

# 石油管道腐蚀失效机理及全生命周期安全防护技术

刘 艳 樊龙龙 杨帆万里 (陕西华睿咨询服务有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 石油管道出现腐蚀失效的情况是限制油气输送安全的关键问题, 对化学腐蚀、电化学腐蚀以及应力耦合腐蚀的作用机制展开系统研究分析, 明确介质环境、材料特性以及运行工况的影响规律, 构建全生命周期监测体系, 包括建设期的无损检测、运行期的在线监测以及退役期的全面评估, 形成源头防控、过程管控、应急治理的三级防护技术路径, 以此为石油管道腐蚀防控提供技术支持, 促使油气输送安全保障体系得到升级。

**关键词:** 石油管道; 腐蚀失效机理; 全生命周期; 安全防护技术; 腐蚀监测

**中图分类号:** TE988 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0151-03

## Corrosion Failure Mechanism of Oil Pipelines and Full Life Cycle Safety Protection Technology

Liu Yan Fan Longlong Yang Fan Wanli ( Shaanxi Huairui Consulting Service Co., Ltd., Xi' an Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The corrosion failure of oil pipelines is a key issue restricting the safety of oil and gas transportation. A systematic study and analysis of the mechanisms of chemical corrosion, electrochemical corrosion, and stress coupling corrosion are conducted, clarifying the influence laws of the medium environment, material characteristics, and operating conditions. A full life cycle monitoring system is constructed, including non-destructive testing during the construction period, online monitoring during the operation period, and comprehensive assessment during the decommissioning period. A three-level protection technology path of source prevention, process control, and emergency treatment is formed to provide technical support for the corrosion prevention of oil pipelines and promote the upgrading of the safety guarantee system for oil and gas transportation.

**Keywords:** Oil pipelines; Corrosion failure mechanism; Full life cycle; Safety protection technology; Corrosion monitoring

石油管道作为油气资源输送过程中非常关键的核心基础设施, 其运行时的安全状况直接关联着能源供应的稳定性以及生态环境的安全性, 而因腐蚀所引发的失效问题乃是限制管道在整个生命周期内正常服役的关键妨碍因素, 此项研究着重关注石油管道腐蚀失效的内在机理以及全生命周期的安全防护技术, 全面且深入地分析化学腐蚀、电化学腐蚀以及应力耦合腐蚀各自的作用机制, 明确介质环境、材料特性与运行工况对于腐蚀进程所产生的影响规律。基于上述研究成果, 构建起一套包含建设期检测、运行期监测及退役期评估的全周期监测体系, 整合源头防控、过程管控以及应急治理等一系列防护技术路径, 为石油管道腐蚀防控工作提供理论方面的支持以及技术层面的方案, 以此推动油气输送管道安全保障体系不断完善并实现升级。

### 1 石油管道腐蚀失效的基础机理

#### 1.1 化学腐蚀的反应机制与影响因素

化学腐蚀指的是石油管道金属表面同环境介质发生直接化学反应的那种腐蚀形式, 在这个反应过程中不会产生电流, 腐蚀产物会直接沉积在管道表面, 石油管道所输送的原油以及成品油里面含有的硫化

物、氧化物等活性介质, 会和管道钢材里面的铁、碳等元素发生氧化还原反应, 生成相应的腐蚀产物。环境温度、介质浓度以及介质流动速率是对化学腐蚀产生影响的关键因素, 温度升高会让化学反应速率加快, 介质浓度增大就会使反应的剧烈程度提高, 而介质的高速流动会对管道表面的腐蚀产物膜造成冲蚀, 破坏保护膜的完整性, 让管道的腐蚀进程加剧, 缩短管道的服役寿命<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 电化学腐蚀的发生条件与作用过程

