

化工管道防腐技术设计探讨

李鸿章（上海利柏特工程技术有限公司珠海分公司，广东 珠海 519000）

摘要：在工业生产中面临严峻腐蚀问题且严重威胁装置安全稳定运行与寿命的化工管道，为提升其防腐设计的科学性与有效性，本文系统探讨腐蚀发生的核心机理与主要类型，并对比分析覆盖层保护与电化学保护等主流技术的适用性与优劣，进一步明确基于腐蚀环境选择耐蚀材料、进行涂层厚度计算与结构细节设计的关键要素。结果表明，成功的防腐设计作为一个系统工程，须将腐蚀机理分析、技术方法比选与精细化设计相结合，且未来技术朝智能化监测与全生命周期管理方向发展。

关键词：化工管道；防腐技术；腐蚀机理；阴极保护；涂层设计

中图分类号：TQ055.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）033-0132-04

Discussion on the Design of Anti corrosion Technology for Chemical Pipeline

Li Hongzhang (Shanghai Liberty Engineering Technology Co., Ltd. Zhuhai Branch, Zhuhai Guangdong 519000, China)

Abstract: Chemical pipelines facing severe corrosion problems in industrial production and posing a serious threat to the safe and stable operation and service life of the equipment, in order to improve the scientific and effective anti-corrosion design, this article systematically explores the core mechanisms and main types of corrosion, and compares and analyzes the applicability and advantages and disadvantages of mainstream technologies such as coating protection and electrochemical protection. It further clarifies the key elements of selecting corrosion-resistant materials, calculating coating thickness, and designing structural details based on the corrosive environment. The results indicate that successful anti-corrosion design, as a systematic engineering, requires a combination of corrosion mechanism analysis, technical method comparison, and refined design, and future technology development towards intelligent monitoring and full lifecycle management.

Keywords: chemical pipeline; Anti-corrosion technology; Corrosion mechanism; cathodic protection Coating Design

化工管道作为化工生产系统核心组成部分广泛分布于各类装置且承担输送原料、中间体及成品关键任务，因其所处运行环境极为苛刻，长期接触高温、高压、高流速强腐蚀性化学介质，导致管道壁厚减薄、性能劣化甚至失效开裂，腐蚀问题造成巨大经济损失与资源浪费且可能引发有毒有害物质泄漏、环境污染乃至重大安全事故，严重威胁人身安全与生产稳定，故而开展科学有效防腐技术设计，从源头抑制和控制腐蚀发生与发展，对保障化工装置长周期安全运行、提升经济效益具有至重要意义，本文旨在系统探讨防腐技术设计核心环节与方法。

1 化工管道腐蚀的主要类型与机理分析

1.1 化学腐蚀与电化学腐蚀机理

化工管道腐蚀的本质是材料在环境介质作用下的退化失效过程，其机理主要划分为化学腐蚀与电化学腐蚀两大类。化学腐蚀是指金属表面与非电解质介质直接发生化学反应而导致的破坏，其过程不产生电流，腐蚀产物通常直接覆盖于发生反应的金属表面。在化工环境中，典型实例是管道在高温干燥环境下的氧化和硫化，例如在裂解炉或转化炉中，碳钢管道在高温烟气作用下表面生成疏松的氧化皮，或在含硫气氛中生成硫化铁鳞，这些腐蚀层一旦剥落便会暴露出新的

金属表面，使腐蚀持续进行。电化学腐蚀则是化工管道最普遍且危害更大的腐蚀形式，其发生必须满足三个基本条件，阳极、阴极、电解质溶液和电流通路^[1]。当管道金属与电解质溶液接触时，由于金属表面化学成分、组织结构、应力状态或介质浓度的不均匀性，会形成无数微小的阳极区和阴极区，构成一个完整的短路原电池。在阳极区发生金属的氧化反应，如 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ，金属以离子形式溶解进入溶液。在阴极区则发生还原反应，消耗掉阳极释放的电子，常见反应有 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ 或 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 。整个过程中有电流在金属和电解质内部流动，腐蚀发生在阳极区域。电化学腐蚀的速率远快于单纯的化学腐蚀，且极易导致局部性的严重破坏，其进程受到温度、介质导电性、pH 值及阴极反应物扩散速度的强烈影响。

