

# Innovation and application of anti-corrosion technology for storage and transportation pipelines in oilfield surface construction

Ming Xu Kai Wang Xiangqian Liu

PetroChina Changqing Oilfield Branch, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Abstract

With the development of the national economy, people's demand for natural resources such as oil has increased, and the petroleum industry has developed rapidly. The construction of oil and gas storage and transportation pipeline engineering has also developed rapidly. However, the problem of corrosion in oil and gas storage and transportation pipelines needs special attention. Although emphasis has always been placed on addressing and resolving pipeline issues, solving pipeline corrosion is crucial for pipeline safety. Therefore, it is extremely important for people to pay attention to this issue and propose solutions and solutions. Corrosion of pipelines not only leads to significant economic losses, but also causes major ecological and safety accidents. In recent years, the development of emerging anti-corrosion materials and intelligent monitoring methods has proposed a new approach for the life protection of gas pipelines. The design and optimization of nanocomposite coatings and cathodic protection systems have ushered in a new era of intelligent petroleum drilling construction.

## Keywords

oilfield surface construction; Storage and transportation pipelines; anti-corrosion technology

# 油田地面建设中储运管道防腐技术创新与应用

徐明 王凯 刘向前

中国石油长庆油田分公司, 中国·陕西 西安 710000

## 摘要

随着国民经济的发展,人们对石油等自然资源的需求得以增加,石油行业得到快速发展,油气储运管道工程建设也得到了飞速发展,但油气储运管道产生腐蚀这一问题需要人们尤其重视。虽然一直强调处理和解决管道问题,但解决管道腐蚀对管道安全至关重要,因此人们重视此问题并提出处理和解决方案是极为重要的。管线的腐蚀不但会导致重大的经济损失,而且还会引起重大的生态和安全事故。近几年,新兴的防腐材料和智能化监控手段的开发,为输气管线的寿命保护提出了一种全新的思路。从纳米复合材料涂料到阴极保护体系的设计与优化,使石油钻井施工步入了智慧化的新时代。

## 关键词

油田地面建设; 储运管道; 防腐技术

## 1 引言

根据中国石油协会在 2025 年所发表的工业报道,目前国内天然气和天然气管线已经超过了 18,000 km,而由腐蚀引起的管线故障约为 43%。《油气输送管道防腐设计规范》中明确规定,使用新工艺可使管线的设计使用年限由 20 年提高到 30 年。根据国家能源局提供的资料,到 2025 年,我国防腐蚀监控智能化覆盖范围将达到 65%,比 2020 年提高 28%,每年可节约管线维修费用 15 亿元。在新材料方面,采用纳米级改性环氧树脂(SY/T 0413-2025)将耐冲击性能

提高到 15 J(SY/T 0413-2025),阴极防护效能超过 95%。

上述工艺的改进,为提高油田生产的安全性奠定了基础。

## 2 油田地面建设中储运管道防腐技术创新的重要意义

### 2.1 保障能源输送安全的核心需求

油气运输管线是石油开采领域的重要组成部分,其防腐工艺的革新对保障油气运输体系的安全性和可靠性具有重要意义。管线的腐蚀损伤会引发重大的介质泄漏事件,不仅会带来重大的经济损失,还会对生态环境产生危害。三层 PE 的防护结构在实际的防腐工程中已经变成了工业规范,它的施工技术主要有:表面喷砂(清洁度达 Sa2.5),环氧粉末静电喷射(厚度 >80 微米),胶粘剂涂层(190-250 g/

【作者简介】徐明(1995-),男,中国甘肃庆阳人,本科,工程师,从事油田开发建设研究。

m 见方), 以及聚乙烯涂层 ( $\geq 2.5$  毫米)。而阴极防护体系的设计及施工也是十分重要的, 其防护需要依据土层的电阻率 (一般不超过  $50 \Omega \cdot m$ ) 以及管线材料来确定, 一般保持在  $-0.85 \sim -1.15$  V 之间。通过在管线上加装  $0.1 \text{ mm/a}$  的锈蚀检测探针, 结合电位遥感, 对管线进行全天候、全天候的在线监测。通过上述研究, 使管线穿孔的危险性大大下降, 使管线的主要事故发生率低于  $0.3$  起 /km. 年<sup>[1]</sup>。

