

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.020

基于油压补偿的换能器结构设计与分析研究

马彦超, 顾磊, 李杰

(上海船舶电子设备研究所 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108)

摘要:在深海水声通信、水声定位等领域,对工作于深海高静水压环境下的换能器有着广泛的应用前景和日益迫切的使用需求。设计一种基于油压补偿的深海换能器新结构,使其能在 30 MPa 工作环境压力下稳定运行。在分析该结构油压补偿工作原理的基础上,基于该模型进行仿真分析。依据结构设计及仿真分析结果制作深海换能器样机,开展相关试验研究。研究结果表明:该设计方案可在减轻换能器质量的同时,显著提高换能器结构的深水耐压生存能力。

关键词:深海换能器;油压补偿;油囊;结构设计;建模

中图分类号:TB565.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0110-05

Research and Analysis on Structural Design of Transducers Based on Oil Pressure Compensation

MA Yanchao, GU Lei, LI Jie

(Key Laboratory of Science and Technology of Underwater Acoustic Antagonizing, Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract:As transducers capable of working in deep-sea high hydrostatic pressure environments in the fields of deep-sea acoustic communication, underwater acoustic positioning etc. have broad application prospects and increasingly urgent usage demands, a new structure of deep-sea transducer based on oil pressure compensation is designed for stable operation under a working environment pressure of 30 MPa. According to the analysis on the working principle of oil pressure compensation in this structure, the simulation analysis was carried out based on the model. A deep-sea transducer prototype was produced in accordance with the structure design and simulation analysis results, and related experimental research was implemented accordingly. The research results indicate that the design scheme can significantly enhance the deep-sea pressure survivability of the transducer structure while reducing its mass.

Keywords:deep-sea transducer; oil pressure compensation; oil bladder; structural design; modeling

0 引言

我国十分重视海洋的开发与利用,将海洋强国的建设作为实现中华民族伟大复兴的重大战略任务^[1],并大力推进海洋工程装备和深海科学研究的创新发展。作为海洋工程装备和深海科学研究领域关键核心技术之一的深海水声技术日趋兴起并蓬勃发展,而深海换能器技术是助力深海水声技术蓬勃发展的强力技术支撑。

深海环境主要从温度和静水压力两个方面钳制着换能器的性能^[2]。深海环境温度随着深度的变化而变化,随之所带来的是换能器电容、阻抗性能的变化,并进一步导致换能器与发射机之间的匹配失效。而静水压力从材料的应力-应变特性、机电特性以及无源材料的力学和声学性能等多方

面对换能器性能造成不利影响,换能器受到的静水压力随着工作深度的增加而线性增大,这就对换能器的静态机械刚度提出了更高要求。因此对应用于深水环境的换能器而言,必须考虑高静水压对换能器本体的影响,否则换能器可能无法正常工作。这就需要针对换能器的实际工况采取相应的压力补偿措施来弱化静水压力对其不利影响,而压力补偿措施的基本原理皆为通过增加结构内部的压力使换能器内外压平衡,提高换能器结构的耐压性能。当前应用于深海环境的换能器结构形式主要分为自支撑耐压结构^[3]、自由浸没耐压结构^[4-8]、液体补偿耐压结构^[9-10]、气体补偿耐压结构^[11-13]以及顺性管液腔^[14]等 5 类。国内外众多学者已陆续开展了相关研究,也取得了一定研究成果,但其仍存在结构较复杂、声特性随深

第一作者简介:马彦超(1996—),男,山东日照人,助理工程师,硕士,研究方向为水声换能器结构设计, mayanchao@nuaa.edu.cn。

度变化以及深度限制等不足。目前已有学者在深海液压系统领域采用柔性橡胶油囊与密封腔体相连接,并将其内部充满油液,利用橡胶油囊弹性变形实现自适应的压力补偿方式来提高系统耐压性能^[15],该压力补偿方式亦适用于深海换能器,如图1所示。虽然外接皮囊的换能器结构形式可在不增加其刚性结构质量的前提下大幅提高换能器的耐压性能,但考虑到系统因压力补偿时引入的油液质量,因此该型深海换能器在高耐压性和轻质量的兼容性上仍存在不足与缺陷。

