

# 老旧油气集输管线完整性评价与修复方案优化

杨玲 杜义宪 (森诺科技有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 老旧油气集输管线因长期服役于复杂工况, 易出现腐蚀、壁厚减薄及泄漏等问题, 不仅会影响油气输送效率, 还会对周边环境与安全构成威胁。本文基于老旧油气集输管线, 构建了老旧油气集输管线完整性评价体系, 在此基础上, 对当前老旧油气集输管线修复方案存在的不足进行了比较深入的分析, 并分别从非开挖技术推广、决策体系优化以及工艺创新等方面角度提出了针对性的优化策略, 以期为老旧管线的安全管理提供参考。

**关键词:** 老旧; 油气集输管线; 完整性评价; 修复方案

**中图分类号:** TE988 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0117-03

## Integrity Assessment and Repair Scheme Optimization for Aging Oil and Gas Gathering Pipelines

Yang Ling, Du Yixian (SINO SCIENCE AND TECHNOLOGY CO., LTD, Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Aging oil and gas gathering pipelines, having served long-term under complex operating conditions, are prone to issues such as corrosion, wall thinning, and leakage. These problems not only impact the efficiency of oil and gas transportation but also pose threats to the surrounding environment and safety. Based on the characteristics of aging oil and gas gathering pipelines, this paper establishes an integrity assessment system for such pipelines. Furthermore, it conducts an in-depth analysis of the shortcomings in existing repair schemes. Targeted optimization strategies are proposed from perspectives including the promotion of trenchless technologies, optimization of decision-making systems, and process innovation, aiming to provide references for the safety management of aging pipelines.

**Keywords:** Aging; Oil and Gas Gathering Pipelines; Integrity Assessment; Repair Scheme

随着“双碳”目标深入推进, 油气行业需在保障能源供应的同时强化环保与安全管理, 且《安全生产法》修订后进一步明确对老旧油气设施的安全管控要求, 而我国约40%的油气集输管线已服役超20年, 进入故障高发期。传统完整性评价依赖人工检测、指标单一, 已经难以满足当前政策要求与效率需求。同时, AI质检、双模传感以及非开挖等新技术的成熟, 为管线管理升级提供了技术支撑。因此, 开展老旧油气集输管线完整性评价与修复方案优化研究, 具有重要的现实意义。

### 1 老旧油气集输管线概述

#### 1.1 老旧油气集输管线现状

老旧油气集输管线中相当一部分服役时长已远超常规安全运行周期, 普遍进入各类故障集中爆发的阶段, 长期使用带来的老化损伤累积效应表现得十分明显。这些管线涵盖集输系统中的干线、支线等核心输送区段, 广泛分布在平原、山地等多种不同的地形区域, 部分管线还会途经化工园区、沿海高盐等对管线运行不利的特殊环境场景。受长期服役影响, 管线整体的安全运行余量持续下降, 在当前“双碳”目标提出的环保管控要求以及修订后《安全生产法》明确的安全管理标准面前, 适配程度已明显不足。

#### 1.2 老旧油气集输管线特征

老旧油气集输管线采用的材质种类较为多样, 不同材质在抵抗腐蚀以及承受疲劳损伤方面的能力存在明显不同, 部分管线的焊缝连接位置还存在着潜在的质量缺陷且会随服役时间增加愈发明显。管线输送的介质中含有具备腐蚀作用的成分, 运行时压力和温度波动会导致管线热胀冷缩, 这种现象长期作用会损害管线密封结构及防腐层且外部还面临多重环境影响。管线常见失效问题包括内外壁腐蚀、管壁减薄、几何形状异常及防腐层破损, 这些问题都容易引发泄漏等安全风险。

### 2 老旧油气集输管线完整性评价体系构建

#### 2.1 评价体系构建原则与框架

老旧油气集输管线完整性评价体系构建需依托科学性原则保证评价方法符合行业技术规范与客观规律, 依托系统性原则覆盖管道全生命周期各环节, 依托可操作性原则设计易获取数据与易执行的评价流程, 依托动态性原则适应管道运行状态变化。该体系以风险评估为核心导向, 将管道本体状况如材质类型与壁厚减薄情况、运行环境如输送介质特性与土壤腐蚀性、管理水平如检测频率与维护记录完整性等多维度指标纳入整合范畴<sup>[1]</sup>。框架设计包含数据采集层负

责收集各类基础信息，指标处理层对采集数据进行标准化处理与量化分析，风险评估层基于处理后数据开展风险等级判定，决策支持层根据风险评估结果输出针对性管理建议，形成从数据获取到决策输出的全流程管理机制。

