

我国海底工程装备与材料技术体系发展思考

郭红缘¹, 矫维成^{1*}, 杨华东², 孟祥尧², 邱志明², 赫晓东¹

(1. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080; 2. 海军研究院, 北京 100422)

摘要: 具有极端特征的海底空间在资源开发、信息获取、通信保障、发展安全等方面的重要价值不断显现, 需要以海底工程装备与材料技术体系为核心支撑; 而海底工程装备与材料是依托共性基础技术形成的紧密耦合整体, 其中的材料、装备、共性基础技术形成互为支撑且不可割裂的逻辑闭环。本文全面讨论了海底工程装备与材料技术体系, 总结了极端环境适应、系统集成度、无人值守与高可靠、水下作业等方面的技术特征, 梳理了国际上海底工程装备的总体发展格局、典型装备系统发展趋势以及结构材料、功能材料与腐蚀防护材料、关键共性基础技术方面的研究和应用进展; 在把握我国海底工程装备与材料领域进展的基础上, 识别出装备性能与工程化能力、系统集成与体系化水平、关键材料与核心部件自主能力、长期运行与可靠性保障能力等方面的发展差距, 基础研究积累、核心部件自主保障、试验验证体系、复合型人才等方面的瓶颈环节。研究认为, 可在科研层面、制度层面精准发力, 即以重大工程任务牵引纵向层级贯通, 提高核心紧缺元器件的自主供给能力, 依托基础研究与验证能力提升技术上限, 分阶段构建标准体系以增强国际话语权, 把握智能化转型机遇以抢占技术制高点, 同时建立深海试验数据共享与资源统筹、深海工程共性基础技术稳定投入、深海工程跨学科人才培养与长效激励等配套机制。采取这一突破路径, 将提升我国海底工程技术体系综合能力, 为建设海洋强国、拓展蓝色发展空间提供科技支撑。

关键词: 海底工程; 深海装备; 深海关键材料; 共性基础技术; 智能化

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

Development of Technology System for Subsea Engineering Equipment and Materials

Guo Hongyuan¹, Jiao Weicheng^{1*}, Yang Huadong², Meng Xiangyao²,
Qiu Zhiming², He Xiaodong¹

(1. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Naval Research Institute, Beijing 100422, China)

Abstract: The subsea space, with its extreme environmental conditions, is demonstrating ever-greater values in resource development, information acquisition, communication assurance, and development security. Realizing these values depends fundamentally on the technology system for subsea engineering equipment and materials. Subsea engineering equipment and materials constitute a tightly coupled whole underpinned by common fundamental technologies. Within this whole, materials, equipment, and common fundamental technologies form an interdependent and inseparable logical closed loop. This study discusses the technology system for subsea engineering equipment and materials. It first summarizes the technical characteristics of the system, including adaptability to extreme environments, a high degree of system integration, long-term unattended operation with high reliability, and automated, intelligent,

收稿日期: 2026-04-07; 修回日期: 2026-06-25

通讯作者: *矫维成, 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所教授, 研究方向为轻量化复合材料; E-mail: xiaojiao458@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目(2025-XZ-147); 国家重点研发计划项目(2024YFB3712904); 国家自然科学基金项目(52572098)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

and systematic underwater operations. It then reviews the overall development landscape of subsea engineering equipment worldwide, development trends of representative equipment systems, and the research and application advances in structural materials, functional materials, corrosion protection materials, and key common fundamental technologies. Drawing on China's progress in this field, the study identifies gaps in equipment performance and engineering capability, system integration and systematization, autonomy in key materials and core components, and long-term operation and reliability assurance. It further pinpoints bottlenecks in basic research accumulation, independent supply of core components, testing and verification systems, and interdisciplinary talent. Moreover, the study concludes that breakthroughs require coordinated efforts at both research and institutional levels. At the research level, major engineering missions should be leveraged to drive vertical integration across hierarchy levels, and the independent supply of critical and scarce components should be enhanced. Basic research and verification capabilities should be strengthened to raise the technical ceiling, while the standards system should be built in stages to enhance China's international discourse power. China should also seize the opportunity presented by intelligent transformation to secure the technological high ground. At the institutional level, supporting mechanisms should be established for deep-sea test data sharing and resource coordination, sustained investment in common fundamental technologies for deep-sea engineering, and interdisciplinary talent cultivation with long-term incentives. Adopting this breakthrough pathway will comprehensively enhance the capability of China's subsea engineering technology system and provide scientific and technological support for boosting China's maritime strength and expanding the marine development space.

Keywords: subsea engineering; deep-sea equipment; deep-sea key materials; common fundamental technologies; intelligentization

一、前言

海洋是人类可持续发展的重要空间，海底则是海洋中极具潜力和战略价值的前沿领域。海底空间具有高压、低温、强腐蚀、复杂地质环境等极端特征，是人类认知极为有限但价值突出的空间之一^[1-3]。深海蕴藏着丰富的矿产、能源、生物资源，以多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、天然气水合物等深海矿产资源为代表，被视为重要的战略储备^[4-5]。同时，海底空间在信息获取、通信保障、发展安全等方面的重要价值不断显现，由资源开发领域逐步拓展为兼有经济、科技、安全属性的综合性战略空间。

随着全球海洋资源竞争的加剧，深海科技成为大国竞争的战略前沿。美国《海上优势》（2020年）强调水下作战优势与无人潜航器发展，《海上科技战略》（2024年）将海底系统列为重点技术领域之一；在“决心号”深海钻探船运营合同终止后，美国国家科学院呼吁加快重建自主深海钻探能力^[6-8]。法国发布《海底战战略》（2022年），是国防领域聚焦海底空间的顶层布局。日本修订《海洋基本计划》，将海洋矿物资源开发作为经济安全保障的重要举措，提出加快商业化开采的目标。近年来，我国《政府工作报告》将深海科技列为战略性新兴产业，“十五五”规划纲要提出加强深海进入、探测、开发、安全能力；也将高端装备列为战略性新兴产业以拓展海洋经济发展空间，表明深海科技从科研探索加速迈向产业化应用阶段。

海底工程装备与材料技术体系是实施深海开

发、建设海底基础设施、保障深海重大利益的核心技术基础^[9-12]。与陆地工程、浅海工程相比，深海工程面临高静水压、低温、高盐腐蚀、暗流、生物附着等极端环境的叠加作用，对装备的极端环境适应性、长期服役可靠性、水下自主作业能力提出了极为严苛的要求^[13-14]。因此，深海工程装备与材料技术长期以来被视为衡量国家海洋科技综合实力的重要标志之一，也是国际上技术封锁严密、自主创新难度大的高技术领域之一。

海底工程装备与材料是依托共性基础技术形成的紧密耦合整体，材料性能边界决定装备的服役深度与寿命上限，装备功能需求牵引材料技术的研发方向，共性基础技术贯穿材料研制、装备设计、集成验证、工程应用的全链条，三方面形成互为支撑、不可割裂的逻辑闭环。为此，本文围绕海底工程装备与材料技术，从体系构建的视角出发，分析国际趋势并梳理国内进展，明确存在差距与制约因素，提出相应的突破路径。以准确认识国内差距的深层成因、精准制定突破策略的方式，为推动海底工程技术体系建设提供基本参考。

二、海底工程装备与材料技术体系的构成及特征

（一）体系构成

海底工程装备与材料技术体系是支撑深海资源开发、海底基础设施建设、海洋环境保护的综合性技术集合，涵盖相互支撑且协同发展的装备、材料、共性基础技术三大层次。装备与材料之间通过

子系统、部件、器件等中间层次形成自上而下、纵向贯通的层级链条（见图1）。装备层面的工程需求逐级向下分解，最终落实到对材料性能的定向要求，这一纵向层级链既是工程能力的分解路径，也是技术突破的传导链条。材料性能的突破向上支撑器件可靠性提升，器件性能的跃升支持部件功能实现，部件能力的集成决定子系统工程化水平，子系统的协同显现装备整体作业能力。

1. 装备层级组成与功能定位

装备系统是实施海底工程的直接载体，按照功能划分为探测感知装备、作业施工装备、运维保障装备^[15-16]。探测感知装备包括深海地质勘探装备、海底地形地貌测量系统、水下原位检测设备、多参数传感器阵列等，承担海底环境信息获取与目标识别任务。作业施工装备涵盖水下铺管系统、海底采矿装备、水下钻探与完井设备、海底电缆敷设装备、海底管道连接器等，直接执行工程建设作业。运维保障装备以各型有缆/无缆水下机器人、深海载人潜水器、水下工程维修平台为核心，保障工程设施的长期稳定运行^[17-19]。上述装备具有明显的系统集成性特征，单一装备通常需要多类子系统协同配合才能执行复杂的海底工程任务，子系统由功能部件构成，部件又依托具体器件实现功能。以载人

潜水器为例，耐压球壳子系统由高强钛合金结构件、密封法兰、观察窗等部件组成，密封法兰部件的核心是橡胶密封圈等密封器件，密封圈的耐压、耐低温、长寿命性能取决于所用材料的本征物性。

