

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.06

窄间隙焊接用 EH11K 焊丝及配套焊剂研制

刘鑫¹, 张晨光², 吉荣亮¹, 刘大为², 郝乾宇¹, 霍树斌¹, 宋昌洪¹, 孙墅畦¹

1. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150060
2. 哈尔滨电气动力装备有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150066

摘要: 为突破屏蔽式核主泵电机窄间隙焊接用埋弧焊焊材进口垄断, 实现国产化替代, 开展了 EH11K 埋弧焊丝与配套 SJ11HR 焊剂的研制。针对核主泵服役工况对焊材成分纯净度、窄间隙工艺适配性及低温韧性的严苛要求, 选用氟碱型焊剂渣系并通过调整组分比例, 解决了窄间隙预热工况下焊渣粘结、脱渣困难的核心工艺问题; 针对熔敷金属 -40 °C 低温韧性不足的短板, 采用焊丝多元微合金化方案, 大幅提升了其低温抗脆断能力。试验结果表明: 优化后的焊材组合在窄间隙焊接中, 能够实现渣壳自动脱渣, 焊道成形平整、熔合良好; 未稀释熔敷金属室温抗拉强度达 540 MPa、屈服强度 428 MPa、断后伸长率 33%, -12.2 °C 冲击吸收能量平均值 166.5 J, -40 °C 冲击吸收能量平均值 125.9 J, 落锤试验未断裂, 各项性能均满足技术要求。该焊材的研制成功为屏蔽式核主泵电机全产业链国产化提供了关键支撑。

关键词: 屏蔽式核主泵; 窄间隙焊接工艺性; 预热工况; 低温韧性

中图分类号: TG422.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)06-0052-06

Development of EH11K Welding Wire and Matching Flux for Narrow-Gap Welding

LIU Xin¹, ZHANG Chenguang², JI Rongliang¹, LIU Dawei², HAO Qianyu¹, HUO Shubin¹,
SONG Changhong¹, SUN Shuqi¹

1. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150060, China
2. Harbin Electric Power Equipment Co., Ltd., Harbin 150066, China

Abstract: To break the import monopoly of submerged arc welding consumables for narrow-gap welding of shielded nuclear main pump motors and achieve localized replacement, the research and development of EH11K submerged arc welding wires and their matching SJ11HR fluxes was carried out. Aiming at the stringent requirements of the nuclear main pump's service conditions on the compositional purity, narrow-gap process adaptability, and low-temperature toughness of welding consumables, a fluoro-alkaline flux slag system was selected. By adjusting the ratio of flux components, the core process issues of slag adhesion and difficult slag removal under narrow-gap preheating conditions were effectively solved. To address the shortcoming of insufficient low-temperature toughness of the deposited metal at -40 °C, a multi-element microalloying scheme was applied to the EH11K welding wires, which significantly enhanced the low-temperature anti-brittle fracture capacity of the deposited metal. Test results showed that during narrow-gap welding, the optimized combination of EH11K wires and SJ11HR fluxes achieved automatic detachment of the slag crust, with smooth weld bead formation and excellent inter-layer fusion. For the undiluted deposited metal prepared by this consumable combination, the room-temperature tensile strength reached 540 MPa, the yield strength was 428 MPa, and the elongation after fracture was 33%. The average impact absorption energy was 166.5 J at -12.2 °C and 125.9 J at -40 °C, and no fracture occurred in the drop-weight test at -40 °C. All performance indicators fully met the technical requirements of the nuclear main pump project. The successful development of this localized welding consumable provides key technical support for the localization of the entire industrial chain of shielded nuclear main pump motors.

收稿日期: 2025-12-28 修回日期: 2026-02-02

作者简介: 刘鑫(1998—), 女, 硕士, 主要从事埋弧焊焊材材料相关研究。E-mail: Lx93762@163.com。

Keywords: shielded nuclear main pump; narrow-gap welding processability; preheating condition; low-temperature toughness

引用格式:刘鑫,张晨光,吉荣亮,等.窄间隙焊接用EH11K焊丝及配套焊剂研制[J].电焊机,2026,56(6):52-57.

