doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202601005

基于聚甲醛的浅海便携式水下数据采集舱设计与分析

刘　进[1],王广袤[1],徐言坤[1],于海博[1],苏　亮[1],宗艳梅[1],刘成龙[2],
胡　鼎[1],张　振[1]
(1. 青岛国实科技集团有限公司,山东 青岛　266237; 2. 崂山实验室,山东 青岛　266237)

摘要:为了满足数据采集设备在水下200 m深度作业时的稳定性和经济性需求,按照压力容器设计准则,在充分考虑了结构强度、材料抗腐蚀性以及工作稳定性的情况下,通过系统化的材料选型和结构优化,设计了一款低成本便携式的聚甲醛材质的数据采集舱。该采集舱通过ANSYS Workbench仿真软件的强度计算和形变分析,发现在安全系数2.5、施加5 MPa的等效静水压力载荷(对应500 m水深)的极限工况中,舱体最大形变量仅为0.99 mm(占外径0.825%),最大等效应力为53.2 MPa,低于聚甲醛的许用应力强度55 MPa。

关键词:数据采集舱;稳定性;聚甲醛;仿真软件;结构强度
中图分类号:TH122　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671－5322(2026)01－0031－07

Design and Analysis of a Portable Underwater Data Acquisition Capsule for Shallow Water Based on Polyformaldehyde

LIU Jin[1], WANG Guangmao[1], XU Yankun[1], YU Haibo[1], SU Liang[1], ZONG Yanmei[1],
LIU Chenglong[2], HU Ding[1], ZHANG Zhen[1]
(1. Qingdao Gosci Technology Group Co. Ltd., Qingdao Shandong　266237, China;
2. Laoshan Laboratory, Qingdao Shandong　266237, China)

Abstract: To meet the stability and economic requirements of underwater data acquisition equipment operating at a depth of 200 m, a low-cost and portable underwater data acquisition capsule made of polyoxymethylene (POM) was designed based on pressure vessel design criteria. Through systematic material selection and structural optimization, comprehensive consideration was given to structural strength, corrosion resistance, and service reliability. Finite element analysis was conducted using ANSYS Workbench to evaluate the capsule's strength and deformation behavior. The results indicate that, under the ultimate condition with a safety factor of 2.5 and an equivalent hydrostatic pressure load of 5 MPa (corresponding to a water depth of 500 m), the maximum deformation of the capsule is only 0.99 mm, accounting for 0.825% of the outer diameter. The maximum equivalent stress is 53.2 MPa, which is lower than the allowable stress of 55 MPa for POM.

Keywords: data acquisition capsule; stability; polyoxymethylene; simulation software; structural strength

收稿日期:2025-11-19
基金项目:崂山实验室专项(LSKJ202201805);青岛海洋科技中心成果转化专项(2023CGZHPT001)。

作者简介:刘进(1990—),男,山东青岛人,高级工程师,硕士,主要研究方向为渔业机械与海洋结构物的设计与制造、机械设计与制造。
通信作者:王广袤(1992—),男,山东曲阜人,高级工程师,硕士,主要研究方向为海洋数字孪生、海洋智能装备。

数据采集舱[1]作为水下设备[2-3]的核心组件，其核心功能在于为电子系统提供干燥、密闭的防护环境，确保设备在复杂海洋工况下安全、稳定、持久地运行。因此，数据采集舱的结构设计与材料选择直接决定了水下系统[4-5]的整体可靠性与应用效能。

在传统设计中，数据采集舱普遍采用金属材质以应对深海高压环境。随着材料技术的发展，新型非金属材料在数据采集舱中的应用越来越多，学者对此也进行了大量的研究，例如 Surya 等[6]利用高成本碳纤维/环氧树脂复合材料，设计出一种军用加筋复合材料的潜水器采集舱壳体，但因未考虑浅水环境特有的经济性约束与便携性需求，难以满足 200 m 近海海域[7]的实际应用需求。

