

深海科学实验装备发展研究

梁健臻¹, 冯景春^{1,2*}, 张卉¹, 张偲^{2,3}

(1. 广东工业大学生态环境与资源学院, 广州 510006; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要: 深海孕育了世界上最大的生态系统, 对深海相关演变规律的深刻认知将支撑人类社会的可持续发展; 深海极端环境条件决定了开展原位实验作业非常困难, 也对深海科学实验装备提出了苛刻的要求。本文从深海科学实验研究的视角出发, 按照深海试验装备及试验场、深海原位探测与实验装备、深海环境模拟实验装备的主要划分, 系统梳理了国内外深海科学实验装备的发展态势和面临的问题。我国在深海科学实验装备领域已形成了一批自主研发的装备技术, 推动了深海科学研究进步, 部分优势方向已跻身国际先进水平; 但在高精尖装备及其关键核心技术方面未能构建成熟的产业链, 导致部分装备发展受限、一些技术薄弱环节凸显。需要加强顶层谋划、协调技术攻关, 建立激励机制、推动创新转化, 建设示范平台、形成标准体系, 突破传感技术、加快国产进程, 加强国际合作、提升创新能力, 以深海科学实验装备高质量发展推动深海科学研究和海洋强国建设。

关键词: 深海; 科学实验装备; 原位实验; 原位观测; 环境模拟; 深海试验场
中图分类号: P76 **文献标识码:** A

Advances in Deep-Sea Scientific Experiment Equipment

Liang Jianzhen¹, Feng Jingchun^{1,2*}, Zhang Hui¹, Zhang Si^{2,3}

(1. School of Ecology, Environmental, and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;
3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: The deep sea fuels the world's largest ecosystem, and a deep knowledge of its relevant evolutionary patterns can support the sustainable development of human society. It is difficult to carry out *in-situ* experiments under the extreme environmental conditions in the deep sea, which puts forward harsh requirements for the development of deep-sea scientific experiment equipment. This study summarizes the development status and problems regarding deep-sea scientific experiment equipment in China and abroad from the aspects of deep-sea test equipment and test sites, deep-sea *in-situ* exploration and experiment equipment, and experimental equipment for deep-sea environment simulation. China has independently developed a serial of equipment and technologies in the field of deep-sea scientific experiment equipment, and some of its advantageous directions have reached the international advanced level, which has promoted the progress of deep-sea scientific research. However, the country fails to build a mature industrial chain in

收稿日期: 2024-02-14; 修回日期: 2024-04-03

通讯作者: *冯景春, 广东工业大学生态环境与资源学院教授, 研究方向为深海天然气水合物开采及环境生态效应、深海新型污染物迁移转化、深海环境新型探测与模拟装备、可持续能源战略规划等; E-mail: fengjc@gdut.edu.cn

资助项目: 广东省六大产业专项(GDNRC[2023]30); 中国工程院咨询项目“深海装备技术体系及发展战略研究”(2023-XZ-06); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML20190609, GML20230921)

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

terms of sophisticated equipment and associated key technologies, resulting in the restricted development of some equipment and prominent technological weaknesses. Therefore, we propose the following suggestions to promote deep-sea scientific research and the high-quality development of the deep-sea scientific experiment equipment: (1) strengthening top-level planning to coordinate technical research; (2) establishing incentive mechanisms to encourage innovation transformation; (3) building demonstration platforms and forming a standards system; (4) developing sensing technologies and accelerating the localization process; and (5) strengthening international cooperation to enhance innovation capacities.

Keywords: deep sea; scientific experiment equipment; *in-situ* experiment; *in-situ* observation; environmental simulation; deep-sea test site

一、前言

深海孕育了世界上最大的生态系统，蕴藏着最大的生物群落、最多的地球深部能源资源，具有突出的生态服务功能与科学价值。认识深海物质能量循环过程是理解和应对全球气候变化的重要途径，对支撑人类社会可持续发展意义重大。目前，人类对深海的认知远远不足，甚至存在诸多盲区。在我国，加快建设海洋强国已成为重大战略，重要前提之一即具备高竞争力的海洋前沿科学认知和尖端技术储备。深海科学实验研究是实现这一前提的重要依托，也是对我国深远海战略空间拓展与能源资源开发的重要支撑，开展深海原位科学实验亟需先进的装备技术。

深海科学实验装备在应用需求上可划分为深海试验装备、深海原位探测与实验装备和深海环境模拟实验装备等，具有在深海极端环境下开展装置试验、原位观测、取样分析、培育实验以及在实验室内开展模拟实验研究等功能特性。解密海洋物质能量循环、地球多圈层相互作用、生命起源及演化机制等重大基础科学问题，需要研发高精尖的科学实验装备^[1]。深海高压、高温/低温、强腐蚀等极端环境条件，导致先进的科学实验装备在深海领域中难以应用，需要发展深海极端环境专用的科学实验装备。

在深海生态系统与极端生命过程谜团揭秘的巨大需求牵引下，深海科学实验装备技术逐渐被重视并取得了长足进步，使得深海科学领域的新突破和新发现不断涌现，并迈入新的“黄金时代”^[2]。目前，国际上仍然是欧美国家、日本等海洋强国在深海科学实验装备领域领先。我国在该领域起步晚，但历经多年的艰辛探索，近年来也取得了重大突破，部分装备已达到国际“领跑”水平。从装备体系来看，我国在深海科学实验大型装备集成方面较为成熟，但在关键部件层面仍存在“卡脖子”环

节。当前，国际局势复杂多变，我国亟需提升自主创新能力，攻克一批关键核心技术，尽快实现深海科学实验装备自主可控。

当前，我国深海科学实验装备正在迈进新发展阶段，因而把握深海资源开发、环境保护等领域装备的发展重点方向，建立深海科学实验装备体系成为亟待研究的重要课题。为此，本文围绕深海科学实验装备，分析国内外发展态势、凝练我国相关发展面临的问题、构思未来发展重点任务，以期对深海科学研究和海洋强国建设提供装备发展方面的参考。

二、世界深海科学实验装备的发展态势

深海特殊的环境为深海科学研究提供了天然的实验场所，为了解决深海重大科学问题，需要利用深海科学实验专用装备进入、探测、研究深海的特殊环境。然而，深海科学实验装备在深海环境面临极端作业条件等苛刻的技术挑战，因此，在深海科学实验研究过程中，首先需要研制深海科学实验装备，经过海试和可靠性验证后，在深海极端条件下开展原位及深海环境模拟实验，从而提升对深海科学规律的认知（见图1）。从全球发展态势来看，深海科学实验研究主要遵循此流程，利用创新装备技术以解决新引发的科学问题，展现出螺旋发展的态势，不断推动深海科学前沿的发展和解决重大的基础问题。世界深海科学实验装备正处于谱系化发展阶段，基于装备功能及应用范围，主要包括深海试验装备及试验场、深海原位探测与实验装备、深海环境模拟实验装备。

（一）深海试验装备及试验场

深海试验装备是有效开展深海科学试验、与相关尖端科学技术进行海试验证的重要工具。随着人类参与深海活动的不断深入，水下作业、科学实

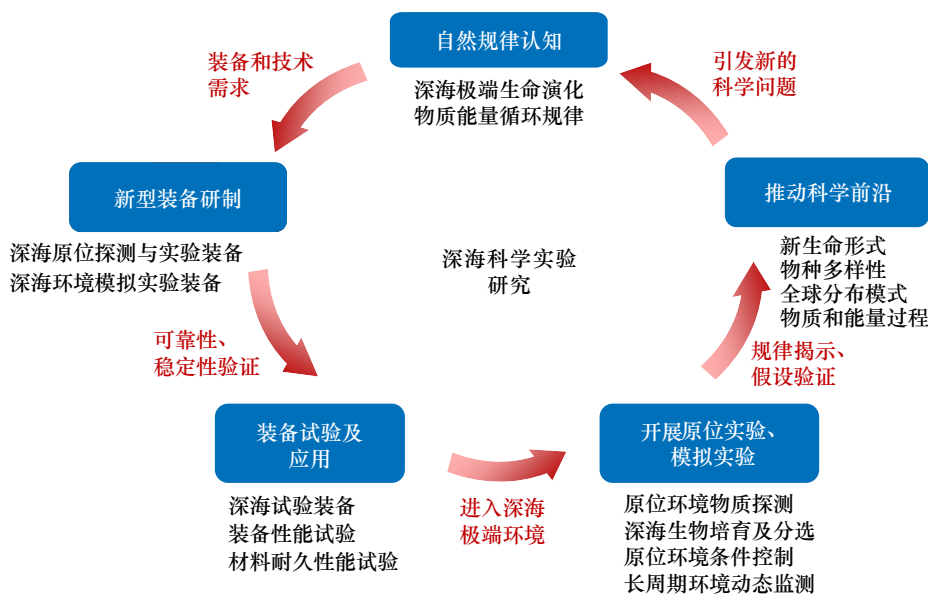


图1 深海科学实验研究流程图

验、原位探测、资源开发等各项深海活动对载人实验专用装备的功能性及稳定性提出了新的挑战，亟需对深海装备性能、深海材料耐久性能等进行测试。当前，国际上已研制的深海试验装备主要包含深海声学试验、材料深海环境适应性试验和深海试验能源与信息保障等各类系统，欧美等国家在相关领域起步较早，并且已建成了深海试验场等综合性试验装备。

