

50 mm 厚 SA508Gr.3Cl.2 钢超窄间隙激光填丝 焊接头组织与性能

张益文¹, 张茂龙³, 孙志远³, 黄 坚^{1,2}, 姚成武¹, 金 鑫¹

¹上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

³上海电气核电设备有限公司, 上海 200245

摘要 采用超窄间隙坡口和光纤激光填丝多层焊工艺, 焊接了 50 mm 厚的 SA508Gr.3Cl.2 核电用钢, 测试并分析了接头的微观组织和性能。结果表明, 焊接接头无宏观缺陷; 热处理后接头中部焊缝中心组织主要为上贝氏体和针状下贝氏体, 母材侧热影响区的粗晶区组织为高温回火马氏体, 硬度为 280 HV。焊接接头拉伸试样的拉伸断裂位置均位于母材, 接头抗拉性能良好。接头上、中、下部位的焊缝冲击韧性均小于母材的, 但焊缝冲击试样的断口形貌仍具有一定的韧性断裂特征。

关键词 激光技术; 光纤激光; SA508Gr.3Cl.2 钢; 超窄间隙激光填丝焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102006

Microstructures and Properties of 50 mm Thick SA508Gr.3Cl.2 Steel Welding Joints by Ultra-Narrow-Gap Laser Welding with Filler Wire

Zhang Yiwen¹, Zhang Maolong³, Sun Zhiyuan³, Huang Jian^{1,2}, Yao Chengwu¹, Jin Xin¹

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China;

³Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd., Shanghai 200245, China

Abstract By the multi-pass fiber laser welding technique with filler wire based on the ultra-narrow-gap grooves, the 50 mm thick SA508Gr.3Cl.2 nuclear power steel is welded, and the microstructures and properties of joints are tested and analyzed. The results show that there are no macro defects inside the welded joints. After heat treatment, the central organization of the welds in the middle of joints mainly consists of upper bainite and acicular lower bainite, the coarse grain area in the heat affected zone near the base material consists of high-temperature tempered martensite, and the microhardness of this area is 280 HV. The tensile fracture position of welding joints is located in the base material, which indicates that the tensile strength of joints is good. The impact toughness of the welds in the top, middle and bottom area of joints are smaller than that of the base material, but the fracture morphology of the impact specimen extracted from the welds has certain characteristics of toughness fracture.

Key words laser technique; fiber laser; SA508Gr.3Cl.2 steel; ultra-narrow-gap laser welding with filler wire; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2017-05-27; **收到修改稿日期:** 2017-07-06

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX06002001)、上海市重大技术装备研制专项(ZB-ZBYZ-03-11-0485)

作者简介: 张益文(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: zhangyiwen0212@163.com

导师简介: 黄 坚(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光焊接方法和激光表面改性方面的研究。

E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

核电蒸汽发生器是核岛的核心部件之一,在我国第三代核电技术堆型 CAP1400 中,蒸汽发生器使用 SA508Gr.3Cl.2 锻件作为壳体材料,其性能符合要求且经济性较好^[1-3]。高效和高质量的厚板焊接技术是保证核电蒸汽发生器运行安全性的关键因素之一。目前,SA508Gr.3Cl.2 锻件壳体的连接技术主要为钨极稀有气体保护焊和埋弧焊^[4-6]。钨极稀有气体保护焊的效率较低;埋弧焊产生的较大热输入会导致热影响区(HAZ)的宽度增加,产生较大的焊接变形和较高的残余应力,从而影响接头性能。

