核用小直径传热管自动化衬管焊接系统的研制

张美玲¹, 张梦金¹, 刘刚¹, 李栩延², 田济语², 吴镐东²

(1.中广核研究院有限公司设备研究所,广东 深圳 518100;

2.华南理工大学 机械与汽车工程学院 , 广州 510641)

摘要:目的 针对核用小直径传热管长期服役于高温高压环境时易产生表面腐蚀缺陷等问题,研制一套自动 化衬管焊接系统,以高效修复腐蚀传热管,并验证该焊接系统的可行性。方法 采用以 STM32F405RGT6 微 处理器为控制核心、植入 FreeRTOS 实时操作系统的方式设计了一款焊接控制系统;以微型 TIG 焊枪为执行 机构、数字化焊接电源为功率输出设备,研制了一套自动化衬管焊接系统;最后以 304 不锈钢管为试样进 行了衬管脉冲焊接试验。结果 焊接试验过程稳定,无断弧现象,得到的焊缝衬管完全焊透,基管适度熔透, 焊缝成形良好。可通过调整基值电流、峰值电流、脉冲频率和占空比等参数调控焊接热输入,获得优质的 焊缝。结论 研制的微型焊枪可适应传热管内部的狭小焊接工况;焊接电源能够满足焊接过程中的能量需求, 提高了焊接过程的动态响应能力;焊接控制系统在硬件和软件层面上实现了焊枪和焊接电源的宏观调度, 能够对焊接波形进行精细化调控。所研制的衬管焊接系统各项性能优秀,满足压水堆核用蒸汽发生器水箱 内不锈钢传热管内衬管焊接高质量修复的需求。

关键词:不锈钢传热管;衬管焊接;微型焊枪;焊接电源;实时操作系统

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.013

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)05-0105-10

Development of Automatic Liner Welding System for Small Diameter Heat Transfer Tubes for Nuclear Use

ZHANG Mei-ling¹, ZHANG Meng-jin¹, LIU Gang¹, LI Xu-yan², TIAN Ji-yu², WU Hao-dong²

 Equipment Research Institute, China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518100, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an automatic liner welding system to solve the corrosion defects on the surface of

Received: 2022-09-14

基金项目:国家自然科学基金(U2141216,51875212);深圳市技术攻关项目(JSGG20191118102201716,JSGG20201201 100401005);广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金(GDNRC[2021]46号)

Fund : National Natural Science Foundation of China (U2141216,51875212); Key Technical Projects of Shenzhen City (JSGG20201201100401005, JSGG20201201100400001); Marine Economic Development (Six Marine Industries) Special Funding Project of Guangdong Province (GDNRC[2021]46)

作者简介:张美玲(1980—),女。

Biography: ZHANG Mei-ling (1980-), Female.

通讯作者:田济语(1991-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为高端焊接电源与工艺。

Corresponding author: TIAN Ji-yu (1991-), Male, Doctor, Assistant Researcher, Research focus: welding power source and welding process.

引文格式:张美玲,张梦金,刘刚,等. 核用小直径传热管自动化衬管焊接系统的研制[J]. 精密成形工程,2023,15(5):105-114. ZHANG Mei-ling, ZHANG Meng-jin, LIU Gang, et al. Development of Automatic Liner Welding System for Small Diameter Heat Transfer Tubes for Nuclear Use[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 105-114.

收稿日期: 2022-09-14

small-diameter heat transfer tubes for nuclear use, repair the corroded heat transfer tubes and verify the feasibility of the welding system. With STM32F405RGT6 microprocessor as the control core, a welding control system was developed by implanting the FreeRTOS real-time operating system. With micro TIG welding gun as the actuator and a digital welding power source as the power output device, an automated lining welding system was developed. Finally, the pulse welding experiment of 304 stainless steel tubes was carried out. As a result, the welding process was stable. There was no arc breaking. The weld liner was completely welded. The base pipe was properly melted, and the weld was well formed. The welding heat input can be regulated by adjusting the base current, peak current, pulse frequency and duty ratio to obtain high quality weld. It is found that the developed micro welding torch can adapt to the narrow welding conditions inside the heat transfer tubes. The welding power source meets the energy demand during welding and improves the dynamic response ability of the welding process. The welding control system realizes macroscopic scheduling of the welding torch and the welding power source in terms of both hardware and software, and can regulate the welding waveform fine. The results show that the developed liner welding system has excellent performances and meets the needs of high-quality repair of the stainless steel heat transfer tubes inside water tanks of steam generators for pressurized water reactors.

