

管道预制焊接中全自动焊技术应用效果与推广前景分析

康玉祥

中石化第十建设有限公司大连分公司 浙江 舟山 316000

【摘要】：管道预制焊接中存在焊接效率低、成形质量不稳定、人工依赖高等问题，限制长输管道建设进度。本文通过集成全自动焊接设备、构建工艺参数数据库、建立工艺试验平台，系统化优化焊接装备与工艺流程。内容涵盖工艺形式、适应性条件、运行维护与效率提升等方面，并提出促进其推广的实际路径。该方法在焊接节拍控制、参数稳定性与全过程自动化运行方面表现出良好的应用效果，为推动长输管道焊接标准化与高效化提供支撑依据。

【关键词】：管道预制；全自动焊接；轨道焊接；参数控制；系统集成

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.018

引言

随着焊接自动化水平不断提升，全自动焊接技术在管道预制阶段的应用成为提升作业质量与效率的关键手段。全位置自动焊系统的组成、运行特性、工艺控制及推广条件进行系统性研究，在构建一套标准化、可复制的预制焊接作业路径，为油气管道建设提供技术支撑。

1 全自动焊接技术概述

1.1 技术发展背景与设备构成

全自动焊接系统主要由焊接执行单元、轨道行走机构、电源装置、送丝机构、自动跟踪传感器和控制模块组成^[1]。焊机通过轨道环绕焊接结构外壁运行，由程序控制多层多道进行自动焊接操作。系统中送丝机构同步控制焊丝进给速度和电弧稳定性，自动跟踪模块可识别焊缝中心线与坡口边缘变化，实现焊枪位置自动微调。焊接控制器通过参数设定控制电流、电压、送丝速度及焊接轨迹。焊接装置配置成套辅助设备，通风除尘系统、固定装置及冷却循环系统，确保焊接连续性与结构稳定性。

1.2 主要工艺形式

工艺布置依托环绕管道外壁的闭合轨道，配合全位置焊接系统，在不改变管道姿态条件下完成从根焊至盖面的全程自动焊接。根焊阶段使用内置对中器锁紧管段，通过机械导引系统精准控制焊枪位置，形成初始熔池。填充焊与盖面焊阶段，采用多层多道焊接模式，焊枪沿设定路径分层逐层堆焊，调节熔宽与熔深。送丝系统根据各层通道宽度进行动态调整，控制熔滴过渡方式，维持弧长恒定。过程采用多参数协调机制，确保不同位置角度焊道成形一致，避免因重力影响产生偏熔或夹渣缺陷。

2 应用于管道预制环节的表现特征

2.1 工艺适应性分析

通过设定内外对口误差容许值在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，并控制坡口间隙在 2mm 至 3mm 之间，配合内对中器机械定位装置，可实现预制管段高精度组对^[2]。系统采用轨道式移动机构，在空间

360° 范围内完成焊接动作，适配管径从 $\Phi 406\text{mm}$ 至 $\Phi 1422\text{mm}$ 范围的直缝管段。在大壁厚工况下，通过调整送丝电机转速为每分钟 3.2米 ，配合恒定热输入实现根焊、热焊、填充、盖面全流程焊接作业。弧压传感器检测焊缝轮廓变化并实时反馈给焊接控制器，由控制程序自动补偿轨迹偏移。在空间转角和垂直位置区段，焊接头部调整角度不大于 15° ，可保持电弧集中度不变，减少高位焊缝的熔深波动。

2.2 工艺参数控制与焊缝质量表现

在全自动焊接过程中，主要工艺参数包括焊接电流、电压、送丝速度、焊枪运行速度、焊缝层数与道数等。根焊阶段采用直流反接方式，焊接电流设置在 90A 至 120A 之间，电压控制在 18V 至 22V 范围，焊枪移动速度约为每分钟 160毫米 ，送丝速度保持在 1.5米/分钟 。进入填充层后，焊接电流提升至 130A 至 150A ，电压上调至 24V 至 26V ，送丝速度提高至 2.2米/分钟 。通过PID控制器实时调节热输入，控制熔池温度均衡。盖面焊阶段维持较低热输入，使用短弧焊模式确保成形平整。整个过程各道焊缝层间温度保持在 150°C 至 220°C 之间，避免产生过热影响金属组织。焊缝外观连续均匀，焊趾与母材过渡圆滑，焊缝宽度稳定在 6mm 至 8mm 范围内，熔深控制在 3mm 至 4mm 之间，焊缝金相组织中奥氏体与铁素体均匀分布，硬度值波动不大。

