

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.17

不同焊接方法对双相不锈钢焊接接头性能的影响

王名利¹, 代绪成², 尚用甲², 孙小磊², 杭建伟¹, 张剑利¹

1. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461

摘要: 对比了钨极氩弧焊(GTAW)和焊条电弧焊(SMAW)对UNS31803双相不锈钢焊接接头性能的影响。通过金相显微镜观察焊接接头的组织结构, 采用ASTM E562标准结点法测定铁素体相比比例, 并测试焊接接头力学性能。结果表明, 两种焊接方法所得焊接接头的相比比例和组织形貌存在差异, SMAW焊缝为针状和少量块状奥氏体组织, GTAW焊缝由块状组织聚集形成针状奥氏体组织为主。两种焊接方法的焊缝和热影响区的铁素体比例均在35%~65%的合理范围内。焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能与铁素体含量密切相关, 随着铁素体含量的增加, 硬度值增加, 冲击吸收功降低, 耐蚀性能降低。在实际工程运用中, 为了提高现场焊接生产效率, GTAW主要用于小管径及薄壁的双相不锈钢焊接, 大管径及厚壁的双相不锈钢采用GTAW打底+SMAW填充的焊接方法。

关键词: 双相不锈钢; 焊接方法; 力学性能; 金相组织; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG457.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2025)04-0128-06

Influence of Different Welding Methods on the Performance of Duplex Stainless Steel Welded Joints

WANG Mingli¹, DAI Xucheng², SHANG Yongjia², SUN Xiaolei², HANG Jianwei¹, ZHANG Jianli¹

1. Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 26652, China

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China

Abstract: This paper compares the effects of Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Shielded Metal Arc Welding (SMAW) on the performance of UNS31803 duplex stainless steel welded joints. The microstructure of the welded joints was observed through a metallographic microscope, the ferrite phase ratio was determined using the ASTM E562 standard node method, and the mechanical properties of the welded joints were tested. The results show that there are differences in the phase ratio and tissue morphology of the welded joints obtained by the two welding methods. The SMAW weld seam consists of needle-like and a small amount of blocky austenite tissue, while the GTAW weld seam is mainly composed of blocky tissues gathered to form needle-like austenite tissue. The ferrite ratio in the weld seam and heat-affected zone of both welding methods is within the reasonable range of 35% to 65%. The mechanical properties and corrosion resistance of the welded joints are closely related to the content of ferrite. As the ferrite content increases, the hardness value increases, the impact absorption work decreases, and the corrosion resistance decreases. In actual engineering applications, in order to improve the efficiency of field welding production, GTAW is mainly used for the welding of small diameter and thin wall duplex stainless steel, while the combination of GTAW backing and SMAW filling is used for the welding of large diameter and thick wall duplex stainless steel.

Keywords: duplex stainless steel; welding methods; mechanical properties; metallographic structure; corrosion resistance

引用格式: 王名利, 代绪成, 尚用甲, 等. 不同焊接方法对双相不锈钢焊接接头性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 128-133.

Citation: WANG Mingli, DAI Xucheng, SHANG Yongjia, et al. Influence of Different Welding Methods on the Performance of Duplex Stainless Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 128-133.

收稿日期: 2025-02-07 修回日期: 2025-04-02

作者简介: 王名利(1985—), 男, 学士, 工程师, 主要从事海洋石油工程质量控制与焊接工艺设计开发等研究。E-mail: wangml7@cnooc.com.cn。

0 引言

双相不锈钢是指金相组织为铁素体和奥氏体、其体积分数约各占 50% 的不锈钢^[1]。S31803 双相不锈钢是由 21%Cr、2.5%Mo 和 5.5% 镍氮合金构成的不锈钢,具有强度高、冲击韧性好,以及良好的整体和局部抗应力腐蚀能力等优点,被广泛用于海洋工程、石油化工、特种船舶、核电和建筑等行业^[2-5]。

