

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.03

先进核电堆型热交换器关键焊接技术

蒋宇晨, 何冰*, 刘晓鸿, 江国焱, 李恩, 戴光明

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广东 广州 511455

摘要: 为突破我国先进核电堆型热交换器一体化设计与商用化的核心制造瓶颈, 本研究聚焦自主设计的新型热交换器, 系统解析其创新结构、材料选型及工艺要求, 重点攻克高可靠焊接技术难题。针对高温钠环境与复杂结构特性, 通过制造装备创新研发、抗钠腐蚀焊接接头工艺开发、焊接过程检测技术等方法, 成功开发了 5 项核心焊接技术: 开槽式管子/管板封口焊焊接工艺、迷宫密封耐磨层堆焊工艺、管板-套筒装焊几何精度与尺寸变形控制措施、小径薄壁管全位置对接焊工艺、大型多层薄壁奥氏体不锈钢低变形高效不锈钢焊接工艺, 形成全流程焊接质量控制体系。研究成果填补国内核级热交换器精密焊接领域空白, 建立了自主化工艺规范与制造标准, 为同类设备标准化设计及工程化应用提供核心技术支撑, 有力推动国家重大装备自主化战略实施。

关键词: 先进核电技术; 热交换器; 焊接技术

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0030-07

Key Welding Technology for Advanced Nuclear Reactor Heat Exchangers

JIANG Yuchen, HE Bing*, LIU Xiaohong, JIANG Guoyan, LI En, DAI Guangming

Dong Fang (Guang Zhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

Abstract: To break through the core manufacturing bottleneck of integrated design and commercialization of advanced nuclear power plant heat exchangers in China, this research focuses on the newly designed heat exchanger with independent intellectual property rights, systematically analyzes its innovative structure, material selection and process requirements, and focuses on solving the technical problems of high-reliability welding. In response to the high-temperature sodium environment and complex structural characteristics, through the innovative development of manufacturing equipment, the development of anti-sodium corrosion welding joint processes, and the detection technology of the welding process, five core welding technologies have been successfully developed: the slot-type tube/tube sheet sealing weld welding process, the labyrinth seal wear-resistant layer surfacing welding process, the control measures for the geometric accuracy and dimensional deformation of the tube sheet - sleeve assembly and welding, the all-position butt welding process for small-diameter thin-walled tubes, and the low-deformation and high-efficiency stainless steel welding process for large multi-layer thin-walled austenitic stainless steel. A full-process welding quality control system has been formed. The research results fill the gap in the field of precision welding of nuclear-grade heat exchangers in China, establish independent process specifications and manufacturing standards, provide core technical support for the standardized design and engineering application of similar equipment, and effectively promote the implementation of the national major equipment independentization strategy.

Keywords: Advanced nuclear power technology; Heat Exchanger; Welding technology

引用格式: 蒋宇晨, 何冰, 刘晓鸿, 等. 先进核电堆型热交换器关键焊接技术[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 30-36.

Citation: JIANG Yuchen, HE Bing, LIU Xiaohong, et al. Key Welding Technology for Advanced Nuclear Reactor Heat Exchangers[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 30-36.

收稿日期: 2025-06-26 修回日期: 2025-08-23

作者简介: 蒋宇晨(1991—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发。E-mail: 491406887@qq.com。

通讯作者: 何冰(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核能相关主设备的焊接新工艺、新技术研发工作。E-mail: 928612175@qq.com。

0 引言

先进核电堆型是我国核电技术发展的重要方向,目前正在发展的先进核能系统主要包括高温气冷堆、钠冷快堆、熔盐堆、超临界水堆和铅冷快堆,与耗资不菲、建造周期漫长的传统大型核电站相比,先进核反应堆造价更低、建造周期短、更安全灵活,能够满足中小型电网的供电、城市供热、工业供汽和海水淡化等各种领域应用的需求^[1]。焊接作为一种通过热加工实现材料连接的手段,是核电装备制造不可或缺的技术手段,焊接质量直接关系到反应堆主设备的安全稳定运行,在核电领域的应用具有极其重要的意义^[2]。

