

化工管道腐蚀工艺设计与应用分析

张文英 刘爱云 (山东大地盐化集团有限公司, 山东 潍坊 262700)

李新华 (山东同成医药股份有限公司, 山东 潍坊 262700)

摘要: 化工管道腐蚀问题对生产安全、稳定和效益有重大影响。本文分析了化工管道腐蚀的工艺设计原则, 并结合工程案例, 对腐蚀工艺设计和防腐措施的应用进行了探讨。研究表明, 通过合理选材、优化工艺、采用先进防腐技术, 能够有效控制化工管道腐蚀, 延长使用周期, 提高安全性和经济性。

关键词: 化工管道; 腐蚀; 工艺设计; 防腐措施; 应用分析

中图分类号: TQ050.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 013-0146-03

Design and Application Analysis of Corrosion Process for Chemical Pipeline

Zhang Wenying, Liu Aiyun (Shandong Dadi Salt Chemical Group Co., Ltd., Weifang Shandong 262700, China)

Li Xinhua (Shandong Tongcheng Pharmaceutical Co., Ltd., Weifang Shandong 262700, China)

Abstract: Corrosion of chemical pipelines has a significant impact on production safety, stability, and efficiency. This article analyzes the process design principles of chemical pipeline corrosion, and discusses the application of corrosion process design and anti-corrosion measures based on engineering cases. Research has shown that by selecting materials reasonably, optimizing processes, and adopting advanced anti-corrosion technologies, chemical pipeline corrosion can be effectively controlled, the service life can be extended, and safety and economy can be improved.

Keywords: chemical pipeline; Corrosion; Process design; Anti corrosion measures; Application Analysis

管道是化工生产的重要组成部分, 其安全平稳运行是化工企业正常生产的基本保障。由于化工管道所处的特殊工况环境, 使其面临严峻的腐蚀威胁, 因此, 加强化工管道的腐蚀防护, 对保障生产安全、提高设备完好率、降低能耗物耗、创造良好经济效益有着不可替代的作用。

1 化工管道腐蚀的工艺设计原则

1.1 合理选材

面对复杂多变的输送介质, 必须充分评估其腐蚀风险, 并权衡技术经济因素, 优选与介质相适应的管材。对于一般的化学介质, 可选用价格适中的碳钢, 通过低碳、细晶、微合金化等冶金手段, 改善其组织均匀性, 提高耐蚀性。而对于高腐蚀性的酸、碱等介质, 则应优先考虑不锈钢、钛合金、哈氏合金等高端耐蚀材料。尽管它们成本较高, 但能从根本上提升管道的耐蚀性能, 延长使用寿命, 降低检修更换频次, 从而在生命周期内实现成本最优。此外, 塑料管道凭借优异的耐酸碱性能, 在输送低压、常温化学品方面也是一个不错的选择。

1.2 优化流程

不合理的管道布置极易引起局部湍流、紊流, 加剧流体对管壁的冲刷磨损, 是诱发和加速腐蚀的重要因素。因此, 在管道设计时应尽量减少弯头、三通等变径段, 必要时可设置流线型流道, 缓冲湍流对弯管

的冲击。对于含固颗粒的介质, 可在弯管前增设缓冲弯管, 释放颗粒动能, 减小磨损腐蚀。高温熔融盐管道则宜采用垂直敷设, 简化管路, 减少热应力。对于某些高速流动的介质, 可利用喷嘴、引射器等节流装置, 降低出口速度, 避免高速冲蚀。

1.3 控制工况

超温超压运行是加速管道腐蚀和失效的诱因。对于高温高压的输送介质, 必须严格控制其温度压力在管材的耐温耐压等级内, 避免材料强度和耐蚀性的急剧下降。对于温压波动大的工况, 可采用缓冲罐、稳压阀等装置进行调节, 确保工况参数处于合理范围内。同时, 要重视对特殊介质输送工况的监测与控制, 如高温熔盐、高压氢气等, 建议配置专门的温度、压力在线监测系统, 实现工况的实时监控和超限报警, 为管道的安全运行提供保障。而对于腐蚀性介质, 要控制输送流速, 避免流速过快加剧侵蚀, 或过慢引起沉积垢腐蚀。

