

载人深潜技术的发展与应用

胡震, 曹俊

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡, 214082)

摘要: 载人潜水器是深海进入、探测、开发和保护的重要技术手段和装备, 代表着潜水器技术的发展前沿。本文简述了国外深海载人潜水器装备与技术的发展现状, 梳理了我国在本领域的装备与技术发展以及探索应用情况, 重点介绍了我国载人深潜技术三大里程碑成就: 基于“蛟龙”号和“深海勇士”号的研制经验, 形成了我国载人深潜技术体系; 在 4500~7000 m 潜深范围, 我国载人深潜技术总体上已处于国际前沿, 且具有自主知识产权; 载人深潜技术向着全海深、全海域的谱系化发展思路已趋于明朗。未来 15 年, 我国载人潜水器领域的发展重点是巩固提高作业能力, 积极拓展应用领域, 不断提高智能化、轻量化、重载化和集群协同水平, 精心打造产业链条, 成为载人深潜技术强国。

关键词: 潜水器; 载人; 深海; 关键技术; 谱系化

中图分类号: TP 242 **文献标识码:** A

Development and Application of Manned Deep Diving Technology

Hu Zhen, Cao Jun

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: Manned submersible is an important technical means and equipment for deep sea entry, exploration, development, and protection, which represents the development frontier of the submersible technology. In this paper, the development status of the equipment and technology of deep-sea manned submersibles abroad is briefly described, and the development and application of the same in China are then reviewed. The three milestones for the development of deep-sea manned submersible technology in China are mainly introduced. Based on the development experience of manned submersibles named “Jiaolong” and “Deep-sea Warrior”, the deep-sea manned submersible technology system is formed in China. In the range of 4500–7000 m deep-sea diving, China’s manned deep diving technology has been at the international forefront in general, and has independent intellectual property rights. The idea of genealogical development of manned deep diving technology towards the whole ocean depth and the whole sea area has become clear. In the next 15 years, China should focus on consolidating and improving the operation ability, actively expanding the application field, constantly improving the level of intelligence, lightweight, heavy load, and cluster coordination, and carefully building the industrial chain, thus to become a powerful country in manned deep diving technology.

Keywords: submersible; manned; deep sea; key technology; genealogical development

收稿日期: 2019-06-22; 修回日期: 2019-11-13

通讯作者: 胡震, 中国船舶科学研究中心研究员, 主要研究方向为深海潜水器总体设计与控制、水下机器人视觉感知与操控;

E-mail: 7000m@vip.sina.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋强国战略研究 2035”(2018-ZD-08)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

21 世纪是海洋的世纪，海洋资源的开发与利用已成为全球竞争的焦点领域：世界各国纷纷加快海洋油气开发进程，从浅海逐步走向深海；海底可燃冰资源丰富，开发利用技术获得重大突破；深海多金属结核、水下富钴结壳、深海热液硫化物等矿产资源开辟了战略金属资源储备的新通道。

受战略需求牵引，海洋强国正在形成从先进水面支持母船，到可下潜 1000~11 000 m 的载人/无人深海潜水器，以及探测、作业技术与装备的综合谱系。人在现场的直接面对、感受、分析、判断和操作，始终是认知复杂海洋，尤其是未知深海最为有效的方式。

载人潜水器作为一种深海运载工具，可将科学技术人员与工程技术人员、各种电子装置与机械设备等快速、精确地运载到目标海底环境中，遂行高效勘探测量和科学考察任务，已经成为人类开展深海研究、开发和保护的重要技术手段和装备。载人潜水器与搭载人员配合，可以有效地收集信息、详细地描述周围环境、快速地在现场做出正确的反应。过去的 50 年中，载人潜水器的安全运行、关键技术的逐渐完善，支撑并推动了深海探测领

域的重大进步 [1]。

本文从国内外载人深潜装备与技术发展历程、发展现状的角度进行了系统梳理，重点阐述我国载人潜水器的应用情况及技术成就。以“蛟龙”号和“深海勇士”号的研制与应用为例，凝练我国载人深潜关键技术体系，分析未来装备与技术发展趋势。

二、国外发展现状

(一) 载人潜水器产业

在强劲市场需求和先进技术进展的共同推动下，载人潜水器产业发展势头强劲（见表 1）。2018 年，海洋技术协会载人潜水器委员会的研究数据表明 [2]，全球载人潜水器活跃数量为 160 艘，可提供 1624 个载人座位；其中 38 艘应用于援潜救生，122 艘应用于科学研究、商业作业、观光旅游等。