2. 深海关键材料的分类及作用

材料是海底工程装备在深海极端环境中长期服役的物质基础，材料的性能边界直接决定上层器件、部件乃至整机装备的服役深度、寿命上限、可靠性水平。深海关键材料不仅是装备的附属配套，而且是装备进入深海、长期驻留、稳定运行的底层约束。按照材料在海底工程装备中的工程功能，可将深海关键材料归纳为结构材料、防护与密封材料、特种功能材料三个主要方向^[20-22]。结构材料直接决定装备的可达深度、结构安全边界，涵盖耐压、承载结构所需的高性能钢材、钛合金、先进复合材料，应满足高静水压力，循环载荷，冲击载荷，复杂海况下的强度、刚度、韧性、疲劳性能要求。防护与密封材料主要决定装备的长期服役可靠性和维护周期，契合深海腐蚀防护、生物附着防控、动静密封可靠性等工程需求，包括重防腐涂层体系、牺牲阳极材料、深海橡胶密封材料等。特种功能材料面向深海浮力调节、隔声减振、探测感知等特定功能需求，包括低密度固体浮力材料、吸声

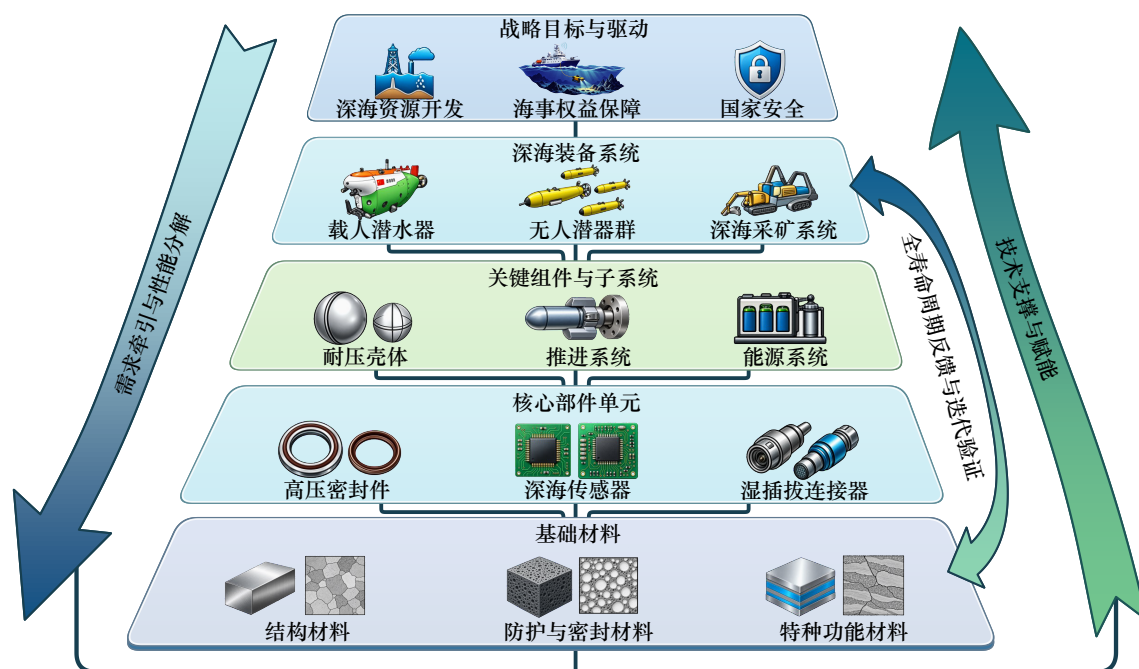


图1 海底工程装备与材料技术体系的纵向层级结构

隔声功能材料、透声/光学窗口材料,是提升装备综合性能的重要支撑。与常规海工材料相比,深海关键材料面临高静水压力、高盐腐蚀、交变载荷、微生物附着、长期无人值守等多重约束,关键性不仅体现在单项性能指标,而且体现在多因素耦合环境下的长期稳定性和工程可验证性^[23-24]。深海关键材料的发展水平通常决定海底工程装备从可用向可靠、可持续、自主可控的跨越。

3. 共性基础技术的支撑作用

共性基础技术是连接海底工程装备、深海关键材料并贯通研发与应用的纽带,按照在体系中承担的功能定位分为支撑装备运行的核心技术(包括密封连接技术、能源保障技术、通信传输技术、感知导航技术、作业控制技术、智能运维技术),贯穿材料研制、器件验证、装备集成全链条的试验验证技术^[25-26]。密封连接技术解决极端压力与温度环境下的工程接口可靠性问题。能源保障技术、通信传输技术分别保障装备在远离母船条件下的持续供电、信息传输能力。感知导航技术支撑装备对自身姿态及周边环境的精确认知。作业控制技术涉及路径规划与人机协同操控等核心能力。智能运维技术通过多源数据融合支持装备运行状态的智能管理与预测性维护。深海环境模拟与测试评价技术为装备和材料研发提供从实验室到工程应用的全周期验证

手段,是材料性能、装备可靠性获得工程界认可的必经环节。

4. 装备-材料-共性技术协同

海底工程装备、深海关键材料、共性基础技术之间存在紧密的逻辑关联,相应的双向传导关系、体系整体运行机制如图2所示。材料性能制约装备的服役深度与寿命边界,装备需求牵引材料技术的研发方向,共性基础技术贯穿材料研制、装备设计、集成验证、工程应用的全链条。因此,推进海底工程装备与材料技术体系的整体提升,不宜“就材料论材料、就装备论装备”,而应坚持纵向层级贯通、横向技术支撑的一体化布局,协同推进各层级的技术攻关。

(二) 技术特征

海底工程装备与材料技术体系具有区别于陆地工程、浅海工程的典型特征。这些特征源于深海极端环境约束、复杂工程需求的共同作用,集中体现在环境适应性、系统复杂性、长期可靠性、技术集成度的全面提升。

1. 极端环境适应性强

极端环境适应性强是海底工程装备与材料技术体系最基本的技术特征。深海环境对装备与材料提出了苛刻的适应性要求。以水深3000 m工况为例,

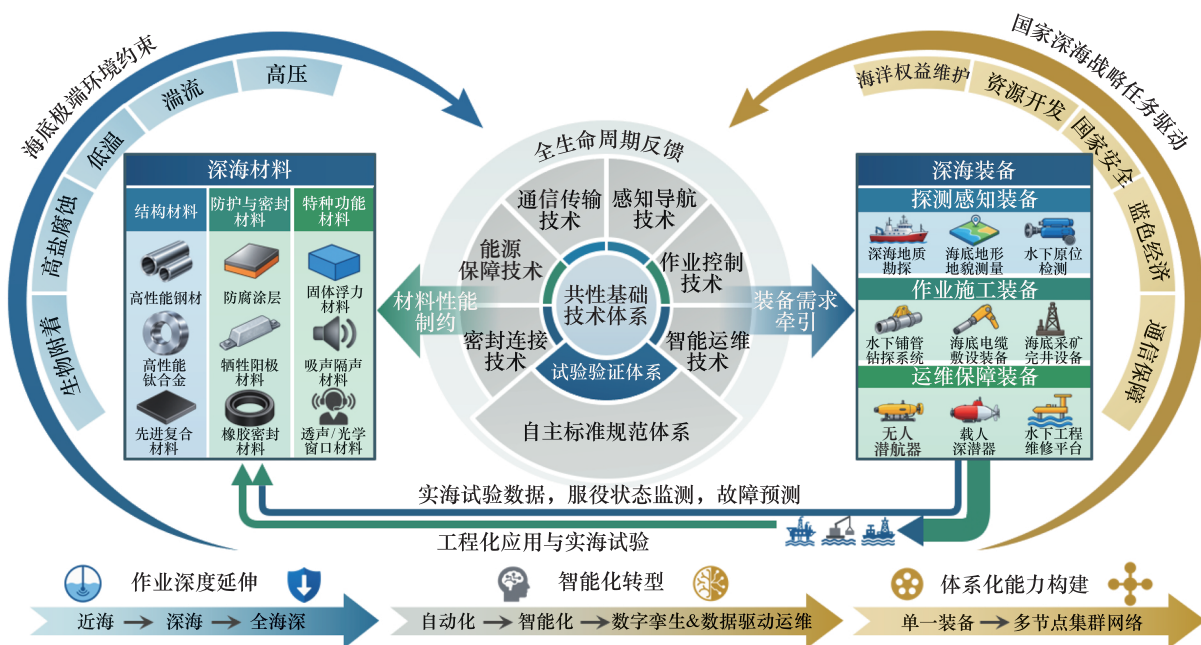


图2 海底工程装备与材料技术体系逻辑与机制

环境静水压力约为30 MPa, 远超绝大多数工业装备的常规设计载荷范围; 海底低温环境对材料韧性、密封性能、润滑介质的流变特性等均产生显著影响; 高盐度、高氯环境持续侵蚀金属表面钝化膜, 金属构件面临突出的腐蚀风险^[27]。此外, 随着极地海域工程活动的拓展, 冰区和极地深海环境呈现常年冰盖封冻、海冰犁蚀、海底永冻层低温流体作用等更为复杂的极端特征, 对装备的冰下自主控制、抗挤压能力以及材料的低温韧性、耐磨蚀性能提出更高要求^[28-30]。深海环境并非单一极端因素的简单叠加, 而是高压、低温、腐蚀、生物附着、微生物活动等多种因素作用的综合极端环境。以金属腐蚀为例, 深海低温会显著改变电化学反应动力学, 高压会劣化金属表面腐蚀产物膜的保护性, 微生物的代谢活动会加速局部腐蚀, 多种因素之间存在非线性效应, 单一因素条件下建立的腐蚀模型在深海环境中严重失效。类似的多场耦合问题也在密封材料的蠕变与老化、复合材料的湿热力耦合失效、传感器件的压力-温度漂移等方面普遍存在。极端环境适应性不仅是装备与材料的核心设计约束, 也是区别于陆地工程、浅海工程的根本性技术特征。相关技术研发需以深海环境精确模拟为前提, 建立覆盖全服役周期的性能演化评价方法, 在材料与结构设计时也应从单一性能优化向多性能协同优化转变。

