

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.06.041

韩岩, 李建荣, 王志乾, 等. 水下耐压舱的结构设计与分析 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (06): 178-181.

水下耐压舱的结构设计与分析*

韩 岩^{1,2}, 李建荣¹, 王志乾¹, 刘绍锦¹, 刘玉生¹, 马文家^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了实现对水下生物及能源的探索和研究, 设计了一种适应性强、可机械手携带的水下观测设备, 此设备可对水下目标进行拍照并存储和记录水深信息, 重点对提供密封工作环境的耐压舱进行了设计和分析。首先, 基于内部的安装尺寸、整体质量及水下配重等情况, 耐压舱首部采用圆形, 尾部采用近似椭圆形式。为提升耐压强度, 舱体采用分段连接形式, 舱体主要采用非金属材料3D打印。窗口玻璃采用平面融石英玻璃, 避免了球面对成像产生畸变的情况, 并对舱体密封进行了设计。然后, 使用有限元分析软件对舱体和窗口玻璃进行静力学分析, 分析结果表明在100 m水深时耐压舱满足强度要求。最后, 根据设计分析结果对耐压舱进行了制造, 并对耐压舱进行水压试验, 试验结果表明耐压舱满足强度和密封要求。

关键词: 水下观测; 耐压舱; 结构设计; 有限元分析

中图分类号: P715

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2024)06-0178-04

Structural Design and Analysis of Underwater Pressure Cabin

Han Yan^{1,2}, Li Jianrong¹, Wang Zhiqian¹, Liu Shaojin¹, Liu Yusheng¹, Ma Wenjia^{1,2}

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to explore and research underwater organisms and energy, an underwater observation equipment with strong adaptability is designed and can be carried by robotics, this device can take photos of underwater targets, store and record water depth information. The design and analysis of the ballast tank which provides a sealed working environment are emphasized. Firstly, based on the internal installation size, overall weight, and underwater counterweight, the head of the device is circular, and the tail is shaped like an ellipse. In order to improve the strength, the cabin adopts a segmented connection form, and the cabin is mainly made of non-metallic materials 3D printed. The window glass is made of flat glass, and the material is fused quartz, which avoids the distortion of imaging caused by the spherical surface. The cabin seal is also designed. Then, finite element analysis software is used to perform static analysis on the cabin and window glass, and the analysis results show that the pressure resistant cabin meets the strength requirements at a water depth of 100 m. Finally, based on the design analysis results, the pressure cabin is manufactured and subjected to a water pressure test. The test shows that the pressure chamber meets the requirements for strength and sealing.

Key words: underwater observation; pressure cabin; structural design; finite element analysis

0 引言

海洋蕴藏着丰富的生物、矿物和能源等资源, 是人类繁衍生息和持续发展的重要基础^[1], 近年来, 随着海洋工程和石油开发需求的不断增加, 以及在军事、海洋科考^[2]等领域的需要, 作为海洋开发重要工具之一的水下观测设备得到了快速发展, 国内外对海洋工程装备的需求日益增多^[3]。

防水耐压舱作为水下观测器的关键部件之一, 常用于放置电子设备和各类传感器等, 其防水密封性和结构安全性至关重要^[4]。有许多学者也对耐压舱设计进行了研究, 苏运来等^[5]设计了一种冲压式复合材料防水耐压舱, 在耐压舱内预先冲入一定压力气体以抵抗在工作水深处的静水压力, 减小在工作时的壳体压力, 并对结构

进行了有限元分析和耐压、密封试验。戴志光^[6]设计了一个ROV样机, 并对耐压壳体、密封进行了设计分析, 对耐压壳体结构进行了有限元分析, 并对水下航行阻力进行了计算。魏会东^[7]对水下摄像机壳体进行了结构设计和分析, 并用有限元方法分析了塑性破坏和屈曲破坏。马骋等^[8]使用碳纤维材料代替高强度钢作为耐压壳, 并对碳纤维铺层角度、厚度、肋骨进行了研究, 有效减轻了整体质量并提高了强度。关文信^[9]对水下航行器壳体进行了强度校核和模态分析, 并给出了结构优化的可行方向。王萌^[10]对碳纤维复合材料壳体的强度和稳定性分析, 并进行了爆破试验。

本文设计了一款便携式水下机械手携带式观测器, 主要对装置的耐压舱结构、密封进行设计分析, 相对于

基金项目: 吉林省科技厅资助项目 (20210201048GX)

