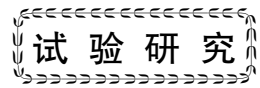


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.09.003



核电异种钢内坡口镍基焊缝全位置 对接焊技术研究

王鹏春, 吴 琼, 黄正凤

(一重集团 大连核电石化有限公司, 辽宁大连 116113)

摘 要: 为了解决核电异种钢管类焊接接头由于结构尺寸限制而无法从接管外壁进行焊接的技术难题以及提高该结构焊缝质量及焊接效率, 在基于多年核电一回路核主设备焊接制造工艺的基础上, 进行了材料、焊接设备、坡口形状尺寸、焊接位置等的合理选择并开展相关工艺试验及焊接工艺评定、产品模拟件焊接验证等工作。最终实现了从管内壁进行镍基焊缝全位置对接焊, 并且按照 NB/T 20002.3—2013《核电厂核岛机械设备无损检测》标准及技术条件进行了相关焊接工艺评定试验, 结果均满足指标要求。该技术在产品制造中进行了成功应用, 将焊接制造周期缩短为横焊位焊接周期的 $1/n$ (n 为焊缝数量), 焊缝一次性无损探伤合格率达 96.9%, 实现了提质增效的目的。

关键词: 核电; 全位置; 内坡口; 焊接; 异种钢接头

中图分类号: TH49; TG115.6 **文献标志码:** A

Research on all-position butt welding technology for internal groove nickel base welds of dissimilar steels for nuclear power application

WANG Pengchun, WU Qiong, HUANG Zhengfeng

(CFHI Dalian Nuclear Power Petrochemical Co., Ltd., Dalian 116113, China)

Abstract: In order to solve the technical problem that the welded joint of dissimilar steel nozzle for nuclear power plant cannot be normally welded from the outer wall of the nozzle due to the structural size limitation, and to improve the weld quality and welding efficiency of the structure, based on the welding manufacturing process of the main equipment of the primary nuclear power plant for many years, our company has carried out reasonable selection of materials, welding equipment, groove shape and size, welding position, etc., and carried out related process tests and welding procedure evaluation, and welding verification of product simulation parts. Finally, the all-position butt welding of the nickel base weld was realized from the inner wall of the pipe, and the related welding procedure evaluation was carried out in accordance with the requirements of NB/T 20002.3—2013 standard *Non-destructive testing for mechanical components in nuclear island of nuclear power plants* and technical conditions, and the test results met the index requirements. This technology has been successfully applied in product manufacturing, shortening the welding manufacturing cycle to $1/n$ of the transverse welding cycle (where n is the number of welds), and achieving a one-time non-destructive testing qualification rate of 96.9% for welds, thus achieving the goal of improving quality and efficiency.

Key words: nuclear power; all-position; inner groove; welding; dissimilar steel joints

0 引言

近年来,随着“碳达峰”和“碳中和”战略目标的推进,核电作为一种无碳能源技术在能源结构中的占比进一步提高^[1]。我国核电具有自主知识产权的“华龙一号”、“国和一号”相继问世,尤其是近期“玲龙一号”的诞生开启了小型堆的序幕,将核电技术发展推向了新的高潮。随着核电堆型不断紧凑型、小型化、模块化的发展需求,出现了一些比较难以焊接的结构,例如背部带障碍物的低合金钢镍基的异种钢焊接接头,这种镍基焊缝受材料、结构、焊接位置、数量等因素的制约,导致焊接制造周期长且焊缝质量合格率低等问题的发生,若按照传统工艺技术焊接已经不能满足短周期制造的要求。本文基于此结构进行专用的内坡口全位置异种接头镍基焊缝对接焊技术研究,旨在实现通过全位置多工位同时焊接的方式来提高产品制造效率,同时也可减少平焊位、横焊位变位工装设计制造成本,优化焊缝制造工艺^[2-3]。

1 焊接性分析

1.1 材料因素

16MND5 钢属于低合金高强钢,焊接过程中容易产生 H 富集导致的冷裂纹、C、S、P、Si 含量过大导致的热裂纹、厚度较大引起的层状撕裂等焊接缺陷。690 镍基合金容易在焊接过程中产生热裂纹和气孔,还存在由于材料物理熔点、导热系数、线膨胀系数、密度、热容量等因素对该异种钢接头焊接产生不良影响的情况^[4]。