双相不锈钢在海洋石油工程行业中主要运用于海底油气输送管道、水下设备与采油树、海上平台海水处理系统等,确保其在长期处于富氯离子的情况下不发生腐蚀泄漏,保障海上石油开采的安全和稳定,并减少维护成本。双相不锈钢在海洋石油工业中运用厚度范围涵盖 2~50 mm,本文针对不同厚度的双相不锈钢,分别采用不同的高效焊接方法进行焊接,通过试验对比分析优化工艺参数、确保组织平衡、避免性能劣化,从而满足苛刻的海洋环境要求。

双相不锈钢导热系数大、线膨胀系数小^[6]、热裂倾向小,具有良好的焊接性。其焊接最大问题是焊接热循环对焊接接头组织的影响,进而对焊接接头力学性能和耐蚀性能有明显的影[7-8]。徐玉松等人^[9]比较了 00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢 SMAW 焊和 TIG 焊接头的力学性能,发现 TIG 要明显好于 SMAW。代维等人^[10]也比较了 S22053 双相钢采用 TIG 打底+SAW 盖面、SMAW、SAW 三种工艺所获接头的组织和力学性能,发现 SAW 所获接头的综合力学性能较好。本文结合实际施工中常用的焊接方法,考虑施工工效和工件参数,分别采用钨极氩弧焊(GTAW)和焊条电弧焊(SMAW)焊接 UNS31803 双相不锈钢钢管,焊后对焊接接头进行金相组织分析和力学性能试验,研究这两种焊接工艺对 S31803 双相不锈钢焊接接头组织、力学性能和耐蚀性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 焊接材料及工艺

试验母材分别选用为 $\varnothing 300\text{ mm}\times 4.57\text{ mm}$ 和 $\varnothing 300\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 的 ASTM A240 Gr UNS31803 双

相不锈钢管材,分别采用 GTAW 和 SMAW 两种方法进行对接焊。GTAW 选用直径为 2.0 mm 的 AWS A5.9 ER2209 焊丝, SMAW 选用直径为 2.6 mm 的 AWS A5.4 E2209-16 焊条。管材和焊材的化学成分如表 1 所示。

表 1 管材和焊材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of pipe and welding material (wt. %)									
材质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
S31803	0.020	0.481	1.387	0.024	0.004	22.38	5.498	2.983	0.103
ER2209	0.017	0.520	1.27	0.017	0.002	22.14	7.85	2.77	0.17
E2209-16	0.026	0.80	0.84	0.020	0.018	22.6	8.73	3.01	0.15

采用单边 V 形坡口,坡口角度 60°,钝边 1~2 mm,根部间隙 2~4 mm。焊接位置为 5G,焊接过程中不转动钢管。GTAW 保护气体为 99.99% 高纯氩气,焊接热输入控制在 0.6~1.5 kJ/mm,层间温度不超过 150 ℃。具体焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameter						
焊接方法	焊道	填充金属	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	氩气流速 /L·min ⁻¹
GTAW	打底	Sandvik 22.8.3L	90~120	10~12	60~80	15~25
	填充		100~140	10~13	60~180	
	盖面		100~140	10~13	60~180	
SMAW	打底	E2209-16	90~110	22~24	160~200	—
	填充		90~120	22~24	160~200	
	盖面		90~120	24~26	160~200	

1.2 金相组织观察和铁素体相比例测定

对焊接接头金相试样进行粗磨、细磨、抛光,然后将试样放在 90~93 ℃的铁氰化钾碱性溶液(30 g KOH+30 g K₃Fe(CN)₆+100 mL H₂O)中进行着色腐蚀,腐蚀时间约为 3 min。着色腐蚀后采用 OLY MPUS-GX51 金相显微镜分别观察焊缝、热影响区和母材的显微组织。

参照 ASTM E562 标准结点法,采用人工数点法进行铁素体相比例测定。在焊缝和热影响区各区域分别选取 8 个测试视野,每个测试视野网格包含 25(5×5)个等间距的点,合计 200 点。