Citation:LIU Xin, ZHANG Chenguang, JI Rongliang, et al. Development of EH11K Welding Wire and Matching Flux for Narrow-Gap Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 52-57.

0 引言

屏蔽式核主泵作为压水堆核电站一回路冷却剂循环的核心动力设备^[1],其电机定子屏蔽套、壳法兰等关键部件的焊接接头需长期承受高温、高压及强辐射工况,对焊接材料的成分稳定性、熔敷金属力学性能及焊接工艺适应性提出严苛要求。当前,在AP1000、CAP1000及CAP1400等主流三代核电项目中,屏蔽式核主泵电机用EH11K埋弧焊丝及配套焊剂仍依赖进口供应,尚未实现国产化替代。

国内现有焊材因核心技术瓶颈,难以实现等效替代。该类焊材的研制难点主要体现在两方面:其一为窄间隙焊接工艺适应性难题,核主泵壳法兰等厚壁部件采用窄间隙埋弧焊,配套焊剂需在狭窄焊道空间内实现逐道良好脱渣、焊道熔合充分及成形平整,避免出现夹渣、咬边等缺陷,然而,窄间隙焊接面临的最大挑战在于清渣困难^[2]。对于需要高温预热的焊接工况,这一问题尤为突出——使用常规焊剂时,焊渣会与焊道表面产生强粘结,形成的渣壳既厚又难以清除。其二为熔敷金属低温冲击韧性短板,依据项目技术要求,未稀释熔敷金属需满足-40℃落锤试验无断裂的指标;国内现有EH11K焊材多依赖Mn-Si二元强化,合金设计单一,进而导致熔敷金属-40℃落锤试验发生断裂,无法抵御低温工况下的脆断风险。本文针对窄间隙预热工况脱渣难与低温韧性不足两大核心痛点,提出“焊剂渣系选择与组分调控+多元微合金化”的协同方案,最终实现焊材工艺性与力学性能的同步达标。该研制工作对突破进口技术垄断、保障核电产业链自主可控具有积极作用,对推动屏蔽式核主泵电机全产业链国产化具有重要价值。

1 焊材设计

合金成分是决定熔敷金属组织与力学性能的

核心要素,需兼顾与母材的相容性及核主泵电机服役环境对焊缝强度、韧性、抗裂性的严苛要求。

1.1 焊丝成分设计

针对屏蔽式核主泵电机用EH11K焊丝,依据ASME第II卷C篇SFA-5.17/SFA-5.17M EH11K化学成分标准及项目技术要求确定关键元素成分范围,并结合本项目的性能需求,对关键元素做进一步的限制。其中,S元素是典型的有害杂质,易与Fe形成低熔点共晶物,在焊接凝固时偏聚于晶界,引发热裂纹,还会降低焊缝韧性;P元素同样属于有害杂质,在焊缝中易在晶界偏聚,导致焊缝出现冷脆性,尤其在低温工况下会大幅降低冲击性能,同时增加凝固裂纹风险,必须严格控制其含量;C元素是主要的强化元素之一,但C含量越高,焊缝金属的凝固裂纹敏感性就越高^[3];Si元素是重要的脱氧剂,能减少熔池中氧含量,同时通过固溶强化辅助提升焊缝强度,不过Si含量过高会促使焊缝中形成粗大铁素体组织,还可能产生硬脆的硅酸盐夹杂物,导致焊缝韧性下降;Mn元素能通过固溶强化提高熔敷金属强度,同时Mn可细化焊缝组织,改善低温韧性,但过量添加会使焊缝组织硬脆化,因此,需合理控制C、Si、Mn的含量。为获得综合性能更好的焊缝组织,采用多元微合金化的设计^[4],通过细晶强化、析出强化等作用,提升熔敷金属的强度、低温韧性,减少焊接冷裂纹的风险,改善焊接性能。因此,设计两种EH11K焊丝成分如表1所示。

