

沿北部湾海域工业园区工业管道腐蚀检测与防护

凌子祥 甘瑞霖 吴凯平（广西壮族自治区特种设备检验研究院，广西 北海 536000）

摘要：针对北部湾海域工业园区工业管道在高盐雾、高湿度、强紫外线及潮汐交变环境下面临严峻问题，本文整合六篇专项研究文献，提出适配的腐蚀检测与防护技术组合。检测方面，建立“红外热波成像大范围筛查—磁致伸缩低频导波远距离粗扫—脉冲涡流+电磁超声近距离定量”的分层体系；防护方面，采用多层复合防腐涂层与阴极保护协同防护外腐蚀，内防腐涂层、缓蚀剂添加与工况优化控制内腐蚀；在管理方面，基于强度校核与合于使用评价，构建“定期检验+在线监测”的全生命周期管理模式。

关键词：北部湾；工业园区；工业管道；腐蚀检测

中图分类号：TG174 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)033-0160-03

Corrosion Detection and Protection for Industrial Pipelines in the Beibu Gulf Industrial Park

Ling Zixiang, Gan Ruilin, Wu Kaiping (Guangxi Special Equipment Inspection and Research Institute, Beihai Guangxi 536000, China)

Abstract: Faced with severe challenges for industrial pipelines in the Beibu Gulf industrial park under conditions of high salt fog, high humidity, strong ultraviolet radiation, and tidal alternation, this paper integrates six specialized research studies to propose an appropriate combination of corrosion detection and protection technologies. For detection, a hierarchical system is established: ‘infrared thermography for large-area screening—magnetostriuctive low-frequency guided wave for long-distance coarse scanning—pulsed eddy current and electromagnetic ultrasonic for close-range quantitative assessment.’ For protection, a multi-layer composite anti-corrosion coating combined with cathodic protection is used for external corrosion, while internal corrosion is mitigated through internal anti-corrosion coatings, addition of corrosion inhibitors, and operating condition optimization. In terms of management, based on strength verification and fitness-for-service evaluation, a full lifecycle management model of ‘regular inspection and online monitoring’ is constructed.

Keywords: Beibu Gulf; Industrial Park; Industrial Pipelines; Corrosion Detection

北部湾海域工业园区以港口为依托，形成了石油化工、冶金、能源输送等产业集群，工业管道总里程超过数千公里，是物料和能源传输的骨干脉络。此区域海洋环境很特殊，年平均盐雾浓度为 $35\sim50\text{mg}/\text{m}^3$ ，相对湿度常年处于 $75\%\sim95\%$ 之间，紫外线辐射强度年平均值为 $2.5\sim3.0\text{W}/\text{m}^2$ ，每天要经受 $6\sim8$ 次潮水的干湿变化，管道的腐蚀速度比大陆工业区高出了 $5\sim8$ 倍。与陆地管道相比北部湾园区管道还有“环境更恶劣、损伤模式单一集中”这两个特点，据统计，海上和沿海管道的腐蚀损伤超过总损伤的70%，而且主要以大气腐蚀、生物腐蚀和保温层下腐蚀为主，和陆地管道所占的5大类共82种损伤模式形成了鲜明的对比。现在园区管道防腐整治技术存在精准度不高、耐久性不够好、防护体系不完整的问题，迫切需要参考相关文献技术成果，建立有针对性的解决办法，这也是保证区域工业生产安全、生态环境稳定的关键所在。

1 沿北部湾海域工业园区工业管道腐蚀检测技术

1.1 多维度检测技术组合

对于北部湾园区管道架空、埋地、室内等多种布

置形式分层检测流程可以进一步细化技术匹配方案。在大范围筛查阶段，红外热波成像技术已成功地在某石化园区的运用中排查出3个隐藏的泄漏点—通过捕获管道表面温度场差异，找出壁厚减薄超过30%的区域，检测效率达 $2000\text{m}^2/\text{天}$ ，比传统人工巡检提高10倍。远距离粗扫阶段，要根据不同管径来选取不同的导波类型：对于4in以上的长直管段，要用磁致伸缩超声导波。用铁钴带做激励源能产生导波信号，导波可以传播到50m的距离，所以能很快定位船舱、船边等不易到达地方的鼓包腐蚀；对2~3寸的管径管道，比如车间工艺管子的话，就用压电超声导波，压电超声导波的传输距离比较短，一般只有30m左右，但是压电超声导波的分辨率比磁致伸缩超声导波要好，可检测到大于5mm的腐蚀缺陷。

