深海环境腐蚀试验技术及研究进展

郭为民，樊洪，丁康康，刘少通，彭文山，许立坤，侯健
（洛阳船舶材料研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室，山东 青岛 266237）

摘要：从深海实海环境试验、模拟试验、原位电化学测试、数值仿真等方面阐述了深海环境试验技术的发展演变过程。介绍了国内外主要深海腐蚀研究使用的试验装置种类，各类装置的优缺点和使用场景，并以试验装置为平台，发展了金属材料深海原位电化学测试技术及深海测试数据实时远程传输技术。介绍了实验室模拟深海环境腐蚀试验技术由单因素模拟到多因素模拟，并结合力学及实时测试的发展历程。阐述了数值仿真技术在深海环境腐蚀研究方面的应用，推介了2项ISO深海环境试验方法国际标准，回顾了近期在材料深海环境腐蚀研究方面取得的最新成果。面向深海装备应用的需求，从新试验技术发展出发，探讨了深海试验技术研究的发展方向和趋势。

关键词：深海；腐蚀；实海试验；模拟试验；试验标准；腐蚀机制
中图分类号：TG172　**文献标志码：**A　**文章编号：**1672-9242(2024)05-0024-10
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2024.05.003

Deep Sea Environmental Corrosion Test Technology and Its Research Progress

GUO Weimin, FAN Hong, DING Kangkang, LIU Shaotong, PENG Wenshan, XU Likun, HOU Jian
(National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The development and evolution process of deep-sea environment test technology is expounded from the aspects of real deep-sea environment test, simulation test, in-situ electrochemical test, numerical simulation, etc. The types of test devices used in the main deep-sea corrosion research at home and abroad, the advantages and disadvantages and use scenarios of various devices were introduced with the test device as a platform to develop a metallic material deep-sea in-situ electrochemical test technology and deep-sea test data real-time remote transmission technology. The development process of laboratory simulation deep-sea environmental corrosion test technology was introduced from single-factor simulation to multi-factor simulation, in combination with mechanics and real-time testing. The application of numerical simulation technology in the research of deep-sea environment corrosion was described. Two international standards for ISO deep-sea environmental test methods were introduced; the latest achievements in the study of material deep-sea environmental corrosion were reviewed. Facing the needs of the application of deep-sea equipment, the development direction and trend of deep-sea test technology research were discussed from the development of new test technology.

KEY WORDS: deep sea; corrosion; real sea test; simulation test; test standard; corrosion mechanism

---

收稿日期：2024-03-10；**修订日期：**2024-04-19
Received：2024-03-10；**Revised：**2024-04-19
基金项目：国家重点研发计划（2022YFB3808800）；技术基础项目（JSHS2020206B002）
Fund：National Key R&O Program of China (2022YFB3808800); Technical Basis Project (JSHS2020206B002)
引文格式：郭为民，樊洪，丁康康，等. 深海环境腐蚀试验技术及研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 24-33.
GUO Weimin, FAN Hong, DING Kangkang, et al. Deep Sea Environmental Corrosion Test Technology and Its Research Progress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 24-33.

深海由于其重要的战略地位和蕴藏丰富的矿产资源，是海洋科技强国争夺的重要领域。从几百米到几千米的深海海底，蕴含丰富的石油、天然气、锰结核、磷钙石等，探索和开采这些资源需要研发投入大量新型海洋工程装备，而海水具有强腐蚀性，腐蚀问题是深海装置和装备应用必须解决的共性问题[1-2]。海水的高腐蚀性使装备在水下面临极大风险，尤其是深海存在巨大的压力，以及人员难以到达，一旦发生腐蚀失效，往往造成灾难性事故，损失巨大。如墨西哥湾“深水地平线”平台事故[3]造成了巨大损失和生态灾。因此，开展深海环境试验技术与腐蚀研究，探清装备在深海的环境适应性行为，建立深海腐蚀防护技术，是开发、利用深海的前提和基础，对保障深海装备安全可靠运行具有重要意义[4]。

材料深海腐蚀环境试验研究始于 20 世纪 60 年代，主要通过深海实海腐蚀环境试验技术和深海模拟腐蚀环境试验技术，积累材料深海环境腐蚀数据，以阐释不同材料在深海低温、低氧、高压环境中的腐蚀机制[5-7]。在深海实海腐蚀环境试验技术方面，随着海水深度和大陆距离增加，材料的腐蚀数据积累和表征方法研究的难度也逐级增大。目前，世界上仅有少数国家开展了材料的深海实海环境腐蚀试验。美国（怀尼米港试验站）、前苏联、日本（北九州试验点、别府试验点）、英国等在 20 世纪 60 年代就开始了材料的深海环境腐蚀试验研究，随后挪威、印度等国家也在开展了这方面的研究工作[8-10]。由于深海自然环境试验系统复杂，试验费用高，除试验装置的投放、运行与回收外，其可靠性还与地质、环境、装置、人为等多种因素相关，存在样板丢失、装置回收率低等问题。据统计，国际上进行的此类海洋环境试验，其装置的回收率最高为 76%[11]。因此，深海模拟腐蚀环境试验技术的发展，成为国内外深海腐蚀研究的一大热点，由单因素发展为多因素全面控制，安全可靠密封技术的突破实现了超高静水压力的模拟[12]。然而，近年来，深海技术发展成为整个海洋科学的前沿，且多应用于军事方面，可以查到的国外相关试验技术资料越发减少；相反，国内方面在深海试验技术研究研究方面则异军突起，取得了一些突破性的进展，相关技术有赶超国外发达国家的趋势。因此，本文从深海腐蚀环境试验技术发展历史、新技术应用乃至未来发展趋势、前景等方面进行了全面综述。

1　深海腐蚀环境试验技术的发展现状

深海实海腐蚀环境技术与大气、表层海水环境试验技术的区别主要是，需要解决深海环境试验框架的可靠性、定位、投放和回收问题，深海模拟腐蚀试验技术需要解决模拟深海腐蚀环境特点和腐蚀电化学在线测试问题。实海试验具有获取材料深海腐蚀老化数据准确可靠的优点，但环境参数不可控，深海模拟试验是在环境可控条件下开展的试验，可以通过控制环境条件，深入研究环境参数对材料性能的影响规律和机理。通过实海试验发现问题，通过模拟试验来复现问题，并进行深入研究，二者相辅相成，是深海腐蚀试验技术的 2 个主要方面。

