

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.003

海洋自然环境加速试验技术与方法探讨

李彦, 罗续业, 马越, 邱泓茗

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 海洋自然环境加速试验技术是支撑海洋装备研制的关键性基础。本文系统剖析了物理冲击、化学腐蚀、生物污损等海洋多因素耦合环境对材料与装备的失效加速机制, 以及主要海洋自然环境试验技术, 提出基于坐底平台的海上全浸式动态加速试验方法。通过部署海上长期连续作业平台, 创新性融合深度梯度压力循环、营养物缓释生物刺激及微电流电化学偏置等原位应力强化技术, 在保真失效路径前提下显著缩短试验周期, 并建立环境补偿寿命评估模型。该方法相较于传统实验室模拟测试可突破环境多要素相关性局限, 为深海装备可靠性检验提供有效解决方案。研究成果可为我国海洋环境试验体系建设提供参考。

关键词: 海洋环境加速试验; 蒙特雷加速研究系统; 原位应力加载; 失效机理; 试验方法

中图分类号: P715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0022-09

海洋自然环境试验是一种直接在海洋环境中或通过模拟材料、装备及结构进行性能测试与评估的科学方法, 其核心目标是研究海洋环境因素(如盐雾、高压、低温、生物污损、冲击等)对被测对象的影响规律。经过100多年的发展, 海上自然环境试验技术已从传统的静态暴露试验发展为涵盖原位监测、深海极端环境模拟的综合性技术体系。随着全球海洋资源开发步伐加快和深海探测需求增长, 海上试验技术的重要性日益凸显, 已成为保障海洋工程安全、推动海洋科技创新的关键支撑。

步入21世纪, 全球气候变化与环境危机、科技与治理失衡等突出问题对海洋装备研发提出了迫切需求。海洋装备预定设计效能的实现, 须克服海洋环境应力与腐蚀相互作用的影响, 海洋自然环境加速试验技术成为支撑这一要求的关键性基础。以欧美为代表的海洋发达国家陆续建立了海上现场加速试验研究系统, 特别是在海底观测试验平台建设方面, 在全球范围内陆续建立了百余个, 在这些系

统中, 部署位置覆盖水深10~3000 m、离岸距离1~300 km的范围, 对认识海洋在气候系统中的作用、促进海洋水下探测新技术发展等方面, 发挥了不可替代的作用^[1-2]。

本文旨在以美国海洋加速研究系统为例, 剖析海上动态加速试验的基础理论与技术方法, 探讨工业生产中海上加速老化试验与海上加速应力试验的技术可行性及未来发展趋势, 并提出适合我国开展海洋自然环境加速试验技术的重点研究方向, 以期为我国海洋科技发展提供参考。

1 海洋环境影响因素及其行为规律

海洋环境对装备的作用呈现物理、化学与生物多因素层级耦合的复杂形态, 其交互效应显著加速材料失效与系统性能衰退^[3]。在物理层面, 海流冲击、波浪载荷、静水压力等流体动力作用可诱发结构疲劳损伤, 如海上锚系平台因强流、强浪作用

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2024-DFZD-29-01); 极地考察业务化与科研项目(N3250JD03)

作者简介: 李彦(1980—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事海底观测与海上试验技术研究。E-mail: yanli_ocean@163.com

通信作者: 罗续业(1961—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事海洋观测技术与装备研发研究。E-mail: luoxuye@vip.163.com

马越(1983—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海洋装备检验技术研究。E-mail: 117428375@qq.com

发生锚链断裂导致仪器偏移, 声学换能器外壳在深海高压下发生氢脆断裂^[4], 静水压力梯度压缩材料晶界微隙, 使 316 L 不锈钢在 3 000 m 深海的点蚀敏感性较浅海提升 2.3 倍。化学腐蚀过程受多参数协同调控, 海水中氯离子 (Cl⁻) 浓度约为 19 000 mg/L, 高盐介质的高导电性加速电位差腐蚀, 引发金属电化学溶解。溶解氧浓度随深度锐减, 表层 8 mg/L 的浓度到达 1 000 m 以深则小于 2 mg/L, 抑制了阴极去极化, 这虽使低碳钢在深海的全腐蚀速率降低 40%, 但加剧了局部腐蚀风险。同时, 4 ℃低温环境延缓腐蚀产物膜形成, 延长金属活性溶解周期, 与高压耦合导致钛合金应力腐蚀裂纹扩展速率提高至常压环境的 3 倍。生物因素通过代谢活动介导电化学过程, 硫酸盐还原菌 (Sulfate-Reducing Bacteria, SRB) 在金属表面形成生物膜, 分泌胞外聚合物 (Extracellular Polymeric