2. 系统集成度高且跨学科融合

海底工程装备的系统集成度高, 跨学科融合特征显著。海底工程任务的可靠执行依赖多类装备、多种材料、多项支撑技术的高度协同, 仅有单一技术突破难以直接转化为工程能力。以深水油气水下生产系统为例, 涉及水下采油树、管汇、脐带缆、立管、水下控制模块、化学药剂注入等数十个子系统, 各子系统在接口标准、控制协议、材料兼容性上应高度统一^[31]。这就要求从系统层面进行技术研发的顶层规划, 重视跨专业、跨领域的集成创新, 尤其是突破装备和材料匹配、系统级可靠性设计、整机集成测试等关键共性技术瓶颈。在海底工程装备领域, 材料技术已从传统支撑角色向功能与结构一体化转变, 材料不仅履行承载功能, 而且逐步集成传感、屏蔽、吸能、防护等功能, 支撑装备的高集成化、小型化发展。

3. 长期无人值守与高可靠性要求突出

海底工程长期无人值守, 对装备的耐久性设

计、材料的长效服役性能提出了远高于陆地工程的严苛要求。海底工程设施一旦布放安装, 因水下作业成本极高而致计划外的检修与更换面临高额经济损失, 部分深水设施甚至要求在无人干预条件下连续稳定运行数年以上。从技术层面看, 需重点解决深海腐蚀疲劳失效机理、密封元件蠕变与老化规律、关键运动副磨损寿命预测、水下结构健康监测与剩余寿命评估等紧迫问题。高可靠性设计理念也需贯穿从材料选型、结构设计、制造工艺到在役监测的装备全寿命周期管理过程。

4. 水下作业自动化、智能化、体系化发展

水下作业的自动化、智能化、体系化发展渐成趋势。人工潜水直接作业的可行深度存在固有局限, 随着开发水深的不断增大, 遥控作业、自主作业、有人与无人协同作业成为深海工程的重要作业模式^[32-33]。自主水下航行器(AUV)等无人水下平台逐步具备环境感知、路径规划、任务决策、精细操作、群体协同作业能力, 也在朝着长航时、高智能、集群化方向发展^[34]。有人与无人装备的协同作业成为深海工程作业的重要模式, 如载人潜水器凭借现场人员的实时判断与精细操作能力来承担复杂环境下的关键决策性任务, 无人潜航器依托续航能力、作业范围、重复执行能力的优势而承担大范围探测、常态化巡检、高风险作业任务。相关趋势对海底工程装备与材料提出了新要求, 如低功耗电子封装材料、高可靠传感材料、适应复杂电磁环境的功能材料等。同时, 数据驱动的运维模式逐渐兴起, 通过多源信息融合与数字孪生技术支持海底系统的智能管理和优化运行, 以智能化水平的持续提升来实质性改变海底工程的作业模式与经济性边界。未来的海底工程将更加依赖有人与无人装备协同、遥控与自主协同、移动平台与固定节点协同, 由此构建海底工程网络, 提升复杂海底环境下的作业效率、安全性、持续运行能力。

三、海底工程装备与材料技术的国际发展态势

(一) 总体发展格局

1. 技术体系的演进逻辑

从历史演进角度看, 全球海底工程技术的功能定位从早期以近海油气开发为核心的单一工程手

段,逐步提升为资源开发、信息感知、环境安全、海洋治理一体化的综合性战略技术体系。这一演进过程中呈现出多个结构性转折节点,如深水油气开发的商业化突破推动了水下生产系统集成能力跃升,水下侦察技术的扩散催生了民用深海探测装备的快速迭代,深海矿产资源竞争加剧推动了采矿、钻探、海底基础设施等技术方向的战略布局^[35-36]。当前,国际海底工程技术的竞争焦点发生根本性转移,由单体装备性能比较转向以系统集成能力、长期可靠运行能力、标准制定权为核心的体系竞争。单体装备性能的边际提升效益递减,而体系级协同作业能力、工程化实施能力成为决定深海战略行动成效的根本因素。掌握从装备设计到工程交付再到全寿命周期管理的完整链条,是在深海竞争中占据优势的基本前提。

2. 主要国家的发展格局

当前,国际海底工程技术格局呈现显著的分层结构。以美国、欧洲国家为代表的传统海洋强国凭借深海工程实践积累,在海底工程技术体系的广度与深度上处于领先地位,主导国际标准制定并将工程经验转化为技术门槛,使后发国家的技术追赶面临能力差距和制度障碍。俄罗斯、日本等国的海底工程技术发展路径也有特色,表明国家战略需求的差异性可以系统性地塑造技术能力的选择方向与投入结构。

美国建立了“政产学研”多元协同的创新生态体系,在全球海底工程技术格局中占据全面的优势地位。在顶层规划层面,美国国家海洋和大气管理局、海军研究办公室、国家科学基金会、能源部分别开展布局,依托企业、高校、联邦实验室形成了覆盖基础研究、技术开发、工程应用的多级协作机制。在深水油气开发装备领域,美国企业主导了水下采油树、水下控制系统、深水立管等高附加值核心产品的国际市场。在深海科学探测装备领域,伍兹霍尔海洋研究所、斯克利普斯海洋研究所等机构持续引领深潜器、水下滑翔机的技术前沿。在海底信息基础设施领域,美国企业是全球海底通信光缆的设计、建造、运营市场主导者之一。

欧洲在海底工程领域的竞争力源自基于地缘专业化分工的多极协同创新体系。挪威企业依托北海油气长期开发积累的海量工程数据与作业经验,在水下生产系统集成、深水管道工程、海底腐蚀防护

技术领域形成了难以快速复制的经验性壁垒。英国企业在水下机器人系统、深海测试基础设施方面持续深耕,法国企业在深海探测装备、科考船设计领域具有突出优势,德国企业在水下传感器件方面形成特色竞争力。这种专业化分工在科技合作框架的制度性支持下逐渐演化为协同互补的技术生态。

俄罗斯的海底工程技术发展遵循典型的军事战略导向逻辑,在大深度载人潜水器研制方面具有深厚积累,如“和平号”系列深潜器曾经执行北极海底科考与特种作业任务。近年来,着力推进以波塞冬核动力水下无人航行器为代表的新型深海战略装备研制与部署,体现出以水下战略威慑、基础设施防护能力为核心的技术需求牵引取向。

日本作为资源对外依赖的海洋国家,采取了资源安全导向的技术发展逻辑,将深海作为潜在的战略资源储备空间,形成了以资源勘探与开发能力建设为轴心的技术路径。日本海洋研究开发机构在深海探测装备方面保持长期投入,在太平洋深海矿产资源科学调查中积累了大量的原始数据,依托“地球号”大洋钻探船的超深钻探能力提高了对深部地质信息的掌握程度^[37-39]。

3. 国际竞争范式的新变化

当前,海底工程发展格局处于由智能化转型驱动的结构重塑进程,也在局部改变竞争格局中的壁垒性质。传统竞争优势主要建立在长期工程实践积累、高端装备制造能力、产业链配套能力、国际标准体系等基础之上,具有较强的历史路径依赖性。然而,以人工智能(AI)、数字孪生、数据驱动技术为代表的新兴技术持续融入海底工程研发、设计、运行、运维的全过程,推动国际竞争逐步向装备、数据、算法、平台协同发展的综合能力演变。智能化技术更多依赖数据资源、算法模型、系统集成能力,创新周期相对短,技术扩散速度更快,在一定程度上降低了部分领域对长期工程经验的依赖度,为后发国家参与国际竞争提供了新的突破口。

值得指出的是,海底工程作为典型的复杂系统工程,开展智能化技术应用仍需建立在高可靠装备、关键材料、试验验证、工程实践等传统能力基础之上。新一轮国际竞争并非传统优势的简单替代,而是传统工程能力与智能化能力深度融合基础上的竞争范式升级,能够率先取得工程技术、数字

技术、产业体系协同发展的国家将更有可能在未来的国际海底工程竞争中形成新的综合优势。这是理解当前国际海底工程格局演变趋势不可忽视的关键判断。

（二）典型装备系统及其发展趋势

在全球海洋战略竞争持续深化、深海技术加速迭代的双重驱动下，各类典型装备与工程系统不断升级，由单一功能装备向多功能集成装备演进，由独立运行向系统协同运行转变，呈现出无人化、智能化、深海化、体系化的发展特征。

