

厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究

温兆鸿

肇庆市新大力设备制造安装有限公司, 广东 肇庆 526020

DOI:10.61369/ME.2025110007

摘 要 : 厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究意义重大。高强钢有独特特性与焊接性特点, 现有评定标准存适应性性问题。需构建全面试验体系, 从热输入控制等多方面优化工艺。同时要规范 WPS 编制, 开发工艺数据库等。研究成果显著, 但部分复杂工况工艺不完善, 未来应聚焦复杂工况适应性。

关 键 词 : 高强钢; 焊接工艺评定; 质量控制

Research on Welding Process Evaluation and Key Technologies of High Strength Steel for Thick walled Pressure Vessels

Wen Zhaohong

Zhaoqing City the New Vigorously Equipment Manufacturing Installation Limited, Zhaoqing, Guangdong 526020

Abstract : The welding process evaluation and key technology research of high-strength steel for thick walled pressure vessels are of great significance. High strength steel has unique characteristics and weldability, and there are adaptability issues with existing evaluation standards. A comprehensive experimental system needs to be established to optimize the process from multiple aspects such as heat input control. At the same time, it is necessary to standardize the preparation of WPS and develop process databases. The research results are significant, but some complex working conditions and processes are not perfect. In the future, we should focus on the adaptability to complex working conditions.

Keywords : high-strength steel; welding process evaluation; quality control

引言

近年来, 国家对特种设备安全愈发重视, 2014 年 1 月 1 日起施行的《特种设备安全法》为厚壁压力容器等特种设备的生产、使用等环节提供了法律保障。厚壁压力容器用高强钢因独特材料特性在工业中广泛应用, 但焊接性特点使其焊接残余应力控制难度大。国内外虽已形成系列焊接工艺评定标准规范, 却在厚壁容器应用中存在适应性问题。因此, 构建科学试验体系、优化焊接工艺关键技术、加强生产现场质量管理等对提升焊接质量至关重要, 且需结合最新政策不断完善, 以满足工业发展对厚壁压力容器质量与安全性的要求。

一、高强钢焊接工艺基础理论与现状分析

(一) 厚壁压力容器用高强钢材料特性

厚壁压力容器用高强钢具有独特的材料特性。在力学性能方面, 其屈服强度和抗拉强度较高, 能承受较大压力, 满足厚壁压力容器对强度的严苛要求。化学成分上, 常含有适量的合金元素, 如铬、镍、钼等, 这些元素能有效提升钢的强度、韧性及耐腐蚀性^[1]。然而, 高强钢的焊接性特点也较为显著。由于碳当量相对较高, 在焊接过程中易产生淬硬组织, 增大冷裂纹倾向。同时, 厚壁结构进一步加剧了焊接残余应力控制的难度。厚壁使得焊缝金属在冷却过程中受到较大拘束, 难以自由收缩, 从而产生较高的残余应力, 严重影响压力容器的结构稳定性与安全性, 因此, 如何有效控制焊接残余应力成为厚壁压力容器高强钢焊接的

关键问题。

(二) 现有焊接工艺评定标准规范

目前, 国内外针对高强钢焊接工艺评定已形成一系列标准规范。如 ASME IX, 它是美国机械工程师协会关于焊接和钎焊评定的标准, 在国际上应用广泛, 对焊接工艺评定的基本要求、评定试验方法等有详细规定。NB/T 47014 是我国承压设备焊接工艺评定标准, 对不同母材、焊接方法等的评定做了明确界定。然而, 这些标准在厚壁容器应用中存在适应性问题^[2]。厚壁压力容器的工况复杂, 对焊接接头性能要求更高, 现有标准可能无法充分考虑厚壁结构的特殊应力分布、热传递特性等, 导致评定结果难以精准反映厚壁容器实际焊接质量, 在指导厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定时存在一定局限性。

二、高强钢厚壁结构焊接工艺评定方法研究

（一）工艺评定试验体系构建

厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定需构建全面且科学的试验体系。通过提出覆盖接头型式试验与焊接工艺参数矩阵的全要素评定方法，实现对高强钢焊接工艺的全方位考量。接头型式试验涵盖多种可能的接头类型，以模拟实际工程中的复杂连接情况；焊接工艺参数矩阵则系统地囊括各类参数组合，如焊接电流、电压、焊接速度等，确保评定的完整性。同时，建立评定指标量化体系，将诸如焊缝强度、韧性、变形量等关键指标进行量化，借助科学合理的量化标准，精确评估焊接工艺的优劣，为厚壁压力容器用高强钢焊接工艺的选择与优化提供可靠依据^[3]。

（二）工艺参数优化与验证方案

针对高强钢厚壁结构焊接工艺，热输入控制需通过调整焊接电流、电压及焊接速度，设计多组不同热输入值的实验，对比焊缝及热影响区的组织与性能，获取适宜热输入范围。层间温度管理上，采用不同的加热及保温措施，设定多种层间温度区间进行焊接，研究层间温度对焊接接头性能的影响。焊后热处理则设定不同的加热温度、保温时间和冷却速度组合，观察其对消除残余应力、改善组织性能的作用。将热输入、层间温度、焊后热处理等参数进行合理组合开展验证实验，依据实验结果优化工艺参数，确保焊接接头满足厚壁压力容器的性能要求^[4]。

