

蛟龙号载人潜水器在大洋勘探中的发展回顾与展望

徐艺南, 叶聪, 王帅, 侯德永

(1. 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082;

2. 深海载人装备国家重点实验室, 无锡 214082)

摘 要: 本文详细回顾了蛟龙号载人潜水器应用而生的立项背景, 探索了由业主中国大洋协会负责项目组织实施的新模式。总结了蛟龙号的技术优势以及近年来在大洋勘探中的应用情况, 阐述了蛟龙号对认识和开发利用深海资源做出的积极贡献, 指出了蛟龙号在推动深海技术进步和新兴产业发展过程中起到的重要作用, 以及中国载人深潜精神作为项目团队前进动力发挥的指导作用。最后, 对蛟龙号载人潜水器在我国下一步国际海底和深海大洋资源开发中的工作进行了展望。

关键词: 载人潜水器, 中国大洋协会, 国际海底, 勘探, 组织实施模式, 深海技术

文章编号: 1004-0609(2021)-11-2627-XX

中图分类号: P742

文献标志码: A

深海载人潜水器是运载科学家、工程技术人员和各种装置、特种设备, 快速、精确到达多种深海复杂环境, 进行高效勘探、科学考察和特种作业的装备, 它可以使科学家亲临海洋的内部研究海洋。科学家对海洋研究越深入, 对深海载人潜水器的需求就越紧迫^[1-2]。开展深海载人潜水器的研制工作与中国大洋矿产资源研究开发协会(以下简称“大洋协会”)的海洋开发与资源调查需要密切相关, 对于维护国家主权, 保障海洋权益, 开发海洋资源, 以及提高国防实力都具有重要的战略意义。

随着铜、镍、钴、锰等大洋矿产资源的战略作用日益凸显, 加强国际海底勘探开发的研究势在必行^[3-4], 大深度载人潜水器的论证与研发工作也逐步开展。蛟龙号是我国自行设计、自主研制的首台大深度载人潜水器, 于 2002 年正式立项, 2009 年开始海试。2012 年 6 月, 蛟龙号在马里亚纳海沟创造了下潜 7062 米的记录, 这是当时世界上同类作业型载人潜水器最大下潜深度, 这一深度覆盖了世界海洋面积 99.8%的范围^[5]。近年来蛟龙号已完成了近 200 次安全下潜, 获得了丰硕的深海科考成果。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0306602)资助

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-08-06

通信作者: 叶聪, 研究员; E-mail: yec@vip.163.com

其中超过 6000 米深度的下潜多达 30 余次,充分验证了它的安全性、可靠性和先进性,为推进我国海洋资源勘探开发、深度参与全球海洋治理提供了有力保障。

1 蛟龙号载人潜水器的立项背景

1960 年起,随着近海石油开采的兴起,国际上出现了一批浅海的载人潜水器和带缆水下机器人 (ROV)。一些海洋大国开始把目光转向蕴藏着丰富资源的大洋海底,因此深海科学研究和深海资源勘探开发利用逐步形成了热点。1980 年后,美、法、俄、日等相继研发了 6000~6500 米深的载人潜水器和无缆自治水下机器人 (AUV),在潜水器研制方面进入了一个新高潮,特别是大深度载人潜水器的直接观察、直接取样、直接测绘和及时判断决策的优势,在深海资源勘查和深海科学研究方面,更展现出不可替代的作用。

我国改革开放后经快速发展,对浅海 ROV 开展了一系列的研究开发和应用,尤其是通过中俄合作 6000 米水下机器人“CR-01” AUV 的研发成功,在耐压结构及密封、槽道螺旋桨推进、水声通信导航定位、环境探测、预编程控制、主从式机械手控制等技术上已取得了初步实用化成果;在路径规划、动力定位、光学、声学图像识别及导引等方面也都取得了实质性突破,并且也初步培养锻炼了一支深海技术装备研发的国家队,积累了深海装备研发的组织管理经验,为发展我国的深海装备建立了从“0”到“1”的技术和人才队伍储备。

