

# 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析

王柏平 赵勇 黄坚

(上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 作为一种新颖的不锈钢厚板连接方法,窄间隙激光填丝多道焊接可以显著提高焊接效率,但目前关于该工艺的不锈钢焊缝组织特点缺乏详细的研究。用 CO<sub>2</sub> 激光填丝多道焊连接 16 mm 厚的 304 钢板,通过光学显微镜、背散射电子衍射(EBSD)、能谱分析(EDS)研究接头组织特征。结果显示,以 8 kW 功率激光、三道次焊接可以获得无裂纹和气孔的良好焊缝。接头组织特征主要为焊缝宏观形貌整体窄而高,上下的宽度基本一致。焊接热影响区极窄,熔合线一侧奥氏体晶粒形貌与母材相当;焊缝中存在长条骨架状和等轴状两种铁素体形貌。奥氏体形貌以柱状晶为主,晶粒尺寸粗大。多道焊的重复加热未造成靠近重熔区焊缝组织的明显变化。主要合金元素 Cr, Ni 在焊缝中均匀分布,无明显偏析。

**关键词** 激光技术;显微组织;多道焊;不锈钢;填丝;背散射电子衍射

**中图分类号** TG456.7;TG401 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0203008

## Investigation on Microstructure of Thick Plate Stainless Steel Joint Welded by Multi-Pass Laser Welding with Filler Wire

Wang Baiping Zhao Yong Huang Jian

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** As a novel way for the joint of thick plate stainless steel, multi-pass laser welding with narrow gap and filler wire can improve the welding efficiency, but seldom research has conducted to the microstructure of this method. In this article, 304 stainless steel plate with 16 mm thickness are welded by CO<sub>2</sub> laser welding with filler, the microstructure of joint are analyzed by optical microscope, electron backscatter diffraction (EBSD) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that, fine joint without crack and porosity can be obtained by 8 kW laser power and three pass of welding. The welding seam profile is narrow and high with homogenous width from bottom to top. The heat affected zone (HAZ) is very narrow and no coarse austenitic grains are seen beside fusion line. Two profiles of ferrite such as skeletal and equiaxial exist in welding seam. The characteristic of austenitic is mainly columnar grains and the size is very coarse. There is no obvious change in the area near re-melted region in spite of the re-heating of multi-pass laser welding. The main alloy elements Cr, Ni are distributed evenly in welding seam and no obvious segregation are seen.

**Key words** laser technique; microstructure; multi-pass laser welding; stainless steel; filler wire; electron backscatter diffraction

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

厚板奥氏体不锈钢的焊接,传统上采用开制大

角度坡口的熔化极气体保护焊(GMAW)和埋弧焊多层多道焊工艺,存在道次多,焊接工作量大的缺

收稿日期: 2012-09-24; 收到修改稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51035004)资助课题。

作者简介: 王柏平(1986—),男,硕士研究生,主要从事厚板激光焊接技术方面的研究。

E-mail: wangbp@sjtu.edu.cn

导师简介: 黄坚(1967—),男,博士,副教授,主要从事激光焊接与熔覆技术,焊接过程分析与数值模拟等方面的研究。

E-mail: Jhuang@sjtu.edu.cn

点。近年来发展的窄间隙激光填丝焊接工艺<sup>[1~4]</sup>可以显著提高焊接效率。Jokinen 等<sup>[5]</sup>用 3 kW 功率 YAG 激光焊接 20 mm 厚度 304 L 不锈钢板对接接头; Zhang 等<sup>[6]</sup>以 6~8 kW 光纤激光焊接整体 50 mm 厚度 316 L 不锈钢板对接接头,均以很少的道次获得了无宏观缺陷的焊接接头。但目前厚板不锈钢窄间隙激光填丝多道焊的焊缝组织特征还没有详细的研究。

奥氏体不锈钢的接头组织与热过程密切相关。弧焊方法的高热输入量通常使焊缝和热影响区(HAZ)的晶粒粗大,降低了接头的力学性能和耐腐蚀性能<sup>[7~9]</sup>。多道焊时,后一道热作用会加强前一道焊缝组织的再结晶,产生更粗大的晶粒组