2.3 操作自动化与稳定性

焊接控制系统通过PLC或工业计算机管理多通道协同控制模块，自动读取坡口类型、焊层数量和焊接速度，实现任务编程与数据导入。机械运行部分由伺服电机驱动，实现 $\pm 0.2\text{mm}$ 精度范围内的平稳运行；轨道安装采用双点导向结构，配合滚轮承载系统，避免轨道震动导致电弧漂移。焊缝跟踪功能采用CCD图像识别与红外激光辅助，实时调整焊枪相对位置，偏差响应时间低于 50毫秒 。熔池动态通过红外热成像监控，若出现冷点或飞溅异常信号，系统将通过保护程序暂停操作并报警提示。整套设备运行过程中，电弧稳定时间大于 95秒 以上，热输入波动控制在 $\pm 0.8\text{kJ/mm}$ 内。全流程可实现多设备同步联控，适应管道预制作业中高节拍、高一致性的作业需求，显著

提升焊接操作的自动化程度与持续稳定性。

3 全自动焊接的效率优势

3.1 作业节拍与焊接速度提升

系统运行时，根焊采用电流 110A、电压 20V，焊枪移动速度为 160mm/min，焊缝宽度控制在 6mm，厚度为 3mm，单圈完成时间为 7 分钟^[3]。填充层使用 140A 电流、24V 电压，焊接速度提高至 190mm/min，控制送丝速度为 2.0m/min，每层间间隙 0.5mm，通道搭接角度设为 40 度。盖面焊采用低热输入参数：电流 90A、电压 19V，焊枪运行速度为 150mm/min，覆盖层厚度为 1.5mm，单道宽度不超过 7mm。

系统采用连续多层多道焊接方式，标准厚壁钢管需完成 6 至 8 层，每层 2 至 3 道，控制总焊接时间在 45 分钟内，远低于人工焊接所需的 90 至 120 分钟。焊机转动环节采用步进驱动机构，平均旋转速度控制在 1 转/分钟，结合恒速轨道推进装置，确保焊接角度与速度匹配，防止焊缝错位或未熔合。整个焊接流程中，预热、焊接、冷却各环节通过系统定时触发器自动切换，不需人工参与，避免节拍失控。系统支持参数预设批量导入，施工过程中无需人工逐条设定，减少焊接准备时间约为 12 分钟，每日平均可完成 22 至 24 道焊缝作业，远高于手工焊每日 10 道以内的极限产出。

3.2 人工依赖度降低

焊接设备采用轨道导引机构，搭载可编程控制系统，通过焊缝路径参数输入后可自动启动焊接流程。操作者仅需在初始阶段完成对中、管段定位及系统参数校验，无需全程手持焊枪或随动操作。设备搭载电弧跟踪系统，集成红外测距模块、激光位移传感器及 CCD 图像识别模块，系统根据焊缝边缘信息实时校正焊枪位置，保证熔池始终位于接头中心，焊道线性误差小于 0.5mm。在焊接执行阶段，伺服系统驱动焊机以每分钟 180mm 速度匀速移动，送丝机构控制精度达 0.1m/min，确保电弧稳定性。焊接参数如电压、电流、焊速、送丝速、焊枪角度等由 PLC 模块分时控制并动态补偿，过程全封闭自动运行。

焊后系统自动启动冷却风机与抽烟装置，维持工作区温度与气体浓度稳定。通过数据库管理接口，操作人员可统一管理焊接数据及设备状态。设备具备远程诊断功能，运行异常通过网络发送报警数据至维护系统，实现集中控制与故障响应。在整套作业流程中，每个工作班组仅需 2 名辅助操作员完成设备设置与成品焊缝检测，不再依赖传统焊接中每道工序配置的单独焊工，焊接现场人力配置由原来的每 6 米管段 6 人降至 2 人，焊接全过程人力干预比例下降至接近设备启动前和结束后阶段，极大减少作业环节中人工介入的频率与强度。