1.1　深海实海腐蚀环境试验技术

1）深海环境腐蚀试验平台。美国主要采用座底式深海试验技术，装挂试样的框架坐沉在试验海域的海床上，如图 1 所示。投放时，到达预定深海试验场后，将试样框架用吊车投放至海底；回收时，通过声释放装置断开海底的锚固物，由上浮标将连接绳带出海面，最后用绞车回收试样框架。坐底式试验装置的优点是框架载样量大，试样框架总质量可达 4 000 kg，受海流影响小，布放深度准确；缺点是对试验场地要求高，试样框架易产生吸底现象，布放回收操作复杂，费用高昂[13]。前苏联、印度、挪威、意大利及法国等国基于深海水文浮标，研发了串挂式深海试验装置[14-20]，使用的试验装置如图 2 所示。串挂式试验装置的优点是可在 1 个试验点同时开展不同深度的环境试验，对试验场地要求不高；缺点是装置较长，易受到海流的影响发生偏移，在水文浮标上挂样受到限制，投放试样数量少，一般每个深度只能投放十几件试样，且试样尺寸受到限制。

我国从 2005 年开始开展深海实海腐蚀环境试验技术研究，中国船舶七二五所开发了具有完全自主知识产权的深海环境试验技术和装置，是国内唯一开展深海实海环境试验研究的单位。立足于深海环境试验需求，对比分析了座底式和串挂式试验装置的优缺点，采用先进的设计理念，设计研制了近底悬浮式深海环境试验装置[4,21]，如图 3 所示。该装置是利用储备浮力将试样框架悬浮在距离海底 20~30 m 的位置，避免了装置座底产生的吸底现象，具有载样量大、结构简单等特点。为满足小批量多深度深海试验的要求，进一步设计研制了高效串型深海环境试验装置[4]。为防止由于长度较大受到海流的影响发生偏转，采用计算机仿真计算，设计装置的浮力配置和大小，装置可同时进行多深度深海环境试验，达到高效试验的效果。

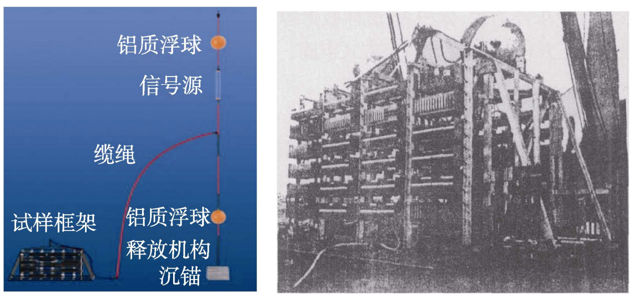

图 1　美国深海环境试验装置示意图及试样框架
Fig.1 Schematic diagram of the U.S. deep-sea environment test device and the sample framework

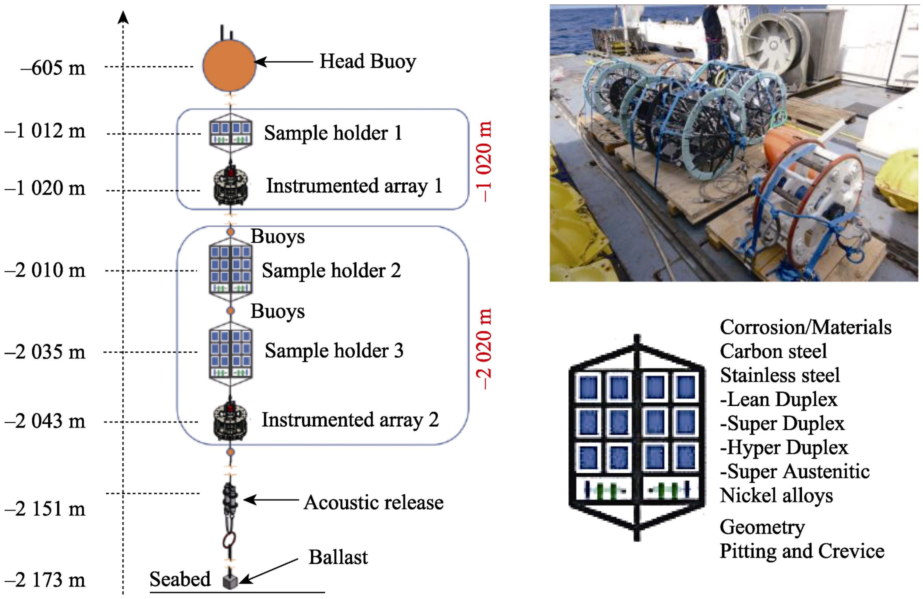

图 2 法国腐蚀研究所在大西洋使用的装置
Fig.2 Device used by the French Corrosion Research Institute in the Atlantic Ocean

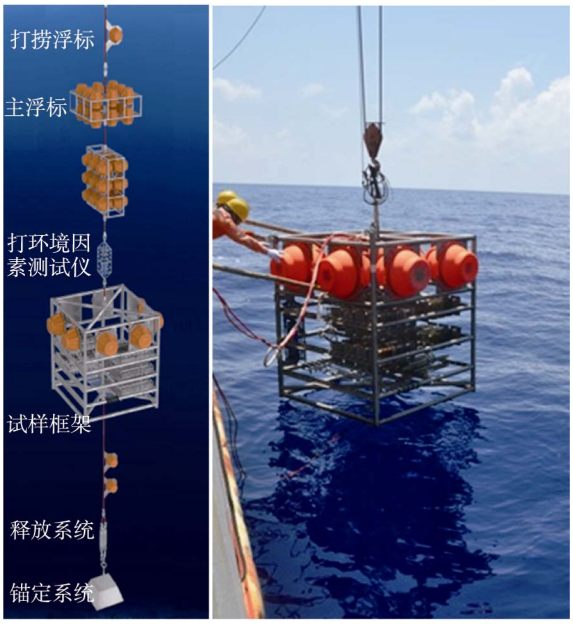

图 3 近底悬浮式深海环境试验装置
Fig.3 Near-bottom suspended deep-sea environment test device

深海浮标方面，在崂山实验室“问海计划”支持下，近 5 年来，4 000 m 深海自持式剖面浮标的研制实现突破，HM4000 型深海剖面浮标于 2021 年完成了西北太平洋布放，在国内首次实现 4 000 m 级深海剖面浮标批量海上观测应用运行。天津大学进一步优化开发了深海自持式剖面浮标定深系统，设计了高压环境模拟台与深海自持式剖面浮标工程样机组成的半实物仿真平台，通过半实物仿真平台对所设计的定深控制系统进行了单目标深度定深跟踪试验与多目标定深试验，证明该控制系统具有良好的定深跟踪能力，定深控制最大下潜深度达到 4 031.4 m[22]。此外，国内相关单位还研制了深海海底环境试验装置[23-24]，作为开展海泥及海泥-海水跨介质环境的材料腐蚀试验的技术储备，为油气管线、采矿设备等海底金属构筑物的腐蚀评价提供试验数据。

