

化工介质管道输送过程中的腐蚀机理与防护技术

王汉革 (郓城县应急管理局, 山东 郓城 274700)

摘要: 在化工生产中, 化工介质管道属于输送各种具有腐蚀性介质的关键设施, 其在运行时的安全性以及稳定性会直接对生产效率和作业安全产生影响。本文针对化工介质管道在输送过程中的腐蚀原理和防护技术开展了研究, 借助剖析各种化工介质的特性, 同时结合管道的材质以及输送环境因素, 对管道腐蚀的内在作用机制进行了系统的梳理, 其中包含化学腐蚀、微生物腐蚀以及电化学腐蚀等类别。基于此情况, 从材质的优化处理、涂层的防护措施、缓蚀剂的具体应用、电化学的保护手段等多个方面, 给出具有针对性的防护技术方案, 清晰界定各类技术所适用的场景以及实施时的关键要点。该项研究的目的在于为化工企业对管道腐蚀防护体系进行优化提供理论支撑以及实践参考, 帮助提高管道的使用时长, 减少由于腐蚀而引发的安全风险以及经济损失。

关键词: 化工介质管道; 腐蚀机理; 防护技术; 管道安全

中图分类号: TQ050.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0139-03

Corrosion Mechanism and Protection Technology in the Transportation Process of Chemical Medium Pipelines

Wang Hangge (Emergency Management Bureau of Yuncheng County, Yuncheng Shandong 274700, China)

Abstract: In chemical production, chemical medium pipelines are key facilities for transporting various corrosive media, and their operational safety and stability directly affect production efficiency and operational safety. This paper conducts a study on the corrosion mechanisms and protection technologies of chemical medium pipelines during transportation. By analyzing the characteristics of different chemical media, combined with factors such as pipeline materials and transportation environments, the internal action mechanisms of pipeline corrosion are systematically sorted out, including chemical corrosion, microbial corrosion, and electrochemical corrosion. Based on this, targeted protection technology solutions are proposed from multiple aspects such as material optimization treatment, coating protection measures, specific application of corrosion inhibitors, and electrochemical protection methods, and the applicable scenarios and key implementation points of various technologies are clearly defined. The purpose of this research is to provide theoretical support and practical reference for chemical enterprises to optimize their pipeline corrosion protection systems, help extend the service life of pipelines, and reduce safety risks and economic losses caused by corrosion.

Keywords: Chemical medium pipeline; Corrosion mechanism; Protection technology; Pipeline safety

在化工领域中, 管道充当着输送如酸碱、盐溶液、有机化合物等化工介质的重要载体, 长时间处于复杂且严苛的服役状况中。各类化工介质所具有的腐蚀性、输送进程中温度和压力的变动, 还有管道材质本身的特性, 这些因素相互作用, 使管道腐蚀的情况频繁出现。管道发生腐蚀不但会让设备的使用时长缩短、使维护费用增加, 更有极大可能引发介质的泄漏现象, 进而造成环境污染、生产活动中断甚至会导致安全事故, 这对企业的安全生产以及生态环境构成了严重的危害。故而, 对化工介质在管道输送进程中的腐蚀原理展开深度剖析, 研究开发运用高效且具备可行性的防护手段, 成为了确保化工生产能够持续且稳定运作的关键议题。本文借助对腐蚀原理开展系统的剖析以及对防护手段进行全面的研讨, 为化工企业应对管道腐蚀难题给予科学的指引。

1 化工介质管道输送过程中的腐蚀机理

1.1 化学腐蚀的作用机制

化学腐蚀作为化工介质管道在输送进程中较为常

见的腐蚀类别, 主要是由管道材质和化工介质之间所产生的直接化学反应引发的, 并且在反应流程中不会产生电流。一旦管道和具备较强氧化性或者较强腐蚀性的化工介质相接触, 管道表面的金属原子就会与介质中的活泼成分产生化学反应, 进而生成对应的金属化合物。倘若这些产物无法构建紧密且稳定的保护膜, 便会持续地剥落, 使管道的金属基体持续暴露在具有腐蚀性的介质中, 从而引发如管道壁厚逐渐变薄、表面出现凹坑状侵蚀等状况。

