

# 特种设备压力容器的腐蚀机制及防护措施探讨

王根山

湖北特种设备检验检测研究院仙桃分院 湖北 仙桃 433000

**摘要:** 随着工业领域对特种设备压力容器需求的增长,其腐蚀问题愈发凸显。本文聚焦特种设备压力容器腐蚀问题,深入探讨其腐蚀机制。首先介绍压力容器腐蚀的主要类型,涵盖物理、化学、电化学、温度及微生物腐蚀等;接着分析影响压力容器腐蚀的多种因素,包括环境、材料、应力以及施工与维护等方面;最后详细阐述针对压力容器腐蚀的防护措施,如合理选材、优化结构、表面处理、电化学防护、环境控制以及定期检测与保养等,旨在为保障压力容器安全运行提供理论依据与实践指导。

**关键词:** 特种设备;压力容器;腐蚀机制;防护措施

引言:特种设备中的压力容器广泛应用于众多工业领域,其安全运行至关重要。然而,腐蚀问题一直是影响压力容器安全性和使用寿命的关键因素。压力容器在复杂的工作环境中,会受到各种因素作用而发生腐蚀,不同类型的腐蚀机制相互交织,给设备带来不同程度的损害。一旦压力容器因腐蚀引发故障,不仅会造成经济损失,还可能引发严重的安全事故,威胁人员生命安全。因此,深入研究压力容器腐蚀机制,并探索有效的防护措施,对于保障压力容器安全稳定运行、推动工业生产健康发展具有极其重要的现实意义。

## 1 压力容器腐蚀的主要类型

### 1.1 物理腐蚀

物理腐蚀并非基于化学反应,而是因物理作用导致材料损失。在压力容器使用场景中,常见情况是金属材料在高温液态金属环境中,金属原子逐渐溶解进入液态金属,造成容器壁厚度减薄。例如,盛装液态锌的压力容器,在特定温度下,容器材质中的铁原子会不断向液态锌中扩散溶解,随着时间推移,容器强度下降,存在破裂风险。这种腐蚀过程不伴随新物质生成,仅是金属原子单纯物理迁移,对压力容器长期安全运行构成潜在威胁,需在选材和工艺设计时充分考虑。

### 1.2 化学腐蚀

化学腐蚀是压力容器金属表面与周围介质直接发生化学反应而引起的腐蚀现象。介质通常为干燥气体或非电解质溶液,如氧气、二氧化硫等。以压力容器接触氧气为例,金属铁与氧气反应生成铁的氧化物,即铁锈,这一过程会使金属表面不断损耗,容器壁变薄,强度降低。化学腐蚀反应速度受温度、介质浓度等因素影响,温度越高、介质浓度越大,反应越剧烈。在一些高温、强腐蚀性气体环境中,压力容器化学腐蚀问题更为突

出,需采取有效防护措施延缓腐蚀进程。

### 1.3 电化学腐蚀

电化学腐蚀是压力容器腐蚀中最常见且危害较大的一种类型。当金属与电解质溶液接触时,由于金属内部存在电位差,形成微电池,产生电流,导致金属溶解。例如,压力容器钢材中不同成分或存在杂质时,在潮湿环境中,就会形成无数微小原电池,活泼金属作为阳极失去电子被氧化,发生腐蚀。像在含有盐分的潮湿空气或水溶液环境中,压力容器表面会形成电解质薄膜,加速电化学腐蚀。这种腐蚀往往在局部区域迅速发展,形成腐蚀坑,严重降低压力容器结构强度,引发安全事故<sup>[1]</sup>。