2）深海环境材料性能原位检测技术。深海环境条件限制以及试验方法的特点，使得获得的数据具有一定的局限性：获得的数据为试验周期内的累积，对材料腐蚀过程尤其是初期腐蚀的发展无法了解；腐蚀数据必须将试样回收后才能获得，周期较长；深海试验还存在一定风险，测试数据需要及时传输。为补齐这一薄弱环节，深化材料深海环境腐蚀机理及防护效果研究，相关机构开发了深海原位腐蚀检测技术。据报道，英国石油公司在北海海域做了牺牲阳极保护实海试验，深度为 150 m，方法是采用浮标系统，将试验系统中的阴极、阳极导线引到海面上的浮标上，定期进行测量。显然，这种方法不适合在远离大陆、更深的深海区。1982~1999 年，挪威海洋技术研究所在北挪威海的多个地点进行了材料深海阴极保护参数的研究，试验深度为 100~1 335 m，这是真正意义上的实海测试，试验采用单点锚系结构，利用多通道海流计的定向舵板，固定牺牲阳极、参比电极和阴极，定期采集保护电位、保护电流，通过一系列试验得到了挪威外海不同深度的钢的保护电流密度，从而筛选出适合深海使用的牺牲阳极[17]。2016 年，法国腐蚀研究所在大西洋亚速尔海开展了为期 11 个月的深海腐蚀试验，利用电位传感器和生物膜传感器对几种钝性金属进行了电位和电流密度的连续原位测量，研究了材料的阴极极化行为和海洋生物膜的生长情况[19]。

国内近年开展了深入的深海环境原位测试技术研究，相较于国外，技术水平有较大提升，不仅开发了多通道的材料腐蚀电位、电偶电流的检测技术，还研发了材料深海环境电化学性能原位测试技术[24]。中

国船舶七二五所突破了测试系统和控制系统低功耗设计、多通道自动控制技术等技术瓶颈，全方位提高了可靠性，利用共模抑制、电磁兼容等手段降低了数据通信的噪声，研发了具有金属材料腐蚀电位、极化、阻抗等测试功能的材料深海环境原位电化学测试技术，在深海同时开展十几种材料试样的电化学原位测试。数据采用自存方式存储于设备中，可为研究材料深海环境腐蚀机理研究提供技术数据，也可作为室内模拟深海环境试验结果的校准。另外，中国石油大学的李强、华中科技大学的董泽华等也设计开发出一种类似的测试技术，可在几百米水深条件下进行腐蚀电化学测试的装置，主要用在采油井内含硫水环境的腐蚀监测[26]。

3）深海环境测试数据远程传输技术。随着材料深海环境原位测试技术的发展，测试数据的传输技术成为下一步需要解决的问题，实时获得深海环境中的腐蚀数据，不仅可以了解材料深海环境中的腐蚀过程，还可以对试验进行监控，为深海试验的进程提供预计。深海试验海域距离大陆较远，及时获得试验数据较为困难，要实现远程传输，必须要解决几方面的瓶颈：数据的跨介质传输（电-声-电转换），需要解决不同传输方式的转换问题；测试数据种类多，要解决数据转化的稳定性；测试和传输设备的功耗，解决各型设备的供电问题。中国船舶七二五所提出了数据远程传输技术，结合原位试验技术实现深海环境下材料腐蚀行为的实时、原位监测，建立了基于水下声通-水面接收-卫星传输的深海数据远程传输通道，数据接收正确率达到 100%，提升了材料深海环境试验成效。中国科学院大学则进一步优化了深海水声信道多途时延扩展大、信噪比低的问题，提出了适用于 M 元通信的 SHFE 和适用于 M 元并行通信的 SCHFE 等 2 种信道匹配技术，并且通过深海超远程水声通信试验，验证了该信道匹配技术良好的稳定性和抑制码间干扰的能力[27]。

1.2　深海腐蚀模拟环境试验技术

深海实海环境试验系统复杂，试验费用和风险高，存在试样丢失、装置回收率低等问题，最重要的是深海高压环境原位测试材料腐蚀电化学数据难度大，获取数据量少，不足以支撑深海环境参数对材料腐蚀行为和机理研究。因此，在深海实海环境试验技术的基础上，又发展了深海模拟试验技术，通过环境参数控制手段，模拟不同深海环境参数，研究材料的深海腐蚀规律，与自然环境试验相互补充，协同完成材料在深海条件下的腐蚀规律和机理研究。

室内模拟腐蚀方法是在实验室内采用小试样和人工配制的海水介质，通过模拟深海海水环境，用化学或电化学加速方法研究影响材料腐蚀的主要因素和控制规律。由于在深海环境下影响材料腐蚀的因素众多，很难在实验室条件下完全模拟实际材料的深海腐蚀行为。通过控制其中 1 个或几个因素，在较短时间内探索材料在深海模拟溶液中的腐蚀规律，并通过不同材料的平行比较，推测材料的深海耐蚀性行为，对研究不同材料在该条件下的腐蚀机理、腐蚀规律和腐蚀失效原因具有重要的参考价值[28]。

随着工业技术的发展，欧美等国研发了能够较准确模拟深海环境特点的深海模拟试验技术，开展了压力、温度、含氧量等主要因素对材料的深海腐蚀行为影响研究。芬兰通过控制海水的温度、压力、溶解氧和盐度等参数，建立了深海模拟试验装置（如图 4 所示），可开展材料电化学性能测试、疲劳试验和应力腐蚀试验。

