

油气管道腐蚀因素及防腐措施的研究

汪 勃

中海石油（中国）有限公司上海分公司 上海 200335

摘 要：油气管道腐蚀主要受土壤、大气、输送介质等多种因素影响，导致管道结构强度降低、工作效率下降，甚至引发安全事故。内腐蚀主要由原油和天然气中的硫化氢、二氧化碳、水分等腐蚀性成分引起，而外腐蚀则涉及土壤、杂散电流及微生物等因素。为应对腐蚀问题，需采取优化管道材质、敷设防腐涂层、应用阴极保护技术及添加缓蚀剂等防腐措施，以保障油气管道的安全运行。

关键词：油气管道；腐蚀因素；防腐措施

引言：油气管道作为现代能源输送的主要方式，其安全性和可靠性对于国家经济发展和能源战略具有重要意义。然而，油气管道在长期的运行中，受到土壤、气候、输送介质等多种腐蚀因素的共同作用，极易导致管道壁厚度减薄、强度降低，甚至发生泄漏事故。因此，深入研究油气管道的腐蚀因素，并采取相应的防腐措施，对保障管道安全、延长使用寿命具有重要意义。本文将就此展开探讨，以期为油气管道的防腐工作提供有益参考。

1 油气管道腐蚀机理概述

1.1 化学腐蚀

化学腐蚀是油气管道面临的一种基本腐蚀类型。油气中常含有 H_2S （硫化氢）、 CO_2 （二氧化碳）、 SO_2 （二氧化硫）和 O_2 （氧气）等腐蚀性成分。这些成分与管道金属（如钢铁）直接发生化学反应，导致金属表面被氧化或硫化，进而形成腐蚀产物。这种腐蚀过程通常伴随着金属表面形态的改变，如变色、粗糙化甚至穿孔。

1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是油气管道腐蚀中最为普遍且严重的类型。它主要发生在土壤、海水等含有电解质溶液的环境中。当管道金属与这些电解质溶液接触时，会形成一个电化学腐蚀电池。在这个电池中，金属作为阳极被氧化，释放出电子；而电解质溶液中的阴离子则在阴极上被还原。这种阳极氧化和阴极还原的过程不断循环，导致管道金属逐渐溶解，形成腐蚀坑或腐蚀裂纹。此外，管道内外壁因材质不均、涂层破损等原因形成的微小原电池，也会加速电化学腐蚀过程。

1.3 多相流腐蚀

多相流腐蚀是油气管道在输送油、水、气等多相流体时面临的一种特殊腐蚀类型。多相流体在管道内流动时，会对管道内壁产生冲刷和腐蚀作用。特别是当流体

以不同的流动形态（如分层流、波状流、段塞流等）在管道内流动时，冲刷腐蚀的效果会更加明显。这种冲刷和腐蚀作用不仅加速了管道的磨损，还可能导致局部腐蚀加速，甚至引发泄漏事故。

1.4 其他腐蚀类型

除了上述主要腐蚀机理外，油气管道还可能受到杂散电流腐蚀和微生物腐蚀等特殊类型的腐蚀影响。杂散电流腐蚀通常发生在管道附近存在高压电线、铁路等地下金属结构物的区域；而微生物腐蚀则是由于土壤或海水中的微生物活动所引起的腐蚀。这些特殊类型的腐蚀虽然相对较少见，但对管道的安全运行同样构成威胁。

2 油气管道腐蚀的主要因素

2.1 外部环境因素

（1）土壤成分和性质。油气长输管道中，有很大一部分是埋设在地下的。土壤作为一种复杂的电解质，其成分和性质对管道的腐蚀速率有着直接的影响。土壤中的水分、可溶性盐类、含氧量、电阻率以及细菌等因素共同决定了管道的腐蚀环境。例如，土壤中高浓度的氯离子和硫酸根离子会加速管道的电化学腐蚀；而土壤中细菌的代谢活动，如硫酸盐还原菌的作用，也会显著增强腐蚀过程。（2）气候条件。气候条件对油气管道的腐蚀也有重要影响。湿度是影响大气腐蚀的主要因素之一，高湿度环境下，金属表面的水膜更易于形成，从而促进电化学腐蚀的发生。温度则会影响腐蚀反应的速率，一般来说，随着温度的升高，腐蚀速率会加快。此外，极端的气候条件，如暴雨、暴雪、高温或严寒，都可能对管道的防腐层造成破坏，从而加速腐蚀过程^[1]。

（3）海水对海底管道的腐蚀作用。对于海底油气管道来说，海水的腐蚀性是一个不容忽视的问题。海水中含有大量的盐分，主要为氯化钠，这使得海水具有很高的电导率，加速了电化学腐蚀的进程。此外，海水中的溶解

