

深海电连接器结构设计及其实验验证

徐世通, 牛王鑫

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年2月25日; 录用日期: 2025年3月18日; 发布日期: 2025年3月27日

摘要

针对水下1500 m的高压环境, 需要对水下电连接器的密封性、插拔力及其电接触性能做出严格要求。本文针对以上性能提出一种深海电连接器的结构设计, 并模拟水下1500 m水深环境对电连接器进行实验验证, 以确保其在高压环境工况下正常工作。

关键词

水下电连接器, 水下密封, 插拔力, 电接触性能, 冠簧, 实验验证

Structural Design and Experimental Verification of Deep-Sea Electrical Connectors

Shitong Xu, Wangxin Niu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 25th, 2025; accepted: Mar. 18th, 2025; published: Mar. 27th, 2025

Abstract

In view of the high-pressure environment of 1500 m underwater, strict requirements should be made on the sealing, plugging force and electrical contact performance of underwater electrical connectors. In view of the above performance, this paper proposes a structural design of a deep-sea electrical connector, and simulates the underwater 1500 m water depth environment to test and verify the electrical connector to ensure that it works normally under high-voltage environmental conditions.

Keywords

Underwater Electrical Connector, Underwater Sealing, Insertion Force, Electrical Contact Performance, Crown Spring, Experimental Verification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着石油行业的不断发展, 深海能源的开采逐步受到人们重视, 但由于其开采的环境苛刻, 水下设备能源供给不足, 水下信息难以传递等原因, 给深海能源开发领域带来了极大的挑战性。为攻克这一难题, 深海电信号连接器的研发起到至关重要的作用。

深海电连接器能够在高压、高盐度、低温度的环境下进行插拔供电, 其电气性能要强于地面电气设备数十倍才能为水下设备提供可靠的能源供应, 这对电连接器的密封性、绝缘性、导电能力、使用寿命等性能的要求极高。

本文针对电连接器的密封性、插合力、导电性能等角度, 提出一种电连接器的结构设计并进行测试实验验证。

2. 基本原理

2.1. 密封原理

深海电连接器的密封原理实质上是利用了橡胶材料的自紧密封机理, 自紧密封机理是指橡胶材料能将压力转变为密封件的接触应力的性质。根据广义胡克定律, 任一方向的应变大小, 不是单一的由在该方向的应力所决定, 而是各个方向应力作用叠加决定的, 又因为橡胶材料的泊松比较大, 当橡胶密封材料受到轴向压力时, 在其径向上也会产生变形, 用方程描述为:

$$\begin{cases} E \cdot \varepsilon_x = \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \\ E \cdot \varepsilon_y = \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \\ E \cdot \varepsilon_z = \sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x) \end{cases} \quad (1)$$

其中 E 为密封材料的弹性模量, ν 为密封材料的泊松比, ε_i 为该方向的应变, σ_i 为该方向的应力。

取密封件上的应力微元作为研究对象, 如图 1 所示[1]。

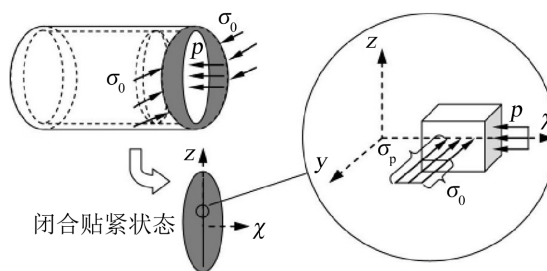


Figure 1. Force analysis of stress elements on the mating surface under pressure

图 1. 压力下贴合面应力微元受力分析

$$\sigma_p = \sigma_0 + \frac{\nu}{1-\nu} P \quad (2)$$

其中 P 为海水压力, σ_0 为密封材料预紧力, σ_p 为贴合面接触应力。

由于橡胶密封材料的体积很难被压缩, 且泊松比接近 0.5, 因此贴合面的接触应力恒大于海水压力, 实现自密封。

2.2. 插拔力设计原理

深海电信号连接器的插合过程是动密封过程, 因此要求插合时插针与插芯、隔膜等材料的配合为过盈配合, 插芯和隔膜发生弹性形变而产生的应力, 导致隔膜对插芯生成了箍紧力, 该箍筋力以及弹簧被压缩产生的弹力是电连接器插合力的本质。

