

百毫米级 304 不锈钢超窄间隙激光焊接头的组织及性能

杨武雄¹, 信纪军^{2,3,4}, 方超^{2,4*}, 戴文华^{2,3,4}, 卫靖^{2,4}, 吴杰峰^{2,4}, 宋云涛^{2,3,4}

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;

²中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

³中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

⁴特种焊接技术安徽省重点实验室, 安徽 淮南 232000

摘要 采用超窄间隙激光焊对 100 mm 厚 304 奥氏体不锈钢进行了焊接试验, 并研究了接头的显微组织和力学性能。结果表明, 超窄间隙激光焊可以实现百毫米级及以上厚板的有效连接且焊缝的成形良好。接头的显微组织由奥氏体和少量铁素体组成, 晶粒呈胞状和等轴状。接头的拉伸强度为 658 MPa。拉伸断裂位于焊缝的胞状晶区, 断裂形式为典型的延性断裂, 断口形貌为细小均匀的韧窝和撕裂棱。焊缝组织中等轴晶区的显微硬度大于胞状晶区。

关键词 激光技术; 超窄间隙激光焊; 厚板焊接; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0702005

Microstructures and Mechanical Properties of Hundred-Millimeter-Grade 304 Stainless Steel Joints by Ultra-Narrow Gap Laser Welding

Yang Wuxiong¹, Xin Jijun^{2,3,4}, Fang Chao^{2,4}, Dai Wenhua^{2,3,4},
Wei Jing^{2,4}, Wu Jiefeng^{2,4}, Song Yuntao^{2,3,4}

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

⁴Anhui Key Laboratory of Special Welding Technology, Huainan, Anhui 232000, China

Abstract The 100 mm thickness SUS304 stainless steels are welded by the ultra-narrow gap laser welding, and the microstructures and mechanical properties of the joints are analyzed. The results show that the hundred-millimeter-grade thickness plates can be effectively welded by the ultra-narrow gap laser welding and the welds present good surface appearances. The microstructures of the joints are composed of austenite and small amount of ferrite, and the grains are with the cellular equiaxed shapes. The tensile strength of the joints is 658 MPa and the tensile fracture is located at the cellular grain zone near the fusion line. The fracture morphology shows fine equiaxed dimples and tearing ridges, which indicates that the fracture is ductile. The microhardness at the equiaxed grain zone is obviously higher than that at the cellular grain zone.

Key words laser technique; ultra-narrow gap laser welding; thick plate welding; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

1 引言

随着工业发展对大型厚壁金属构件要求的不断

提高, 大厚板的优质、高效连接技术成为迫切需求。大厚板的连接主要采用传统的弧焊方法, 焊接速度低, 热输入量大, 易造成接头组织粗化和性能降低。

收稿日期: 2018-01-12; 收到修改稿日期: 2018-02-02

作者简介: 杨武雄(1976—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事先进激光制造技术方面的研究。E-mail: bbgei@126.com

* 通信联系人。E-mail: fangchao@ipp.ac.cn

激光焊作为一种高能束焊接方法,具有热输入量少、接头质量好、焊接效率高等优点^[1-3],但是受激光功率、光束品质、焊接工艺和一次熔透深度等因素影响,激光焊在大厚度材料焊接中的应用受到限制。

超窄间隙激光焊利用了激光束的高能量密度、精确可控以及超窄间隙焊填充材料少的特性,为大厚板甚至超厚板的焊接提供了一种可行的方法^[4]。对激光束的传输、聚焦参数进行优化设计,可以使百毫米级厚板的间隙尺寸减小至 4 mm 以下,从而减小超窄间隙激光焊的金属填充量及焊接变形,提升焊接效率。此外,超窄间隙激光焊可以通过调整填充金属成分来调节焊缝组织,改善接头性能^[5-7]。国内外学者已经进行了较系统的超窄间隙激光焊研究。Jokinen 等^[8-9]利用 3 kW 的 YAG 激光实现了 35 mm 厚钢板的焊接。Zhang 等^[10]采用超窄间隙激光焊实

