

20 mm 厚 316LN 不锈钢板的超高功率 光纤激光自熔焊

信纪军^{1,2,3}, 方超^{1,3*}, 宋云涛^{1,3}, 卫靖¹, 吴杰峰^{1,3}, 戴文华^{1,2,3}

¹中国科学院等离子体物理研究所装置总体研究室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院等离子体物理研究所特种焊接技术安徽省重点实验室, 安徽 淮南 232000

摘要 采用 20 kW 超高功率光纤激光器单道焊接了 20 mm 厚 316LN 奥氏体不锈钢, 研究了焊接工艺参数对焊缝成形及宏观形貌的影响, 并对焊接接头的显微组织和力学性能进行了分析。结果表明, 采用负离焦可以得到成形良好的焊缝; 焊缝组织为单一的奥氏体组织, 焊缝上部和底部中心区存在等轴晶粒, 焊缝中部中心区为粗大的柱状晶。在优化的工艺参数下, 焊接得到的接头抗拉强度为 645 MPa, 与母材相当。焊接接头断裂于熔合线边界处, 为典型的韧性断裂。焊接接头热影响区的显微硬度略高于焊缝和母材。

关键词 激光技术; 激光自熔焊; 厚板; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0502007

Autogenous Laser Welding of 20-mm-Thick 316LN Stainless Steel Plate by Ultra High Power Fiber Lasers

Xin Jijun^{1,2,3}, Fang Chao^{1,3}, Song Yuntao^{1,3}, Wei Jing¹, Wu Jiefeng^{1,3}, Dai Wenhua^{1,2,3}

¹Tokamak Design Division, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Anhui Key Laboratory of Special Welding Technology, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Huainan, Anhui 232000, China

Abstract The 20-mm-thick 316LN austenitic stainless steels are welded by the 20 kW ultra high power fiber laser, the effects of welding parameters on the macro-morphologies and weld formation are investigated, and the microstructures and mechanical properties of welded joints are analyzed. The results show that better surface appearances can be obtained via a negative defocusing. The weld microstructure is single austenite and there exist the equiaxed grains in the central areas of the top and bottom zones of welds; in contrast, there exist the coarse columnar grains in the central areas of the middle zone of welds. Under the optimal welding parameters, the tensile strength of welded joints is 645 MPa, equivalent to that of base metals. The fracture of welded joints occurs at the fusion line in a typical ductile manner. The micro-hardness of the heat-affected zone is slightly higher than those of welds and base metal.

Key words laser technique; autogenous laser welding; thick plate; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2008GB101000)

作者简介: 信纪军(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光焊方面的研究。E-mail: xinjijun@ipp.ac.cn

导师简介: 宋云涛(1973—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁约束核聚变工程方面的研究。

E-mail: ytsong@ipp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fangchao@ipp.ac.cn

1 引 言

国际热核聚变试验堆(ITER)计划是世界最大的国际科技合作工程之一,其真空室、磁体容器及支撑、导体等均为大厚度奥氏体不锈钢焊接结构件,厚板焊接技术是制约 ITER 工程建造的技术瓶颈之一^[1-4]。结构件巨大的外形尺寸及低温下严苛的工作条件使得 ITER 部件的焊接需保证良好的焊接质量并严格控制焊接变形^[5]。奥氏体不锈钢的传统焊接方法的焊接速度慢,热输入量大,接头热影响区较大,焊接残余应力及变形大,难以满足 ITER 部件中奥氏体不锈钢厚板的焊接要求。激光焊具有能量密度高、焊接速度快、热输入量小、焊接变形小、接头质量高等优点^[6-7],是一种先进、高效、优质的焊接方法,为厚板不锈钢的焊接提供了解决方法^[8-9]。

目前,厚板不锈钢的激光焊接只能采用激光窄间隙填丝焊^[10]和激光复合焊工艺^[11]。激光窄间隙填丝焊方法虽然降低了对激光功率的依赖性,但也降低了对接头装配精度的要求。而且,激光填丝焊容易出现侧壁、层间未熔合缺陷以及热裂纹缺陷^[11-12]。激光复合焊在焊接效率和焊接质量控制方面有较大的优势,但其热输入量较激光焊接的大,且

表 1 316LN 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 316LN austenitic stainless steels (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	P	S	Co	B	Nb	Fe
Content	0.017	0.45	1.58	16.74	12.86	2.05	0.14	0.019	<0.001	0.025	<0.0005	<0.02	Bal.

