

化工设备腐蚀失效的成因分析与预防对策研究

李帮洪, 冉江林*, 罗飞, 杨坤

(瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550500)

摘要 化工设备腐蚀失效问题严重影响化工生产效率、产品质量与安全。本文深入分析了化工设备常见的腐蚀失效类型, 包括均匀腐蚀、局部腐蚀和磨损腐蚀等, 探讨了材料、环境、设计及操作维修等因素导致腐蚀失效的具体原因, 并针对腐蚀失效成因提出了材料选择与改性、设计优化、环境控制与介质处理、操作与维护管理、新技术新工艺应用等预防对策, 以期对化工设备防腐蚀提供有益参考, 保障化工生产的安全稳定运行。

关键词 化工生产; 化工设备; 设备腐蚀; 腐蚀失效; 抗腐蚀能力

中图分类号: TQ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.041

0 引言

在化工行业蓬勃发展的当下, 化工设备作为生产流程的关键物质基础, 其运行状态直接关系到化工生产的效率、产品质量以及整体经济效益, 更与生产安全紧密相连。然而, 腐蚀失效问题却如同隐形的“杀手”, 广泛存在于各类化工设备之中, 严重制约着化工生产的连续性与稳定性, 甚至可能引发灾难性的安全事故, 造成巨大的经济损失与环境破坏。鉴于此, 对化工设备腐蚀失效的成因进行深入探究, 并探寻切实有效的预防对策, 已成为化工领域亟待解决的关键课题, 具有重要的现实意义与应用价值。

1 化工设备腐蚀失效的常见类型介绍

1.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀是指金属表面与周围环境发生化学或电化学反应, 导致金属以相对均匀的方式逐渐减薄的现象。从化学角度来看, 当化工设备的金属材料与腐蚀性介质(如酸、碱、盐溶液等)接触时, 金属原子会失去电子变成离子进入溶液, 同时介质中的氧化剂得到电子, 发生氧化还原反应, 使得金属表面不断被腐蚀。在电化学方面, 金属表面不同区域由于杂质、应力等因素存在电位差, 形成无数微小的腐蚀电池。以碳钢设备在电解质溶液中为例, 其中杂质颗粒或缺陷处可能成为阳极, 周围相对纯净区域作为阴极, 在电解质溶液的导电作用下, 阳极金属溶解进入溶液, 阴极发生还原反应, 整个金属表面遭受均匀腐蚀^[1]。

1.2 局部腐蚀

局部腐蚀是一种在腐蚀介质作用下, 金属材料仅在特定局部区域发生腐蚀, 而其余部位相对完好的现

象。在众多金属腐蚀形式中, 局部腐蚀因具有隐蔽性强、危害性大等特点, 常常给工业生产和设备运行带来严重威胁。

常见的局部腐蚀类型主要包括孔蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等。其中, 孔蚀是一种高度局部化的腐蚀形态, 它通常会在金属表面形成小而深的孔洞。这些孔洞的尺寸可能微小到难以察觉, 但深度却较大, 极具隐蔽性。一旦孔蚀形成, 它就会像一颗“定时炸弹”, 快速向金属深处发展, 最终可能导致设备穿孔泄漏, 进而引发一系列严重的安全事故和经济损失。

而缝隙腐蚀则容易发生在设备的缝隙或屏蔽部位, 如法兰连接处、垫片下方等位置。在这些部位, 由于缝隙的存在, 介质容易滞留并且发生浓缩, 从而引发腐蚀反应。而且随着缝隙宽度的减小, 腐蚀速率反而会增大, 这使得缝隙腐蚀的防控难度进一步提升。在实际工业设备中, 因缝隙腐蚀导致的设备损坏和维修成本占据了相当大的比例, 因此对缝隙腐蚀的深入研究和有效预防至关重要。

1.3 磨损腐蚀

磨损腐蚀, 又称为磨蚀, 是指金属表面在腐蚀性介质与相对运动的固体颗粒、流体等共同作用下发生的腐蚀损坏现象, 是机械磨损与化学或电化学腐蚀联合作用的结果, 其腐蚀速率往往比单纯的机械磨损或化学腐蚀要快得多。在化工设备中, 磨损腐蚀常见于流体输送管道、泵、阀门以及搅拌设备等部件, 在输送含有固体颗粒的浆液管道内, 固体颗粒在流动过程中对管道内壁产生冲刷作用, 同时管道内的腐蚀性介质会与金属表面发生化学反应, 加速金属的腐蚀。

*本文通信作者, E-mail: 2691945482@qq.com。

2 化工设备腐蚀失效的成因分析

2.1 材料因素

不同的金属或合金在特定的化工介质环境下,其化学稳定性差异巨大,不锈钢在一般大气环境下具有良好的耐腐蚀性,但在含有氯离子的溶液中就容易发生点蚀。这是因为氯离子会破坏不锈钢表面的钝化膜,使金属基体暴露在腐蚀介质中,进而引发局部腐蚀。晶粒大小、相组成以及晶界状态等微观特征都与腐蚀行为密切相关。细晶粒材料往往具有更好的抗腐蚀能力,因为其晶界数量多,能够分散腐蚀应力,同时晶界处的原子排列相对混乱,不利于腐蚀反应的快速进行。而多相合金中不同相之间的电位差异,可能会形成微观电池,加速某一相的腐蚀。在材料加工过程中,如焊接、热处理等工艺,会改变材料的局部成分和组织结构^[2]。焊接热影响区的材料性能通常会变差,容易成为腐蚀的薄弱环节。热处理不当可能导致材料内部残余应力过大,这些残余应力会促使腐蚀裂纹的萌生和扩展。

