

化工设备维修中的材料腐蚀机理与防护

马建权

国家能源集团宁夏煤业煤制油化工安装检修分公司 宁夏 银川 750000

摘要: 化工设备在复杂且严苛的化学环境中运行,材料腐蚀问题严重威胁设备的安全性、可靠性和使用寿命,进而影响化工生产的效率与质量。本文深入剖析化工设备维修中材料腐蚀的机理,涵盖化学腐蚀、电化学腐蚀、物理腐蚀等多种类型,并详细分析影响腐蚀的因素。同时,针对不同腐蚀机理和实际情况,阐述合理选材、表面处理、电化学保护、添加缓蚀剂以及加强设备维护管理等防护措施,结合具体技术细节与数据,为化工设备防腐提供科学依据和实践指导。

关键词: 化工设备维修;材料腐蚀机理;防护措施;技术细节;数据支撑

1 引言

化工设备在运行过程中,不可避免地会受到各种腐蚀因素的影响。据统计,全球每年因金属腐蚀造成的经济损失约占国民生产总值的2%-4%,在化工行业,这一比例可能更高。材料腐蚀不仅会增加设备的维修成本和更换频率,还会影响化工生产的连续性和产品质量,甚至可能引发安全事故,给企业带来巨大的经济损失和社会影响。因此,深入研究化工设备维修中的材料腐蚀机理,并采取有效的防护措施,对于保障化工设备的安全运行、提高化工生产效率和经济效益具有重要意义。

2 化工设备材料腐蚀的机理

2.1 化学腐蚀

化学腐蚀是指金属材料与非电解质直接发生纯化学作用而引起的破坏。在化工生产中,许多介质如干燥的气体、非电解质溶液等都能与金属表面发生化学反应,导致金属原子失去电子而被氧化。以铁在高温氧气环境中的氧化为例,在570℃以下,铁的氧化反应遵循以下步骤: $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$, 在570℃以上,反应产物主要为 Fe_2O_3 , 化学腐蚀的速率通常取决于金属材料的性质、介质的化学性质以及温度等因素。根据阿伦尼乌斯公式, 化学反应速率常数 k 与温度 T 的关系为: $k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$, 其中, A 为指前因子, E_a 为活化能, R 为气体常数 (8.314J/(mol·K)), T 为绝对温度。一般来说, 金属的活泼性越强, 介质的氧化性越强, 温度越高, 化学腐蚀的速率就越快。例如, 在相同温度下, 钠比铁更容易与氧气发生反应; 在高温下, 铁与氧气的反应速率比在常温下快得多。

2.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是金属与电解质溶液接触, 因电极电位差形成原电池导致的腐蚀, 是化工设备常见且严重的腐

蚀形式。腐蚀时, 金属表面分阳极区和阴极区。阳极区金属失电子氧化成离子入溶液, 阴极区氧化性物质得电子还原。以钢铁在潮湿空气中腐蚀为例, 先生成氢氧化亚铁, 后氧化为氢氧化铁, 脱水成铁锈。其速率受多种因素影响。电极电位低的金属更易成阳极被腐蚀, 如铁与铜接触, 铁会腐蚀^[1]。电解质溶液中离子种类和浓度影响离子迁移与反应速率, 氯离子会破坏金属氧化膜加速腐蚀。温度升高会加快反应和离子迁移, 一般每升10℃, 腐蚀速率增1-3倍。溶液pH值影响金属表面氧化膜, 酸性溶液中腐蚀更快。金属表面粗糙、有缺陷易吸附腐蚀介质, 增加腐蚀倾向。

2.3 物理腐蚀

物理腐蚀是指金属由于单纯的物理溶解作用而引起的破坏。在某些特定的介质中, 金属材料可能会直接溶解到介质中, 导致设备壁厚减薄。例如, 液态汞对铁、铜等金属具有很强的溶解能力。在20℃时, 汞对铁的溶解度约为0.0001% (质量分数), 随着温度的升高, 溶解度会增加。当化工设备与液态汞接触时, 金属材料会逐渐溶解到液态汞中, 造成设备的损坏。物理腐蚀通常发生在高温、高压或特殊介质的条件下, 其腐蚀速率取决于金属材料在介质中的溶解度、介质的温度和压力以及金属与介质的接触时间等因素。

