

Analysis of welding quality defects and control measures of petrochemical pressure vessels

Xiaoli Cai

China National Petroleum Sixth Construction Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi, 535000, China

Abstract

Petrochemical pressure vessels are subjected to high temperature, high pressure, and corrosive media during the production process, and the welding quality directly affects the safety and service life of the equipment. However, various defects such as porosity, cracks, and lack of fusion are prone to occur during the welding process, which may lead to equipment failure and even safety accidents. This article focuses on the welding quality issues of petrochemical pressure vessels, analyzes the classification, causes, and impact of welding defects on equipment operation, and proposes a series of control measures, including the application of advanced welding technology, material selection and management, construction quality control, application of non-destructive testing technology, and improvement of quality management system, to improve welding quality and ensure the safe operation of pressure vessels.

Keywords

petrochemical pressure vessel; welding quality; welding defects; control measures; Non-destructive testing

石油化工压力容器焊接质量缺陷与控制措施分析

蔡肖莉

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 钦州 535000

摘要

石油化工压力容器在生产过程中承受高温、高压和腐蚀性介质, 焊接质量直接影响设备的安全性和使用寿命。然而, 焊接过程中容易产生各种缺陷, 如气孔、裂纹、未熔合等, 这些缺陷可能导致设备失效, 甚至引发安全事故。本文围绕石油化工压力容器焊接质量问题, 分析焊接缺陷的分类、成因及其对设备运行的影响, 并提出一系列控制措施, 包括先进焊接技术的应用、材料选择与管理、施工质量控制、无损检测技术的应用及质量管理体系的完善, 以提高焊接质量, 确保压力容器的安全运行。

关键词

石油化工压力容器; 焊接质量; 焊接缺陷; 控制措施; 无损检测

1 引言

石油化工行业对压力容器的质量要求极为严格, 而焊接作为其制造和维修过程中最重要的工艺环节, 直接影响设备的结构完整性和运行安全。在焊接过程中, 由于材料特性、工艺控制、环境因素等影响, 容易出现不同类型的缺陷, 导致设备使用寿命缩短甚至发生失效。因此, 研究焊接缺陷的类型、成因及其对设备的影响, 并采取有效的控制措施, 具有重要的工程价值和现实意义。

2 焊接质量概述

2.1 石油化工压力容器焊接的特点

由于生产条件的关系, 石油化工压力容器承受高温、高

压、腐蚀性介质的工况条件, 对焊后质量要求高。焊接是连接两种或更多种材料最常见且成本低的方法, 其优劣直接影响着设备的密封性、强度和工作寿命。石油化工压力容器的焊接特点有: 焊接材料大多为耐高温、耐腐蚀的特种合金钢或复合材料, 焊接时对热输入量要求严格, 防止组织的转变和性能的恶化; 焊接多为多层多道的施焊方式, 以保证焊缝质量均匀, 避免焊缝存在应力集中点; 焊接方法多变, 压力容器大多结构复杂, 焊缝形式多样, 施焊方法也有所差异; 焊后的焊缝检测方法多, 其检测设备繁多, 又关系到其最终质量与使用安全, 外观检测、射线或超声检验是必不可少的^[1]。

2.2 影响焊接质量的关键因素

焊接质量受多种因素影响, 主要包括材料、工艺、环境和操作技术等方面。首先, 材料的化学成分、组织结构及杂质含量对焊接质量影响显著, 特别是含碳量和合金元素会影响焊缝的力学性能和裂纹敏感性。其次, 焊接工艺的合理性决定了焊缝的质量, 如焊接方法、焊接顺序、预热及后热

【作者简介】蔡肖莉(1999-), 女, 中国广西合浦人, 本科, 助理工程师, 从事压力容器设备焊接研究。

处理等都需要严格控制,以减少焊接应力和变形。环境因素同样重要,湿度、温度及风速等都会影响焊接过程中熔池的形成及气体的逸出,从而影响焊接接头的质量。焊工的操作技能和经验直接决定焊接过程的稳定性和焊缝成形的质量,熟练的焊工能有效避免缺陷的产生,提高焊接质量的可靠性。