氧、海洋生物以及海底沉积物中的腐蚀性成分都会对管道造成潜在的腐蚀威胁。

2.2 输送介质因素

(1) 油气中的腐蚀性成分含量。油气本身含有的腐蚀性成分,如硫化氢、二氧化碳、水等,都会对管道造成直接的腐蚀。硫化氢和二氧化碳会与管道金属反应生成相应的金属硫化物和碳酸盐,导致管道金属结构的破坏。水分则会促进电化学腐蚀的发生,特别是在管道低洼地段和弯头处,水分和固体杂质的沉积会加剧腐蚀作用。(2) 水分和固体杂质对管道内壁的腐蚀影响。除了油气中的腐蚀性成分外,水分和固体杂质也是影响管道内壁腐蚀的重要因素。在输送过程中,这些杂质可能会沉积在管道内壁,形成腐蚀电池,加速管道的电化学腐蚀。特别是在管道的低洼地段和弯头处,由于流体动力学的影响,这些部位的沉积物更为严重,腐蚀速率也更高。

2.3 管道材质和设计因素

(1) 管道材料的耐腐蚀性。管道材料的耐腐蚀性是决定其抗腐蚀能力的关键因素。不同材质的管道在相同的腐蚀环境中,其腐蚀速率可能会有很大的差异。因此,在管道设计和选材时,需要充分考虑输送介质的腐蚀性、管道的运行条件以及预期的服役寿命等因素,选择合适的管道材料^[2]。(2) 管道结构的合理性。管道结构的合理性也是影响其腐蚀速率的重要因素。合理的管道结构可以减少流体对管道的冲刷和腐蚀作用,提高管道的抗腐蚀能力。例如,通过优化管道的形状和尺寸,可以减少流体在管道内的湍流和涡流,从而降低腐蚀速率。此外,合理的管道支撑和固定方式也可以减少因管道振动和变形而引起的腐蚀问题。(3) 防腐涂层的质量和选择。防腐涂层是保护管道免受腐蚀的重要措施之一。涂层的质量和选择直接关系到其防腐效果的好坏。高质量的防腐涂层能够有效地隔离管道金属与腐蚀环境,减缓腐蚀速率。在选择涂层时,需要充分考虑输送介质的腐蚀性、管道的运行条件以及预期的服役寿命等因素,选择合适的涂层材料和类型。同时,涂层的施工质量和维护管理也是影响其防腐效果的重要因素之一。

3 油气管道防腐措施

3.1 外防腐措施

(1) 防腐涂层的应用。防腐涂层是油气管道外防腐的首选措施。它通过物理隔离和化学稳定作用,有效阻止腐蚀介质与管道金属的接触,从而减缓或防止腐蚀的发生。环氧涂层以其优异的附着力和耐腐蚀性,在油气管道防腐中得到了广泛应用。它能在管道表面形成一层致密的保护膜,有效抵御土壤、水分等腐蚀介质的

侵蚀。此外,三层聚乙烯涂层(3PE)因其良好的机械性能和耐老化性能,也成为油气管道防腐的重要选择。3PE涂层由聚乙烯底层、胶粘剂和聚乙烯表层组成,三层结构协同作用,提供卓越的防腐保护。(2) 阴极保护技术。阴极保护技术是电化学防腐的重要手段。它通过向管道施加阴极电流,使管道金属电位负移,从而减缓或停止腐蚀反应。外加电流阴极保护系统由恒电位仪、辅助阳极和参比电极组成。恒电位仪提供稳定的阴极电流,辅助阳极将电流引入土壤或海水中,参比电极用于监测管道电位。牺牲阳极阴极保护则是利用电位更负的金属(如镁、锌)作为阳极,与管道金属连接后,阳极金属会优先发生腐蚀,从而保护管道金属不受腐蚀。这种方法不需要外部电源,适用于远离电网的偏远地区^[3]。

(3) 绝缘层防腐方法。绝缘层防腐方法是通过在管道外部包裹一层绝缘材料,如玻璃布、岩棉等,来隔离管道金属与外部环境。这种方法特别适用于海底管道等难以进行阴极保护的场合。绝缘层不仅能阻止腐蚀介质的侵入,还能减少热损失,提高管道的输送效率。然而,绝缘层防腐方法也存在一定的局限性,如施工难度大、成本高等。

