

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.15

AP堆型核电站CV贯穿件插入板专用自动焊接装备研发

李竹渊^{1,2,3}, 王世培^{1,2,3}, 汤昊^{1,2,3}, 吴晔华^{1,2,3}, 屈晗玮^{1,2,3}, 姚舒扬^{2,3},
唐春云^{2,3}, 王金明^{1,2,3}, 赵泽栋^{1,2,3}, 王晓娜^{2,3}, 徐松辉^{2,3}

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

摘要: AP堆型核电站安全壳(CV)贯穿件插入板为核级厚板结构,其焊接质量直接决定第三道安全屏障的密封性与结构完整性。目前国内施工普遍采用焊条电弧焊,存在劳动强度大、质量一致性差、对高技能焊工依赖度高等问题,严重制约核电建造效率与质量稳定性。为解决上述工程痛点,研制了一套AP堆型CV贯穿件插入板专用自动化焊接装备。该装备以四轴联动焊接小车为核心执行机构,集成一体化涨紧定位机构、弧压自动跟踪系统及熔池远程监控系统,创新设计三档式离合器与180°可翻转监控相机,实现快速装夹、精准定位、全姿态稳定焊接与实时可视化监控。针对焊枪晃动问题,将原光轴铜套传动优化为直线导轨传动,使焊枪末端间隙控制在1 mm以内。采用SA-738Gr.B核级钢开展模拟件焊接验证,结果表明,装备运行平稳,焊枪末端晃动间隙 ≤ 1 mm,焊接效率较手工焊提升1倍以上。模拟件焊接验证表明,焊缝无损检测及理化性能均满足ASME标准,核心部件100%国产化,填补国内技术空白,为核电焊接提供高效可靠的自动化解决方案。

关键词: AP堆型核电; CV贯穿件; 自动化焊接装备; 国产化

中图分类号: TG444+.74; TP273+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)04-0119-09

Research and Development of Special Automatic Welding Equipment for CV Penetration Insert Plates in AP Nuclear Power Plants

LI Zhuyuan^{1,2,3}, WANG Shipai^{1,2,3}, TANG Hao^{1,2,3}, WU Yehua^{1,2,3}, QU Hanwei^{1,2,3}, YAO Shuyang^{2,3},
TANG Chunyun^{2,3}, WANG Jinming^{1,2,3}, ZHAO Zedong^{1,2,3}, WANG Xiaona^{2,3}, XU Songhui^{2,3}

1. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China
2. Nuclear Industry Engineering Research and Design Co., Ltd., Beijing 101300, China
3. CNNC Key Laboratory of High-Efficiency and Intelligent Welding, Beijing 101300, China

Abstract: The penetration insert plate of the containment vessel (CV) in AP nuclear power plants is a nuclear-grade thick plate structure, whose welding quality directly determines the sealing performance and structural integrity of the third safety barrier. At present, manual metal arc welding is widely adopted in domestic construction, which is featured with high labor intensity, poor quality consistency, and high dependence on highly skilled welders, seriously restricting the efficiency and quality stability of nuclear power construction. To solve the above engineering problems, a set of special automatic welding equipment for CV penetration insert plates in AP nuclear power plants was developed. Taking the four-axis linkage welding trolley as the core executing mechanism, the equipment integrates an integrated tensioning positioning mechanism, automatic arc voltage tracking system and remote molten pool monitoring system. The innovative three-speed clutch and 180° reversible monitoring camera are designed to realize rapid clamping, precise positioning, full-attitude stable welding and real-time visual monitoring. Aiming at the problem of welding torch shaking, the original optical axis copper sleeve transmission

收稿日期: 2026-01-29 修回日期: 2026-02-24

作者简介: 李竹渊(1987—),男,学士,高级工程师,主要从事核电技术研究。E-mail: lizhuyuan87@126.com。

was optimized into linear guide rail transmission, so that the shaking clearance of the welding torch end is controlled within 1 mm. The simulation test was carried out with SA-738Gr.B nuclear-grade steel. The results show that the equipment runs stably with the shaking clearance of the welding torch end ≤ 1 mm, and the welding efficiency is more than doubled compared with manual welding. The simulation welding verification proves that the non-destructive testing and physical and chemical properties of the welds meet the ASME standards. The core components are 100% domestic, which fills the domestic technical gap and provides an efficient and reliable automatic solution for nuclear power welding.

Keywords: AP nuclear power plant; CV penetration; automatic welding equipment; localization

引用格式:李竹渊,王世培,汤昊,等. AP堆型核电站CV贯穿件插入板专用自动焊接装备研发[J]. 电焊机,2026,56(4):119-127.

Citation:LI Zhuyuan, WANG Shipai, TANG Hao, et al. Research and Development of Special Automatic Welding Equipment for CV Penetration Insert Plates in AP Nuclear Power Plants[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 119-127.

