

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250088.

专题:海洋通信与传感网络

陈学永,夏仁善,孙晓军,等.水下湿插拔光电混装连接器关键技术分析[J].光通信研究,2025(4):250088.

Chen X Y, Xia R S, Sun X J, et al. Key Technology Analysis of Underwater Wet-mate Photoelectric Hybrid Connectors [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250088.

水下湿插拔光电混装连接器关键技术分析(特邀)

陈学永,夏仁善,孙晓军,宗晓明,曹育良

(中航光电科技股份有限公司,河南 洛阳 471000)

摘要:【目的】在构建大型海底工程水下互联项目时,水下湿插拔光电混装连接器是其核心器件,为了打破国外技术和产品垄断,实现自主可控,文章对其关键技术进行了分析并进行了产品研制。【方法】文章采用等压平衡、旋转密封、充油缆密封连接、多级引导精准对接与到位识别、非接触式光接触件和光纤调芯等关键技术,研制出了水下湿插拔光电混装连接器,并对其进行了高压水下插拔试验、充油缆的振荡飞线和飞线拉力试验以及最大偏移插拔试验。同时,对水下湿插拔连接器的关键静、动密封问题以及动态插拔过程中的接触压力进行了仿真分析。【结果】高压水下插拔试验结果表明,静水压力为45 MPa时,水下湿插拔连接器的插头和插座在插拔100次后,连接器的插入损耗(0.5 dB)及绝缘电阻(≥ 50 G Ω)均合格;充油缆锥面密封结构抗拉能力及端接可靠性均能满足要求。仿真分析结果表明,水下湿插拔连接器在动态插拔过程中滚轴的接触压力始终大于水压,能始终保持动密封,不发生泄漏。对于静密封结构,当水压为70 MPa时,不会造成海水泄漏进设备内部,但随着间隙的增大,O形圈变形、所受应力及其与壁面的接触压力均呈增大趋势,对于动密封结构,插针运动速度越快,海水压力越大,其泄漏量也越大,试验验证结果与仿真情况具有较好的一致性。【结论】文章所得结果可为水下湿插拔光电混装连接器的设计提供理论指导。

关键词:水下;光电混装;连接器;密封

中图分类号:TP303 **文献标志码:**A

Key Technology Analysis of Underwater Wet-mate Photoelectric Hybrid Connectors

CHEN Xueyong, XIA Renshan, SUN Xiaojun, ZONG Xiaoming, CAO Yuliang

(Avic Jonhon Optronics Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: 【Objective】 In the construction of large-scale underwater interconnection projects for submarine engineering, the underwater wet-mateable hybrid optoelectronic connector is a key component. To break the monopoly of foreign technologies and products and achieve self-reliance and controllability, the paper analyzes its key technologies and develops the product. 【Methods】 The paper employs key technologies such as isobaric balance, rotary sealing, oil-filled cable sealing connection, multi-stage guided precise docking and position recognition, non-contact optical contacts, and fiber core adjustment to develop an underwater wet-mateable hybrid optoelectronic connector. The connector is subjected to high-pressure underwater mating and unmating tests, oscillation and tension tests of oil-filled cables, and maximum offset mating and unmating tests. Additionally, the paper conducts simulation analyses on the critical static and dynamic sealing issues of the underwater wet-mateable connector, as well as the contact pressure during dynamic mating and unmating processes. 【Results】 The test results show that the insertion loss (0.5 dB) and insulation resistance (≥ 50 G Ω) of the connector are qualified after 100 times of plugging and unplugging under the pressure of 45 MPa. Tensile capacity and end connection reliability of oil-filled cable cone sealing structure meet the requirements. The simulation analysis results indicate that during the dynamic mating and unmating process of the underwater wet-mateable connector, the contact pressure of the rolling shaft is always greater than the water pressure, ensuring dynamic sealing and preventing leakage. For static sealing structures, when the water pressure is 70 MPa, there will be no seawater leakage into the equipment interior. However, as the gap increases, the deformation, stress, and contact pressure of the O-ring with the wall surface all show an increasing trend. For dynamic sealing structures, the faster the pin movement speed, the greater the seawater pressure, and the greater the leakage amount. 【Conclusion】 The obtained results in the paper can provide theoretical guidance for the design of underwater wet plug-in optoelectronic hybrid connectors.