2.2 环境因素

大气环境对化工设备腐蚀影响显著,大气中的氧气、水蒸气以及各种污染物如二氧化硫、氮氧化物等是腐蚀的“催化剂”。氧气在金属表面发生氧化反应,加速金属腐蚀进程;水蒸气则为腐蚀反应提供了必要的介质,使得金属表面容易形成电解质溶液,进而促进电化学腐蚀的发生;而二氧化硫等污染物会与水蒸气结合生成酸性物质,进一步降低金属表面的pH值,加剧腐蚀程度。化工生产过程中接触到的各种化学介质环境也是腐蚀失效的重要诱因。例如:强酸、强碱溶液会直接与金属发生化学反应,使金属逐渐溶解或被置换,如不锈钢在浓硫酸环境中,其表面的钝化膜会被破坏,导致基体金属遭受严重腐蚀。含有氯离子的溶液对许多金属具有极强的腐蚀性,氯离子能够穿透金属表面的保护膜,引发点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀现象,这种局部腐蚀往往难以察觉,但一旦发生,可能会迅速导致设备穿孔、泄漏等失效情况。高温环境下,金属的腐蚀速率通常会加快,一方面是因为化学反应速率随温度升高而增加;另一方面,高温会使金属材料的微观结构发生变化,降低其抗腐蚀性能。而湿度的高低则直接影响金属表面的水膜形成和厚度,进而影响腐蚀反应的进行。在高湿度环境中,金属表面容易长期保持湿润状态,为腐蚀提供了持续的条件^[3]。这些环境因素相互交织、相互影响,共同构成了化工设备腐蚀失效的复杂外部条件。

2.3 设计因素

在设备选材阶段如果未充分考虑化工生产环境中介质的腐蚀性,如在强酸环境下选用普通碳钢而非耐酸的不锈钢或其他合金材料,就会使设备在投入使用后很快遭受腐蚀。设备的结构设计同样至关重要,存在不合理结构时,例如设备内部有死角或缝隙,这些区域容易积聚腐蚀性介质,导致局部腐蚀加剧,而且在这些部位介质的流动不畅,难以通过正常的工艺操作进行清洗和置换,使得腐蚀介质长期滞留,加速腐蚀进程。设备的焊接设计也会影响腐蚀失效,焊接接头处往往是应力集中区域,若焊接工艺不当,如焊接缺陷、焊缝形状不佳等,会使接头处的金属材料更容易受到腐蚀介质的侵蚀,而且焊接过程中可能会改变材料的微观结构,降低其耐腐蚀性能。在设备的密封设计方面,若密封结构设计不合理,密封材料选择不合适,就会导致介质泄漏,加速设备整体的腐蚀失效。

2.4 操作与维修因素

在操作过程中,如果工艺参数控制不稳定,如温度、压力、流量等超出设备设计范围,会使设备长期处于超负荷或异常工况下运行,加速腐蚀进程,温度过高会加剧化学反应速率,使腐蚀介质与设备材料的反应更加剧烈,从而加快设备腐蚀。操作人员未严格按照操作规程进行操作,如在设备启动、停车过程中未遵循正确的顺序,可能导致设备内部介质分布不均,形成局部腐蚀环境。在维修方面,维修不及时或维修不当也是导致腐蚀失效的重要原因。设备出现局部腐蚀或损坏后,若未能及时发现并维修,腐蚀会进一步扩散,最终导致设备整体失效。而且在维修过程中,若选用的维修材料与原设备材料不匹配,或者维修工艺不符合要求,如焊接修复时焊接工艺不当,不仅无法有效修复腐蚀部位,还会引入新的腐蚀隐患,进一步降低设备的耐腐蚀性能,缩短使用寿命。

3 化工设备腐蚀失效的预防对策

3.1 材料选择与改性

从材料选择方面来看,首先需根据化工介质的性质精准选材,对于处于酸性环境中的设备,如硫酸、盐酸等强酸介质,不锈钢很快就被腐蚀,而采用高硅铸铁或者衬有橡胶、塑料等耐酸材料的设备则能有效抵御腐蚀。若是处理碱性介质,如烧碱溶液,普通碳钢易被腐蚀,这时选用耐碱的镍基合金材料就会是更好的选择。考虑到不同材料在不同温度、压力下的稳定性也至关重要,在高温环境下,一些材料可能会加速腐蚀,此时就得选用具有高温稳定性的合金材料,

