

# 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究

温 鹏<sup>1,2</sup> 郑世卿<sup>1</sup> 荻崎贤二<sup>3</sup> 山本元道<sup>3</sup>

<sup>1</sup>清华大学机械工程系, 北京 100084  
<sup>2</sup>先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084  
<sup>3</sup>广岛大学机械系统工程系, 日本 广岛 739-8527

**摘要** 将填充热丝应用到高光束质量、长焦距的光纤激光窄间隙焊接中, 不锈钢母材通过激光加热, 镍基焊丝通过电流加热, 有效利用复合热源的优势, 提高了焊丝过渡稳定性和熔覆效率。通过高速摄像机对送丝过程进行在线观察, 分析工艺参数对焊丝过渡的影响。研究不锈钢和镍基合金异种金属窄间隙焊接接头的凝固组织, 并对焊缝金属进行元素分布扫描。研究发现, 由焊丝电流和送丝速度等工艺参数决定的送丝稳定性是影响填充热丝激光焊接质量的最主要因素。对于窄间隙焊接, 采用与间隙宽度相当的离焦光斑激光热导焊, 可形成较好的侧壁熔合, 由熔融金属曲面和侧壁构成的激光反射是侧壁熔合的主要原因。焊缝冷却速度较快, 焊缝金属的凝固组织呈明显的对生长, 在坡口侧壁附近其生长方向与侧壁近似垂直, 焊缝不存在宏观偏析。在间隙底部直角处容易出现未熔合现象, 采用底部圆弧过渡的 U 型坡口后, 可较好地解决底部未熔合问题, 获得了无宏观缺陷的焊接接头。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 热丝; 高速摄像; 窄间隙焊接

**中图分类号** TG456.7; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1103004

## Experimental Research on Laser Narrow Gap Welding with Filling Hot Wire

Wen Peng<sup>1,2</sup> Zheng Shiqing<sup>1</sup> Shinozaki Kenji<sup>3</sup> Yamamoto Motomichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China

<sup>3</sup>Department of Mechanical System Engineering, Hiroshima University, Hiroshima, 739-8527, Japan

**Abstract** Hot wire is used as the filler metal of high beam quality and long focal distance fiber laser for narrow gap welding. The austenite stainless steel base metal is molten by laser, and the Ni-based alloy wire is heated up by wire current. Both the stability and efficiency are improved a lot by using the hybrid heating sources. High speed camera is used to observe the movement of filler wire during laser welding and analyze the effect of welding parameters on wire transition. The solidification microstructure and the element distribution of narrow gap laser weld are studied. Consequently, it is found that wire current and filling wire speed are the two key processing parameters for laser hot wire welding quality. The side wall of base metal is bonded well with weld metal when defocused laser spot with a diameter close to the width of narrow gap is used. The laser reflection mainly contributes to the melting of side walls, rather than the laser beam itself. The solidification microstructure shows obvious epitaxial growth, while the dendrites grow vertically to the side wall due to the rapid cooling speed. No macro segregation is found. However, lack of fusion is found in the bottom of narrow gap with a 90° angle. This problem is solved by using U type narrow gap with arc transition in the bottom. The narrow gap laser weld is finally obtained without macro weld defects.

**Key words** laser technique; laser welding; hot wire; high speed imaging; narrow gap welding

**OCIS codes** 140.3390; 100.2000; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

激光焊接的焊缝深宽比大、焊接速度快、热影响

区窄、焊接变形小, 焊接质量和效率均比传统焊接方法高; 激光光束的加热范围精确, 可用于非接触的精

收稿日期: 2011-06-08; 收到修改稿日期: 2011-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(51005125)资助课题。

作者简介: 温 鹏(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: wenpeng@tsinghua.edu.cn