1. 水下无人系统

水下无人系统是当前海底工程装备领域中技术迭代活跃的方向，涵盖无缆自主水下航行器、有缆遥控水下机器人（ROV）、水下滑翔机、混合型水下无人系统等平台类型。各类平台正在沿着智能化程度不断提升、作业能力持续增强的主线加速发展^[40]，如挪威康斯伯格公司的AUV已在深水海底管道检测、海底地形测绘、目标搜寻方面获得商业化应用。自主感知与决策能力是推动AUV技术进步的关键内生动力，基于深度学习的水下目标识别、基于同步定位与地图构建的水下自主导航、基于强化学习的自适应任务规划等技术逐步从实验室研究走向工程应用。在水下无人系统的集群化方向，AUV/ROV协同作业技术从概念验证走向工程实践，如美国开展的近海水下持续监视网络和深海对抗项目形成了分布式水下网络的技术基础，欧盟SWARMs项目重点开展了水下无人系统集群协同感知、通信与任务分配技术攻关。水下无人系统集群的规模化应用，将从根本上改变大范围海底工程探测、监测、作业任务的实施模式，以集群协作取代单体高性能平台，在降低系统成本的同时显著提升任务执行的鲁棒性。

2. 水下生产与资源开发装备

水下生产和运输系统是深水油气资源开发的核心工程装备，将油气开采、分离、增压、输送等功能在海底集成，实现从井口到运输的全流程海底化，有效减少对海面平台的依赖^[41]。相关装备朝着高可靠、长寿命方向发展，经历了以全电化、深度一体化为核心特征的新一轮技术变革。面向海洋新能源开发需求，海底电力输运与能量管理系统获得快速发展，为海底工程系统提供稳定的能源保障。

深海采矿装备由海底采集车、破碎与集矿装置、矿浆提升管线、水面支持船、动力与控制系统、环境监测系统等组成^[42-43]，也是资源开发装备的重要研制方向；具有作业水深大、海底地形复杂、矿体赋存分散、固液两相输送距离长、装备磨蚀严重、环境扰动敏感等服役特点，对行走机构、采集头、破碎输送系统、提升泵、耐磨耐蚀材料、水下定位导航、环境监测提出了较高要求。国际深海采矿装备正在从小规模工程试验转向集约化、商业化开采，受技术成熟度、经济性验证、国际法规框架等因素制约仍处于工程化与产业化的渐进式发展阶段。深海采矿装备技术发展重点包括低扰动采集、高可靠海底行走、长距离矿浆提升、耐磨耐蚀输送材料、沉积物羽流扩散控制、环境影响监测与评估等，整体处于原理样机与海上中间试验阶段^[44-46]。未来的资源开发装备将从以油气开发为主的单一主线逐步拓展为油气、天然气水合物、深海固体矿产、海底空间综合利用的多元体系，装备形态也由单体设备向采集、提升、输运、监测、环境评估、智能控制一体化系统演进。

3. 海底观测网络与运维技术

海底观测网络是支持深海环境长期、连续、实时监测的重要基础设施，在组网规模、传感能力、数据智能处理方面取得了显著进展。在固定式海底观测网络方面，加拿大海王星观测网、美国海洋观测计划、欧洲多学科海底及水体观测系统代表了固定式海底观测网络的国际先进水平，支持地震、海啸、洋流、生态等类型的海洋环境参数长期实时监测，通过海底光缆将监测数据传输至陆地或各节点岸站数据中心。在移动式与固定式观测协同方面，水下滑翔机群、全球观测网与固定观测网的协同组网技术快速发展，通过动态部署移动节点填补固定观测网络的空间盲区，逐步形成“固定骨干网+移动延伸网”的立体观测体系。智能巡检机器人、自主维护装备逐步应用于海底工程运维，主要执行缺陷检测、清洁等任务。依托数据分析与数字孪生技术，海底工程系统朝着预测性维护、全生命周期管理方向发展。

4. 装备系统发展趋势

一是作业深度向超深水与全海深延伸，载人深潜、无人深潜具备万米级全海深作业能力，深海钻探的钻深能力也迈入万米级，海底工程装备的压力

边界、材料强度储备、试验验证等级随之抬升，极端环境适应能力由可达向常驻升级。二是智能化、无人化成为新一代装备的核心发展方向，AI和自主控制技术加速向海底工程装备渗透，自主作业、有人与无人协同、无人集群成为能力跃升的主线，数据驱动的预测性维护将逐步取代故障后维修。三是由单一装备向体系化能力转变，固定观测网、移动平台协同组网，采集、提升、运输、监测趋于一体化集成，竞争焦点从装备单体性能转向基于标准与网络的装备体系能力。四是绿色化、可持续约束显著增强，低扰动作业、环境影响实时监测、清洁低碳能源供给成为海底工程装备研制的内置约束，环境绩效逐步成为国际规则制定和项目准入的衡量维度。

（三）材料与关键基础技术进展

深海工程材料与关键基础技术是制约海底工程装备服役性能与寿命极限的核心瓶颈，也是决定海底工程体系自主化、深海化、长期化能力的基础环节。随着海底工程不断向深海、超深海拓展，材料性能和基础技术能力面临极端环境的考验进一步增加，呈现材料与结构一体化设计、多功能复合化、智能化响应等发展趋势。

1. 结构材料

高强高韧与轻量化是结构材料的主要发展方向，决定装备服役深度和结构安全边界。钛合金具有优异的比强度、耐腐蚀性能、抗压能力，成为深潜器耐压壳体、关键承力结构的主流材料，朝着高强度、高断裂韧性、良好焊接性能方向发展。高性能钢材通过成分优化与热处理工艺改进，在深海管道、立管、大型结构中继续占据重要地位。碳纤维增强聚合物基复合材料在减重、耐腐蚀方面具有明显优势，逐步从航空航天领域向深海工程装备渗透，如美国泰坦深潜器外壳、新型AUV耐压舱、深海系泊缆、生产立管开始采用相关材料方案。金属基复合材料（如颗粒增强铝基、钛基复合材料）在耐磨承压部件方面应用前景良好，陶瓷基复合材料（如氧化铝基复合材料）在深海电绝缘承压器件上的应用受到关注^[47-49]。

2. 功能材料与腐蚀防护材料

深海功能材料涵盖浮力材料、吸声隔声材料、透声窗口材料、水下光学窗口材料等细分类型，以

多功能集成、智能响应为主要发展趋势。在深海固体浮力材料方面，空心玻璃微珠/聚合物复合体系仍是主流技术路线，超深水（>6000 m）固体浮力材料的耐压性能提升与密度降低是国际研究前沿。提升固体浮力材料性能事关全海深自主无人潜航器的有效载荷空间，进而决定探测与作业能力的上限。吸声隔声材料与透声/光学窗口材料共同决定深海探测装备的感知能力边界。吸声材料的声学特性决定声呐系统的目标识别精度与探测距离，成为水下声学系统的关键材料。透声窗口材料的声透射率、在深海高压低温环境下的性能稳定性，决定换能器在超深水环境中的设计灵敏度。功能材料的性能上限一旦固定，无论换能器设计、信号处理算法如何优化，系统探测能力都存在无法突破的上限，这就体现了材料性能对装备能力的根本性约束。形状记忆合金、压电功能陶瓷等智能响应功能材料，正在探索应用于深海仿生机器人。腐蚀防护材料是决定海底工程设施服役寿命的关键材料，长效防腐涂层体系、阴极保护材料、腐蚀监测技术方面均有重要进展。在国际海洋环保法规趋严的背景下，无毒低表面能防污涂层、仿生微结构防污涂层成为替代传统含铜防污体系的重要方向，受到学术界与产业界的广泛关注。

3. 关键共性基础技术

近年来，在材料本体技术以外，支撑海底工程装备研发与工程化的关键基础技术也取得重要突破，深刻影响了海底工程技术体系的演进方向。在统一的工程设计规范与标准体系引领下，逐步形成了软硬件标准化与模块化规范，为海底工程系统提供了高可靠的运转保障。① 在水下密封与连接技术方面，深海湿式可插拔电气连接器、大通径深水道法兰快速连接系统、水下液压快速接头等技术获得突破，推动水下设备的模块化更换与维修能力提升。② 在深海能源技术方面，依托高能量密度电池性能提升，采用压力补偿或密封设计后可使电源系统在深海环境中稳定持久工作；深海能源基站作为局部能源节点，与“发储输用”多能互补模式配套使用，为未来长期能源支持打下基础^[50]。③ 水下通信技术由传统的声学通信向“声光电”多模态协同传输方向发展，研究重点是远距离稳定传输、低时延控制、复杂海况下的抗干扰能力；通过高阶调制与自适应均衡提升高速水声通信能力，在近距离范

围内实现兆比特级的数据传输；蓝绿激光通信具有水下超高传输速率（千兆比特量级），受海水浊度及穿透距离的限制仅适用于短距离高速数据交换。④在感知导航技术方面，基于水声定位基阵、地形匹配的组合导航技术逐步成熟，提高了深海装备在无卫星导航环境下的长期定位精度；多波束声呐、合成孔径声呐等探测设备的分辨率与成像质量持续提升，为深海装备的自主避障和精细化作业提供了直接支持^[51-53]。⑤在作业控制技术方面，深海装备逐步从遥控操作向自主决策方向演进，持续优化路径规划、目标识别、人机协同操控等核心算法，部分作业型ROV已具备半自主作业能力。⑥在智能运维技术方面，基于多源传感数据融合的装备健康状况监测与数字孪生技术逐步获得应用，通过装备运行数据的实时采集与建模分析增强了故障预测和维护决策的智能化水平，改善了深海装备在远海、深水条件下的运维保障效率^[54-55]。⑦在试验验证与可靠性评估技术方面，深海环境模拟与全寿命周期评价能力不断提升，通过高压舱、腐蚀环境模拟装置、多场耦合试验平台、全海深压力验证、实海试验等，为材料性能评价、器件可靠性验证、装备集成测试提供了重要支撑。

