

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.03

具有熔池监视功能的开放式自动焊接装备研发与应用

唐春云^{1,2,3}, 李竹渊^{1,2,3}, 孙秋阳^{1,2,3}, 汤昊^{1,2,3}, 姚舒扬^{1,2,3}, 李刚^{1,2,3},
张晓冬^{1,2,3}, 孙佳丞^{1,2,3}, 乔伟^{1,2,3}, 胡晓艳^{1,2,3}, 王颖^{1,3}

- 核工业工程研究设计有限公司, 北京 101300
- 中核高效智能化焊接重点实验室, 北京 101300
- 中国核工业二三建设有限公司, 北京 101300

摘要: 为解决核电、石化等管道工程中, 传统开放式自动焊装备因缺乏有效熔池可视化手段而导致焊接质量波动大、焊工劳动强度高的难题, 研发了一款适用于现场施工、具备熔池实时监视功能的开放式自动焊装备。通过定制国产小型熔池监控相机、优化焊枪结构与焊接机头布局, 集成无线传输模块, 构建了一体化监控系统。核心技术包括: 采用石英玻璃喷嘴与45°折弯式水电气路设计, 将熔池观测视线遮挡率从>75%降至<15%; 基于5.0 GHz Wi-Fi技术实现端到端传输延迟<80 ms, 具备强抗弧光与电磁干扰能力; 通过模块化紧凑设计保障装备在狭小空间的适配性。经焊接工艺试验及核电现场规模化应用验证, 该装备可实现熔池状态的清晰实时监控, 焊缝成形美观且无未熔合、气孔等缺陷, 一次合格率≥98%, 同时大幅降低了焊工劳动强度。该装备实现了核心部件的国产化替代, 打破了国外技术限制, 不仅为核电、石化等高端制造业提供了安全高效、自主可控的焊接解决方案, 保障了核安全与国家能源安全; 更推动我国开放式自动焊装备从“自动化”向“可视化+自动化”跨越式升级, 确立了国产高端焊接装备在核心技术领域的竞争优势。

关键词: 开放式自动焊装备; 熔池实时监控; 核电管道焊接; 国产化替代; 焊接质量控制

中图分类号: TG444+.74; TP273+.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0030-10

Development and Application of Open Automatic Welding Equipment with Molten Pool Monitoring Function

TANG Chunyun^{1,2,3}, LI Zhuyuan^{1,2,3}, SUN Qiuyang^{1,2,3}, TANG Hao^{1,2,3}, YAO Shuyang^{1,2,3}, LI Gang^{1,2,3},
ZHANG Xiaodong^{1,2,3}, SUN Jiacheng^{1,2,3}, QIAO Wei^{1,2,3}, HU Xiaoyan^{1,2,3}, WANG Ying^{1,3}

- Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China
- Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China
- Key Laboratory for Highly Efficient and Intelligent Welding of CNNC, Beijing 101300, China

Abstract: To address the challenges of significant welding quality fluctuations and high welder labor intensity in pipeline engineering for nuclear power, petrochemical, and other industries, caused by the lack of effective molten pool visualization methods in traditional open automatic welding equipment, a new type of open automatic welding equipment suitable for on-site construction, equipped with real-time molten pool monitoring function, has been developed. An integrated monitoring system was constructed by customizing domestically produced small molten pool monitoring cameras, optimizing the welding torch structure and welding head layout, and integrating wireless transmission modules. Core technologies include: adopting a quartz glass nozzle and a 45° bent design for water, gas, and electrical lines, reducing the obstruction rate of the molten pool observation line of sight from >75% to <15%; achieving end-to-end transmission delay <80 ms based on 5.0 GHz Wi-Fi technology, with strong resistance to arc light and electromagnetic interference; ensuring equipment adaptability in confined spaces through a modular and compact design. Validated by welding process tests and large-scale on-site applica-

收稿日期: 2025-12-03 修回日期: 2026-01-19

基金项目: 北京市科委2025年京津冀科技创新协同专项课题; 中核二三公司揭榜挂帅集群研发项目(CNNC-CNI23-KY-2024-11)

作者简介: 唐春云(1996—), 男, 学士, 主要从事智能焊接装备研究。E-mail: zhestcy@163.com。

tions in the nuclear power industry, this equipment enables clear real-time monitoring of the molten pool status. The resulting welds exhibit good formation without defects such as lack of fusion or porosity, achieving a first-pass yield rate of $\geq 98\%$, while significantly reducing the labor intensity for welders. This equipment achieves localization replacement of core components, breaking foreign technological restrictions. It not only provides a safe, efficient, and independently controllable welding solution for high-end manufacturing industries like nuclear power and petrochemicals, safeguarding nuclear safety and national energy security, but also promotes a leapfrog upgrade of China's open automatic welding equipment from "automation" to "visualization + automation," establishing a competitive advantage for domestic high-end welding equipment in core technological fields.

Keywords: open-type automatic welding equipment; real-time molten pool monitoring; nuclear power pipeline welding; localization replacement; welding quality control

引用格式:唐春云,李竹渊,孙秋阳,等.具有熔池监视功能的开放式自动焊接装备研发与应用[J].电焊机,2026,56(2):30-39.

Citation:TANG Chunyun, LI Zhuyuan, SUN Qiuyang, et al. Development and Application of Open Automatic Welding Equipment with Molten Pool Monitoring Function[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 30-39.