电化学腐蚀指的是石油管道于电解质环境当中出现的腐蚀状况, 这种腐蚀现象的发生要契合三个核心条件, 分别是存在电极电位差、有电解质溶液以及有闭合回路, 石油管道的表面因为钢材成分并不均匀, 存在着大量微观阳极和阴极, 而管道所处的如土壤、地下水等环境则作为电解质溶液, 构建成了一个完整的电化学腐蚀体系。在腐蚀的过程中, 阳极区域的金属原子会失去电子, 被氧化成为金属离子, 电子会借助管道金属本体流向阴极区域, 阴极区域的氧化性物质会获得电子并被还原, 电子的定向移动形成了腐蚀电流, 持续不断的电化学反应会致使阳极区域金属持续溶解, 使得管道壁厚变薄, 最终引发管道穿孔或者

破裂等失效问题。

### 1.3 应力耦合腐蚀的失效原理与破坏特征

应力耦合腐蚀是一种管道失效形式,由金属腐蚀与应力共同作用引发,应力来源主要有管道制造过程中产生的残余应力、运行阶段出现的内压应力以及外部环境导致的附加应力,该腐蚀形式破坏的原理是,应力作用致使管道金属内部产生微裂纹,腐蚀介质会进入裂纹内部,在裂纹尖端形成高度腐蚀的局部环境,加速裂纹的扩展。其破坏特征体现为腐蚀裂纹沿着应力方向延伸,裂纹大多呈现穿晶或沿晶扩展的形态,破坏过程有隐蔽性和突发性,相较于单纯腐蚀或单纯应力破坏,应力耦合腐蚀对管道造成的损伤更为严重,大多时候在没有明显外观腐蚀迹象的状况下,引发管道的脆性断裂,导致严重的安全事故<sup>[2]</sup>。

## 2 石油管道腐蚀失效的影响因素分析

### 2.1 介质环境因素对腐蚀失效的作用规律

介质环境作为诱发石油管道腐蚀失效的关键外部因素,不同的环境组分借助直接或者间接的作用对管道基体的腐蚀进程起到加速作用,土壤环境里的酸碱度、含盐量以及含水率可改变管道表面的电化学特性,酸性土壤容易引发氢去极化腐蚀,高盐环境会提高电解质的导电性,缩短腐蚀原电池的极化周期。油气输送介质中的硫化氢、二氧化碳等酸性气体,会跟管道金属发生化学反应生成可溶性腐蚀产物,破坏金属表面钝化膜的完整性,微生物代谢活动产生的有机酸与硫化物,会加重管道局部点蚀与缝隙腐蚀,高速流体的冲刷作用会使内壁腐蚀产物保护膜被剥离,让新鲜金属基体持续暴露,最终导致管道壁厚减薄甚至穿孔失效。

### 2.2 管道材料特性与腐蚀敏感性的关联机制

管道材料的成分以及微观结构直接决定着其腐蚀敏感性,这是影响腐蚀失效的关键内部因素,像碳钢和低合金钢这类常用材料,由于碳化物与杂质相分布不均匀,容易在晶界处形成腐蚀原电池,诱发晶间腐蚀,材料的纯度以及合金元素配比会改变其钝化能力,铬、镍等元素可促使金属表面形成致密钝化膜,提高抗均匀腐蚀能力,而硫、磷等有害杂质会降低耐蚀性,成为腐蚀萌生的薄弱部位。冷加工产生的残余应力会致使晶格畸变,增加应力腐蚀开裂风险,不合理的焊接工艺会造成焊缝区域组织不均匀,形成焊接热影响区的腐蚀短板,材料表面的粗糙度和缺陷也会成为腐蚀优先发生的位置<sup>[3]</sup>。

### 2.3 运行工况参数对腐蚀进程的调控作用

石油管道运行时的工况参数,借助动态调控腐蚀反应条件,对腐蚀失效的速率和形式有着直接影响,

输送压力出现波动,会使管道内壁的应力状态发生改变,在高压环境下产生的拉应力,会促使应力腐蚀开裂加速扩展,而压力交变的情况,则会引发腐蚀疲劳,致使微裂纹不断萌生并扩展。运行温度升高,会让腐蚀反应动力学过程加快,使离子迁移速率提升,钝化膜稳定性降低,造成均匀腐蚀速率以指数级增长,介质含水饱和度超过临界值时,会形成水膜,诱发全面腐蚀,蜡质与胶质沉积会形成局部缺氧环境,推动厌氧菌繁殖并引发垢下腐蚀,管道的启停频次以及输送间歇周期,会致使内壁出现干湿交替现象,加重氧腐蚀的发生程度<sup>[4]</sup>。

