

压力管道压力容器焊接质量控制分析

周啸天

江苏省特种设备安全监督检验研究院 江苏 扬州 225000

摘要: 压力管道与压力容器作为工业领域核心承压设备,其焊接质量直接关系系统安全稳定运行。从材料、工艺、设备、人员等多维度剖析影响焊接质量的关键因素,明确焊接前准备检测、过程动态管控、焊后检验修复的质量控制要点。通过技术创新、检测技术升级及人员培训管理等优化策略,构建全流程质量控制体系,为提升压力管道与压力容器焊接质量提供理论支撑与实践路径,降低安全事故风险。

关键词: 压力管道;压力容器焊接;质量控制

引言

在石油化工、能源电力等工业领域,压力管道与压力容器广泛应用,其焊接质量对设备运行安全及工业生产稳定意义重大。焊接过程易受材料特性、工艺参数、设备性能及人员操作等多因素干扰,导致气孔、裂纹等缺陷,威胁设备安全。本文基于此,深入分析影响焊接质量的因素,探究焊接全流程质量控制要点,并提出优化策略,旨在为工业生产中压力管道与压力容器焊接质量管控提供科学指导,保障工业系统安全运行。

1 压力管道与压力容器焊接质量概述

压力管道与压力容器作为工业领域广泛应用的承压设备,其焊接质量直接关系到系统的安全性与可靠性。焊接作为连接管道与容器各部件的关键工艺,在形成完整密闭承压结构过程中,不仅要保证密封性,还需确保接头处的连接强度,防止因焊接接头处几何不连续引起的应力集中导致损伤或失效。焊接质量的优劣,通过焊接接头的力学性能、微观组织结构以及缺陷分布等多方面因素综合体现。优质的焊接接头应具备与母材相当甚至更优的力学性能,包括足够的抗拉强度、屈服强度、冲击韧性以及良好的塑性和疲劳性能,以承受复杂工况下的压力波动与交变载荷。从微观角度来看,合理的焊接工艺能够促使焊缝及热影响区形成均匀、致密的组织结构,减少柱状晶、粗大晶粒等不良组织形态,从而避免因组织不均匀导致的性能差异与局部薄弱点。焊接过程中需严格控制气孔、夹渣、裂纹、未熔合等缺陷的产生,这些缺陷不仅削弱接头承载能力,还可能成为裂纹扩展的源头,在介质压力作用下引发灾难性后果。在实际工程中,焊接质量受焊接材料、焊接工艺参数、焊接设备以及焊工操作技能等多种因素影响。不同类型的压力管道与压力容器,因设计压力、温度、介质特性及结构形式的差异,对焊接质量的要求也不尽相同。例如,

输送易燃易爆、有毒有害介质的压力管道,对焊接接头的密封性和无损检测要求更为严格;高温高压工况下运行的压力容器,需重点关注焊接接头的高温性能和抗蠕变能力。只有充分考虑各方面因素,严格把控焊接过程中的每一个环节,才能确保压力管道与压力容器的焊接质量,保障工业生产安全、稳定运行。

2 影响压力管道与压力容器焊接质量的因素

2.1 材料因素

压力管道与压力容器所选用的母材和焊接材料,直接关系到焊接接头的性能与质量。母材的化学成分、力学性能以及金相组织决定了其可焊性,碳当量过高会显著增加焊接接头的淬硬倾向,引发冷裂纹,如高碳钢在焊接时易形成硬脆的马氏体组织,降低接头韧性。焊接材料的匹配性同样关键,焊条、焊丝的化学成分与母材不匹配,会导致焊缝金属的强度、韧性无法满足设计要求,例如采用含镍量不足的填充材料焊接奥氏体不锈钢,易出现晶间腐蚀问题。材料的表面质量也不容忽视,若母材表面存在油污、铁锈等杂质,在焊接过程中会分解产生气体,导致焊缝内部出现气孔等缺陷,影响整体结构的密封性与承载能力^[1]。

2.2 工艺因素

焊接工艺参数的精准控制是保障焊接质量的核心环节。焊接电流过大,会使熔池温度过高,造成焊缝金属晶粒粗大,降低接头的冲击韧性,同时还可能导致烧穿等缺陷;电流过小则易出现未焊透、未熔合等问题。焊接速度直接影响焊缝的熔宽和熔深,过快的焊接速度会使熔池金属来不及充分填充,形成咬边、焊缝成形不良等缺陷;过慢的焊接速度会增加焊接热输入,导致接头热影响区组织粗大。预热与焊后热处理工艺也至关重要,合适的预热温度能够降低焊接接头的冷却速度,避免产生淬硬组织;合适的焊后热处理可以松弛焊接残余

应力、改善接头性能和疲劳强度，对服役于应力腐蚀环境中的设备尤其重要。焊接顺序和层间温度的控制同样会影响焊接应力分布，不合理的焊接顺序可能导致结构变形过大，层间温度过高或过低都会对焊缝金属的组织性能产生不利影响。