载人潜水器产业包括制造商、运营者、研究船、行业协会等。2000 年以来，新成立了以载人潜水器设计、制造和运营为主业的众多商业公司。截至目前，载人潜水器保持着良好的安全记录，这和船级社在安全设计和建造认证等方面的努力密不可分，例如，经由第三方船级社进行认证的载人潜水器比例高达 92%。

表 1 现役载人潜水器（工作深度 > 1000 m）

名称	运营机构	深度 /m	载员 / 人	建成时间 / 年
Deepsea Challenger	美国伍兹霍尔海洋研究所（WHOI）	11 000	1	2011
“蛟龙”号	中国大洋协会（COMRA）	7000	3	2009
Shinkai 6500	日本海洋研究开发机构（JAMSTEC）	6500	3	1989
Mir1	俄罗斯科学院（RAS）	6000	3	1987
Mir2	RAS	6000	3	1987
Rus	俄罗斯海军	6000	3	2001
Consul	俄罗斯海军	6000	3	2011
Nautille	法国海洋开发研究院（IFREMER）	6000	3	1985
New Alvin	WHOI	4500	3	2013
“深海勇士”号	中国科学院	4500	3	2017
PISCES IV	美国夏威夷水下研究实验室（HURL）	2000	3	1971
PISCES V	HURL	2000	3	1973
TRITON 3000	美国阿卢西亚号科考船	1000	3	2011
Deep Rover	加拿大潜水公司	1000	1	1984
Deep Rover DR2	美国阿卢西亚号科考船	1000	2	1994
LULA 1000	雷比科夫黑格尔基金会（FRN）	1000	3	2011

(二) 深海载人潜水器

1. 发展历程

1960年1月,瑞士人皮卡德父子乘坐“的里雅斯特”号载人深潜器,到达了太平洋的马里亚纳海沟(深度10913 m),自此拉开了向深海进军的序幕。彼时虽然人类已经能到达海洋的绝大部分深度,但这距离认识深海、利用深海尚有较大距离。

随着计算机、材料、水声、图像等技术的发展,以法国、苏联/俄罗斯、日本、美国为代表,海洋大国从20世纪80年代起,完成了多艘6000 m级深海载人潜水器的研制(见图1)[3~6]。这些运载器的应用,充分显示了专业人员亲临深海和洋底现场进行直接观察和勘查的优越性,到达范围遍及大陆坡、2000~4000 m深度的海山、火山口、洋脊以及6000 m深度的洋底,获得了大量的地质、沉积物、生物、地球化学和地球物理的重要发现。

2000年以来,有关深海载人潜水器的研究重新活跃起来,特别是全海深(11000米级)载人潜水器的研制,引发了新一轮行业技术发展[7]。2012年3月,美国卡梅隆团队研制的载人潜水器Deepsea Challenger号创造了单人下潜的深度记录(10898 m)。尽管不是一艘作业型的载人潜水器,

但一些技术特点准确契合了载人潜水器技术的发展趋势,如:载人舱大内径(1.1 m)、以高强度钢作为建造材料、潜浮速度大(150 m/min)、新型照明布局(LED光源,最长2.4 m)等。

2. 发展现状

(1) 升级改造

美国“阿尔文”号载人潜水器自1964年交付以来完成了多次大修,2013年启动了最全面的升级改造(见图2),包括:全新的载人球内径更大,潜深可达6500 m;先进的数字指挥与控制、推进、高清照像/视频成像、数字科学仪器交互等子系统;全新的科学工作空间和机械手配置。

(2) 全新研制

针对印度洋1000~5500 m深处矿产资源的探测需求,印度国家海洋技术研究所研发了深海载人潜水器,工作深度为6000 m,具有大于30 m/min的上升和下降速度,3 h到达工作深度。潜水器采用传统结构设计,总质量小于20 t,钛合金载人球舱直径为2.1 m,可搭载3人,标准/紧急生命支持时间分别为12 h和72 h。

