

石油化工压力容器焊接缺陷的产生和预防

郭德水 田士彬 李彦君

山东大齐石油化工设计有限公司, 山东 淄博 255400

[摘要]随着石油化工行业的持续发展, 压力容器的使用要求日益严格, 传统焊接技术面临着许多挑战。石油化工设备通常工作在复杂且变化莫测的环境中, 焊接接头经常暴露在高温、高压以及腐蚀性介质等极端条件下, 这使得焊接缺陷的控制成为一项极具技术难度的任务。近年来, 焊接缺陷的研究已逐渐引起学术界和工业界的广泛关注。通过深入分析焊接缺陷的类型、成因及其影响因素, 并结合现代智能焊接技术的应用, 焊接质量得以有效改善, 缺陷发生的风险也显著降低, 焊接效率得到了提升, 对提高石油化工压力容器的安全性与经济性具有显著的现实意义。

[关键词]压力容器; 焊接缺陷; 产生原因; 预防措施

DOI: 10.33142/ec.v8i3.15636

中图分类号: TH49

文献标识码: A

Generation and Prevention of Welding Defects in Petrochemical Pressure Vessels

GUO Deshui, TIAN Shibin, LI Yanjun

Shandong Daqi Petro Chemical Design Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255400, China

Abstract: With the continuous development of petrochemical industry, the use requirements of pressure vessels are increasingly strict, and traditional welding technology is facing many challenges. Petrochemical equipment usually works in a complex and unpredictable environment, and welded joints are often exposed to extreme conditions such as high temperature, high pressure and corrosive media, which makes the control of welding defects a very difficult task. In recent years, the research on welding defects has gradually attracted extensive attention from academia and industry. Through in-depth analysis of the types, causes and influencing factors of welding defects, combined with the application of modern intelligent welding technology, the welding quality has been effectively improved, the risk of defects has been significantly reduced, and the welding efficiency has been improved, which has significant practical significance for improving the safety and economy of petrochemical pressure vessels.

Keywords: pressure vessels; welding defects; causes; preventive measures

引言

石油化工行业作为国民经济的关键支柱, 压力容器在该行业生产过程中扮演着至关重要的角色。生产安全、设备稳定性以及操作效率, 都直接受到压力容器质量的影响。在压力容器的制造过程中, 焊接工艺是其中最为关键的环节之一。焊接质量不仅决定了焊接接头的强度与耐腐蚀性, 还直接影响着整体结构的可靠性。气孔、夹渣等焊接缺陷, 常常是导致压力容器失效的主要原因, 甚至在严重情况下, 可能引发重大安全事故。因此, 焊接缺陷成因的深入研究以及有效预防措施的采取, 对于提高石油化工压力容器的焊接质量具有至关重要的意义。

1 石油化工压力容器常见焊接缺陷类型及成因

1.1 气孔

在石油化工压力容器的焊接过程中, 气孔作为一种常见的焊接缺陷, 对焊接质量造成了显著影响。气孔的形成是一个复杂的物理化学过程, 涉及多个因素, 不仅削弱了焊缝的力学性能, 还可能成为腐蚀介质的积聚点, 进而影响焊接接头的长期可靠性。因此, 明确气孔的成因对提高焊接质量至关重要。气孔的形成主要与气体在熔池中的溶

解、逸出及捕获有关。焊接时, 为了防止空气中的氧气、氮气等有害气体进入焊缝, 通常会使用保护气体。如果保护气体的纯度不达标或流量不合适, 空气中的有害气体便可能渗入熔池, 在焊接过程中未能及时排出, 导致气孔的生成。焊接材料的质量同样对气孔的产生起到重要作用, 未清理干净的焊丝表面油污、锈蚀, 或者焊条与焊剂中的杂质和水分, 在高温下分解时释放的气体会促使气孔的形成。母材表面的清洁度也是一个关键因素, 若母材上存在油污、水分或氧化膜, 这些杂质在高温条件下分解并释放气体, 未能及时逸出的气体便会被困在焊缝中, 形成气孔。而焊接工艺参数的设置也直接影响气孔的生成。过低的焊接电流会导致熔池温度不足, 难以有效排出熔池中的气体; 过快的焊接速度会使熔池过早凝固, 从而封闭气体, 形成气孔。因此, 精确控制焊接电流、电压以及焊接速度等参数, 是减少气孔的有效途径。

