

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.11

手工钨极氩弧焊修复密封面不锈钢堆焊层 工艺技术研究

柏忠炼, 李诗易, 叶义海, 刘钺丹, 薛敬凯

中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041

摘要: 针对核反应堆压力容器密封面308L不锈钢堆焊层的局部修复需求, 采用手工钨极氩弧焊技术, 在SA508-III低合金钢基材的模拟件上开展不同深度(1 mm、2 mm、3 mm)的补焊试验, 系统研究焊接热影响及焊趾区变形特征。结果表明: 当不锈钢堆焊层总厚度为6 mm、焊接电流为90 A时, 补焊深度达3 mm仍不会对下层低合金钢组织产生热影响, 其微观结构保持块状铁素体与珠光体的原始形态, 无硬脆马氏体生成; 焊缝及热影响区显微硬度分布稳定(焊缝区约210 HV, 不锈钢层约200 HV, 低合金钢母材约120 HV)。但补焊后焊趾区存在最大19.614 μm 的凹陷, 需通过后续机加工消除以保证密封面平面度。本研究首次明确了手工钨极氩弧焊修复308L堆焊层的安全工艺窗口(≤ 3 mm补深/90 A电流), 为核反应堆压力容器密封面的局部精准修复提供了关键技术依据。

关键词: 手工钨极氩弧焊; 核反应堆压力容器; 密封面修复; 不锈钢堆焊层; 热影响区; 焊趾变形

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0106-06

Research on the Process Technology of Manual Tungsten Argon Arc Welding for Repairing Stainless Steel Surfacing Layer on Sealing Surface

BAI Zhonglian, LI Shiyi, YE Yihai, LIU Chengdan, XUE Jingkai

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

Abstract: In response to the local repair needs of the 308L stainless steel cladding layer on the sealing surface of nuclear reactor pressure vessels, manual tungsten inert gas arc welding technology was employed. Welding tests were conducted on SA508-III low-alloy steel base material mock-ups at different depths (1 mm, 2 mm, 3 mm) to systematically study the thermal impact of welding and the deformation characteristics of the weld toe area. The results show that when the total thickness of the stainless steel cladding layer is 6 mm and the welding current is 90 A, a repair depth of up to 3 mm will not cause thermal effects on the underlying low-alloy steel structure. Its microstructure remains in the original form of blocky ferrite and pearlite, with no hard and brittle martensite formation. The microhardness distribution in the weld and heat-affected zone is stable (weld area approximately 210 HV, stainless steel layer approximately 200 HV, low-alloy steel base material approximately 120 HV). However, after repair, there is a maximum depression of 19.614 μm in the weld toe area, which needs to be eliminated by subsequent machining to ensure the flatness of the sealing surface. This study for the first time defines the safe process window for manual tungsten inert gas arc welding repair of the 308L cladding layer (≤ 3 mm repair depth / 90 A current), providing a key technical basis for the precise local repair of the sealing surface of nuclear reactor pressure vessels.

Keywords: manual tungsten inert gas welding; nuclear reactor pressure vessel; sealing surface repair; stainless steel cladding layer; heat affected zone; weld toe deformation

引用格式: 柏忠炼, 李诗易, 叶义海, 等. 手工钨极氩弧焊修复密封面不锈钢堆焊层工艺技术研究[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 106-111.

Citation: BAI Zhonglian, LI Shiyi, YE Yihai, et al. Research on the Process Technology of Manual Tungsten Argon Arc Welding for Repairing Stainless Steel Surfacing Layer on Sealing Surface[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 106-111.

