

油气管道运输中的腐蚀与防护

刘阳舟

四川全威安环科技有限公司

摘要：油气管道的腐蚀问题是影响其安全性和长期稳定运行的关键因素之一。腐蚀不仅会导致管道的物理损伤，还可能引发环境污染和安全事故，加强对油气管道腐蚀的防护是管道建设和运营中的重要任务。本文从油气管道腐蚀的基本概念出发，分析了腐蚀的影响因素和主要机理，探讨了目前的防护措施，包括材料防腐、化学防腐和阴极保护等技术。通过对国内外油气管道防腐案例的分析，本文总结了防腐技术的应用效果和经验，旨在为油气管道的腐蚀防护提供一定的理论指导和实践借鉴。

关键词：油气管道；腐蚀；防护措施；电化学腐蚀；微生物腐蚀；阴极保护

随着能源需求的不断增长，油气管道作为运输石油和天然气的主要方式，已经成为现代能源输送的重要基础设施。油气管道在长期运行过程中，受到环境、材料和操作等多方面因素的影响，腐蚀问题逐渐成为影响其安全性和运行效率的重大挑战。腐蚀不仅会导致管道的局部损坏，还可能引发系统性故障，甚至带来严重的环境污染和经济损失。研究油气管道腐蚀的影响因素、机理及防护措施，具有重要的实际意义。本文将重点探讨油气管道腐蚀的基本概念、影响因素、机理以及目前采用的防护技术，并结合具体案例分析，提出合理的防腐措施，为油气管道的安全运营提供参考。

1 油气管道腐蚀的特点

油气管道腐蚀具有多种特点，首先是腐蚀速率较高。管道长期暴露在外环境中，尤其是埋地或海底的管道，容易受到湿气、土壤酸碱度、盐分以及微生物等多种因素的影响，导致腐蚀速率加快^[1]。油气管道所输送的介质具有复杂性，油气中常含有硫化氢、二氧化碳等腐蚀性物质，这使得管道腐蚀的形

式更加多样。硫化氢可能引起管道的点蚀，而二氧化碳则容易导致均匀腐蚀或产生腐蚀性酸性物质。油气管道通常需要承受较高的压力与温度，在这种极端条件下，腐蚀的危害更加显著，容易引发应力腐蚀和裂纹扩展。油气管道的腐蚀问题不仅会影响管道本身的完整性，还能导致泄漏、爆炸等严重事故，因此腐蚀防护工作对保障管道安全运行至关重要。

2 油气管道腐蚀的影响因素

2.1 环境因素

环境因素是影响油气管道腐蚀的重要因素之一，包括土壤性质、湿度、温度以及外部电流干扰等。外部电流干扰是埋地管道腐蚀中一个值得关注的问题，尤其是当管道周围存在直流接地极时，其电流可能对管道表面电位产生显著影响，从而加速腐蚀过程^[2]。

如图1所示，直流接地极的入地电流会改变管道周围的电位分布，使管道表面形成阳极区和阴极区。这种局部电位差导致电化学腐蚀在阳极区加剧，可能引发管道的局部损伤或穿孔。设计油气管道防腐方案时，需要充分考虑外部

电流的影响，采取有效措施，如调整管道埋设位置、优化阴极保护设计等，来减少外部电流干扰带来的腐蚀风险。

2.2 材料因素

油气管道材料的性质对其腐蚀性能起着至关重要的作用，不同材质的管道在相同环境中可能表现出截然不同的腐蚀行为。材料的化学成分决定了管道的耐腐蚀能力。

常见的油气管道材料如碳钢、合金钢和不锈钢等，其耐腐蚀性能各异。碳钢在某些环境下易受腐蚀，而高合金钢或不锈钢则具有更好的耐蚀性，尤其在含有硫化氢和二氧化碳的环境中表现更为优越。材料的表面状态对腐蚀也有重要影响。管道表面若存在氧化膜、污垢、划痕等缺陷，腐蚀的发生往往更加迅速。