如在高温高压的合成氨设备中,常采用铬钼钢来增强抗腐蚀能力。材料改性更是为化工设备防腐蚀开辟了新路径。一方面,可以改变材料的微观组织结构来提升其耐蚀性,如对普通碳钢进行热处理,在特定的温度和冷却速度下,使其内部的晶粒细化、组织均匀化,从而降低腐蚀速率。另一方面,添加合金元素是常用的改性手段,以不锈钢为例,在铁中添加铬、镍等元素,铬能使不锈钢表面形成一层致密的氧化铬膜,这层膜能有效隔绝腐蚀介质与基体的接触,而镍则能进一步稳定不锈钢的组织结构,提高其耐蚀性。

3.2 设计优化

从结构设计层面而言,应尽量选择简洁流畅的外形,避免出现过多的缝隙、死角和凹槽,因为这些部位极易残留腐蚀性介质,难以清理,从而加速腐蚀进程。在设计管道连接处时,优先采用焊接方式代替螺纹连接,焊接连接的密封性更好,能减少介质在连接处的积聚,降低缝隙腐蚀风险;对于一些复杂结构的设备内部,要合理设置排水孔和排气孔,确保在设备停机时,内部液体顺利排出,防止液体长期停留造成腐蚀,如在卧式储罐底部设计适当的坡度并安装排液阀,便于将残留液体排空。在材料布局上,应充分考虑不同部位所处的腐蚀环境差异。对于直接与腐蚀性介质接触的部位,如反应器的内壁、管道的内表面等,即使整体结构选用同一基础材料,也应通过合理设计,如增加局部衬里、涂层等方式增强其耐蚀性^[4]。以常见的碳钢设备为例,在其内部可衬上一层耐腐蚀的橡胶、塑料或玻璃钢等材料,这些衬里材料能形成一道有效的防护屏障,将碳钢基体与腐蚀介质隔离开,大幅延长设备的使用寿命。

3.3 环境控制与介质处理

湿度是引发腐蚀的重要因素,特别是在含有腐蚀性气体的环境中,高湿度会使金属表面形成水膜,加速电化学腐蚀。因此,在设备存放区域及部分非连续作业的化工厂房,可采用除湿设备将相对湿度控制在 60% 以下,如一些对湿度敏感的电子化工设备车间,可配备工业除湿机,定期监测湿度并自动调节,降低腐蚀风险。通风换气也是重要的环境控制手段,在酸性或碱性气体易积聚的反应釜车间,安装轴流风机等通风设备,每小时换气次数不少于 5~10 次,及时排出有害气体,避免其在设备表面凝结成腐蚀性液滴。在一些沿海化工企业,还需考虑海水飞溅及海雾中的盐分对设备的侵蚀,可通过设置防风帐篷、厂房封闭等措施阻挡盐雾侵蚀^[5]。在介质处理方面,去除腐蚀性杂质是有效手段。以循环冷却水系统为例,水中常含

有溶解氧、硫化氢、氯离子等腐蚀性成分,可采用离子交换树脂法去除氯离子,利用鼓风机曝气或真空脱气法去除溶解氧,运用生物处理法消除硫化氢。

3.4 操作与维护管理

在日常操作环节,严格遵守操作规程是基础中的基础,每一位操作人员都必须精准按照既定流程进行开工、停工以及正常运行时的各项操作,精准控制工艺参数至关重要,依据不同化工设备与工艺要求,将温度、压力、流速等参数稳定在合理区间,如在一些酸性水溶液的化工反应釜中,温度每升高 10℃,腐蚀速率可能会成倍增加,所以借助高精度的温度传感器与自动控制系统,把温度波动范围控制在极小的幅度内,可显著降低腐蚀风险。设备维护管理同样不可小觑,定期巡检是发现问题的“千里眼”和“顺风耳”,维护人员需按照固定的时间周期和详细检查清单,对设备的外观、焊缝、连接处等易腐蚀部位进行全面细致的检查,如检查管道外表面是否有腐蚀产物附着,设备表面的防腐涂层是否出现鼓泡、脱落等现象,一旦发现异常,立即记录并安排处理^[6]。

4 结束语

化工设备的腐蚀失效问题给化工行业的安全生产与经济效益带来了严峻挑战。本文深入剖析了化工设备腐蚀失效的类型、成因,从材料选择与改性、设计优化、环境控制、操作维护管理到新技术应用,为化工设备防腐蚀提供参考。未来,化工行业应强化腐蚀防控意识,将先进理念与技术融入设备全生命周期管理,以降低腐蚀风险,保障生产安全稳定,延长设备寿命,推动化工行业绿色、高效、可持续发展。

参考文献:

- [1] 代军荣,谭隆,王盛洁.石油机械设备防腐设计要点分析[J].中国设备工程,2025(10):90-92.
- [2] 张荣华.浅谈化工机械设备管理与维修保养技术[J].中国设备工程,2025(09):60-62.
- [3] 李小松,龚升武.浅析化工生产装置的设备腐蚀与防护[J].中国设备工程,2025(09):178-179.
- [4] 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.
- [5] 陈畏畏.化工设备检修作业中的安全隐患及对策[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(04):25-27.
- [6] 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.