收稿日期: 2024-07-15 修回日期: 2024-12-01

作者简介: 柏忠炼(1991—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事特种焊接工艺研发工作。E-mail: baizhonglian@126.com。

0 引言

在国内外压水堆核电站中,308L由于具有优异的耐腐蚀性和力学性能,常作为管道内壁、稳压器内壁、安全端接管、反应堆压力容器密封面等设备的耐蚀层堆焊材料^[1-4]。然而,在一定浓度含氯介质的高温环境中,308L堆焊层易发生点蚀、缝隙腐蚀及应力腐蚀开裂^[5-6]、导致密封功能退化甚至失效^[5-6]。工程实践表明,秦山核电站1991年开盖检查时发现压力容器封头密封槽及筒体法兰密封面存在点状腐蚀^[7],斯洛伐克 Bohunice 核电站 V-213 型3、4号机组更是因密封面缺陷分别于2004年、2005年实施整圈焊接修复,凸显该类部件维修的紧迫性。

当前国内核电站逐步进入设计寿期末期及延寿阶段,核电运维作为工作重心之一。反应堆压力容器密封面作为一回路压力边界的核心构件,其应急与预防性维修技术体系的构建已成为核电运维领域的关键课题。大量工程应用案例表明,针对密封面维修可采用局部研磨、整面焊接和机加工方式予以修复^[8-10]。局部研磨适用于轻微腐蚀损伤的修复,但难以恢复密封面的平面度;整面焊接可以彻底消除腐蚀损伤,但成本较高且施工难度大;机加工则需要在焊接修复后进行,以确保密封面的平面度满足要求。值得注意的是,针对核电厂反应堆压力容器密封面的局部焊接修复技术,目前国内外研究鲜有报道。其技术瓶颈主要体现在两方面:一是补焊过程中的热输入可能导致低合金钢母材组织劣化,进而影响结构承载能力;二是焊接局部变形可能超出后续机加工修正范围,危及密封性能。

鉴于此,本研究采用手工钨极氩弧焊技术,针对核反应堆压力容器密封面308L耐蚀层开展局部修复试验,通过设置不同补焊深度,系统分析低合金钢侧组织演变规律及焊趾区变形特征,旨在为后续机加工工艺优化提供理论依据与试验支撑。

1 试验方法

1.1 试验件制备

试验基材选用SA508-III低合金钢,尺寸为300 mm×300 mm×50 mm,其化学成分如表1所示。

基材表面处理采用多层堆焊工艺:首先以焊条电弧焊堆焊309L过渡层,随后堆焊308L耐蚀层;堆焊完成后经600℃热处理,再通过机械加工确保不锈钢复合层(309L+308L)总厚度达6 mm,且表面平面度控制在0.1 mm以内,粗糙度为Ra0.8。

表1 SA508-III化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical Composition of SA508-III (wt. %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
0.30	0.29~1.06	0.035	0.035	0.10	0.40	0.40	0.15	0.40	0.08

1.2 试验方法

在试板表面模拟缺陷去除,加工直径5 mm,深度分别为1 mm、2 mm、3 mm的圆形凹坑(凹坑底部圆滑过渡,间距50 mm),如图1所示。采用手工钨极氩弧焊进行修复,焊接参数基于前期工艺试验优化确定:焊接电流90 A,焊丝为 $\varnothing 1.0$ mm的ER308L,保护气体为99.99%Ar(流量10 L/min),平焊位置。

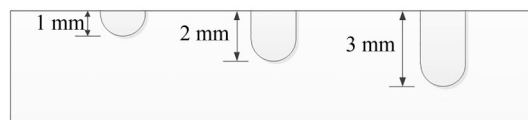


图1 不同深度补焊凹坑示意

Fig. 1 Schematic diagram of repairing welding pits at different depths

焊后沿焊缝中间切取截面金相试样,如图2所示,采用240#、600#、800#、1000#、1500#砂纸打磨,并抛光处理。采用两步腐蚀法处理:先在低合金钢区域涂覆指甲油保护,以10%草酸溶液(6 V电压)电解45~60 s;去除指甲油后,用3%硝酸酒精溶液侵蚀低合金钢。使用OLS 4000激光共聚焦显微镜观察横截面微观组织及表面形貌,分析焊接变形特征;采用INNOVATEST FALCON 500显微硬度计测试硬度分布,测试条件为载荷10 kgf,保压15 s,测点间距0.5 mm。