Substances, EPS) 构建缺氧微环境, 其代谢产生的 H₂S 与 Fe²⁺反应生成导电性 FeS, 加速碳钢电偶腐蚀, 藤壶等大型生物附着则破坏有机涂层完整性, 形成氧浓差电池并促进 Cl⁻渗透, 致使船体涂层下腐蚀坑深度年均增长 0.5 mm, 传感器探头在热带海域因生物污损腐蚀造成数据偏差等^[5-6]。

更为关键的是, 海洋环境的影响通常表现为多因素非线性叠加效应 (表 1)。以海洋声学设备为例, 温度-盐度剖面决定声速梯度, 进而影响水下噪声传播损耗, 而浮游生物昼夜垂直迁移产生的散射层导致声呐信号起伏超 15 dB。海洋环境多因子耦合特性的影响, 不仅体现在材料层级的加速老化, 更体现在引发系统层级的功能退化, 这需要通过跨尺度耦合模型去揭示作用机制, 为装备长效防护提供理论支撑。同时, 这一特点也显著增加了海上试验技术开发的复杂性。

表 1 海洋环境因素对海洋仪器装备影响的常见失效模式与机理

序号	海洋环境因素	失效模式	失效机理
1	盐度、异金属接触、静水压力、溶解氧	电化学腐蚀	点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂
2	微生物膜、生物附着、氮磷超标	生物污损	传感器堵塞、流体通道阻塞、转动部件卡死
3	深水高压、温度梯度、材料蠕变	高压密封	壳体破裂、密封圈泄漏、压力传感器漂移
4	波浪能量、海流流速、涡旋	流体冲击	结构疲劳断裂、支架变形、仪器位移
5	气温日变幅、相对湿度、紫外辐射	温湿交变	电路短路、涂层剥落、光学元件雾化
6	悬浮沙浓度、颗粒硬度、水流剪切力	沉积物磨损	机械磨损、密封面划伤、光学窗口模糊
7	pH、低温 (深海、极地)	极端环境耦合	材料性能退化、电子元件瞬断、能源系统崩溃

2 海洋自然环境试验技术与方法

2.1 静态暴露试验技术

静态暴露试验最早可追溯至 20 世纪初的美国, 主要用于研究自然条件多种因素综合作用下材料、工艺、元器件的响应机制和规律。20 世纪 70 年代, 南佛罗里达海水与海洋大气腐蚀试验站基于 11 个近海海洋试验场和太平洋深海试验场的静态暴露试验结果, 公布了 52 种材料 16 年的腐蚀数据及 475 种合金材料 3 年的腐蚀数据, 为耐腐蚀材料和涂层技术发展提供了有力的数据支撑^[7-9]。

2024 年, 我国中交四航工程研究院有限公司编写了国际首部《海洋长期暴露试验站设计与运行指南》, 标志着海水静态暴露试验已发展为系统性工程^[10]。这种试验方法遵循自然条件周期变化, 是最

直接的试验方法, 但缺点是试验周期较长, 通常在 5 年以上, 少则也要 1—2 年, 显然不能满足新材料、新工艺、新技术快速发展的需求。

2.2 动态暴露试验技术

动态暴露试验主要用于海洋装备环境适应性和可靠性检测, 也是我国海洋监测技术装备最常用的一种海试方法。目前主要有基于船载的海上移动平台试验方法、基于锚系平台的海上固定平台试验方法和基于坐底式平台的深水试验方法等, 方法的核心是与国际先进的同型号产品进行现场比测验证。如国产温盐深测量仪 (Conductivity Temperature Depth, CTD) 与美国海鸟公司同类型产品进行海上现场原位比测, 通过对比观测数据的精确度和准确度的一致性进行国产技术性能评价^[12-15]。但这种方法受限于时空测试尺度, 本质上仍是功能性的现场验证, 存在很大的不确定性。

美国在这方面已形成“数字孪生驱动、多源数据融合、全生命周期评估”的完整体系,构建了涵盖以水声阵列为代表的声学测试、坐底式高压模拟装置的材料环境适应性试验及光电复合缆岸基连接的能源信息保障系统等综合技术链^[11,17],实现装备在真实复杂海况下的长期验证。