### 1.4 温度腐蚀

温度对压力容器腐蚀有着显著影响,温度腐蚀并非独立腐蚀类型,而是温度因素加速其他腐蚀过程。一方面,温度升高会加快化学反应速率,无论是化学腐蚀还是电化学腐蚀,在高温下反应速度都会大幅提升,使腐蚀加剧。另一方面,高温会使金属材料组织结构发生变化,降低其耐腐蚀性能。例如,某些不锈钢在高温下晶间腐蚀敏感性增加,容易在晶界处发生腐蚀。此外,温度变化还会引起热应力,与腐蚀介质共同作用,导致应力腐蚀开裂,严重影响压力容器安全,需在设计和使用中考虑温度控制。

### 1.5 微生物腐蚀

微生物腐蚀是微生物生命活动对压力容器金属产生的腐蚀作用。在压力容器所处环境中,如土壤、水等,存在各种微生物,其中硫酸盐还原菌等对金属腐蚀影响较大。硫酸盐还原菌在缺氧环境中,能将硫酸盐还原为硫化氢,硫化氢与金属反应生成金属硫化物,加速金属腐蚀。例如,埋地压力管道,土壤中的微生物附着在管道表面,形成生物膜,在膜内进行代谢活动,改变局部

环境化学性质，破坏金属表面保护膜，促进腐蚀发生。

## 2 影响压力容器腐蚀的因素

### 2.1 环境因素

环境因素对压力容器腐蚀起着关键作用。首先是介质性质，不同介质对金属的腐蚀性差异显著。例如，强酸、强碱溶液会与金属发生剧烈化学反应，加速腐蚀；而一些中性介质在特定条件下也可能引发腐蚀。其次是环境湿度，在潮湿环境中，金属表面易形成水膜，为电化学腐蚀创造条件，湿度越大，腐蚀速率往往越快。温度也是重要因素，高温会加快化学反应和电化学腐蚀的速度，同时改变介质性质，加剧腐蚀。此外，环境中是否存在腐蚀性气体，如二氧化硫、氯化氢等，这些气体溶解在水中形成酸性溶液，会严重腐蚀压力容器。

### 2.2 材料因素

材料本身的特性直接影响压力容器的耐腐蚀性。金属材料的化学成分是关键，不同金属元素及其含量决定了材料的抗腐蚀能力。例如，不锈钢中添加铬、镍等元素，能在表面形成致密的氧化膜，有效阻止腐蚀介质侵入。材料的组织结构也不容忽视，晶粒粗大、存在杂质和缺陷的材料，腐蚀更容易从这些薄弱部位开始并扩展。此外，材料的加工工艺会影响其耐腐蚀性，如冷加工会使金属产生内应力和晶格畸变，降低耐腐蚀性能；热处理不当也可能改变材料的组织结构，影响抗腐蚀能力<sup>[2]</sup>。

### 2.3 应力因素

应力对压力容器腐蚀有着重要影响。首先是工作应力，压力容器在运行过程中承受内压、外压等机械应力，当应力超过材料的屈服强度时，会产生塑性变形，破坏金属表面的保护膜，使腐蚀介质更容易与金属接触，加速腐蚀。而且，应力集中部位，如焊缝、缺口、几何形状突变处等，应力水平较高，腐蚀更容易在这些部位发生和发展，形成腐蚀坑或裂纹。其次是残余应力，在压力容器制造过程中，如焊接、冷加工等工艺会产生残余应力，残余应力会使金属的电极电位发生变化，促进电化学腐蚀，并且残余应力与工作应力叠加，可能使局部应力超过材料的承载能力，引发应力腐蚀开裂，严重威胁压力容器的安全。

### 2.4 施工与维护因素

施工过程中的操作对压力容器腐蚀有显著影响。焊接工艺不当，如焊接参数选择错误、焊接顺序不合理等，会导致焊缝区域产生气孔、夹渣、裂纹等缺陷，这些缺陷成为腐蚀的起始点，加速局部腐蚀。而且，焊接时若保护措施不到位，会使焊缝金属氧化，降低耐腐蚀性。在安装过程中，若压力容器表面受到机械损伤，如