Key words: underwater; optoelectronic hybrid; connector; sealing

0 引言

“蛟龙号”、“思源号”和“奋斗者号”等多艘全海深潜器在国家海洋战略的牵引下实现了万米突破,

大型无人潜航器和观测系统等重大装备也取得了重大突破,这些突破都迫切的需要国产关键器件,如水下插拔连接器^[1-3]。

在海底工程领域,海洋设施的水下组建成为首

收稿日期:2025-03-12; 修回日期:2025-04-14; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:发改委电子信息产业技术改造工程资助项目

作者简介:陈学永(1970-),男,河南洛阳人。研究员,博士,主要研究方向为连接器技术。

通信作者:宗晓明,高级工程师。E-mail:zongxiaoming100@163.com

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

要挑战,单靠整体布放的方式放于海面显然是无法实现的,必将采用分阶段、分块的方式^[4],并通过潜水员或遥控无人遥控潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)操作水下插拔连接器在水下完成系统连接。因此,海底观测网、水下试验场、水下补给系统、水下生产系统和水下采油树等海洋开发项目均需使用水下插拔连接器为系统互连及高效维护提供支持。目前常用的水下插拔连接器包括水下插拔电连接器、水下插拔光连接器以及水下湿插拔光电混合连接器^[5-7]。

水下湿插拔光电混合连接器无论是连接器插合、分离还是插拔过程均需要保证密封,此外光接触件对脏污非常敏感,插针和插孔均需在密封腔内,这大大增加了产品的复杂程度和技术难度^[8],目前只有 GISMA、Siemens 和 Teledyne ODI 等为数不多的国外厂家能够提供稳定可靠的连接器。正在建设中的海底观测网系统中采用的连接器几乎都来自美国 Teledyne OD 公司,而我国在水下光电复合插拔连接器的研发方面起步相对较晚,中电二十三所、中科院西光所和中航光电等单位均有研制,其中,中科院西光所水下湿插拔光电混装连接器进行了南海海试,但其实用性和工程施工操作性与国外产品相比还存在一定差距,尚未达到国际同行水平^[9]。为了满足国内水下湿插拔连接器的国产化需求,打破国外垄断,实现自主可控,为我国新一代武器装备研制和海洋工程项目提供配套支持,对水下光电复合插拔连接器的相关技术进行研究具有重要的意义。

本文对建立大型海底工程项目水下互联的核心器件水下湿插拔光电混装连接器的关键技术进行了介绍和分析,着重介绍与分析了等压平衡、旋转密封、多级引导精准对接与到位识别、非接触式光接触件和光纤调芯等技术。对水下湿插拔连接器的关键静、动密封技术进行了仿真分析,并开展了试验验证,为水下湿插拔连接器技术的发展提供了理论支持。

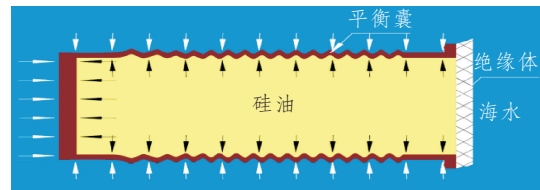
1 水下湿插拔连接器关键技术

水下湿插拔连接器用于连接海底工程节点,实现长期稳定的光纤和电缆连接,进而支撑能源传输、数据收集和数据回传,保证海底观测网、海底油气开采、海洋探测与通信网络等大型深海工程设施的正常运行。其采用了特殊技术,可在深海环境下进行插拔,能有效防止水和污染物进入连接器内部,确保了连接器在恶劣的海洋环境中正常工作。现阶段,

有关水下湿插拔连接器的技术主要有等压平衡、旋转密封、多级引导精准对接与视觉到位识别、非接触式光接触件和光纤调芯等。

1.1 等压平衡技术

水下湿插拔连光电混装连接器在设计时采用了充油等压平衡技术来实现高水压下插座与插头的分离与连接。如图 1 所示,忽略油液的压缩性,利用皮囊优异的膨胀和收缩特性,调节插合过程中内部体积的变化,使得油液压力与外界水压平衡。此外,采用等压平衡技术后,连接器外壳体及密封元件承受的压差将大大减小,可以增强壳体压力负载能力,降低密封难度。



利用液体的不易压缩性,平衡囊填充硅油平衡外部海水压力。

图 1 等压平衡原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of isobaric balance principle

本文针对运用等压平衡技术设计而成的水下湿插拔光电混装连接器开展了高水压环境下的水下插拔试验,如图 2 所示,试验压力为 45 MPa,插拔次数为 100 次,试验后,连接器插入损耗(0.5 dB)合格,绝缘电阻($\geq 50 \text{ G}\Omega$)合格。



图 2 水下湿插拔光电混装连接器带压水下插拔试验

Figure 2 Pressure-resistant underwater mating and unmating tests for underwater wetmateable hybrid optoelectronic connectors

1.2 旋转密封技术

为了保证光电混装连接器在深海环境插拔时光

电接触件的动密封可靠,在设计时采用了旋转密封技术,即在插头和插座都采用滚轴挤压密封,如图3所示。插头和插座的绝缘体前端各设计了1个滚轴,每个滚轴均布4个通道,未插合前滚轴的通道与绝缘体端面呈90°,借助等压平衡橡胶囊,达到插头与插座的独立密封效果。

