

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.03.07

12Cr13与304L异种不锈钢焊接工艺研究

邹小平¹, 沈天阔¹, 乐学来², 郭宝超²

1. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124

2. 上海第一机床厂有限公司, 上海 201308

摘要: 核反应堆控制棒驱动机构用材料12Cr13与304L异种不锈钢的焊接质量对驱动机构的安全性有重要影响。为了得到综合性能较好的焊接接头, 根据不同的热处理制度和接头设计确定两个不同的实验方案, 均选用ERNiCrFe-7A镍基焊丝, 采用钨极氩弧焊工艺, 通过在12Cr13上堆焊不同厚度的隔离层、经不同热处理后再坡口对接。采用光学显微镜观察焊接接头的显微组织并进行拉伸试验、弯曲试验以及硬度试验, 对12Cr13热影响区进行0℃冲击试验。结果表明, 采用堆焊4mm隔离层+调质处理的方案能获得质量较好的焊接接头, 足够的隔离层厚度能减少最终焊接热循环对焊接性较差的母材的影响, 调质处理有效降低了12Cr13热影响区的硬度, 对接焊缝与304L母材硬度较为均匀, 热影响区为均匀回火索氏体组织, 0℃冲击功达到了平均152J。

关键词: 核反应堆控制棒驱动机构; 异种不锈钢焊接; 热处理; 镍基合金隔离层

中图分类号: TG457.11 文献标识码: B 文章编号: 1001-2303(2022)03-0053-06

Welding Process of 12Cr13 and 304L Dissimilar Stainless Steel

ZOU Xiaoping¹, SHEN Tiankuo¹, YUE Xuelai², GUO Baochao²

1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518172, China

2. Shanghai No.1 Machine Tool Works Co., Ltd., Shanghai 201308, China

Abstract: The welding quality of 12Cr13 and 304L dissimilar stainless steel for nuclear reactor control rod driving mechanism has an important effect on the safety of the mechanism. In order to obtain a welded joint with better comprehensive performance, nickel-based welding wire ERNiCrFe-7A and the method GTAW are used in this research. After welding of isolation layer on 12Cr13 side and heat treatment, the 12Cr13 and 304L are welded together. The microstructure of the welded joint is observed with an optical microscope, and the tensile test, bending test and hardness test are carried out. Welding joint impact test is carried out at 0℃. The results show that the scheme tempered sorbite structure is uniform and the hardness of the HAZ is uniform with 4mm isolation layer by quenching and tempering. The impact energy at 0℃ reaches an average of 152J. The quenching and tempering treatment effectively reduces the hardness of the 12Cr13 HAZ. The welded joint has a uniform weld structure and good mechanical properties.

Keywords: nuclear reactor control rod driving mechanism; dissimilar stainless steel welding; heat treatment; isolation layer of Nickel base alloy

引用格式: 邹小平, 沈天阔, 乐学来, 等. 12Cr13与304L异种不锈钢焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2022, 52(3): 53-58.

Citation: ZOU Xiaoping, SHEN Tiankuo, YUE Xuelai, et al. Welding Process of 12Cr13 and 304L Dissimilar Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 53-58.

0 前言

在压水堆核电站一回路系统中, 设备的运行环

境十分复杂苛刻, 对焊接质量有着较高的要求。控制棒驱动机构是核反应堆控制和保护系统的伺服机构, 它是反应堆本体中唯一的动设备, 其安全性

* 收稿日期: 2021-09-27 修回日期: 2022-02-23

作者简介: 邹小平(1976—), 男, 硕士, 主要从事焊接材料和焊接工艺的研发工作。E-mail: zouxiaoping@cgnpc.com.cn。

和可靠性直接影响到反应堆的安全与运动,其焊接质量直接决定着核反应堆的服役安全性,如何提高控制棒驱动机构中焊接接头的综合性能成为核工业领域的一个重要研究方向^[1-3]。