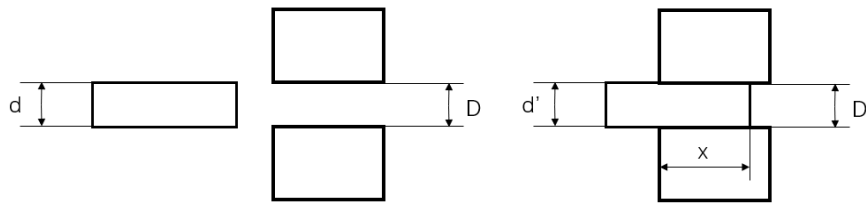


Figure 2. Interference fit analysis diagram

图 2. 过盈量分析图

对过盈配合的摩擦力计算首先要得到过盈量, 如图 2 所示, 分析插针插合的运动过程, 根据不同阶段摩擦系数进行分段求解; 由胡克定理计算可得到弹簧弹力, 将摩擦力和弹簧弹力叠加即可计算插合力。

孔的单边平均收缩与轴的单边平均扩张两者之和为单边过盈量[2], 则由位移协调关系可以计算出材料过盈量, 方程描述为:

$$e = \frac{D - D'}{2} + \frac{d - d'}{2} = \frac{D - d}{2} \quad (3)$$

其中 e 为单边过盈量, D 为密封件的轴径, D' 为被挤压扩张后密封件的轴径, d 为插针的轴径, d' 为挤压收缩后插针的轴径。

计算得出单边过盈量后计算平均压力及接触压力[3]:

$$P_0 = Ke\mu \quad (4)$$

$$P = Ke\pi D'\mu \quad (5)$$

其中 P_0 为平均压力, K 为过盈配合比例常数, μ 为摩擦系数, x 为插针和插孔互相作用的距离。

弹簧弹力为线性力, 方程描述为:

$$F = kx \quad (6)$$

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (7)$$

其中 x 为弹簧变形量, k 为弹簧系数, G 为弹簧材料的切变模量, d 为钢丝直径, n 为弹簧有效圈数, D 为弹簧中径。

2.3. 电接触性能设计原理

影响深海电连接器电接触性能的关键在于接触电阻的大小, 接触电阻是指成对导体在对接过程中的

阻值, 接触电阻由导体电阻、集中电阻和膜层电阻组成。导体自身的阻值称为导体电阻; 当两导体对接时, 电流流过接触表面而形成电流线集中产生的电阻成为集中电阻; 当导体表面有镀层或沾有其他杂质而形成的污染膜, 表面膜层产生的阻值称为界面电阻或膜层电阻。

故接触电阻阻值计算, 方程描述为:

$$R = R_p + R_C + R_F \quad (8)$$

其中 R 为接触电阻, R_p 为导体电阻, R_C 为集中电阻, R_F 为膜层电阻。

电接触性能除了要考虑接触电阻阻值问题, 还要考虑电接触可靠性的问题。导体的接触件是连接器内部承担电接触性能的关键部件, 其可靠性也对电连接器的工作性能起关键性作用。导体接触件的设计要考虑接触方式、工艺、制造、原材料等诸多因素。

3. 结构设计

本文提出一种新型电连接器结构设计, 对电连接器的密封性、插针之间的绝缘性、连接器的插拔力以及电接触等角度的性能有了显著提升。

3.1. 电连接器公头基本结构

深海电连接器公头主要由公头本体、公头套筒、插针、公头路由体、螺纹挡圈等零件构成, 如图 3 所示, 其密封方式为前密封和端密封构成密封腔, 端密封可由螺纹挡圈通过斜面机构进行锁紧; 插针使用螺纹连接便于更换, 且在铜制母材用特殊工艺铸塑一层高密制绝缘材料以防止电压击穿。

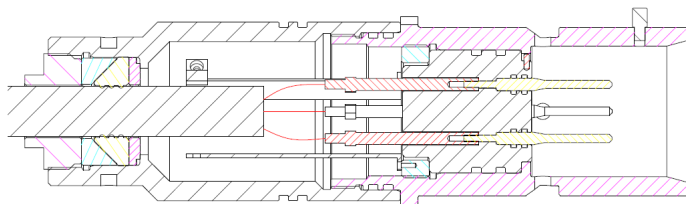


Figure 3. Male electric connector

图 3. 电连接器公头

3.2. 电连接器母头基本结构

深海电连接器母头主要由母头本体、母头套筒、非金属插针、冠簧、保护套、弹簧、螺纹挡圈等零件构成, 如图 4 所示。其密封方式采用多级隔膜技术, 包括前密封、端密封、主级隔膜和次级隔膜的密封结构, 并在其密封区域内注入绝缘油以确保其绝缘强度。次级隔膜的设计可以使不同插针在对接过程中构成自己的独立水域, 构成插针之间的物理隔离, 确保插针之间的绝缘。前密封与非金属插针过盈配合, 端密封与公头采用同种螺纹锁紧设计。