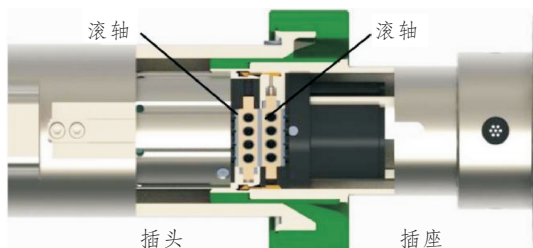


图3 未插合前插头插座状态

Figure 3 The state of plug and socket before in plugging

插头插座对插时,插座端顶杆带动滚轴部件转动,直至两个滚轴部件转动至通孔对正的状态,在转动过程中要求转动到任一角度时,插头和插座滚轴之间旋转挤压形成密封状态,使得连接器针孔与海水隔绝,其旋转过程如图4所示。

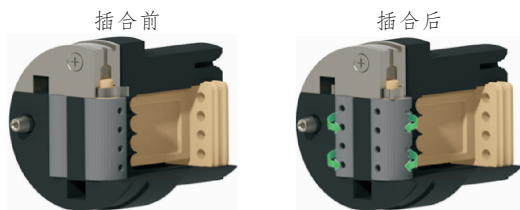


图4 旋转密封转动过程

Figure 4 Rotating process of rotary seal

1.3 多级引导精准对接与到位识别技术

水下插拔连接器在深海中工作环境复杂,操作困难,在设计时要求插头和插座插合时能够顺利引导并实现快速精准对接,与此同时,操作应当简便,插合后需形成一个完整的整体,不会因洋流和水生物等因素的影响而发生分离,而在需要分离时,能够顺利解除这种锁定状态。

① 多级引导精准对接

(a) 引导套筒粗引导。考虑到机器人控制时会发生大角度偏离和斜插等情况,设计引导套筒实现粗引导,如图5(a)所示。(b) 锁紧套筒次级引导。插头锁紧套筒键槽与插座引导螺钉可实现次级引导,如图5(b)所示。(c) 端面销钉3级引导。在插合过程中,插头与插座端面贴紧时,端面的引导销钉与引导槽配合实现3级引导,如图5(c)所示。

对多级引导结构进行试验,如图6所示,在允许最大偏移位置安装插座法兰,±X和±Y 4个方向进

行最大错位插拔。在插合后对连接器的光电性能进行测试。光学性能插入损耗为0.09~0.62 dB、电气性能绝缘电阻≥50 GΩ。试验后产品外观和插拔正常。

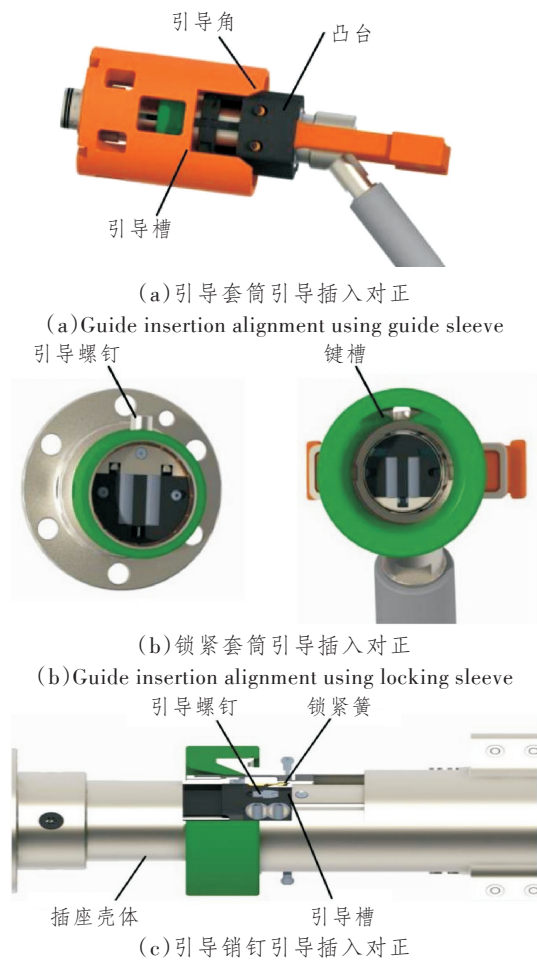


图5 多级引导精准对接

Figure 5 Multi-level guidance accurate docking



图6 最大偏移插拔

Figure 6 Maximum offset mating and unmating

② 视觉到位识别结构

视觉到位识别结构与锁紧机构设计为联动结构,一端通过连接螺钉与锁紧机构铰接实现联动,另一端为识别套,如图7所示。当连接器开始插合时,铰接端翘起,另一端的标识套下落直至隐藏在侧板内,从外部无法看到;当连接器插合到位时,插头和

