

# 深海耐压结构研究现状和发展趋势

王芳<sup>1,2</sup>, 崔维成<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 316000; 2. 上海海洋可再生能源工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 西湖大学 工学院 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 杭州 310024)

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52071203); 上海市工程技术研究中心建设计划“上海海洋可再生能源工程技术研究中心”(19DZ2254800)

## 摘要

我国在深海资源开发和发展深海技术的背景下, 不断进行装备的国产化攻关和关键技术的巩固与提升, 并以此为目标基本完成了大深度载人/无人潜水器的谱系化建设。耐压结构设计、制造、测试和评估技术是深海装备发展的基础之一。对深海耐压结构在材料、结构型式、制造工艺等方面的研究现状进行回顾, 对新型材料、仿生型结构的探索性研究成果以及制造工艺的突破性进展进行介绍, 对未来深海耐压结构研究的发展趋势进行探讨。

## 01 我国深海载人/无人潜水器发展现状

深海载人/无人潜水器是开展深海资源开发和发展深海技术的重要移动式平台之一。过去十几年内, 在继突破7 000米级“蛟龙”号载人潜水器研发之后, 我国又成功研发了以实现国产化为主要目标的4 500米级“深海勇士”号载人潜水器和“潜龙”号、“海马”号无人潜水器, 以深渊区科学考察为目标任务的11 000米级“奋斗者”号载人潜水器和“海斗”号、“逐梦”号、“海龙11 000”号无人潜水器, 基本实现了大深度载人/无人潜水器的谱系化建设, 如图1所示。未来20年~30年, 载人/无人潜水器将配合其他固定式和移动式

海洋观测平台, 完成深海资源勘测的编队协同作业。

我国在海洋技术发展战略中, 强调开展基础理论、应用技术、服役性能一体化研究, 建立设计、研究、应用的创新发展机制。大深度潜水器技术起步晚、技术跨越大, 但在成功突破万米之后, 我国已基本掌握了水下各类潜水器的总体设计和集成技术。以此为牵引的大深度耐压结构的设计、制造、安全评估技术理论体系不断完善, 以确保载人潜水器功能实现的可靠性和对极端环境的适应性。对大深度载人潜水器耐压结构设计可靠、制造可靠、使用可靠三者之间协调统

一的把握是未来谱系化作业能力和合理应用场景构建的基础。

过去十年内, 各国依托在研潜水器项目<sup>[1-3]</sup>, 基础科学与共性技术新概念、新思想、新技术纷纷涌现, 基础研究和装备研制并进。近几年, 我国学者在潜水器耐压结构材料探索<sup>[4-5]</sup>、设计和试验方法<sup>[6-7]</sup>、服役安全性评估方法<sup>[8-9]</sup>上仍不断完善系统化的见解, 研究成果显著, 以应力状态和结构变形为目标的健康检测也在潜水器服役过程中得到应用<sup>[10]</sup>。国内外学者对大深度耐压结构的研究仍在深入。