近距离定量测定时，脉冲涡流和电磁超声组合使用要依据环境调节参数。在北部湾高湿环境里，脉冲涡流检测需要把激励频率调到 $500\text{Hz}\sim1\text{kHz}$ ，以减少信号衰减，保证穿透50mm厚保温层之后依然能准确得到壁厚数据。某项目用此技术检出的 $660\text{mm}\times200\text{mm}$ 腐蚀区域，经过电磁超声复验后，最

薄壁厚误差只有 $\pm 0.1\text{mm}$ 。交流电磁场检测技术应用于北部湾园区泵进出口管道中时，不需要打磨环氧涂层，就可以探测出长度 $\geq 3\text{mm}$ 的表面疲劳裂纹，检测合格率达到了98%，大大降低高空作业风险。

1.2 应力腐蚀早期检测

北部湾园区管道因为介质压力波动，以及潮汐作用力而存在拉应力集中，再加上高盐雾、酸性介质等影响，应力腐蚀开裂的风险很大。传统的线性超声检测微米级裂纹的检出率不足30%，非线性超声混频检测技术则可以很好地解决这个问题。在北部湾X70材质输气管道检测中搭建RITECRAM-5000SNAP高能超声系统，使用2.5MHz斜探头激励两列5MHz和10MHz入射波，在微损伤处产生和频与差频信号。非线性系数 β 值为0.008–0.028；远离焊缝的正常区域， β 值稳定在0.008–0.012，对应的里氏硬度为245–260HV10；而焊缝热影响区， β 值升高到0.02–0.028，硬度降到220–235HV10，表示该区域已经出现早期应力腐蚀微裂纹。该技术将应力腐蚀检测的时间提前到“微损伤阶段”，比传统技术预警时间提前了6~12个月。

1.3 腐蚀机理及速率监测

电化学测量技术可以实时监测北部湾管道的腐蚀动态。实验数据表明，在园区工业循环水管道内，当碳钢开路电位从 -0.6V 降到 -0.75V 时，腐蚀电流密度从 $5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 增加到 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，换算成腐蚀速率 0.05mm/a 变成 0.1mm/a ；在加入50ppm咪唑啉类缓蚀剂以后，电荷转移电阻从 100Ω 变为 1000Ω ，双电层电容由 $20\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 降为 $5\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ，缓蚀率可达90%，该作用可持续保持30天以上。表面分析技术显示了腐蚀微观过程，用扫描电镜观察，北部湾管道表面点蚀坑大都是圆的或椭圆的，直径30到 $80\mu\text{m}$ 左右，深度10至 $30\mu\text{m}$ 左右，坑里富集了氯离子，X射线衍射分析结果是腐蚀产物主要是 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 和 Fe_3O_4 ，浪花飞溅区铁锈的含量为70%以上，埋设地段铁矿石占比超过60%，和不同区域氧含量差距相关。

2 沿北部湾海域工业园区工业管道腐蚀防护技术

2.1 外防腐体系优化

多层复合防腐涂层体系要根据北部湾各个腐蚀区的情况来配置。对于轻度腐蚀区，选择“环氧磷酸锌底漆+聚氨酯面漆”，该体系耐盐雾时间可达1500h，5年内无大修；中度腐蚀区，采用“水性环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+脂肪族聚氨酯面漆”，总厚度 $\geq 240\mu\text{m}$ ，耐盐雾时间大于2500h，3年内一次大修；重度腐蚀区，使用“无机富锌底漆+玻璃鳞片环氧中间漆+氟碳面漆”，总厚度 $\geq 360\mu\text{m}$ ，耐

候性达到15年，而且要配合牺牲阳极保护，选用锌镁铝合金阳极，在浪花飞溅区每2m布置一块，潮差区每3m布置一块，通过动态监测保护电位，保证防腐层损坏的地方金属不会被腐蚀。

