

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.08

核电平板滤网2507超级双相不锈钢焊接工艺

徐杰, 丁跃华*, 徐耀, 刘红, 方圆, 林丽花, 顾陆军, 沙凯丰

江苏电力装备有限公司, 江苏 常州 213012

摘要: 针对我国滨海某百万千瓦级CAP1000型三代非能动压水堆核电机组的冷源取水拦截清理循环系统中平板滤网设备材料2507超级双相不锈钢的焊接工艺进行研究, 采用拉伸、弯曲、晶间腐蚀和金相分析等方法测定其焊接接头性能。结果表明: 使用热输入分别为9.00 kJ/cm正面打底、9.60~11.52 kJ/cm正面填充、11.65~12.48 kJ/cm正面盖面、10.56 kJ/cm背面封底的药芯焊丝气体保护焊接(FCAW-G)工艺, 得到的焊接接头具备优异的力学性能及良好的金相组织, 满足核电设备在海洋腐蚀环境下的严格要求。横向菱形拉伸试样抗拉强度为845 MPa, 破断于母材; 180°横向侧弯试样无裂纹; 金相组织均匀, 铁素体相与奥氏体相比比例合理, 无显微裂纹和有害相析出; 无晶间腐蚀倾向。结果验证了2507超级双相不锈钢适用于恶劣海洋条件下的核电设备焊接制造, 符合核级结构材料标准。

关键词: 核电设备; 超级双相不锈钢; 药芯焊丝气体保护焊接; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)07-0079-10

Research on the Welding Process of 2507 Super Duplex Stainless Steel in the Flat Screen Filter Equipment of Nuclear Power Plants

XU Jie, DING Yuehua*, XU Yao, LIU Hong, FANG Yuan, LIN Lihua, GU Lujun, SHA Kaifeng

Jiangsu Electric Power Equipment Co., Ltd., Changzhou 213012, China

Abstract: This study investigates the welding process of 2507 super duplex stainless steel, a critical material for flat screen filter equipment in the cold source water intake interception and cleaning circulation system of a CAP1000 third-generation passive pressurized water reactor nuclear power unit (1,000 MW class) in China. The performance of welded joints was comprehensively evaluated through tensile testing, bend testing, intergranular corrosion analysis, and metallographic characterization. Experimental results demonstrate that the flux-cored arc welding with gas shielding (FCAW-G) process, employing optimized heat inputs of 9.00 kJ/cm for the front-side root pass, 9.60-11.52 kJ/cm for front-side fill passes, 11.65-12.48 kJ/cm for the front-side capping pass, and 10.56 kJ/cm for the reverse-side backing pass, yields welded joints with exceptional mechanical properties and favorable metallurgical integrity. These joints meet the stringent requirements for nuclear equipment operating in marine corrosive environments. Transverse rhombic specimens exhibited a tensile strength of 845 MPa, with fractures localized in the base material. 180° transverse side-bend tests showed no surface cracking. Homogeneous dual-phase microstructure with a balanced ferrite-to-austenite phase ratio. Absence of microcracks, detrimental phase precipitation, or susceptibility to intergranular corrosion. The findings validate the applicability of 2507 super duplex stainless steel in critical nuclear power systems under harsh marine conditions, ensuring compliance with nuclear-grade structural material standards.

Keywords: nuclear power plant equipment; super duplex stainless steel; flux-cored arc welding with gas shielding; mechanical properties; microstructure

引用格式: 徐杰, 丁跃华, 徐耀, 等. 核电平板滤网2507超级双相不锈钢焊接工艺[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 79-88.

收稿日期: 2025-03-30 修回日期: 2025-04-07

作者简介: 徐杰(2001—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事核电设备焊接质量控制。E-mail: 2254786991@qq.com。

通讯作者: 丁跃华(1975—), 男, 副高级工程师, 高级技师, 主要从事核电设备高效焊接生产管理。yhdhding0015@ceec.net.cn。

Citation: XU Jie, DING Yuehua, XU Yao, et al. Research on the Welding Process of 2507 Super Duplex Stainless Steel in the Flat Screen Filter Equipment of Nuclear Power Plants[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 79–88.

0 引言

核电利用铀核裂变释热能进行发电,能量密度高、单机功率大、发电成本低、不受自然条件影响^[1],是高效、清洁的新能源,更是我国能源供应体系的重要组成部分^[2]。国家顶层文件《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》,首次明确指出:“加快沿海核电清洁能源基地建设”,并要求“积极、安全、有序发展核电”。核电设备产业发展迎来“黄金期”。当下,研究性能更稳定、质量更可靠、与我国三代核电技术相配套的核电设备焊接生产工艺,意义重大且势在必行^[6]。

我国滨海核电机组运行均采用海水直流冷却方式^[2],需要大量海水作为冷源进行冷却。海水中存在大量鱼虾水母、海藻和漂浮物等杂质^[3],极易堵塞核电机组冷源取水流动道,影响冷却循环水系统和厂用水系统运行^[4]。核电冷源取水堵塞是全球性难题,直接影响核电机组安全,关乎电力稳定供应^[5]。核电冷源取水拦截清理系统又称循环水过滤系统,是为核电站汽轮发电机组凝汽器和常规岛辅助冷却水系统提供清洁冷却水的工艺系统^[7],也是解决核电冷源取水安全问题关键。配套的系统设备主要有海上预拦截网、钢闸门、拦污栅、清污机、平板滤网、旋转滤网、鼓形滤网、二次滤网、电动滤水器^[5],进行有效拦截、过滤、清理冷却循环水中杂质,以此保证后续泵房及传热设备正常运行^[3]。