插座自动锁紧,锁紧动作带动了到位识别结构联动,使识别结构上的标识套从内部外露出来,并被水下

机器人或 ROV 上的摄像头捕捉,后者据此判断连接器已插合到位。

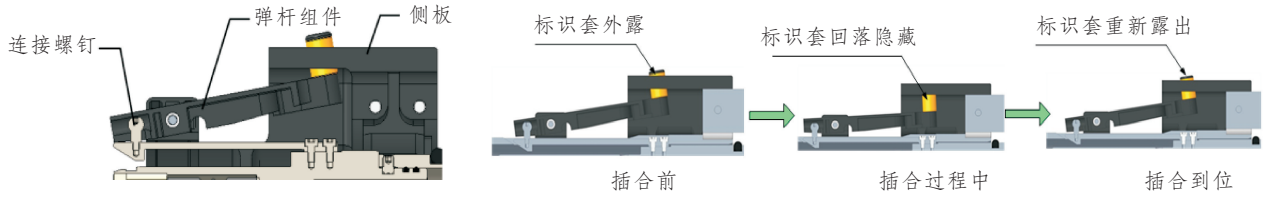


图7 视觉到位识别结构及过程示意图

Figure 7 Structure and process diagram of visual in-place identification

1.4 非接触式光接触件和光纤调芯技术

①非接触式光接触件设计技术

为了解决因小灰尘和颗粒等污染物造成光纤中信号传播时的散射、反射甚至光路不通的问题^[10],本文设计了非接触式光纤接触件,其工作示意图如图8所示。其中自聚焦透镜、陶瓷粘接管及陶瓷插针公差配合进行严格控制,将配合工程降至最小,保证自聚焦透镜准直后光束与陶瓷粘接管同轴度;同时对装配环境进行控制,对原材料进行清洗,粘接前复检并在40倍显微镜下进行粘接操作避免环境灰尘等污染物影响产品性能。



图8 非接触式光接触件工作示意图

Figure 8 Operating diagram of non-contact optical contact

②光纤调芯设计技术

光纤与陶瓷插针之间存在间隙,填胶、穿纤和固化后,会出现光纤纤芯与陶瓷套管不同轴,两根互配光纤通过接触件对插后出现错位偏差,此错位偏差将直接影响光纤连接器的插入损耗,为此可以增加调芯键位以消减横向错位引起的插入损耗,其原理如图9所示。通过调芯键位结构设计,采用专用调芯仪设备,将偏心方向与连接器壳体键槽方向调整一致,从而达到光纤调芯的工艺装配效果。

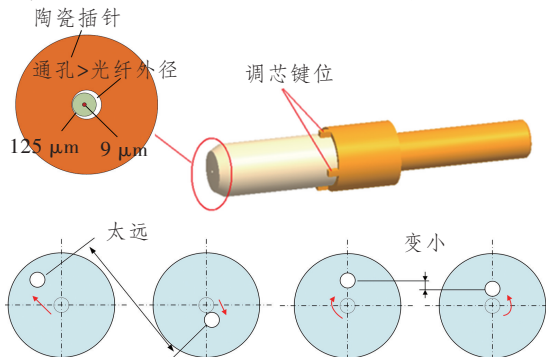


图9 光纤调芯原理示意图

Figure 9 Schematic diagram of optical fiber core adjustment

2 水下湿插拔连接器的密封技术及仿真分析

水下密封连接器长期可靠稳定的使用主要依赖于密封材料,同时关键零部件的可靠性将直接影响连接器的整体可靠性。等压平衡式水下插拔连接器采用了等压平衡橡胶囊填充液体实现等压平衡,产品密封主要采用静密封和动密封两种方式。

2.1 静密封技术及仿真分析

①密封原理

静密封主要是通过O形橡胶圈和等压平衡橡胶囊的挤压来保证的。O形圈作为一种双向密封元件,依据密封压力的具体要求,在径向或轴向上具备合适的初始压缩量,进而使得密封圈发生压缩变形,该变形反作用于壁面和沟槽面,填补了壁面和沟槽面的间隙,从而形成初始密封。O形圈密封示意图如图10所示。

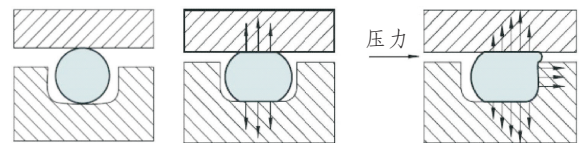


图10 O形圈密封示意图

Figure 10 The diagram of O-ring seal

橡胶囊端部的内外两侧面分别与绝缘体的外壁面和光、电插针外壁面接触,通过设计过盈结构,使得橡胶囊端部被挤压在上述两壁面之间。由于橡胶良好的力学性能,在挤压力作用下发生弹性形变并将两壁面表面的微小缝隙填充,从而阻止橡胶囊内的绝缘油液通过壁面上的微小间隙发生泄漏。橡胶囊端部密封结构如图11所示。