近年来,窄间隙激光填丝焊由于具有能量密度高、焊缝及 HAZ 较小、热输入较小、焊接变形和残余应力较小、填充材料用量较少等优点而被广泛关注^[7-9]。Jokinen 等^[10]通过 3 kW 的 YAG 激光器,运用窄间隙激光填丝焊工艺焊接了 20 mm 厚的 304 L 钢板。赵勇等^[11]采用窄间隙 CO₂ 激光填丝焊的方法,焊接了 50 mm 厚的 30Cr2Ni4MoV(30 表示碳的质量分数为 0.3%,2 表示 Cr 的质量分数为 2%,4 表示 Ni 的质量分数为 4%)转子钢,焊后接头内部无气孔、裂纹及未熔合侧壁等缺陷,自熔焊焊缝和填充焊焊缝 HAZ 的粗晶区硬度显著高于母材和接头其他区域的。Guo 等^[12]采用 16 kW 光纤激光对 6 mm 厚 SA508Cl.3 钢板进行了单道纯激光焊接,结果表明,焊缝和 HAZ 的粗晶区微观组织均为粗大的马氏体和自回火马氏体,硬度达 410 HV 以上。然而,关于厚板 SA508 钢光纤激光填丝多层焊接接头组织和力学性能的研究鲜有报道。

本文采用超窄间隙光纤激光填丝多层焊工艺,焊接了板厚为 50 mm 的 SA508Gr.3Cl.2 钢,对热处理态焊接接头进行了微观组织分析,研究了接头上、中、下部的焊缝和 HAZ 的组织特征,通过显微硬度、拉伸试验以及夏普冲击韧性试验表征了接头的力学性能。

2 试验材料与方 法

试验板材为 50 mm 厚的 SA508Gr.3Cl.2 钢,是一种 Mn-Mo-Ni 系的低碳低合金调质态高强钢,其化学成分及力学性能分别见表 1,2。试验采用的焊丝为与 SA508Gr.3Cl.2 钢同质的配套焊丝,直径为 1.2 mm。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base material (mass fraction, %)

Composition	C	Cr	Ni	Mo	V	Mn	Si	Al	N	Fe
Value	0.20	0.13	0.89	0.51	0.001	1.47	0.17	0.039	0.014	Bal.

表 2 母材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of base material

Property	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
Value	624	743	18.6

焊接试验使用的激光器为德国 IPG 公司生产的 YLS-10000-S2 多模光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,激光聚焦后焦斑直径为 0.72 mm。送丝机为奥地利 Fronius 公司生产的 TPS500 气保护焊机,采用前送丝的焊接方式,后置保护气体采用纯氩气以保护焊接熔池。超窄间隙焊接坡口示意图如图 1 所示,钝边高为 4 mm,间隙底宽为 2.4 mm,双边坡口角度为 4°。第一道为激光自熔焊以连接坡口钝边,后续道次均为激光填丝焊。激光填丝多层焊的激光功率为 4.0~4.5 kW,焊接速率为 0.33~0.36 m·min⁻¹,送丝速率为 2.0~2.5 m·min⁻¹,离焦量为 +20 mm,保护气体流量为 10 L·min⁻¹。每完成一道焊接,需要对焊缝表面和坡口两侧进行清理。焊接完成后进行焊后热处理,即在 610 °C 下保温 40 h 后空冷。

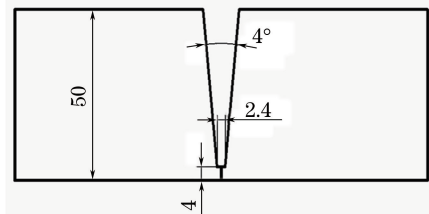


图 1 焊件坡口尺寸

Fig. 1 Groove geometry of workpiece

通过线切割的方式截取焊接接头横截面来制备金相试样,经研磨抛光后,用体积分数为 2% 的硝酸乙醇进行腐蚀,对焊接接头的上、中、下三个位置的微观组织进行观察、分析和显微硬度的测量,具体测量位置为图 2 所示的线 1、线 2 和线 3。截取两个全厚度的拉伸试样,在 100 t 拉伸试验机上进行室温拉伸试验,拉伸样的尺寸如图 3 所示。在焊接接头的 1/4、1/2、3/4 处截取焊缝冲击试样,具体取样位置为图 2 所示的三个矩形框。冲击试样的缺口在焊缝中心位置,试验温度为 3 °C。最后,利用扫描电子显微镜对冲击断口形貌进行观察和分析。

