

化工设备换热器防腐措施及经济性分析

孙旭强（国能新疆化工有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘要：本文围绕化工设备换热器的防腐相关内容进行研究，分析了换热器腐蚀问题的类型、原因及危害，详细阐述多种防腐措施，包括涂层保护、合理选材、添加缓蚀剂等，并对这些防腐措施从初期投入、维护成本及长期效益等方面进行经济性分析，从而为化工企业选择适宜的换热器防腐措施，实现企业经济与安全的平衡，促进化工企业高质量发展。

关键词：化工设备；换热器；防腐措施；经济性分析

中图分类号：TQ050.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）034-0046-03

Corrosion Prevention Measures and Economic Analysis for Heat Exchangers in Chemical Equipment by

Sun Xuqiang (Guoneng Xinjiang Chemical Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830000, China)

Abstract: This study investigates corrosion prevention strategies for chemical heat exchangers, analyzing the types, causes, and hazards of corrosion issues. It details various protective measures including coating applications, material selection optimization, and corrosion inhibitors. The analysis evaluates the economic viability of these measures from three perspectives: initial investment, maintenance costs, and long-term benefits. The research aims to assist chemical enterprises in selecting appropriate corrosion prevention solutions, achieving a balance between economic efficiency and operational safety, and ultimately promoting sustainable development in the chemical industry.

Key words: chemical equipment; heat exchanger; anti-corrosion measures; economic analysis

在化工生产中，换热器是关键设备之一，负责热量传递和物料温度调节等重要工作，在提高能源利用效率、确保生产流程稳定连续等方面发挥着不可缺少的作用，但受化工生产环境复杂等因素影响，换热器长期与腐蚀性介质接触导致腐蚀现象频繁发生。腐蚀不但会使换热器传热效率降低、设备泄漏甚至造成安全事故，也增加了设备的维护及更换费用给企业经济效益带来不利影响，因此，研究有效的换热器防腐措施并对其进行经济性分析，对于化工企业具有重要的现实意义。

1 化工设备换热器腐蚀问题分析及危害

1.1 腐蚀类型与原因

1.1.1 均匀腐蚀

在化工设备中，均匀腐蚀是最常见和最典型的腐蚀类型之一，主要表现在金属表面的腐蚀过程呈现了一种较为均匀的分布模式，不会在任何地方出现显著的腐蚀坑或者腐蚀区域，在化工换热器工作环境下，金属表面接触腐蚀性介质并有持续而完全的接触后，金属晶格内原子将失去电子变成金属离子并融入接触溶液，这个过程本质上就是金属的氧化反应。电化学上看均匀腐蚀是一种全面性电化学腐蚀过程，金属表面各部位在同一时间作为阳极被氧化溶解，无明显阴极、阳极局部分界，所以腐蚀产物对金属表面进行比较均匀的覆盖或者直接与介质溶液接触。一般情况下当其他条件固定时，酸性

介质浓度越大、环境温度越高、介质流速越大则均匀腐蚀速度也就越大，最终使金属构件整体厚度均匀变窄从而影响其结构强度及使用寿命^[1]。

1.1.2 局部腐蚀

局部腐蚀分点蚀和缝隙腐蚀两种类型，点蚀又称为小孔腐蚀主要发生在含有活性阴离子（例如氯离子）介质环境下，以不锈钢换热器为例，在含有氯离子的水里金属表面钝化膜局部破损，形成一个小阳极，而周围的大面积钝化膜则是阴极从而形成腐蚀微电池，阳极区金属不断溶解成小孔且持续向下延伸，点蚀的产生受介质内阴离子浓度、溶液 pH 值以及温度等因素的影响，一般情况下氯离子浓度越大、pH 值越低以及温度越高则点蚀就越有可能出现。而且缝隙腐蚀往往存在于金属之间或者金属和非金属之间的细小间隙，由于缝隙内部介质的滞流导致了缝隙内外的介质浓度不均，形成了浓差电池从而导致了缝隙内部的金属腐蚀^[2]。缝隙宽度、介质种类和温度对于缝隙腐蚀具有显著影响，当缝隙宽度处于 0.025-0.1mm 范围时最为严重，而含有较高氧含量和较高温度会导致缝隙腐蚀程度加剧。

1.1.3 应力腐蚀开裂

金属受拉应力及特定腐蚀介质等作用下脆性断裂的现象为应力腐蚀开裂，换热器在生产安装时都会产生残余应力，其工作时由于温度和压力的变化而产生

工作应力,这些应力和腐蚀性介质共存时会使金属表面出现细微裂纹,并且在应力与腐蚀双效作用下裂纹不断延伸,从而造成设备故障。应力大小、介质成分和材料特性对应力腐蚀开裂有显著的影响,拉应力大,介质腐蚀性离子浓度高,材料对应力腐蚀开裂越敏感,也较易发生这种腐蚀。

