

石油化工设备与管道常见腐蚀原因及防腐对策

梁宝龙 (山东大明精细化工有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 在石油化工生产的过程中, 设备与管道会长时间处于高温、高压以及强腐蚀性介质等复杂工况条件之下, 这些情况极易引发各种腐蚀方面的问题。腐蚀现象会对装置运行的安全性和稳定性产生影响, 还极有可能导致重大安全事故以及经济损失的出现。本文针对石油化工设备与管道中常见的腐蚀类型展开系统分析, 这些腐蚀类型涵盖均匀腐蚀、局部腐蚀及应力腐蚀开裂等。并从介质因素、环境因素以及设备材质与设计的角度, 对腐蚀问题产生的成因进行深入探讨。阐述了材料选择以及制造加工工艺对设备抗腐蚀性能所造成的影响, 进而提出涂层防护、缓蚀剂应用、材质升级优化及合理设计与维护等综合防腐策略, 提出切实可行的防腐对策, 期望为工程实践提供理论支撑及技术参考。

关键词: 石油化工设备与管道; 腐蚀类型; 介质因素; 材料选择; 防腐策略

中图分类号: TE98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 004-0151-03

Common Causes of Corrosion in Petrochemical Equipment and Pipelines and Anti-corrosion Countermeasures

Liang Baolong (Shandong Daming Fine Chemical Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: During the process of petrochemical production, equipment and pipelines will remain in complex working conditions such as high temperature, high pressure, and strong corrosive media for a long time. These conditions are highly likely to cause various corrosion problems. Corrosion phenomena can affect the safety and stability of the device operation and may even lead to major safety accidents and economic losses. This paper conducts a systematic analysis of the common corrosion types in petrochemical equipment and pipelines, including uniform corrosion, local corrosion, and stress corrosion cracking, etc. It also deeply explores the causes of corrosion problems from the perspectives of medium factors, environmental factors, and equipment material and design. It elaborates on the impact of material selection and manufacturing processing techniques on the corrosion resistance of equipment, and then proposes comprehensive anti-corrosion strategies such as coating protection, application of corrosion inhibitors, material upgrading and optimization, and reasonable design and maintenance. It presents practical anti-corrosion countermeasures, hoping to provide theoretical support and technical references for engineering practice.

Keywords: Petrochemical equipment and pipelines; Corrosion types; Medium factors; Material selection; Anti-corrosion strategies

1 石油化工设备与管道常见腐蚀类型

1.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀指的是金属表面在腐蚀介质的作用之下整体发生较为一致的溶解或者氧化反应, 这种反应会导致材料的厚度均匀减薄。该类腐蚀通常是在酸性、碱性或者含盐水溶液的环境中发生, 特别是当碳钢设备接触湿硫化氢、二氧化碳或者低 pH 值介质的时候表现得较为明显。腐蚀速率会受到介质浓度、温度、流速以及氧含量等多种因素的影响, 虽然它的破坏形式相对来说是可以预测的, 但是由于涉及的面积极广, 要是没有及时进行检测与干预, 仍然有可能造成设备壁厚不足, 进而引发强度失效的情况。均匀腐蚀的特征在于腐蚀产物会覆盖整个暴露表面, 不存在明显的局部集中现象, 检测手段大多依赖定期测厚与腐蚀挂片试验。尽管这种类型的腐蚀不会迅速导致穿孔或者突发性破裂, 但是它的累积效应是不可以忽视的, 尤其是在高温高压的工况之下, 材料力学性能会随着

