

基于锡合金的水下机器人密封自修复系统设计

赵俐蓉¹, 段捷^{1*}, 赵河明¹, 于静²

(1.中北大学 长治产业技术研究院, 山西 长治 046012;

2.中国船舶集团有限公司第七一四研究所, 北京 100101)

摘要: **目的** 解决水下机器人推进器密封系统在驱动电机轴高速旋转和高水压情况下, 密封件易磨损失效导致发生漏水故障的问题。**方法** 利用冗余设计思想, 在原有密封结构的基础上, 设计一种基于锡合金的水下机器人密封自修复系统, 当原有密封结构失效漏水, 密封自修复系统便控制限位锡合金块加热至融化, 使锡合金块的限位作用消失, 进而释放冗余密封圈, 并通过拉簧的作用将冗余密封圈推至密封槽内, 从而恢复推进器的密封功能。为验证设计的可靠性, 又通过有限元软件 ANSYS 对密封自修复结构中影响密封性能的关键部件进行静力学分析。**结果** 关键部件的强度仿真结果均满足设计要求, 在密封自修复实验装置箱体内存注适量水, 并施加 2 MPa 的水压保持一段时间, 密封自修复系统成功启动, 且其密封性能传感器未检测到其漏水。**结论** 密封自修复系统可在漏水的情况下顺利启动, 并起到密封的作用, 验证了设计的可行性。

关键词: 水下机器人; 漏水故障; 冗余设计; 密封自修复; 锡合金; 静力学分析

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)02-0089-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.012

Design of Seal Self-repairing System Based on Tin Alloy for Underwater Vehicle

ZHAO Lirong¹, DUAN Jie^{1*}, ZHAO Heming¹, YU Jing²

(1. Changzhi Industrial Technology Research Academy, North University of China, Changzhi 046012, China;

2. The 714th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Beijing 100101, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the sealing element of the underwater vehicle propeller seal system is prone to wear failure, causing water leakage when the motor shaft runs at high speed and high pressure. A seal self-repairing system based on tin alloy and original sealing structure for underwater vehicle was designed by the idea of redundancy design. When the original sealing structure failed and leaked water, the self-repairing system controlled the limit tin alloy block for heating and melting, so that the limiting effect of the tin alloy block disappeared, and then released the redundant sealing ring, and pushed the redundant sealing ring into the sealing slot through the action of the tension spring, thus restoring the sealing function of the propeller. In order to verify the reliability of the design, the static analysis of the weak parts of the seal self-repairing structure was carried out by the finite element software ANSYS. The strength simulation results of key components met the design requirements, and the self-repairing system was successfully started by injecting proper amount of water into the box of the self-repairing experimental device and applying 2 MPa water pressure for a period of time, and its sealing performance sensor did not detect water leakage. The results show that the seal self-repairing system can start smoothly under

收稿日期: 2023-12-19; 修订日期: 2024-02-03

Received: 2023-12-19; Revised: 2024-02-03

引文格式: 赵俐蓉, 段捷, 赵河明, 等. 基于锡合金的水下机器人密封自修复系统设计[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 89-96.

ZHAO Lirong, DUAN Jie, ZHAO Heming, et al. Design of Seal Self-repairing System Based on Tin Alloy for Underwater Vehicle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 89-96.

*通信作者 (Corresponding author)

the condition of water leakage and play the role of sealing, which verifies the feasibility of the design.

KEY WORDS: underwater vehicle; water leakage; redundancy design; seal self-repairing; tin alloy; statics analysis

随着人们对海洋的研究越来越深入,作为探索和研究海洋必不可少的工具,水下机器人能否高效顺利地完成任务变得尤为重要,对我国海洋战略的发展有着重大的意义。与电子元器件故障一样,水下机器人的密封失效也是一种常见的故障形式。现在的水下机器人普遍采用的驱动器大都是电机驱动,电机主轴与壳体之间的密封结构由于密封件的磨损易发生泄露,当水流进舱体,容易使推进系统发生故障^[1-3]。