1.3 力学性能试验

根据 ASME Section IX 的要求加工制作拉伸、弯曲和冲击试验件。采用 WAW-1000C 型电液伺服万能试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 10 mm/min。采用 WDW-300E 型电子式万能试验机进行弯曲试

验, GTAW 和 SMAW 的弯曲压头直径分别为 15 mm 和 38.1 mm, 弯曲角度均为 180° 。在焊接接头的焊缝中心、熔合线、熔合线+1 mm 和母材分别取 10 mm $\times$ 2.5 mm $\times$ 55 mm 的 V 型缺口冲击试样各一组, 在 JBW-300B 型屏显冲击试验机上进行 -50°C 低温冲击试验。

1.4 硬度测试

采用 VH-5AC 型维氏硬度计分别测量焊接接头焊缝、热影响区和母材的维氏硬度, 其中焊缝和母材的测量间距为 1 mm, 热影响区的测量间距为 0.5 mm。载荷为 10 kg, 加载时间 15 s。

1.5 三氯化铁点蚀试验

采用线切割加工工艺垂直于焊缝加工点蚀试样, GTAW 和 SMAW 分别加工 4 mm $\times$ 25 mm $\times$ 50 mm 和 15 mm $\times$ 25 mm $\times$ 50 mm 试样各 3 件, 并用 1000# 砂纸对试样的 6 个加工面进行抛光处理。依据 ASTM G48-11 (2020)《采用三氯化铁溶液测定不锈钢及合金耐点蚀和抗裂口腐蚀的标准试验方法》中方法 A 测定焊接接头的点蚀速率。依据标准配制 6% FeCl_3 溶液, 溶液成分为 100 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +900 mL 蒸馏水, 实验温度为 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$, 腐蚀时间为 72 h。

2 试验结果与分析

2.1 金相观察与分析

母材及两种焊接方法所得焊接接头焊缝和热影响区的组织形貌如图 1、图 2 所示, 为典型的双相不锈钢组织, 铁素体(δ , 灰黑色)与奥氏体(γ , 白色)呈近似 1:1 的体积比(见图 1)。两相沿钢管原始轧制方向呈带状交替分布, 铁素体基体中弥散分布着条带状奥氏体。

GTAW 焊缝(见图 2b)奥氏体整体呈针状分布, 由等轴块状奥氏体聚集而成, 聚集的块状组织之间存在明显分界线。这是由于 GTAW 热输入较低(0.6~1.5 kJ/mm), 奥氏体组织在 $\delta \rightarrow \gamma$ 二次相变过程中冷却速度快, 奥氏体来不及析出针状、羽毛状等聚集状态组织。SMAW 焊缝(见图 2d)奥氏体以粗大针状晶粒为主, 仅含少量块状组织。SMAW 热输入较高(50~180 mm/min), 冷却速率较慢, 奥氏体在凝固过程中有充足时间通过枝晶生长形成针状

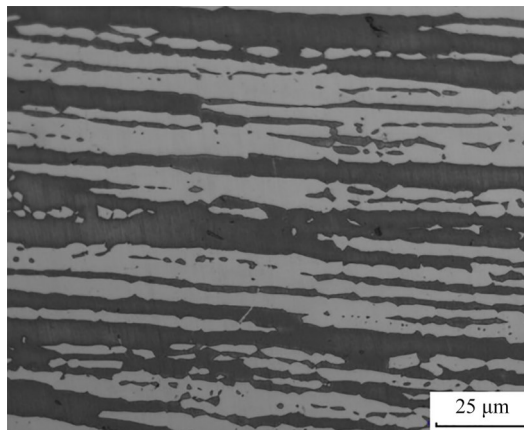


图 1 母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of base material

形态^[11]。

热影响区均保留初始带状组织特征, 但局部区域发生相比例调整。GTAW 的 HAZ 区(见图 2a), 奥氏体厚度略有增加, 但仍以带状分布为主。由于热输入低, 加热区温度梯度大, 铁素体溶解不充分, 仅表层发生轻微奥氏体再结晶。SMAW 的 HAZ 区(见图 2c), 奥氏体带状结构增宽, 且在近缝区出现细碎块状奥氏体。高热输入导致铁素体部分溶解, 冷却过程中奥氏体在铁素体晶界形核并快速长大, 形成粗大块状组织。