4. 材料与基础技术发展趋势

材料与关键基础技术正在由单点突破向体系协同创新转变，既支撑海底工程装备性能提升，又引领海底工程模式变革。随着新材料、新工艺、新技术的融合，海底工程朝着高可靠、长寿命、智能化方向发展，为深海资源开发、海洋空间利用提供坚实基础。同时，随着海底工程活动向极地等极端环境拓展，低温、冰覆、长期无人值守等复杂工况对装备可靠性与材料服役性能提出更高要求，耐低温结构材料、低温密封材料、极端环境适应型关键技术成为重要发展方向，将推动海底工程装备与材料体系提升环境适应和长期自主运行能力。

四、海底工程装备与材料技术的国内进展与差距分析

（一）国内发展现状

自“十二五”时期以来，在海洋强国战略、深海科技专项的推动下，我国海底工程装备与材料技

术取得了重大进展，基本形成了覆盖深海探测、作业施工、资源开发、材料支撑的技术体系；在一些关键领域取得标志性成果，部分技术达到国际先进水平，显著增强了深海工程能力和自主保障能力^[56-59]。整体上，海底工程装备与材料领域从基本空白发展至具备一定的体系化能力，在载人深潜、深水钻井平台、部分关键材料方面取得重大进展，为深海工程装备能力的进一步提升确立了重要基础。

1. 载人与无人深潜装备

载人深潜装备是我国深海技术领域取得的突破集中、高显示度方向之一。以万米级载人潜水器“奋斗者号”为代表，具备全海深载人探测能力，标志着耐压结构设计、高强材料应用、系统集成技术达到国际领先水平。在无人深潜装备方向，“海龙”系列遥控水下机器人、“潜龙”系列自主水下航行器、“海翼”系列水下滑翔机形成了覆盖不同深度与任务类型的装备谱系，在深海地形测绘、资源调查、工程巡检等方面应用广泛。系列化的AUV在航程、续航、自主控制能力方面持续提升，实现从单一功能向多任务平台的转变。

2. 水下作业与资源开发装备

在海底作业装备与资源开发方面，我国初步形成了完整的技术体系。深水铺管船、大型起重船、配套施工装备完成研制，具备在复杂海况下实施海底管道铺设与结构安装的能力。海底作业机器人及专用工具逐步实现国产化，可自主开展观测、取样和部分维护作业。海底井口装置、采油树、管汇系统、脐带缆等深海油气开发装备完成自主研发并在部分海域开展工程应用。深水油气开发由依赖国外技术逐步转向自主可控发展，海底管道、立管系统的设计与制造水平不断提升，支持深水环境下长期稳定运行需求。在深海矿产开发方面，针对太平洋多金属结核、南海多金属硫化物两类重点矿产资源开展了装备研发与海上试验工作，启动了海底采集、矿浆输送、提升系统、水面支持、环境监测等装备技术研究，具有深海采矿装备系统集成和关键部件研制的基础能力^[60]。在深海钻探与取芯技术方面，近年来取得了从浅表取样向深部钻进的突破。自主设计和建造的万米级大洋钻探船正式入列，是自主开展深海科学钻探和深部地球探测能力的直接体现，为相关研究提供了平台支撑。此外，面向深

海复杂环境的工程装备自动化与智能化水平不断提升,为海底工程的高效实施提供了关键支撑。

3. 海底观测与监测系统

我国逐步构建了海底观测网络与环境监测体系。海底观测节点、传感器系统、数据采集平台不断完善,支持开展海洋环境参数与地质活动的长期监测。建成东海海底观测小衢山试验站,正在建设东海海底观测子网、南海海底观测子网,初步具备了海底地震、海流、温盐、生态等参数的长期实时观测能力,同步实施移动平台与固定观测节点相结合的应用模式。积极推进透明海洋科技计划,加快建设覆盖西太平洋关键海域的立体综合观测网络,自主研发了多波束测深系统、浅地层剖面仪、深海多道地震采集系统等水下声学探测设备。海底监测技术在工程安全保障中的作用得到充分发挥,西太平洋实时科学观测网、南海潜标观测网等具备了长期观测能力并在进一步提高实时化与智能化水平。

4. 关键材料技术

我国在高性能结构材料与功能材料领域取得显著进展。钛合金材料在深潜器耐压壳体及关键承力结构上获得工程应用,具有良好的强度、韧性、耐腐蚀等关键性能。“奋斗者号”载人潜水器全面实现全海深耐压壳体的国产化,相关钛合金材料的研制攻关积累了宝贵的工程经验。防腐涂层、密封材料、高可靠连接材料也在不断进步,为深海装备的长期服役提供了直接保障。深水旋转动密封、深水静密封、深水电气连接器等关键部件的自主研发取得进展,部分产品通过了装备级工程验证,打破了依赖进口的被动局面。

5. 共性基础技术

近年来,我国围绕重大装备开展了系统性的共性基础技术攻关,在部分领域有效打通了装备与材料的协同转化链条,但整体发展不均衡的特征依然明显。在能源保障技术方面,国产深海锂电池的能量密度与安全性持续提升,在多型深潜器与长航时无人装备上获得应用;完成镁/海水燃料电池系统的3000米级海试验证,深入开展了水下氢氧燃料电池技术研究^[61-63]。在通信传输技术方面,自主研发的全海深高速相干水声通信技术实现万米水深条件下的实时语音、文字、图像数据传输。在感知导航技术方面,全海深多波束测深系统获得技术指标的持续提升,装备到“实验6号”“探索二号”深海科

考船并投入科考应用;深海多道地震采集系统在海洋油气勘探领域实现商业化应用,技术水平进入国际先进行列;浅地层剖面仪的国产化取得进展,但在深海高分辨率探测方向仍存在短板。在水下作业控制技术方面,突破了超高压密封与驱动控制技术,研制的全海深主从伺服液压机械手具有超过60 kg的持重能力,在多型载人潜水器上获得应用,完成岩石和生物抓取、沉积物取样器操作等精准作业任务。同时,为了支撑关键技术工程化应用和装备可靠运行,依托国家深海基地、海试平台、高压环境模拟装置不断完善试验验证技术,建立了覆盖材料、器件、装备的试验验证能力体系,为海底工程装备与材料技术体系的深海化和智能化发展提供支撑。

(二) 国内外的差距对比

尽管我国在海底工程装备与材料技术领域取得了一系列进展,但与国际先进水平相比仍存在一定差距,主要体现在装备性能与工程化能力、系统集成与体系化水平、关键材料与核心部件自主能力、长期运行与可靠性保障能力。

1. 装备性能与工程化能力差距

在装备性能与工程化能力方面,我国具备深海探测与部分种类的工程作业能力,但工程化水平与国际先进存在差距。以深海油气开发为例,发达国家形成了成熟的全流程海底生产系统应用体系,可在复杂海况下长期稳定运行并形成标准化、模块化的工程体系;也具备从工程设计、装备制造、海上安装到寿命周期完整性管理的全链条服务能力,正在加快向全电化水下生产系统推进。我国在关键装备研制方面取得突破,但在系统成套化、规模化应用、复杂工程环境适应能力方面仍有不足,深海采矿装备的海底采集系统长期可靠运行、复杂地形自主行走与定位、矿浆长距离提升、耐磨耐蚀关键部件、环境扰动控制、系统级海试验证等仍待加强。在深海资源勘探与科学认知能力建设方面,发达国家依托历时超过50年的国际大洋钻探计划,积累了覆盖全球主要海域的岩心样品库、测井与地球物理数据库,形成了复杂地层钻进工程经验、多学科岩心描述与分析规范^[64-66]。我国在超深水/超大钻长条件下的钻井液体系优化、复杂井况应急处置等方面的工程实践经验仍在积累过程中,国际大洋钻探

规则制定、航次组织管理、全球科学家网络构建也处于从参与者向主导者转变的阶段。此外，在高精度ROV、深水施工机器人等高端水下作业装备方面，国内产品在稳定性、作业精度、环境适应性等方面仍待提升。

2. 关键材料与核心器件自主能力不足

在关键材料与核心器件及部件方面，我国在部分领域虽有进展，但高端产品不足的问题依然存在。在材料层面，高性能钢材、钛合金、深海复合材料等关键材料的性能稳定性、一致性、工程化应用能力与国际先进水平存在差距，高可靠密封材料、特种连接材料等关键基础材料仍依赖进口或尚未完全自主可控，品种谱系不够完整，面向不同工况需求的系列化产品体系有待建立。国产碳纤维复合材料在深海耐压结构应用方面的工程经验积累较为有限，与国际先进水平存在较大差距。在器件层面，深海专用压力传感器、温度传感器、姿态传感器等核心感知器件的精度、稳定性、长期可靠性存在明显不足，高性能深海电池单体、深海专用轴承、精密齿轮传动器件等基础器件在性能一致性方面仍有短板；湿式电气连接器的接触可靠性、水下光纤接头的插拔寿命等关键器件指标与国际先进产品存在差距，成为深海装备模块化维护与系统集成的瓶颈。在核心部件与组件层面，深水旋转动密封组件、大深度液压控制单元、水下电动执行机构等关键功能部件的自主供给能力虽有改善，但在高端产品的可靠性寿命、极端环境适应性方面存在较大提升空间，部分高端部件仍然依赖进口，制约了装备综合性能的提升。此外，国内在长期服役环境下的材料性能衰减规律、结构可靠性评估、故障预测技术方面仍有诸多不足，而海试数据积累不充分、长期运行经验欠缺进一步放大了装备寿命设计与可靠性验证的不确定性。

