

化工设备中压力容器失效的原因与预防性维护研究

李江波 白巧秀 贺建英 申世荣 徐海利
陕西榆能化学材料有限公司 陕西 榆林 719300

摘要: 随着化工行业的快速发展,压力容器作为其核心设备,其安全性和稳定性至关重要。本文深入研究了化工设备中压力容器失效的原因,包括强度不足、疲劳损伤、腐蚀影响、蠕变变形及操作不当等。针对这些原因,文章提出了一系列预防性维护措施,如优化设计、严格质量控制、定期检验、故障预警及处理、制定维护策略和加强人员培训等,旨在确保压力容器的安全运行,减少事故风险。

关键词: 化工设备; 压力容器; 失效原因; 预防性维护

引言: 化工设备中的压力容器,作为储存和运输高压、高温、腐蚀性介质的关键组件,其安全性和可靠性直接关系到化工生产的安全与效率。然而,由于操作条件恶劣、材料老化、设计缺陷等因素,压力容器常面临失效风险。本文旨在探讨压力容器失效的主要原因,并提出有效的预防性维护策略,以期提高设备的使用寿命,保障化工生产的安全稳定运行,为企业带来更大的经济效益和社会效益。

1 化工设备压力容器概述

1.1 压力容器的定义与分类

(1) 定义及作用。压力容器是指能够承受一定压力(内部或外部)的密闭容器,是化工、石油、能源、医药等行业广泛使用的关键设备。其主要作用是储存、运输、反应或分离各种气体、液体或气液混合物,确保工艺流程的顺利进行。压力容器不仅要求具有足够的强度和稳定性,还需具备良好的密封性和耐腐蚀性,以满足复杂工艺条件的要求。(2) 不同承压方式下的分类。压力容器根据承压方式的不同,可分为内压容器和外压容器。内压容器主要承受容器内部介质的压力,是化工生产中最为常见的类型。而外压容器则主要承受外部压力,通常用于真空设备或需要承受外部挤压的特殊场合。(3) 根据压力大小、工作温度及制作方式的分类。根据压力大小,压力容器可分为低压、中压、高压和超高压容器。工作温度方面,则有常温、中温和高温容器之分。此外,根据制作方式的不同,压力容器还可分为焊接容器、锻造容器、铸造容器和组合容器等。这些分类有助于针对不同工艺需求,选择合适的压力容器类型和规格。

1.2 压力容器的使用环境及特点

(1) 高温、高压、腐蚀性等复杂环境。压力容器通常工作在高温、高压和腐蚀性极强的环境中。这些极端

条件对容器的材料选择、结构设计、制造工艺和维护保养都提出了极高的要求。为确保容器的安全运行,必须采用耐高温、耐高压、耐腐蚀的材料,并严格控制制造工艺和质量检验流程。(2) 压力容器的危险性、环境污染及影响设备正常运行的特点。由于压力容器内部储存的介质往往具有易燃、易爆、有毒或腐蚀性等特点,一旦发生泄漏或爆炸事故,将对人员和环境造成极大的危害。同时,压力容器的失效还可能影响整个生产线的正常运行,导致生产中断和经济损失。因此,加强压力容器的安全管理和预防性维护至关重要。

2 化工设备压力容器失效原因分析

2.1 压力容器强度失效

(1) 材料屈服或断裂引起的失效模式。容器的主要功能之一是承受内部介质的压力,因此其材料必须具备足够的强度和韧性。然而,当容器内的压力超过材料的屈服强度时,材料会发生塑性变形,即所谓的屈服现象。如果压力继续增加,直至超过材料的抗拉强度,材料将发生断裂,导致容器失效。这种失效模式通常表现为容器的突然破裂,伴随巨大的能量释放,可能引发爆炸事故。(2) 材料的脆性转变与焊接接口缺陷。在某些条件下,原本韧性较好的材料可能会发生脆性转变,尤其是在低温环境下,材料的韧性会显著降低,易于发生脆性断裂。此外,焊接是压力容器制造过程中的关键环节,焊接接口处往往存在应力集中、气孔、夹渣等缺陷,这些缺陷会成为裂纹萌生的源头,降低容器的整体强度,增加失效风险。

2.2 疲劳破裂

(1) 交变应力作用下的长期损伤。在化工生产中,一些压力容器需要承受周期性变化的压力,这种交变应力会导致材料内部的微观结构发生变化,产生疲劳损伤。随着使用时间的延长,疲劳损伤逐渐积累,最终在

材料最薄弱处形成裂纹,并不断发展,直至导致容器破裂。(2)疲劳裂纹的形成、扩展与断裂阶段。疲劳裂纹的形成是材料在交变应力作用下微观损伤累积的结果。一旦裂纹形成,就会在应力作用下持续扩展,扩展速度受应力水平、裂纹形状、材料性能等多种因素影响。当裂纹扩展到一定程度,容器的剩余强度不足以承受当前压力时,就会发生断裂^[1]。