确定位和局部加热,容易实现高效率和高柔性的自动化焊接<sup>[1]</sup>。因此,激光焊接被普遍认为是一种先进的连接方法。然而,激光焊接在大多数情况下是不填丝的焊接,即单面焊双面成形,存在一些问题<sup>[2,3]</sup>:熔深主要依靠激光器的输出功率,由于高功率激光器的成本较高,对于大熔深和高反射率材料的激光焊接比较困难;激光焊接对工件装配要求高,允许的坡口间隙很小;非填丝激光焊接的焊缝没有堆高,易出现咬边和驼峰焊道等成形缺陷;焊缝成分完全由母材决定,对于热裂纹敏感材料和易淬硬材料,不填充材料的激光焊接问题较多。这些都制约着激光焊接的实际应用。通过向焊缝填充金属,激光可以焊接间隙较大的对接板和大厚度板,如采用开坡口的多道焊接,这时焊接厚度就不受激光功率的限制<sup>[4]</sup>。此外,填充金属可以调整焊缝的化学成分,从而控制焊缝组织,不仅可以抑制焊接裂纹,还可以改善接头力学性能<sup>[5~7]</sup>。

激光-电弧复合焊接可用来向焊缝中填充金属,具有较强的适应性,已经得到一些应用。然而,激光-电弧复合焊的熔深主要由单道激光深熔焊完成,对于厚大部件的焊接,仍然对高功率激光器有较大依赖<sup>[8]</sup>。电弧的热输入大,加热范围不易控制,导致焊缝的熔合比增大,牺牲了激光热源精确加热的优势;电弧焊接容易出现飞溅和烟雾,这些都影响到焊接质量<sup>[9]</sup>。激光填丝焊接虽然也有一定应用,但是由于激光既要熔化母材,又要熔化焊丝,焊丝的熔覆效率受到一定限制<sup>[6,7]</sup>。采用电阻加热的方式对焊丝进行预加热,减小焊丝熔化对焊接热源的依赖,可大幅度提高熔覆效率,这种热丝方法已被广泛用于钨惰性气体(TIG)焊接<sup>[10,11]</sup>,但对填充热丝激光焊接的研究还很少<sup>[12,13]</sup>。本文对填充热丝激光焊接的工艺参数进行实验研究,将填充热丝激光焊接用于异种材料的窄间隙焊接,通过高速摄像机拍摄焊丝过渡过程,旨在发展一种高效稳定的填充金属激光焊接技术。

表1 所用母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

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

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
304	0.06	0.84	0.46	0.026	0.004	18.15	8.05	Bal.
Inconel600	0.04	0.25	0.24	0.006	<0.001	15.68	Bal.	6.4

### 3 实验结果

填丝激光焊接的送丝参数包括送丝角度(焊丝与工件表面夹角)、光丝距离(送丝点到激光中心距

## 2 实验方法

图1为配合高速摄像机的激光热丝焊接装置图。用IPG YLR-3000光纤激光器作为焊接热源,其最大输出功率为3 kW,波长为1070 nm,产生的激光通过0.2 mm芯径的加工光纤经扩束后连接到安装在机械臂上的焊接加工头,再经过焦距400 mm的聚焦透镜会聚到工件表面,最小光斑直径为0.44 mm。为防止反射光对激光器可能产生的损害,加工头偏离垂直方向5°。采用侧吹Ar气对焊缝及熔池进行保护,流量为50 L/min。母材材料为304奥氏体不锈钢,厚度为10 mm;填充焊丝为Inconel600镍基合金,焊丝直径为1.2 mm,材料化学成分如表1所示。焊接方法为预置坡口的窄间隙焊接,焊接试件如图2所示,预先在板中央加工一个3 mm×5 mm的槽,模拟窄间隙焊接。激光功率为3 kW,焊接速度为0.4 m/min,焦点位于工件表面上方60 mm处,此时光斑直径约为3 mm。采用固定的激光功率和焊接速度,主要考虑送丝参数对焊接稳定性和质量的影响。焊丝加热电源采用Babcock-Hitachi生产的PowerAssist IV-662热丝电源,加热电流调节范围为0~350 A。热丝电源的负极接母材,正极通过送丝头与焊丝接触,在焊丝过渡到熔池附近之前,对焊丝进行大电流的电阻加热。采用高速TIG送丝机,最大送丝速度为9.9 m/min。