1990 年初,在分析国内外发展趋势的基础上,我国海洋科技界就提出了“载人潜水器与深海工作

站发展”战略论证的建议,我国大洋协会也于 1990 年成立。1991 年,经国际海底管理局 (International Seabed Authority, 以下简称“ISA”) 批准,大洋协会在东太平洋国际海底区域获得 15 万平方公里的锰结核矿开辟区。富钴结壳资源也成为国际关注的新热点,因此大量海底的勘查工作要做^[6]。在这样的形势下,我国大深度载人潜水器的研制已迫在眉睫。大洋协会明确提出研制我国自己的大深度载人潜水器的需求。

2000 年,大洋协会再次邀请了国内相关专业领域的院士和专家召开了深海运载技术需求论证会。2001 年,大洋协会与 ISA 正式签订了《国际海底多金属结核矿区勘探合同》,这更是成为中国载人潜水器研制立项的直接推动因素。

当时,国际上 6000 米级的载人潜水器有美国的 Seacraft、法国的 Nautilie、俄罗斯的 Mir-I 和 Mir-II,以及日本 6500 米级的 Shinkai6500,均已下水十年以上。在这种情况下,如何根据国内深海装备研发经验和装备总体水平,确定符合中国实际的深海载人潜水器发展目标,制定科学合理的技术路线,如何组织国内力量开展项目研发等等,成为建议者和决策者需要具体考虑和审慎处理的问题。

中国政府和中国科学家历来积极推动世界海洋技术装备的进步和发展,中国应该为世界海洋科学的研究和发展做出中国人应有的贡献。在综合国力的强力支撑下,中国理应将国际深海载人潜水器的水平向前推进一步。在国际上作业型载人潜水器最大下潜深度为 6500 米的基础上,确定 7000 米的目标就成了必然选择。同时,7000 米载人潜水器的研制也将为未来向全海深进发实现阶段性突破。

为此, 中国工程院 2001 年召开了 7000 米载人潜水器立项论证专题座谈会, 参加的有国家各部委领导、相关技术优势单位的院士和专家。会议统一了认识, 确定了 7000 米载人潜水器研发的迫切性, 明确了已具备可以立项的技术条件。

在目标明确、技术路线清晰之后, 国家科技部组织专家对《7000 米载人潜水器总体方案论证报告》进行了评审。2002 年 6 月, 国家科技部正式批准设立国家“十五”863 计划“7000 米载人潜水器”(即后命名的蛟龙号载人潜水器)重大专项, 确定了四项标志性技术目标。具体研制目标是: 根据中国大洋协会勘查锰结核、富钴结壳、热液硫化物矿和深海生物等资源的计划及要求, 瞄准国际深海勘查作业前沿技术的发展, 研制一台采用多种高新技术、新材料和新工艺集成的、拥有自主知识产权的 7000 米载人潜水器, 其总体技术指标达到国际领先水平。国家海洋局是项目的组织部门, 中国大洋协会作为业主, 具体负责项目的组织实施。中国船舶集团公司第七〇二研究所作为总师单位, 联合中科院沈阳自动化所、中科院声学所负责载人潜水器本体研制任务, 以及载人潜水器总装与集成、潜航员培训等工作, 一场深海技术领域的攻坚战由此拉开帷幕^[7]。



图 1 我国首台 7000 米级大深度载人潜水器蛟龙号

Fig.1 Jiaolong, China's first 7,000-meter large depth manned submersible

2 探索中的项目组织实施模式

开展深海载人潜水器研制这样的大型科技项目, 是需要政府部门间、不同企事业单位间相互协调, 通力合作, 联合攻关而成的庞大系统工程, 潜水器本体、母船及水面支持系统、潜航员培训、深海基地建设等四大版块需齐头并进, 建立完善的组织保障体系至关重要。由国家海洋局、科技部、中国船舶集团公司、中国科学院、教育部等部门成立了 7000 米载人潜水器重大专项领导小组, 负责对项目的全面领导与决策; 由业主中国大洋协会组织成立了 7000 米载人潜水器重大专项总体组, 在负责项目具体组织实施的基础上, 又相继任命了潜水器本体总师组 and 水面支持系统总师组, 各自负责相应的技术任务。之后还成立了潜航员培训专家组, 负责对潜航员选拔和培训进行技术指导与协调。又成立了国家深海基地筹建办公室, 对潜水器今后的业务化运行模式等进行深入研究。