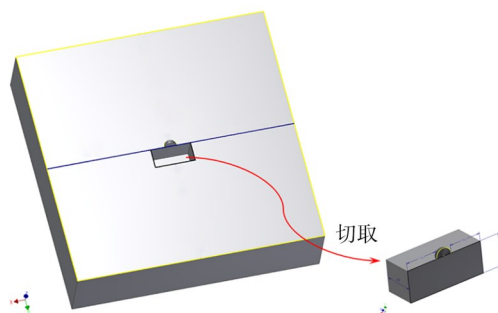


图2 截面金相取样示意

Fig. 2 Schematic diagram of cross-sectional metallographic sampling

2 结果与分析

2.1 不同补焊深度后低合金钢侧组织分析

采用 90 A 电流对不同深度凹坑补焊后,截面宏观形貌如图 3 所示。结果显示,各深度补焊的焊缝组织均呈现为典型的柱状晶组织,且无裂纹、未熔合、夹渣、气孔等缺陷,满足 ASME 核 I 级焊缝质量要求。深度 1 mm 凹坑补焊后,补焊区原始堆焊层厚度 6.185 mm,焊缝及热影响区范围约为 2.471 mm,补焊区域与黑色区域(即指甲油覆盖区域)之间的带状区(原不锈钢耐腐蚀层),宏观组织形貌未发生明显变化;深度 2 mm 凹坑补焊后,原始堆焊层厚度为 6.662 mm,焊缝及热影响区范围扩展至 3.563 mm,剩余的不锈钢耐蚀层从左至右组织形貌保持一致;深度 3 mm 凹坑补焊后,在补焊区原始堆焊层 6.717 mm 厚度下,焊缝及热影响区范围约 3.809 mm,并未突破不锈钢耐蚀层厚度。

进一步从微观上分析不锈钢耐蚀层下方低合金钢侧的组织状态。由图 4c、4e、4g 可知,在 200 倍放大倍数下,不锈钢耐蚀层与低合金钢熔合区的不锈钢耐蚀层侧,在奥氏体晶界及晶内有少量的块状 δ 铁素体^[11],且在靠近熔合线处,呈现轻微的脱碳,与图 4a 未补焊区的形貌一致。总体上,不同深度凹坑补焊后低合金钢界面的微观组织形貌相似,且与未补焊的形貌特征相同(见图 4a)。不同深度凹坑补焊后在放大 1 000 倍下的组织形貌与未补焊区低合金钢侧特征一致,即低合金钢一侧组织为块状铁素体,在铁素体的晶内和晶界处分布有小岛状、呈灰色的珠光体,以及少量的残余奥氏体;随着与熔合线距离的增大,低合金钢组织均为典型的粒状贝氏体,均无板条、片状的硬脆马氏体劣化组织特征。结合脱碳区与未补焊区的一致性可知,该脱碳现象源于不锈钢耐蚀层制备过程,与补焊无关。

综上,保守决策,当不锈钢耐蚀层厚度 ≥ 7 mm 时,采用 90 A 焊接电流补焊缺陷去除后 3 mm 以内的待焊坡口,不会对耐蚀层下方的低合金钢组织产生热影响,可确保其原始力学性能。

