

窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接中的应用研究

王永庆

(中国石油工程建设有限公司, 北京 100120)

摘要 在工业生产阶段, 重型机械、船舶制造、压力容器等关键领域都广泛应用厚板结构, 其焊接质量和效率直接影响装备整体性能以及服役过程中的安全。传统厚板焊接工艺因焊缝宽度偏大、热输入高, 常出现成型不理想、变形量偏大等问题, 难以契合现代工业对高精度、高效率焊接的需求。本文针对窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接中的应用展开研究, 系统剖析窄间隙焊接工艺在焊缝成型、生产效率、变形管控等方面的核心优势, 考察自适应系统、焊接机器人单元、数据采集分析系统等自动化设备的应用模式, 重点阐释焊缝跟踪、智能工艺决策等关键技术的实践手段, 以期通过工艺优化及设备集成, 构建适配厚板焊接的高效处理方案, 为厚板焊接作业的质量提升、效率提高和自动化升级提供技术参考, 助力窄间隙焊接技术在工业领域实现规模化应用。

关键词 窄间隙焊接工艺; 自动化设备; 厚板焊接

中图分类号: TG44

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.041

0 引言

随着工业制造向大型化、重型化方向发展, 厚板结构在诸多关键装备中的应用占比持续上升, 其焊接技术水平成为制约装备制造质量的核心因素之一。在厚板焊接的过程中, 传统焊接工艺受自身技术特性的局限, 遇到许多明显难题: 焊缝成型稳定性不佳, 容易引发气孔、裂纹等缺陷, 质量精准控制难以实现; 焊接工序繁杂, 需进行多层多道的焊接作业, 导致生产效率处于较低水平; 依赖人工操作的环节较多, 自动化与智能化程度较低, 不仅增加了人力成本, 还因人为因素影响焊接质量的一致性。

厚板焊接技术的进步迫切需要突破传统工艺局限, 寻求兼具高质量、高效率和高自动化特性的新型技术手段。窄间隙焊接工艺凭借焊缝间隙窄、热输入集中等特性, 在减少焊接材料消耗、控制焊接变形方面展现突出优势, 而自动化设备的融入为该工艺的精准实施提供了保障。开展窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接应用实例的研究, 可切实解决传统厚板焊接存在的质量控制困难、效率较低、自动化程度不足等问题, 提升厚板焊接标准化及智能化的水平。此研究不仅符合工业制造转型升级的发展需求, 还可为相关领域的技术创新提供理论参考及实践借鉴, 对推动装备制造行业实现高质量发展具有重要的现实意义。

1 窄间隙焊接工艺优点概述

1.1 具有优良的焊缝成形效果

焊缝成型效果佳, 窄间隙焊接凭借特有的加工方法, 优势十分明显。在执行窄间隙焊工艺时, 采用窄间隙焊接方式, 焊缝横截面近似矩形, 此形状极大地提升了焊缝成型能力, 外形规整且端正, 内部缺陷发生率显著下降, 有效增强了焊接的可靠性^[1]。

1.2 生产效率显著

从焊接技术角度看, 窄间隙焊接凭借独特优势成为技术关键, 其高效焊接的特性十分突出, 焊接生产率较高。窄间隙焊接凭借其特有的窄缝结构设计, 显著提升了焊丝及焊渣的利用效率, 同时焊接过程大幅提速, 进而有效增强了焊接效能。

1.3 有助于实现低变形焊接

针对焊接工艺的实施, 若接合处变形不明显, 通过窄间隙焊接可大幅降低结构形变程度, 该属性是其关键亮点, 采用专门工艺参数进行窄间隙焊接, 相对普通焊接技术, 熔池横截面积极具减小, 减少了需熔融及凝固的金属量, 实现了热量的优化调控, 热流传递强度降低, 加工件热场梯度下降, 热耦合应力减小。热应力是焊接变形产生的关键驱动力, 热应力递减, 变形量级大幅下降, 针对结构复杂的大型机械零件加工时, 对结构件的尺寸偏差与形状误差限制严格, 若

加工受热产生明显形变，返工过程必然抬高支出，甚至削弱结构功能性，采用此种焊接方式可明显降低形变程度，维持产品成形稳定性，促进高效产出，对体积大、构造复杂的工件加工优势明显^[2]。

1.4 便于实现自动化生产

在高度自动化的窄坡口焊接场合，若想追求良好焊接质量，就必须实现焊枪工作角度的精准把控。由于该工艺对参数精度有着极高要求，人为控制难以实现参数的长期稳定达标，采用自动化方案恰好能满足此类精密控制需求，它可以可靠地进行精密定位与姿态调整，依照既定程序，实时闭环调节焊枪在窄间隙空间的构型，达成焊接过程可控、结果一致的目的。