2.3 加速暴露试验技术

加速暴露试验比实验室内模拟加速试验更接近实际使用环境。20 世纪 60 年代,美国阿特拉斯耐侯集团研制了跟踪太阳暴露试验机,广泛用于有机高分子材料及制品的自然加速暴露试验,并在此基础上研制出将太阳辐射强化 60 倍的超高加速自然环境试验系统,成功解决了样品表面温度控制的难题^[6]。

海上全浸式加速试验方法仍以美国较为先进,如蒙特雷湾试验场建立的蒙特雷加速研究系统(Monterey Accelerated Research System, MARS)^[17],集科学、技术、工程于一体,通过环境应力强化、数据实时性与失效机理关联实现长时间尺度的现场寿命加速试验,以工程创新压缩认知周期;大西洋水下测试与评估中心部署的固定式水下噪声测量系统,在 1 300 m 水深布设大型直线阵列,配备双圆锥框架式水听器阵列,支持实时数据采集与处理,具备高频次、多场景覆盖的动态加速测试能力,同时通过海底网络辅助连接导航及通信模块,实现水下装备的实时通信测试,显著缩短了传统分阶段试验周期。

受海洋环境条件限制,我国海洋装备研制仍以实验室内模拟加速试验为主,通常采用高加速应力筛选和高加速寿命试验两种方法。环境应力筛选是提高装备质量的可靠性试验手段之一,高加速应力筛选技术已成为实验室产品加速试验标准方法。有调查结果表明温度循环与随机振动相结合的应力筛选试验可以筛出 90% 的缺陷^[18-21]。为进一步提升装备可靠性测试效率,研究人员突破了多因素综合气候模拟加速试验技术,研制了多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱,可以同时开展光照、盐雾、温度、湿度和风速 5 种环境要素的综合加速试验,为材料腐蚀、工艺改进、关键部件筛选等提供性能指标验证的加速试验^[22-23]。实验室模拟难以复制真

实环境的复杂性,且人为设定失效因子的边界条件可能导致实验室特有失效模式的产生,难以发现自然使用环境中的失效模式,如热膨胀系数不匹配引发的电路板焊点裂纹等。

近些年有学者研究发现,由于海洋环境的复杂性,室内环境模拟加速试验与海上现场使用并无明显相关性^[24-25],因此,本文提出现场自然环境加速试验研究的构想。实验室环境模拟加速试验与自然环境相关性、海上现场加速暴露试验将成为海洋试验科学未来发展的重要研究方向。

3 基于 MARS 的海上动态加速试验技术与方法

美国部署在蒙特雷湾试验场的 MARS 在水下 900 m 建立了坐底试验平台,如图 1 所示。平台由一条海底光电复合缆将岸基站电能输送至海底试验基站,基站提供 400 V/48 V/24 V/12 V 直流电,具备 100 M/1 000 M 高速通信不间断连续测试功能,支撑海洋技术装备长期原位试验。该平台最初是一个海底观测网建设和运维的原型系统,其核心目标是进行组网技术的现场验证,并通过持续供电与高速数据传输,加速海洋科学研究的认知进程。这里的“加速”是指通过实时、长期、高分辨率的数据获取与共享机制,大幅缩短海洋观测与科学发现的周期。随着海洋探测新技术发展带来的测试需求,后又成为海上现场加速试验平台,赋予了“海上加速老化试验”功能,支撑了单点式新型探测传感器、分布式声学传感器(Distributed Acoustic Sensor, DAS)等创新技术的研发和应用。

3.1 基础理论与核心技术

MARS 基于原位实时监测理论,强调在真实海洋环境中直接获取连续数据,避免传统间歇式采样带来的信息缺失。依托海洋立体感知技术体系,融合海洋流体力学、海洋生物学、海洋地质学等多物理场环境传感技术,通过长期部署传感器网络捕捉瞬态事件,并揭示长周期变化规律。如集成 CTD、声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、溶解氧传感器、浊度传感器等,实现对温度、盐度、流速、浊度等海洋动力环境参数的原位同步采集,基于高级精简指令集处理器(Advanced