针对水下设备的密封性问题,研究者们做了许多探索。Muhammad等^[4]通过将聚丙烯酸钠作为一种高吸水性聚合物应用于有受损部位的水下航行器实验模型,通过实验发现其能够迅速膨胀堵塞破损的泄漏孔,但吸水材料由于吸水后使得航行器一侧质量增加,容易引起失衡。Huang等^[5]针对水下航行器设计了一种压力自适应水密接线盒,采用活塞和钛膜压力自适应补偿器,使内部压力总是略高于外部水压,达到了很好的密封效果,但其结构占用空间较大,设计比较复杂。王雷等^[6]针对水下机器人推进器密封性问题,通过采用带钛合金隔离套的筒式永磁推进器将动密封转化为静密封,实验表明,这种永磁推进器传扭能力强,密封性能更好,但其对所用的永磁材料以及隔离套材料要求较高,整个磁路设计以及结构排列比较复杂。陈饰勇等^[7]为了减小密封结构处密封圈在高水压下的变形失效问题,设计了两级O形锯齿状密封结构,提高了密封效果。虽然其结构简单,但得到最优结构参数的难度较大。因此,设计一种小体积、结构简单、用材普通但又能够实现高效密封的水下密封结构意义重大。

综上所述,本文利用冗余设计思想,设计了一种基于锡合金的水下机器人密封自修复系统,通过添加的密封系统冗余机构来提高水下机器人的密封效果。通过对系统薄弱部件进行有限元静力学分析,验证设计的可靠性。最后通过实验证明了密封自修复系统的漏水检测功能、修复功能和密封性能均能达到设计要求。

1 密封自修复系统设计

O形密封圈具有结构简单、造价低廉、安装使用方便、密封性能优良等特点^[8]。水下机器人推进器动密封使用O形橡胶密封圈作为密封元件,可以节约设计成本,降低维修费用,且能够满足动密封使用要求^[9-10]。因此,在密封自修复系统中,最终也是通过推动密封冗余结构中的O形密封圈实现再次密封。

1.1 总体设计方案

基于冗余思想设计的水下机器人密封自修复结构原理如图1所示。冗余技术是通过再额外增加1组或多组同样的部件或系统来提高其完成任务的可靠性^[11],其基本思想是通过多个相同可靠性低的部件或零件,组成一个可靠性较高的设备或系统^[12-13]。冗余机构是借助冗余思想通过备份相同的结构零件,当被备份的结构件发生故障时,冗余结构可以替代发生故障部件,并替代故障部件的工作,从而降低系统的故障率和故障时间^[14-15]。所研究的水下机器人在海水下作业的最大深度为200 m,在不考虑海水盐度、温度等的影响下,其推进器动密封结构O形密封圈受到的海水压力 P 约为2 MPa。

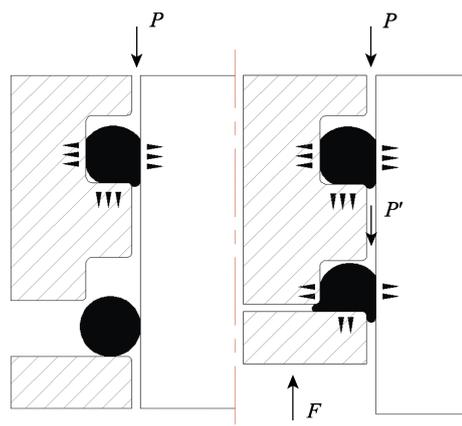


图1 密封自修复结构设计原理

Fig.1 Schematic diagram of seal self-repairing structure design

当推进器原有密封结构没有漏水时,密封自修复结构的冗余O形密封圈没有参与密封动作,处于空闲状态。此时,当推进器的电机主轴开始工作进行转动时,仅原有密封结构的主密封圈起到密封效果,并受水压 P 的作用。当推进器原有密封结构发生漏水,水会顺着轴和壳体间的缝隙流进其后面的密封自修复结构中,结构中的故障检测传感器会发现漏水故障,控制模块便驱动执行机构动作,将密封自修复结构中的冗余O形密封圈推到密封槽内,开始发挥密封作用。此时的冗余O形密封圈受到泄露的水压 P' 和结构中推力 F 的共同作用,只要保证推力 F 大于水下机器人在下潜时所受海水压力 P ,即可保证密封自修复结构的密封功能。密封自修复系统总体设计框图如图2所示。基于以上密封自修复系统的总体设计方案,完成了对密封自修复系统整体结构的设计,其中O形密封圈选用邵氏A70的丁腈橡胶密封圈,整