采用德国 IPG 公司的 YLS-20000 光纤激光器进行焊接试验,最大输出功率为 20 kW,聚焦距离为 300 mm,准直距离为 200 mm,光纤芯径为 300 μm ,最小光斑直径为 0.45 mm,激光焊接头安装在德国 KUKA 公司的 KR60HA 机器手臂上。采用对接接头的单激光自熔焊形式,焊接位置为平焊,以质量分数为 99.999% 的氩气作为保护气体。焊后将试样沿着横截面切开,研磨抛光后采用质量分数为 10% 的草酸水溶液进行电解腐蚀,利用光学显微镜观察焊缝

对于大尺寸小截面核聚变部件的焊接,其焊接变形的控制难度非常大。

随着超高功率激光技术的快速发展,厚板奥氏体不锈钢的激光单道穿透焊接成为可能。Zhang 等^[13-14]采用万瓦级光纤激光器对 12 mm 的厚板 304 不锈钢进行了焊接。Sun 等^[15]在横焊位置进行了 16 mm 厚 304 不锈钢激光焊接试验研究。厚板不锈钢的单道激光焊存在飞溅、未焊透、表面咬边以及未填满等焊接缺陷。尤其在单道平焊位置焊透厚板不锈钢时,表面张力与熔池重力作用的不平衡容易造成焊缝下塌、背面驼峰等缺陷。关于 20 mm 及以上厚板的高功率激光焊研究鲜有报道。

本文研究了 20 kW 光纤激光器对厚板奥氏体不锈钢的焊接特性以及不同焊接工艺参数对焊接缺陷的影响,获得了优化的焊接工艺参数,实现了 20 mm 厚超高功率激光深熔焊的优质连接,为 ITER 校正场超导磁体的焊接提供了试验依据。

2 试验材料和方法

选用 20 mm 厚的 ITER 超低碳 316LN 奥氏体不锈钢作为试验材料,其抗拉强度为 665 MPa,伸长率为 55%,其化学成分见表 1。

的宏观形貌和显微组织。采用奥地利 Qness 公司的 Q10A+ 型全自动显微硬度计测量接头显微硬度,载荷为 200 g,载荷保持时间为 5 s,测试路径如图 1 所示。室温环境下,在深圳三思纵横科技股份有限公司的 WAW -2000-DL 型电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸载荷加载速度为 2 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$,取三个试样的测试结果的平均值,拉伸试样的尺寸如图 2 所示,其中 R 为半径。采用美国 FEI 公司的 Nova Nano SEM450 扫描电镜观察接头的断口形貌。

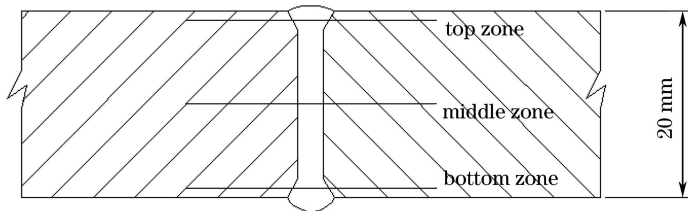


图 1 激光焊接头的显微硬度检测示意图

Fig. 1 Schematic of micro-hardness measuring of laser welded joints

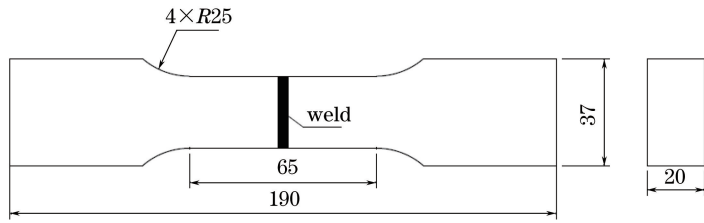


图 2 激光焊接头拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic of tensile specimen of laser welded joints

3 试验结果及分析

3.1 焊接接头表面成形及横截面形貌

当激光功率为 20 kW, 离焦量为 0 mm, 保护气流量为 15 L·min⁻¹时, 不同焊接速度下焊缝表面成形及焊缝横截面形貌见表 2。从表 2 可以看出, 当焊接速度为 1.2~2.0 m·min⁻¹时, 焊缝均实现了熔透焊接; 正反面焊缝成形连续, 焊缝背部未出现根部