某先进核电堆型热交换器是主热传输系统的关键设备之一,用于实现一、二回路的热量交换^[3]。设备换热主体竖直浸没在一回路钠池内,将一回路的钠的热量传输给二回路的钠,同时,通过换热管束将一次放射性钠和二次非放射性钠隔离,实现堆内冷却剂的放射性屏蔽。每个机组主冷却系统设两条环路,每条环路设置2台热交换器,共计4台。

该热交换器结构复杂、服役条件严苛(高温液态钠、放射性屏蔽要求、长期热循环载荷),其制造面临多项重大焊接技术挑战:开槽式管子/管板封口

焊、抗微动磨损迷宫密封表面耐磨层堆焊、管板-套筒装焊几何精度与尺寸变形控制、小径薄壁管全位置对接焊、大型多层薄壁奥氏体不锈钢低变形高效不锈钢焊接。以上核心焊接技术,尤其针对先进核电堆型热交换器特定结构的成熟工艺与质量控制体系,在国内尚属空白,严重制约了该关键设备的自主化制造进程。为此,本文系统性地针对该先进核电堆型热交换器的制造需求,重点阐述突破的相关核心焊接技术。

1 热交换器结构

该先进核电堆型热交换器包括以下主要零部件:下腔室组件(包括流量分配板)、管系组件(包括换热管、管系筒体、上/下管板等)、上部压力腔室组件、中心管组件、防护块组件、保护壳、上部三通套管、紧固法兰、螺栓、螺母和垫圈等,主体结构如图1所示。主体外形尺寸为 $\varnothing 2\,664\text{ mm}\times 17\,040\text{ mm}$,净重约106吨,换热管数量为5 850根。该设备为管壳式换热器,包括两个回路,其中壳程侧回路工作介质为放射性钠,设计温度 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$,设计压力 0.3 MPa ;管程侧回路工作介质为非放射性钠,设计温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$,设计压力 1.5 MPa 。

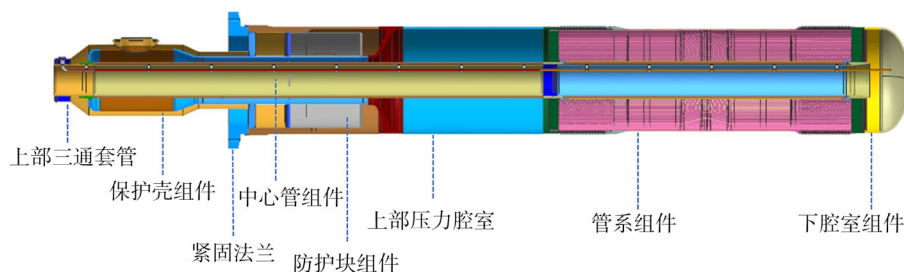


图1 先进核电堆型热交换器结构

Fig. 1 Structure diagram of advanced nuclear power reactor heat exchanger

2 主要材料

热交换器母材类型为锻件、管材、板材等,材质型号主要为SA-965M F316H、SA-240M 316H、SA-312M TP316H、SA-213 TP316H等,该设备运行在高温钠环境中,主体材料需要具有良好的耐高温性、抗钠腐蚀性和抗老化能力。为满足特殊运行工

况的要求,中国原子能科学研究院联合中国科学院金属研究所,开展该设备原材料的自主研发工作,研发结果表明,在ASME NH篇规定的高温用316不锈钢中C(0.04%~0.06%)和N(0.04%~0.07%)含量的要求上,对这两种元素含量要求进一步收窄,将C含量控制在范围的下限,即0.04%~0.05%,N含量控制在上限,即0.06%~0.07%,以获得耐腐蚀

性能更为优异的材料^[4]。同时为了探索 316H 钢在其服役工况下的老化行为,研究单位还开展了 316H 不锈钢在钠环境中的相容性试验^[5]。为满足研发材料的各项性能要求,产品的焊接工艺也均为全新研发。

根据产品材质、结构和焊接工艺特点,热交换器所用的焊接材料主要为耐高温不锈钢类焊材,特殊结构部位采用耐磨焊材,具体型号如表 1 所示。

表 1 主要焊接材料类型

Table 1 Main welding material types

类别	型号	规格
不锈钢埋弧焊丝焊剂	ER316H/FLUX	Ø4.0
不锈钢焊条	E316H	Ø3.2, Ø4.0
不锈钢焊丝	ER316H	Ø0.9, Ø2.0
耐磨焊条	EDCrNi-B-15	Ø4.0