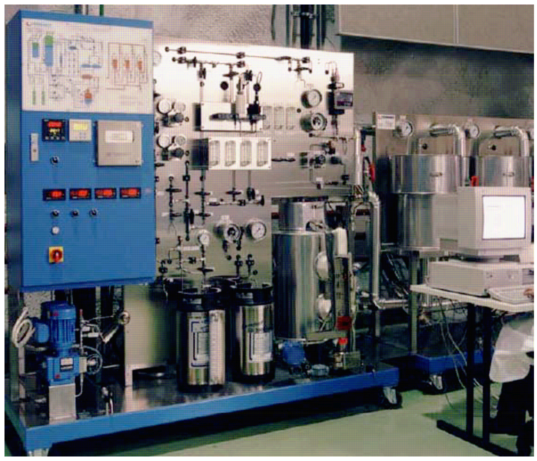

图 4　芬兰 Cormet 公司制造的深水腐蚀试验装置
Fig.4 Deep-water corrosion test device manufactured by Cormet, Finland

国内从事模拟深海环境试验研究的机构较多，主要有洛阳船舶材料研究所、北京科技大学、中科院金属所、中国海洋大学等，通过建立的深海模拟试验装置，研究压力、温度、溶解氧对材料腐蚀行为和腐蚀机理的影响。深海环境模拟试验装置主要由控制系统、测试系统、海水循环系统、高压釜等部分组成。

中国科学院金属研究所自主设计了利用高纯氮气和增压泵增压海水的深海模拟装置。利用常规电化学测试技术、微观形貌表征、力学性能测试相结合的方法研究深海环境腐蚀机理。此类模拟设备能够模拟的环境条件单一，只能模拟压力、温度条件，海水介质不能循环，属于第一代模拟设备。

在第一代模拟试验装置的基础上，中国船舶七二五所自主研发了全自动模拟深海环境循环装置。该设备主要由 2 个循环水仓和高压增压泵构成，通过向高压仓中打压海水实现增压，其他包括温度、溶解氧、pH、盐度、电导率等因素参数通过调节储水仓中海水参数实现控制。参数范围：温度为 2~25 ℃，pH 为 5.0~9.0，盐度为 0~5%，压力为 0~50 MPa，溶解氧为 0~饱和，可模拟 0~5 000 m 不同深度海水环境，如图

5 所示。该装置试验腔容积高达 80 L，可进行部件级的腐蚀性能评价，属于第二代模拟设备。

图 5 深海环境模拟试验装置
Fig.5 Deep-sea environment simulation test device

目前国内多家单位正在研制第三代深海模拟试验装置，以期实现多因素动态控制，保持较长时间的试验周期，试验装置内海水介质成分稳定。同时配置腐蚀形貌、材料成分变化原位检测单元，电化学试验单元，应力加载单元等，适合开展材料腐蚀老化机理研究。另外，对于一些特殊环境，需要对海水成分、温度等特殊环境因素进行调整，以达到该环境的实际环境。例如海底热液区[29]：压力为 50 MPa、温度为 200 ℃、pH=6.0 等，海水含硫化物等以及其他固体沉积物。

1.3 深海腐蚀数字仿真试验技术

随着深海装备的发展和更新换代，研制周期缩短，如果单独采用传统的环境试验方法难以实现对装备用金属材料深海环境腐蚀的快速评估，尤其是对于存在应力、流体、磨损等复杂条件下的腐蚀性能评估。近年来，随着仿真计算、虚拟化、深度学习等技术的发展，材料环境适应性仿真和虚拟化试验技术成为快速评价材料和装备环境适应性的重要手段。美国等国家将仿真试验列为“有助于极大提高战备、现代化、部队结构、持续军事能力”的一项重要的国防技术。数值仿真技术具有不受空间和时间限制的优点，可以在已获得深海环境试验数据的基础上，结合装备实际运行环境模拟腐蚀过程，不仅能够极大缩短试验时间，而且能够节省巨大的试验费用。对于较复杂的装备和系统，仿真技术的优越性更加明显，显著提高试验与评价的时效性和经济性，有效弥补了传统环境试验技术快速评价的不足。

20 世纪 60 年代后期，研究人员第一次使用计算机仿真技术进行腐蚀预测，采用的是有限微分法。随后在许多场合下，有限差分法比有限微分法具有更高的精度而被应用于腐蚀预测，但不适合三维图形模拟，20 世纪 70 年代开始使用有限元法。有限元法在编程解决问题方面更加容易，但是生成有限单元网格过程极其繁琐，其后边界元法被广泛使用，用来进行设计分析和案例研究。20 世纪 80 年代中，人工网络用来预测腐蚀类型和腐蚀性能。腐蚀专家系统是计算机技术在腐蚀科学中应用的又一个重要方面。美国 OLI 公司的 Corrosion Anslyzer 腐蚀仿真技术，属于一种典型的复杂环境效应仿真技术，能分别从动力学、热力学模拟材料在任何一种水溶液中的腐蚀情况，计算出各条件下的腐蚀速率、腐蚀电位，绘制出腐蚀速率随各种参数的变化曲线、金属和合金的电位-pH 图，并可判断各种条件下局部腐蚀的发生的可能性[30]。比利时 Elsyca 公司，采用有限元/边界元方法开发了 Corrosion Master 腐蚀仿真系列软件，分析阴极保护工程问题，具有自动校正功能[31]。英国 Computational Mechanics 的 BEASY 腐蚀仿真软件系统，在腐蚀控制、接触腐蚀、损伤判别等方面处于国际领先水平，主要用于预测阴极保护效率、电化学腐蚀风险、腐蚀设计的电磁信号等的仿真。该软件可以进一步进行深度开发，针对更加细分的腐蚀形式，突破相关技术瓶颈，将使腐蚀评估研究领域产生值的飞跃[32]。

我国在材料及部件及腐蚀仿真方面取得了较大的进步，使用的软件为 ABAQUS、COMSOL、ANSYSFLUENT 等，主要对管路流动腐蚀、电偶腐蚀、杂散电流腐蚀等方面研究较多，对点蚀、应力腐蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀的仿真研究较少。主要原因为，边界条件复杂，涉及的物理场较多，增大了开展仿真研究的难度。国内研究人员在深海实海和模拟深海试验数据的基础上，采用数值仿真技术实现了深海装备受力结构力学-电化学多物理场耦合腐蚀仿真，为受力结构深海腐蚀的快速预测及腐蚀防护提供了方法。鉴于数值仿真技术可大幅度提高装备环境适应性评价的效率，其作为一种先行技术手段，在深海装备腐蚀评估中必将得到广泛应用和快速发展。