核反应堆控制棒驱动机构用不锈钢主要为 12Cr13 和 304L。12Cr13 为马氏体不锈钢,约含 0.1% 碳和 13% 铬,焊接工艺性能较差,焊后近缝区会形成粗大的马氏体硬化区且导热性较差,淬硬倾向和过热倾向较大,一般通过选用高铬、镍元素的焊接材料,控制预热温度与焊后冷却速度,焊后热处理等方式来控制焊接接头的性能。304L 不锈钢碳含量小于 0.03%,是超低碳奥氏体不锈钢,具有良好的力学性能,且避免了在较高温度于晶界形成铬的碳化物造成的晶间腐蚀现象,在压水堆一回路的堆内构件、控制棒驱动机构等设备的制造中得到了大量的应用。刘国亮^[4]等针对焊后热处理难以同时改善焊缝区及 HAZ 性能的难题,采用电子束焊接,通过两步法焊后热处理制度(临界时效 680 °C/4 h 和临界回火 600 °C/4 h),使 430 铁素体不锈钢的焊接热影响区硬度降低到一个最优值,实现了 430 与 316L 奥氏体不锈钢异相焊接。冯毅^[5]等采用 CMT 焊接 304/430 异种不锈钢,以较低热输入解决 430 一侧熔合区晶粒组织粗大问题,焊缝金相组织为奥氏体+铁素体,304 一侧的熔合区组织形态与母材差别不大,而 430 侧熔合线很明显,焊接接头抗拉强度高于母材。李友谊^[6]等研究了马氏体沉淀硬化不锈钢与奥氏体不锈钢焊接工艺,指出在选择焊接材料时要兼顾两种母材各自的物理性能,耐腐蚀性最好优于两侧母材的,采用焊条电弧焊“小电流、短电弧、快速、多层多道焊”的软规范工艺参数可以减小稀释率。针对双相不锈钢焊接,国内外学者开展了一些研究工作,Ni 含量对双相不锈钢焊缝组织调控有重

要作用^[7-8],适当增加热输入有助于提高焊缝中的奥氏体含量^[9-10]。冯家玮^[11]研究了含氮奥氏体不锈钢的焊接工艺,获得了优质的焊接接头。李子晗^[12]研究了搭接间隙对不锈钢焊缝成形的影响规律。

12Cr13 与 304L 不锈钢焊接时,12Cr13 马氏体钢侧的碳势高,会导致 304L 不锈钢侧增碳,降低 304L 侧焊接接头耐蚀性能,可有效阻断因碳迁移引起的接头质量下降。文中通过在 12Cr13 钢母材上先堆焊镍基合金焊丝 ERNiCrFe-7A 隔离层后热处理,再用 ERNiCrFe-7A 将其与 304L 钢母材以坡口对接形式进行焊接,并分析焊接工艺和热处理制度对熔敷金属组织和焊接接头力学性能的影响。

1 试验材料

1.1 母材

试验用母材为退火态 12Cr13 马氏体不锈钢和 304L 超低碳奥氏体不锈钢,其化学成分及力学性能分别如表 1、表 2 所示。试板尺寸 600 mm×150 mm×20 mm 和 600 mm×150 mm×9 mm。

表 1 12Cr13 和 304L 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 12Cr13 and 304L(wt. %)

材质	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Co
12Cr13	0.15	1.00	1.00	0.025	0.025	11.50~13.50	—	0.05
304L	0.030	1.00	2.00	0.005	0.035	18.00~20.00	8.00~12.00	0.05

1.2 焊接材料

焊接材料选用 ERNiCrFe-7A 型镍基合金焊丝,直径 1.2 mm,其 Cr 含量达到了 30%,并加入了 Co、Al、Ti、Ta、Nb 等元素,较高的 Cr 含量使其在核辐射环境中具有更好的抗应力腐蚀开裂能力。该种焊丝具有电弧稳定、成形美观、抗气孔性佳、熔敷金属机械性能稳定、耐蚀性好等特点,其化学成分及力学性能如表 3、表 4 所示。

表 2 12Cr13 和 304L 主要力学性能

Table 2 Main mechanical properties of 12Cr13 and 304L

材料	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 A /%	断面收缩率 Z /%	冲击功 A_{kv} /J	硬度/HB
12Cr13	≥485	≥275	≥20	≥45	均值≥56	≤223
(退火态)	≥390	≥227	—	—	—	—
304L	≥485	≥170	≥30	≥40	—	—
	≥360	≥105	—	—	—	—

表 3 ERNiCrFe-7A 化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of ERNiCrFe-7A (wt. %)

C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Co
0.04	1.0	7.0~11.0	0.020	0.010	0.50	0.30	余量	0.05
Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo	Al+Ti	B	Zr	B+Zr+其他
1.10	1.0	28.0~31.5	0.5~1.0	0.50	1.5	0.005	0.02	0.50

表 4 ERNiCrFe-7A 主要力学性能

Table 4 Main mechanical properties of ernicrfe-7A

	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 A /%
室温	≥ 550	≥ 310	≥ 30
350 °C	≥ 505	≥ 190	≥ 30