2.3 腐蚀破裂

(1)全面腐蚀与局部腐蚀。腐蚀是压力容器失效的主要原因之一。全面腐蚀是指容器材料表面均匀受到腐蚀介质的侵蚀,导致材料厚度均匀减薄,影响容器的承载能力。而局部腐蚀则更为危险,它包括区域腐蚀、点腐蚀、晶间腐蚀等多种形式,这些腐蚀形式往往集中在容器的某个区域,导致该区域材料迅速减薄,甚至穿孔。(2)应力腐蚀与腐蚀疲劳。应力腐蚀是指在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下,材料发生低应力脆性断裂的现象。腐蚀疲劳则是材料在交变应力和腐蚀介质共同作用下,加速疲劳裂纹的形成和扩展,最终导致破裂。这两种腐蚀形式均对压力容器的安全运行构成严重威胁。

2.4 蠕变失效

(1)高温下拉应力作用下的塑性变形。蠕变失效主要发生在高温高压环境中。在高温下拉应力的作用下,金属材料会发生缓慢的塑性变形,导致容器壁厚减薄、形状改变,甚至丧失承载能力。蠕变过程是一个长期的过程,但一旦发展到破裂阶段,往往伴随着突然的灾难性后果。(2)蠕变破裂的罕见性与条件。蠕变破裂虽然较为罕见,但在特定条件下(如高温、高应力、长时间作用)却可能发生。蠕变破裂的特点是断裂前没有明显的塑性变形,且断裂面通常呈晶粒状。因此,对于工作在高温高压环境下的压力容器,必须充分考虑蠕变失效的风险。

2.5 刚度失效与失稳失效

(1)过度弹性形变引起的刚度失效。刚度失效是指压力容器在受到外力作用时,由于材料弹性模量下降或结构不合理,导致容器发生过度弹性形变,无法维持原有的形状和尺寸稳定性。刚度失效虽然不会直接导致容器破裂,但会影响容器的正常功能和安全性^[2]。(2)压力作用下容器失去规则几何形状的失稳失效。失稳失效是指压力容器在内部压力或外部载荷作用下,失去原有的规则几何形状,如发生鼓胀、扭曲等。失稳失效通常发生在容器的设计或操作条件不满足稳定性要求时,如壁厚过薄、支撑结构不足等。失稳失效会显著降低容器的承载能力,甚至导致破裂。

2.6 泄漏失效

(1)接口密封面失效或器壁穿透性裂纹。泄漏是压力容器常见的失效形式之一。接口密封面因材料老化、安装不当或受力不均等原因而失效,导致介质泄漏。此外,器壁上的穿透性裂纹也是泄漏的重要原因。(2)泄漏介质可能引起的燃烧、爆炸和中毒事故。泄漏不仅会造成资源的浪费和环境的污染,更重要的是,泄漏介质如易燃易爆气体、有毒有害液体等,一旦遇到明火或暴露于空气中,就可能引发燃烧、爆炸事故,对人员生命安全和环境构成严重威胁。同时,有毒介质的泄漏还可能导致人员中毒。

3 化工设备压力容器预防性维护措施

3.1 优化设计与制造

(1)合理的结构设计与制造工艺选择。压力容器的设计制造阶段,是其生命周期中至关重要的环节。设计时应充分考虑容器的使用场景、介质特性、压力等级、温度范围等,确保结构设计合理、应力分布均匀,避免局部应力过高导致的疲劳损伤。制造工艺的选择同样重要,应采用先进的制造工艺和技术,如自动化焊接、热处理等,减少制造过程中的缺陷,提高容器的整体质量。同时,设计时应预留足够的检查孔和检修空间,以便日后进行维护和检查。(2)减少应力集中与采用抗疲劳材料。应力集中是导致压力容器疲劳损伤和失效的主要原因之一。设计时,应尽量避免结构突变和尺寸突变,如采用圆角过渡、光滑连接等方式减少应力集中。同时,应选用具有高抗疲劳性能的材料,如低合金高强度钢、不锈钢等,以提高容器的抗疲劳能力。此外,对于长期承受交变应力的容器,应考虑增加疲劳强度设计裕量,确保在长期使用过程中不发生疲劳破坏^[3]。

3.2 严格质量控制与检验

(1)原材料的质量控制。原材料的质量直接影响压力容器的制造质量和使用寿命。因此,在采购原材料时,应选择信誉良好、质量稳定的供应商,并严格进行质量检验。检验内容应包括材料的化学成分、力学性能、无损检测(如超声波检测、射线检测)等,确保原材料符合设计要求和相关标准。对于有特殊要求的容器,如需要承受高温高压、腐蚀介质等,应选择具有相应性能的专用材料。(2)焊接工艺与焊缝质量的检验。焊接是压力容器制造过程中的关键环节,其质量直接影响容器的整体强度和密封性能。因此,应制定详细的焊接工艺规程,明确焊接方法、焊接材料、焊接参数等。同时,对焊工进行严格的培训和考核,确保其具备相应的焊接技能和资质。焊缝质量检验应包括外观检查、无