0 引言

在核电建设安装工程中,AP堆型核电站的安全壳(Containment Vessel, CV)贯穿件是安装于安全壳结构上,用于实现安全壳内外系统管道、电缆等连接的核心组件,按功能可分为机械贯穿件与电气贯穿件两大类。其核心使命是保障安全壳的结构完整性,有效阻隔放射性物质泄漏,同时确保关键设备与系统的稳定互联互通,是核电安全屏障的重要组成部分^[1]。

CV贯穿件插入板的焊接作业面临着焊接部位多变、空间受限、施工难度大及劳动强度高的多重挑战。当前国内该环节普遍采用焊条电弧焊(SMAW),焊接质量高度依赖核级焊工的专业技能水平,人为因素对焊接效果影响显著^[2-4]。由于焊接位置复杂、技术难度高、劳动强度大及焊工技能存在差异,大型承压壳体的贯穿件焊接环节易出现质量波动,存在产生相关缺陷的潜在风险。这类潜在问题可能导致施工成本增加、工期延长,且在后续处理过程中,还可能衍生出新的质量隐患,给核电安全运行带来不确定因素。

在AP堆型核电CV模块焊接领域,国内外技术发展呈现明显差异^[5]。国外相关技术起步较早,自动化焊接装备与配套工艺体系已趋于成熟,例如美国西屋公司在AP1000堆型设计中采用CV结构,其合作伙伴林肯电气成功实现了CV主体焊缝的自动化焊接,大幅提升了焊接质量稳定性与施工效率,但针对CV贯穿件焊接的具体自动化技术方案,公开文献中鲜有详细披露。国内相关研究虽起步较晚,但近年来发展迅速,中核二三、中核二二、中核

五公司等企业已围绕CV主体焊缝开展自动焊装备与工艺研发,并取得阶段性进展。然而在CV贯穿件焊接这一关键环节仍面临诸多技术瓶颈:CV贯穿件具有大直径、高精度的结构特点,全熔透焊缝的焊接工艺要求极为严苛,目前国内施工仍以传统手工焊接为主,存在装备适应性不足、工艺稳定性差等问题,难以满足大规模、高质量核电建设的需求。尤为关键的是,国内面向CV贯穿件的高效、高可靠性自动化焊接技术尚未形成系统性研究成果与工程化应用案例,存在明显技术短板与应用空白。

面向AP系列堆型核电建设高质量发展需求,为显著提升CV贯穿件插入板焊缝质量与长期运行可靠性,降低人工劳动强度,减少对核级焊工的依赖,弱化人为因素导致的焊接缺陷,研发适配CV贯穿件结构特点的专用自动化焊接装备已成为核电工程领域亟待突破的关键课题,对保障核电建设安全、提高施工效率与工程效益具有重要的工程价值与现实意义。

1 AP堆型核电CV贯穿件简介

AP三代先进核电钢制安全壳上的贯穿件按功能可划分为机械贯穿件和电气贯穿件(以下统称“贯穿件”)。作为安全壳的一部分,贯穿件与安全壳共同构成反应堆的第三道安全屏障。贯穿件主要由插入板和套筒两部分组成,插入板的材质为SA-738Gr.B核级调质钢,厚度88.9~95 mm,套筒材质为SA350 CrLF-2,规格 $\varnothing 800$ mm $\times$ 88.9 mm^[6-8]。

如图1、表1所示,本研究重点聚焦直插型贯穿

件,其结构设计依据西屋 AP1000 堆型标准图纸,插入板与 CV 筒体的连接焊缝均为承压边界焊缝,焊接质量需严格符合 ASME 规范要求,是 CV 贯穿件焊接中的重点与难点^[9]。

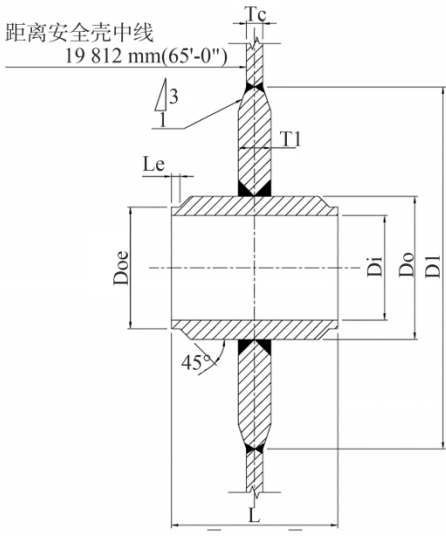


图 1 AP堆型直插型贯穿件图纸

Fig. 1 Drawing of straight plug penetration for AP reactor type

表 1 AP堆型电气贯穿件尺寸数据(mm)

Table 1 Dimensional data of electrical penetration for AP reactor type (mm)							
安全壳壁厚	套管					插入板	
T_c	D_i	D_o	D_{oe}	L	L_e	D_1	T_1
44.5(1.75")	430	540	480	458	38.1	800	88.9
47.6(1.875")							