2.3 设备因素

焊接设备的性能与稳定性对焊接质量起着决定性作用。电弧焊机的输出特性直接影响焊接过程的稳定性，如焊机的动特性不佳，在引弧和熔滴过渡时会出现电弧不稳定现象，导致焊缝成形不良。送丝系统的精度和可靠性至关重要，送丝速度不均匀会造成焊缝宽窄不一致，影响焊缝的外观质量和内部质量。焊接设备的控制系统若存在偏差，会导致焊接工艺参数波动，无法严格按照预设参数进行焊接，降低焊接质量的一致性。焊接设备的维护保养情况也不容忽视，长期使用后设备部件的磨损、老化，如导电嘴磨损、电缆接触不良等，会影响焊接电流和电压的稳定传输，增加焊接缺陷产生的概率，进而影响压力管道与压力容器的焊接质量^[2]。

2.4 人员因素

焊接操作人员的技能水平和工作态度是影响焊接质量的关键人为因素。熟练的焊工能够根据不同的材料特性和焊接工艺要求，灵活调整焊接参数，准确控制焊接操作手法，确保焊缝成形美观、内部质量优良。操作技能不足的焊工在焊接接头的气孔、夹渣、未焊透、未熔合等缺陷控制率方面存在不足。焊工的工作态度也至关重要，严谨认真的工作态度能够保证在焊接前仔细清理焊件表面，严格按照工艺规程进行操作；若焊工存在敷衍了事的心态，可能会忽视焊接过程中的关键细节，如未按要求进行预热、未控制好层间温度等，从而降低焊接质量。焊工对焊接设备的熟悉程度和操作经验也会影响焊接过程的顺利进行，只有充分了解设备性能，才能在出现异常情况时及时调整，保障焊接质量。

3 压力管道与压力容器焊接质量控制要点

3.1 焊接前的准备与检测控制

焊接前的充分准备与精准检测是保障压力管道与压力容器焊接质量的基础。按照图纸及制造需求，准备好覆盖设备焊接范围的焊接工艺评定报告（PQR）和焊接工艺规程（WPS）以及详细的焊接作业指导书（WWI）是设备高质量焊接的必要前提。焊材选择至关重要，需根据母材的化学成分、力学性能、工作环境等因素，选用匹配的焊条、焊丝、焊剂，严格把控材料质量，对进场材料进行外观检查、理化性能检测，杜绝不合格材料投入使用。组对、定位焊前的精确测量，对减少焊接后

的形变量、拘束应力及残余应力十分关键，通过整圆、工装等方式尽量减少对口错变量，不应强力对中、找平。对焊接接头进行严格的坡口加工与清理，控制坡口角度、钝边尺寸在工艺要求范围内，去除坡口及两侧母材表面至少20mm范围内氧化皮、油污、熔渣及其他有害杂质，防止焊接时产生气孔、夹渣等缺陷；对母材进行预热处理，依据材料特性与焊接工艺确定预热温度和加热方式，改善焊接接头组织性能，降低焊接应力。

3.2 焊接过程中的动态质量管控

焊接过程中的动态质量管控直接影响压力管道与压力容器焊接接头的最终质量。在电弧引燃阶段，需控制引弧位置与方式，避免在母材表面随意引弧产生电弧擦伤，影响材料性能。焊接过程中，严格执行既定的焊接工艺参数，精确控制焊接电流、电压、焊接速度、层间温度等。不同的焊接电流和电压组合会改变熔池的形状和尺寸，焊接速度过快易导致焊缝熔深不足、未焊透，过慢则会造成焊缝余高过高、热影响区过大；层间温度控制不当会使焊缝金属组织发生变化，降低接头性能，因此需实时监测并调整，确保各参数处于合理区间。多层多道焊时，严格清理每层焊道表面的熔渣、飞溅物，保证后续焊道与前一层焊道充分熔合，防止层间未熔合、夹渣等缺陷。采用合理的焊接顺序和方向，减小焊接变形和残余应力，例如对称焊接、分段退焊等方法的应用。在焊接环境方面，控制风速、湿度、温度等条件，当环境不满足焊接要求时，采取有效的防护措施，如搭设防风棚、加热除湿等，避免因环境因素影响焊接质量^[3]。

3.3 焊接后的质量检验与修复处理

焊接后的质量检验是发现焊接缺陷、保障压力管道与压力容器安全运行的关键环节，而修复处理则是消除缺陷、提升整体质量的重要手段。采用多种无损检测方法对焊接接头进行全面检测，如射线检测可有效检测内部气孔、夹渣、未焊透等体积型缺陷，超声波检测对裂纹、未熔合等面型缺陷具有较高的检测灵敏度，磁粉检测和渗透检测适用于表面缺陷的检测。根据检测结果，对焊接接头质量进行评定，对于不合格的焊接接头，准确判定缺陷的类型、位置和尺寸，分析产生缺陷的原因，制定针对性的修复方案。修复过程中，严格控制修复工艺，对缺陷部位进行彻底清除，采用合适的焊接材料和工艺参数进行补焊，补焊层数、焊接电流、电压等参数需与原焊接工艺相匹配。修复完成后，再次对修复部位进行无损检测和力学性能试验，确保修复质量满足要求。建立焊接质量档案，详细记录焊接过程中的各项

