水下激光通信耐压舱结构设计与分析

陈沙古1,2，高 原1,2，冯令良1,2，谢晓忠1,2

（1.中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082；2.船舶结构安全全国重点实验室，江苏 无锡 214082）

摘 要**：**随着海洋资源开发与深海探测技术的不断发展，水下激光通信近年来逐步成为研究热点。论文以水下激光通信耐压舱为研究对象，根据耐压舱的结构特点和设计目标，提出一种采用钛合金舱体与蓝宝石光窗的耐压结构方案。围绕耐压舱设计方案开展理论分析，研究评估了耐压舱的结构强度和极限承载能力。建立耐压舱结构实体单元有限元模型，基于Bilinear弹塑性模型和Mooney-Rivlin超弹模型对耐压舱结构安全和密封性能进行仿真计算。计算结果表明，文中关于耐压舱的结构设计与评估结果正确可靠，光窗密封结构合理可行，可以为水下激光通信耐压舱的工程设计提供依据。

关键词：激光通信；耐压舱；结构设计；安全评估；光窗结构

**中图分类号**： U663 **文献标识码**：A

**1 引言**

水下通信方式主要可分为声、光、电三类，即水声、激光与电磁波通信，目前水声通信是应用范围最广的水下无线通信技术，但随着海洋资源开发与深海探测技术的不断发展，水声通信的短板如传播延迟长、信号衰减大、多径效应严重、通信带宽有限等特性带来的设计问题越来越突出。水下激光通信具有传输速率高、信息容量大、抗干扰性强、安全保密度高、隐蔽性好等特点，是未来水下通信技术的发展和应用趋势[1-4]。水下激光通信系统主要由发射端、接收端两大部分组成，发射端通过编码、调制将电信号转换为光信号，从光窗发出；接收端从光窗接收光信号，并通过解调、解码将光信号转换成电信号。

耐压舱是水下激光通信发射端、接收端的重要部件，可以为舱内编/解码、调/解制相关仪器设备提供常压密封环境。该耐压舱相比于传统的深海耐压结构，除了要具备足够的耐压强度与密封性能外，还涉及光窗结构及其密封设计问题。光窗结构既是耐压结构的一部分，也是发射端、接收端光信号进出的窗口，是耐压舱结构设计的关键。本文以某水下激光通信系统耐压舱为对象，采用理论分析与有限元仿真手段对耐压舱的耐压与密封性能开展研究，重点讨论耐压舱的结构形式及其安全性设计方法，以期为耐压舱的工程设计提供技术依据。

**2 研究对象**

水下激光通信耐压舱采用4光窗结构布置，光窗口径Φ30mm，舱内空间需求≮Φ360mm×L650mm。显然，耐压舱是金属-非金属组合式耐压结构，舱体部分为金属结构，光窗部分为非金属结构。综合考虑耐压结构受力特性和舱内空间布置效率，耐压舱采用圆柱壳体结构，两端分别采用球封头、平封头结构，通过螺栓和o形圈进行连接密封。平封头的设置主要是为了有效集中布置集光窗和穿舱接口，如图1所示。