3 热交换器关键焊接技术

3.1 不锈钢管子管板封口焊技术

热交换器换热管材质 SA-213M TP316H, 规格 $\Phi 16 \times 1.2$ mm, 管板材质 SA-965M Gr.F316H, 上、下管板分别采用开应力环槽式和不开环槽式的平齐封口焊结构形式, 焊喉尺寸平均值 ≥ 1.3 mm, 最小值 ≥ 1.2 mm, 接头结构如图 2 所示。若焊喉尺寸小于要求值, 焊缝有效承载面积不足, 在高温高压工况下极易开裂, 且焊缝的密封性无法得到保证, 易引发泄漏; 若焊喉尺寸过大, 焊缝余高可能影响设备的整体换热效率, 同时还会引发结构应力集中, 长期运行时易产生疲劳裂纹。因此, 焊喉尺寸过大或过小均会造成严重的质量问题, 导致设备无法正常交付。为了保证封口焊缝质量, 焊完后对焊缝进行 100%RT, 单个焊接接头氦检漏泄漏率不超过 1×10^{-9} Pa·m³/s (1×10^{-9} Pa·m³/s 约相当于标准状态下每年泄漏 0.001 mL 氦气, 或密封系统压力下降小于百万分之一/年)。

管子管板焊缝焊接的难点在于以下几点: 一, 管子壁厚较薄, 如果焊接过程中热输入控制不当将

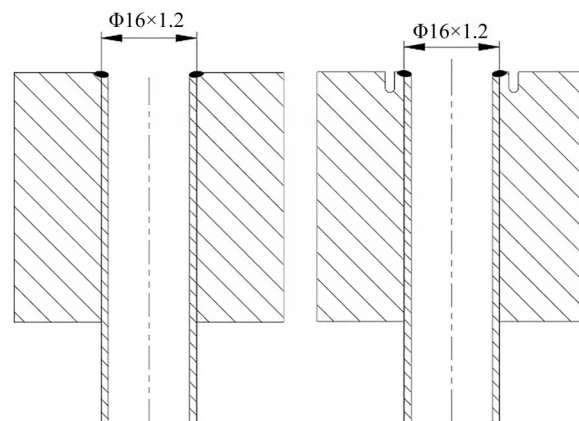


图 2 热交换器管接头焊接结构设计图

Fig. 2 Heat exchanger pipe joint welding structure design

使管子变形超标, 同时如果焊接过程中控制不当, 会使焊缝根部出现不连续缺陷, 继而无法满足后续使用要求^[6]。二、对于开应力环槽侧的管板, 环槽边缘距离换热管外壁距离仅为 1.625 mm, 管壁侧内凸尺寸要求 ≤ 0.8 mm, 平均焊喉要求 ≥ 1.3 mm, 靠近应力环槽侧焊缝尺寸控制范围为 0.325 mm, 靠近管子内壁侧焊缝尺寸控制范围为 0.68 mm, 在该范围内需保证封口焊缝成形、不熔塌环槽且控制内凸, 控制难度大。

为解决以上难题, 得到焊缝质量优异、成形良好的封口焊缝, 采取以下措施: 在进行封口焊前执行定位胀以减少间隙, 减少管子与管板间隙对焊接质量的影响^[7]; 采用不填丝脉冲自熔封口焊工艺, 焊接保护气体为 50%Ar+50%He 高纯混合气, 脉冲电流可以保证接头根部熔深^[8], 实现焊喉尺寸平均值 ≥ 1.3 mm, 具体焊接参数见表 2; 开发具备管孔视觉自动定位功能的十字操作架式自动焊接设备, 精确控制钨极对中位置和角度, 同时保证焊缝成形美观、环槽不塌陷, 以及改善换热管口内缩情况, 如图 3 所示。

3.2 迷宫密封耐磨堆焊层技术

迷宫密封结构作为典型的非接触式密封, 广泛应用于汽轮机、压缩机等流体机械中, 因其具有结构简单、工作可靠、无直接接触等优点, 适用于高

表 2 封口焊焊接参数

Table 2 Sealing weld welding parameters

峰值电流/A	峰值时间/ms	基值电流/A	基值时间/ms	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	钨极高度/mm	气体流量/(L·min ⁻¹)
66~80	75~85	26~31	295~305	70~110	1.4~1.8	7~20