2.2 补焊后显微硬度分布

对最大深度为 3 mm 的凹坑试样,焊后沿焊缝 $\rightarrow$ 不锈钢堆焊层 $\rightarrow$ 低合金钢母材路径进行显微硬

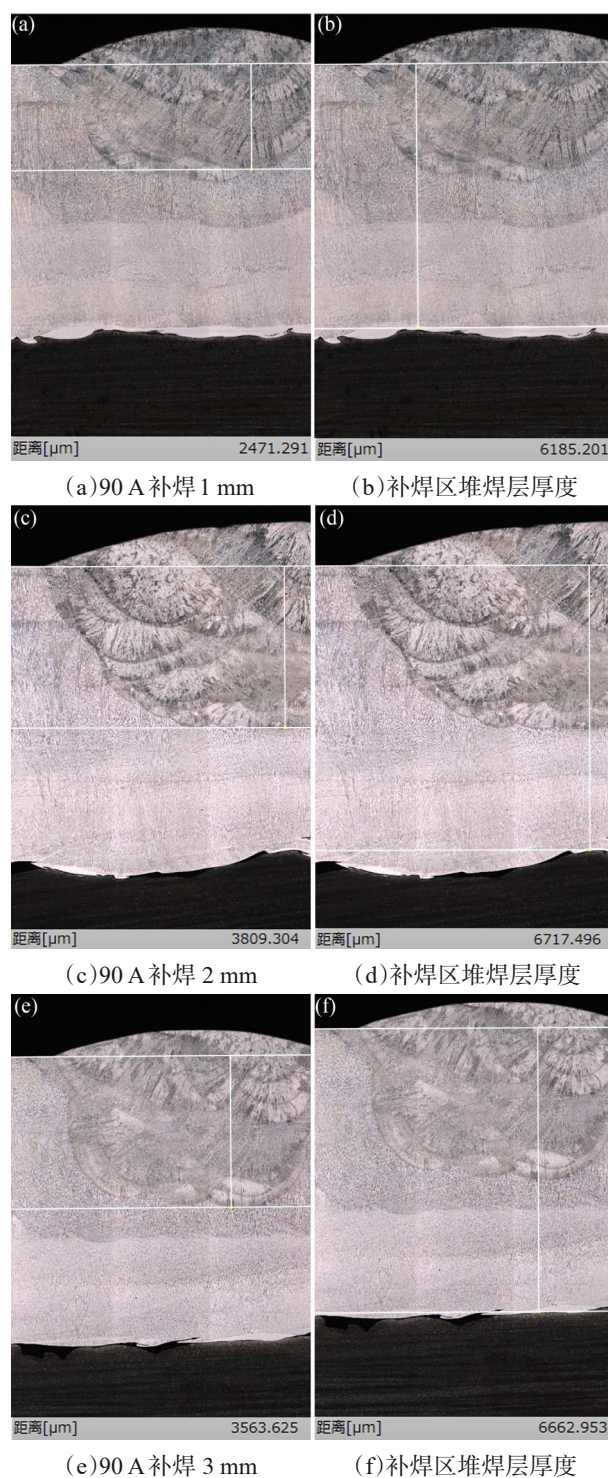


图 3 不同补焊深度截面金相

Fig. 3 Metallography of sections with different repair welding depths 度测试,结果如图 5 所示。由测试数据可知,焊缝区显微硬度约为 210 HV,不锈钢堆焊层显微硬度约为 200 HV,低合金钢母材显微硬度约为 120 HV。该硬度分布特征与前述微观组织分析结果一致:低合