收稿日期: 2024-04-18

传统的圆柱形水下耐压壳体结构^[11-12], 本外形采用非圆柱3D打印结构, 并进行了耐压、密封试验。结果表明, 结构强度满足使用要求, 密封性良好。

1 总体设计方案

本装置的主要功能是通过内部的相机对水下植被、生物进行拍照, 并对照片进行存储, 以便对海洋进行探索研究, 其不具有自主航行功能, 可通过带有机械手的水下航行器进行携带, 因此在设计时应尽可能保证体积小、质量轻, 适应性强。

装置主要由壳体、窗口玻璃、相机、镜头、处理电路板、电池、压力传感器等组成, 具体组成如图1所示。壳体和窗口玻璃组成耐压舱为装置提供密封工作空间, 电池对处理电路板、相机和压力传感器供电, 相机对水下目标进行拍照, 处理电路板将照片存储, 同时存储压力传感器数值, 便于对不同深度水下资源进行研究。

2 耐压舱结构设计

为了给相机、镜头、电池、处理电路板提供密封环境, 保证设备正常工作, 需使用耐压舱对其进行封装, 所以本论文主要对耐压舱进行设计, 耐压舱主要由耐压壳体和窗口玻璃组成。

2.1 舱体

在同等容积下, 相对于其他形状, 圆柱型舱体具有较好的承压能力并且便于加工, 因此大多数水下耐压舱均采用圆柱形结构。但对于本装置而言, 在舱体内部布置相机、镜头、电池、控制电路板等设备, 内部布置属于扁平结构, 如果采用圆柱形或球形结构其内部剩余空间较多, 造成整体尺寸过大, 质量重^[13], 水下浮力也会增大, 需对其进行更多的配重。因此为减小尺寸、质量和提高空间利用率, 综合考虑内部零件质量、整体尺寸、水下浮力情况, 同时因窗口部位尺寸小于与处理电路部位尺寸, 为减小前行时的阻力, 耐压舱结构设计为前端圆柱形用于安装窗口玻璃, 后端采用近似椭圆的扁平式结构, 中间采用流线型过渡, 可有效降低航行过程中阻力。

为便于内部器件的安装, 在舱体内部需设计支撑结构, 同时为提高支撑强度和考虑水下配重因素, 在舱体内部设计支撑筋提高耐压强度, 同时可减少后期配重。制造方面, 由于内部结构复杂, 采用去材料加工方式成本高且难以实现, 若采用金属铸件形式会造成整体质量大幅增加, 整体密度增大, 且由于装置为单件生产, 开模费用高。因此经对比分析, 壳体采用3D材料打印方式, 同时结合3D打印材料强度、尺寸限制、装配、配重等情况, 结构采用分段形式, 即前段壳体、后段壳体、后盖为3D打印, 连接段壳体为钛合金TC4数控加工。在壳体底部预留安装位置, 便于安装到机械手等携带设备上, 具体结构如图2所示。

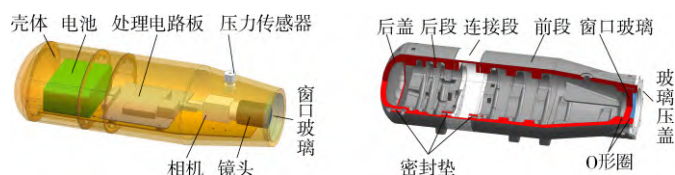


图1 系统组成

图2 耐压舱结构

由于耐压舱结构采用非圆柱形结构, 采用长短圆筒理论确定舱体壁厚公式在此不再适用, 且本耐压舱外形近似椭圆形, 并非标准的椭圆, 目前上没有理想的设计公式^[14], 本耐压舱采用试算法进行设计, 即设计壁厚时参照内部零件尺寸、工作深度, 根据经验确定初始壁厚, 并根据有限元分析结果对结构进行优化, 多次迭代后确定最终壁厚值。最后将设计的舱体及各个器件在三维制图软件中画出三维图, 并对各个零件赋材料属性, 最终整个装置的包络尺寸为418 mm×159 mm×115 mm, 整体质量3.4 kg, 通过三维软件计算出在水下浮力作用下的密度为0.98 g/cm³, 满足水下配重要求。

2.2 窗口玻璃

因相机需对水下生物进行拍照, 需在前段安装窗口透镜, 大多数水下窗口透镜采用球面形式, 此形式具有良好的耐压能力, 但缺点是球面透镜会对成像产生畸变, 且修正算法复杂还会增加计算量, 增加功耗。因此本装置采用平面玻璃作为窗口透镜可避免这一问题, 并在玻璃表面镀增透膜提高光线透过率。

