

海底管道泄漏安全防控与应急响应技术探究

刘广顺 (中海石油 (中国) 有限公司天津分公司, 天津 300450)

摘要: 海底管道受到腐蚀、地质灾害和船舶抛锚等多种威胁, 会导致管道泄漏事故发生。海底管道泄漏在造成重大经济损失的同时, 也会造成油气资源的浪费、海洋生态环境的破坏、污染海水、危害海洋生物多样性, 同时也会给海上作业人员的生命安全带来严重威胁。所以本文对海底油气管道的环境与风险进行分析, 讨论了海底管道泄漏安全防控措施以及海底管道泄漏应急响应技术, 以期能够为相关人员提供参考, 确保海洋资源开发活动可持续发展。

关键词: 海底管道; 泄漏; 安全防控; 应急响应

中图分类号: TE58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0144-03

Research on Safety Prevention and Emergency Response Technology for Submarine Pipeline Leaks

Liu Guangshun (CNOOC (China) Limited Tianjin Branch, Tianjin 300450, China)

Abstract: Submarine pipelines are threatened by various factors such as corrosion, geological disasters, and ship grounding, which can lead to pipeline leakage accidents. Submarine pipeline leaks not only cause significant economic losses but also result in the waste of oil and gas resources, damage to marine ecosystems, pollution of seawater, and harm to marine biodiversity. Additionally, they pose serious threats to the lives of offshore workers. Therefore, this paper analyzes the environment and risks of submarine oil and gas pipelines, discusses safety prevention measures for submarine pipeline leaks, and explores emergency response technologies for submarine pipeline leaks, aiming to provide references for relevant personnel and ensure the sustainable development of marine resource exploitation activities.

Key words: submarine pipeline; leakage; safety control; emergency response

海洋中高压、低温、强腐蚀以及强水流动力, 会对海底油气田管道材料性能以及结构稳定性都有苛刻要求。事故发生后不仅会造成重大经济损失, 而且可能导致海洋生态灾难严重, 长期后果不可估量。所以加强海底油气田管道安全防护和应急救援体系建设, 是目前急需解决的一项重要任务。

1 海底油气管道的环境与风险

海底油气管道所处的环境存在显著特殊性, 管道的运行安全受到多重环境要素的约束。在垂直维度上, 静水压力随水深的增大而线性增大, 这对管道材料抗压强度和密封性能有了更高的技术要求, 而深海区域高压环境, 容易使管体应力集中而造成结构形变或者焊缝开裂。在水平方向, 海流持续冲刷作用, 将使管道周围海床形态发生变化, 周期性流速波动有可能引起涡激振动, 并加速支撑结构的疲劳损伤; 同时海水高盐度特性, 又通过电化学反应强化了金属腐蚀过程, 特别是潮差带地区干湿交替状态, 使防腐涂层效能进一步退化^[1]。

底层条件又构成了另外一个至关重要的因素, 黏土质沉积物由于高压压缩性容易发生不均匀沉降, 而砂质底层由于渗透性较强而被部分掏空, 粉砂质沉积物受到动力扰动时, 可能会产生液化现象。这类地质参数差异, 对管道埋设深度设计标准有直接影响, 而不

恰当的敷设方案会导致管段悬空或者过多嵌埋, 前一种情况会增加机械损伤的风险, 后一种情况会妨碍热应力的释放。另外, 生物附着群落还通过代谢产物使局部微环境 pH 值发生变化, 藤壶等硬质生物的附着形成点蚀核, 会加速局部腐蚀穿孔。

2 海底管道泄漏安全防控措施

2.1 完善应用定期检测技术

定期检测技术是保证海底油气管道安全服役的核心保障。无损检测技术 (NDT) 是一种不需破坏的、主要依据各类物理原理, 进行内部探伤工作的核心技术和手段。其中超声检测通过高频率的声波对管壁的穿透作用, 根据回波时间差, 测定壁厚变化和内伤缺陷; 电磁检测主要是基于涡流或者磁通量变化, 测定管体表面及周边的腐蚀缺陷与裂纹; 射线检测是在定向辐射辅助下穿透管道, 通过物质对射线吸收率的差异, 获得反应其内部结构的影像, 以此判断隐藏缺陷。这几种方法都不会对管道本体造成损坏, 就可以获取关键性的健康状态数据, 为后来的维修决策提供客观依据^[2]。

水下机器人巡检系统, 是自动化、智能化巡检的一个重要发展方向。该系统配备高清视觉模块、多波束声呐和侧扫声呐及多种水质、流速和温度传感器等设备, 具有自主航行和悬停作业能力。其实现了对复

杂海况的远程遥控或者预设路径巡检, 担负着管线从地形测绘到管体外观的可视检查, 再到周边冲刷淤积情况的评价和海洋环境参数的同步获取等诸多责任。

以上三类关键技术并不是孤立应用的, 而是要根据管道的风险等级、服役年限和环境特点等进行科学规划, 组合部署, 构成一个相互补充协同的综合探测方案。该集成化策略可显著提高管道全生命周期健康状况掌控力, 显著减少泄漏事故发生概率, 有力地保证海底油气资源输送系统长期安全平稳运行。