在激光焊接过程中采用装有微距镜头(Nikon, AF Micro-Nikkor ED 200 mm)的高速摄像机(Photron, FASTCAM-1024)对焊丝过渡进行放大摄像,研究工艺参数对焊丝过渡的影响。波长为980 nm的半导体激光被用来提供主动照明,并在微距镜头前加装了带通光学滤镜,保证只有(980±5)nm范围的光线能进入到微距镜头成像。焊接过程中激光加工头和摄像机位置固定,焊接工件随机床移动,摄像中心始终位于熔池附近区域。摄像帧速250 frame/s,快门速度设置为open。

离)和送丝速度等。采用热丝后,送丝参数还包括加热距离(焊丝导电点到工件表面距离)和焊丝电流。首先利用平板堆焊实验,对部分送丝参数进行了优

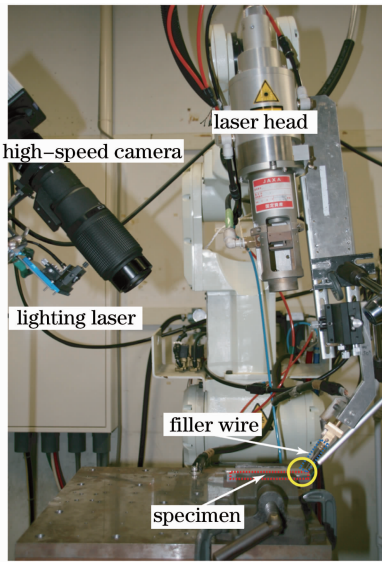


图1 填充热丝激光焊接装置图

Fig. 1 Hot wire laser welding system

化。研究发现送丝角度较小时,焊丝不易保持刚直,不利于焊丝平稳过渡,因此在保证送丝头与激光喷嘴不干涉的基础上,送丝角度取最大值 $70^\circ$ 。加热距离越长,焊丝加热量越大,同时焊丝容易散失刚性,经过对比实验,设置为固定值 $70\text{ mm}$ 。送丝速度为 $4\text{ m/min}$ ,此时电阻加热焊丝所产生的热量完

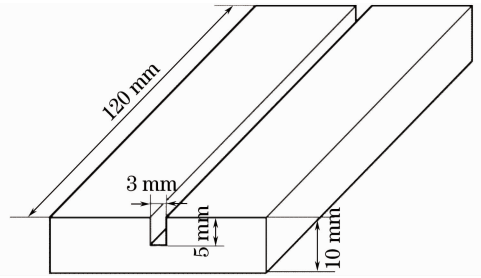


图2 窄间隙焊接工件示意图

Fig. 2 Specimen for narrow gap welding

全由焊丝电流决定。图3(a)为光丝距离 $1.5\text{ mm}$ 、焊丝电流 $45\text{ A}$ 时高速摄像机拍摄的图像,焊丝被充分加热后送到熔池,此后在激光辐射热量和熔池导热的共同作用下,焊丝达到熔点并平稳过渡到熔池,焊接过程稳定,焊缝表面成形良好。图3(b)为光丝距离 $1.5\text{ mm}$ 、焊丝电流 $50\text{ A}$ 时高速摄像机拍摄的图像,由于电流较高,过度加热的焊丝在激光和熔池热量的作用下,不定期熔化爆断,容易带来飞溅和不连续焊缝。另一方面,当焊丝电流较小时,固体焊丝直接刺向熔池,无法完成焊接。当光丝距离为 $1\text{ mm}$ 、焊丝电流为 $45\text{ A}$ 时,由于送丝点距离激光太近,加热后的焊丝被激光直接熔化,不定期产生很大的熔滴,无法形成稳定焊接,如图3(c)所示。