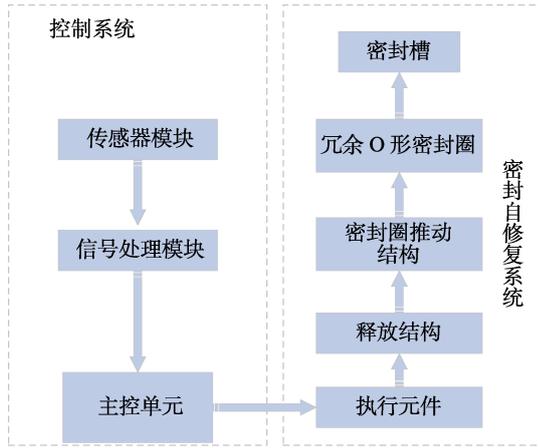


图 2 密封自修复系统总体设计框图
Fig.2 Overall design of seal self-repairing system

体结构的三维模型如图 3 所示。

自修复系统的工作原理: 当 O 形密封圈磨损漏水后, 水会顺着轴和壳体间的缝隙流进其后面的密封自修复结构中; 当水接触到环形槽中的漏水传感器时, 控制系统会控制加热棒将锡合金块加热至熔化, 使得对旋转环的限位作用消失; 旋转环在拉簧的拉动作用下产生旋转运动, 并脱离碟簧导杆圆柱面上的环形槽, 此时, 4 个碟簧导杆则被取消限位并释放, 进一步导致内环被释放; 在 4 组组合碟簧的推动下, 内

环会沿着轴向运动, 将冗余 O 形密封圈推到密封圈座的密封槽中, 并产生预压缩力, 使推进器的密封功能恢复正常。

1.2 密封自修复系统结构组成

1.2.1 碟形弹簧

碟形弹簧外形为圆锥形, 一般由薄板冲压形成, 其结构如图 4 所示。在密封过程中, 当密封圈发生磨损后, 碟簧对密封圈产生的持续压缩力可以使密封圈发生变形, 补偿密封圈的磨损量。在设计组合碟簧时, 要保证内环轴向运动有足够的位移, 防止内环未释放前挤压冗余 O 形密封圈, 使 O 形密封圈发生提前磨损, 还要保证其释放的推力大于摩擦力以及海水压强。

在 200 m 水下深度下, 海水压强对水下机器人的冗余 O 形密封圈产生的最大推力为:

$$F_q = \pi \left[(d_1/2 + h_0)^2 - d_1^2/4 \right] P \quad (1)$$

式中: d_1 为电机主轴直径, mm; h_0 为密封槽槽底到被密封面的距离, mm。

碟簧载荷的计算公式为^[16]:

$$F = \frac{4E}{1-\mu^2} \times \frac{t^4}{K_1 D^2} K_2^2 \frac{f}{t} \left[K_2^2 \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{2t} \right) + 1 \right] \quad (2)$$