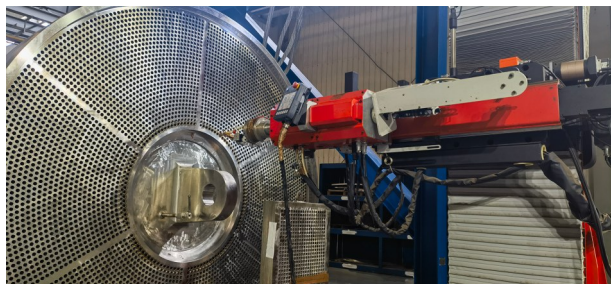


图3 自动封口焊

Fig. 3 Automatic sealing welding

温、高压、高流速等复杂应用场景^[9]。先进核电堆型热交换器的二次侧腔室采用的就是迷宫密封结构,该结构可以保证绝大多数换热介质流进换热管进行热量交换,防止短流现象的发生,是保证机组热功率的基础。同时,密封结构的可靠性又高度依赖环隙大小、密封齿数、密封槽尺寸。设备运行时,在高温作用下,中心层与外层之间将会产生剧烈、反复的轴向窜动,这就要求密封区域内的材料应有极高的硬度,以保证密封有效性,覆盖在迷宫密封结构表面的耐磨堆焊层起到了至关重要的作用。

迷宫密封组件材质为SA-965M Gr.F316H,耐磨层堆焊材质为EDCrNi-B-15,采用焊条电弧焊在环形锻件外表面进行整圈堆焊,焊后需加工齿槽,如图4所示。该焊材具有高硬度、韧性差、冷裂倾向大的特点,其本身焊接工艺性较差,裂纹敏感性高,对焊接工艺参数、温度控制的要求极为苛刻^[10]。堆焊后加工齿槽时,由于车削工艺的震动,硬度过高的堆焊层会产生崩碎和开裂,因此需要严格控制堆焊层的硬度,同时保证结构的密封有效性和加工后堆焊层的质量。

制造工艺流程为堆焊1层E316H以及2层



图4 迷宫密封焊接和加工

Fig. 4 Labyrinth seal welding and machining

EDCrNi-B-15,采用偏低的焊接电流、偏高的搭接量、偏快的焊接速度,三者有机结合的焊接工艺,具体焊接参数见表3,整个焊接过程连续堆焊,利用焊层间回火作用降低堆焊层硬度^[11]。

表3 耐磨层堆焊参数

Table 3 Wear-resistant layer overlay welding parameters

焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	搭接量/%
100~130	22~28	15~25	50~60

焊接过程中温度的控制也是减少裂纹产生的重要因素,为了实现耐磨层堆焊过程中温度精准控制,设计专用电加热工装对工件进行加热,实现加热器固定,产品周向匀速旋转,提升工件整体温度均匀性,确保焊缝圆周各个测温区域温差目标值 $\leq 20^\circ\text{C}$ 。通过提高预热温度区间,焊后后热缓冷控制,以减少温差过大引起耐磨层产生裂纹的影响。

3.3 管板与连接套筒装焊技术

热交换器为双管板结构,上、下管板在管孔加工完成后进行对中装配,并通过管板连接套筒连接为整体,如图5所示。上管板、下管板与管板连接套筒焊接环缝时,需要保证5 850个管孔的同轴度在 $\varnothing 1\text{ mm}$ 以内,然而管板组件长近7 m,双管板与套管过渡段焊接量大,每一层焊接变形量影响对中同轴度变化最大可达到5 mm,变形难以控制。



图5 管板与连接套筒装焊

Fig. 5 Assembly and welding of tubesheet and connecting sleeve

为满足装焊后上/下管板之间的跨度距离,保证后续穿管、封口焊等操作的精度要求,管板与套管过渡段焊接接头设计了锁扣式带垫板坡口结构,如图6所示。

焊接时采用双人同时对称施焊,避免焊接过程

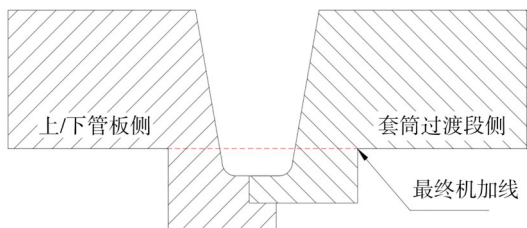


图6 管板侧与套筒过渡段侧坡口结构设计图

Fig. 6 Pipe plate side and sleeve transition section side groove structure design drawing