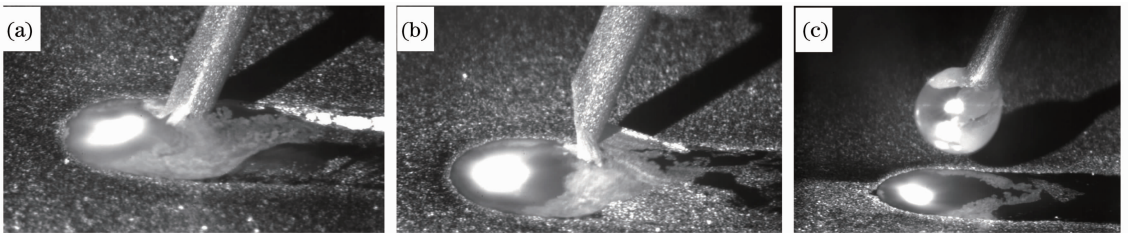


图3 不同焊丝电流和光丝距离的填充热丝激光焊接图像。(a)  $45\text{ A}$ ,  $1.5\text{ mm}$ ; (b)  $50\text{ A}$ ,  $1.5\text{ mm}$ ; (c)  $45\text{ A}$ ,  $1\text{ mm}$

Fig. 3 Laser hot wire welding with different wire currents and distances between laser and wire.

(a)  $45\text{ A}$ ,  $1.5\text{ mm}$ ; (b)  $50\text{ A}$ ,  $1.5\text{ mm}$ ; (c)  $45\text{ A}$ ,  $1\text{ mm}$

窄间隙焊接时送丝速度取 $4\sim 9.9\text{ m/min}$ ,焊丝电流取 $0\sim 230\text{ A}$ ,在不同送丝参数下进行了焊接。图4为窄间隙填充热丝焊接过程的图像,此时的送丝速度为 $8\text{ m/min}$ ,焊丝电流为 $175\text{ A}$ ,光丝距离为 $2\text{ mm}$ 。在该条件下,焊丝经过加热后,稳定地送到熔池后端,在激光辐射和熔池作用下熔化,形成焊缝金属。Inconel600焊丝的电阻率取 $1.0\times 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$ ,根据欧姆公式,由焊接电流、焊丝直径、加热距离和送丝速度,可简单计算出焊丝加热功率约为 $1896\text{ W}$ ,在加热距离内产生的热量为 $996\text{ J}$ ,此时焊丝熔覆效率为 $76.6\text{ g/min}$ 。可以看出,在送丝稳定的条件下,焊丝得到充分的加热,大大提高了熔覆效率。

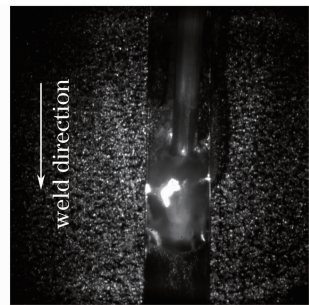


图4 窄间隙填充热丝激光焊接图像

恰好等于坡口宽度( $3\text{ mm}$ ),可以看出只有坡口底部发生导热模式的熔化,坡口两侧的侧壁未发生熔化,如图5(a)所示。当加热后的焊丝被送进坡口时,虽

当单独用激光照射坡口时,由于激光光斑直径

然母材的熔化量很小,但可以看出坡口侧壁与焊缝金属形成了结合,如图 5(b)所示。此时,单道焊可得到约 3 mm 的堆高,母材在焊缝金属中的熔合比约为 7%。间隙上端左角被熔成圆弧状,右侧基本保持直角,说明间隙两侧壁处的熔融不平衡。从高速摄像机拍摄的图像(图 4)也可以看出,间隙左侧壁上表面母材被激光过分熔融,说明激光束相对于坡口中心线偏左。虽然激光束略有偏离,但从断面看,坡口两侧壁处的母材都与焊缝金属形成较好地熔合。