1.5 经济性优势突出

窄间隙焊接坡口截面积较传统工艺有效缩减，填充金属用量大幅降低；低变形特性减少焊后矫正工序，能耗与人工成本同步下降。全周期综合成本较宽坡口焊有效降低，经济性显著提升，尤其适用于大型构件批量制造场景。

2 厚板焊接技术现状

2.1 焊缝质量难以精确控制

开展厚板焊接任务时，因材料厚度大，高热量集中输入，焊缝易出现复合质量缺陷，稳定性降低。变形是焊接中的主要缺陷，焊接热循环会导致收缩和膨胀不一致，造成整体和局部变形；气孔和夹杂物会显著降低焊缝质量。夹杂物产生的两个主要原因是材料纯度不达标和焊接氧化，气孔多由于焊接区域湿度高、保护气体纯度不够或操作参数设置偏差引起。存在的缺陷会削弱焊缝承载能力，存在裂纹扩展隐患，威胁焊接部件可靠运行^[3]。

2.2 焊接作业效率不高

在厚板焊接中，手工电弧焊、埋弧焊等工艺技术可行，但熔敷效率不高、产出能力不强，导致焊接效率偏低。焊接时需不断更换焊条、调整参数，多层多道焊接又增加了时间，跟不上现代制造工艺的节奏。厚板焊接时通常需进行预热及后热处理，致使整体工期相应延长。为提高焊接作业效率，专家团队正针对高功率激光焊接和电子束焊接开展专项研究，此类技术优势突出，表现为高能量密度、快速焊接速率以及狭窄热影响区，将显著提升厚板焊接的生产效率。

2.3 自动化程度有待提升

自动化实施进度滞后，厚板焊接仍普遍采用人工操作模式，自动化进展滞后，采用人工焊接会阻碍产量的有效提升，且降低质量可控性，操作者的工艺掌

握程度关系到焊接质量稳定性，难以实现稳定的焊接质量。手工焊接存在作业强度大、环境恶劣等弊端，引发交付周期延长。基于厚板焊接工艺的智能自动化实施需求，技术团队正全力攻克焊接机器人及自动化系统的核心工艺难点，采用此类设备可实现焊接参数的毫米级精准控制，实施焊接作业的智能自动运行，以此提高作业速度，实现理想焊接效果，降低用工支出^[4]。

3 自动化设备在厚板焊接中的应用

3.1 实现精准控制的自适应系统

针对窄间隙厚板焊接的关键工序阶段，诸多工艺参数将直接影响焊接质量，板材制造公差与焊缝外形起伏，造成焊缝间隙稳定性减退，焊接工艺的优劣直接关系到构件的安全可靠性，实现焊缝质量稳定是核心要求，基于此，自适应控制技术的采用成为必然途径^[5]。

该系统由焊缝跟踪传感器、焊机控制单元和机器人控制系统三个核心组件协同工作实现控制功能。系统利用传感器实时检测焊缝的形态和坐标，该功能类似于系统的视觉组件。采集到的焊接数据实时传送到焊机控制模块，控制系统根据采集到的信号，如同技艺娴熟的焊工实时调整焊接电流、电压等关键参数，以保持焊缝成型质量的稳定。机器人控制系统展现出舞者般的精准协调能力，结合焊缝形貌反馈，协同调节焊枪的X-Y-Z坐标和偏转角度，使焊枪始终处于最佳工作状态。自适应控制模式的应用，明显提高了窄间隙厚板焊接的质量。

3.2 完成自动化焊接的机器人单元

就厚板窄坡口焊接专业而言，采用焊接机器人是实现自动化焊接的重要手段，与人工焊接作业相比，显著优点体现在效率提升、精度保证和灵活适配三个维度^[6]。

主流窄间隙焊装置普遍采用多模块设计，该装置采用六轴焊接机器人作为主体，运动稳定性强，可实现精准定位，可实时优化焊接工艺参数，实时精准调整焊枪的坐标与朝向，实现焊枪在空间多维度上的稳定路径跟踪，实现焊道的在线追踪。厚板窄间隙焊接操作可借助这套智能焊接机械装置由自动化系统完成。装置能稳定夹持焊枪，因其结构精密，使焊枪始终处于预设理想位置，维持焊缝间隙的精确度，而细微间隙误差就会影响焊接质量。其作为焊接能量核心输出设备，能精准输出预设焊接电流电压值，适配不同工艺参数要求，实现对焊接参数的精准控制^[7]。

3.3 负责信息获取与分析的数据系统

在厚板窄间隙焊接的精细作业执行时，优质焊缝的实现核心在于焊接参数的精准管理与持续优化。采

用精确数据采集与分析策略，对焊接全过程进行实时监测和数据挖掘，是关键的重要步骤。数据采集系统能实时捕获焊接电流、工作电压、运行速率和焊枪姿态，随后将实时采集的数据统一存入数据库。对这些复杂数据进行多维度分析，可系统筛选出与焊接质量相关的关键参数，进而合理调控焊接工艺参数，大幅提高焊接件的质量水平^[8]。