现了板厚为 50 mm 的 316L 不锈钢板的焊接,焊接接头质量优良。Fang 等^[11-12]通过超窄间隙激光焊实现了 20 mm 厚 316LN 奥氏体不锈钢的优质连接。肖荣诗等^[13-14]利用 6 kW 多模光纤激光实现了 60 mm 厚 304 不锈钢的焊接。黄坚等^[15]等采用大功率 CO₂ 激光实现了 70 mm 厚碳钢板的焊接。

本文采用自行设计开发的超窄间隙激光焊接系统与工艺技术,开展了 100 mm 厚 304 不锈钢的超窄间隙激光焊试验,研究并分析了焊缝的成形、接头的组织特性和力学性能。

2 试验材料和方法

选择 100 mm 厚的 304 奥氏体不锈钢作为试验材料,其化学成分见表 1。填充焊丝为 ER347 奥氏体不锈钢焊丝,其化学成分见表 2。

表 1 304 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 304 austenitic stainless steels (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	P	S	Fe
Content	0.039	0.54	1.12	18.22	8.01	0.061	0.035	0.003	Bal.

表 2 ER347 奥氏体不锈钢焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of ER 347 austenitic stainless steel filler (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Nb	Fe
Content	0.03	0.40	1.34	19.24	9.55	<0.02	0.017	0.013	0.51	Bal.

采用美国 IPG 公司的 YLS-6000 光纤激光器和德国 KUKA 公司生产的 KR60HA 六轴机械手加工系统进行焊接试验,激光系统参数为:传输光纤芯径 200 μm,聚焦镜焦距 250 mm,焦斑直径 0.42 mm。焊丝输送角度为 45°,焊丝干伸长度为 15 mm,采用质量分数为 99.99% 的氩气作为保护

气体并从板面吹入熔池。焊接装置示意图如图 1 所示,超窄间隙坡口如图 2 所示。超窄间隙采用 U 型坡口,坡口钝边厚度为 5 mm,宽度为 4 mm。焊接工艺:钝边采用激光自熔焊一次焊透,然后采用激光填丝的方法在间隙内逐层堆积直至形成完整焊缝,焊接工艺参数见表 3。焊后将焊缝沿横截

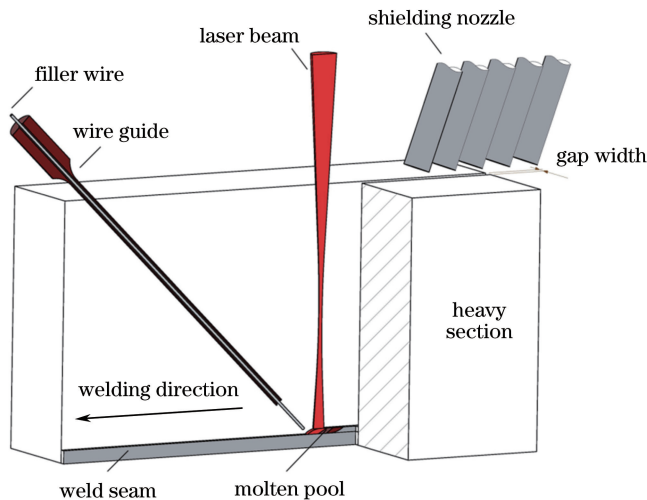


图 1 超窄间隙激光焊示意图

Fig. 1 Schematic of ultra-narrow gap laser welding

面切开进行取样,样品经机械加工和研磨抛光后,用质量分数为 10% 的草酸水溶液进行电解腐蚀。使用日本奥林巴斯公司生产的 M51 光学显微镜观察焊缝的组织形貌。使用山东莱州华银试验仪器有限公司生产的 310HVS-5 型显微硬度计测量接头的显微硬度,载荷为 500 g,保持时间为 15 s。拉伸试样厚度为 2 mm,具体尺寸如图 3 所示。采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 WAW-2000-DL 型电子万能试验机进行拉伸试验,拉伸载荷加载速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用德国蔡司公司生产的 AURIGA 型扫描电镜观察接头的断口形貌。