KEY WORDS: stainless steel heat transfer tube; liner welding; micro welding torch; welding power source; real-time operating system

不锈钢传热管是压水堆核用蒸汽发生器水箱内 部的核心构件,在压水堆核用蒸汽发生器中,一回路 80%的承压面积为列管传热管^[1-5]。目前通用的传热 管常服役于高温高压环境,容易产生局部腐蚀现象, 应力腐蚀开裂(SCC)等工程问题随之产生^[6]。据工 业部门统计,在核电站设备破裂事故中,约1/4的事 故由腐蚀开裂造成^[7]。传热管是一回路的易损部位之 一,一旦薄壁传热管失效,一回路放射性物质将泄漏 至二回路,严重威胁压水堆核电站的安全运行。

针对核用小直径传热管表面的腐蚀缺陷问题,现 有工程解决方案有以下几种^[8] :(1) 堵管处理,通过 堵塞传热管来解决泄漏问题,包括爆炸堵管和机械堵 管,这2种堵管方式都属于永久性堵管,相应的代价 是使被堵传热管永久性失效,降低蒸汽发生器的工作 效率^[9];(2)更换失效传热管,该方案涉及拆卸传热 管,由于传热管与管板的连接方式主要为胀接与焊 接,拆卸步骤复杂,相应时间成本增加;(3)定位拆 取失效传热管后进行管外开裂位置精准环焊[10-11],该 方案同样存在拆卸困难的问题,并且在修复过程中涉 及的裂缝面积较大^[7],修复过程复杂且修复成本高; (4)衬管修复^[12],采用衬管焊接的方式对传热管进行 修复,即在破损传热管内部嵌入一根衬管,利用胀接 和焊接的方法使衬管和传热管紧密连接,从而达到传 热管修复的效果^[12]。衬管焊接修复是在不拆取、不封 堵传热管的前提下最为高效的小直径管道修复方案。

目前常用的衬管焊接修复方案是钎焊衬管和激 光焊接衬管^[13]。钎焊衬管的密封性好,实用性强,但 是耗时长,效率低;激光焊接衬管的环境适应性强, 焊接质量更好,但激光焊接设备昂贵,修复成本高。 TIG 焊焊接质量好、效率高且设备成本低,本文在借 鉴 TIG 焊管道修复应用的基础上提出了衬管 TIG 焊 接修复方案^[14]。

衬管 TIG焊接修复方案存在工艺和电源2个方面 难题。在工艺方面,不锈钢传热管存在管道直径小 (19 mm)、位置深(长度可能超过 500 mm)、施焊 空间狭窄等问题^[14],目前市面上没有一套完全适用于 小直径不锈钢传热管内壁焊接的微型 TIG 焊枪。在电 源方面,用于全位置焊接的焊接电源大部分为模拟控 制电源,逆变频率仅有 20 kHz,动态响应能力无法满 足衬管焊接需求^[15-18],并且大部分焊机不具备实时显 示功能,无法直观地监控电源的工作状态。

本文基于衬管 TIG 焊接修复方案,研制了一套自 动化衬管焊接系统,包括执行机构、焊接电源和控制 系统。执行机构是一套细长的微型焊枪,可适应小直 径传热管内狭长的焊接工况;焊接电源采用全数字化 控制,逆变频率高达100 kHz,可大大提高焊接过程 中的动态响应能力;控制系统以 STM32F405RGT6 (微控制器)为核心,结合 FreeRTOS 实时操作系统, 可对焊接过程中的波形进行精细化调制。设备性能测 试与衬管焊接试验结果表明,所研制的衬管焊接系统 性能优秀,能满足压水堆核用蒸汽发生器内部小直径 不锈钢传热管衬管焊接高效修复的需求,为核用小直 径传热管衬管焊接修复提供了稳定高效的解决方案。