与以往不同, 这种重大专项任务由业主作为任务大乙方总负责制的模式, 更有力保障了项目的功能目标管控, 以及最终成果的及时转化, 更能满足实际应用的需要。

按照确定的“自主设计、集成创新”技术总路线, 项目总体组对当时的国际载人深潜技术状况和发展趋势进行了全面系统的分析研究, 与俄罗斯、美国、英国、法国等有关国家的深海装备供应商开展广泛接触, 综合考虑国际地缘政治等各种因素, 进一步细化了各系统研发的技术路线, 逐个部件落

实自主研发或国外采购的具体技术实现途径。

在研制过程中,提出了“‘适用’须贯穿研制主线,‘安全’是所有工作底线”的设计理念,首次提出载人潜水器研制的五个设计准则,即载体性能与作业要求一体化准则,技术先进性与工程实用性统一准则,技术要素规范化、标准化准则,结构分块化和功能模块化准则,以人为本的多层面安全保障准则。基于上述五个设计准则,采用多学科优化技术,提出了超大深度载人潜水器总体研制思路^[8]。

项目组贯彻了“丰富继承、重点突破、集成创新、整体跨越”的设计思想,制订了“自行设计、自主集成、独立完成海上试验”的研制路线,着力继承和发展国内无人潜水器的相关技术,吸收、消化可能获得的国外先进技术,自主创新、重点突破“深、准、通、新”四方面技术难点,实现跨越发展。针对四方面技术难点归纳出的四大核心关键技术,经细化分解,梳理出本体研制必须攻克的三十一项关键技术,组织国内上百家相关技术优势单位实现强强联合、协同创新,各自承担研制技术责任,实行全程质量控制^[9-10]。

提出“四同步”研发模式,即同步研制,同步建造试验设备,同步形成方法、标准和体系,同时强调同步自主能力的培育与突破。蛟龙号开始研制时,受当时国内技术水平和科研力量的限制,我们对整个载人潜水器是自行设计的,而对一些部件和配套设备的加工采用三种途径来实现:

(1) 自主设计、自主研制——边试验、边改进、边应用、积累经验再创新;

(2) 自主设计、委托国外加工制造——设立

专项由国内专业单位研制出更新的材料、更好的工艺;

(3) 国际市场可供应的成熟产品——引进、消化、再创新。

到蛟龙号研制任务完成之时,也初步实现了各种部件的同步自主研发。

另外,在蛟龙号研发过程中培训潜航员,全面掌握运维知识与技能,确保了潜水器及时交付与运营。可以说,蛟龙号载人潜水器研发与应用项目的组织实施模式,是大型科研项目新型举国体制的成功典型案例。



图2 蛟龙号首批两名潜航员

Fig.2 The first two pilots of Jiaolong submersible

3 蛟龙号的技术优势和应用情况

面对队伍年轻缺乏经验的现实,在我国科技人员的奋力拼搏、艰苦攻关下,他们以国家深海事业为己任,用智慧和勤劳攻克了一个个技术难关。经过十年的努力,完成的蛟龙号与国际同类作业型深海载人潜水器相比,具有六大技术优势:

(1) 最大工作深度:7000 米,工作范围可覆盖全球海洋面积的 99.8%;

(2) 最佳操纵控制:自动定高、定深、定向,自动巡航、近底爬坡等,特别是具有悬停定位功能;

(3) 最全作业手段: 复杂地形条件下取样能力、定点作业能力、高清航拍能力, 尤其是高精度地形地貌测绘能力;

(4) 最强通信探测: 可实时传输语音、图像、信号和文字, 9000 米的通信距离在当时载人潜水器中最大, 测深侧扫声纳的分辨率高达 5 厘米;

(5) 最多安全保障: 互为备用的动力, 冗余的生命支持与通信, 故障检测与应急处理, 6 套应急抛载措施^[11];