采用 ASTM E562 标准结点法对各区域进行铁素体含量测定, 焊缝和热影响区铁素体相体积分数的测量结果见表 3。在焊缝区, GTAW 铁素体含量(47.38%)高于 SMAW(44.50%), 差异源于热输入对 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变的抑制作用。在热影响区, GTAW 铁素体含量(63.88%)同样高于 SMAW(52.50%), 说明 GTAW 更有利于保留原始铁素体基体。两种焊接接头各区域的铁素体含量均在标准要求的 35%~65% 范围内。

2.2 力学性能结果与分析

根据 ASME Section IX 标准对焊接接头进行力学性能测试, 结果见表 4。GTAW 和 SMAW 焊缝的抗拉强度分别为 776 MPa(均值)和 761.5 MPa(均值), 均显著高于 S31803 双相不锈钢母材的最小抗拉强度(≥ 690 MPa), 断裂位置均位于母材(非焊缝区域), 表明焊缝强度储备充足, 满足工程安全要求。GTAW 和 SMAW 焊缝的弯曲角度均为 180° , 压头直径分别为 15 mm(GTAW)和 38.1 mm(SMAW),

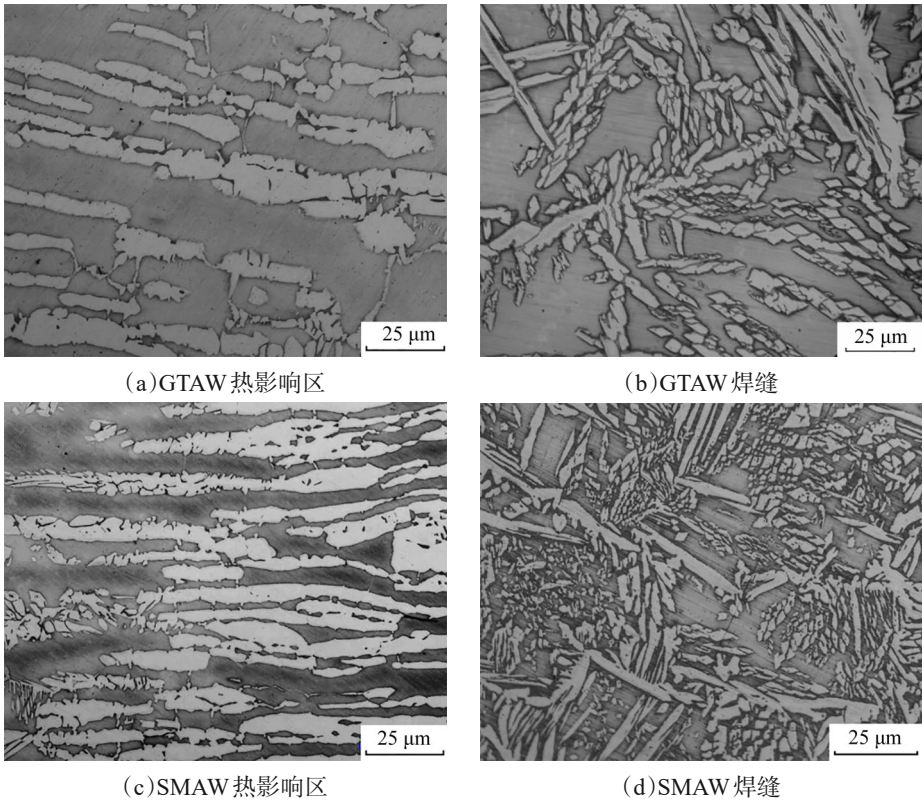


图2 GTAW和SMAW焊接接头的显微组织

Fig. 2 Microstructure of weld joints by GTAW and SMAW

表3 焊接接头铁素体体积分数

Table 3 Ferrite volume fraction of weld joints

焊接方法	热影响区/%	焊缝/%
GTAW	63.88	47.38
SMAW	52.50	44.50

均无裂纹产生。SMAW的弯曲压头直径更大,表明其焊缝塑性略优于GTAW,可能与SMAW焊缝晶粒