厚度减薄而显著下降, 有可能诱发次生失效模式。

1.2 局部腐蚀

局部腐蚀指的是腐蚀集中于金属表面某些特定区域, 而其余部分几乎不会受到影响, 其危害性要远远大于均匀腐蚀。在石油化工设备当中, 局部腐蚀主要包含点蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀以及晶间腐蚀等具体形式。点蚀通常是由氯离子等侵蚀性阴离子所引发, 会在钝化膜薄弱之处形成微小孔洞并向材料内部纵深发展, 非常容易造成穿孔泄漏情况。缝隙腐蚀大多发生在法兰连接面、垫片下方或者沉积物覆盖区域, 由于氧浓差电池作用, 缝隙内会形成酸性还原环境进而加速金属溶解。电偶腐蚀出现在不同金属直接接触且处于电解质环境当中的时候, 电位较负的金属会成为阳极从而加速腐蚀。晶间腐蚀主要对奥氏体不锈钢产生影响, 在敏化温度区间长期服役之后, 晶界会析出碳化铬, 导致晶界贫铬从而优先被腐蚀。局部腐蚀具备隐蔽性强、发展迅速、难以预测等特点, 常规检测

手段往往很难及时发现，一旦发生，可能在短时间内致使设备失效。

1.3 应力腐蚀开裂

在石油化工系统当中，奥氏体不锈钢处于含氯离子环境里、碳钢处于碱液或者湿硫化氢环境中时，都容易出现此类开裂现象。应力的来源包含残余应力、工作载荷以及热应力等方面，而腐蚀介质需要具备特定的化学组成与浓度范围。应力腐蚀开裂一般是从表面缺陷或者局部腐蚀坑开始的，裂纹会沿着晶界或者穿晶进行扩展，从宏观角度看没有明显的塑性变形，断裂之前也没有显著的征兆。这类失效模式对设备的完整性会构成严重威胁，特别是在高温高压容器、换热器管束及输送管道中更常见。因为其发生条件具有高度的特异性，仅控制应力或者介质都很难完全避免开裂情况的发生，所以必须要采取综合防控的措施。

2 石油化工设备与管道腐蚀原因分析

2.1 介质因素

工艺流体通常会含有水、硫化氢、二氧化碳、氯离子、有机酸、氨以及微量氧等具有腐蚀性的组分，这些物质会在不同的温度、压力和流速条件之下与金属材料发生复杂的电化学或化学反应。比如，湿硫化氢能够引发氢鼓泡、氢致开裂以及硫化物应力腐蚀开裂等情况，二氧化碳溶解于水之后会形成碳酸，从而导致碳钢设备出现酸性腐蚀现象，氯离子则会对不锈钢钝化膜造成破坏，进而诱发点蚀与应力腐蚀问题。介质的pH值、氧化还原电位以及电导率也会对腐蚀行为产生显著的影响。多相流（气—液、液—固）还会让冲刷腐蚀的情况加剧，特别是在弯头、三通等流动发生突变的部位。介质成分存在的波动性会进一步增加腐蚀控制方面的难度，就像原油劣质化会使得硫、氮、重金属含量上升，从而让下游设备的腐蚀速率加快。

2.2 环境因素

大气腐蚀这种情况在露天布置的塔器、储罐以及管道外壁较为常见，它会受到湿度、盐雾、如SO₂、NO_x这类工业污染物以及温度变化等因素的影响，并且在沿海地区或者高湿工业区这种腐蚀现象会变得更加严重。埋地管道会面临土壤腐蚀方面的问题，其腐蚀程度主要取决于土壤电阻率、含水量、pH值、微生物活性以及杂散电流等一系列因素。保温层下腐蚀（CUI）属于石化行业特有的环境腐蚀问题，当保温材料出现吸水情况或者密封失效的时候，水分会在金属表面不断积聚从而形成持续潮湿环境，再加上温度波动会促进氧扩散进而导致碳钢或者不锈钢发生严重腐蚀。此类腐蚀具有很强的隐蔽性，通过常规巡检很难将其发现，往往在保温层拆除之后才会被察觉。环

境腐蚀虽然并非直接由工艺介质造成，但其累积效应同样会对设备安全构成威胁。

2.3 设备材质与设计

设备的材质以及结构设计对于腐蚀行为起着决定性的影响。材质选择如果出现不当情况，是导致设备早期腐蚀失效的主要原因之一，比如在含有氯元素环境中使用普通的304不锈钢，非常容易发生点蚀以及应力腐蚀开裂的问题，在高温硫腐蚀的工况之下选用非抗硫碳钢，会加速材料的损耗速度。材料的冶金质量、晶粒度以及夹杂物含量等因素也会对其耐蚀性产生影响。在结构设计方面，不合理的设计会形成腐蚀的诱因，如存在死角、滞留区、缝隙或者湍流区的情况，容易导致沉积物出现堆积、局部浓缩或者冲刷腐蚀的现象。焊缝区域要是没有进行适当的热处理或者存在咬边、未熔合等缺陷，将会成为腐蚀优先发生的位置。