(6) 最高电池容量: 容量为 110 千瓦时安全稳定的银锌电池电源系统。

蛟龙号载人潜水器于 2009 年开始海上试验, 连续 4 年成功完成了 1000 米级、3000 米级、5000 米级、7000 米级海上检验, 2012 年在马里亚纳海沟创造了 7062 米的世界同类作业型载人潜水器最大下潜深度纪录。国家海洋局从实际出发, 决定紧接着从 2013 年开始进入 5 年的试验性应用阶段。到 2017 年, 蛟龙号载人潜水器先后在我国南海、东太平洋多金属结核勘探区、西太平洋海山结壳勘探区、西南印度洋脊多金属硫化物勘探区、西北印度洋脊多金属硫化物调查区、西太平洋雅浦海沟区、西太平洋马里亚纳海沟区 7 大海区下潜, 涵盖了海山、冷泉、热液、洋中脊、海沟、海盆等典型海底地形区域, 主要为大洋协会深海资源勘探计划、环境调查计划, 科技部“973”计划, 中国科学院深海先导计划, 国家自然科学基金委南海深部计划等提供技术和装备支撑^[12-14]。

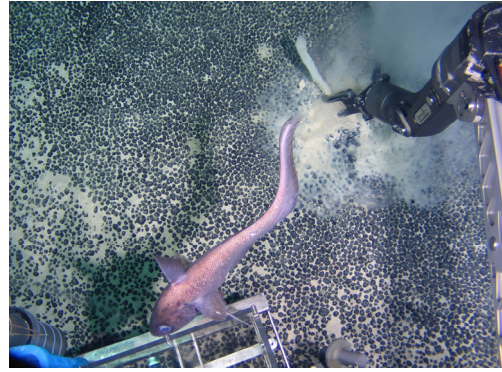


图 3 蛟龙号在 5300 米深的锰结核矿区抓取海绵

Fig.3 Jiaolong submersible was grabbing sponge in manganese nodules mining area (5300m)

蛟龙号的应用开创了我国深海资源高效精细勘探的新模式。利用蛟龙号, 实现了沿预定测线间隔 1 米距离的全断面近底调查、200 公斤的多点大容量取样, 揭示了结壳区资源分布特征、矿体边界; 验证了多波束回波强度结壳勘探方法的有效性; 首次取得原位洋中脊热液流体样品, 揭示了超慢速扩张洋中脊热液流体特征, 查明了龙旗热液区热液活动及热液产物分布特征; 为在大洋协会和 ISA 已签订的勘探区内划定潜在的开矿选址提供了重要依据。

蛟龙号的应用为我国精准选划和申请新的矿区勘探合同提供了核心调查资料。利用蛟龙号, 首次在西北太平洋采薇海山区 5000m 以深海底发现了大面积的高品位富钴结壳; 首次在西北印度洋热液区获取了高质量海底矿物、岩石、热液流体和生物样品以及大量的海底高清视频、照片和同步的环境数据; 为我国富钴结壳和多金属硫化物新矿区的申请积累了可靠数据。蛟龙号的应用助力我国成为海底勘探合同数量最多、矿种最全、矿区面积最大的国家。

蛟龙号的应用也开辟了我国深渊科学研究的新领域。利用蛟龙号,首次在马里亚纳海沟发现活动泥火山地质新现象,对研究超深渊区板块构造活动、俯冲与沉积作用具有重要意义;首次揭示了维嘉海山与采薇海山巨型底栖动物具有很高的相似性,改变了海山间生物种类相似性低的传统认识;取得了深海生态环境新认识,发现不同类型热液喷口生物群落的巨型底栖生物种类和数量有显著差异。蛟龙号亲临海底开展的科学调查,为提升我国在国际海底治理的话语权发挥了重要作用。

通过试验性应用阶段,衔接海上试验与日常应用,蛟龙号已累计成功下潜 192 次,搭乘了近 600 人次的海洋科学家和科技工程人员下潜深海海底进行直接观测、取样、测绘。其中,31 个潜次作业水深超过 6000 米,累计获得了 1200 公斤岩石和结核、结壳样品,398 管沉积物样品,3953 件生物样品和 6225.5GB 地形地貌视频等资料。