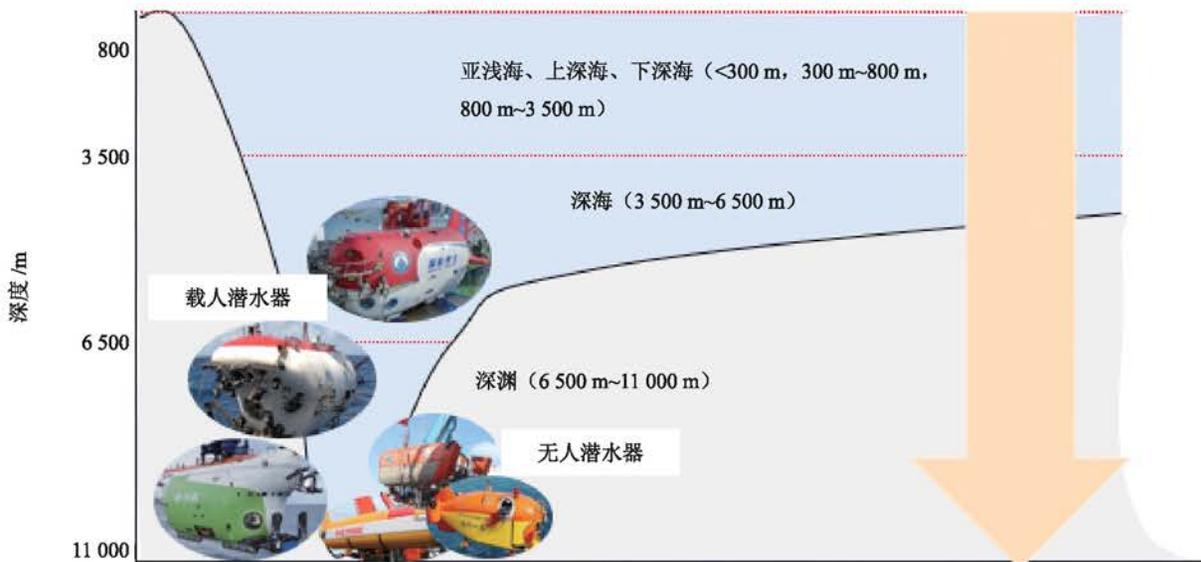


图1 中国大深度载人/无人潜水器谱系化

## 02 深海耐压结构材料应用

深海耐压结构总体性能受材料、结构形式、载荷和环境因素影响，其中材料是性能优化的前提，也是研究和设计人员关注的重点。深海服役环境的特殊性决定了设计人员在材料选择上必须考虑比强度、比刚度、抗疲劳和抗腐蚀等综合因素<sup>[4]</sup>。为优化潜水器性能，可选择的高性能材料包括目前在役潜水器中使用的以高强度钛合金、高强度钢、铝合金为代表的金属材料<sup>[4-5]</sup>，和以复合材料、陶瓷、有机玻璃为主的非金属材料。由于具备质量小、强度高、耐腐蚀、可加工性强等优势，非金属材料越来越体现出其在水下耐压结构应用的发展潜力<sup>[11]</sup>，以适应不断提高的设计要求以及不同的应用场景。其中，深海耐压壳使用的金属材料相对比较成熟，主要强调高强高韧性，金属壳体的设计方法和以此

为基础的设计标准也在经验积累的过程中逐渐固化<sup>[12]</sup>。我国3台大深度载人潜水器的载人球壳均以高强高韧钛合金为壳体材料。全海深潜水器研发的需求也带动了高性能钛合金材料的发展<sup>[4,8]</sup>和对超高强度钢的探索<sup>[5,7,9,13]</sup>。

纤维增强树脂基复合材料在水下的应用研究始于20世纪60年代，玻璃纤维增强树脂基复合材料（Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP）和碳纤维增强树脂基复合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）是2种主要的耐压壳备选复合材料<sup>[11]</sup>，制造技术的进步逐步推动了高性能复合材料在潜水器耐压壳中的应用。20年前，玻璃纤维/环氧树脂复合材料就在美国千米级潜水器 Deep Flight I 的耐压壳中应用。在美国、韩国、中国等国家启动的水下滑翔机（Underwater

Glider, UG）项目中，碳纤维耐压壳结构的使用对优化滑翔机性能起到了重要的作用<sup>[14-15]</sup>。近年来，我国轻型复合材料耐压舱研制不断取得新进展。几十年来，陶瓷材料也备受关注，尤其近二十年内氧化铝陶瓷和高温陶瓷耐压壳的研究发展迅速，主要应用于无人潜水器、海底地震仪、滑翔机等水下装备的关键设备耐压舱<sup>[16-18]</sup>。除了高强度和低密度，陶瓷壳体还具有耐腐蚀、电绝缘、非磁性和可透过辐射等优点，但其固有的脆性使其应用范围受到很大的限制，基于增韧研究的高性能先进陶瓷材料有待发展。有机玻璃是水下观光潜水器的主要耐压材料，为载人壳提供半透明或全透明视野。过去，大深度载人潜水器使用有机玻璃制造观察窗的应用研究经验的积累<sup>[19-21]</sup>也为通透型耐压舱的设计提供了