表 5 焊接工艺参数

Table 5 Welding process parameters

焊接位置	保护气流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot \min^{-1})$
隔离层	11 (氩气 $\geq 99.999\%$)	120~140	12~16	60~90
坡口对接	10 (氩气 $\geq 99.999\%$)	80~130	8~14	80~100

2 试验方案

根据核反应堆控制棒驱动机构设计及制造要求,拆卸钮、保护套筒、挠性接头等零部件均会使用 12Cr13 与 304L 两种不锈钢材料,有调质处理和退火处理两种热处理制度。文中以这两种方案实施。焊前打磨母材待焊区域、并用酒精清洗以去除氧化膜。两种方案焊接时均采用 TIG 焊,焊机型号 MLS3000,钨极直径 2.4 mm,钨极角度 60°。焊接接头示意如图 1 所示,X 型坡口,均先在 12Cr13 坡口处堆焊隔离层,经热处理后进行对接焊,焊接工艺参数如表 5 所示。

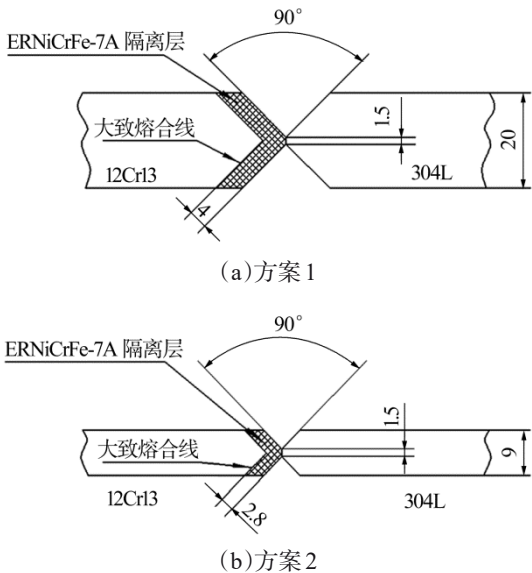


图 1 焊接接头示意

Fig. 1 Schematic diagram of welded joint

方案一:对有隔离层(厚度 4 mm)的 12Cr13 母材(厚度 20 mm)先进行调质处理,通过淬火 12Cr13 得到马氏体组织,再通过回火使其转变为回火索氏体,得到硬度、强度、塑性、韧性适当的组织。方案二:对有隔离层(厚度 2.8 mm)的 12Cr13 母材(厚度 9 mm)先进行退火处理,以达到均匀材料化学成分及组织、细化晶粒、消除内应力的作用,热处理曲线示意如图 2 所示。

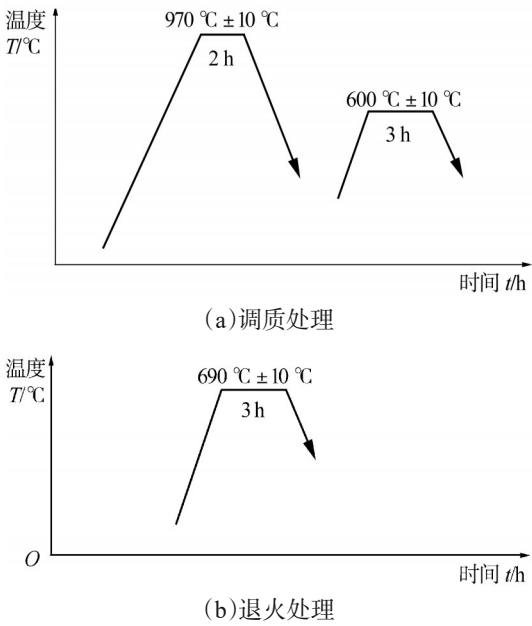


图 2 热处理曲线示意

Fig. 2 Schematic diagram of heat treatment curve

焊接完成后,采用机械加工方式将焊接接头制成 2 个拉伸试样、4 个侧向弯曲试样、3 个冲击试样以及全焊缝截面的金相试样、硬度试样。按照标准

AWS B4.0M (Standard methods for mechanical testing of welds), 利用 CBD-300 型冲击试验机和 WAW-1000 微机控制电子万能试验机进行力学性能试验。先用 SiC 砂纸研磨试样焊缝截面, 然后用 $2.5\ \mu\text{m}$ 抛光膏进行表面抛光。用 10% 草酸溶液电解腐蚀试样, 电压为 10 V。腐蚀完成后用光学显微镜观察试样的宏观及微观金相组织, 采用数显维氏硬度计 YLL22001 测量硬度。