3 焊接质量缺陷分析

3.1 焊接缺陷的分类

焊接缺陷为指焊缝或热影响区中存在的有损结构完整性和使用安全的不理想现象,不同的焊缝存在相应的成因及现象,按成因和现象差异可以划分为几种类型。气孔类的焊接缺陷指焊缝及热影响区中熔池内未逸出的气体残留在焊缝中造成的圆形或椭圆的气孔现象,使焊缝不致密的现象。裂纹类的焊接缺陷为热裂纹、冷裂纹、再热裂纹等,呈沿焊缝或母材扩展的现象,有极大危害性。未熔合与未焊透为焊缝金属与母材之间、焊道之间无熔化的冶金结合现象,使接头强度降低的现象。夹渣现象为焊缝中的非金属夹杂物,熔渣未浮出熔池造成的缺陷,使焊缝均匀性与抗腐蚀性受影响。咬边、焊瘤、凹陷现象为焊缝表面现象,使焊缝承载能力降低,应力集中的应力集中度增大,从而使焊接接头稳定性减弱,危及设备正常运转^[2]。

3.2 焊接缺陷的主要成因

导致焊接缺陷产生的原因通常为材料、工艺、环境以及操作技术等诸多影响因素。其中,材料因素是影响焊接质量的主要因素,焊接材料本身的化学成分、纯度以及焊材表面状态等都会对焊接产生直接影响。母材或焊材中硫、磷含量高易造成焊缝出现裂纹或者夹渣缺陷。其次是焊接工艺不当,焊接的方法和焊接顺序及热输入控制、焊前焊后预热与保温都影响焊接质量,过大或者过低的焊接热输入也会引起焊缝组织不良,降低焊缝强度及韧性;焊前焊后预热不足易造成冷裂纹,焊接速度快会造成冷却速度过快形成硬度组织,使焊缝发硬,存在硬脆的倾向。第三,环境因素也会对焊缝质量产生一定影响,通常湿度过大焊缝易出现气孔;环境空气流动快容易造成保护气体保护失效,引起焊缝氧化。最后是焊工操作技术水平也有较大差异,焊接角度与速度、移动的速度、焊接的填充的方式不正确,也都会影响到焊缝的成形。焊接过程中,如不能按照操作要求进行操作会导致未熔合、未焊透、焊缝咬边等缺陷。

3.3 焊接缺陷对设备运行的影响

压力容器存在焊接缺陷,严重影响压力容器的运行安全和使用寿命,严重者还将导致压力容器的失效。一方面,焊接缺陷会导致焊缝的强度降低,以致设备承受高温、高压或者交变载荷运行时出现破坏,裂纹会在运行过程中不断扩展,最终导致焊缝破坏产生泄漏甚至爆炸;另一方面,焊接缺陷会影响压力容器的密封性,特别是承装腐蚀性介质

的压力容器,由于未熔合、未焊透、气孔等缺陷会在焊缝形成应力集中点,腐蚀介质通过焊缝进入容器内部,使得容器钢材的腐蚀、疲劳损伤加剧;再一方面,焊接夹渣、气孔等缺陷导致的焊缝耐腐蚀性能下降,在压力容器承受恶劣工况运行时压力容器材料容易被介质所腐蚀,造成压力容器壁减薄或穿孔;焊缝成形缺陷中的咬边、焊瘤,会引起应力集中现象,提高焊缝的脆性断裂风险,降低压力容器设备长周期运行的稳定性。避免压力容器焊接缺陷的出现是防止焊缝质量降低而影响压力容器运行安全和使用寿命,焊接工艺操作过程缺陷的严格控制和焊后无损检测的及时探伤复验是防止和解决压力容器焊接缺陷的重要手段^[1]。