1.2 结构因素

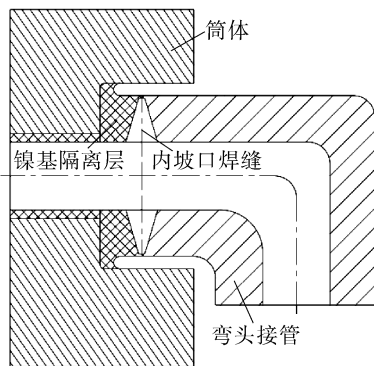


图1 背部不可达焊接接头示意

Fig.1 Schematic diagram of inaccessible welding joints on the back

核电反应堆压力容器接管背部带障碍管或者障碍物的异种钢焊接接头结构如图1所示。由于结构尺寸限制从接管外壁焊接不可达,故只能从接管内壁进行焊接。焊接该接管时,由于背部不可达且不易观察,无法进行焊后背部清根,给焊接带来了极大困难。

2 焊接工艺性试验

2.1 坡口设计

结合核反应堆压力容器制造经验,综合考虑母材及焊缝材料、结构等因素,拟选用钝边2 mm的U形坡口,坡口的面角度及坡宽有助于调整熔池形态及焊缝成形,保证侧壁熔合良好^[5],满足首道单面焊双面成型要求(若背部可清根,可选择插接坡口),除此之外考虑焊枪可达性,不宜采用窄间隙坡口,工艺试验坡口如图2所示。

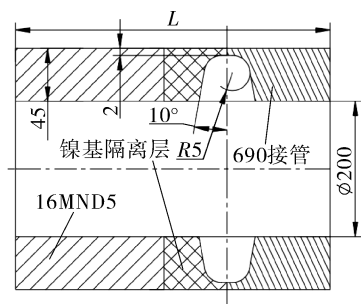


图2 工艺试验接头结构尺寸

Fig.2 Structural dimensions of process test joints

2.2 焊接位置

结合产品需求,在该坡口只能选择横焊位和全位置,为了便于产品焊接多工位同时作业的需求,工艺试验选用全位置焊接。焊接过程包含了平焊、上坡焊、下坡焊、仰焊情况,由于熔池金属和熔滴在重力等影响下,焊缝成形及质量存在差异,焊接变形控制较为困难,故焊接难度大^[6]。

2.3 试验材料

试验件母材分别选取核电常用的16MND5低合金钢试管+镍基隔离层和690镍基合金试管,结构尺寸如图2所示。考虑异种接头焊接性及腐蚀问题,焊缝及隔离层焊材均选用核电常用的抗热裂纹性较好的 $\phi 0.9$ mm的ERNiCrFe-7A镍基焊丝,牌号为INCONEL Filler Metal 52M,其化

学成分如表 1 所示。母材力学性能及化学成分如 表 2 和表 3 所示。

表 1 INCONEL Filler Metal 52M 镍基焊丝化学成分

Tab. 1 Chemical composition of INCONEL Filler Metal 52M nickel based welding wire										%
元素	C	Si	Mn	P	S	Fe	Cu	Ni	Co	
含量	0.036	0.12	0.89	<0.005	<0.002	8.88	<0.01	余量	<0.01	
元素	Al	Ti	Cr	Nb + Ta	Mo	B	N	Zr	其他	
含量	0.11	0.27	29.73	0.94	0.39	0.000 7	0.010 7	<0.01	<0.50	

表 2 16MND5 主要力学性能

Tab. 2 Main mechanical properties of 16MND5

项目	室温			350 ℃			0 ℃	- 20 ℃	20 ℃
	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A (%)	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A (%)	KV_2 /J		
数值	432	616	25.0	402	552	24.0	220,242,230	191,196,193	211,222,210

表 3 16MND5 化学成分

Tab. 3 Chemical composition of 16MND5

Tab. 3 Chemical composition of 16MND5													%
主要元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Co	Al	Cr	V	Mo	
含量	0.21	0.17	1.50	<0.005	0.002 0	0.04	0.73	0.006	0.019	0.11	<0.002	0.48	