1.2 腐蚀的危害性分析

1.2.1 影响设备性能

腐蚀是造成换热器传热效率降低的一个主要因素,在化工生产环境下换热器金属表面不断接触腐蚀性介质时将逐步生成腐蚀产物,这类产物大多具有孔隙和多孔性,附着于传热表面时形成附加的热阻层,随着时间的推移腐蚀产物的积累使传热过程中介质间传递热量的路径变得越来越长,同时热传递阻力明显增大,传热效率下降直接影响换热器不能满足工艺设计需要进行热量交换,从而影响到整个化工生产过程中温度控制精度。化工生产对于温度参数有严格的限制,温度超出标准范围会使反应速率和反应程度等关键工艺条件发生变化,不仅影响到最终产品纯度和成分质量指标,而且也会使生产过程稳定性降低和生产节奏紊乱严重,最终导致总体生产效率降低。

1.2.2 缩短设备寿命

持续的腐蚀作用会使换热器结构完整性严重受损,其中最直接的表现就是设备壁厚逐步变薄,换热器在设计和制造过程中,它的壁厚是由所承受的工作压力、温度和介质特性决定的,目的是确保该装置有足够的强度和承受压力的能力。腐蚀过后,金属材料继续损失,壁厚渐小,设备结构强度渐弱,承压能力亦随之降低,在壁厚减薄至一定范围时,设备在正常工作压力及温度下会产生局部应力集中现象并由此引发泄漏,如果泄漏问题没有及时解决就会使腐蚀更加严重,最后会造成设备破损等严重故障,该系列工艺极大地缩短了换热器寿命,迫使其提前进行设备更换,但换热器又是化工生产的关键设备之一,购买和安装的成本都比较高,经常更换会明显提高企业设备更换成本和增加生产成本负担^[3]。

2 化工设备换热器防腐措施

2.1 涂层保护

2.1.1 有机涂层

有机涂层在换热器金属表面生成连续致密保护膜,隔离金属和腐蚀性介质,常用有机涂层材料有环氧树脂、聚氨酯和酚醛树脂,其附着力好、耐腐蚀性强、耐磨性能佳,应用领域广泛,可广泛用于各种换热器,特别是常温及非强腐蚀介质条件下使用。比如化工企业冷却水换热器上环氧树脂涂层可以有效地避免水的

侵蚀,施工前需要对金属表面进行严格的预处理工作,其中包括除油、除锈以及粗化,从而保证了涂膜与金属之间的良好连接,还应控制涂膜厚度、施工环境温度及湿度来确保涂膜质量。

2.1.2 无机涂层

无机涂层主要有陶瓷涂层和玻璃涂层,具有耐高温、耐磨损、耐化学腐蚀等特点,例如,陶瓷涂层可以通过加热涂覆或者烧结的方式在金属表面形成一层陶瓷薄膜,其中的主要材料有氧化铝和氧化锆,这些材料具有较高的硬度和较强的化学稳定性,适用于高温和强腐蚀环境下换热器。无机涂层施工工艺复杂,对设备和技术要求高,如陶瓷涂层在高温下需要使用特殊的喷枪设备并对喷涂参数进行准确的控制以确保涂层的均匀性和紧密性。

2.2 合理选材

2.2.1 选择耐腐蚀金属材料

根据换热器所处的腐蚀环境,选用自身耐腐蚀性能较好的金属材料,在化工生产环节耐腐蚀需求较高,比如海水淡化、制药行业换热器等,一般都会使用钛材或者镍基合金,虽然其价格昂贵,但是可以延长设备的使用寿命并降低维护成本,选材既要考虑耐腐蚀性又要兼顾机械性能、加工工艺性及成本,如果钛材耐腐蚀性能较好,但是加工难度较大且成本较高,则在设计选材过程中需要综合考虑。

2.2.2 采用复合材料

复合材料由两种以上不同性能材料的组合而成,以发挥其优势,利用碳钢的高强度以及不锈钢的耐腐蚀性来达到设备的要求,在大型化工设备换热器生产中得到了广泛应用,保证碳钢和不锈钢之间的良好融合,通常使用爆炸复合和轧制复合等方法进行生产,与此同时还应注意避免加工过程中对复合界面造成的破坏从而影响防腐性能^[4]。

2.2.3 添加缓蚀剂

缓蚀剂可以在金属表面生成保护膜或者阻止腐蚀反应,按作用机理可分为阳极型缓蚀剂、阴极型缓蚀剂及混合型缓蚀剂三种类型,在酸性介质条件下含有氮和磷等有机化合物可以作为缓蚀剂附着于金属表面来抑制阳极溶解反应。广泛用于化工生产中的换热器的防腐工作,具有操作简便和经济实惠等特点,特别适合那些不能用别的防腐措施进行防腐的情况,如已经投用的换热器防腐处理,需要根据不同介质性质,温度以及流速等因素选择适当的缓蚀剂种类与浓度,应考虑缓蚀剂和其他添加剂之间的相容性以免产生不良反应,对缓蚀剂浓度及作用进行定期监控并及时调节添加量。

