

化工管道系统的防腐蚀设计与应用

王海城

河北英科石化工程有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]化工管道作为化工生产流程的核心载体, 输送介质多具有强腐蚀性、高温高压等特性, 腐蚀问题直接影响系统运行安全性、稳定性与经济性。文章基于化工管道腐蚀的机理与影响因素, 从设计源头出发, 系统阐述防腐蚀设计的核心原则, 详细介绍材料选择、结构优化、涂层防护、电化学保护等关键设计技术, 结合工程应用中的质量控制要求, 构建全方位的防腐蚀设计体系, 为化工管道系统的长周期安全运行提供技术支撑。

[关键词]化工管道; 防腐蚀设计; 材料选择; 涂层防护; 电化学保护

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18619 中图分类号: TQ630.79 文献标识码: A

Anti-corrosion Design and Application of Chemical Pipeline System

WANG Haicheng

Hebei Enco Petrochemical Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As the core carrier of chemical production processes, chemical pipelines transport media with strong corrosiveness, high temperature and high pressure characteristics. Corrosion problems directly affect the safety, stability and economy of system operation. Based on the mechanism and influencing factors of corrosion in chemical pipelines, this article systematically elaborates on the core principles of anti-corrosion design from the design source, and details key design technologies such as material selection, structural optimization, coating protection, and electrochemical protection. Combined with quality control requirements in engineering applications, a comprehensive anti-corrosion design system is constructed to provide technical support for the long-term safe operation of chemical pipeline systems.

Keywords: chemical pipeline; anti-corrosion design; material selection; coating protection; electrochemical protection

引言

化工业在国家经济中占有举足轻重的地位, 而化工管道是石油、天然气、化工原料等的运输保障, 其运行状态直接关系到整个生产装置的连续性和安全性^[1]。但该类管线长期处于高温、高压、高湿、化学介质等苛刻条件下, 极易发生损伤, 严重影响其服役寿命与安全。且化工行业输送介质多样, 含盐溶液、强酸等, 且多在高温高压高流速下输送, 易致化工管道腐蚀失效, 使管壁减薄、强度下降, 甚至会引发安全事故的发生概率, 对企业的安全生产及经济效益造成了极大的挑战^[2]。因此, 本文研究首先阐述化工管道腐蚀发生原因, 并逐步深入到技术方案及质量控制, 形成完整的防腐蚀设计应用体系。

1 化工管道腐蚀发生原因

管道腐蚀的原因很多, 除了石油天然气的腐蚀外, 还包括外部环境中的 H₂S、CO₂ 以及土壤中的 H₂S 和 CO₂, 以及焊缝开裂、残余应力等^[3]。首先, 油管的作用就是输送石油和天然气, 这种化学品含有硫化氢和二氧化碳, 在输送过程中, 还会对管道的内壁造成一定程度的侵蚀。长时间运行后, 管壁会变得越来越薄, 进而导致泄漏, 最终导致爆炸。由于原油为液体, 具有较高的粘度, 可以采用在管内壁上涂敷电沉积层来提高输送效率, 但是随着时间

的流逝, 涂层表面会出现剥落现象, 在油气流经过程中会形成静电, 加之外界环境因素的影响, 会导致管线的腐蚀^[4]。其次, 在建设过程中, 管道多采用焊接方式, 法兰连接部位因人为因素和外部影响而出现缝隙, 造成焊缝中出现大量气泡。这样, 在焊接过程中, 土壤中的水分和化学物质会和裂纹发生化学反应, 从而导致裂纹的出现。此外, 油气管道内的残余应力、外加应力等因素, 极易发生应力腐蚀, 造成管道的变形与失效。管道内金属物质的体积变化或管道内金属材料冷却不均匀, 管道在施工时受力不均, 也会产生残余应力, 从而使材料损坏而无法使用。