参数、检测结果及修复情况,为后续设备的运行维护和质量追溯提供依据。

4 压力管道与压力容器焊接质量控制的优化策略

4.1 技术创新与应用

(1) 引入先进的焊接工艺是提升质量的重要途径。等离子弧焊因其能量集中、焊接速度快且应力变形小的特性,在压力容器纵环焊缝打底焊接中展现出显著优势,配合氩弧自动焊填充盖面,可大幅提升3~14mm中薄板焊接质量和工作效率;激光焊凭借其高精度与低热影响区、自动化与高效率、焊缝外观成型好以及职业健康环保等优势,为薄壁压力容器焊接、定型产品耐蚀堆焊以及压力容器非承压部件焊接提供新的解决方案。(2) 智能化焊接设备的应用推动焊接质量迈向新台阶。配备自适应控制系统的免示教焊接机器人,可实时监测焊接过程中的电流、电压、速度等参数,根据材料厚度、接头形式等变化自动调整焊接参数,保证焊接过程的稳定性和一致性,大幅降低人为操作导致的质量波动。(3) 焊接材料的研发创新同样不可或缺。新型焊接材料在化学成分和冶金性能上不断优化,通过添加特定合金元素,增强焊缝金属的抗腐蚀性能、韧性和强度,满足不同工况下压力管道与压力容器对焊接接头性能的严苛要求,从源头上保障焊接质量。

4.2 质量检测技术升级

(1) 超声相控阵检测技术凭借其多声束、多角度扫描的独特特性,可对压力管道与压力容器的焊接接头展开全面且快速的检测。在检测过程中,它能精准调控超声波的传播方向与聚焦点,从而对复杂结构及微小缺陷实施有效探测。相比传统超声检测,该技术检测效率和准确性都有显著提升。(2) 衍射时差法(TOFD)检测技术利用缺陷端点的衍射信号进行缺陷检测和定量,对埋藏缺陷具有极高的检测灵敏度。在压力管道与压力容器焊接质量检测中,TOFD技术可准确测量缺陷高度,对缺陷的定性和定量分析更加精准,为焊接质量评估提供可靠依据。(3) 数字射线检测(DR)技术将传统射线检测与数字化成像技术相结合,具有成像速度快、图像分辨率高、便于存储和分析等优点。通过对焊接接头进行数字射线检测,可清晰显示焊缝内部的气孔、夹渣、未焊透等缺陷,利用图像处理软件还能对缺陷进行精确测

量和分析,及时发现潜在的质量隐患,有效保障压力管道与压力容器的安全运行。

4.3 人员培训与管理

(1) 强化焊接操作人员的技能培训是保障焊接质量的基础。针对不同类型的焊接工艺和设备,开展系统性、针对性的培训课程,使操作人员熟练掌握焊接参数的调整、焊接工艺的执行以及设备的正确使用和维护,通过大量的实操训练,提高操作人员的动手能力和对焊接过程的控制能力。(2) 建立科学严密的焊接追溯机制至关重要。以焊工持证信息数据库为基础,物联网技术配合电子标识取代传统的写编号、敲钢印等方式对每一道焊缝进行定位,一方面可以用刷卡等方式,判定焊工持证项目可覆盖该焊缝方可上工,另一方面可对焊接质量、返修率、焊接效率等数据进行统计,以便后期分析研判。(3) 加强焊接团队的协作与沟通同样不容忽视。在压力管道与压力容器的焊接作业中,涉及多个工种和工序的配合,良好的团队协作和沟通能够确保各环节衔接顺畅,及时发现并解决焊接过程中出现的问题。通过组织团队活动和技术交流会议,增强团队成员之间的默契和信任,营造积极向上的工作氛围,从而提高整体焊接质量和工作效率^[4]。

结语

综上所述,压力管道与压力容器焊接质量控制是系统性工程。通过剖析材料、工艺、设备、人员等影响因素,严格把控焊接前、中、后各阶段质量控制要点,实施技术创新、检测升级、人员培训等优化策略,可显著提升焊接质量。随着工业技术发展,焊接质量控制面临新挑战,未来需持续探索新技术、新方法,完善质量控制体系,为工业设备安全运行筑牢质量防线。

参考文献

- [1]任清茂.压力管道压力容器焊接质量控制分析[J].科学与财富,2021,13(13):85.
- [2]王博文.压力容器管道焊接技术与质量控制分析[J].数字化用户,2024(36):277-278.
- [3]郭洁,刘震,刘通.浅析压力容器管道焊接技术与质量控制[J].中国化工贸易,2023,15(3):172-174.
- [4]郭晓东.压力管道焊接工艺与质量控制方法分析[J].中国化工贸易,2023,15(12):184-186.