

Research on corrosion and anticorrosion measures of chemical equipment

Wenhui Chen

Guangdong Maohua Construction Group Co., Ltd. Yangpu Branch, Danzhou, Hainan, 578101, China

Abstract

This paper mainly analyzes the main types of chemical equipment corrosion, including chemical corrosion, electrochemical corrosion and physical corrosion, and discusses the main causes of corrosion, such as the erosion of chemical media, improper selection of equipment materials, the influence of environmental factors and operation and maintenance management is not in place. On this basis, a series of effective corrosion measures are proposed, including material corrosion, process corrosion, equipment structure optimization, corrosion coating, etc. By rationally selecting corrosion-resistant materials, optimizing process conditions and strengthening equipment management, the service life of chemical equipment can be effectively extended, and the safety and economic benefits of chemical production can be improved.

Keywords

chemical equipment; corrosion type; anti-corrosion measures; material protection

化工设备腐蚀与防腐措施研究

陈文惠

广东茂化建集团有限公司洋浦分公司, 中国·海南 儋州 578101

摘要

本文主要分析了化工设备腐蚀的主要类型, 包括化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀并探讨了腐蚀产生的主要原因, 如化工介质的侵蚀、设备材料的选择不当、环境因素影响以及运行维护管理不到位等。在此基础上, 提出了一系列有效的防腐措施, 包括材料防腐、工艺防腐、设备结构优化、防腐涂层等。通过合理选择耐腐蚀材料、优化工艺条件、加强设备管理, 可有效延长化工设备的使用寿命, 提高化工生产的安全性和经济效益。

关键词

化工设备; 腐蚀类型; 防腐措施; 材料防护

1 引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业, 其生产过程中涉及大量的化工设备, 如反应釜、换热器、储罐、管道等。这些设备在长期运行中, 常常受到化工介质、高温高压、环境因素等影响, 导致腐蚀问题的发生。设备腐蚀不仅会降低生产效率、缩短设备使用寿命, 还可能引发安全事故, 造成严重的经济损失和环境污染。因此, 化工设备的腐蚀防护问题已成为行业关注的重点。

2 化工设备腐蚀的类型

化工设备腐蚀主要分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀三大类。

化学腐蚀是由于设备表面与化工介质发生化学反应而引起的腐蚀。例如, 酸性或碱性溶液与金属反应, 导致金属

表面逐渐溶解。常见的化学腐蚀有氧化腐蚀、硫化腐蚀等。氧化腐蚀常发生在设备暴露在空气中的环境中, 金属与氧反应形成氧化物, 降低了设备的强度和耐用性。硫化腐蚀则通常发生在石油化工设备中, 硫化物与金属接触时生成腐蚀性较强的硫化物, 严重时会导致金属的结构破坏。

电化学腐蚀是金属材料在电解质溶液中的电化学反应引起的腐蚀。电化学腐蚀常发生在具有电解质溶液环境中, 当金属与溶液接触时, 金属表面形成电极, 产生电流并引发腐蚀现象。常见的电化学腐蚀类型包括点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂。点蚀是金属表面局部出现小孔, 通常由氯离子等腐蚀性介质引发; 缝隙腐蚀则发生在设备表面的缝隙处, 腐蚀速度较快; 应力腐蚀开裂则是由于金属表面应力集中与腐蚀作用共同作用, 导致金属发生裂纹。

物理腐蚀则是由于设备在高温、高压、气流或液流等物理因素作用下产生的腐蚀。这种腐蚀通常是由于流体的摩擦或冲刷作用, 导致金属表面物理性损害, 或者是由于温度过高引起的金属氧化。特别是在化工生产中, 流体的高速流

【作者简介】陈文惠(1983-), 男, 中国海南文昌人, 本科, 助理工程师, 从事化工设备方面维修维护研究。

动和高温环境会加剧设备的磨损，导致设备寿命缩短。^[1]