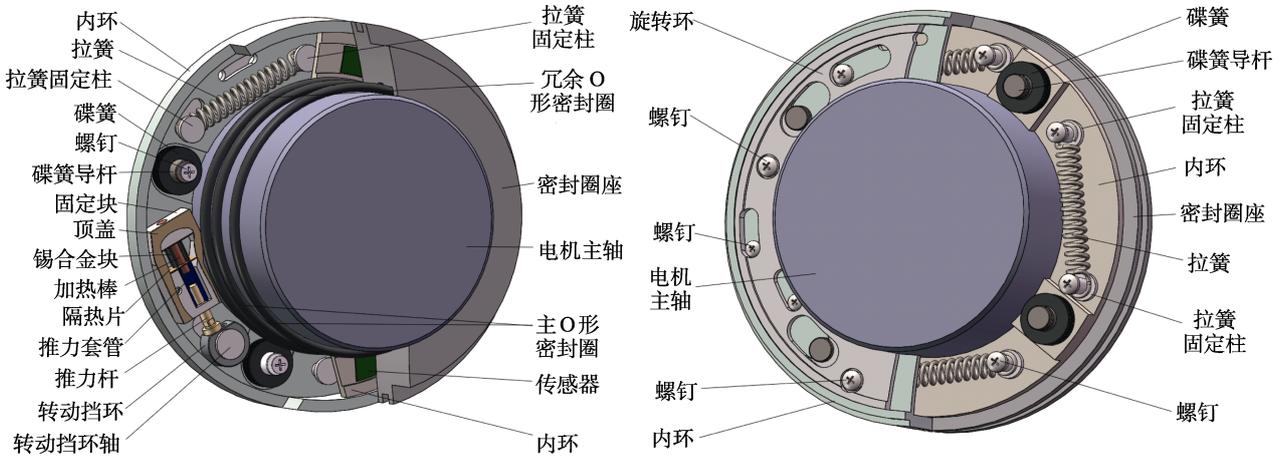


图 3 自修复系统三维模型
Fig.3 3D model of self-healing system

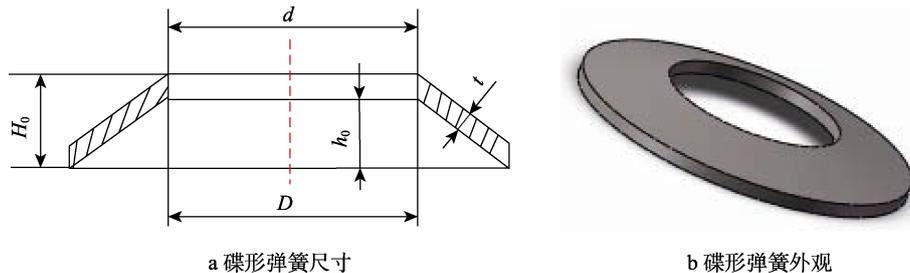


图 4 碟形弹簧

Fig.4 Belleville spring: a) dimensioning of the belleville spring; b) the appearance of the belleville spring

式中： F 为单个弹簧载荷，N； t 为碟簧厚度，mm； D 为碟簧外直径，mm； f 为单片碟簧的变形量，mm； E 为弹性模量，MPa； μ 为泊松比； K_1 、 K_2 为计算系数。

4 组碟簧对内环产生的推力为：

$$F_1' = 4F_1 \quad (3)$$

因此，在设计碟簧时，要保证推力大于海水推力 F_q 即可。每组选用 10 个碟簧，且为对合组合，安装于外环与内环之间，如图 5 所示。

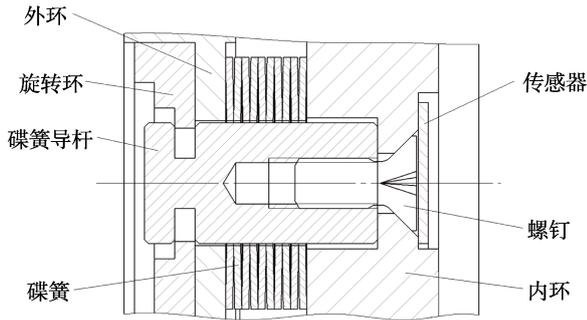


图 5 组合碟簧安装图

Fig.5 Installation diagram of the combined belleville spring

1.2.2 内环释放结构

内环释放结构的主要功能是当动密封结构未漏水时锁紧内环，当动密封漏水时，能够可靠地将内环释放，释放结构如图 6 所示。

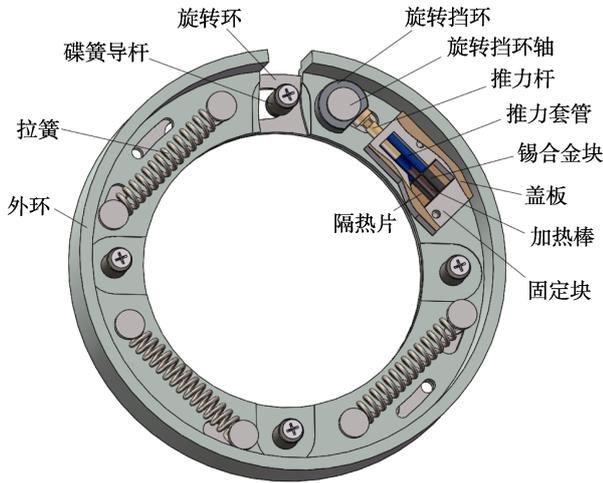


图 6 释放结构

Fig.6 Diagram of release structure

在内环释放结构中，拉簧为旋转环的旋转运动提供转矩，固定块利用螺钉固定在外环上，推力杆与推力套管为螺纹联接，锡合金块将推力套管限制在固定块内，推力杆又将转动挡环限制在推力套管上，转动挡环安装在转动挡环轴上，转动挡环轴利用螺钉固定在旋转环上，最终旋转环被锡合金块限制在外环上。当锡合金块熔化后，锡合金对旋转环的限位作用

消失，旋转环在拉簧的拉力作用下相对外环发生旋转，碟簧导杆被释放，即内环被释放。旋转环在旋转的过程中，旋转挡环相对旋转挡环轴转动，旋转挡环与推力杆为面接触，且相对滑动，防止旋转挡环与推力杆卡死。设计固定块时，考虑了锡合金熔化受压后液态锡合金的排放空间。盖板的作用是防止锡合金块熔化后泄漏到自密封结构中。

1.2.3 拉伸弹簧

拉伸弹簧是承受轴向拉伸载荷的螺旋弹簧，是释放结构的关键元件，如图 7 所示。本文选用圆截面的圆形圆柱螺旋拉簧，拉簧储能释放后，提供的拉力应保证能够拉动旋转环运动，释放碟簧导杆。