1.2 常见腐蚀形态及影响因素

在电化学腐蚀机理的主导下，化工管道会呈现出多种不同的腐蚀形态，其破坏形式、速率和预测难度各不相同，直接决定了防腐技术方案的选择。均匀腐蚀表现为金属表面以相对均匀的速率减薄，虽然可能导致管道因强度不足而失效，但其破坏可预测性强，通过在设计时引入足够的腐蚀裕量通常即可控制风

险。局部腐蚀则危害性更大，其腐蚀高度集中在特定区域，包括点蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀开裂等^[2]。其中，电偶腐蚀为当两种具有不同电极电位的金属或合金在电解质溶液中接触时，电位较负的金属作为阳极而腐蚀加速，电位较正的金属则受到保护，此种腐蚀称为电偶腐蚀，常见于异种金属连接处。

晶间腐蚀为腐蚀优先沿着金属材料的晶界或晶界附近区域进行，而晶粒本身腐蚀轻微，这种局部腐蚀会导致晶间结合力丧失，材料强度急剧下降。点蚀发生在管道表面个别微小地点并向深处发展，形成小孔，其深孔内的自催化效应使得腐蚀加速进行，极易造成管道穿孔泄漏。缝隙腐蚀则发生于金属与金属或非金属之间形成的狭窄缝隙内部，由于缝隙内介质滞流、缺氧形成浓差电池而导致腐蚀加速，法兰连接面、垫片下方、螺栓缝隙以及沉积物底部都是高发区域。应力腐蚀开裂是材料在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下产生的一种脆性开裂，这种裂纹扩展迅速且难以检测，常导致管道在没有明显预兆的情况下发生灾难性的突发断裂^[3]。

此外，流动介质还会引发磨损腐蚀和空泡腐蚀，冲刷破坏保护膜并加速金属溶解。这些腐蚀形态的发生与发展受到一套复杂因素体系的综合影响，介质成分是根本，不同离子对腐蚀的促进作用截然不同。浓度决定了化学和电化学反应的驱动力。温度则显著加

速几乎所有腐蚀反应的动力学过程。流体流速通过影响传质过程和剪切力，既可能冲蚀保护膜也可能缓解局部腐蚀。pH 值直接关系着金属的钝化态稳定性及阴极反应类型。深刻理解这些因素如何相互作用并诱发特定腐蚀形态，是进行精准防腐设计的绝对前提，化工管道常见腐蚀类型及特点如表 1 所示。

2 主流管道防腐技术比选与应用

2.1 覆盖层保护技术

覆盖层保护技术的有效性根植于其能否在金属表面形成一道完整、耐久且附着力卓越的连续屏障，其技术内涵远不止于简单刷漆，而是一项涉及材料科学、表面工程与施工管理的复杂系统工程。以埋地管道最常用的三层聚乙烯防腐系统为例，其第一层是熔结环氧粉末涂层，厚度通常在 80–150 μm 之间，它通过静电喷涂和高温熔融固化与钢管表面形成极强的化学键合与机械锚固，提供卓越的附着力与阴极剥离抵抗力，并赋予系统基本的防腐性能。中间层是共聚物胶粘剂，在高温下将环氧粉末层与外层的聚乙烯层牢固地粘结成一个整体^[4]。

最外层是挤出缠绕的聚乙烯防护层，厚度可达 2–3mm，其作用是提供优异的机械保护，抵抗土壤应力、岩石冲击和磨损，并具备极低的吸水率以维持长期绝缘稳定性。对于内部防腐，液体环氧涂料或无溶剂环氧体系是常见选择，但其施工质量极度依赖于表面处理至 Sa 2.5 级的洁净度与 20–75 μm 的粗糙度轮