粗大但奥氏体比例较高有关。GTAW与SMAW的焊缝区域冲击吸收功相近(GTAW:32~33 J;SMAW:34~36 J),表明焊接热输入对焊缝金属的低温韧性影响有限;SMAW热影响区的冲击吸收功(35~40 J)略高于GTAW热影响区(24~31 J),主要归因于其奥氏体比例较高,奥氏体作为韧性相可有效阻碍裂纹扩展。

表4 焊接接头力学性能试验结果

Table 4 Mechanical property test results of welding joint

焊接方法	抗拉强度/MPa	断裂位置	弯曲($\alpha=180^\circ$)	冲击吸收功KV ₂ /J(-50℃)			
				焊缝	熔合线	熔合线+1 mm	母材
GTAW	780,772	母材	无裂纹(正反弯, $d=15$ mm)	33,32,32	26,24,31	39,40,42	40,38,38
SMAW	770,753	母材	无裂纹(侧弯, $d=38.1$ mm)	34,34,36	37,40,38	35,38,37	40,43,42

2.3 硬度测试结果与分析

两种焊接方法所获焊接接头的维氏硬度分布曲线如图3所示,硬度值主要分布在合理的硬度值范围内(250~285 HV)。GTAW焊缝和热影响区的硬度均高于SMAW焊缝和热影响区,一是由于GTAW焊材合金元素Mn含量相对较高,Mn能提高金属材料的硬度;二是GTAW焊缝和热影响区中的

铁素体含量均大于SMAW,而铁素体的硬度高于奥氏体^[6]。

2.4 三氯化铁点蚀试验结果与分析

点蚀试验后放大20倍观察,试样表面如图4所示。试样表面光滑,均无明显点蚀坑,也无腐蚀产物附着,表明GTAW和SMAW焊接接头均能获得良好的耐Cl⁻腐蚀性能。

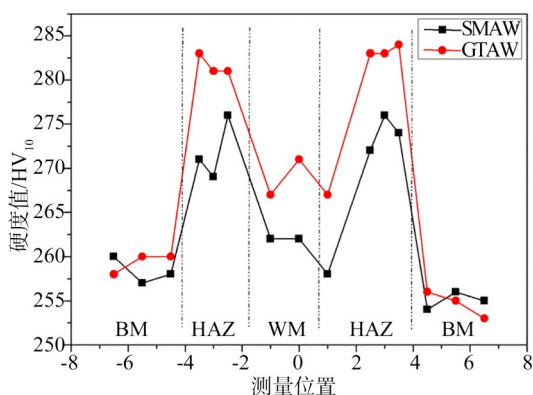


图3 维氏硬度试验结果

Fig. 3 Results of vicker hardness test

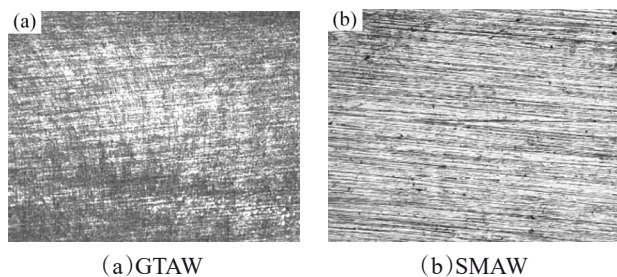


图4 点蚀后试验表面(20×)