1.2 焊剂组分设计

焊剂组分设计直接影响熔池流动性、焊缝成形质量及力学性能^[5],通过组元配比间接调控粘度、表面张力、熔点等核心参数,与EH11K焊丝形成良好冶金协同,且主要围绕窄间隙埋弧焊工艺适配性及焊缝性能要求展开。

窄间隙焊接中,脱渣性是焊剂最关键的性能之一^[6],这一性能受多重因素影响:熔渣的线膨胀系数、氧化性、疏松度和表面张力等,其中最重要的是

表1 EH11K焊丝成分设计(质量分数, %)

Table 1 Composition Design of EH11K Welding Wire (wt. %)

焊丝	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Bi
标准值	0.07~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.015	≤0.010	—	—	—	≤0.35	<0.002
焊丝 1#	0.091	1.72	0.84	0.0055	0.0078	—	—	—	0.001	<0.001
焊丝 2#	0.1	1.57	0.95	<0.001	0.0015	0.027	0.034	0.06	0.057	<0.001

熔渣与焊缝金属之间的热膨胀系数差值。为避免熔渣在窄间隙坡口内形成楔形堆积,熔渣的热收缩系数应高于焊缝金属,以 Al_2O_3 为基体且富含氟化物的熔渣通常具备该特性。通过对比酸性渣系(氧化性强、焊缝韧性差)、中性渣系(成本高、工艺适应性窄)与碱性渣系(低氧化性、高脱硫脱磷效率)^[7-9]的性能差异,结合目标焊缝对纯净度、低温韧性的要求,最终选定氟碱型渣系作为基础体系。在初步设计试验时,结合焊剂各组元的作用: CaF_2 :降低熔渣粘度与表面张力,改善流动性及焊缝成形; MgO :调控熔渣粘度抑制下淌,提升热膨胀系数以保障脱渣性; SiO_2 :稳定电弧,优化熔渣凝固特性与铺展性; Al_2O_3 :调节熔渣碱度与结构强度,严控含量防止渣壳粘连; CaO :微调碱度,降低氧含量; MnO_2 :脱氧降熔点,改善熔渣流动性,通过实际生产经验设计了SJ11HR的两种基础配方,主要成分如表2所示。

表2 SJ11HR焊剂成分范围(质量分数, %)

Table 2 Composition Range of SJ11HR Flux (wt. %)

成分	CaF_2	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO_2
焊剂 1#	30~50	0	15~35	10~20	0	0
焊剂 2#	20~30	2~10	15~30	1~5	20~40	5~8

2 试验方法

2.1 焊接方法

试验选用A36为母材,窄间隙工艺性试验用母材尺寸为400 mm×150 mm×40 mm,单边坡口面角度4°,具体如图1a所示。焊接未稀释熔敷金属性能试板尺寸按照ASME第II卷C篇SFA-5.17的要求,母材尺寸为500 mm×314.5 mm×25 mm,单边坡口面角度15°,根部间隙14.5 mm,具体如图1b所示。

采用设计的EH11K埋弧焊丝和焊剂进行埋弧焊工艺性试验及未稀释熔敷金属焊接试验,焊丝直径 $\varnothing 2.4$ mm,焊剂颗粒度10~60目,焊接工艺参数如表3所示。