1. 深海声学试验系统

深海底层的声学参数是研究海洋声场环境的基础数据，其声学特性是分析海底声波传播损失、构建地声模型不可缺少的研究内容。在地声测试方面，国外的浅地层剖面探测技术相当成熟，尤其是SES2000和Parasound P等浅地层剖面仪，可获取海底沉积层的精细分层信息^[3]。在深海装备静态水声测试方面，以美国东南阿拉斯加的水声静态试验系统最为典型，整体构造为长方形基阵，由测试平台、延长系泊设施以及多组水听器组成，通过水下锚固装置固定。以美国大西洋水下测试与评估中心的新型固定式STAFAC水声测量系统为代表^[4]，动态水声测试在1300 m水深处开展并以大型水下直线阵型进行布设，核心测量装置为大型双圆锥框架式水听器阵列，系统配制了水下导航及通信等多个模块，可与海底网络进行辅助连接，为深海潜水器等科研装备提供水下实时通信和导航的测试。国际

上的深海声学测试系统已发展较为成熟，水声测试范围和地声测试深度是系统性能突破的关键。

2. 材料深海环境适应性试验系统

材料是所有深海装备研制和安全服役的基础。材料在深海环境下的服役性能数据是深海装备设计选材的重要依据，而深海环境适应性试验是获取钢铁、钛合金等金属材料在深海服役性能数据的唯一途径。美国在20世纪60年代就开始进行深海环境适应性试验，以部署在太平洋海底的深海坐底式试验装置为典型^[5]，进行了系统的、范围广泛的材料环境适应性试验，评估了各种深海装备结构相关材料、结构件在深海环境中的服役性能等。深海装备材料环境效应数据的原位监测和评估是该系统的技术难点，主要为量化装备的耐腐蚀性和耐压性等方面。

3. 深海试验能源与信息保障系统

各类深海装备试验的开展离不开可靠的能源及信息等条件保障，以确保各类试验工作安全、有效进行。美国蒙特雷加速研究系统的“科学节点”是最具代表性的深海试验能源及信息保障装备，在海底部署时装配于钛合金压力舱内并通过耐高压的光电复合缆线与岸站进行连接，电源转换模块可转换电压以供试验仪器或装备长期运行，内部的多个科学接口为观测或试验的仪器建立与岸基的通信连接，高速的数据传输带宽可使研究人员实时获取高

画质的数字视频数据并基于互联网进行远程控制。为支撑多种原位科学仪器的高效运行,仍需突破深海试验保障系统的能源密度、输出功率以及水下信息传输效率。

4. 深海试验场

试验保障能力的提升,促进海上试验场向深远海方向发展,同时为各类深海仪器和装置提供长期试验的实海环境条件。国外典型的试验场有美国蒙特雷湾海上试验场、加拿大海洋技术试验场、欧洲海洋能源中心波浪能试验场等。美国蒙特雷湾海上试验场最具代表性^[6],主要有蒙特雷海洋观测系统、蒙特雷加速研究系统、自主海洋采样网、陆地/海洋生物地球化学观测、海洋多学科获取系统等,可用于海洋装备的试验、观测和采样方法研究以及海洋科学现场观测和研究。近年来,多个研究机构在蒙特雷湾海上试验场开展了多种海洋科学观测和试验研究,为海洋地球生物化学过程研究和海洋观测技术发展提供了试验场所和大量观测数据支撑。此外,试验场还可作为推进海洋技术发展计划的重要内容,其目的是建设海底工程实验室,帮助研究人员开展科学仪器原型设计、海洋技术开发和系统工程。因此,深海试验场已成为针对各类深海装备服役性能进行综合性、科学性试验和验证的重要平台,平台建设仍需要向大深度、强海流、复杂地形的深远海区域发展。

总的来说,深海试验装备的科学试验服务功能逐渐向多功能、多工况、高精度、综合性、持久性和自适应性的方向发展。未来,深海试验场的建设将不断向深远海方向发展,通过在更复杂的原位条件下长期试验和完善各类深海装备,全方位优化深海装备的环境适应能力和水下性能表现,从而促进复杂功能需求下的深海装备体系产业化进程。

(二) 深海原位探测与实验装备

深海原位探测与实验装备是基于实验室中的生物、化学和环境等检测和实验的基础方法学并通过特殊的材料和封装工艺所研制的深海装备,通过原位实验平台搭载的特定装置进入深海海底并基于研究目的控制实验条件,从而进行深海环境物质转化、生物富集培养及生物反应过程等实验研究。

1. 深海海底实验室

深海海底实验室是科学家在深海海底开展长周

期原位实验的重要装备,是一种装配有各类科学实验仪器的海底大型载人潜艇。基于海底实验室,科学家可以在原位环境中驻留20天左右并开展现场取样、实验、观测和分析,以探究长周期的环境变化、群落动态和生态系统演化等规律^[1]。20世纪70年代,美国研制的“NR-1号”是世界首艘科研工程核潜艇^[7],水下排水量为400 t、下潜深度为914 m、最大载员6人、最长驻留时间为15~20天,同时搭载机械手用于海洋研究、海底设施安装等任务。“NR-1号”于2008年退役后,美国又提出了潜深为914~1524 m、排水量为828~2062 t的3种“NR-2”深海移动式工作平台方案,最后完成了海洋生物学、海洋地质学、地球物理学、环境科学等广泛的科研任务。然而,此类装备的建造体量、人员安全、能源保障、实验装置耐受性等要求较高,目前仅有较少国家能够自主研制。

2. 深海原位环境探测系统

深海环境的取样和检测是深海科学实验研究的基础条件。新型的原位传感器能够在无偏差的情况下精确测量孔隙水剖面,特别是需要快速检测的如 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 和营养盐等环境指标。法国研发的非接触式和浸没式采样的深海拉曼光谱仪,可在不受干扰的情况下检测深海极端环境中的物质浓度变化^[8]。利用水下声呐技术可以探测深海地形的具体特征,获取如海山、洋壳、海沟等特殊环境的地形图资料。挪威地质调查局利用自主潜水器(AUV)搭载的高分辨率声呐绘制了深海冷泉区的声学图像,识别了甲烷渗漏的气泡羽流以及生境特征^[9]。相比于大范围的地形扫描,清晰详细的生境信息则需要依靠水下成像技术来呈现。诱饵观测系统已被广泛用于深海生境动物群观测,有效载荷通常包括装配有环境传感器的视频摄像机,在视频录制的同时记录温度、盐度、压力和水流等环境参数。美国研发的基于自主底栖着陆器平台的诱饵摄像系统^[10],可对深海宏生物物种形态特征及丰度进行视频观测,该系统强大的水下续航能力是长周期观测的关键。水下光学和声学观测技术相比其他方法具有无干扰下收集更多深海群落生境信息的优点,有助于提高调查受气候变化和人类活动影响的深海水柱和栖息地的能力。因此,深海原位环境探测系统的特点在于快速、准确、自动地探测深海生境,然而由于高压、快速变化的作业环境,传感器探头等