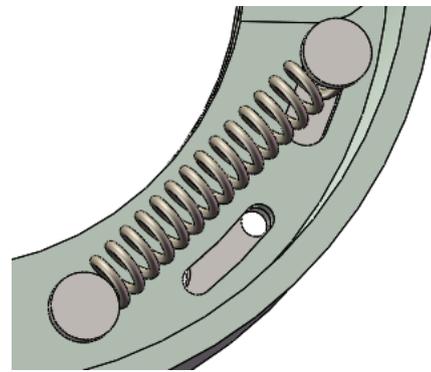


图 7 拉伸弹簧

Fig.7 Tension spring

自密封结构释放前，旋转环通过卡住碟簧导杆圆柱面环形凹槽将内环锁紧在外环上，内环受到每组组合碟簧的推力 F_2 ，旋转环受到每个碟簧导杆的拉力也为 F_2 ，那么旋转环在释放碟簧导杆时产生旋转运动需要克服的最大摩擦力矩为^[17]：

$$T_f = nijF_2r_1 \quad (4)$$

式中： n 为碟簧拉力的组数； i 为摩擦面的面数； j 为静摩擦系数； r_1 为每组组合碟簧产生的推力到旋转中心的距离，mm。

如果想要弹簧可靠地拉动旋转环，弹簧需要提供的最小力矩为^[18]：

$$T_s = ST_f \quad (5)$$

式中： S 为安全系数。

设计时，选用 3 个拉簧提供旋转环所需的力矩，则弹簧所需要的拉力为：

$$F_{拉} \geq \frac{T_s}{kr_2} \quad (6)$$

式中： k 为拉簧的个数； r_2 为弹簧拉力到旋转中心的距离，mm。

1.2.4 加热装置

锡铅合金由于晶粒细小，韧性良好，软硬合适，可通过机加工或材料成形工艺制造成机械零件^[19-20]。

密封冗余结构一般可通过形状记忆合金的形状改变以及电机带动凸轮转动来取消限位进行释放, 与这些结构相比, 锡合金块限位消耗的能量更少, 占用的空间更小, 保证有充足的空间来设置弹簧组以提供足够的释放推力^[21-22]。因此, 本方案通过控制锡合金的物理状态的变化来控制释放结构的启动。

加热释放前, 锡合金块呈固态, 锡合金具有一定的机械强度, 可以限制旋转环的位置。加热后, 锡合金块受热熔化, 由固态变成液态, 其机械强度大大降低^[23], 对旋转环的限位作用消失。因此, 拉簧将拉动旋转环产生旋转运动, 释放碟簧导杆, 进而释放内环, 加热装置实物如图 8 所示, 加热棒放置于锡合金块的孔内。



图 8 加热棒
Fig.8 Heating rod

在 20 °C 的实验室环境下, 对加热棒的加热特性进行测试, 通过 TES-1310 温度仪测得加热棒在额定电压 27 V 工作时, 在 10 s 时达到 200 °C 左右, 超过锡合金熔点温度 (183 °C)^[24], 锡合金开始熔化。若在锡合金块与其他零件接触的位置用隔热片隔开, 加热释放机构可在较短的时间内释放内环。

1.3 关键部件强度仿真

经过以上环节, 基于锡合金的水下机器人密封自修复系统已设计完毕, 设计参数见表 1。还需要对影响密封自修复系统主要功能的关键部件内环与外环进行分析, 通过分析以上部件的受力变形, 可以验证其是否会对密封自修复结构内环推动并压紧冗余 O 形密封圈的过程产生影响, 为密封结构的设计和改进行提供依据。

1.3.1 外环强度分析

外环材料选用 45 钢, 对外环与固定块的固定螺钉接触处施加全约束, 在外环与拉簧固定杆 B 的固定螺钉接触的半个圆柱面、外环与旋转环接触的面上以及外环与碟簧接触的面上分别添加 30、0.19、1.7 MPa 的面载荷。通过 ANSYS 软件对外环进行强度分析, 分析结果如图 9 所示。

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameter

参数	数值	参数	数值
电机主轴直径 d_1 /mm	43	弹性模量 E /MPa	2.06×10^{11}
槽底到被密封面距离 h_0 /mm	1.8	泊松比 μ	0.3
碟簧厚度 t /mm	0.35	碟簧拉力组数 n	4
碟簧外直径 D /mm	12.5	摩擦面面数 i	2
单片碟簧变形量 f /mm	0.20	静摩擦系数 j	0.15
安全系数 S	1.5	碟簧产生推力到旋转中心的距离 r_1 /mm	21
弹簧拉力到旋转中心距离 r_2 /mm	21		