1.2 夹渣

在石油化工压力容器的焊接过程中, 夹渣是常见的焊接缺陷之一, 指的是熔池中的非金属夹杂物未能有效排出, 残留在焊缝内部。这些夹杂物来源多样, 可能是母材、焊

丝、焊剂中的杂质，也可能是由于不良焊接环境导致的。夹渣的存在会破坏焊缝的连续性，降低焊接接头的强度，进而影响其耐腐蚀性。在石油化工设备的高温、高压以及腐蚀性介质环境中，夹渣缺陷容易成为焊缝的薄弱环节，进而影响设备的安全性与使用寿命。为深入分析夹渣的形成原因，研究团队对石油化工压力容器的焊接过程进行了实地观察，记录了焊接参数、操作规范等重要因素。结果表明，焊接电流及焊接速度的控制对夹渣的产生具有显著影响。当焊接电流过大或焊接速度过快时，熔池金属未能充分熔化，导致熔渣难以顺利浮起并排出，从而形成夹渣。除此之外，焊丝中的杂质元素可能与熔池金属发生反应，生成非金属夹杂物，并滞留在焊缝中。母材中的化学成分，尤其是碳、硫等元素的含量较高时，也可能在焊接过程中形成氧化物、硫化物等夹杂物，从而增加夹渣的发生概率。除材料因素与工艺参数外，焊接操作技术也是影响夹渣形成的重要因素。在实际操作中，若焊工未能保持适当的焊枪角度，或者未能及时清理层间焊渣，都会增加夹渣的风险。控制焊接过程中的每一环节，优化工艺参数，严格控制焊接材料质量，并保证操作规范，能有效减少夹渣的出现，提升焊接质量。

2 石油化工压力容器焊接缺陷的产生原因分析

2.1 材料因素对焊接质量的影响

材料的冶金特性与表面状态在石油化工压力容器的焊接质量中起着至关重要的作用。焊接接头的强度、韧性以及耐腐蚀性，直接受母材与焊材的成分、力学性能、杂质含量及金相组织的影响。例如，当母材成分不稳定，尤其是硫、磷等有害元素含量过高时，焊接裂纹的敏感性会显著提高，焊缝的塑韧性则会降低。对于高碳钢或合金钢，焊接过程中可能形成淬火组织，进而使焊缝及热影响区变脆，冷裂纹的风险也随之增加。焊材的匹配性对焊接质量同样至关重要，若焊材的化学成分与母材不匹配，或焊丝、焊条中的合金元素不足，焊接接头的强度可能会下降，甚至出现未熔合、未焊透等缺陷。同时，焊材的存储与使用环境也不能忽视。若焊条储存不当，如受潮或焊剂污染，气孔、夹渣等缺陷可能在焊接过程中产生，焊缝的致密性与力学性能将因此受到严重影响。焊接质量的另一个关键因素是材料表面的清洁度，若母材或焊材表面存在油污、氧化皮或水分，这些物质会在高温下分解并释放气体，未能及时逸出的气体将可能在熔池中形成气孔或夹杂物，导致焊缝不均匀。因此，在焊接前，必须对母材进行彻底清理，去除锈蚀、油污及氧化物，并对高强度钢材或其他敏感材料进行适当预热，从而减少焊接缺陷的发生，确保石油化工压力容器的焊接质量与长期使用的安全性。