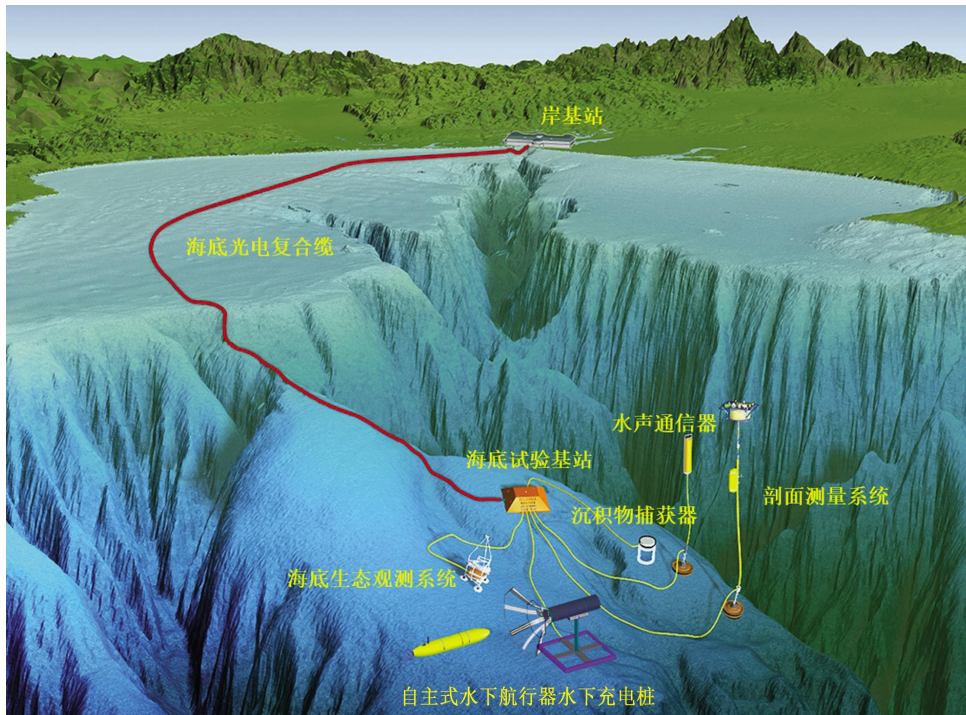


图 1 MARS 海上试验设施组成架构

RISC Machine, ARM) 架构嵌入式系统, 搭载 Linux 操作系统, 实现低功耗长期运行与实时数据预处理。

在技术实现上, MARS 基于分布式系统理论, 采用网络化节点架构, 通过海底光电复合缆连接多个观测节点, 实现数据与电力的分布式传输。这种设计基于通信理论与嵌入式系统协同控制理论, 确保在深海高压环境下稳定运行。海底电缆传输电能, 经基站节点高低压电能转换设备为海底仪器设备提供 400 V 直流电, 支持其连续工作。10 GB 高速光纤通信采用波分复用技术, 在单根光纤中分离数据通道与传感通道, 确保监测数据与科研通信互不干扰。

MARS 海底主干缆不仅是电力和通信传输的载体, 也是新技术创新试验的主体。如地震监测前沿技术 DAS, 利用系统 52 km 海底电缆中的光纤发送超短脉冲激光, 将单根光纤转化为连续的声学传感器阵列, 实现分布式声波监测。2018 年开展的“暗光纤”实验中, 将 20 km 长的电缆转化为 10 000 个独立运动传感器, 成功观测到风暴潮、内波及新断层^[29], 如图 2 所示。图 2(a)和图 2(b)分别为 MARS 海底试验部署位置和 DAS 试验获取的新断层分布。在 2022 年连续一年的试验中, 以 200 Hz 的采样率

沿整个电缆长度采集连续的地震数据, 成功监测到 100 多起地震事件, 包括浅海微震^[27]。

3.2 试验原理

传统工业中的加速老化试验是在保证不改变产品失效机理的前提下, 通过强化试验条件, 使受试产品加速失效, 以便在较短时间内获得必要信息, 来评估产品在正常条件下的可靠性或寿命指标。无论加速寿命试验 (Accelerated Life Testing, ALT) 还是加速应力试验 (Accelerated Stress Test, AST), 基本原理均是加强应力条件。MARS 将实验室模拟应力条件搬到海洋环境多物理场耦合作用的真实场景中, 通过强化压力、温度、测量周期等海洋环境使用中的应力条件, 开展海上现场加速试验。这里主要探讨结合 MARS 深海原位、长期连续、多参数协同的试验能力, 通过环境应力强化、数据实时性与失效机理关联开展“海上 ALT”与“海上 AST”。

3.3 试验对象

海上加速试验的研究对象覆盖海洋技术装备全链条关键要素, 包括设备类、传感器类、材料类、结构类等 (表 2), 可结合实际海洋失效模式与工程验证需求选取不同试验对象, 本文主要针对坐底式原位观测系统。