3. 标准规范体系建设滞后

深海工程标准规范体系方面的国内外差距尤为突出。美国石油学会、挪威石油工业标准机构、国际标准化组织等建立了覆盖深水油气开发装备、海底管道、水下生产系统、水下无人系统的国际标准体系，相关标准实际上成为全球深海工程行业的通行准则。相比之下，我国深海工程领域的自主标准体系建设明显滞后，现行国家标准中大量直接引用或等效采用国际标准，原创性技术标准数量极为有

限，在国际标准制定中的话语权不强，不仅制约了国产深海工程技术与装备的国际市场准入，也在一定程度上限制了自主技术路线的探索空间。

（三）瓶颈环节与制约性因素

从国内外的差距对比可见，我国海底工程装备与材料技术发展面临的瓶颈环节并非单纯的技术能力缺失，而是受到基础研究积累、工业体系配套、创新生态构建、战略统筹机制等层面的系统性制约。突破这一困局，既需要在关键核心技术方向实施合力攻关，也应当从基础研究、工业体系、验证能力、创新生态、人才队伍等方面统筹谋划并协同推进。

1. 基础研究积累薄弱

我国海底工程装备与材料领域长期存在重工程应用、轻基础研究的结构性失衡情况，基础研究积累薄弱、原始创新能力不足成为制约深海工程发展水平的根本性问题之一。深海极端环境下的材料失效机理、多物理场耦合作用规律、深海流体动力学特性、水下声学传播机制等基础科学问题的研究积累尚不深厚，导致工程实践中遭遇的技术问题往往缺乏充分的理论支撑，难以从机理层面出发寻求系统性解决方案。以深海腐蚀防护为例，深海低温、高压、微生物活跃等因素耦合作用下的金属腐蚀动力学机制至今尚未完全阐明，现有的防腐设计规范主要依赖经验参数而非机理模型，难以对装备全寿命周期的腐蚀演化行为进行精准预测。类似情况普遍存在于深海密封材料老化机理、深海复合材料“湿热力”耦合失效机制、深海声学超材料设计理论等关键方向，明显制约了技术创新能力与工程应用深度。从科研投入结构看，深海领域国家科技计划项目对应用研究、工程示范的支持力度较大，而对深海工程定向基础研究、前沿探索研究的连续稳定支持有所不足。

2. 核心部件自主保障能力不足

核心部件自主保障能力仍待提升，且关键环节存在“卡脖子”风险。海底工程装备作为典型的高端装备，开展研制涉及特种钢铁、高性能橡胶密封件、精密液压元件、高端电子器件、特种光纤传感器、专用润滑材料等数百种关键基础材料与零部件。我国工业基础体系在上述多个关键环节存在明显的薄弱点，是制约深海装备自主供给进程的深层

次瓶颈。深海装备核心零部件对加工精度、表面质量、材料一致性的要求极为苛刻，而国内对应的精密制造能力不强。部分深海装备所需特种原材料的国内供应存在品质不稳定、规格不配套、批次一致性差等突出问题，而国内对应的原材料保障力度不足。

3. 试验验证体系不健全

试验验证体系不健全，工程化能力存在系统性短板。试验验证是深海装备从实验室研究走向工程应用的必经环节，也是我国深海工程装备体系建设中最为突出的短板之一。深海工程领域的每一次实海试验都对应着巨额的资金投入、漫长的项目周期，带来极高的试错成本。实验室加速老化试验与真实深海服役环境之间存在难以消除的等效性鸿沟，加速试验一般通过增压或增大介质浓度来压缩时间，但这些手段可能改变失效主导机制而致加速试验结论难以外推至真实服役条件。在工程设计中，多依赖经验来保守估计装备寿命，无法为新材料、新装备的工程应用提供充分的置信度。现有的深海装备试验验证体系在设施规模、测试能力、验证规范方面均存在不足。全海深压力等级的大型综合试验装置数量稀少，极少对完整装备系统进行全尺寸、全深度的工程级验证测试，导致许多装备在进入实海试验时缺乏充分的地面验证，因而实海试验风险偏高、研发周期与成本显著增加。在试验条件方面，深海试验海区的使用协调机制有待完善，深海试验数据的共享机制尚未建立，不同研究单位之间存在重复试验与“数据孤岛”问题，客观上造成宝贵深海试验资源的浪费与低效利用。

4. 高端复合型人才短缺

高端复合型人才与交叉创新能力不足共存并相互影响。海底工程装备与材料技术研发高度依赖具备深海工程领域系统知识和实践经验的高端人才，而国内这类人才处于短缺局面。高校尚未建立面向深海工程装备的系统化学科培养体系，人员培养分散于船舶与海洋工程、材料科学与工程、机械工程、水声工程等学科，也缺乏将深海极端环境适应性设计、水下系统集成、深海材料工程与海洋工程作业有机结合的跨学科综合培养机制，导致培养人员的知识结构不适应深海工程装备复杂系统研发的一线需求。在高端人才引进与留用方面，国内深海工程装备研发机构在薪酬待遇、科研条件、职业发

展路径等方面与国际顶尖机构存在差距。目前海底工程装备与材料技术方面的高端人才队伍，在规模与稳定性上不足以支撑技术攻关的中长期需求。

五、我国海底工程装备与材料技术体系突破路径探析

我国海底工程装备与材料技术体系的发展，是涉及战略认知重塑、体系框架重构、创新生态重建、竞争格局重定的系统性工程。从国家战略高度出发，深刻认识基础技术体系构建的关键地位，以装备、材料、技术逻辑闭环为主线统筹谋划，在筑牢基础研究、突破核心技术、完善验证体系、构建自主标准、培育高端人才、完善政策保障、把握智能化机遇方面协同发力，推动深海工程技术体系能力跃升。

（一）科研攻关路径

1. 以重大工程任务牵引纵向层级贯通

以重大工程任务为牵引，打破主体分散的领域研发布局。面向全海深长期驻留作业系统、深海矿产规模化智能采集装备系统等具有战略引领价值的深海工程目标，设立跨学科体系攻关专项，以工程目标的刚性约束“倒逼”各层级之间的技术对接。以整机装备的系统性能目标为起点，沿纵向层级链反向分解出子系统指标、部件性能要求、器件精度目标、材料性能边界，形成自上而下、逻辑连贯的技术攻关布局，据此统筹配置科研资源。以深海长期驻留作业工程为例，重点解决装备在高压、强腐蚀极端环境下数年乃至超过十年的无故障运行问题，直接要求在耐蚀合金、深海功能弹性体、低功耗智能传感材料、高可靠电气连接材料等方向实施前瞻性研发布局，而非等到装备研制面临材料瓶颈时再临时寻求解决方案。在这一发展框架中，共性基础技术研究直接提供试验手段与设计规范，处于装备与材料之间的接口设计、性能匹配优化、失效模式协同分析核心环节，确保各层级攻关目标紧密对接。

2. 提高核心紧缺元器件的自主供给能力

器件与部件层面是装备和材料体系中脆弱且卡脖子风险集中的环节，该层面的自主供给能力突破可作为最优先、最紧迫的任务。整机装备研制依赖

下层的完整支撑，相比研究周期长、距工程应用“远”的基础材料，核心器件与关键部件的国产化替代在周期可控性、验证路径清晰度、工程实现难度上具有相对优势，是近期可取得实质性突破、打通体系链条卡点的优先选项。例如，深海高可靠湿式电气连接器、全海深旋转动密封组件、深海专用高精度压力与温度传感器件、大深度液压比例控制部件等关键组件的突破，将直接打通从材料到装备的层级链，使积累的大量材料研究成果找到工程化落地的出口，也为整机装备的性能跃升筑牢基础条件。为此，可建立“卡脖子”器件优先级清单，按照“一旦缺失则整机无法工程化”的判断标准来筛选最紧迫器件，进而集中资源实施定向攻关。针对重点器件建立专项工程验证通道，明确从实验室样件到高压舱验证再到实海挂载的完整验证路径与时间节点，推动整机研制单位在新型号中优先采用国产替代器件，再通过工程应用反馈促进国产器件的快速迭代和熟化。

3. 依托基础研究与验证能力提升技术上限

基础研究与验证能力的同步建设决定海底工程技术体系的能力上限，可作为次级优先任务。建设验证平台需要科学指导，而基础研究成果若无验证体系支撑将难以得到工程界认可，两方面存在相互依存的内在逻辑，应作为整体进行统筹布局。在基础研究方面，以核心科学问题为导向，围绕多场耦合腐蚀机制、跨层级性能传递规律、长期服役等效加速试验方法、一体化设计理论等开展定向攻关，建立指导工程设计的机理模型体系。在验证能力建设方面，采取实验室模拟、陆地平台、实海验证三级递进框架，重点补齐全海深压力等级的大型多场耦合试验装置、实海试验数据共享平台两大短板，将验证能力从当前的局部片段式发展提升为完整的工程化支撑体系。