0 引言

在“双碳”目标引领下,中国核电进入积极安全有序的发展新阶段,2019-2025年累计核准新建机组56台,核准在建54台、商运58台,总规模达112台,规模持续位居全球首位^[1]。核电与石化领域的管道长期处于高温、高压、高辐射的严苛环境中,其焊接质量直接决定设备质量与制造进度,不仅关乎核电站建设与运营的经济效益,更是保障核安全与国家能源安全的基石^[2]。焊缝若存在未熔合、气孔等缺陷,可能引发介质泄漏甚至重大安全事故,因此焊接质量控制是工程建设的核心要点^[3]。

当前国内核电管道焊接主要依赖传统手工焊与普通自动焊。手工焊需投入大量焊工(单座核电站安装约需300名)^[4],焊接质量高度依赖人员技能,在长时间作业或复杂空间施工场景下,易因视觉疲劳、操作误差导致缺陷产生,一次合格率普遍低于90%;普通自动焊较手工焊效率提升30%~50%,但多数缺乏有效的熔池可视化系统,焊工需通过焊帽间接观察熔池状态,而核电管道排布密集、焊姿多变的特点导致观测盲区突出,部分角度无法有效观察,既加剧劳动强度,又造成焊接质量波动。更关键的是,在役管道缺陷返修时,高辐射环境下缺乏熔池监控会形成操作盲区,焊工需近距离长时间暴露在辐射中,不仅面临严重健康风险,还易因参数调节不当产生二次缺陷,显著增加返工成本与安全隐患,成为制约焊接质量稳定的关键瓶颈。

核电厂管道系统规格多样、数量庞大,材质以不锈钢和碳钢为主,现场安装焊接量大^[5]。以“华龙一号”单机组为例,其管道系统焊接工作量约23.4万道,其中3~10英寸中小口径管道焊口约5.3万道。在核电快速发展背景下,单纯依靠“人海战术”已难以为继,技术革新势在必行^[6]。核工业工程设计有限公司焊接研究所科研人员,依托自主研发的开放式管道自动焊接装备展开优化升级,通过定制国产小型熔池监控相机、优化焊枪结构、改进机头空间尺寸与运动机构、引入视频无线传输技术,成功研制出具备熔池监视功能的开放式自动焊接装备,其熔池可视化系统可让焊工实时清晰观察熔池状况,及时调节参数^[7],既减轻劳动强度,又确保焊缝成形美观、质量稳定,不仅解决了自动焊设备焊接时观察不便的难题,还显著提升了焊接质量与生产效率,为核电管道焊接提供了全新技术方案。

1 现有技术挑战

通过对国内外现有技术的深入调研,在研发过程中主要面临以下技术挑战:

(1)空间集成难题。开放式管道自动焊设备机头内部空间小,传统的熔池相机安装时与焊枪水电气路干涉严重,不能达到安装要求。主流熔池监控相机存在体积大、价格贵、集成兼容性差等缺陷,不能满足开放式管道自动焊设备轻量化、低成本、高集成度的要求。

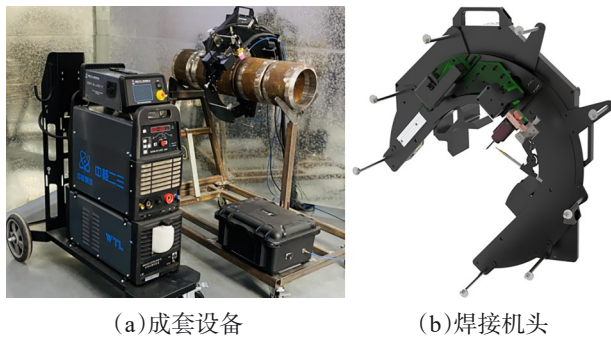
(2) 视线遮挡问题。目前开放式小管自动焊装备焊枪多采用陶瓷喷嘴, 电缆、气路管路沿焊枪轴线布置, 当相机装在焊枪侧面时, 喷嘴及线路对熔池视线遮挡率超过 75%, 不能观察坡口两侧熔合情况。

(3) 抗干扰能力。焊接时产生的强电弧弧光、金属飞溅、电磁干扰等容易造成相机图像过曝、模糊、数据传输断开。

(4) 实时性保障。传统的无线传输方式传输延迟一般大于 100 ms, 不能满足焊接现场的实时监控要求, 有线传输又存在机头运动时线缆缠绕的问题。

2 装备总体研发设计

以核工业工程研究设计有限公司自主研发的开放式管道全位置自动焊设备(型号: 23HY-Arc400-P/K)为基础, 进行设备的升级研究。该款设备主要由开放式焊接机头、控制系统、焊接电源以及外置式送丝机组成, 如图 1 所示。



(a) 成套设备

(b) 焊接机头

图 1 开放式管道全位置自动焊设备

Fig. 1 Full range pipeline automatic welding equipment

结合开放式自动焊装备焊接机头空间布局, 将熔池相机镜头视线与焊丝及钨极调整至同一竖直平面, 并设计相机专用连接架与焊枪安装支架连接, 使相机跟随焊枪位置的变化而变化, 选取以下优化设计策略:

(1) 选取国产小型化熔池监控相机, 降低对空间的需求。

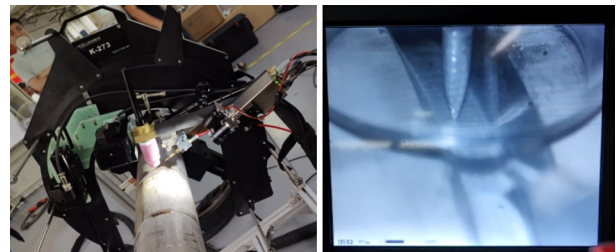
(2) 重新设计焊枪结构, 采用耐高温石英玻璃罩代替陶瓷喷嘴, 使熔池和坡口等关键显示区域视线不被阻碍; 优化现有焊枪水电气路结构, 将传统的直进直出的线路布局优化成 45° 折弯线路布局, 使其避开熔池相机安装位置及监控视线。