1 衬管 TIG 焊接原理与系统整体方案

1.1 衬管 TIG 焊接原理

衬管 TIG 焊接修复原理如图 1 所示。在腐蚀待修 复区内嵌入一个外径大小与传热管内径匹配、壁厚与 传热管壁厚相同的同心中空管(衬管),胀管后通过 管内全位置焊接技术在腐蚀待修复区前后两端环焊 两圈,使衬管完全焊透、传热管适度熔透,两管焊合





至符合工程需求,以达到焊接修复的目的。

衬管焊接焊缝为圆形,将微型焊枪伸入衬管内部 进行自动化焊接作业时,将环焊位置按照时钟的钟点 进行划分^[19],如图 2a 所示,分为仰焊(点 11、点 0、 点 1)、平焊(点 5、点 6、点 7)和立焊(点 2、点 3、 点 4、点 8、点 9、点 10)。熔池受力示意图如图 2b 所示。在焊接过程中,熔池位置是变化的,在变化的





熔池中,熔融金属会受到重力 G、熔池表面张力 f 与 TIG 焊轴向电弧吹力 F 的共同作用,重力在不同的焊 接位置对熔池的影响不同,这将导致环形焊缝成形不 均匀^[20]。为减小熔池受重力因素影响,在施焊过程中 采用 TIG 直流脉冲焊接方式,即在峰值形成熔池,基 值维持电弧燃烧,同时对熔池进行冷却,这样有利于 得到熔合良好、成形均匀的焊缝^[21-23]。

1.2 系统整体方案

设备整体系统图如图 3 所示。自动化衬管焊接系统由执行机构、焊接电源和控制系统 3 部分组成。其中,执行机构为衬管焊接焊枪,可实现对破损传热管的焊接修复,焊接电源负责提供焊接所需能量,控制系统可实现对整个焊接过程的总体调度。

焊枪采用本文自研的一款集传动、保护气、水冷 循环、导电与绝缘于一体的衬管焊枪,其整体结构紧 凑、空间利用率高;枪体部分长径比大,满足狭长管 道焊接的空间需求。焊接电源包括功率变换电路和硬 件控制电路 2 个部分, 功率变换电路采用 MOSFET 作为功率开关器件 ,极大提高了电源的动特性和能量 密度;硬件控制电路采用基于 ARM 的全数字化控制 系统,可实现脉冲 TIG 焊的精细化调控。衬管焊接控 制系统包括焊枪控制电路、焊接电源控制电路和可视 化人机交互系统 3 部分, 焊枪控制电路可实现焊枪 转速与转角的控制,焊接电源控制电路可控制输出 电流的波形和电流大小,可视化人机交互系统负责 接收用户输入的给定焊接参数,并在焊接过程中实 时显示采集到的电参数。焊枪控制电路和焊接电源 控制电路与可视化人机交互系统通过 RS485 总线方 式进行通信。



图 3 设备整体系统图 Fig.3 Diagram of overall system

2 衬管焊接专用焊枪结构设计

小直径传热管内部空间狭窄,可操作范围小,传 统钨极焊枪已无法满足工艺需求^[24],为此,自研了一 套专用于衬管焊接工况的旋转焊枪,实现了小直径管 内壁旋转 TIG 焊接。衬管焊枪整体结构如图4所示, 衬管焊枪整体由焊枪传动系统、保护气系统、冷却水 循环系统、电流传导系统与绝缘系统组成。

焊枪枪体长达 1 050 mm,可伸入管道内的导电 轴长度达 800 mm,满足核电现场的管深需求;伸入 管内的结构部分最大直径为 14 mm,焊枪长径比高达 57:1,满足小直径不锈钢衬管内径 14.5 mm的施焊 空间需求。



Fig.4 Construction of liner welding torch

2.1 传动系统

焊接速度对焊缝成形有着极大的影响,这是因为 钨极旋转速度的快慢决定了单位长度焊缝热输入量 的大小。钨极旋转速度越慢,单位长度焊缝的热输入 量越大,焊缝的熔深与熔宽越大;相反,单位长度焊 缝的热输入量越小,焊缝的熔深与熔宽越小。

焊接速度与焊枪传动系统的设计有关,如图5所示,焊枪传动系统包括直流无刷减速电机、传动齿轮副、导电轴和钨极导电杆。直流无刷减速电机经过传动齿轮副减速增扭,之后通过平键传递至导电轴,再通过螺纹传递至钨极导电杆,最终达到钨极