4. 分阶段构建标准体系以增强国际话语权

自主标准体系的分阶段构建决定我国在深海工程国际规则制定中的话语权，应作为战略性布局方向。标准体系构建周期最长、战略价值最高，一旦建成将从制度层面为自主材料与器件打通工程应用的生存困境。按照补空白、建体系、谋话语权的划分，逐层有序推进建设。集中弥补深海装备设计规范、材料性能分级标准、深海环境模拟试验方法等

基础性标准的空白，形成支撑国内工程实践的自主标准最小完备集。在国内具有技术优势的全海深装备、深海观测网络等领域，加快成为国际深海工程技术规则的重要制定者，将技术优势转化为标准话语权。

5. 把握智能化转型机遇以抢占技术制高点

把握智能化转型的历史性机遇，抢占国际深海工程技术代际竞争的制高点。在海底工程领域，智能化的价值远超提升现有装备自动化程度的层次，突出表现在赋予深海装备超越传统设计的感知、决策、协同能力。与传统装备制造领域相比，国内在AI、大数据、新一代通信、数字孪生等技术方向具有良好的积累，具备将这些技术优势向深海工程装备领域渗透转化的基础条件。若能在智能化深海装备方向上率先形成体系化优势，将有效缩短与发达国家在深海工程整体能力方面的差距，取得局部超越乃至引领。在深海工程技术体系中系统性地嵌入智能化发展主线，将AI、机器学习方法引入材料性能预测、装备故障诊断、剩余寿命评估，构建面向深海工程全寿命周期的数字孪生管理平台。提升自主水下航行器的感知、决策、执行一体化能力，在复杂海底地形条件下实施真正意义上的自主智能作业。构建多平台协同的深海作业网络架构，依托固定节点、移动平台、水面支持的多级体系构建大范围深海持续监控与作业能力，为开展能力领先的无人集群作业提供现实基础。

（二）制度保障机制

1. 建立深海试验数据共享与资源统筹机制

建议由管理部门牵头，建立深海装备与材料试验数据的国家级共享平台，明确数据归属、共享权限、使用规范，通过合理的利益分配机制（如数据共享积分、优先使用权置换等）激励各方机构贡献试验数据，有效破解“数据孤岛”。可按照数据敏感程度、应用场景实施分级分类管理：对于基础环境数据、材料通用性能数据、公开试验方法等，建立开放共享数据库；对于涉及装备性能、工程任务的安全敏感信息，采取授权访问、脱敏处理、受控共享的使用方式。统筹和优化深海试验装置的使用协调机制，推动高压舱、多场耦合试验平台等稀缺试验资源的开放共享，有序向高校、科研院所、行业企业开放，提高关键试验资源的综合利用效率。

2. 建立深海工程共性基础技术稳定投入机制

建议设立海底工程与关键材料科技重大项目，实行滚动支持机制，对持续稳定推进的共性基础技术方向保障5~10年的稳定投入，破解资源投入碎片化现象，匹配基础研究的长周期特点，增强研究团队的稳定性，避免支持断档而解散或转向。引导社会资本、产业基金向器件和部件国产化替代的中试阶段靠拢，合理分担工程化验证风险。考虑深海实海试验的高风险与不确定性，建立科学适用的工程海试宽容失败免责与容错机制，将机理查明、过程合规、数据留存作为评价依据，激发并保护原始创新活力。

3. 建立深海工程跨学科人才培养与长效激励机制

在船舶与海洋工程、材料科学、控制工程等优势学科的高校，试点设立深海工程系统专业方向，加大专业人才培养力度。统一设计并科学整合现有分散于各学院的关联课程，在核心课程体系中纳入深海极端环境工程设计、深海材料与防护工程、水下系统集成与测试、深海试验方法与数据分析等必修课程。强化实践教学环节，依托国家深海基地、崖州湾载人深潜工程实验室、骨干企业实习基地，建立长期稳定的深海工程一线实习制度，将实践经验作为学位授予的前提条件而非可选项。针对在海的深海工程科研人员，建立与深海工程研发高风险、长周期特点相匹配的评价制度，用于职称晋升评审与科研奖励。针对主导完成“卡脖子”器件国产化突破的核心技术人员，明确合理的奖励机制，以清晰的激励信号稳定攻关人才队伍。

六、结语

海底工程装备与材料技术体系是支撑海底空间认知、资源开发、信息通信、安全保障的重要基础。面向海底极端环境和长期作业需求，相关装备性能提升既依赖关键材料与核心部件的突破，也需要共性基础技术、系统集成、试验验证能力的协同支撑。需要加强材料研发、部件研制、装备集成、工程应用之间的衔接，形成需求牵引、协同攻关、验证反馈相结合的技术发展路径，推动单项技术进步向体系能力提升转化。

我国海底工程装备与材料研发取得良好进展，

但在装备工程化与系统集成、关键材料与核心部件自主保障、长期运行可靠性等方面仍存在短板，基础研究积累不足、试验验证条件不完善、跨学科人才支撑不足等因素也制约着技术成果向工程应用的转化进程。后续发展应更加重视实际工况下的性能验证和长期服役评价，将单机性能与系统协同能力、技术先进性与工程可靠性统筹考虑，通过试验数据积累和失效反馈来持续改进材料设计、装备研制、运行维护。

面向未来，以重大工程任务牵引材料、部件、装备、系统各层级贯通，围绕关键材料与紧缺核心元器件加强自主研发和工程验证，以基础研究和共性试验能力建设支撑领域创新突破。结合技术成熟度与应用需求，分阶段完善标准体系，推动智能感知、自主控制、健康管理等技术与海底工程装备融合。建立深海试验数据共享与资源统筹机制，完善共性基础技术稳定投入、跨学科人才培养与长效激励机制，为领域持续攻关提供保障。协同推进科研布局、制度建设，逐步提升我国海底工程装备与材料技术体系的自主保障能力、工程应用能力、长期运行可靠性，推动在深海工程领域由技术追赶者向重要引领者转变，为海洋强国建设提供坚实支撑。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 7, 2026; **Revised date:** June 25, 2026

Corresponding author: Jiao Weicheng is a professor from the Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology. His major research field is lightweight composites. E-mail: xiaojiao458@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project (2025-XZ-147); National Key Research and Development Program of China (2024YFB3712904); The National Natural Science Foundation of China Project (52572098)

参考文献

- [1] Guo X S, Liu X L, Stoesser T. Advances in marine engineering: Geological environment and hazards II[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(8): 1253.
- [2] Peng W S, Hou J, Guo W M, et al. Virtual-real combination evaluation method and digital twin technology exploration for deep-sea corrosion[J]. npj Materials Degradation, 2025, 9: 125.
- [3] Jin H C, Tian L M, Bing W, et al. Bioinspired marine antifouling coatings: Status, prospects, and future[J]. Progress in Materials Science, 2022, 124: 100889.
- [4] Cheng Y R, Dai Y, Zhang Y Y, et al. Status and prospects of the

