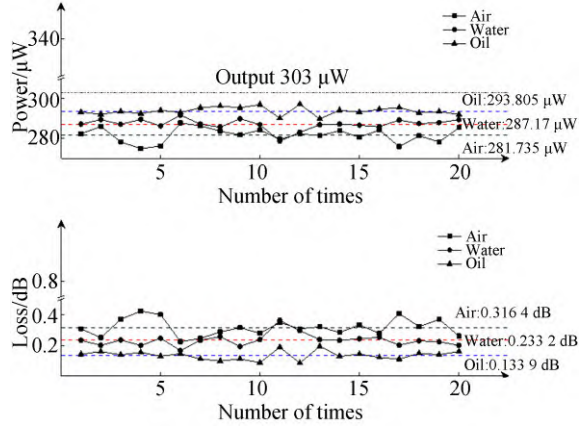


图 9 不同介质下光插针的功率损耗
Fig. 9 Power loss of optical channel in different media

测试数据与图 5 的实验结论相符。测量数据如表 3 所示。

表 3 不同介质下光插针测量数据		
Tab. 3 Measured data in different media by using optical channel		
Medium	Average/ μW	SD
Air	281.735	3.645 8
Water	287.540	3.605 6
Oil	293.805	1.994 5

如图 9 和表 3 所示,将光插针的测试数据与 3.2 节实验结果进行对比,发现光插针测试数据在误差范围内的离散程度较大,在缺少其他部件固定的条件下,插拔姿势、插拔力等人为因素会引起对准误差以及介质间隙厚度的细微变化。

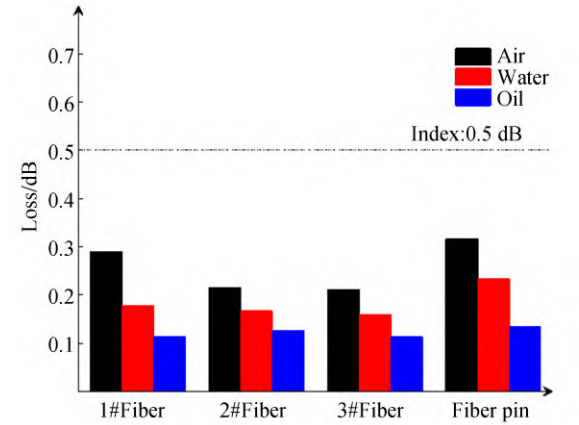


图 10 不同介质下各组平均功率损耗
Fig. 10 Power loss of each group under different media

通过图 10 的平均损耗对比图分析,其整体数据趋势与第 2 节理论分析相符,测量数据满足小于 0.5 dB 的评价指标。

综上所述,水可以直接作为填充介质,在确保插针腔内水体清洁的情况下实现水下原位湿插拔,无需额外填充硅油。

4 结 论

本文通过朗伯-比尔定律、水的表面张力、传输损耗以及光纤氢损效应等理论分析,在光纤端面形成了厚度在 5 μm 以内的水层,经计算该厚

度水体的额外吸收影响在 1% 以内,带来的额外总损耗可保持在容差范围内,由此提出在确保水体清洁的情况下将光连接进行水下原位湿插拔的设计方案。实验数据表明,光纤原位湿插拔耦合损耗在 0.17 dB,光插针原位湿插拔耦合损耗为 0.23 dB,与理论分析和实验结果相吻合。

该方案有望打破国外油液密封方式的技术垄断,针对结构设计高效、紧凑的水下设备,以可接受的传输损耗换取研制难度的降低,为水下连接器的设计提供了新思路。未来,需进一步验证实际工作中的“氢损”程度以及复杂水体环境下清洁能力等问题。

参考文献:

- [1] 李德威,丁忠军,景春雷,等. 国际海底观测网络的发展及现状[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(11): 13-18.
LI D W, DING ZH J, JING CH L, *et al.* Present status and development of international seafloor observatory network [J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(11): 13-18. (in Chinese)
- [2] 李风华,路艳国,王海斌,等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321-330.
LI F H, LU Y G, WANG H B, *et al.* Research progress and development trend of seafloor observation network [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 321-330. (in Chinese)
- [3] 张康,洪毅,段梦兰,等. 深水水下连接器国产化设计关键技术[J]. 石油科学通报, 2017, 2(1): 123-132.
ZHANG K, HONG Y, DUAN M L, *et al.* Key design technologies for developing China's own sub-sea connectors [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(1): 123-132. (in Chinese)
- [4] LAMARE P, VERNIN P. Underwater mateable electro-optical connectors: the feedback from ANTARES [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 602(1): 252-254.
- [5] BAGGEROER A B, HOWE B M, MIKHALEVSKY P N, *et al.* Ocean observatories: An engineering challenge [J]. *The Bridge*, 2018, 48(3): 17-34.
- [6] FISCHER P, BRIX H, BASCHEK B, *et al.* Operating cabled underwater observatories in rough shelf-sea environments: a technological challenge [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 551.
- [7] HAN Q, CHEN H Y, YANG W C, *et al.* Analysis of reciprocating O-ring seal in the pressure-balanced oil-filled wet-mate electrical connectors for underwater applications [J]. *Lubrication Science*, 2019, 31(7): 335-345.
- [8] CAIRNS J. Hybrid wet-mate connectors: 'writing the next chapter' [J]. *Sea Technology*, 1997, 38: 17-22.
- [9] 《科技日报》. 国产 2000 m 级水下插拔电连接器问世 [J]. 机械制造, 2020, 58(1): 8.
《Science and Technology Daily》. Domestic 2000 m underwater plug-in electrical connector comes out [J]. *Machinery*, 2020, 58(1): 8. (in Chinese)
- [10] 杨文聪. 深海湿插拔连接器的关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
YANG W C. *Research on the Key Technologies of Deep-sea Wet-mateable Connector* [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [11] 陈海洋. 深海插拔电连接器的设计与制造 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
CHEN H Y. *Design and Manufacture of Underwater Mateable Electrical Connector* [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [12] SONG W T, CUI W C. An overview of underwater connectors [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 813.
- [13] SIMONINI E, DOUTHIT J. Expanded beam & physical contact fiber optic connectors [J]. *White*

- Paper, Amphenol Fiber, S.
- [14] 董雪岩,李平雪,章曦,等. 基于ZEMAX的扩束型光纤连接器对准误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 176-185.
DONG X Y, LI P X, ZHANG X, *et al.* Analysis of alignment errors of beam-expanded optical fiber connector based on ZEMAX[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 176-185. (in Chinese)
- [15] 郝寅雷,金龙文,赵文兴. 低色差GRIN棒透镜的设计原则[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 324-328.
HAO Y L, JIN L W, ZHAO W X. Designing principles for a low chromatic aberration GRIN rod lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 324-328. (in Chinese)
- [16] FISCHER-HIRCHERT U H. *Photonic Packaging Sourcebook*[M]. Springer, 2015.
- [17] BROWN G. Development, testing and track record of fiber-optic, wet-mate, connectors [C]. 2003 *International Conference Physics and Control. Proceedings (Cat. No. 03EX708)*. June 25-27, 2003, Tokyo, Japan. IEEE, 2003: 83-88.
- [18] 汪舰,魏建平,杨波,等. 高透明液体透射率的测定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 624-630.
WANG J, WEI J P, YANG B, *et al.* Measurement of transmittance for highly transparent liquid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 624-630. (in Chinese)
- [19] 邓孺孺,何颖清,秦雁,等. 近红外波段(900~2500 nm)水吸收系数测量[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 192-206.
DENG R R, HE Y Q, QIN Y, *et al.* Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900-2500 nm) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 192-206. (in Chinese)
- [20] WOZNIAK B, DERA J. *Light Absorption by Suspended Particulate Matter (SPM) in Sea Water* [M]. Light Absorption in Sea Water. New York, NY: Springer New York, 2007: 167-294.
- [21] 韩雪云. 海水中不同盐分对水下光传输影响的研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2016.
HAN X Y. *Research on the Effect of Different Sea Salts on the Underwater Optical Transmission* [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2016. (in Chinese)
- [22] 穆壮壮,赵强,李晋,等. 海水吸光度测量系统的搭建及误差来源分析[J]. 光学精密工程, 2021, 29(8): 1751-1758.
MU ZH ZH, ZHAO Q, LI J, *et al.* Construction and error source analysis of seawater absorbance measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1751-1758. (in Chinese)
- [23] 赵鲁梅,何仲,黄槐仁,等. 海水折射率与温度、盐度关系的实验研究[J]. 中国现代教育装备, 2019(17): 49-51.
ZHAO L M, HE ZH, HUANG H R, *et al.* Relationship between the refractive index of seawater and salinity, temperature [J]. *China Modern Educational Equipment*, 2019(17): 49-51. (in Chinese)
- [24] MASLO A, HODZIC M, SKALJO E, *et al.* Aging and degradation of optical fiber parameters in a 16-year-long period of usage [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2020, 39(1): 39-52.
- [25] KANAMORI H. Fifty year history of optical fibers [J]. *Sei Technical Review*, 2020 (91): 15.
- [26] GONG Z F, CHEN K, WANG W, *et al.* A pressure-sensitive fiber optic connector for loss analysis of physical contact [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 134-138.

作者简介:



谈 琪(1995—),男,湖北孝感人,硕士研究生,2019年于湖北文理学院获得学士学位,主要从事光纤耦合方面的研究。E-mail: tanqi9504@163.com

通讯作者:



孟浩然(1980—),男,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,2002年于吉林大学获得学士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事海洋光学探测、激光应用、光学显微成像等领域的研究。E-mail: ranokok@gmail.com