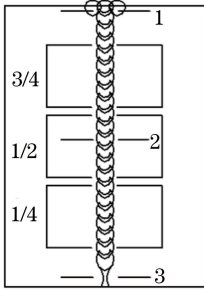


图 2 显微硬度测量及冲击试样取样位置

Fig. 2 Measurement position of microhardness and sampling position of impact sample

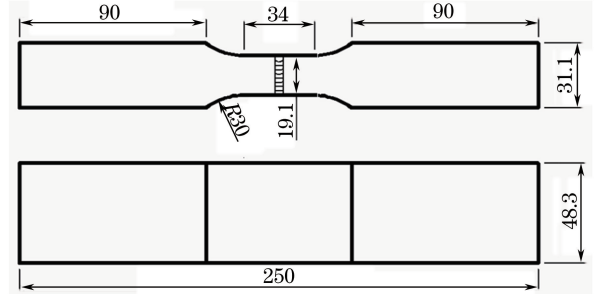


图 3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 Dimensions of tensile sample

3 试验结果及分析

3.1 焊接接头横截面的宏观形貌

焊接接头横截面的宏观形貌如图 4 所示。接头由 25 道焊接完成,共有 23 层,其中第 1 层为激光自熔焊,第 2~22 层为多层单道激光填丝焊,第 23 层为由三道激光填丝焊缝组成的盖面层。焊缝平均宽度约为 4 mm。通过对焊接接头进行 X 射线无损探伤检测后可知,焊接接头成形良好,没有气孔、裂纹以及未熔合侧壁等缺陷。

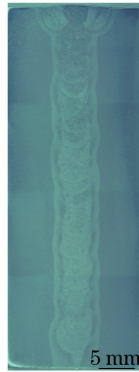


图 4 焊接接头的宏观形貌

Fig. 4 Macromorphology of welding joint

3.2 焊接接头不同区域的微观组织

接头不同区域的组织首先由焊接热循环中的峰值温度及冷却速度决定,进一步受到焊后热处理的影响。焊后热处理完成后,利用光学显微镜观察焊接接头上、中、下三个区域的焊缝和以粗晶区为主的 HAZ 的微观组织。焊接接头下部激光自熔焊焊接区域的金相组织如图 5 所示,由图 5(a)可以看出,焊缝两侧的熔合线几乎平行,焊缝垂直于熔合线,呈对生长的粗大树枝晶形貌。因为垂直于熔合线方向的热流动速度最大,所以晶粒在此方向上生长最快。图 5(b)所示的焊缝中心微观组织主要为回火索氏体和少量的针状铁素体,图 5(c)所示为母材(BM)经过 610 °C 高温回火后的热处理态微观组织,主要是由贝氏体、铁素体和马氏体-残余奥氏体的岛状组织所构成的复相组织,即粒状贝氏体。

激光填丝多层焊接接头主要可划分为四个区域,如图 6 所示,A 区域为未受到后层焊道热影响的焊缝金

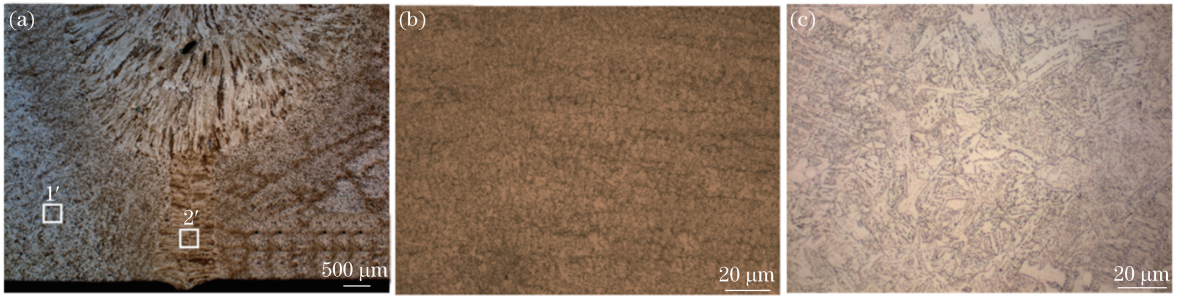


图 5 激光自熔焊焊道形貌。(a)宏观形貌;(b)图 5(a)中位置 1' 的局部放大;
Fig. 5 Weld pass morphologies in autogenous laser welding. (a) Macromorphology; (b) partially enlarged view of position 1' in Fig. 5(a); (c) partially enlarged view of position 2' in Fig. 5 (a)