装备的关键部件在水下环境中的适配和应用是其研发技术的难点。

3. 深海原位生物定植系统

深海生物原位定植培养系统可通过深海着陆器长期布放于海底,在沉积物表面进行原位微生物富集培养,并实现无污染样品采集和近底水体环境参数记录。2011年,比利时科研人员^[11]通过水下缆控潜水器(ROV)的机械臂将定植实验装置部署于海底并开展同位素¹³C标记的原位培育实验,用于分析浮游生物在定植和摄取方面的生物反应,并揭示底栖生物群小规模迁移机制及时空异质性。2015年,法国科研人员^[12]利用深海生物定植装置并结合木材等基质开展原位实验和长期观测,用于揭示深海生物定植过程及其群落动态,探究外来基质与化学合成微生物的相互关系。2022年,日本研制出新型原位微生物培养装置^[13],可在预设程序的不同培育时间内自主采集海水样品并定向培育水体微生物,还可注入底物以及固定样品。可以看出,深海生物原位定植系统是观测群落演替过程的重要手段,其研发难点在于实现原位微生物自动培育以及环境参数的自动监测,并以微生物定量、基质补充、环境实时监测、同位素追踪为发展趋势。

4. 深海原位样品处理系统

在深海特有基因和生命过程的研究中,具备原位样品处理的基因检测系统是识别微生物的短周期节律性过程的新途径。美国蒙特利湾水族馆研究所的海洋学家^[14]研发了深海4000米级环境样品处理器(D-ESP),它是一种集成微生物富集、过滤、裂解和核酸纯化过程的原位基因芯片检测装置,可进行深海功能基因的定量聚合酶链式反应(PCR)扩增实验,可对目标基因的表达量和特定菌群的丰度进行实时检测。此外,该系统还通过系统集成的深海质谱仪对原位过滤后的海水物质进行检测,并且可以接入蒙特利湾海底观测网络。在生物样品失踪标记和活性测定等原位样品处理方面,美国研制了一种可在潜水器搭载的微生物采样与培养一体化系统(MS-SID)^[15],可在原位海水原生生物培养过程中进行荧光示踪剂注入、微生物采样和处理等一体化操作,通过原位样品处理测量微生物群落的高活性和系统生产力,加深了对深海微生物食物网过程的认识。深海原位微生物活动过程的发现极大地促进了科学家对深海原位观测的重视,深海原位样品处

理系统是高保真获取原位基因信息的新兴手段,然而该装备在自动化控制、保压样品处理、原位基因芯片、无菌环境保障等方面研发难度大,仅有少数国家能实现自主研制。

从研究需求出发,国际上深海原位探测与实验装备愈加注重原位环境的长周期、精准、实时观测,通过多学科监测手段获取长时间序列的生态系统动态信息。未来将开发具备极端动态环境长时间适应、复杂海底地形有效部署、多介质环境综合观测、环境参数自主感知、智能精准控制、低功耗和长续航等特点的深海原位探测与实验装备,以期实现深海环境全方位精确探测以及原位科学实验,获取详细的深海环境动态信息,从而解决重大的深海科学问题。

(三) 深海环境模拟实验装备

随着装备进入深海和原位实验的能力不断增强,人类深海探索的区域逐渐扩大,并不断向全海深延伸。然而,由于进入特殊极端环境的机会有限,以及巨大的成本和安全风险,不可能在深海极端环境中开展所有实验研究;同时,通过科考船航次获得用于实验分析的样本数量有限,深海生物离开原有的高压、低温/高温环境时,其活性很容易受到影响,因此,在实验室模拟深海原位环境条件是开展深海环境物质转化、生物代谢反应等实验研究的一种有效而经济的方法。当前,深海环境模拟实验装备主要包含封闭体系的高压生物培养系统以及开放体系的连续式高压生物反应系统等。

1. 深海高压生物培养系统

在深海环境模拟实验系统中,通过调节温度和静水压力的变化,可以模拟从表层海洋到深海底的各种环境。高压生物反应系统可基于压力容器、控温装置以及物质观测工具来评估深海微生物群落演变对不同环境的响应机制。然而,深海原位微生物样本的可获得性和可行性限制了实验水平,科学家正在探索新型的装备手段以获取丰度和纯度更高的深海难培养微生物^[16]。现有深海环境模拟实验系统主要侧重于高温高压和低温高压的生物反应器,以模拟深海热液和冷泉等极端复杂环境。2002年,美国研制的高压生物反应器^[17]被应用于研究减压对深海极端微生物结构的影响,通过压力环境的调节,揭示了深海微生物生长及其内核对压力反应的有限

性。2018年,美国研发了一种高压培养装置^[18],可在常压或原位压力条件下开展培养实验,成功富集嗜压的化学有机营养菌和确定其代谢过程,研究强调了静水压力对嗜压性微生物富集及分离的重要性。2022年,美国开发出了基于高压容器和温控系统的高压分批培养系统^[19],该系统无需在采样期间进行样品减压和再加压的流程,探究了该流程对微生物生长速率、细胞产量和压力耐受性的影响,研究揭示了反复减压会对细胞活力产生显著的负面影响。此外,由于深海高压环境中底物供应有限,微生物生长非常缓慢,因此深海模拟生物培养系统正在向大容量、高传质、高保真、在线式等技术难点方向进行突破,以有效提升深海微生物的富集效率。

2. 连续式高压生物反应系统

深海连续式高压反应系统已被用于研究与深海特殊环境条件相关的微生物活性及地球化学过程。2007年,美国科研人员^[20]利用研制的连续式生物反应系统成功富集了热液环境中的嗜热微生物,并进行长时间序列的流体化学变化监测,以探究矿物流体反应和代谢过程之间的相互作用。2015年,瑞士研制了一种深海模拟生物反应器^[21],来开展原位环境样本培育实验,获得了代表性低的微生物种群,并研究了深海环境中具有生物多样性驱动力的微生物-矿物-流体相互作用。连续式高压反应系统还可以模拟强耦合流动和地质力学的环境过程及研究天然气水合物的矿床。2022年,美国开发了一套耦合流动-地质力学模拟系统^[22],具备流体控制、压力控制、温度控制和数据采集等功能,该系统采用过量水法进行三维测试,相比一维的实验,其具备更强的耦合流动和地质力学过程观察能力。因此,连续式高压反应系统可以模拟更真实的深海环境过程,实现多类型地质过程模拟以及生物、环境指标在线监测将是未来该类模拟装备需要攻克的方向。

总的来说,国际深海环境模拟实验装备发展趋势主要是朝着温度和压力控制精准性、连续流动性、监测灵敏度以及地质耦合模拟等方向发展。研发自动化、系统化、多层次、综合化、高压稳定性、自主感知环境参数的深海大型生态系统模拟装备,结合多要素培育与长周期监测,在实验室原位重塑深海生态系统,将为科学家理解深海生态系统演化过程及生物适应策略提供新方向。

三、我国深海科学实验装备的发展现状

(一) 深海试验装备及试验场

我国应用于深海科学试验的装备研发起步较晚,在试验装备的先进程度以及试验技术与分析方法方面都与国外发达国家有着较大差距,尤其是可提供综合性试验服务的试验场建设仍然空白,这阻碍了我国深海科学实验装备及相关设备的研发与产业化应用。

1. 深海声学试验系统

在深海水声定位方面,深海高精度水声综合定位系统集成超短基线、长基线于一体,为大范围、长航程的深海潜水器提供高精度定位服务,定位精度优于1 m,最大工作距离为8000 m,作业深度为7000 m。该系统于2017年为中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”南海综合考查航次提供了高精度定位保障,作业深度达1200 m,动态定位精度优于0.5 m。深海装备的水声测试可为海底底质声学分类、海底声学环境评价、声学调查等提供基础资料。

2. 材料深海环境适应性试验系统

深海装备研发对材料深海环境适应性试验和相关基础数据也提出了广泛和迫切的需求。我国在深海空间站等大型装备建设中明确提出,需要开展高强度钢、钛合金等异种材料构件的电偶腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等深海测试^[23]。目前,中国船舶集团有限公司第七二五研究所自主研发了悬浮式深海试验装置和试验方法,该装置主要通过浮力材料和重力锚将试验系统框架悬浮于靠近海底的水域,减少了海底泥沙对装备测试的影响。该装置先后在南海3000 m水深海域内开展了多批次、多深度的材料环境适应性试验研究,为我国海洋重大工程提供了环境适应性测试评价和设计选材等基础数据。此外,中国科学院海洋研究所也利用研制的坐底式试验装备开展研究。然而,由于深海环境适应性原位测试设备缺乏以及深海电源供应有限等问题,目前国内深海试验装置均未搭载原位测试系统,仅对回收试件进行实验室测试分析,缺乏原位环境下的实时服役参数信息,因此亟需研发具备深海环境参数及环境效应数据原位采集的材料深海原位试验装置。