仪器设备类试验对象, 可选取原位观测仪器

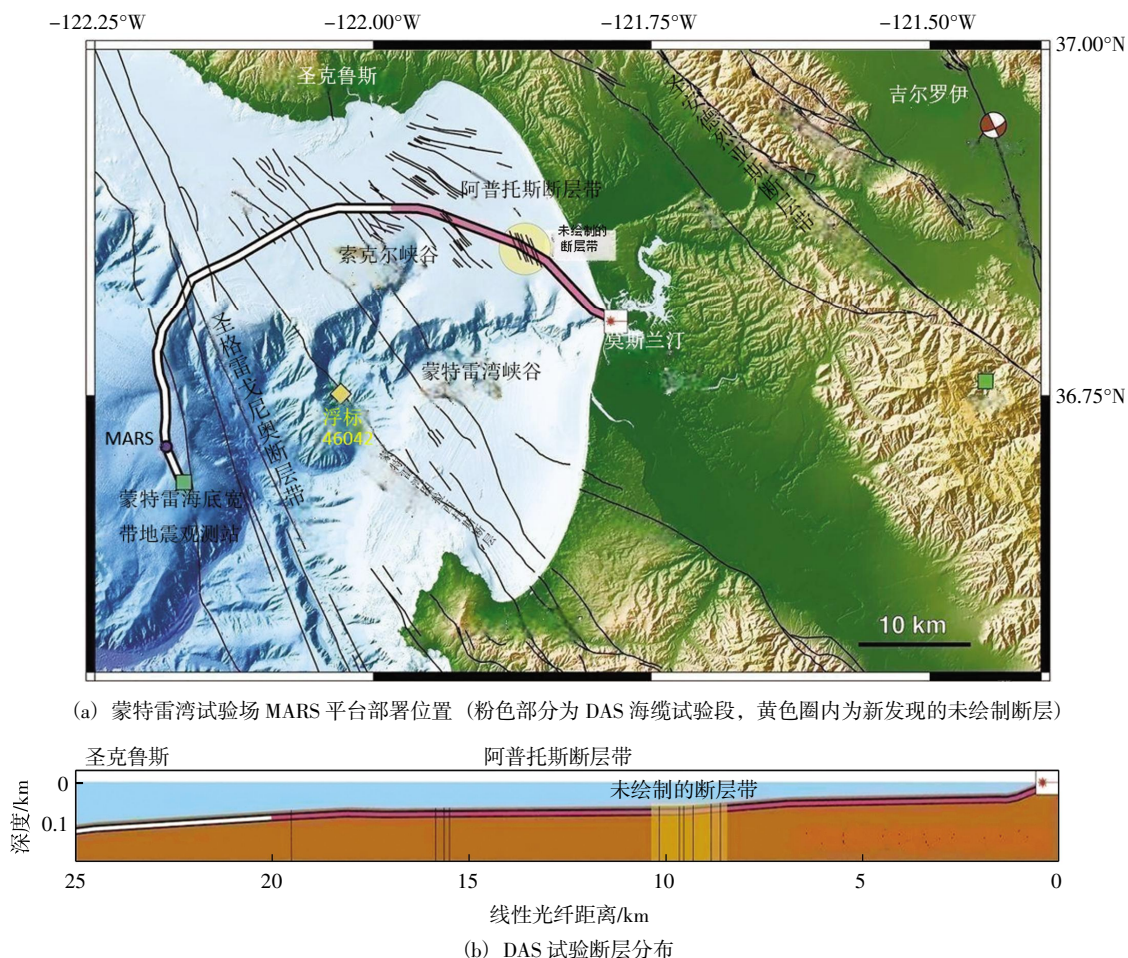


图 2 MARS 开展的 DAS 海上试验

表 2 基于坐底平台的海上加速试验主要试验对象

序号	类别	具体对象	核心验证内容
1	设备类	原位观测探仪器: CTD、ADCP、多参数水质仪等 能源信息类装备: 海底光电复合缆、接驳盒等	高压密封性能、生物污损干扰 电化学腐蚀、机械疲劳
2	传感器类	声学传感器: DAS 等 光学传感器: 水下摄像机、激光测距仪等	高压-低温耦合环境下的声学响应失真 抗生物附着/沉积物磨蚀性能
3	材料类	金属结构材料: 钛合金 TC4、不锈钢 316L 等 防护涂层	深海高压环境应力腐蚀、电偶腐蚀 抗老化性能
4	结构类	密封系统: O 形橡胶密封圈等 安装框架	压力循环下的密封可靠性 海流-波浪耦合载荷疲劳强度