2 深海环境试验方法标准化研究

美国等发达国家的环境试验工作开展较早，试验和评价标准较齐全，特别是实验室模拟环境试验标准，涉及自然环境试验的标准多达 850 个。我国的环境试验标准化工作起步较晚，20 世纪 80 年代各部门才依据自身需要，参照外国相关标准制定了一些自然环境试验方法标准[33-34]。由于缺乏急迫的需求，以及技术上的不成熟，深海环境试验标准处于缺失状态。对于一项成熟的试验技术，其最终必须形成一个标准，以便对技术进行更大范围的推广应用，确保相关试验结果的可比性，对从事深海装备研发、设计、生产和试验的人员起到指导作用，提高我国深海装备环境适应性、质量与可靠性水平[35]。

国内与深海环境试验方法相关的现有标准有，

GB/T 6384—2008《船舶及海洋工程用金属材料在天然环境中的海水腐蚀试验方法》、GB/T 5776—2023《金属和合金的腐蚀　金属和合金在表层海水中暴露和评定的导则》；国外的 ASTM G52《金属及合金的表面海水暴露试验的推荐程序》、DIN 50917T 2《金属的腐蚀——自然腐蚀试验——海水里的自然腐蚀试验》、ISO 11306《金属及合金的腐蚀　对海水表面的金属及合金的暴露和评估准则》等。上述标准均适用于试验站等浅表海水的自然环境试验，深海环境试验条件与表层海水存在很大不同，中国船舶七二五所在多年材料深海环境腐蚀试验研究及实践经验基础上，进一步开展了深海腐蚀方法标准研究，总结提升了试验方法，编制了 2 项深海环境试验标准[36-37]：ISO 23336: 2020“Corrosion of metals and alloys—Guidelines for the corrosion testing of metals and alloys exposed in deep-sea water”、ISO 5668: 2023“Corrosion of metals and alloys —Uidelines and requirements for corrosion testing in simulated environment of deep-sea water”。标准借鉴了国内外环境试验技术发展的最新成果，对材料深海环境试验条件、环境因素监检测、试验场地与装置、试验样品、试验程序、数据处理与结果表述等内容进行全面规范，充分反映了材料深海环境试验的特点，以实用性、先进性和可操作性为目标，建立了通用的材料深海环境试验的标准方法，标准的颁布实施，显著提升了我国在该技术领域的影响力和话语权，标志着深海试验进入到了一个新的阶段。

3　深海环境试验技术应用

3.1　深海自然环境试验技术应用

深海实海环境试验，主要用于材料及构件级别的实海暴露，积累材料深海环境腐蚀老化基础数据、环境因素数据，总结材料腐蚀老化性能随深度和时间的变化规律，发现深海环境腐蚀老化的特殊性，获得的结果真实，可直接用于深海海洋工程及装备/设施的设计、选材。

到目前为止，世界上仅有中国、美国、前苏联、印度、意大利、法国等少数国家开展了材料的深海实海环境腐蚀试验，其中试验持续较长、规模较大的是中国、美国和印度。美国海军土木工程实验室利用座底式试验装置，于 1962~1970 年在怀尼美港西南的海底进行了深度为 762~1 829 m 的材料深海腐蚀试验，暴露时间最长为 1 037 d。该试验的挂片接近 20 000 片，包括 475 种不同材料，涵盖了钢、铸铁、不锈钢、铜合金、镍合金、铝合金等多种金属。1968~1972 年，美国洛克希德公司开展了 7 种涂装铝合金和不锈钢材料的深海试验，试样分别投放于太平洋和大西洋，深度分别为 1 798、1 234 m。通过 10 a 的研究，获得了丰富的基础数据和腐蚀老化规律，总结了钢、铁、铜、铝等金属的腐蚀形态、腐蚀速率、点蚀深度随深度变化和时间变化的规律，最终形成了一部海水腐蚀手册，奠定了深海研究的基础[14-15,38-39]。

1987 年，印度研究者利用串型深海试验装置在阿拉伯海和孟加拉湾分别进行了 1 000、2 900 m 深度、1 a 周期的暴露试验，研究了低碳钢、不锈钢、黄铜、铜、铜镍合金的腐蚀行为，并与浅表海水中的腐蚀现象进行了对比。印度国家海洋技术研究所与其他机构合作，在印度洋进行了 500、1 200、3 500、5 100 m 深度的金属材料腐蚀性能研究，包括一般腐蚀、表面微观形貌电化学性能及腐蚀产物分析，暴露时间为 174 d。通过试验发现，低碳钢在深海中的腐蚀速率低于在浅表海水环境，不锈钢在深海中几乎不腐蚀，然而在浅表海水中点蚀严重，对于其他材料，海水深度对腐蚀的影响轻微[16-17,40-41]。

从 2008 年开始，洛阳船舶材料研究所率先开展了材料的深海自然环境腐蚀老化试验，利用系列化的深海试验装置，分别在我国南海、西太平洋、印度洋相继开展了 500、800、1 200、2 000、3 000 m 深度的深海环境试验，积累了 9 大类 40 余种不同材料、不同周期的深海腐蚀老化数据，试验材料包括碳钢、低合金钢、不锈钢、铜合金、铝合金、钛合金、偶合件、非金属复合材料、有机涂层、金属涂层、紧固件、牺牲阳极等，积累腐蚀数据 36 000 余个，并根据取得的数据中揭示出材料在深海环境下的腐蚀规律，对比了南海、西太平洋、印度洋海域典型材料的腐蚀性能，并与美国、印度等国的研究成果进行了比较[42-47]。在进行材料深海腐蚀数据积累的同时，积累了不同深度海洋环境因素数据，对试验海域海水温度、盐度、溶氧量、海流速度等环境因素进行了测试和收集，探讨了材料腐蚀与环境因素之间的关系，建立了我国首个材料深海腐蚀老化数据库，绘制了南海、西太平洋、印度洋海域深海环境腐蚀性热力图，填补了我国在深海环境中材料性能研究的空白，获得的基础数据对我国深海装备的发展具有重要意义。2022 年，南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）海洋工程材料与腐蚀控制创新团队利用“深海勇士”号载人潜水器顺利回收了于 2021 年 3 月份布放在海底 3 403 m 深海极端环境的工程材料深海腐蚀试验平台（DSC-1），包含碳钢、不锈钢、钛合金、高/中熵合金、非晶合金、粉末冶金钛、钛合金涂层、3D 打印钛、钛钢复合板等 8 种类型的 67 个深海试验样品。