本文针对数据采集舱塑料材质可行性研究的显著空白，以及安装拆卸效率、多传感器集成、长期服役可靠性方面的落后状况，创新性地提出一种专为 200 m 近海海域设计的聚甲醛材质的数据采集舱。该设计基于从海床基[8]或潜浮标系统[9]中安装和拆卸的需要，以及收集温度、盐度、深度、溶解氧和海流等传感器数据的方便[10]，从数据采集舱的结构设计、材料选择等方面进行设计分析和结构优化，并使用 ANSYS Workbench 仿真分析软件进行设计验证。结果表明，该设计不仅科学论证了工程塑料在浅水数据采集舱中的技术可行性与经济优势，更为近海监测领域提供了可标准化复用的低成本结构范式，对推动海洋监测设备的商业化普及与可持续发展具有重要的工程指导价值。

1　数据采集舱设计

1.1　数据采集舱结构

圆柱形结构凭借其优异的耐压性能、较低的轴向水流阻力以及良好的可制造性，被广泛认为是水下设备设计的理想结构形式。完整的数据采集舱三维结构示意图如图 1 所示。

由图 1 可知，该结构主要由顶盖与筒体构成，顶盖与筒体之间通过 M5 规格的防水螺栓进行固定连接，确保筒体内部电子系统的干燥环境。在顶盖处，预留两个孔用于外部传感器信号传输，并采用双 O 型圈密封槽设计，形成双重防护屏障，有效阻隔海水在 200 m 水深工况下的渗透；同时，针对近海作业中频繁的安装与拆卸需求，在顶盖增设符合人体工程学的可拆卸把手，可显著简化潜浮标系统或海床基平台等近海水下设备的现场操作流程。在筒体内部，依据电子系统的布局需求，数据采集舱需适配直径为 70 mm 的电路板，并设置 3 个对称分布的固定孔位以确保安装稳定性，电路板示意图如图 2 所示；为保障采集舱长期的供电需求，在筒体内部安置 4 节 34615 型高能量密度电池，以及适配直径 70 mm 电路板的专用支架。该设计在确保结构完整性与环境适应性的同时，实现了多传感器数据(温度、盐度、深度、溶解氧及海流)的高效集成与同步采集，为近海监测任务提供了可靠的硬件平台支撑。