产生扭转,并在装配点焊后、手工氩弧焊打底焊接完成后、焊条电弧焊 1/2 厚度以及最终焊接完成使用激光跟踪仪进行测量^[12],即在一侧管板的管孔上安装激光发射器及固定工装,在另一侧管板对应的管孔上安装激光接收器,在管板管孔周向上均布若干激光对中装置,并将激光接收器的接受数值调整至与激光跟踪仪的测量结果一致,监测方案布置如图 7 所示。在整个焊接过程中,根据激光对中装置的数据变化情况实时调整焊接顺序,确保焊接变形量不超差,以及上/下管板管孔的对中同轴度。同时,采用高精度倾角传感器对管孔的轴向倾角进行实时监控,并设定报警值,若变形数值超出预设要求,则触发报警提醒,整个过程根据监测结果及时调整焊接顺序和焊接变形方向^[12]。

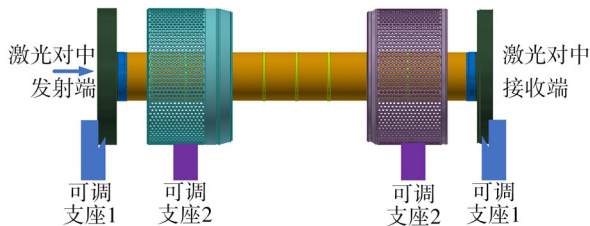


图7 管板对中监测方案

Fig. 7 Schematic diagram of the monitoring scheme for tube plate centering

3.4 管板与不锈钢小直径管对接技术

热交换器有大量不锈钢小管($\varnothing 14 \times 2$ mm)对接焊结构,焊接完成后,需进行通球试验和射线探伤,由于管子尺寸较小且壁厚薄,通常存在焊接过程熔池控制难度大、焊缝强度难满足设计要求、焊后通径不满足要求等问题^[13-14],对焊工技能要求极高。

为了降低焊接过程中焊工的技能操作难度,同时保证通球尺寸检验以及其他无损检验,在保证设计强度的基础上设计了反面扩径的坡口结构,如图

8 所示。该种对接焊缝坡口在内侧削边,对接焊时,焊缝根部熔池在表面张力的作用下,可以抑制熔池向内凸起,从而控制焊缝内凸尺寸,焊后保证 $\varnothing 8.5$ mm 的金属球顺利通过;同时,通过调整装配间隙,保证焊缝全焊透,以获得足够的强度和韧性,提高焊接接头的整体性能。最终实现了 4 套热交换器,60 条小直径管对接缝最终检验一次合格。

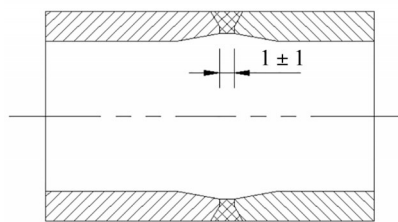


图8 小直径管对接坡口结构设计图

Fig. 8 Small diameter pipe butt groove structure design drawing

3.5 不锈钢壳体焊接技术

热交换器各零件筒体壁厚范围为 10~40 mm,根据不同部件的板材厚度、筒体的尺寸,坡口结构设计主要为单面 V 形坡口,采用手工氩弧焊、焊条电弧焊、自动埋弧焊三种焊接方法进行焊接。然而产品中存在多层套管结构的焊缝(如中心管组件、总装最终环缝等),焊接难度大,变形控制要求高,返修困难,因此,针对此类环缝,结合产品结构特点、套装顺序要求等,设计带垫板坡口结构,以保证焊缝质量。

中心管组件为多层套管的细长结构,套装后的最终环缝为外套管 1 和中间外套管对接焊缝,该处焊缝与内层管间隙十分狭小,仅为 19 mm。为保证中心下降管外套管组件与中心下降管组件的能够顺利装焊,提升焊缝质量,降低焊缝返修的质量风险,避免异物掉落在套管层中,设计带焊接垫板的坡口结构,采用手工氩弧焊和焊条电弧焊进行焊接,如图 9 所示。