3.2　深海模拟试验技术应用

深海环境实海试验可以直接反映材料在深海环境中的腐蚀性能，但是实海试验难度大，研究周期长，获得的数据量少，难以满足装备发展的需求。在实海数据的基础上，通过模拟海水环境，控制环境因素，利用电化学等方法表征材料性能，深入研究材料深海

环境腐蚀老化机理，包括但不限于海水环境因素对材料性能的影响机理、深海复杂工况材料的腐蚀老化机理等。

丛园[48]利用模拟试验方法分别研究了不同静水压力和缝隙对 316L 不锈钢的点蚀敏感性和钝化膜力学性能影响。孙海静等[49]研究了深海静水压力环境下低合金高强度钢在 3.5%的 NaCl 溶液中的腐蚀行为，并与常压下的结果进行对比发现，静水压力并没有对低合金钢的腐蚀行为造成影响。此外，金属腐蚀与防护国家重点实验室还展开了静水压力对纯镍腐蚀行为的影响[50]、深海环境下有机涂层失效等研究。孙静等[51]研究了 907A 低合金钢在模拟 1 000 m 深海环境中的腐蚀行为，并对其腐蚀机理进行了分析。刘杰[52]研究了深海静水压力对 2 种低合金钢腐蚀行为的影响。张海兵等[53]评价了深海牺牲阳极在模拟环境中的性能，研究了低温低氧环境对其的影响。

胡建朋等[54]则通过模拟南海某海域环境研究了 304 不锈钢在模拟深海和浅海中的应力腐蚀开裂（SCC）行为，发现 304 不锈钢在深海中为氢致开裂，在浅海中则主要为阳极溶解。张博[55]研究了 10CrSiNiCu 低合金钢在模拟深海环境下的氢渗透-应力腐蚀机制，并提出了一种利用电化学阻抗谱低频端感抗检测氢在金属表面吸附能力的测试方法。Sun 等[56]则采用电化学预充氢的方法，研究了高压下 X70 钢的氢渗透行为，以及充氢对 X70 钢在深海环境中应力腐蚀敏感性的影响规律。类似的深海应力腐蚀研究结果为深海装备的选材提供了依据。

4 发展趋势与应用前景

深海是未来世界军事与经济竞争的重要领域，是维护国土安全和国家权益的主战场。随着我国国家战略向深远海发展，服役于深海环境的装备越来越多，解决装备的深海腐蚀问题，保障装备的深海服役安全，离不开深海环境试验技术，离不开材料的深海环境适应性数据。装备的发展和服役环境的变化，对深海试验技术也提出了新的要求。

4.1 深海腐蚀环境试验技术发展趋势

1）试验对象系统化、整机化。目前无论是深海实海环境试验技术，还是模拟深海环境试验技术，研究能力局限于单一材料、小型试样及部分构件。然而由于尺度效应、偶接效应等，系统、整机腐蚀行为与小型试样存在差异，基于试样获得的数据无法满足深海装备安全评估、腐蚀防护需求。因此，深海环境试验的发展方向之一是开展部件、分系统、装备整机的深海试验。

2）试验手段智能化、可视化。目前实海试验技术主要通过实海投样-回收-实验室检测分析的技术手段开展，其局限性在于只能获取阶段性数据，而无法获取整个试验过程中材料的腐蚀老化数据，制约了材料腐蚀、老化行为及规律的研究。随着电子测控技术的发展，特别是深海原位测试手段的丰富，实海试验技术与图像采集技术、数据测试与传输技术集成，发展深海环境原位观测技术、大数据传输技术成为深海试验技术的重要发展方向。

3）模拟技术精确化、集成化。模拟深海试验技术可模拟控制的环境因素逐步拓展，实现温度、压力、含氧量、pH、盐度等多因素的监测与快速响应控制，精确模拟深海腐蚀环境。集成电化学监测技术、在线图像监测技术、裂纹扩展速度监测技术等，实现材料腐蚀性能的综合评价。模拟深海环境参数的精确化、测试的集成化是深海试验技术的发展趋势之一。

4）试验技术数字化、多样化。由于实际深海环境腐蚀试验投入大、风险高，只能在一些代表性深海海域进行试验，因此需要采用先进的数学建模和计算方法，以实际深海环境试验为基础，建立深海虚拟仿真试验技术。未来只要获取各大洋的深海环境因素，即可预测材料的深海腐蚀性能。

4.2 深海试验技术应用前景

海洋环境是自然环境中最为严酷的环境，海洋装备环境适应性问题突出，由腐蚀引发的故障或事故时有发生，严重影响了装备的安全性和使用效率，缩短了使用寿命，增加了维护成本。因此，将深海环境试验贯穿深海装备寿命期全过程，对于指导设计选材、优化结构布局、评价服役性能具有重要意义。深海试验作为环境试验的重要组成部分，是保障装备深海服役安全的重要支撑手段。

我国正逐步从近海走向深远海，各国对深海资源的争夺也日益激烈，深海装备未来的发展方向是大深度、长寿命、高可靠性，装备在深海中长期服役运行都必须要解决材料的腐蚀问题。深海环境试验技术不仅是研究材料腐蚀失效不可或缺的技术手段，也是深海防护技术研究的重要技术途径，也可以作为深海装备性能检验和验证的平台，深海试验技术必将在深海装备腐蚀防护领域大有用武之地，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] TRAVERSO P, CANEPA E. A Review of Studies on Corrosion of Metals and Alloys in Deep-Sea Environment[J]. Ocean Engineering, 2014, 87: 10-15.

[2] SHIFLER D A. Understanding Material Interactions in Marine Environments to Promote Extended Structural Life[J]. Corrosion Science, 2005, 47(10): 2335-2352.

[3] 包木太, 皮永蕊, 孙培艳, 等. 墨西哥湾“深水地平线”溢油事故处理研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 55-62.

BAO M T, PI Y R, SUN P Y, et al. Research Progress on "Deepwater Horizon" Oil Spill of Gulf of Mexico[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(1): 55-62.