1.4 合理装配

焊接连接作为化工管道的主要连接方式, 其焊缝质量的好坏直接关系到管道的耐蚀性。为此, 应优选全焊透对接焊, 减少焊缝数量, 降低缺陷概率。同时采用与管材相匹配的焊材, 严格控制焊接工艺参数, 确保焊缝的冶金质量和力学性能。而对于必须采用法兰连接时, 宜选择突面或榫槽等能够降低泄漏风险的

密封结构，并选用柔性石墨复合垫片，最大限度地减少介质泄漏引起的缝隙腐蚀。此外，管道与设备、管架等的连接处，应设计合理的补偿装置，降低外加应力和应力集中，防患应力腐蚀开裂于未然。

1.5 电化学保护

通过在管道表面施加电流，可强制其电位降低至耐蚀区，从而抑制电化学腐蚀的阳极溶解过程。常见的阴极保护方法有牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法利用镁、锌等比管道电位更负的金属做阳极，与管道连接形成原电池，阳极溶解保护管道。它结构简单，不需外加电源，运行维护简便，但保护电流小，且阳极消耗后需要更换。外加电流法则采用外加直流电源，以管道为阴极，惰性材料如石墨、磁铁矿为阳极，强制管道保持在耐蚀电位区。它可施加较大保护电流，保护效果好，但初投资大，管理要求高。为发挥两种方法的优势，实践中往往采用牺牲阳极与外加电流联合保护。

1.6 合理检修

只有准确掌握管道的实时腐蚀状态，才能为评估其健康水平、优化维修策略提供可靠依据。为此，必须建立多层次、全覆盖的腐蚀检测网络，综合采用超声波测厚、射线探伤、涡流等无损检测技术，定期检测管道壁厚变化趋势。对于可拆解管段，宜辅以内窥镜等就地检测手段，及时发现局部腐蚀缺陷。值得强调的是，检测频次应体现差异化原则，即高腐蚀风险管段应适当缩短检测周期，而一般管段则可延长检测周期，在安全性和经济性之间寻求平衡。检测中一旦发现严重减薄、开裂等问题，必须及时评估，采取更换或修复等措施消除隐患。日常维护中，还应加强巡检，重点关注保温层、阴极保护系统、管道支撑等薄弱环节。

2 化工管道的防腐蚀技术与措施

2.1 涂层防护

化工管道防腐的首要措施就是在管道表面涂覆防腐涂层，通过涂层在管道表面形成一道隔离屏障，阻断腐蚀介质与管道基体的直接接触，从而大大降低腐蚀的风险。防腐涂层按材料可分为有机涂层、无机涂层和金属涂层等。在实际工程应用中，环氧树脂、聚氨酯等有机涂层凭借其优异的施工性能和强大的粘接力得到广泛青睐，它们通过与管道表面形成交联网络结构，紧密附着在管道上，形成柔韧的保护膜。这类涂层施工方便快捷，涂装设备简单，不受管道形状的限制。但有机涂层的耐热性一般在150℃以下，不适合高温场合。而且有机涂层容易被有机溶剂、强酸强碱等侵蚀，使用环境有一定局限性。对于输送高温、