②仿真分析

橡胶材料的有限元分析归属于非线性有限元的范畴,通常采用 Mooney-Rivlin 模型进行描述。当橡胶材料为不可压缩的丁腈橡胶时,可知:

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3), \quad (1)$$

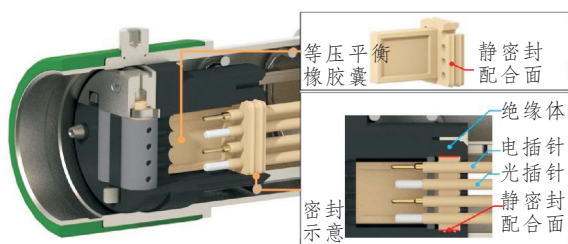


图 11 橡胶囊端部挤压

Figure 11 The end extrusion of rubber capsule

式中： W 为应变能密度函数； C_{10} 和 C_{01} 为橡胶特性参数； I_1 和 I_2 分别为第 1 和第 2 Green 应变不变量。对于不可压缩的橡胶材料而言，其泊松比 μ 近似为 0.5，在小应变的情况下，弹性模量 E 、剪切模量 G_1 和 Mooney-Rivlin 常数 C_{10} 和 C_{01} 存在以下关系：

$$G_1 = E/3 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (2)$$

由相关试验数据可知，橡胶的硬度 H_A 和弹性模量 E 之间的关系为

$$E = \frac{15.75 + 2.15H_A}{100 - H_A} \quad (3)$$

对于丁腈橡胶，酌情取 $C_{01}/C_{10} = 0.25$ ，则可得 $C_{01} = E/30$ ， $C_{10} = E/7.5$ 。

若指定 $C_{01} = 0$ ，得到 $C_{10} = E/6$ ，则可定义一个 Neo-Hookean Mooney-Rivlin 材料模型。

以 $\phi 18.72 \times 2.62$ 规格的 O 形圈为例，承水压为 70 MPa，对其在不同间隙 m 下的受力情况进行仿真分析，结果如图 12 所示。

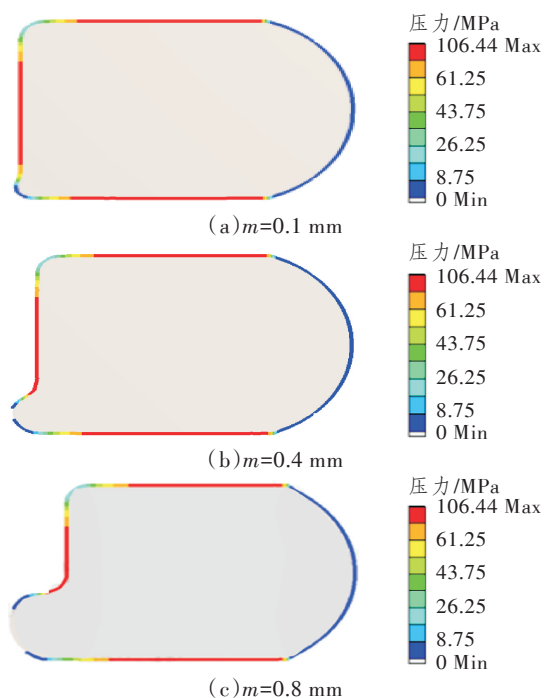


图 12 不同间隙 m 下 O 形圈与壁面的接触压力

Figure 12 Contact pressure between O-ring and wall under different clearances m

根据仿真结果，当水压为 70 MPa 时，O 形圈与壳体壁面的接触压力均大于 70 MPa，不会造成海水泄漏进入设备间内部，但随着间隙的增大，O 形圈变形，所受应力及其与壁面的接触压力均呈增大趋势，这对 O 形圈的长期使用是不利的，会造成 O 形圈的应力老化，极大缩减 O 形圈寿命。

如图 13 所示，针对产品静密封结构，本文设计了耐静水压力试验，进行了 48 h 的耐水压试验，试验后产品光插入损耗为 0.31~0.51 dB，电绝缘电阻 $\geq 50 \text{ G}\Omega$ ，连接器性能合格。将试验后连接器拆解，对连接器内硅油进行电阻率测试，硅油电性能仍符合要求，实验结果表明产品密封结构设计合理。



