

原油集输系统中的腐蚀机制与防护策略

韦佳安（中石化西北油田分公司油气运销部，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘要：原油集输系统是石油工业中至关重要的组成部分，但同时也面临着严重的腐蚀问题。本文首先概述了原油集输系统的重要性和腐蚀问题，然后详细分析了内腐蚀和外腐蚀的机制。内腐蚀主要包括化学腐蚀和微生物诱导腐蚀，而外腐蚀则涉及环境因素和物理损伤。接着，探讨了腐蚀检测技术，包括传统与现代方法以及无损检测技术的应用。在防护策略部分，讨论了材料选择、表面处理、化学方法和微生物控制等策略。通过案例研究，分析了国内外的成功与失败案例，并考虑了经济与环境的影响。

关键词：原油集输系统；腐蚀机制；防护策略；检测技术；案例研究

1 原油集输系统的重要性与腐蚀问题概述

原油集输系统是石油工业中的关键环节，负责将原油从开采地输送到加工或储存地点。这一系统包括了从油井到处理厂的整个流程，涵盖了原油的提取、输送、储存和初步处理等多个环节。由于原油中含有多种腐蚀性物质，如硫化氢、二氧化碳等，加之输送过程中的高压、高温等条件，使得腐蚀问题成为原油集输系统设计和运行中必须面对的重大挑战。腐蚀不仅会导致设备损坏、效率降低，还可能引发安全事故，对环境造成污染，给企业带来巨大的经济损失。

2 研究背景与目的

随着全球能源需求的不断增长，石油工业的发展对原油集输系统的效率和安全性提出了更高的要求。然而，腐蚀问题一直是制约系统性能的主要因素之一。近年来，由于原油品质的多样化和开采环境的复杂化，传统的腐蚀防护措施已难以满足现代石油工业的需求。因此，开展对原油集输系统中腐蚀机制的深入研究，探索更为有效的防护策略，对于提升整个行业的技术水平和竞争力具有重要的现实意义。本研究旨在通过分析原油集输系统中的腐蚀类型、成因及其影响因素，系统地提出针对性的防护措施，并通过案例研究验证这些措施的有效性。

3 原油集输系统概述

3.1 系统组成与工作原理

原油集输系统是一个复杂的工程体系，它由多个相互连接的部分组成，包括油井、集输管道、增压站、储油设施、脱水站和终端处理厂等。这些组成部分协同工作，以确保原油从地下油层安全、高效地输送到最终用户或储存设施。系统的核心工作原理基于流体力学和热力学原理，通过控制压力和温度，实现原油的流动和输送。在原油提取过程中，可能需要使用人

工举升设备，如泵或气举，以克服地层压力和提高原油的流动性。随后，原油通过管道输送，期间可能需要增压以克服流动过程中的摩擦损失和地形高差。在输送过程中，系统还需对原油进行初步处理，如脱水和脱气，以减少腐蚀和提高原油的品质。

3.2 原油集输过程中的关键环节

在原油集输过程中，有几个关键环节对整个系统的效率和安全性至关重要。首先是原油的提取，这一环节需要确保油井的稳定产出和原油的初步分离。其次是输送，这一过程中，原油的流动特性和管道的物理条件对系统的运行至关重要。增压站作为输送过程中的关键节点，负责维持原油流动所需的压力，防止因压力下降导致的流动问题。储油设施则为系统提供必要的缓冲，以应对生产和需求之间的波动。脱水站对原油进行脱水处理，去除原油中的水分，减少腐蚀和提高原油的商业价值。最后，原油在终端处理厂进行进一步的净化和加工，以满足不同用户的需求。在整个集输过程中，对腐蚀的控制和管理是保证系统长期稳定运行的关键，这涉及到材料选择、防腐涂层、缓蚀剂使用以及定期的检测和维护。

4 腐蚀机制分析

4.1 内腐蚀：化学腐蚀、微生物诱导腐蚀

内腐蚀是原油集输系统中常见的问题之一，它主要发生在管道和储罐的内部，由于原油中含有的腐蚀性物质直接与材料表面接触而引发。内腐蚀分为化学腐蚀和微生物诱导腐蚀两种类型。

化学腐蚀通常是由原油中的酸性气体如硫化氢（ H_2S ）和二氧化碳（ CO_2 ）引起的。这些气体在水的存在下会形成酸性环境，加速金属的腐蚀过程。硫化氢具有特别强的腐蚀性，能够迅速穿透金属表面的保护膜，导致材料的局部腐蚀或全面腐蚀。此外，原油

中的有机酸,如乙酸和丙酸,也会在一定条件下对金属造成化学腐蚀。

微生物诱导腐蚀 (Microbially Influenced Corrosion, MIC) 是由微生物活动引起的腐蚀。在原油集输系统中,硫酸盐还原菌 (SRB) 和铁氧化菌等微生物能够代谢原油中的有机物质,产生硫化氢和其他腐蚀性物质。这些微生物不仅直接参与腐蚀过程,还可能形成生物膜,为腐蚀性物质的积累提供场所,加剧腐蚀速率。MIC 通常难以检测,但其对材料的破坏性可能与化学腐蚀相当,甚至更为严重。