2.2 焊接工艺因素分析

焊接工艺的合理性对焊缝的质量与性能起着决定性作用。在焊接过程中，电流、电压、焊接速度及热输入等

各项参数必须精确匹配，任何不当的选择都可能引发焊接缺陷。过大的电流可能导致焊缝过烧、形变加剧，甚至引发裂纹；而过小的电流则会导致焊缝未熔合或未焊透，从而影响焊缝的强度与密封性。若焊接速度过快，熔池冷却过快，金属的流动性受限，焊缝中的夹杂物无法及时排除；反之，速度过慢则可能导致焊缝积累过厚，增加焊接应力，甚至引起热裂纹。焊接方法的选择同样至关重要，手工电弧焊、TIG焊、MIG焊及埋弧焊等方法，各自适用于不同材料与厚度的工件。在大厚度压力容器的焊接中，若选择热输入较低的焊接方式，焊缝的层间结合可能出现问题，从而影响焊接接头的整体可靠性。对于多层多道的焊接，层间清理与焊接顺序的合理安排同样不容忽视。不彻底的层间清理可能导致夹渣，焊接顺序的不当安排则容易引发较大的焊接残余应力及变形。在工艺执行过程中，严格遵守工艺规程，合理控制预热、层间温度及焊后热处理，能够有效减少焊接应力，降低裂纹发生的风险。对于关键的焊接接头，合适的坡口设计与装配间隙的选用，有助于确保熔池金属的流动性与冶金结合的质量。随着现代焊接技术的不断发展，智能焊接与自动化焊接设备的广泛应用，大大提高了工艺的稳定性，减少了人为因素对焊接质量的影响，从而确保了石油化工压力容器焊接的可靠性与安全性。

3 石油化工压力容器焊接缺陷的预防措施

3.1 焊接材料的合理选择与质量控制

焊接材料的选择在焊接接头的性能与质量中具有至关重要的作用，尤其是在石油化工压力容器的焊接中，材料的适配性和质量控制尤为关键。焊接材料的化学成分必须与母材协调一致，以确保焊缝与母材在力学性能、耐腐蚀性以及热处理反应上的一致性。在选择焊接材料时，特别对于高强度合金钢、不锈钢等特殊材料，应特别注意合金元素的比例，避免因材料不匹配而引发裂纹或降低焊接接头的强度^[1]。焊材的质量控制同样对焊接质量起着至关重要的作用，焊条、焊丝和焊剂的质量直接影响熔池金属的成形与清洁度。若焊材中含有过多的杂质或水分，可能在焊接过程中引发气孔、夹渣等缺陷。因此，焊材的存放与处理必须严格遵循相关规范，确保其干燥和清洁，同时按照要求进行预热，以避免环境因素对焊接质量造成的不利影响。选择焊材时，还需考虑焊接过程中的温度控制。对于在低温或高温工况下使用的压力容器，应选用具有优良抗裂性与高温韧性的焊接材料，以确保焊接接头在极端工作条件下仍能保持稳定的性能。此外，应定期对焊材进行批次抽检与性能测试，以确保其符合国家或行业标准的要求，从而保障焊接质量的可靠性。

3.2 焊接工艺优化与工艺参数控制

优化焊接工艺及精确控制工艺参数是确保石油化工压力容器焊接质量的关键。选择合适的焊接方法是工艺优化的基础，对于不同材料、厚度及工作要求的压力容器，

必须根据其特性选择最合适的焊接方式。例如,薄壁容器采用 TIG 焊接,既能保证高精度,又能确保焊缝的外观质量;而对于较厚的钢板,则应选择埋弧焊或 MIG 焊,以提高焊接效率,并确保良好的熔透性。在工艺参数的控制方面,精确调节焊接电流、电压、焊接速度以及热输入是避免焊接缺陷的核心。电流过高时,熔池可能过大导致过热,进而产生过烧或裂纹;而电流过低则可能导致熔池不足,造成未熔合或未焊透等问题^[2]。同样,焊接速度的控制也至关重要,过快的速度可能会导致焊缝未能充分熔化,进而形成夹渣或气孔;过慢的速度则可能带来过多的热输入,进而使焊接接头产生应力集中,甚至引发变形。为确保焊接质量,最佳参数应通过实验与模拟测试来确定,并在施工过程中根据环境变化进行调整。控制层间温度、预热温度以及焊后热处理等工艺步骤在提升焊接质量方面同样至关重要,在高强度材料的焊接过程中,适度的预热有助于减少热裂纹的发生,而合理的热处理则能有效消除焊接应力,改善焊缝的力学性能。通过对焊接工艺的优化及每一环节的精确控制,焊接的稳定性能够得到显著提高,缺陷也将大大减少,从而确保石油化工压力容器的安全性及长期可靠运行。