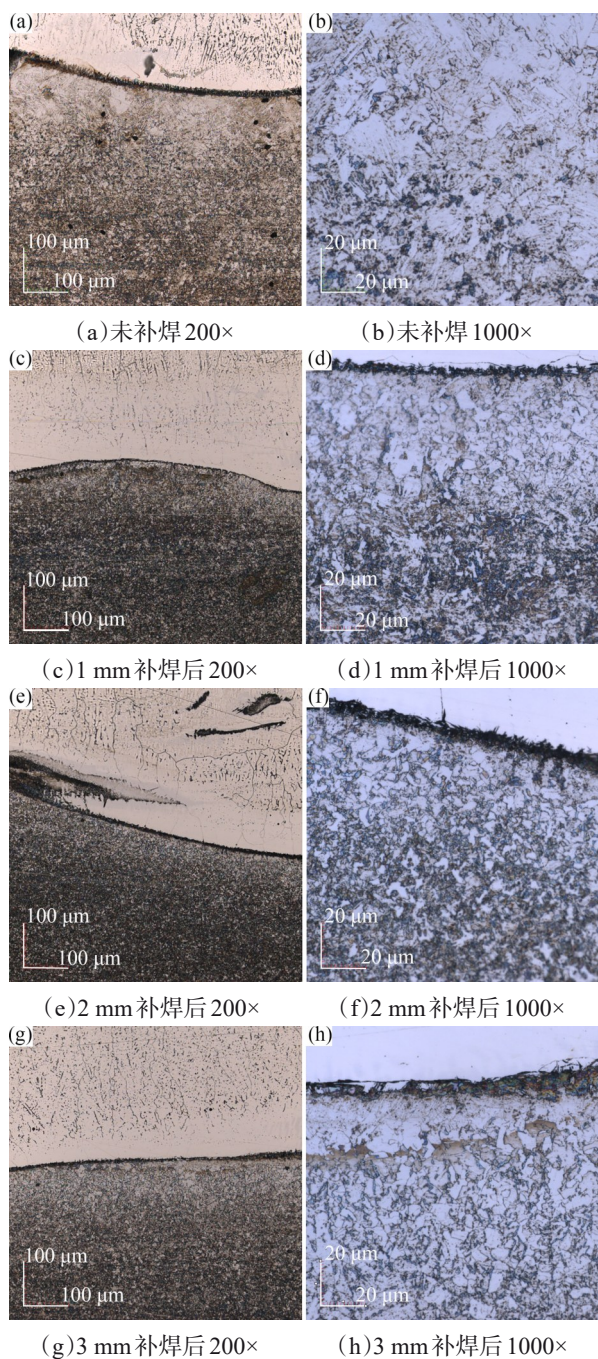


图4 补焊不同深度后低合金钢界面微观组织

Fig. 4 Interface microstructure of low alloy steel after welding at different depths

金钢侧未出现硬脆相组织,故其硬度保持母材原始水平,且低于回火焊接工艺下低合金钢热影响区的典型显微硬度值^[12],进一步印证了90 A焊接电流下补焊过程未对低合金钢母材造成热损伤。

2.3 补焊深度对焊趾区域变形影响

焊趾区变形直接影响后续加工后的密封面平

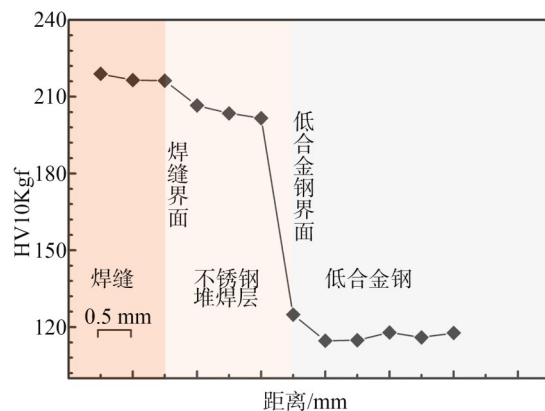
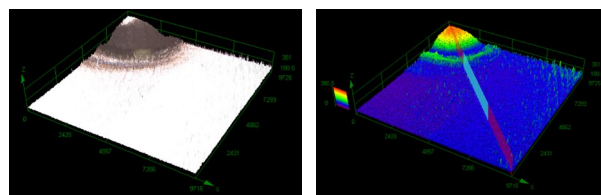


图5 补焊3 mm凹坑显微硬度分布

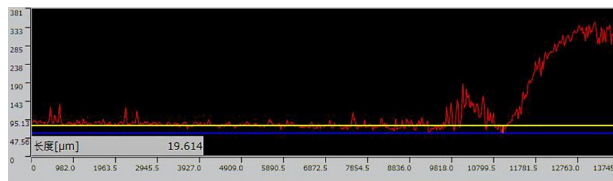
Fig. 5 Microhardness distribution of 3 mm pit after welding repair