3 材料制造与加工工艺对设备腐蚀性能的影响

3.1 材料选择对腐蚀性能的影响

在石油化工的环境中，不同材料针对特定腐蚀介质的耐受性有着显著差异。碳钢由于成本相对低廉，比较适用于非腐蚀性或者弱腐蚀性的工况，不过在含硫、含氯或者酸性的环境需要配合防护措施使用。低合金钢通过添加Cr、Mo等元素能够提升高温强度与抗硫腐蚀的能力，所以被广泛应用于加氢装置中。奥氏体不锈钢像316L因为含有钼，耐点蚀性能要优于304，比较适合用于含氯介质的环境，双相不锈钢兼具高强度和优异的抗应力腐蚀性能，适用于较为苛刻的环境。镍基合金例如Inconel 625、Hastelloy C-276是用于极端腐蚀条件。在材料选择时，要综合考虑介质成分、温度、压力、经济性、可焊性等多种因素。要是选材出现错误，不仅会导致腐蚀加速，还很有可能引发连锁失效。材料选择必须要基于系统性的腐蚀评估，确保其在全生命周期内具备足够的耐蚀裕量。

3.2 制造加工工艺对腐蚀性能的影响

制造加工工艺会直接对设备的微观结构以及表面状态产生影响，进而影响到设备的腐蚀行为。焊接作为最关键的加工环节，不当的焊接参数或者工艺会导致热影响区组织出现粗化、残余应力集中以及敏化等现象，从而显著降低设备的耐蚀性。例如奥氏体不锈钢在450—850℃区间长时间停留时，会析出Cr₂₃C₆，造成晶界贫铬进而诱发晶间腐蚀。冷加工像弯管、胀管这类操作会引入加工硬化与残余拉应力，增加应力腐蚀开裂的敏感性。表面处理诸如喷砂、酸洗、钝化等工艺如果控制不当，可能残留污染物或者破坏钝化膜，反而促进设备腐蚀。此外制造过程中引入的划痕、凹坑或者毛刺会成为腐蚀的起始点。因此制造过程必

须严格执行相应的工艺规程,对关键设备实施焊后热处理以消除应力,控制热输入防止敏化现象发生,采用洁净装配避免设备受到污染,并对焊缝进行无损检测与表面修整,确保制造质量能够满足防腐要求。

4 石油化工设备与管道防腐策略

4.1 涂层防护

涂层防护是通过在金属表面施加有机或无机覆盖层的方式,以此来隔绝腐蚀介质与基体之间的接触,进而达到抑制腐蚀反应的目的。在石化设备当中,外防腐通常采用环氧煤沥青、聚氨酯或者氟碳涂料,这些涂料适用于大气或者埋地环境,内防腐则大多使用玻璃鳞片树脂、酚醛环氧等耐化学介质涂层。保温层下的设备需要使用具备耐高温、抗吸水特性的专用涂层。涂层体系的有效性主要取决于表面处理质量、涂层附着力、致密性以及施工工艺。将表面进行喷砂除锈至 Sa2.5 级是保证涂层附着的必要前提,采用多层涂装结构能够提升涂层的屏障性能。涂层破损的部位容易形成大阴极一小阳极腐蚀电池,这会加速局部腐蚀的发生,所以需要定期对涂层进行检查和修补。对于高温设备而言,还需要考虑涂层的热稳定性与热膨胀匹配性。涂层防护虽然不能完全替代材料升级,但作为一种经济有效的辅助手段,其在延长设备使用寿命方面能够发挥重要的作用。