3 试验结果与分析

3.1 焊缝金相检验

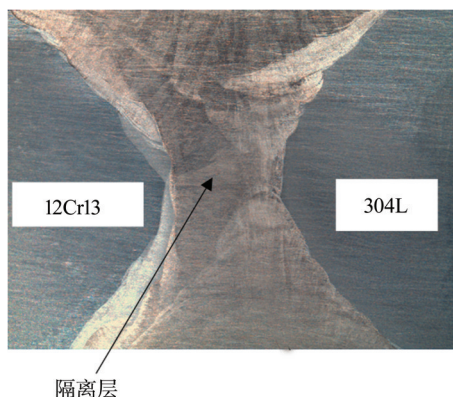
焊接接头的宏观金相如图 3 所示。方案 1 焊缝可见清晰的隔离层轮廓与焊道轮廓 (见图 3a), 隔离层靠近 12Cr13 一侧存在一定宽度的稀释区, 焊缝及热影响区无裂纹、气孔等缺陷。方案 2 焊缝无明显隔离层轮廓 (见图 3b), 在最终对接焊过程中, 较薄的隔离层有很多区域被熔化, 成为焊缝的一部分。

图 4a、4b 为方案 1、方案 2 的 12Cr13 母材热影响区的微观金相组织。可以看出, 在方案 1 中, 经过 $970\ ^\circ\text{C}$ 淬火 + $600\ ^\circ\text{C}$ 回火后, 12Cr13 主要组织为保持马氏体位向分布的索氏体和铁素体, 在 $600\ ^\circ\text{C}$ 回火温度下, 马氏体分解, 残留奥氏体发生转变, 原马氏体组织晶界变模糊, 碳化物大量析出, 弥散分布; 在方案 2 中, 经过退火及焊接热循环, 12Cr13 热影响区存在较多呈片状、多角状的铁素体, 密集分布在熔合线附近, 尺寸较小, 在距离熔合线较远区域铁素体分布较少。

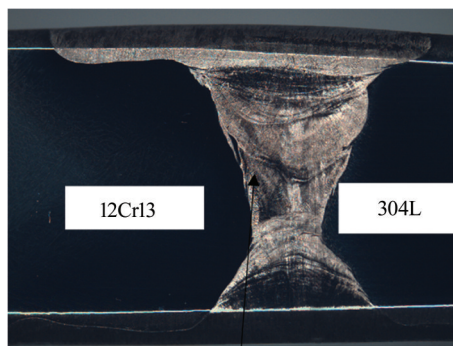
图 4c、4d 为方案 1 焊缝隔离层、对接焊缝的微观金相组织。由图 4a 可知, 经焊后热处理, 隔离层晶粒较为粗大, 这是因为在热处理过程中, 隔离层在 $970\ ^\circ\text{C}$ 保温 3 h, 奥氏体晶粒有充足的时间形核与长大。由图 4d 可知, 熔敷金属中主要为方向性明显的垂直于熔合线的柱状晶, 这是由于熔池冷却速度快, 熔合线附近的温度梯度最大, 晶粒沿着散热最快的方向生长。

3.2 焊接接头力学性能试验

通过机械加工方法取试样后, 进行焊接接头室温拉伸、弯曲以及 12Cr13 热影响区 $0\ ^\circ\text{C}$ 冲击韧性试



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 3 焊接接头宏观金相

Fig. 3 Macro metallography of welded joint

验。焊接接头力学性能如表 6 所示。

由表 6 可知, 方案 1 接头抗拉强度为 597 MPa、610 MPa 且试样均断于 304L 母材, 说明方案 1 可以满足设计要求。结合方案 1 所对应的焊接接头组织可以看出, 经过热处理后, 马氏体分解, 残留奥氏体发生转变, 原马氏体组织晶界变模糊, 碳化物大量析出, 弥散分布, 提高了焊接接头强度。方案 2 焊缝抗拉强度为 595 MPa、596 MPa, 两个试样分别断于 304L 母材与焊缝; 方案 1 弯曲后焊缝和热影响区均无超过 3 mm 的任何方向的开裂缺陷; 方案 1 的 12Cr13 热影响区试样 $0\ ^\circ\text{C}$ 冲击功分别为 168 J、135 J、154 J, 方案 2 的 12Cr13 热影响区试样 $0\ ^\circ\text{C}$ 冲击功分别为 44 J、42 J、40 J, 与方案 1 结果存在较大差距。这是因为最终对接焊时隔离层的消失导致马氏体不锈钢受到焊接热循环的影响, 较高的温度与快速冷却使马氏体不锈钢 HAZ 析出了较多的片状铁素

