Current Status and Development Trends of Automated Welding Technology in Petrochemical Engineering

Xixing Wen Xiangchao Kong

1. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 743418, China
2. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Handan, Hebei, 056001, China

Abstract

This paper systematically examines the current application status and future development trends of automated welding technology in petrochemical engineering construction. It first defines the core concepts of automated welding within this field and analyzes its fundamental value in enhancing project quality, ensuring construction safety, and improving operational efficiency. Subsequently, it details the technical characteristics of mainstream automated welding processes and their specific applications in critical stages such as pipeline prefabrication, modular construction, and storage tank installation. The study focuses on identifying technical bottlenecks and management challenges hindering widespread adoption of this technology. Finally, it outlines a forward-looking roadmap for the evolution of automated welding toward intelligent, flexible, and standardized operations through process innovation, equipment upgrades, and system integration, providing theoretical insights for the transformation and upgrading of welding technologies in the petrochemical industry.

Keywords

automated welding; petrochemical engineering; intelligentization; process control; technology integration

石油化工工程自动化焊接技术的应用现状和发展趋势

文星星 孔祥超

1. 中国石油天然气第六建设有限公司，中国·甘肃 平凉 743418
2. 中国石油天然气第六建设有限公司，中国·河北 邯郸 056001

摘　要

本文系统性地探讨了自动化焊接技术在石油化工工程建设领域的应用现状及其演进方向。文章首先界定了石油化工工程范畴内自动化焊接技术的核心内涵，分析了其在提升工程质量、保障施工安全、提高作业效率方面的根本价值。进而，详细阐述了当前主流自动化焊接工艺的技术特点及其在管线预制、模块建造、储罐安装等关键环节的具体应用场景。文章重点剖析了制约该技术深度普及的技术瓶颈与管理挑战。最终，从工艺革新、装备升级、系统集成等维度，前瞻性地论述了自动化焊接技术向智能化、柔性化、标准化演进的核心路径，为石油化工行业焊接技术的转型升级提供理论参考。

关键词

自动化焊接；石油化工工程；智能化；工艺控制；技术集成

1 引言

石油化工工程作为国家能源与基础原材料供应的重要支柱，其设施建设具有规模宏大、结构复杂、介质高危、服役环境苛刻的显著特点。焊接作为连接金属构件、形成密闭承压系统的核心工艺环节，其质量直接关乎装置的整体完整性、安全可靠性与长期运行寿命。传统手工焊接方式高度依赖焊工的个人技能与作业状态，在一致性、稳定性、可追溯性方面存在固有局限，难以完全满足现代石化工程对高质量、高效率、高安全标准的严苛要求。因此，推动焊接作业从依赖人工经验向依靠自动化、智能化技术转变，已成为行业发展的必然选择。

2 自动化焊接技术的概念阐释与核心价值

2.1 石油化工工程范畴内自动化焊接的技术定义

自动化焊接技术特指在石油化工装置建造过程中，通过机械装置、传感系统与程序逻辑控制器协同工作，部分或全部替代焊工手持焊枪进行直接操作，实现焊接参数预设、焊缝轨迹跟踪、熔池状态监控与工艺过程闭环调节的先进制造技术。其核心在于将焊接工艺知识数字化、代码化，并由执行机构精准复现，从而剥离了焊缝质量与操作者瞬时状态的强关联。

【作者简介】文星星（1995–），男，中国甘肃平凉人，本科，助理工程师，从事焊接技术研究。

2.2 自动化焊接技术对于石化工程建设的根本性意义

该技术的根本性意义在于为石化工程建设质量提供了基于确定性的保障机制。首先，它通过恒定的运动精度与参数稳定性，极大提升了焊缝成形的一致性，有效降低了气孔、夹渣、未熔合等传统手工焊易发缺陷的出现概率。其次，自动化设备可适应恶劣施工环境，如在高温、高寒、有限空间或存在有害气体的场合进行连续作业，显著降低了焊工的劳动强度与职业健康风险。再者，焊接过程数据可被完整记录与追溯，为实现焊接质量的全生命周期数字化管理奠定了基础，有助于故障归因与寿命预测。从工程经济性角度，自动化焊接通过连续作业大幅提高了熔敷效率，缩短了施工周期，其长期综合成本优势日益凸显。

3 自动化焊接的主要工艺形式与技术特征

3.1 基于轨道引导的自动焊接工艺形式

轨道式自动焊接系统是当前石化现场应用最为成熟的形式之一。该系统将焊枪搭载于沿预设刚性轨道行走的小车上，轨道通过磁性或机械方式固定于工件表面。其技术特征表现为运动轨迹高度精确、重复定位性能优异，特别适用于长直焊缝、环焊缝等规则路径的焊接。该系统通常集成多丝或热丝技术，通过提高熔敷速率来适应厚壁结构的施工需求，同时配备电弧传感或视觉传感以实现焊缝的自动对中与宽度跟踪。