织<sup>[10]</sup>。本文使用 CO<sub>2</sub> 激光填丝多道焊技术连接 16 mm 厚度 304 不锈钢,焊后采用光学显微镜、背散射电子衍射(EBSD)、能谱分析(EDS)研究焊缝组织形貌和主要合金元素 Cr, Ni 的分布等特征,为窄间隙激光填丝多道焊在不锈钢厚板焊接的应用提供冶金学参考。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 焊接试验

304 不锈钢母材的板厚为 16 mm, 填丝选用 ER308 型不锈钢气保护填丝(直径 1.2 mm), 母材及填丝成分见表 1。焊接试样的坡口形式如图 1 所示, 设置钝边高 2 mm、宽 3 mm, 坡口角度为单边 5°。

表 1 母材及填丝的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of base material and filler wire (mass fraction, %)

Material	Cr	Ni	C	Cu	Mn	Mo	Si	P	S
ER308	20.69	10.4	0.069	0.1934	1.862	0.0453	0.3946	0.0291	0.024
SUS304	17.42	8.185	0.068	0.197	1.05	0.112	0.445	0.263	0.027

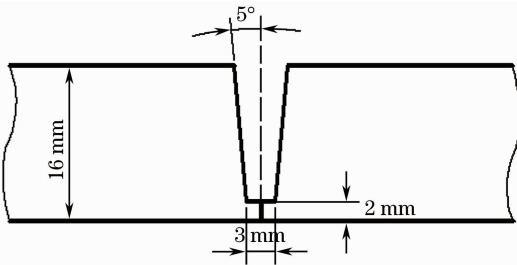


图 1 焊接坡口示意图

Fig. 1 Schematic of welding groove

激光器使用德国 TRUMF 公司 TLF15000t 型快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器, 最大输出功率 15 kW, 光束聚焦特征参数  $K_f = 17 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 焦点半径为 0.5 mm; 送丝机采用 KEPMI 公司 PROMIG 型 MIG 焊机。激光填丝焊接试验的装置安排如图 2 所示。焊接气体为纯 N<sub>2</sub>, 起到抑制等离子体与保护焊接熔池的作用。

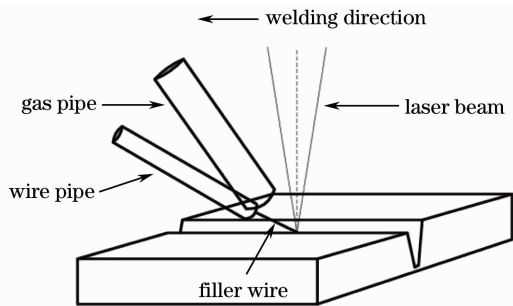


图 2 激光填丝焊装置及焊接方向示意图

Fig. 2 Schematic of welding arrangement and welding direction

通过工艺试验优化工艺参数, 实现以三道激光填丝焊填满坡口获得完整焊接接头, 焊接工艺参数均为: 激光功率 8 kW, 焊接速度 0.5 m/min, 送丝速度 4.5 m/min, 侧吹气体流量 25 L/min, 离焦量 +30 mm。不控制层间温度, 待自然冷却至室温后焊接下一道。

### 2.2 接头组织分析

用光学显微镜观察焊缝的金相形貌。电解抛光后通过 EBSD 和 EDS 分析奥氏体晶粒形貌, 以及焊缝中 Cr, Ni 的分布情况, 试验设备为 CamScan 公司热场扫描电子显微镜(SEM)与 Oxford 公司 EBSD、EDS 附件。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 焊缝宏观形貌

三道激光填丝焊获得的完整焊接接头宏观形貌如图 3 所示, 侧壁熔合完好, 无气孔及裂纹等缺陷。焊缝形貌显著不同于电弧焊, 沉积焊缝金属窄而高, 焊缝两侧的熔合线几乎平行。I 道焊缝的堆积高度在 6~7 mm, 平均宽度为 4.3 mm 左右。II 道焊缝重熔的深度为 1.8 mm, III 道焊缝的重熔深度为 3.0 mm, III 道焊缝的重熔深度约为 II 道的两倍。以上的结果表明, 尽管激光填丝焊工艺的激光与焊丝的热作用主要发生在焊道的底部, 在窄间隙坡口条件下热量仍能够往高处均匀分散, 形成上下宽度基本一致的焊缝形貌。

