

海洋采油平台海水管道腐蚀因素及防护技术研究

尹亮(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:海洋采油平台广泛分布于海洋环境,其正常运行高度依赖于各类管线系统。其中,海水管道承担着冷却、消防、注水等重要功能,但海洋环境具有强腐蚀性特质,海水管道长期处于严苛服役条件下,普遍面临着严重的腐蚀问题。管道腐蚀穿孔或破裂失效会导致介质泄漏、造成环境污染和资产损失。因此,本文重点围绕海水管道的腐蚀危害、腐蚀核心影响因素及关键防护技术展开分析,以期延长管道寿命、保障采油平台安全。

关键词:海洋采油平台;海水管道;管道腐蚀;腐蚀因素

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)029-0142-03

Research on Corrosion Factors and Protective Technologies of Seawater Pipelines on Offshore Oil Production Platforms

Yin Liang (CNOOC (China) Co., LTD. Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

Abstract: Offshore oil production platforms are widely distributed in Marine environments, and their normal operation highly depends on various pipeline systems. Among them, seawater pipelines undertake important functions such as cooling, fire protection, and water injection. However, the Marine environment has strong corrosive characteristics, and seawater pipelines have been under harsh service conditions for a long time, generally facing serious corrosion problems. Corrosion perforation or rupture failure of pipelines can lead to medium leakage, environmental pollution and asset loss. Therefore, this article focuses on analyzing the corrosion hazards of seawater pipelines, the core influencing factors of corrosion, and key protective technologies, with the aim of extending the pipeline's lifespan and ensuring the safety of oil extraction platforms.

Key words: Offshore oil production platform; Seawater pipeline; Pipeline corrosion; Corrosive factors

海洋采油平台在运行过程中,其海水输送管线系统长期暴露于高度侵蚀性的海洋环境之中。此类管线承担着平台冷却、消防及注水等核心功能的流体输送任务,其服役状态直接关系到平台的整体运行安全。深入认识海水管线在海洋环境下的主要腐蚀诱导因素及其相应的防护对策,对于保障平台长期安全稳定运行具有关键的实践意义。

1 海洋采油平台海水管道腐蚀的危害

海洋采油平台的安全稳定运行与海水管道紧密相连。海水介质输送,实现冷却、消防、压载及注水等关键功能。但管道因海洋极端侵蚀性而极易遭受重度腐蚀,腐蚀造成的危害是多方面的。管道结构强度遭受显著削弱,管壁在腐蚀的持续作用下持续变薄,最终诱发局部破洞或整体断裂,海水及携有污染物的介质大量溢出海洋。

管道系统遭遇泄漏或故障,须暂停运行以执行维修及更换,将引发生产单元乃至整个平台的运作停滞,引发巨额经济后。此外,作为消防系统不可或缺的一环,因腐蚀而损坏的海水管道,将完全丧失在火灾等紧急情境中维护生命与财产安全的根本能力,极大增加发生灾难性事故的风险,海水管道的侵蚀现象对海洋油气平台的安全、稳定操作及环境保护构成重大威胁^[1]。

2 海洋采油平台海水管道腐蚀因素

2.1 海水化学成分侵蚀

海水乃富含腐蚀性之复杂电解质溶液,金属管道正遭受其化学成分引起的直接且持久的腐蚀破坏。海水中存在大量氯离子,具有极强的穿透能力,破坏金属表面的钝化层结构,诱发点蚀和缝隙腐蚀,构成金属表面的阳极腐蚀电池区。此外,海水中的氧气成分作为阴极去极化促进剂,加速了金属的氧化溶解过程,尤而在流速较缓地带,氧浓度梯度加剧了氧浓差电池的腐蚀现象。此外,海水所含的其他离子,腐蚀反应也由如硫酸根离子 SO_4^{2-} 、镁离子 Mg^{2+} 、钙离子 Ca^{2+} 及二氧化碳溶解物介入,影响腐蚀产物的结构及稳定性,促进腐蚀深化。