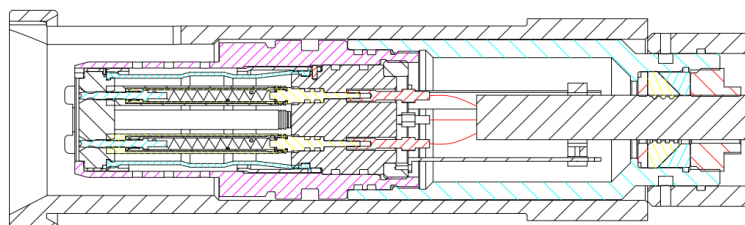


Figure 4. Female electrical connector

图 4. 电连接器母头

3.3. 压力平衡装置及隔膜尺寸设计

由于深海领域是高压环境, 巨大的海水背压会使连接器拔脱时受到巨大阻力, 因此在电连接器中设计了二级压力平衡及补偿技术, 其压力平衡的基本原理是利用了液体的可压缩特性, 通过海水背压挤压内部绝缘油, 从而提高密封腔内压力进而补偿拔脱力。

密封腔内外的压力差便成为电连接器拔脱力的关键因素之一, 电连接器的主级隔膜与次级隔膜构成双重囊式压力平衡装置。根据弹性薄壳理论, 可调整次级隔膜的几何尺寸来控制压力差。根据已有研究可得到次级隔膜不同几何尺寸对压力差的影响[4], 如图 5~8 所示。

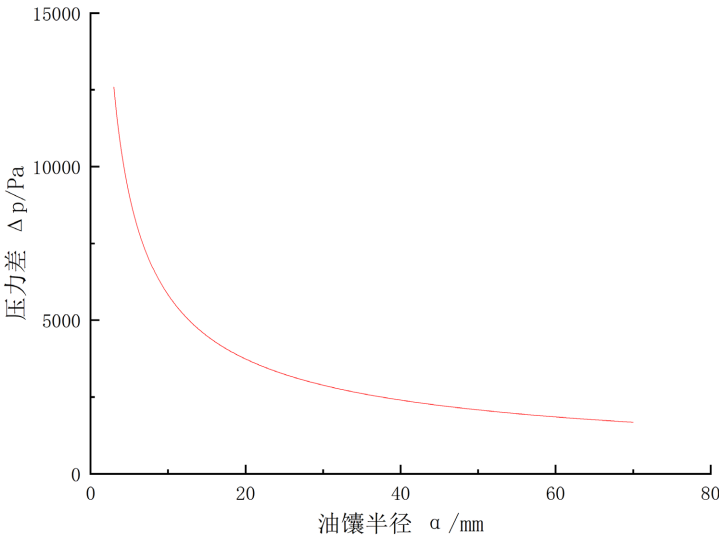


Figure 5. Δp change curve with the radius of oil naan

图 5. Δp 随油囊半径变化曲线

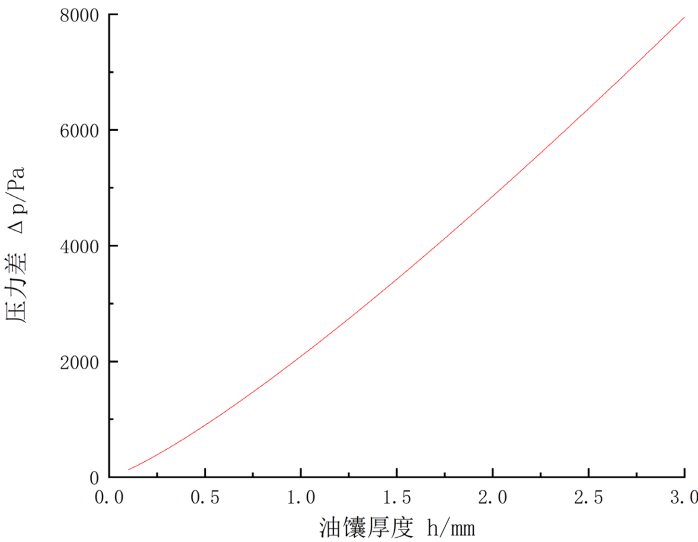


Figure 6. Δp change curve with the wall thickness of oil naan

图 6. Δp 随油囊壁厚变化曲线

不难看出, 压力差随着次级隔膜的半径增大而减小, 但其平衡压力差的能力也逐渐减弱; 压力差随

次级隔膜厚度增大而增大, 且其平衡压力差的能力增大; 压力差与次级隔膜弹性模量的关系呈线性增长; 压力差随次级隔膜长度增大而减小, 平衡压力效果也逐渐减弱。综合隔膜的强度要求以及空间限制, 最终确定次级隔膜几何尺寸 $a = 4.05 \text{ mm}$ 、 $h = 0.8 \text{ mm}$ 、 $l = 74.5 \text{ mm}$ 。