3. 深海试验场

固定式海上试验场是海洋观测、监测仪器和调查设备研发、海洋科学研究以及高新科技成果转化的重要试验平台，对海洋科技和海洋产业的发展具有明显的促进作用。中国船舶重工集团公司第七六〇研究所试验场是国内建成较早、测试技术相对成熟的固定式海上试验场，是我国独具特色的舰船目标特征信息中心。该试验场主要提供海区声学、电磁、海流等各项科研测试以及环境辅助试验数据信息的获取与处理等服务。中国科学院声学研究所的固定式海上试验场主要从事海洋声学、水声工程等方面的研发工作，该试验场所在的南海陵水海域由浅到深过渡并且海底环境多样，具备对深远海长期立体观测、环境信息获取、传输及资源共享的能力，可形成国家级海洋技术与系统试验基地。我国成熟的固定式海上试验场大多处于浅海海域，且建设规模较小、设备和功能相对单一，缺乏业务化的运行能力。目前，我国深海装备的海试仍是由保障支持母船搭载至指定深度海域开展短期试验为主，亟需研发服务于科学研究及技术装备试验的固定式深海试验场。

总的来说，我国深海试验装备仍在追赶国际发展步伐，如材料深海环境适应性试验系统等装备仍

需补齐短板和完善配套装备，以期实现破解深海装备交付应用“最后一公里”瓶颈难题，使试验能力达到国际上同类型深海试验装备的领先水平。我国深海试验装备将重点在深海声学、深海作业、深海装备材料与构件的环境效应考核以及深海试验保障等五大深海试验需求方向上深入发展。我国需重点建设服务深海装备长周期实海试验的固定式试验场，将其打造成为我国海洋技术体系中科技创新和社会服务的重要基地。

(二) 深海原位探测与实验装备

深海原位探测与实验装备是获取我国南海甚至全球海域基础环境信息的重要手段。我国与世界海洋强国在该领域的起步差距较大（见图2），在经历多年艰辛探索才实现了从“跟跑”到“并跑”的跨越，由最初的依赖国外，发展到现在能够自主建造深海潜水器等原位综合实验平台以及规划建设深海海底实验室。

1. 深海海底实验室

依靠海底实验室，科学家亲临海底原位环境，利用深海海底天然的环境特性展开科学研究。目前，国内仍未建造出专门用于深海生态系统过程研究的海底实验室，对于该研究需求仅借助载人潜水

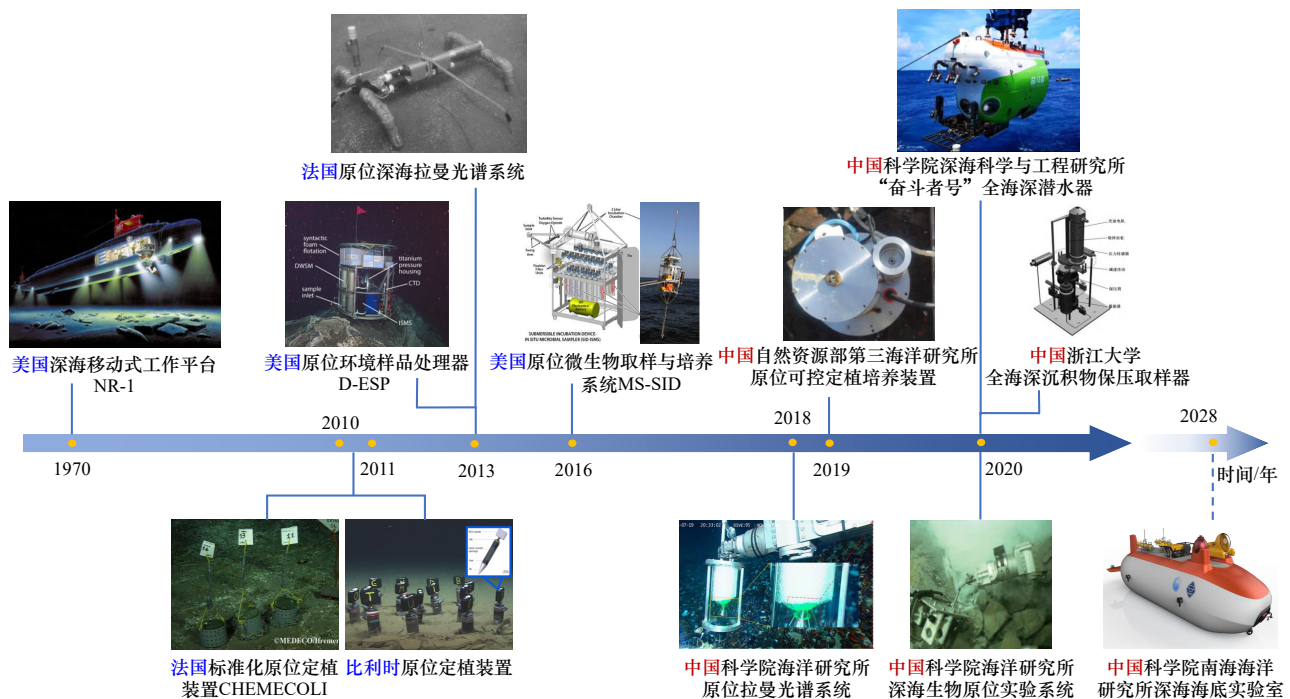


图2 深海原位探测与实验装备的发展历程

器的多次下潜和短期作业来完成。国家发展和改革委员会批复了本研究团队承担的重大科技基础设施“冷泉生态系统研究装置”的可行性建设规划，其中提出建设可长期驻留并观测冷泉生态系统过程的海底实验室（见图3）。根据总体设计方案，这套海底实验室最大工作水深为3000 m，内部分为4个主要功能舱室，可携带6名人员（包括3位科学家和3位操作员）。深海冷泉海底实验室的建造将为深海冷泉生态、生物和地球化学等方面的科学研究提供重要的装备与平台支撑。

2. 深海原位综合实验平台

深海载人潜水器是科学家在深海原位环境开展综合科学实验的重要平台，可搭载多种原位探测、样品采集和处理装置进行原位作业，也可开展多学科综合实验研究。深海原位综合实验平台具备更多的实际应用优势，可利用推进器及操作系统实现宽广的作业范围；搭载多序列的取样装置和配备灵活操作的机械手，可实现在深海底定点进行大量采样、实验装置布放与回收；通过观察窗可实现对真实的深海环境动态和特殊的海底地质特征进行近距离观察；搭载地质化学探测设备，可实现对深海未知区域进行精细探测^[24]。我国先后开展了“蛟龙号”“深海勇士号”“奋斗者号”载人潜水器的研制，载人深潜技术逐步达到了世界一流水平。2020年，“奋斗者号”核心部件的国产化率达到了96.5%，具备了全海深进入、科考和作业的能力。然而，相比其他海洋强国的潜水器，在功能应用等方面仍有较大差距，主要表现为控制系统自动化程度不高、搭载原位精细探测传感器较少、视觉成像分辨率和传输速率不高、搭载设备兼容性较低、多潜水器联合作业配套设施不全等^[25]。



图3 深海海底实验室概念图

3. 深海原位环境探测系统

当前，我国开展深海环境探测实验主要通过测量、采集、抓取、泵吸等方式实现海水和沉积物等深海环境样品的取样和检测，其中样品保真和精确测量是装备研发的重点和难点^[26]。在原位观测方面，水下传感器是对深海生态系统环境参数及物质成分实时观测分析的有效工具。2020年，中国科学院研究团队^[27]自主研发的深海激光拉曼光谱原位探测系统（RiP）最具代表性，可在深海热液区对喷口流体进行原位检测，发现了自然超临界二氧化碳，这是我国在全球范围内的首次发现。中国海洋大学团队^[28]研制了国内首套深海自容式激光拉曼光谱原位探测系统（DOCARS），在国际上首次获取了水下4000 m深度样品的双波长激发的深海原位拉曼光谱，实现了系统对海水中常见酸根离子的定量探测能力。中国地质调查局研究团队^[29]研制了4000米级坐底式潜标观测系统，搭载了甲烷、二氧化碳、温盐深、溶解氧、浊度计、透射计、声学多普勒剖面仪以及定点海流计等多种传感器，长期监测能力在180天以上，覆盖整个水合物开采周期以观测海底甲烷泄漏的环境变化过程。自然资源部第一海洋研究所于2021年利用自主开发的自由投放式声学多普勒海流剖面观测系统（FADCP）在南海西沙海域1400 m深度处开展原位观测实验，获得了16个站点的海流及温盐深仪（CTD）等断面环境信息^[30]。深海原位观测装备可以实时有效识别深海环境的理化因子等生境信息，然而深海环境条件苛刻，这类观测设备的精密探头往往开发难度大，目前正朝着紧凑、智能和精确的方向发展。