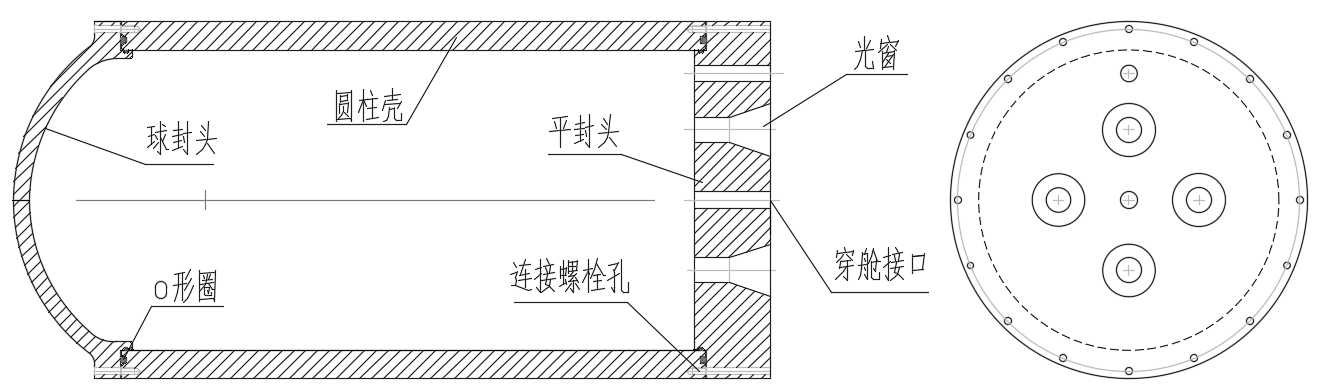


图1 耐压舱结构形式

钛合金密度小、强度高、无磁性，是深海耐压结构的理想材料。通过论证分析，该水下激光通信系统耐压舱金属结构部分材料选用合金TC4ELI，其材料力学性能指标如下表1。光窗材料选用蓝宝石，其力学性能如表2所示。

表1 钛合金TC4ELI的材料力学性能

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 材料参数 | 屈服强度（MPa） | 抗拉强度（MPa） | 弹性模量（GPa） | 泊松比 | 密度（t/m3） |
| 力学性能 | 740 | 860 | 115 | 0.34 | 4.5 |

表2 蓝宝石的材料力学性能

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 材料参数 | 断裂强度（MPa） | 抗压强度（MPa） | 抗弯强度（MPa） | 弹性模量（GPa） | 泊松比 | 密度（t/m3） |
| 力学性能 | 400 | 2000 | 895 | 435 | 0.28 | 3.98 |

**3 结构设计与安全评估**

**3.1 设计方案**

根据该水下激光通信系统耐压舱的设计目标，确定结构设计参数为：计算压力=60MPa，圆柱壳内径=180mm，圆柱壳直段长度=700mm，球封头内径=210mm。参考某载人潜水器耐压壳体设计计算规则等水下耐压结构相关设计方法[5-8]，可以估算确定耐压舱结构的厚度。

耐压舱圆柱壳厚度应满足关系式

 （1）

式中为许用应力、为应力系数，经计算可得圆柱壳厚度应不小于17.2mm，取整=20mm。

球封头厚度应满足关系式

 （2）

经计算可得球封头厚度应不小于9.6mm，由于球封头上需贴合安装散热设备，为同时保障具有足够刚度，球封头厚度取为与圆柱壳一致，即=20mm。

平封头厚度应满足关系式

 （3）

式中为平封头外直径，、为计算系数，为材料屈服强度，经计算平封头厚度应不小于60.9mm，由于平封头上布置了光窗和穿舱接口，进一步考虑开孔折减系数

 （4）

式中、分别为光窗和穿舱接口的开孔直径，、分别为平封头直径剖面上光窗和穿舱接口的数量。经计算得到=0.83，则平封头厚度应不小于73.1mm，取整=76mm。

光窗玻璃采用圆平板的结构形式，玻璃与光窗底座之间通过o形圈密封，采用螺母预压紧固定。根据光窗口径设计目标，经综合考虑光窗结构的强度、刚度和透光性能，光窗孔座的开孔直径为Φ70mm，蓝宝石玻璃厚度=20mm。