3PE防腐涂层被广泛用于北部湾长输管道中，涂层结构为“环氧粉末+胶黏剂+聚乙烯”。各层之间的结合力大于等于 $70\text{N}/\text{cm}$ ，抗阴极剥离性能小于等于 10mm ，埋地管道使用寿命20年以上。对于已有管道的防腐修复，使用冷喷锌和环氧封闭漆施工时不需要喷砂除锈，成本比传统的喷砂降低40%，而且20年的维护总成本比单纯的涂装便宜25%。

2.2 内腐蚀控制内防腐涂料选择要根据输送介质的性质

输送油品和天然气介质的管道用高性能环氧内防腐涂料，采用高压无气喷涂使涂层均匀覆盖，在弯头、三通等易冲刷的部位涂层厚度增加20%–30%，可耐受介质流速 $\leq 3\text{m/s}$ 的冲刷；输送含重金属离子工业废水的管道选用聚氨酯内防腐涂料，耐化学腐蚀性能好，在pH值3–11范围内稳定，且与金属基体附着力 $\geq 5\text{MPa}$ 。缓蚀剂添加要精准把控参数：对含有 H_2S 、 CO_2 等腐蚀性油气介质的管道，用有机磷酸盐类缓蚀剂，浓度50–100ppm，添加频率每月一次；通过在线监测系统实时检测缓蚀剂浓度，保持管道内壁形成稳定的保护膜；对工业循环水管道用锌盐–磷酸盐复合缓蚀剂，浓度200ppm，可将碳钢腐蚀速度控制到 0.03mm/a 以下。

工况参数优化也一样重要。控制管道内介质流速不得超过 2m/s ，避免湍流腐蚀；冶金园区将冷却水管的直径由DN100改至DN125之后，流速由 2.5m/s 降低到 1.8m/s ，腐蚀速度降低40%；介质温度要维持在 $50\sim 65^\circ\text{C}$ 之间，过高的温度会加快腐蚀反应，必要时可以采用岩棉保温隔热层，控制温度波动不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；定期执行智能化清管作业，清管器上装载有超声波检测仪，每隔6个月执行一次清洁作业，可以清洁出管壁90%以上腐蚀产物和沉积物；某石化园区实施后，管道的腐蚀速度从 0.2mm/a 降到了 0.08mm/a 。

2.3 结构与施工优化

双金属衬里复合管适合北部湾高腐蚀介质管道使用。X52/825冶金复合管，内层825合金，外层X52钢，通过对管内高压 10MPa 以及材料线胀系数，两管间的紧度达到 0.8MPa ，经过腐蚀试验720h后无开裂漏液现象，可以应用于含 H_2S 的石油输送管道。施工环节用半机械化技术提高质量：除锈作业用自走式喷砂机器人（效率 $200\text{m}^2/\text{h}$ ，喷砂到 $\text{Sa}2.5$ 级，粗糙度 $40\sim 70\mu\text{m}$ ，比人工除锈效率提高3倍；喷涂作业用爬壁

机器人，负载 150–200kg 的设备，适应储罐曲面及焊缝凹凸面，涂料损耗率< 15%。某跨海管道项目用该技术后，工期缩短 22 天，人工成本降低 37%。

施工质量控制要形成闭环。从原材料进场和性能检测报告、表面处理、涂层施工到固化养护，湿度≤ 85%，每个环节都设立质量控制点。涂层检查用 3000V 电火花检测（来控制，项目通过此项控制，涂层一次合格率从 85% 提高到 98%，避免施工缺陷引发后期腐蚀。

3 管道全生命周期安全的腐蚀评估与管理

3.1 腐蚀强度校核与适用性评价

当管道腐蚀减薄率大于 20% 时，应按照《ASMEB31.3》标准对强度重新校核。北部湾的某平台直径为 Φ508mm、壁厚为 9.53mm 的 A234Gr.WPB 原油管，投用 14 年后检测发现在弯头处的腐蚀减薄率达到了 68.31%，壁厚最薄的地方为 3.02mm。计算得出：按设计压力 1.586MPa 计算厚度为 2.91mm，按工作压力 0.827MPa 计算厚度为 1.32mm，但该管径(NPS20)在温度<205℃时最小结构厚度为 3.1mm(参考表 2)>，有效厚度 2.59mm 不能满足要求，判定需要维修更换。如因生产原因不能停机，则按 GB/T19624-2019 附录 H 做合于使用评价：将腐蚀区规则化后，计算出无缺陷管道的塑性极限内压 PLO=2.8MPa，有缺陷管道的 PLS=2.2MPa，实际工作压力 P=0.827MPa，代入公式：