(3) 焊接机头结构优化设计, 使改进和增加部件能够平稳运行且有充足的调节空间。

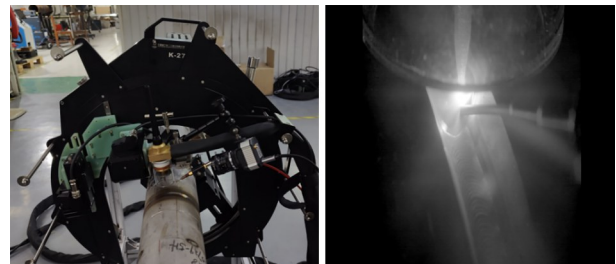
(4) 视频无线传输方式设计, 减少线缆、提高传输效率、保障机头运行稳定。

2.1 熔池监控相机选型及定制开发

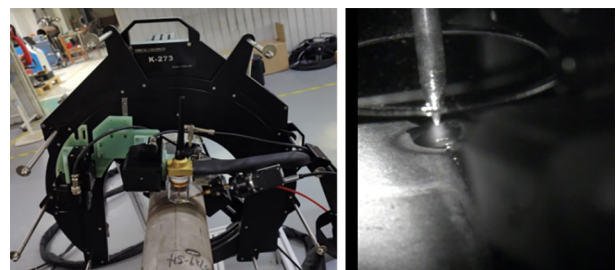
为筛选适配开放式自动焊装备的核心监测部件, 对国内外 4 款主流熔池相机进行焊接性能对比试验, 重点考核相机空间尺寸、成像质量、流畅度及抗高频干扰能力。实验效果如图 2 所示, 熔池相机试验结果对比如表 1 所示。



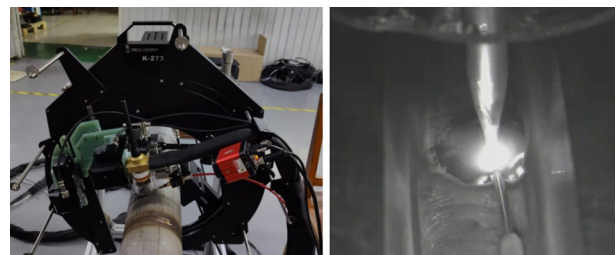
(a) 加拿大 XIRIS-WJ500



(b) 法国 NIT-SN220616



(c) 法国 NIT-SN230127



(d) 国产 MecaWeld M2-130H

图 2 熔池监控相机测试效果

Fig. 2 Test effect drawing of the molten pool monitoring camera

表1 熔池相机实验结果对比

Table 1 Comparison table of experimental results of molten pool camera

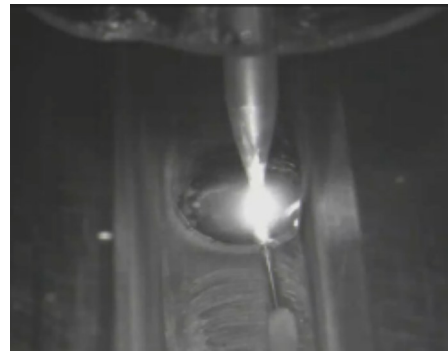
序号	相机型号	相机空间尺寸/mm	焊接成形质量	抗高频干扰能力
1	加拿大 XIRIS-WJ500	150×50×50	高分辨率,清晰捕捉熔池细节,无延迟或卡顿	一般,焊接启动时会黑屏
2	法国NIT-SN220616	140×50×50	分辨率一般,图像有延迟或卡顿	一般,焊接启动时黑屏,导致软件崩溃,屏幕闪烁影响观察
3	法国NIT-SN230127	80×40×40	高分辨率,清晰捕捉熔池细节,无延迟或卡顿,低光条件下表现良好	足够,不会因高频干扰而黑屏
4	国产 Mecaweld M2-130H	62×45×45	高分辨率,清晰捕捉熔池细节,无延迟或卡顿,低光条件下表现良好	足够,不会因高频干扰而黑屏

试验结果表明,国产 Mecaweld M2-130H 熔池相机在小型化、抗干扰、成像稳定等大部分指标上已经超越了国外同类产品,尤其在核电、石化等对设备可靠性要求很高的场合下表现最佳。该相机使用的是高性能、高灵敏度、低功耗、低噪声的 CMOS 感光芯片,该种 CMOS 芯片通过改善自身的性能短板,在感光灵敏度、噪声控制等关键参数上不断优化,并且依靠普通的半导体电路制程实现高整合度,可以满足工业场景对于硬件小型化、低功耗的需求^[8];同时该相机采用 SoC 片上系统硬件架构和专利弧光抑制算法,其中 SoC 架构通过片上总线(如 AMBA-AP 总线)实现图像处理模块高效互联和数据传输,配合图像处理流水线中的噪声抑制、曝光控制等算法优化,即使在视场内明暗反差较大、亮度快速变化的情况下,也能保持清晰、均匀、稳定的成像,不会出现闪烁现象^[9]。