综上所述设计计算，可得耐压舱结构设计方案如图2所示。

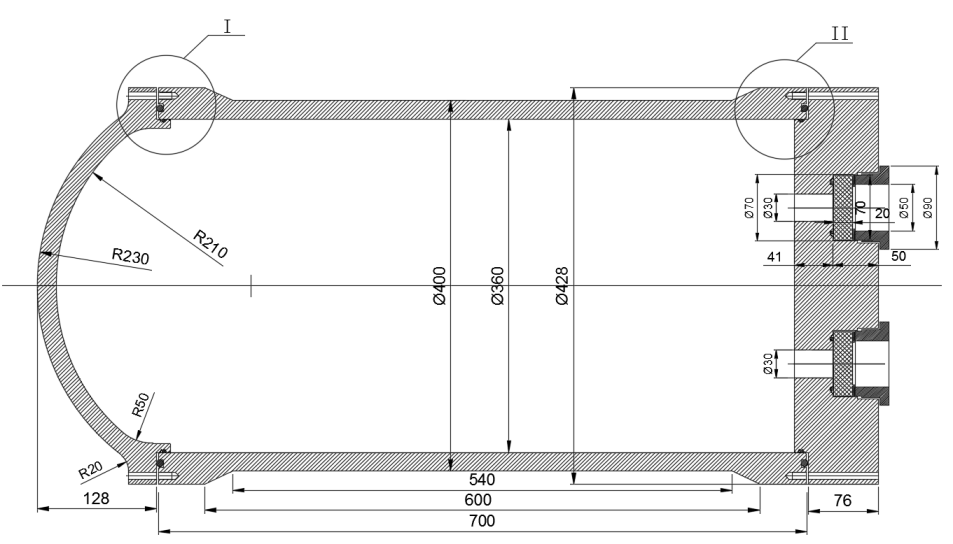


图2 耐压舱结构设计方案

**3.2 校核计算**

耐压舱由圆柱壳、球壳结构组成，参考载人潜水器耐压壳体设计计算规则等相关方法，耐压舱结构安全校核主要包括圆柱壳和球壳的应力、屈曲压力、极限承载能力等校核内容，结构校核计算方法及其结果见表3所示。结果表明，耐压舱结构强度和承载能力满足相关衡准要求。

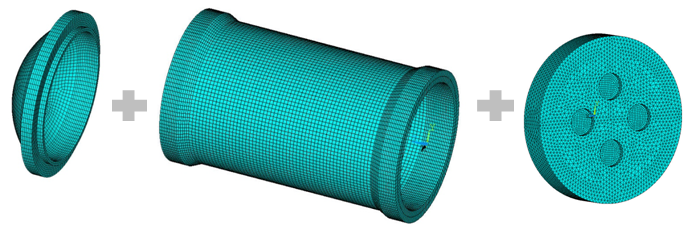
表3 耐压舱结构安全校核计算结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 校核内容 | | 计算方法 | 计算值 | 校核衡准 |
| 圆柱壳结构 | 中面周向应力 |  | 570.0 | ≤666 |
| 屈曲压力 |  | 63.9 | ≥60 |
| 极限承载能力 |  | 81.1 | ≥60 |
| 球壳结构 | 中面膜应力 |  | 330.0 | ≤658.6 |
| 屈曲压力 |  | 119.7 | ≥60 |
| 极限承载能力 |  | 129.7 | ≥60 |

**4 有限元仿真计算分析**

**4.1 有限元模型**

根据耐压舱结构设计方案，采用3维20节点固体结构单元SOLID186建立有限元模型，如图3所示，单元网格尺寸ESIZE=。有限元模型包括球冠封头、圆柱壳体、带开孔平封头三部分，球冠封头与圆柱壳体之间、平封头与圆柱壳体之间的法兰端面设置接触约束，在球冠封头顶部施加变形约束UZ=0（约束刚体位移）。