表 1 化工管道常见腐蚀类型及特点

腐蚀类型	主要特征	易发生条件	危害程度
均匀腐蚀	整个金属表面以近似速率减薄，腐蚀产物可能覆盖表面。	强酸、强碱等腐蚀性均匀的环境。	中。可预测，可通过设计腐蚀裕量应对。
点蚀	金属表面局部出现深而小的孔洞，孔径小且深度大。	含氯离子介质，不锈钢和铝合金在钝化态下易发生。	极高。隐蔽性强，极易导致设备穿孔，突发泄漏。
缝隙腐蚀	发生在金属缝隙内部或覆盖物下方，呈沟壑状或溃疡状。	法兰面、垫片下、螺栓连接处、沉积物底部。	高。常见于密封结构，破坏设备完整性。
电偶腐蚀	两种不同金属在电解质中接触，电位较负的金属加速腐蚀。	异种金属连接处，如碳钢管与铜阀连接。	中 - 高。腐蚀速率取决于金属电位差与面积比。
晶间腐蚀	腐蚀沿金属晶界进行，表面完好但内部晶间结合力丧失。	不锈钢敏化温度区间（450-850℃）受热后，接触腐蚀介质。	极高。材料强度骤降，导致突发脆性断裂。
应力腐蚀开裂 (SCC)	拉应力与特定腐蚀介质共同作用导致的脆性裂纹。	奥氏体不锈钢（Cl ⁻ 、OH ⁻ ）、碳钢（NO ₃ ⁻ 、OH ⁻ ）。	极高。裂纹扩展快，失效无先兆，灾难性后果。
磨损腐蚀	腐蚀与流体机械冲刷、磨损共同作用，表面呈沟槽、波纹状。	高流速、湍流、含有固体颗粒的流体环境，如弯头、泵叶轮。	高。协同效应使材料流失速率远高于单纯腐蚀或磨损。

廓,任何残留的盐分、油脂或可见的氧化皮都会成为膜下腐蚀的起点。

2.2 电化学保护技术

电化学保护是一项通过改变金属在电解质中的电化学电位来实现腐蚀控制的主动防护技术,其设计与应用充满了电化学工程学的精确计算与持续调控。牺牲阳极系统依赖于电位更负的金属合金,如特定化学成分的铝合金阳极,其理论驱动电位约为 -1.1V 相对 Cu/CuSO_4 参比电极,它在导电介质中与被保护的钢管连接后,通过自身持续的溶解消耗向管道提供保护电流,其输出电流服从欧姆定律,受阳极与介质间的接地电阻严格制约,而接地电阻又由阳极设计、填充料成分及土壤电阻率共同决定,因此在设计时必须精确计算所需的总电流、阳极数量与布置间距,以确保在阳极的设计寿命内,管道电位能始终被极化至 -0.85V 或更负的保护标准。

强制电流系统则是一个更为强大和复杂的工程系统,其核心是一台能够持续输出数十乃至数百安培直流电的恒电位仪或整流器,该设备通过一个埋设于远离管道的阳极地床将电流注入大地,电流经由土壤抵达管道表面,并通过汇流点返回电源完成回路。辅助阳极地床的材料选择至关重要,高硅铸铁阳极适用于一般土壤,而混合金属氧化物带状阳极则更适合用于高电阻率环境或需要分布式电流的场景。

3 防腐结构设计的关键要素与计算

3.1 耐腐蚀材料的选择原则

管道本体材料的选择构成防腐设计首要且关键的技术决策,需在多维约束条件下进行系统性优化,核心在于平衡安全性、可靠性与全生命周期经济性。碳钢凭借显著的经济效益与良好的机械加工性能适用于非苛刻介质环境,依赖腐蚀裕量设计可有效应对均匀腐蚀威胁,然而其耐蚀性存在本质局限,尤其当介质中含有微量氯离子或存在拉应力时极易诱发应力腐蚀开裂风险,此时必须采用更高等级材料。

奥氏体不锈钢如 304、316L 因表面钝化膜特性成为处理有机酸、无机酸及盐溶液的理想选择,但该材料对氯离子诱导的点蚀及缝隙腐蚀高度敏感,在海水或卤水环境中性能显著劣化,高温工况还可能引发敏化导致晶间腐蚀失效。

在强腐蚀、电导率极高或金属材料面临严峻挑战的工况中,非金属材料展现出不可替代的技术价值:热塑性塑料管道如聚丙烯、聚偏氟乙烯凭借其本征化学惰性可完全抵御电化学腐蚀,特别适用于输送高纯度酸、碱及有机溶剂;热固性玻璃钢管道通过树脂基体与纤维增强体的复合结构,在酸性气体或含氯废水