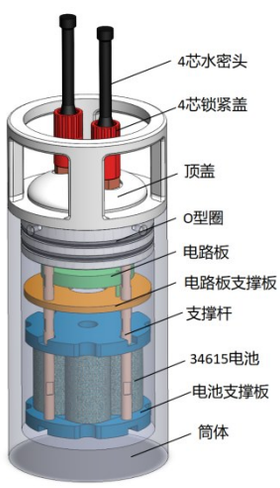


图 1　数据采集舱完整结构示意图

Fig. 1　Complete structural schematic diagram of the data acquisition capsule

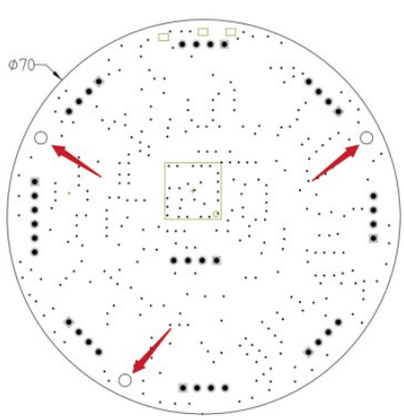


图 2　电路板示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the circuit board

1.2　数据采集舱厚度计算

在水下数据采集舱设计中，材料的选择对设备的结构完整性、环境适应性以及经济可行性具有决定性影响。常用的数据采集舱设计材料主

要有聚甲醛(以下简称POM)、有机玻璃(以下简称PMMA)、6061铝合金、316L不锈钢和TCL钛合金等,其中,聚甲醛作为一种高性能热塑性工程材料,因具有优异的机械加工性能[11]、高刚度及显著的成本优势,广泛应用于精密机械零件的制造[12];有机玻璃则凭借其高透光率(>92%)、优异的耐水解性及易于成型的特性,成为水下摄像系统与照明装置防护外壳的常用材料;6061铝合金因其低密度、良好的可加工性及阳极氧化处理后显著提升的耐腐蚀性能,在轻量化结构设计中备受关注;相比之下,不锈钢虽具备高刚度、高强度及优异的耐压与焊接性能,但其较高的密度限制了在减重需求场景的应用;钛合金虽综合了低密度与高强度的优势,适用于深海环境,但其高昂的制造成本及复杂的焊接工艺阻碍了在浅水设备中的规模化应用。各种主要材料的力学性能参数如表1所示。

基于成本效益分析、加工工艺适应性以及材料的物理化学特性(包括密度、抗压强度、耐腐蚀性及密封性能),本研究初步筛选聚甲醛、有机玻璃和6061铝合金作为数据采集舱主体结构的候选材料。

表1　常见材料的力学性能参数

Table1　Mechanical property parameters of common materials

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})	可焊接性能
聚甲醛	55~70	2 600	1 390	不可焊接
有机玻璃	40	3 000	1 190	不可焊接
6061铝合金	276	69 000	2 700	焊接性较好
316L不锈钢	205	200 000	7 920	焊接性较好
钛合金TCL	830	103 000	4 510	焊接性较差

依据潜浮标系统、海床基系统等水下设备在近海海域的部署需求,数据采集舱的设计深度范围限定于200 m水深。根据流体静力学原理,水下数据采集舱静水压力P计算公式为:

$$P = \rho g h \tag{1}$$

式中:ρ为海水密度;g为重力加速度;h为水下数据采集舱最大设计深度。

考虑到动态载荷、材料不确定性以及环境扰动等综合风险,水下数据采集舱设计压力需在静水压力基础上引入安全系数。引入安全系数后水下数据采集舱设计压力计算公式如下:

$$P_{\text{design}} = P \cdot S \tag{2}$$

式中:P_{design}为水下数据采集舱设计压力;S为安全系数,通常取2。

根据“薄壳理论”和稳定性计算,得到数据采集舱壳体厚度δ计算公式为:

$$\delta = \beta \frac{P_{\text{design}} \cdot R}{\sigma_{\text{s}}} \tag{3}$$

式中:β为数据采集舱的设计系数;R为数据采集舱的舱体半径;σ_{s}为数据采集舱主体材料的屈服强度。

根据公式(1)~(3)及表1,在综合考虑内部组件空间约束及外部水压载荷后,数据采集舱的舱体外径最终确定为120 mm,即采集舱的舱体半径R为60 mm,同时安全系数S取2,设计系数β=1,海水密度ρ=1 025 kg/m^3,最大设计水深h=200 m,得到满足承压要求的最小理论壁厚分别为$\delta_{\text{POM理论}}$=4.3 mm、$\delta_{\text{PMMA理论}}$=6 mm、$\delta_{\text{铝合金理论}}$=1 mm。

考虑到3种材料的经济性与工艺性,可以发现市售标准棒料(半径60 mm、长度1 m)的采购价格中,POM材料成本约为300元,显著低于PMMA的660元和6061铝合金的860元;在加工工艺方面,POM在车削、铣削、钻孔等常规机械加工过程中表现出良好的工艺适应性,其加工难度与PMMA及6061铝合金相当,因此,选择聚甲醛作为数据采集舱的主体结构材料更有利于保证加工精度和经济性要求。