2.2 选择有效的维修技术与材料

在海底管道运行过程中, 由于腐蚀、外力破坏或者地质活动对管体造成破坏, 需要采用科学有效的维修技术和适配材料, 来恢复管道完整性, 确保能源输送的安全性。对于海底管道破坏的修复技术, 可以分为非开挖修复和水下直接干预 2 种类型。非开挖修复技术以最小化环境干扰为核心原则, 主要包括机械夹具加固、内衬贴片修补及复合材料强化三种方式。该机械夹具采用定制化的金属构件, 在损伤区域施加环向约束, 并使用预紧力和密封结构来达到临时止漏和结构支撑的目的, 适合突发性裂纹或者局部变形的应急工况^[3]。

内衬贴片技术是利用耐腐蚀的合金或者高分子复合材料, 结合水下机器人携带的专用工具, 来完成对破损部位的准确包覆, 并与环氧树脂固化工艺相结合构成隔离层, 其能有效地堵塞介质渗漏的途径, 适合点状腐蚀或者焊缝缺陷的修补。复合材料强化法则是基于碳纤维和玻璃纤维来增强基体的, 其通过浸渍树脂体系来制备预制修复层, 并通过真空负压吸附工艺, 将其贴合到管体的外壁上, 增强了管体抗压强度和疲劳寿命, 适合远距离均匀腐蚀或者第三方冲击造成的结构性弱化。

水下直接干预技术涉及湿法焊接、干式舱室修复和管段更换 3 种类型的高复杂度操作。湿法焊接是利用药芯焊丝和水下专用电源相结合的方式, 由潜水员手拿设备来完成坡口组对和多道次熔敷的焊接方法, 需要严格控制电弧的稳定性和氢致裂纹的危险性; 对于干式舱室的修复, 需构建一个气密工作舱, 并在排除水体的干扰后, 采用氩弧焊或激光堆焊技术, 这种方法特别适用于深度超过 50m 的深海作业环境。对损毁严重的管段, 则需要通过法兰对接或者卡箍连接工艺整段更换, 操作过程依靠 ROV 的精确导航和液压扭矩工具的配合, 来保证接口的密封等级达到设计的压力。

2.3 制定预防性维护策略

预防性维修是降低海底输油输气管线失效发生的

概率、延长管道使用周期的有效措施, 是保证海底输油输气管道安全与稳定的基石, 其通过采用系统化的技术与管理的的手段, 从源头杜绝管道失效, 有效保障输油输气管道的可靠性。

防腐蚀涂层技术是预防性维护的基础措施, 该项技术是将防护性能优异的物质包覆于管道外壁上, 构成一道密实的物理屏障, 从而有效地阻挡海水环境中, 氯离子和硫化氢等腐蚀性介质的侵入, 显著减缓管道外部腐蚀发生和发展。这类涂层需要有较好的附着力、耐水性和抗渗透性, 能适应海底复杂多样的环境状况, 并对管道起到长期有效和稳定保护作用^[4]。

阴极保护技术则属于电化学防护范畴, 是预防性维护体系必不可少的一部分。其原理是由外部直流电源对管道产生负向电流, 使整个管道呈阴极状态, 并利用电化学反应, 在管道表面形成一层稳定保护膜。这种膜层可以抑制金属表面阳极溶解过程, 屏蔽电化学腐蚀电子传递路径, 进而有效地制止或延缓管道由于电化学作用而诱发腐蚀损伤, 提高管道海水介质抗腐蚀性能。

3 海底管道泄漏应急响应技术

3.1 事故预警系统

海底油气管道事故预警系统, 是海洋能源基础设施保障安全运营的核心保证, 技术架构主要包括多维度感知层、智能传输层和决策分析层。系统采用分布式传感网络对全管段进行状态监测, 并依靠工业互联网协议, 构建实时数据交互的机制, 利用机器学习算法来完成对风险态势的研判^[5]。

感知层布置各种传感器, 并根据管道的路由地质特征差异化布设, 并对重点部位实行三维立体覆盖以保证能捕捉到管道的轴向应力、环向形变和接缝位移等主要力学参数。环境监测单元对海流速度、海水盐度、海底地形变化以及其他外在影响因素进行同步获取, 构成多源异构数据集。数据传输层需搭建以 5G-北斗双模通信为核心的混合网络架构。

主干线通过水下光缆完成 GB 级数据的回传, 支线节点通过自组网浮标配置中继器, 并在极端运行条件下发起卫星通信备份链路建设。在系统集成中, 可利用数字孪生技术建立虚拟管道映射, 以动态同步物理实体和数字模型。将历史事故数据库与贝叶斯概率模型进行连接, 并对风险评估算法进行不断优化。该安全防护体系能够满足 IEC 62443 的要求, 并建立硬件级加密芯片, 避免数据篡改的问题。该预警系统通过融合传感技术、通信技术和人工智能, 形成覆盖“监控—诊断—预报—处理”全流程的安全防控体系, 可显著提高海底管道的本质安全, 为海洋油气资源的