但该相机在默认参数设置下还存在以下不足:(1)高亮区域出现过曝,导致细节丢失(如熔池轮廓、坡口融合情况难以辨认);(2)背景暗部细节不足,整体画面对比度偏低。为了解决以上问题,本研究采用缩短曝光时间和优化增益参数、使用弧光抑制算法动态调节功能来对高亮区域实现精准的控制,避免因过曝而导致熔池细节信息的丢失,使熔池轮廓、坡口融合等信息可以清晰的体现。其次对伽马校正参数进行优化,使用自适应对比度增强算法,暗部细节明显提高。提高了整个画面的层次

感与对比度,能够对焊接过程中的任何小变化进行准确的捕捉与分析。

采用相同的焊接条件,对默认参数和优化参数两组采集的图像(见图3)进行对比可以发现,优化后的图像高亮部分过曝现象明显改善,熔池轮廓连续,表面细节完整,暗部区域以及背景设备结构轮廓清晰度大大提高,整体画面层次感增强,满足核电建设工程对焊接过程实时监控的成像要求。



(a)默认参数实验效果



(b)优化参数实验效果

图3 Mecaweld M2-130H 相机不同参数的焊接效果

Fig. 3 Welding effect diagram of Mecaweld M2-130H camera under the same welding conditions but with different parameters

2.2 焊枪结构设计开发

如图4所示,围绕“消除线路干涉、实现视线通透”两大核心目标,对焊枪结构进行重新设计。具体改进措施如下:(1)喷嘴材料替换与结构优化。采用耐高温石英玻璃替代传统不透明陶瓷喷嘴,利用其良好的耐高温性和高透光率,降低视线遮挡并维持稳定的光学性能。同步重新设计保护气体整流装置结构与喷嘴安装方式,减少视线的阻碍,改善气体的流动路线,提升保护效果和成形质量^[10]。(2)焊枪水、电、气路布局优化。将焊枪进气口从轴线位置改为45°朝上布置,规避与熔池相机光学通道



改造前 改造后

图4 焊枪改造前后对比

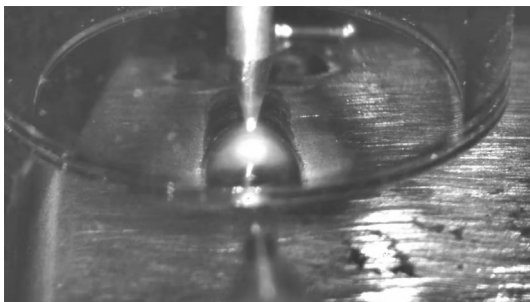
Fig. 4 Comparison of welding torch before and after modification
的干涉;优化线路和管路走向,采用紧凑化折弯设计,减小空间占用,为相机稳定成像提供良好环境。

焊枪经结构优化后,解决了焊枪传统设计在安装熔池相机的核心痛点,综合性能实现跨越式提升,具体效果如下:

(1)熔池观测视线遮挡率从优化前的 $>75\%$ 降至 $<15\%$,坡口两侧熔合状态、熔池状态以及焊道成形情况清晰可见,彻底消除观测盲区。如图5所示。



(a)优化前



(b)优化后

图5 焊枪改造前后熔池相机监控视图

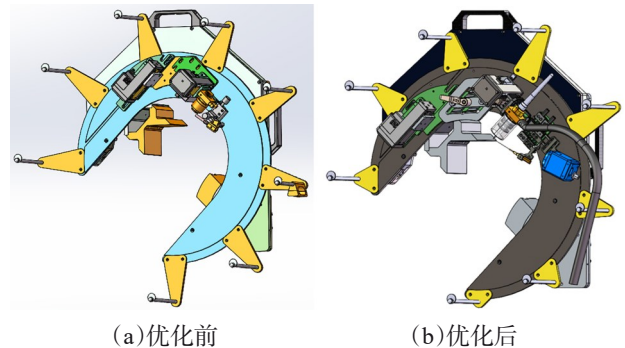
Fig. 5 Monitoring views of the molten pool camera before and after welding torch renovation

(2)原直进直出的轴线布局优化为紧凑的折弯设计,解决线路干涉问题,结构适配性大幅提升。

(3)保护气体流场稳定性增强,保护气流覆盖区域扩大20%,焊接质量更可控,有效减少了气孔、未熔合等缺陷的产生。

2.3 焊接机头结构优化设计

从空间布局、部件集成及运动稳定性三个方面对焊接机头进行改进。(1)将熔池相机、焊枪、送丝机构等重要部件进行紧凑化设计,在有限空间内实现高效集成。(2)优化相机连接架与焊枪安装支架的耦合方式,确保熔池相机随焊枪位置实时调整到最佳观测角度和视场范围。(3)用模块化设计思想改进焊枪结构、熔池相机支架、无线传输模块等标准接口。一方面提高了部件之间的协同适配程度,另一方面,在维护及更换部件时可以快速拆装机头,从而提高了机头的工作效率和可维护性。(4)在OSC运动机构中增设高精度直线导轨支撑结构,强化机头刚性和强度,提升运动稳定性与定位精度。



(a)优化前 (b)优化后

图6 焊接机头优化前后三维设计图

Fig. 6 Three-dimensional design drawings of the welding machine head before and after optimization

传统焊接机头在钨极沾污时,只能将整个焊接机头从管道取下后再从焊枪下部取出钨极,而优化后的焊接机头,得益于模块化设计,只需对焊枪部分进行单独拆卸,就能便捷地从焊枪下部取出钨极,拆装时间从3 min降低至30 s,大大节省了操作时间和人力成本。焊枪运动定位精度也从原来的 $\pm 0.5\text{ mm}$ 减小至 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内,弧压跟踪系统可更精准地控制焊枪与工件间距,确保电弧长度稳定与焊接质量一致性。