经文献查询及现场调研,当时 CV 贯穿件普遍采用“预制车间集中预制模式”。插入板焊接作业均在 CV 预制车间内进行,车间内搭建脚手架作业平台,平台标高根据贯穿件预制胎架高度灵活调整,作业人员通过脚手架登临作业点实施焊接操作^[10]。

目前,国内 AP 堆型核电项目中, CV 贯穿件插入板焊接仍以传统焊条电弧焊(SMAW)为主,该焊接方式存在热输入不易控制、易引发相关缺陷的潜在风险,且焊接质量一致性难以保障,同时面临劳动强度与施工成本偏高、工艺可控性弱等问题。相比之下,熔化极气体保护焊(GMAW-135)具有热输入小且稳定、轨迹控制精准、人为干预少等优势,能从根源上降低手工焊可能存在的固有风险。但专用自动焊接装备的研发面临三大核心瓶颈:轨迹跟

踪精度控制、复杂结构适配性、长期运行稳定性,因此聚焦机械系统的创新设计,是突破该技术难题的关键所在。

2 CV 贯穿件专用自动化焊接装备设计

2.1 装备研发总体描述

针对直插型贯穿件的结构特点(插入板外径 $\varnothing 800\text{ mm}$ 、厚 88.9 mm ,安全壳壁厚 $44.5\sim 47.6\text{ mm}$)及现场焊接工况,装备研发以“精准适配、稳定可靠、操作便捷”为核心原则。

在轨道式自动焊技术体系中,为确保焊缝成形美观且质量可靠,需将焊接轨道与待焊母材相对固定,为焊接小车提供稳定运行平台。考虑到 CV 贯穿件插入板焊缝为 360° 环形结构,且焊接过程中需在立焊、平焊等位置间切换,对焊枪的稳定性及姿态调节灵活性提出了更高要求。基于此,装备设计集成四轴联动控制、弧压自适应跟踪、远程熔池监控系统等核心功能,同时兼顾轻量化与集成化,保障现场施工的合格率与效率。

2.2 装备组成

CV 贯穿件插入板专用自动焊接装备的核心构成包括 PC 端上位机、线控器、焊接电源、送丝机、焊接小车及涨紧定位机构,整体设计贯穿集成化与轻量化理念,有效提升设备的工况适配性与操作便捷性,如图 2 所示。

针对安全壳表面曲率引发的焊缝高度差问题(最大高度差达 4 mm),专门搭载弧压跟踪系统,其控制系统可通过弧压高度跟踪功能实时感知焊缝高度动态变化,并自动进行焊枪高度的精准补偿,确保焊接过程的稳定性与焊缝质量的一致性^[11]。

装备配备高清熔池监控系统,通过专用监控相机实时采集焊接区域的视频信号,并同步传输至外部显示终端。操作人员无需佩戴传统焊帽滤光片,也无需近距离观测焊接区域,即可通过显示屏放大查看熔池形态、焊缝成形细节及焊接过程状态,既大幅提升了焊接操作的安全性与可控性,又显著降低了焊工的劳动强度。



图2 装备整体构成

Fig. 2 Overall configuration of the equipment

2.3 焊接小车

如图3所示,焊接小车作为装备的核心执行单元,采用四轴模块化设计,集成行走机构、焊枪高度调节机构、焊枪左右调节机构及焊枪角度调节机构,整套传动系统通过直流电机与步进电机驱动,各轴运动速度精准可控。针对CV贯穿件环形焊缝的焊接需求,创新设计离合器调节机构与可翻转熔池监控相机机构,实现左右机互换功能与焊接过程的全程精准监控。

焊接小车主体尺寸600 mm×400 mm×435 mm,质量仅为14 kg,可灵活适配现场狭小空间作业需求。小车底盘与焊接轨道采用齿轮与侧齿啮合方式连接,行走速度调节范围为0.04~0.6 m/min,可根据不同焊接工艺需求实现精准匹配。焊枪调节机构具备电动50 mm+手动70 mm的复合调节行程,角摆范围为±30°,支持平摆、角摆两种自动摆动模

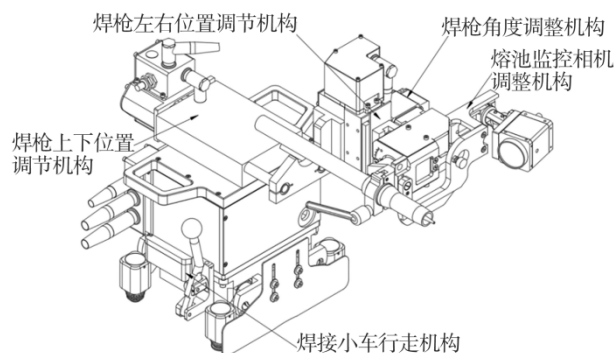


图3 焊接小车结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding trolley structure