设备, 以 CTD、ADCP、多参数水质仪为代表, 重点验证高压密封性能及生物污损干扰, 如 9 MPa 静水压力下的壳体蠕变与生物附着导致传感器信号漂移等。也可选取能源信息类装备, 以海底光电复合缆、接驳盒为代表, 重点考核长期通电工况下的电化学腐蚀与机械疲劳, 如 Cl⁻介导的电解腐蚀、低温下海流涡激振动引发的铠装层断裂等。

传感器类试验对象除传统的电磁类外, 还包括声学、光学类传感器等, 如 DAS 水听器通过光纤

应变监测验证高压-低温耦合环境下的声学响应失真。水下摄像机镜头、激光测距仪等主要用于验证光学窗口生物附着或沉积物磨蚀等。

材料类试验对象可以测试金属结构材料及防护涂层, 如钛合金 TC4、不锈钢 316L 等, 研究深海高压环境应力腐蚀开裂及异金属接触电偶腐蚀, 环氧树脂基防污涂层, 量化生物膜-紫外线辐射协同作用下的老化速率等。

结构类试验对象包括密封系统及安装框架等,

如 O 形橡胶密封圈在压力循环下的压缩永久变形, 平台支架的海流-波浪耦合载荷疲劳等, 20 年服役期可等效加速至 2 年。

在紧密结合实际海洋环境失效模式与工程验证需求的同时, 还应考虑选取试验对象的环境敏感性、加速可行性和数据可测性。环境敏感性指存在明确海洋环境失效机理, 如表 1 所列 7 类失效模式。加速可行性指具备原位应力加载路径, 如深度梯度压力循环。数据可测性指支持实时状态参数采集, 如接驳盒实时运行状态监测等。

3.4 试验方法

以新型深海原位测量 CTD 为例, 说明利用 MARS 实现原位加速试验的方法。加速应力主要包括深度梯度、动态海洋环境、长期连续供电与数据传输。MARS 海水深度梯度从 20 m 至 900 m, 形成了从 0.1 MPa 至 9 MPa 的天然压力梯度, 温度与盐度存在季节波动, 长期连续且频率可调的工作周期可以实现基于时间或事件的加速。

3.4.1 失效机理与环境映射

对于全浸式试验, 深海和浅海对装备性能影响的环境应力不尽相同, 浅海主要是温度、盐度、溶解氧、pH、生物附着、流速等, 深海则主要是压力、生物附着及综合应力。

根据表 1 可知, 同一台海洋仪器在海洋环境中工作存在不同的失效模式。CTD 原位加速试验设计中面临的失效机理主要包括压力壳体腐蚀疲劳、电极生物污损、密封材料蠕变等。在深海 900 m 高压环境下, 钛合金壳体应力腐蚀开裂、电极式电导池的电解腐蚀或生物污损、密封 O 形圈的压缩变形均可能导致仪器失效。

3.4.2 多节点协同加速试验设计

本文主要针对深水高压、浅水富营养化及海流振动等环境因素开展加速试验设计, 分别在浅水、中深、深水节点布放 CTD。浅水节点主要利用温盐波动、海流振动和生物活跃等自然条件, 重点开展生物污损加速试验。中深节点主要利用季节性变化, 重点开展腐蚀热循环耦合加速试验。深水节点主要利用高压、低温等条件, 重点开展壳体压力加速试验。

3.4.3 原位应力加载增强

在浅水节点的 CTD 表面安装营养物缓释装置, 释放磷酸盐/硝酸盐, 刺激生物膜生长速率。根据电化学腐蚀原理, 海水中金属发生阳极极化加速其溶解反应, 不锈钢在 4℃、3.5%氯化钠 (NaCl) 溶液中的点蚀电位为 0.4 V^[28], 在沿海高湿环境中钝化膜破坏电位为 0.5 V。中深节点的 CTD 外壳采用不锈钢材质, 将其置于强阳区, 电极施加微电流偏置 (+0.5 V vs 银 (Ag) /氯化银 (AgCl)) 促进电化学腐蚀。在深水节点, 通过 MARS 的水下机器人 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 定期将深水组 CTD 转移至浅水, 部署一个月后再返回深水节点, 模拟压力循环 $\Delta P = 8.8$ 兆帕/次。

3.4.4 数据采集与失效诊断

实时获取海洋环境监测科学数据和仪器设备运行状态参数数据, 包括海水温度、盐度、压力、溶解氧、海流、pH 和仪器设备内置的温度、湿度、蠕变累积量、电导率漂移率等。同时配有高清摄像机和浮游生物测量仪, 用于捕捉大型生物和微生物, 激光测距仪测量微生物附着厚度, 声学水听器检测密封失效气泡声等。