（a）球封头 （b）圆柱壳体 （c）平封头

图3 耐压舱有限元模型

**4.2 结构应力仿真计算**

在有限元模型外表面施加面载荷60MPa（模拟外部水压计算压力）进行仿真计算，根据应力计算结果，提取相关部位的结构应力按强度标准进行评价分析，如图4所示。

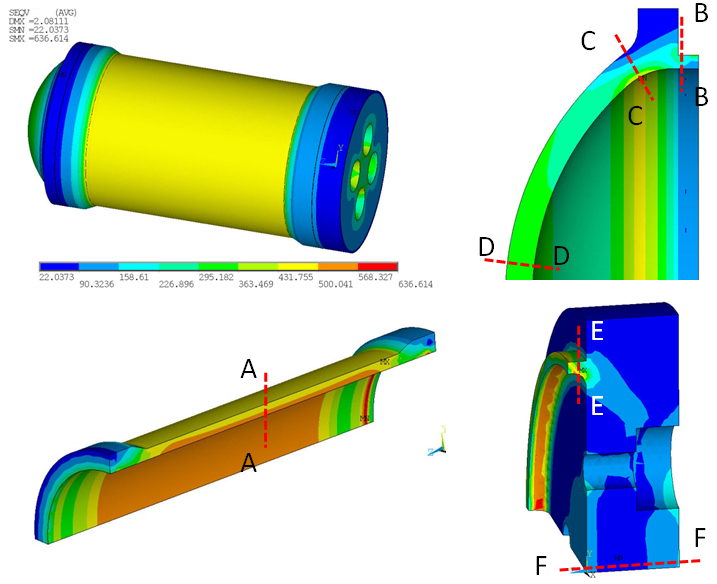


图4 耐压舱结构应力云图

耐压舱结构应力仿真计算结果见下表4所示，耐压舱圆柱壳和球壳典型部位的应力满足结构强度标准要求。

表4 耐压舱结构应力仿真计算结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 应力类型 | 位置 | 应力计算（MPa） | 强度标准（MPa） |
| 圆柱壳中面周向应力 | A-A截面 | 599.2 | ≤666.0 |
| 球封头法兰根部表面纵向应力 | B-B截面 | 353.3 | ≤851.0 |
| 膜应力和弯曲应力的组合应力 | C-C截面 | 546.1 | ≤823.3 |
| 球壳膜应力 | D-D截面 | 378.5 | ≤658.6 |
| 平封头法兰根部表面纵向应力 | E-E截面 | 535.5 | ≤757.4 |
| 膜应力和弯曲应力的组合应力 | F-F截面 | 335.1 | ≤823.3 |