图 5 焊枪传动系统 Fig.5 Welding torch transmission system 沿管内壁旋转的目的。

为满足衬管焊接对焊接速度的要求,在设计时优 先选择内部减速比大的直流无刷减速电机,所选电机 参数如表1所示。最终选择赛仑特无刷减速电机,该 电机内部减速比为 721:1,额定负载时的输出转速 为 14.5 r/min 且速度可调,配合齿轮箱 2.9:1 的减 速比,焊枪转速可在 1~5 r/min 内调整,符合衬管焊 接速度需求。电机最大输出扭矩为 6 N·m,符合旋 转扭矩需求。

2.2 保护气系统及水冷循环系统

TIG 焊需要钨极在富氩环境中起弧^[25],并且在焊 接过程中需要对焊枪与钨极导电杆进行水冷,由于列 管直径小、空间狭窄,传统的保护气与水冷却循环独 立式设计已经不符合工况要求,因此设计时采用水气 电一体化的思路,将保护气通道与冷却水通道集成在 导电轴内部,使导电轴既可以传导输出电流,又可以 通保护气并实现水冷循环。

为了隔离焊枪内部的保护气和冷却水,设计了 如图 6 所示的焊枪水气分布套。在焊枪旋转时,陶 瓷滚动轴承可以保证进气管和水软管静止,防止软 管缠绕,O 形密封圈隔离了水路和气路,避免了水 气互扰。

2.3 导电系统及绝缘系统

导电系统在焊接过程中负责完成输出电流的传 导。本系统采用直流正接(DCEN),工件与焊机电 源正极相连,钨极与负极相连。在焊接过程中,当高 频引弧成功后,电流流向如下:焊接电源正极→不锈 钢列管→钨极→钨极导电杆→导电轴→焊接电源负 极,形成了完整的电流回路。

绝缘系统可有效保护操作人员与设备系统的安 全。焊枪减速齿轮部分由绝缘减速箱保护,导电轴包 裹一层 PTFE 热缩管,钨极导电杆包络3层高温绝缘 布,轴承采用陶瓷轴承,这些设计保证了焊枪的绝缘 性,起到了绝缘防护的作用。

设计的衬管焊接专用焊枪充分考虑到了工况尺 寸、导电、绝缘、气保护与水循环等需求,为小直 径传热管自动化衬管焊枪的设计提供了高效的解决 方案。

	表 1	所选电	机参数	
Tab.1	Paramete	rs of th	e selected	motor

Model : Silent ST28p-28541W3-24-721							
Input voltage –	No load		Rated load			Instant allowable	Ratio of
	Speed/ $(r \cdot min^{-1})$	Current/A	Speed/ $(r \cdot min^{-1})$	Current/A	Torque/(N \cdot m)	torque/(N·m)	deceleration
24 V DC	17.4	0.5	15.8	1.7	6	9	721:1



Fig.6 Construction of liquid-gas separator

3 衬管焊接控制系统开发

3.1 控制系统硬件开发

控制系统硬件设计是衬管焊接系统实现自动化、 数字化的基础,主要包括衬管焊枪驱动电路、焊接电 源控制电路以及可视化人机交互系统。

3.1.1 衬管焊枪驱动电路

为保证衬管焊枪按预设参数稳定转动,设计了如 图 7 所示的无刷电机驱动电路。T1—T6 为 N 沟道 MOSFET,组成了三相逆变桥。三相逆变桥的输出与 电机三相线相连,控制芯片 STM32 输出的 PWM 信





号经过隔离放大后控制 MOS 管通断和占比,进而控 制电机内部励磁电流,从而进一步控制电机转子的转 速。通过无刷电机内部的 HA、HB、HC 霍尔传感器 采集转子转动信息,将变化的脉冲信号传输到 STM32 定时器脉冲捕获通道,通过与标准脉冲数对比判断转 子的转动角度,从而得到衬管焊枪的转速和转角,实 现焊枪转速和转角的闭环控制。

3.1.2 焊接电源控制电路

衬管焊接电源控制电路采用 STM32F405RGT6 芯片作为控制系统核心处理器,STM32F4 系列芯片 拥有 168 MHz 的最高主频以及集成运算模块,具有 优异的数据处理能力与极快的运算速度,不仅能够满 足衬管焊接控制系统的精度及速度要求,还能够根据 需求外拓功能。