由于窗口玻璃暴露在外环境, 承受高压, 在应力作用下会使表面产生微裂纹, 严重时发生断裂, 可采用下述公式确定玻璃厚度^[15]:

$$t_w = 0.5A_w \sqrt{\frac{K_w f_s \Delta P_w}{S_F}}$$

式中: t_w 为窗口玻璃厚度; A_w 为窗口玻璃直径; ΔP_w 为内外压差, 取1 000 kPa; K_w 为支撑条件系数, 取0.75; f_s 为安全系数, 取4; S_F 为断裂强度, 可近似为抗拉强度取 $S_F = 49$ MPa。

根据成像视场角需求确定该窗口玻璃直径为75 mm, 代入相关数据可得最小厚度 $t_w \approx 9.3$ mm。

结合制造工艺的合理性, 本装置中采用厚度为10 mm的融石英玻璃。

2.3 材料选择

由于水下设备工作环境恶劣, 对材料的耐腐蚀型、抗压性、密度等具有严格要求, 因此选择合适的材料对耐压舱的结构设计至关重要, 表1所示为本装置采用的材料的力学性能。

融石英玻璃透明度高, 且可在表面镀增透膜提高光通过率。尼龙7500材料可用于3D打印且密度低, 对于外壳零件来说其精度尚可, 且打印成本低。金属材料中,

表1 采用材料的力学性能参数

材料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /MPa	密度 /(g·cm ⁻³)
融石英玻璃	49		77 800	2.21
尼龙7500	48		1 800	1.10
不锈钢316L	520	205	193 000	7.98
钛合金TC4	900	800	110 000	4.51

不锈钢316L和钛合金TC4具有很好的耐海水腐蚀性且刚度和强度高，但不锈钢密度大，对设备整体质量影响较大。在水下设备制造时，钛合金TC4是较理想的材料，不足之处是钛合金加工成本高，不适合大量使用。

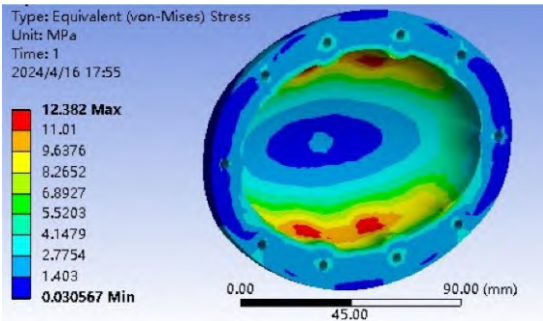
在本设备中前段壳体、后段壳体、后盖采用尼龙7500进行3D打印，采用激光烧结工艺（SLS），优点是不需支撑结构且尺寸精度较高^[10]，在保证耐压前提下可降低整体质量，连接段壳体和窗口玻璃压盖采用钛合金材料，螺钉和螺母采用不锈钢316L材料，窗口玻璃采用融石英材料。

2.4 有限元强度分析

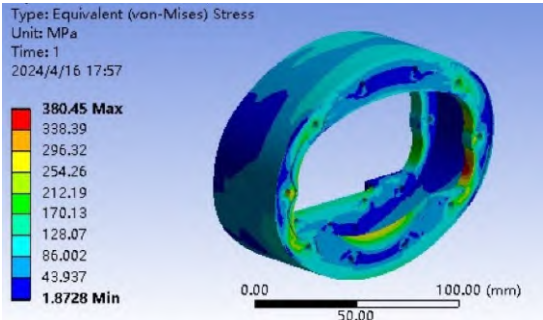
本设备使用条件最大水深为100 m，承受水压为1 MPa，为了进一步验证耐压舱结构设计的合理性，通过三维软件导出文件，使用分析软件对零件进行有限元静力分析。

2.4.1 舱体强度校核

本文中前段壳体、后段壳体、后盖采用尼龙7500材料3D打印制造而成，连接段壳体采用钛合金TC4数控加工，在分析软件中赋予材料属性，并对其进行网格划分、施加约束，分析结果如图3所示。



(c) 后盖应力云图



(d) 连接段壳体应力云图

图3 舱体应力分析结果

仿真分析表明，后盖的最大应力为12.382 MPa，安全系数为3.9，后段的最大应力为18.828 MPa，安全系数为2.5，连接段的最大应力为380.45 MPa，安全系数为2.1，前段的最大应力为31.695 MPa，安全系数为1.5，因此耐压舱设计满足使用要求。