前期基础。二十世纪七八十年代, STACHIEW 博士对有机玻璃球壳在 2 439 m 深海的应用以及环境、材料老化、压力和开孔等因素对有机玻璃球壳的影响进行了研究<sup>[19]</sup>。近几年美国、荷兰、加拿大、中国在全通透观光潜水器产品制造能力上发展迅速。为提高有机玻璃耐压结构的长期使用安全性, ASME 规范<sup>[22]</sup>考虑了很高的安全系数, 设计厚度限制了有机玻璃作为完整球壳材料大

深度条件下的应用。有限元分析中观察到的 von Mises 应力和位移与设计压力相比要小得多<sup>[23]</sup>, 这给控制设计中考虑的安全系数带来了积极的希望。然而, 对设计安全系数更加成熟的思考还应基于对疲劳、蠕变和裂纹萌生等长期使用因素的分析 and 理解。大深度全透明设计的挑战要求掌握确定合理的设计安全系数的理论依据。

安全角度进行的基础理论研究, 过去几年主要集中在以潜水器长期循环载荷下的疲劳寿命预报为目标的材料性能的本构模型和性能变化规律<sup>[8]</sup>。对材料长期使用性能的把握, 配合耐压结构关键部位的长期实时健康检测和损伤识别, 以及合理可靠的寿命评估模型<sup>[24]</sup>, 如图 2, 可为潜水器安全使用保驾护航。

以完善理论体系和保证服役

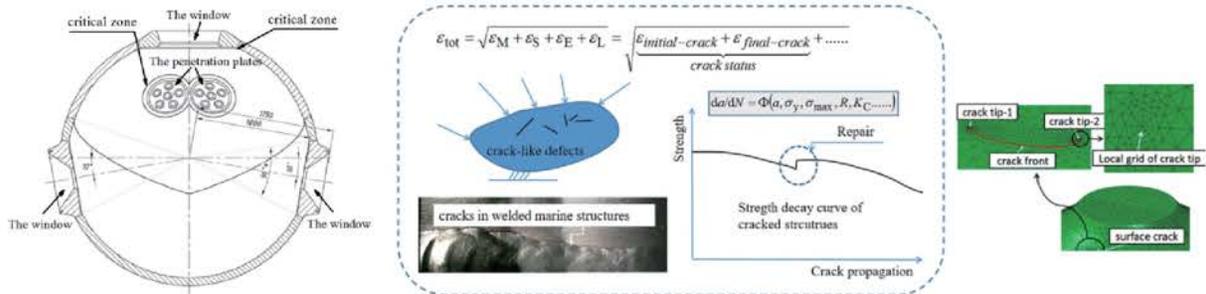


图 2 基于材料性能变化规律的大深度耐压壳长期寿命评估模型

## 03 深海耐压结构设计方法

长期以来, 球壳是大深度耐压结构的主要形式, 大量的研究集中在以钛合金、高强度钢为主要壳体材料的球壳结构的设计优化和参数化性能分析。初挠度、厚度和残余应力等缺陷的实测数据越来越充分, 基于实测因素的理论研究和试验研究使得适用于不同金属球壳的极限强度计算方法和非线性数值仿真方法更加完善<sup>[25]</sup>。中国船级社规范不断吸收了大深度载人潜水器载人舱在材料制备、加工工艺、设计方法上的研究成果<sup>[12]</sup>。未来, 基于金属球壳非线性屈曲破坏准则的设计方法可逐渐在复合材料、陶瓷、有

机玻璃球壳应用中获得修正。

部分学者通过对比圆柱、椭球、球-球、球-柱-球形式耐压壳的容重比, 发现椭球的容重比最高。近些年, 半球、碟形与椭球(图 3(a))等各种回转壳广泛应用于水下耐压结构封头和舱体设计。研究表明, 碟形封头适用于浅海低压环境, 椭圆形封头适用于深海高压环境<sup>[26-27]</sup>。尤其环肋扁长椭球封头结构具有良好的抗压能力和流线型, 但缺点是设计计算难度大、壳内空间利用率低、工艺复杂、加工成本高。近年来, 蛋形耐压壳(图 3(b))已被证明比其他形状的耐压壳具有更大的