核电冷源取水拦截清理系统配套核电设备长期受到海水、海风的冲击和侵蚀。恶劣海洋环境富含大量游离氯离子,极易对核电设备产生电化学和化学腐蚀;海水中还存在多种藻类和微生物进行附着腐蚀^[8];且海水夹裹杂质不断流冲核电设备,产生机械磨损和应力腐蚀^[9]。在多种复杂机理共同作用下,核电设备长期暴露于高盐、高湿、高氧的腐蚀性海洋环境中^[8],这对核电设备焊接接头的力学性能、耐海水腐蚀性能以及长期稳定性提出严苛要求^[9]。

本研究以我国某百万千瓦级 CAP1000 型三代非能动压水堆核电机组冷源取水拦截清理系统中

平板滤网设备材料 2507 超级双相不锈钢为研究对象,通过分析设备结构和材料焊接性,进行焊接工艺评定试验,创新性使用使用药芯焊丝气体保护焊接方法,把 99.5% 纯度 CO₂ 气体作为保护气体,用于焊接核电设备水工金属结构。然后,通过测试焊接接头的各项力学性能和耐晶间腐蚀性能,分析焊缝中心、热影响区以及母材区域显微金相组织。研究出满足质量技术要求、兼顾生产制造效率、可用于核电设备实际焊接的最佳工艺参数。

1 平板滤网设备分析

平板滤网设备是核电厂及常规电厂冷源取水拦截清理系统和厂用水系统中的核心设备,因其设备价格低廉、性能优良、安全可靠,被广泛应用在电力工程、海洋工程、水利工程和环境工程^[9]。平板滤网设备的结构如图 1 所示,是典型水工金属结构,由本体框架、工作网、支撑网、集污网、起吊座和压板等部件拼装焊接而成。设备功能是拦截和过滤核电机组取水进水流道中的浮游杂质,减轻后续过滤设备运行负担,保证后续泵房及传热设备正常运行,直接影响核电机组运行安全,具有过滤和流输两种重要功能^[7]。平板滤网特点是占地面积小、形状结构简单、制造成本低廉、安装快捷方便,具有过水量大、除污性能好、运行部件少、使用寿命长、维修简便等优点^[6]。常规平板滤网设备制造材料为 316L 奥氏体不锈钢或 2205 普通双相不锈钢。

我国某在建的百万千瓦级 CAP1000 型三代非能动压水堆核电机组的冷源取水拦截清理循环系统中需要焊接制造多台平板滤网设备安装在取水进水流道处,作为首道滤网直接过滤海水,并拦截清理海水中浮游杂质。平板滤网设备本体高 15 m,宽 3.5 m,取水流速为 0.6~1.0 m/s,长期经受海水流冲和腐蚀,需要承担一定交变载荷和机械磨损。但在核电站的水工金属结构设备中并不考虑冲击韧性影响,主要考虑强度、塑性和耐腐蚀性等指标^[26]。同时,根据相关设计要求,平板滤网设备通体由

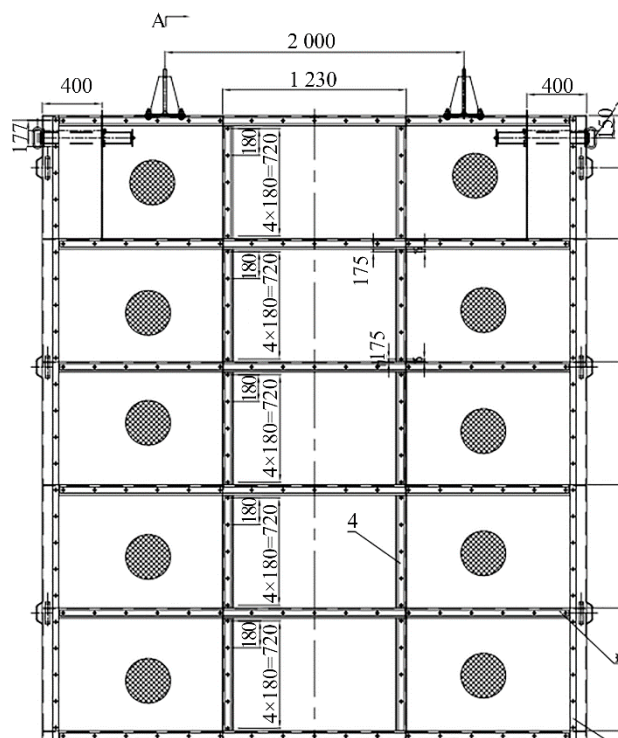


图1 平板滤网设备结构图

Fig. 1 Flat plate filter screen equipment structure

2507超级双相不锈钢经加工、装配、焊接而成。设备制造完成后要求对角线误差小于3 mm、扭曲小于2 mm,必须控制焊接变形量,保证焊接接头质量,焊接制造难度极大。分析平板滤网设备图纸结构可知:该设备各类部件母材厚度范围在2~20 mm,焊缝类型大多为角焊缝、对接焊缝及组合焊缝,焊缝布置主要为平焊、横焊和立向下焊位置,坡口形式包括无坡口、V型坡口和X型坡口。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

2507超级双相不锈钢作为第三代双相不锈钢,是一种高性能合金材料^[13]。其微观结构呈铁素体与奥氏体双相结构^[14],兼具铁素体不锈钢与奥氏体不锈钢的优点:力学性能卓越,屈服强度在550 MPa以上,抗拉强度超过750 MPa,断后延伸率在15%以上,强度极高,韧性和延展性较好^[11];耐腐蚀性能优异,耐点蚀当量(PREN值)大于40%,抗氯离子点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀以及应力腐蚀开裂能力突出^[10],可直接在海水环境或酸碱介质中使用。相比