2.4.2 窗口玻璃强度校核

为验证窗口玻璃厚度计算的数值是否符合要求，这里采用有限元方法对其进行静力学仿真分析对其进行校核，结果如图4所示。仿真分析表明，在最大水深工作时窗口玻璃的最大应力11.772 MPa，低于抗拉强度49 MPa，安全系数为4.2，因此窗口玻璃设计满足使用要求。

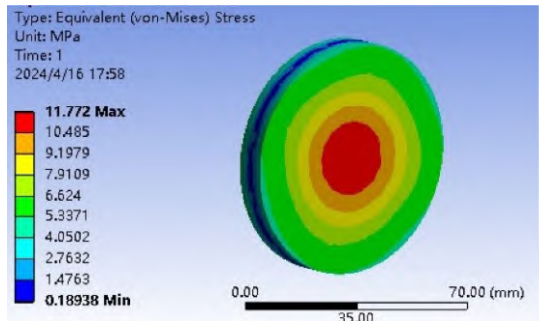
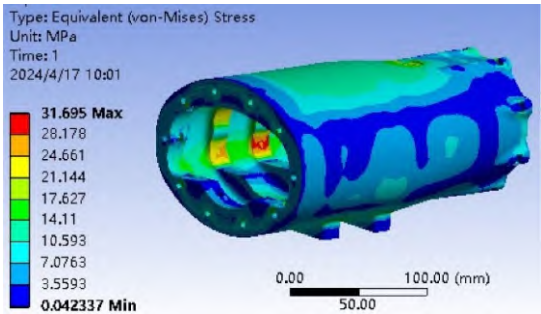


图4 窗口玻璃应力分析结果

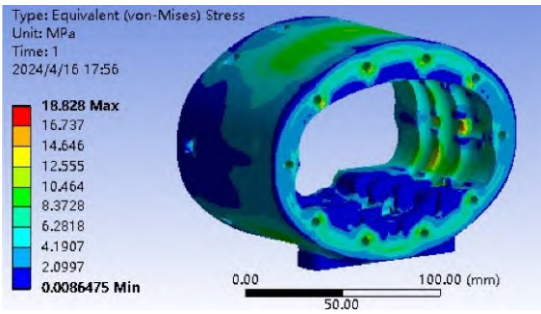
3 密封设计

密封设计是保证水下设备正常使用、安全可靠的关键环节，密封泄漏或失效，轻则导致设备不能正常使用，重则会使设备产生腐蚀或破坏引起巨大的经济损失。本装置中需要密封的部位为窗口玻璃与舱体之间、壳体分段连接处。

在窗口玻璃与舱体之间采用O形圈密封形式，O形圈适用范围广、成本低、拆装更换方便。在安装窗口玻



(a) 前段壳体应力云图



(b) 后段壳体应力云图

璃压盖时采用力矩扳手均匀拧紧预紧螺栓, 玻璃压盖与窗口玻璃之间的O形圈不起密封作用, 仅起保护作用, 防止玻璃压盖压碎玻璃, O形圈材料选择耐腐蚀的氟橡胶材料。在壳体分段连接处采用密封垫进行密封, 由于同等受力情况下, 密封垫受力面积大, 变形压缩量比O形圈小, 因此密封垫材料选择材质软的天然橡胶(NR), 连接处同样使用力矩扳手拧紧各个螺栓, 使螺栓预紧力一致, 密封垫受压均匀, 保证密封性。

在使用O形圈密封时, 密封效果与密封圈的压缩率和拉伸率有关, 压缩率过小, 不能达到好的密封效果, 压缩率过大会使密封圈损坏变性^[17-18]。同样, 当O形圈的拉伸率过大, 会降低密封圈的弹性, 使密封效果不佳。通常情况下, 在使用O形圈进行密封设计时, 其压缩率控制在15%~30%为宜^[19], O形圈的压缩率计算公式如下^[20]:

$$\varepsilon = \frac{d-t}{d} \quad (1)$$

式中: t 为沟槽的深度, mm; d 为O形圈的截面直径, mm; ε 为压缩率。

O形圈在承受径向力被挤压时, 密封设计应注意其径向变形量的控制, 其最大拉伸率最大不应超过4%。O形圈的拉伸率计算公式如下^[16]:

$$\delta_1 = \frac{D_1 - D}{D} \quad (2)$$

式中: D_1 为O形圈内径配合的轴, mm; D 为O形圈内径, mm; δ 为拉伸率。

本文使用直径4mm密封圈, 并根据国标确定槽宽, 根据上述压缩率和拉伸率公式最终确定沟槽度和配合轴的直径。

4 打压及密封性试验

根据设计结果对耐压舱进行了制造加工, 密封表面均进行打磨抛光处理, 并对零件进行了装配。试验前在其内部放置干燥纸张, 拧紧密封螺栓。随后将耐压舱在压力水罐中进行耐压、密封试验, 如图5所示。试验过程为, 按2 MPa/min的速率升压, 压力达到设定值1 MPa后保压60 min, 期间筒内压力波动为 ± 0.1 MPa, 保压结束后按均匀速率泄压至标准大气压。试验前后均对耐压舱进行称重, 通过质量变化及检查内部纸张干燥程度判断密封是否完好, 通过壳体完整性检查耐压性。



图5 耐压舱的耐压、密封试验

试验后, 经检查耐压舱外观完好未发生破坏, 通过对实验前后质量对比, 试验前后质量没有增加。对壳体

开盖检查, 内部纸张干燥无潮湿, 确认未发生漏水、渗水现象, 密封完好。此试验结果表明, 本文设计的耐压舱结构强度和密封效果良好, 满足使用要求。

5 结束语

本文设计了一种水下观测器的耐压舱, 整体形状为前端圆柱形后端近似椭圆形结构, 并通过流线设计进行过渡连接, 舱体采用分段形式提高强度, 分别使用尼龙7500材料3D打印和钛合金TC4数控加工而成, 首部为石英材料的平面窗口玻璃, 为相机提供观察视角。为了验证结构设计的合理性, 利用分析软件对舱体和窗口玻璃进行了静力学仿真, 结果表明舱体和窗口玻璃满足强度要求。在分析的基础上, 进一步验证耐压性和密封性, 对耐压舱进行了水压试验, 试验结果表明耐压舱未发生破坏, 内部未漏水, 验证了耐压舱的设计合理性。

参考文献:

- [1] MELIKOGLU M. Current status and future of ocean energy sources: a global review[J]. Ocean Engin, 2018, 148: 563-573.
- [2] TEAGUE J, ALLEN M J, SCOTT T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. Ocean Engin, 2018, 147: 333-339.
- [3] 张洪彬, 徐会希, 陈仲. 水下机器人耐压舱优化设计与结构分析[J]. 海洋学研究, 2018, 36(3):84-85.
- [4] 刘继鑫, 严天宏, 何波, 等. 基于SolidWorks的AUV耐压舱体设计与校核[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 102-106.
- [5] 苏运来, 吴文华, 范召林, 等. 小潜深充压式轻质防水耐压舱设计及分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 10139-10146.
- [6] 戴志光. 小型水下机器人本体结构设计及水动力仿真[D]. 扬州:扬州大学, 2012.
- [7] 魏会东, 商辉, 梁凌云, 等. 深水水下摄像机壳体的结构设计分析[C]. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下), 2011: 5.
- [8] 马骋, 李宪栋, 许维军. 水下航行器复合材料耐压壳优选设计研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(9): 58-65.
- [9] 关文信. 基于SolidWorks某水下航行器壳体有限元分析[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 131-133.
- [10] 王萌, 王鹏飞, 李丽丽, 等. 基于ANSYS ACP模块的复合材料耐压壳体设计[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(4): 16-22.
- [11] 魏振卓, 徐元哲, 王连明. 水下耐压舱结构设计方法研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2022, 54(2):89-94.
- [12] 胡中惠, 张家锐, 李文跃, 等. 一种AUV模块化载体结构设计及实现[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(4):74-77.
- [13] 罗珊, 王纬波. 潜水器耐压壳结构研究现状及展望[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 7-16.
- [14] 高红利, 洪锡纲. 非圆形截面容器的特点及其应力计算[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2003(1): 87-89.
- [15] 方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4):220-225.
- [16] 王延庆, 沈竟兴, 吴海全. 3D打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4):89-98.
- [17] 周志鸿, 张康雷, 李静, 等. O形橡胶密封圈应力与接触应力的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2006, 31(4): 86-89.
- [18] 秦亚军. 基于有限元的O形橡胶圈密封性能分析[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(8): 31-33.
- [19] 曹关宝. 橡胶O形密封圈拉伸量的核算及合理取值[J]. 橡胶工业, 1993, 40(1): 21-23.
- [20] 司江伟, 刘军鹏, 罗晓兰, 等. 深水结构物监测耐压壳体的密封结构设计[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(5):29-34.

第一作者简介: 韩岩(1991—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究领域为相对位姿测量、光机结构设计。