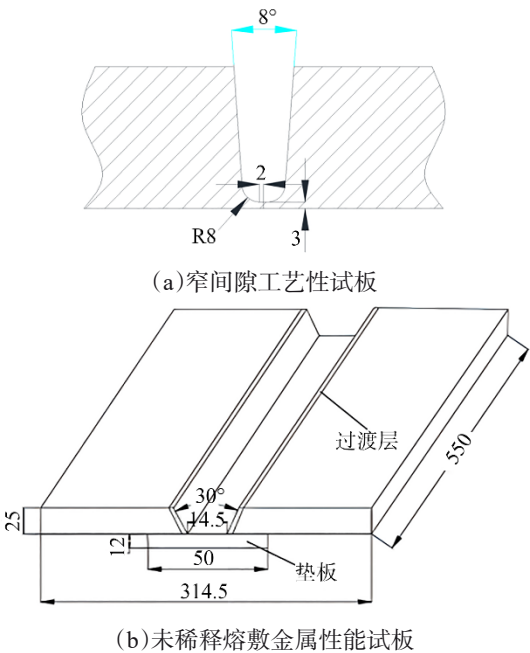


图1 试板结构及尺寸示意(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of test plate structure and dimensions(mm)

表3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters

电弧电压/V	焊接电流/A	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	层间温度/°C
30	400	430	≤250

2.2 焊后热处理

EH11K埋弧焊丝和焊剂组合热处理工艺参数如表4所示。装炉和出炉温度为≤315 °C,315 °C以下出炉后可在静止空气中冷却。

表4 热处理工艺要求

Table 4 Heat-treatment process requirements

热处理温度/°C	保温时间/h	在315 °C以上的加热速度/(°C·h ⁻¹)	在315 °C以上的冷却速度/(°C·h ⁻¹)
580	30	≤22.2	≤55

2.3 力学性能试验

对未稀释熔敷金属试板进行取样,焊接试板两侧起弧和收弧处由于电弧不稳定常存在熔敷金属成分不均匀的问题,因此焊道两侧各去除25 mm。依据AWS B4.0M—2020制备1个 $\varnothing 12.5$ mm拉伸试

样,3个尺寸55 mm×10 mm×10 mm的冲击试样,依据ASME IX卷QW-160制备4个20 mm×25 mm×220 mm侧弯试样,依据ASTM E208-20e1表1中的P-2型制备2个落锤试样。在UTM5305SYXL电子拉伸试验机上进行拉伸试验;在JBN-300B冲击试验机上进行夏比V型缺口冲击试验;在WAW-300万能试验机上进行弯曲试验;在ZCJ9203落锤冲击试验机上进行落锤试验。取样位置如图2所示。

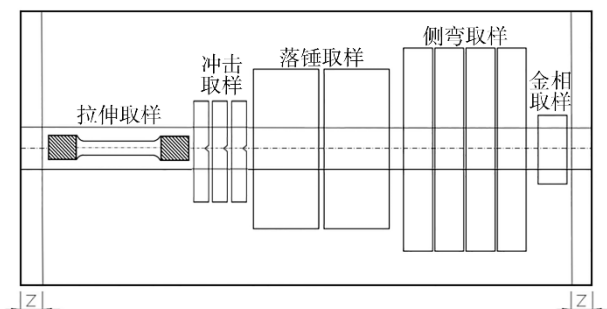


图2 试样取样位置示意

Fig. 2 Schematic diagram of specimen sampling position

在熔敷金属上层受热循环影响较小的位置制备金相试样,用4%的硝酸酒精溶液进行化学浸蚀,通过Olympus GX51型光学显微镜观察熔敷金属的金相组织。

3 试验结果与分析

3.1 焊剂工艺性分析

烧结焊剂的焊接工艺性能主要包括焊剂脱渣性和焊缝成形性等。按照表3中焊接参数在窄间隙试板中进行工艺性试验。焊剂1#焊缝表面形貌如图3所示,焊剂2#焊缝表面形貌如图4所示。脱渣性方面,焊剂1#焊后渣壳致密且与焊缝结合紧密,需工具敲击脱落,易残留碎渣,如图3a所示;焊剂2#渣壳呈疏松片状,冷却后可自动翘起,窄间隙焊道内无粘渣,脱渣较好,如图4a所示;这得益于MgO增大熔渣与金属热膨胀系数差值,配合适量SiO₂避免渣壳过度致密。焊道成形上,焊剂1#焊道表面呈明显凸起状,焊道摊开性差,侧壁与层间熔合线模糊、熔合不充分,如图3b所示;焊剂2#焊道光滑平整、波纹均匀,宽度一致且边缘无咬边,MgO调控熔渣黏度抑制流淌,SiO₂优化铺展性实现圆滑过渡,无