于其他不锈钢,2507超级双相不锈钢经济性价比更高^[12]。因此,2507超级双相不锈钢被广泛应用于海洋工程、化工装备和能源设备领域^[15]。

2507超级双相不锈钢碳含量极低,铬、镍、钼和氮含量较高^[11],对超级双相不锈钢的焊接性分析有着复杂影响。高镍、高铬导致焊接过程中低熔点共晶物析出,易产生热裂纹^[19];高铬、高钼使得钢材淬硬倾向变大,易产生冷裂纹。但受铁素体与奥氏体双相结构和碳、磷、硫超低含量因素影响,2507超级双相不锈钢的冷、热裂纹出现风险较低^[25]。2507超级双相不锈钢与铁素体不锈钢相比,焊后脆化倾向较低,且热影响区铁素体晶粒粗化程度也较低;与奥氏体不锈钢相比,热裂倾向不明显,所以综合判定其焊接性较好^[23]。

焊接2507超级双相不锈钢需要考虑的核心问题是确保焊缝中心和热影响区的双相比比例均衡以及防止有害相和碳化物等杂质析出^[22]。焊接热循环影响铁素体与奥氏体双相比比例:焊接热输入过小、焊后冷却过快,会使铁素体相比比例增高,导致焊缝和热影响区的冲击韧性降低,脆性增加,耐腐蚀性能下降^[22];焊接热输入过大、焊后冷却过慢,则使奥氏体相比比例相对增高,铁素体晶粒粗大,合金元素烧损,导致焊缝和热影响区强度降低,耐腐蚀性能劣化^[28]。 σ 相、 χ 相等有害相以及碳、氮化物等杂质也会在高温下析出^[27],增加脆性和裂纹风险,影响焊缝质量。解决方法在于严格控制热输入和层间温度,通过使用小电流、快焊速、窄间焊和多层多道焊的焊接工艺^[27],保证热输入在5~15 kJ/cm范围,层间温度小于150 °C^[30];并采用与母材成分、强度相匹配的焊接材料,补偿氮和其他元素损失,提升焊接接头质量^[19]。

试验和设备制造所用的2507超级双相不锈钢由振石集团东方特钢有限公司生产,执行标准为ASTM A240M-2020a,材料状态为热轧板料,并经固溶、酸洗处理,化学成份见表1,力学性能见表2。

由于核电设备的重要性以及2507超级双相不锈钢材料的特殊性,在焊接工艺评定试验和实际焊接生产中,必须严格按照强度、成分相匹配的焊材选用原则和相关标准,使用专用核级焊材^[6]。焊接材料选用锦州特种焊条有限公司生产的 $\varnothing 1.2$ mm

表1 2507 超级双相不锈钢化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of 2507 super duplex stainless steel (wt. %)

项目	C	Si	Mn	S	P
标准值	≤0.03	≤0.80	≤1.20	≤0.02	≤0.035
实测值	0.024	0.61	0.66	0.001	0.024
项目	Cr	Ni	Mo	N	Cu
标准值	24~26	6~8	3~5	0.24~0.32	≤0.50
实测值	25.6	6.5	3.3	0.25	0.05

表2 2507 超级双相不锈钢力学性能
Table 2 Mechanical properties of 2507 super duplex stainless steel

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
标准值	≥550	≥750	≥15
实测值	612	830	40.5

直径 ER2594T1-1 牌号药芯不锈钢焊丝,质量符合 GB/T 17583—2018《不锈钢药芯焊丝》、AWS A5.22—2017《不锈钢药芯和金属芯焊条和焊丝标准》和 NB/T 47018—2017《承压设备用焊接材料订货技术条件》的相关要求。且在焊材入库前进行理化试验,复验合格,化学成分如表3所示,力学性能如表4所示。

表3 ER2594T1-1 焊材熔敷金属化学成分(质量分数,%)
Table 3 Chemical composition of ER2594T1-1 weld deposited metal (wt. %)

项目	C	Si	Mn	S	P
标准值	≤0.04	≤1.0	0.5~2.5	≤0.03	≤0.04
实测值	0.024	0.79	1.57	0.004	0.016
项目	Cr	Ni	Mo	N	Cu
标准值	24~27	8~10	2.5~4.5	0.2~0.3	≤0.5
实测值	25.26	9.05	3.41	0.24	0.03

表4 ER2594T1-1 焊材熔敷金属力学性能
Table 4 Mechanical properties of ER2594T1-1 weld deposited metal

项目	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	弯曲试验	
标准值	≥750	≥15	180°面弯无裂纹	180°侧弯无裂纹
实测值	790	35	合格	合格

2.2 试验方法

本文按照 SL 36—2016《水工金属结构焊接通用技术条件》对平板滤网设备材料“2507 超级双相不锈钢”进行焊接工艺评定试验。2507 超级双相不锈钢焊接性良好,但焊接过程必须严格控制焊接热输入和层间温度,以防止焊缝中心和热影响区晶粒粗化和双相失衡,影响其力学性能和耐腐蚀性能^[17]。

2507 超级双相不锈钢的常规焊接方法为焊条电弧焊(SMAW)、非熔化极惰性气体保护焊(GTAW)^[18]和熔化极气体保护焊(GMAW),先进焊接方法有激光自熔焊(LBW)^[10]、电子束焊(EBW)^[20]、等离子弧焊(PAW)^[14]以及冷金属过渡与脉冲复合焊(CMT+P)^[15]。但这些焊接方法均有一定局限性:SMAW 和 GTAW 半自动化程度较低,生产效率低下;GMAW 所用富氩含氮保护气体价格较高且飞溅相对较大,影响焊缝美观;而一些先进焊接方法所用设备体积大、成本投入高、不能满足全位置焊接^[16]。

