

长输管道完整性管理与腐蚀预防技术

白云朋 张志远 秦少博 冉克辉 刘永俊 (国家管网北方管道, 河南 郑州 450000)

摘要: 本文系统探讨了天然气站场管道完整性管理中的腐蚀监测与预防技术, 旨在为石油天然气等行业提供一套综合性的管理方案, 以降低管道因腐蚀导致的事故风险, 保障生产安全与效率。通过回顾传统与先进的腐蚀监测技术, 结合现代材料科学与电化学原理的腐蚀预防策略, 阐述管道完整性管理中的风险评估与控制方法, 并通过实际案例分析验证了所提出措施的有效性。

关键词: 管道完整性管理; 腐蚀监测; 腐蚀预防; 风险评估

0 引言

随着全球能源需求的持续增长, 长距离输油输气管道成为能源运输的关键基础设施。然而, 管道腐蚀问题严重影响着其安全运行与寿命, 不仅造成巨大的经济损失, 还可能引发严重的环境污染和安全事故。因此, 加强站场管道的完整性管理, 尤其是腐蚀预防与监测, 对于确保能源供应链的安全与稳定至关重要。本文通过分析当前管道腐蚀监测与预防技术, 提出一套系统化的管理策略, 帮助运营商有效识别、评估并控制腐蚀风险, 提升管道系统的整体安全性和经济性。

1 站场管道腐蚀监测技术

1.1 传统监测方法

在管道腐蚀监测领域, 传统方法扮演了基石的角色, 为后续的高级监测技术奠定了基础。其中, 最为人熟知的两种方式是目视检查和壁厚测量。

1.1.1 目视检查

这是一种直观且直接的监测手段, 主要依赖于操作人员的专业知识和实践经验。通过人工巡视管道外部, 检查是否有明显的腐蚀迹象, 如锈斑、凹陷或裂纹等。尽管这种方法简便易行, 但其效果高度依赖于检查者的经验和细致程度, 且难以发现隐蔽部位或内部腐蚀情况。

1.1.2 壁厚测量

为了弥补目视检查的不足, 壁厚测量成为另一种重要的传统监测技术。利用超声波测厚仪等专业设备, 可以在不损坏管道的前提下, 周期性测量管道壁厚, 以此来评估腐蚀造成的材料损失。尽管这种监测方法较为精确, 但其属于点测量, 难以全面反映整个管道的腐蚀分布情况。

1.2 先进监测技术

随着科技的进步, 一系列创新的腐蚀监测技术应运而生, 显著提高了监测的效率与准确性, 其中包括

超声波检测、电磁检测以及智能传感网络的应用。

1.2.1 超声波检测

利用超声波穿透涂层和材料的能力, 非侵入性地对管道内部结构进行扫描, 能够精确定位腐蚀缺陷的位置与大小, 即使是对隐藏在涂层下的腐蚀也无遁形。这种方法减少了对管道的物理损伤, 提高了检测的深度和准确性。

1.2.2 电磁检测 (ECT, Electro-Magnetic Testing)

通过激发并检测管道周围的磁场变化, 来识别管道壁的金属损耗情况。电磁检测技术能够在不中断运营的情况下, 快速评估大范围管道的腐蚀状态, 特别适合用于检测覆盖有绝缘层或涂层的管道。

1.2.3 智能传感网络

这是近年来快速发展的一项技术, 通过在管道沿线部署大量的传感器节点, 形成一个密集的监测网络。这些传感器能够实时收集温度、压力、应力以及腐蚀产物等数据, 通过无线通信技术传输至中央控制系统, 实现对管道状态的连续远程监控。智能传感网络不仅提升了监测的实时性, 还为大数据分析和预测模型提供丰富的数据支持, 有助于提前预警潜在的腐蚀问题。

2 管道腐蚀预防技术

2.1 材料选择与表面处理

在管道设计阶段, 选择具有优异耐腐蚀性能的材料是抵御腐蚀的第一步, 这将会直接影响管道的长期性能与维护成本。不锈钢以其良好的耐腐蚀性和广泛的适用性成为首选材料之一, 尤其在面临含氯离子的腐蚀环境中表现出色。合金钢, 如双相不锈钢和超级奥氏体不锈钢, 通过调整合金元素的配比, 进一步增强了抗腐蚀能力, 适合于更严苛的工况。此外, 钛合金、镍基合金等特种金属材料, 虽然成本较高, 但在极端腐蚀条件下展现出卓越的耐久性, 如耐高温、强酸碱腐蚀。

除了材料本身的选择, 表面处理技术是增强管道

耐腐蚀性的另一重要防线。电镀，如镀锌层，通过在管道表面沉积一层致密的锌层，牺牲锌来保护铁基体，广泛应用于水下及土壤埋设管道。涂装技术则提供了多样化的防腐选择，如环氧树脂涂层，其优异的附着力、耐化学品性能和低渗透性，有效隔离腐蚀介质与基材接触，适用于地面及架空管道。