三、焊接工艺关键技术研究

（一）工艺制定管理技术

1. WPS编制标准化流程

在厚壁压力容器用高强钢焊接工艺中，WPS编制标准化流程至关重要。首先要建立从PQR（焊接工艺评定报告）到WPS（焊接工艺规程）的规范转化机制。深入分析PQR中的各项数据，包括焊接材料、焊接参数、接头形式等，确保这些关键信息准确无误地转化到WPS中，实现二者的紧密衔接。同时，制定工艺文件动态更新管理办法^[5]。随着高强钢焊接技术的不断发展、新的标准规范出台或实际生产中遇到新问题，及时对WPS进行调整和优化。通过定期审查与不定期更新相结合，保证WPS始终符合生产实际与技术发展需求，为厚壁压力容器的焊接质量提供坚实保障。

2. 工艺信息数字化管理

为实现厚壁压力容器用高强钢焊接工艺信息的高效管理，开发基于MES系统的工艺数据库至关重要。该数据库能够对焊接工艺所涉及的各类参数进行精准记录与存储，诸如焊接电流、电压、焊接速度、预热温度等关键参数^[6]。这使得在后续产品生产过程中，可便捷地追溯各参数信息，确保焊接过程的一致性与可重复性。同时，数据库具备版本控制功能，能对不同阶段、不同优化程度的焊接工艺版本进行有效管理，避免因工艺变更而导致的混淆。通过工艺信息数字化管理，极大地提高焊接工艺制定的效率与准确性，为厚壁压力容器用高强钢焊接工艺的持续优化与

稳定应用提供坚实保障。

（二）生产现场质量控制技术

1. 焊接过程监控体系

焊接过程监控体系对于厚壁压力容器用高强钢焊接质量至关重要。构建的全过程质量监控网络，从焊前准备开始就需严格把控，如对焊接材料的检验、焊件坡口处理等，确保为焊接过程创造良好条件。焊接过程中，对电流、电压、焊接速度等关键参数进行实时监测与调控，这些参数直接影响焊缝成形与性能，一旦出现偏差及时纠正。焊后检验阶段，利用无损检测技术如超声检测、射线检测等，全面检查焊缝内部缺陷。通过这样一套全过程质量监控网络，可实现对厚壁压力容器高强钢焊接质量的精准把控，减少焊接缺陷，提高产品可靠性^[7]。

2. 缺陷预防控制方法

为有效预防厚壁压力容器用高强钢焊接缺陷，建立基于统计过程控制（SPC）的冷裂纹、未熔合等缺陷预警机制至关重要。通过收集大量焊接过程中的数据，如焊接电流、电压、焊接速度、预热温度、层间温度等参数，利用SPC技术对这些数据进行分析处理。设定合理的控制界限，一旦数据超出界限，便发出预警信号，提示操作人员及时调整焊接工艺参数，从而有效避免冷裂纹、未熔合等缺陷的产生。这一机制能对生产现场质量进行动态监控，提前发现潜在问题，将缺陷控制在萌芽状态，提高厚壁压力容器用高强钢焊接质量，降低生产成本，保障产品的安全性与可靠性^[8]。

四、生产现场质量管理实践

（一）质量保证体系构建

1. 人员资质管理系统

在厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究的生

产现场质量管理实践中，人员资质管理系统至关重要。实施焊工技能矩阵管理，能清晰界定不同焊工在各类焊接工艺上的技能水平，精准匹配焊接任务与焊工能力，避免因技能不匹配导致的焊接质量问题。同时，建立覆盖工艺、检验的复合型人才培养机制，使人才不仅掌握焊接工艺技术，还熟悉检验要点，可从源头把控焊接质量，及时发现并解决潜在问题。这一机制有助于培养全面发展的专业人才，为厚壁压力容器的高质量生产提供坚实人力支撑，确保高强钢焊接工艺的有效实施和产品质量的可靠保障^[9]。

2. 设备状态监控方案

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，设备状态对焊接质量至关重要。制定焊接设备精度校验规程，定期对焊接设备如焊机、送丝机等进行全面精度校验，严格依据相关标准与工艺要求，确保设备各项参数精准无误，为高质量焊接提供基础保障。同时，开发焊机参数在线监测系统，借助先进的传感器与信息技术，实时采集焊机的电流、电压、焊接速度等关键参数，实现对焊接过程的动态监控。一旦参数出现异常波动，系统立即发出警报，以便操作人员及时调整，保障焊接过程稳定。该系统还能存