2 化工管道系统防腐蚀关键设计技术

2.1 材料选择设计

(1) 金属材料选择

金属材料因性能良好, 在化工管道应用广泛, 常用有碳钢、低合金钢、不锈钢、铜合金、钛合金等。碳钢和低合金钢成本低、强度高、加工性好, 但耐蚀性差, 适用于低风险管道。不锈钢耐蚀性好, 分奥氏体不锈钢(如 304、316L, 适于中高风险管道)、双相不锈钢(如 2205、2507, 适于高风险管道)、铁素体不锈钢(如 430, 适于中低风险管道)。铜合金和钛合金耐蚀优异但成本高, 适于高风险特殊介质管道, 如黄铜输海水等, 钛合金输强腐蚀性介

质,高温高压工况优势明显。铜合金和钛合金具有优异的耐腐蚀性,但成本较高,适用于特殊腐蚀性介质的高风险管道。例如,黄铜管道适用于输送海水、弱酸等介质;钛合金管道则适用于输送强酸、强碱、含氯介质等强腐蚀性介质,尤其在高温高压工况下具有不可替代的优势。

表1 为常用金属管道材料的耐腐蚀性及适用范围对比

材料类型	代表牌号	耐腐蚀性	适用范围
碳钢	Q235	差,易发生电化学腐蚀和化学腐蚀	常温常压、惰性介质或弱腐蚀性介质(如水、氮气)
低合金钢	16Mn	较差,耐腐蚀性略优于碳钢	中低压、常温或中温的水蒸气、天然气等介质
奥氏体不锈钢	316L	良好,耐弱酸、弱碱、含氯介质腐蚀	中高温、中高压的弱酸、弱碱、含氯介质
双相不锈钢	2205	优异,耐点蚀、应力腐蚀开裂能力强	高温高压、高浓度氯离子介质
钛合金	TA2	极佳,耐强酸、强碱、含氯介质等强腐蚀	高温高压、强腐蚀性介质(如盐酸、硫酸、烧碱)

(2) 非金属材料选择

非金属材料具有诸多优点,如耐腐蚀、重量轻、成本低,适于输送强腐蚀性介质的管道,但是其耐高温性能与力学性能不高,使用过程中主要应用于中低压、常温管道,常用有塑料、玻璃钢、陶瓷等。塑料管道中,聚氯乙烯(PVC)耐酸碱、成本低,于输送常温强酸、有机溶剂等介质;聚丙烯(PP)耐化学腐蚀和高温(最高100°C),适输中温弱碱、有机溶剂等介质;聚四氟乙烯(PTFE)耐腐蚀极佳、耐高温(最高260°C),适输高温、强腐蚀介质,但成本高、加工难。玻璃钢管道由玻璃纤维和树脂复合,耐腐蚀等性能良好,重量轻、安装方便,广泛应用于多行业,按树脂分有环氧(适常温)、酚醛(适高温)等。陶瓷管道耐腐蚀和耐磨性极高,适输强腐蚀高磨损介质,但脆性大、抗冲击差,易破损,适用于固定工况下的高风险管道。

2.2 结构优化设计

(1) 管道布置优化

管道布置要避免形成滞留区、涡流区和死腿,确保介质顺畅流动。尽量少用弯头、三通等局部阻力部件,使用直管进行布置;必须用弯头时,优先选大曲率半径弯头(如长半径弯头);合理设管道坡度(一般 ≥ 0.002),确保介质可以排尽,防在管道底部形成积液滞留区。同时,避免管道盲端等部位形成死腿,无法避免时设冲洗或排污口,定期冲洗,防止腐蚀性介质积聚,降低局部腐蚀风险。

(2) 连接方式优化

管道连接方式影响连接部位腐蚀风险,优先选焊接,其密封性好,可减少介质泄漏与腐蚀;避免用螺纹和法兰连接,密封面易泄漏且存在缝隙,易引发缝隙腐蚀。必须用法兰连接时,要选耐腐蚀的法兰材质和密封垫片,确保密封性。不同金属管道连接应用绝缘或过渡接头,防止形

成电偶腐蚀。

(3) 几何形状优化

管道几何形状宜平滑,避免尖锐棱角与截面突变,以减少介质流速突变和压力集中。如管道的变径处用渐缩或渐扩管;内壁尽量光滑,降低表面粗糙度,减少腐蚀性介质吸附滞留。对于输送含固体颗粒介质的管道,应适当增大内径、降低流速,减少冲刷腐蚀,还可在内壁设耐磨衬里(如橡胶、陶瓷衬里)以提升抗冲刷腐蚀能力。