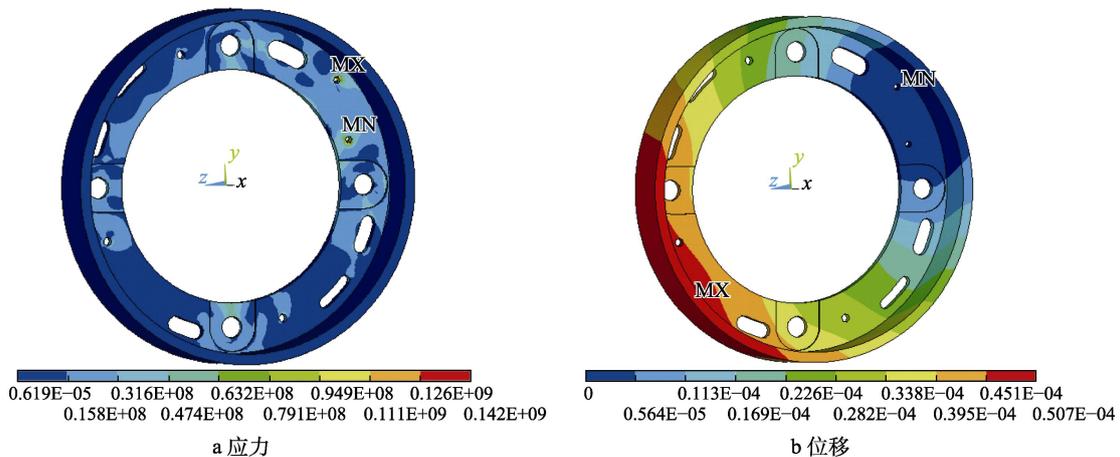


图 9 外环静力学分析结果
Fig.9 Results of static analysis of the outer ring: a) stress; b) displacement

由图 9a 可知，外环固定块的固定螺钉通孔处应力最大，最大处应力为 142.1 MPa，小于 45 钢的屈服强度 355 MPa^[25]，外环的结构设计和材料选择能够满足其强度要求。由图 9b 可知，外环的最大变形位移为 0.05 mm，且该处在外环的边缘，变形量很小，不会对内环的释放造成影响，其刚度能够满足设计要求。

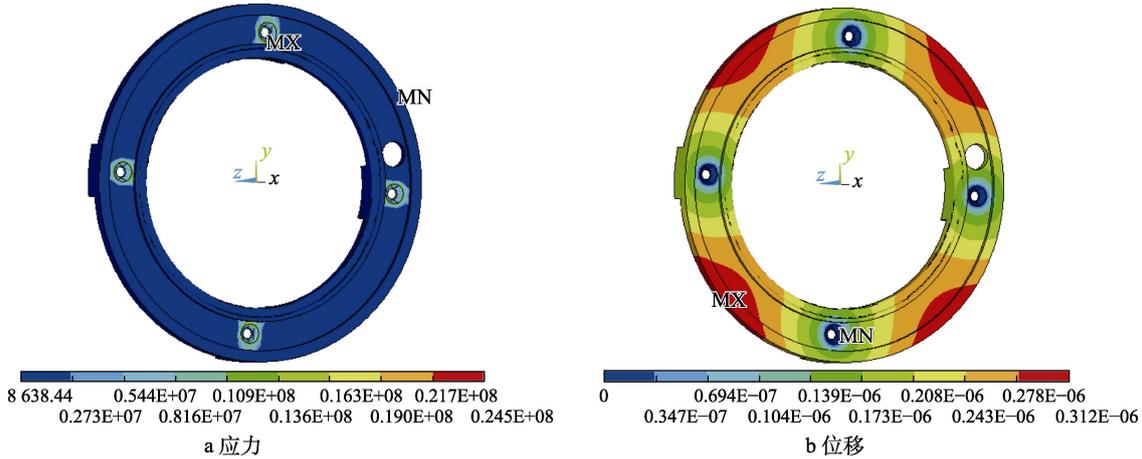


图 10 内环静力学分析结果
Fig.10 Results of static analysis of the inner ring: a) stress; b) displacement

由图 10a 可知，内环与螺钉接触处的应力最大，最大处应力为 24.51 MPa，小于 45 钢的屈服强度 355 MPa，能够满足其强度要求。由图 10b 可知，内环的最大变形位移为 0.000 3 mm，变形很小，其刚度能够满足设计要求，不会对内环的释放及自密封结构的密封性造成影响。