4 推广应用的现实条件与技术瓶颈

4.1 适用场景限制因素

焊接工序要求管段具备圆度偏差小、轴线对中精度高、坡

口一致性良好等特性，常规接口偏差不得超过 $\pm 0.5\text{mm}$ ，否则将导致轨道导向偏移、焊枪偏心或熔深不均^[4]。焊接轨道的布设需基于精确测量的支撑基准面，采用四点式固定结构，其垂直度误差不得大于 0.3 度，轨道间隙需控制在 2mm 以内，以保障焊接车运行平稳。空间条件是设备应用的前提，若预制厂区间纵向作业区长度不足或存在多工位交叉干扰，轨道移动受限，焊接操作将无法连续进行。

设备对施工环境的温湿条件亦有敏感性，运行时要求环境温度在 5℃ 至 35℃ 之间，相对湿度控制在 85% 以下，需在作业面设立封闭防风棚并配备局部抽湿设施。针对管段内外壁温差大的区域，还必须在焊前布设红外测温装置并进行双面预热控制，使焊接热输入分布均匀，防止形成脆化区或过烧区。

4.2 设备运行与维护难点

全自动焊接设备在连续运行过程中对核心部件的性能稳定性和联动响应能力提出严格要求，焊接车轨道驱动系统由伺服电机控制其线性运行，其运行过程中受轨道磨损、转动阻尼变化、电流波动影响，可能导致位置偏移和速度波动，从而影响焊接轨迹均匀性。设备中焊枪控制系统集成自动摇摆机构、角度调节器、弧压反馈组件，需持续实时采集与修正焊枪相对于坡口中心的偏差值，若其中任一传感器失灵，系统无法进行弧长调节，将出现烧穿或未熔合问题。

送丝机构采用电控比例反馈电机进行恒张力送丝，钢丝盘直径变化将导致张力波动，需在每次焊接前通过 PID 闭环控制对张力进行标定。激光辅助跟踪系统通过光束照射检测焊缝边界，其识别算法对反射光斑清晰度依赖度高，若坡口边缘存在油污、氧化层或间隙波动过大，易产生误识别。维护环节需每 48 小时进行一次轨道清洁、紧固件检查、润滑油更换，同时对焊机本体执行温控系统测试、焊接线缆电阻检测、冷却液浓度校准。高频使用区域的伺服电机需定期拆卸并检验碳刷磨损程度，风冷系统应检查散热风扇轴承磨损，必要时进行平衡校正。

4.3 成本结构分析

设备折旧成本按五年平均法计入日常摊销，在单日平均焊接环节中分摊至每根管段，若以单位焊缝长度 L 为基准，则折旧分摊单价可表示为 $C_d = \frac{P_e}{T_u \cdot L}$ ，其中 P_e

为设备采购总价， T_u 为设备使用总时长（小时）。耗材成本由焊丝、保护气体与电极损耗构成，每道焊缝中焊丝用量计算基于熔敷面积与焊道数，焊丝线径固定时，耗量 W 近似为 $W = A \cdot n \cdot \rho$ ，其中 A 为单道焊缝截面积， n 为焊道数量， ρ 为焊丝单位体积质量。电耗成本以焊接热输入计算，其中单位热输入 Q 为 $Q = \frac{U \cdot I \cdot t}{L}$ ，其中 U 为电压， I 为电流， t 为通电时间， L 为焊缝长度，再以单位电价计算每日能耗支出。系统运行过程需配置辅助压缩空气系统、抽气冷却系统与送丝反馈控

制电源,增加电源冗余负载及分配逻辑,提升了电能转换效率但相应增大了系统内部电源损耗。工序耗时影响整体管段周转节拍,自动焊在实现连续作业后可将单位焊缝时间控制在限定窗口内,但在定位、装夹、预热与检测环节仍需固定操作周期,过程不可压缩。

5 促进自动焊技术推广的路径建议

5.1 焊接装备系统化集成

在设备搭建环节,将焊接电源与伺服驱动模块通过 RS485 总线连接至中央 PLC 控制器,各接口按照 Modbus 标准协议统一通信,以确保电弧电流、电压与轨道速度实现同步响应^[5]。焊接执行系统中的轨道运行单元应采用多点支撑结构,并集成角度解算模块与反馈调节芯片,在任意空间姿态下可进行位置偏移修正。送丝系统应与熔滴过渡模式匹配,通过实时调整送丝速度 V_f 控制电弧长度 L_a ,满足公式 $L_a = \frac{V_f}{f_s}$,其中 f_s 为送丝频率调节因子。传感器模块则包含 CCD 视觉组件、红外测距仪与温控反馈单元,各类数据统一接入数据采集卡并进入主控逻辑单元处理。辅助系统如预热、冷却及保护气体分配应按焊接段数分区独立控制,以避免局部压力波动造成熔池不稳定。