为了有效控制内腐蚀,需要采取一系列措施。首先,可以通过选择耐腐蚀的材料或应用防腐涂层来提高系统的抗腐蚀能力。其次,使用缓蚀剂可以减缓腐蚀反应的速率,保护管道和设备免受腐蚀。此外,定期的清洗和维护也是必要的,以去除管道内的腐蚀产物和微生物生物膜。最后,通过监测原油中的腐蚀性物质含量和微生物活动,可以及时发现并处理腐蚀问题,从而保障原油集输系统的安全和效率。

4.2 外腐蚀:环境因素、物理损伤

外腐蚀是在原油集输系统的外部环境中发生的腐蚀现象,它通常由环境因素和物理损伤共同作用引起。外腐蚀对系统的安全和可靠性构成了严重威胁,需要通过综合措施进行有效控制。

环境因素是引起外腐蚀的主要原因之一。原油集输系统常常暴露在各种自然环境中,如土壤、水体、大气等,这些环境中含有多重腐蚀性物质,例如土壤中的硫化物、水分和微生物,水体中的盐分和溶解氧,以及大气中的湿度和污染物。这些因素会与管道和储罐的外表面发生化学反应,导致金属的氧化和腐蚀。特别是沿海地区和盐碱地,由于土壤和水中的氯离子含量较高,更容易引发局部腐蚀和应力腐蚀开裂。

5 腐蚀检测技术

5.1 传统与现代检测方法

腐蚀检测是确保原油集输系统安全运行的关键环节。传统腐蚀检测方法主要包括直接观察、厚度测量、电化学测试等。这些方法各有优势,但也存在一定的局限性。

直接观察是最直观的检测手段,通过视觉检查可以发现明显的腐蚀迹象,如锈斑、裂纹和变形。然而,这种方法无法检测到隐蔽部位的腐蚀,且对初期腐蚀的敏感度较低。

厚度测量是通过测量材料厚度的变化来评估腐蚀程度的一种方法。常用的工具有超声波测厚仪,它可

以穿透涂层测量金属的剩余厚度。这种方法对于定量分析腐蚀程度非常有效,但需要定期进行,以获取准确的数据。

电化学测试,如极化曲线测试和电阻探针测试,可以提供关于腐蚀速率和腐蚀机制的详细信息。这些测试可以实时监测腐蚀过程,为腐蚀控制提供科学依据。

5.2 无损检测技术的应用

无损检测技术 (Non-Destructive Testing, NDT) 在腐蚀检测中的应用越来越广泛。这些技术可以在不破坏材料结构的前提下,检测材料的内部和表面缺陷,对于早期发现和评估腐蚀具有重要意义。

超声波检测 (UT) 是一种常用的 NDT 技术,它通过发射和接收超声波来检测材料中的缺陷。超声波在遇到材料不连续性时会产生反射,通过分析反射信号可以确定缺陷的位置和大小。

射线检测 (RT) 利用 X 射线或伽马射线穿透材料,通过检测射线的衰减程度来评估材料的厚度和内部缺陷。这种方法适用于检测厚壁管道和大型储罐的腐蚀情况。

磁粉检测 (MT) 和渗透检测 (PT) 是两种表面检测技术,它们通过检测材料表面的磁性变化或渗透液体的分布来发现表面缺陷。这些方法对于检测裂纹、划伤和其他表面损伤非常有效。

涡流检测 (ET) 利用电磁感应原理,通过检测材料表面的涡流变化来评估材料的电导率和厚度变化。这种方法对于检测导电材料的腐蚀和磨损非常敏感。

光纤传感技术是一种新兴的 NDT 技术,它通过分析光纤中传输的光信号变化来检测材料的应力、温度和腐蚀情况。这种技术具有高度的灵敏度和空间分辨率,适用于复杂环境和难以接触的部位。

6 防护策略探讨

6.1 材料选择与表面处理

材料选择是预防腐蚀的首要步骤。在原油集输系统中,选择合适的材料可以显著提高系统的耐腐蚀性能。理想的材料应具备良好的耐化学腐蚀性、耐微生物腐蚀性以及在高温高压环境下的稳定性。常用的材料包括不锈钢、双相钢、镍基合金和涂层碳钢等。这些材料通过合金化或涂层技术,提高了对腐蚀性介质的抵抗能力。

表面处理技术也是提高材料耐腐蚀性能的有效手段。涂层技术如环氧涂层、聚氨酯涂层等,可以在材料表面形成保护层,隔绝腐蚀介质与材料的直接接触。此外,表面处理技术如热喷涂、电镀和化学镀等,可