为了提高管道的耐腐蚀性，通常需要对材料表面进行处理，如涂层、喷涂或电镀等。管道的焊接质量也是影响腐蚀的重要因素。焊接接头部位可能存在微观结构的差异，使得该部分的腐蚀速率高于其他区域。材料的力学性能，如强度、硬度和韧性等，也在一定程度上影响材料对腐蚀的抵抗能力。在一些

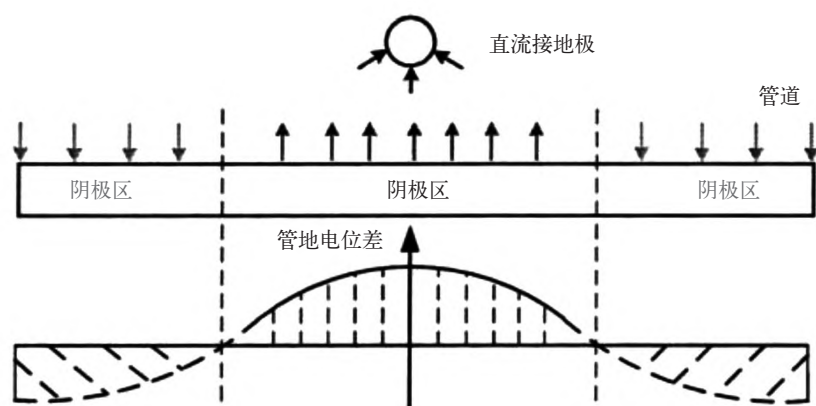


图1 直直接地极处于阴极状态时入地电流对埋地油气管道的干扰影响

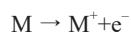
高压或高温环境下,管道材料的疲劳性能差,可能加速裂纹的形成和扩展,导致更为严重的腐蚀损害。

3 油气管道的腐蚀机理

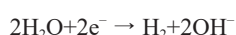
3.1 电化学腐蚀机理

电化学腐蚀是油气管道中最常见的腐蚀机理之一,主要发生在金属与其周围环境发生电化学反应时。油气管道通常由金属材料构成,当管道表面与土壤或水分接触时,会形成电偶电池结构,在管道表面和周围介质中存在不同的电位差,导致电子从电位较高的区域流向电位较低的区域,从而发生腐蚀反应。

电化学腐蚀过程一般可分为两个主要反应:阳极反应和阴极反应。在阳极区域,金属表面发生氧化反应,金属原子失去电子并溶解到环境中,形成金属离子。此时,管道表面发生金属的损失。阳极反应通常为:



而在阴极区域,电子通过外部电路流动至该区域,并与氧气、氢离子等反应,形成水或氢气等副产物。阴极反应通常为:



这一过程中,金属原子在阳极区域被溶解并产生腐蚀产物。腐蚀速率与电位差、温度、溶液酸碱度及导电性等因素密切相关。电化学腐蚀导致的管道损失通常表现为均匀腐蚀、点蚀或缝隙

腐蚀等不同形态。

3.2 微生物诱导腐蚀机理

微生物诱导腐蚀(MIC)是油气管道中一种特殊且严重的腐蚀形式,它由微生物的代谢活动引起。某些微生物,尤其是厌氧微生物,能够在管道表面形成生物膜,并产生代谢产物如硫化氢(H_2S)、酸性物质等,这些产物会显著加速管道的腐蚀。MIC通常发生在缺氧、低pH值的环境中,如油气管道内输送的原油或天然气中含有硫化氢,或管道埋设在湿润或潮湿的土壤中。微生物的代谢活动会导致局部区域的化学环境发生变化,从而增加腐蚀的风险。

硫酸盐还原菌(SRB)通过还原硫酸盐生成硫化氢,这种腐蚀性物质不仅直接参与腐蚀反应,还能与金属表面反应,形成金属硫化物,进而加速腐蚀过程。铁还原菌等微生物则通过还原铁离子生成铁氧化物和氢气,形成腐蚀性环境^[3]。微生物的作用不仅能增加腐蚀速率,还能使管道表面产生不规则的腐蚀坑,进而引发裂纹和裂口,增加泄漏的风险。MIC的发生通常是缓慢且难以检测的,但一旦形成腐蚀生物膜,腐蚀程度可能急剧加剧,造成严重后果。