属;B 区域为受到后层焊道热影响的焊缝金属,即为焊缝内的 HAZ。焊接热作用在母材侧形成的 HAZ 可分为两种,C 区域为焊缝母材侧的一次 HAZ,即该区域母材只受到本层焊道的焊接热影响;D 区域为焊缝母材侧的二次 HAZ,即该区域同时处于本层焊道和后一层焊道的热影响范围内,先后受到两次焊接热循环影响。

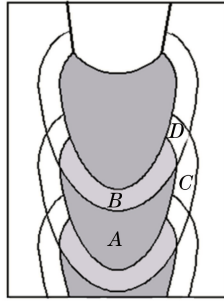


图 6 多层焊接头的区域划分

Fig. 6 Regional division of multi-layer welding joint

中部填丝焊区域的金相形貌如图 7 所示。图 7(b)中焊缝中心的微观组织包含大量的针状下贝氏体和上贝氏体及少量的回火马氏体。根据焊接热循环的作用,中部填丝焊缝的 HAZ 分为多种不同区域。图 7(c)和图 7(d)分别为中部填丝焊焊缝母材侧的一次 HAZ 粗晶区和细晶区,一次 HAZ 粗晶区由大量的粗大回火马氏体组成。经过焊后 610 °C 高温回火后,回火马氏体仍保持着原马氏体位向,SA508Gr.3Cl.2 钢中的 Mo 元素具有较高的回火抗力,使得马氏体在高温回火时没有完全分解,还保持着马氏体的位向,只是在相界、板条界和板条内析出了大量较为粗大的碳化物颗粒,称之为“高温回火马氏体”。由图 7(d)可知,中部填丝焊焊缝母材侧的一次 HAZ 细晶区的微观组织则为回火索氏体。由于焊缝与母材初始组织的不同,因此,焊缝内的 HAZ 组织不同于焊缝母材侧的。以粗晶区为例,图 7(e)所示中部填丝焊焊缝内的 HAZ 粗晶区的微观组织除了高温回火马氏体之外,还包含了一部分针状下贝氏体。由图 7(f)可以看出,焊缝母材侧的二次 HAZ 粗晶区主要由大量粗大的回火马氏体组成。

由三道焊缝构成的盖面焊区域的金相形貌如图 8 所示,其中 WM 表示焊缝金属。宏观形貌如图 8(a)所示;图 8(b)所示为中间道次的焊缝中心,主要由大量的羽毛状上贝氏体、下贝氏体和极少量的高温回火马氏体组成。中间道次的 HAZ 完全处于前面道次的焊缝内,图 8(c)所示为中间道次的 HAZ 粗晶区微观组织,可以看到大量的粒状贝氏体组织和少量的高温回火马氏体组织。图 8(d)所示为左侧道次的焊缝中心,主要由大量的针状下贝氏体和少量的高温回火马氏体组织组成。图 8(e)所示为左侧道次在母材中形成的 HAZ 粗晶区,可以看到全部是粗大晶粒的高温回火马氏体。图 8(f)所示为同时受到盖面中间道次和左侧道次热循环影响的焊缝内 HAZ 粗晶区的微观组织,主要由高温回火马氏体和针状下贝氏体组成。可以发现,填充焊缝的母材侧 HAZ 粗晶区比焊缝内的 HAZ 粗晶区更易生成粗大晶粒的马氏体。