优越性<sup>[28-29]</sup>。研究表明, 蛋形壳体满足圆顶原理, 具有超强的耐压特性和流线型, 是一种优异的仿生原型, 可最优协调潜水器的安全性、快速性、空间利用率、人机环等性能。理论研究提出了蛋形壳体容积、质量、浮力系数求解方程, 以及其强度与屈曲解析公式, 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, 并基于非线性屈曲机理的蛋形破坏分析和比例模型试验验证了蛋形仿生壳体的优越性, 在载荷衰减率、空间利用率、水阻力等方面均克服了传统球形耐压舱的固有不足, 为

新型潜水器耐压舱的创新设计提供创新结构。

近几年,考虑新型材料在水下耐压结构中应用的潜力,部分学者开展了复合材料蛋形潜水耐压壳设计优化研究<sup>[30]</sup>,证明复合材料蛋形耐压壳和复合材料球

形耐压壳在减重、材料失效和结构稳定性等方面的综合性能几乎相同,而复合材料蛋形耐压壳的缺陷敏感性低于复合材料球壳。层数、纤维夹角和材料体系在很大程度上决定了铺层顺序和耐压壳的设计方法。复合材料耐压壳

在进入制造过程前的优化设计是研究人员和设计工程师非常感兴趣的问题<sup>[11]</sup>。探讨各种复合材料的结构优化方法可为新型耐压结构设计提供基础。

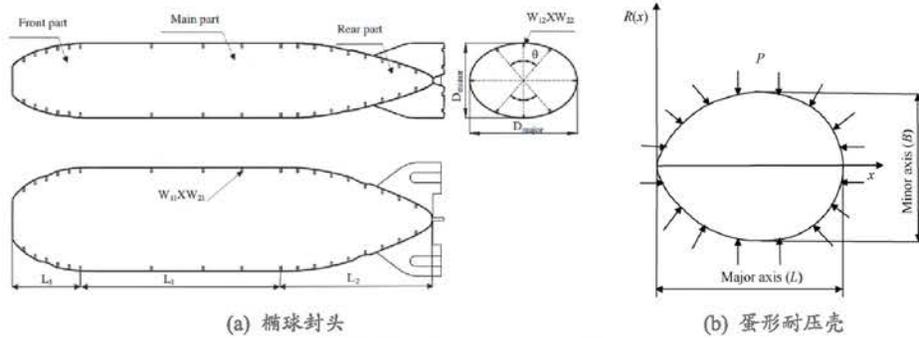


图3 不同形式耐压壳结构示意图

## 04 深海耐压结构制造技术

国内深海装备的快速发展,促进了大型耐压结构制造工艺的进步。在大深度载人潜水器谱系化发展过程中,我国逐步掌握了高强度合金焊丝加工技术、大厚度宽幅板冲压成形、大厚度耐压壳体焊接和热处理技术、焊接接头消应处理技术,攻克了大尺度耐压壳体开孔、密封、锁紧和舱盖设计的关键技术以及孔口围壁优化方法和核心组件的设计理论,完善了大厚度耐压结构的设计及制造规范<sup>[12]</sup>。随着“奋斗者”号的研制,我国在球壳制造工艺

上逐步刷新了钛合金宽幅、超厚板材制备技术(见图4),壳体安全性随之提高。制造能力的发展将拉动我国深海装备材料与制造技术发展进步。

作为探索性研究,基于基本板壳单元相互组合的异形回转壳无模成形方法<sup>[31-32]</sup>可用于高效蛋形结构制造,将复杂异形回转壳简化为多个基本板壳单元组合而成的简单叠加壳,再通过施加内压发生塑性变形,成为目标壳体,满足深海耐压结构多品种、单件小批量、大尺寸制造特点,

无需单独开设模具,可有效降低成本,提高效率。

近年来,我国轻型高分子复合材料深海耐压舱制造技术有了新突破。基于拓扑变换的缠绕策略和舱体预应力紧身等新技术,成功解决了碳纤维缠绕深海高压舱体的难题<sup>[33]</sup>,轻型高分子复合材料深海耐压舱制造突破2 000 m大关,可广泛应用于无人遥控潜水器、自主式水下潜器、潜标和水下滑翔机等多种海洋观测平台。