平板滤网设备所需部件厚度不一,焊缝数量和接头形式多样。综合考虑制造成本、生产效率和焊接工艺评定试验覆盖性因素,最终确定焊接方法为药芯焊丝气体保护、多层多道、清根双面焊接,焊接接头类型为板-板对接,焊接位置为平焊,坡口形式为 V 形坡口,焊接试板规格为 δ16×250×600 mm,2 块,焊接接头形式和焊接顺序如图2所示。

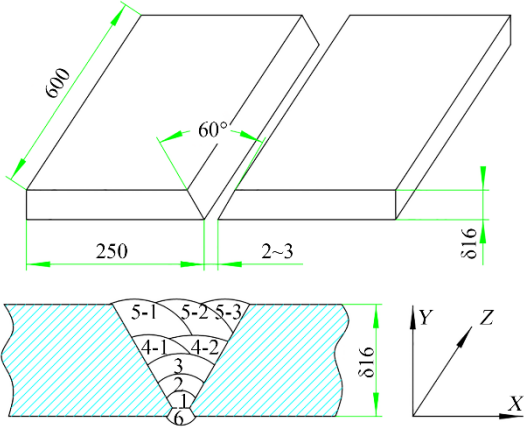


图2 试板焊接接头形式及焊接顺序
Fig. 2 Configuration of welded joints and welding sequence schematic for test plates

药芯焊丝气体保护焊接(FCAW-G)通过气渣联合保护兼具 SMAW 和 GMAW 优点^[24]:成本低、效率高、焊缝质量好^[23]。焊前清除 2507 超级双相不锈钢试板坡口两侧油污等杂质并用丙酮清洗擦拭干净,预留焊缝间隙 2~3 mm、作反变形角 3°,保护气体为纯度 99.5% CO₂,气体流量为 20 L/min,定位焊按首道参数施焊,打磨去除,不熔于焊缝。试板焊接工艺参数详见表5。焊前不预热;焊中每层、每道需清理熔渣及氧化皮,焊枪摆动幅度不大于 20 mm,层间温度小于 150 °C,热输入控制在 5~15 kJ/cm;焊

后表面允许修磨,背面清根,无需进行固溶热处理^[21]。

焊接热输入是指在焊接过程中单位长度焊缝实际吸收输入的有效热量,是衡量焊接能量大小的关键参数^[10]。焊接热输入值直接影响焊缝冶金过程和力学性能,并通过热循环间接影响焊缝附近母材区域的力学性能和金相组织^[15]。焊接热输入按

式(1)计算后列入表5。

$$E=\frac{\eta UI}{v}$$

(1)

式中 E 为热输入(单位:kJ/cm); U 为电弧电压(单位:V); I 为焊接电流(单位:A); v 为焊接速度(单位:cm/min); η 为 FCAW 焊接热效率系数(取值0.8)^[15]。

表 5 2507 超级双相不锈钢试板焊接工艺参数

Table 5 Welding process parameters for 2507 super duplex stainless steel cladding plates

焊接层道	焊接方法	电流极性	焊接材料		焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	热输入 /(kJ·cm ⁻¹)	层间温 度/℃
			牌号	规格/mm					
1	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	180	25	24	9.00	20
2	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	200	25	25	9.60	70
3	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	200	26	25	9.98	75
4-1	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	240	26	28	10.70	82
4-2	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	240	28	28	11.52	92
5-1	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	260	28	30	11.65	98
5-2	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	260	30	30	12.48	106
5-3	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	260	30	32	11.70	132
6	FCAW-G	直流反接	ER2594T1-1	1.2	220	25	25	10.56	64

试板焊接完成后进行无损检测(包括目视检测 VT、渗透检测 PT 和射线检测 RT)和破坏性检测试验(主要为拉伸试验、弯曲试验、晶间腐蚀试验和显微金相组织分析)。破坏性检测试验采用机械冷加工方式取样,各个试样取样位置如图3所示^[6]。

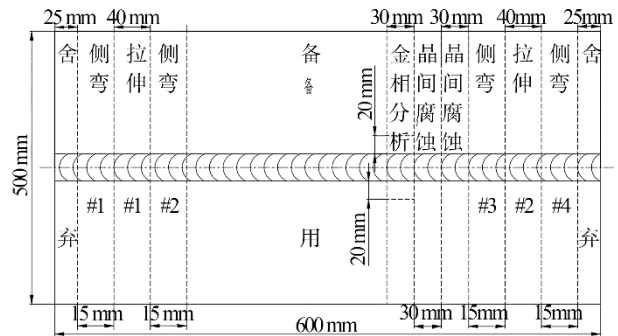


图 3 破坏性检测试验取样示意

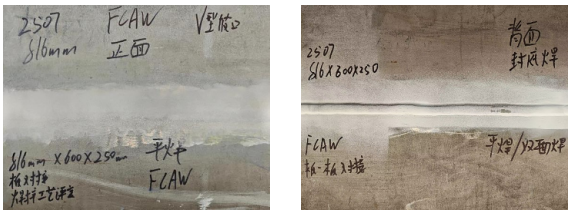
Fig. 3 Schematic diagram of destruentructive testing sample collection

3 试验结果与分析

3.1 无损检测

试板焊接完成24 h内进行无损检测,结果均符合相关标准要求。焊缝外观使用目视检测(VT)方法,可见试板表面无裂纹、气孔、夹渣和未熔合等焊

接缺陷,焊缝正面宽度20~21 mm、余高1.5~1.8 mm;焊缝背面宽度13.5~14 mm、余高1~1.5 mm,焊缝表面成形合格。试板经过修磨清根后,正面焊缝和背面焊缝全长及邻近25 mm区域采用溶剂去除型着色法进行渗透检测(PT),按照GB/T 26953-2011标准进行,如图4所示,观察检测结果为I级合格;焊缝全长进行射线检测(RT),按照GB/T 3323.1-2019标准执行,检测结果为I级合格^[6]。