4 石油化工压力容器焊接质量缺陷措施分析

4.1 先进焊接技术的应用

为了有效控制焊接质量缺陷,提高石油化工压力容器的可靠性,先进焊接技术的应用至关重要。目前,广泛采用的焊接技术包括埋弧自动焊、气体保护焊、窄间隙焊接技术以及激光-电弧复合焊等。埋弧自动焊因其焊接速度快、熔深大、焊缝质量稳定等特点,被广泛应用于厚壁压力容器的制造,能有效减少未熔合和未焊透缺陷。气体保护焊(如TIG和MAG焊)则凭借其优异的电弧稳定性和熔池控制能力,能够减少气孔、夹渣等缺陷,适用于焊接高合金耐腐蚀材料。窄间隙焊接技术对于厚壁容器的焊接具有重要意义,其主要特点是减少坡口角度和填充焊道数量,从而降低焊接变形和残余应力,提高接头致密性。除了焊接方法的改进,智能焊接技术的应用也对焊接质量提升起到了关键作用。在焊接过程监控方面,采用实时热像检测系统和电弧光谱分析技术,可动态识别焊接过程中的熔池状态和缺陷形成趋势,及时调整焊接参数,以避免质量缺陷的产生。

4.2 材料选择管理

材料的选择和管理是保证焊口质量的前提条件。石油化工压力容器焊材多选用了低合金钢、不锈钢、双相不锈钢、镍基合金等,这些材料在高温高压且处于腐蚀介质状态下工作的稳定性直接关系到焊口质量。不同类别的材料其焊接性各不相同,比如低合金钢焊接易形成氢裂纹,不锈钢焊接易产生热裂纹,双相不锈钢焊接对铁素体、奥氏体成分比例有严格控制,铁素体和奥氏体比例合适才能保证耐腐蚀性和力学性能等。为使焊材与母材匹配选用应严格执行材料选用规范标准,如ASME、GB150等,选用具有良好可焊性的材料,焊材(焊条、焊丝、焊剂)的碳含量、硅、硫、磷等成分应严格受到控制,以免杂质的掺入对焊口质量造成不良影响。在材料管理上,一方面要建立健全焊材储存与标识制度。焊材要在干燥环境中储存,焊条和焊剂使用前要进行烘干处理,以保证除去吸附水,焊接过程中避免产生氢裂纹。另一方面要严格执行焊材领用和回收管理办法,坚决避免焊材使用混乱、混淆的情况发生。

4.3 施工过程质量控制

施工过程的质量管理。焊前检查、焊接、焊后处理是施工过程的关键环节,即焊接前进行母材及焊材质量检查,按技术文件要求进行坡口加工,检查其是否符合相应的技术要求,坡口加工后的表面不应存在裂纹、氧化层以及杂质;制定相应的焊接工艺,包含焊接方法、各焊接层间温度控制及焊接的预热要求等,如厚壁压力容器,应要求在焊接时进行150~250℃的预热,可降低冷裂纹。焊接过程中要合理控制焊接顺序、焊接方法等,减小焊接的残余应力及焊接变形量,如尽量采用对称焊、分段退焊方式,减小焊缝的焊接变形量,提高焊缝均匀性;合理控制焊接的焊接电流、焊接速度及电弧长度等,可以降低焊缝的熔深浅及过烧程度,避免或减小未熔合及气孔缺陷。焊后处理有清理焊缝表面、清理焊缝表面及焊渣、消除应力热处理等,对于厚壁压力容器或承受较高应力的构件进行消除应力退火处理,减小焊接残余应力的数值,防止发生裂纹的延伸;在对焊缝进行焊后处理,如焊接后可对焊缝进行酸洗钝化,以提高耐腐蚀性,延长使用周期。