5.2 工艺参数数据库构建

参数采集阶段,采用高频采样模块对焊接过程中电流 I、电压 U、送丝速度 V_f 、焊枪角度 θ 、焊接速度 v_w 等关键指标进行毫秒级记录。数据结构中每组参数与工件材质、坡口角度、焊道层次一一对应,构成主键索引体系。在数据库建立过程中,设定数据输入界面,包含坡口类型选择、根部间隙输入、焊层数与层间温度录入等字段。参数之间建立函数关系模型,热输入 $Q = \frac{U \cdot I}{v_w}$ 作为判据值,以识别焊接状态是否处于稳定区间。数据库运行中引入模糊匹配算法,通过输入待焊接管段规格后,系统自动调取相近参数组,允许误差范围内的上下浮动。

5.3 工艺试验平台与示范项目支持

试验平台基座需采用双轴旋转支架,可调节焊接角度在 0 至 360 度范围内连续变化,配套固定管段直径控制装置,管段

端面跳动误差需小于 0.2mm。平台内设有可编程热源模拟器,实现对高热输入、低热输入不同情形的交替加载。系统配备激光-电弧复合焊头、双焊炬气体保护头以及轨道导向单元,焊接轨迹可按设定指令切换至不同类型路径,包括螺旋形、环状与断点补偿形。试验数据采集系统通过接入电信号同步触发模块,在焊接启动的同时记录初弧、稳弧、熄弧全过程数据。平台设有实时视频成像系统与红外测温仪,形成焊接过程温度-图像-参数三维同步记录。试验后材料截取应配备金相制样单元与显微硬度测试模块,对焊缝金相组织、热影响区结构及微观缺陷展开扫描与比对。为实现试验结果标准化,还应在平台附设工艺样板收集装置,对合格焊缝成形标准进行编号存档,并导出相关试验工况数据包。

6 实施成效与持续优化路径

作业启动前,由自动定位装置完成管口同轴校正,定位误差通过光电检测模块控制在允许范围^[6]。焊接过程采用预设多层多道路径,第一层根焊由内对中器与自动引弧系统配合完成,确保电弧稳定建立,之后填充层与盖面层依次执行,每道焊缝厚度与间距依据坡口结构自动调整。焊接过程中系统同步采集电压、电流、焊速、温度、送丝量五类关键数据,形成多维参数曲线。焊后立即执行激光轮廓扫描与熔池成像比对,判断焊道熔深一致性与成形质量。若任一指标偏离标准区间,系统启动回溯模块,将异常段数据与设备状态进行匹配分析。针对常见失配问题,控制系统自动生成修正建议,形成参数微调方案并存储入机载数据库。后续作业过程中,同规格管段再次进入工作区,系统调用优化后参数并自动加载,实现焊接参数的闭环更新。

7 结语

在预制作业环节引入全自动焊系统后,通过参数识别、路径控制与焊缝质量闭环反馈机制,有效提升了焊接过程的稳定性与重复性。焊接各环节由系统统一执行,降低了人为干预频率,实现了多参数实时控制与数据驱动下的连续作业。在系统化集成、数据库支持及工艺试验验证的基础上,全自动焊技术在长输管道中的推广具备明确实施条件和持续优化路径,为焊接效率与质量提供持续保障。

参考文献:

- [1] 崔成武,靳红星,薛如,等.L415M 管道全自动焊接接头组织与性能[J].焊接,2025,(05):89-95.
- [2] 杜保健.天然气长输管道全自动焊接质量的影响因素及管控措施[J].油气田地面工程,2025,44(05):41-46.
- [3] 陈建,张文军.地铁无缝线路轨道焊接结构疲劳寿命分析[J].建筑机械,2025,(05):83-86.
- [4] 单勇,张月来.激光焊接在轨道车辆制造中的应用需求与展望[J/OL].激光技术,1-15[2025-06-30].
- [5] 曹龙韬,孟腾逸,曹文楷,等.轨道交通典型焊接工艺碳排放研究[J].轨道交通材料,2025,4(02):25-31.
- [6] 汪忠.管道预制全自动焊接工艺技术装备.江苏省,昆山华恒焊接股份有限公司,2009-08-15.