图 13 静水压力试验

Figure 13 Hydrostatic pressure test

2.2 动密封技术及仿真分析

① 动密封结构

动密封相较于静密封需要考虑的因素更多，除了密封表面质量好且压缩量足够外，还需考虑密封件材料的耐磨性和产品插拔的速度是否合理等因素。

水下插拔连接器的动密封结构如图 14 所示，采用两种动密封形式，一是接触件组件与等压平衡囊接触密封，二是插头滚轴与插座滚轴的旋转动密封。

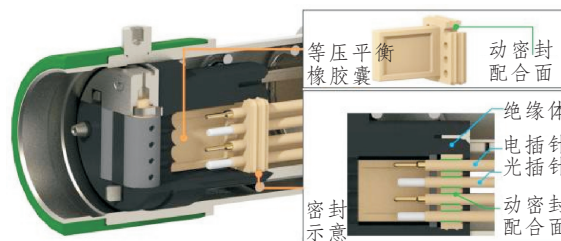
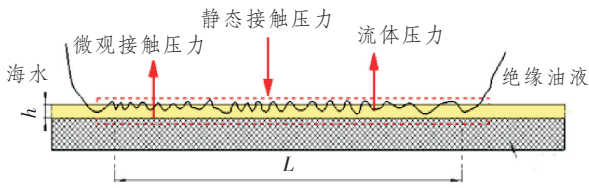


图 14 动密封结构示意图

Figure 14 Schematic diagram of dynamic seal structure

接触件组件和等压平衡囊的接触区域会形成一层油膜，其外侧为海水，内侧是绝缘油液，如图 15 所示。在介质压差和预紧力的综合作用下，配合部位被径向压缩，由于等压平衡囊接触部位的孔边缘受绝缘

体约束,使接触部位表面紧密压合,达到密封效果。



注: h 为油膜厚度; L 为密封长度。

图 15 密封接触部位示意图

Figure 15 Schematic diagram of sealing contact parts

在密封区域中,微观接触压力 P_c 、静态接触压力 P_{sc} 以及油膜压力 P 间的平衡关系为 $P_{sc}=P+P_c$ 。

② 仿真结果分析

水下插拔连接器的等压平衡囊及滚轴的材料均采用特制橡胶,具有出色的耐海水腐蚀和耐磨性能。采用两参数的 Mooney-Rivlin 模型来对水下插拔连接器的动密封进行求解。

当接触部位产生接触并处于压缩状态后,会形成静态的接触压力,这是密封的关键。利用 ANSYS 对接触区域的压力分布进行仿真分析,图 16 所示为滚轴转动过程的接触压力变化云图。

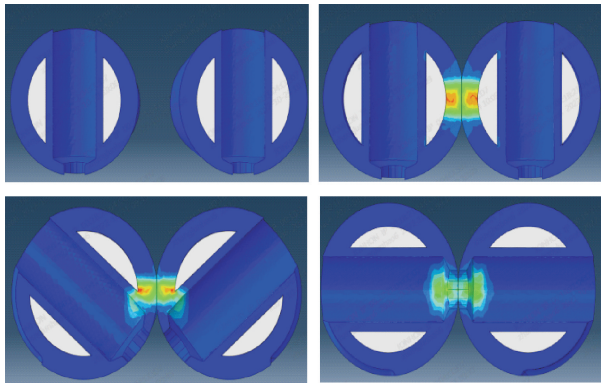
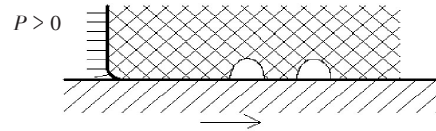


图 16 插合过程应力云图

Figure 16 Stress nephogram of insertion process

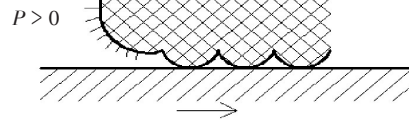
由图可知,接触压力始终大于水压,能始终保持动密封,不发生泄漏。

上述仅从宏观上对连接器在动态插拔过程中的接触压力进行了仿真分析,实际上,橡胶密封组件往复运动时其工况恶劣。由于橡胶密封件和插针接触部分存在不平整现象,有很多凹槽。在连接器插合时,橡胶密封件与插针之间做往复运动,很容易将液体带到密封组件中,导致泄漏发生,其原理如图 17 所示。在流体动压效应的影响下,被挤入密封组件中的液体压力高于工作液体压力,此时,液体被挤入密封组件的凹坑处,随着插头的推进,介质便沿着插针运动方向流动。当回程运动时,凹坑中没有被带回的部分液体就形成了泄漏。