3.2 依赖于机械臂执行的智能化焊接工艺形式

以工业机器人为载体的智能化焊接系统代表了更高的自动化层级。六轴或更多自由度的机械臂提供了极其灵活的空间运动能力，能够完成复杂三维空间曲线焊缝的焊接，如管管相贯接头、泵阀异形件、结构框架节点等。该形式的特征在于其强大的离线编程与仿真能力，施工前可在虚拟环境中规划最优焊枪姿态与路径，避免干涉碰撞。先进的机器人系统融合激光扫描传感，能够对组对后的工件进行实际轮廓扫描，并与理论模型比对后自动生成修正后的焊接程序，从而补偿工件加工与装配误差，实现真正的自适应焊接。

3.3 适用于特殊场景的自动化焊接工艺形式

除上述主流形式外，针对石化工程特定场景衍生出若干专用自动化工艺。例如，窄间隙自动焊专为厚壁压力容器的环缝和纵缝设计，采用特制焊枪在极窄的坡口内进行多层多道摆动焊接，在保证焊透性的同时最大限度地减少填充金属用量与焊接变形。全位置管道自动焊机则用于现场固定口的焊接，其机头通常设计为分离式钳状结构，能够包裹管壁进行爬行焊接，内置的多个微型执行器独立控制各区域参数，以应对焊接位置连续变化带来的熔池控制难题，确保在全周范围内获得均匀一致的焊缝质量 [1]。

4 石油化工工程自动化焊接的应用实态与未来走向

4.1 管道预制环节自动化焊接的规模化应用实态

在环境可控、工位固定的管道预制厂内，自动化焊接技术已实现了高度规模化和流水线化的工业级应用，这是其应用最成熟、效益最显著的领域。对于长输管道项目，广泛采用“内焊机根焊 + 外焊机自动填盖”的流水作业模式。内焊机在管道内部展开多个焊炬，一次性完成整周根焊，效率极高且背面成形光滑。随后，管道移至外焊工位，多台外焊机（通常为双焊炬或四焊炬）沿轨道环绕管道，同步进行热焊、填充焊和盖面焊，将原本需要多日的焊口作业压缩至数小时内完成。在工艺管道的预制中，基于焊接机器人、管端坡口机、管件变位机（翻转机）集成的柔性制造单元已成为现代化预制厂的标准配置。通过变位机的精确旋转与翻转，将管道上的法兰角焊缝、对接环缝等始终调整到机器人最擅长的平焊或船形焊位置，这不仅获得了最高的焊接质量，也极大地简化了机器人编程，只需针对少数几种标准位置编程即可覆盖绝大多数焊缝。预制环节自动化的核心追求在于将焊接工序彻底分解、标准化，并融入节拍化的生产流水线，从而实现质量、效率与成本的最优平衡 [2]。

4.2 模块化建造中自动化焊接的深度集成实态

模块化建造是近年来石化工程领域的革命性趋势，即将整套装置在条件优越的陆地车间分解为多个巨型功能模块进行预制，然后整体运输至现场拼装。在这一模式下，自动化焊接技术从“辅助工具”升级为“核心生产中枢”。大型结构模块（如钢结构框架）、管廊模块（集成了数百米管道、阀门、仪表）的制造，涉及海量重复的标准化焊接节点，如 H 型钢梁柱连接、管道支吊架焊接等。机器人焊接工作站被深度嵌入到从钢材数控切割、坡口机器人加工、到组对校正、再到最终焊接的全数字化流水线中。基于统一的三维产品信息模型，焊接机器人可以直接读取每一条待焊焊缝的精确坐标、尺寸、坡口形式及材质信息，并自动从中央工艺数据库中调用经过严格评定的最优焊接参数包 [3]。这种深度的信息集成与流程贯通，其价值不仅在于提升了单个焊点的质量，更在于通过确保模块内数以万计焊点质量的绝对均匀一致，从根本上保障了各个重量达数千吨的巨型模块在经历长途海运、吊装后，在现场能够实现毫米级的精准对位与快速连接，这是模块化战略得以成功实施的不可或缺的技术支柱。

4.3 现场安装环节自动化焊接的技术优势与适应性

施工现场环境复杂多变，存在组对误差大、风雨气候干扰、空间受限、工况不可控等诸多不利因素，这对自动化焊接技术的环境适应性与智能性提出了终极考验。尽管挑战巨大，自动化焊接在现场安装的关键环节已展现出不可替代

的优势。在大型储罐、塔器、反应器的现场立式组装中，自动化焊接是主流选择。例如，储罐壁板的竖向焊缝普遍采用气电立焊自动化完成，其效率可达手工焊的三至五倍，且焊缝一次合格率极高。大型塔器逐段吊装后的环向对接焊缝，则广泛应用自动埋弧横焊设备。对于遍布全厂的工艺管道固定口安装，全位置自动焊机的推广正在加速。这些适应现场的设备，其技术先进性集中体现在智能传感与自适应控制上。它们集成了更精密的视觉传感或基于电弧物理信号（如电弧电压、声发射）的监控系统，能够实时“感知”坡口宽度的变化、组对间隙的起伏以及环境风力的影响，并通过内置的智能算法，自动、平滑地调整焊枪的横向摆动幅度、焊接行进速度乃至送丝速度与热输入，从而在非理想的、动态变化的工况条件下，依然能够输出成形美观、内部质量合格的焊缝。