(3) 商业观光型

国外商业公司的观光与探险型载人潜水器发展也独具特色。尽管潜深指标一般,但在材料、总体



图1 世界主要深海载人潜水器的发展历程

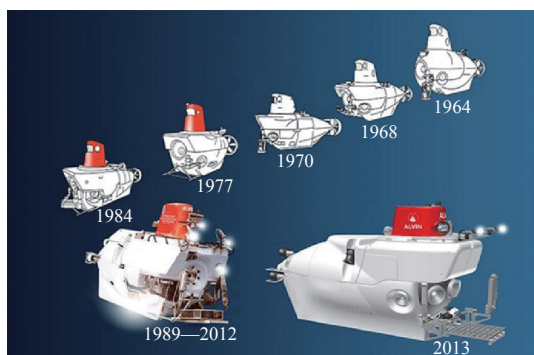


图 2 美国“阿尔文”号升级改造历程

结构、动力、操纵性能、布放回收、生命支持与应急自救等方面都有新的突破，为深海载人潜水器发展提供了样板。

1995年，美国 SEAmagine 公司研制的商业型潜水器，可搭载 2~6 人，深度级别为 150~1500 m。2005 年起，荷兰 U-Boat Worx 公司发展了系列产品：2 人型号深度级别为 3000 m、3 人型号深度级别为 2500 m、5~11 人型号深度级别为 200~1700 m。2008 年以来，美国的 Triton 公司发展了覆盖全海深范围、搭载 1~7 人的多类潜水器。此外，加拿大和俄罗斯等国均有各自的小型观察型载人潜水器，已投入市场应用。

(4) 新技术发展型

2018 年，美国 OceanGate 公司完成了 Titan 载人潜水器的建造，可搭载 5 人潜入 4000 m 水深，用于深海的商业探索和研究冒险。Titan 载人潜水器主要分为两部分：可搭载 5 人的潜水器本体，集成式布放回收平台（见图 3）。

Titan 载人潜水器的亮点设计包括：复合材料耐压壳体、大型丙烯酸观察窗、集成式布放回收平台。集成式布放回收平台将用于布放回收载人潜水器，同时还可作为运行维护的浮动平台，运行在偏远地区实现更简单、低成本的部署。Titan 载人潜水器采用了新型的实时船体健康监测（RTM）系统，利用部署在压力边界上的 9 个声学传感器和 18 个应变计，能够分析潜水器下潜时压力变化对壳体的作用力并准确评估结构的完整性。

此外，美国 Triton Submarines 公司和 EYOS 考察公司牵头开展了万米深度极限探险活动，建造了 Triton LF 全海深载人潜水器，选择了较大高宽比的立扁型方案（见图 3）。



(a) Titan 4000 m 载人潜水器



(b) Triton LF 万米载人潜水器实物图

图 3 代表性的新技术发展型载人潜水器

三、国内发展情况

(一) 整体情况

我国在“八五”和“九五”期间开始了载人潜水器技术的研究、开发与应用，集中在援潜救生潜水器方面，包括：200 米级单人常压潜水装具、600 米级深潜救生艇、200 米级救生钟等。

2000 年以来，我国载人潜水器领域发展迅速。2012 年，研制 7000 米级作业型载人潜水器“蛟龙”号，在马里亚纳海沟最大下潜深度达 7062 m。2015 年，研制 500 米级作业型、仿人形的单人常压潜水器装具（ADS）；研制 2 台“寰岛蛟龙”型全通透载客潜水器，工作深度为 40 m，载员 12 人，商用载客运行获得国家批准试点。2016 年，启动研制全海深（11 000 m）载人潜水器，预计 2020 年开展海上试验。2017 年，研制 4500 米级作业型载人潜水器“深海勇士”号，国产化率达 95%。2018 年，世界首台大坝深水检测载人潜水器通过中期检查，工作深度为 300 m，即将开始总装联调及示范性应用。此外，研制了多型移动型救生钟和机动型救生钟，为海军援潜救生提供了国产化装备。