## 2.2 评价指标体系设计

管道本体指标中材质类型决定基础耐受能力，不同材料在抗腐蚀与抗疲劳性能上存在差异，运行年限体现老化累积效应，随服役时间增加材料性能逐渐衰减，壁厚减薄率反映承载能力损耗，需结合设计壁厚判断安全余量，腐蚀程度需区分内外壁损伤形态量化评估，焊缝质量聚焦连接部位缺陷检查。运行环境指标里输送介质特性关注腐蚀性成分影响内壁状态，压力等级需控制在设计范围内避免负荷过高，温度变化引发热胀冷缩影响密封与防腐层结合，土壤腐蚀性通过成分湿度形成电化学环境作用于外壁。安全风险指标中泄漏历史梳理次数位置原因明确薄弱区段，第三方破坏风险评估周边人为干扰增加损伤概率，地质灾害风险关注地形变化带来的机械应力威胁。管理指标中检测频率按风险等级设定差异化周期，维护记录留存参数缺陷及处理细节保障追溯准确性，应急预案明确突发情况响应流程避免处置混乱。

## 2.3 数据采集与检测技术应用

内检测技术以智能清管技术为核心，通过带有特定排列机械抓手的测径清管器检测管线几何异常，机械抓手压着管道内壁会因横断面凹陷、偏圆、褶皱或管壁碎屑引起偏移，捕捉的偏移信号转换为电子信号存储至机载设备，后续经合格软件分析显示确定影响管道完整性的异常点，同时搭配漏磁检测技术在管道截面充满磁场，借助传感器感应磁场泄漏和偏移确定金属损失面积与位置<sup>[2]</sup>。外检测采用多频管中电流法与交流地电位梯度法联合使用，前者从管道检查头施加激励信号检测电流衰减判断防腐层状态，后者向管道施加检测信号借地电位梯度变化定位防腐层破损点。人工验证通过在检测缺陷点处开挖对比结果校准数据，数据融合阶段建立统一数据标准，整合内检与外检数据实现有效互通。

## 2.4 风险评估模型构建

风险评估模型构建先通过 K-means 算法对管道内检测获取的金属损失点位置、深度及几何异常数据进行聚类分析，将特征相似的缺陷数据归为同一类别，为后续风险分类提供基础数据支撑。再应用决策树和神经网络模型，输入缺陷数据与管道运行参数，通过模型训练构建缺陷风险分类模型，依据缺陷对管道安全的影响程度将风险划分为高、中、低三个等级。最

后结合层次分析法，从缺陷严重程度、管道运行压力及管线重要性等维度设定权重，对高风险缺陷进行优先级排序，为后续修复决策提供清晰方向。

## 2.5 完整性评价流程与标准

完整性评价流程先明确评价范围需覆盖集输管线的干线与支线，同时确定了解管线内外腐蚀状况、几何形状异常及防腐层完整性的评价目标。数据采集阶段采用内检技术与外检技术获取相关信息，之后对采集到的数据进行筛选处理，去除无效或干扰信息。指标量化环节将防腐层电阻率、金属损失深度等指标转化为可计算数值，权重分配需结合管线设计压力、输送介质等特性调整。风险等级评估通过管道缺陷失效压力模型结合 ERP 曲线开展，判断缺陷风险程度。评价结果验证通过在管线上选取典型点位开挖，对比开挖结果与检测数据进行修正。最后依据评价结果制定包含定期检测、缺陷监控的完整性维护计划，评价周期按风险等级划分，高风险管道每季度开展一次，中低风险管道适当延长间隔。

## 3 当前老旧油气集输管线修复方案存在的不足

### 3.1 传统开挖修复的局限性

传统开挖修复需对管线敷设区域开展大规模地面挖掘作业，从前期场地清理、围挡设置到挖掘施工，每个环节都需耗费较多时间，整体施工周期远超其他修复方式。这种修复方式需要投入大量挖掘设备与人工，同时挖掘后还需对地面进行回填与恢复，各项费用叠加使得综合成本远高于非开挖技术。大规模挖掘过程中会产生大量扬尘，这些扬尘会改变周边区域空气状态，导致扬尘污染指数上升，同时挖掘作业也可能对管线周边原有设施或地表植被造成扰动。

### 3.2 技术选择缺乏科学依据

修复方案制定过程中主观性较强，多依赖过往经验判断而缺少对管线实际工况的系统性分析。在成本考量上未建立全生命周期成本效益分析模型，无法全面权衡修复初期投入与长期运行维护的费用关系，易出现短期成本节省但后续问题频发的情况<sup>[3]</sup>。技术选择环节常与管线实际需求脱节，在高腐蚀环境下若选用普通修复材料，会因材料耐腐蚀性能不足加快管线再次损坏速度。

### 3.3 施工工艺与安全风险突出

施工过程中动火作业风险较高，油气富集区域内分布着大量可燃介质，动火操作若管控不当易引发燃烧或爆炸等安全事故，对周边人员与设备造成威胁。复杂地形条件下开展修复施工会面临明显难度，山地管道修复时地形起伏大且地面平整度差，施工设备难以平稳摆放和灵活移动，作业空间受限还会影响操作

规范性, 进一步增加施工难度。传统施工工艺在质量控制方面存在不足, 对修复部位的尺寸匹配度、材料贴合度等关键指标把控能力较弱, 难以达到预期修复精度, 可能导致修复后管线仍存在安全隐患。