式,其中角摆动速度($6^{\circ}\sim 240^{\circ}$)/s可调,平摆速度100~750 mm/min可调,可充分适配不同焊缝成形要求。

(1) 可翻转熔池监控相机机构。

可翻转熔池监控相机机构由180°水平旋转机构与相机位置调节机构组成,用于解决焊接方向切换时熔池监控视角偏差的问题。180°水平旋转机构可根据焊接方向的切换进行同步翻转,确保相机视角始终与焊接方向保持一致,保障熔池监控的连续性与清晰度,具体结构如图4所示;相机位置调节机构包括距离调节与角度调节两个维度,操作人员可根据焊接过程中熔池的实时位置灵活调整监控视角,确保清晰捕捉熔池动态。

(2) 三档式离合器调节机构。

创新设计三档式离合器调节机构,操作人员可根据实际施工需求,将离合器手柄推拉至对应档位

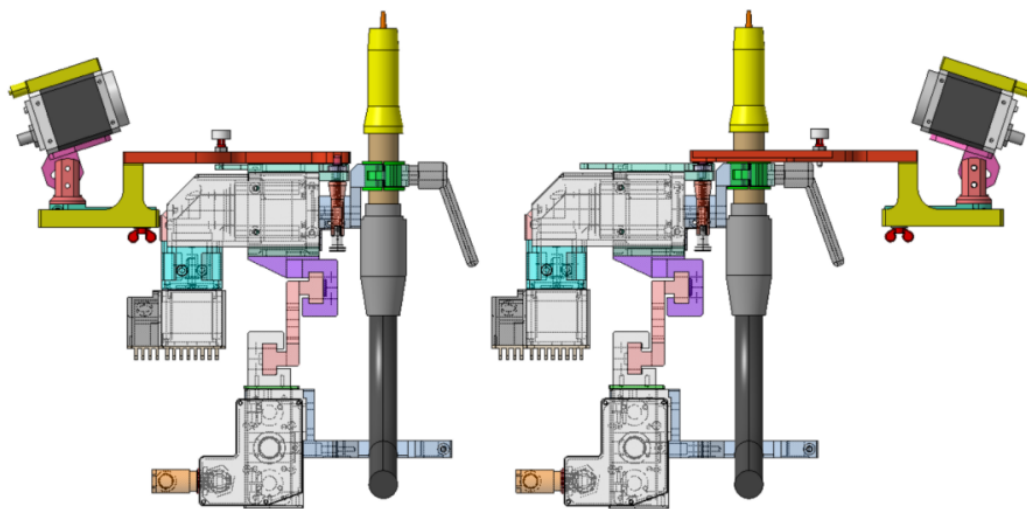


图4 相机固定调节机构示意

Fig. 4 Schematic diagram of camera fixing and adjusting mechanism

(啮合档、空档及分离档),实现不同作业状态的快速切换。啮合档为行走齿轮与轨道边缘侧齿相啮合的工作状态,通过电机驱动实现焊接小车的稳定行走与精准定位,配合示意如图5所示;空档状态下,驱动机构与轨道分离,但4个行走导向轮仍与轨道保持配合,操作人员可通过手动拖拽将焊接小车快速移至预定焊接位置;分离档专门用于焊接小车的安装与拆卸操作,进一步提升了现场作业效率。此外,该机构可通过手动预缠绕操作调整小车初始位置,优化现场施工流程,降低操作难度。

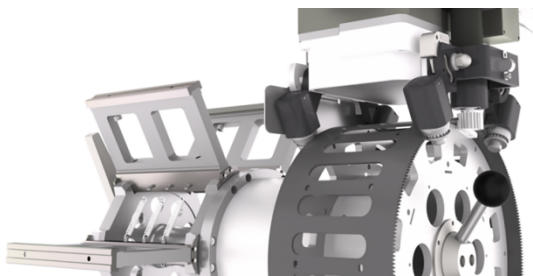


图5 啮合档位配合示意

Fig. 5 Schematic of meshing gear position fit

2.4 定位机构

如图6所示,定位机构采用涨紧机构与焊接轨道一体化设计,其核心功能是为焊接小车提供稳定、精准的运行基准,同时实现对不同规格CV贯穿件的灵活适配。该机构拆分为涨紧机构与焊接轨道两部分,无需现场额外装配调试,大幅缩短施工准备时间。