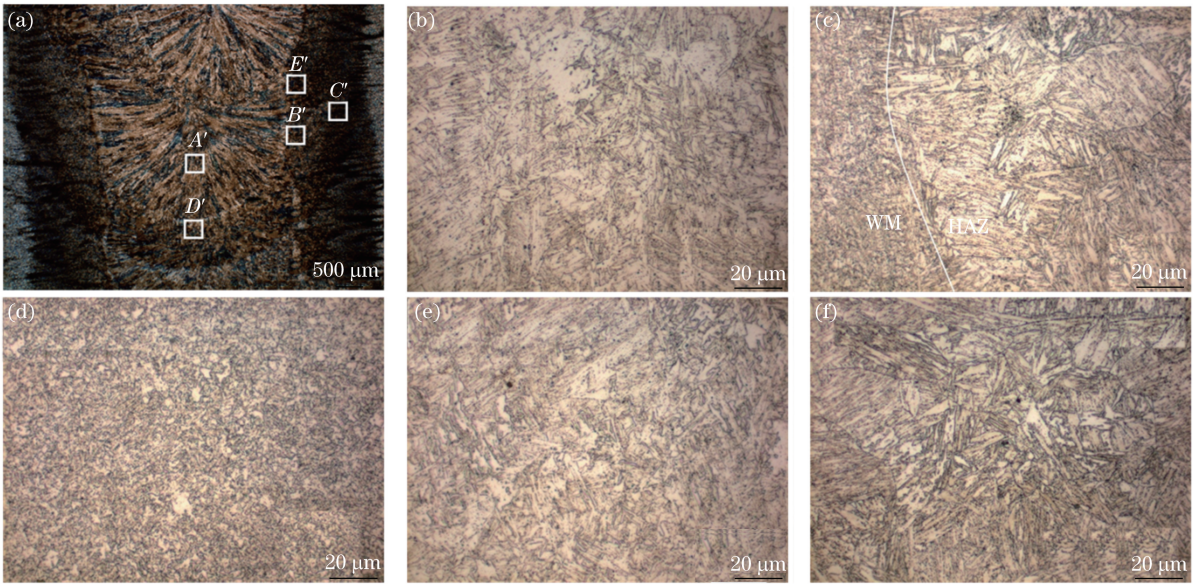


图 7 中部激光填丝焊焊道形貌。(a)宏观形貌;(b)图 7(a)中位置 A' 的局部放大;(c)图 7(a)中位置 B' 的局部放大;
 (d)图 7(a)中位置 C' 的局部放大;(e)图 7(a)中位置 D' 的局部放大;(f)图 7(a)中位置 E' 的局部放大
 Fig. 7 Middle weld pass morphologies in laser welding with filler wire. (a) Macromorphology; (b) partially enlarged view of position A' in Fig. 7(a); (c) partially enlarged view of position B' in Fig. 7(a);
 (d) partially enlarged view of position C' in Fig. 7(a); (e) partially enlarged view of position D' in Fig. 7(a);
 (f) partially enlarged view of position E' in Fig. 7(a)