2.4 试验设备

试验焊接电源型号选用的是 POLYSOUDE 600PC-3 电源。钨极气体保护焊 (GTAW) 因具有焊接过程中电弧稳定性好、焊缝质量优良、对材料和焊接位置普遍适用性、焊接过程可控、易于实现数字化和智能化等优点而被广泛应用于核岛主设备的焊接制造^[7],由于内坡口焊接要求及结构尺寸限制,不能选用常规的轨道小车设备,故选择

了 POLYSOUDE 悬臂梁结构形式的全位置机械 GTAW 无限回转结构的新焊接机头,为了便于控制焊接过程,配备了观察熔池焊缝成形的高速摄像头及数据采集系统。

2.5 试验过程

2.5.1 工艺参数开发

试验件试验过程尽可能模拟产品焊接制造工序,工艺路线如图 3 所示。

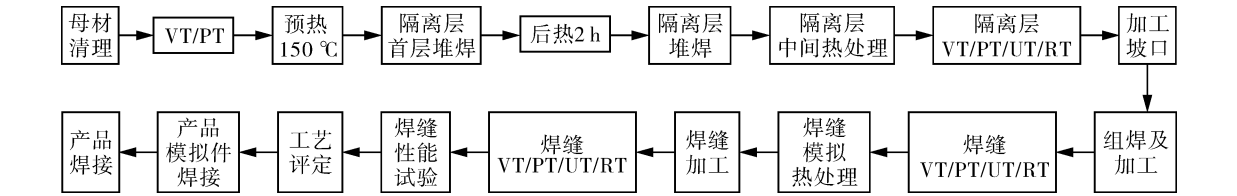


图 3 试验主要工序

Fig. 3 Main process of the test

采用正交试验进行工艺参数的筛选确定,主要考虑焊缝成形、侧壁熔合、无目视可见焊接缺陷、控制焊接顺序、焊道排布等因素,并进行了焊接分区及不分区工艺参数试验对比,最终依据无损探伤检验和理化性能试验确定出试验适用参数,如表 4 所示。对坡口形状尺寸进行验

证,为了解决背部烧穿的问题,将钝边增加到 2.5 mm,同时背部采用氩气保护能实现单面焊双面成型。由于不便观察内坡口,采用高速摄像头监控熔池动态情况,以保证焊缝质量^[8],并且可以清楚地观察到熔池及送丝、焊缝的成形情况,如图 4 所示。

表 4 主要焊接工艺参数
Tab. 4 Main welding process parameters

层数	焊接方法	电流极性	电流范围	电压/V	焊接速度/ (mm · min ⁻¹)	保护气体	气体流量/ (L · min ⁻¹)
前 3 层	GTAW	DC/SP	基值:60 ~ 90 A 峰值:90 ~ 110 A 占空比:50% 脉冲频率:2 ~ 4 Hz	8 ~ 10	100 ~ 130	99.999% 氩气	10 ~ 50
其余层	GTAW	DC/SP	基值:120 ~ 180 A 峰值:170 ~ 250 A 占空比:50% 脉冲频率:2 ~ 4 Hz	8 ~ 14	90 ~ 150	99.999% 氩气	10 ~ 50