环境中兼具优异耐蚀性与结构强度。

针对高温高压与强腐蚀并存的关键工况,衬里管道技术提供创新解决方案,以碳钢或低合金钢构成承压壳体保障机械完整性,同时在管道内壁复合聚四氟乙烯、橡胶或陶瓷衬里层实现介质隔离,此类复合结构既能利用金属优异的力学性能,又充分发挥非金属材料极致耐蚀特性,显著拓宽材料应用边界并降低全生命周期成本^[5]。

3.2 防腐涂层厚度设计与计算

涂层厚度设计绝非凭经验取值,而是基于对涂层失效机理的科学理解,以实现预定设计寿命为目标进行的定量计算过程。涂层的主要失效模式包括活性基材的腐蚀蔓延、涂层的老化降解以及机械损伤,其寿命与干膜厚度之间存在强烈的正相关性^[6]。国际标准 ISO 12944 为此提供了权威的设计框架,该标准首先根据腐蚀性严重程度划分环境类别,例如 C3 (中等腐蚀性)、C4 (高腐蚀性) 和 C5-I (工业极高腐蚀性)/C5-M (海洋极高腐蚀性),并为每个类别和不同的设计寿命规定了推荐的总干膜厚度范围,例如在 C5-I 环境下要求达到 $280\mu\text{m}$ 甚至 $320\mu\text{m}$ 以上的厚度。但这仅是初步指导,更精确的设计需借助涂层寿命预测模型,该模型量化了涂层厚度、环境侵蚀强度与预期寿命之间的关系,其核心公式可表达为,

$$L = A \cdot \left(\frac{d}{\Delta E} \right)^B$$

其中, L 代表预测的涂层寿命,单位为年 (year)。 d 为涂层的总干膜厚度,单位为微米 (μm)。 ΔE 是一个综合环境因子,是一个无量纲参数,用于量化特定环境的腐蚀性,它综合了温度、湿度、紫外线辐射、污染物浓度等所有环境应力。 A 和 B 则是与特定涂层体系相关的经验常数,通过大量实验数据和服役历史回归得出, A 代表基础耐久性系数, B 代表厚度对寿命影响的敏感性指数。

该模型清晰地表明,要达到翻倍的设计寿命,所需的涂层厚度并非简单翻倍,而是需要更大幅度的增加。在实际工程设计中,需根据项目所在地的环境数据确定 ΔE ,并选用经实验验证的 A 、 B 常数,计算出所需厚度 d ,并在此基础上额外考虑施工过程中的膜厚波动、不可避免的缺陷以及预留的安全裕量,最终确定一个略高于计算值的设计厚度,从而确保涂层系统在整个设计生命周期内都能提供有效且可靠的保护。

4 结语

本文结合科学的机理分析、精准的技术选型与定量的设计计算以实现安全性与经济性最优平衡的化工

管道防腐技术设计,是一项贯穿管道全生命周期的系统性工程。

本文通过系统探讨腐蚀发生的电化学本质与多样形态,为识别风险根源提供理论依据。通过对比分析覆盖层与电化学保护这两大技术体系的应用深度与联合互补必要性,为方案制定指明方向。最终落脚于材料选择与涂层厚度计算的工程实践,将防腐设计从定性经验提升至定量科学。

研究成果表明,只有将腐蚀控制前置于设计阶段,进行多维度、全要素的综合考量,才能构建起高效可靠、直接服务于延长设备寿命、保障生产安全、降低维护成本这一核心工程目标,并为未来发展智能化监测与完整性管理提供坚实技术基础的防腐系统。

参考文献:

[1] 贺军龙,朱瑞.化工管道泄漏监测与科学防护[J].纯

碱工业,2025,(03):38-40.

[2] 史克忠.化工管道防腐蚀技术在安装中的应用探讨[J].石化技术,2025,32(06):342-344.

[3] 王志海.工业管道防腐技术在石油化工中的应用分析[J].石化技术,2025,32(04):7-9.

[4] 王清春,王洁光.石油化工管道防腐关键技术研究[J].化工管理,2025,(02):129-132.

[5] 李洪明.化工管道外防腐层机械化维修技术研究[J].设备管理与维修,2024,(14):143-145.

[6] 易顶珍.石油化工管道防腐蚀技术的应用和改进研究[J].中国设备工程,2023,(15):174-177.

作者简介:

李鸿章(1995-),男,汉族,广东五华县人,本科,助理工程师,从事化工工艺管道设计。



广告