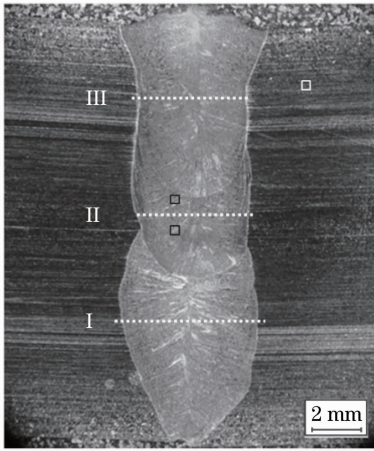


图3 焊接接头宏观形貌

Fig. 3 Macrograph of joint

### 3.2 焊缝结晶特征分析

热影响区及焊缝的典型组织如图4所示。母材

组织为等轴奥氏体晶粒,存在少量长条状铁素体。激光填丝焊形成的热影响区极窄,熔合线一侧的奥氏体晶粒无明显的晶粒长大现象,其形貌与母材相当。焊缝金属为典型的高速焊形貌,快速凝固的柱状晶从熔合线边缘垂直地向焊缝中心生长。高倍组织显示焊缝金属为(FA)凝固模式形成的较细小骨架状铁素体,但骨架状结构并不发达,有较多不连续的树枝晶,一次枝晶的间距为 $15\ \mu\text{m}$ 左右。盖面焊道介于熔合线和焊缝中心之间的区域存在较多的短条的等轴铁素体,表明盖面焊的冷却速度相较于其他两道慢一些。在两道次的交界处,可以看到宽约为 $100\ \mu\text{m}$ 的铁素体过渡区域,其生长方向与后一道焊缝金属一致,为III道焊缝的起始生长点。在过渡区域两侧的铁素体则保持各自焊缝的形貌特征。

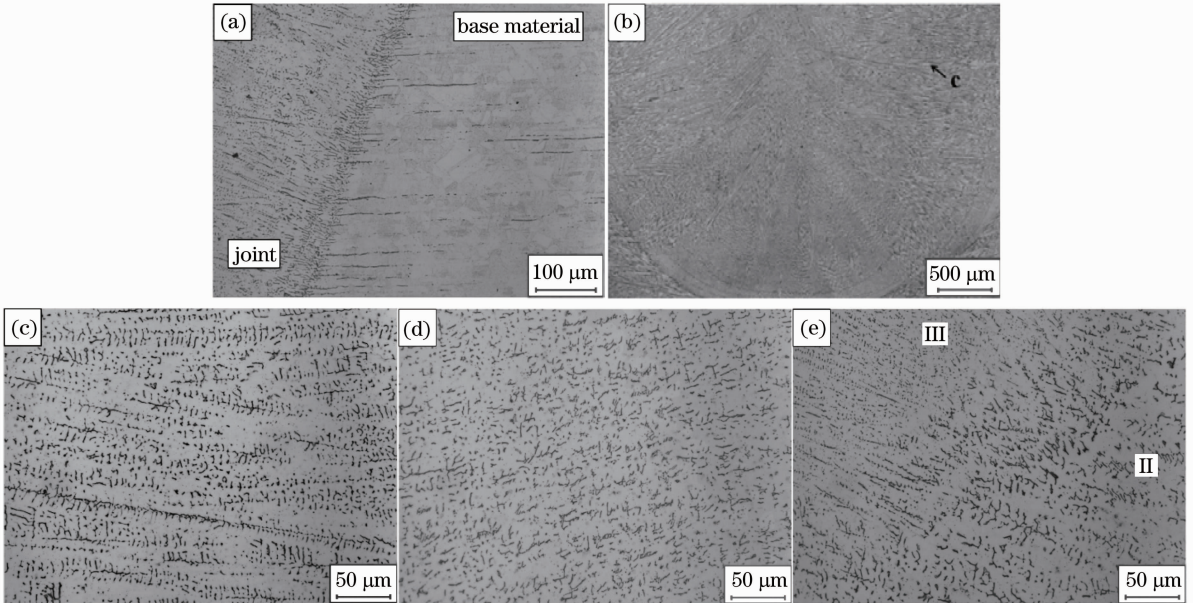


图4 热影响区及焊缝微观组织。(a)热影响区;(b) II道焊缝低倍形貌;(c) II道焊缝高倍形貌;(d) III道焊缝等轴铁素体;(e) II-III道焊缝交界处形貌