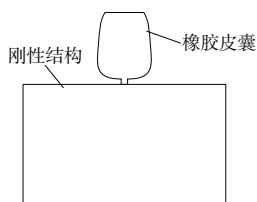


图1 外接皮囊型深海换能器

本文针对镶拼圆环换能器的结构特点,综合考虑高静水压、声转换效率、轻质量以及透声性等因素,提出一种油压补偿的刚-柔耦合式深海耐压换能器结构,以解决传统深海换能器在追求高耐压性时,因压力补偿导致系统质量增加而引起的系统高耐压性和轻质量的兼容性存在不足的问题。采用该结构的镶拼圆环换能器可在30 MPa工作环境压力下稳定运行。

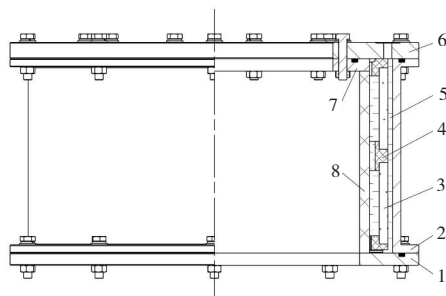
1 油压补偿的刚-柔耦合式换能器结构设计及工作原理

1.1 油压补偿的刚-柔耦合式换能器结构设计

油压补偿的刚-柔耦合式换能器结构如图2所示;内衬灌封前、后示意图如图3所示。

从图3(a)中可以看到,上顶板和下底板由10根圆周均布的连接杆刚性连接形成组合体,上顶板和下底板选用7075合金,连接杆选用304不锈钢。上顶板的下表面和下底板的上表面各自留有一圈圆周均布的凸台,且连接杆上也留有两个通孔,旨在通过增大各结构与灌封层的黏接面积来保证灌封后柔性灌封层与组合体黏接面的牢固性和可靠性。柔性灌封层采用聚氨酯透声橡胶经型腔模具灌封制成,其厚度大于连接杆直径,并在灌封成型过程中将连接杆、顶板下端凸台和底板上端面凸台完全包裹其中,如图3(b)所示。此外,为提高聚氨酯柔性灌封层的耐水性,降低其吸水 and 透水速度,灌封层外侧由防水胶涂覆,内衬实

物如图4所示。由于内衬中采用聚氨酯和少量连接杆代替了原有的7075合金,结构质量在一定程度上得到减轻。



1—下底板;2—外壳;3—镶拼圆环;4—支撑环;5—甲基硅油;
6—端盖;7—上顶板;8—柔性灌封层。

图2 油压补偿的刚-柔耦合式换能器结构

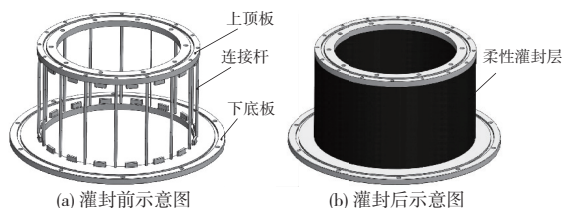


图3 内衬灌封前、后示意图



图4 内衬实物图

由于O形圈密封方式具有结构简单、密封性能好等优点^[16],各结构连接面均采用O形圈的密封方式。结合图2和图3可以看到,外壳的顶部法兰面留有安装O形圈的密封槽,其与端盖在螺栓的刚性连接及O形圈的端面密封下构成了外部金属密封结构,外壳和端盖同样选用7075合金。上顶板和下底板各自留有安装O形圈的密封槽,外壳的底部法兰面与内衬的下底板、内衬的上顶板与端盖均同样采用O形圈密封方式,并在螺栓的刚性连接下两两密封成一体,外部金属密封结构与内衬共同形成了一个封闭腔体。两个镶拼圆环及支撑环同轴按序安装在封闭腔体内部,腔体内部剩余空间则由甲基硅油完全填充。此外,端盖上留有用于注油的进油抽气孔以及安装水密接插件的安装孔。

1.2 工作原理

图5为换能器在深海高静水压作用前、后的结构受力示意图。当换能器置于深海环境时,聚氨酯柔性灌封层在高静水压的作用下发生弹性变形,封闭腔体内部的甲基硅油被压缩。与此同时,外壳亦受到高静水压作用,均产生微小形变共同挤压封闭腔体。从结构整体而言,利用聚氨酯柔性灌封层的弹性形变容积来补偿甲基硅油的压缩体积与外部金属结构内腔体积变化的差值。在此过程中,换能器外部的高静水压与其内部甲基硅油压力始终保持平衡,由此实现油压补偿,提高换能器结构的深海耐压性能。所谓油压补偿简言之就是借助甲基硅油介质,利用聚氨酯柔性灌封层的弹性变形自适应的平衡换能器结构内外压力,提高换能器结构的深水耐压生存能力。