虽然从力学性能角度分析,POM舱体壁厚4.3 mm即可满足4 MPa静压强度的要求,但考虑到实际工况中存在的压力波动、装配应力、制造公差以及长期运行下的可靠性以及水下深度浮动等问题,需在理论值基础上预留足够的安全裕度;同时,适当增加壁厚有助于提升舱体的整体刚度,抑制局部变形与振动引发的结构失稳风险。因此,为确保结构在复杂环境中的安全性与耐久性,最终将数据采集舱实际壁厚$\delta_{\text{实际}}$确定为10 mm,舱底厚度h_1设计为20 mm,以增强底部结构在静水压力下的抗变形能力。

1.3 数据采集舱稳定性计算

数据采集舱在实际工作时,其内部压力小于外部压力,当外压载荷增大到某一值时,壳体会突然失去原来的形状,被压扁或出现波纹;载荷卸去后,壳体不能恢复原状,这种现象称为外压壳体的失稳。导致壳体失稳的压力称为壳体的临界压力p_{cr},此时筒壁内存在的压应力称为临界压应力σ_{cr}。

圆柱形外压容器分为长圆筒和短圆筒,两者计算临界压力的方式不同。判断圆柱形外压容器类型的公式为:

$$L_{cr} = 1.17D_{圆柱}\sqrt{\frac{D_{圆柱}}{\delta_{圆柱}}} \tag{4}$$

式中:L_{cr}为圆柱形外压容器的计算临界长度,mm;$D_{圆柱}$为圆柱形外压容器的外径,mm;$\delta_{圆柱}$为圆柱形外压容器的设计壁厚,mm。

圆柱形外压容器设计长度$L \geqslant L_{cr}$时,属于长圆筒;设计长度$L<L_{cr}$,则属于短圆筒。本文设计的数据采集舱舱体外径为120 mm,根据公式(4)得到数据采集舱设计壁厚与筒体临界长度的关系,如图3所示。依据电路板支架和供电电池的长度确定数据采集舱的设计长度L_{dc}为210 mm,根据图3可以发现在数据采集舱壁厚$\delta<56$ mm时都属于短圆筒。由于本文设计的数据采集舱壁厚δ取10 mm,可以判断该数据采集舱壳体属于短圆筒。

短圆筒临界压力计算公式为:

$$P_{cr} = \frac{2.59E\delta'^2}{LD_O\sqrt{D_O/\delta'}} \tag{5}$$

式中:P_{cr}为短圆筒的计算临界压力,MPa;E为短圆筒材料的弹性模量,MPa;δ'为设计的圆筒壁厚,m;D_O为数据采集舱外压圆筒的外直径,mm。

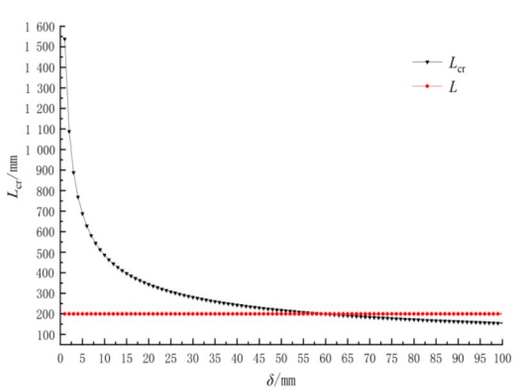


图3 设计壁厚与筒体临界长度的关系

Fig. 3 The relationship between design wall thickness and critical length of the cylinder

由于聚甲醛材料的弹性模量为2 600 MPa,数据采集舱的长度为210 mm,外压圆筒的外径为120 mm,设计的圆筒壁厚为10 mm,根据式(5)得出数据采集舱临界压力P'_{cr}=7.74 MPa。

在数据采集舱设计中,设计的临界压力对实际工作压力应该有一定的冗余,通常使用临界安全系数来度量冗余程度。临界安全系数定义为

$$S' = \frac{P'_{cr}}{P_c} \tag{6}$$

式中:S'为临界安全系数;P_c为数据采集舱设计的工作压力,取2 MPa。

根据式(6),得到圆筒的临界安全系数S'=3.87,依据德国劳氏规范[13]的要求,该值大于设计采用的安全系数2,能够保证数据采集舱的设计临界压力大于实际工作压力,因而在给定压力条件下,上述设计的圆筒不会失稳。