2015 年 3 月,蛟龙号结束在印度洋的科考任务后,停靠在青岛母港的国家深海基地码头,国家深海基地管理中心正式启用。中心建立了一套国家重大深海装备开放共享的应用管理机制,培养了一支载人深潜应用发展队伍,全面负责蛟龙号的业务运行和保障^[15]。

在 2018 年启动的蛟龙号技术升级工作中,根据科学应用需求,完成了载人球壳结构全寿命监测系统、载体框架的优化设计与建造、水下灯光视频系统改进设计、作业接口规范与增加、控制系统升级和测深侧扫声纳国产化等六项技术改进工作,进行了 7000 米级油浸锂电池组样机试制和试验,完成锂电池换装技术设计。通过技术升级,蛟龙号载

人潜水器的技术先进性、安全性,可维性、可用性和作业能力均有显著提高,可以满足新的应用需求,保持技术领先优势。

蛟龙号载人潜水器的新母船“深海一号”于 2020 年 8 月正式下水,开展试航和船载装备适航性试验验收工作。“深海一号”船先后在国家深海基地管理中心码头开展了 3 次蛟龙号布放回收演练,在威海近海试验基地和鳌山卫锚地开展了 5 次蛟龙号浅海下潜演练,在蛟龙号南海 1000-3000 米海试期间最大 6 级风、浪高 2.5 米的恶劣海况下开展了 5 次下潜,在蛟龙号马里亚纳-雅浦海沟 7000 米级海试中 21 天内完成 12 次下潜。“深海一号”船与蛟龙号载人潜水器适配性得到充分验证,水面布放回收作业规程日渐成熟,在最近的 D192 潜次中,从潜水器挂上龙头缆到回收甲板用时仅仅 15 分钟。

ISA 秘书长 Lodge 先生对蛟龙号给予高度评价,称赞蛟龙号“无疑是使人类进入深海探索的最先进的科技成果之一”。中国常驻 ISA 代表处也表示,蛟龙号研发和应用对我国深海海底矿区资源勘探和开发发挥了不可替代的作用。

4 推动深海技术和新兴产业发展

蛟龙号推动了我国深海技术、应用体系的跨越发展和深海关键装备的国产化进程。在蛟龙号研制与应用过程中,蛟龙号原引进的深海磁耦合推进器、深海直流电机、浮力材料、水下灯、水密接插件、七功能机械手、超短基线、长基线定位声纳、超高压海水泵等部件已实现国产化。

为提高我国深潜装备关键技术的自主可控能

力, 早在 2009 年蛟龙号尚未完成海试之时, 863 计划又布局了 4500 米载人潜水器也就是深海勇士号设计与关键技术研究项目。历经 8 年持续艰苦攻关, 深海勇士号实现了载人舱等耐压结构和材料、锂电池新能源、海水均衡系统、液压作业系统、声学通信、水下定位、控制软件和执行机构等关键部件的国产化, 潜水器装备自主化率达到 95%, 并于 2017 年 10 月成功完成海试, 为深海载人深潜高端装备实现“中国制造”探索了一条切实可行的路径。深海勇士号的成功, 极大拓展了中国企业相关领域的制造能力, 实现了我国载人潜水器由集成创新向自主创新的历史性跨越。

有了蛟龙号和深海勇士号的基础, 瞄准全球海洋最深处逐步成为可能。2016 年, 国家科技部适时支持了奋斗者号全海深载人潜水器研制项目, 开启了历时 5 年的集智攻关工作。2020 年 11 月, 奋斗者号在马里亚纳海沟完成八次万米级下潜, 并且实现了全球首次万米深海作业现场的高清视频直播, 使我国具有了进入世界海洋最深处开展科学探索和研究的能力, 实现了我国在同类型载人深潜装备方面的超越和引领。

“用字当头”是大深度载人潜水器工程研发的首要宗旨, “要用”是工程立项的原动力, “顶用”是工程发挥作用的生命力, “用好”是工程寿命期实现的保障。蛟龙号、深海勇士号、奋斗者号三台大深度载人潜水器研制成功后, 迄今已累计完成 580 余次下潜任务, 成功率达 100%, 成果丰硕。我国载人深潜遵循严谨的科学发展路线, 一步一个脚印走出了中国特色的自主自强之路。