2.4 应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂是金属材料在拉应力与特定腐蚀介质共同作用下发生的脆性断裂。化工设备中管道、压力容器等运行中承受应力, 若处于特定腐蚀介质, 就可能发生。其过程分三阶段: 先是腐蚀介质在金属表面形成微小腐蚀坑或裂纹源; 接着拉应力使裂纹尖端应力集中, 裂纹扩展; 最后裂纹扩展到一定程度, 设备突发脆性断裂, 易引发严重安全事故。影响因素有金属材料种类与

组织结构、应力大小和性质、腐蚀介质成分与浓度、温度等。不同金属对不同腐蚀介质应力腐蚀敏感性不同,如奥氏体不锈钢在含氯离子溶液中易发生,铁素体不锈钢敏感性相对较低^[2]。拉应力越大,开裂倾向越大,一般拉应力达金属屈服强度30%-70%时可能开裂。特定腐蚀介质(如氯离子、氢氧化钠溶液)易引发应力腐蚀开裂,氯离子会吸附在裂纹尖端破坏钝化膜,加速裂纹扩展。温度升高会加快开裂进程,如奥氏体不锈钢在含氯离子溶液中,温度每升10℃,裂纹扩展速率约增1-2个数量级。

2.5 腐蚀疲劳

腐蚀疲劳是金属材料在交变应力与腐蚀介质共同作用下产生的疲劳破坏。化工设备中泵的叶轮、轴等部件运行中受交变应力,若处于腐蚀介质中就会发生腐蚀疲劳。其过程是交变应力使金属表面产生微裂纹,腐蚀介质加速裂纹扩展,最终致设备疲劳断裂。腐蚀疲劳裂纹扩展速率远快于单纯疲劳裂纹,寿命也更短。影响腐蚀疲劳的因素有交变应力幅度和频率、腐蚀介质成分和浓度、金属表面状态及温度等。交变应力幅度越大、频率越高,腐蚀疲劳倾向越大,幅度超疲劳极限时发生概率显著增加;腐蚀介质腐蚀性越强,裂纹扩展越快,如酸性溶液中金属腐蚀疲劳寿命比中性溶液短;金属表面粗糙度、缺陷影响裂纹起始与发展,表面粗糙易应力集中,加速裂纹起始和扩展;温度升高通常加快腐蚀疲劳进程,如碳钢在海水中的腐蚀疲劳寿命,温度从20℃升至50℃会缩短一半左右。

3 化工设备材料腐蚀的防护措施

3.1 合理选材

根据化工设备的运行环境、介质的性质和腐蚀要求,选择合适的金属材料是防止腐蚀的关键。在选择材料时,应综合考虑材料的耐腐蚀性能、力学性能、加工性能和经济性等因素。例如,对于在强腐蚀性介质(如浓硫酸、浓硝酸等)中运行的设备,可以选择哈氏合金(如Hastelloy C-276)、蒙乃尔合金(如Monel 400)等耐腐蚀性能优异的材料。哈氏合金C-276在还原性和氧化性介质中都具有出色的耐腐蚀性能,在65℃的60%硫酸溶液中,其腐蚀速率小于0.025mm/a。对于在一般腐蚀性介质中运行的设备,可以选择304不锈钢并进行适当的防腐处理^[3]。304不锈钢在常温下的稀硫酸、稀盐酸等介质中具有一定的耐腐蚀性能,且成本相对较低。此外,还可以采用复合材料,如金属基复合材料、陶瓷基复合材料等,以提高设备的耐腐蚀性能和力学性能。例如,钢-铝复合材料结合了钢的强度和铝的耐腐蚀性能,适用于一