驼峰缺陷, 焊缝内部未出现气孔、裂纹等缺陷; 但焊缝正面出现下塌、咬边以及飞溅等缺陷。随着焊接速度的增大, 焊接线能量的减小使得焊缝表面下塌情况逐渐好转; 但焊接熔池的稳定性受到影响, 焊接飞溅现象变得越来越严重。因此, 在实现熔透焊接过程中, 焊接速度的变化对焊缝的下塌和飞溅等有明显的影响。

表 2 焊接速度对焊缝表面成形和横截面形貌的影响

Table 2 Effect of welding speed on surface appearances and cross sections of welds

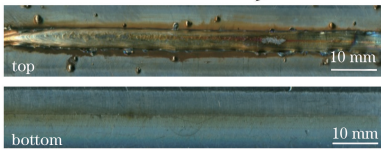

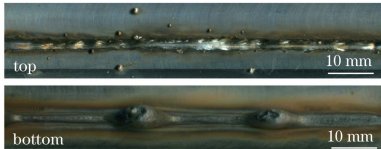

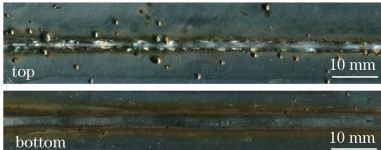

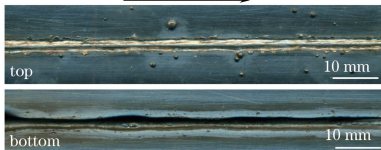

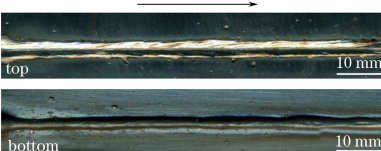

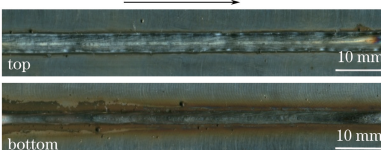
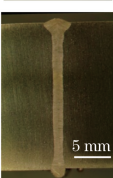
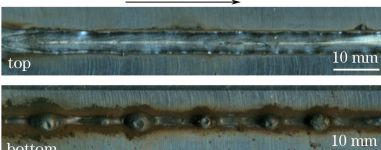

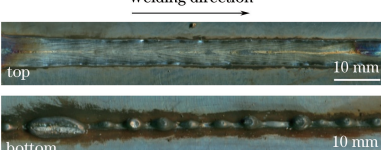

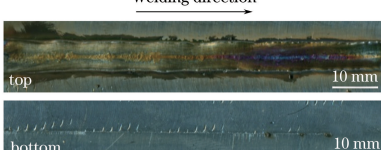

Welding speed / (m·min ⁻¹)	Surface appearance	Cross section
1.2	 top 10 mm	 5 mm
	 bottom 10 mm	
1.8	 top 10 mm	 5 mm
	 bottom 10 mm	
2.0	 top 10 mm	 5 mm
	 bottom 10 mm	

当激光功率为 20 kW, 焊接速度为 1.8 m·min⁻¹, 保护气流量为 15 L·min⁻¹时, 不同离焦量对焊缝表面成形和横截面形貌的影响见表 3。从表 3 可以看出, 当离焦量为 +10 mm 时, 焊缝未焊透; 当离焦量减小到 +5 mm 时, 焊缝表面飞溅及下塌严重, 且焊缝背部出现驼峰, 焊缝无法实现有效的连续成形。通常在焊缝出现底部驼峰的情况下, 也会伴随着表面下塌。这是因为小孔内金属蒸气压力和前沿孔壁液体凸起的向下动量使熔池金属流出

试样底面, 在表面张力的作用下, 熔池向后流动, 形成驼峰, 并导致焊缝上表面下塌^[16]。当离焦量从 0 mm 变化到 -10 mm 时, 焊缝中无底部驼峰和表面下塌的问题, 实现了有效的连续成形。当离焦量为负时, 焊缝表面飞溅程度明显减小, 焊缝表面逐渐变得光滑; 随着负离焦量绝对值的增大, 焊缝背面余高逐渐减小。当负离焦量增大至 -20 mm 和 -25 mm 时, 焊缝成形明显恶化, 焊缝呈现不连续熔透; 当离焦量为 -30 mm 时, 焊缝彻底未焊透。

表 3 离焦量对焊缝表面成形和横截面形貌的影响

Table 3 Effect of defocus on surface appearances and cross sections of welds

Defocusing /mm	Surface appearance	Cross section
+10	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
+5	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
0	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-3	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-6	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-10	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-20	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-25	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	
-30	<p style="text-align: center;">Welding direction →</p> 	

