

石油化工工艺管道的腐蚀及防护技术

雒晓璐（陕西化建工程有限责任公司，陕西 杨凌 712100）

摘要：石油化工工艺管道腐蚀问题一直是影响工业安全和生产效率的关键因素。为了更好地保证油气资源的安全稳定输送，本文探讨了石油化工工艺管道常见的腐蚀类型及其成因，包括化学腐蚀、电化学腐蚀和应力腐蚀等。针对这些腐蚀问题，进一步详细分析了现有的防护技术，如涂层防护、阴极保护、材料选择和焊接质量控制等，旨在提高管道的耐腐蚀性和延长使用寿命。此外，本文还强调了腐蚀监测与检测工作的重要性，以期为石油化工企业的管道防腐工作提供理论指导和实践参考。

关键词：石油化工；工艺管道；腐蚀；类型；成因；防护技术

中图分类号：TE988.2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)014-0127-03

Corrosion and Protection Technology of Petrochemical Process Pipelines

Luo Xiaolu (Shaanxi Huajian Engineering Co., Ltd., Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: Corrosion of petrochemical process pipelines has always been a key factor affecting industrial safety and production efficiency. In order to better ensure the safe and stable transportation of oil and gas resources, this article explores the common types and causes of corrosion in petrochemical process pipelines, including chemical corrosion, electrochemical corrosion, and stress corrosion. In response to these corrosion issues, further detailed analysis was conducted on existing protective technologies, such as coating protection, cathodic protection, material selection, and welding quality control, aimed at improving the corrosion resistance and extending the service life of pipelines. In addition, this article emphasizes the importance of corrosion monitoring and detection work, in order to provide theoretical guidance and practical reference for pipeline anti-corrosion work in petrochemical enterprises.

Keywords: Petrochemical industry; Process pipeline; Corrosion; Type; Causes; Protective technology

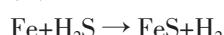
管道运输以其高效、连续和低成本的特点，在能源输送的广阔领域中占据了举足轻重的地位。特别是那些穿越山川、横跨海域的长输管道，它们如同能源的血脉，源源不断地将石油、天然气等宝贵资源输送到全国各地，为现代工业的发展注入了源源不断的动力。这些管道不仅是现代工业的生命线，更是国家能源安全的重要基石，保障了能源供应的稳定性和可靠性，为国家的经济发展和社会稳定提供了坚实的保障。然而，石油化工工艺管道在长期的运行过程中常常面临着严重的腐蚀问题，腐蚀不仅会降低管道的强度和密封性，威胁到管道的安全性和可靠性，还可能引发泄漏事故，造成环境污染和经济损失。因此，深入研究石油化工工艺管道的腐蚀机理，探索有效的防护技术，对于保障工业生产的顺利进行、维护国家能源安全以及保护生态环境都具有极其重要的意义。

1 石油化工工艺管道常见的腐蚀类型及其成因

1.1 化学腐蚀

化学腐蚀是石油化工工艺管道中最常见的一类腐蚀，此类腐蚀主要发生在管道表面与周围介质直接接触时，由于介质中某些化学物质与管道材料发生化学反应，导致管道材料逐渐溶解或变质。石油化工生产中常见的腐蚀性介质包括酸、碱、盐等强腐蚀性物质，它们在与管道材料接触时，会破坏材料的表面结

构，形成腐蚀坑、腐蚀裂纹等缺陷。此外，高温、高压的工作环境也会加速化学腐蚀的进程，使管道材料的腐蚀速率增加。化学腐蚀不仅会降低管道的强度和密封性，还可能引发泄漏事故，对生产安全和环境保护构成严重威胁。例如，钢材与硫化氢反应生成硫化亚铁，其化学方程式可表示为：