(1) 涨紧机构。

涨紧工装主要作用于套筒内部,用于实现定位

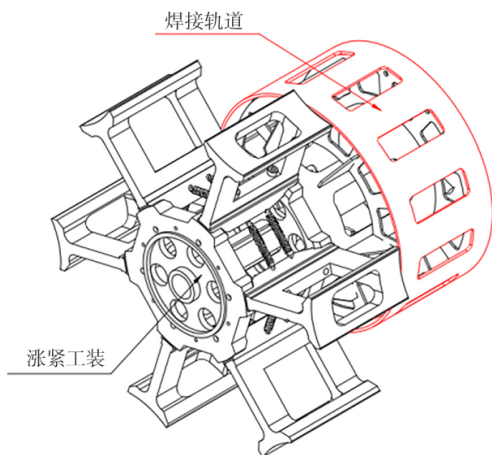


图6 定位机构结构示意

Fig. 6 Schematic diagram of positioning mechanism structure

机构与套筒的稳固连接。使用时,操作人员将涨紧工装搬运至贯穿件套筒内部,通过手动旋拧丝杠控制移动滑块的进给量;当移动滑块向后移动时,与固定挡板共同挤压楔形块,楔形块受到挤压后向外顶起涨紧支撑块,直至涨紧支撑块与套筒内壁紧密贴合,实现涨紧固定效果。

涨紧操作后,丝杠螺纹的自锁功能可直接将涨紧机构稳固锁定于贯穿件套管内,无需额外辅助固定,彻底消除机构掉落风险,保障现场作业安全。

(2) 焊接轨道。

焊接轨道采用环形结构,边缘加工有侧齿,可与焊接小车行走传动齿轮精准啮合,传动精度高,高速运行时无打滑现象,同时降低了加工制造成本与装配复杂度。轨道通过两个支撑圆盘与涨紧机构固定连接,有效避免运输与使用过程中出现弯曲变形,确保轨道与焊缝的同心度满足施焊要求。

如图7所示,相较于传统分体式结构,焊接轨道与涨紧机构的一体化设计省去了现场单独安装轨道、定位涨紧机构的分步操作,避免了两者的对位偏差,简化了施工流程,降低了现场操作复杂度;同时省去了分体部件间的匹配调试环节,显著提升了施工效率,能够充分适配核电现场高强度、高要求的焊接作业环境。

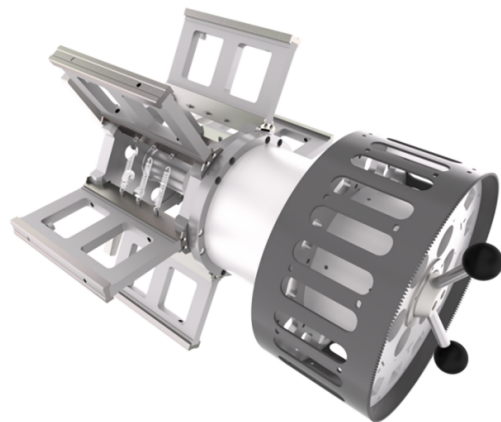


图7 定位机构结构渲染图

Fig. 7 Rendering of positioning mechanism structure

3 装备性能验证优化

3.1 装备性能测试

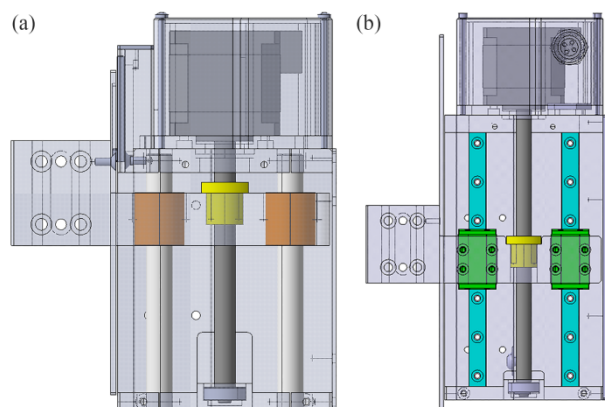
在完成CV贯穿件插入板专用自动化焊接装备

的研发与生产后,开展了系统性的装备集成联调及性能验证优化工作。该阶段的核心目标是全面检验装备各组成部分的协同工作能力,排查程序运行BUG,确保自动焊装备在实际工况中能够达到预期的设计性能与功能要求。

装备集成联调工作主要是将研发的机械结构与控制系统进行联动测试,确保各部件间的电气信号传输准确无误,机械动作响应及时、协调一致。性能验证工作则围绕装备功能完整性与性能指标展开全面检测:通过专业仪器测量各轴传动行程精度,测试焊接小车的负载极限能力,同时对焊接作业中的关键功能(熔池监控清晰度、焊接参数实时调节响应速度、故障诊断报警灵敏度等)进行反复验证,系统性评估装备在复杂工况下的适应性与长期运行稳定性。

3.2 装备优化改造

在装备性能测试过程中,发现焊枪左右调节机构经长时间高频运行后,出现末端晃动间隙过大的问题(最大间隙达7 mm),影响焊接精度。经拆解检查分析,该现象是由于驱动电机两侧光轴丝杠与铜套在高频摩擦下,铜套内径磨损扩大所致(见图8a)。针对这一问题,对该机构进行优化改造,将光轴铜套传动机构改为直线导轨传动结构(见图8b)。改造后经多次性能测试,焊枪左右调节机构的末端晃动间隙降至1 mm以内,完全满足焊接精度要求,有效提升了装备的运行稳定性与使用寿命。