当离焦量为 -10 mm, 保护气流量为 15 L·min⁻¹时, 不同激光功率和焊接速度下焊缝表面成形及横截面形貌见表 4。当激光功率为 20 kW, 焊接速度分别为 1.5 m·min⁻¹ 和 1.8 m·min⁻¹时, 焊缝上下表面成形良好, 只存在局部咬边现象; 随着焊接速度的增大, 焊缝表面飞溅和咬边程度逐渐增大。当焊接速度为 1.5~2.7 m·min⁻¹时, 焊缝均实现了熔透焊接; 而当焊接速度为 3.0 m·min⁻¹时, 焊缝未焊透。因此, 当

激光功率为 20 kW 时, 20 mm 厚板的单道熔透焊接工艺的窗口非常宽。为了得到成形良好的焊缝, 需要减小激光对焊缝的冲击作用, 当激光功率减小为 19 kW, 焊接速度从 1.5 m·min⁻¹变化至 2.0 m·min⁻¹时, 焊缝均实现了熔透焊接; 当焊接速度为 1.8 m·min⁻¹时, 焊缝上下表面成形良好, 无飞溅、咬边等缺陷。从焊缝的横截面形貌也可以看出, 焊缝与母材结合良好, 且内部未见裂纹和气孔缺陷。

表 4 焊接速度和激光功率对焊缝表面成形和横截面形貌的影响

Table 4 Effects of welding speed and laser power on surface appearances and cross sections of welds

Laser power /kW	Welding speed /(m·min ⁻¹)	Surface appearance	Cross section
20	1.5		
20	1.8		
20	2.0		
20	2.4		
20	2.7		
20	3.0		
19	1.5		

续表

Laser power /kW	Welding speed /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Surface appearance	Cross section
19	1.8		
19	2.0		

3.2 焊接接头的显微组织

采用优化激光焊接工艺得到的焊接接头宏观形貌及不同位置处焊缝显微组织形貌如图 3 所示,其中激光功率为 19 kW,焊接速度为 $1.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,离焦量为 -10 mm ,保护气体流量为 $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。从图 3(a)可以看出,焊缝无明显咬边,未见气孔、裂纹等缺陷。焊缝的凝固模式为全奥氏体凝固模式,焊缝组织为单一的奥氏体相。图 3(b)所示为焊缝上部的显微组织形貌,其主要为沿垂直于两边熔合线方向生长的柱状晶以及在焊缝中心处生长的等轴晶。柱状晶紧紧依附于母材并逆着热传导方向向焊缝中心

生长,具有联生结晶和外延生长的特征。从焊缝上部中心线处显微组织放大图可以看到,在柱状晶中心交汇处存在不同生长方向的等轴晶粒,如图 3(e)所示。由图 3(c)可知,焊缝中部的显微组织为方向性更强的粗大柱状晶,同时,在图 3(f)中可以观察到焊缝中部柱状晶的焊缝中心线,且未发现焊缝中部中心线处有等轴晶粒存在,焊缝中部较快的冷却速度使得柱状晶沿着熔合线两侧快速生长并在中心线处交汇。图 3(d)所示为焊缝底部的显微组织照片,在焊缝中心线处析出了大量的等轴晶,等轴晶的组织放大图如图 3(g)所示。因此,接头显微组织在深度方向上存