损检测（如超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测等）和力学性能试验（如拉伸试验、弯曲试验、冲击试验等），确保焊缝的质量和强度满足要求。

3.3 定期检验与维护

（1）压力容器的定期检验计划。为确保压力容器的安全运行，应制定详细的定期检验计划。检验周期应根据容器的使用情况、介质特性、压力等级等因素确定，通常为每年或每两年进行一次全面检验。检验内容应包括容器的外观检查、壁厚测量、焊缝质量检测、安全附件校验（如压力表、安全阀、爆破片等）等。通过定期检验，及时发现并处理潜在的缺陷和问题，确保容器的整体性能和安全性。（2）对腐蚀、压力、温度等关键参数的监控。腐蚀、压力和温度是影响压力容器性能和安全性的重要因素。因此，应定期对这些参数进行监控和测量。对于易受腐蚀的容器，应定期进行腐蚀检测，如采用电化学腐蚀监测、涡流检测等方法，了解容器的腐蚀状况，并采取必要的防腐措施。同时，应设置压力表和温度计等监测设备，实时掌握容器的运行状况，确保其在安全范围内运行^[4]。

3.4 异常声响与故障处理

（1）异常情况下的快速响应与处理流程。在压力容器运行过程中，可能会出现异常声响、泄漏等故障。为确保人员安全和设备完整，应制定详细的快速响应与处理流程。一旦出现故障，操作人员应立即采取紧急措施，如切断电源、关闭阀门等，并报告给相关部门和领导。同时，应根据故障类型采取相应的处理措施，如修复泄漏、更换受损部件等。在处理过程中，应确保操作人员的安全，避免发生次生灾害。（2）受损部件的修理或更换。对于受损的部件，应及时进行修理或更换。修理工作应由具备相应资质的专业人员进行，并遵循相关的维修规程。如需更换部件，应选择与原部件相同或性能更优的材料，并确保更换后的部件满足设计要求。在修理或更换部件后，应进行必要的检验和测试，确保容器的整体性能和安全性。

3.5 预防性维护策略制定

（1）结合企业实际情况制定维护标准与规定。不同企业的化工设备压力容器在类型、使用环境等方面存在差异。因此，在制定预防性维护策略时，应结合企业的实际情况进行。维护标准与规定应明确维护周期、维护

内容、维护人员职责等，以确保维护工作的规范性和有效性。（2）对压力容器运行稳定参数进行调整。为确保压力容器在安全稳定的参数范围内运行，应定期对其进行调整。调整内容包括工作压力、工作温度、介质流量等。调整工作应根据容器的实际情况和监测数据进行，以确保调整后的参数符合设计要求和安全规范。

3.6 加强人员培训与管理

（1）操作人员的专业培训与安全教育。操作人员的专业技能和安全意识对压力容器的安全运行至关重要。因此，应定期对操作人员进行专业培训和安全教育。培训内容应包括容器的结构原理、操作规程、安全注意事项等。通过培训，提高操作人员的专业技能和安全意识，减少因操作不当引发的安全事故。（2）管理人员对预防性维护工作的监督与执行。管理人员的监督与执行对预防性维护工作的有效性具有重要影响。管理人员应定期对维护工作进行检查和评估，确保维护工作的规范性和有效性。同时，应建立健全的预防性维护管理体系，明确各级人员的职责和权限，确保维护工作的顺利开展。此外，企业还应加强对预防性维护工作的投入，包括资金、人员和技术等方面的支持。通过持续改进和创新，不断完善预防性维护策略和技术手段，提高压力容器的安全性和稳定性。

结束语

综上所述，化工设备中压力容器的失效是多种因素共同作用的结果，但通过合理的预防性维护措施，可以有效降低失效风险。本文提出的各项维护策略，不仅有助于提升压力容器的安全性和稳定性，还能延长设备寿命，减少生产成本。未来，随着技术的不断进步，我们将继续探索更高效、更智能的维护方法，为化工行业的安全发展贡献力量。

参考文献

- [1]滕雪松.化工设备压力容器破坏原因及预防措施[J].造纸装备及材料,2020,(03):24-25.
- [2]杨中奇.浅析化工设备压力容器破坏及预防措施[J].天津化工,2020,(07):70-71.
- [3]张旭,赵旸.化工设备压力容器破坏原因及预防[J].化工设计通讯,2021,(11):98-99.
- [4]李晓光.浅析化工设备压力容器破坏原因及预防措施[J].节能,2021,(14):146-147.