3.3 无损检测技术的应用

无损检测技术在确保石油化工压力容器焊接质量中扮演着至关重要的角色,能够在不破坏材料结构的前提下,精准检测焊接缺陷,从而显著提高设备的安全性和可靠性。常见的无损检测方法包括超声波检测、X 射线检测、磁粉检测和渗透检测等。每种方法在不同的使用环境中都具有其独特的优势,合理选择适合的检测技术,能够最大限度地发现潜在的焊接缺陷。超声波检测以其高灵敏度和较深的探测能力,广泛应用于厚壁压力容器的焊接质量检测。利用声波反射的原理,它可以精确定位焊缝内的气孔、裂纹或未熔合等缺陷。X 射线检测则是检查焊接接头内部结构与完整性的有效工具,特别适用于复杂焊缝的检测,能够清晰揭示隐藏在内部的焊接缺陷,如气孔、夹渣或未焊透等问题^[3]。磁粉检测和渗透检测主要用于焊缝表面缺陷的检测。磁粉检测适用于钢铁材料,能有效揭示表面或近表面的裂纹、断裂等缺陷;而渗透检测通过渗透液在裂缝中的渗透性,帮助发现焊缝表面的微小缺陷。两种方法操作简便,灵敏度高,尤其适合于表面缺陷的早期检测。无损检测的显著优势在于,能够在不破坏工件的情况下,实时且准确地识别出焊接过程中的潜在缺陷,为后续的焊接修复及质量控制提供重要的依据。定期实施无损检测不仅能及时发现焊接缺陷,还能评估焊接接头在长期使用过程

中的性能表现,从而有效确保压力容器的安全运行。因此,在石油化工压力容器焊接过程中广泛应用无损检测技术,成为提高焊接质量、延长设备使用寿命、保障安全运行的关键举措。

3.4 现代智能焊接技术的应用

随着科技的不断进步,现代智能焊接技术已成为提升石油化工压力容器制造中焊接质量与效率的关键工具。这一技术融合了自动化控制、人工智能(AI)、物联网(IoT)以及大数据分析,能够实时监控焊接过程中各项工艺参数,并根据数据反馈自动调节焊接过程,从而最大程度地减少人为因素对焊接质量的干扰,确保达到高标准的焊接结果。例如,作为典型智能焊接技术的机器人焊接系统,通过高精度的机器人臂确保焊接过程的稳定性与精确性,特别适合于处理复杂或难以到达的焊接部位,这些机器人系统配备有传感器,能够实时监测焊接质量,自动调整偏差并持续跟踪焊缝,从而大幅度提升焊接一致性。人工智能的深度学习算法可分析历史数据,预测潜在缺陷,自动优化焊接参数,从而有效减少缺陷的发生。同时,物联网技术将焊接设备与云平台连接,实现了远程监控与故障诊断。这一技术帮助管理人员根据实时数据对工艺及生产流程进行优化,进一步提升了整体生产效率。

4 结语

石油化工压力容器的焊接质量与其安全性及长期可靠性密切相关,因此,焊接缺陷的有效控制至关重要。通过对气孔、夹渣等常见缺陷形成原因的深入分析,并结合合理的材料选择、工艺优化与严格的操作控制,焊接接头的质量可以得到显著提升。智能焊接技术的引入,依托自动化、人工智能及物联网等前沿技术,使得焊接过程变得更加精确与稳定,从而为缺陷的预防提供了坚实的保障。随着技术的不断进步,焊接质量必将得到更大幅度的提升,进一步确保压力容器在使用过程中的安全性与稳定性。

[参考文献]

- [1]安海堂. 石油化工压力容器焊接缺陷的产生和预防[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(15): 22-24.
 - [2]阎世力. 石油化工压力容器设计要求和设计方法[J]. 化学工程与装备, 2022(6): 155-156.
 - [3]张超. 压力容器制造质量管理控制要点分析[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(6): 128-149.
- 作者简介: 郭德水(1993.7—), 毕业院校: 山东理工大学, 所学专业: 机械设计制造及其自动化, 当前就职单位: 山东大齐石油化工设计有限公司, 职称级别: 工程师。