气孔凹陷缺陷,如图4b所示。因此,针对屏蔽式核主泵电机窄间隙焊接需求,对比焊剂1#与焊剂2#的工艺性能,焊剂2#更适配窄间隙工况。



(a)渣壳形貌



(b)焊道形貌

图3 焊剂1#焊缝表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of weld seam with flux 1#



(a)渣壳形貌



(b)焊道形貌

图4 焊剂2#焊缝表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of weld seam with flux 2#

在窄间隙室温焊接工艺性验证基础上,结合项目“预热温度>95℃、道间温度≤250℃”的实际工况要求,进一步针对渣系2开展预热工况下的工艺性试验,结果发现其脱渣性能出现劣化,焊后渣壳不再具备自动翘起能力,需借助扁铲等工具敲击才能剥离,主要通过调整焊剂碱度,合理调整焊剂成分优化实现工况适配。焊剂碱度越大,焊缝含氧量越低,夹杂物就越少,低温冲击就越高^[10],但焊剂碱度太高时,工艺性能变差。综合考虑窄间隙工艺与熔敷金属-40℃落锤试验,控制碱度在2.3~3.3,确保焊丝焊剂组合具有良好的焊接工艺性能和优异的低温冲击韧性。

Al₂O₃属尖晶石型化合物,易与焊缝表面氧化铁形成牢固结合的MeO·Me₂O₃型化合物,且会增大熔渣表面张力,使焊缝表面呈凸型,导致渣壳在窄间隙尖角处被“卡住”,剥离难度骤增;预热工况下,道

间 200~250 °C 的保温效应会加剧这种界面粘结,进一步恶化脱渣性。为此,通过设置 15%、20%、25%、30% 四组 Al_2O_3 比例开展预热工况下的窄间隙工艺性试验,最终将 Al_2O_3 含量优化至 15%~20%,同时为弥补 Al_2O_3 降低对碱度的影响,将 SiO_2 含量调整为 7%~15%,配合提升 CaF_2 含量至 28%~32%,降低熔渣黏度、强化高碱度焊剂的脱硫脱磷能力,同时与 MgO 协同增大熔渣与金属的热膨胀系数差值,为预热工况下渣壳自动翘起提供应力基础。经 IIV 碱度公式计算,调整后焊剂碱度稳定在 2.44。综上,优化后的焊剂 2# 渣壳表面形貌如图 5a 所示,模拟环渣壳表面形貌如图 5b 所示,冷却后渣壳边缘自然翘起,与焊缝界面有明显剥离间隙,窄间隙焊道内无粘渣,脱渣性能优异。焊剂在预热工况下实现了“自动脱渣+窄间隙适配”的目标,满足实际焊接需求。

3.2 熔敷金属性能分析

采用 EH11K 焊丝 1# 和 2#, 与优化后的焊剂 2# 进行焊接试验,力学性能测试结果如表 5 所示。从测试结果可见:1# 焊丝的未稀释熔敷金属拉伸以及 -12.2 °C 冲击均满足技术要求考核指标,但熔敷金属 -40 °C 落锤试验中,两个试样均发生断裂,未满足标准“两个试样均未断裂”的考核要求;补充的 -40 °C

表 5 焊丝 1# 与焊丝 2# 未稀释熔敷金属力学性能对比

Table 5 Comparison of mechanical properties of undiluted deposited metal between welding wire 1# and welding wire 2#