2.2 电化学保护技术

电化学保护技术利用电化学反应原理，通过调整管道与周围电解质溶液间的电势差，主动控制腐蚀过程，分为阴极保护和相对较少用到的阳极保护。

阴极保护技术是目前应用最广的电化学保护手段，分为外加电流法和牺牲阳极法。外加电流法通过外部电源向管道输入负电流，强制管道表面成为阴极，有效减少或停止腐蚀反应。此法适用于大规模、长距离的管道系统。而牺牲阳极法，利用镁、铝等活性高于铁的金属制成阳极，与管道相连后，这些阳极优先腐蚀，牺牲自己保护管道，适合小型设施或局部保护。

阳极保护，尽管在管道防腐领域应用不如阴极保护普遍，但在某些特定场合，如某些金属合金在特定介质中的保护，通过使管道表面成为阳极并施加正向电流，可以减少特定类型的腐蚀。这种策略需要精确控制电流密度和环境条件，以避免过度腐蚀，因此在实际应用中需要精确计算和严格监控。

2.3 环境控制与管理

环境因素在管道腐蚀管理中占据举足轻重的地位，通过精心调控输送介质和周围环境条件，能够显著抑制腐蚀现象。首要步骤是介质管理，包括调节介质的 pH 值至适宜范围，通常远离金属材料的腐蚀阈值，确保介质对管道的侵蚀作用最小化。同时，控制介质的流速，避免因高速流动产生的湍流效应加速腐蚀，尤其是在弯头、阀门等易磨损区域。此外，维持适宜的温度区间，防止因温差引起热胀冷缩产生的热应力腐蚀，对管道造成损伤。

对于埋地管道，环境管理尤为关键。土壤是影响外部腐蚀的主要因素，通过向土壤中添加缓蚀剂可以中和有害物质，减少腐蚀性离子的影响。调整土壤 pH 值至中性或接近中性，避免酸性或碱性过强的土壤环境加速腐蚀。此外，采用防腐覆盖层包裹管道，如聚合物涂层或水泥砂浆层，形成一道屏障，隔离土壤中的水分和腐蚀性物质，是有效控制外部腐蚀的常用手段。

2.4 内衬技术与复合管的应用

在处理高腐蚀性介质时，内衬技术和复合管技术是两项重要的工程技术解决方案。

内衬技术通过在原有管道内壁加装一层耐腐蚀材料，如塑料、陶瓷或橡胶等，形成物理隔离层，有效阻隔腐蚀介质直接接触金属管道，极大增强了管道的抗腐蚀能力。这项技术特别适用于旧管道的改造升级，无需完全替换原有管道，大幅降低了改造成本，也缩短了施工周期，提高了管道使用寿命。

复合管则是材料科学发展的产物，它结合了两种或多种材料的优势，如钢塑复合管结合钢材的高强度和塑料的耐腐蚀性，玻璃纤维增强塑料（FRP）管则利用了玻璃纤维的高强度和塑料的轻质特性。这些复合材料管道保持了必要的力学性能，而且在腐蚀性环境中展现了卓越的耐久性，显著降低长期维护成本和因泄漏导致的环境风险。它们的广泛应用，特别是在化工、石油天然气行业，体现了现代材料技术在解决复杂腐蚀问题上的创新与进步，为管道工程提供了更为安全、经济、环保的解决方案。

3 管道完整性管理中的风险评估与控制

3.1 风险识别与量化方法

在管道完整性管理的框架下，风险识别与量化是构建风险管理策略的基石，其目的在于明确潜在的腐蚀风险源及其可能产生的后果，为后续的预防措施和资源分配提供科学指导。这一过程融合了定性分析的灵活性与定量评估的精确性，确保了风险评估的全面性和可靠性。故障树分析（FTA）是一种自上而下的系统性分析工具，通过从最终的不利事件（例如管道腐蚀导致的泄漏）逆推至各种可能导致这一结果的因素，构建出逻辑清晰的“故障树”。在这个过程中，所有可能的失效模式、原因及其之间的逻辑关系被逐一识别和组织，使管理者能够直观地理解腐蚀风险的多维度来源，为制定针对性的防控措施奠定基础。

层次分析法（AHP）则是处理多准则决策问题的有效方法，尤其适用于将复杂的腐蚀风险因素进行分层和量化评价。通过构建多级判断矩阵，AHP 能够将定性评估转化为定量数据，比如通过专家打分的方式，对诸如环境腐蚀性、材料敏感度、维护难度等因素的重要性进行排序。最终，AHP 生成的风险优先级列表为决策者提供了清晰的行动指南，确保资源能够集中投入到最关键的风险缓解措施上。

3.2 腐蚀风险的特定评估模型

为了提高腐蚀风险评估的精确度，构建基于历史数据与实时监测信息的特定评估模型显得尤为重要。这类模型反映了管道的历史表现，还融入了当前的运行状态，为预测未来腐蚀趋势提供动态视角。