(二) 标志性成就

经过近 20 年的跨越式发展，我国在载人潜水

器领域已经建成了完整的技术链条和应用体系，形成了三大里程碑。

1. “蛟龙”号载人潜水器创造 7062 m 中国载人深潜记录

2002年，国家863计划启动了7000 m载人潜水器“蛟龙”号的研制工作（见图4和表2）。通过全国近百家优势科研机构的联合攻关，历经方案设计、加工制造、总装联调、水池功能性试验等阶段，于2008年初具备了出海试验的技术条件。2009年8—10月、2010年5—7月、2011年7—8月和2012年6—7月，分别完成了1000米级、3000米级、5000米级和7000米级海上试验任务，最大下潜深度达到了7062 m。2013年，7000 m载人潜水器开始投入应用，在中国南海、东太平洋锰结核区、西太平洋富钴结壳区、马里亚纳海沟、西南印度洋、西北印度洋等海区完成了百余次下潜，取得了大量生物、矿物、沉积物、岩石等样品，拍摄了高清晰海底影像资料，为开展深海资源和环境评价提供了重要依据[8]。2019年，完成大修与技术升级后的第一个测试下潜。

2. “深海勇士”号载人潜水器实现 4500 m 深度的高频次应用

2017年，国产化达到95%的“深海勇士”号载人潜水器完成了研制和海试，成功交付用户（见图5和表3）。该潜水器最大作业深度为4500 m，广泛采用国产化技术，包括载人舱、浮力材料、定位声呐、推力器、液压源、机械手、充油锂电池组、超高压海水泵、水下照明、声学设备等，重点提升了实用性、经济性和可维护性。

2018年，“深海勇士”号投入实际应用，在中国南海、西南印度洋累计下潜超过100次，承担了科学调查、海洋考古、水下打捞、热液考察等深海

作业任务，取得丰硕科研成果。在实际应用中，多次实现夜间下潜、一日两潜，下潜间隔最短5 h，可与6000米级遥控潜水器（ROV）联手作业，展示了良好的实际应用性能和可靠性[9]。

3. 全海深载人潜水器目标工作深度为 11 000 m

2016年，在国家重点研发计划支持下，组建了以中国船舶重工集团公司第702研究所为总体集成单位的“全海深载人潜水器项目群”，标志着中国全海深载人潜水器工程研制进入实施阶段，计划于2020年实现万米下潜。2017年全海深载人潜水器方案设计通过评审，目前正处于关键技术攻关、大型地面试验、样件试制等阶段。该潜水器同样广泛采用国产化技术，包括载人舱、浮力材料、定位声呐、推力器、液压源、机械手、蓄电池等。2018年12月，完成钛合金载人舱球壳焊接，焊接一次成型。载人舱是潜水器最核心的主体构件，由我国自主研发制造，此次采用具有国

表2 “蛟龙”号载人潜水器基本参数

名称	参数
载人数	3人（1位驾驶员+2位乘客）
尺寸	8.3 m×3.8 m×3.0 m
载体质量	22 000 kg
深度	7000 m
航速	2.5 n mile/h
有效载荷	220 kg
推进	7个电动推进器
壳体	厚度78 mm 钛合金
生命支持	标准12 h（3人） 紧急72 h（3人）
上浮/下潜速度	40 m/min



图4 “蛟龙”号大修与技术升级

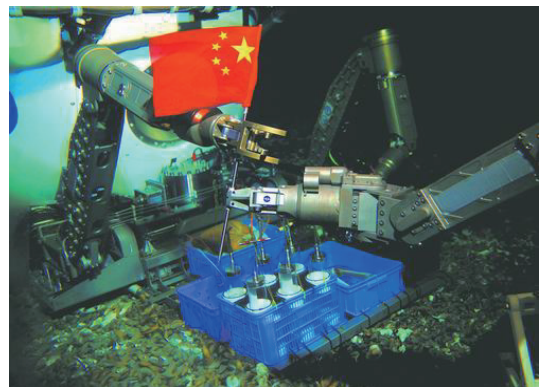


图5 “深海勇士”号与ROV联合作业

表3 “深海勇士”号载人潜水器基本参数

名称	参数
载人数	3人(1位驾驶员+2位乘客)
尺寸	8.0 m×3.0 m×3.5 m
载体质量	20 000 kg
深度	4500 m
航速	2.5 kn
有效载荷	220 kg
推进	6个电动推进器
壳体	厚度 53 mm 钛合金
生命支持	标准 10 h (3人) 紧急 72 h (3人)
上浮/下潜速度	50 m/min

际先进水平的真空电子束焊接方法,使焊接精度大幅提高。

四、关键技术及发展趋势

(一) 我国载人潜水器技术现状分析

载人潜水器对深海技术与装备具有全面的带动作用。经过长期技术积累与重点任务攻关,特别是“蛟龙”号和“深海勇士”号载人潜水器的成功研制与应用,我国载人深潜技术总体上已处于国际前列。