2.2 海洋微生物附着影响

海洋微生物种类繁复,海水管道表面聚集微生物,繁殖后构成生物膜,对腐蚀过程产生显著影响。由微生物附着构成,实际覆盖管道表层,改变了金属/溶液界面的微环境。此外,微生物活动直接介入并催化腐蚀过程,于厌氧环境中,硫酸盐还原菌实现硫酸盐向硫化物的还原,硫化氢 (H_2S) 腐蚀性极强,引发显著局部腐蚀与氢脆现象;氧气被好氧菌所消耗,生物膜层内氧浓差电池的生成。同时,金属基体及防腐涂层受微生物代谢有机酸、无机酸产物的直接腐蚀与

破坏，生物膜构筑屏障，影响缓蚀剂至金属表面的渗透，降低其防护效果。

2.3 海流与海浪冲刷作用

海流与波浪对海水管道实施持续的流体动力侵蚀，机械作用与腐蚀现象耦合紧密，引发冲刷腐蚀机制。海水高速流动，对管道内壁施加剧烈剪切与冲击力。该机械应力促使金属表面防护性腐蚀产物膜及初期钝化膜持续损耗，金属本体持续暴露于腐蚀性介质侵袭之下，腐蚀进程迅猛加快。此外流体携带悬浮固体颗粒对管壁实施磨损，造成壁面物理性破坏。海浪周期性冲刷大气区及飞溅区管道外层，产生类似效应，或诱发管道振动现象，诱发疲劳破坏^[2]。

2.4 温度与压力变化影响

海洋采油平台海水管道作业环境，温度与压力非恒定参数，波动显著干扰腐蚀行为。温升普遍加速化学反应速率的递增，所指电解质腐蚀反应范畴，普遍加速腐蚀进程。在高温情境中，微生物繁殖速度可能迅速增加，加剧微生物侵蚀活动。此外，温度波动引起管道材料的热膨胀与收缩行为，引发约束条件下的周期性热应力变化，诱致涂层破裂、剥蚀及金属热疲劳，促进了腐蚀的有利条件形成。而且压力变化同样重要，深水区管道面临巨大静水压，高压状态可能对腐蚀反应的平衡及速度实施调节，或催化氢气渗透进展，提升氢脆倾向。

3 海洋采油平台海水管道防护技术

3.1 高性能防腐涂层技术

在海洋采油平台海水管道的腐蚀防护体系中，高性能涂层涂覆技术广泛采用。该技术核心是在管道金属表面形成一层连续、致密且粘附牢固的阻隔层，此技术实现金属与海水腐蚀环境的物理隔离作用，显著减缓侵蚀性成分对金属表面的渗透与扩散。实际应用场合，针对海洋环境的极端严酷性，涂层体系必须符合一系列严格性能参数：超凡化学稳定性，有效抵御海水盐分及生物代谢侵蚀；优异耐磨抗冲击性能，有效抵御海水悬浮颗粒侵蚀及潜在机械损伤威胁；优异的柔韧性和抗阴极剥离性能赋予涂层在长期浸泡、压力波动及施工弯曲中，持续维持完整性并有效遮蔽基体的能力；耐久老化性能经受海水浸泡、紫外线辐射及湿气浸润与干燥循环的反复挑战。海洋重防腐涂层技术发展，多采用环氧富锌、环氧玻璃鳞片、无溶剂环氧及聚氨酯等高性能树脂材料，部分采用多层结构组合，如采用富锌底漆以强化阴极保护效能，中间层赋予屏蔽与韧性提升，表层着重强化抗候耐磨特性^[3]。

在管道防腐涂层的具体应用流程中，防护效能的实现程度与施工质量的严格控制紧密相连。管道表面

处理作业自此刻入，常规操作为采用喷砂技术，达成特定清洁与表面粗糙度标准，如 Sa2.5 评定等级，完全去除锈蚀、氧化皮、油污及灰尘，实现涂层与基材间的理想机械联结与物理吸附。