2.4 视频无线传输模块选型

为减少焊接机头线缆数量以及焊接画面能方

便地进行远程观察与操作,将熔池监控画面通过无线方式发送并在显示器端无线接收,实现焊接机头与远程监控设备之间的实时视频传输,无论是操作人员还是监控人员,都可以通过显示器实时观看焊接画面,从而提升工作效率和操作便捷性。

根据核电管道焊接的实时监控需求,确定无线传输系统的核心设计目标和量化指标,保证技术方案可以验证、可以落地:①延迟控制:从熔池相机采集图像到控制系统显示屏上显示的端到端传输延迟 ≤ 100 ms,满足焊接参数实时调整要求;②抗干扰能力:在焊接强电磁干扰、弧光辐射环境下,图像无卡顿、无丢帧;③适配性:传输模块体积适配机头紧凑空间布局;④稳定性:连续传输时长 ≥ 4 h,传输中断次数 ≤ 3 次。

通过对比工业场景中常用的无线传输技术

(Wi-Fi、蓝牙 5.2、5G 工业模组、ZigBee)的性能差异,结合焊接现场的实际需求,最终选定国产工业级 5.0 GHz Wi-Fi 无线传输作为主要方案。Wi-Fi 技术可以建立无线局域网,实现视频数据的稳定传输,在处理图像这种大容量的数据时,具有很好的适配性,可以满足实时视频传输对网络稳定性和数据吞吐量的基础需求^[11],选型依据见表 2。

该模块支持 IEEE802.11ac 协议,专门针对 5 GHz 频段,使用 256QAM 调制技术和信道带宽合并技术,单流传输速率达到 867 Mbps,多流时速率可以达到更高的水平。该协议具有低时延、高并行带宽的特点,可完全满足 1080P 高清熔池图像实时传输对数据速率和传输稳定性的需求,保证焊接过程中熔池动态细节信息的连续、无卡顿传输,避免由于速率不够而造成的图像丢帧或者延迟现象^[12]。

表 2 工业无线传输技术性能对比

Table 2 Performance comparison table of industrial wireless transmission technology

技术类型	传输延迟/ms	抗电磁干扰能力	模块体积 (长×宽×高)/mm	连续传输 4 h 中断次数	适配性
Wi-Fi (5.0GHz)	<80	强(支持信道自动切换)	45×35×18	≤ 2 次	适配机头狭小空间,支持高清视频传输
蓝牙 5.2	150~200	中(易受弧光干扰)	38×30×15	≥ 5 次	体积适配,但延迟超标
5G 工业模组	≤ 50	强	80×60×25	≤ 1 次	体积过大,与机头线路干涉
ZigBee	200~300	中	40×32×16	≥ 8 次	延迟严重超标,不支持高清传输

2.5 设备集成设计与实现

设备集成设计以“模块化协同、空间兼容、功能闭环”为核心目标,将熔池监控相机、优化后焊枪、改进型焊接机头、无线传输模块与原有控制系统、焊接电源、送丝机进行系统性整合,解决各部件间的机械干涉、信号同步、功能联动等关键问题,最终形成完整的具备熔池实时监视功能的开放式自动焊接装备。设备整体架构如图 7 所示。

机械层采用优化后的焊接机头作为载体,用标准化接口实现熔池相机、石英玻璃喷嘴焊枪、送丝机构的紧凑布置。相机连接架和焊枪安装支架采用快拆式结构,可以保证两者运动同步,也可以单独拆卸维修。电气层搭建统一的供电和信号传输网络,使用 24 V 直流稳压电源给相机、无线模块提供独立供电,用屏蔽线缆连接各个部件的电气接口,减少电磁干扰。相机的图像信号接口 HDMI 直接对接无线传输模块的输入接口,从而达到图像信号无线传输的目的。

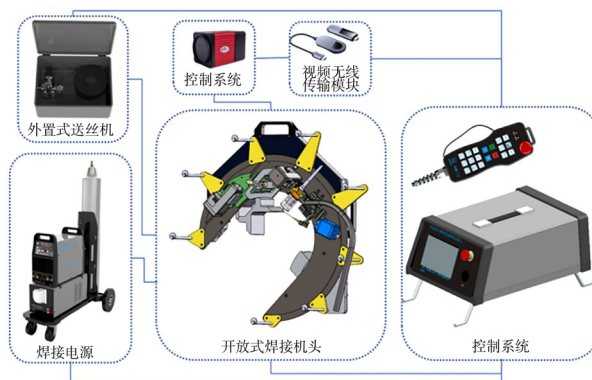


图 7 设备整体架构

Fig. 7 Overall architecture diagram of the equipment

软件层基于原有控制系统平台进行扩展开发,新增熔池图像显示模块与参数-图像联动界面,支持图像实时播放、参数实时叠加显示等功能,操作人员可通过同一操作面板完成焊接控制与熔池监控。控制系统平台显示界面如图 8 所示。