些对耐腐蚀和强度都有要求的场合。

3.2 表面处理

表面处理是提升金属材料耐腐蚀性的重要手段,常见方法有:

3.2.1 涂层保护

在金属表面涂覆耐腐蚀涂料(如环氧树脂、聚氨酯、氟碳涂料等),隔绝金属与腐蚀介质。环氧树脂附着力、耐化学腐蚀和机械性能好,在常温酸、碱、盐介质中耐腐蚀性强;聚氨酯耐磨、耐候、耐腐蚀,适用于户外及高耐磨场合;氟碳涂料耐腐蚀和耐候性极佳,使用寿命超20年。此方法施工方便、成本低、适用广,但质量受施工工艺和环境影响。施工前需除锈、除油,施工时要严格控制涂层厚度和干燥条件。

3.2.2 镀层保护

通过电镀、化学镀在金属表面镀耐腐蚀金属或合金(如镀锌、镀铬、镀镍)。镀锌层耐大气腐蚀,防护寿命10-20年;镀铬层硬度高、耐磨、耐腐蚀,常用于提高零件性能;镀镍层耐腐蚀且具装饰性,广泛应用于电子、电器行业。镀层防护效果受厚度和结合力影响,使用中可能磨损、脱落。需严格控制镀液成分、温度、电流密度等参数。

3.2.3 氧化处理

使金属表面形成致密氧化膜,如钢铁发蓝处理、铝合金阳极氧化处理。钢铁发蓝处理在碱性溶液中加热形成黑色四氧化三铁氧化膜,有一定耐腐蚀性和装饰性,耐腐蚀性比未处理钢铁提高2-3倍;铝合金阳极氧化处理形成氧化铝膜,厚度几微米到几十微米,耐腐蚀、耐磨、绝缘,在海洋环境中耐腐蚀性比未处理铝合金提高5-10倍。氧化膜可提高耐腐蚀性,改善外观和耐磨性,效果取决于其厚度、致密性和稳定性。

3.2.4 渗层处理

将耐腐蚀元素渗入金属表面形成渗层,如渗氮、渗碳、渗铝。渗氮处理形成氮化物渗层,硬度高、耐磨、耐腐蚀,如渗氮齿轮表面硬度达HV900-1200,耐磨性提高3-5倍,潮湿环境耐腐蚀性显著提升;渗碳处理提高金属表面硬度和耐磨性,一定程度提升耐腐蚀性;渗铝处理形成铝渗层,耐高温氧化和耐腐蚀,适用于高温设备。此方法工艺复杂、成本高,但能显著提高金属表面性能。

3.3 电化学保护

电化学保护利用电化学原理防金属腐蚀,主要有阴极保护和阳极保护。

3.3.1 阴极保护

给被保护金属设备施加阴极电流,使其电极电位降至腐蚀电位以下,抑制阳极溶解。分外加电流和牺牲阳极两种。外加电流阴极保护用直流电源为大型复杂化工设备(如埋地管道,安装辅助阳极和参比电极,施以电流使电位降至-0.85V(相对饱和硫酸铜参比电极)以下防腐蚀)供电;牺牲阳极阴极保护在金属设备上连接电位更负的金属(如镁、锌、铝)作牺牲阳极,其优先溶解为被保护金属提供电流,适用于小型简单设备或局部保护(如小型储罐底部装镁合金牺牲阳极)。保护效果可通过测量金属电极电位评估,达保护电位时腐蚀速率显著降低。

3.3.2 阳极保护

将被保护金属设备作阳极,通一定阳极电流,使其表面形成致密钝化膜,提高耐腐蚀性。适用于有钝化特性的金属(如不锈钢、钛),在特定腐蚀介质中效果好。如硫酸生产中不锈钢设备,在硫酸浓度70%-80%、温度80-85℃时,施以阳极电流形成氧化铬钝化膜,腐蚀速率可降至0.01mm/a以下。控制参数(阳极电流密度、电位等)需依金属材料和腐蚀介质调整。