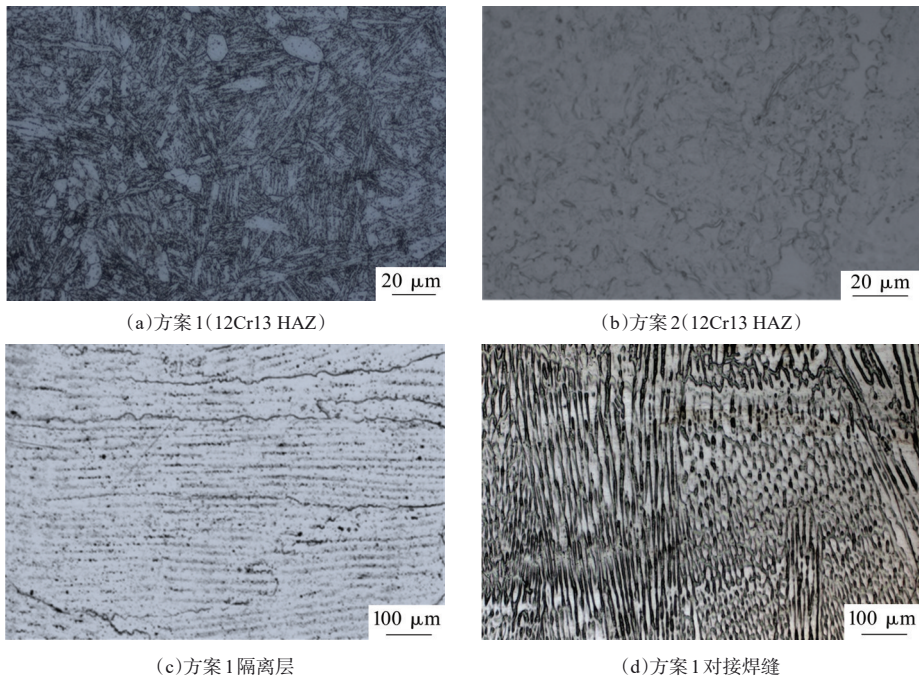


图 4 焊接接头微观金相组织

Fig. 4 Microstructure of welded joint

表 6 焊接接头力学性能

Table 6 Mechanical properties of welded joints

试验项目	拉伸试验(室温)		弯曲试验(室温)	冲击试验
	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置		0 °C冲击值 A_{kv} /J
方案 1	597,610	均断于 304L 母材	合格	168,135,154
方案 2	595,596	分别断于 304L 母材与焊缝	合格	44,42,40

体,导致其强度与冲击韧性下降。

3.3 焊接接头硬度试验

在焊接接头上沿横向每隔 1 mm 测一个硬度数据。从接头力学性能可以看出,方案 1 的焊接效果更好,因此测量了方案 1 接头硬度曲线如图 5 所示。

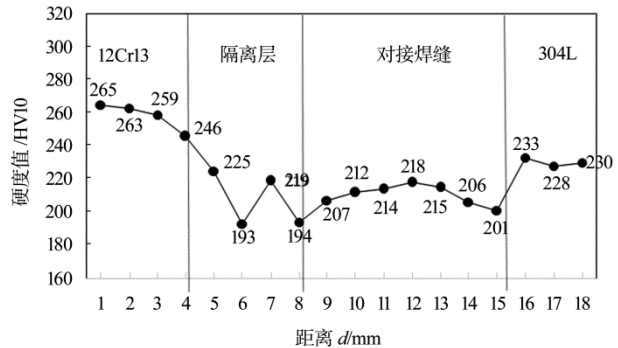


图 5 方案 1 接头硬度值

Fig. 5 Joint hardness value of scheme 1

可以看出,12Cr13 热影响区硬度均匀,无接头硬化现象。调质处理使 12Cr13 形成了均匀的回火

组织,有效改善了 12Cr13 热影响区硬化现象,足够厚度的隔离层保证了 12Cr13 受到最终对接焊热循环的影响较少,最终硬度均匀,力学性能较好。隔离层硬度值存在一定的波动,这是因为隔离层存在一定的稀释区,导致这一区域,尤其是靠近 12Cr13 一侧的化学成分不均匀,从而导致隔离层的硬度值不稳定。最终对接焊缝与 304L 母材硬度较为均匀。