$$(P/PLS)^2 + (M/MLS)^2 = (0.827/2.2)^2 + 0 = 0.14 \leq 0$$

3.2 全生命周期管理体系构建

根据成本优化的思想，北部湾园区管道应先采用长寿命的防腐方案。经济性对比显示：传统溶剂型环氧富锌涂层的起始成本为 120 元 /m²，10 年内要维护三次，总成本为 260 元 /m²；水性无机富锌涂层的起始成本为 150 元 /m²，10 年内只维护二次，总成本为 230 元 /m²，全生命周期的成本下降了 11.5%；如果使用石墨烯锌纳米涂层，不用大修可使用 20 年，总成本为 300 元 /m²，与传统涂层 20 年的总成本 520 元 /m² 比较，下降率达到了 42.3%。

在线监测系统是管理的核心。在管道重要位置安装腐蚀电位传感器和壁厚检测传感器，数据利用 LoRa 无线传输到监控平台，传输间隔为 1h。平台装载腐蚀预测模型，根据最近 6 个月壁厚数据拟合出腐蚀速率曲线，当预测一年内壁厚降到最小结构厚度时，自动发出警报。某园区采用此系统之后，突发维修次数由原来的每年 8 次降到了现在的 2 次，停产损失减少 80%。同时进行 1 年期和 3 年期定期检查：1 年期检查用红外热波与低频导波快速筛查，3 年期检查用非

线性超声与脉冲涡流进行全面检查，形成“在线监测+定期检查”双重保障。

4 结语

北部湾海域工业园区工业管道的腐蚀检测和防腐措施应紧密围绕区域性海洋环境的特性来制定，并且用六个专业文献技术作基础支撑，构建“检测精细化、防护体系化、管理全周期”的技术方案。利用分层检测技术实现腐蚀缺陷的早发现、早识别，依靠复合防护技术切断内外部腐蚀途径，凭借科学评估和智能管理延长管道寿命。未来要推动检测技术的智能化更新（如用无人机搭载红外热波成像）、防护材料的环保化提升（低 VOC 水性涂料），继续完善全生命周期成本，为北部湾园区工业高质量发展提供强有力的管道保障。

参考文献：

- [1] 协会首届“腐蚀控制工程”大会会议纪要 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(07):1-23.
- [2] 瞿法军 , 张元元 . 变换气废热锅炉换热管腐蚀泄漏自动监测方法 [J]. 化工机械 ,2025,52(03):468-473.
- [3] 宁米彦 , 张恒 , 王乐 , 等 . 在用工业管道局部减薄体积缺陷的计算及安全评定 [J]. 锅炉制造 ,2025,(03):62-64.
- [4] 连江河 . 聚脲防水涂料在工业厂房中的应用 [J]. 工程技术研究 ,2025,10(02):125-127.
- [5] 王宏 , 冯佳俊 , 戴旗 , 等 . 基于 CNN-LSTM-CS 工业管道腐蚀率预测模型 [J]. 计算机系统应用 ,2024,33(05):103-109.
- [6] 刘海朝 , 胡圣忠 , 梁海明 , 等 . 脉冲涡流检测技术在工业管道检测中的应用 [J]. 中国特种设备安全 ,2023,39(S2):81-85.
- [7] 王海涛 , 李静 , 张宏伟 . 海洋环境下复合防腐涂层体系性能评价与寿命预测 [J]. 材料保护 ,2024,57(1):88-94.
- [8] 黄灵刚 , 李广 , 周振宇 , 等 . 海上油田腐蚀套管更换实践 [J]. 石油钻采工艺 ,2012(S1):121-124.

作者简介：

凌子祥 (1995-)，男，壮族，广西崇左人，学历：大学本科，职称：助理工程师，主要研究方向：能源化学工程。

甘瑞霖 (1999-)，男，汉族，广西北海人，学历：本科，职称：助理工程师，主要研究方向：管道检测。

吴凯平 (1987-)，男，汉族，广西浦北人，学历：大学本科，职称：工程师，主要研究方向：特种设备安全评估。