紧接其后的涂装作业应在严控的温湿度环境中实施，依照涂层生产商的技术规范手册实施涂装，精确混合组分，确保熟化到位，实施恰当的喷涂与辊涂技术以实现涂层均匀性，对管件、焊缝、法兰边缘等复杂部位实施涂层完整性监控，防止针孔、漏涂等瑕疵缺陷。最后，对每一层涂覆膜实施现场即时厚度检测与记录，确保总干膜厚度达到并力求超过设计参数，确保构建出充分的防护层厚度。

3.2 阴极保护技术

随着海洋采油平台服役年限的增长和运行工况的日益复杂，依靠涂层隔离已不足以全面抵御海水管道的长期腐蚀，电化学防护手段，阴极保护技术占据核心位置。该技术通过干预，调整金属管道在海水电解质环境中的电极电势，将整体结构调整为电化学腐蚀电池的阴极配置，阻断金属原子电子流失所引起的氧化溶解趋势。具体是通过向管道金属表面持续施加一个稳定、可控的保护电流，矫正腐蚀微电池阳极区的电流消耗。

在海水管道的实际防护工程中，普遍运用两种相互依托的阴极防护法：阳极牺牲防腐处理与电流辅助防腐处理。牺牲阳极保护的实施，主要借助在管道特定部位嵌入电位更低的活性金属合金模块，管道钢结构与之实现电性结合，阳极材料优先氧化溶解，供应阴极极化所需电流。同时，实施外加电流法则需借助直流电源装置，强制将保护电流输送至海水中的辅助阳极，再传递至管道结构。

阴极保护工程必须进行严谨的设计与精确的安装，重点在于全面收集参数与科学计算，涵盖海水腐蚀性分析、管道总面积及布局、现有涂层质量与绝缘状态、邻近设施干扰效应等关键要素需考量。凭借详实数据支撑，工程师需引用既定理论模型及规范公式，精确测定管道系统实现阴极保护所需的最小或理想电流密度水平，进而明定阴极保护站配置、布局、功率输出区间及牺牲阳极类型、规格、数量与空间部署方案。

在此过程中，重点优化阳极与管道的相对布局结构，力求电流在管道表面实现全面覆盖，规避电位分布极端不均导致保护不足或过保护。最后，还应按照设计图纸与技术规范实施安装步骤，稳固连接阳极支架与管道、电缆焊接精细并多重绝缘密封、参比电极在典型监测点精确预埋、外加电流设备防爆安全正确

就位，并在系统投运前，对电气连接的绝缘性能与导电状态需进行细致的验证与确认。

3.3 缓蚀剂添加技术

缓蚀剂添加技术的实质是在腐蚀性介质中定量引入特定的化学添加剂，利用其在金属/溶液界面发生物理吸附、形成保护性分子膜或参与电极反应改变腐蚀动力学参数等作用机制，干扰并显著削弱海水环境中金属管道发生的电化学腐蚀过程。缓蚀剂的选择高度依赖于具体的运行环境以及管道材质，核心种类包括能够在金属表面定向吸附成膜、物理阻断腐蚀性离子与金属表面接触的吸附型缓蚀剂；优先迁移到金属阳极区域，通过促使金属氧化物或沉淀膜形成来减少阳极溶解倾向的钝化型缓蚀剂；干扰阴极区氧还原反应的阴极型缓蚀剂；以及兼顾多重机制的混合型缓蚀剂。同时，筛选评价一种合适的缓蚀剂，要重点关注其在真实服役条件下达成预定防腐目标所需的有效浓度、与海水介质的相容性、化学稳定性、环境友好属性、处理成本等多方面因素的综合平衡^[4]。

缓蚀剂防护技术的成功应用，精确设计、稳定运行及严格监管的化学药剂注入系统构建对其成功应用依赖性极大。在实施工程阶段，该系统由主缓蚀剂储存模块、高精度加注装置、均衡布局的注入点网络、流量调控与监控仪表、相关管道阀门及检测缓蚀剂残留的在线或离线监测设备构成。