4 结论

(1)针对核反应堆控制棒驱动机构用材料 12Cr13 与 304L 异种不锈钢焊接开展研究,结果表明,采用堆焊 4 mm 隔离层+调质处理的工艺,可有效避免马氏体不锈钢在焊接过程中出现接头硬化及裂纹等缺陷,获得质量较好的焊接接头。

(2)焊接隔离层时,应有足够的隔离层厚度,以

预留足够的隔离层稀释区,减小最终焊接热循环对焊接性较差的母材的影响。

(3)调质处理会导致镍基合金隔离层的奥氏体晶粒长大,但其强度仍高于 304L 母材。

(4)通过隔离层焊接可以实现 12Cr13 与 304L 异种不锈钢的优质焊接,但其中涉及的焊接冶金机理方面的研究还有待开展。

参考文献:

- [1] 张扬健,陈德胜,我国核电现状及发展趋势分析[J]. 节能与环保, 2017(01): 52-55.
Zhang Yangjian, Chen Desheng. Analysis of current situation and development trend of Nuclear power in China[J]. Energy Engineering and Environmental Protection, 2017(01): 52-55.
- [2] 周诗光. 秦山一期 CRDM 关键部件失效机理及可靠性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Zhou Shiguang. On analysis of fault mechanism & reliability about key parts of CRDM for QNPC-1, Thesis [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [3] 李延葆,郭宝超,金伟芳,堆内构件钴基合金堆焊工艺研究[J]. 动力工程学报, 2016(03): 247-251.
Li Yanbao, Guo Baochao, Jin Weifang. Study on hard-facing process of reactor vessel internals with cobalt alloys[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016(03): 247-251.
- [4] Sedat Kolukisa. The effect of the welding temperature on the welding ability in diffusion welding of martensite (AISI 420) stainless steel with ductile cast iron [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(186): 33-36.
- [5] 刘国亮,杨善武,周鲁军,等. 异种不锈钢电子束焊接接头的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(05): 194-203.
Liu Guolaing, Yang Shanwu, Zhou Lujun, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of dissimilar stainless steel [J]. Transactions of materials and heat treatment, 2020, 41(05): 194-203.
- [6] 冯毅,李亚虎,贾金龙,等. 304 与 430 异种不锈钢 CMT 焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 51-54.
Feng Yi, Li Yahu, Jia Jinlong, et al. CMT Welding Process of 304 and 430 Dissimilar Stainless Steels[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(23): 51-54.
- [7] 李友谊,王成伟,尹忠阳,等. 马氏体沉淀硬化不锈钢与奥氏体不锈钢焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(07): 50-54.
Li Youyi, Wang Chengwei, Yin Zhongyang, et al. Study on welding process of Martensitic precipitation-hardening stainless steel and austenitic stainless steel [J]. Welding Technology, 2019, 48(07): 50-54.
- [8] Da C J E J, Franzini O D, Caliliari, et al. Effects of Nickel Addition on the Microstructure of Laser-Welded UNS S32750 Duplex Stainless Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(4): 1616-1618.
- [9] Lai R, Cai Y, WU Y, et al. Influence of absorbed nitrogen on microstructure and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel joint processed by fiber laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 397-405.
- [10] Choudhury B, Chandrasekaran M. Microstructural Investigation and Integrated Optimization of Weld Bead Characteristics in Electron Beam Welding of Inconel 825 [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(11): 2681-2701.
- [11] 李国平,柳阳,王立新,等. 热输入对 S32750 超级双相不锈钢 TIG 焊接接头腐蚀性能的影响[J]. 焊接, 2018(09): 43-46, 67.
Li Guoping, Liu Yang, Wang Lixin, et al. Effect of heat input on corrosion properties of TIG welded of S32750 super duplex stainless steel joints [J]. Welding & Joining, 2018(09): 43-46, 67.
- [12] 冯家玮,江来珠,徐锴,等. 低镍含氮奥氏体不锈钢脉冲 TIG 焊接接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(01): 68-76.
Feng Jiwei, Jiang Laizhu, Xu Kai, et al. Study on Microstructure and Properties of Pulsed TIG Welded Joints of Austenitic Stainless Steel with Nitrogen and Low Nickel [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(01): 68-76.
- [13] 李子晗,忻建文,吴东升,等. 不锈钢薄板等离子弧搭接焊间隙对焊缝表面成形的影响[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 28-33, 127-128.
Li Zihan, Xin Jianwen, Wu Dongsheng, et al. Influence of gap on weld appearance in lap plasma arc welding of thin stainless steel plates [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(12): 28-33.