3 化工设备腐蚀的原因

3.1 化工介质的影响

化工介质是导致化工设备腐蚀的主要因素之一。化工生产过程中，许多原料、中间产物及最终产品具有强腐蚀性，如强酸、强碱、盐类、氧化剂、还原剂等。这些介质与设备接触后，会与金属材料发生化学或电化学反应，导致设备腐蚀。例如，在酸性环境中， H^+ 离子会与金属发生电化学反应，导致金属溶解，使设备表面逐渐减薄甚至穿孔。在碱性介质中，某些金属（如铝）容易与 OH^- 发生反应，生成腐蚀产物并影响设备的机械强度。某些含有硫化物的化工介质，如原油和天然气，会在高温条件下与金属表面发生硫化反应，形成硫化物腐蚀层，严重时导致设备脆化或泄漏。氯离子（ Cl^- ）也是造成设备腐蚀的重要因素，尤其在不锈钢等材料中，氯离子能破坏钝化膜，导致点蚀甚至应力腐蚀开裂。化工介质的温度、流速及浓度也会影响腐蚀速率。例如，高温环境会加速化学反应速率，提高腐蚀程度；高流速则可能导致冲刷腐蚀，使金属表面保护层被破坏，进一步加剧腐蚀。

3.2 设备材料的影响

化工设备的材料特性对其耐腐蚀能力具有决定性作用。不同材料的耐腐蚀性能存在较大差异，如果选材不当，设备在使用过程中容易发生腐蚀。例如，碳钢虽然具有良好的机械性能和经济性，但在酸性、碱性或含氯离子的环境中容易腐蚀，导致设备寿命缩短。而不锈钢由于表面形成了一层钝化膜，能有效防止腐蚀介质侵蚀，但在高温、高氯离子浓度或酸性条件下仍可能发生点蚀和应力腐蚀开裂。合金元素的种类和含量也会影响材料的耐腐蚀性能。例如，添加铬（Cr）、镍（Ni）、钼（Mo）等元素的合金钢，其抗氧化、抗硫化和抗酸碱腐蚀能力显著提高。另一方面，金属的内部组织结构也会影响腐蚀行为。晶界腐蚀是一种常见现象，通常发生在不锈钢等合金材料中，当金属内部的碳化物在晶界析出后，会导致晶界处的铬元素贫化，使钝化膜失效，从而引发腐蚀。金属材料的加工方式（如焊接、铸造、热处理等）也可能影响其耐腐蚀性。例如，不当的焊接工艺可能导致焊缝区组织变化，形成电化学腐蚀的阴阳极区域，加剧腐蚀进程。

3.3 环境因素的影响

化工设备所处的环境对其腐蚀行为有重要影响。空气湿度、温度、气体成分等环境因素均可能加速设备腐蚀。例如，高湿度环境会增加设备表面水膜的形成，促进电化学腐蚀反应。特别是在沿海地区，空气中的氯离子含量较高，会加速金属的点蚀和缝隙腐蚀。大气中的污染物，如二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）等，在空气中溶解后会形成酸性降水，腐蚀暴露在外的设备表面，尤其是碳钢等非耐蚀材料。在高温环境下，金属材料更容易发生高温氧化和热腐蚀，

例如，在炼油和化工装置中，金属设备表面可能与含硫、含氢等气体反应，生成易剥落的腐蚀产物，降低设备强度。温度波动较大的环境也可能导致热疲劳和热应力腐蚀。某些情况下，设备长期暴露在紫外线或其他辐射环境中，可能会加速涂层老化，降低其保护性能。化工厂区的粉尘、颗粒物沉积在设备表面，也可能与化工介质结合形成腐蚀性化合物，从而加剧腐蚀。^[2]

