

# 长距离油气输送管道的腐蚀防护与检测技术分析

丁 硕 (泰安技师学院, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 长距离油气输送管道在能源输送中占据重要地位, 腐蚀问题严重影响其安全性、经济性和运行效率。本文分析了油气管道腐蚀的主要类型及其形成机理, 探讨了常见防护技术的应用现状和发展趋势, 重点介绍了外部防腐涂层技术、阴极保护技术和新型防腐材料的防护效果。针对管道腐蚀检测本文分析了常用的腐蚀检测技术, 如金属损失测量、壁厚检测等, 以及无损检测技术在管道维护中的应用。随着管道监测技术的发展, 智能化监测系统和物联网技术的应用为腐蚀检测提供了更加精准和实时的手段, 可以提高管道运行的可靠性和安全性。

**关键词:** 油气管道; 腐蚀防护; 阴极保护; 涂层技术; 腐蚀检测; 智能化监测

## 1 引言

长距离油气输送管道作为现代能源运输的核心设施, 承担着石油和天然气从生产地到消费市场的关键任务。随着油气资源开发的不断深入, 管道的输送压力和输送距离逐渐增加以及管道的腐蚀问题日益突出, 已成为制约管道安全性和经济性的主要因素之一。腐蚀会降低管道的使用寿命并增加维修和替换的成本, 还可能引发泄漏、爆炸等严重安全事故, 对环境和人民生命财产安全构成威胁。管道腐蚀问题复杂, 涉及外部环境、材料特性、输送介质等多重因素, 不同类型的腐蚀在管道不同部位表现出不同的危害。为了解决这一问题相关防腐技术和检测手段逐渐得到了应用和发展。防腐技术方面涂层防护、阴极保护等技术已得到广泛使用, 但应用效果仍受到腐蚀类型、工作环境和材料特性等多方面的影响, 亟需进一步的研究与优化。

## 2 长距离油气输送管道腐蚀的类型与机理

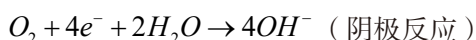
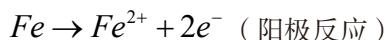
### 2.1 腐蚀类型的分类与特征

油气管道在运输过程中的局部腐蚀一般发生在管道的局部区域, 其特点是腐蚀集中且深度较大, 常见于管道内壁和外壁的某些区域, 如焊接接头、管道表面有缺陷的部位。局部腐蚀可能导致管道表面出现凹坑、裂纹从而增加泄漏风险。均匀腐蚀则表现为管道表面整体的腐蚀现象, 一般发生在管道的内外表面且腐蚀速率相对均匀, 常见于管道内输送液体或气体时, 与介质接触的整个表面都可能受到影响<sup>[1]</sup>。应力腐蚀是由外部机械应力和腐蚀环境共同作用引发的腐蚀形式, 主要发生在管道的接头、弯头等受力较大的地方, 导致裂纹扩展和管道脆断。微生物腐蚀则是由微生物群体(如硫酸盐还原菌、铁细菌等)作用引起的腐蚀,

常见于地下和海洋环境中。

### 2.2 腐蚀机理分析

油气管道的腐蚀发生是一个复杂的物理、化学和生物学过程, 涉及电化学反应、溶解反应以及微生物的参与。在化学过程中, 管道表面金属与周围环境中的氧、水分、盐分等反应, 发生金属溶解现象。以铁为例, 铁与水中的氧反应形成氧化铁, 从而引发腐蚀反应。电化学腐蚀的基本过程可通过以下反应方程式表示:



电化学腐蚀的基本原理是金属表面发生氧化反应, 释放电子, 生成金属离子, 而电子在电路中流动到阴极, 导致氧还原反应的发生。电化学腐蚀原理及应用图如图1所示:

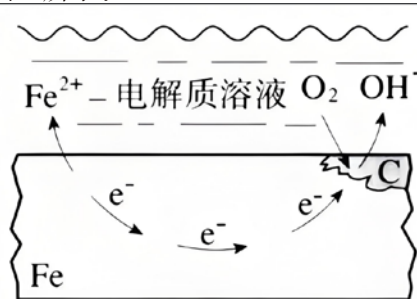


图1 电化学腐蚀原理及应用图

腐蚀的速率与温度、湿度和电解质的浓度等环境因素密切相关。土壤中的水分、氧气、盐分以及温度对电化学腐蚀的影响尤为显著<sup>[2]</sup>。高温和高湿环境下腐蚀反应会加剧。微生物腐蚀则主要借助微生物的代谢活动产生腐蚀性物质, 硫酸盐还原菌借助还原硫酸盐生成硫化氢, 从而进而导致管道材料的腐蚀。