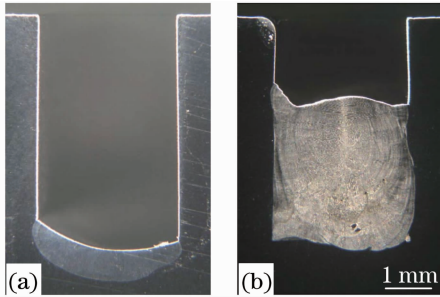


图 5 窄间隙填充热丝激光焊缝断面

Fig. 5 Cross section of narrow gap laser welding with hot wire

图 6 为经过腐蚀后窄间隙填充金属部的微观组织。由于母材的稀释率很小,焊缝金属中化学成分和 Inconel600 焊丝基本相同,高的含 Ni 量导致焊缝凝固组织呈单一的  $\gamma$  相。采用热丝和离焦激光后,焊接熔池接受的热量较小,冷却速度较快,因此焊缝金属的结晶形态呈树枝状,甚至在局部出现等轴晶状。凝固后的枝晶呈明显的对生生长,在坡口侧壁附近的焊缝金属生长方向与侧壁近似垂直,在焊缝中央可以观察到两侧凝固组织对生生长后形成

的晶粒边界线。焊缝底部观察到裂纹,推测这些裂纹为凝固热裂纹,由于冷却速度较快,加上  $\gamma$  相凝固组织的热裂纹敏感性较高,这些热裂纹由晶界的低熔点共晶物和热应力共同造成。

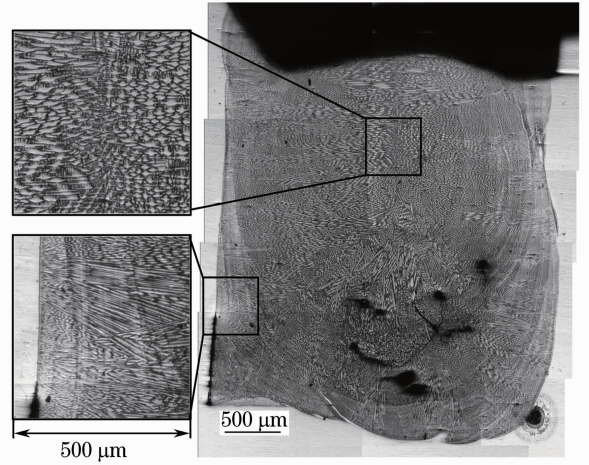


图 6 窄间隙热丝激光焊缝的微观组织

Fig. 6 Microstructure in the weld metal of narrow gap laser welding with hot wire

间隙底部左侧直角处发现了未熔合问题,对于直角过渡的窄间隙坡口,虽然在焊接过程中尝试变换了各种参数,但底部直角处的未熔合问题很难解决。此外,在焊缝金属底部可观察到一些空洞,说明焊接过程中可能有少量焊丝没有充分熔融。不锈钢母材和镍基焊丝的主要成分为 Ni、Cr 和 Fe,采用电子探针显微分析仪(EPMA)对焊缝中这 3 种元素的分布进行了面分析,如图 7 所示。坡口中焊缝金属的右侧上方和坡口底部左下角发现了母材的混入,总体来看,整个焊缝区域内 3 种元素的分布都比较均匀,没有发生大的宏观偏析。