3.4 设备运行与维护不当

设备的运行状况和日常维护直接影响其腐蚀速度和使用寿命。如果运行条件不稳定或维护管理不当，设备腐蚀问题会更加严重。例如，化工生产中，设备的温度、压力、流速等工艺参数应严格控制，若出现超温、超压或流速过快的情况，会加剧设备的腐蚀速率。高温高压环境可能加快化学反应，使腐蚀介质更具破坏性，而流速过高则可能引起冲刷腐蚀，使设备表面保护层受损。设备长期停机或长期处于静止状态，内部介质可能沉积或浓缩，导致局部腐蚀加剧。例如，锅炉停机后若不进行适当处理，内部管道可能因残留水分形成氧腐蚀。另一方面，设备维护不到位，如未及时清理腐蚀产物、未按时更换防腐涂层或缓蚀剂，都会使腐蚀问题加重。特别是对于石化设备，管道和储罐内部的残留物若未清理干净，可能在高温环境下生成腐蚀性物质，如硫化氢或氨气，导致设备内部腐蚀。设备检修时，如果未采用正确的焊接或修复工艺，可能造成焊接缺陷，形成腐蚀裂纹。由于维护不当引起的腐蚀问题往往具有隐蔽性，一旦发生泄漏或结构失效，可能导致严重的安全事故。

4 化工设备的防腐措施

4.1 材料防腐

材料防腐是化工设备防腐的核心措施之一，合理选择耐腐蚀材料可以显著降低腐蚀速率，提高设备的可靠性。化工设备的材料选择主要依据介质种类、温度、压力、流速等参数。例如，不锈钢（如304、316L）因其含有18%以上的铬（Cr）和8%以上的镍（Ni），能够形成致密的钝化膜，在pH4~8范围内的水溶液环境中腐蚀速率低于0.01mm/a。然而，在含有氯离子的介质（ $Cl^- > 50mg/L$ ）或酸性环境（ $pH < 3$ ）下，普通不锈钢容易发生点蚀和晶间腐蚀，因此需要采用更高级别的不锈钢（如2205双相不锈钢，PREN > 35）或镍基合金（如Inconel625），其耐点蚀温度（CPT）可达90℃以上。此外，对于高温高压环境（ $> 400℃$ ， $> 10MPa$ ）的化工设备，可采用钛合金（如Ti-6Al-4V），其抗氧化性能优异，氧化速率低于0.01g/(m²·h)，适用于高温腐蚀工况。对于非金属材料，氟塑料（如PTFE、PVDF）可耐受-100℃至250℃的极端温度环境，同时渗透率低于0.01g/(m²·d)，能有效防止酸碱介质的渗透腐蚀。化工设备的耐腐蚀性能不仅取决于基材，还取决于材料的加工工艺。例如，采用冷轧不锈钢比热轧不锈钢的抗点蚀性能提高

15%以上,采用真空熔炼工艺的镍基合金,其耐腐蚀寿命比传统电弧熔炼工艺提高20%。在材料防腐设计中,需要综合考虑介质特性、工况条件以及材料的物理化学特性,合理选择合适的耐腐蚀材料

4.2 工艺防腐

工艺防腐主要通过优化生产参数、控制腐蚀性介质、合理选择工艺条件等措施来减少腐蚀对设备的影响。介质的pH值对腐蚀速率影响显著。例如,在酸性环境($\text{pH} < 4$)下,碳钢的腐蚀速率可高达 1mm/a ,而在 $\text{pH}6200\text{mg/L}$,可有效降低腐蚀速率30%以上。介质中的溶解氧(O_2)和硫化氢(H_2S)是主要的腐蚀源,尤其在石油化工装置中, H_2S 含量超过 20ppm 时,碳钢材料的腐蚀速率可提高5倍。因此,可采用脱氧塔或化学脱氧剂(如联氨, N_2H_4),将溶解氧控制在 0.1mg/L 以下,以减少氧化腐蚀。控制介质流速对减少冲刷腐蚀至关重要。例如,酸碱介质的管道流速建议控制在 $1.5\sim 2.5\text{m/s}$,避免因湍流导致的局部冲刷腐蚀,而对于含固颗粒的浆料管道,流速应低于 1m/s ,以减少磨蚀腐蚀。温度控制也是关键因素,高温条件下,许多化学反应速率会加快,腐蚀速率也随之升高。^[3]例如,在 90°C 硫酸介质中,不锈钢的腐蚀速率比 50°C 时提高3倍,因此,需采用降温措施,如换热器、冷却水循环等,将关键部件的运行温度控制在 60°C 以下。