### 2.3 腐蚀影响因素探讨

管道腐蚀的发生和腐蚀速率受外部因素包括土壤的电化学性质、输送介质的特性及工作环境的影响。土壤的pH值、水分和电解质浓度直接影响腐蚀速率，电解质浓度越高腐蚀越容易发生。一般高温高湿条件下温度和湿度也对腐蚀速率加剧。输送介质如天然气、石油的成分，硫化氢或水分也会加剧腐蚀。内部因素主要是管道材料的选择和内部流体特性，不同材料在不同环境中的耐腐蚀性差异较大，流速、压力和液体的酸碱性等会影响腐蚀类型和速率。针对不同的腐蚀环境需采取相应的监控和防护措施来保障管道安全稳定运行。

## 3 油气输送管道的腐蚀防护技术

### 3.1 外部防腐涂层技术

外部防腐涂层技术借助在管道表面涂覆防腐材料来形成物理屏障，防止腐蚀介质侵入。常用涂层材料中环氧树脂涂层附着力强，耐腐蚀性好，适用于湿度较高的环境，原理是运用分子中的极性基团与金属表面形成附着力来隔离腐蚀介质<sup>[1]</sup>。缺点是抗机械损伤差，容易产生裂纹。聚乙烯涂层具有较好的耐磨性和抗机械损伤能力，适用于土壤和高冲击环境可以有效防止水分和氧气侵入管道，但在高温环境下容易老化。附着力通常由拉伸粘结强度来表示可借助下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$\sigma$  其中，为拉伸粘结强度，F为施加的力，A为粘结面面积。

### 3.2 阴极保护技术

阴极保护技术借助电化学反应减少金属管道腐蚀速率，利用外部电源或牺牲阳极提供电子，使管道表面成为阴极从而抑制氧化反应。该技术分为牺牲阳极保护和外加电流保护两种方式。牺牲阳极保护借助活泼金属（如锌、铝、镁）提供电子，结构简单、成本低适用于小型管道或单一腐蚀环境，但阳极寿命有限需要定期更换<sup>[4]</sup>。外加电流保护借助外部电源为管道提供稳定电流，适应复杂环境和大规模管道并能精确调控电流强度，但需要复杂电气设备和长期维护。阴极保护技术的原理可通过以下电化学反应表示：

阳极反应（金属溶解）：



阴极反应（还原反应）：



阳极反应和阴极反应是阴极保护技术中的关键电化学反应，二者共同作用实现腐蚀防护。阳极反应中金属（如铁）在电化学反应中发生氧化，释放电子并溶解为金属离子（ $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ ），这一过程是腐蚀的主要表现，借助金属溶解使管道的金属部分逐渐失去结构强度。阴极反应则是电子从阳极流向阴极的过程中，发生氧气的还原反应，氧气和水分在阴极表面接受电子生成氢氧根离子（ $O_2 + 4e^{-} + 2H_2O \rightarrow 4OH^{-}$ ）。阴极保护中借助外部电源或牺牲阳极供给电子，抑制金属的阳极反应来保证金属表面保持在还原状态，进而防止腐蚀。阴极保护的关键就是通过控制电流流向，保持管道表面处于阴极状态可以避免阳极反应发生，从而减缓金属的溶解腐蚀过程。选择合适的阴极保护方式需要综合考虑管道所在环境的电导率、土壤条件及管道的结构特性。复杂环境中外加电流保护技术逐渐成为主流，大规模、长距离的管道应用中外加电流保护技术可以有效延长管道的使用寿命并降低维修成本。

### 3.3 新型防腐材料的应用

纳米涂层、智能材料和自修复材料等新型防腐材料相较传统材料具有更长的使用寿命和更强的抗腐蚀性。纳米涂层借助纳米颗粒的添加，增强了涂层的致密性和耐腐蚀性能也提高了抗紫外线和抗老化能力。纳米涂层可以有效防止腐蚀介质渗透管道表面并延缓腐蚀进程。智能材料则具备感知环境变化并自适应调整性能的特性，腐蚀环境变化时可以主动调整涂层的保护强度，达到动态防护的效果。自修复材料是一种新型的高性能材料，当涂层受到损伤时可以借助内部修复机制自动修复裂缝和孔洞，恢复其原有的防腐性能。

## 4 油气输送管道的腐蚀检测技术与方法

### 4.1 常用腐蚀检测技术概述

油气管道的腐蚀检测技术中金属损失测量是借助直接测量管道表面金属的损失量来评估腐蚀程度，常使用仪器如超声波测厚仪进行定期检测。该技术适用于检测管道表面局部腐蚀、坑蚀等情况，但对于均匀腐蚀或早期腐蚀的检测敏感度较低。腐蚀速率测定则通过监测管道表面腐蚀反应的速率，一般通常使用电化学方法，如电流或电位法进行测量可以实时反馈腐蚀变化，但受外部环境影响较大难以适应复杂环境<sup>[5]</sup>。管道壁厚检测借助非破坏性手段，如超声波技术来测量管道壁的厚度变化，适用于大范围管道的检查，可