划痕、碰撞等，会破坏金属表面的保护层，为腐蚀介质提供侵入途径。维护方面，若长期不进行清洁保养，压力容器表面会积累污垢、灰尘等，这些物质可能吸附腐蚀性介质，加剧腐蚀。

## 3 压力容器腐蚀的防护措施

### 3.1 合理选择材料

合理选材是压力容器腐蚀防护的基础与关键。需依据压力容器所处的工作环境，如介质种类、浓度、温度、压力等条件，精准挑选具有良好耐腐蚀性的材料。

对于盛装强腐蚀性介质的压力容器，可选用不锈钢、镍基合金等高端耐蚀材料。例如，在化工领域，处理硫酸、盐酸等强酸介质时，高纯度的奥氏体不锈钢凭借其表面能形成致密氧化膜的特性，可有效抵御酸液侵蚀。若处于高温、高压且腐蚀性强的极端环境，镍基合金则更为合适，其出色的耐高温腐蚀和抗氧化性能，能确保压力容器长期稳定运行。对于一般腐蚀环境，碳钢经适当防腐处理后也可使用。但要注意，不同牌号的碳钢耐腐蚀性有差异，应根据具体工况选择。此外，还可考虑采用复合材料，将耐蚀性好的金属或非金属材料与基体材料复合，充分发挥各自优势，既降低成本，又能提高耐腐蚀性能，满足不同压力容器的使用需求<sup>[1]</sup>。

### 3.2 优化结构设计

优化结构设计对于预防压力容器腐蚀意义重大，科学合理的结构能有效减少腐蚀发生，延长设备使用寿命。在设计时，应尽量避免结构中出现缝隙。缝隙处容易积存腐蚀介质，形成闭塞电池，加剧局部腐蚀。例如，可采用对接焊缝代替搭接焊缝，减少缝隙产生的可能性。同时，要合理设置排水孔和排气孔，及时排出容器内积聚的液体和气体，避免介质在局部停留造成腐蚀。对于容易产生应力集中的部位，如开孔、转角处等，要进行特殊设计。可以采用圆角过渡，降低应力集中系数，减少因应力引发的腐蚀开裂风险。此外，结构的设计还要便于内部清洁和检查，方便定期对容器进行维护，及时发现并处理潜在的腐蚀问题。通过优化结构设计，使压力容器在满足使用功能的前提下，最大程度降低腐蚀发生的几率，保障设备的安全稳定运行。

### 3.3 表面处理

表面处理是增强压力容器耐腐蚀性能的重要手段，通过在金属表面形成保护层，隔绝腐蚀介质与基体金属的接触。常见的表面处理方法有多种。涂层涂覆是较为广泛应用的方式，像环氧树脂涂层、聚氨酯涂层等，它们具有良好的化学稳定性和附着力，能有效阻挡水、氧气及腐蚀性离子的侵入，适用于多种腐蚀环境。金属镀

层处理也不可或缺,例如镀锌、镀镍等,镀层金属一般比基体金属更活泼,在腐蚀环境中优先被腐蚀,从而保护基体,而且镀层还能改善金属表面的外观和耐磨性。此外,渗镀技术也发挥着重要作用,如渗铝、渗锌,能使铝、锌等元素扩散到金属表面层,形成致密的合金层,显著提高耐腐蚀能力。表面处理不仅能提升压力容器的抗腐蚀性能,还能在一定程度上增强其机械性能,为压力容器的安全稳定运行提供可靠保障。

### 3.4 电化学防护

电化学防护是利用电化学原理来减缓或阻止压力容器腐蚀的有效方法,主要包括牺牲阳极保护法和外加电流阴极保护法。牺牲阳极保护法是将电位更负的金属(如镁、铝、锌及其合金)与被保护的压力容器金属连接,形成原电池。在腐蚀环境中,电位负的金属作为阳极不断溶解,优先被腐蚀,而压力容器金属成为阴极得到保护。这种方法简单易行,无需外部电源,适用于小型或结构简单的压力容器,以及土壤、淡水等环境中的设备。外加电流阴极保护法是通过外部直流电源,将直流电的正极连接到辅助阳极,负极连接到被保护的压力容器金属上。通电后,辅助阳极发生氧化反应,被保护金属表面阴极极化,抑制了金属的腐蚀反应。此方法适用于大型或结构复杂的压力容器,以及海水、化工介质等腐蚀性较强的环境。电化学防护能有效降低压力容器的腐蚀速率,延长其使用寿命,保障设备的安全运行。