注:钨极直径:Ø4 mm/Ø3.2 mm,该管径焊接参数分区与不分区对焊缝成形等影响的差别不大。

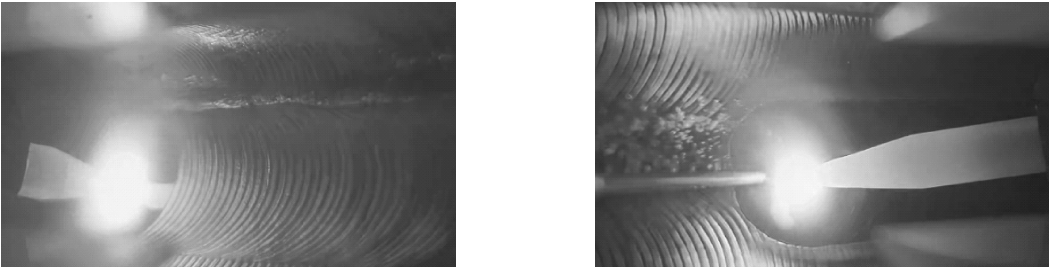


图 4 熔池视频监控画面
Fig. 4 Video monitoring screen of molten pool

2.5.2 工艺过程控制

在清洁、干燥、无对流风的环境中进行焊接,由具有多年核电产品焊接经验且有相应焊工资质的焊接操作者施焊。焊接前,对母材、焊丝等进行严格清理,焊接过程中及时热态进行每道清理、每层打磨,避免清洁不当造成的热裂纹及气孔等缺陷^[9-10]。焊接过程中控制其低热输入及层间温度 < 100 ℃,保证焊缝力学性能及耐腐蚀性能,避免热裂纹产生^[11-12]。通过高清摄像头 + 焊帽观察的模式,对熔池、电弧、送丝、成形、排道及熔合情况、钨极、焊接参数等做出及时调整,并对有问题的焊道及时打磨、经 PT 合格后继续焊接^[13-14],保证每道焊缝无目视缺陷。

3 焊接工艺评定

试验件按照 NB/T 20003—2010《核电厂核岛机械设备无损检测》的要求进行 100% VT, PT, UT, RT 无损探伤,探伤结果全部合格。按照 NB/T 20002.3—2013《压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范》及相关技术条件要求进行焊接工艺评定试验,评定过程中材料及工件尺

寸、坡口形式及尺寸、焊接参数及过程控制、工序流程等与工艺试验过程相同,其力学性能试验结果如表 5 所示。可以看出各项结果满足要求,其中强度略高于母材,弯曲试样存在不超标微裂纹。按照 GB/T 13298—2015《金相显微组织检验方法》进行接头金相组织检验,如图 5 所示,在 200 倍显微镜下发现焊接接头不存在微裂纹和影响接头性能的沉淀物。在低合金钢热影响区,没有显微裂纹,也没有淬火形成的异常组织。低合金钢母材组织为回火索氏体,镍基母材为奥氏体,镍基焊缝及隔离层为奥氏体,热影响区分别为回火索氏体 + 铁素体和奥氏体。10 倍显微镜下观察,无裂纹、未焊透等缺陷。按照 GB/T 15260—2016《镍基合金晶间腐蚀试验方法》进行焊缝晶间腐蚀试验发现焊缝金属热处理态、热处理 + 敏化态均无晶间腐蚀或开裂倾向。按照 GB/T 223《钢铁及合金化学分析方法》进行焊缝化学分析结果如表 6 所示。按照 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》在接头 T/2 厚度处测量硬度试验结果如表 7 所示。

表 5 焊接接头力学性能检测结果

Tab. 5 Mechanical property testing results of welded joints

试验项目	试验方法	试验温度	验收指标	实测值	判定结果
熔敷金属 拉伸试验	GB/T 2652—2008 《焊缝及熔敷金属 拉伸试验方法》	室温	$R_m = 520 \sim 750 \text{ MPa}$	表层:699,661 MPa 根部:671,665 MPa	合格
			$R_{p0.2} \geq 250 \text{ MPa}$	表层:493,447 MPa 根部:466,451 MPa	合格
			$A \geq 25\%$	表层:31.2,35.2 MPa 根部:36.9,38.6 MPa	合格
	GB/T 228.2—2015 《金属材料拉伸 试验》	350 ℃	R_m 提供数据 $R_{p0.2} \geq 200 \text{ MPa}$	表层:515,515 MPa 根部:506,523 MPa 表层:345,350 MPa 根部:361,380 MPa	— 合格
焊接接头 拉伸试验	GB/T 2651—2008 《焊接接头拉伸 试验方法》	室温	$R_m = 520 \sim 670 \text{ MPa}$	647,653 MPa	合格
			$R_{p0.2}$ 未要求	431,417 MPa	合格
		350 ℃	R_m 提供数据	表层:461,442 MPa 根部:455,457 MPa	合格
冲击 试验	GB/T 2650—2008 《焊接接头冲击 试验方法》	室温	平均值 $\geq 70 \text{ J}$, 单个最小值 $\geq 52 \text{ J}$	表层:148,145,177 J 根部:121,126,117 J	合格
		室温	平均值 $\geq 70 \text{ J}$, 单个最小值 $\geq 52 \text{ J}$	表层:200,191,200 J 根部:201,192,194 J	合格
		-20 ℃	平均值 $\geq 50 \text{ J}$, 单个最小值 $\geq 38 \text{ J}$	表层:70,58,63 J 根部:71,64,67 J	合格
		-20 ℃	平均值 $\geq 50 \text{ J}$, 单个最小值 $\geq 38 \text{ J}$	表层:148,188,168 J 根部:237,181,165 J	合格
弯曲 试验	横向面弯	室温		2 件试样无缺陷	合格
	横向背弯	室温	长度在 0.4 mm 以上的 裂纹数量不允许超过 3 个,当裂纹、气孔和 夹杂物长度不允许 超过 2 mm	1 件裂焊缝: 0.64 mm×0.04 mm, 1 件裂焊缝: 0.67 mm×0.05 mm	合格
	侧弯	室温		2 件试样无缺陷, 1 件裂焊缝: 0.58 mm×0.14 mm	合格