集成完成后的开放式自动焊接装备(见图 9),保持了原有设备的开放式操作特性,同时新增熔池

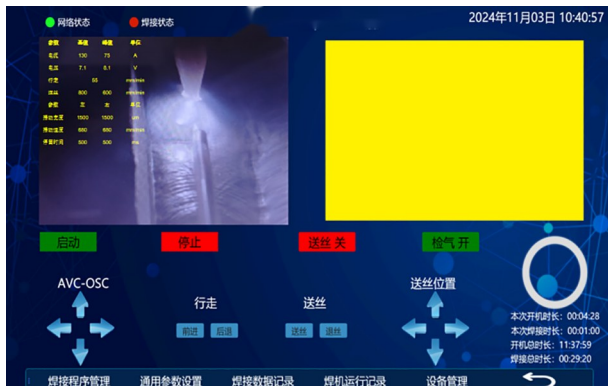


图8 控制系统平台显示界面

Fig. 8 Control system platform display interface



图9 装备集成实物

Fig. 9 Physical diagram of equipment integration

实时监视功能,整机重量较原设备增加 ≤ 1 kg,机头尺寸无明显扩大,完全适配核电现场狭小空间的施工需求。

3 试验验证及现场应用

3.1 试验验证与结果分析

为验证装备的综合性能,结合核电现场实际焊接需求,选取核电工程常用规格 $\varnothing 108$ mm $\times 8$ mm、 $\varnothing 168$ mm $\times 10$ mm、 $\varnothing 273$ mm $\times 12$ mm碳和不锈钢管道,坡口形式为U型管-管对接进行焊接试验。试验过程中,严格按照核电焊接工艺规范,设置多组差异化焊接参数,系统评估装备在不同工艺条件下的熔池监控效果、焊接质量及力学性能。

(1)不同焊接参数下熔池监控效果对比。

在焊接电流80~220 A(基值电流均为60 A)、电压8.6~13.6 V、焊接速度30~60 mm/min,送丝速度均为300 mm/min的参数范围内,对熔池监控系统的成像质量、传输延迟及抗干扰能力进行测试,结果如

表3、图10所示。结果表明,装备在给定的参数区间内均能保持清晰稳定的熔池成像,传输延迟稳定在68~76 ms之间,远低于100 ms的设计目标;强弧光环境下无过曝现象,暗部细节完整度 $\geq 90\%$,抗高频干扰性能稳定,完全适配核电管道不同规格、不同材质的焊接工艺需求,解决了传统设备在参数波动时监控失效的问题。

表3 不同焊接参数下熔池监控效果对比

Table 3 Comparison table of molten pool monitoring effects under different welding parameters

峰值电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(mm \cdot min $^{-1}$)	传输延迟 /ms	成像效果
80	8.6	30	71	成像清晰、暗部细节完整、无卡顿
120	9.8	40	68	成像清晰、暗部细节完整、无卡顿
160	11.4	50	74	成像清晰、暗部细节完整、无卡顿
200	12.6	60	73	成像清晰、暗部细节完整、无卡顿
220	13.6	60	76	成像清晰、暗部细节完整、无卡顿

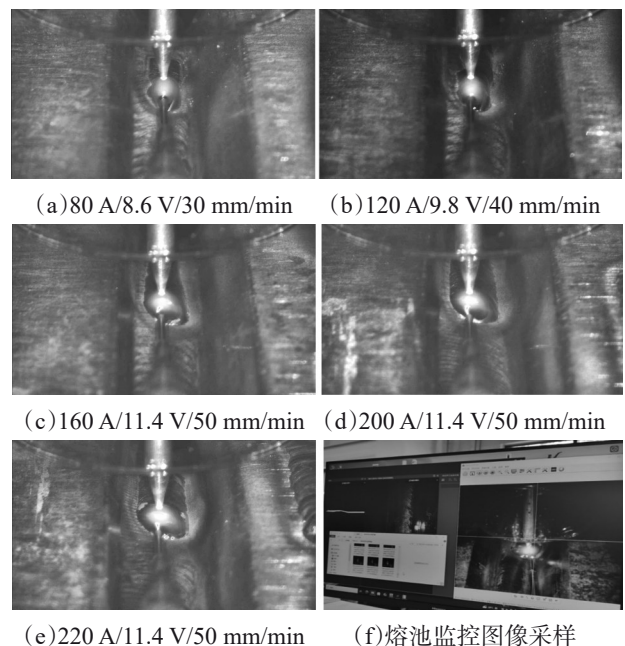


图10 熔池监控效果

Fig. 10 Molten pool monitoring effect

(2)不同种类管道实际焊接效果对比。

试验选取 $\varnothing 273$ mm $\times 12$ mm规格的碳钢、不锈钢管道,采用U型坡口对接形式进行全自动打底、

填充和盖面焊接。无损检测结果显示,焊缝成形美观,余高、宽度均匀,未发现未焊透、未熔合、气孔等缺陷。6组测试焊口均通过射线检测,合格率达100%,如表4、图11所示。

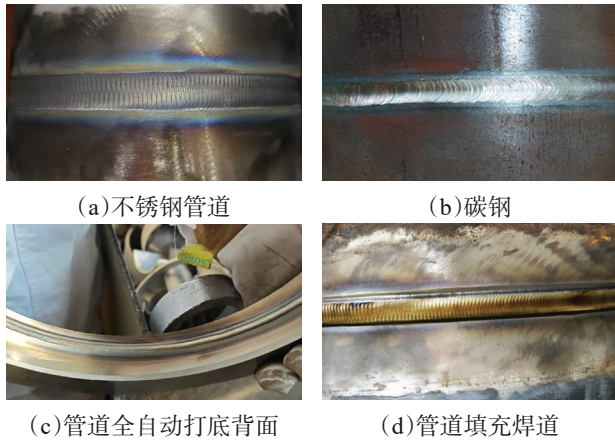


图 11 管道焊接效果

Fig. 11 Pipe welding effect drawing

表 4 射线检查情况及结果

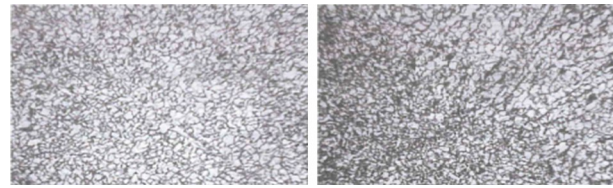
Table 4 Radiographic inspection status and results table