衬管焊接电源控制电路如图 8 所示,衬管焊接电 源控制系统包括 ARM 最小系统、焊接电流 D/A 输出 模块、输出电信号采样调理模块、水冷却气保护开关 模块、电机控制及驱动信号给定模块与触摸屏人机交 互模块等。

焊接电流通过 PWM 模块控制, PWM 模块输出 的驱动信号被驱动芯片放大之后,得到全桥驱动电路 的 PWM 信号,通过控制 MOSFET 的导通占空比来 完成对焊接电流的控制。采样系统采集输出电信号反 馈到 STM32,并通过 PID 算法实现输出电流的闭环 控制,提高了电流的精细化控制能力。

焊接过程中的水循环、保护气开关通过 STM32 的 GPIO 口控制。工作时,GPIO 口通过控制继电器 开关来控制水、气的导通和关断,执行相应任务。



图 8 衬管焊接电源控制电路 Fig.8 Control circuit of liner welding power source

3.1.3 可视化人机交互系统

可视化人机交互系统由触摸屏和各种通讯模块 组成,提供了开放灵活的参数输入界面,并且能够实 时显示焊接电流、电压与焊枪转速等参数。触摸屏结 构原理如图9所示,触摸屏的核心为32位的精简指 令集微处理器,外围电路包括指示灯电路、通信模块 电路以及显示与触摸单元电路。通过触摸屏编辑焊接 参数,通过 RS485 总线将焊接参数发送至 STM32 控 制器。





3.2 控制系统软件开发

控制系统软件设计是衬管焊接系统实现自动化、 数字化的关键,主要包括衬管焊接任务设计、衬管焊 接任务流程设计与衬管焊接控制算法。

3.2.1 衬管焊接任务设计

衬管焊接控制系统基于 FreeRTOS 实时内核,建 立了包括衬管 TIG 焊接任务、电流波形控制任务、按 枪检测任务、RS485 通讯任务等在内的多个任务。其 中,衬管 TIG 焊接任务确保衬管焊接流程正常进行, 电流波形控制任务实现焊接过程电流波形的实时控 制,两者是完成焊接流程的基体;按枪检测任务优先 级较高,用来判断焊枪开关是否按下,是衬管焊接流 程开始的标志;RS485 通讯任务可以保证焊接参数的 可视化输入与实时显示。

3.2.2 衬管焊接任务流程设计

衬管焊接任务流程图如图 10 所示。系统设备通 电后,通过人机交互触摸屏编辑焊接参数,并通过 RS485 总线将数据发送至 STM32 控制器,控制器实 时监测按枪开关是否按下,按枪按下后,保护气与水 循环开关依次打开,提前水冷送气。当提前水冷送气 结束后,接通高频引弧开关。当系统判断引弧成功后, STM32 输出电机控制 PWM 信号,控制焊枪的旋转, 同时控制输出电流缓慢上升,此时电机已转 10°左右, 焊接电源进入输出电流波形控制阶段。当控制器通过 采集无刷减速电机内部的霍尔传感器脉冲数判断电 机旋转了一圈后,控制输出电流按照一定的比例下降 到 0,待无输出电流时,焊枪停止旋转,并滞后水冷 与送气,整个焊接流程结束。整个焊接过程中电机转 动 370°,初始段电流上升与结束段电流下降的焊缝重 合 10°,从而使整道焊缝各处受热均匀,焊缝成形更 加优良。



图 10 衬管焊接任务流程图 Fig.10 Flow chart of linearwelding task

4 衬管焊接系统测试

4.1 电源动态性能

利用衬管焊接设备、模拟负载电阻器、力科 HDO4000 系列高分辨率示波器以及相应探头搭建测 试平台,进行系统性能测试和衬管焊接修复试验,衬 管焊接现场如图 11 所示。根据工艺需求,选择 0~30 A 与 0~120 A 这 2 种输出电流进行电流阶跃响应测试, 电流 0~30 A 的阶跃响应时间为 2.2 ms,如图 12a 所 示;电流 0~120 A 的阶跃响应时间为 2.3 ms,如图 12b 所示。由此可见,电源阶跃响应速度优秀,对于大电 流输出与小电流输出皆具有较好的动态响应特性,调 整能力良好。