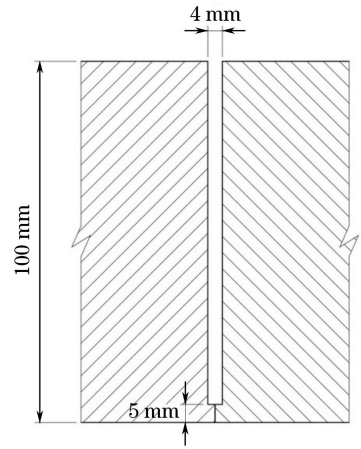


图 2 超窄间隙坡口示意图

Fig. 2 Schematic of ultra-narrow gap grooves

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

Position	Laser power /kW	Welding speed / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Wire feed speed / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Defocusing /mm	Gas flow rate / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
Root pass	5000	1.0	-	+5	20
Filler or cover pass	4500	0.6	2.0	+40	20

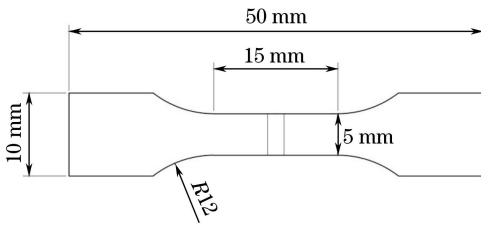


图 3 拉伸试样示意图

Fig. 3 Schematic of tensile specimen

3 结果及分析

3.1 表面成形及横截面形貌

超窄间隙激光焊接头的焊缝表面形貌如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,坡口内填充的金属充分铺

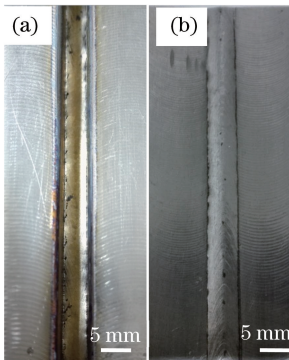


图 4 焊缝形貌。(a)坡口内焊缝;(b)焊缝外观

Fig. 4 Weld appearance. (a) Weld in groove;

(b) weld profile

展,且与母材两侧熔合良好,没有发生熔合不良和侧壁过度熔化而引起的咬边现象;坡口内焊缝表面保护效果良好,呈亮白的金属原色。由图 4(b)可以看出,焊缝表面鱼鳞纹细密规则,焊缝整体形貌均匀一致。

超窄间隙激光焊接头试样及焊缝横截面形貌如图 5 所示。可以看出,焊接试样的变形很小。整个接头由 42 层激光填丝焊堆积而成,平均每层堆高约为 2.4 mm。焊缝宽度平均值为 4.5 mm。整条焊缝熔合比为 11%,未出现气孔、裂纹、侧壁未熔合及冷隔等缺陷。

3.2 显微组织

超窄间隙激光焊接头显微组织如图 6 所示。根据焊缝的组织形貌特点将其分为熔合区、搭接区、中心细晶区和多晶型混合区分别进行研究。图 6(a)所示为低倍率下的焊缝组织,可以发现,焊缝区由单一的奥氏体相组成。由图 6(b)可知,在焊缝熔合区的组织形貌中,胞状晶束以大角度晶界分布于熔合线内侧,胞状晶间夹杂着部分细小的一次枝晶。熔合区为一条宽度约为 $50 \mu\text{m}$ 的带状区,其组织主要为胞状奥氏体及微小的条状铁素体。带状区偏母材侧可发现棒状铁素体,其上垂直分布着细小的板条状铁素体。热影响区受激光加热影响,分布着少量析出的条状铁素体,热影响区中奥氏体晶界处没有发现碳化物析出和晶界液化现象。图 6(c)所示为搭接区显微组织,没有发现明显的层