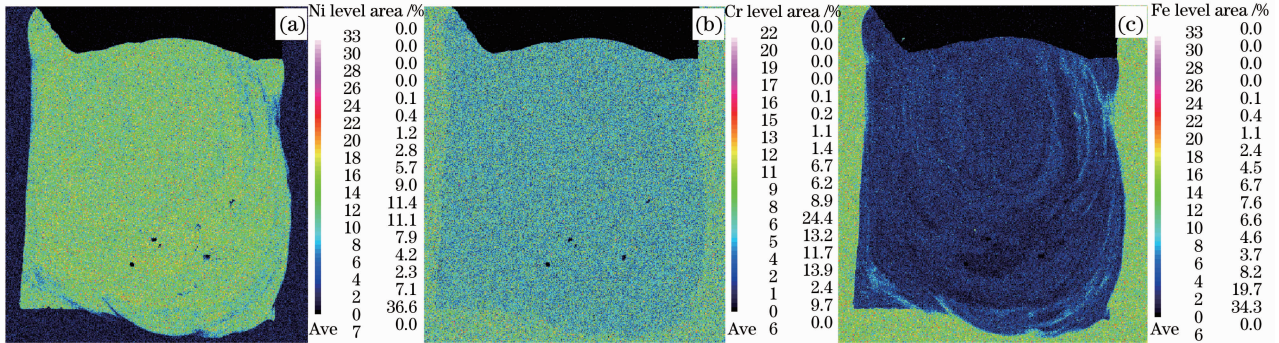


图 7 窄间隙填充热丝激光焊缝断面的 EPMA 面分析。(a) Ni 元素;(b) Cr 元素;(c) Fe 元素

Fig. 7 EPMA area analysis of narrow gap laser welding with hot wire for element (a) Ni; (b) Cr; (c) Fe

## 4 分析和讨论

与 TIG 焊接相比,由于激光的能量密度集中,

熔池较小,填充冷丝的激光焊接需要较高的热量将焊丝熔化,对送丝点位置要求很高,难以形成高效稳

定的焊丝过渡。采用热丝后,焊丝进入熔池前得到充分加热,提高了送丝稳定性和熔覆效率。填充热丝采用电阻加热,加热能力受焊丝的电阻率、焊丝直径和加热距离(接触到母材距离)决定。当焊丝种类和加热距离固定时,送丝速度越快,焊丝产生一定热量所需的电流就越大。加热电流过低,预热热量利用不充分,无法实现高效的焊丝填充;加热电流过高,焊丝失去刚性,无法将其精确地送到熔池,焊接失败。同时,光丝距离过大,焊丝无法送到熔池;光丝距离过小,焊丝被激光直接照射,无法形成稳定的焊丝过渡。

对于窄间隙焊接,采用离焦激光获得与坡口宽度相当的光斑直径。无焊丝填充时,激光束直接照射在坡口底部,侧壁基本没有熔化;当焊丝被送入坡口后,侧壁发生熔化。侧壁熔化机理如图 8 所示,与间隙同宽的光斑并未直接照射到侧壁,填充热丝在自身电流加热和激光能量共同作用下形成熔融金属,液态金属在窄间隙坡口内部形成一定曲面,该曲面与侧壁共同作用,对激光束形成多次反射,导致侧壁发生熔化,使得填充金属与侧壁形成冶金结合,并获得极小的母材熔化。通过高速摄像机获得的图像(图 4)可以清楚地看到熔融金属形成的曲面和反射光(图 4 中高亮部分)。通过在线观察可以分析光丝位置和焊丝电流对送丝稳定性的影响,但尚未从图像中找到与侧壁未熔合或焊缝空洞等焊接缺陷具有直接关联的特征。通过建立图像特征和焊接质量的映射关系,可以深入研究工艺参数对焊接质量的影响,并可由此发展焊接质量在线检测技术。

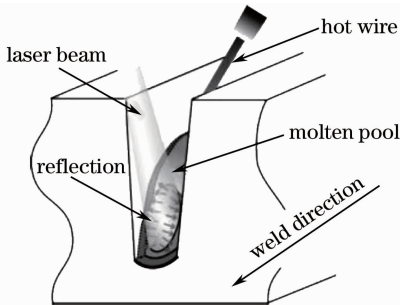


图 8 窄间隙填充热丝激光焊接中的激光反射示意图

Fig. 8 Laser reflection in narrow gap laser welding with hot wire

由于填充热丝熔化所需热量很大一部分来自焊丝的电阻加热,焊接过程中填充金属的温度较低,冷却速度较快,熔池金属流动性较差,容易在坡口底部的直角处出现未熔合问题(图 6)。为了解决此问题,采用了间隙底部为圆弧的 U 型坡口,圆弧过渡