4.4 当前自动化焊接技术推广普及面临的核心制约

尽管技术优势显著且应用案例不断增多，但自动化焊接在石化工程领域的全面普及仍面临一系列深层次的制约因素。首当其冲的是高昂的初始投资与总拥有成本。一套功能完备的高性能焊接机器人系统、专用的自动化焊接专机及其必需的激光跟踪、传感系统、工装夹具，购置费用动辄数百万，且后期的维护、升级、工艺调试同样需要持续投入，这对许多项目驱动型、利润空间有限的中小型工程承包商构成了较高的资金门槛。其次是技术准备与工艺开发的复杂性。不同于手工焊的“即插即用”，针对每一项新工程的特定材料（如高强钢、耐热钢、双相不锈钢）、新的接头形式，都必须进行系统的焊接工艺评定试验，以建立可靠的焊接参数数据库，这个过程耗时耗力，对工艺工程师的理论功底和实验能力要求极高。第三是系统柔性的不足。当前多数自动化系统，尤其是轨道专机，是为特定类型的焊缝“量身定做”的。而石化工程现场存在大量非标准、小批量、多样化的焊接任务，为每一种此类焊缝定制自动化方案在经济上不可行，系统快速重构与重编程的能力尚待突破。最后，也是最为隐性的制约，来自于管理与思维的惯性。传统的项目管理流程、以“人工工时”为基础的施工组织与计价模式、基于事后抽检的质量验收体系，与自动化焊接所代表的“前期高投入、过程高可控、数据可追溯”的新模式存在内在冲突。推动自动化焊接，不仅是一场技术变革，更是一场涉及标准更新、流程再造、技能重构的深层组织变革。

4.5 自动化焊接技术向智能化深度演进的必然趋势

展望未来，石油化工工程对焊接质量、效率与可靠性的需求永无止境，这必将驱动自动化焊接技术向着更高程度的智能化、网络化与本质柔性化方向深度演进。其核心趋势是从当前以“程序执行”为主的自动化，向以“感知 - 决策 - 执行”闭环为特征的智能化跃迁。未来的焊接单元将是一个高度集成的智能体：通过深度融合高分辨率机器视觉、3D 激光雷达、光谱分析与多物理场传感，它能够在作业起始瞬间自主识别工件身份、扫描焊缝三维形貌、评估装配质量；在焊接过程中，不仅能监控熔池的几何形状与振荡频率，还能通过光谱信息初步分析熔池的冶金状态；基于这些海量实时数据与内置的工艺知识图谱、机器学习模型，系统能够进行自主决策，动态调整参数以应对各种扰动，并实时预测焊缝成形与内部质量，实现真正的在线质量判定。数字孪生技术将成为标准配置，在虚拟空间中构建与物理焊接过程完全同步的镜像，通过多物理场耦合仿真，提前预测并优化焊接应力、变形和微观组织演化。从系统形态上，模块化、可重构的柔性制造单元将逐步取代固定式专机，通过标准化接口快速更换不同的末端执行器（焊枪、激光头、打磨头等），并借助云端共享的工艺算法，迅速适应新的焊接任务。最终，焊接将不再是孤立的“工位”，而成为工厂物联网与工业互联网中的一个智能节点，与材料管理、生产调度、质量系统、设备健康管理平台等无缝连接，实现从单一工序优化到全产业链协同优化的跨越，为石化工程建设带来革命性的进步。

5 结语

自动化焊接技术在石油化工工程领域的渗透与应用，已跨越了早期的概念验证与试点示范阶段，正稳步迈入规模化、深度化集成应用的新时期。它不再仅仅被视为提升某项具体工艺效率的替代工具，其更深层次的意义在于，它作为一项使能技术，正在深刻改变石化工程建设的底层逻辑——从依赖个人技艺的“手工业”模式，转向依托工艺科学、数据驱动与智能装备的“现代工业”模式。这项变革在提升工程本体质量与安全的同时，也为行业应对熟练焊工短缺、实现绿色低碳建造、拥抱数字化转型提供了关键抓手。当然，前方的道路并非坦途，高昂的成本、复杂的技术集成、对管理体系的冲击都是必须正视的挑战。这要求行业内的设计方、业主、承包商、设备供应商乃至标准制定机构形成共识，协同发力，在技术研发上持续创新，在标准规范上与时俱进，在人才培养上未雨绸缪，在商业模式上勇于探索。

参考文献

[1] 李辉.石油化工工程自动化焊接技术的应用现状和发展趋势[J].中国石油和化工标准与质量, 2024(21):193-195.

[2] 邬剑波.汽车产业中焊接自动化技术的现状及发展趋势[J].大众汽车, 2023(9):0087-0089.

[3] 孙克.离散制造装备传感器应用技术现状与发展趋势[J].仪表技术与传感器, 2023(5):1-4.