1.2 电化学腐蚀的作用机制

电化学腐蚀相对而言更常见, 并且造成的危害也更为显著, 其本质在于管道金属和含有一定水分的化工介质共同构成了原电池, 在此过程中会发生氧化还原反应, 同时产生电流。由于管道金属表面存在材质不均匀、应力有差异或者氧化膜不够完整等情况, 从而形成了数量众多的微小阳极区与阴极区, 在阳极区, 金属原子会失去电子并发生氧化反应, 以离子的形态溶解到介质中, 这会使基体遭受损害; 而在阴极区,

会接收电子, 介质中的氢离子、氧气等具有氧化性的物质会得到电子并发生还原反应。此类电化学反应的循环会促使腐蚀进程加快, 进而形成局部的腐蚀电池, 从而引发缝隙腐蚀、点蚀等情况。

1.3 微生物腐蚀的作用机制

微生物腐蚀是一种很容易遭到忽略, 然而, 其属于危害性十分显著的腐蚀类别, 其主要是在细菌、真菌等微生物, 在管道表面构建起生物膜之后所引发的, 其腐蚀的作用机制, 呈现出复杂性与隐蔽性的特点, 微生物在进行代谢活动过程中, 会生成酸性物质(例如, 硫酸盐还原菌会产生硫化氢、硝化细菌会产生硝酸), 这会使得局部介质的 pH 值有所降低, 进而加快金属溶解的速度; 与此同时, 生物膜的形成, 会致使管道表面的氧浓度出现差异, 从而形成氧浓差电池, 甚至是诱发电化学腐蚀现象; 有一部分微生物, 还会直接参与到电极反应之中, 让腐蚀电位发生改变, 以此推动腐蚀的发展进程。在输送像含油污水、天然气等介质的管道中, 硫酸盐还原菌属于极为常见, 而且具有腐蚀作用的微生物, 其所产生的硫化氢, 不但能够造成管道金属, 出现硫化物腐蚀状况, 而且还会诱发应力腐蚀开裂现象, 特别是在管道焊缝、弯头等应力聚集的部位, 特别容易引发突然性的断裂事故。除此之外, 生物膜还会对防护涂层和管道基体的结合起到一定阻碍作用, 让涂层剥离的速度加快, 给腐蚀介质创造通行的路径, 从而进一步加重腐蚀所带来的危害。

2 化工介质管道腐蚀的防护技术

2.1 管道材质优化技术

对管道材质加以优化, 是自源头处降低化工介质管道遭受腐蚀风险的一项关键技术举措, 其核心要点为依照所输送化工介质的特性、温度以及压力等工况状况, 挑选具备较强耐腐蚀能力的管道材质。就输送具有强腐蚀性介质的管道而言, 可以选用特种合金材质, 此类合金拥有十分出色的耐酸碱以及抗氧化性能, 能够在情况恶劣的介质环境中, 始终维持稳定的化学属性, 切实有效地抵抗介质的侵蚀作用。针对输送具有一般性腐蚀特性的介质, 并且在成本预算处于受限状况的场景中, 可以选用衬里管道, 以此隔绝管道金属基体和介质之间发生反应, 与此同时, 依靠金属管道确保整体的结构强度。其中较为常见的材料中, 包括聚四氟乙烯 (PTFE)、聚丙烯 (PP) 等, 适用于常温常压下输送酸碱盐溶液的工况, 既实现了降低成本的目的, 而且达成了切实有效隔离腐蚀介质。