4.2 电源输出波形测试

所研制的衬管焊接设备能够实现恒流输出与脉 冲输出 2 种波形,如图 13 所示。直流 80 A 的输出电 流波形如图 13a 所示,直流脉冲输出波形如图 13b 所 示。从输出波形来看,输出电流波形规整,脉冲电流 切换时无尖峰产生,切换速度快,输出电流稳态误差 小,电源具有良好的控制精度与动态特性。



a 衬管焊接设备

图 11 衬管焊接现场

Fig.11 Field drawing of liner welding: a) equipment; b) digital control system; c) communication module





4.3 衬管焊枪挠度检测

焊枪挠度检测平台包括激光跟踪仪本体、靶球、 夹具和待测焊枪等,挠度测试设备及试验现场如图 14 所示。

在设计时提供了多种钨极导电杆尺寸以适应不 同场景下的衬管焊接,为验证焊枪在各种场景下的适 应性,需求出刚性变形范围内挠度和导电杆质量之间 的关系。因此,本文设置4组试验,导电杆质量分别 为 80、120、160、210 g, 并测得焊枪挠度值 w 如表

2 所示。

采用线性回归方程对检测值进行模拟,挠度值 w 与质量 m 的关系如式(1)所示。

$$w = 40.8m + 10.673\tag{1}$$

根据现场测试情况判断可知,当焊枪挠度大于 20 mm 时将不能正常伸入传热管。为将挠度值控制在 20 mm 以内,根据式(1)可知,钨极导电杆质量最 大值 mmax<228 g,因此在设计钨极导电杆时需将质量 控制在 228 g 以内,以保证焊枪的正常使用。



图 14 挠度测试设备及试验现场 Fig.14 Test equipment of deflection and experimental site

表 2	焊枪挠度检测值
Tab.2 Deflection de	etection value of welding torch

Group	Mass/g	Deflection/mm
1	80	13.997
2	120	15.498
3	160	17.154
4	210	19.281

4.4 衬管焊接试验

焊接试验平台由本文研制的衬管焊接系统、气瓶和力科 HDO4000 系列高分辨率示波器组成,将设备应用于衬管焊接工艺中以验证其实际焊接工艺性能。焊接试样为 304 不锈钢管,基管外径为 19 mm、内径为 17 mm,衬管外径为 16.5 mm、内径为 14.5 mm, 基管与衬管通过胀管工艺消除间隙。焊枪旋转速度为 3 r/min,采用氩气作为保护气,气流量为 10 L/min,脉冲电流频率为 10 Hz。为对比脉冲波形各参数对焊接工艺的影响,设置了 2 组不同参数进行对比试验,每组参数进行了 5 次试验,焊接参数设定如表 3 所示。

表 3 焊接参数设定值 Tab.3 Parameters setting of welding

Group	Base current/A	Peak current/A	Frequency/Hz	Duty/%
1	40	110	10	50
2	60	110	10	50

2 组焊接试验过程的起弧时间短,焊接过程电弧 燃烧稳定、无断弧、无飞溅,所获得的焊缝形貌分别 如图 15a 和图 15b 所示。焊缝表面光滑、成形均匀、 无明显缺陷。对比图 15a 和图 15b 可知,通过调整脉 冲输出参数可有效控制焊接热输入、集中电弧能量, 可根据实际焊接需求调整电源输出参数得到优质焊 缝,使衬管完全焊透、传热管适度熔透。





b 参数 2 图 15 焊接试验焊缝形貌 Fig.15 Weld morphology of welding test: a) weldment 1; b)weldment 2

5 结论

1)设计了一套可用于小直径(内径 14.5 mm) 传热管管内焊接的微型焊枪。该焊枪集成了水冷却、 气保护、导电、绝缘防护与焊枪旋转等模块,可适用 于管内狭窄环境中的全位置焊接。

2)研制了一套可用于衬管焊接的 SiC 数字化 TIG 焊接电源,动态性能良好,输出电流波形稳定,为衬 管焊接提供稳定的能量输出。 3)开发了一套适配核用小直径传热管自动化衬 管焊接的控制系统,实现了对焊枪转速及转角的精确 控制,可精细化调节焊接电流的大小,提高了焊接过 程中的动态响应速度及稳定性。