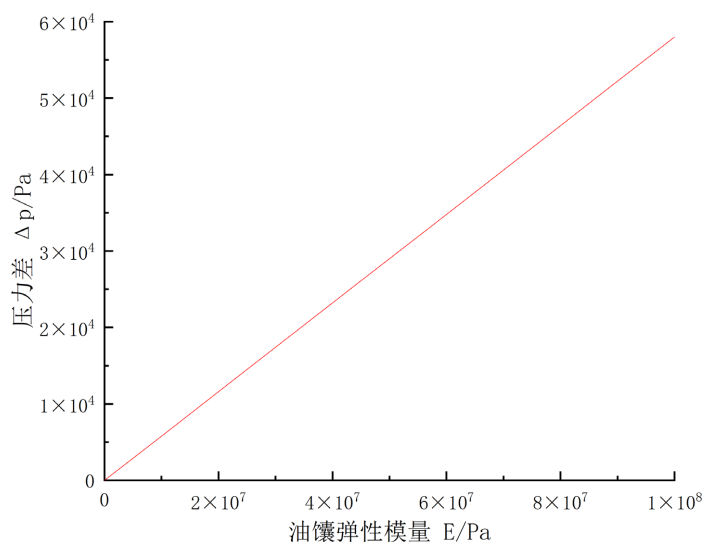


Figure 7. Δp change curve with elastic modulus of oil naan

图 7. Δp 随油饅弹性模量变化曲线

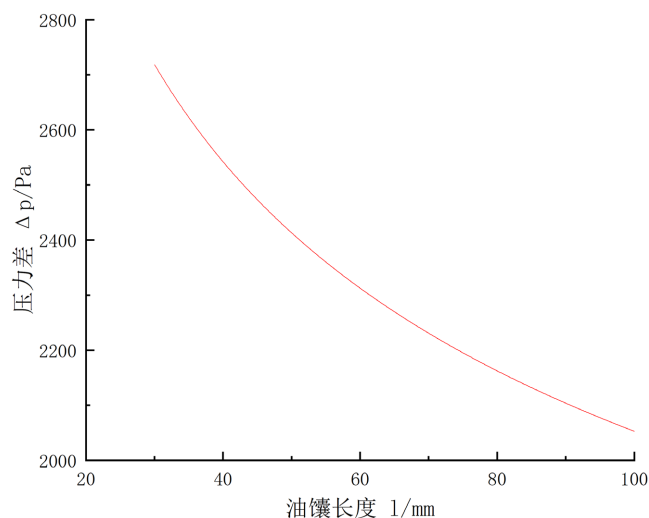


Figure 8. Δp change curve with length of naan

图 8. Δp 随油饅长度变化曲线

4. 工作原理

4.1. 电连接过程

深海电连接器的插合过程是由水下 ROV 机器人操作完成的, 由于 ROV 机器人只能进行简单的运动, 无法完成过于精密的操作, 因此电连接器需要设计机械导向机构, 如图 9 所示, 该机构利用斜面副进行对准, 以此来确保插针与插芯的相对位置正确防止插针破坏母头密封件。

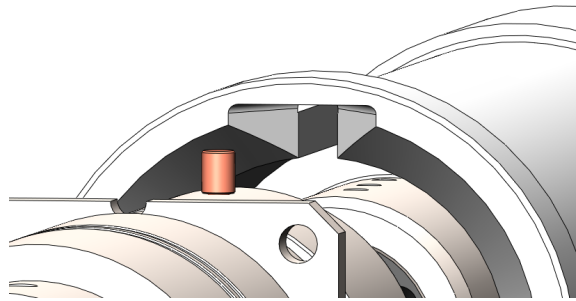


Figure 9. Mechanical guide mechanism
图 9. 电连接器母头机械导向结构

机械导向对准后, 插针会首先和非金属插针接触, 非金属插针为高绝缘耐磨材料, 提高电连接器使用寿命。金属插针会克服摩擦力和弹簧弹力缓慢推动非金属插针向内运动。

电连接器母头前密封与插针之间配合为过盈配合, 若插针表面附有杂质可能会刮伤密封件, 但由于二级压力平衡及补偿技术, 密封腔内油压与海水背压有一定压差, 在插合过程中次级隔膜内的绝缘油会被挤压而喷出绝缘油冲洗插针上的杂质和水膜, 保障了电连接器的工作性能。