2.2.4 阴极保护

阳极法是利用电位较负的金属与被保护的换热器金属构成腐蚀电池,其中电位较负的金属作阳极优先被腐蚀而保护换热器金属作阴极,适合导电性能较好的介质比如海水和土壤等的换热器,安装方便不需要外加电源,维护费用低廉,基于换热器的结构及介质条件合理地选择阳极的形状、大小及安装位置以保证阳极对保护电流的均等供给,定期对阳极的消耗情况进行检查并及时进行替换。

外加电流法就是利用外部直流电源给被保护换热器金属接电源负极做阴极,而辅助阳极则接电源正极,给介质注入电流从而使阴极面发生还原反应从而抑制金属腐蚀,适用于大型或者重要的换热器或者在腐蚀条件差的情况下使用。化工园区集中供热系统大换热器采用外加电流法可以达到更加有效的防腐与保护效果,外加电流阴极保护系统包括直流电源、辅助阳极、参比电极以及连接电缆,运行时对保护电位和电流进行定期监控以保证系统正常工作,应重视辅助阳极损耗及参比电极失效等问题及时进行维护和更换。

3 化工设备换热器防腐措施的经济性分析

3.1 涂层保护的经济性

有机涂层的成本主要包括涂层材料的开销、表面的预处理费用、施工过程中的开销以及后期所需的维护费用等,无机涂层由于施工工艺较为复杂,其成本也包括了特殊的设备购买与折旧开销,有机涂层初期投入比较低,适合一般性腐蚀环境换热器使用。但是使用寿命不长,一般在5-10年内需要定期进行维护和重新涂装,而长期维护成本会比较高,无机涂层虽然初始投资较大,但是具有耐高温和耐腐蚀性能优良和使用寿命较长的特点,尤其适用于高温和强腐蚀等特殊环境时,从长远的综合成本来看可能会更有优势^[5]。

3.2 合理选材的经济性

选择耐腐蚀金属材料时,成本主要来自材料本身的价格,这通常要比普通的碳钢高出许多,例如钛材的价格可能比碳钢高出几倍甚至几十倍,使用复合材料的费用不仅包括了材料的成本还涉及复合工艺的加工费用等。耐腐蚀金属材料与复合材料初期投资较高,但是良好的耐腐蚀性能可以延长换热器使用寿命并减少设备的更换与维修频率以及生产中断造成的损失,针对化工生产过程在较长的时间内保持稳定且要求设备可靠性较高的情况,就其设备全生命周期成本而言,选材的优化具有较好的经济性,但是在短时间使用或者腐蚀性不强的情况下,过大的初始投资可能会降低经济性。

3.3 添加缓蚀剂的经济性

添加缓蚀剂的费用主要包括缓蚀剂的采购成本、

加装装置的投资与运营成本以及定期的监控成本,由于缓蚀剂的种类不同,性能也不同,所以高效缓蚀剂的价格相对来说比较高。添加缓蚀剂在初期投入较少,使用较为灵活,适应多种腐蚀环境,特别适合临时或短期防腐需求具有较好的经济性,但是需要不断地加入,长期运行的成本会很高,并且缓蚀剂的效果受到介质成分和温度等因素的影响,需要不断地进行调整以降低管理成本。

3.4 阴极保护的经济性

牺牲阳极法的成本主要包括牺牲阳极材料的费用,包括安装费用和定期更换阳极的费用,这些费用因所用材料的不同而有所变化,锌合金阳极的费用比较低廉而铝合金阳极的费用则比较高,外加电流法的成本由直流电源,辅助阳极,参比电极及其他设备的购买费用,安装费用及运行电费及维护费用组成,牺牲阳极法具有初期投资少,安装维护方便的特点,适合于小型,分散式换热器或者保护要求不高的情况,具有较好的经济性;外加电流法初期投资大,但保护效果好,适用于大型、重要换热器,保障生产连续性和稳定性,其经济性需综合设备价值和运行成本评估,对于大型化工园区核心装置的大型换热器,采用外加电流法虽初期投资大,但可有效避免因腐蚀造成的生产损失,从长期看经济性更好。

4 结论

综上所述,企业在选用换热器防腐措施时要兼顾设备腐蚀状况、运行环境、使用寿命和经济成本等诸多因素,权衡各种防腐措施的优缺点,选择最合适方案以促进换热器防腐整体水平的提升,达到经济效益和设备安全平稳运行的最佳平衡状态,并为化工行业的可持续发展提供支持。

参考文献:

- [1] 唐猛,王明梅,童文辉,徐铭泽.化工换热器常见腐蚀问题及防控措施[J].仪器仪表用户,2024(03):61-63.
- [2] 郝盼,杨芳.化工机械典型设备的腐蚀原因与防腐措施分析[J].化纤与纺织技术,2023(04):94-96.
- [3] 李凤旭,程化振,赵梓全.化工换热器常见腐蚀问题及防控措施分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025(17):25-27.
- [4] 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.
- [5] 任美霞.化工设备换热器的常见腐蚀问题及防腐措施探讨[J].中国设备工程,2025(03):181-183.

作者简介:

孙旭强(1995-),男,甘肃渭源人,大学本科,助理工程师,研究方向:化工设备维护维修。