4.2 缓蚀剂应用

缓蚀剂是通过在腐蚀介质中添加少量化学物质的方式,吸附于金属表面形成保护膜或者改变电极反应动力学,来降低金属的腐蚀速率。在石化系统当中,缓蚀剂被广泛应用于循环水系统、酸洗过程、油气集输以及炼油装置。按照作用机理划分,缓蚀剂可分为阳极型、阴极型以及混合型缓蚀剂。缓蚀剂的选择需要依据介质性质、材质类型以及工艺条件来确定,以此确保其兼容性与有效性。缓蚀剂在注入时需要维持稳定的浓度,浓度过低无法形成完整的保护膜,浓度过高则可能引发副作用如乳化或沉积。需要监控缓蚀剂降解产物对系统所产生的影响。缓蚀剂技术具备实施灵活、成本较低的优点,不过它依赖持续投加与监测,比较适用于封闭或半封闭系统。在开式系统或者高流速区域,缓蚀剂容易被冲刷流失,其防护效果会受到一定限制。所以,应该结合工艺特点制定科学合理的加注方案,并辅以腐蚀监测手段来验证防护效果。

4.3 材质升级优化

材质升级优化是通过选用具有更高耐蚀等级的材料去替代原有的材质,以此从根本上提升设备的抗腐蚀能力。在腐蚀情况较为严重的区域,像常减压塔顶、催化裂化分馏塔以及加氢反应器等位置,经常采用

不锈钢、双相钢或者镍基合金来替代碳钢。进行材质升级时需要权衡初始投资与全生命周期成本,避免出现过度设计的情况。在中等氯离子浓度的环境当中,316L 不锈钢就能满足使用要求,不需要选用更为昂贵的超级双相钢。还可以采用复合结构,例如碳钢基体加上不锈钢衬里或者堆焊层,从而兼顾材料的强度与耐蚀性。材质升级还需要考虑焊接性、热膨胀系数匹配以及异种金属接触腐蚀等方面的问题。在实施材质升级的过程中,应该建立材料数据库,明确各工况下的推荐材料清单,并且在设计变更的时候进行腐蚀风险再评估,以此确保升级方案的合理性与可持续性。

4.4 合理设计与维护

合理开展设计与维护工作是从系统层面控制腐蚀的重要关键措施。在进行设计的阶段应该严格遵循防腐设计原则,比如要避免出现死角、确保设备能够排净、减少缝隙的存在、让流道实现平滑过渡、把流速控制在合理范围之内等。进行设备布局的时候应该使其便于进行检测与维护,要在关键部位预留出腐蚀监测点。在维护方面,需要建立起一套完善的腐蚀监测体系,这其中涵盖了定点测厚、腐蚀挂片、电阻探针以及在线 pH/电导率监测等方式,从而能够及时掌握腐蚀的动态情况。定期对设备进行清垢和排污可以防止沉积物下出现腐蚀问题,定期检查保温层能够预防 CUI 情况发生,对于停用的设备应该实施干燥封存或者氮封保护措施。

5 结束语

石油化工设备与管道所面临的腐蚀问题具备复杂性和多样性特点,其形成原因涉及介质、环境、材料以及设计等多重因素。本文深入分析腐蚀产生的根本原因,并且从材料选择、制造工艺、防护技术以及运行维护等多个方面提出综合防控策略。有效的腐蚀管理需要依托科学的设计理念、合理的材料应用、严格的制造标准以及规范的运维制度。切实提升装置的本质安全水平,保障石化生产的连续性与可靠性。

参考文献:

- [1] 陆登. 浅谈石化企业设备常见腐蚀原因与防腐措施 [J]. 中国设备工程, 2024(22):182-184.
- [2] 周峰. 石油化工设备腐蚀原因及防腐管理 [J]. 山西化工, 2024,44(03):129-131.
- [3] 姚娜. 石油化工设备防腐管理措施研究 [J]. 当代化工研究, 2024(12):157-159.
- [4] 李跃春. 针对石油化工设备腐蚀原因提出的解决办法 [J]. 化工管理, 2019(04):157-158.
- [5] 郝宝全. 石油化工机械设备腐蚀原因及对策研究 [J]. 湖北农机化, 2020(4):181.