Fig. 4 Test specimens surface after pitting test(20×)

两种焊接方法获得的焊接接头平均点蚀速率分别为 $1.148\ 5\ \text{g/m}^2$ 和 $0.975\ 1\ \text{g/m}^2$, 如表5所示, SMAW接头的腐蚀速率略低于GTAW接头, 主要原因是SMAW接头焊缝和热影响区的两相的比例相对均匀, 而GTAW接头铁素体含量相对较高, 铁素体的增加会导致耐蚀性能降低^[12-13]。

表5 焊接接头点蚀试验结果

Table 5 Pitting test results of welding joint

焊接方法	试验前 质量/g	试验后 质量/g	失重/g	点蚀速率 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	平均值 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
GTAW	42.877 8	42.873 9	0.003 9	1.234 0	1.148 5
	43.653 3	43.649 7	0.003 6	1.136 4	
	43.636 6	43.633 2	0.003 4	1.075 1	
SMAW	145.003 8	145.000 1	0.003 7	0.782 7	0.975 1
	141.371 8	141.367 8	0.004 0	0.849 9	
	143.932 7	143.926 6	0.006 1	1.292 6	

3 结论

(1) UNS31803双相不锈钢采用GTAW和SMAW焊接方法均能获得合理的相比比例和力学性能优良的焊接接头。在实际工程运用中, 为了提高现场焊

接生产效率, GTAW主要用于小管径及薄壁的双相不锈钢焊接, 大管径及厚壁的双相不锈钢采用GTAW打底+SMAW填充的焊接方法。

(2) SMAW和GTAW获得的焊接接头在焊缝区域奥氏体组织形貌存在较大差异: SMAW焊缝为方位不同的针状组织和少量块状组织, 且奥氏体晶粒尺寸粗大; GTAW焊缝主要呈现等轴块状组织聚集形成针状奥氏体组织。焊接接头各区域的两相比比例也存在一定的差异, 但均在标准要求的35%~65%合理范围内。

(3) 双相不锈钢焊接接头的两相的比例影响冲击吸收功和硬度值。铁素体含量高的, 硬度值大, 冲击韧性差。

参考文献:

- [1] 吴玫. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 陈兴润, 潘吉祥. 2205双相不锈钢焊接接头组织与性能研究[J]. 焊接, 2014(10): 54-57.
CHEN X R, PAN J X. Microstructures and properties of 2205 duplex stainless steel welded joint[J]. Welding & Joining, 2014(10): 54-57.
- [3] 赵建华, 赵占西, 胡网勤. 焊条电弧焊双相不锈钢焊接接头性能研究[J]. 电焊机, 2010, 40(12): 80-82.
ZHAO J H, ZHAO Z X, HU W Q. Research on the properties of shield metal arc welding for 2205 duplex stainless steel welded joint[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(12): 80-82.
- [4] 李伟, 王立志, 王士山, 等. 双相不锈钢FCAW焊接接头腐蚀性能的研究[J]. 电焊机, 2019, 49(3): 115-120.
LI W, WANG L Z, WANG S S, et al. Research on corrosion property of FCAW welded joint of duplex stainless steel[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(3): 115-120.
- [5] 柳昱, 包晔峰, 谢秉鎔, 等. Co对CrNiMo双相不锈钢组织及耐蚀性能的影响[J]. 电焊机, 2021, 51(4): 20-25.
LIU Y, BAO Y F, XIE B Q, et al. Effect of Co content on the microstructures and corrosion resistance of CrNiMo duplex stainless steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(4): 20-25.
- [6] 金晓军, 霍立兴, 张玉凤, 等. 热输入对双相不锈钢管接头力学和腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 109-112.
JIN X J, HUO L X, ZHANG Y F, et al. Effects of heat