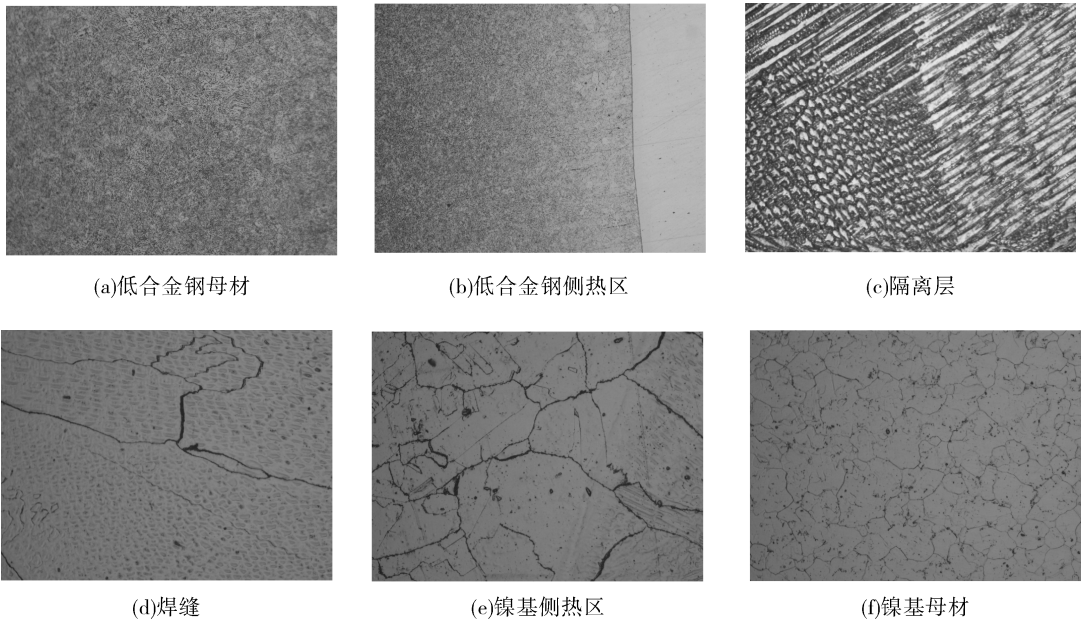


图 5 异种钢镍基对接焊缝母材、隔离层、焊缝、热区微观组织形貌

Fig. 5 Microstructural morphology of dissimilar steel nickel based butt weld base material, isolation layer, weld seam, and hot zone

表 6 焊缝化学分析结果

Tab. 6 Chemical analysis results of welds %

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Cu
含量	0.030	0.13	0.90	0.005	<0.002	余量	30.14	9.028	<0.01
元素	Co	Mo	Zr	N	Al	Ti	B	Nb + Ta	其他
含量	<0.01	0.39	<0.01	0.008 2	0.11	0.26	<0.000 5	0.95	≤0.50