3.4.5 寿命评估模型

在 MARS 系统加速寿命试验中, 将压力、盐度、生物等多应力耦合作用作为加速因子关联加速条件与正常条件下的寿命, 重点在于直接用于寿命评估的环境补偿因子模型, 因此, 基于环境补偿因子模型的寿命评估公式如下。

$$K = K_{deph} \times K_{bio} \times K_{flow} \quad (1)$$

$$L = ML \times K \quad (2)$$

式中, K 为环境补偿因子; K_{deph} 为目标使用深度/试验节点深度; K_{bio} 为目标使用溶解氧/试验节点溶解氧; K_{flow} 为目标使用流速/试验节点流速; L 为真实寿命; ML 为 MARS 试验寿命。

关于温度、盐度、pH、叶绿素 a 浓度等参数可根据实际使用环境进行模型修正。例如, 对于考虑增加温度应力的加速试验, 采用 Arrhenius 模型计算温度影响因子 (K_{temp})。

$$K = K_{deph} \times K_{bio} \times K_{flow} \times K_{temp} \quad (3)$$

$$K_{temp} = \exp((Ea/R) \times (1/T_{use} - 1/T_{test})) \quad (4)$$

式中, Ea 为失效机理的活化能; R 为玻尔兹曼

常数; T_{use} 和 T_{test} 分别为使用条件和试验条件下的绝对温度。

最后, 进行失效机理分析并进行设计改进。

4 结论及展望

4.1 结论

基于 MARS 海上动态加速试验较传统实验室内模拟试验具有支持综合耦合效应、长期蠕变行为、多源数据实时诊断等技术优势, 尤其在深海极端环境下, 可大幅缩短研发周期、降低工程风险。但同时存在一些问题。

(1) 动态海洋环境的不可控干扰, 如温度/盐度波动、生物扰动及海流变化导致监测数据噪声显著, 且多应力耦合效应易引发失效机理混杂, 传统实验室的单一变量控制策略在此失效。

(2) 深海部署的高成本与操作复杂性将试验样本量限制在极小规模, 加之长周期试验难以重复, 致使统计推断面临小样本不确定性风险。

(3) 加速机制的真实性保障存在根本矛盾, 通过主动增强措施, 如浅水区营养物缓释或电极微电流偏置, 虽可缩短试验周期, 但可能改变自然失效路径, 而利用深度梯度产生的压力/生物差异需建立

复杂的环境补偿模型以避免寿命外推失真。

4.2 展望

为突破这些技术瓶颈, 建议未来重点开展以下研究。

(1) 针对环境干扰, 构建智能感知-滤波融合体系。在试验对象周边部署温/盐/压/流多维传感器阵列, 建立环境参数与退化速率的传递函数模型, 并集成小波分解与长短期记忆 (Long Short-Term Memory, LSTM) 神经网络, 实现生物扰动噪声的主动滤除。

(2) 针对小样本困境, 开发贝叶斯驱动数据增强框架。融合历史故障数据与同节点多设备并行监测轨迹, 通过 Weibull-Bayes 分层模型提升寿命评估置信度。

(3) 针对加速失真风险, 创新原位混合加速机制。在保持深度梯度压力和季节性温变等自然应力场基础上, 采用受控营养物梯度释放与微电流偏置, 实现失效路径保真加速。同步构建包含压力因子、生物因子的动态补偿模型, 结合 ROV 搭载的激光扫描和声学泄漏阵列等原位诊断设备, 形成深海环境失效机理闭环验证能力, 最终将试验周期缩短。

参考文献:

- [1] FAVALI P, BERANZOLI L, SANTIS A D. Seafloor observatories: A new vision of the earth from the abyss[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [2] 海洋地质国家重点实验室 (同济大学). 海底科学观测的国际进展[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [3] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- [4] 项琦峰, 赵阳, 张涛, 等. 模拟浅海及深海环境中阴极极化对 10CrNi5MoV 钢氢脆敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(6): 1599-1609.
- [5] 马士德, 郭为民, 刘欣, 等. 工业纯钛 (TA2) 在南海三亚海洋环境试验站海水全浸的生物污损与腐蚀[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 23-30.
- [6] 李友焜, 邓培昌, 王贵, 等. TC4 钛合金实海污损生物附着行为与腐蚀机理研究[J]. 表面技术, 2024, 53(24): 110-119, 132.
- [7] 舒马赫, 李达超, 杨荫, 等. 海水腐蚀手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] 夏兰廷, 王录才, 黄桂桥. 我国金属材料的海水腐蚀研究现状[J]. 中国铸造装备与技术, 2002, 6: 1-4.
- [9] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展[J]. 新技术新工艺, 2013, 8: 68-74.
- [10] LI K F, ZENG J J, TANG L P, et al. RILEM recommendation from TC 289-DCM: Guideline for designing and operating long-term marine exposure sites[J]. Materials and Structures, 2024, 57: 44.
- [11] 庞业珍, 俞孟萨. 国外水下噪声试验手段发展趋势[C]//第十五届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 无锡: 中国船舶科学研