直至金属插针和保护套内的冠簧接触, 将冠簧的簧片撑开至稳定插合, 至此完成电连接过程。且由于前密封的自紧密封性以及多级隔膜设计, 保障了深海电连接器的绝缘性。此时电连接器母头两侧卡瓦会扣住公头卡槽实现锁紧功能, 如图 10 所示。

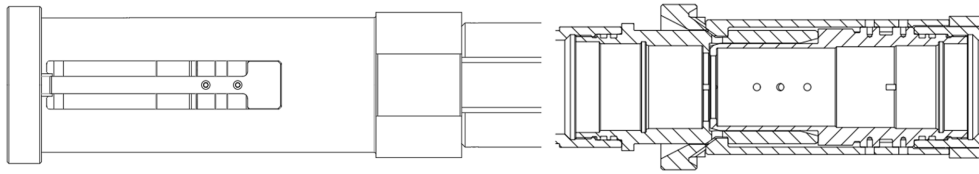


Figure 10. Slip assembly and locking diagram
图 10. 卡瓦装配及锁紧示意图

4.2. 插合过程

插合过程共分为三个阶段, 第一阶段是金属插针接触非金属插针后, 金属插针进入密封件。在该阶段的插合力为金属插针与密封件的摩擦力、非金属插针与密封件的摩擦力、非金属插针与次级隔膜的摩擦力以及弹簧弹力。

第二阶段是金属插针穿过密封件后进入次级隔膜。在此阶段的插合力为金属插针与密封件的摩擦力、金属插针与次级隔膜的摩擦力、非金属插针与次级隔膜的摩擦力以及弹簧弹力。

第三阶段是金属插针穿过密封件和次级隔膜。在此阶段的插合力为金属插针与密封件的摩擦力、金属插针与次级隔膜的摩擦力、金属插针受到冠簧弹性变形而产生的箍紧力以及弹簧弹力。电连接器插合力可分为三部分, 分别为摩擦力、箍紧力以及弹簧弹力, 方程描述为:

$$F = F_f + F_C + F_N \quad (9)$$

摩擦力 F_f 可分阶段表示, 方程描述为:

$$\begin{cases} k_1 e_1 \pi d'_1 x \mu_1 + k_3 e_3 \pi d'_2 (x_1 - x) \mu_3 + k_4 e_4 \pi d'_2 (x_2 - x_1) \mu_4 & 0 < x \leq x_1 \\ k_1 e_1 \pi d'_1 x_1 \mu_1 + k_2 e_2 \pi d'_1 (x - x_1) \mu_2 + k_4 e_4 \pi d'_2 (x_2 - x) \mu_4 & x_1 < x \leq x_2 \\ k_1 e_1 \pi d'_1 x_1 \mu_1 + k_2 e_2 \pi d'_1 (x_2 - x_1) \mu_2 & x_2 \leq x \end{cases} \quad (10)$$

其中, 金属插针插合长度记为 x , 密封件厚度记为 x_1 , 次级隔膜前端过盈配合长度与密封件厚度总和记为 x_2 ; 金属插针与密封件的过盈配合比例常数记为 k_1 , 摩擦系数记为 μ_1 , 单边过盈量记为 e_1 ; 金属插针与次级隔膜的过盈配合比例常数记为 k_2 , 摩擦系数记为 μ_2 , 单边过盈量记为 e_2 ; 非金属插针与密封件的过盈配合比例常数记为 k_3 , 摩擦系数记为 μ_3 , 单边过盈量记为 e_3 ; 金属插针与次级隔膜的过盈配合比例常数记为 k_4 , 摩擦系数记为 μ_4 , 单边过盈量记为 e_4 。

冠簧箍紧力 F_C , 其计算方式可以简化为材料力学的简支梁模型计算, 如图 11 所示, 金属插针受力情况为冠簧中点处受集中载荷, 方程描述为:

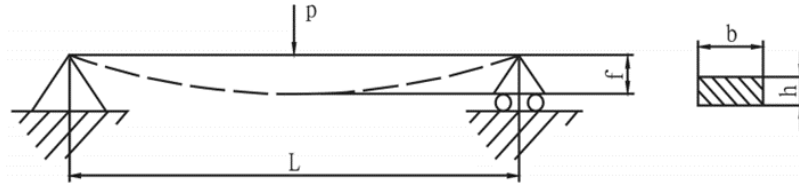


Figure 11. Simple supported beam concentrated load model

图 11. 简支梁集中载荷模型

$$M_{\max} = \frac{1}{4} PL \quad (11)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma] \quad (12)$$