### 3.4 智能化与信息化水平低

修复全过程的智能化与信息化水平较低, 检测阶段缺乏精准定位技术, 难以快速且准确锁定管道金属损失点或防腐层破损点的具体位置, 需额外耗费时间开展人工排查, 影响修复前期准备工作的效率。施工阶段缺乏实时监控手段, 无法动态掌握修复作业中关键参数的变化, 比如防腐层修复时的材料贴合情况或金属修补时的操作精度, 不能及时发现并调整施工偏差。评估阶段依赖人工判断修复效果, 采用的验证方法较为落后, 无法通过数字化手段量化修复后的管道性能, 难以全面且客观反映修复质量是否达到预期标准。

## 4 老旧油气集输管线修复方案优化策略

### 4.1 非开挖修复技术推广与应用优化

针对传统开挖修复的局限, 重点推广的紫外光原位固化修复技术, 需先将浸渍树脂的玻璃纤维软管缓慢拖入待修管道内部, 确保软管与管道内壁充分贴合后, 利用专用设备发射紫外线对软管进行照射, 使树脂固化形成高强度内衬层以替代受损管道结构<sup>[4]</sup>。该技术在施工效率上表现突出, 单日修复工作量能够达到 200m 以上, 大幅缩短修复周期。从适用场景来看, 它可适配管径在 DN200 至 DN2000 区间的管道, 尤其在化工园区和沿海高盐环境中更能发挥优势, 避免开挖对周边环境和设施造成干扰。

### 4.2 修复决策体系科学化构建

针对技术选择不科学的问题, 建立系统化决策机制需先开发基于 AHP 的多目标决策模型, 在模型中纳入技术可行性、经济性和安全性三方面因素进行综合考量, 让决策不再依赖单一维度判断。之后引入最小要求使用寿命评估方法, 通过该方法计算不同修复方案在满足基本使用需求前提下的经济临界点, 为成本与寿命平衡提供依据。还要构建修复方案决策支持工具, 将行业专家积累的知识和各类评估算法进行封装, 减少决策过程中的主观偏差。最后建立全生命周期成本效益分析模型, 在模型中全面考虑修复过程产生的直接成本、管线后续运行中的维护成本以及可能发生故障带来的损失成本, 让决策更贴合长期运营需求。

### 4.3 施工工艺创新与安全管控强化

针对施工风险问题, 创新工艺并强化安全管控需推广不动火缺陷修复技术, 该技术通过非明火操作方式处理管道缺陷, 无需开展传统动火焊接等步骤, 从作业源头切断动火操作可能引发的燃烧或爆炸隐患,

适配油气集输管线周边可燃介质易富集的环境特点<sup>[5]</sup>。同时应用氮气双段推油工艺, 作业时先借助油推清管器对管道内介质进行初步推送, 完成第一阶段处理后, 再投入氮气推清管器开展后续推送作业, 利用氮气的惰性特质隔绝管道内可燃介质与空气接触, 降低高风险区域施工中介质泄漏引发安全事故的概率, 从工艺设计层面提升整体作业安全性。

### 4.4 智能化技术集成与全流程优化

针对智能化水平低的问题, 构建“检测-修复-运维”全链条数字化管理模式需集成 CCTV 检测机器人与 AI 质检系统, 由机器人深入管道内部采集缺陷图像, AI 系统对图像自动分析以区分金属损失、防腐层破损等缺陷类型并量化程度, 实现管道缺陷精准识别与评估。修复过程中应用“双模传感系统”, 该系统实时捕捉树脂黏度变化数据, 依据数据反馈自动调整紫外线照射设备的光照强度, 保障树脂固化效果。修复后建立修复效果数字化评估体系, 通过三维建模还原修复前后管道的几何参数与结构强度, 直观对比修复效果。

## 5 结语

综上所述, 针对老旧油气集输管线, 需要构建起系统的完整性评价体系, 覆盖从指标设计到评价流程的全环节。同时, 还需要精准识别当前修复方案存在的不足, 并采取针对性的优化策略, 进而为老旧油气集输管线的安全运行提供可靠保障。未来可进一步探索智能化技术与管线全生命周期管理的深度融合, 研发更适配极端工况的修复材料, 推动老旧油气集输管线管理向更高效、环保、智能的方向迈进。

### 参考文献:

- [1] 赵彤, 张圣柱, 王旭, 等. 油气长输管线路由评价指标体系及模型构建研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(S2): 108-114.
- [2] 薛琨, 史宝成, 周凯丽, 等. 减氧空气驱油集输管线缓蚀剂防腐评价研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(18): 104-108+112.
- [3] 蒋志远, 李勇, 黄松, 等. 油气集输管线腐蚀穿孔修复材料理化性能研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(10): 29-33.
- [4] 王选涛, 师涛, 陈浩英, 等. 高分子材料修复技术在长输管线的应用 [J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(12): 29-33.
- [5] 陈辉. 长输管线缺陷点修复补强项目总结 [J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2013, (11): 117-118.

### 作者简介:

杨玲(1990-), 女, 汉族, 山东省烟台人, 本科; 中级工程师, 研究方向: 油气集输。