(a) 海水被带入收敛性缝隙

(a) Seawater is brought into the convergence gap



(b) 海水被挤入橡胶密封组件第 1 凹处

(b) Seawater is squeezed into the first recess of the rubber sealing component

图 17 泄漏原理示意图

Figure 17 Schematic diagram of leakage principle

密封部位的密封能力与流体的工作压力、预压缩量、接触面间的摩擦因数以及插针的运动速度都有很大的关系,当静水压增大时,泄漏量会有增大趋势;当插针插入速度很小时,接触区域的密封可以看作静密封,但当插入速度较大时,流体的动压效应会增大,绝缘油液泄漏量也会相应增大;接触表面若不光滑,泄漏量和滑动摩擦力均会相应增大,可通过建立单点接触模型及多点接触模型进行简化分析,获得接触面粗糙度对泄漏量的影响。此外,温度的变化引起的密封圈变形以及绝缘油粘度的降低,均会影响泄漏量。对于介质的泄漏量 G ,通常采用以下经验公式:

$$G = \frac{k\pi DLS}{v_r} \left(\frac{P'vR_a}{\eta} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

式中: k 为系数, $k=2.1 \times 10^{-4}$; D 为密封圈内径(单位为 m); S 为被密封面行程长度(单位为 m); v_r 为橡胶的复原速度(随温度而变)(单位为 m/s); P' 为内外介质压差(单位为 MPa); v 为插拔速度(单位为 m/s); R_a 为表面粗糙度参数(单位为 m); η 为介质运动黏度(随温度而变)(单位为 Pa·s)。由式(4)可知各参数对泄漏量的影响情况。当内外介质压差为 1 MPa 时, G 和 v 的关系如图 18 所示。

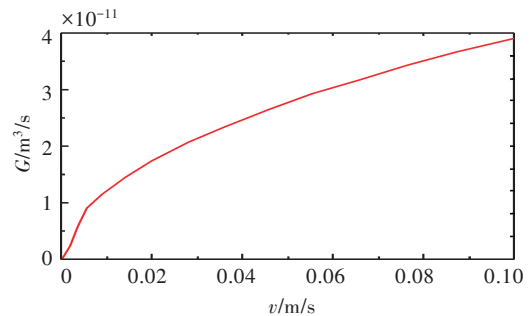


图 18 泄漏量 G 和插拔速度 v 的变化关系图

Figure 18 Relation between leakage G and speed change v

由图可知,随着插拔速度 v 的增大,泄漏量 G 增多,但其增长趋于平缓。同样控制 $v=0.1\text{ m/s}$,得到 G 和内外介质压差 P' 的关系如图 19 所示。

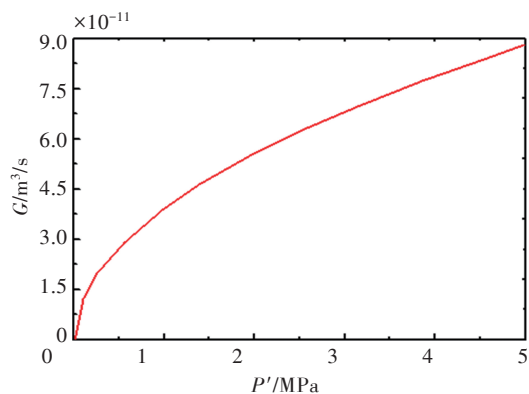


图 19 泄漏量 G 和介质压差 P' 的变化关系图

Figure 19 Relationship diagram of medium differential pressure P' and leakage G

由图可知,内外介质压差 P' 越大,其泄漏量 G 也越大。对插头插座往复插拔一次,计算其在不同插拔速度 v 和 P' 下的 G ,如图 20 所示。由图可知,随着 v 和 P' 的增大, G 增多。

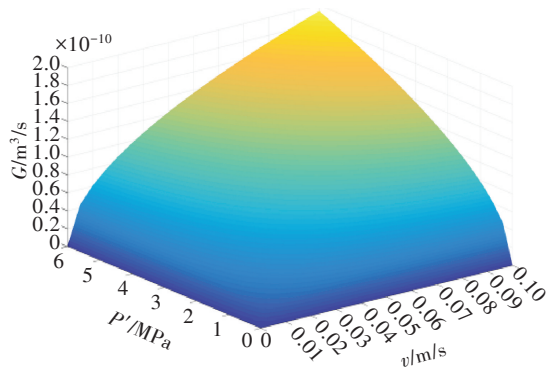


图 20 不同插拔速度 v 和介质压差 P' 下连接器往复插拔一次的泄漏量 G

Figure 20 Leakage G of connector after reciprocating plugging and unplugging at different plugging and unplugging speeds v and differential medium pressure P'

对采用等压平衡技术设计的水下湿插拔光电混装连接器进行高压水下插拔试验,以充分验证水下湿插拔光电混装连接器的动密封能力,试验压力为 45 MPa,插拔次数为 100 次,试验后连接器插入损耗(0.5 dB)合格,绝缘电阻($\geq 50\text{ G}\Omega$)合格。此外,还进行了浑浊水箱插拔试验,试验最大压力为 31 MPa,插拔次数为 100 次,试验后连接器插入损耗(0.5 dB)合格,绝缘电阻($\geq 50\text{ G}\Omega$)合格。水压完成后,拆下被测连接器的插头和插座,检查固体颗粒在表面的