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (13)$$

$$f \leq \frac{Pl^2}{48EI} \quad (14)$$

其中 P 为单根冠簧簧片的集中力, $M_{\max}$ 为最大弯矩, L 为簧片长度, $\sigma_{\max}$ 为最大弯曲应力, W 为抗弯截面模量, I 为轴惯性矩。计算可得:

$$P \geq \frac{4Ebh^3}{L^3} f \quad (15)$$

$$F_C = n\mu P = n\mu \frac{2bh^2}{3L} [\sigma] \quad (16)$$

其中 n 为冠簧簧片数量, μ 为金属插针与冠簧的摩擦系数。

弹簧弹力 F_N 为线性力, 由胡克定律计算可得:

$$F_N = kx = \frac{Gd^4x}{8nD^3} \quad (17)$$

综上可以计算得出电连接器的插合力, 插合力过大会破坏密封件导致密封失效, 插合力过小在插合过程中会渗入海水, 理论可得插合力约为 156 N。

4.3. 电接触性

深海电连接器在高压低温的工作环境下, 要求电连接的接触性能优良、工作可靠、且便于维修, 其工作可靠性直接影响整个系统的安全性。本文的电连接器采用冠簧作为接触件, 如图 12 所示。采用冠簧

作为接触件的特点是接触面积较大、接触电阻较小、使用寿命较长, 较适应于大电流电源连接器。由于其点面接触的特性可以获得更低的膜层电阻, 故接触电阻也更低。

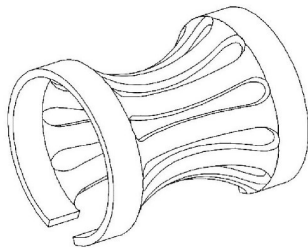


Figure 12. Inner crown spring
图 12. 内冠簧

接触电阻由导体电阻、集中电阻和膜层电阻组成。假设金属插针与冠簧接触时, 冠簧簧片没有发生塑性变形, 则其集中电阻阻值方程描述为[5]:

$$R_c = 0.45\rho \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{Pr}} \tag{18}$$

其中 ρ 为材料收缩电阻率, E 为材料弹性模量, P 为单根冠簧簧片的集中力, r 为冠簧簧片球面半径。膜层电阻阻值方程描述为:

$$R_f = \frac{\sigma}{A} = \frac{\sigma H}{P} \tag{19}$$

其中 σ 为触电膜层电阻, H 为触电硬度。导体电阻的阻值的数量级为 $10^{-8} \text{ m}\Omega$, 与集中电阻和膜层电阻对比通常可以忽略, 故可以计算其接触电阻约为 $1.03 \text{ m}\Omega$, 但由于实际插合过程中, 冠簧簧片并非完全是弹性变形, 每根簧片的接触表面也不一致, 且其接触电阻阻值也会随插拔次数增多而增大, 因此实际接触电阻通常比理论计算值大。

5. 测试实验

为验证深海电连接器结构的有效性, 针对其密封性、插拔力及电接触性能做相关测试实验。测试实验模拟水下 1500 m 的高压环境, 依据 API 17F 水下生产控制系统标准, 检测其结构的实用性。使用绝缘电阻测试仪, 测量其在各触点下的绝缘电阻值, 间接验证电连接器的密封性; 使用数显拉力试验机, 检验电连接器插拔力大小是否符合标准; 使用接触电阻测试仪, 检验电连接器的电接触性能是否符合应用要求。

5.1. 密封性测试实验

密封性测试实验分别在实验室压力下和 15 MPa 压力的测试水箱中进行。电连接器的触点分布如图 13 所示。实验室压力环境下使用绝缘电阻测试仪测量各触点的绝缘阻值, 结果如图 14 所示:

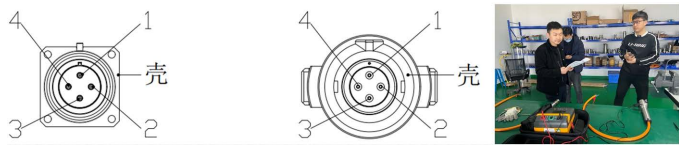


Figure 13. Measurement of insulation resistance under laboratory pressure
图 13. 实验室压力下绝缘电阻测量

绝缘电阻测试					
验收标准: ● 绝缘阻值 $\geq 11\text{G}\Omega$					
公头绝缘电阻测试值 ($\text{G}\Omega$)					
环境温度	23℃		环境温度	28	
触点	测试值	验收	触点	测试值	验收
1-2	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-3	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
2-3	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	4-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐

母头绝缘电阻测试值 ($\text{G}\Omega$)					
环境温度	23℃		环境温度	28	
触点	测试值	验收	触点	测试值	验收
1-2	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-3	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-4	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
2-3	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	4-壳	1.06 T Ω	合格 ☒ 不合格 ☐