(a)改造前(白色:光轴、橙色:铜套);(b)改造后(绿色:滚珠滑块、蓝色:导轨)

图8 焊枪左右调节机构示意

Fig. 8 Schematic of welding torch L-R adjustment mechanism

4 模拟件焊接

为验证装备与配套工艺的可靠性,设计模块化模拟件焊接工装,如图9所示,精准复刻现场直插型电气贯穿件的结构尺寸与焊接工况:母材选用SA738Gr.B核级调质钢,安全壳壁厚48 mm、插入板外径 $\varnothing 800$ mm、厚度88.9 mm,坡口形式采用与现场实际一致的X型;填充材料选用ER90S-G焊丝($\varnothing 1.2$ mm),保护气体为80%Ar+20%CO₂混合气,确保模拟焊接与现场实际工况的一致性^[12]。

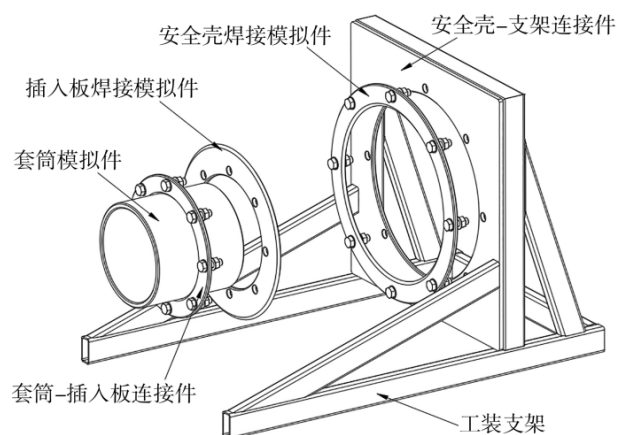


图9 焊接试验工装结构示意图

Fig. 9 Schematic of welding test fixture structure

焊接工艺采用“手工焊打底、自动焊填充盖面”的组合模式,同时将360°环形焊缝划分为多个工艺分区,通过智能MAG控制平台实现各分区焊接参数的精准匹配与动态调节。经多轮工艺优化试验,确定最优焊接参数窗口为:焊接电流140~220 A、焊接速度160~250 mm/min。焊接过程中,通过可翻转熔池监控相机实时观察熔池状态,结合三档式离合器机构快速调整小车位置,确保焊接过程连续稳定。

4.1 焊后无损检测

RT探伤检测覆盖全部模拟焊缝,结果显示:打底焊层无任何缺陷,填充及盖面焊层间熔合良好,仅存在少量分散性气孔缺陷(最大尺寸 $\varnothing 1.5$ mm $\times$ 1 mm),且缺陷数量与尺寸均在ASME标准允许范围内,所有检测底片均达到I级合格标准。具体检测结果见表2。

4.2 理化性能试验

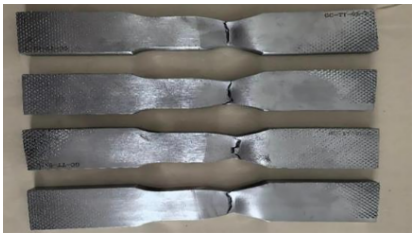
(1)拉伸试验。

表 2 RT 探伤检测结果
Table 2 RT inspection results

序号	底片号	显示丝号	黑度	缺陷描述	级别	结论
1	FL-1	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
2	FL-2	8	2.1-3.3	Ø1×1 1点	I	合格
3	FL-3	8	2.1-3.3	Ø1×1 1点	I	合格
4	FL-4	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
5	FL-5	8	2.1-3.3	Ø1×1 1点	I	合格
6	FL-6	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
7	FL-7	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
8	FL-8	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
9	FL-9	8	2.1-3.3	未见缺陷	I	合格
10	FL-10	8	2.1-3.3	Ø1.5×1 2点	I	合格
11	FL-11	8	2.1-3.3	Ø1×1 1点	I	合格
12	FL-12	8	2.1-3.3	Ø1×1 1点	I	合格

分别进行室温(见图 10a)与 200 °C 高温拉伸试验(见图 10b),结果显示:室温下焊缝接头抗拉强度达 628~637 MPa;200 °C 高温下,焊缝接头抗拉强度为 547~554 MPa,所有试样均断裂于母材区域,表明