从蛟龙号到深海勇士号再到奋斗者号, 我国载

人深潜技术实现了自主设计、自主制造、核心关键技术自主可控, 特别是在设计计算方法、基础材料、建造工艺、通信导航、智能控制、能源动力等方面实现了重大技术创新。以奋斗者号的核心部件载人球舱为例, 其钛合金材料由我国自主研发, 强度高、韧性好、可焊性强, 这是国际上 30 年来在载人深潜技术新材料应用上取得的首次突破之一。

蛟龙号的研制有效促进我国深海战略性新兴产业发展, 带动我国深海能源、材料、结构、通讯导航定位等高科技和产业全面发展, 带动深海通用元器件、高性能电池、精密传感器、特种功能材料等研发和产业化, 实现自主可控, 改变对外高度依赖的局面。这些深海通用技术和装备, 在深海油气勘探开发、深海考古乃至旅游观光等方面的应用前景十分广阔, 支撑我国深海战略性新兴产业发展的潜力巨大。

以蛟龙号载人潜水器研发与应用为依托, 我们国家闯出了一条挺进 7000 米的深海海底之路。在创造世界同类作业型载人潜水器最大下潜深度记录的同时, 实现了我国深海技术发展的新突破和重大跨越, 成为我国深海技术发展的重要里程碑。更重要的是, 我们的深海工程技术人员从此树立了进军深海大洋的信心和决心, 我们的深海科学家具有了进入海洋内部探索海洋奥秘的良机。可以说, 蛟龙号研发与应用任务的圆满完成, 为“建设海洋强国”战略创造了良好的社会氛围。

一系列潜水器的研制, 不仅推动了我国载人潜水器形成谱系, 而且有力促进了无人技术的发展, 为我国深海大洋研究和开发工作的全面开展奠定了坚实基础。

5 中国载人深潜精神的传承

“严谨求实、团结协作、拼搏奉献、勇攀高峰”的中国载人深潜精神首次在 2009 年蛟龙号第一阶段 1000 米海试总结时被提出。从海上试验“没有单位，只有岗位”的理念，到“我的工作无差错，我的岗位请放心”具体要求，中国载人深潜精神的内涵不断凝练与充实。伴随着深海实践的不断探索，团队力量不断凝聚，团队自信心不断增强，中国载人深潜精神逐渐成为整个载人深潜团队的灵魂。特别是在蛟龙号历次海试与试验性应用中，中国大洋协会作为业主单位严密组织，坚持党的领导在第一线，充分发挥党组织的战斗堡垒作用和党员的先锋模范作用，为蛟龙号研制与应用的成功发挥了重要指导作用。

严谨求实，传承了“实事求是”的思想路线，体现了追求真理的科学态度，是指导深海载人潜水器研制和应用的思想基础和客观要求。

团结协作，传承了集体主义精神，体现了友爱互助、和谐共进、创新发展的时代特色，是完成载人深潜研制和应用任务的根本保障和坚强基石。

拼搏奉献，传承了艰苦奋斗和革命英雄主义优良传统，体现了胸怀祖国、不畏艰险、勇往直前的豪迈气概和忠于职守、攻坚克难、敢于担当的奋斗精神，是中国载人深潜团队完成研制和试验任务的精神力量和内在支撑。