1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀多发生在管道与电解质溶液接触时，由于管道材料中存在电位差，导致电子在材料内部和电解质溶液之间流动，形成腐蚀电池。在腐蚀电池中，阳极区的管道材料会失去电子而被氧化，阴极区的管道材料则会得到电子而被还原。这种氧化还原反应会导致管道材料逐渐溶解，形成腐蚀产物。电化学腐蚀的速率受多种因素影响，包括介质成分、温度、压力、流速以及管道材料的电化学性质等^[1]。石油化工生产中，由于管道常常与含有水、硫化氢、二氧化碳等腐蚀性成分的介质接触，因此电化学腐蚀是管道腐蚀的主要形式之一。例如，在酸性环境中，氢离子会在阴极得到电子生成氢气：



1.3 应力腐蚀

应力腐蚀是石油化工工艺管道中一种较为复杂的

腐蚀类型。这种腐蚀主要发生在管道材料受到拉伸、压缩、弯曲等应力作用时，与腐蚀性介质共同作用导致的腐蚀现象。应力腐蚀的机理较为复杂，通常认为是由于应力作用导致管道材料内部的晶格结构发生变化，使得材料的耐腐蚀性降低。同时，腐蚀性介质在应力作用下的渗透和扩散速度也会加快，进一步加剧了管道的腐蚀进程^[2]。石油化工生产中由于管道常常需要承受较高的压力和温度，因此应力腐蚀是管道腐蚀中不可忽视的一种类型，其可能导致管道在无明显变形或预兆的情况下突然断裂，引发严重的安全事故。

2 石油化工工艺管道腐蚀防护技术

2.1 选择耐腐蚀管材

耐腐蚀管材的选择是石油化工工艺管道腐蚀防护的基础性措施。在复杂工况下，管道材料需同时满足耐腐蚀性、机械强度和经济性要求。针对不同腐蚀环境，需优先选择与介质兼容的材料。例如，在含硫或酸性介质中，奥氏体不锈钢（如316L）因其高铬、镍含量和添加钼元素，可有效抵抗点蚀和应力腐蚀；而在高温高压或高氯离子环境中，双相不锈钢（如2205）凭借两相结构的协同作用，具有更优的抗腐蚀性能^[3]，具体如表1所示。对于极端腐蚀条件（如强酸、强碱或海水环境），钛合金、镍基合金等高端材料可显著延长管道寿命，但需权衡其高昂成本。

除此之外，管材选型还需结合工艺参数和腐蚀机理进行综合评估。例如，碳钢管道成本低、机械性能好，但在潮湿或含盐环境中需配合其他防护措施；玻璃钢或塑料管道（如PVC、PP）对电化学腐蚀免疫，但受限于温度和压力适用范围。此外，材料表面处理技术（如渗氮、渗碳）可提升管材表面硬度和耐蚀性。选材过程中需遵循API、ASTM等国际标准，并考虑焊接工艺对材料耐蚀性的影响，避免热影响区成为腐蚀薄弱环节。

2.2 外涂层技术

外涂层防腐的基本原理是通过在管道表面涂覆一层具有优异阻隔性能的涂层材料，将管道与腐蚀性介

质隔离开来，从而有效地抑制腐蚀的发生和发展，是目前应用最广泛的防护方法之一。例如，环氧树脂涂层因其优异的附着力、耐化学性和机械强度，成为埋地管道的首选防护层；聚氨酯涂层则因其耐候性突出，常用于架空管道。三层聚乙烯（3PE）复合结构结合了环氧底漆的防腐性、胶黏剂的粘结性和聚乙烯层的机械保护性，在长输管道中表现卓越。近年来，纳米改性涂层通过添加氧化锌、二氧化硅等纳米颗粒，显著提升了涂层的致密性和抗渗透能力^[4]。

需要注意的是，施工过程中应注意环境温湿度对固化效果的影响，避免出现针孔、流挂等缺陷。弯头、法兰等复杂部位可采用液态聚氨酯现场成型技术实现无缝防护，并特别关注涂层老化问题，因为紫外线辐射、温差应力等因素会加速涂层失效，需结合工况优化涂层体系设计。

