

项目名称： 深渊装备耐压舱及其组件关键技术研发与应用

项目简介：

本项目属于深海机械装备制造制造技术领域。

高端海洋装备研发是中国科技创新发展规划的国家战略。6000 至 11000 米级深渊装备是其前沿和制高点。我国深渊装备研发起步晚、技术跨越大，迫切需要理论体系拓展和技术创新，以保证国际领先地位。耐压舱是深渊装备的关键部件和承压单元，其核心技术为结构与安全评估。

现役耐压舱存在非对称元素敏感性高、空间利用率低等固有不足，并缺乏长期使用安全评估系统。项目组经多年持续攻关，突破了深渊装备耐压舱及核心组件服役安全评估技术瓶颈，创新了卵形仿生耐压结构，攻克了多项制造和检测关键技术，实现了工程化示范应用。整体技术达到国际先进水平，深渊耐压舱疲劳寿命预报统一方法和蛋形耐压舱仿生设计方法达到国际领先水平。创新如下：

(1) 提出了覆盖全海深的耐压舱总体设计需求模型，建成了深渊装备耐压舱试验验证体系与设施，制定了 11000 米级的极限水深陆上和海上试验方法，为深渊耐压舱及核心组件研发和试验考核验证提供了重要支撑。

(2) 在国际上首次提出了基于广义概率论和循环蠕变裂纹扩展率时域模型的深渊耐压舱疲劳寿命预报统一方法，弥补了基于累积损伤的传统低周疲劳寿命预报方法的不足；创新了超高强度钢耐压舱极限承载能力评估模型，建立了舱体实物模型抗压分析方法，研发了覆盖全海深的耐压舱设计与分析系统，填补了国内外现有船级社规范空白，为全海深载人舱设计和安全营运奠定了基础。

(3) 在突破传统耐压舱技术瓶颈基础上，为克服其固有不足，创新了蛋壳、桂圆壳等卵形仿生耐压结构。建立了等厚、变厚蛋壳设计函数及超高压环境下多蛋壳连接变形协调理论，形成了蛋形耐压舱仿生设计方法，蛋形舱载荷衰减率提高 50%、空间利用率提高 30%；发现了桂圆壳仿生结构模型，桂圆舱整体抗压能力提高 10%，为开拓未来新型潜水器耐压舱创新设计与应用奠定了理论基础。

(4) 攻克了深渊耐压舱及核心组件设计、制造和检测技术，发明了主被动平衡耐压装备、双半球壳密封锁紧机构、异形壳无模成形方法、大尺寸回转壳定位测量装置、复杂压力环境测试系统，实现了 11000 米级高压环境下的实时观测和极端海况下的试验考核验证，保障深渊耐压舱及核心组件质量和服役安全性。

项目授权发明专利 42 件，其中国际发明专利 6 件；获批软件著作权 4 件；发表业界公认的高质量论文 53 篇，其中 ESI 高被引 1 篇；出版英文专著 2 部、中文专著 1 部、编著 1 部；参与制定国家标准 1 项。研究成果受中央电视台、上海东方卫视等媒体广泛报道，近三年累计新增利税 8675.9 万元，新增产值 2.17 亿元，社会经济效益显著。

项目研发的深渊装备耐压舱及核心组件关键技术，成功应用于 2 台全海深无人潜水器、5 台全海深着陆器，并在全海深载人潜水器研制中发挥重要作用。无人潜水器和着陆器由“张謇号”、“沈括号”母船搭载，先后 30 多潜次在玛索海沟、新不列颠海沟、马里亚纳海沟获得了万米深渊的宏生物、微生物、海水、沉积物样品及宝贵影像资料，在深渊资源开发利用中发挥重要的引领示范作用。

主要完成单位

1 单位名称：上海海洋大学

排名：1

主要贡献：作为第一完成单位，组织其它完成单位，共同开展深渊装备耐压舱及核心组件关键技术研发与应用工作，在深渊耐压舱总体设计与海试科考、寿命预报、仿生技术、加工检测等方面，做出了创造性贡献。具体如下：

(1) 建立了深海耐压壳总体设计需求模型，开发了深渊载人舱、全海深压载水舱、电舱、舱盖、密封锁紧装置等深海耐压装备及其组件，成功应用于彩虹鱼无人潜水器、着落器及彩虹鱼载人深渊器和 6000 米级载人潜水器的研制。