(a) 壳体冲压



(b) 半球成型



(c) 耐压壳焊接

图4 我国高强高韧钛合金壳体制造技术

## 05 深海耐压结构研究发展趋势

随着新技术、新方法、新材料、新工艺的出现,未来深海耐压结构研究的发展趋势将体现在如下3个方面:

1) 跨物质层次和多尺度的海洋工程材料设计研究将推动材料快速发展,仿生学研究将为创新型结构的设计理念提供基础,3D打印制造技术将成为新材料应用于复杂耐压结构制造的主要方向。基于系统论观点的耐压结构安全评估方法将受到更加重视,人为因素在耐压结构设计、

制造和使用过程中的影响将会被更加充分地考虑<sup>[34]</sup>。

2) 大尺寸高强度金属耐压结构焊接强韧性机理和组织调控工艺有待进一步研究,为未来大型深海装备研制奠定基础;非金属材料的应用还需要不断加深对设计理论、制造工艺、经济性等关键问题的探索,尤其需在层间性能的优化、结构失效模式的预测、安全系数的理论基础及复合材料结构与金属结构间连接强度计算方法上取得突破,功能一体

化的设计方法和耐久性研究尤为重要。

3) 新型海洋工程材料的应用将促进材料与海洋环境的多系统交互作用机理的研究,集理论、计算和试验为一体的研究手段和设计验证方法将逐步拓展。新型材料在极端海洋环境下的腐蚀和蠕变等行为与作用机制、材料微观组织与使用性能的关系模型和耐久性评估模型的研究对优化材料制备工艺、提高装备的使用安全性有着重要的意义。

## 06 结束语

我国在深海关键技术研究布局上,坚持国产化攻关,自立自强,坚持实际能力的巩固与提升。目前深海装备关键技术的研究方

兴未艾,新型海工材料和大型耐压结构设计理论的发展对我国形成领先世界的深海进入能力尤为重要。提高功能实现的可靠性和

对极端环境的适应性将是大幅度耐压结构设计、制造、测试和评估技术的发展目标。

## 参考文献:

- [1] 崔维成,刘峰,胡震,等.蛟龙号载人潜水器的7000米级海上试验[J].船舶力学,2012,16(10):1131-1143.
- [2] 王帅,向杨君.中国船舶:深海,我们勇往直"潜"[J].国防科技工业,2020(12):58-61.
- [3] CUI W C, HU Y, GUO W, et al. A Preliminary Design of a Movable Laboratory for Hadal Trenches[J]. Methods in Oceanography, 2014, 9: 1-16.
- [4] WANG F, CUI W C. Experimental Investigation on Dwell-fatigue Property of Ti-6Al-4V ELI Used in Deep-sea Manned Cabin[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 642: 136-141.
- [5] WANG F, HU Y, CUI W C. Preliminary Evaluation of Maraging Steels on Its Application to Full Ocean Depth Manned Cabin[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(12): 1557-1572.
- [6] 张博文,屈平,徐强,等.球柱结合式多球型耐压结构极限强度特性研究[J].中国造船,2020,61(2):35-42.
- [7] 王芳,杨青松,胡勇,等.全海深载人潜水器载人舱缩比结构模型试验研究[J].中国造船,2018,59(2):62-71.
- [8] WANG F, WANG K, CUI W C. A Simplified Life Estimation Method for the Spherical Hull of Deep Manned Submersibles[J]. Marine Structures, 2015, 44: 159-170.
- [9] ZHANG J, ZHANG Y W, WANG F, et al. Strength Characteristics of Maraging Steel Spherical Pressure Hulls for Deep Manned Submersibles[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(12): 1509-1526.
- [10] 杨华伟.深海耐压结构健康监测与在线评估技术研究[D].北京:中国舰船研究院,2018.
- [11] 罗珊,李永胜,王纬波.非金属潜水器耐压壳发展概况及展望[J].中国舰船研究,2020,15(4):9-18.
- [12] 中国船级社.潜水系统和潜水器入级规范[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [13] ZHANG J, ZHANG Y W, WANG F, et al. Experimental and Numerical Studies on the Buckling of The Hemispherical Shells Made of Maraging Steel Subjected to Extensively High External Pressure[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 172: 56-64.
- [14] OSSE T J, ERIKSEN C C. The Deepglider: A Full Ocean Depth Glider for Oceanographic Research[C]// OCEANS 2007. 2007.
- [15] KANG J I, JEOUNG S K, OH J Y et al. An Analysis of Carbon Fiber Hull Structure of a New Underwater Glider[J]. International Journal of Modern Physics B, 2018, 32(19): 1840065.
- [16] STACHIEW J D, PETERS D, MCDONALD G. Ceramic External Pressure Housings for Deep Sea Vehicles[C]// OCEANS 2006. 2006.
- [17] YANO Y, TAKAGAWA S. Exploratory Study on Engineering Ceramics Pressure Hulls for Deep-Sea Submergence Services[J]. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(3): 49-55.
- [18] TAKAGAWA S. New Ceramic Pressure Hull Design for Deep Water Applications[C]// OCEANS 2010. 2010.
- [19] STACHIW J D, DOLAN R B. Effect of Weather, Age, and Cyclic Pressurizations on Structural Performance of Acrylic Plastic Spherical Shells under External Pressure Loading[J]. Journal of Engineering for Industry, 1982, 104 (2): 190-200.