- development of deep-sea polymetallic nodule-collecting technology[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5):4572.
- [5] Zhang Q, Chen X G, Luan L B, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives[J]. *Earth Energy Science*, 2025, 1(1):65-84.
 - [6] Board O S. Progress and priorities in ocean drilling: In search of earth's past and future[M]. Washington, DC: National Academies Press, 2024.
 - [7] Board O S. Forecasting the ocean: The 2025—2035 decade of ocean science[M]. Washington, DC: National Academies Press, 2025.
 - [8] Department of the Navy. Naval science and technology strategy 2024[R]. Washington, DC: Department of the Navy, 2024.
 - [9] 蔡鹏, 柳存根, 林忠钦, 等. 海洋强国目标下我国海洋装备关键基础性技术发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(5):91-103.
Cai P, Liu C G, Lin Z Q, et al. Development strategy of key basic technologies for marine equipment to enhance the marine strength of China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(5):91-103.
 - [10] Guo X Q, An Y C, Chen X H, et al. Research progress and development prospects of dynamics theory and vibration control of mining string used in oil & gas exploration for deep sea[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 342:123139.
 - [11] Liu Z H, Liu K, Chen X G, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(9):1083-1115.
 - [12] Rumson A G. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235:109214.
 - [13] Li Z, Fan L, Ma L, et al. Perspective review on factors that influence the stress corrosion of Ti alloys for deep-sea applications[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 222:228-249.
 - [14] Zhu Y M, Zhang J, Zhang Y, et al. Editorial: Design and mechanical failure of deep-sea pressure structures[J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 10:1292283.
 - [15] Yao W, Tian C, Teng Y, et al. Development of deep-sea mining and its environmental impacts: A review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2025, 12:1598584.
 - [16] Zheng X Q, Shi J F, Cao G, et al. Progress and prospects of oil and gas production engineering technology in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3):644-659.
 - [17] 高泽鹏, 李丙瑞, 窦银科, 等. 无人潜航器的发展与应用[J]. *科学*, 2026, 78(1):53-58, 69.
Gao Z P, Li B R, Dou Y K, et al. The development and prospects of unmanned underwater vehicles[J]. *Science*, 2026, 78(1):53-58, 69.
 - [18] Zhou J, Si Y L, Chen Y. A review of subsea AUV technology[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6):1119.
 - [19] Matos H, Ngwa A N, Chaudhary B, et al. Review of implosion design considerations for underwater composite pressure vessels[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(9):1468.
 - [20] Sözen A, Neşer G. A critical systematic scoping review on the applications of additive manufacturing (AM) in the marine industry[J]. *Polymers*, 2025, 17(1):4.
 - [21] Wang X H, Wang Y H, Wang P, et al. Design, analysis, and testing of Petrel acoustic autonomous underwater vehicle for marine monitoring[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(3):037115.
 - [22] Kalyoncu E G, Dahi T A. Geopolymer applications in deep-sea energy and mining infrastructure: A review of properties, challenges, and future prospects[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(12):345.
 - [23] Xu S Y, Li F, Du C C, et al. Smart material design via accelerated corrosion evaluation: Convergence of high-throughput characterization and AI-driven prediction in marine engineering[J]. *npj Materials Degradation*, 2025, 9:131.
 - [24] Xue S L. Fatigue failure analysis of high-strength steel in seawater corrosion environment[J]. *npj Materials Degradation*, 2025, 9:153.
 - [25] Cai C Y, Rong Z W, Chen Z, et al. A resident subsea docking system with a real-time communication buoy moored by an electro-optical-mechanical cable[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271:113729.
 - [26] Theocharidis T, Kavallieratou E. Underwater communication technologies: A review[J]. *Telecommunication Systems*, 2025, 88(2):54.
 - [27] Wu Y M, Zhao W J, Wang L P. State of the art and current trends on the metal corrosion and protection strategies in deep sea[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 215:192-213.
 - [28] Yan J B. Materials and structures at cold-region and Arctic low temperatures: A state-of-the-art review[J]. *Earthquake Engineering and Resilience*, 2024, 3(4):519-547.
 - [29] Hashemi S, Shiri H. The response of layered seabed to ice gouging: Sand over clay[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266:113134.
 - [30] Angelopoulos M, Overduin P P, Miesner F, et al. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31(3):442-453.
 - [31] Bhardwaj U, Teixeira A P, Soares C G. Bayesian framework for reliability prediction of subsea processing systems accounting for influencing factors uncertainty[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218:108143.
 - [32] Yan J, Zhang T Y, Guan X P, et al. Digital twin-driven swarm of autonomous underwater vehicles for marine exploration[J]. *Communications Engineering*, 2026, 5:18.
 - [33] Tani S, Ruscio F, Caiti A, et al. Visual-acoustic-based framework for online inspection of submerged structures using autonomous underwater vehicles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2026, 43(2):1152-1177.
 - [34] 曹红梅, 胡光兰, 李晓东. 国外无人潜航器能源技术发展现状与趋势研究[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2022, 5(4):361-368.
Cao H M, Hu G L, Li X D. Research on the development status and trend of foreign unmanned underwater vehicle energy technology[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2022, 5(4):361-368.
 - [35] Li Z, Li W K, Sun K, et al. Recent progress on underwater wireless communication methods and applications[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(8):1505.
 - [36] Zhuang F N, Li Y, Guo T, et al. Review on in-situ marine monitoring using physical and chemical optical fiber sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2025, 15(2):250230.
 - [37] Yamazaki T, Nakatani N, Arai R, et al. Combined mining and pulp-lifting of ferromanganese nodules and rare-earth element-rich mud around Minamitorishima Island in the Western North Pacific: A prefeasibility study[J]. *Minerals*, 2021, 11(3):310.

- [38] Toyoda K. Implications of fish bone debris for rare earth element-rich Pacific deep-sea mud[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2026, 13(3):324-325.
- [39] Kirkpatrick J D, Savage H M, Regalla C, et al. Extreme plate boundary localization promotes shallow earthquake slip at the Japan Trench[J]. *Science*, 2026, 391(6784):489-493.
- [40] Ruan D R, Chen J W, Peng X Q, et al. Development of a full ocean depth hydraulic manipulator with heavy-duty capacity[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1470361.
- [41] Zhang H W, Zhang S T, Wang Y H, et al. Subsea pipeline leak inspection by autonomous underwater vehicle[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 107: 102321.
- [42] Chen X, Fan Z H, Jia Y G, et al. In-situ environmental monitoring for deep-sea polymetallic nodule mining: Status, challenges, and future directions[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2026, 36(5): 1041-1059.
- [43] Wang C, Zhou S Y, Shu X J, et al. Deep-sea mining: A potential solution to secure critical energy minerals availability[J]. *npj Ocean Sustainability*, 2025, 4: 59.
- [44] Wang C, Shu X J, Zhou S Y, et al. Embracing a new era of deep-sea mining: Research progress and prospects[J]. *Marine Policy*, 2025, 180: 106778.
- [45] International Seabed Authority. Status of contracts for exploration in the area[EB/OL]. [2026-06-15]. https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2024/06/ISA_Secretary_General_Annual_Report_2024_Chapter5.pdf.
- [46] Stewart E C D, Wiklund H, Neal L, et al. Impacts of an industrial deep-sea mining trial on macrofaunal biodiversity[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2026, 10(2):318-329.
- [47] Lu X C, Li S J, Wang X, et al. Superior toughness—strength epoxy via biocomposite curing for deep-sea equipment using multifunctional syntactic foams[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(19): 13296-13309.
- [48] Kareem S A, Anaele J U, Aikolola E O, et al. Aluminium matrix composites reinforced with high entropy alloys: A comprehensive review on interfacial reactions, mechanical, corrosion, and tribological characteristics[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 8161-8186.
- [49] Guo F J, He Z C, Liu L, et al. High-strength and corrosion-resistant Al_2O_3 ceramics with excellent closed-cell structure[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(22): 33160-33166.
- [50] Lüth A, Keles D. Risks, strategies, and benefits of offshore energy hubs: A literature-based survey[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203: 114761.
- [51] Chowdhury M I, Phung Q V, Ahmed I, et al. Next-generation underwater localization: Artificial intelligence-based and energy-aware approaches[J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 165: 104842.
- [52] Long J W, Zhao J H, Zhao X, et al. Underwater terrain matching method based on multibeam bathymetric point cloud descriptors[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2434655.
- [53] Das S, Malik P K, Pandey A. Challenges and advances in underwater sonar systems and AI-driven signal processing for modern naval operations: A systematic review[J]. *Journal of Field Robotics*, 2026, 43(2): 899-931.
- [54] Shi H T, Song Z L, Bai X T, et al. Attention mechanism-based multisensor data fusion neural network for fault diagnosis of autonomous underwater vehicles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(7): 2401-2412.
- [55] Gao S, Wang Y, Zhang Z Y, et al. Hybrid fault diagnosis method for underwater thrusters based on the common features of multi-source signals[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 222: 111740.
- [56] 陈连增, 雷波. 中国海洋科学技术发展 70 年[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 3-22.
Chen L Z, Lei B. Marine science and technology development over the past 70 years in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(10): 3-22.
- [57] 宋德勇, 刘浩, 杨申申. 极地环境载人潜水器发展关键技术分析[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(3): 54-57.
Song D Y, Liu H, Yang S S. Analysis of key technologies for development of manned submersible in polar environment[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(3): 54-57.
- [58] 熊亮, 李星辰, 谢文卫, 等. 我国深海科学钻探技术研究成果及进展[J]. *中国地质调查*, 2025, 12(1): 29-39.
Xiong L, Li X C, Xie W W, et al. Achievements and progress of deep-sea scientific drilling technology research in China[J]. *Geological Survey of China*, 2025, 12(1): 29-39.
- [59] 王华, 赵坦, 陈妍. 载人深潜器耐压壳体用金属材料研发进展[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(3): 88-95.
Wang H, Zhao T, Chen Y. Research and development progress of metal materials for manned submersible pressure hulls[J]. *Development and Application of Materials*, 2023, 38(3): 88-95.
- [60] 陈曦, 李志雨, 张新, 等. 基于西太平洋矿区深海多金属结核开采海试的环境监测程序研究[J]. *船舶*, 2025, 36(4): 100-110.
Chen X, Li Z Y, Zhang X, et al. On environmental monitoring procedures based on deep-sea polymetallic nodule mining trials in Western Pacific mining region[J]. *Ship & Boat*, 2025, 36(4): 100-110.
- [61] Zhao Y H, Li N, Xie K Y, et al. Manufacturing of lithium battery toward deep-sea environment[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7(2): 022009.
- [62] Liu J H, Zhou M, Jin K, et al. Beyond metal–air battery, emerging aqueous metal–hydrogen peroxide batteries with improved performance[J]. *Battery Energy*, 2024, 3(2): 20230049.
- [63] 修心岩, 刘洋, 谢俊恩, 等. 水面与水下燃料电池能源系统研究进展及展望[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2026, 47(2): 299-316.
Xiu X Y, Liu Y, Xie J E, et al. Research progress and prospect of fuel cell energy systems for marine and underwater applications[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2026, 47(2): 299-316.
- [64] Camoin G, Eguchi N, Group T I P. The international ocean drilling programme (IODP3)[J]. *Scientific Drilling*, 2024, 33(1): 89-92.
- [65] Lucchi R G, St John K E K, Ronge T A, et al. Proceedings of the international ocean discovery program, volume 403: Eastern framer strait paleo-archive[EB/OL]. [2026-06-15]. <https://publications.iodp.org/proceedings/403/403.PDF>.
- [66] 冉崑, 张涛. 近十年大洋科学钻探进展与未来重点发展方向[J]. *中国地质*, 2024, 51(3): 1091-1094.
Ran H, Zhang T. Progress of scientific ocean drilling over last decade and future priorities[J]. *Geology in China*, 2024, 51(3): 1091-1094.