针对目标海水系统缓蚀剂的导入，常规操作主要采用两种导入途径。①海水总管及主循环回路入口结合部，采用定量泵连续或间歇式注入，将预定浓度的缓蚀剂溶液与大量海水实现均质化融合，实现生态防护的长期效应；②针对特定局部区块，实施定点标记技术，必须使注入的缓蚀剂在海水中形成并维持一个既定的最低有效浓度标准；③实践中还应对加注速率、注射点位置进行精细调整，实时海水流量变动与之同步联动。同时，配备相应的静态及在线混合设施，实现缓蚀剂与海水的高效均匀混合，防止浓度梯度过大，确保管道各部分均匀实现既定缓蚀保护等级。

3.4 管道材质优化选择

鉴于海洋采油平台海水管道所处服役环境的极端严苛性与长期运行的安全性要求，单纯依靠外部防护措施存在失效风险，从管道工程设计的源头发力，依据特定工况系统性地选择具有更优异耐蚀本征特性的金属材质，成为构建整体防护体系的基础性和长远性策略。

这种选材优化的决策核心在于深度理解目标环境以及工艺流程参数与各种潜在候选金属材料的腐蚀行为之间的内在联系。选材过程中需要细致对比评估不

同金属或合金在实际海洋环境下关键耐蚀性指标的表现：例如对应力腐蚀开裂的敏感程度、在氯离子环境中抵抗点蚀与缝隙腐蚀的能力、抗冲刷腐蚀性能、抵抗微生物腐蚀的效能以及均匀腐蚀速率等^[5]。

在实际海洋平台海水管道系统的建设与更换项目中，基于工程标准的材质优化选择通常集中在几种经过大量实践验证的特定材料系列上。普通碳钢因其成本优势常用于对腐蚀要求相对宽松的系统，但其在海水中的耐蚀性明显不足，严格限制其使用往往附加苛刻的防护涂层与阴极保护联合条件，增加了后期维护复杂性与失效风险。提升等级的耐腐蚀特种钢种获得青睐，典型代表是含钼双相不锈钢。

此类材料凭借其双相结构特征和高钼含量，展现出远优于奥氏体304/316L不锈钢的抗氯离子点蚀和应力腐蚀开裂性能，并具备良好的强度与焊接性，成为处理海水冷却、注水等高腐蚀性工况的主流管材选择。铜镍合金则因其固有的优异抗海水腐蚀性、抗海生物附着性和良好的导热性，在海水换热器管束、部分低压海水管道上具有特定使用价值。对于冲刷腐蚀风险极高或使用寿命要求超长的关键管道位置，耐蚀性顶尖的镍基合金乃至钛及钛合金则是最终考量方案，尽管其采购成本显著高昂。

4 结语

海洋采油平台海水管道的腐蚀问题源于复杂的海洋环境因素协同作用，其危害深远。通过系统整合高性能防腐涂层、阴极保护、缓蚀剂添加及管道材质优化等关键技术，构建多层次的协同防护体系，并辅以科学的运行维护管理，可显著提升管道的耐蚀性能与服役可靠性。

参考文献：

- [1] 袁禹, 李伟, 周录坤, 等. 三代核电厂海水管道用钢的腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(08): 28-32.
- [2] 张鲁君, 吴晓阳, 潘兴隆. 舰船腐蚀海水管路剩余强度评价方法研究综述 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(10): 1-8+16.
- [3] 李慧心, 常炜, 李大朋, 等. 掺海水输送对海底管道结垢及腐蚀行为的影响 [J]. 材料保护, 2022, 55(09): 34-40.
- [4] 赵志芳. 浅析海水泵扬水管的腐蚀与防护 [J]. 中国设备工程, 2022(05): 170-172.
- [5] 郝方方. 船舶海水管道腐蚀的原因及其防护研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2022(06): 113-115.

作者简介：

尹亮（1990—），男，汉族，学士学位，机械工程师，研究方向：石油化工机械设备及海上采油平台管道。