2.3 涂层防护设计

(1) 涂层材料选择

涂层防护是在管道表面涂耐腐蚀涂层,隔开金属基体与腐蚀介质来防腐,具有施工方便、成本低、适用广等优点,是化工管道常用防腐措施。涂层材料选型需依介质特性、工况及腐蚀风险等级,确保其耐腐蚀、附着力、耐磨、耐高温性能良好。

目前,国内已有的钢管内壁防腐涂料分为熔烧型和常温两种,其中,在熔烧型防腐涂料中,双酚A型环氧树脂具有更高的高温抗酸性能^[5]。且环氧树脂具有良好的黏结性,具有较高的强度、温度。对于常温固化的耐酸防腐涂料来说,酚醛型树脂通过氧化形成多官能环氧树脂,而酚醛基改性的氨基作为固化剂,其结构规整致密,腐蚀性物质难以渗入,从而使其耐腐蚀性得到最大程度的发挥。

(2) 涂层厚度设计

涂层厚度是影响涂层防护效果的关键,过薄易现针孔等缺陷致腐蚀,过厚增加成本且易产生裂纹等问题。其设计需依介质腐蚀性、工况及涂层材料性能确定,室内管道涂层厚150~200μm,户外200~300μm,埋地300~500μm。高腐蚀风险管道可用“底漆+中间漆+面漆”多涂层体系,底漆增附着力,厚30~50μm;中间漆增厚度、提耐蚀性,厚100~200μm;面漆装饰抗老化,厚20~50μm,总厚度高风险管道不小于300μm。

(3) 施工工艺设计

涂层施工工艺影响质量和防护效果,施工须严格按照规范分表面处理、涂覆施工、固化养护三环节进行。表面处理是基础,旨在去除管道表面油污等杂质,提升涂层与基体附着力,常用方法有喷砂、抛丸、酸洗等,喷砂效果最佳,可形成40~80μm均匀粗糙度,显著提升附着力,处理后表面应达Sa2.5级或更高等级。涂覆施工要依涂层材料特性选方法,常用刷涂、滚涂、喷涂。刷涂和滚涂适合小型管道或局部修补,方便但涂层厚度不均;喷涂适合大型管道或批量施工,厚度均匀、效率高。涂覆时要控速度和厚度,防针孔等缺陷。固化养护是关键,不同材料固化条件不同,按要求控温、控时,固化中防管道受损,完全固化后再投入使用。

2.4 电化学保护设计

电化学保护是基于电化学反应原理对化工管道进行保护的重要方法,其核心思路是将管道设定为负极,以此

来阻止管道发生腐蚀的电化学反应^[6]。在实际应用中，阴极保护主要有强制电流和牺牲阳极两种方式。

强制电流法的工作原理基于外加电场的作用，通过外部电源向管道施加稳定的直流电流，使管道始终处于阴极状态，确保整个电极系统处于常压之下，形成一个完整的电流回路。在这个回路中，电子持续流向管道，避免了管道金属因失去电子而发生电化学腐蚀。这种方法就像是为管道提供了源源不断的电子补给，使其在面对腐蚀环境时始终保持稳定的化学状态。强制电流法适用于长距离、大口径的管道，以及土壤电阻率较高的区域，能够提供强大且稳定的保护电流，有效延长管道的使用寿命。牺牲阳极技术则是利用一种具有高还原性的物质，通常是金属，与被保护的管道连接，形成一个完整的电化学结构。在这个结构中，高还原性金属作为阳极，优先发生氧化反应，不断失去电子，而管道作为阴极得到保护。例如，常用的镁合金、锌合金等作为牺牲阳极材料，具有较高的电位差，能够提供足够的驱动力，使电子从阳极流向阴极，从而实现对管道的有效保护。牺牲阳极技术具有安装简单、无需外部电源、对周边环境干扰小等优点，适用于小型管道、复杂地形或对电流干扰敏感的区域。