- 究中心, 2015: 43-57.
- [12] 任强, 于非, 魏传杰, 等. 温盐深测量仪 (CTD) 资料质量对比分析[J]. 海洋科学集刊, 2016, 51(51): 288-295.
- [13] 雷发美, 商少平, 贺志刚, 等. 两型国产 CTD 海上比测试验结果分析[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(1): 136-143.
- [14] 靳萍. 基于水下平台 CTD 性能试验评价方法研究[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2021.
- [15] 周凯, 杨健, 张挺, 等. CTD 海上剖面测量性能综合评定方法研究[J]. 海洋技术学报, 2024, 43(2): 18-26.
- [16] 周堃, 王莞, 杨小奎, 等. 自然环境试验与观测体系化发展综述[C]//OSEC 首届兵器工程大会论文集. 重庆: 重庆市兵工学会, 2017: 650-653.
- [17] MASSION G, RAYBOULD K. MARS: The Monterey Accelerated Research System[J]. Sea Technology, 2006, 47(9): 39-42.
- [18] SAAD E S, GARBATOV Y, GUEDES S C. Experimental assessment of corroded steel box-girders subjected to uniform bending[J]. Ships and Offshore Structures, 2013, 8(6): 653 - 662.
- [19] GARBATOV Y, SAAD E S, GUEDES S C, et al. Tensile test analysis of corroded cleaned aged steel specimens[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2019, 54(2): 154-162.
- [20] 谢干跃, 宁书存, 李仲杰. 可靠性维修性保障性测试性安全性概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [21] 张利军, 韩维航. 环境试验与环境应力筛选试验辨析[J]. 机械管理开发, 2011, 6: 18-20.
- [22] 王俊芳, 李希, 殷宗莲, 等. 多因素综合海洋气候模拟加速试验技术在紧固件表面处理工艺筛选中的应用[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 175-180.
- [23] 杨晓然, 赵方超, 杨小奎, 等. 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 141-150.
- [24] SKILBRED A W B, ARNTZEN O A, AMODT T. Field testing-on the correlation between accelerated laboratory tests and field testing[C]//NACE-International Corrosion Conference Series. Nashville: Association for Materials Protection and Performance, 2019: 3109-3117.
- [25] KNUDSEN A W B, SKIBRED A, LOKEN B, et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103729.
- [26] LINDSEY N J, DAWE T C, AJO-FRANKLIN J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [27] ROMANOWICZ B, ALLEN R, BREKKE K, et al. SeaFOAM: A year-long DAS deployment in monterey bay, california available to purchase[J]. Seismological Research Letters, 2023, 94(5): 2348-2359.
- [28] 王晶, 尚新春, 路民旭, 等. 316L 不锈钢在不同环境中点蚀形核研究[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 12-18.

Discussion on Accelerated Testing Technologies and Methods for Marine Natural Environments

LI Yan, LUO Xuye, MA Yue, QIU Hongming
(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Marine natural environment acceleration testing technologies serve as critical foundations supporting the development of marine equipment. This paper systematically analyzes the accelerated failure mechanisms of materials and equipment under coupled marine environmental factors including physical impact, chemical corrosion, and biological fouling, as well as the main Marine natural environmental test technology. A novel fully-immersed dynamic acceleration test method based on seafloor platforms is proposed. By deploying long-term continuous operation platforms and innovatively integrating in-situ stress enhancement techniques such as depth gradient pressure cycling, nutrient-release bio-stimulation, and micro current electrochemical biasing, the experimental cycle is significantly shortened while preserving authentic failure pathways. An environmental compensation life assessment model is established. Compared with traditional laboratory simulations, this method overcomes limitations in environmental multi-factor correlation, providing an efficient solution for reliability testing of deep-sea equipment. The research findings offer reference for the marine testing system development.

Keywords: marine environmental acceleration testing; Monterey Accelerated Research System; in-situ stress loading; failure mechanisms; test method