- input on mechanical and corrosion properties of duplex stainless steel tubular welded joint [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2004, 5 (3): 109-112.
- [7] 张建勋,李为卫,李庆琰. 2205 双相不锈钢的焊接性研究综述[J]. 焊管, 2005, 28(5): 6-9.
- ZHANG J X, LI W W, LI Q Y. State-of-the-art Weldability of the 2205 Duplex Stainless Steel [J]. Welded Pipe and Tube, 2005, 28(5): 6-9.
- [8] 张建勋,李庆琰,李为卫,等. 热模拟 2205DSS 焊接 HAZ 的点蚀实验研究[J]. 材料工程, 2006(8): 28-32.
- ZHANG J X, LI Q Y, LI W W, et al. Pitting Corrosion Property of Simulated Welding HAZ in 2205DDS [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(8): 28-32.
- [9] 徐玉松,仇璐,范继,等. 超低碳双相不锈钢焊缝组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 38-41.
- XU Y S, QIU L, FAN J, et al. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of Ultra-low Carbon Duplex Stainless Steel [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 38-41.
- [10] 代维,罗腾英,王帆,等. 不同焊接工艺双相不锈钢焊接接头的组织和力学性能[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 175-180.
- DAI W, LUO T Z, WANG F, et al. Microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel welded joint under different welding technology [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(5): 175-180.
- [11] 张三艳,张汇文. 焊接方法对双相不锈钢焊接接头耐蚀性的影响[J]. 机械制造文摘-焊接分册, 2014(3): 19-22.
- ZHANG S Y, ZHANG H W. Effect of welding process on corrosion resistance properties of duplex stainless steel welded joint [J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2014(3): 19-22.
- [12] 常静,梁艳,罗磊. S31803 双相不锈钢焊接接头组织及耐蚀性能研究[J]. 电焊机, 2018, 48(04): 69-72.
- CHANG J, LIANG Y, LUO L. Research on the Microstructure and Corrosion Resistance of S31803 Duplex Stainless Steel Welded Joints [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(04): 69-72.
- [13] 张志强,张宇航,张宏伟,等. UNS S32750 超级双相不锈钢激光焊接接头微观组织与耐蚀性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 14-20.
- ZHANG Z Q, ZHANG Y H, ZHANG H W, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel Laser Welded Joints [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(4): 14-20.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 106 页

- 工艺开发[J]. 电焊机, 2023, 53(S1): 34-32.
- LI C A, DONG B, QIN G L, et al. Development of the Inertial Friction Welding Process for Copper/Aluminum Thin-Walled Tubes [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(S1): 34-32.
- [9] Yu H, Zhang L, Cai F, et al. Interface microstructure and growth mechanism of brazing Cu/Al joint with BA188Si filler metal [J]. Vacuum, 2020, 181: 109641.
- [10] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1998: 24-25.
- [11] 茅卫东,石铭霄,李盛良,等. 机械振动辅助铝合金 MIG 焊接接头组织与性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(10): 9-14.
- MAO W D, SHI M X, LI S L, et al. Study on the Microstructure and Properties of Mechanically Vibrated Assisted Aluminum Alloy MIG Welded Joints [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 9-14.
- [12] 黄俊兰. 微量元素对 Zn85Al 钎料及 Cu Al 钎焊接头性能的影响[D]. 河南:郑州机械研究所, 2010: 22-40.
- HUANG J L. The Influence of Trace Elements on the Performance of Zn85Al Braze Alloy and Cu Al Brazed Joints [D]. Henan: Zhengzhou Mechanical Research Institute, 2010: 22-40.
- [13] 刘永红,张忠明,刘宏昭,等. 锌铝合金的研究现状及应用概况[J]. 铸造技术, 2001(1): 42-44.
- LIU Y H, ZHANG Z M, LIU H Z, et al. Research Status and Application Overview of Zinc-Aluminum Alloys [J]. Casting Technology, 2001(1): 42-44.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>