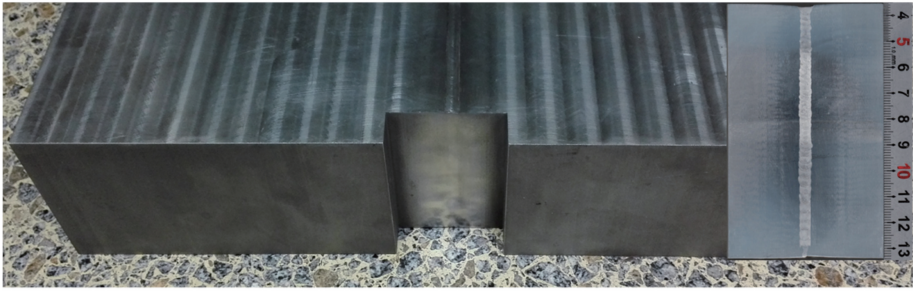


图 5 接头试样及横截面形貌

Fig. 5 Joint specimen and its cross-sectional appearance

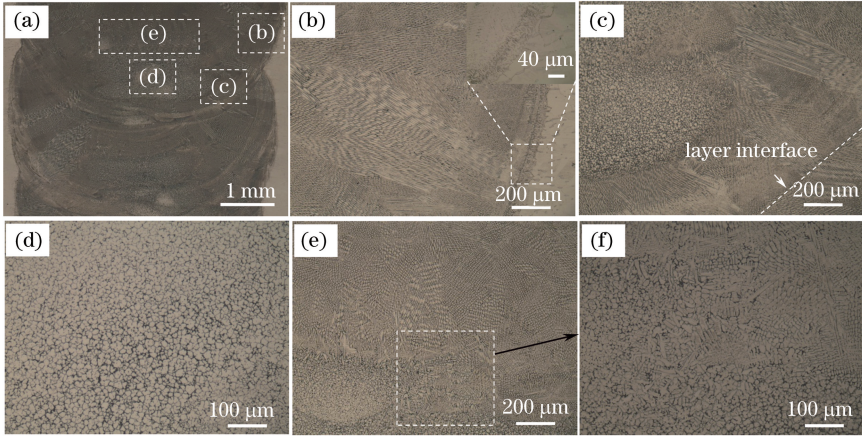


图 6 接头不同区域的显微组织。(a)低倍;(b)熔合线;(c)搭接区;(d)细晶粒区;(e)混合区;(f)图 6(e)的局部放大

Fig. 6 Microstructures at different zones of joints. (a) Low magnification; (b) fusion line; (c) lap zone; (d) fine grain zone; (e) mixed zone; (f) local magnification of Fig. 6(e)

状偏析,组织形貌为胞状晶和一次枝晶围绕着的中心等轴细晶区。这是因为多道焊时上层的高温加热使得下层的晶粒长大和析出物重新溶解,晶粒长大方向与热量散失方向相反,形成的柱状晶呈圆弧状分布;激光焊高的温度梯度形成大过冷度,使溶质元素富集在固/液界面凝固前沿,驱使金属熔液快速成核,焊缝中心相对均衡的温度场也有助于等轴晶的生长。焊丝中含有的铌元素在降低碳在奥氏体中溶解度的同时有利于促进稳定弥散的碳化物粒子的形成,成为新晶粒的异质成核中心,从而胞状晶被抑制而等轴晶得以成长,等轴细晶形貌如图 6(d)所示。图 6(e)所示为等轴晶、胞状晶和枝晶相混合的组织形貌。激光焊极快的传热传质和剧烈的熔池流动对不同形貌和取向的晶粒生长有很大的推动作用,因此,在规则晶区的交叉区域会有形貌差异很大的不同晶型出现。

3.3 力学性能

超窄间隙激光焊接头拉伸试验的应力-应变曲线如图 7 所示。由图可知,焊缝的平均抗拉强度为 658 MPa,母材的拉伸强度为 698 MPa,焊缝的拉伸

强度达到了母材强度的 94.3%,焊缝的静态力学性能良好。焊接接头的断裂位置位于焊缝区中胞状晶区内,这是因为焊缝区的胞状晶较粗大,且枝晶间容易发生元素偏聚,造成其强度降低。焊接接头的断口形貌由细小的韧窝和撕裂棱构成,韧窝表现为完整且封闭的撕裂棱及底部凹坑,断口为典型的延性断裂形貌。由图 8 断口形貌可以看到,在断口韧窝底部均匀分布着纳米级的第二相颗粒。断口处纳米颗粒的能谱分析结果如图 9 所示。由图可知,纳米级的颗粒为合金元素的氧化物颗粒。在拉伸过程