为保证耐压舱工作的稳定性,需对数据采集舱的顶盖厚度进行计算,圆形顶盖的厚度计算公式为

$$\delta_p = D_c\sqrt{\frac{KD_c}{[\sigma]^t\phi}} \tag{7}$$

式中:δ_p为数据采集舱的顶盖计算厚度,mm;D_c为数据采集舱顶盖的设计直径,mm;K为数据采集舱的结构特征系数,对于圆形平盖K取0.25;$[\sigma]^t$为数据采集舱设计材料的屈服强度,MPa;ϕ为数据采集舱的焊接接头系数,对于无焊接接头其数值为1。

数据采集舱顶盖的设计直径D_c与数据采集舱舱体外径一致,为120 mm;根据表1,POM数据采集舱屈服强度为55 MPa~70 MPa,取上限值70 MPa,又聚甲醛材料为不可焊接,故其焊接接头系数ϕ=1,又圆形平盖K=0.25,从而根据式(7)得到数据采集舱顶盖的计算厚度δ_p=78 mm。

基于前述设计压力分析与材料性能评估,得到数据采集舱的几何参数为:外压圆筒的外直径D_O为120 mm,壁厚δ取10 mm,舱底厚度h_1为20 mm,数据采集舱的L_{dc}为210 mm;顶盖的设计直径D_c为120 mm,顶盖厚度δ_p取78 mm。根据上述尺寸,得到数据采集舱的整体二维结构剖面图如图4所示。

2 数据采集舱的有限元分析

为精确评估数据采集舱在浅海环境(200 m水深等效工况)下的结构响应特性,采用ANSYS

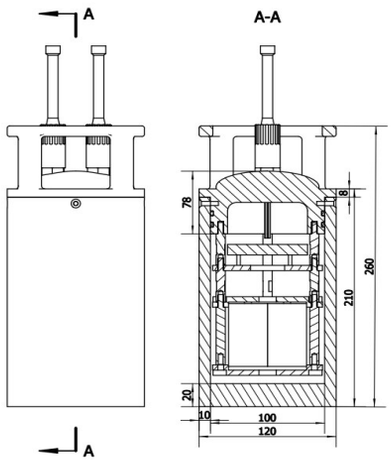


图4　数据采集舱二维结构剖面图

Fig. 4　2D structural cross-section of the data acquisition capsule

Workbench 平台的 Mechanical 模块开展有限元应力分析。首先,基于 SolidWorks 软件完成数据采集舱的三维参数化建模;其次,将模型以 step 格式导入 Workbench 环境,并在工程数据模块中新建材料库条目“POM 采集舱”,定义新材料属性包括依据 ASTM D638 标准[14]设定密度 1 390 kg/m^3、杨氏模量 2.6 GPa 及泊松比 0.386,以准确表征聚甲醛在静水压力载荷下的本构行为;最后,采用结构化的六面体单元对模型进行网格划分,并对筒体主体结构进行局部网格加密,最终生成高质量的网格模型,其中筒体部分如图 5 所示,包含 410 014 个节点;顶盖部分如图 6 所示,包含 82 033 个节点。

2.1　数据采集舱筒体的有限元分析

为系统评估数据采集舱在超设计工况下的结构安全性,通过 ANSYS Workbench 软件对采集舱的筒体进行有限元求解,并设置安全系数 2.5(高于设计安全系数 2)进行极限载荷验证。验证时,对筒体底面施加固定约束,限制其各方向位移,随后在采集舱筒体外表面施加 5 MPa 的均匀静水压力载荷,检验结构在极端环境下的安全裕度。通过上述分析得到数据采集舱筒体在超设计工况下的变形与应力分布特征,分别如图 7、图 8 所示。