## 3 石油管道全生命周期腐蚀监测技术

### 3.1 建设期腐蚀隐患的无损检测技术

在石油管道腐蚀隐患防控工作里建设期占据着关键地位,无损检测技术可在不损害管道本体的状况下,精确识别材料以及施工环节中潜在的腐蚀风险,此项技术体系把超声波检测、射线检测以及磁粉检测当作核心内容,超声波检测借助声波反射信号来剖析管道壁厚的均匀程度,以此判断材料是否存在因轧制缺陷而引发的局部腐蚀倾向,射线检测借助电磁辐射穿透管道焊缝,捕捉焊接过程中有可能形成的气孔、夹渣等容易诱发腐蚀出现的结构缺陷,磁粉检测是针对铁磁性管道材料,依据磁场分布的变化来定位表面以及近表面的微裂纹,防止这类缺陷成为后期腐蚀扩展的起始源头。

借助在建设期开展全面的无损检测,可从根源上挑选出合格的管道材料、评估焊接质量,为管道全生命周期的安全运行构建起第一道防线,保证后续服役阶段腐蚀防控工作可有序进行。

### 3.2 运行期腐蚀状态的在线监测方法

在运行期间,石油管道长时间处于复杂介质环境以及动态工况之中,在线监测方法可达成对腐蚀状态的实时追踪以及动态预警,这种监测模式依靠电阻探针、电化学阻抗谱以及超声导波等技术手段,电阻探针借助监测探针在腐蚀过程里电阻值的变化,换算得出管道内壁的腐蚀速率,电化学阻抗谱借助电极与管道表面的电信号响应,来分析腐蚀反应的动力学过程,以此判断腐蚀类型与发展阶段,超声导波技术利用低频声波在管道内的长距离传播特性,实现对管道全线腐蚀缺陷的定位和定量分析。

在线监测系统可以把采集到的腐蚀数据实时传输到控制中心,结合工况参数展开综合研判,当腐蚀指标超出安全阈值时会自动发出预警信号,指导运维人员及时采取防护措施,有效防止因腐蚀失效引发的泄漏、爆管等安全事故<sup>[5]</sup>。

### 3.3 退役期腐蚀损伤的全面评估技术

退役阶段石油管道的腐蚀损伤评估乃是管道安全处置以及资源化利用的前提条件,全面的评估技术要针对管道整体的腐蚀状况展开系统的诊断与分级判定,评估工作起始于管道外观检查,借助宏观观测来确定表面腐蚀坑的分布情况、尺寸大小以及密度,初步判断腐蚀的严重程度,基于此展开壁厚测量,运用超声波测厚仪针对管道不同截面实施多点检测,获取壁厚减薄的数据,计算剩余强度,结合材料理化性能测试,剖析腐蚀对管道材料力学性能所产生的影响,明确材料是否因为腐蚀而出现脆化、强度下降等问题。依据评估结果,可把退役管道划分成安全处置、修复再利用以及报废等不同类别,为退役管道的规范化处理给予科学依据,避免了腐蚀管道盲目报废所造成的资源浪费,又防止了存在严重腐蚀隐患的管道违规复用所引发的安全风险。

## 4 石油管道全生命周期安全防护技术

### 4.1 源头防控:材料优选与表面防护技术

源头防控在石油管道全生命周期腐蚀防护里是最为关键的起始部分,重点是要从材料以及表面处理方面切断腐蚀产生的原因,材料的挑选要依据管道服役时的介质环境、压力等级以及温度条件来进行,优先选择耐蚀合金材料或者高等级防腐钢材,借助优化材料的化学成分与金相组织,提高其抵抗化学腐蚀和电化学腐蚀的内在性能。表面防护技术主要关注管道外表面和内表面的防护处理,外表面运用防腐涂层涂装工艺,形成紧密的物理隔离屏障,阻挡外界腐蚀介质与管道基体相接触,内表面可借助化学或者钝化处理,提高内壁的耐蚀性以及光滑度,减少介质滞留导致的局部腐蚀,经由材料与表面防护共同发挥作用,可从根本上降低管道腐蚀失效的可能性,为后续防护环节打下基础。