以在材料表面形成一层耐腐蚀的金属或合金层，从而提高材料的耐腐蚀性。

6.2 化学方法：缓蚀剂、原油处理

化学方法是控制腐蚀的有效手段之一。缓蚀剂是一种添加到原油或水中的化学物质，能够减缓腐蚀反应的速率。常见的缓蚀剂包括有机磷酸酯、胺类化合物和酰胺类化合物等。这些缓蚀剂通过吸附在金属表面形成保护膜，或通过改变腐蚀介质的化学性质来抑制腐蚀。

原油处理也是化学方法的一部分，包括脱硫、脱水和脱气等过程。通过去除原油中的腐蚀性物质，可以降低腐蚀发生的可能性。例如，通过脱硫处理可以减少硫化氢的含量，从而降低化学腐蚀的风险。

6.3 微生物控制与设计施工

微生物诱导腐蚀是原油集输系统中的一个重要问题。控制微生物生长和活动是预防 MIC 的关键。微生物控制方法包括生物杀灭剂的使用、微生物控制膜的应用以及通过调节环境条件抑制微生物生长等。

在设计和施工阶段，也应考虑防腐措施。例如，合理设计管道的流速和流态，避免滞流区的形成，减少微生物的沉积和生长。在施工过程中，应确保焊接质量和管道连接的密封性，避免因施工不当导致的腐蚀问题。

通过综合运用材料选择、表面处理、化学方法和微生物控制等策略，可以有效地预防和控制原油集输系统中的腐蚀问题，保障系统的安全、可靠和经济运行。

7 案例研究与未来研究方向

7.1 国内外成功与失败的案例分析

案例研究是理解腐蚀问题和评估防护策略有效性的重要手段。以下是两个具体的案例分析：

7.1.1 成功案例：挪威北海油田的腐蚀控制

挪威北海油田是世界上腐蚀控制较为成功的案例之一。由于该地区海水温度低，含盐量高，传统的防腐措施难以满足要求。挪威石油公司采用了一种综合防护策略，包括使用高合金钢材料、阴极保护系统、以及定期的腐蚀监测。

7.1.2 失败案例：墨西哥湾某油田的腐蚀事故

相比之下，墨西哥湾某油田由于腐蚀控制不当导致了严重的事故。该油田在设计初期未能充分考虑腐蚀问题，使用了普通的碳钢材料，且防腐涂层质量不佳。随着时间的推移，管道和设备遭受了严重的腐蚀，最终导致泄漏和环境污染。

从这两个案例中，我们可以得出以下教训：

①防腐设计应从项目初期就开始考虑，选择合适的材料和防护措施。

②定期的腐蚀监测和维护是预防腐蚀事故的关键。

③综合防护策略，包括材料选择、表面处理、化学方法和微生物控制，能够更有效地控制腐蚀。

7.2 经济与环境的影响

腐蚀问题对经济和环境的影响是深远的。从经济角度来看，腐蚀导致的设备损坏和生产中断会直接增加维修和更换的成本，影响企业的经济效益。例如，腐蚀引起的管道泄漏不仅需要立即的修复成本，还可能导致生产延误和收入损失。此外，频繁的维修和更换也会增加企业的运营成本。从环境角度来看，腐蚀可能导致原油和化学污染物的泄漏，对土壤、水体和大气造成污染，破坏生态系统，影响人类健康。

7.3 新材料、新技术的应用前景

随着科技的发展，新材料和新技术在腐蚀控制领域的应用前景广阔。例如，纳米材料由于其独特的物理和化学性质，被广泛应用于防腐涂层和缓蚀剂中，提供了更高效的防护效果。智能涂层技术能够响应环境变化，自动释放缓蚀剂，实现动态的腐蚀控制。此外，生物基材料和生物技术也在腐蚀控制中显示出潜力，例如利用微生物降解原油中的腐蚀性物质，或开发生物基缓蚀剂。

参考文献：

- [1] 侯进才. 原油集输系统能耗分析与综合优化设计软件开发 [D]. 东北石油大学, 2011.
- [2] 栾庆. 萨中油田原油集输系统优化简化技术措施 [J]. 石油规划设计, 2007, 18(3): 3.
- [3] 王新刚, 曲森. 油田开发中后期原油集输系统的优化运行 [J]. 油气田地面工程, 2005, 24(9): 2.
- [4] 葛健. 塔三联原油集输管道内腐蚀机理及防护技术研究 [D]. 西南石油大学, 2018(12).
- [5] 王子明, 李越, 宋光铃. 基于润湿调控的管道多相流腐蚀防护技术 [J]. 化工管理, 2022(09).
- [6] 王碧玉. 原油集输系统腐蚀结垢因素与防治对策探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2022(008): 036.
- [7] 周诗杰, 靳永红, 何强, 等. 高矿化度原油集输系统中 KY-5 咪唑啉缓蚀剂浓度检测研究及应用 [C]//2018 全国石油石化行业腐蚀与防护新技术发展与应用交流研讨会. 中国石油企业协会, 2018.
- [8] 张德成. 孤东油田集输系统原油管道腐蚀穿孔原因及防腐措施探讨 [J]. 经营管理者, 2010(8X): 2.