深海环境中的物理化学特性及形态演化过程研究同样也需要进行原位观测实验。为探究水合物在深海埋藏条件下的动态生成与解离过程，中国科学院海洋研究所团队^[31]研制的深海环境过程观测系统最具代表性，该团队通过“发现号”ROV在我国南海冷泉部署该系统并开展观测实验，在国际上首次获取了冷泉喷口附近水合物动态生成与分解的视频资料。该系统通过耦合深海原位拉曼系统，可以现场测量原位水合物的笼型、饱和度等原位理化特性，发现了冷泉流体中矿物颗粒在水合物快速形成中的关键作用。深海环境过程观测系统是未来原位综合环境调查的有力工具，仍需要加强长期稳定性、测量精确性、系统耦合协同性等方面的研究。

用于原位环境参数监测分析的传感器系统是深海科学实验装备的关键核心部件。从我国海洋传感器相关技术发展来看,虽然海洋传感器技术在2010年后得到快速发展,但其整体数量偏少(见图4)。海洋传感器技术涵盖声学海洋传感器、海洋光纤传感器、海洋电磁传感器、海洋光谱传感器等。其中,我国在声学海洋传感器和海洋光纤传感器技术方面具有较大进步,这得益于我国海洋观测组网建设重大工程的推动^[6]。我国在海洋电磁传感器、海洋光谱类传感器等更加精密的科学仪器方面,表现出明显的短板,这类传感器大多仍依赖于进口。因此,高端原位传感系统及其精密的传感器核心部件是我国深海科学实验装备的重点研发方向。

4. 深海原位保真取样系统

由于缺乏深海环境实时检测和在线分析等原位探测装备,研究人员通常采用深海环境取样装备以获取深海原位样品并用于后续的实验室分析调查。科学家发现在深海环境取样转移过程中压力下降和温度升高对样品的物理化学性质及微生物活性容易产生影响。对基于原位获得的核酸进行组学研究,发现相对于使用Niskin采样瓶的常规取样方式,保压取样器可以最大程度地还原深海原位的微生物群落结构和基因表达活性^[32]。因此,深海取样装置不仅需要实现样品保压和保温的功能,还要对采样器内的样品进行动态监测,以维持样品的高保真度。2020年,青岛科技大学研究团队^[33]研制出一套高保真取样、回收及转移的一体化取样器,可搭载于潜水器且可作业于5000 m水深,实现了样品的保温、保压及动态监测。为了实现全海深沉积物的保压取

样,浙江大学研究团队^[34]研发了基于海底着陆器的自密封式全海深沉积物保压取样系统,在2021年大洋科考航次中,该取样器搭载“奋斗者号”潜水器在马里亚纳海沟进行了原位测试与保压取样,获取了保压率超过80%、体积超过700 mL的保压沉积物样品。在生物保真取样方面,2022年,中国船舶科学研究中心研究团队^[35]研制了深海生物原位保温、保压装置,可通过舱外充油半导体制冷进行主动控温以及高压气瓶补压方式来实现装置的原位压力维持,并且验证了该技术基于潜水器搭载和应用的可行性。

从物质分析来看,常规取样器采集的样品已不能完全反映深海环境物质真实的成分信息。事实上,高压环境中原位样品往往含有大量的溶解性气体,获取其中的CH₄、H₂S和CO₂等气体含量信息,是准确追踪海底冷泉和热液等深海特殊生境过程的重要方式,因而全海深保真取样器已成为重要的取样工具。为了获取更加真实准确的深海环境数据以及高保真的深海生物样品及生物信息,亟需发展原位保真取样、样品保真转移和保真储存一体化的深海环境取样装备。

5. 深海原位生物定植系统

为了对深海沉积物中具有特殊功能的微生物培育提供海底实验平台,2016年,杭州电子科技大学研究团队^[36]研制了大容量、长时间序列的沉积物富集培育系统;该系统具备原位富集实验、自动多阶段采样的能力,可识别沉积物质来源、定量沉积速率以及获取大量微生物。2019年,自然资源部第三海洋研究所团队^[37]自主研发了深海水体原位定植培养系统,培养舱具有定量缓释氮素的功能,可在南海3300 m水域中开展长周期氮循环微生物原位可控培养,成功获取并分离了多种氮循环功能的富集菌群。基于ROV等平台的原位实验能力,生物原位培养装置能够在深海各类生境开展可控的原位培养实验。2020年,中国科学院海洋研究所团队^[38]自主研发了基于“发现号”ROV的深海大型生物原位实验系统,该系统具备样品采集、同位素定时定量加注以及原位或移位培养的能力,可在原始环境或特定环境胁迫下分析深海微生物相互作用的能力。对于深海特定功能微生物的定向原位富集培养,需要借助定制的原位培养系统开展原位条件控制实验。可以看出,原位生物培育系统逐渐向多类型环

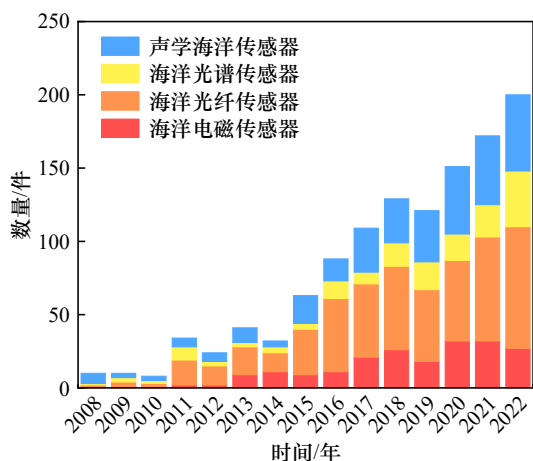


图4 我国海洋传感器专利技术发展情况

境适应、环境条件自主控制与监测以及功能需求定制化设计的发展方向。

总的来说，我国深海原位探测与实验装备与世界海洋强国仍然存在差距，要达到领先水平，需要向感知精准性、样品保真性、环境适应性、长期稳定性、设备兼容性和自主性等方向发展。我国需注重提升自主创新能力，重点突破传感器等关键部件及其制备工艺的核心技术，从而形成一大批高精度、高稳定性、多要素的国产深海原位探测与实验装备，以满足多种应用场景下的深海科学实验需求。

(三) 深海环境模拟实验装备

我国现有的深海环境模拟实验装备主要有深海高压生物反应器、深海天然气水合物形成与开采模拟系统等，可在实验室利用可调控的温度压力条件以及物质输入来模拟深海中的各类自然环境。目前，我国在深海天然气水合物模拟系统方面取得了较大进展，在深海生物反应器系统方面仍需加大研发力度。

1. 深海高压生物培养系统

深海高压生物反应器以富集深海微生物和分析

反应过程为主要目标，以上海交通大学团队^[39]研发的一套连续分批进料式生物培养系统为代表，该系统能够调节甲烷压力并模拟冷泉原位环境，可监测并探究甲烷循环过程，同时富集甲烷氧化功能菌群并提升菌群活性。此外，气提式生物反应器是另一种持续富集生物反应器，专用于开展深海热液环境下嗜热群落培育及其生物多样性分析。2019年，中国科学院深海研究所团队^[40]研制了宏生物高压培养系统，通过加压的实验流程，实现深海生物环境适应性研究。

2. 深海生物全过程原位环境培育分选系统

为获取高存活率的纯培养生物，生物培育、转移和分选全过程需要保持原位环境条件，作者研究团队于2023年研发了一套深海保温保压单菌落高通量自动筛分系统，结构如图5所示，该系统同时具备温度和压力调控、微生物培育和分选功能，可对深海微生物进行人为可控的单菌落自动分离和纯化培养，系统内的高压微注泵是实现单菌落分离功能的核心硬件。可以看出，深海生物反应器从生物反应监测向生物富集、转移和分选等生物研究全过程的发展方向，其中样品保真和环境条件精准调控是关键。