3.4 焊缝跟踪与自适应控制系统

自动化厚板焊接设备的关键技术支撑，是能实现焊缝连续跟踪和工艺参数自适应的智能系统。厚板焊接持续操作阶段，由于装配尺寸存在误差、焊接热变形和坡口加工精度有细微偏差，设定的焊接轨迹难以与实际情形完全一致，而保持焊枪精确对准焊缝中心是实现焊接质量稳定的关键挑战。这套系统采用激光视觉与接触式传感等先进检测方法，使焊接机器人具备实时视觉监测和触觉反馈的感知机制，它能够对焊缝区域进行持续动态追踪，实时测量焊缝位置、宽度以及熔池形态变化等重要参数。采集的动态数据迅速传至中央运算模块，与理论标准焊缝模板进行数据比对。若检测到焊枪偏离焊缝中心线达到最小界限，控制模块即刻发出校正指令，该指令促使焊枪执行部件自动调整，立即调节 X/Y 轴位置及摆动运动参数，保证焊接电弧始终聚焦在焊缝的理想作用点上。这种闭环调控方法显著减少了外部干扰带来的焊缝偏移、咬边和未熔合缺陷，使焊接操作从预设程序迈向智能响应，明显提高了厚板焊接接头的一致性、可靠性及自动化水平。

3.5 智能工艺决策与专家系统

突破单维度参数监控的限制，运用智能专家系统进行工艺决策是厚板焊接自动化的新趋势。针对不同的坡口形状、材料属性和结构要求，单纯套用固定参数或针对单一偏差做局部调整，不足以实现最高品质标准。智能工艺决策系统是融合大量焊接经验和案例的 AI 核心模块，它能综合调用设计输入信息、焊接实时运行情况和历史数据，进行整体推理和自主判断。在开始焊接前，系统根据厚度规格、材质选择和坡口尺寸等输入数据，智能生成一组优化的基础焊接工艺参数。焊接实施阶段，系统能够对采集到的大量数据进行深入挖掘和关联分析，既可判定当前是否合规，又能预测焊接质量变化趋势。一旦识别出工艺窗口出现偏离或潜在质量风险处于初期，系统不再采用单纯事后补救方式，而是运用预先构建的专家知识库和算法，基于预判主动修正多组焊接参数之间的协同关系，

甚至智能调整焊接过程，从而在宏观层面实现焊接全过程的最优化质量控制，实现从机械式反馈到智能化决策的本质转变。

4 结束语

本文针对窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接工作中的应用展开系统研究，细致梳理了窄间隙焊接工艺的关键优势，详细分析了厚板焊接技术的现状与难点，并深入探讨了各类自动化设备在厚板焊接中的应用情况与作用机理。窄间隙焊接工艺凭借良好的焊缝成型效果、显著提高的生产效率、低变形特性及自动化适配性，可精准契合厚板焊接的技术需求；而诸如自适应控制系统、焊接机器人单元、数据处理系统等自动化设备的应用，进一步实现了厚板焊接的精准控制、智能决策与高效开展，有效弥补了传统厚板焊接技术的不足。

窄间隙焊接工艺与自动化设备的协同应用，为厚板焊接提供了兼顾质量、效率与智能化的解决方案，对促进厚板焊接技术的升级进步具有重要意义。随着智能制造技术的不断发展，窄间隙焊接工艺将向着参数优化精度提升、材料适配范围扩大的方向发展；自动化设备还将进一步融入人工智能、数字孪生等先进技术，实现焊接过程全流程智能控制及自主决策。该技术体系将在新能源装备、海洋工程等新兴领域拓展其应用场景，为更多工业领域实现高质量发展提供坚实的技术支撑，助力制造业向智能化、高效化、绿色化方向稳步迈进。

参考文献：

- [1] 王相亭,王永康.窄间隙焊接工艺研究及在缸筒上的应用[J].金属加工(热加工),2024(09):55-58.
- [2] 王莹刚.厚板 TC4 钛合金旋转电弧窄间隙 GTAW 立向上焊接工艺研究[D].济南:山东大学,2024.
- [3] 赵荣泽.SA508-3 低合金钢空心钨极窄间隙焊接工艺及组织性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [4] 许智杰.厚板钛合金窄间隙激光诱导 TIG 电弧焊接工艺及性能研究[D].大连:大连理工大学,2024.
- [5] 孙海港.澳新标准高硼元素厚板焊接工艺研究及其应用[J].金属加工(热加工),2023(09):47-51.
- [6] 马生明.超窄间隙焊接装置研制与焊接工艺参数多目标优化[D].兰州:兰州理工大学,2023.
- [7] 黄河.中厚板多层多道焊接机器人路径规划策略与实验研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- [8] 韩飞云.焊接自动化技术在石油钻采设备制造中的应用[J].中国设备工程,2019(11):30-31.