[4] 郭为民，孙明先，邱日，等. 材料深海自然环境腐蚀实验研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术，2017，29(3): 313-317.

GUO W M, SUN M X, QIU R, et al. Research Progress on Corrosion and Aging of Materials in Deep-Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(3): 313-317.

[5] VENKATESAN R. Studies on Corrosion of Some Structural Materials in Deep Environment[D]. Bangalore: Department of Metallurgy, Indian Institute of Science, 2000.

[6] LAQUE F L. Marine Corrosion[M]. London: John Wiley and Sons Inc, 1975.

[7] CHADLER K A. Marine and Offshore Corrosion(Marine Engineering Series)[M]. London: Butter Worth, 1985.

[8] DEXTER S C. Effect of Variations in Sea Water upon the Corrosion of Aluminum[J]. Corrosion, 1980, 36(8): 423-432.

[9] SPARKS C P, CABILLIC J P, SCHAWANN J C. Longitudinal Resonant Behavior of Very Deep Water Risers[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1983, 105(3): 282-289.

[10] VENKATESAN R, VENKATASAMY M A, BHASKARAN T A, et al. Corrosion of Ferrous Alloys in Deep Sea Environments[J]. British Corrosion Journal, 2002, 37(4): 257-266.

[11] 郭为民，李文军，陈光章. 材料深海环境腐蚀试验[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 10-15.

GUO W M, LI W J, CHEN G Z. Corrosion Testing in the Deep Ocean[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 10-15.

[12] GRAY K O. Laboratory Simulation of the Deep-Ocean Environment[J]. Journal of Hydronautics, 1967, 1(1): 54-59.

[13] JENKINS J F. Pineering Studay of Deep Ocean Corrosion, 1960-1975[C]// Corrosion NACE 2006. San Diego: NACE, 2006.

[14] ULANOVSKII I. Corrosion of Metals in the Atlantic Ocean[J]. Prot Met, 1979, 15: 563-567

[15] ULANOVSKII I, EGOROVA V. Metal Corrosion at Different Depths in the Sea[J]. Prot Met, 1978, 14: 137-140.

[16] SAWANT S S, WAGH A B. Corrosion Behaviour of Metals and Alloys in the Waters of the Arabian Sea[J]. Corros Prev Control, 1990, 36: 154-157.

[17] SAWANT S S, VENKAT K, WAGH A B. Corrosion of Metals and Alloys in the Coastal and Deep Waters of the Arabian Sea and the Bay of Bengal[J]. Indian J Technol, 1993, 31: 862-866.

[18] FISCHER K P. Field Testing of CP Current Requirements at Depths Down to 1 300 m on the Norwegian Continental Shelf from 63 to 67°N[C]// Corrosion 99. San Antonio: NACE, 1999.

[19] DILER E, LARCHÉ N, THIERRY D. Cathodic Activity on Passive Materials in Deep Seawater[J]. Corrosion, 2020, 76(4): 344-355.

[20] DILER E, LARCHÉ N, THIERRY D. Carbon Steel and Stainless-Steel Cathodic Protection Design Data in Deep-sea Water-Influence of the Environment on the Biofilm Cathodic Activity[C]// NACE Corrosion 2019. Nashville: NACE, 2019.

[21] 郭为民，范林，侯健，等. 一种大载样量多功能深海环境试样框架、试验装置及试验方法：中国，ZL201610635265.8[P]. 2016-08-05.

GUO W M, FAN L, HOU J, et al. A Multi-functional Deep-sea Environmental Sample Framework, Test Device and Test Method for Large-load Samples: China, ZL201610635265.8[P]. 2016-08-05.

[22] 张博伟. 基于自抗扰控制技术的深海自持式剖面浮标定深控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.

ZHANG B W. Research on Depth Determination Control of Deep-Sea Self-Sustaining Profile Buoy Based on Active Disturbance Rejection Control Technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

[23] 郭为民，侯健，王军. 一种深海海泥环境的腐蚀试验装置: 中国, ZL201310073538.2[P]. 2014-09-24.

GUO W M, HOU J, WANG J. A Corrosion Test Device for Deep Sea Mud Environment: China, ZL201310073538.2[P]. 2014-09-24.

[24] 范林，郭为民，张彭辉，等. 一种深海环境腐蚀试验装置: 中国, ZL202110177602.4[P]. 2022-10-11.

FAN L, GUO W M, ZHANG P H, et al. A Deep-sea Environmental Corrosion Test Device: China, ZL202110177602.4[P]. 2022-10-11.

[25] 丁康康，郭为民，侯健，等. 一种深海多通道腐蚀电化学原位测试装置及其测试方法: 中国，ZL201610525240.2[P]. 2016-07-06.

DING K K, GUO W M, HOU J, et al. A Deep-sea-Multi-channel Corrosion Electrochemical In-situ Test Device and Test Method: China, ZL201610525240.2[P]. 2016-07-06.

[26] 丁康康，范林，郭为民，等. 典型金属材料深海腐蚀行为规律与研究热点探讨[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 107-113.

DING K K, FAN L, GUO W M, et al. Deep Sea Corrosion Behavior of Typical Metal Materials and Research Hotspot Discussion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(1): 107-113.

[27] 舒秀军. 深海超远程水声通信关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

SHU X J. Research on Key Technologies of Deep-Sea Ultra-Long-Range Underwater Acoustic Communication[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[28] 周建龙，李晓刚，程学群，等. 深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术，2010,