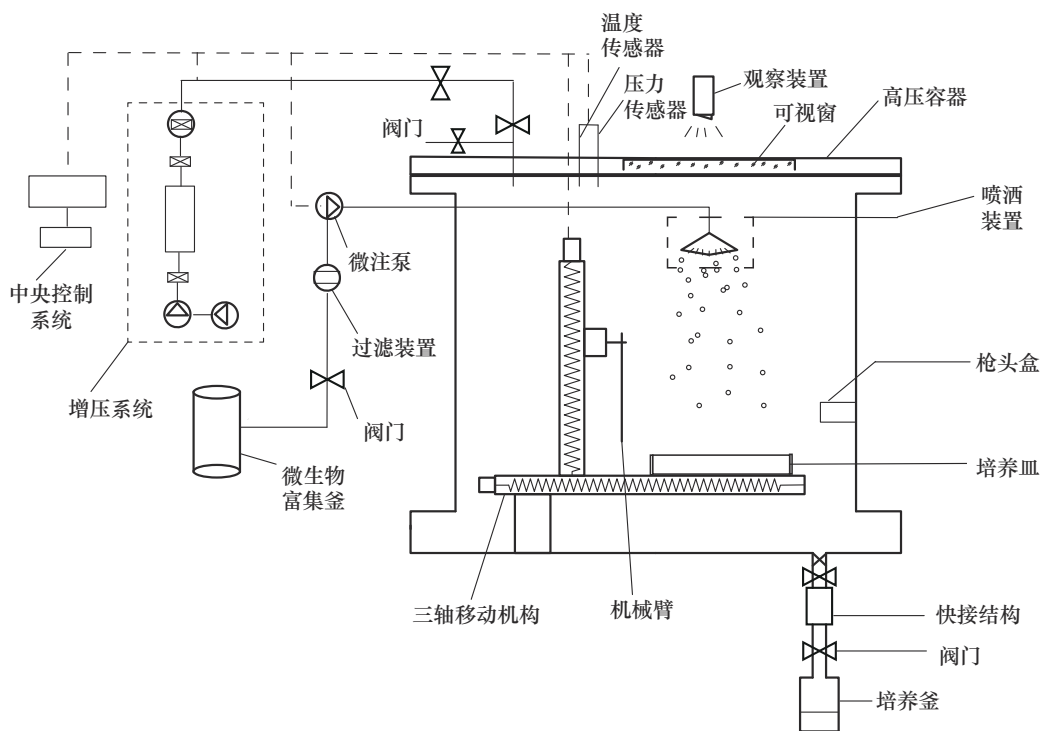


图5 深海生物全过程原位环境培育分选系统

3. 深海环境过程模拟实验系统

深海环境模拟实验系统是模拟深海地质化学过程以及探究深海特殊物质形成转化机制的重要装备。作者研究团队^[41]于2021年研制了深海甲烷渗漏过程模拟系统（见图6），其具备深海冷泉环境气泡流条件模拟以及甲烷水合物形成动力学观测的能力，包括不同流动模式、形态演变和气体消耗等过程，发现了甲烷流体稳态和非稳态之间存在临界流速并且导致水合物成核时间缩短。为了进一步揭示完整的深海甲烷渗漏过程中的渗漏途径和水合物转化机制，研究团队^[42]在2022年研制了一套深海沉积物-海水模拟系统（DSSWS），该系统可模拟下层沉积物和上层海水的多层级深海环境，通过电阻和温度传感器的空间部署可实现对沉积物层甲烷气泡运移路径和水合物转化聚集过程进行监测，该系统对深海冷泉区甲烷渗漏过程的实验模拟具有开创性意义。

在天然气水合物等深海油气资源开采过程中，由于油气泄漏引发的环境变化过程及其控制因素是深海资源科学开发的研究重点。然而，当前只有少数的模拟实验系统被开发用于研究天然气水合物等

深海资源开采油气泄漏的环境过程。2022年，研究团队^[43]开发了一套新型的天然气水合物分解和甲烷泄漏耦合模拟系统（DLCS），以研究水合物开采及甲烷释放的环境效应。该系统克服了以往研究构建无水合物上覆地层和海水的缺陷，可以模拟含有水合物储层、上覆地层和上覆海水的原位自然环境。此外，该系统集成了水合物储层系统中温度、压力和电阻的空间分布，可对上覆地层进行可视化监测，并对覆盖层气体和液体进行采样。目前，已通过实验测试验证了该系统耦合模拟的有效性，明确了甲烷气体的泄漏机制，可为制定深海油气资源安全开发策略提供科学依据。

总的来说，我国在深海环境模拟实验装备领域能够紧跟国际发展步伐，深海环境模拟实验系统装备的发展趋势主要表现为大体积、高耐压、自动化、可视化、综合化、系统稳定性以及环境调控迅速、精准等。在实验室原位重塑深海生态系统已成为新的研究方向，结合多要素培育与长周期监测，识别和量化生物地球化学反应，开展深海多学科交叉融合分析，从而提升深海生态系统中生物适应机制和生态演化过程的认知。未来我国需要自主建设

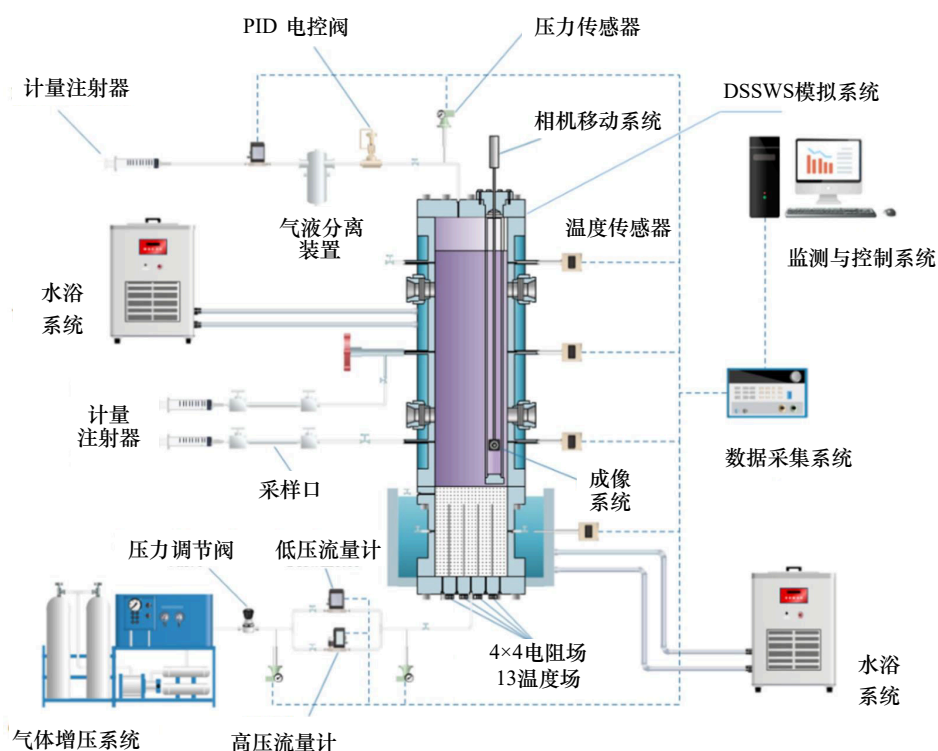


图6 深海沉积物-海水模拟系统
注：PID表示进程控制符。

更加完善的全维度深海生态系统演化模拟装备，开发集成生物、化学、地质等多维度模块及多功能专业设备，从而占领深海环境模拟实验研究的新高地。

四、我国深海科学实验装备发展思考

（一）加强顶层谋划，协调技术攻关

我国尚未发布国家层面的深海科学实验装备发展规划，该领域装备发展路径的顶层设计较为模糊。相关管理部门在行业层面制定的发展规划存在边界不清晰的情况，导致领域内装备出现低层次重复建设现象。我国深海科学实验研究与海洋重大工程建设的关联性不强，国家层面统筹组织的科学任务输入和稳定透明的科研资助布局亟待加强。