面度,因此针对不同补焊深度(1 mm、2 mm、3 mm)的试样表面形貌进行表征。结果显示,所有试样焊趾区域均存在下凹现象,如图6~图8所示。其中1 mm补深时下凹量最大,达19.614 μm;随补深增加,下凹量逐渐减小,2 mm补深时下凹量为14.458 μm,3 mm补深时降至13.179 μm。值得注意的是,各试样焊趾邻近母材侧均伴随凸起特征。从机理上分析,若暂不考虑焊接热变形的影响,补焊终末阶段的熔池行为可能是导致该现象的关键:凹坑表面母材熔化形成熔池后,在电弧力的外推作用下,液相金属向熔池边缘迁移形成波峰状凸起;而当焊丝熔化金属未能完全填充熔池外围区域时,该凸起形态被保留,最终导致焊趾区呈现“内侧凹陷-外侧凸起”的变形特征。这一变形规律为后续机加工工艺参数的制定提供了量化依据,需通过精准控制加工



(a) 三维扫描实物

(b) 三维扫描云图



(c) 焊趾区剖面数据

图6 1 mm凹坑补焊后局部形貌表征

Fig. 6 Local morphology characterization of 1 mm pit after welding repair

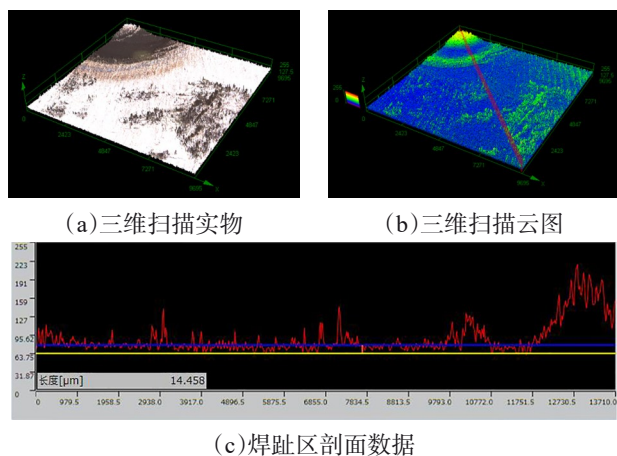


图7 2 mm 凹坑补焊后局部形貌表征

Fig. 7 Local morphology characterization of 2 mm pit after welding repair

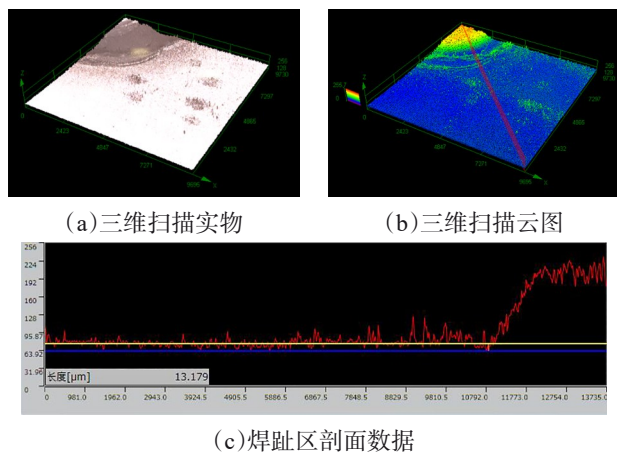


图8 3 mm 凹坑补焊后局部形貌表征

Fig. 8 Local morphology characterization of 3 mm pit after welding repair

余量以消除凹坑对密封面平面度的影响。

3 结论

本研究通过手工钨极氩弧焊对核反应堆压力容器密封面模拟件 308L 不锈钢堆焊层开展局部修复试验,系统探究了补焊深度对低合金钢组织、显微硬度及焊趾区变形的影响,主要结论如下:

(1)在不锈钢堆焊层总厚度为 6 mm 的条件下,采用 90 A 焊接电流对深度 ≤ 3 mm 的凹坑进行补焊时,焊缝及热影响区未突破不锈钢耐蚀层,低合金钢侧组织保持原始特征——以块状铁素体、珠光体及粒状贝氏体为主,无硬脆马氏体生成,且显微硬