4.4 无损检测技术的应用

无损检测技术是确保焊接质量、发现焊接缺陷的有效手段,常见的方法包括射线检测(RT)、超声检测(UT)、磁粉检测(MT)和渗透检测(PT)。射线检测适用于检测内部缺陷,如气孔、未熔合、裂纹等,其检测精度可达0.1mm。超声检测利用高频声波反射原理,能够有效发现焊缝内部缺陷,适用于厚壁压力容器的质量检测。磁粉检测和渗透检测主要用于发现表面或近表面缺陷,适用于检测细微裂纹和焊缝表面缺陷。

4.5 质量管理体系的完善

建立科学、系统的质量管理体系是提高石油化工压力容器焊接质量的核心保障。由于压力容器在石油化工行业中承受高温、高压和腐蚀性介质的作用,其焊接质量直接关系到设备的安全性和稳定性。因此,需要从管理制度、人员培训、质量监控和技术改进等多个方面构建完善的质量管理体系,以有效降低焊接缺陷的发生率。健全焊接质量管理制度。应制定符合国家标准(如GB150《压力容器》、NB/T 47014《承压设备无损检测》)及国际规范(如ASME、API标准)的质量管理文件,确保焊接全过程具有明确的技术要求和质量控制标准。此外,企业应建立焊接工艺评定体系,严格按照焊接工艺规程(WPS)进行施工,确保焊接参数的稳定性。同时,需实行焊工持证上岗制度,定期考核焊接操作人员的

技能水平,杜绝无证或技术水平不达标人员参与焊接作业。

加强焊接质量监督与过程管理。在焊接生产过程中,质量管理应覆盖焊前准备、焊接过程控制、焊后检测及数据追溯等环节。焊前需对母材、焊材进行严格检验,确保其符合技术标准,并检查坡口加工质量、预热温度和装配精度。在焊接过程中,应安排专职质量监督人员对焊接参数、焊接环境及操作规范进行实时检查,防止焊工因操作不当导致缺陷的产生。此外,还可采用智能焊接监控系统,对焊接电流、电压、焊接速度等关键数据进行记录和分析,确保焊缝质量处于受控状态。焊后需进行全方位的无损检测,并对焊接数据进行存档,便于质量追溯和分析。建立焊接质量追溯系统。压力容器焊接质量管理的一个关键环节是确保焊接过程的可追溯性。应建立数字化焊接质量管理系统,将焊接工艺参数、焊接材料、焊工信息、检测结果等数据录入数据库,以便在设备运行过程中进行质量分析和缺陷追踪。若某设备在运行过程中发生焊缝泄漏事故,可通过追溯系统快速查找到该焊缝的焊接工艺及检测记录,以分析问题根源,并优化后续焊接工艺。最后,推行第三方质量监督和认证。在大型石油化工压力容器的制造过程中,企业可引入第三方质量监督机构,如中国特种设备检测研究院(NDT)、ASME认证机构等,对焊接质量进行独立检查和审核。通过第三方检测,可以增强焊接质量控制的公正性,同时发现内部质量管理体系的薄弱环节,促进企业改进焊接管理水平。

5 结语

石油化工压力容器焊接质量对设备的安全性和稳定性至关重要。焊接缺陷的存在会影响设备的承载能力和长期运行效果,甚至引发严重安全事故。因此,必须通过优化焊接技术、合理选择和管理焊接材料、加强施工质量控制、采用先进的无损检测手段以及完善质量管理体系等措施,来提高焊接质量,确保设备的可靠性和使用寿命。未来,应进一步加强焊接工艺研究,提高检测手段,促进焊接技术的持续改进,以满足石油化工行业日益增长的安全与质量要求。

参考文献

- [1] 张伟. 石油化工压力容器焊接质量控制技术研究[J]. 化工管理, 2020, (12): 45-47.
- [2] 李强. 压力容器焊接质量缺陷分析及控制措施[J]. 石油化工设备技术, 2019, 40(04): 23-26.
- [3] 王磊, 陈建华. 石油化工压力容器焊接工艺及质量控制探讨[J]. 现代焊接, 2021, 37(06): 56-58.