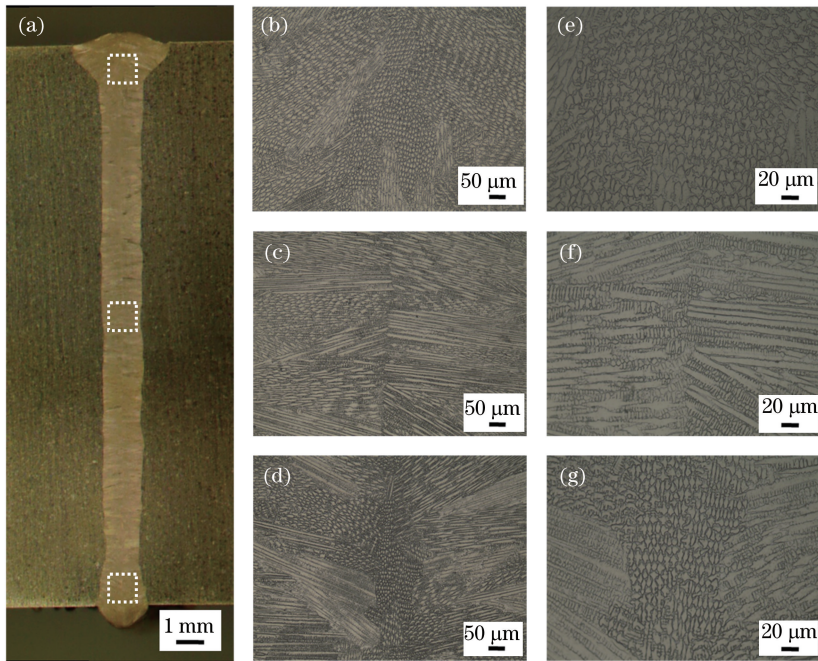


图 3 焊接接头宏观形貌及焊缝不同位置处的显微组织形貌。(a)激光焊接头宏观形貌;(b)焊缝上部显微组织;(c)焊缝中部柱状晶区;(d)焊缝底部显微组织;(e)图 3(b)的局部放大图;(f)图 3(c)的局部放大图;(g)图 3(d)的局部放大图
 Fig. 3 Macro morphologies of laser welded joints and microstructures at different locations of weld. (a) Macro morphology of laser welded joints; (b) microstructure at the top of weld; (c) columnar dendritic structure in the middle of weld; (d) microstructure at the bottom of weld; (e) local magnification of Fig. 3 (b); (f) local magnification of Fig. 3 (c); (g) local magnification of Fig. 3 (d)

在差异。焊缝上部和底部的显微组织由熔合线附近的柱状晶和焊缝中心的等轴晶组成,焊缝中部由方向性较强的柱状晶组成,不同区域显微组织的差异可能与焊接过程中各区域熔池的冷却条件有关。

3.3 焊接接头的力学性能

当激光功率为 19 kW,焊接速度为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量为 -10 mm 时,激光焊接头的应力应变曲线如图 4 所示,其中插图拉伸断口实物照片。由图可知,焊接接头展现出良好的拉伸性能,抗拉强度为 645 MPa,与母材相当。拉伸断裂位于熔合线附近焊缝区内,这是因为靠近熔合线处为垂直于熔合线生长的粗大的柱状晶组织,抗拉强度较小,且焊趾处存在应力集中。激光焊接头断口形

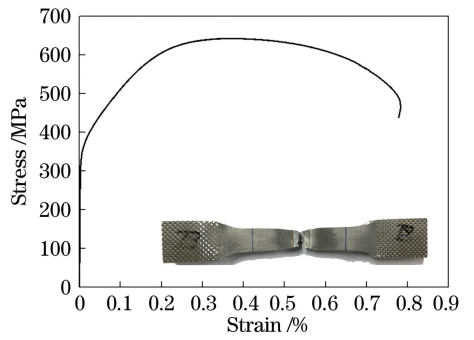


图 4 拉伸试样的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of tensile specimen

貌如图 5 所示。可以看到,断口是由一些细小的韧窝和撕裂棱组成,韧窝大小不一,深度较浅,为典型的韧性断裂。

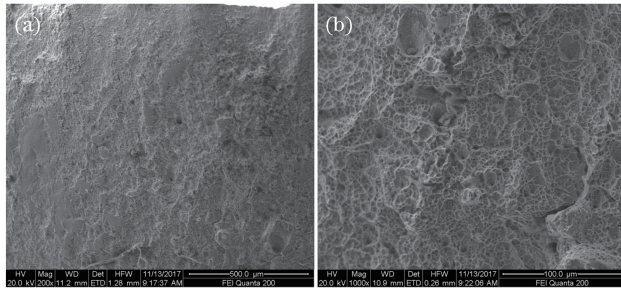


图 5 拉伸试样的断口形貌图。(a)低倍放大;(b)高倍放大

Fig. 5 Fracture morphologies of tensile specimen. (a) Low magnification; (b) high magnification

焊接接头深度方向不同位置的显微硬度分布如图 6 所示。由图可知,从母材到热影响区的显微硬度值逐渐增大,热影响区的显微硬度较大,约为 230 HV。这可能是由于热影响区受到热循环的作用,在冷却过程中析出了碳化物和氮化物。焊缝区域随着离焊缝中心线距离的减小,显微硬度值逐渐减小,焊缝中心线附近的显微硬度值最小。深度方向不同位置的显微硬度在热影响区附近的差异较小,而在焊缝中心区附近存在一定的差别,焊缝中部的中心区显微硬度值大于焊缝上部和焊缝底部的。