2.2 涂层防护技术

涂层防护技术借助在管道表面涂抹具备耐腐蚀、绝缘或者阻隔性能的涂层材料, 在管道金属基体和腐

蚀介质二者之间构建物理屏障, 以此阻止腐蚀介质和管道表面相互接触, 进而达成防护的目标。按照应用场景的差异, 涂层能够划分成内涂层以及外涂层, 外涂层主要用于保护管道外壁, 而内涂层主要是用来保护管道内壁。内涂层需要拥有良好的耐介质腐蚀性、耐磨性还有与管道内壁的附着力, 如环氧树脂、聚氨酯、聚烯烃等, 都是较常见的内涂层材料, 在涂覆后, 能够在管道内壁形成光滑且致密的保护膜, 这层保护膜不但能够抵御介质所带来的腐蚀, 而且还可以降低介质流动时的阻力, 让输送效率得到提升。外涂层的作用是对管道外壁予以保护, 其必须能够适应户外或者地下的复杂环境状况, 该涂层应具备如耐候性、耐土壤腐蚀性能以及抗紫外线老化能力等特性, 常见使用的材料包含 3PE 防腐涂层、熔结环氧粉末涂层等, 这些涂层可以切实有效地将土壤中的水分、盐分以及空气中的氧气隔离, 进而避免管道外壁出现腐蚀现象。在实际应用中, 涂层施工质量至关重要, 需要严格控制表面处理(如喷砂除锈达到 Sa2.5 级以上)、涂覆厚度和固化条件, 否则会因涂层缺陷导致腐蚀介质渗透, 引发“涂层下腐蚀”。

2.3 电化学保护技术

电化学保护技术借助改变管道金属的电极电位, 让管道处于一种在热力学层面较为稳定的状态, 以此抑制电化学腐蚀状况的出现, 该技术主要涵盖阴极保护以及阳极保护方式。阴极保护技术可划分成牺牲阳极法和外加电流法, 其中, 牺牲阳极法是将电极电位比管道金属更低的金属或者合金和管道相连接, 进而形成原电池, 在原电池中, 牺牲阳极作为阳极会发生氧化反应, 而管道则作为阴极得以受到保护; 外加电流法是依靠外部直流电源, 将管道设定成阴极, 将辅助阳极设定成阳极, 在电解质所处的环境中构建电流回路, 使管道表面的腐蚀电流被抑制住, 从而达成阻止阳极溶解的目的。阳极保护技术可应用于具备钝化特质的金属管道, 通过额外施加直流电流, 让管道的金属表面生成稳定的钝化膜, 同时维持一定数值的钝化电流, 以此保证钝化膜不遭受破坏, 从而达成防腐保护的目的。

2.4 缓蚀剂应用技术

缓蚀剂应用技术属于一种防护方法, 此方法是在化工介质中, 添加数量不多的特定化学物质, 以此改变介质和管道金属之间界面反应的特性, 进而抑制或者减缓腐蚀情况的发生, 该技术具备成本低廉、施工方式灵活、适用范围广泛等诸多优点, 特别适合用于一些已经建成的管道之中。在腐蚀防护方面的升级, 缓蚀剂发挥作用的机制主要有以下几点: 吸附在金属的表面, 进而形成一层保护膜, 以此阻隔腐蚀介质和

金属的接触；对介质的酸碱度加以调节，从而降低其腐蚀性；参与到电极反应当中，抑制阳极溶解的过程，或者阴极还原的过程。按照作用的原理缓蚀剂能够划分成阳极型（如铬酸盐、亚硝酸盐等）、阴极型（例如，碳酸氢盐、胺类等），以及混合型（如好比咪唑啉类、有机磷化合物等），在实际的运用中，依据介质的种类、温度压力等工作状况，挑选相匹配的缓蚀剂。例如，在酸性介质的输送管道中，常常会使用胺类、膦类缓蚀剂；在含有盐水的介质中，咪唑啉类缓蚀剂所起到的效果十分明显。与此同时，严格把控缓蚀剂的添加浓度，若缓蚀剂的浓度处于较低水平，便难以达成防护的成效；而若浓度过高极有可能致使成本上升，亦或是引发一些不良的副效应（例如对介质的纯度造成影响、引发沉淀，进而导致堵塞状况的出现），除此之外，缓蚀剂的长期有效性，需要借助定期保障介质里缓蚀剂的浓度，并开展监测工作，在必要的情形下，需要进行补充添加操作，以此达到保证防护效果的同时，还能维持稳定且持续的状态。