勇攀高峰，传承了永不满足、奋发图强的进取意识，体现了与时俱进、敢为人先、追求卓越的创新思维，是夺取载人深潜研制和试验胜利的执着追求和强大动力。

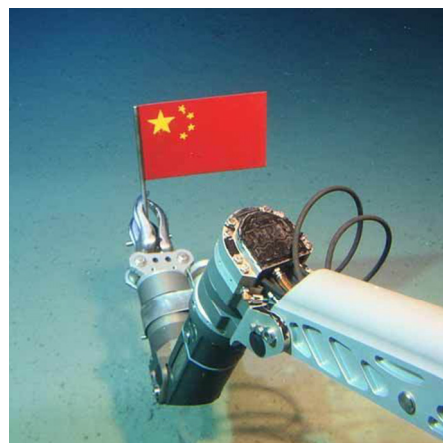


图 4 蛟龙号在海底布放国旗

Fig.4 Placing the Chinese national flag by Jiaolong submersible

2012 年，党中央、国务院授予了蛟龙号载人潜水器 7000 米级海试下潜人员“载人深潜英雄”称号，授予研发与海试团队“载人深潜英雄集体”称号，并肯定了团队凝练形成的“严谨求实、团结协作、拼搏奉献、勇攀高峰”的载人深潜精神。2020 年 11 月 28 日，习近平总书记在奋斗者号海试胜利返航时发来贺信指出：“从蛟龙号、深海勇士号到今天的奋斗者号，你们以严谨科学的态度和自立自强的勇气，践行‘严谨求实、团结协作、拼搏奉献、勇攀高峰’的中国载人深潜精神，为科技创新树立了典范。”

6 展望

深海大洋蕴藏着无穷的奥秘和宝藏。进入深海大洋，离不开深海装备。目前，大洋协会正在全力打造以蛟龙号载人潜水器、海龙号无人有缆潜水器、潜龙号无人无缆潜水器等“三龙”大型装备体系和深海钻探“深龙”、深海开发“鲲龙”、海洋数据云计算“云龙”以及海面支持的“龙宫”为一体

的“七龙”协同作业^[16], 服务于“深海进入、深海探测、深海开发”战略, 更好地推进国际海底和深海大洋资源开发工作可持续发展。未来, 中国载人深潜技术和装备将为服务深海大洋事业发挥出更大的作用。

REFERENCES

- [1] 徐芑南. 对发展我国载人深潜器高技术的研讨[J]. 中国海洋平台, 1994(Z1):55-58.
XU Qi-nan. Discussion on developing high technology of manned deep submersible in China[J]. China Offshore Platform, 1994(Z1):55-58.
- [2] 刘峰, 李向阳. 中国载人深潜蛟龙号研发历程[M]. 海洋出版社, 2016.
LIU Feng, LI Xiang-yang. Chinese Jiao long' s footmarks: development of manned submersible[M]. Ocean Press, 2016.
- [3] 金建才. 大洋多金属结核资源的研究开发[J]. 自然杂志, 1992(3):205-208.
JIN Jian-cai. Research and development of marine polymetallic nodule resources[J]. Chinese Journal of Nature, 1992(3):205-208.
- [4] 贾明星. 七十年辉煌历程 新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1801-1808.
JIA Ming-xing. A review of nonferrous metals industry achievements in China(1949–2019) and prospects for the future[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1801-1808.
- [5] LIU Feng, CUI Wei-cheng, LI Xiang-yang. China' s first deep manned submersible, JIAOLONG[J]. Science Ching(Earth Sciences), 2010, 53(10): 1407-1410.
- [6] 岳峰. 我国大洋科考发展历程[J]. 百科探秘(海底世界), 2015, (Z2):5-13.
YUE Feng. The development course of ocean scientific research in China[J]. Scientific Exploration(Undersea World), 2015, (Z2):5-13.
- [7] 徐芑南, 张海燕. 蛟龙号载人潜水器的研制及应用[J]. 科学, 2014,66(2):11-13.
XU Qi-nan, ZHANG Hai-yan. Development and application of Jiaolong manned submersible[J]. Science, 2014,66(2): 11-13.
- [8] 崔维成, 刘正元, 徐芑南. 大型复杂工程系统设计四要素法[J]. 中国造船, 2008, 49(2): 1-12.
CUI Wei-cheng, LIU Zheng-yuan, XU Qi-nan. The Four-Element Method for Design of Large Complex Engineering System[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2): 1-12.
- [9] 顾继红. 浅析国家科技重大专项档案管理——以蛟龙号载人潜水器研制项目为例[J]. 兰台世界, 2020(6):92-94.
GU Ji-hong. Analysis of the Archives Management of National Science and Technology Key Projects—Taking Jiaolong HOV as an Example[J]. Lantai World, 2020(6):92-94.
- [10] 张磊, 侯德永, 史淦君. 蛟龙号载人潜水器研