22(1): 47-51.
ZHOU J L, LI X G, CHENG X Q, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47-51.
[29] 屈少鹏, 程柏璋, 董丽华, 等. 2205 钢在模拟深海热液区中的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1094-1104.
QU S P, CHENG B Z, DONG L H, et al. Corrosion Behavior of 2205 Steel in Simulated Hydrothermal Area[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(8): 1094-1104.
[30] 郭刚. 综合自然环境建模与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
GUO G. Comprehensive Natural Environment Modeling and Simulation[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2004.
[31] 冯亚菲, 方志刚, 赵伊. 海军装备腐蚀仿真技术现状、挑战和展望[J]. 中国材料进展, 2020, 39(3): 179-184.
FENG Y F, FANG Z G, ZHAO Y. Status, Challenge and Prospect of the Technology of Corrosion Simulation on Navy Equipment[J]. Materials China, 2020, 39(3): 179-184.
[32] 庞震, 孙炜, 汤小波, 等. 碳钢/有机涂层在模拟大气环境中的失效研究与寿命预测[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(6): 637-642.
PANG Z, SUN W, TANG X B, et al. Degradation and Service Life Prediction of Organic Coatings/Carbon Steel in Simulated Atmospheric Environments[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(6): 637-642.
[33] 苏艳. 国内外自然环境试验标准体系探讨[J]. 中国标准化, 2003(3): 27-28.
SU Y. Announcement of Newly Approved National Standards of P.R.China[J]. China Standardization, 2003 (3): 27-28.
[34] 洪亮, 杨志宏, 崔旭涛. 海军导弹环境试验标准体系研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 65-69.
HONG L, YANG Z H, CUI X T. Study of Navy Missiles Environmental Test Standard System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 65-69.
[35] 周阳红生, 张洪彬, 薛海红, 等. 我国综合环境试验现状与发展建议[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 44-47.
ZHOU Y H S, ZHANG H B, XUE H H, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 44-47.
[36] ISO23336: 2020, Corrosion of Metals and Alloys—Guidelines for the Corrosion Testing of Metals and Alloys Exposed in Deep-Sea Water[S].
[37] ISO5668: 2023, Corrosion of Metals and Alloys—Guidelines and Requirements for Corrosion Testing in Simulated Environment of Deep-Sea Water[S].
[38] 舒马赫 M. 海水腐蚀手册[M]. 李大超, 杨荫, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985.
SCHUMACHER M. Handbook of Seawater Corrosion[M]. LI D C, YANG Y, Translate. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
[39] MILLER J D, WARREN B J, CHABOT L G. Microbiologically Influenced Corrosion of Gulf of Mexico Mooring Chain at 6, 000 Feet Depths[C]// Proceedings of ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro: [s. n.]. 2013.
[40] VENKATESAN R, DWARAKADASA E S, RAVINDRAN M, et al. A Deep Sea Corrosion Study of Titanium and Ti6Al4V Alloy[J]. Corrosion Prevention and Control, 2004, 51(3): 98-103.
[41] VENKATESAN R, MUTHIAH M A, MURUGESH P. Unusual Corrosion of Instruments Deployed in the Deep Sea for Indian Tsunami Early Warning System[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(6): 6-13.
[42] 张彭辉, 李显超, 仝宏涛, 等. $10CrNi_3MoV$ 钢在西太平洋深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(6): 1075-1080.
ZHANG P H, LI X C, TONG H T, et al. Corrosion Behavior of $10CrNi_3MoV$ Steel in Deep-Sea Environment of Western Pacific[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(6): 1075-1080.
[43] 彭文山, 段体岗, 马力, 等. $ZAlSi_7Mg$ 铝合金在深海环境中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报，2023, 43(3): 516-524.
PENG W S, DUAN T G, MA L, et al. Corrosion Behavior of $ZAlSi_7Mg$ Al-Alloy in Deep-Sea Environments in Western Pacific Ocean and South China Sea[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(3): 516-524.
[44] PENG W S, DUAN T G, HOU J, et al. Long-Term Corrosion Behaviour of 1060 Aluminium in Deep-Sea Environment of South China Sea[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2021, 56(4): 327-340.
[45] DING K K, GUO W M, QIU R, et al. Corrosion Behavior of Q235 Steel Exposed in Deepwater of South China Sea[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4489-4496.
[46] XING S H, HOU J, SUN M X, et al. In Situ Study of the Deep Sea Electrochemical Performance of Aluminum-Based Galvanic Anodes[J]. Materials and Corrosion, 2020, 71(12): 1946-1956.
[47] DING K K, FAN L, YU M J, et al. Sea Water Corrosion Behaviour of T2 and 12832 Copper Alloy Materials in Different Sea Areas[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2019, 54(6): 476-484.
[48] 丛园. 缝隙和静水压力环境对 316L 不锈钢腐蚀行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
CONG Y. Effect of Crevice and Hydrostatic Pressure Environment on Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
[49] 孙海静, 刘莉, 李瑛. 深海静水压力环境下低合金高强度钢腐蚀行为研究[J]. 电化学, 2013, 19(5): 418-424.
SUN H J, LIU L, LI Y. Corrosion Behavior of a High

Strength Low Alloy Steel under Hydrostatic Pressure in Deep Ocean[J]. Journal of Electrochemistry, 2013, 19(5): 418-424.

[50] 刘斌. 静水压力对纯镍腐蚀行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
LIU B. Effect of Hydrostatic Pressure on the Corrosion Behavior of Pure Nickel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.

[51] 孙静, 赵雨波, 李炳志, 等. 907A 低合金钢在模拟深海环境中的腐蚀行为及机理[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(12): 68-77.
SUN J, ZHAO Y B, LI B Z, et al. Corrosion Behavior and Mechanism of 907A Low-alloy Steel in Simulated Deep-sea Environment[J]. Corrosion and Protection, 2022, 43(12): 68-77.

[52] 刘杰. 模拟深海环境下有机涂层/低合金钢体系失效过程的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
LIU J. Simulation of the Failure Process of Organic Coating/low-alloy Steel System in a Deep Sea Environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.

[53] 张海兵, 马力, 李威力, 等. 深海牺牲阳极模拟环境电化学性能研究[J]. 材料开发与应用, 2015, 30(5): 63-67.
ZHANG H B, MA L, LI W L, et al. Electrochemical Performance of Deep-Sea Sacrificial Anode in Simulated Environment[J]. Development and Application of Materials, 2015, 30(5): 63-67.

[54] 胡建朋, 刘智勇, 胡山山, 等. 304 不锈钢在模拟深海和浅海环境中的应力腐蚀行为[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 9-14.
HU J P, LIU Z Y, HU S S, et al. Stress Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in Simulated Deep and Shallow Seawater Environments[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 9-14.

[55] 张博. 模拟深海环境 10CrSiNiCu 钢腐蚀及氢损伤行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
ZHANG B. Study on Corrosion and Hydrogen Damage Behavior of 10CrSiNiCu Steel in Simulated Deep Sea Environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.

[56] SUN F, CHENG X, LIU Z, et al. Stress Corrosion Cracking of X70 Steel in Deep Sea Environments[C]// EUROCORR 2013. Estoril: [s. n.], 2013.