2.3 电化学保护技术

电化学保护主要是通过改变金属电位实现腐蚀控制，通常包括阴极保护和阳极保护两种形式。强制电流阴极保护系统由直流电源、辅助阳极和参比电极构成，适用于长距离埋地管道，通过输出电流使管道电位极化至保护区间。牺牲阳极法则利用镁、锌、铝合金的电位差提供保护电流，适用于短管段或复杂管网节点。阳极保护通过施加阳极电流使金属表面形成钝化膜，多用于浓硫酸储罐等强氧化性介质环境。

系统设计需精确计算保护电流密度，避免过保护引发涂层剥离或氢脆风险。混合金属结构需采用电绝缘法兰防止电流干扰，并行管道间距小于30m时应考虑跨接均压^[5]。日常维护需定期检测保护电位、电流输出等参数，利用极化探头评估真实保护效果。对于高电阻率土壤环境，可添加化学回填料改善阳极接地性能。电化学保护需与涂层技术联合使用，可降低90%以上的维护成本。

2.4 缓蚀剂技术

缓蚀剂作为一种重要的化学物质，通常被少量添加到腐蚀性介质中，以有效抑制金属表面的腐蚀反应。

表1 一些石油化工管道材料的性能对比

材料类型	主要成分	耐腐蚀性能	应用场景
碳钢	铁、碳	耐碱性较好，耐酸性差	输送油、气、水等弱腐蚀性介质
低合金钢	铁、碳、少量合金元素（如Cr、Mo、Ni等）	比碳钢耐蚀性有所提高	输送含少量腐蚀性介质的油、气、水
奥氏体不锈钢	铁、铬、镍	耐酸性、耐氧化性较好	输送酸性、氧化性介质
双相不锈钢	铁、铬、镍、钼、氮	兼具奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的优点，耐蚀性更强	苛刻的腐蚀环境
镍基合金	镍、铬、钼、铁等	优异的耐腐蚀性能，耐高温、高压	极端腐蚀环境，如高温高压、强酸强碱等
钛合金	钛、铝、钒等	非常优异的耐腐蚀性能，重量轻	对重量和耐蚀性要求极高的场合
锆合金	锆、锡、铁、铬、镍等	优异的耐腐蚀性能，尤其耐强酸、强碱	核工业和化工领域

表 2 缓蚀剂作用机理分类

分类	阳极型缓蚀剂	阴极型缓蚀剂	混合型缓蚀剂
作用机理	抑制金属阳极溶解反应，通过形成氧化膜或钝化膜阻断阳极反应	抑制阴极还原反应（如氧还原、析氢反应），通过沉淀膜覆盖阴极区域	同时作用于阳极和阴极，或通过吸附膜隔离金属与介质接触
代表物质	铬酸盐、亚硝酸盐、钼酸盐	聚磷酸盐、锌盐、碳酸盐	有机胺类（如咪唑啉）、硫脲、苯并三氮唑
适用场景	中性或碱性介质环境（如循环水系统）	酸性或含氧介质环境（如锅炉给水系统）	复杂介质环境（如油气管道 CO ₂ /H ₂ S 腐蚀）
优点	保护效果显著，成膜速度快	安全性较高，无腐蚀风险	适用范围广，协同作用强
缺点	需严格控量（浓度不足可能引发局部腐蚀）	缓蚀效率较低，需持续补充	成本较高，可能受温度影响稳定性

其作用机理主要可以分为阳极型、阴极型和混合型三类，如表 2 所示。阳极型缓蚀剂主要通过在金属表面形成一层致密的氧化膜或难溶性化合物膜，从而阻碍金属的阳极溶解过程，减缓腐蚀速率，这类缓蚀剂包括重铬酸钾、铬酸钾等无机氧化性物质，它们能使金属表面阳极产生钝态，形成保护膜，提高金属的抗腐蚀性^[6]。阴极型缓蚀剂则主要作用于金属的阴极反应过程，通过提高阴极反应的过电位、在金属表面形成难溶的沉淀膜或吸收水中的溶解氧等方式，来抑制阴极反应的进行，从而减缓金属的腐蚀。例如，硫酸锌等缓蚀剂能在金属表面形成氢氧化锌沉淀膜，抑制阴极反应。混合型缓蚀剂则兼具阳极型和阴极型缓蚀剂的特点，既能抑制阳极反应又能抑制阴极反应，它们的作用机理更为复杂，可能包括在金属表面形成胶体物质、吸附膜或同时与阳极和阴极反应产物反应生成不溶物等方式，来全面减缓金属的腐蚀过程。