(a)试板正面 (b)试板背面

图 4 渗透检测

Fig. 4 Penetrant testing

3.2 拉伸试验

拉伸试验按照GB/T 228.1-2021标准执行,取焊缝横向菱形拉伸试样2件,如图5所示。拉伸加载速率为3 mm/min,拉伸试样试验结果如表6所示,焊接接头横向拉伸平均抗拉强度为845 MPa,拉伸试样的破断位置均发生在母材处,符合试验

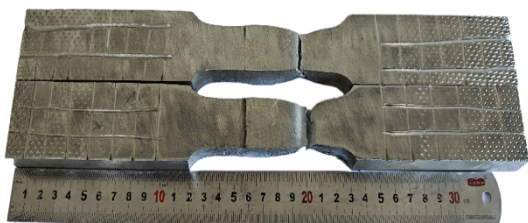


图5 拉伸试样

Fig. 5 Tensile test specimen

表6 焊接接头横向菱形拉伸试验结果

Table 6 Transverse diamond tensile test results of welded joint

拉伸 试样	尺寸 /mm	温度 /°C	拉伸强度/MPa		破断 位置	试验 结果
			标准值	试验值		
试样1	25.56×16.15	20	≥800	849	母材	合格
试样2	25.60×16.26	20	≥800	842	母材	合格

要求^[6]。

3.3 弯曲试验

弯曲试验按照 GB/T 232—2024 标准执行,取侧弯试样4件,如图6示。压轴直径为4倍板厚,支座间距为6倍板厚+3 mm,弯曲角度为180°。弯曲试验详细数据见表7,观察侧弯试样接头处均无裂纹产生,抗弯性能符合相关技术标准^[28]。



图6 弯曲试样

Fig. 6 Bend test specimen

表7 焊接接头180°横向侧弯试验结果

Table 7 180°Lateral side bend test results of welded joint

弯曲 试样	尺寸/mm	弯轴直径 /mm	支座间距 /mm	弯曲 角度/°	弯曲 方法	试验 结果
试样1	16.22×10.02	40	63	180	侧弯	无裂纹
试样2	16.22×10.00	40	63	180	侧弯	无裂纹
试样3	16.21×10.01	40	63	180	侧弯	无裂纹
试样4	16.20×10.02	40	63	180	侧弯	无裂纹

3.4 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀试验按照 GB/T 4334—2020 标准中方法E执行,取横向晶间腐蚀试样2件,如图7所示。腐蚀试剂为铜-硫酸铜-16%硫酸溶液,使用弯曲法判断晶间腐蚀倾向。将试样沿焊缝熔合线进行180°弯曲,进行10倍放大观察,无因晶间腐蚀行为

产生的裂纹,晶间腐蚀试验数据如表8所示,耐腐蚀性能符合相关要求^[29]。

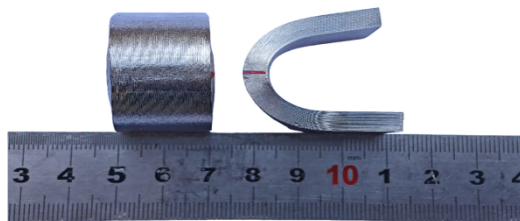


图7 晶间腐蚀试样

Fig. 7 Intergranular corrosion specimen

表8 焊接接头横向晶间腐蚀试验结果

Table 8 Transverse intergranular corrosion test results of welded joint

腐蚀 试样	尺寸/mm	弯曲角度 /(°)	放大 倍数	评判 方法	试验 结果
试样1	20.02×4.01	180	10	弯曲法	无裂纹
试样2	20.00×4.02	180	10	弯曲法	无裂纹

3.5 金相组织分析

金相组织观察试验分为宏观金相观察和微观金相观察^[6]。2507 超级双相不锈钢焊接试板在试验所用焊接工艺参数下,焊缝中心、热影响区和母材区域显微金相组织均符合相关要求,使得焊接接头耐腐蚀性能优异,力学性能极好。

宏观金相检测按照 GB/T 26955—2011 标准执行,使用浓度为10%的草酸溶液电解浸蚀,在10倍放大镜下观察,检测结果如图8示,试样截面无裂纹、气孔、未熔合等焊接缺陷^[26]。

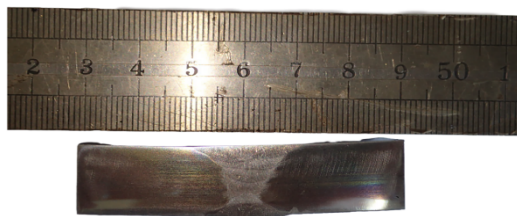


图8 宏观金相检测

Fig. 8 Macroscopic metallographic examination

微观金相检测按照 GB/T 26955—2011 标准执行,使用浓度为10%的草酸溶液电解浸蚀,分别放大200倍观察焊缝中心、热影响区以及母材区域的显微金相组织,通过 Image-Pro Plus 图像定量分析软件,进行灰度阈值分割计算两相平均面积占比。