焊缝强度高于母材,完全满足核级焊接的强度要求。具体试验结果见表 3。



(a)室温拉伸试样



(b)高温拉伸试样

图 10 拉伸试样整体形貌

Fig. 10 Macrograph of tensile specimens

表 3 拉伸试验结果
Table 3 Tensile test results

试样编号	温度/°C	试样尺寸	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	断裂部位	结果
GC-TT-01-1	室温	38.00×15.41	633	—	—	—	母材	合格
GC-TT-01-2	室温	37.97×17.79	637	—	—	—	母材	合格
GC-TT-02-1	室温	38.04×15.43	628	—	—	—	母材	合格
GC-TT-02-2	室温	38.02×17.74	635	—	—	—	母材	合格
GC-TT-03-1	200	Ø12.40	554	450	21	74	母材	合格
GC-TT-03-2	200	Ø12.41	547	465	20	79	母材	合格

(2)冲击试验。

如图 11 所示,在焊缝区、热影响区及母材区分别取样进行-29 °C 低温冲击试验,结果显示:焊缝区冲击吸收功≥91 J,热影响区冲击吸收功≥107 J,母材区冲击吸收功>300 J,所有试样的侧膨胀值与剪切断面率均满足 ASME 标准要求,表明焊缝接头具有优良的低温韧性。具体试验结果见表 4。



图 11 冲击试样断裂宏观

Fig. 11 Macrograph of impact specimen fracture

综合焊后无损检测与理化性能试验结果可知,模拟件焊缝的成形质量、内部缺陷控制及力学性能均满足 ASME B&PVC 规范第 III 卷 III 分卷中的对应标准要求,验证了专用自动化焊接装备及配套工艺的可靠性与适用性^[13]。

需要说明的是,本次模拟件焊接试验的核心目的是验证专用自动焊接装备的机械性能与运行稳定性,试验结果表明装备各轴传动精准、运行状态稳定,各轴行程参数完全符合现场实际工况的适配要求,充分证明该装备具备开展核电 CV 贯穿件插入板焊接作业的硬件基础与可行性。但本试验所采用的焊接工艺仅为适配装备验证的基础方案,尚未针对不同规格贯穿件、复杂工况下的焊缝成形优化、多参数耦合调控、焊接缺陷精准抑制等关键技术开展深入研究。相关内容将在后续研究中进一

表4 冲击性能测试结果

Table 4 Impact property test results

取样区域	试样编号	冲击吸收功 KV2/J	侧膨胀 值/mm	剪切断 面率/%	备注
焊缝区	1-1	116	0.76	80	折断
	1-2	91	0.87	70	折断
	1-3	103	0.92	90	折断
	2-1	125	0.84	100	折断
	2-2	115	1.11	100	折断
	2-3	125	0.84	100	未折断
热影响区	1-1	118	0.97	100	折断
	1-2	120	0.95	100	折断
	1-3	107	0.92	90	折断
	2-1	178	1.56	100	未折断
	2-2	152	0.91	100	折断
	2-3	260	1.93	100	未折断
母材区	1-1	>300	2.33	100	未折断
	1-2	>300	2.27	100	未折断
	1-3	>300	2.27	100	未折断

步完善。

5 结论

针对 AP 堆型核电站 CV 贯穿件插入板焊接质量要求高、手工焊接焊缝一致性差、操作人员劳动强度大及对核级焊工依赖度高的行业痛点,开展专用自动化焊接装备的研发与验证,主要结论如下:

(1)研发的适配 CV 贯穿件插入板的专用自动化焊接装备,集成四轴联动焊接小车、涨紧与轨道一体化定位机构、弧压自适应跟踪及远程熔池监控等功能。焊接小车搭载三档式离合器机构,实现了装备快速装卸、手动预定位与稳定焊接的无缝衔接;配合 180°可翻转熔池监控相机,保障左右机互换焊接时的监控精准度。定位机构采用丝杠楔形块涨紧原理实现与套筒的稳固定位,轨道侧齿设计有效提升传动精度,避免高速运行打滑。

(2)装备经性能测试与优化改造后,各部件协同运行稳定、动作响应协调。焊枪调节机构末端晃动间隙控制在 1 mm 以内,弧压跟踪系统可精准补偿 4 mm 范围内的焊缝高度差,装备整体轻量化设计(焊接小车质量仅 14 kg),能够灵活适配核电现场狭小空间作业与复杂工况下的焊接施工需求。装备核心部件实现 100% 国产化,技术自主可控。

(3)模拟件焊接验证表明,研发的自动化焊接装备焊接效率较传统焊条电弧焊提升 1 倍以上。在最优焊接参数窗口(焊接电流 140~220 A、焊接速度 160~250 mm/min)下,焊缝成形均匀,RT 探伤检测底片均达到 I 级合格标准,室温/高温拉伸、-29 °C 低温冲击等理化性能均严格满足 ASME B&PVC 规范第 III 卷 NE 分卷要求,有效规避了手工焊热输入波动大、人为干预多等固有缺陷。