的半径为 1.5 mm,用于避免底部直角处液态金属难填充的问题。图 9 为焊缝横截面照片,图中虚线为坡口的原始形状。可以看出,所得到的焊接接头在间隙侧壁和底部都得到了较好的熔合,无宏观焊接缺陷发生。下一步准备采用多层多道的焊接工艺获得大熔深的窄间隙焊接接头,并对接头进行力学性能测试。

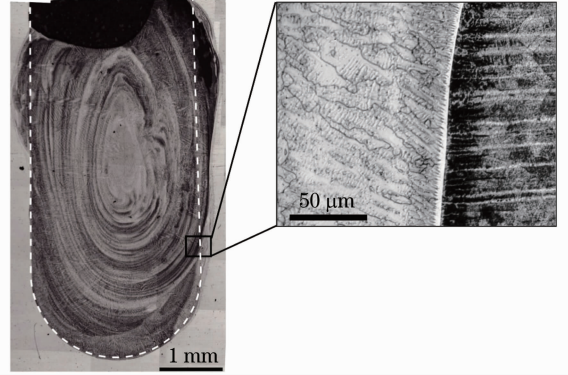


图 9 采用 U 型坡口的填充热丝窄间隙激光焊缝的横截面

Fig. 9 Cross section of U-type narrow gap laser welding with hot wire

## 5 结 论

1) 将填充热丝激光焊接应用到异种材料的窄间隙焊接,通过高速摄像方法清楚地拍摄了焊丝过渡过程。通过调整光丝距离、送丝速度和焊丝电流等影响送丝稳定性的主要工艺参数,获得了稳定的填充热丝激光焊接过程。

2) 由于对焊丝进行了单独加热,大大提高了填充热丝的送丝稳定性和熔覆效率,在合适电流的配合下,采用高达 8 m/min 的送丝速度获得了稳定的焊丝过渡。对坡口宽度为 3 mm 的窄间隙,单道焊获得了 3 mm 的堆高,焊缝金属熔合比为 7%,焊缝金属没有发现较大偏析。

3) 对于窄间隙的填充热丝激光焊接,由熔融金属曲面和侧壁构成的激光反射是侧壁熔合的主要原因,而焊缝金属仍然存在底部未熔合等问题。采用 U 型坡口后,有效地解决了底部直角未熔合问题,获得了无宏观缺陷的焊接接头。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Yanbin. Modern Laser Welding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2006
- 2 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 3 Richard P. Martukanitz. A critical review of laser beam welding [C]. SPIE, 2005, 5706: 11~24

- 3 P. Reinhart, L. Peter, H. Hans. Development trends of new high power laser sources[C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 81~90
- 4 Y. Arata, H. Maruo, I. Miyamoto. High power CO<sub>2</sub> laser welding of thick plate, multipass welding with filler wire[J]. *Trans. JWRI*, 1986, **15**(2): 199~206
- 5 F. Vollertsen, F. Buschenhenke, T. Seefeld. 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 Chun, Yang Wenguang, Chen Wuzhu *et al.*. Research on gap width detecting sensor and wire feeding system in butt laser welding with filler wire[J]. *Applied Lasers*, 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 Jie, Li Liqun, Tao Wang *et al.*. Weld microstructure characteristics of dual laser beam multi-layer welded high strength steel with filler wire[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1361~1367  
尹 杰, 李俐群, 陶 汪 等. 高强钢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 B. Claus, Flemming O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, **17**(1): 2~24
- 9 B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding[J]. *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**(4): 223~244
- 10 H. Watanabe, Y. Butsusaki, T. Nagashima. Development of ultra-narrow gap hot wire GTA welding process [C]. International Institute of Welding (IIW), 2004, Doc XII-1810-04
- 11 K. Shinozaki, M. Yamamoto, Y. Nagamitsu *et al.*. Melting phenomenon during ultra-high-speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire [J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2009, **27**(2): 22s~26s
- 12 J. Marshall, E. Carl, N. Daniel *et al.*. Laser hot-wire welding for minimizing defects [C]. 23rd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, 2004
- 13 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2422~2425  
吴世凯, 肖荣诗, 陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2422~2425

栏目编辑: 宋梅梅