表 7 焊缝硬度测量结果

Tab. 7 Weld hardness measurement results

测量位置	镍基侧母材	焊缝	隔离层	低合金钢侧母材	镍基侧热区	低合金钢侧热区
测量结果 (HV10)	170,171,170, 176,174	201,196,206, 210,217	191,197,192, 201,203	203,188,189, 195,191	211,208,207, 220,216	222,214,209, 238,230

4 产品应用

经过工艺试验及焊接工艺评定确定内坡口异种接头镍基焊缝对接焊工艺,再次在与产品结构 1:1 的模拟件上进行焊接及无损探伤验证合格后,应用在了某反应堆压力容器类似结构焊缝的焊接制造中,且产品焊缝质量可靠,对应焊缝焊接见证件解剖性能试验结果满足要求。另外,实现了多工位全位置焊接作业,将产品的制造效率变为横焊位的 1/*n*(*n* 为焊缝数量)且减少了横焊位变位工装的设计,极大地提高了产品制造效率。

5 结语

(1) 通过对产品焊接接头进行材料和工艺性能的分析,制定了合理可行的工艺试验,经最终焊接工艺评定,其无损检验结果,性能试验、化学分析、金相、腐蚀、硬度结果满足标准及技术规范要求,验证了异种钢内坡口镍基焊缝全位置对接焊工艺的可行性;并且验证了该接头坡口形状及尺寸设计的合理性,可满足内坡口全位置组焊的需求。

(2) 借助高清摄像头及多台焊接设备全位置同时协同焊接的方式,提高了该复杂结构的异种钢接头的焊接质量及效率,保证了产品的制造周期,该研究成果可在核反应堆压力容器、蒸汽发生器和稳压器等设备类似结构的焊接中进行应用。

参考文献:

[1] 李萍,杨红义,刘琳,等. “碳中和”目标下中国核电发展[J]. 节能技术,2023,41(1):10-15.
LI Ping,YANG Hongyi,LIU Lin,et al. Development of nuclear power in China under carbon neutrality target[J]. Energy Conservation Technology,2023,41(1):10-15.
[2] 刘万存,袁亮文,赵佳. 全位置不锈钢内壁堆焊技术

研究[J]. 压力容器,2022,39(4):25-32.
LIU Wangcun,YUAN Liangwen,ZHAO Jia. Study on surfacing technology of all-position stainless steel inner wall [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(4): 25-32.
[3] 刘万存,袁亮文,肖鹏,等. 全位置镍基内壁与端面一体化增材堆焊技术[J]. 压力容器,2022,39(6):21-27.
LIU Wancun,YUAN Liangwen,XIAO Peng,et al. All-position nickel-based inner wall and end face integrated additive surfacing technology [J]. Pressure Vessel Technology,2022,39(6):21-27.
[4] 王苗苗. 核岛主设备安全端焊接工艺应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
WANG Miaomiao. Research on the application of safety end welding process for nuclear island main equipment [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2017.
[5] 黎振龙,邹杰,池乐忠,等. 非能动先进压水堆核岛主设备安全端全位置缝异种金属自动环焊接工艺研发[J]. 广东化工,2016,43(11):208-210.
LI Zhenlong,ZOU Jie,CHI Lezhong,et al. The all-position automatic welding technology development for safe-end to main equipment of passive advanced pressurized water reactor [J]. Guangdong Chemical Industry,2016,43(11):208-210.
[6] 吴林,殷树言,刘金合. 焊接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
WU Lin,YIN Shuyan,LIU Jinhe. Welding manual [M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2001.
[7] 张忠海. 热丝 TIG 焊在核电设备制造中的应用[J]. 一重技术,2021(1):49-52.
ZHANG Zhonghai. Application of hot wire TIG welding technique in manufacture of nuclear power equipment [J]. CFHI Technology,2021(1):49-52.
[8] 罗英,郑浩,邱天,等. 核级主设备焊接技术探讨及