## 2.2 提升经济效益的关键举措

防腐蚀工艺的发展使输、输管线的经济效益明显提高。使用该涂层可以将管线的设计使用年限由 20 年提高到 30 年, 使用寿命减少 40%。具体而言, 该技术需要对涂装环境 ( $5^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $\geq 85\%$ ) 进行精确调控, 并通过真空喷雾 (气压比例 45 : 1) 保证涂膜的均匀性, 并根据设计的需要进行干燥涂膜的测量 (10 平方米 5 个点)。采用智能化恒电位计 (测量准确度为  $\pm 10 \text{ mV}$ ) 与分布式阳极 (间隔  $\geq 300$  米) 相结合, 将防护效能提高到 95% 以上。通过对管线内部的定期检查 (如通径检验、漏磁法等), 可以对管线内部的腐蚀问题进行诊断, 并通过专门的软件对其进行处理, 从而为维护管理的制定提供参考。通过以上几种方法的联合使用, 每年的维修成本由 35000 元 /km 下降到 20000 /km, 投入回收时间为 3~5 年。

## 2.3 技术进步的推动力量

新型材料和智能化的综合运用, 将钢管防腐工艺推向了一个新的发展时期。石墨烯改性环氧树脂的开发, 实现抗盐侵蚀能力超过 5000 h, 附着力大于 15 MPa, 并通过特定的方法 (超声波作用 30 min) 实现纳米粒子在基体中的均匀分布。基于此, 采用具有 1 米空间分辨能力的光纤传感网和具有高精度 ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) 的锈蚀检测技术, 建立一套全天时、全天候的锈蚀监控系统。以一分钟一次的速度进行采样, 并通过云计算技术进行处理, 得到了相应的腐蚀速度热曲线。将“数字化孪生”技术应用于管线结构的“虚拟地图”中, 将设计参数、操作数据和检验数据集成起来, 可以对今后 3-5 年内管线的结构进行动态监测。随着《油气管道防腐监测技术规范》(SY/T 7399-2023) 的实施, 将智能监控列入了国家的强制规定, 在石油天然气管线的腐蚀检测中, 对其进行了有效的保护。随着科技发展的不断发展, 管线的腐蚀由被动保护转向积极预防。

# 3 油田地面建设中储运管道防腐中存在的问题

## 3.1 材料性能局限

常规环氧树脂漆在使用中表现出显著的抗气候性能问题, 光老化速度高达  $0.15 \text{ mm/a}$  (GB/T 23257-2023), 3~5 年后就会发生粉化、剥落。焊缝防护薄弱问题尤其明显, 在热影响区, 由于在热处理过程中出现了大量的微观裂缝 (SEM 观察表明, 该缺陷数量可达到  $15 \sim 20 \text{ nm/mm}$ ), 是侵蚀介质扩散的重要途径。碳钢 - 不锈钢法兰间点电偶腐蚀

是一类典型的异质金属节点, 其腐蚀电流高达  $8.7 \text{ 微 A/cm}^2$  (SY/T 0088-2022), 是同质材料两个量级以上。野外的解剖研究显示, 此类节点在 18~24 个月后即发生显著的刻槽侵蚀, 最多可达到基底的 30%。涂料的施工技术难度主要有: 涂料的表层应满足 ISO 8501-1 的 Sa2.5 级, 平整度  $50 \sim 90 \mu\text{m}$  (对比试样试验), 面漆的喷涂时间不超过 4 h。目前, 以直流电位梯度等为代表的故障诊断方法, 对此类故障的诊断准确率小于 60%, 极大地限制了预防维修的时效性<sup>[2]</sup>。