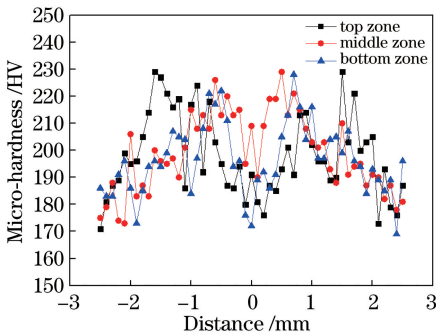


图 6 焊接接头的显微硬度分布

Fig. 6 Micro-hardness distribution of welded joints

由焊缝不同深度位置的显微组织可知,焊缝上部和底部区域中心线附近为等轴晶粒,而焊缝中部中心线附近为柱状晶粒,在凝固后期杂质元素偏聚于等轴晶晶界处,造成焊缝上部和底部区域显微硬度值的减小。

4 结 论

采用 20 kW 高功率光纤激光器对 20 mm 厚的 316LN 奥氏体不锈钢厚板进行了单道激光焊接试验,研究了工艺参数对焊缝成形的影响,并对接头的显微组织和力学性能进行了分析,得到以下结论。

1) 通过工艺参数优化,实现了 20 mm 厚 316LN 奥氏体不锈钢的自熔焊接。当激光功率为 19 kW,焊接速度为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量为 -10 mm 时,焊缝成形良好,没有气孔、裂纹等缺陷。

2) 在优化焊接工艺参数下,焊缝的显微组织为单一的奥氏体相,接头显微组织在深度方向上存在差异。

3) 激光焊接接头的拉伸断裂位于熔合线附近焊缝区内,断裂方式为典型的韧性断裂。

4) 焊缝中心处深度方向不同位置的组织形貌

差异造成显微硬度值存在一定的差异。

参 考 文 献

- [1] Jones L, Arbogast J F, Bayon A, *et al.* Manufacturing preparations for the European vacuum vessel sector for ITER [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, 87(5/6): 700-705.
- [2] Sakurai T, Iguchi M, Nakahira M, *et al.* Mechanical properties of welded joint at cryogenic temperature for manufacturing of ITER TF coil structure [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 4204705.
- [3] Fang C, Song Y T, Wu W Y, *et al.* Thermal analysis of laser welding for ITER correction coil case [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 100: 357-363.
- [4] Fang C, Song Y T, Wei J, *et al.* Microstructural characteristics of the laser welded joint of ITER correction coil sub case [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 98/99: 1960-1963.
- [5] Xin J J, Fang C, Song Y T, *et al.* Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of ITER-grade 316LN austenitic stainless steel weldments [J]. *Cryogenics*, 2017, 83: 1-7.
- [6] Li Z J, Lü J X, Zou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of joint in laser welding of stainless steels with nitrogen shielding gas [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202006. 李竹洁, 吕俊霞, 邹江林, 等. 氮气保护不锈钢激光焊接接头组织及力学性能 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202006.
- [7] Ren Y, Wu Q, Zou J L, *et al.* Real-time monitoring of coaxial protection fiber laser welding of austenitic stainless steels [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0502003. 任勇, 武强, 邹江林, 等. 奥氏体不锈钢光纤激光同轴保护焊接的实时监测 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0502003.
- [8] Wu S K, Xiao R S, Chen K. Laser welding of heavy section stainless steel plants [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [9] Zhang G W, Xiao R S. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding [J]. *Chinese Journal of 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.
- [10] Yu Y C, Yang S L, Yin Y, *et al.* Multi-pass laser welding of thick plate with filler wire by using a narrow gap joint configuration [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(7): 2125-2131.
- [11] Kujanpaa V. Thick-section laser and hybrid welding of austenitic stainless steels [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 630-636.
- [12] Nasstrom J, Frostevarg J, Kaplan A F H. Multipass laser hot-wire welding: Morphology and process robustness [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022014.
- [13] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, *et al.* Direct observation of keyhole characteristics in deep penetration laser welding with a 10 kW fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19997-20004.
- [14] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, *et al.* Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser [J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 568-576.
- [15] Sun J H, Feng K, Zhang K, *et al.* Fiber laser welding of thick AISI 304 plate in a horizontal (2G) butt joint configuration [J]. *Materials & Design*, 2017, 118: 53-65.
- [16] Chen G Y, Xia H L, Zhou C, *et al.* Study on the mechanical of root humping of laser welding with high power fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0203004. 陈根余, 夏海龙, 周聪, 等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203004.