(2) 建立了基于古典概率论的广义概率论 (GPT) 和循环蠕变裂纹扩展率时域模型，提出了深海耐压壳统一疲劳寿命可靠性预报方法 (UFLP)，实现了彩虹鱼潜水器 6000 米级和 11000 米级深渊载人舱的可靠性设计。

(3) 发现了生物壳桂圆的卵形结构模型，分析了桂圆壳的高度对称性和良好抗压特性，揭示了形状系数正态分布规律，提出了卵形缺陷球壳仿生设计方法，为具有倾向性卵形缺陷的球形耐压壳设计与制造提供参考。

(4) 攻克了回转壳模压成形、车铣加工关键工艺技术，观察窗本构、舱盖断裂、试件疲劳参数测试方法，以及万米高压环境实时观测，为深海耐压壳及其验证模型加工制造、性能检测、抗压测试等提供保障。

(5) 2015-2019 年，将项目研制的深海耐压壳体及其组件，配套于彩虹鱼无人潜水器、全海深着落器，进行了 5 次海试试验，由“张謇号”、“沈括号”母船搭载，分别完成了 6000 米级海试和马里亚纳海沟 11000 米级海试。

2 单位名称：江苏科技大学

排名：2

主要贡献：协助第一完成单位上海海洋大学，在深海耐压壳抗压分析评估、蛋壳仿生设计、壳体测量测试、论文专利成果建设等方面，做出了创造性贡献。具体如下：

(1) 阐明了各类正高斯回转壳、舱盖在外压作用下非线性屈曲机理，揭示了屈曲载荷随着几何物理参数变化规律，提出了基于真实缺陷的外压中厚壳实物模型抗压分析方法，为深海耐压壳极限承载能力评估奠定理论基础。

(2) 建立了塑性衰减因子、缺陷衰减因子设计图谱，提出了深海耐压壳极限承载能力预报模型及验证策略，为彩虹鱼全海深潜水器载人舱、耐压电子舱、压载水舱等深海耐压壳评估提供了理论工具。

(3) 提出了蛋壳表观弹性模量和泊松比无损测试方法，论证了蛋壳具有超强抗压能力，是一种优异的仿生原型；建立了母线蛋形函数，揭示了蛋形系数分布规律及期望值，为蛋形耐压壳仿生建模及模型系数选取奠定了基础。

(4) 提出了蛋形耐压壳仿生设计方法，建立了等厚、变厚壳设计函数及多蛋壳连接变形协调理论，发明了一种新型深海蛋形耐压壳，为原创性深海潜水器耐压装置研发提供创新结构。

(5) 攻克了水气压力载荷转换放大、内外压差动态调节、压力舱筒柔性设计等技术，发明了深海压力环境测试系统，实现了深海耐压壳试验模型的作业抗压能力、极端海况行为、循环疲劳寿命测试。

3 单位名称：中电科（宁波）海洋电子研究院有限公司

排名：3

主要贡献：协助第一完成单位上海海洋大学，在深海耐压壳海试信息通讯与数据处理、水下搭载设备布放、深海耐压技术推广应用方面，做出了创造性贡献。具体如下：

(1) 提出了基于 MEMS 的固态导航雷达目标检测的补偿方法，发明了一种舵角指示系统、静水压力释放器，为彩虹鱼无人潜水器、全海深着落器 5 次海试试验，提供信息通讯、数据处理、搭载设备布放设备，并形成国家标准一项（GB/T 31843.2-2019）。

(2) 将第二完成单位江苏科技大学的多个耐压壳设计与制造专利成果，在中电科（宁波）海洋电子研究院有限公司，进行推广应用，将耐压壳配套于电子通信导航系列产品，并形成销售，为深远海资源勘探开发提供配套设备。