4 油气管道的腐蚀防护措施

4.1 材料防腐

材料防腐是油气管道腐蚀防护的重要措施之一,常见的方法包括选择耐

腐蚀材料和采用防腐涂层处理。防腐涂层可以有效隔离管道与外部腐蚀性环境的接触,从而显著降低腐蚀速率。目前常用的防腐涂层包括环氧树脂涂层、聚乙烯涂层、聚氨酯涂层和陶瓷颗粒涂层等。它们在厚度、耐腐蚀时间、抗渗透率和成本等方面存在一定差异。以下图表列出了常用防腐涂层的性能参数:

如图2所示,各类涂层的性能指标差异显著。例如,陶瓷颗粒涂层的厚度为1.2 mm,耐腐蚀时间可达25年,抗渗透率高达99.9%,但其成本相对较高,为40元/ m^2 。而聚乙烯涂层虽然耐腐蚀时间较短(20年),但其成本较低,仅为30元/ m^2 ,适合应用于中等腐蚀环境的管道^[4]。这些数据为防腐涂层的选择提供了重要依据,在具体应用中需要综合考虑管道的运行环境、经济性及防腐需求。

4.2 化学防腐方法

化学防腐方法是通过在管道内外表面涂覆或加入某些化学物质,抑制腐蚀反应的发生,降低腐蚀速率。这些化学物质包括防腐涂料、腐蚀抑制剂等,广泛应用于油气管道的腐蚀防护中。常见的防腐涂料包括环氧树脂涂料、聚氨酯涂料和聚乙烯涂料等,这些涂料能够形成致密的保护层,隔绝管道与外部环境的直接接触,从而有效减缓腐蚀。涂料的选择应根据管道所处环境的腐蚀特性、温度和压力等因素来决定。

腐蚀抑制剂是一种通过化学作用降低金属腐蚀速率的物质,常用于管道的内部防护。腐蚀抑制剂的使用可以通过减少腐蚀反应的电化学过程,降低腐蚀性物质对管道的侵害。腐蚀抑制剂可以是有机或无机化学物质,通常与输送的油气介质兼容,并能在管道内形成保护膜。通过合理的化学防腐方法,可以延长管道的使用寿命并确保安全运行。

4.3 阴极保护

阴极保护是一种通过改变管道电位来减缓腐蚀的防护技术,主要包括牺

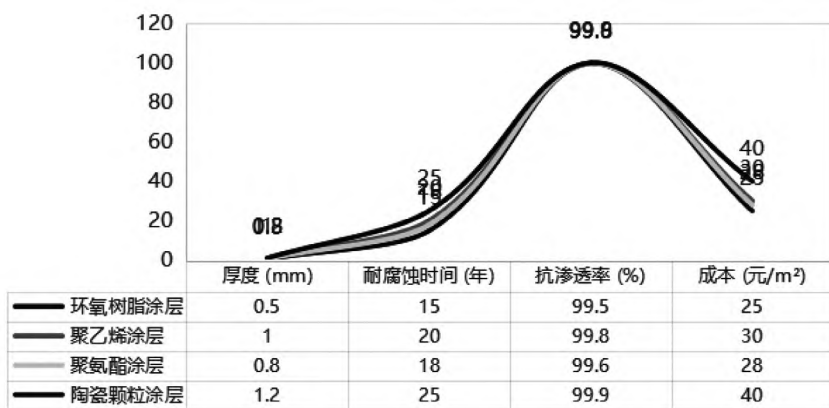
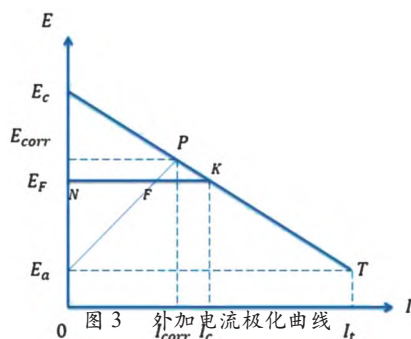