序号	拉伸性能			低温韧性		落锤试验	侧弯试验
	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$KV_g(-12.2\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	$KV_g(-40.0\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	-40 °C	$D=4a, 180^\circ$
焊丝 1#	529	417	34	103.5、89.9、85.4	47.8、52.0、55.2	两个试样均断裂,不合格	无裂纹
焊丝 2#	540	428	33	163.6、171.0、164.8	128.6、113.5、135.5	两个试样未断裂,合格	无裂纹

3.3 熔敷金属组织分析

力学性能的差异本质上由微观组织特征决定,对两者的未稀释熔敷金属试样进行金相组织表征与分析。取焊丝 1#、焊丝 2# 熔敷金属的未稀释区域制备金相试样,经机械打磨、抛光后,采用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀,利用光学显微镜进行显微组织观察。图 6a、6b 分别对应焊丝 1#(冲击性能差)和焊丝 2#(冲击性能好)的典型显微组织。

如图 6a 所示,焊丝 1# 熔敷金属组织主要以粗大块状、条状的先共析铁素体(PF)为主,其间分布有少量针状铁素体(AF);PF 呈离散状分散于基体中。这种组织形态对韧性极为不利:其一,粗大的晶粒减少了晶界总面积,削弱了晶界对裂纹扩展的阻碍



(a) U 型坡口渣壳表面形貌



(b) 模拟环渣壳表面形貌

图 5 焊剂 2 优化后渣壳表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of slag crust of Flux 2# after optimization

冲击试验结果显示,冲击吸收能量分别为 47.8 J、52.0 J、55.2 J,平均值仅 51.7 J,低温韧性不足,成为当前焊材组合的核心性能短板。2# 焊丝的未稀释熔敷金属,室温抗拉强度 540 MPa、屈服强度 428 MPa,与焊丝 1# 相比无显著波动,满足标准要求,-12.2 °C 冲击吸收能量实测值为 163.6 J、171.0 J、164.8 J,平均值达 166.5 J,较焊丝 1# 提升 81.5%,-40 °C 冲击吸收能量平均值达 125.9 J,较焊丝 1# 提升 144.4%,焊丝 2# 低温韧性更优;同时,-40 °C 落锤试验中焊丝 2# 两个试样均未发生断裂,完全满足标准考核指标,解决了低温韧性不足的短板。

作用;其二,大块 PF 破坏了基体的连续性,极易成为裂纹快速扩展的低阻力通道。与之对比,图 6b 中焊丝 2# 熔敷金属组织整体均匀细密,以大量交织分布的针状铁素体(AF)为核心,未见明显粗大的 PF。AF 板条细小,呈无定向交错排列,形成相互锁定的板条束结构。这种结构内部含有大量大角度晶界,能有效偏转、钝化和分岔扩展中的裂纹,消耗大量断裂能。同时,更细小的晶内铁素体进一步增加了晶界密度,强化了对裂纹的阻滞效果。综上所述,金相分析表明,多元微合金化设计是实现熔敷金属组织优化与性能突破的关键。焊丝 2# 通过添加 Ni、Cr、Mo 等元素,有效抑制了粗大先共析铁素体的形成,促成了细密针状铁素体组织的生成,从微观层

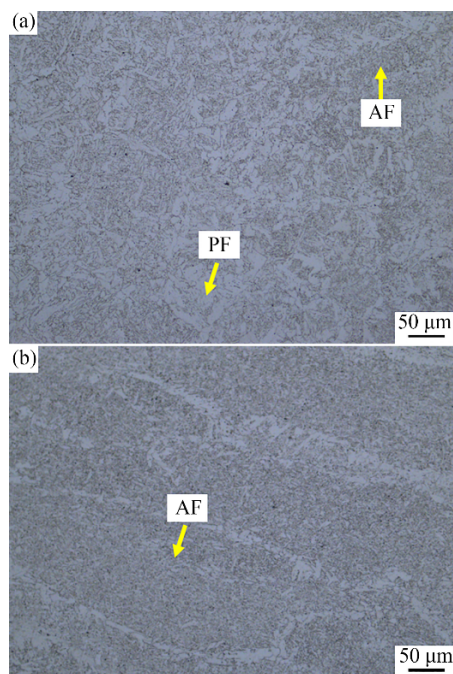


图6 熔敷金属显微组织对比(OM)