- [20] PRANESH B, SATHIANARAYANAN D, RAMESH S. Structural Reinforcement of Viewports in Spherical Pressure Hull for Manned Submersibles[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(3): 17-24.
- [21] WANG F, WANG W W, ZHANG Y K, et al. Effect of Temperature and Nonlinearity of PMMA Material in the Design of Observation Windows for a Full Ocean Depth Manned Submersible[J]. Marine Technology Society Journal, 2019, 53(1): 27-36.
- [22] ASME. Safety Standard for Pressure Vessel for Human Occupancy[S]. 2016.
- [23] RAJPUT N S, PRANESH S B, SATHIANARAYANAN D, et al. Acrylic Spherical Pressure Hull for Manned Submersible[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 6(3): 35-47.
- [24] WANG F, ZHANG X Z, JIANG Z, et al. On Calculating the Crack Growth within a Single Load-Dwell-Unload Cycle for Metal Structures[C]// Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2019.
- [25] 张震, 王永军, 蔡新钢, 等. 考虑实测初挠度、厚度和残余应力等缺陷的耐压球壳极限承载力分析 [J]. 船舶力学, 2019, 23(11): 1331-1338.
- [26] BLACHUT J, SMITH P. Tabu Search Optimization of Externally Pressurized Barrels and Domes[J]. Engineering Optimization, 2007, 39(8): 899-918.
- [27] SMITH P, BLACHUT J. Buckling of Externally Pressurized Prolate Ellipsoidal Domes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 130(1): 244-254.
- [28] ZHANG J, HUA Z, WANG F, et al. Buckling of an Egg-Shaped Shell with Varying Wall Thickness under Uniform External Pressure[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(6): 559-569.
- [29] ZHANG J, WANG M L, CUI W C, et al. Effect of Thickness on the Buckling Strength of Egg-Shaped Pressure Hulls[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(4): 1-10.
- [30] IMRAN M, SHI D Y, TONG L L, et al. Design Optimization of Composite Egg-shaped Submersible Pressure Hull for Minimum Buoyancy Factor[J]. Defence Technology, 2020, 3(1): 11-23.
- [31] ZHANG J, WANG F, WANG F, et al. Free Bulging of Thin-walled Cylinders Closed by Two Heavy Plates[J]. Ocean Engineering, 2021, 223: 108646.
- [32] ZHANG J, DAI M, WANG F, et al. Theoretical and Experimental Study of the Free Hydroforming of Egg-shaped Shell[J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 6: 1-11.
- [33] 中国海洋大学. 中国海洋大学轻型复合材料深海耐压舱研制取得重要进展 [EB/OL]. [2015-04-06]. <http://www.ouc.edu.cn/6b/de/c10639a93150/pagem.psp>.
- [34] CUI W C. On Some Fundamental Issues about the Safety of Marine Structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2020(S1): 1-10.