4)利用所研制的自动化衬管焊接系统进行了大 量焊接试验,结果表明,研制的衬管焊接设备焊接过 程稳定,焊缝成形良好,环焊接头性能可满足核用蒸 汽发生器传热管的实际工作需要,为我国核用小直径 衬管焊接修复工艺提供了高效稳定的解决方案。

参考文献:

- 符治. 核安全级换热器换设备热管与管板自动钨极氩 弧焊接研究[J]. 自动化应用, 2021(3): 145-147.
 FU Zhi. Research on Automatic Tungsten Argon Arc Welding of Heat Pipes and Tube Sheets of Nuclear Safety Class Heat Exchanger Equipment[J]. Automation Application, 2021(3): 145-147.
- [2] 邹小平, 沈天阔. 核电站蒸汽发生器不锈钢堆焊层剥离问题的分析与改进[J]. 焊接技术, 2022, 51(6): 83-87.

ZOU Xiao-ping. SHEN Tian-kuo. Analysis and Improvement of Stainless Steel Surfacing Layer Stripping of Steam Generator of Nuclear Power Plant[J]. Welding Technology, 2022, 51(6): 83-87.

- [3] 焦殿辉,张文广,李禅,等. 蒸汽发生器传热管应力 腐蚀案例分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(16): 224-226.
 JIAO Dian-hui. ZHANG Wen-guang. LI Chan, et al. Analysis on Steam Generator Heat Pipe Stress Corrosion Case[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(16): 224-226.
- [4] 刘福广,杨二娟,李勇,等.核电蒸汽发生器堵管技 术研究进展及其在高温气冷堆的应用前景[J]. 热力发 电, 2022, 51(6): 74-81.

LIU Fu-guang, YANG Er-juan, LI Yong, et al. Research Progress on Tube Plugging Technology of Nuclear Power Steam Generator and Its Applicability for High Temperature Gas-cooled Reactor[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6): 74-81.

[5] 张加军,郑丽馨,刘英伟,等. 压水堆核电厂蒸汽发 生器传热管的降质问题[J]. 压力容器, 2013, 30(12): 57-63.

ZHANG Jia-jun, ZHENG Li-xin, LIU Ying-wei, et al. Discussion about Degradation Issue of Steam Generator Tube in PWR[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(12): 57-63.

[6] 李明,林健,雷永平,等.核电蒸汽发生器传热管/管 板接头传热管内壁的焊接残余应力分布[J].机械工程 材料,2019,43(1):82-86.

LI Ming, LIN Jian, LEI Yong-ping, et al. Welding Residual Stress Distribution of Heat Transfer Tube Inner Wall of Tube-to-tube Sheet Joint in Nuclear Steam Generator[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(1): 82-86.

- [7] 张帅. 蒸汽发生器管子管板胀焊残余应力数值模拟及 试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 1-5. ZHANG Shuai. Numerical Simulation and Experimental Research on Residual Stress of Expansion Welding of Steam Generator Tube and Tube Sheet[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 1-5.
- [8] 高明华,韩玉刚,雷水雄,等.核电厂蒸汽发生器运行维护的措施[J].压力容器,2019,36(4):74-78. GAO Ming-hua, HAN Yu-gang, LEI Shui-xiong, et al. A Brief Discussion on the Operation and Maintenances of Steam Generator in NPP[J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(4): 74-78.
- [9] 王仕航,郑东宏,范安全,等.核电站蒸汽发生器传 热管机械堵管工艺评定[J].压力容器,2021,38(1): 75-80.
 WANG Shi-hang, ZHENG Dong-hong, FAN An-quan, et al. Mechanical Plugging Procedure Qualification of Steam Generator Heat Transfer Tube in Nuclear Power Plant[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(1): 75-80.
- [10] 张其先, 吴绍炳, 刘鸣宇, 等. 核电蒸汽发生器用国产化传热管焊接性能试验研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(23): 159-162.
 ZHANG Qi-xian, WU Shao-bing, LIU Ming-yu, et al. Study on Weldability of Domestic Heat Transfer Tube Used in Nuclear Steam[J]. Working Technology, 2012, 41(23): 159-162.
- [11] 李双燕. 核电蒸汽发生器最终环缝焊接技术[J]. 装备 机械, 2021(3): 47-50.
 LI Shuang-yan. Final Welding Technology of Circumferential Seam of Nuclear Power Steam Generator[J].
 The Magazine on Equipment Machinery, 2021(3): 47-50.
- [12] 左涛. 垫衬法管道修复关键问题研究[D]. 北京: 中国 地质大学, 2021: 1-5.
 ZUO Tao. Research on Key Issues of Pipeline Repair by Grouting Anchor Lining Method[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021: 1-5.
- [13] 冯利法,未永飞, 闫国华. 蒸汽发生器传热管衬管技术研究[J]. 压力容器, 2011, 28(4): 35-40.
 FENG Li-fa, WEI Yong-fei, YAN Guo-hua. Research on Sleeving Technique of Steam Generator Tubes[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(4): 35-40.
- [14] 石凯, 奚运涛,周勇,等.小口径钢管全位置脉冲 TIG 焊的成形控制及组织调控[J]. 焊管, 2004(1): 21-24.
 SHI Kai, XI Yun-tao, ZHOU Yong, et al. Forming Control & Adjustment of Full Circumference Length Pulse Tig Weld for Small Diameter Pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 2004(1): 21-24.
- [15] 王振民, 江东航, 吴健文, 等. 逆变式电弧焊机的发展与展望[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 186-193.
 WANG Zhen-min, JIANG Dong-hang, WU Jian-wen, et al. Development and Prospect of Inverter Arc Welding