由图 7 可知,筒体侧面的变形量沿轴向呈现中部较大、两端较小的趋势,表明结构在外部静水压力作用下发生了径向收缩变形,其中侧面中心区域的最大变形量为 0.55 mm;筒体底部变形分布规律与侧面基本一致,亦表现为中心区域变形较大、边缘区域变形较小,且底部中心位置的最大变形量达到 0.99 mm。

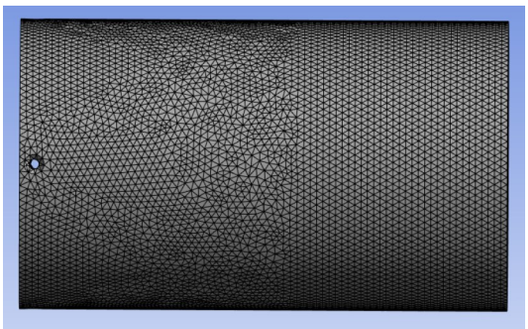


图5　采集舱筒体的网格图

Fig. 5　Mesh diagram of the capsule cylinder

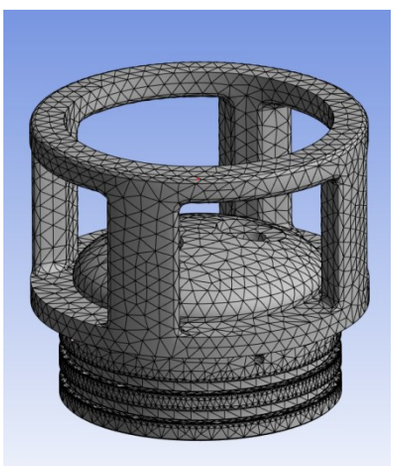


图6　采集舱顶盖网格图

Fig. 6　Mesh diagram of the capsule top cover

由图 8 可知,筒体侧面及底部区域的应力分布在各自范围内均呈现中心较高、边缘较低的特征,其中侧面中心应力约为 35 MPa,底部中心应力约为 36 MPa;从整体结构来看,最大等效应力并未出现在侧面或者底部中心区域,而是集中于筒体与顶盖的连接过渡区域,峰值为 53.2 MPa,这可能是由于连接处的几何形状不连续导致局部应力集中所致。