开采提供可靠的技术支持^[6]。

3.2 应急响应流程

海底油气管道事故应急响应体系是由海底油气管道事故发生后,上报到事故结束时所进行的一系列步骤组成,应急响应各步骤之间环环相扣,一环套一环,可在事故期间有效、快速地响应、救援,最大程度地减小损失,保障人员的生命安全与海洋环境安全^[7]。

在系统发出的预警或现场人员感知事件发生后,可迅速在预先构建的通讯渠道中真实报送事故信息,应急响应程序可同时启动。该环节要极速、准确地汇报事故信息,为后续行动争取时间。指挥中心通过接到报告后启动初评程序,根据信息资料对事故的性质、程度、范围大小及后果判断进行综合分析,通过分析、评价可为有针对性的制定应急对策策略方案奠定基础。同时要抓紧做好应急资源调配工作,不仅需要迅速动员专业的救援团队,如清洁团队、潜水员和环境监测专家等,还需要准备一系列必要的设备和物资,例如吸油毡、生物降解剂和检测仪器等。另外,需要综合协调海事部门、环保机构和科研机构等各方面支援力量,以保证救援资源快速准确到达事故现场。

应急响应期间连续环境监测非常关键。可采用无人机和水下机器人等先进技术手段,对泄漏物扩散路径、浓度变化及其对周围海洋生态系统产生的影响进行实时监测。依据监测结果及时对应急策略进行调整,以更加有效地对事故进行处理。清理和恢复工作随救援工作同时进行,彻底清除漏出油污和化学品,修复破坏海洋生态环境。同时对损坏海底管道实施维修或替换,保证管道系统安全平稳运行。

3.3 救援技术与设备

海底油气管道事故环境复杂、处理难度大、时效性强等特点,应急救援需要以专业化技术装备和标准化作业流程为支撑。核心救援技术涉及水下检测与评估、人员干预、泄漏封堵和污染防控4个模块,各个环节都需要多学科技术的协同配合才能达到高效处置的目的。

水下机器人(ROV)是远程操作的关键平台,其所携带的高清成像设备可以对水下影像进行实时回传,声呐阵列可以穿透浑浊水体建立三维地形模型,并在机械臂末端集成力反馈工具,可以达到毫米级的精度运行。这类装置主要应用于泄漏点定位、管体结构损伤评估和临时封堵装置部署等非接触式操作,有效地避免强洋流和低温高压等极端环境,给人员带来的安全威胁。

专业的潜水团队则负责执行高风险的人工干预任务,其成员必须持有国际潜水承包商协会(ADCI)的

认证资格。操作包括管体焊缝探伤、破损段切除和法兰对接的精细化操作,常用的饱和潜水技术可增加有效的操作时间。同时要配置闭环式呼吸混合气供应系统、抗干扰液压工具组和热切割设备等,能够在能见度小于1m的海域自主完成口径大于2m的管段修复项目^[8]。

快速封堵技术有被动密封和主动加固2种系统。前者采用弹性复合材料制作自适应封堵器,并由液压驱动贴合管壁发生形变;后者使用双组分环氧树脂灌浆工艺,通过导管向裂缝内准确地灌注固化剂。这两种技术都能在没有外部能源的情况下,使压力复测在30min之内达到标准,从而为随后的永久修复赢得一个关键的时间窗。

4 结语

综上所述,海底管道是海洋油气能源的主要输送管道,管道泄漏会涉及海洋生态环境、能源供应安全及沿海民众的日常生产生活。从安全防控角度来说,先进监测系统以及智能预警技术的掌握与应用,能够及时对可能的泄漏事故进行监测感知,优质材料与科学设计铺设,可降低泄漏风险。因此,今后应进一步加强多学科融合、强化技术创新、健全更为完善的防控与应急体系,提高我国海底管道安全保障能力,守卫海洋生态安全。

参考文献:

- [1] 苏天水,廖恒杰,黄潘阳.海底管道定期检测技术探讨[J].海洋工程装备与技术,2025,12(03):118-122.
- [2] 李新宏,张宇航,郭孟孟,等.基于数字孪生的腐蚀海底管道安全管理方法研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(01):118-123.
- [3] 于子健.海洋石油在役海底管道安全事故分析及对策研究[J].石化技术,2024,31(10):315-317.
- [4] 胡春阳.海底管道外检测技术现状综述[J].化工装备技术,2023,44(05):60-63.
- [5] 韩雪.关于海底管道完整性数字化管理体系研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(16):61-63.
- [6] 刘慧勇.海底管道腐蚀防护状态检测和评估技术[J].化工设计通讯,2023,49(01):62-64.
- [7] 邹定杰,金鑫.海底管道检测最新技术与发展研究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(21):55-57.
- [8] 郎一鸣,赵怀岗,吕旭鹏,等.某海底管道事故原因分析及相关治理对策建议[J].中国海洋平台,2022,37(02):85-91.

作者简介:

刘广顺(1988-),男,汉族,天津宁河人,本科,中级工程师,研究方向:安全管理。