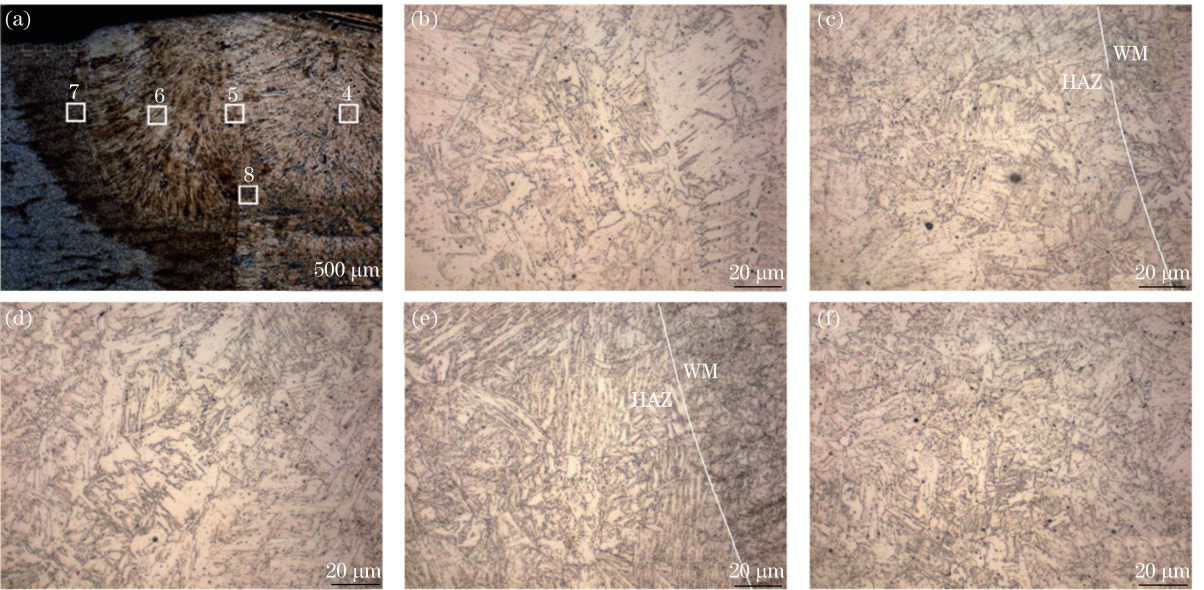


图 8 上部激光填丝焊焊道形貌。(a)宏观形貌;(b)图 8(a)中位置 4 的局部放大;(c)图 8(a)中位置 5 的局部放大;
 (d)图 8(a)中位置 6 的局部放大;(e)图 8(a)中位置 7 的局部放大;(f)图 8(a)中位置 8 的局部放大
 Fig. 8 Top weld pass morphologies in laser welding with filler wire. (a) Macromorphology; (b) partially enlarged view of position 4 in Fig. 8(a); (c) partially enlarged view of position 5 in Fig. 8(a);
 (d) partially enlarged view of position 6 in Fig. 8(a); (e) partially enlarged view of position 7 in Fig. 8(a);
 (f) partially enlarged view of position 8 in Fig. 8(a)

4 接头性能测试及分析

4.1 接头显微硬度

经过焊后热处理的 SA508Gr.3Cl.2 钢焊接接头上、中、下三个位置的硬度分布如图 9 所示。由于激光自熔焊部位的焊缝化学成分与母材的基本相同,且焊接速度较快、热输入较小、厚板散热较快、熔池冷却速度比填丝焊道的更快,因此更易形成淬硬组织。从硬度分布图来看,激光自熔焊部位的焊缝区硬度比填丝焊的大 80 HV 左右。中部填丝焊焊缝的硬度分布趋势大体是:从母材经 HAZ 到焊缝区,硬度先增大后减小,最后趋于平稳,硬度最大值出现在靠近熔合线的 HAZ 粗晶区。HAZ 粗晶区的微观组织为粗大的高温回火马氏体,故硬度值最高。焊缝区的组织主要为上贝氏体和针状下贝氏体,故其硬度值低于粗晶区的但高于母材区的。盖面焊与中部填丝焊的硬度分布趋势大致相同,其 HAZ 粗晶区的硬度最大值为 280 HV 左右,与中部填丝焊的一样。盖面焊中间道次焊缝的 HAZ 全部位于其他道次的焊缝内,此处 HAZ 粗晶区的硬度也明显小于母材侧的,但与盖面焊两侧道次的焊缝硬度相当,同时略大于盖面焊中间道次的焊缝硬度。