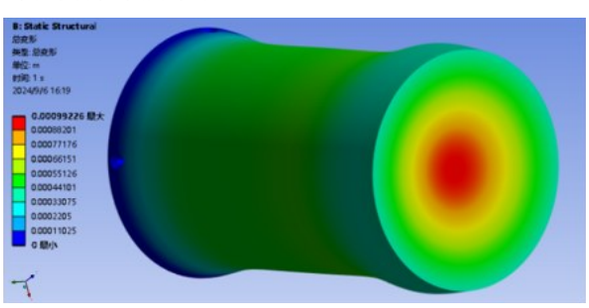


图7　采集舱筒体变形云图

Fig. 7　Deformation contour plot of the capsule cylinder

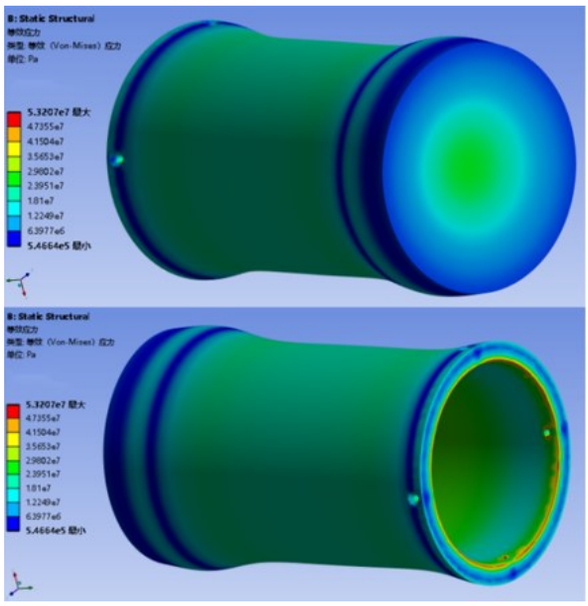


图 8　采集舱筒体应力云图

Fig. 8　Stress contour plot of the capsule cylinder

由以上分析可知,数据采集舱筒体的最大变形为 0.99 mm,小于封装壳体通常允许变形量不超过外径 1% 的变形控制要求[15-16];最大等效应力 53.2 MPa,小于 POM 数据采集舱的屈服强度 55 MPa,显然该数据采集舱筒体的刚度满足使用要求。

2.2　数据采集舱顶盖的有限元分析

通过 ANSYS Workbench 软件对采集舱的顶盖进行有限元求解,并设置安全系数 2.5 进行极限载荷验证。具体实施时,根据其与筒体的实际装配关系,在顶盖把手最上面的表面施加位移约束使其无法自由移动,然后在顶盖外表面施加 5 MPa 的均匀静水压力载荷,检验结构在极端工况下的安全裕度。通过上述分析得到数据采集舱顶盖在超设计工况下的变形与应力分布特征,分别如图 9、图 10 所示。

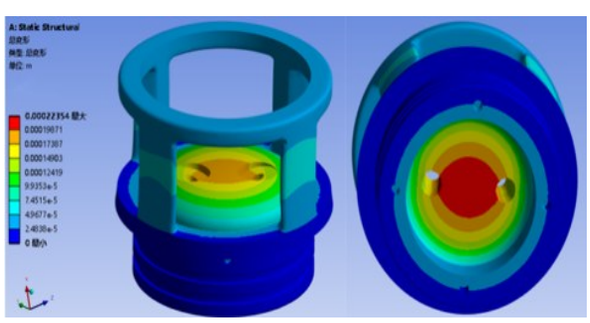


图 9　采集舱顶盖变形云图

Fig. 9　Deformation contour plot of the capsule top cover

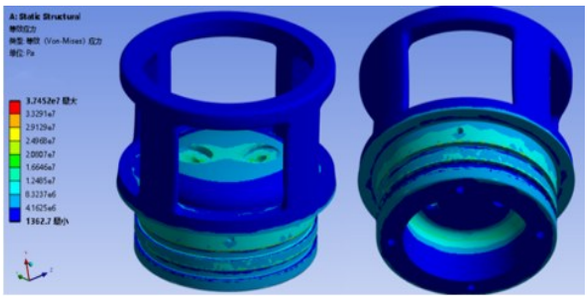


图 10　采集舱顶盖应力云图

Fig. 10　Stress contour plot of the capsule top cover

由图 9 可知,顶盖的变形分布具有明显的规律性,整体呈现出中心区域较大、边缘区域较小的特性。这表明在均匀静水压力作用下,顶盖中心区域作为主要受力部位,发生了挠曲变形,其最大变形量为 0.22 mm,为顶盖最大外形尺寸直径的 0.18%。

由图 10 可知,在 5 MPa 的压力载荷作用下,采集舱顶盖应力分布较为连续,大部分主体区域应力较低,而在内表面环形区,螺纹孔周边及密封槽等不连续部位应力明显升高;顶盖中心区域应力约为 20 MPa,表明该区域在均匀外压作用下承担了主要载荷;螺纹孔周边应力约为 29 MPa,这是由于孔边不连续导致局部应力集中所致;密封槽区域的应力最高,达到 37.4 MPa,这是由于该区域在满足密封要求的同时还需要适应顶盖整体变形,因此成为应力集中最为明显的部位。

由以上分析可知,数据采集舱顶盖的最大变形为 0.22 mm,小于封装壳体通常允许变形量不超过外径 1% 的变形控制要求[15-16];最大等效应力 37.4 MPa,小于 POM 数据采集舱屈服强度 55 MPa,显然该数据采集舱顶盖的刚度满足使用要求。