**4.3 承载能力仿真计算**

为计及耐压舱结构几何非线性，通过屈曲计算，可获得耐压舱结构的弹性屈曲压力和屈曲模态，其第一阶屈曲形态如图5所示，对应的弹性失稳压力为137.9MPa。

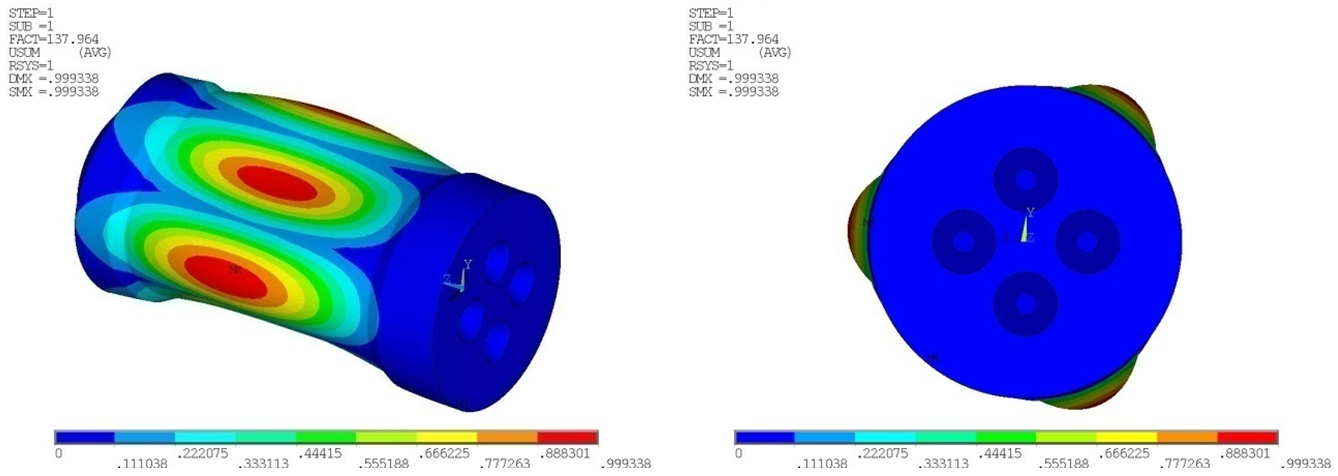
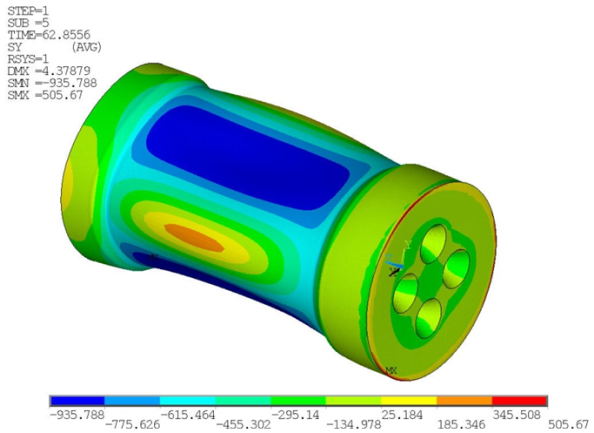
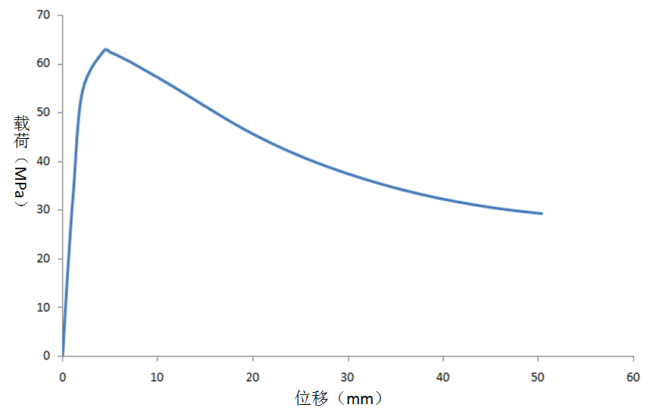


图5 接收端水密舱屈曲模态

取一阶模态导入初始缺陷，设置初始缺陷幅值为0.1×t=2mm，耐压舱材料非线性按Bilinear弹塑性模型，屈服强度设置为740MPa，利用弧长法进行非线性屈曲分析，计算结果如图6所示。根据计算结果，耐压舱的极限承载能力为62.8MPa，大于结构计算压力，满足结构承载能力要求。

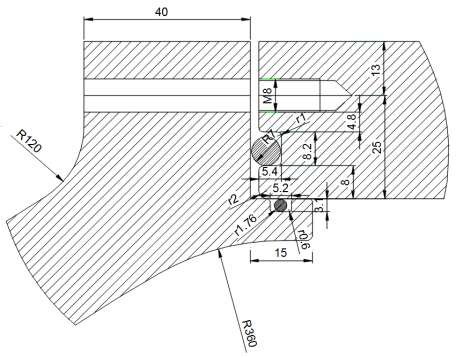
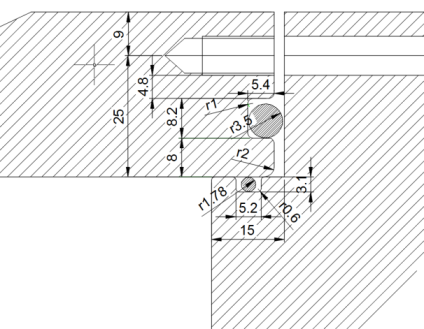
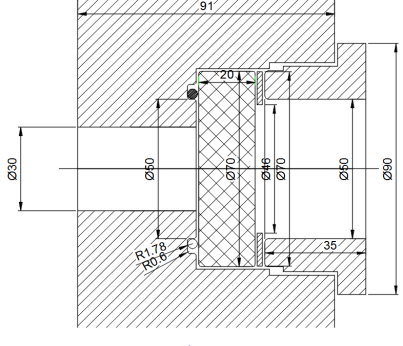
（a）破坏形态云图 （b）载荷-变形曲线