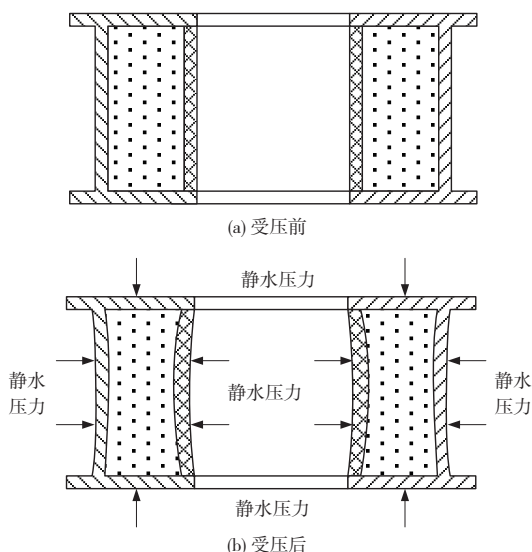


图5 高静水压下作用前、后换能器结构受力示意图

需要注意的是,由于该换能器结构中的端盖厚度(24 mm)相对于外壳、内衬圆柱筒体厚度(12 mm)而言较大,因此本文在后续建模中主要考虑外壳、内衬圆柱筒体变形对该油压补偿过程的影响,端盖受压变形所带来的影响在本文中不做考虑。

2 仿真分析

本节主要对外壳在采用油压补偿前后的受力情况进行有限元仿真,旨在分析油压补偿对于换能器耐压性能提升的效果。由于内衬筒体的耐压性能主要取决于聚氨酯柔性灌封层与上顶板及下底板的连接强度,内衬筒体的耐压性能将通过高静水压试验进行验证。

在未采取油压补偿措施时,30 MPa 深海静水

压力下外壳的应力分布情况如图6所示。从图中可以看出,此时换能器外壳所受最大应力为945.9 MPa,已远超7075合金材料本身的屈服力505 MPa,这将使得外壳被压溃失效,导致换能器无法正常工作,说明此时的换能器结构无法满足30 MPa的使用要求。此时提高外壳耐压强度的措施主要有更换强度更高的材料、增加外壳筒体的壁厚以及合理增加加强筋等。由于增加外壳筒体的壁厚以及增加加强筋等均可能会对换能器的声性能产生不利影响,而即使将外壳材料更换为强度更高的TC4钛合金时,30 MPa 深海静水压力下外壳所受最大应力为988.6 MPa,也已超过其材料自身屈服力827.4 MPa,如图7所示。这说明即使不考虑经济性和质量等问题,单纯更换强度更高的材料可能也无法满足结构的深水耐压使用要求。因此基于油压补偿提高换能器结构的深水耐压生存能力不失为一个有效措施。

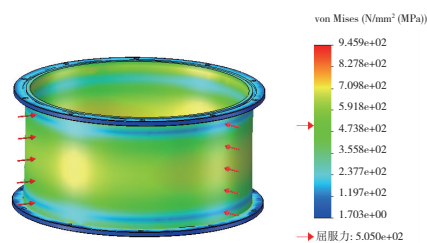


图6 油压补偿前30 MPa下外壳应力分布云图

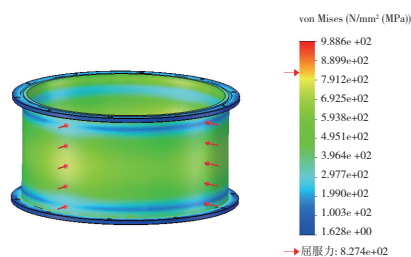


图7 油压补偿前30 MPa下TC4外壳应力分布云图

在采用油压补偿方案后,由于聚氨酯柔性灌封层弹性变形自适应的平衡换能器结构内外压力,当30 MPa的深海静水压力作用于外壳时,聚氨酯柔性灌封层向外形变,挤压壳体内部甲基硅油,油压会逐渐增加最终与深海静水压力相等,即换能器结构内部压力与外部深水压力相等,实现动态平衡。此时外壳的应力分布情况如图8所示。从图中可以看出,外壳所受应力仅为176.9 MPa,远小于7075合金材料的屈服力505 MPa,与未采用油压补偿的方案(即图6)相比,外壳所受应力减少80%以上,结构整体耐压性能提升明显,