在国家层面，协调多个管理部门制定针对深海科学实验装备发展以及国产化关键技术攻关的总体战略规划，加强深海科学实验装备发展路径的顶层设计以及相关深海科技专项的统筹布局，对深海科学实验装备国产化关键部件的技术需求组织常态化调研，加强装备技术研发及应用标准规范的制定，针对深海科学实验装备全产业链的薄弱环节给予重点支持，围绕深海科学实验装备国产化关键技术，集中国内优势力量开展联合攻关，强化关键小件、敏感材料、基础工艺研发，实现关键核心技术自主可控，支撑深海科学实验装备技术行业高质量发展。

（二）建立激励机制，推动创新转化

我国深海科学实验装备产业化短板明显，“产学研用”连接性弱、科技成果转化周期长、规模化应用产品少。我国科研机构的科技成果大多处于实验室应用阶段，科技成果向现实生产力的转化程度不足。企业作为创新主体，市场生存压力大，因成本和收益考虑参与产品化、产业化积极性不足。因而导致市场活力低迷，创新创业体系不完备，难以真正推动深海科学实验装备实现产品化、系列化。

探索并制定针对深海科学实验装备产业化发展的激励政策，推动建立以企业为主体，高校、科研院所、企业协调运作的产业体系，建立多渠道、多元化的融资机制，强化深海科学实验装备产业的发展要素，引导企业创新主体的参与，构建“产学研用”协同创新体系，设立深海科学实验装备技术成

果孵化器，鼓励深海传感器等科学实验装备自主关键技术的产品化，激发创新创业热情和市场活力，推动创新成果转移、转化和产业化，促进国产化创新成果在深海科学实验装备上的落地应用，以自主创新驱动相关产业链发展。

（三）建设示范平台，形成标准体系

深海原位科学实验的作业环境十分复杂，包括高静水压、高盐度、高温/低温、复杂流体力学、腐蚀污损等多种苛刻因素，这些复杂因素的强耦合会导致深海材料的损伤以及深海科学实验装备的失效^[23]，亟需在研制阶段利用深海试验装备对各类实验装置进行原位检验、性能测试及安全评估，以保障深海科学实验装备能够持续稳定运行。然而，我国在深海环境材料学、结构力学、腐蚀科学、水声学等装备技术应用方面的基础性研究仍然缺乏。在深海领域专用材料、实时通信、定位导航、自主控制设备等共性配套技术设备方面，我国深海科学实验装备配套技术水平发展不均衡、技术标准制定不统一，受制于世界海洋强国^[44]。因此，亟待建设标准化、体系化的深海试验场，为我国深海科学实验装备的研发、检验和工程化应用全流程提供统一、科学、高效的服务。

加快建设针对深海科学实验装备研发的国家级技术创新组织体系、综合试验基地，形成面向真实海况的装备研发、试验、验证的综合业务能力，为深海科学实验装备研制及应用提供高质量、标准化的配套服务；按需整合资源，合理支持已有实验基地的业务运行，建设国家级深海综合试验场，构建深海科学实验装备技术公共检验平台、应用推广示范平台；以公共试验基础设施支持深海科学实验装备技术产品定型和产品化，同时促进相关装备技术研发创新主体的良性发展，推动深海科学实验装备的产业化进程；对标国际深海科学实验装备技术标准，自主构建我国完整的标准体系，在数据处理、管理模式、体系建设等方面形成系列标准和规范，为我国深海科学实验装备开拓国际市场筑牢基础。

（四）突破传感技术，加快国产化进程

深海传感器作为我国深海综合环境信息观测装备的核心部件。当前，我国在海洋领域的核心传感器国产化率仅为23%；深海领域关键技术产品的主

要市场被世界海洋强国垄断,其市场份额占比达到 95%^[45]。关键传感器技术的缺乏导致我国高端精密的深海原位传感系统严重落后,目前对于深海环境的物质检测和分析大多仍需要采集原样品并运送到实验室中完成,难以实现即时快速分析和原位在线检测。在深海传感系统方面,我国声学传感器的高端产品未形成体系,非声学的海洋光纤、电磁、光谱类传感器产品在海试和工程化应用方面仍然薄弱。多数海洋科技企业以中低端领域的集成应用为主,对进口敏感元件、芯片等关键部件进行二次开发,创新积极性不足,自主研发能力薄弱。

加强管理部门协调联动,制定针对深海传感系统装备产业发展的总体规划,统筹支持深海传感系统技术创新、装备攻关、示范应用和平台建设。加强国家创新重大项目、重点研发计划等专项对深海传感技术、装备和人才的支持,推动深海科学与技术创新齐头并进,提升我国深海基础研究与实验能力。加强联合技术攻关,将深海传感系统装备试验验证和应用推广等纳入指标考核要求,落实首台(套)示范应用等政策。研制一批深海传感装备设计、制造、检测、验证等技术和方法的基础标准,开展装备性能、可靠性、零部件以及数据处理等关键技术标准的制定/修订。在国家层面重点支持深海传感系统装备全产业链的薄弱环节,推动我国突破深海传感器关键技术瓶颈,研制自主可控的深海原位传感装备,摆脱深海科学研究依靠国外实验装备的局面,从而有效提升我国深海科学研究水平及学术影响力。

(五) 加强国际合作,提升创新能力

增强深海科学实验装备技术的自主创新能力,必须扩大国际科技合作与交流。以深海领域国家重点研发计划为依托,大力推进与海上丝绸之路沿线国家著名海洋科研机构合作,加强与世界海洋强国海洋科研机构合作,完善我国与世界深海研究机构的合作网络,为共同推动世界深海科技前沿提供有力支撑。设立国际深海科技创新高层交流论坛,加强与海上丝绸之路沿线国家在深海科技和产业领域的交流与合作,积极引进国际先进深海科学实验装备技术,鼓励引进、消化、吸收、再创新,实现跨越式发展。支持我国科学家和科研机构参与或牵头组织国际和区域性深海大科学计划,为我国深海科

学实验装备走向世界奠定坚实的基础。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 14, 2024; **Revised date:** April 3, 2024

Corresponding author: Feng Jingchun is a professor from School of Ecology, Environmental, and Resources, Guangdong University of Technology. Her major research fields include deep-sea gas hydrate exploitation and environmental ecological effects, deep-sea pollutant transport and transformation, novel detection and modeling equipment for deep-sea environments, and strategic planning for sustainable energy. E-mail: fengjc@gdut.edu.cn.

Funding project: Guangdong Natural Resources Foundation (GDNRC [2023]30); Chinese Academy of Engineering project "Research on Deep-Sea Equipment Technology System and Development Strategy" (2023-XZ-06); PI Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML20190609, GML20230921).

参考文献

- [1] Feng J C, Liang J Z, Cai Y P, et al. Deep-sea organisms research oriented by deep-sea technologies development [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(17): 1802–1816.
- [2] Liang J Z, Feng J C, Zhang S, et al. Role of deep-sea equipment in promoting the forefront of studies on life in extreme environments [J]. *iScience*, 2021, 24(11): 103299.
- [3] Abukawa K, Asada A, Mizuno K, et al. Diagnostic evaluation of quay wall using three-dimensional acoustic measurement systems [R]. Tokyo: 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), 2013.
- [4] DeNolfo P, Harrison M, Thomson H, et al. South TOTO acoustic measurement facility (STAFAC) in-water systems design [R]. Quebec City: OCEANS, 2008.
- [5] 许立坤, 李文军, 陈光章. 深海腐蚀试验技术 [J]. *海洋科学*, 2005, 29(7): 1–3.
Xu L K, Li W J, Chen G Z. Deep sea corrosion test technique [J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(7): 1–3.
- [6] 马蕊, 赵修涛, 柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 19–25.
Ma R, Zhao X T, Liu C G. Development of marine equipment for underwater stereoscopic observation [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 19–25.
- [7] Parsons B S, Vogt P R, Haflidason H, et al. Sidescan and video exploration of the Storegga slide headwall region by submarine NR-1 [J]. *Marine Geology*, 2005, 219(2/3): 195–205.
- [8] Yücel M, Sievert S M, Vetriani C, et al. Eco-geochemical dynamics of a shallow-water hydrothermal vent system at Milos Island, Aegean Sea (Eastern Mediterranean) [J]. *Chemical Geology*, 2013, 356: 11–20.
- [9] Thorsnes T, Chand S, Brunstad H, et al. Strategy for detection and high-resolution characterization of authigenic carbonate cold seep habitats using ships and autonomous underwater vehicles on glacially influenced terrain [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 708.