- 制过程中的质量控制方法. 质量与可靠性, 2015(6): 35-38.
- ZHANG Lei, HOU De-yong, SHI Gan-jun. Quality control method in the development of Jiaolong manned submersible[J]. Quality and Reliability, 2015(6): 35-38.
- [11] 张奕, 丁忠军. “蛟龙”号载人潜水器安全保障制度构建研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(11): 32-36.
- ZHANG Yi, DING Zhong-jun. The Security System Construction of JIAO LONG Manned Submersible[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(11): 32-36.
- [12] 姚会强, 刘永刚, 张伙带, 等. 维嘉平顶海山富钴铁锰结壳空间分布特征: 基于“蛟龙号”载人潜水器近海底观测资料[J/OL]. 地学前缘, 1-12 [2021-05-24]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.1.61>.
- YAO Hui-qiang, LIU Yong-gang, ZHANG Huo-dai, et al. The Distribution Characteristics of Cobalt-rich Ferromanganese Crust on the Weijia Guyot: Constraints from the Near Bottom Observation Data of the Human Occupied Vehicle Jiaolong submersible[J/OL]. Earth Science Frontiers, 1-12[2021-05-24]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.1.61>.
- [13] 鲁德泉, 丁忠军, 李德威, 等. “蛟龙号”载人潜水器钴结壳取芯器的研究及应用[J]. 中国机械工程, 2019, 30(5): 603-607.
- LU De-Quan, DING Zhong-jun, LI De-wei, et al. Studies and Applications of Cobalt-rich Crust Core Samplers Mounted on “Jiao Long” Manned Submersibles[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(5): 603-607.
- [14] 张同伟, 唐嘉陵, 李正光, 等. 蛟龙号载人潜水器在深海精细地形地貌探测中的应用[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(7): 947-955.
- ZHANG Tong-wei, TANG Jia-ling, LI Zheng-guang, et al. Application of Jiaolong manned submersible in deep-sea fine topography exploration[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(7): 947-955.
- [15] 李超, 史先鹏, 李正光, 等. 浅谈“蛟龙”号载人潜水器试验性应用航次陆基保障工作[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(5):32-35.
- LI Chao, SHI Xian-peng, LI Zheng-guang, et al. A brief introduction to Land-Based Supporting Work of Tentative Application Voyage for Jiaolong Deep-Sea Manned Submersible[J]. Ocean Development and Management. 2020, 37(5):32-35.
- [16] 刘峰. 继往开来 跨越发展 续写大洋新华章[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(0z1):33-35.
- LIU Feng. Continue to move forward and leap forward development, continue to write the Ocean New China Chapter[J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(0z1):33-35.

The development review and prospect of Jiaolong manned submersible in ocean exploration

XU Qi-nan, YE Cong, WANG Shuai, HOU De-yong

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;

2. State Key Laboratory of Deep-sea Manned Vehicles, Wuxi 214082, China)

Abstract: In this paper, the background of project approval arising from the application of Jiaolong manned submersible is reviewed in detail, and the new model of project organization and implementation by the owner, China Ocean Mineral Resources R&D Association is explored. The technical advantages of Jiaolong and its application in ocean exploration in recent years is summarized, the positive contribution of Jiaolong to the development and utilization of deep-sea resources is expounded, the important role of Jiaolong in promoting the progress of deep-sea technology and the development of emerging industries and the guiding role of Chinese manned deep-sea spirit as the driving force of the project team is pointed out. Finally, the future work of Jiaolong manned submersible in China's international seabed and deep ocean resources development is prospected.

Key words: manned submersible; China Ocean Mineral Resources R&D Association; International seabed; deep-sea exploration; organization and implementation model; deep sea technology

Foundation item: Project(2017YFC0306602) supported by the National Key Research and Development Program

Received date: 2021-04-12; **Accepted date:** 2021-08-06

Corresponding author: YE Cong; E-mail: yec@vip.163.com

(编辑 某某某)