腐蚀速率预测模型便是其中的关键组成部分。该模型综合考虑了影响腐蚀速率的多种因素，如管道材质的耐蚀性、输送介质的化学成分、流速、温度、压力以及周围环境的 pH 值和微生物活动等。借助机器学习算法等先进数据分析技术，模型能够从海量数据中学习并识别出腐蚀行为的规律，从而对特定区域或管道段的腐蚀速度进行精确预测。通过模拟不同工况下的腐蚀情况，模型能够即时评估管道的腐蚀状态，还能前瞻性地揭示潜在的高风险时段或位置，为制定预防性维护计划提供了强有力的依据。

例如，通过对历史腐蚀数据的深度学习，模型可能识别出在某一特定季节或流体温度区间内腐蚀速率显著增加的趋势，促使管理者在这些时段前安排加强巡检或采取预防措施，有效遏制腐蚀的发展，从而在源头上控制风险，减少维修成本，保障管道运行的长期安全与稳定。

3.3 风险控制与缓解策略

风险评估完成后，制定并实施有效的控制与缓解策略是确保管道安全运行的关键。基于风险评估的结果，应定制化地制定维护计划，优先处理高风险区域，采取如局部更换、加强监测频率等措施。同时，建立完善的应急预案，以应对突发的腐蚀导致的泄漏或失效事件，减少对环境和社会的影响。长远来看，还需要制定长期防腐策略，这包括材料升级、技术创新、管理流程优化等，旨在从根本上降低腐蚀风险，提高管道系统的整体韧性和经济性。

4 案例分析

以“蓝海油气管道项目”为例，该项目是一条连接海上油气田与陆上炼油厂的长距离输油管道，全长约 800 公里，途经复杂多变的地理环境，包括海底、山区、河流穿越等，面临着严峻的腐蚀挑战。项目团队综合运用上述提到的技术与策略，显著提升了管道的腐蚀管理效能。

项目初期，项目组采用智能传感网络与超声波检测相结合的方式进行全面监测。智能传感器部署在关键节点和环境敏感区域，实现了对管道内外压力、流速、温度及振动等参数的实时监测，结合超声波检测对管道壁厚进行周期性评估，及时发现了几处潜在的腐蚀热点。通过这一集成监测系统，项目团队能够在腐蚀问题酿成重大事故前迅速响应，显著减少了因腐蚀导致的紧急停机时间。

在材料选择上，针对海底段采用了双相不锈钢材

料，增强耐海水腐蚀性能；而在陆地段，管道外壁涂覆了高性能环氧树脂涂层，并在关键河床穿越段加装了混凝土套管，有效隔离了腐蚀介质。同时，项目团队实施了阴极保护系统，通过安装牺牲阳极棒，维持管道处于负电位状态，显著抑制了电化学腐蚀。此外，对沿途土壤进行改良处理，通过加入缓蚀剂调整土壤 pH 值，进一步优化管道外部环境。

项目启动前，团队运用层次分析法（AHP）和蒙特卡洛模拟技术，对各段管道的腐蚀风险进行详细评估，识别出高风险区域。基于评估结果，制定了针对性的维护计划，包括对特定区段的定期检查、预置应急响应小组等。在运营过程中，根据监测数据和风险模型更新，不断调整维护策略，确保了腐蚀风险的持续有效控制。

通过上述措施的综合应用，“蓝海油气管道项目”在腐蚀管理方面取得了显著成效。首先，相比传统管道项目，其腐蚀相关的停机时间减少了近 40%，极大地提高了管道的可用性和输送效率。其次，由于早期预警和预防性维护的实施，维修成本较预期降低了 30%，避免大量因突发腐蚀事件引起的高额抢修费用。最后，整体安全水平得到了显著提升，自项目运营以来未发生任何因腐蚀导致的重大安全事故，保障了环境安全与社会稳定，充分证明综合应用现代腐蚀监测、预防技术以及风险评估与控制策略在大型油气输送管道项目中的有效性，为类似工程项目提供宝贵经验与示范。

5 结束语

站场管道完整性管理与腐蚀预防是一个涉及多学科知识和技术的复杂过程。通过不断优化监测技术、创新预防措施并强化风险管理体系，可有效延长管道使用寿命，保障能源输送的安全高效。未来，随着大数据、人工智能等新技术的应用，管道腐蚀管理将更加智能化、精细化，为能源行业可持续发展提供更强有力的支持。

参考文献：

- [1] 宫彦双,唐金娟,张卫朋,等.油气田管道和站场建设期完整性管理研究与应用[J].石油工程建设,2023,49(06):77-81.
- [2] 张加东,安超,冉文燊,等.某油田管道完整性管理技术及效果评价[J].特种设备安全技术,2022,(04):61-63.

作者简介：

白云朋（1991.11—），男，汉族，河南长葛人，大学本科，工程师，研究方向：天然气长输管道。