### 3.5 环境控制

环境控制作为压力容器腐蚀防护的关键环节,通过调节压力容器所处环境的各项参数,能有效降低腐蚀发生的可能性。在湿度控制方面,对于处于潮湿环境中的压力容器,可采用除湿设备降低周围空气湿度,防止金属表面形成水膜,从而抑制电化学腐蚀的启动。例如在地下室或潮湿车间安装除湿机,维持相对干燥的环境。温度控制也至关重要,高温会加速化学反应和电化学腐蚀速率,因此对于高温工况下的压力容器,要采取有效的隔热措施,减少热量传递,降低容器表面温度。同时,避免温度的急剧变化,防止因热应力引发应力腐蚀开裂。对于介质环境,可通过净化处理去除其中的腐蚀性杂质,如除氧、除氯离子等。在一些化工生产中,对进入压力容器的介质进行预处理,降低其腐蚀性。此外,合理控制介质的流速,避免流速过快对容器内壁造

成冲刷腐蚀,确保压力容器在相对温和、稳定的环境中运行,有效延长其使用寿命。

### 3.6 定期检测与保养

定期检测与保养是保障压力容器安全运行、预防腐蚀问题恶化的重要举措。定期检测能够及时发现压力容器潜在的腐蚀隐患。通过无损检测技术,如超声检测、磁粉检测、渗透检测等,可精准发现容器表面及内部的腐蚀缺陷,像裂纹、气孔、夹渣等,还能测定腐蚀部位的尺寸和深度,评估腐蚀程度。同时,进行厚度测量,了解容器壁厚的减薄情况,判断是否仍在安全使用范围内。保养工作同样不可或缺。要定期对压力容器进行清洁,去除表面的污垢、灰尘和腐蚀产物,防止其吸附腐蚀性介质。对于有保温层的容器,要检查保温层是否完好,若有破损及时修复,避免水分侵入导致内部腐蚀。另外,定期检查容器的安全附件,如压力表、安全阀等,确保其灵敏可靠。根据检测结果制定针对性的保养方案,对轻微腐蚀部位进行修复和防护处理。通过持续、规范的定期检测与保养,可有效延长压力容器的使用寿命,确保其始终处于安全稳定的运行状态<sup>[4]</sup>。

### 结束语

特种设备压力容器的腐蚀问题关乎生产安全与经济效益,其腐蚀机制复杂多样,涵盖物理、化学、电化学等多个层面,受环境、材料、应力等诸多因素影响。本文所探讨的合理选材、优化结构、表面处理、电化学防护、环境控制以及定期检测保养等防护措施,为应对腐蚀挑战提供了系统思路。未来,随着材料科学、电化学等领域的不断发展,需持续探索更高效、经济的防护技术与策略,强化压力容器全生命周期管理,以保障特种设备安全稳定运行,推动相关行业健康可持续发展。

### 参考文献

- [1]刘东平.关于特种设备锅炉压力容器检验分析[J].华东科技:综合,2020,(11):0451-0451.
- [2]徐长伟.特种设备压力容器焊接工艺分析[J].市场调查信息:综合版,2021,(21):00105-00107.
- [3]王毅.特种设备压力容器焊接方法研究[J].中国化工贸易,2020,12(30):70-70.
- [4]周喜彦,刘晓坤.锅炉、压力容器等特种设备的安全性评估与防护措施[J].中国科技期刊数据库工业A,2023,(07):0178-0180.