在两型载人潜水器的研制过程中,突破的关键技术有 [10,11]:大深度载人潜水器总体优化设计与集成、复杂线型水下航行体水动力性能预报与优化、功能模块化/结构分块化总体布置设计、运载器无动力下潜/上浮、大深度载人钛合金球壳设计及制造、高能量密度深海动力能源、针对作业目标的稳定悬停定位、以人为中心的信息与自动化系统、高速水声通信和高分辨率测深侧扫声纳、大深度载人潜水器应急安全与生命支持、轻小型化水下电机、深海高压海水泵和阀、复杂线型耐海水高压复合材料轻外壳的设计与制造等。

充分发挥社会主义市场经济条件下科技创新的新型举国体制优势,组织国内优势技术单位进行联合攻关,突破了“载人深潜”关键技术体系,辐射带动了深海装备领域的技术发展。例如,通过“蛟龙”号的研制,带动了我国以下技术的大幅度提升:①材料领域中的高强度钛合金厚板制造、钛合金焊接工艺、基于玻璃微珠的浮力材料制造与加工、高强度复合材料等;②电子领域中的深海充油银锌蓄

电池、水密电缆和接插件、深海高性能电机等;③深海方向的推进器、液压、水压、通信、潜水器控制等。

(二) 核心关键技术梳理

(1) 载人潜水器优化设计、安全性评估及应用技术,具体包括:载人潜水器型线、总体布局、载人舱布局、功能特性等的优化设计技术,载人潜水器服役期间各种设备的安全性、可靠性设计与评估技术,载人舱内人因工程设计评估技术,载人潜水器应用模式及相关体系设计技术等。

(2) 载人舱设计、建造及评估技术,具体包括:金属及非金属材料载人舱的设计技术,球形、柱形及其他形状载人舱设计技术,各种材料及形状的载人舱建造技术,建造完成后载人舱的检测及其使用安全性的评估技术等。

(3) 高能量密度动力技术,具体包括:充油锂电池设计、建造及管理技术,水下燃料电池设计、建造及管理技术,水下能源安全性评估技术,水下能源补充技术,新型能源深海应用技术等。

(4) 水声技术,具体包括:各种声学设备在潜水器上的集成设计技术,船载高速水声通信系统设计及其装备制造技术等。

(5) 导航定位技术,具体包括:高精度、高可靠性的水声定位技术,水下复杂环境下连续高精度导航技术,水下作业目标搜索及作业点重返技术等。

(6) 浮力材料技术,具体包括:大深度低密度浮力材料的设计、制备、成型技术,浮力材料的测试与安全性评估技术等。

(7) 载人潜水器安全体系技术,具体包括:载人潜水器技术安全体系设计技术,潜水器状态检测与安全性评估技术,各种抛载机构可靠性设计、评价技术等。

(8) 载人潜水器控制技术,具体包括:载人潜水器在复杂海底环境下的航行控制技术,可视化的综合信息显控技术,载人潜水器控制仿真技术等。

(三) 前沿技术趋势判断

着眼国际前沿,近年来私营资本的注入,为海洋大国新型载人潜水器的研制注入了新的活力。载人潜水器装备的主要发展方向是全海深载人潜水器

和专用载人潜水器。可以预判,未来15年将是载人潜水器装备和技术更新换代的集中时期。

(1) 非金属材料载人舱设计建造技术。以美国 OceanGate 公司的 Titan 载人潜水器为例(见图6),技术突破重点是复合材料圆柱形耐压壳体+钛合金材料前后端盖这一新型结构形式,在承载和减重方面取得很好的平衡。

(2) 全透明材料应用于大视野观察窗的设计、建造技术。观光型载人潜水器已大量采用全透明材料应用于大视野观察窗的设计与建造(见图7),美国 SEAmagine 公司 AURORA 系列的工作深度达到 1000 m。

(3) 以水动力外形设计技术为主的高速无动力潜浮技术。美国 DeepFlight 公司的有翼潜水器采用了“主动上浮”设计理念(见图8),利用机翼的水动力来改变潜水器的水下运动。美国 Triton 公司的 Triton LF 潜水器则采用了高宽比较大的垂直立扁型设计(见图3),仅约 2.5 h 即可到达海洋最深处。