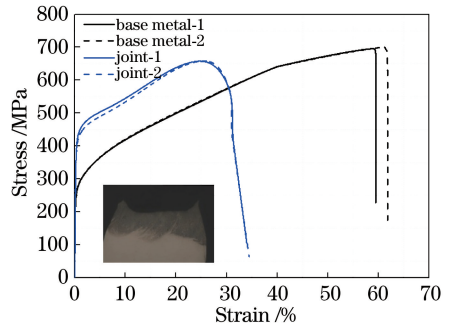


图 7 接头的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of joints

中, 纳米级的第二相颗粒会阻碍位错的运动, 在颗粒附近造成位错塞积, 从而形成微裂纹源, 在拉力继续

作用下, 微裂纹起裂形成小的微孔, 微孔聚集长大并最终发生断裂。

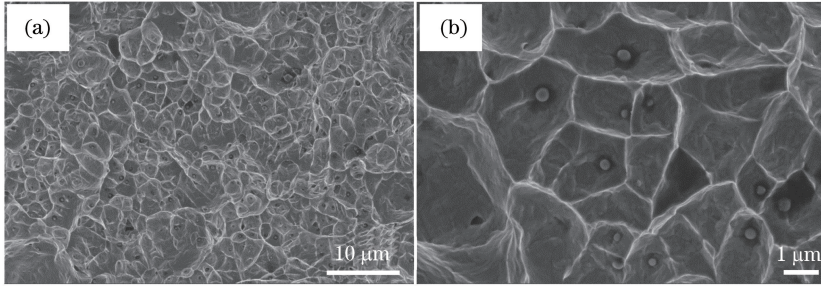


图 8 接头的断口形貌。(a)低倍放大;(b)高倍放大

Fig. 8 Fracture morphologies of joints. (a) Low magnification; (b) high magnification

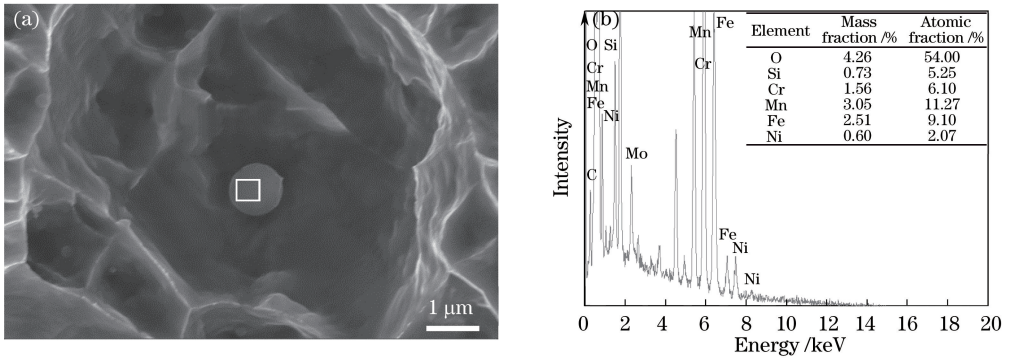


图 9 (a)接头断口表面颗粒及(b)其能谱分析结果

Fig. 9 (a) Particle on joint fracture surface and (b) its energy spectrum analysis result

超窄间隙激光焊接头的显微硬度分布如图 10 所示。热影响区和熔合区的显微硬度比母材略小而焊缝中心的硬度略大于母材, 硬度差值最大约为 30 HV。这可能是由于热影响区受循环热作用析出了部分铁素体, 较软铁素体的存在导致了热影响区和熔合区显微硬度的减小。焊缝两侧胞状晶区的晶粒呈粗大的团束状结构, 造成其显微硬度波动较大, 整体偏小; 等轴细晶粒区的晶粒细小, 晶间均匀分布的碳化物和氮化物显著增大了其显微硬度。在焊缝