序号	底片号	像质指数	黑度	缺陷描述	结论
1	0-1	W12	3.2~3.8	未见缺陷	合格
2	1-2	W12	3.2~3.9	未见缺陷	合格
3	2-3	W12	3.4~3.9	未见缺陷	合格
4	3-4	W12	3.3~4.1	未见缺陷	合格
5	4-5	W12	3.2~3.9	未见缺陷	合格
6	5-6	W12	3.3~3.8	未见缺陷	合格

对合格焊口试件进行切割加工后,开展室温拉伸、弯曲、冲击等破坏性力学试验及金相分析。微观宏观金相如图12、13所示,硬度检测如图14、表5所示,力学性能测试结果如表6所示,由表可知,拉伸试件抗拉强度达614~630 MPa,拉伸破断位置均位于母材区域,其他检测项目均符合RCC-M-2007版《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》中相应检测标准。金相检测均未见缺陷及微裂纹和沉淀物。所有接头均通过RCCM-1级检测和破坏性力学试验。

3.2 现场应用

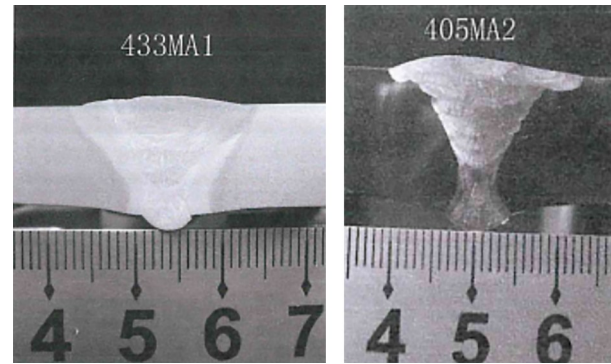
该装备的现场应用以核电工程核心焊接场景为主,包括预制场规模化管道预制和核岛现场安装施工两个主要场景。针对3~10英寸碳钢、不锈钢中小口径管道批量焊口,进行U、V型坡口管-管对接等常见接头形式的全流程单焊口自动化焊接及熔



(a)模拟件1 (b)模拟件2

图 12 微观金相检查(200×)

Fig. 12 Microscopic metallographic examination (200×)



(a)模拟件1 (b)模拟件2

图 13 宏观金相检查

Fig. 13 Macroscopic metallographic examination

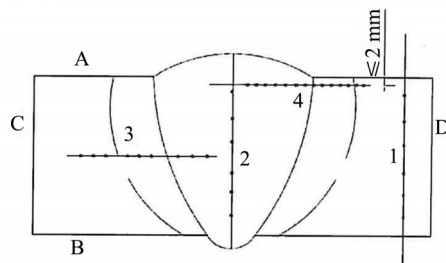


图 14 硬度检测示意

Fig. 14 Hardness test schematic diagram

表 5 硬度检测结果

Table 5 Hardness test results table

试样编号	检测温度/°C	测试部位数	测试值/HV
433 MA 1	23	1	A→B: 150, 149, 146, 153, 153, 151
		2	A→B: 235, 213, 184, 175, 175, 178
		3	C-D: 154, 157, 157, 168, 179, 190, 179, 183, 180
		4	C-D: 213, 204, 198, 216, 243, 234, 228, 224, 237, 246, 232, 240, 231, 243, 241, 237, 217, 233, 220, 230, 215, 186, 161, 157, 161

池实时监控,很好地解决了在核岛复杂空间内使用传统的自动焊设备观察困难、操作不便的行业痛点。截至目前,该装备已在核电工程预制场和核岛等10多个项目部超40套的使用中,累计焊接焊口超10万寸,应用前景十分广阔。

表6 力学检测结果

Table 6 Mechanical testing results table

试样编号	试样形状	试样尺寸/mm	面积/mm ²	最大拉力/kN	抗拉强度/MPa	破断位置
433TT1	弧形	宽度 25.25, 厚度 8.73	220.77	135.57	614	焊缝
433TT2	弧形	宽度 25.22, 厚度 8.84	223.28	139.19	623	焊缝
433TT3	弧形	宽度 25.23, 厚度 9.03	228.18	140.73	617	母材
433TT4	弧形	宽度 25.23, 厚度 8.81	222.62	140.26	630	母材



(a)核岛现场应用

(b)预制厂规模化应用

图15 现场应用

Fig. 15 On-site application

4 结论

针对核电管道工程中自动焊接质量实时监控的核心需求,为解决传统开放式自动焊装备缺少高效熔池可视化手段的问题,完成了熔池实时监视功能的开放式自动焊装备研发与应用验证。

该装备研发成功,一方面实现了关键核心部件的国产化替代,打破了国外同类产品在空中适应性、抗干扰性能等方面的限制,另一方面也证明了开放式自动焊装备“可视化+自动化”的发展道路。未来可从两方面持续深化升级:一是继续扩展装备的材质适配范围,针对高温合金等特殊材料优化熔池监控算法,提升极端工况下的适配能力;二是深度融合人工智能技术,重点推进两大具体技术路径——其一为基于深度学习的熔池缺陷智能识别,同步提取熔池特征,实现未熔透、气孔等缺陷的高精度实时识别;其二为基于熔池视觉特征与历史工艺参数数据集,训练预测模型,建立“缺陷特征——参数调整”映射关系,实时动态修正焊接关键参数并融入补偿算法。通过上述升级,推动自动焊装备向感知、决策、控制一体化的智能焊接方向发展,为更多工业领域高效、高质量焊接提供解决方案。

参考文献:

[1] 朱学蕊.我国核电驶入积极安全有序发展快车道[N].