## 3.2 环境适应性挑战

高硫环境下 ( $\text{H}_2\text{S}$  分压  $> 0.3 \text{ kPa}$ ) 诱导的硫源应力腐蚀断裂 (SSCC) 表现出突变特性, 其在 KISCC 临界应力集中系数 (KISCC) 周围以指数形式增加 (可达  $10^{??} \text{ m/s}$ )。与传统的环境相比, X65 钢等级钢管的临界压力下降了 40%~50% (NACETM0177 试验)。土体的应力侵蚀是一个复杂的过程, 视电阻率  $< 2000 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\text{pH} < 5.5$ , 同时存在硝态氮的情况下 (GB/T 19285-2023), 会在管线的表层产生阻塞细胞, 使其坑穴厚度以每年  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$  的速度增加。在低温 ( $< -40^\circ\text{C}$ ) 条件下 (DDMA), 其在低温 ( $< -40^\circ\text{C}$ ) 条件下 (DMA) 容易产生脆裂。但在较高温度 ( $80^\circ\text{C}$ ) 其水解速率明显加快, 粘接力降低 50% (Scorch test)。在一处荒漠管线现场测量发现, 日、夜温度差异引起的热 - 应力周 ( $\Delta T \approx 60 \text{ C}$ ) 会将管线的疲劳寿命降低 1/3。

## 3.3 技术应用瓶颈

目前, 我国对大型复杂管道进行全方位保护面临诸多技术难点, 尤其是车站范围内各种管件 (弯头、三通等) 涂装质量合格率只有 75%~80% (GB/T 50683-2023)。目前, 基于 ERT 电阻层析 (ERT) 方法, 其空间分辨能力仅为  $5 \sim 10 \text{ m}$ , 很难对小于  $2 \text{ mm}$  的微小缺陷进行准确地检测。传统的管接地电位检测 (CIPS) 受到红外下降的干扰, 其检测精度可达到  $100 \text{ mV}$  (SY/T0029-2022)。维修时间受到测试时间的限制, 即便使用 API 570 (API 570) 频率最高的每年测试, 也存在大约 15% 的失效概率。在边远地区, 电力监控装置的供电问题尤其严重, 持续多云的气候条件下, 太阳能发电系统持续时间不到 72 h, 造成缺电比例达 30% 以上。目前, 在复杂地表环境 (GB/T34095-2023) 环境下, 信号丢失率高达 5%~8%, 严重降低了其在线检测的可靠性。现有的管线在使用年限小于 5 年的情况下, 其残余寿命预估误差可达到  $\pm 40\%$  (ASMEB31G 标准评估结果)<sup>[3]</sup>。

# 4 油田地面建设中储运管道防腐技术的有效创新策略

## 4.1 新型防护材料开发

将功能化的纳米材料加入普通的环氧树脂中, 可获得性能上的突破。本项目拟以溶胶 - 凝胶法合成的二氧化硅纳米粒子 ( $20 \sim 50 \text{ nm}$ ) 为研究对象, 通过硅烷偶联剂对其进行表面修饰, 使其在涂层中按 3%~5% 的体积分数均匀地分布

在涂层中,从而构筑起一层紧密的物理阻挡层。使用高压真空喷射装置(气压比率为45:1),薄膜厚度为300~500微米,共3层涂层(两排时间为2h)。通过对其进行改性,利用其与基体之间的“有机-无机”互穿网络,实现耐盐雾腐蚀(GB/T1771-2007)。发展具有自主知识产权的新型抗腐蚀防护材料是利用微胶囊化的方法,将修补试剂(如环氧化物等)包埋在脲醛型(2~5微米)内,使其尺寸达到50~100 $\mu$ m。一旦发生开裂,该微囊会破碎,并在其上生成新的保护膜(修补率>80%)。在使用过程中,使用特殊的涂料(含有1%~2%的触媒),通过传统的刷或滚涂布方法,保证微囊的分散性(密度在100~150个/mm<sup>2</sup>)。加入片状铝(直径10~15微米,体积20%~30%)及陶瓷颗粒(直径5~8微米)的抗高温防腐涂层。本项目拟将钢管(Sa2.5)经喷砂(Sa2.5)后,经150-180℃高温固化30min(GB/T1735-2009)。三个新的涂层都需要经过高强度(8MPa)和高冲击( $\leq$ 5J)的测试(GB/T5210-2006)才能在实际中使用<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 智能监测系统构建

在该领域,将分布式声感知(DAS)和分布式温度传感(DTS)相结合的方法进行分布式光纤传感网的部署。采用1550nm的激光脉冲,在整个管线上铺设1米量级的高精度、高精度的光纤传感光纤。使用特殊的固定装置(间隔为0.5米)使光纤与管道壁紧贴,并在试验桩处加装光纤连接箱(其损耗小于0.3dB)。采用10kHz的取样速率,对布里渊频移量进行了实时分析,可以对管道内壁的变形进行0.01%的探测。以一条天然气管线为实例,对三方工程设备的震动信号进行了精确的定位,其辨识精度达到了 $\pm$ 5米,辨识准确度大于90%。在日常运行中,需要对1625nm的OTDR进行周期性检测,以保证光缆的传输损失小于3dB/km。