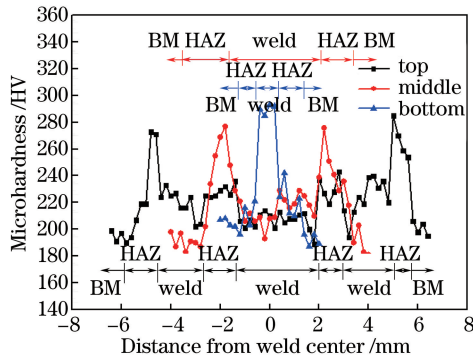


图 9 接头硬度分布

Fig. 9 Microhardness distributions of joint

4.2 拉伸及冲击试验

SA508Gr.3Cl.2 钢热处理态全厚度焊接接头的拉伸试验结果见表 3。焊接接头拉伸试样的抗拉强度高 达 686 MPa,拉伸断裂位置均位于母材,表明焊缝的强度高于母材的,焊接接头有良好的抗拉性能。

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

Tensile sample No.	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Tensile fracture position
1	562	684	Base material
2	564	687	Base material
Average	563	686	

焊接接头的 1/4、1/2、3/4 处的焊缝区在 3 °C 下的冲击试验结果见表 4。焊缝区冲击功最小为 62 J,最大 为 106 J,均低于母材的。填丝焊焊缝中心组织为大量的针状下贝氏体、上贝氏体以及少量的高温回火马氏 体,故其冲击功、侧向膨胀量和纤维断裂率都要明显小于微观组织为粒状贝氏体的母材。

表 4 冲击试验结果

Table 4 Results of impact test

Position	Absorbed energy /J	Lateral expansion /mm	Fiber fracture rate /%
Base material	123	1.89	64
3/4 joint	106	1.53	62
1/2 joint	62	0.88	47
1/4 joint	72	1.07	60

母材以及焊接接头 1/2 处冲击试样的断口形貌如图 10 所示。图 10(a)所示为母材宏观形貌。由 图 10(b)、(e)可以看出,母材冲击试样断口的晶状区面积明显小于焊接接头 1/2 处的冲击试样,表明母材冲 击试样更多地表现出韧性断裂特征。从图 10(f)可以看出,韧窝的大小十分均匀,表现出等轴状的特征,韧