Fig. 4 Microstructure of HAZ and welding seam. (a) HAZ; (b) II-pass welding seam morphology with low magnification; (c) II-pass welding seam morphology with high magnification; (d) equiaxed ferrite in III-pass welding seam; (e) junction morphology of II-III pass welding seams

为直观分析焊缝的晶粒形貌,取图3中所示的点进行EBSD分析,所取位置分别为母材、第II道焊缝中部和靠近第III焊缝熔合线 $0.5\ \text{mm}$ 处,扫描面积为 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ ,步长 $2\ \mu\text{m}$ 。所得奥氏体晶粒形貌如图5所示。母材的奥氏体为细小的等轴晶。焊缝中奥氏体晶粒基本为大尺寸的柱状晶,第II道焊缝中部与上部的奥氏体形貌相似,主要均为粗大柱状晶,说明多道焊的重熔热量未使奥氏体晶

粒形貌产生明显的改变。个别晶粒的宽度达到 $100\ \mu\text{m}$ 以上,长度可以贯穿整个扫描面,与常规GMAW焊接相比,激光填丝焊的奥氏体显得更为粗大<sup>[8]</sup>。图中的白色点状物为铁素体相,主要存在于奥氏体晶粒中。由奥氏体不锈钢焊缝的凝固过程可知<sup>[9]</sup>,铁素体相的初始位置为树枝状奥氏体的枝晶间,且在后续的奥氏体晶粒再结晶过程中不发生铁素体相 $\alpha$ 向奥氏体相 $\gamma$ 的转变,因此该形貌清晰



地表明了粗大奥氏体柱状晶是由位向一致的树枝状晶粒的合并与晶界迁移形成的。

通常在高速焊条件下,由于热输入的降低有助于晶粒的细化,而此处粗大柱状晶可能是由激光热源的集中性和窄坡口条件共同造成的,即激光束的能量主要用于加热熔化填丝和底部金属并使熔池达到很高的温度,而侧壁金属相对低温,强过冷作用使铁素体树枝晶从熔合线迅速向焊缝中心生长。相比于电弧焊形成的浅而宽的焊缝形貌,窄坡口条件下形成的是高而窄的熔池形貌,不利于焊缝金属的快速散热,因此提供了充分的热作用时间使位向一致

的细长奥氏体柱状晶发生晶界合并与迁移成为大尺寸晶粒。

由EBSD分析软件的相比例统计功能可得到图5(b)和(c)的铁素体含量分别为4.81%和2.78%,表明焊缝中铁素体在不同微区的含量差异较大。进一步分析发现,在不同取向的奥氏体晶粒内铁素体含量也存在明显差异。如图5中箭头所指示的位置,铁素体在该取向的晶粒内大量富集,而其他取向的晶粒内含量很少。因此,焊缝中铁素体相的形成可能与晶粒取向有关,由此造成的铁素体“偏析”是否会给接头性能带来不利的影响值得进一步研究。

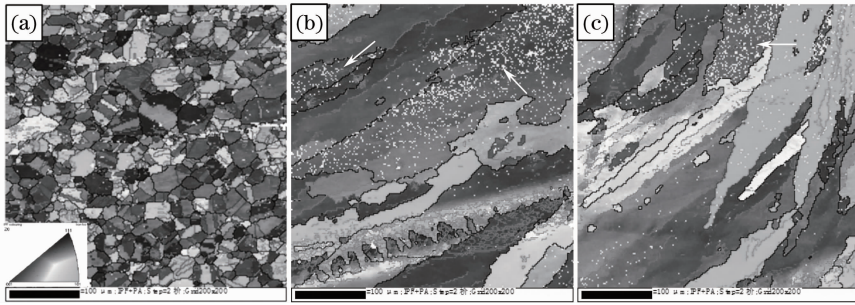


图5 母材及焊缝的晶粒取向分布图。(a)母材;(b)第II道焊缝中部;(c)第II道焊缝上部

Fig.5 Grain orientation maps of base material and weld beads. (a) Base material; (b) middle place of II-pass; (c) upper place of II-pass