- 展望[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 194 – 201.
- LUO Ying, ZHENG Hao, QIU Tian, et al. Discussion and prospect of welding technology for nuclear grade main equipment[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 194 – 201.
- [9] 余磊, 曹睿. 镍基合金焊接裂纹研究现状[J]. 金属学报, 2021, 57(1): 16 – 28.
- YU Lei, CAO Rui. Welding crack of Ni-based alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(1): 16 – 28.
- [10] 胡义良, 杨晓成. 镍合金的窄间隙焊接工艺[J]. 电焊机, 2008, 38(3): 65 – 66.
- HU Yiliang, YANG Xiaocheng. Process of narrow-gap welding of nickel-based alloy[J]. Electric welding machine, 2008, 38(3): 65 – 66.
- [11] 李杨, 吴琼, 王向余. 核电堆芯补水水箱镍基隔离层堆焊工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2023(4): 29 – 32.
- LI Yang, WU Qiong, WANG Xiangyu. Research on surfacing process of nickel-based isolation layer of nuclear power core makeup tank[J]. Heavy Casting and Forging, 2023(4): 29 – 32.
- [12] 胡丹, 高向东, 张南峰, 等. 焊缝缺陷检测现状与展望综述[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 736 – 742.
- HU Dan, GAO Xiangdong, ZHANG Nanfeng, et al. Review of status and prospect of weld defect detection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(7): 736 – 742.
- [13] 吴树雄, 尹士科, 路勇超. 镍基耐蚀合金及其焊接特性概述[J]. 焊接技术, 2019, 48(7): 1 – 6.
- WU Shuxiong, YIN Shike, LU Yongchao. Nickel-based corrosion-resistant alloy and its welding characteristics[J]. Welding Technology, 2019, 48(7): 1 – 6.
- [14] 刘全印. 核电站稳压器设备安全端焊接技术[J]. 压力容器, 2009, 26(6): 34 – 37.
- LIU Quanyin. Welding technology for safety end of pressurizer for nuclear power plant[J]. Pressure Vessel Technology, 2009, 26(6): 34 – 37.

作者简介:王鹏春(1988), 男, 工程师, 研究方向为表面工程技术, 主要从事核电焊接工艺方面的工作, 通信地址: 116600 辽宁省大连市开发区马桥子街道怡海社区万国宫馆三期 15 号楼, E-mail: 1005954032@qq.com。

本文引用格式:

- 王鹏春, 吴琼, 黄正凤. 核电异种钢内坡口镍基焊缝全位置对接焊技术研究[J]. 压力容器, 2023, 40(9): 16 – 22.
- WANG Pengchun, WU Qiong, HUANG Zhengfeng. Research on all-position butt welding technology for internal groove nickel base welds of dissimilar steels for nuclear power application[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(9): 16 – 22.

(上接第 15 页)

- [17] 毕宗岳. 管线钢管焊接技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- BI Zongyue. Pipeline steel pipe welding technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [18] 陆武慧. 基于 MATLAB 的包装箱盖章机构仿真分析及优化设计[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(4): 96 – 100.
- LU Wuhui. Simulation analysis and optimization design of automatic stamping mechanism based on MATLAB[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(4): 96 – 100.
- [19] 杨辉, 王富祥, 戴联双, 等. 管道环焊缝结构性应力集中效应与拘束度评估[J]. 压力容器, 2022, 39(10): 78 – 86.
- YANG Hui, WANG Fuxiang, DAI Lianshuang, et al. Structural stress concentration effect and constraint evaluation of girth weld in pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(10): 78 – 86.

作者简介:刘木强(1996), 男, 主要从事钢铁材料失效分析与表征技术研究工作, 通信地址: 300387 天津市西青区精武镇宾水西道 399 号天津工业大学, E-mail: lmqdyxh@163.com。

通信作者:宋明(1983), 男, 教授级高工, 副所长, 主要从事特种设备安全评估与失效分析工作, 通信地址: 101300 北京市顺义区顺兴路一号院, E-mail: songm214@foxmail.com。

本文引用格式:

- 刘木强, 孙超, 尤景泽, 等. 电子背散射衍射技术在 X80 管线钢环焊缝塑性应变表征中的应用[J]. 压力容器, 2023, 40(9): 7 – 15.
- LIU Muqiang, SUN Chao, YOU Jingze, et al. Application of electron backscatter diffraction in plastic strain characterization of X80 pipeline steel girth welds[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(9): 7 – 15.