焊缝中心显微金相组织成分中,铁素体相呈现黑色的层状和岛状结构,少量铁素体组织相变为二次奥氏体(γ_2)组织。奥氏体相呈现白色的细小针

状、片状和少量团块状均匀交错分布在铁素体基体中。铁素体含量约为53%,奥氏体含量约为47%,符合相关标准。晶粒形态大部分为柱状晶,为典型“双相网状”结构^[11]。焊缝中心无显微裂纹,无明显的粗化晶粒,无 σ 相和连续碳、氮化物沉淀析出,这表明热输入控制得当^[30],如图9所示。

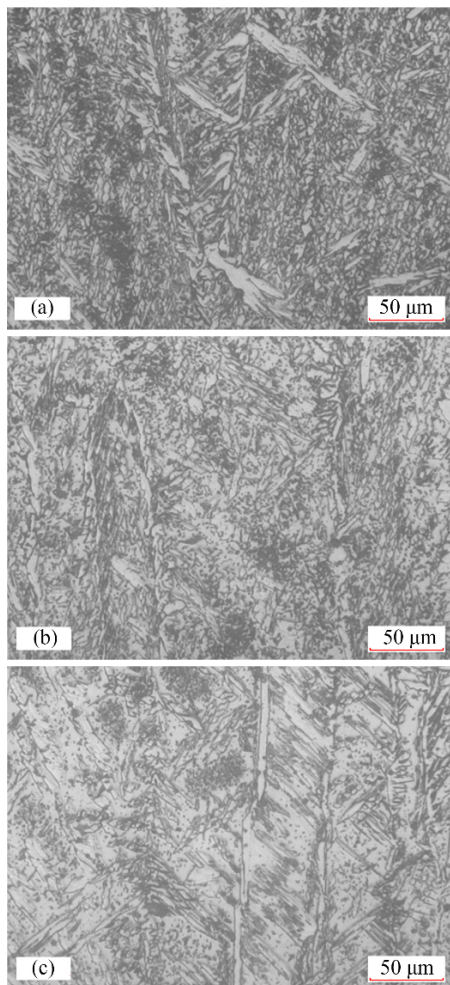


图9 焊缝中心显微金相组织

Fig. 9 Microstructure of weld center zone

热影响区显微金相组织成分中,铁素体相与奥氏体相均匀交错,黑灰色铁素体含量约为61%,白色奥氏体含量约为39%,铁素体含量多于奥氏体含量,但无明显铁素体富集带和奥氏体贫化区。靠近焊缝区域,奥氏体以颗粒状和条块状嵌入在铁素体基体上;远离焊缝区域,奥氏体形态更加规则,与母材组织过渡均匀^[12]。热影响区无显微裂纹,铁素体晶粒略微粗化,但无明显局部异常,无 σ 相和连续碳化物析出,有少量细小氮化物颗粒弥散分布(允许

存在,主要由于多层多道焊使得HAZ反复受热导致少量偏析^[13]),如图10所示。

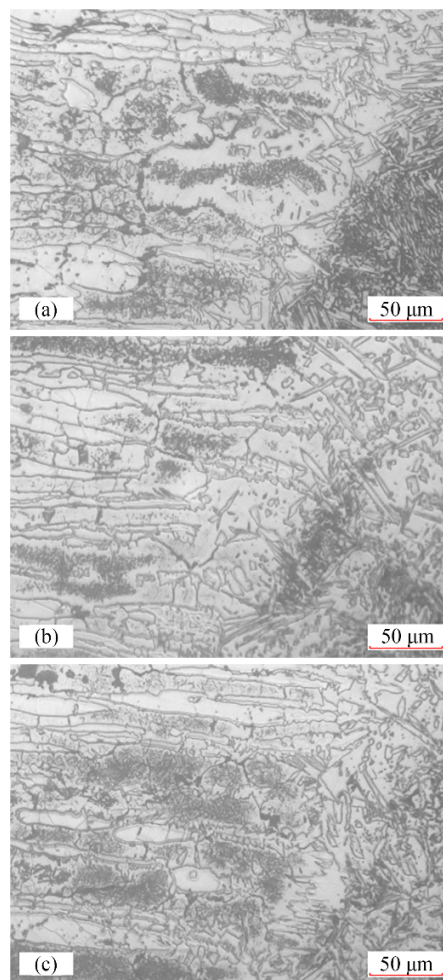


图10 热影响区显微金相组织

Fig. 10 Microstructure of heat-affected zone

远离焊缝中心的母材区域显微金相组织保持为原始板材经过固溶处理后的“双相网状”结构,铁素体相与奥氏体相均匀交错分布,相比接近50:50,两相界面平滑,晶界清晰,晶粒细小且均匀^[13]。铁素体呈连续基体相,晶粒形态为轻微拉长的等轴状;奥氏体组织以层状形态嵌入在铁素体基体中^[10]。母材区域无显微裂纹,无有害相和连续碳化物析出,有极少量的细小氮化物颗粒弥散分布,如图11所示。