3.4 添加缓蚀剂

缓蚀剂是以适当浓度和形式存在于介质中,可防止或减缓金属腐蚀的化学物质。其作用机理是在金属表面形成保护膜隔绝腐蚀介质,或改变介质性质降低腐蚀性。按作用机理和化学成分,缓蚀剂可分为无机、有机和聚合物缓蚀剂。无机缓蚀剂(如铬酸盐、亚硝酸盐)能在金属表面形成氧化膜保护,如循环冷却水系统添加铬酸盐可使碳钢腐蚀速率降至0.05mm/a以下,但有一定毒性和污染。有机缓蚀剂(如胺类、羧酸类、硫脲类)可在金属表面吸附成膜,如酸洗时添加硫脲可显著降低钢铁在酸液中的腐蚀速率并减少酸雾^[4]。聚合物缓蚀剂(如聚丙烯酸、聚乙烯醇)分散性和成膜性好,能在金属表面形成均匀保护膜。缓蚀剂使用方便、成本低、效果显著,广泛应用于化工设备防腐。但选择需考虑介质性质、金属材料种类和腐蚀环境要求,添加量要严格控制(一般在几十到几百ppm之间),过多或过少都会影响防护效果。

3.5 加强设备维护管理

加强设备维护管理是防腐蚀重要举措,具体如下:

3.5.1 定期检查

定期检查化工设备,及时发现腐蚀部位、程度等情况并处理。检查方法有外观检查(肉眼观察表面有无腐

蚀等)、无损检测(如超声波、磁粉、渗透检测,可查内部缺陷与腐蚀)、腐蚀监测(如电阻探针法、线性极化法,能实时监测腐蚀速率)。例如压力容器,每年全面检查,每3-6年内外部检验。

3.5.2 清洗除垢

定期清洗除垢,去除设备表面污垢、腐蚀产物,保持清洁,减少腐蚀介质附着。清洗分化学(用化学药剂溶解,如盐酸除碳酸钙垢、硝酸除铁锈)和物理清洗(机械或高压水冲洗,如刷子、刮刀除垢,高压水枪冲洗)。如换热器每1-2年化学清洗一次,提高换热效率。

3.5.3 控制运行参数

严格控制设备温度、压力、流速等参数,避免过高运行,减少腐蚀。高温设备采取冷却措施控温;高压设备定期检查密封防泄漏;高速流体设备优化结构,减少冲刷。

3.5.4 建立防腐档案

建立设备防腐档案,记录材质、防腐措施、检查、维修等信息,为防腐管理提供依据。分析档案数据可了解腐蚀规律,及时调整措施,提高防腐效果。

结语

化工设备维修中的材料腐蚀问题是一个复杂而又重要的问题,它涉及到材料科学、电化学、化学工程等多个领域。材料腐蚀的机理多种多样,包括化学腐蚀、电化学腐蚀、物理腐蚀、应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳等,这些腐蚀机理受到环境因素、材料因素和设备设计与制造因素等多种因素的影响。为了防止化工设备的材料腐蚀,需要采取综合的防护措施,包括合理选材、表面处理、电化学保护、添加缓蚀剂以及加强设备维护管理等。在未来的化工设备维修和防腐工作中,还需要不断探索和创新,开发更加高效、环保的防腐技术和材料,以适应化工行业不断发展的需求。

参考文献

- [1]杨廷全.化工设备的腐蚀问题与防腐措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(08):16-18.
- [2]王繁华.石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐措施研究[J].中国设备工程,2024,(20):179-181.
- [3]邓连逢.化工设备金属材料腐蚀原因及防护策略思考[J].世界有色金属,2024,(19):28-30.
- [4]牛环宁,滕万凤,童路,等.化工设备腐蚀及防护措施研究[J].造纸装备及材料,2024,53(07):53-55.