4.3 设备结构优化

设备结构设计对腐蚀的影响不容忽视,合理的结构优化可以降低腐蚀风险,提高设备的耐久性。设备设计应避免死角和缝隙,以减少局部腐蚀。例如,在换热器设计中,采用U形管结构可减少管束之间的积液区域,降低缝隙腐蚀的发生概率。研究表明,U形管换热器的腐蚀速率比直管换热器降低25%以上。此外,焊缝设计应采用连续焊接工艺,避免点焊或间断焊接,以减少应力集中和电化学腐蚀。例如,在海洋环境中采用全焊接结构的不锈钢储罐,使用寿命比传统螺栓连接结构提高30%。对于输送高腐蚀性介质的管道,如输送盐酸(HCl)和氢氟酸(HF)的管道,建议采用双层管设计,外层采用耐腐蚀合金(如哈氏合金C-276),其耐腐蚀性能比单层碳钢管提高5倍以上。设备内部流道的设计也需优化,例如,在高流速环境下,管道弯头处容易发生冲刷腐蚀,因此建议采用大半径弯管(弯曲半径 $R \geq 3D$),其冲刷腐蚀速率比传统 $1.5D$ 弯管降低40%。对于储罐和反应釜,应采用倾斜底部设计,倾斜角度控制在 $3^\circ\sim 5^\circ$,使腐蚀性沉积物能顺利排出,减少局部腐蚀。在设备设计中,

应考虑材料的膨胀系数匹配,例如,在 400°C 以上的高温环境下,碳钢与不锈钢的膨胀系数相差2倍以上,容易引起界面应力腐蚀,因此应采用过渡连接或缓冲材料,如镍基合金过渡层,以减少热应力影响。

4.4 防腐涂层与涂装技术

常见的防腐涂层包括环氧树脂涂层、聚氨酯涂层、氟碳涂层等。环氧树脂涂层具有优异的耐化学性和耐酸碱性,适用于大多数中性或弱酸环境。环氧树脂涂层的厚度一般控制在 $200\sim 400\mu\text{m}$ 范围内保持良好的防腐性能。在石油化工领域,聚氨酯涂层常用于暴露在外的设备,如外部管道、储罐等,聚氨酯涂层的厚度通常在 $250\sim 600\mu\text{m}$ 之间,能够有效抵御风吹雨打、紫外线辐射等环境因素的影响,同时具有较强的耐磨损性能。在高温、高腐蚀性环境下,推荐使用氟碳涂层,其耐高温可达 450°C ,并且具有较低的渗透率($< 0.01\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$),可以防止氯化物等腐蚀性介质对金属表面的侵蚀,广泛应用于化学反应器、储存装置等高温高压设备的防腐保护。此外,热喷涂技术也广泛应用于防腐涂层的施工中,尤其是在大规模化工装置中。热喷涂铝(TSA)技术是高温环境下常用的一种防腐技术,其涂层厚度通常在 $200\sim 1000\mu\text{m}$,其附着力和耐磨损性优于有机涂层,能够显著延长设备的使用寿命。

5 结论

化工设备腐蚀问题对工业生产的安全性、经济性和环保性具有重要影响。本文系统分析了化工设备的腐蚀类型、主要腐蚀原因,并提出了材料防腐、工艺优化、设备结构优化、防腐涂层、电化学防护及日常维护等防腐措施。通过合理选择耐腐蚀材料、优化生产工艺、加强设备结构设计和维护管理,可有效降低设备腐蚀速率,提高其使用寿命和运行安全性。未来,随着新材料、新技术的不断发展,纳米涂层、高性能合金、智能监测技术等将进一步提高设备的耐腐蚀性和管理效率。智能传感器与大数据分析的结合,有望实现腐蚀的实时监测和预测维护,为化工行业提供更高效、更可靠的防腐解决方案。

参考文献

- [1] 刘琪.化工设备换热器的常见腐蚀问题与防腐措施探讨[J].中国设备工程,2025,(04):185-187.
- [2] 彭星运,司孝刚,田光雨,等.浅谈化工设备的腐蚀与防腐措施[J].广东化工,2023,50(12):124-125+133.
- [3] 周超.石油化工设备常见腐蚀原因及防腐措施[J].化工管理,2021,(20):143-144.