根据制造工艺顺序流程,为保证中心管组件的顺利套装,需在中心管组件与管系组件套装后再进行上部压力腔室组件的装焊,此时产品已进入最终组装阶段,腔室封闭空间里的焊缝根部区域已经无法接触到,背部气体保护难度大,且焊缝根部产生缺陷需要挖补时,若采用原单 V 形坡口设计,打磨至焊缝根部的金属碎屑等异物会掉落至腔室内,人

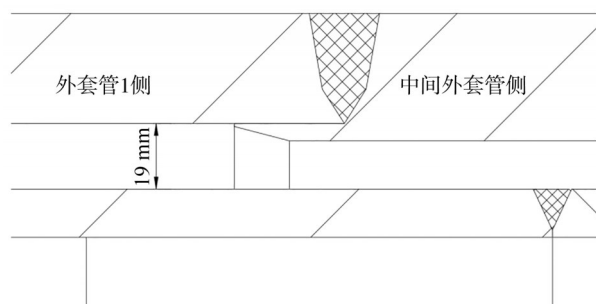


图9 外套管1和中间外套管对接坡口结构设计图

Fig. 9 Outer casing 1 and middle outer casing joint groove structure design drawing

员无法进入内部进行清理,为了降低焊缝返修的质量风险,设计带焊接衬环的坡口结构,采用手工氩弧焊和焊条电弧焊进行焊接,如图10所示。

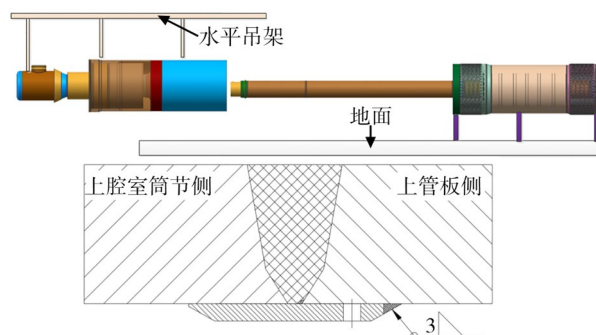


图10 上部压力腔室组件与管系组件装焊及坡口设计图

Fig. 10 Upper pressure chamber assembly and piping assembly welding and groove structure design drawing

4 结论

本研究围绕先进核电堆型热交换器的核心焊接技术展开系统攻关,取得了一系列具有理论和实践价值的突破性成果,主要结论总结如下:

(1)在全面吸收实验堆型热交换器技术的基础上,成功实现自主设计与制造能力突破,系统性解决了开槽式管子/管板封口焊焊接工艺、迷宫密封耐磨层堆焊工艺、管板-套筒装焊几何精度与尺寸变形控制措施、小径薄壁管全位置对接焊工艺、大型多层薄壁奥氏体不锈钢低变形高效不锈钢焊接工艺这5项关键技术难题,形成适配先进核电堆型热交换器需求的成套焊接工艺体系。

(2)经工程实际应用验证,文中提及的5项关键核心焊接技术可有效保障焊接质量,满足核级设备

严苛工况要求。

(3)研究成果为一体化堆型制造提供标准化焊接工艺方案,更为后续商用堆型批量化生产及核能技术迭代奠定工艺基础,对实现核电装备自主化具有重要战略意义。

参考文献:

- [1] 范珊珊.核电新浪潮[J].能源,2024,(02):10-17.
- [2] 龙伟民,井培尧,秦建.极端条件下焊接技术的研究进展[J].电焊机,2023,53(4):1-13.
LONG W M, JING P Y, QIN J. Research Progress of Welding Technology Under Extreme Conditions [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(4): 1-13.
- [3] 宋广懂,姜林,邱斌斌,等.中间热交换器二次侧流量分配及阻力特性试验研究[J].核动力工程,2024,45(1):55-59.
SONG G D, JIANG L, QIU B B, et al. Study on Flow Distribution and Resistance Characteristics of Secondary Side of Intermediate Heat Exchanger [J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(1): 55-59.
- [4] 宋广懂,李鑫,刘萌萌,等.C/N含量对钠冷快堆热交换器用316H奥氏体不锈钢组织和性能影响[J].钢铁钒钛,2023,44(1):135-141.
SONG G D, LI X, LIU M M, et al. Effect of C and N content on the microstructure and performance of 316H austenitic stainless steel used in sodium-cooled fast reactor heat exchanger [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(1): 135-141.
- [5] 纪琰,张金权,阮章顺,等.示范快堆中间热交换器材料316H钢钠中老化行为研究[J].科技资讯,2024,22(2):117-120.
JI Z, ZHANG J Q, RUAN Z S, et al. Research on the Aging Behavior of 316H Steel Sodium for Intermediate Heat Exchangers of Demonstration Fast Reactors in Sodium [J]. Science & Technology Information, 2024, 22(2): 117-120.
- [6] 杨二娟,李勇,米紫昊,等.蒸汽发生器焊接堵管残余应力数值模拟及寿命预测[J].电焊机,2023,53(5):12-20.
YANG E J, LI Y, MI Z H, et al. Numerical Simulation of Residual Stress and Life Prediction of Welding Blocked Pipes of Reactor Steam Generator [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(5): 12-20.
- [7] 王苗苗,岳娟,池乐忠,等.非能动余热排出热交换器的关键焊接技术[J].电焊机,2023,53(10):71-77.

- WANG M M, YUE J, CHI L Z, et al. Welding for Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(10): 71-77.
- [8] 唐俐. 换热器管子管板封口焊试验及应用[J]. 压力容器, 2006(3): 32-34.
- TANG L. Test and Application of Tube-Tube Sheet Welding for Heat Exchangers[J]. Pressure Vessel Technology, 2006(3): 32-34.
- [9] 肖芳, 王亚洲, 刁安娜, 等. 基于 FLUENT 技术迷宫密封的结构优化[J]. 流体机械, 2013, 41(09): 29-32.
- XIAO F, WANG Y Z, DIAO A N, et al. Structural Optimization Design of Labyrinth Seal Based on Software FLUENT[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(9): 29-32.
- [10] 吴进奎. D547Mo 焊条在深孔堆焊中裂纹的控制[J]. 金属加工(热加工), 2010(24): 51-53.
- [11] 東方電氣(広州)重型機器有限公司. Wear-resistant overlay welding method for annular high-temperature resistant stainless steel and intermediate heat exchanger manufactured by that method: JP20230139504[P]. 2024-01-05.
- [12] 邹杰, 何冰, 江国焱, 等. 冷却剂泵壳与蒸汽发生器焊接过程数值模拟[J]. 压力容器, 2018, 35(10): 37-43.
- ZOU J, HE B, JIANG G Y, et al. Numerical Simulation Analysis of the Welding Process of Primary Coolant Pump Casing and Steam Generator[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(10): 37-43.
- [13] 丁海城, 肖毅, 邓俊. 不锈钢(316L)小管的 TIG 焊接技术[J]. 中国科技信息, 2012(11): 127.
- [14] 苗俊安. 超级奥氏体不锈钢薄壁管全自动焊接工艺[J]. 焊接技术, 2024, 53(11): 84-87.
- MIAO J A. Fully automatic welding process for super austenitic stainless steel tubes with thin walled [J]. Welding Technology, 2024, 53(11): 84-87.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 29 页

- 成形 316L 不锈钢微观形貌和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(8): 15-19.
- ZNG X W, ZHANG J, LU B C, et al. Effect of Scanning Speed on Micromorphology and Properties of 316L Stainless Steel Formed by Selective Laser Melting [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2021, 45(8): 15-19.
- [26] 姜夕义, 夏维龙, 娄殿军, 等. 扫描速度对选区激光熔化 Ti-6Al-4V 合金内部缺陷和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(11): 41-45.
- JIANG X Y, XIA W L, LOU D J, et al. Effect of Scanning Speed on Internal Defects and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2020, 44(11): 41-45.
- [27] Mahtabi M B, Yadollahi A, Stokes R, et al. Effects of Process Interruption During Laser Powder Bed Fusion on Microstructural and Mechanical Properties of Fabricated Parts[C]//Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference, 2022: 592-602.
- [28] Hyer H C, Petrie C M. Effect of Powder Layer Thickness on the Microstructural Development of Additively Manufactured SS316[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 666-674.
- [29] Sehha M H, Sutton A T, Yates Z, et al. Effects of Recoating Velocity and Layer Thickness on the Powder-Bed Surface Roughness in the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Process [C]//Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>