4 单位名称： 上海彩虹鱼科考船科技服务有限公司

排名： 4

主要贡献：作为第四完成单位，协助第一完成单位上海海洋大学，在科考母船建造、海试方案制定及深海装备推广应用方面，做出了创造性贡献。具体如下：

(1) 依据深渊科学技术流动实验室理念，建造了专门用于深海耐压壳及其集成潜水器、着落器海试的“张謇号”、“沈括号”科考母船。

(2) 参与制定海试方案，先后开展了 5 次海上试验，彩虹鱼无人潜水器完成了 6000 米级海试，5 台全海深着落器完成了马里亚纳海沟 11000 米级海试。

(3) 将本项目开发研制的着陆器等进行推广应用，通过联合载体“张謇号”、“沈括号”等科考母船给用户提供服务，实现了良好经济社会效益。

5 单位名称： 宝钛装备制造（宝鸡）有限公司

排名： 5

主要贡献：作为第五完成单位，协助第一完成单位上海海洋大学，在深海耐压壳加工制造技术及其推广应用方面，做出了创造性贡献。具体如下：

(1) 攻克了各类中厚度回转耐压壳模压成形、车铣加工等关键工艺技术，成功完成了 6000 米级载载人舱，全海深压载水舱、电舱、舱盖、密封锁紧装置等深海耐压装备及其组件的加工制造。

(2) 将本项目研制的耐压壳模压成形、车铣加工等关键工艺技术，进行推广应用，制造了各类深海耐压壳，广泛应用于深海载人潜水器、无人潜水器、水下机器人等水下工程装备。

主要完成人员

完成人：王芳

所在单位：上海海洋大学

排名： 1

主要贡献：项目总设计师，疲劳寿命预报、桂圆仿生设计、组件性能检测的课题负责人。对本项目创新点 1 中（2）、（4），创新点 2 中（2），创新点 3 中（2）、（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 80%。支撑材料：发明专利 5 件：ZL201710224516.8、ZL201710225008.1、ZL201710232949.8、ZL201710233630.7、ZL201410163455.5；软著 1 件：2021SR0321538；通讯作者发表 SCI 论文 6 篇，EI 论文 2 篇；第三作者出版专著 1 部、编著 1 部。

完成人：张建

所在单位：江苏科技大学

排名：2

主要贡献：项目副总设计师，抗压评估分析、蛋壳仿生设计、深海抗压测试的课题负责人。对本项目创新点 1 中（2）、（3），创新点 2 中（1）、（2），创新点 3 中（1）、（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 75%。

支撑材料：发明专利 6 件：US10343749B2、ZL201510746100.3、ZL201710232949.8、ZL201510073803.4、ZL201510519824.4、ZL201610077586.0；通讯作者发表 SCI 论文 9 篇，EI 论文 1 篇；第一作者出版专著 1 部；软件著作权 1 个：2018SR261893。

完成人：崔维成

所在单位：西湖大学

排名：3

主要贡献：项目副总设计师，疲劳寿命预报、桂圆仿生设计、组件性能检测的课题负责人。对本项目创新点 1 中（2）、（4），创新点 2 中（2），创新点 3 中（2）、（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 80%。

支撑材料：发明专利 5 件：ZL201710224516.8、ZL201710225008.1、ZL201710232949.8、ZL201710233630.7、ZL201410163455.5；通讯作者发表 SCI 论文 6 篇，EI 论文 2 篇；第三作者出版专著 1 部、编著 1 部。

完成人：唐文献

所在单位：江苏科技大学

排名：4

主要贡献：项目骨干，自平衡耐压壳、生物仿生建模、壳体加工测量的课题负责人，对本项目创新点 1 中（1）、创新点 2 中（1），创新点 3 中（1）（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 70%。

支撑材料：发明专利 6 件：ZL201510586853.2、ZL201510501537.0、ZL201710440967.5、ZL201610538636.0、ZL201710034140.4、ZL201610691915.0；通讯作者发表 SCI 论文 3 篇；第一作者出版专著 1 部；软件著作权 1 个：2015SR083237。

完成人：朱永梅

所在单位：江苏科技大学

排名：5

主要贡献：项目骨干，深海耐压壳开孔及封头研发负责人。对本项目创新点 1 中（1）、（2）、创新点 3 中（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 60%。

支撑材料：发明专利 5 件：ZL201510737765.8、ZL201610214942.9、ZL201710233630.7、ZL201710224516.8、ZL201510742830.6；通讯作者发表 SCI 论文 3 篇，第三作者出版专著 1 部；软件著作权 1 个：2015SR248788。

完成人：潘彬彬

所在单位：上海海洋大学

排名：6

主要贡献：项目骨干，深海耐压壳极限承载能力子项课题负责人，深海耐压壳及其组件在全海深着落器上集成应用及海试负责人，对本项目创新点1中（1）、（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的50%。支撑材料：发明专利4件：ZL201710232949.8、ZL201710233630.7、ZL201410163451.7、ZL201410163455.5。