(4)该专用自动化焊接装备填补了国内 AP 堆型核电 CV 贯穿件插入板自动化焊接的技术空白,有效缓解了核级焊工短缺的行业痛点,为核电工程安全高效建设提供了可靠的自动化解决方案,具有广阔的工程应用与推广前景。

参考文献:

- [1] 李璐,邓克剑,曾庆威,等. CV 自动焊工艺对 SA738 Gr.B 钢板焊接接头性能的影响[J]. 焊接技术,2019,48(S2):12-16.
- LI L, DENG K J, ZENG Q W, et al. Influence of CV Automatic Welding Process on Welding Joint Properties of SA738Gr. B Steel Plate [J]. Welding Technology, 2019,48(S2):12-16.
- [2] 李会永,王军涛. AP1000 核电站钢制安全壳底封头组焊焊接质量控制[J]. 广东化工,2012,39(8):183-184.
- LI H Y, WANG J T. Quality Control of Assembly and Welding for Bottom Head of AP1000 Nuclear Power Plant Steel Containment Vessel[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012,39(8):183-184.
- [3] 于立学,宋聚海. SA738Gr.B 焊接工艺研究[J]. 电焊机,2014,44(3):1-4.
- YU L X, SONG J H. Research on Welding Process of SA738Gr. B [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(3):1-4.
- [4] 唐识,张俊宝,朱跃德,等. 核电站钢制安全壳 SA-738Gr.B 的焊接工艺[J]. 电焊机,2016,46(7):72-78.
- TANG S, ZHANG J B, ZHU Y D, et al. Welding Process of SA-738Gr.B for Nuclear Power Plant Steel Containment Vessel[J]. Electric Welding Machine, 2016,46(7):72-78.
- [5] 高宪鹏,李少南,龚磊. CV 焊接自动化在现场拼装过程中应用的研究[J]. 中国电机(技术版),2015(11):93-96.
- GAO X P, LI S N, GONG L. Research on the Application of CV Welding Automation in On-site Assembly

- Process [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015, (11): 93-96.
- [6] 刘伟,宋聚海,刘秀荣,等. 钢安全壳插入板与贯穿件套筒的焊接质量[J]. 焊接技术, 2016, 45(09): 44-46.
- LIU W, SONG J H, LIU X R, et al. Welding Quality of Insert Plate and Penetration Sleeve of Steel Containment Vessel [J]. Welding Technology, 2016, 45 (09): 44-46.
- [7] 赵震,于志强. CAP1400钢制安全壳贯穿件套筒和插入板组件角焊缝超声波检测[J]. 无损探伤, 2020, 44(06): 46-48.
- ZHAO Z, YU Z Q. Ultrasonic Testing of Fillet Welds between Penetration Sleeve and Insert Plate Assembly of CAP1400 Steel Containment Vessel [J]. Nondestructive Testing, 2020, 44(06): 46-48.
- [8] 刘非,唐识. 熔化极气体保护自动焊工艺在核电站钢制安全壳中的应用[J]. 核动力工程, 2018, 39(03): 128-133.
- LIU F, TANG S. Application of Gas Metal Arc Welding Automatic Welding Process in Nuclear Power Plant Steel Containment Vessel [J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(03): 128-133.
- [9] 董国利,程传茂,廖平平,等. CV插入板与贯穿件套筒焊接接头超声波检测[J]. 国防制造技术, 2016(01): 54-56.
- DONG G L, CHENG C M, LIAO P P, et al. Ultrasonic Testing of Welding Joints between CV Insert Plate and Penetration Sleeve [J]. National Defense Manufactur-
- ing Technology, 2016(01): 54-56.
- [10] 伟明. 自动焊在管道工厂化预制中的应用研究[J]. 化工建设工程, 2003(03): 12-13.
- WEI M. Research on the Application of Automatic Welding in Pipeline Factory Prefabrication [J]. Chemical Engineering Construction, 2003(03): 12-13.
- [11] 姚舒扬,王世培,屈晗玮,等. 基于STM32的核电安全壳MAG自动焊控制系统设计[J]. 电焊机, 2025, 55(06): 81-87.
- YAO S Y, WANG S P, QU H W, et al. Design of MAG Automatic Welding Control System for Nuclear Power Containment Vessel Based on STM32 [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(06): 81-87.
- [12] 陈鹏,刘一搏,王亚峰,等. 核电CV厚板窄间隙摆动自动焊接工艺参数研究[J]. 电焊机, 2020, 50(03): 11-17.
- CHEN P, LIU Y B, WANG Y F, et al. Research on Welding Process Parameters of Narrow Gap Oscillation Automatic Welding for Nuclear Power CV Thick Plate [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(03): 11-17.
- [13] 张荣俭. AP1000钢制安全壳建造工艺及质量控制关键技术[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2018.
- ZHANG R J. Key Technologies of Construction Process and Quality Control for AP1000 Steel Containment Vessel [D]. China University of Petroleum (East China), 2018.