Figure 14. Connector insulation resistance measurement record under laboratory pressure

图 14. 实验室压力下连接器绝缘电阻测量记录

以电连接器公头绝缘电阻测试为例, 实验中公头触点“1-2”表示插针 1 和插针 2 之间的绝缘阻值, 公头触点“1-壳”表示插针 1 与电连接器金属外壳之间的绝缘阻值。由于实验中使用的绝缘电阻测量仪最大量程为 $1060\text{G}\Omega$, 可得出该电连接器在实验室压力下绝缘性能正常。

使用空气压缩机将压缩空气打入水箱模拟水下高压环境; 将电连接器母头固定在水箱一端; 电连接器公头插针端与水箱一端动密封连接, 尾端固定于气动装置模拟插拔工况。此时电连接器公头和母头处于插合状态, 故只测量电连接器母头各触点的绝缘阻值, 结果如图 15 所示。

绝缘电阻测试					
验收标准: ● 绝缘阻值 $\geq 11\text{G}\Omega$					
母头绝缘电阻测试值 ($\text{G}\Omega$)					
环境温度			环境温度		
触点	测试值	验收	触点	测试值	验收
1-2	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-4	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-3	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	2-壳	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-4	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-4	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
1-壳	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	3-壳	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐
2-3	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐	4-壳	1060 G Ω	合格 ☒ 不合格 ☐



Figure 15. Simulating insulation resistance measurement under 1500 m pressure

图 15. 模拟水下 1500 m 压力下绝缘电阻测量

测试水箱中测量绝缘阻值大小仍处于绝缘电阻测量仪最大量程, 故可得出结论, 在多级隔膜密封的结构下, 次级隔膜内无过量水涌入, 电连接器的密封效果能符合水下 1500 m 的工况要求。

5.2. 插拔力测试实验

插拔力测试实验应用数显拉力试验机，分别测量电连接器公头母头对心插拔和偏心插拔的插拔力，结果如图 16 所示。

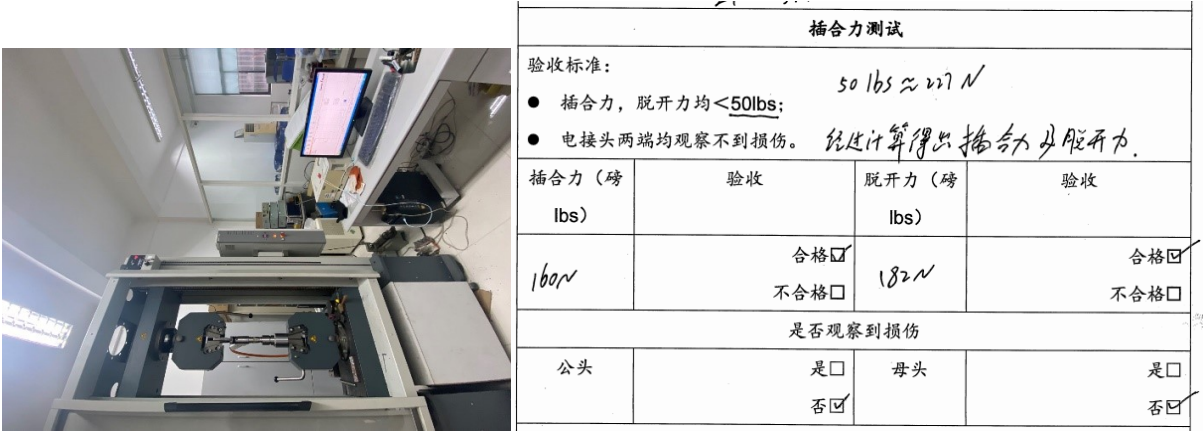


Figure 16. Electrical connector to core insertion and withdrawal force measurement
图 16. 电连接器对心插拔力测量