3 化工管道防腐蚀设计的质量控制

3.1 材料质量控制

防腐蚀设计的效果不仅取决于设计方案的合理性，还取决于施工过程和运行维护过程的质量控制。因此，建立完善的质量控制体系，对防腐蚀设计的全生命周期进行管控，是确保防腐蚀效果的关键。施工是防腐蚀设计落地的关键，施工质量直接影响防腐蚀效果。防腐蚀相关材料（如管道、涂层、牺牲阳极、辅助阳极等）进场前须严格质检，确保性能符合设计要求，检验涵盖外观、理化性能、耐腐蚀性试验等。如管道材料查化学成分与力学性能，涂层材料查固含量、粘度等，牺牲阳极查化学成分与电化学性能。不合格材料严禁进场使用。

3.2 施工质量检测

施工需全程质量检测，及时整改缺陷。常用检测方法有：涂层厚度用测厚仪测，确保达标；附着力用划格或拉开试验，保证与基体结合良好；针孔用电火花检测仪查有无破损；焊缝用射线或超声波无损检测，确保质量合规；电化学保护系统用参比电极监测电极电位，保证保护电位合理。

3.3 腐蚀状态监测

需建立完善腐蚀状态监测体系，定期监测管道腐蚀情况。常用方法有：外观检查，定期查看管道表面涂层有无脱落等缺陷及管道有无泄漏、结垢；壁厚测量，用超声波测厚仪定期测壁厚、算腐蚀速率、判剩余寿命；腐蚀速率监测，用腐蚀挂片、电阻探针等设备实时监测；电化学电位监测，通过参比电极实时监测电极电位，确保电化学保

护系统正常运行。

3.4 定期维护保养

依据腐蚀监测结果制定合理定期维保计划，及时保养管道。涂层破损脱落应及时修补，保证完整；电化学保护系统要定期检查牺牲阳极消耗、辅助阳极性能及外部电源运行状态，及时换件、调保护电流或电位；结垢堵塞管道需定期清洗；运行工况参数波动频繁的管道，应优化控制，减少影响。

3.5 应急处理

建立完善应急处理机制，针对腐蚀引发的管道泄漏、破裂等突发事故制定应急预案，涵盖应急组织、响应流程、处置措施及物资储备等，确保能及时采取有效措施减少损失。同时，定期组织应急演练以提升应急处置能力。

4 结论与展望

金属腐蚀具有普遍、自发、隐蔽等特点，其种类繁多，且随着腐蚀介质的不断更新，金属材料的种类越来越多，其种类也越来越多。然而，任何一种锈蚀分级方法，其目的在于从多个层面对锈蚀现象的表现形态、特征、规律及机理等进行刻画，从而对锈蚀现象与规律进行阐释、分析与研究，从而找到预防锈蚀的措施与方法。化工管道系统腐蚀影响生产安全、稳定与经济运行，防腐蚀设计是抑制腐蚀失效的根本。本文基于腐蚀影响因素分析，阐述材料选择、结构优化等关键设计技术，强调施工与运维质量控制，形成全方位防腐蚀体系，提升管道防腐蚀能力、减少局部腐蚀风险。随着化工行业向“三高一大”发展，腐蚀环境更苛刻，对防腐蚀技术要求更高。未来，可结合物联网等先进技术开发智能化电化学保护系统，实现保护参数自动调节，并建立管道腐蚀在线监测预警系统，实现智能化防腐蚀管控。

【参考文献】

- [1]易顶珍.化工管道防腐蚀技术的应用和改进研究[J].中国设备工程,2023,11(15):174-177.
 - [2]杨冰.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(16):159-160.
 - [3]刘彦丽,李莉,孙爱军,等.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].化工管理,2019,11(7):158.
 - [4]李崇娟.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].设备管理与维修,2023,11(18):187-188.
 - [5]吕良辰.油气储运中的管道腐蚀成因与防治探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(18):37-39.
 - [6]马波.化工设备防腐蚀技术研究[J].设备管理与维修,2023,11(20):155-157.
- 作者简介：王海城（1994.11—），毕业院校：河北工业大学城市学院，所学专业：化学工程与工艺，当前就职单位：河北英科石化工程有限公司，职务：工艺设计，职称级别：中级工程师。