度稳定在 120 HV 左右,证实焊接热输入未对低合金钢母材造成组织劣化或性能损伤。

(2)补焊后焊缝区显微硬度约 210 HV,不锈钢堆焊层约 200 HV,低合金钢母材约 120 HV,硬度梯度分布合理,与微观组织分析结果一致,进一步验证了该工艺参数下焊接过程的安全性。

(3)不同深度补焊后,焊趾区均存在凹陷现象,其中 1 mm 补深时凹陷量最大(19.614 μm),随补深增加凹陷量逐渐减小,且焊趾邻近母材侧伴随凸起。该变形特征提示后续需通过精准机加工消除凹陷,以保障密封面平面度合格。

(4)密封面手工补焊修复时,应准确控制焊枪及送丝,确保熔融金属充分铺展覆盖表面母材熔化区。

参考文献:

- [1] 刘金华,文燕,张雪梅,等.反应堆压力容器密封面材料非正常工况下的腐蚀性能研究[J].核动力工程,2012,33(1):83-87.
LIU J H, WEN Y, ZHANG X M, et al. Corrosion Properties of Sealing Surface Material for RPV under Abnormal Working Conditions [J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(1): 83-87.
- [2] Liu F, Hwang Y H, Nam S W. Precipitation of σ -phase and creep-fatigue behavior of 308L steel weldment [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 483: 418-421.
- [3] 王莉,杜玉华. AP1000 核岛主设备不锈钢堆焊层首层铁素体含量研究[J].电焊机,2019,49(12):29-31.
WANG L, DU Y H. Study of ferrite number of the first layer for AP1000 nuclear island equipment stainless steel cladding [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(12): 29-31.
- [4] 林晓冬,彭群家,韩恩厚,等.热老化对核用 308L 不锈钢焊材的显微结构与腐蚀行为影响研究[C]//第十届全国腐蚀大会,2024.
- [5] 卢媛媛,刘金华,龚宾,等. 308L 不锈钢堆焊层在含氯介质中的腐蚀行为研究[J].东方汽轮机,2012(3):45-50.
LU Y Y, LIU J H, GONG B, et al. Corrosion Properties of 308L Stainless Steel in Chloride Solution [J]. Dongfang Turbine, 2012(3): 45-50.
- [6] 曹鑫源. 核电堆焊材料 308L 的组织,热老化行为及其对高温水氧化行为的影响[D]. 北京:北京科技大学,2018.

- CAO X Y. Microstructure, thermal aging behavior of nuclear grade 308L cladding material and their effects on oxidation behavior in high temperature water [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [7] 陆传根,林兴华.核电站反应堆压力容器法兰密封面腐蚀机理的分析[J].压力容器,2004,21(5):41-44.
LU C G, LIN X H. Analysis of Corrosion on Flange Surface of RPV for NPP [J]. Pressure Vessel Technology, 2004, 21(5): 41-44.
- [8] 牟杨. 核电厂“死管段”边界阀门密封面新材料(NOREM02)研究[C]//中国核学会, 2023.
- [9] 杨美昆. 密封面堆焊修复工艺技术[J]. 中国化工装备, 2020(4): 18-20.
YANG M K. Surfacing Welding Repair Technology of Sealing Surface [J]. China Chemical Industry Equipment, 2020(4): 18-20.
- [10] 董振富. 嵌接环槽界面防水法兰头: CN201821350559.7 [P]. 2019-06-04.
- [11] 麻丁龙,牛锐锋,朱平,等. 热处理与热老化对核级308L焊缝组织的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2016(6): 31-34.
MA D L, NIU R F, ZHU P, et al. Effect of heat treatment and thermal aging on microstructure of nuclear grade 308L weld [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016(6): 31-34.
- [12] 叶义海,郑德旭,罗绪珍,等. 核级低合金钢手工回火焊接热影响区组织性能研究[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 34-39.
YE Y H, ZHENG D X, LUO X Z, et al. Research on the microstructure and properties of the low alloy steel heat-affected zone by the manual temper bead technique [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(5): 34-39.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>