(4) 新型高密度耐压蓄电池组技术。西班牙和美国合作,开发能在全海深运行的电池模块,免维护、循环周期达 4000 次、即插即用。

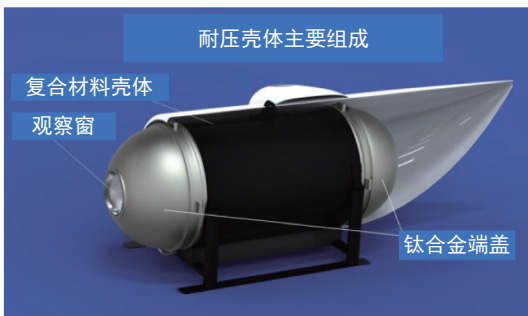


图6 复合材料耐压壳体



图7 全透明大视野观察窗



图8 潜水器新概念外形设计

(5) 多人多舱技术。日本提出的全海深载人潜水器研究计划,将为6名船员提供舒适的乘坐体验和长达48 h的任务时间,设置有休息和盥洗空间。

五、结语

我国载人深潜领域经过近20年的跨越式发展,在4500~7000 m深度工作范围,整体上已处于国际前沿,基本构建了具有自主知识产权的载人深潜关键技术体系。

未来,我国载人深潜技术向着全海深、全海域的谱系化发展思路已经逐渐明朗。依托新一代载人潜水器装备,有望在15年内,巩固并提升全海深、江河水库、油气矿产、热液冷泉的作业能力,有效拓展搜索、打捞、考古、观光、极地、核能等新应用领域。同时,不断革新载人潜水器的智能化、轻量化、重载化和集群协同水平,培育打造产业链条,支撑海洋强国建设。

参考文献

- [1] 朱大奇, 胡震. 深海潜水器研究现状与展望 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 205-216.
Zhu D Q, Hu Z. Research status and prospect of deep-sea underwater vehicle [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2018, 41(3): 205-216.
- [2] William K. MTS manned underwater vehicles 2017—2018 global industry overview [J]. Marine Technology Society Journal, 2018, 52(5): 125-151.
- [3] 任玉刚, 刘保华, 丁忠军, 等. 载人潜水器发展现状及趋势 [J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 114-121.
Ren Y G, Liu B H, Ding Z J, et al. Research on the current status and development trend of manned submersibles [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(2): 114-121.
- [4] 赵羿羽. 世界主要载人潜水器下潜活动概述 [J]. 船舶物资与市场, 2018, 149(1): 41-48.
Zhao Y Y. Overview of diving activities of major manned submersible vehicles in the world [J]. Marine Equipment /

- Materials & Marketing, 2018, 149(1): 41–48.
- [5] Anatoly M S. 30 years experience of Mir submersibles for the ocean operations [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2018, 155(9): 83–95.
- [6] 刘峰. 深海载人潜水器的现状与展望 [J]. 工程研究, 2016, 8(2): 172–178.
Liu F. Technical status and development trend of the deep-sea manned submersible [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 172–178.
- [7] 徐伟哲, 张庆勇. 全海深潜水器的技术现状和发展综述 [J]. 中国造船, 2016, 57(2): 206–221.
Xu W Z, Zhang Q Y. Overview of present status and development trend of full ocean depth submersibles [J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(2): 206–221.
- [8] 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.
Cui W C, Liu F, Hu Z, et al. 7000 m sea trials test of the deep manned submersible “Jiao Long” [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1131–1143.
- [9] 张同伟, 唐嘉陵, 杨继超, 等. 4500 m以深作业型载人潜水器 [J]. 船舶工程, 2017, 39(6): 77–83.
Zhang T W, Tang J L, Yang J C, et al. Deep operational manned submersibles > 4500 m [J]. Ship Engineering, 2017, 39(6): 77–83.
- [10] 刘涛, 王璇, 王磊, 等. 深海载人潜水器发展现状及技术进展 [J]. 中国造船, 2012, 53(3): 233–243.
Liu T, Wang X, Wang L, et al. The current status and technical development of deep sea manned submersible [J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(3): 233–243.
- [11] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海载人潜水器技术动向 [J]. 中国船检, 2016 (11): 94–97.
Zhao Y Y, Zeng X G, Lang S Y. Technical trends of deep-sea manned submersible [J]. China Ship Survey, 2016 (11): 94–97.