图6 耐压舱极限承载能力仿真计算结果

**4.4 密封性能仿真计算**

耐压舱端部封头与圆柱壳体之间密封结构采用两道o形圈分别进行轴向密封和径向密封，并利用螺栓进行紧固连接，轴向密封圈线径Φ7mm，内直径Φ376mm，密封凹槽尺寸深5.4mm、宽8.2mm，径向密封圈线径为Φ3mm，内直径Φ352mm，密封凹槽尺寸深3.1mm、宽5.2mm；光窗底座采用一道o形圈、通过螺母压紧光窗玻璃进行密封，密封圈线径Φ3.55mm，内直径Φ50mm，密封凹槽尺寸深3.1 mm 、宽5.2mm，如图7所示。

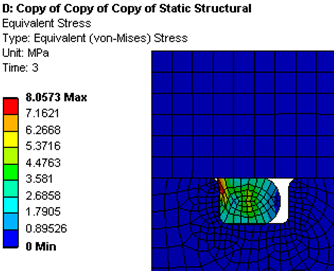
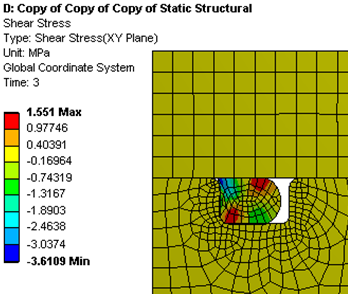
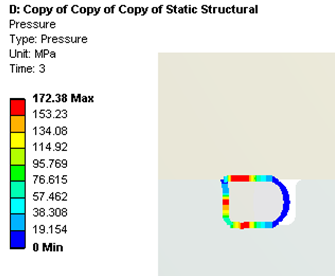
o形圈的密封性能评价如下：1）o形圈最大等效应力小于材料的屈服强度，即：，o形圈橡胶的屈服强度为23MPa；2）o形圈最大剪应力小于材料的抗剪强度，即 ，o形圈橡胶的抗剪强度为4.6MPa；3）o形圈与法兰面之间的最大接触压力大于静水压力（计算压力），即。

（a）球封头端密封结构 （b）平封头端密封结构 （c）光窗密封结构

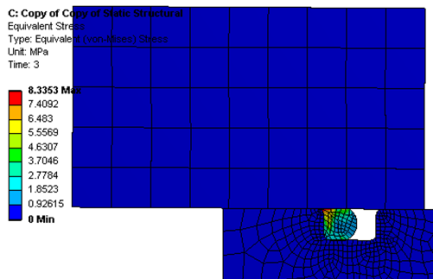
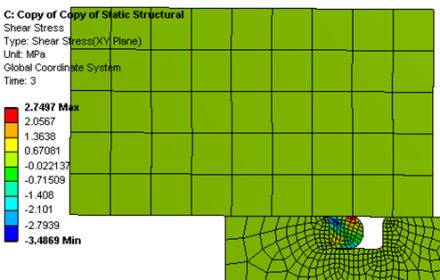
图7 耐压舱端部封头密封结构形式

o形圈材质为丁晴橡胶，有限元仿真计算时采用Mooney-Rivlin超弹模型描述材料本构关系，耐压舱密封性能仿真计算结果云图如图8-9所示。

（a）合成应力云图 （b）剪切应力云图 （c）接触应力云图

图8 耐压舱封头端部密封性能仿真计算应力云图

（a）合成应力云图 （b）剪切应力云图 （c）接触应力云图

图9 耐压舱光窗密封性能仿真计算应力云图

计算结果表明：

1）耐压舱封头端的o形圈等效应力最大为8.1MPa，位于密封圈内侧上部与密封槽接触部位，其值小于橡胶的屈服强度（23MPa）；其最大剪应力为-3.6MPa，位于密封圈内侧上部与密封槽接触部位，其值小于橡胶的抗剪强度（4.6MPa）；密封圈接触压力为172.4MPa，大于外部静水压力，密封圈不会发生渗漏。