堆积程度,检测油囊内硅油的绝缘电阻。结果显示,连接器表面有少量固体颗粒堆积,不影响连接器的正确操作;油囊内硅油的绝缘电阻 $> 50\text{ G}\Omega$ (合格),实物如图 21 所示。

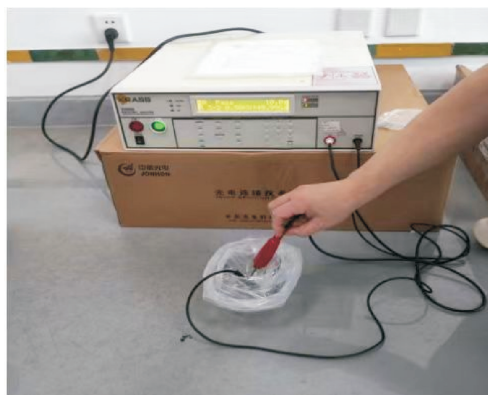


图 21 水下插拔试验后检测内部硅油的绝缘电阻

Figure 21 Measurement of the insulation resistance of the internal silicone oil after underwater mating and unmating tests

3 结束语

本文对建立大型海底工程项目水下互联的核心器件水下湿插拔光电混装连接器的关键技术进行了分析,着重介绍与分析了等压平衡、旋转密封、多级引导精准对接与到位识别、非接触式光接触件和光纤调芯等技术。

对水下湿插拔连接器的关键静、动密封技术进行了仿真分析,结果表明,对于静密封结构,当水压为 70 MPa 时,不会造成海水泄漏进设备内部,但随着间隙的增大,O 形圈变形,所受应力及其与壁面的接触压力均呈增大趋势。这对 O 形圈的长期使用是不利的,会造成 O 形圈的应力老化,极大缩减了 O 形圈寿命。对于动密封结构,插针运动速度越快,海水压力越大,其泄漏量也越大。本文还对仿真结果进行了试验验证,为水下湿插拔光电混装连接器技术的发展提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 谈琪,孟浩然,殷建平,等. 水下湿插拔接触式光纤耦合设计与性能分析[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 313-321.
Tan Q, Meng H R, Yin J P, et al. Design and Performance Analysis of Contact Fiber-coupled of Underwater Wet-mateable Connector[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(3): 313-321.
- [2] 朱家远,叶杨高. 国外水下插拔连接器密封设计及分

- 析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(5): 518–522.
- Zhu J Y, Ye Y G. Sealing Structure Design and Analysis for Wet-mate Connector in Foreign Countries [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(5): 518–522.
- [3] 任程刚, 苏建, 郭朝阳, 等. 4 500 m水深用 水下插拔电连接器的设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2023(6): 14–17.
- Ren C G, Su J, Guo C Y, et al. Design of Wet-mate Electrical Connector in 4 500 m Water Depth[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2023(6): 14–17.
- [4] 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.
- [5] Jenkins D K. Wet-mateable Optics: Very High Performance, Small Form Factor, Harsh Environment Wet Mateable Optic Connectors [C]// Oceans 2003. Diego, CA, USA: IEEE, 2003: 178173.
- [6] 徐鲁杰, 孙晓军, 汤振, 等. 水下插拔电连接器技术[J]. 机电元件, 2011, 31(6): 3–5.
- Xu L J, Sun X J, Tang Z, et al. Technology of under Water Wet-mate Electrical Connector [J]. Electromechanical Components, 2011, 31(6): 3–5.
- [7] 耿翟, 黄然, 乔鹏, 等. 水下连接器动态插拔试验技术浅析[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(5): 246–249.
- Geng Z, Huang R, Qiao P, et al. Analysis on Dynamic Plugging and Unplugging Test Technology of Underwater Connector[J]. Electronic Components and Information Technology, 2023, 7(5): 246–249.
- [8] 张新立, 唐群植, 伍浩成, 等. 防潮密封型光纤连接器[J]. 光电工程, 2020, 47(12): 200067.
- Zhang X L, Tang Q Z, Wu H C, et al. Moisture-proof Seal Optical Fiber Connector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(12): 200067.
- [9] 李孟龙, 王名春, 张强, 等. 高电压湿插拔电连接器测试技术研究[J]. 自动化应用, 2022(6): 40–42.
- Li M L, Wang M C, Zhang Q, et al. Research on Testing Technology of High-voltage Wet-plug Electrical Connectors[J]. Automation Application, 2022(6): 40–42.
- [10] 王国庆, 闵锐, 李兴泉, 等. 双通道加密自由空间光通信系统[J]. 光电工程, 2024, 51(9): 43–53.
- Wang G Q, Min R, Li X Q, et al. Dual Channel Encrypted Free-space Optical Communication System[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(9): 43–53.