表1 常规腐蚀检测技术对比表

检测技术	适用范围	检测精度	技术局限性	适用场景
金属损失测量	表面腐蚀、均匀腐蚀	$\pm 0.2$ mm	对局部腐蚀不敏感	平直管道
腐蚀速率测定	长期腐蚀监测	1%	需要长时间数据积累	长期监测
管道壁厚检测	管道腐蚀进程监测	$\pm 0.1$ mm	对涂层要求高	平直管道

以有效监测腐蚀对管道壁的影响，但其精度与测量位置有关且只能反映一定时段内的腐蚀情况。常规腐蚀检测技术对比表如表1所示。

表1展示了三种常见的腐蚀检测技术，并对其适用范围、检测精度、技术局限性和适用场景进行了对比分析。金属损失测量技术主要用于表面腐蚀和均匀腐蚀的检测，具有较高的精度（ $\pm 0.2$  mm），但对局部腐蚀的敏感性较差，适合应用于平直管道的监测。腐蚀速率测定适用于长期腐蚀监测可以提供腐蚀速率的数据，精度为1%，但其局限性在于需要较长时间的数据积累，适用于长期监控。管道壁厚检测技术通过测量管道壁厚来监测腐蚀进程，精度为 $\pm 0.1$  mm，适用于管道腐蚀的定期检查，但对涂层要求较高，适合平直管道的应用。

#### 4.2 无损检测技术（NDT）在管道检测中的应用

无损检测（NDT）技术中超声波检测通过发射超声波并分析回波信号，能精准测量管道壁厚，适用于长输管道和复杂形状的管道，但对涂层或表面光滑的管道不敏感。磁粉检测适用于检测铁磁性管道表面的裂纹和局部腐蚀，但只能检测表面缺陷且不能用于非磁性材料。涡流检测利用电磁感应原理，适用于表面腐蚀和裂纹检测，但对厚壁管道的效果较差。射线检测借助高能射线穿透管道，适合检测内部腐蚀和缺陷并用于大规模管道，但操作需要严格的辐射安全措施。

#### 4.3 智能化监测技术的发展与应用

智能化监测技术结合了物联网、大数据、人工智能等先进技术，可以实时监控管道的运行状态和腐蚀变化。借助安装传感器并将数据传输至监控平台，系统可以自动识别管道的腐蚀程度并实时预警潜在的腐蚀风险。智能传感器如腐蚀探测器和温度传感器可以运用测量管道表面或周围环境的温湿度、电流、电位等信息，结合先进的数据分析算法来自动评估腐蚀速率和风险等级。上述技术相较于传统的人工检测方法，具有高效、实时、自动化的特点并能提高检测的准确性和监控的及时性。

### 5 结论

常见的腐蚀类型如均匀腐蚀、局部腐蚀、应力腐

蚀和微生物腐蚀等，在不同环境和部位对管道的影响各异导致管道寿命大大缩短。腐蚀机理主要涉及物理、化学和生物学过程，外部因素如土壤的电化学性质、温度、湿度等直接影响腐蚀速率，内部因素包括管道材料、输送介质的性质及流速等也对腐蚀过程起到重要作用。为应对这一问题油气管道的腐蚀防护技术主要包括外部防腐涂层技术、阴极保护技术和新型防腐材料的应用，其中环氧树脂涂层、聚乙烯涂层等常用防腐涂层具有较好的耐腐蚀性，但在高机械冲击环境中可能失效。阴极保护技术通过牺牲阳极和外加电流系统有效减少腐蚀，尽管牺牲阳极保护结构简单但寿命较短，而外加电流保护则可提供更精确的控制。新型防腐材料如纳米涂层和自修复材料展现出更强的抗腐蚀性能和更长的使用寿命，为油气管道的防腐提供了新的方向。

#### 参考文献：

- [1] 徐亮, 韩萌, 袁页. 聚乙烯管材在城市燃气管网腐蚀防护中的应用与实践 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(10): 34-36.
- [2] 王林, 赵成军, 白值尹. 大口径高钢级输油气管道氩电联焊缺陷成因分析与解决方案 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(10): 141-145.
- [3] 王辉. 基于知识图谱的并行管道风险指标体系构建与分析 [J]. 石油工程建设, 2024, 50(05): 56-60.
- [4] 高志琴, 刘佳欣, 白帆. 浅谈油气管道富水山区隧道建设中水文地质专项勘察的重要性及其对施工的指导意义 [C]// 中国石油学会石油工程专业委员会. 石油天然气勘察技术中心站第三十一次技术交流研讨会论文集. 四川省自贡华川勘察设计有限公司, 2024: 10.
- [5] 张迎春, 王坤, 张艺莹. 炼化装置腐蚀防护用新型抗高温缓蚀剂的制备及性能评价 [J]. 当代化工, 2024, 53(08): 1900-1904.

#### 作者简介：

丁硕（1984-），男，汉，山东泰安人，哈尔滨工业大学化学工程与工艺专业工学学士，讲师，研究方向：为化工安全、化工机械