调整电连接器公头母头的相对位置，使其偏心插合并测量插拔力，结果如图 17 所示。

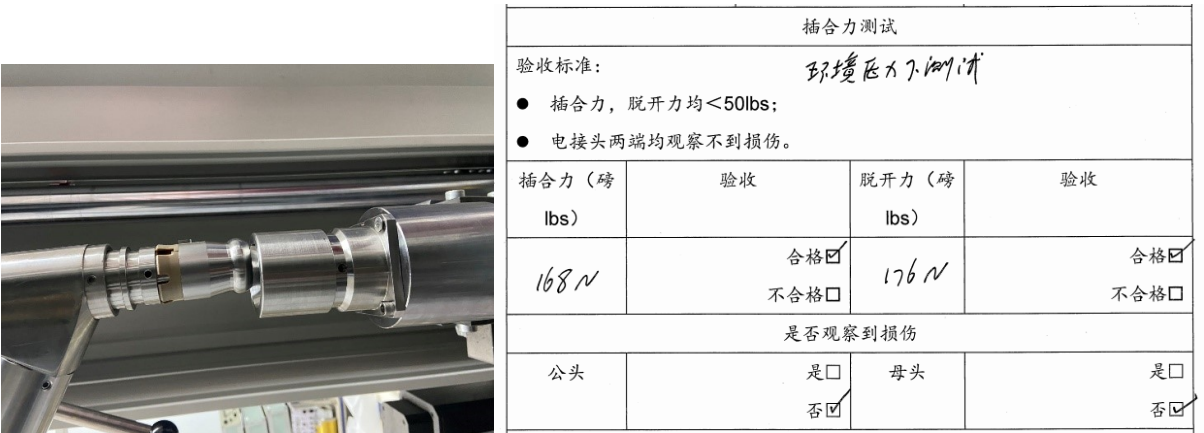


Figure 17. Electrical connector eccentric insertion and withdrawal force measurement
图 17. 电连接器偏心插拔力测量

插合力的理论计算值约为 156 N，实验结果略大于 156 N，且符合插合力、脱开力均小于 50 lbs 的标准，故该电连接器在工作时不会由插拔力过大损伤密封件。

5.3. 电接触性能测试实验

电接触性能测试实验应用接触电阻测试仪，测量电连接器公头母头对接后插针与插芯的接触电阻，并测量在 25 次测试水箱湿式插拔后接触电阻的变化，检验其水下插拔寿命，结果如图 18~19 所示。

实验中触点“1-1”表示公头插针 1 和母头插芯 1 对接之后的接触电阻阻值。测得接触电阻阻值不大于 10 mΩ；经 25 次测试水箱内湿式插拔后，其接触电阻阻值浮动不超过 10 mΩ，则该电连接器的电接触性能满足深海 1500 m 的工况。

接触电阻		
验收标准:		
● 测量阻值-线阻 < 10mΩ; ● 针与针之间测量值不超过±10mΩ。		
触点	接触电阻 (mΩ)	验收
1-1	$39.328 - 18.11 - 18.40 = 1.818 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
2-2	$39.02 - 18.27 - 18.32 = 2.43 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
3-3	$38.55 - 18.24 - 18.29 = 2.02 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
4-4	$42.397 - 18.36 - 18.34 = 5.697 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐

Figure 18. Contact resistance measurement in laboratory environments

图 18. 实验室环境接触电阻测量



测试压力下插拔测试后 ✓		
接触电阻		
验收标准:		
● 测量阻值-线阻 < 10mΩ; ● 针与针之间测量值不超过±10mΩ。		
触点	接触电阻 (mΩ)	验收
1-1	$37.1 \text{ m}\Omega - 37 \text{ m}\Omega = 0.1 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
2-2	$43.5 \text{ m}\Omega - 37 \text{ m}\Omega = 6.5 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
3-3	$37.4 \text{ m}\Omega - 37 \text{ m}\Omega = 0.4 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐
4-4	$37.1 \text{ m}\Omega - 37 \text{ m}\Omega = 0.1 \text{ m}\Omega$	合格 ☒ 不合格 ☐

Figure 19. Contact resistance measurement after 25 wet insertions

图 19. 25 次湿式插拔后接触电阻测量

6. 结论

本文提出了一种深海电连接器的结构设计, 针对其密封性、插拔力及电接触性能做出详细论述, 采用多级密封保证电连接器的绝缘性能; 应用二级压力平衡技术, 设计次级隔膜基本尺寸, 平衡插拔力; 应用冠簧作为电连接接触件, 增加了电连接可靠性, 减小了接触电阻阻值。最后设计测试实验, 模拟 1500 m 水深环境对电连接器结构进行实验验证, 证明电连接器结构设计可靠性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Wang, C.M., He, S.X. and Wu, H.Y. (2018) An Implementable SAA Nonlinear Lagrange Algorithm for Constrained Minimax Stochastic Optimization Problems. *Mathematical Problems in Engineering*, No. 4, Article 5498760.
- [3] 何宏文, 甘屹, 张鹏举. 基于动密封过程的深海电连接器插合力研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(9): 81-88.
- [4] 陈海洋, 杨文聪, 韩权, 邵丽影, 张艳. 水下电连接器的囊式压力平衡装置特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(2): 45-47+53.
- [5] 周权, 雷永涛, 叶宇, 王旭, 蓝菲. 电连接器冠簧接触件结构分析及其接触可靠性[J]. 机电元件, 2015, 35(1): 44-47.