2 实验结果

实验采用陆上模拟实际使用环境，设计一个密封自修复试验装置（如图 11 所示），包括试压泵、兆信 ZF-302D 直流稳压电源、可调速直流电机、试验样机、注水设备、联轴器等。密封自修复系统电机主轴在转速(410±10)r/min 条件下转动，利用加压装置给密封试验装置水箱加压(2±0.2)MPa，人为向原有主密封结构中注入水滴（每次注射的水量均小于 1 mL），模拟由于动密封 O 形密封圈磨损导致的漏水故障，持续保压 10 min。

30 次的实验结果显示，当注射器往原有密封结构内注射适量的水后，观测到漏水传感器指示灯均变亮，说明密封自修复系统漏水故障检测功能能够满足要求。在 30 次试验中，听到密封自修复结构均释放（内环释放时，与其他零件碰撞会发出一定的声响），并且记录到试压泵的压力值均保持在 2 MPa 附近不变，密封自修复系统密封性检测传感器指示灯均未亮，说明密封自修复系统在原有密封条件失效的情况下，工作可靠，没有再次漏水。

1.3.2 内环强度分析

内环材料同样选用 45 钢，在内环与螺钉接触的圆锥面上施加全约束。内环与碟簧为面接触，且受组合碟簧的推力，所以在两者的接触面上添加面载荷 1.8 MPa。利用 ANSYS 软件对外环进行应力分析，分析结果如图 10 所示。

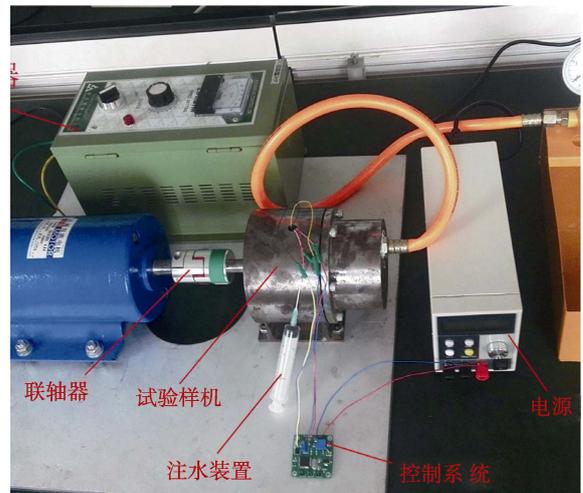


图 11 密封自修复系统实验装置
Fig.11 Seal self-repairing system experimental device

3 结论

本文利用冗余设计思想，在原有密封结构的基础上，设计了一种基于锡合金的水下机器人密封自修复系统，并进行了实验验证，结论如下：

1) 通过对水下机器人密封自修复系统各主要部件进行设计，搭建了整体结构的三维模型，并通过有限元静力学分析，验证了密封自修复系统在发挥作用时，所设计的关键部件均能满足刚度和强度要求，不会对密封过程产生不利影响。

2) 原有密封失效, 水流开始渗透, 被传感器检测到内环释放压紧冗余密封圈的较短时间内, 锡合金块凭借其优越的物理特性, 快速熔化, 保证了系统在水流渗透冗余密封圈之前发挥密封作用。

3) 通过实验证明, 密封自修复系统能够准确地检测原有密封结构漏水情况, 并可靠地开启密封自修复功能, 密封自修复系统的密封性能能够达到设计要求。

参考文献:

- [1] 冯森. 自补偿式水下推进器的设计及其密封和水动力性能研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(5): 141-147.
FENG S. Design of Self Compensating Underwater Propeller and Its Sealing and Hydrodynamic Performance[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(5): 141-147.
- [2] 桑勇, 王旭东, 邵利来. 水下机器人液压缸 O 形密封圈的有限元分析[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(5): 18-22.
SANG Y, WANG X D, SHAO L L. Finite Element Analysis of Cylinder O-Ring for Underwater Hydraulic Vehicle[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38(5): 18-22.
- [3] 王恒, 任杰. 开口缸气动弹射装置密封性能仿真分析与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 59-64.
WANG H, REN J. Simulation Analysis and Experimental Study on Sealing Performance of Open-Cylinder Pneumatic Ejection Device[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(8): 59-64.
- [4] MA G, KAMARUDDIN M H, KANG H S, et al. Water-tight Integrity of Underwater Robotic Vehicles by Self-Healing Mechanism[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1995-2007.
- [5] HUANG H C, YE Y Y, LENG J X, et al. Study on the Pressure Self-Adaptive Water-Tight Junction Box in Underwater Vehicle[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(3): 302-312.
- [6] 王雷, 贾振元, 刘鑫, 等. 水下机器人永磁推进器关键特性[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(4): 33-39.
WANG L, JIA Z Y, LIU X, et al. The Key Characteristics of the Permanent Magnet Thruster for Underwater Vehicle[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(4): 33-39.
- [7] 陈饰勇, 刘晓初, 王立涛, 等. 基于分解压力原理的水下机器人主体密封结构设计[J]. 润滑与密封, 2018, 43(4): 104-107.
CHEN S Y, LIU X C, WANG L T, et al. The Sealing Structure Design for Pressure Decomposition of Underwater Vehicle Body[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(4): 104-107.
- [8] WU J B, LI L. Influence of Ambient Pressure on Sealing Performance of O-Ring in Deep-Sea Hydraulic System[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110440.
- [9] LIU D, YUN F H, JIAO K F, et al. Structural Analysis and Experimental Study on the Spherical Seal of a Subsea Connector Based on a Non-Standard O-Ring Seal[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(3): 404.
- [10] CAO S M, BENNETT J C, WANG Y K, et al. Si-TiN Alloy Li-Ion Battery Anode Materials Prepared by Reactive N₂ Gas Milling[J]. Journal of Power Sources, 2019, 438: 227003.
- [11] LI L, WANG S Q, ZHANG Y Y, et al. Aerial-Aquatic Robots Capable of Crossing the Air-Water Boundary and Hitchhiking on Surfaces[J]. Science Robotics, 2022, 7(66): eabm6695.
- [12] 林木栋, 赵河明, 赵紫甜, 等. 基于形状记忆合金水下机器人推进器自密封系统设计[C]//《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(中册). 重庆:《环境工程》编辑部, 2019.
Ling Mu-dong, Zhao He-ming, Zhao Zi-tian, et al. Design of Self-Sealing System Based on Shape Memory Alloy for Under Water Robot Propeller[C]// Proceedings of the 2019 National Academic Conference on Environmental Engineering (Volume). Chongqing: Editorial Department of Environmental Engineering, 2019.
- [13] WANG, GUO, ZHONG. An Underwater Vector Propulsion Device Based on the RS+2PRS Parallel Mechanism and Its Attitude Control Algorithm[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23): 5210.
- [14] 邓星星. 水下机器人推进器动密封自修复技术[D]. 太原: 中北大学, 2015.
DENG X X. Dynamic Seal Self-Repairing System of Propulsion for Underwater Vehicle[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [15] GIGLIOTTI A K, BOWEN W D, HAMMILL M O, et al. Sequence Diversity and Differences at the Highly Duplicated MHC-I Gene Reflect Viral Susceptibility in Sympatric Pinniped Species[J]. The Journal of Heredity, 2022, 113(5): 525-537.
- [16] DE JESÚS ASTACIO A L M, PRABHAKARA K H, LI Z Q, et al. Closed Microbial Communities Self-Organize to Persistently Cycle Carbon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(45): e2013564118.
- [17] TIWARI R, KIM J. Multi-Cell, Triple Pane, Vacuum Insulated Glazing[J]. Solar Energy, 2022, 245: 340-352.
- [18] ALNATHEER S, AHMED M A. Optimal Method for Test and Repair Memories Using Redundancy Mechanism for SoC[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 811.
- [19] MAZZETTA I, VITI L, RIGONI F, et al. Microwave Driven Synthesis of Narrow Bandgap Alpha-Tin Nanoparticles on Silicon[J]. Materials & Design, 2022, 217: 110632.
- [20] XIAO Y Y, CAO L, WANG G C, et al. Formation and Precipitation Mechanism of TiN Inclusion in Mg-Treated GCr15 Bearing Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(2): 916-930.

- [21] GUO Y F, JING J F, CHEN F, et al. Selective Separation of Tin from Tin-Bearing Middling via Sulfur Roasting[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 27: 102545.
- [22] LIANG B L, YANG X, WANG Z L, et al. Influence of Randomness in Rubber Materials Parameters on the Reliability of Rubber O-Ring Seal[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1566.
- [23] ZHANG J, XIE J X. Investigation of Static and Dynamic Seal Performances of a Rubber O-Ring[J]. *Journal of Tribology*, 2018, 140(4): 042202.
- [24] GADE J, TKACHUK A, VON SCHEVEN M, et al. A Continuum-Mechanical Theory of Redundancy in Elastostatic Structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, 226/227: 110977.
- [25] NI T M, CHANG H, YAO Y, et al. A Novel Built-in Self-Repair Scheme for 3D Memory[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 65052-65059.