### 3.3 EDS 成分分析

沿图3所示虚线对I、II、III道焊缝从左至右进行EDS扫描,检测焊缝中的Cr,Ni含量(质量分数)。结果如图6所示,三道焊缝中的Cr,Ni含量围绕平均值小幅度波动,各道次的Cr,Ni元素分布较为均匀,无明显的偏析产生。说明在窄坡口条件下,熔池仍具有充分的流动性,使合金元素能够平均地分布于焊缝中,这有利于接头保持均匀的力学性能和耐腐蚀性能。

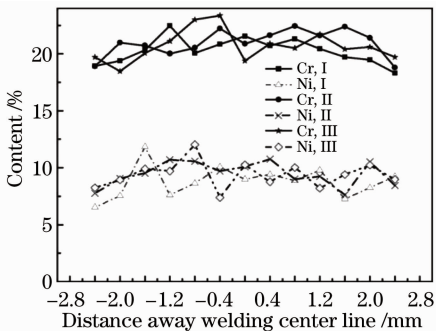


图6 焊缝的Cr,Ni含量分布

Fig.6 Content distributions of Cr, Ni in welding seam

## 4 结 论

1) 采用8 kW功率CO<sub>2</sub>激光,以三道激光填丝

焊焊接16 mm厚度304不锈钢板,可以获得无气孔、裂纹等缺陷的优质焊接接头,焊缝整体形貌窄而高,平均宽度为4 mm,单道堆积高度为6~7 mm。

2) 焊缝整体为快速凝固的柱状晶,奥氏体晶粒尺寸粗大。焊缝存在长条骨架状和等轴状两种铁素体形貌,其中骨架状铁素体的枝晶间距为15 μm左右,等轴铁素体出现在第III道焊缝。铁素体相在焊缝中的分布不均匀,主要集中在某些取向的奥氏体晶粒内。熔合线侧的母材晶粒并未见长大,表明热影响区极小。多道焊的重复加热未造成靠近重熔区的焊缝组织的明显变化。

3) 3道次焊缝的主要合金元素Cr,Ni在焊缝中分布均匀,无显著的偏析区域。

### 参 考 文 献

- 1 Z. Sun, A. S. Salminen. Current status of laser welding with wire feed[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1997, **12**(5): 759~777
- 2 U. Dilthey, D. Fuest, W. Scheller. Laser welding with filler wire[J]. *Optical and Quantum Electronic*, 1995, **27**(12): 1181~1191
- 3 Yoshiaki Arata, Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto *et al.*. High power CO<sub>2</sub> laser welding of thick plate[J]. *Transaction of JWRI*, 1986, **15**(2): 27~34
- 4 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji *et al.*. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J].

- Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1103004
- 温 鹏, 郑世卿, 荻崎贤二等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1103004
- 5 Tommi Jokinen, Miikka Karhu, Veli Kujanpää. 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
- 6 Xudong Zhang, Eiji Ashida, Shoh Tarasawa *et al.*. Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers[J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, **23**(2): 002002
- 7 A. S. Lima, A. M. Nascimento, H. F. G. Abreu *et al.*. Sensitization evaluation of the austenitic stainless steel AISI 304 L, 316 L, 321 and 347[J]. *Journal of Material Science*, 2005, **40**(1): 139~144
- 8 Xuan Hung Ha, Se-Whan Jang, Woong Ho Bang *et al.*. Texture evolution in weld regions of SUS-304 stainless steel and TRIP steel[J]. *Materials Science Forum*, 2002, **408~412**: 1377~1382
- 9 John C. Lippold, Damian J. Kotecki. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels* [M]. Chen Jianhong transl. Beijing: China Machine Press, 2008. 25~40
- John C. Lippold, Damian J. Kotecki. *不锈钢焊接冶金学及焊接性*[M]. 陈剑虹译. 北京: 机械工业出版社, 2008. 25~40
- 10 Erich Folkhard. *Welding Metallurgy of Stainless Steels*[M]. Li Zhuoxin, Zhu Xuejun transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 76~86
- Erich Folkhard. *不锈钢焊接冶金*[M]. 栗卓新, 朱学军译. 北京: 化学工业出版社, 2004. 76~86

栏目编辑: 宋梅梅