4 结论与展望

本文依据 SL 36—2016《水工金属结构焊接通

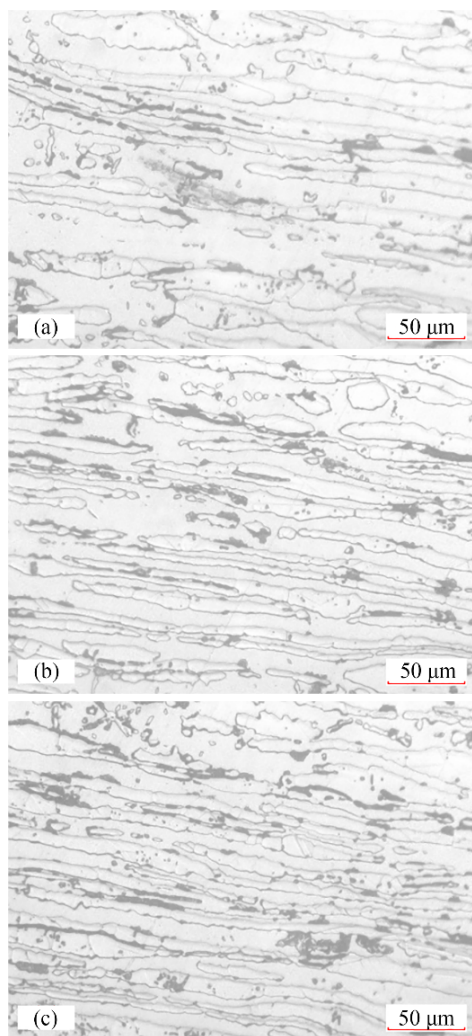


图 11 母材区域显微金相组织

Fig. 11 Microstructure of base metal zone

用技术条件》，以我国滨海的某百万千瓦级CAP1000型三代非能动压水堆核电机组冷源取水拦截清理系统中平板滤网设备材料“2507 超级双相不锈钢”为研究对象，选取药芯焊丝气体保护、多层多道、清根双面焊接方法进行焊接工艺评定，使用合理焊接工艺参数焊接试板，然后对试板进行无损检测以及破坏性检测试验，并分析试验结果，得出以下结论：

(1) 2507 超级双相不锈钢焊接性良好，药芯焊丝气体保护焊接方法适用。当焊接工艺参数为：层间温度小于 132℃、热输入为 9.00~12.48 kJ/cm 时，焊接效率极高，焊缝成形美观，焊缝质量较好，无焊接缺陷；焊缝中心力学性能优于热影响区和母材区域^[20]；各区域显微金相组织熔合过渡良好，双相比比例均衡，无有害相和沉淀物析出。

(2) 使用 E2594T1-1 药芯焊丝和 99.5% 纯度 CO₂ 气体进行保护焊接，严格遵循核安全文化及相关标准、工艺规程，得到的焊缝强度符合核电设备质量要求，具备较好塑性指标和使用寿命指标，耐晶间腐蚀性能极强，可以满足核电设备在复杂海洋腐蚀环境下的严格要求。

(3) 研究结果验证 2507 超级双相不锈钢非常适用于恶劣海洋条件下的关键核电设备的焊接制造，符合核级金属结构材料标准。试验所用焊接工艺可推广至其他核电设备水工金属结构焊接，可覆盖立向上焊外所有焊接位置，可用于 2~32 mm 母材厚度的清根双面焊或带衬垫的板状、管状对接焊缝、组合焊缝和任意厚度角焊缝接头。试验所用焊接工艺已经成功应用于多个核电站粗细格栅、钢闸门、清污机等设备生产制造，具有较高应用价值。

参考文献：

- [1] 郑洁, 余凡, 朱军民, 等. 海洋核动力装备国内外发展现状与前景展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(03): 62-73.
ZHENG J, YU F, ZHU J M, et al. Development status and prospects of marine nuclear power equipment at home and abroad[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 62-73.
- [2] 王薇, 何桂萍, 关晓健, 等. 我国滨海核电厂取排水方式现状及其对海洋生态环境的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2024, 51(06): 769-780.
WANG W, HE G P, GUAN X J, et al. Current status of water intake and discharge methods in coastal nuclear power plants and their impacts on marine ecological environment[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2024, 51(6): 769-780.
- [3] 林海. 核电厂海水过滤系统常见故障分析及应对措施[J]. 中国设备工程, 2023, (S2): 66-68.
LIN H. Common fault analysis and countermeasures of seawater filtration systems in nuclear power plants[J]. China Equipment Engineering, 2023(S2): 66-68.
- [4] 曹平. 某核电厂循环泵海洋生物入侵影响及应对措施浅析[J]. 中国核电, 2021, 14(05): 673-678.
CAO P. Analysis of marine bio-invasion impacts and countermeasures in a nuclear power plant circulation pump house[J]. China Nuclear Power, 2021, 14(5): 673-678.
- [5] 张文杰, 杨嘉, 张荣勇. 核电厂冷源系统防堵塞物大规