完成人：胡勇

所在单位：上海交通大学

排名：7

主要贡献：项目骨干，钛合金深海耐压壳抗压计算子项课题负责人，深海耐压壳及其组件在彩虹鱼无人潜水器上集成应用及海试负责人。对本项目创新点1中（1）、（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的50%。支撑材料：发明专利3件：、ZL201710233630.7、ZL201410163451.7、ZL201410163455.5。

完成人：连雪海

所在单位：中电科（宁波）海洋电子研究院有限公司

排名：8

主要贡献：项目骨干，负责深海耐压壳海试信息通讯与大数据处理，对本项目创新点1中（1）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的40%。支撑材料：发明专利2件：ZL201710650110.6、ZL201810633288.4。

完成人：齐继阳

所在单位：江苏科技大学

排名：9

创造性贡献：项目骨干，负责深海耐压壳海试故障诊断、耐压壳焊接加工监测，对本项目创新点1中（1），创新点3中（1）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的40%。支撑材料：发明专利3件：ZL201610095084.0、201510602754.9、ZL201510559853.3。

完成人：姜哲

所在单位：上海海洋大学

排名：10

主要贡献：项目骨干，负责高强度钢耐压壳及其组件疲劳寿命计算，以及海试方案设计。对本项目创新点3中（2）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的40%。支撑材料：发表SCI论文3篇，EI论文1篇。

完成人：苏世杰

所在单位：江苏科技大学

排名：11

主要贡献：项目骨干，负责深海耐压壳加工数据分析与加工误差测量。对本项目创新点 3 中第 2) 条做出了创造性贡献：组织完成了深海耐压壳加工数据分析与加工误差测量；参与完成了深渊耐压舱及组件性能检测技术开发。在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 30%。在本项目中获得发明专利 2 件：ZL201610279649.0、ZL201510674335.6。

完成人：陈峰落

所在单位：同济大学

排名：12

主要贡献：项目骨干，负责 6000 级载人舱的设计，参与疲劳寿命预报统一方法的建立。对本项目创新点 1 中（2）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 35%。支撑材料：获软著 1 件 2021SR0321538“小时间域裂纹扩展模型分析软件”。

完成人：周通

所在单位：江苏科技大学

排名：13

主要贡献：项目成员，负责自平衡耐压技术开发与测试，对本项目创新点 1 中（1），创新点 3 中（3）做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 30%。发明专利 2 件：RU2681825C1、ZL201510519824.4。

完成人：左新龙

所在单位：江苏科技大学

排名：14

主要贡献：项目成员，负责多蛋交接耐压壳研发，对本项目创新点 2 中（2），做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 30%。发明专利 2 件：ZL201610077586.0、ZL201510386319.7。

完成人：王明禄

所在单位：江苏科技大学

排名：15

主要贡献：项目成员，负责蛋形耐压壳仿生设计，对本项目创新点 2 中（2），做出了创造性贡献，在该项目研发工作中投入的工作量约占本人工作总量的 30%。发明专利 1 件：ZL201510073803.4；通讯作者 SCI 论文 2 篇。

新增直接经济效益

1、中电科（宁波）海洋电子研究院有限公司经济效益，源于配套本项目耐压舱及核心组件的各类海洋电子通信导航产品，2018 年销售 1898.9 万元；2019 年销售 3593.5 万元；2020 年销售 3887.1 万元；利润率为 21.4%、2018 年税率为 17%、2019 年税率为 16%、2020 年税率为 13%。

2、上海彩虹鱼科考船科技服务有限公司经济效益，源于项目的实施开发出“张謇”号、“沈括号”号等科考母船以及深渊装备海试方案，用于深渊科考和深渊装备的海上试验，科考母船租赁费平均 21 万元/天，平均利润为 5 万元/天，2018 年租赁 70 天、2019 年租赁 115 天、2020 年租赁 112 天，共计租赁 297 天，累计新增销售 6237 万元，累计新增利润 1485 万元，累计新增税收 624 万元。

3、宝钛装备制造（宝鸡）有限公司经济效益，源于承接深渊装备耐压舱及核心组件的加工制造，2018 年新增产值 898.9 万元；2019 年新增产值 2593.5 万元；2020 年新增产值 3605.4 万元；利润率为 36.8%、2018 年税率为 17%、2019 年税率为 16%、2020 年税率为 13%。