上中下位置, 接头的显微硬度分布趋势趋于一致, 各部位的显微硬度差异较小。

4 结 论

采用超窄间隙激光焊成功实现了 100 mm 厚 304 奥氏体不锈钢的焊接, 得到以下结论。

- 1) 焊缝成形良好, 没有气孔、未熔合、裂纹等缺陷。
- 2) 焊缝的显微组织由奥氏体和微量铁素体组成。接头的显微组织由胞状晶和等轴晶组成。
- 3) 焊接接头的拉伸强度为 658 MPa, 达到母材强度的 94.3%。拉伸断裂位于焊缝的胞状晶区域内, 断裂方式为典型的延性断裂, 韧窝内分布着大量的第二相氧化物纳米颗粒。
- 4) 焊接接头等轴晶区域内的显微硬度大于胞状晶区域的。焊缝上中下位置的显微硬度分布趋于一致, 显微硬度差异较小。

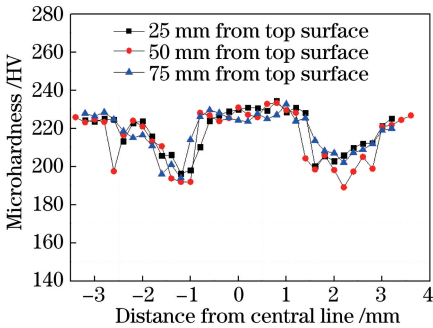


图 10 接头不同位置处的显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distributions at different positions of joints

参 考 文 献

[1] Onozuka M, Alfile J P, Aubert P, *et al.* Manufacturing and maintenance technologies

- developed for a thick-wall structure of the ITER vacuum vessel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 55(4): 397-410.
- [2] Li Z J, Lü J X, Zou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of joints 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.
- [3] 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.
- [4] Xie Y F S, Huang J, Wang W, *et al.* Ultra-narrow gap laser wire filling welding forming defects of 5083 aluminum alloy thick plate [J]. *Chinese Journal of 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.
- [5] Vollertsen F, Buschenhenke F, Seefeld T. Reduction of hot cracking in laser welding using hypereutectic AlSi filler wire [J]. *Welding in the World*, 2008, 52(5/6): 3-8.
- [6] Liu C, Yang W G, Chen W Z, *et al.* Research on gap width detecting sensor and wire feeding system in butt laser welding with filler wire[J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 199-202.
刘春, 杨文广, 陈武柱, 等. 填丝激光焊对接间隙宽度检测传感器与送丝系统的研究 [J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 199-202.
- [7] Yin J, Li L Q, Tao W, *et al.* Weld microstructure characteristics of dual laser beam multi-layer welded high strength steel with filler wire [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1361-1367.
尹杰, 李俐群, 陶汪, 等. 高强度双光束填丝多层焊的焊缝组织特征 [J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1361-1367.
- [8] Jokinen T, Kujanpaa V. Multi-pass Nd:YAG laser welding of thick section austenitic stainless steel[C]. *The 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, 2001: 438-447.
- [9] Jokinen T, Viherva T, Riikonen H, *et al.* Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas-metal arc welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2000, 12(5): 185-188.
- [10] Zhang X D, Ashida E, Tarasawa S, *et al.* Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers [J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23(2): 022002.
- [11] Fang C, Zhang S T, Zhou Z C, *et al.* Study on laser welding of case closure weld for ITER correction coil [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(3): 4201103.
- [12] 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.
- [13] Wu S K, Zou J L, Xiao R S, *et al.* Ultra-narrow-groove laser welding for heavy sections in ITER [J]. *Welding Journal*, 2016, 95(8): 300-308.
- [14] 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.
- [15] Zhao Y, Ma S C, Huang J, *et al.* Narrow-gap laser welding using filler wire of thick steel plates [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(5/6/7/8): 2955-2962.