表明采用油压补偿方案的换能器结构可满足 30 MPa 的深水耐压使用要求。

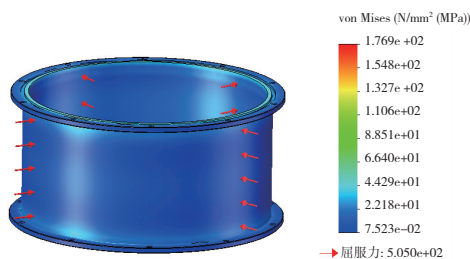


图 8 油压补偿后 30 MPa 下外壳应力分布云图

3 试验研究

基于油压补偿原理及上述结构设计和仿真分析,本文最终得到了如图 9 所示的油压补偿换能器实物,并围绕其开展高静水压及深海试验。在验证聚氨酯柔性灌封层与上顶板及下底板连接强度的同时,验证油压补偿方案的可靠性以及该刚-柔耦合结构的设计合理性。

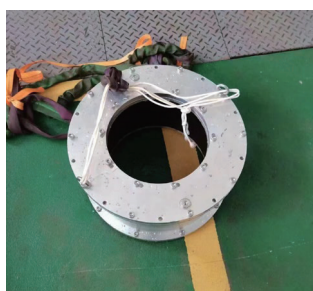


图 9 换能器实物图

3.1 高静水压试验

为验证基于油压补偿新结构的换能器样机能否满足耐设计工作压力 30 MPa 的要求,取 1.3 倍安全裕量,将大尺度、大深度换能器样机置于 SHS1000/4000-160S 型全海深深海环境模拟器中(后文简称为压力釜)中进行 40 MPa 的高静水压试验,高静水压试验现场如图 10 所示。在将换能器置于压力釜中后,关闭压力釜上端盖,随后注水加压。将压力釜按 1 MPa/min 的速度增压至 10 MPa,并保压 20 min,压力釜内无异响。随后按 1 MPa/min 的速度继续增压至 40 MPa 的预定压力,压力釜增压过程如图 11(a)所示。压力釜在 40 MPa 下保持压力 1 h,从图 11(b)中可以看出,保压过程中压力釜内压力值波动较小、总体平稳。待卸压完成并取出换能器样机观察后发现,其外表与打压前并无明显差异,且测试后换能器的绝

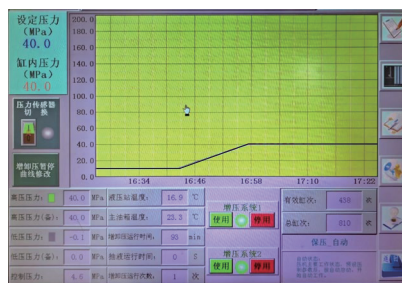
缘性能与打压前亦基本保持一致,均能达到 100 MΩ 以上,表明换能器在该压力下水密性较好,其结构无压溃现象发生,因此基于油压补偿新结构的换能器样机可以满足 3 000 m 水深的深海工作要求,具备该水深耐压生存能力。



图 10 换能器高静水压试验现场图



(a) 40 MPa 增压过程



(b) 40 MPa 保压过程

图 11 40 MPa 增压、保压折线图

3.2 深海试验

为更加真实有效地验证大深度换能器样机的耐压性能,证实基于油压补偿新结构的换能器样机设计合理性,在海况条件不劣于三级海况的条件下,围绕该型换能器样机在南海某平均深度达 1 200 m 的海域进行了多次千米级深海重复试验。换能器样机固定在绞车线缆端部,确定换能器状态良好后,利用全自动收放绞车按 30 m/min 的放缆速度将其放入水下 1 050 m 深度,并在该深度持续工作 4 h,换能器在海试过程中的水下工作情况如图 12 所示。4 h 后将换能器按 30 m/min 的