图2 常用防腐涂层的性能参数

牺牲阳极法和外加电流法。在外加电流法中,通过外部电源向管道施加负电位,使管道金属表面转变为阴极,减少金属氧化反应的发生。其工作机理可通过极化曲线图进行直观说明,如图3所示。

通过图3可以看出,随着外加电流的增加,管道金属的电位逐渐降低,当电位达到某一阈值时,金属的腐蚀速率显著下降,从而达到阴极保护的效果。此图清晰展示了管道电位(E)与外加电流(I)之间的关系,帮助理解阴极保护的工作原理^[5]。



牺牲阳极,并结合外加电流系统,确保管道在长期运行中的稳定性。经过多年的运行,该项目的管道腐蚀问题得到了有效控制,延长了管道的使用寿命,保证了运输过程中的安全性和可靠性。

5 油气管道腐蚀防护的案例分

5.1 国内油气管道防腐案例

在国内,油气管道腐蚀防护工作已得到高度重视,许多项目采用了先进的防腐技术和措施。以中国石油天然气集团公司(中石油)某长输油气管道项目为例,该项目涉及长距离油气管道的建设和防腐。由于管道所经过的地区气候湿润、土壤腐蚀性强,且部分区域还存在微生物腐蚀问题,项目团队采取了复合防腐涂层和阴极保护相结合的方式提供有效的物理隔离,防止外部水分和腐蚀性物质的渗透。

为了应对土壤电化学腐蚀,采用了牺牲阳极法,在管道外部安装了牺

5.2 国际油气管道防腐案例

在国际上,油气管道防腐的应用也取得了显著的成果。美国的阿拉斯加管道项目是全球最著名的长输油管道之一,其建设和运行过程中采取了严密的防腐防护措施。阿拉斯加的极寒气候和复杂地质条件对管道腐蚀提出了巨大挑战,因此该项目采取了多种防腐技术。管道外表面涂覆了环氧涂层,同时加入了陶瓷颗粒以增强耐磨性,减少外界物理损伤。

考虑到阿拉斯加地区的土壤腐蚀性较强,管道外部采用了阴极保护系统,并安装了牺牲阳极与外加电流装置,有效降低了电化学腐蚀的风险。由于管道的部分区域位于湿滑的湿地环境,针对

微生物腐蚀问题,项目团队还进行了生物防腐处理。通过这些综合性的防腐措施,阿拉斯加管道的运行至今未出现严重的腐蚀事故,保证了油气运输的安全与高效。

6 结语

油气管道的腐蚀问题是影响管道安全运行的关键因素之一,腐蚀不仅加速了管道的老化,还可能导致泄漏、爆炸等严重安全事故。通过本研究可以看出,油气管道腐蚀的影响因素复杂多样,主要包括环境因素和材料因素。针对腐蚀机理,电化学腐蚀和微生物诱导腐蚀是两大主要机制,防治措施需要综合考虑多种因素。

国内外的防腐案例显示,材料防腐、化学防腐及阴极保护等技术的结合应用,能够有效延长管道的使用寿命,保证油气输送过程中的安全性。未来,随着防腐技术的不断发展,油气管道的腐蚀防护将越来越精细化和智能化,为油气运输的安全稳定提供更加有力的保障。

参考文献:

- [1] 刘振宇. 浅谈油气管道运输中的工艺设备与自动化控制[J]. 中国设备工程, 2022 (11): 118-120.
- [2] 李宇霆. 埋地油气管道腐蚀机理研究及防护措施[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36 (02): 121-122.
- [3] 李思琪. 埋地钢制油气管道防腐措施的探究[J]. 化工管理, 2022 (02): 113-115.
- [4] 李磊. 油气储运过程中油气管道防腐分析及研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38 (20): 31-32.
- [5] 徐太贵. 燃气发电机常见故障及原因分析[J]. 流程工业, 2021 (01): 36-37.