中国能源报,2025-05-05(003).

- [2] 陈涛.“华龙一号”主管道窄间隙自动焊焊接缺陷控制及预防措施[J].焊接技术,2023,52(03):91-95.
CHEN T. Control and prevention measures for welding defects in narrow-gap automatic welding of HPR1000 main pipeline[J]. Welding Technology, 2023, 52(03): 91-95.
- [3] 邹国伟,王伟波.“华龙一号”反应堆压力容器关键焊接技术[J].电焊机,2020,50(12):65-73+111.
ZOU G W, WANG W B. Key welding technologies for HPR1000 reactor pressure vessel[J]. Electric Welding Machine 2020,50(12):65-73+111.
- [4] 冯英超,石爱强,王挺,等.核电站安装施工中自动化焊接技术应用分析[J].电焊机,2009,39(08):27-29.
FENG Y C, SHI A Q, WANG T, et al. Application analysis of automatic welding technology in nuclear power plant installation and construction [J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(08): 27-29.
- [5] 吕旭伟,谭文良,朱德才,等.核电厂管道卡钳式全位置自动焊工艺[J].电焊机,2021,51(02):55-59+111.
LV X W, TAN W L, ZHU D C, et al. Clamp-type all-position automatic welding process for nuclear power plant pipelines[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(02):55-59+111.
- [6] 冯英超,党文智,李青霞,等.核电站辅助管道预制中自动焊技术应用研究[J].焊接技术,2013,42(09):29-33.
FENG Y C, DANG W Z, LI Q X, et al. Research on application of automatic welding technology in prefabrication of auxiliary pipelines of nuclear power plants [J]. Welding Technology, 2013, 42(09): 29-33.
- [7] 张春莲,张世豪,王中任,等.电弧焊焊接熔池视觉跟踪技术研究[J].金属加工(热加工),2024,(12):40-44.
ZHANG C L, ZHANG S H, WANG Z R, et al. Research on visual tracking technology of arc welding pool [J]. Metal Working (Hot Working), 2024, (12): 40-44.
- [8] 王立梅. CMOS 和 CCD 未来智能视频监控市场展望浅析[J].科技创新导报,2013(11):234.

- Wang L M. Brief analysis on the future prospect of CMOS and CCD in intelligent video surveillance market [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(11):234.
- [9] 戈志伟. 面向 CIS 图像处理 SoC 的算法、架构及复杂多媒体 SoC 中通信网络研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- GE Z W. Research on algorithms, architectures for CIS image processing SoC and communication networks in complex multimedia SoC [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [10] 胡特生,徐耀德. TIG 焊枪气体保护性能测定方法研究[J]. 焊接, 1995(10):4-7.
- HU T S, Xu Y D. Research on measurement method of gas protection performance of TIG welding torch [J]. Welding & Joining, 1995(10):4-7.
- [11] 陈春光. Wi-Fi 无线传输视频混沌保密通信技术[D]. 广东:广东工业大学, 2014.
- CHEN C G. Chaotic secure communication technology for Wi-Fi wireless video transmission [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2014.
- [12] 辛艳,梁建坤,修长虹. 无线局域网 IEEE802.11ac 协议的研究及应用[J]. 网络安全技术与应用, 2016(09):80-81.
- XIN Y, LIANG J K, XIU C H. Research and application of IEEE802.11ac protocol for wireless local area networks [J]. Network Security Technology and Application, 2016(09):80-81.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第29页

- 54-62.
- XU Y L, QIAN P, LI J Y, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welded Joint of Dissimilar Steel 304&Q235 [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(01):54-62.
- [29] 裴龙基,胡志月,瞿龙,等. TA2/Co13Cr28Cu31Ni28/Q235 脉冲 TIG 焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(11):90-96+102.
- PEI L J, HU Z Y, QU L, et al. Microstructure and properties of TA2/ Co13Cr28Cu31Ni28/ Q235 pulsed TIG weld joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(11):90-96.
- [30] 赵勇桃,李波波,鲁海涛,等. Q235 钢与 316 不锈钢异种钢焊接接头组织及力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11):35-38.
- ZHAO Y T, LI B B, LU H T, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Q235 Steel and 316 Stainless Steel Welded Joints [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(11):35-38.
- [31] 安藤弘平. 焊接电弧现象[M]. 北京:机械工业出版社, 1985:416-421.
- [32] 陈世雄,姚继开,范立想,等. 电弧增材制造焊丝熔化及熔滴过渡过程建模与仿真研究[J]. 电加工与模具, 2024(03):48-53.
- CHEN S X, YAO J K, Fan L X, et al. Modeling and Simulation of Weld Wire Melting and Droplet Transition Process in Wire Arc Additive Manufacturing [J]. Electromachining & Mould, 2024(03):48-53.
- [33] 黄泽涵,韩绍华,薛丁琪,等. 考虑温度场的 MIG 熔滴过渡行为数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(03):123-127.
- HUANG Z H, HAN S H, Xue D Q, et al. Numerical simulation of droplet behavior in MIG welding considering temperature field [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(03):123-127.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>