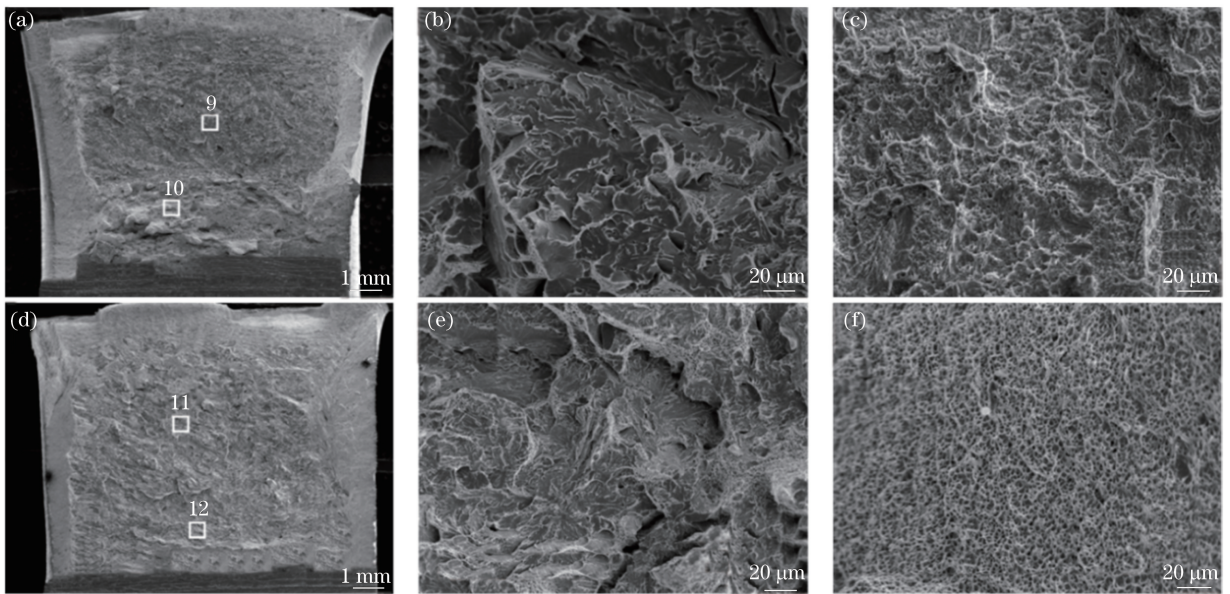


图 10 冲击试样的断口形貌。(a)母材宏观形貌;(b)图 10(a)中位置 9 的局部放大;(c)图 10(a)中位置 10 的局部放大;
 (d)焊接接头 1/2 处宏观形貌;(e)图 10(d)中位置 11 的局部放大;(f)图 10(d)中位置 12 的局部放大
 Fig. 10 Fracture morphologies of impact specimen. (a) Macromorphology of base material; (b) partially enlarged view of position 9 in Fig. 10(a); (c) partially enlarged view of position 10 in Fig. 10(a);
 (d) macromorphology of middle welding joint; (e) partially enlarged view of position 11 in Fig. 10(d);
 (f) partially enlarged view of position 12 in Fig. 10(d)

窝细小但仍有一定的深度,说明焊接接头 1/2 处的冲击试样也表现出了一定的韧性断裂特征。

5 结 论

通过超窄间隙激光填丝焊工艺,对 50 mm 厚的 SA508Gr.3Cl.2 钢进行了焊接试验,得到以下结论。

- 1) 焊后热处理后,接头下部的激光自熔焊焊缝中心形成了回火索氏体和针状铁素体,中部填丝焊部位的焊缝中心组织主要为上贝氏体和针状下贝氏体。接头上部盖面焊中间道次的 HAZ 粗晶区组织主要为高温回火马氏体和部分针状下贝氏体,左边道次焊缝母材侧的 HAZ 粗晶区组织为粗大的高温回火马氏体。
- 2) 激光自熔焊焊缝区的硬度高于中部填丝焊焊缝区的。
- 3) 焊接接头拉伸试样的拉伸断裂位置均位于母材,表明焊缝的强度高于母材的,焊接接头抗拉性能良好。从冲击试样断口形貌可知,接头断裂具有一定的韧性断裂特征。

参 考 文 献

- [1] Zinkle S J, Was G S. Materials challenges in nuclear energy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 735-758.
- [2] Yvon P, Carré F. Structural materials challenges for advanced reactor systems[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 385(2): 217-222.
- [3] Zinkle S J, Busby J T. Structural materials for fission & fusion energy[J]. Materials Today, 2009, 12(11): 12-19.
- [4] Verón P, Hipplesley C A, Knott J F. Comparative studies of stress-relief cracking in relaxation test specimens and in a full-scale weldment[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1984, 16(1): 29-51.
- [5] Murty K L, Miraglia P Q, Mathew M D, et al. Characterization of gradients in mechanical properties of SA-533B steel welds using ball indentation[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999, 76(6): 361-369.
- [6] Zhang X P, Dorn L. Investigation on the possibility of using the microshear test as a surveillance method to estimate the mechanical properties and fracture toughness of nuclear pressure vessel steel, A508CL3, and its joints welded by narrow-gap submerged-arc welding[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999, 76(1): 35-41.
- [7] Wang Baiping, Zhao Yong, Huang Jian. Investigation on microstructure of thick plate stainless steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203008.

- 王柏平, 赵勇, 黄坚. 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203008.
- [8] Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803007.
- [9] Xie Yufasheng, Huang Jian, Wang Wei, *et al.* Ultra-narrow gap laser wire filling welding forming defects of 5083 aluminum alloy thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0302008.
谢余发生, 黄坚, 王伟, 等. 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊成形缺陷研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302008.
- [10] Jokinen T, Karhu M, Kujanpää V. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:yttrium-aluminum-garnet laser with filler wire and hybrid process[J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(4): 220-224.
- [11] Zhao Yong, Wang Qingzhao, Huang Jian, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203007.
赵勇, 王清瑛, 黄坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203007.
- [12] Guo W, Dong S Y, Guo W, *et al.* Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 625: 65-80.