Fig. 6 Comparison of microstructures of deposited metal (OM)

面直接解释了其低温冲击韧性提升的原因。

4 结论

(1)研制的SJ11HR氟碱型焊剂,成功解决窄间隙狭窄空间清渣难、预热工况($>95^{\circ}\text{C}$)渣壳强粘结等问题,完全适配窄间隙深坡口的焊接工艺需求。

(2)通过多元微合金化的成分设计,有效提升了熔敷金属的低温韧性。 -40°C 冲击吸收能量达125.9 J,落锤试验均未断裂,实现了工艺性与力学性能的协同优化。

(3)研制的EH11K焊丝与SJ11HR焊剂组合,在窄间隙工艺适配性及力学性能上均达到核主泵电机焊接的严苛要求,成功打破进口焊材垄断,实现国产化替代。该焊材为屏蔽式核主泵厚壁部件的高效、高质量焊接提供了可靠解决方案,对保障核电产业链自主可控、推动核电装备国产化具有重要工程应用价值。

参考文献:

- [1] 龙云,胡波,朱荣生,等.三代压水堆核主泵关键部件制造及工艺研究进展[J].排灌机械工程学报,2024,42(10):973-982.

- LONG Y, HU B, ZHU R S, et al. Research progress on manufacturing and process of key components of nuclear reactor coolant pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2024, 42(10): 973-982.
- [2] Sun Q J, Hu H F, Yuan X, et al. Research status and development trend of narrow-Gap TIG welding[J]. Advanced Materials Research, 2011, 308: 1170-1176.
- [3] 蒋宇晨,李恩,何冰,等.铬钼钢焊接材料焊接工艺及性能研究[J].电焊机,2025,55(12):85-90.
- JIANG Y C, LI E, HE B, et al. Research on Welding Technology Development and Application of Chrome-Molybdenum Steel Welding Material[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 85-90.
- [4] 潘晓坤,孙万利,闫建升,等.钢铁材料合金化技术的发展现状及趋势[J].特殊钢,2025,46(06):24-31.
- PAN X K, SUN W L, YAN J S, et al. The Development Status and Trends of Alloying Technology for Iron and Steel Materials[J]. Special Steel, 2025, 46(06): 24-31.
- [5] Singh B, Khan Z A, Siddiquee A N. Review on effect of flux composition on its behavior and bead geometry in submerged arc welding (SAW)[J]. Journal of Mechanical Engineering Research, 2013(7): 123-127.
- [6] Pikna E. Fluxes for narrow-gap welding[J]. Welding International, 1989, 3(12): 1095-1098.
- [7] 李鹏明.高性能埋弧烧结焊剂研制与应用[D].沈阳:东北大学,2013.
- LI P M. Development and application on the high-performance submerged arc sintered flux[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [8] Choudhary S, Shandley R, Kumar A. Optimization of agglomerated fluxes in submerged arc welding[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5049-5057.
- [9] Chen Z, Wang H, Sun Y, et al. Insight into the Relationship Between Viscosity and Structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ Molten Slags[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(6): 2930-2941.
- [10] 杨飞,张毅,段然,等.船用LNG储罐高锰奥氏体低温钢埋弧焊焊丝焊CHW-SMn/CHF610的研制[J].当代化工研究,2024(21):85-87.
- YANG F, ZHANG Y, DUAN R, et al. Development of Submerged Arc Welding Wire Flux CHW-SMn/CHF610 for High Manganese Austenitic Low Temperature Steel for Marine LNG Storage Tank[J]. Modern Chemical Research, 2024(21): 85-87.