2）光窗底座处的o形密封圈等效应力最大为8.3MPa，位于密封圈内侧上部与密封槽接触部位，其值小于橡胶的破坏强度；其最大剪应力为-3.5MPa，位于密封圈内侧上部与密封槽接触部位，其值小于橡胶的抗剪强度；密封圈接触压力为177.5MPa，大于外部静水压力，密封圈不会发生渗漏。

**5 结果比较分析**

根据前文所述计算结果，耐压舱的结构强度与承载能力计算结果汇总见表5所述。显然，文中关于耐压舱结构应力与承载能力的解析计算值与有限元仿真计算结果较为一致。

表5 耐压舱结构强度与承载能力计算结果比较

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 计算内容 | | 解析计算值 | 有限元仿真计算值 |
| 圆柱壳结构 | 中面周向应力 | 570.0 | 599.2 |
| 屈曲压力 | 63.9 | 62.8 |
| 极限承载能力 | 81.1 | / |
| 球壳结构 | 中面膜应力 | 330.0 | 378.5 |
| 屈曲压力 | 119.7 | / |
| 极限承载能力 | 129.7 | / |

**6 结论**

本文围绕某水下激光通信耐压舱开展结构设计与安全评估研究，主要结论如下：

（1）针对水下激光通信耐压舱的结构特点和设计目标，提出了一种钛合金舱体和蓝宝石光窗的耐压结构方案。

（2）采用理论分析与有限元仿真方法研究评估耐压舱的结构强度和承载能力，两者计算结果比较一致，且满足结构安全衡准要求。

（3）基于Mooney-Rivlin超弹模型的密封性能仿真表明耐压舱的密封结构合理可行，满足深海耐压密封性要求。

论文研究结果可以直接为该水下激光通信系统耐压舱的工程设计提供依据，也可为类似耐压结构设计提供技术参考。

参 考 文 献：

[1]曾凤娇,杨康建,宴旭,等.水下激光通信系统研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(3):1-12.

[2]刘润芃,佟首峰,张鹏.水下光通信技术研究[J].光通信研究,2023,(4):11-14.

[3]李碧丽,贺锋涛,朱云周,等.大功率水下激光通信发射系统研究[J].自动化与仪器仪表,2022,(2):30-33.

[4]姜艳,邹雨泽,朱平杰,等.水下无人潜航器无线通信技术研究[J].舰船电子工程,2022,42(11):69-73.

[5]载人潜水器耐压壳体设计计算规则[R].中国船舶科学研究中心,2019.

[6]吴梵,朱锡,梅志远.船舶结构力学[M].北京:国防工业出版社,2010.

[7]徐秉汉,朱邦俊,欧阳吕伟,裴俊厚.现代潜艇结构强度的理论与试验[M].北京:国防工业出版社,2007.

[8]朱邦俊,万正权.环肋圆柱壳应力分析的一种新方法[J].船舶力学,2004,8(4):61-67.

作者简介：

陈沙古，男，1984年生，高级工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究，联系电话：13812540425；

地址：无锡市滨湖区山水东路222号；邮箱：[chenshagu@163.com](mailto:chenshagu@163.com)。

高 原，男，1993年生，工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究。

冯令良，男，1995年生，工程师，主要从事水下工程结构测试技术与信息化研究。

谢晓忠，男，1989年生，高级工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究。