收揽速度回收至甲板,观察换能器外表后发现其与下水前并无明显差异,且换能器下水前后绝缘均超过 $100\text{ M}\Omega$,表明换能器水下密封性能良好,且并无进水情况发生,由此说明该换能器结构可在真实海况下满足千米深度的耐压要求。当前该型换能器样机已在该海域按上述试验步骤顺利完成千米级深海重复试验工作,进一步验证了基于油压补偿换能器结构的可靠性以及设计的合理性,且可为大尺度深海耐压结构相关设计提供一些借鉴与参考。

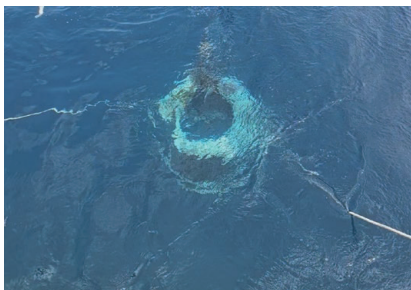


图 12 换能器水下现场工作图

4 结语

本文设计了一种基于油压补偿的刚-柔耦合式深海换能器新结构,使其能在 30 MPa 工作环境压力下稳定运行。在分析该结构油压补偿工作原理的基础上,基于该模型进行了仿真分析。最后依据结构设计及仿真分析结果制作了深海换能器样机,并围绕该样机开展了相关试验研究。结果表明:

1) 借助甲基硅油介质,利用聚氨酯柔性灌封层的弹性变形自适应的平衡换能器结构内外压力,可在减轻换能器质量的同时,显著提高换能器结构的深水耐压生存能力;

2) 高静水压试验和千米级深海重复试验真实有效地验证了大深度换能器样机的耐压性能,证实了基于油压补偿新结构的换能器样机在设计上具有一定的合理性;

3) 本文所设计的换能器样机主要用于该油压补偿方案的原理性验证,暂未考虑深海环境下因含氧量降低,可加速材料的腐蚀或增大开裂倾向等不利影响,这些深海环境特征都对换能器耐压结构材料的安全性、可靠性提出了更高要求,后续

换能器金属结构可升级为低密度、耐腐蚀、透声以及强度比高的纯钛合金;

4) 本文所提出的基于油压补偿的刚-柔耦合式深海换能器新结构对其它深海耐压装备具有参考意义,为其他领域深海装备提供了一种可行的压力补偿方案。

参考文献:

- [1] 陈旭光,寇海磊,牛小东,等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学,2024,26(2):1-14.
- [2] 苏妍. 深海换能器研究概述[J]. 声学及电子工程,2024(1):1-7.
- [3] 赵双,董铭锋,吴进帆,等. 一种耐超高静水压球形水听器:中国,CN109239695A[P]. 2019-01-18.
- [4] 桑永杰,蓝宇. 多液腔 Janus-Helmholtz 水声换能器[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(10):1261-1266.
- [5] 桑永杰,蓝宇,吴彤,等. 外液腔式 Janus-Helmholtz 水声换能器[J]. 声学学报,2017,42(4):397-402.
- [6] 伊子旭,莫喜平,柴勇,等. 宽体液腔 Janus-Helmholtz 换能器[J]. 应用声学,2020,39(5):656-660.
- [7] 孙淑珍,李俊宝. 多谐振宽带 Janus-Ring 换能器[J]. 声学学报,2019,44(4):743-750.
- [8] 吴彤. 径向辐射的 Janus 换能器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [9] 黄威,朱辉庆,傅寅锋. 深水换能器现状及展望[J]. 声学及电子工程,2015(1):45-48.
- [10] 李世长. 基于液腔振动的低频水声换能器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- [11] 桑永杰. 低频宽带水声换能器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [12] 张巧儿,陶国良. 水下气体压力补偿系统仿真分析及优化设计[J]. 机床与液压,2007,35(2):121-124.
- [13] 江彪,郑江龙,黄晓鑫,等. 基于压力补偿平衡的深海宽频电磁脉冲声源实验研究[J]. 集成技术,2025,14(3):134-144.
- [14] 楼成淦,范进良,朱伟敏,等. 一种顺性管的仿真与设计[J]. 声学及电子工程,2008(3):34-37.
- [15] 吴怀超,金波,杨灿军,等. 一种深海液压系统压力补偿装置的建模与应用[J]. 液压与气动,2010,34(5):46-49.
- [16] 王玺,仲健林,夏文嘉,等. 组合密封圈密封性能仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):130-133.

收稿日期:2024-07-05