综上所述,采用 POM 材料制造的数据采集舱,在 5 MPa 载荷的模拟工作环境中表现出良好的结构稳定性和强度性能,筒体和顶盖的关键部位应力和变形也控制在安全范围内,说明采用 POM 材料制造数据采集舱是可行性的。

3　结论

为开发一款适用于近海 200 m 水域的轻量化便携式数据采集舱,本文创新性地采用聚甲醛作为主体结构材料,通过结构优化设计及 ANSYS Workbench 平台的有限元分析,发现在安全系数 2.5、施加 5 MPa 等效静水压力载荷(对应 500 m

水深)的极限工况中,舱体最大形变量仅为0.99 mm,占外径的0.825%,小于变形控制值1.2 mm(占外径1%);最大等效应力为53.2 MPa,低于POM材料的屈服强度55 MPa,验证了该设计的工程可行性与可靠性,从而为近海观测仪器平台的采集系统提供了新的设计思路和参考,未来可进一步开展长期水下服役性能测试,以优化结构设计、拓展应用的深度范围。

参考文献:

[1] 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(6): 178-181.

[2] GONG H X, PING Z R, MENG F C, et al. Modeling and optimization of interior ballistics within pneumatic underwater launchers[J]. Inventions, 2024, 9(2): 30.

[3] 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 1-20.

[4] BOOTHROYD A, ADAMS V, ALEXANDER K, et al. Stakeholder perceptions of the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources Marine Protected Area planning process[J]. Marine Policy, 2024, 170: 106381.

[5] 蒋明镜, 王华宁, 张璐璐, 等. 水合物开采及海洋环境诱发地质灾害机理和风险评估研究现状与展望[J]. 工程地质学报, 2024, 32(4): 1424-1438.

[6] SURYA PRABA R P, RAMAJEYATHILAGAM K. Microstructural damage and response of stiffened composite submersible pressure hull subjected to underwater explosion[J]. Ships and Offshore Structures, 2023, 18(8): 1116-1131.

[7] DING S Q, CHANG J M, ZHANG W Z, et al. Environmental microbial diversity and water pollution characteristics resulted from 150 km coastline in Quanzhou Bay offshore area[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1438133.

[8] LIU J W, JIA Y P, CUI L, et al. Numerical analysis of dynamic response and liquefaction phenomena in sandy seabed foundation around a semi-circular breakwater under wave loading[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(1): 40.

[9] 禹润田, 李昊, 冯师军, 等. 潜浮标技术发展应用及展望[J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39(1): 112-116, 120.

[10] HÖFLER L. Good results from sensor data: Performance of machine learning algorithms for regression problems in chemical sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 421: 136528.

[11] LIU J S, LI Y B, HUANG M H, et al. Prediction of low-velocity impact mechanical response and damage in thermoplastic composites considering elastoplastic behavior[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 194: 105099.

[12] MARIES E R G , CHIRA D . Influence of processing temperatures of acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyamide 6.6 (PA 6.6) and polyoxymethylene (POM) on some mechanical properties when injecting items used in the automotive industry based on mechanical resistance tests[J]. Materiale Plastice, 2012, 49(4): 288-292.

[13] GERMANISCHER LLOYD. Rules for classification and construction. i ship technology. part 5: underwater technology. 3: unmanned submersibles (ROV, AUV) and underwater working machines[S]. Hamburg: Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 2009.

[14] ASTM. Standard test method for tensile properties of plastics: D638-22[S/OL]. (2022-01-01)[2025-09-20]. https://store. astm. org/d638-22. html.

[15] 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.

[16] 闫枫, 付平, 熊学军. 深海潜标系统电池舱的设计与分析[J]. 机械制造, 2021, 59(1): 11-15

(责任编辑:李华云)