### 4.2 过程管控:电化学防护与环境调控技术

过程管控在石油管道运行阶段的腐蚀防护里属于核心手段,是要依靠动态干预措施来维持管道的腐蚀防护状态,电化学防护技术主要有阴极保护和阳极保护这两类,阴极保护是借助施加外加电流或者牺牲阳极的办法,让管道基体处于电化学阴极状态,抑制阳极溶解反应的出现,在埋地管道与水下管道的腐蚀防控方面广泛适用,阳极保护是针对特定的强腐蚀介质环境,凭借控制阳极极化电流,使管道表面形成稳定的钝化膜。

环境调控技术要实时监测管道服役环境中的腐蚀因子,依靠调节介质的pH值、去除杂质离子、控制湿度等途径,优化管道的运行环境,降低腐蚀介质的

侵蚀性,电化学防护与环境调控相结合,达成了对管道运行阶段腐蚀风险的动态管控,保障管道在服役周期内安全稳定地运行。

### 4.3 应急治理:腐蚀缺陷修复与补强技术

应急治理在石油管道腐蚀防护方面起着非常关键的作用,它是最后一道防线,当运行过程中检测出腐蚀缺陷时,要采取高效且可靠的修复与补强措施,以此防止因缺陷扩展而引发泄漏或破裂事故,腐蚀缺陷修复要依据缺陷的检测数据,精确评估缺陷的位置、尺寸以及损伤程度,对于浅层局部腐蚀缺陷,可采用补口补伤技术,借助局部打磨、重新进行涂装的办法恢复防护层的完整性。对于深度腐蚀缺陷,可运用焊接修复工艺,填补腐蚀造成的基体损伤,补强技术针对缺陷比较严重但还没有完全丧失承载能力的管道区域,采用复合材料补强或者套筒补强的方式,提高管道的结构强度以及承压能力,恢复其服役功能,应急治理技术需遵循快速响应、精准施策的原则,结合无损检测技术的实时数据,保证修复补强后的管道符合安全运行标准,延长管道的剩余使用寿命。

## 5 结语

本研究针对石油管道腐蚀失效机理以及全生命周期安全防护技术展开了全面且深入的剖析,详细明确了化学腐蚀、电化学腐蚀以及应力耦合腐蚀各自的作用机制,清晰地厘清了介质环境、材料特性以及运行工况之间的影响规律,成功构建起一套包含建设期检测、运行期监测以及退役期评估的全周期监测体系,形成了源头防控、过程管控以及应急治理的三级防护技术路径。研究所得成果为石油管道腐蚀防控提供了理论方面的依据以及技术层面的支撑,油气输送管道安全保障体系实现优化升级,对于推动管道行业实现长效安全发展有着关键的现实意义。

### 参考文献:

- [1] 徐学武. 海底油气管道内腐蚀分析与防护 [J]. 期刊论文, 2014, 35(5).
- [2] 姜昌亮. 油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨 [J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1081-1091.
- [3] 臧国军, 崔斌. 油气集输管道内涂层金属腐蚀失效机理研究 [J]. 石油化工设计, 2005, 22(04): 3.
- [4] 车俊铁, 姬忠礼, 黄俊华. 不锈钢管道焊接处海水腐蚀失效分析与机理研究 [Z]. 2026-01-10.
- [5] 吴明, 谢飞, 陈旭, 等. 埋地油气管道腐蚀失效研究进展及思考 [J]. 油气储运, 2022(006): 041.

### 作者简介:

刘艳 (1986.06—), 女, 汉族, 陕西延安人, 本科, 工程师, 研究方向: 石油天然气安全。