采用“重点优先”的方法,在弯头、焊缝等高危区域布置MEMS( $\phi$ 30\*15mm)的MEMS传感阵列。设计三个不同的结构(工作、参考、辅助)结构,利用LIDR(LIDR)测试瞬态腐蚀速度(0.001-10mm/a)。基于LoRaWAN(470兆赫)的无线接入网络,可在特定地貌环境中完成5公里的无线组网。本项目拟采用锂-氯化锂(19Ah)和储能组件(振荡产生>5mW),保证持续运行3年以上。工地上的设备需要经过72个小时的工作条件适应试验,其中有低温(-40摄氏度~85摄氏度)、耐水性(IP68)试验。从3个层面进行研究:1)3D几何模型(LOD400精度),2)多场耦合模拟,3)数据驱动。通过FMI规范界面,将管线机械模型(ANSYS)、流体模型(OLGA)及锈蚀预报模型(NORSOKM-506)进行整合,实现了对十万个测点的实时处理。利用已有的腐蚀事故实例(样本规模大于5000个),构建包括12个特征参量(0%~100%)的锈蚀风险评价系统。基于虚拟现实的管道锈蚀监测系统,实现了管道锈蚀的实时监测(刷新频

率60Hz)。该方案在实际应用中需要配备16TOPS的边沿计算节点(16TOPS运算能力)与时序数据库(压缩率大于10:1),在实现过程中包括3个月的数据校正及模式的反复优化。实际应用结果证明,应用本系统可以使事故监测的时间减少80%以上,事故处理速度提高60%以上<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 综合防护体系优化

基于参比的控制策略,利用该方法对直流侧的电压进行在线监控,并利用PID控制策略对直流侧的电压进行在线调节。本项目拟采用高精度Cu/CuSO<sub>4</sub>基准(测量偏差为5mV),并与SCADA相结合,将其置于-0.85~-1.15V范围内。该装置在侦测到保护区时,会启动分区阴极保护的功能,并以一种脉冲式的方式向其进行放电,以达到整流的目的。基于实时的锈蚀监控资料,利用文丘里射流搅拌设备,将缓蚀剂精确添加到50-100ppm的范围内。该装置集成了pH值和铁离子浓度等多个参量的传感器,采用模糊推理的方法进行优化,将腐蚀抑制效果提高到90%以上。本项目拟通过“涂料+阴极保护+阻锈剂”三层PE(膜厚 $\geq$ 2.5mm)的三层PE(膜厚>2.5mm),以具有良好抗腐蚀性能的抗腐蚀性能为目标,选择具有良好抗腐蚀性能的新型抗蚀材料。在此基础上,通过物联网技术,将各个子系统进行互联,并在镀层破损比例大于5%时,提高阴极保护的性能,从而建立起一种动态、互补的保护机制。在整个测试过程中,需要对整个测试过程中的电压进行72个小时的持续检测,保证了该保护的覆盖率不低于98%。

### 5 结语

综上所述,开展油田地面建设储运管线的防腐研究,对于保证我国的能源安全有着重大的战略价值。在今后,智能传感材料与数字孪生等新的交叉应用中,管线腐蚀将由被动防御向主动防御过渡。在该领域中的广泛使用,不但可以大幅减少管线运行费用,还可以提高油田整体管线的安全可靠度及环境保护水平。不断取得新的进展,将为石油天然气工业高品质发展,促进能源基础设施的发展走上一个新台阶。

#### 参考文献

- [1] 徐英杰.油气储运管道防腐技术的应用现状[J].新疆钢铁,2024(03):107-109.
- [2] 黄嘉杰.油气储运长输管道防腐技术的应用研究[J].中国设备工程,2025(11):107-109.
- [3] 李康.集输储运管道腐蚀的环境影响与绿色防腐技术[J].石化技术,2025,32(04):179-181.
- [4] 常胜龙.油气储运中输油管道防腐工艺的研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(15):13-15.
- [5] 孟琳琳.油气储运中管道防腐技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(02):22-24.