3.2 内防腐措施

(1) 选择合适的管材和内壁涂层。针对油气管道内壁的腐蚀问题,选择合适的管材和内壁涂层是关键。对于输送腐蚀性较强的油气介质,应选用耐腐蚀性能较好的管材,如不锈钢、合金钢等。同时,在管道内壁涂覆一层防腐涂料,如环氧树脂、聚氨酯等,也能有效防止腐蚀的发生。内壁涂层不仅能隔离腐蚀介质与管道金属的接触,还能减少流体对管道的冲刷和磨损。(2) 添加缓蚀剂,形成保护膜。缓蚀剂是一种能够减缓或阻止金属腐蚀的化学物质。在油气介质中添加适量的缓蚀剂,可以使其在管道内壁形成一层保护膜,从而防止腐蚀介质对管道的侵蚀。缓蚀剂的种类和用量应根据油气介质的成分、温度、压力等因素进行选择。同时,缓蚀剂的使用还需注意其对管道材质和输送介质的影响,确保安全性和有效性。(3) 改善输送介质的质量,减少腐蚀性成分。改善输送介质的质量是防止油气管道内壁腐蚀的根本措施。通过降低油气介质中的水分、硫含量等腐蚀性成分的含量,可以减少其对管道内壁的腐蚀作用。这需要对油气开采、加工和输送过程进行严格的质量控制,确保输送介质的质量符合要求^[4]。

3.3 综合防腐技术

(1) 联合使用多种防腐措施,提高防腐效果。油气管道的防腐工作不应局限于单一措施,而应综合考虑多

种防腐技术的优势,形成互补效应。例如,将防腐涂层与阴极保护技术相结合,可以形成双重保护机制;在内壁涂层中添加缓蚀剂,可以进一步提高防腐效果。通过联合使用多种防腐措施,可以显著提高管道的抗腐蚀能力,延长其使用寿命。(2)采用先进的监控手段,实时监测管道腐蚀情况。随着科技的发展,先进的监控手段被越来越多地应用于油气管道的防腐管理中。通过在管道上安装腐蚀监测传感器或检测装置,可以实时监测管道的腐蚀情况,及时发现并处理潜在的腐蚀问题。这些监控手段包括在线腐蚀监测技术、超声波检测技术、漏磁检测技术等。通过实时监测和数据分析,可以准确评估管道的腐蚀状况,预测未来的腐蚀趋势,并据此制定和调整防腐措施。这不仅提高了防腐工作的效率和质量,还为管道的安全运行提供了有力保障。

4 油气管道防腐措施的经济效益分析

4.1 防腐措施的成本投入

防腐措施的成本投入主要包括防腐材料费用和人力成本两部分。(1)在材料方面,防腐涂层、阴极保护设备、缓蚀剂等是主要的支出项。这些材料的选择和使用量会根据管道的材质、运行环境以及预期的防腐效果来确定。高质量的防腐材料虽然初期投入较大,但其卓越的防腐性能能够显著降低后期的维护成本,因此具有更高的性价比。(2)人力成本方面,防腐施工和维护需要专业的技术人员进行操作。这些人员需要经过严格的培训,掌握防腐技术的核心要领,以确保施工质量和维护效果。随着人力资源成本的不断提高,如何合理安排施工和维护计划,提高工作效率,降低人力成本,成为管道管理者需要面对的重要课题。

4.2 防腐措施带来的经济效益

(1)通过有效的防腐措施,可以显著减少因腐蚀导致的管道泄漏和维修成本。腐蚀是管道泄漏的主要原因之一,一旦泄漏发生,不仅会造成能源的浪费,还会引

发环境污染和安全事故。因此,通过防腐措施降低泄漏风险,对于保障管道安全运行具有重要意义。(2)防腐措施能够延长管道的使用寿命,提高能源运输效率。随着管道运行时间的延长,其内部结构和性能会逐渐发生变化,导致运输效率下降。而有效的防腐措施能够减缓这种变化,保持管道的良好状态,从而提高能源运输效率,降低运输成本。(3)防腐措施还能保障能源安全,减少环境污染。能源安全是国家安全的重要组成部分,而管道作为能源传输的主要通道,其安全运行直接关系到能源的稳定供应。同时,管道泄漏不仅会造成能源的浪费,还会对周围环境造成严重的污染。因此,通过防腐措施降低泄漏风险,对于保障能源安全和环境保护具有重要意义。

结束语

综上所述,油气管道的腐蚀问题复杂多变,涉及土壤、气候、介质成分等多方面因素。通过本研究,我们深入剖析了这些腐蚀因素的作用机制,并探讨了多种有效的防腐措施。未来,随着科技的进步和材料科学的发展,油气管道的防腐技术将会更加先进和多样化。我们期待通过持续的研究和实践,不断提升油气管道的防腐能力,为保障国家能源安全、促进经济社会发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]郭文鑫,星志涛.油气管道腐蚀检测与防护[J].化工管理,2021,(13):114-115.
- [2]郑中亮,徐振.油气管道腐蚀因素及防腐措施的研究[J].清洗世界,2023,(10):93-94.
- [3]孙玉,张薇,唐成瑞.油气管道腐蚀因素与防腐措施进展[J].全面腐蚀控制,2023,(13):115-116.
- [4]张善泽.油气管道腐蚀检测技术与防腐策略[J].中国石油和化工标准与质量,2023,(15):174-175.