- [10] Giddens J, Turchik A, Goodell W, et al. The national geographic society deep-sea camera system: A low-cost remote video survey instrument to advance biodiversity observation in the deep ocean [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 7: 601411.
- [11] Guilini K, Soltwedel T, van Oevelen D, et al. Deep-sea nematodes actively colonise sediments, irrespective of the presence of a pulse of organic matter: Results from an *in situ* experiment [J]. *PLoS One*, 2011, 6(4): e18912.
- [12] Szafranski K M, Deschamps P, Cunha M R, et al. Colonization of plant substrates at hydrothermal vents and cold seeps in the north-east Atlantic and Mediterranean and occurrence of symbiont-related bacteria [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 162.
- [13] Amano C, Reinthaler T, Sintes E, et al. A device for assessing microbial activity under ambient hydrostatic pressure: The *in situ* microbial incubator (ISMI) [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2023, 21(2): 69–81.
- [14] 王勇, 郑鹏飞, 贺丽生, 等. 深海生物原位实验与生态监测研究进展 [J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 543–553.
Wang Y, Zheng P F, He L S, et al. Advances in deep-sea *in situ* biological research and ecosystem observation [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(3): 543–553.
- [15] Pachiadaki M G, Taylor C, Oikonomou A, et al. *In situ* grazing experiments apply new technology to gain insights into deep-sea microbial food webs [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 129: 223–231.
- [16] 冯景春, 梁健臻, 张偲, 等. 深海生物资源开发装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 67–75.
Feng J C, Liang J Z, Zhang S, et al. Development of deep-sea biological resources exploitation equipment [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 67–75.
- [17] Park C B, Clark D S. Rupture of the cell envelope by decompression of the deep-sea methanogen *Methanococcus jannaschii* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(3): 1458–1463.
- [18] Marietou A, Chastain R, Beulig F, et al. The effect of hydrostatic pressure on enrichments of hydrocarbon degrading microbes from the gulf of Mexico following the deepwater horizon oil spill [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 808.
- [19] Cario A, Oliver G C, Rogers K L. Characterizing the piezosphere: The effects of decompression on microbial growth dynamics [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 867340.
- [20] Houghton J L, Seyfried W E Jr, Banta A B, et al. Continuous enrichment culturing of thermophiles under sulfate and nitrate-reducing conditions and at deep-sea hydrostatic pressures [J]. *Extremophiles: Life Under Extreme Conditions*, 2007, 11(2): 371–382.
- [21] Callac N, Rouxel O, Lesongeur F, et al. Biogeochemical insights into microbe-mineral-fluid interactions in hydrothermal chimneys using enrichment culture [J]. *Extremophiles*, 2015, 19(3): 597–617.
- [22] Kim J, Lee J Y, Ahn T W, et al. Validation of strongly coupled geomechanics and gas hydrate reservoir simulation with multi-scale laboratory tests [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 149: 104958.
- [23] 蒋鹏, 王启, 张斌斌, 等. 深海装备耐压结构用钛合金材料应用研究 [J]. *中国工程科学*, 2019, 21(6): 95–101.
Jiang P, Wang Q, Zhang B B, et al. Application of titanium alloy materials for the pressure-resistant structure of deep diving equipment [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(6): 95–101.
- [24] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 76–83.
Song X C, Du J F, Wang S Q, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 76–83.
- [25] 胡震, 曹俊. 载人深潜技术的发展与应用 [J]. *中国工程科学*, 2019, 21(6): 87–94.
Hu Z, Cao J. Development and application of manned deep diving technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(6): 87–94.
- [26] 冯景春, 梁健臻, 张偲, 等. 深海环境生态保护装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 56–66.
Feng J C, Liang J Z, Zhang S, et al. Environmental and ecological protection equipment in deep sea [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 56–66.
- [27] Zhang X, Li L F, Du Z F, et al. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(11): 958–964.
- [28] Du Z F, Li Y, Chen J, et al. Feasibility investigation on deep ocean compact autonomous Raman spectrometer developed for *in situ* detection of acid radical ions [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(2): 545–550.
- [29] 董一飞, 罗文造, 梁前勇, 等. 坐底式潜标观测系统及其在天然气水合物区的试验性应用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 195–203.
Dong Y F, Luo W Z, Liang Q Y, et al. A newly developed bottom-supported submersible buoyant system and its testing application to a natural gas hydrate area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 195–203.
- [30] 牟勇, 梁楚进, 蔺飞龙, 等. 自由投放式声学多普勒海流剖面观测及数据处理 [J]. *海洋学报*, 2023, 45(4): 144–153.
Mou Y, Liang C J, Lin F L, et al. Free-dropping acoustic Doppler Current profiler observation and data processing [J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(4): 144–153.
- [31] Du Z F, Zhang X, Xi S C, et al. *In situ* Raman spectroscopy study of synthetic gas hydrate formed by cold seep flow in the South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 197–206.
- [32] Wang Y, Gao Z M, Li J, et al. Hadal water sampling by *in situ* microbial filtration and fixation (ISMIF) apparatus [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 144: 132–137.
- [33] 王洪浩. 深海冷泉保温保压取样器结构设计及优化研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学(硕士学位论文), 2020.
Wang H H. Study on the structural design and optimization of deep-sea cold spring thermal insulation and pressure retaining sampler [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology (Master's thesis), 2020.
- [34] 周朋, 王豪, 张培豪, 等. 全海深沉积物保压取样装置设计及试验研究 [J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(2): 252–258.
Zhou P, Wang H, Zhang P H, et al. Design and experimental study of a pressure-holding sampling device for full-depth sediments [J]. *Engineering Science and Technology*, 2023, 55(2): 252–258.

- [35] 许可, 赵飞虎, 周鑫涛, 等. 深海生物原位保温保压装置设计方案研究 [J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 62–66.
Xu K, Zhao F H, Zhou X T, et al. Research on scheme of *In-situ* temperature and pressure preserving device for deep sea creatures [J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(2): 62–66.
- [36] 林鹏. 深海沉积物原位定植培养工作站系统设计 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学(硕士学位论文), 2016.
Lin P. The design of deep-sea sediments *in-situ* colonization culture systems [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University(Master's thesis), 2016.
- [37] 王蕾, 王丽萍, 董纯明, 等. 南海深海氮循环微生物的原位培养与多样性分析 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 1–13.
Wang L, Wang L P, Dong C M, et al. Deep sea *in situ* cultivation and diversity analysis of microorganism involved in nitrogen cycling in the South China Sea [J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(1): 1–13.
- [38] 杜增丰, 连超, 席世川, 等. 基于“发现”号缆控水下机器人的深海原位探测/取样/实验技术研发与科学应用 [J]. 现代物理知识, 2021, 33(1): 14–18.
Du Z F, Lian C, Xi S C, et al. Research and scientific application of deep-sea *in-situ* detection/sampling/experimental technology based on the “Discovery” cable controlled underwater robot [J]. Modern Physics, 2021, 33(1): 14–18.
- [39] Zhang Y, Henriot J P, Bursens J, et al. Stimulation of *in vitro* anaerobic oxidation of methane rate in a continuous high-pressure bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 3132–3138.
- [40] Chen J W, Liu H L, Cai S Y, et al. Comparative transcriptome analysis of *Eogammarus posseticus* at different hydrostatic pressure and temperature exposures [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 3456.
- [41] Li P, Feng J C, Yang Z F, et al. Kinetic behaviors of methane hydrate formation with bubble seeping at conditions of “Haima” cold seep [J]. Energy & Fuels, 2021, 35(15): 12132–12141.
- [42] Xie Y, Feng J C, Hu W Q, et al. Deep-sea sediment and water simulator for investigation of methane seeping and hydrate formation [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(4): 514.
- [43] Xie Y, Feng J C, Sun L W, et al. Coupled simulation of hydrate-bearing and overburden sedimentary layers to study hydrate dissociation and methane leakage [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(5): 668.
- [44] 董胜, 廖振焜, 于立伟, 等. 海洋科考装备技术发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 33–41.
Dong S, Liao Z K, Yu L W, et al. Development strategy for marine scientific equipment and technologies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 33–41.
- [45] 王军成, 孙继昌, 刘岩, 等. 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 42–52.
Wang J C, Sun J C, Liu Y, et al. Research progress and prospect of marine monitoring instruments and equipment in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 42–52.