强酸碱等极端介质的管道，可以选用珐琅、玻璃或陶瓷等无机非金属涂层。它们熔点高，化学惰性强，能耐受绝大多数酸、碱、盐的腐蚀，是理想的耐化学腐蚀涂层。但无机涂层的脆性较大，抗冲击、抗变形能力差，在管道运输、安装、振动等过程中容易开裂脱落。因此施工时要严格控制涂层厚度和均匀性，减少应力集中，避免热冲击。金属涂层如热镀锌、热喷铝可利用金属间电位差形成牺牲阳极保护层，通过阴极保护机制抑制钢管腐蚀。当涂层出现局部损伤时，基体暴露，涂层材料优先溶解，保护下面的钢管基体，自愈性好。金属涂层附着力强，耐磨耐蚀，广泛用于石油、海洋等管道。但热喷涂、电镀等工艺成本较高，工件尺寸受喷涂设备限制，而且考虑到金属间可能的电偶腐蚀，要慎重选择合适的涂层材料。在碳钢管道内衬工程塑料是一种新兴的复合防腐技术，它将高强度碳钢管架与耐蚀塑料内层巧妙结合，集两者优点于一身。塑料内衬管道兼具金属管道的高强度和金属管道的耐腐蚀性，既可耐酸碱、耐盐水，又有优异的柔韧性和抗冲击性，在化工管道得到越来越多的应用。选择管道防腐涂层时，要综合考虑输送介质性质、使用温度、环境条件、施工安装等因素，根据不同管段的工况条件、腐蚀特点，配套选用不同的涂层体系。对于一些特殊管段如接头、阀门、法兰等，要因地制宜地选用涂层或采取其他防腐措施。

2.2 缓蚀剂保护

化工管道除了采用涂层隔离防腐外，向输送介质中添加缓蚀剂也是一种行之有效的电化学保护方法。缓蚀剂是一类能够显著减缓金属腐蚀速率的化学物质，它们通过与金属表面发生物理吸附或化学反应，在金属表面形成一层致密的保护膜，阻止腐蚀性物质与金属发生直接接触，从而大大降低了腐蚀的驱动力。工业上常用的缓蚀剂品种繁多，按其作用机理可分为阳极型、阴极型和混合型等。在实际选用时，必须根据输送介质的酸碱性、温度等特点，选择合适的缓蚀剂种类。而在酸性介质中，则宜选用聚合磷酸盐、肌氨酸等阴极型缓蚀剂。它们能吸附在阴极表面，抑制氢离子的还原析出，从而减缓阴极反应速度。此外，混合型缓蚀剂如苯骈三唑、咪唑啉等因兼具阴阳极缓蚀作用，可抑制电极反应的各个环节，因而适用范围更加广泛。使用时只需控制在几十到几百ppm的低浓度，就能获得良好的缓蚀效果。但在实际应用中，要注意定期检测缓蚀剂的浓度并及时补加，以维持其缓蚀作用。需要指出的是，缓蚀剂的选用还要考虑到系统的整体腐蚀状况。有些缓蚀剂对某些金属有良好的缓蚀效果，但对另一些金属可能会加速腐蚀，如铬酸

盐对碳钢有很强的缓蚀作用，但对铝及其合金的耐蚀性反而不利。所以在多金属组成的管路系统中，缓蚀剂的使用要兼顾各种材料，避免引起局部腐蚀。同时，含氮、含硫的有机缓蚀剂在高温下可能分解失效，产生有毒有害物质，带来环保安全隐患。而无机缓蚀剂价格低廉，但用量大，处理不当会造成环境污染。所以在选用缓蚀剂时，除了考虑缓蚀性能，还要权衡环保、成本等诸多因素。

2.3 化学镀保护

化学镀是利用化学还原反应原理，在金属表面自催化沉积防护涂层的一种表面处理技术。与电镀相比，它无需外加电源，操作更加简便快捷。化学镀铜层延展性好，能均匀沉积在管道内壁的狭窄缝隙、死角等腐蚀薄弱区域，大大提高了防腐的完整性。而且铜与碳钢的电极电位很接近，不易形成电偶腐蚀，化学镀铜作为化学镀镍的底层，可以增强涂层与基体的结合力。

此外，化学镀锌工艺简单，沉积速度快，可获得柔韧致密的锌涂层。当化学镀锌层与钢基出现缺陷时，锌作为牺牲阳极优先溶解，从而保护下面的钢管基体不受腐蚀。但化学镀锌层容易老化，在酸性和含氯离子环境中易发生点蚀，一般多用作其他涂层的底层。