- 模暴发技术措施探讨[J]. 给水排水, 2020, 56(S1): 9-12.
- ZHANG W J, YANG J, ZHANG R Y. Discussion on technical measures to prevent large-scale blockage out-breaks in cold source systems of nuclear power plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(S1): 9-12.
- [6] 周彦彬, 徐杰. 核电鼓形滤网中撑管与连接法兰焊接工艺[J]. 焊接技术, 2022, 51(10): 68-72.
- ZHOU Y B, XU J. Welding process of support tube and connecting flange in nuclear power drum filter screen [J]. Welding Technology, 2022, 51(10): 68-72.
- [7] 汪建军, 李俊峰, 张守杰, 等. 板框式旋转滤网清污性能分析及提升研究[J]. 中国电力, 2019, 52(02): 165-171.
- WANG J J, LI J F, ZHANG S J, et al. Analysis and improvement of decontamination performance of plate-frame rotating filter screen [J]. China Electric Power, 2019, 52(2): 165-171.
- [8] 唐楚天. 海洋环境下2507超级双相不锈钢的腐蚀行为研究[D]. 云南: 昆明理工大学, 2020.
- TANG C T. Study on corrosion behavior of 2507 super duplex stainless steel in marine environment [D]. Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [9] 袁孟琪. S32750超级双相不锈钢的腐蚀行为研究[D]. 江苏: 东南大学, 2019.
- YUAN M Q. Study on corrosion behavior of S32750 super duplex stainless steel [D]. Jiangsu: Southeast University, 2019.
- [10] 王广进. SAF2507超级双相不锈钢焊接接头组织及性能研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2019.
- WANG G J. Study on microstructure and properties of SAF2507 super duplex stainless steel welded joint [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [11] 高站起. 超级双相不锈钢焊接接头组织和腐蚀性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- GAO Z Q. Study on microstructure and corrosion properties of super duplex stainless steel welded joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] 楚昊然. UNS S32750双相不锈钢焊接热影响区组织演变规律与性能研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- CHU H R. Study on microstructure evolution and properties of welding HAZ in UNS S32750 duplex stainless steel [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.
- [13] 赵辉. 超级双相不锈钢SAF2507焊接接头的微观组织演变和性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- ZHAO H. Study on microstructure evolution and properties of SAF2507 super duplex stainless steel welded joints [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.
- [14] 王琦. SAF 2507超级双相不锈钢非熔化极电弧焊接接头组织性能研究[D]. 山东: 山东大学, 2023.
- WANG Q. Study on microstructure and properties of non-consumable arc welded joints of SAF2507 super duplex stainless steel [D]. Shandong: Shandong University, 2023.
- [15] 白玉洁. UNS S32750超级双相不锈钢CMT+P焊接工艺及组织性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- BAI Y J. Research on CMT+P welding process and microstructure-properties of UNS S32750 super duplex stainless steel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [16] Li T, Wang K, Lei Y. A Review of Welding Process for UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel [J]. Materials, 2024, 17(21): 5215-5215.
- [17] Świerczyńska A, Łabanowski J, Fydrych D. The Effect of Welding Conditions on Mechanical Properties of Superduplex Stainless Steel Welded Joints [J]. Advances in Materials Science, 2014, 14(1): 14-23.
- [18] Kumar S, Srinivas N M, Kumar N, et al. Evaluation of microstructural and mechanical qualities in optimised TIG-welded SDSS 2507 joints [J]. Materials Science-Poland, 2024, 42(4): 163-179.
- [19] Baskar C S, Rama S R K, Sundaravel V, et al. Effect of welding processes on ferrite content, microstructure and mechanical properties of super duplex stainless steel 2507 welds [J]. Materials Testing, 2023, 65(12): 1836-1844.
- [20] Tamás T, Christin A H, Viktor K, et al. Microstructural and mechanical properties of electron beam welded super duplex stainless steel [J]. Welding in the World, 2024, 68(8): 1929-1940.
- [21] 刘爱国, 刘震昊. 我国近10年双相不锈钢焊接研究进展分析[J]. 焊接技术, 2024, 53(08): 1-9.
- LIU A G, LIU Z H. Analysis of welding research progress on duplex stainless steel in China over the past decade [J]. Welding Technology, 2024, 53(8): 1-9.
- [22] 王新, 刘洁, 李岩, 等. SAF2507超级双相不锈钢焊接技术研究现状[J]. 山西冶金, 2016, 39(01): 30-34.
- WANG X, LIU J, LI Y, et al. Research status of SAF2507

- super duplex stainless steel welding technology [J]. Journal of Shanxi Metallurgy, 2016, 39(1): 30-34.
- [23] 李添祺, 张莹莹, 高磊, 等. 双相不锈钢药芯焊丝在核电领域的应用前景[J]. 焊接技术, 2017, 46(11): 69-72.
- LI T Q, ZHANG Y Y, GAO L, et al. Application prospects of duplex stainless steel flux-cored wire in nuclear power field [J]. Welding Technology, 2017, 46(11): 69-72.
- [24] 张迪, 马德志, 王英杰, 等. 超级双相不锈钢焊接用药芯焊丝的研制[J]. 焊接技术, 2022, 51(02): 78-83.
- ZHANG D, MA D Z, WANG Y J, et al. Development of flux-cored wire for super duplex stainless steel welding [J]. Welding Technology, 2022, 51(2): 78-83.
- [25] 李义民, 张凯, 任世宏, 等. 超级双相不锈钢药芯焊丝堆焊技术在压力容器制造中的应用[J]. 电焊机, 2015, 45(09): 189-192.
- LI Y M, ZHANG K, REN S H, et al. Application of super duplex stainless steel flux-cored wire surfacing technology in pressure vessel manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(9): 189-192.
- [26] 刘永生, 杜爱国. 某核电厂 SAF2507 双相不锈钢管道开裂原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2024, (06): 125-129+136.
- LIU Y S, DU A G. Cause analysis of SAF2507 duplex stainless steel pipeline cracking in a nuclear power plant [J]. Metal Working (Thermal Processing), 2024(6): 125-129+136.
- [27] 程必刚. 超级双相不锈钢的焊接性及焊接技术研究[J]. 中国设备工程, 2024, (06): 198-200.
- CHENG B G. Study on weldability and welding technology of super duplex stainless steel [J]. China Equipment Engineering, 2024(6): 198-200.
- [28] 葛华, 王杰. UNS S32750 超级双相不锈钢焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(06): 96-100.
- GE H, WANG J. Research on welding process of UNS S32750 super duplex stainless steel [J]. Metal Working (Thermal Processing), 2024(6): 96-100.
- [29] 李鹏飞, 王建涛. 超级双相不锈钢 S32750 焊接工艺研究[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(06): 1-5+17.
- LI P F, WANG J T. Study on welding process of super duplex stainless steel S32750 [J]. Chemical Equipment and Piping, 2022, 59(6): 1-5+17.
- [30] 栗宏伟, 赵志毅, 薛润东. 热输入对 SAF2507 超级双相不锈钢焊接接头显微组织及硬度的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(02): 20-26+114.
- LI H W, ZHAO Z Y, XUE R D. Effect of heat input on microstructure and hardness of SAF2507 super duplex stainless steel welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 20-26+114.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>