储历史数据，用于后续的数据分析与质量追溯，进一步提升质量管理水平^[10]。

（二）关键工序控制点设置

1. 焊接环境控制标准

在厚壁压力容器用高强钢的焊接过程中，焊接环境对焊接质量影响显著。需严格制定环境温湿度及防风措施的量化控制指标与执行规范。对于环境温度，应保持在适宜范围，过低易导致焊缝产生裂纹等缺陷，通常建议控制在不低于5℃，具体根据钢材特性微调。湿度方面，相对湿度不宜超过60%，过高湿度会使焊缝中出现气孔等问题。同时，要做好防风措施，当风速超过2m/s时，应采取有效防风屏障，如设置防风棚等，避免焊接过程中空气流动干扰焊接电弧稳定性，保证焊接质量的一致性与可靠性，严格执行这些量化指标与规范，能有效提升高强钢焊接的质量。

2. 过程参数监控程序

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，过程参数监控程序至关重要。对于电压电流波形采集，选用高精度传感器，直接连接到焊接设备的输出端，确保能准确捕获实时的电压电流波形数据。这些数据通过专用线路传输至数据处理终端，运用特定算法对波形进行分析，判断焊接过程的稳定性。层间温度监测方面，采用红外测温仪或热电偶，在每层焊接完成后，迅速测量焊缝及附近区域的温度。将测量数据实时反馈到控制系统，若温度超出预先设定的范围，系统立即发出警报，提醒操作人员调整焊接节奏或采取冷却、预热等措施，以保证层间温度符合工艺要求，从而确保高强钢焊接质量。

（三）质量追溯与持续改进

1. 缺陷溯源分析方法

在厚壁压力容器用高强钢焊接的生产现场，缺陷溯源分析方法对于质量追溯与持续改进至关重要。首先可采用失效模式与效应分析（FMEA），通过识别潜在焊接失效模式，分析其可能后果及产生原因，评估风险优先度，确定关键缺陷因素。利用鱼骨图工具，从人、机、料、法、环、测等方面系统梳理导致焊接缺

陷的原因，直观展现因果关系。基于大数据分析，收集大量焊接工艺参数、设备运行数据、人员操作记录等，运用数据挖掘算法，挖掘出与焊接缺陷紧密相关的关键参数及规律，实现缺陷的精准溯源，为后续针对性改进措施的制定提供有力依据，提升焊接质量。

2. 质量改进 PDCA 循环

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，质量改进 PDCA 循环发挥着关键作用。Plan 阶段，根据高强钢焊接特点及质量要求，制定详细的焊接工艺计划，明确各项工艺参数及质量目标。Do 阶段，严格按照计划执行焊接操作，规范工人操作流程，确保焊接过程稳定。Check 阶段，运用无损检测等手段对焊接质量进行全面检查，将实际结果与质量目标对比，找出偏差。Act 阶段，针对检查发现的问题，分析原因，采取改进措施，如优化焊接工艺参数、加强工人培训等。通过不断重复 PDCA 循环，持续提升厚壁压力容器用高强钢焊接质量，构建以过程能力指数 CPK 为核心的质量持续改进体系，使焊接工艺不断优化，满足生产高质量厚壁压力容器的需求。

五、总结

高强钢在厚壁压力容器制造中应用广泛，对其焊接工艺评定及关键技术的研究意义重大。本次研究成果显著，明确了适用的焊接工艺，通过工艺评定确定了合适的焊接材料、焊接层数、焊接速度等参数，有效保障了焊接接头性能。同时，提炼出工艺参数优化与质量控制关键技术，如通过调整热输入改善焊缝组织，利用无损检测技术确保焊接质量。实际工程应用效果良好，提高了厚壁压力容器的制造质量与可靠性。然而，当前研究仍存在局限性，如部分复杂工况下的焊接工艺尚不完善。未来研究应聚焦复杂工况适应性，深入探究极端条件下的焊接工艺优化，进一步提升高强钢厚壁压力容器的焊接技术水平，满足工业发展的更高需求。

参考文献

- [1] 刘亚星. 高强钢冷连轧过程核心轧制模型与关键工艺技术研究 [D]. 燕山大学, 2021.
- [2] 石百顺. 690MPa 低屈服比超高强海工钢焊接工艺研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] 孙伟. 中厚板 Q690D 高强钢激光-药芯焊丝电弧复合焊接工艺及组织性能 [D]. 山东大学, 2022.
- [4] 徐浩然. 舰船高强钢厚板焊接固态相变影响研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023.
- [5] 段士华. 3mm 厚高强钢 K-TIG 焊接工艺及电弧特性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 苏建国. 高强钢 STREX 700E 的焊接工艺评定 [J]. 今日制造与升级, 2024, (03): 43-46.
- [7] 刘洪武, 徐向军, 马立朋, 等. 大跨度钢桁梁桥高强钢弦杆焊接工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2023, (11): 53-59.
- [8] 宋佳峰. 潮湿环境高强钢焊接工艺及工程应用 [J]. 建筑技术, 2023, 54(11): 1336-1338.
- [9] 刘庚林. 客车用高强度钢与普通钢的焊接工艺研究 [J]. 客车技术与研究, 2022, 44(03): 47-49.
- [10] 董自虎, 胡剑. 某高强钢焊接工艺分析 [J]. 材料开发与应用, 2023, 38(03): 12-16.