2.5 合理选用腐蚀监测与检测技术

在石油工艺管道的腐蚀检测领域，针对埋管的腐蚀状况评估至关重要，以确保管道运行的安全性和可靠性。目前，主要采用的检测技术分为内腐蚀检测技术和外腐蚀检测技术两大类。其中，漏磁通法和超声波法在国内应用尤为广泛，这得益于它们在实际应用中的高效性和准确性。

漏磁通法即通过检测管道壁内磁场的变化来识别腐蚀缺陷，一般而言，管道存在腐蚀时金属壁厚度减少，导致磁场泄漏，利用传感器捕捉这些泄漏的磁场信号，可以精确测量腐蚀的深度和位置。这种方法非破坏性、适应性强，尤其适用于长距离埋地管道的腐蚀检测。超声波法则是利用超声波在金属中的传播特性，通过测量超声波在管道壁中的反射、散射和透射情况，来评估管道的腐蚀状况。超声波检测能够穿透较厚的管壁，提供高精度的腐蚀图像，且对管道材质和结构的适应性广。

相较于其他检测方法，如射线检测、涡流检测等，漏磁通法和超声波法因其实用性强、操作简便、数据准确度高，成为当前国内石油工艺管道腐蚀检测的首

选。其他方法或因技术难度高、操作复杂，或因数据可靠性不足，难以满足实际工程中对腐蚀检测的高标准要求，难以作为后续制定和实施有效的防腐蚀措施提供科学依据。因此，漏磁通法和超声波法在保障石油管道安全运行方面发挥着不可替代的作用。

3 结束语

总而言之，石油化工工艺管道的腐蚀问题对安全生产构成严重威胁，但通过有效的防护技术应用，可以显著提升管道的耐腐蚀性和使用寿命。当前，国内广泛采用三层 PE、FBE 等防腐涂层技术，以及液态聚氨酯防腐涂料等先进材料，这些技术具有优异的防腐性能、良好的机械强度和施工便捷性，能够显著降低管道的腐蚀速率。同时，针对特定环境下的腐蚀问题，如应力腐蚀、高温高压腐蚀等，还采取了选用耐腐蚀材料、优化管道设计、实施压力波动控制等综合措施，减少了因腐蚀导致的经济损失和安全风险，还推动了石油化工行业的可持续发展。未来石油化工工艺管道的腐蚀防护将更加高效、环保，为行业的安全生产提供有力保障。

参考文献：

- [1] 朱文波. 石化管道安装工程施工管理中的常见问题及处理方法 [J]. 石化技术, 2023, 30(05):229-231.
- [2] 雷建联. 石油化工工艺管道安装工程施工管理中的常见问题研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(01):75-77.
- [3] 马洪震. 石油化工工程中工艺管道安装标准及施工风险 [J]. 现代盐化工, 2022, 49(05):81-82+91.
- [4] 韩庆国, 鲍海平. 石油化工装置设备、工艺管道试压程序及管理要点 [J]. 建设监理, 2022(05):68-71.
- [5] 于刚, 肖莉. 石油化工工艺管道安装质量控制技术分析 [J]. 石化技术, 2022, 29(01):85-86.
- [6] 卢磊. 石油化工管道焊接工艺与质量管理 [J]. 化工管理, 2021, (31):179-180.

作者简介：

雒晓璐（1985-），男，汉族，陕西岐山人，大学本科，工程师，研究方向：机电工程安装。