2.4 生物膜保护

生物膜保护是一种新兴的化工管道微生物腐蚀控制技术，它利用微生物在管道内表面形成的生物膜，通过物理阻隔和化学抑制作用，减缓甚至阻止腐蚀性介质对管道的电化学腐蚀过程，这种方法因其环保、经济、适用面广等特点，近年来受到越来越多的关注和研究。在化工管道的水环境中，往往存在着大量的细菌等微生物。当环境条件适宜时，细菌就会在管道内壁上吸附、繁殖，并分泌胞外聚合物形成凝胶状的生物膜。生物膜一旦形成，其内部的微环境就与外界水体隔绝，pH值、溶解氧等保持相对稳定。同时，细菌代谢产生的某些有机物质如挥发性脂肪酸，也能吸附在生物膜内起到缓蚀作用。以厌氧条件下的硫酸盐还原菌为例，它们以有机物为碳源，将水中的 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ，与腐蚀产生的 Fe^{2+} 结合，在钢铁表面形成一层致密的 FeS 保护膜。这层 FeS 膜能有效阻止腐蚀性阴离子如 Cl^- 向钢铁表面扩散，大大减缓了碳钢的阳极溶解过程。

此外，生物膜的形成还能缓解管道的沉积垢腐蚀。生物膜内部微生物的新陈代谢，可溶解水垢中的碳酸钙、硫酸钙等沉积物，防止垢下腐蚀的发生。对于易发生缝隙腐蚀的焊缝、螺纹等部位，生物膜也能填充其间隙，阻碍局部腐蚀的加剧。

2.5 耐蚀合金材料

作为最常用的化工管道材料，不锈钢凭借表面致密的钝化膜，展现出远优于普通碳钢的耐蚀性。铜镍合金如90/10铜镍，因其铜含量高，导热性能优异，主要用于蒸汽冷凝管道。高铜镍合金中加入适量的铁、锰，可大幅提高强度，改善耐蚀性。含铬、锰的白铜更是具有优异的抗海水腐蚀性能，是舰船管路系统的理想材料。钛及其合金密度低，比强度高，又兼具优异的耐高温、耐腐蚀性能。在常见的酸性介质以及氯离子环境中，钛几乎不发生腐蚀。而且钛及其合金的加工性能好，可采用焊接、弯曲等常规工艺制造管道。目前，钛合金管道已在石油、化工、海洋工程等领域获得成功应用。

3 应用实例

以某化工厂浓硫酸管道的腐蚀案例为例，管道频繁泄漏的根本原因在于304不锈钢的耐蚀性不能满足浓硫酸环境的要求。304不锈钢虽然是最常用的奥氏体不锈钢，但其耐点蚀能力有限，在高浓度酸性介质中很容易发生严重的点蚀，导致管壁快速减薄，甚至穿孔。通过更换310S不锈钢，该厂从根本上提高了管道的耐蚀性能。310S不锈钢含有更高的铬、镍含量，奠定了其优异的抗氧化性和耐蚀性。而对原有缺陷焊缝的返修，消除了点蚀优先发生的薄弱环节，增设流速缓冲段，抑制了湍流和冲刷对管道的额外损伤。该案例充分表明，针对具体工况，选用高性能耐蚀材料，并优化工艺设计，才是从源头上防治化工管道腐蚀，确保长周期安全运行的治本之策。

4 结束语

总之，化工管道防腐蚀始终是一个复杂的系统工程，它贯穿于管道全生命周期的设计、制造、安装、投运、检维修的各个环节。工程实践表明，只有遵循因地制宜、因材施教、多措并举的原则，针对管道的工况特点和风险等级，在合理选材的基础上，周密设计防腐工艺，综合利用涂层保护、缓蚀剂处理、电化学保护、蚀情监测等手段，并辅之以完善的检测和维护体系，才能从根本上控制和减缓化工管道的腐蚀。

参考文献：

- [1] 熊伟. 石油化工工艺管道的腐蚀及防护技术分析 [J]. 中国设备工程, 2024(16):107-109.
- [2] 樊兴. 石油化工工艺管道的腐蚀及防护技术应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(10):157-159.
- [3] 张勇. 基于石油化工管道安装新技术的要点分析 [J]. 化工设计通讯, 2020, 46(12):18-19.
- [4] 李伟. 基于化工生产的耐腐蚀管道综合性能探究 [J]. 中国氯碱, 2020, (12):17-19.