Machine[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 186-193.

- [16] 邵红, 吴凌燕, 戚甫峰. 逆变焊接电源的发展和现状
 [J]. 科技信息, 2010(29): 109.
 SHAO Hong, WU Ling-yan, QI Fu-feng. The Development and Current Situation of Inverter Welding Power Supply[J]. Science & Technology Information, 2010(29): 109.
- [17] 李峰,李亮玉,李香.国内全数字化焊机的研究现状
 [J]. 焊接技术,2006(4): 6-8.
 LI Feng, LI Liang-yu, LI Xiang. Internal Research Status of Digital Electric Welding Machine[J]. Welding Technology, 2006(4): 6-8.
 [18] 张秀兰、马红艳、徐绪炯.数字化焊接电源的发展[J].
- [16] が方三、与红花、体質が、数子化片设定部は发展[J].
 电焊机, 2003(2): 9-10.
 ZHANG Xiu-lan, MA Hong-yan, XU Xu-jiong. Development of Digital Welding Machine[J]. Electric Welding Machine, 2003(2): 9-10.
- [19] 郭春富,孙伟强,刘帛炎,等.管道全位置自动焊的研究现状及展望[J]. 电焊机, 2017, 47(11): 77-81.
 GUO Chun-fu, SUN Wei-qiang, LIU Bo-yan, et al. Research Status and Expectation on All-position Automatic Welding for Pipeline[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(11): 77-81.
- [20] SATTARI F I, JAVADI Y. Influence of Welding Sequence on Welding Distortions in Pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 265-274.

- [21] 陆军. 核电蒸汽发生器管子管板液压胀接技术研究
 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 1-4.
 LU Jun. Study on The Hydraulically Expanded of Tube-to-tube Sheet in Steam Generator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 1-4.
- [22] 翟君. 300 MW 核电机组蒸汽发生器管子—管板胀接 技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016:1-3. ZHAI Jun. Research on the Expanding Technology of Tube to Tube Sheet for 300 MW Nuclear Power Station Steam Generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 1-3.
- [23] 朱慧. 核电蒸汽发生器换热管与管板液压胀接技术研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011: 1-5.
 ZHU Hui. Research of Hydraulic Expansion Technology in Nuclear Steam Generator[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011: 1-5.
- [24] VIDYARTHY R S, DWIVEDI D K. Activating Flux Tungsten Inert Gas Welding for Enhanced Weld Penetration[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22(8): 211-228.
- [25] 王振民,唐嘉健,潘晓浩,等. 全数字大功率交流脉 冲埋弧焊接电源[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 1-8.
 WANG Zhen-min, TANG Jia-jian, PAN Xiao-hao, et al. Digital High-power AC-pulse Submerged Arc Welding Power Source[J]. Journal of Mechanical Engineering. 2022, 58(4): 1-8.

责任编辑:蒋红晨