3 防护技术的应用适配与效果保障

3.1 防护技术的应用适配原则

在选择化工介质管道腐蚀防护技术时，需依照适配性准则，全面考量诸多因素，如管道所输送介质的腐蚀程度、工况状况、管道的敷设环境以及成本预算等，以此达成防护技术和实际需求之间的精确契合。针对输送具备高温高压特性、强腐蚀性介质的关键管道，应优先挑选具备较强耐腐蚀性的特种合金材质，并结合电化学保护技术，从而保障防护效果的可靠程度；而对于输送一般性腐蚀介质，并且敷设环境相对简捷的管道，可以采用涂层防护技术，同时结合缓蚀剂应用技术，在保证防护效果的情况下，对成本加以控制。例如，某大型化工企业输送 98% 浓硫酸的管道，采用 316L 不锈钢材质（耐钝化腐蚀）+ 阳极保护技术的组合方案，运行 5 年未出现明显腐蚀的方式；而输送普通工业废水的管道，则采用碳钢 + 环氧树脂内涂层 + 复合型缓蚀剂的方案，以此达到在满足防护要求的同时，大幅降低了建设成本。

3.2 防护效果的保障措施

为了保证化工介质管道腐蚀防护技术可以在长时期内稳定地发挥功效，有必要构建一套完善的防护效果保障办法。其一，在实施防护技术前，要对管道开展全方位的预先处理，如清除管道表面的铁锈、油污、污垢等，以此保证涂层涂覆、缓蚀剂添加或者电化学保护系统安装的基础条件能够达到标准。其二，设立定期检测以及维护的机制，借助管道壁厚检测、腐蚀速率监测、涂层完整性检查、缓蚀剂浓度检测等方式，

实时了解管道的腐蚀状况以及防护技术的运行成效，及时察觉并解决防护系统所存在的问题。最终，强化操作人员的专业培训，提高其对于防护技术的原理、操作的规范以及故障处理办法的掌握水平，保证防护技术能够持续且有效地运转。同时，建立健全防护技术档案，记录管道材质、防护措施、检测数据等信息，为后续维护和优化提供依据。

4 结论

本文研究化工介质在管道输送过程中，所涉及的腐蚀原理，以及相应防护手段，全方位分析了化学腐蚀、微生物腐蚀、电化学腐蚀等几种腐蚀类型的作用机理，在此过程中，还精准地明确了不同腐蚀类型出现的条件，以及各类腐蚀类型所具有的危害特征，从涂层防护、材质优化、电化学保护及缓蚀剂运用这四个方向入手分析，详细地说明了各类防护技术发挥作用的原理、适合应用的场景，以及实施过程中的关键点，同时，还给出了防护技术应用时的匹配规则，以及保障应用的效果与办法。通过实践分析、研究之后可以发现，化工介质管道出现的腐蚀情况，主要是因为多种因素共同发挥作用所导致的后果，仅仅依靠一种单一的防护技术，很难实现全面且有效的防腐保护目标。因此，有必要根据管道实际的运行状况，选择与之相适配的防护技术，并依据实际需求科学组合与应用防护技术。与此同时，还需要配备一套完善的检测与维护机制，在后续的实际操作过程中，化工企业可以依据本文的研究成果，结合现场实际需求，科学优化管道腐蚀防护体系，以此达到提升管道运行的安全性与稳定性的同时，还可以减少因腐蚀而引发的经济损失与安全隐患，进而为化工生产的持续且高效进行提供保障。

参考文献：

- [1] 李佳鹏, 陈刚, 王刚, 姚红亮. 天然气管道输送过程中管道防腐的研究及防腐方法 [J]. 当代化工研究, 2021(04):97-98.
- [2] 李成阳, 杨晶, 林冬华. 天然气管道输送过程中管道防腐的创新研究 [J]. 化工管理, 2021(09):131-132.
- [3] 何鑫. 天然气管道输送过程中管道防腐的研究及防腐方法 [J]. 全面腐蚀控制, 2020,34(04):101-102.
- [4] 陈运海. 天然气管道输送过程中管道防腐的研究及防腐方法 [J]. 中国新技术新产品, 2019(10):84-85.
- [5] 胡瑞南. 天然气管道输送过程中管道防腐的研究及防腐方法浅析 [J]. 石化技术, 2018,25(12):180.

作者简介：

王汉革 (1968-), 男, 汉族, 山东郓城人, 大学本科, 国家注册安全工程师, 研究方向: 化学工程。