

# 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响

马广义 吴东江 王占宏 郭玉泉 郭东明

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 基于 0.5 mm 厚度 Hastelloy C-276 合金, 开展了脉冲激光焊接实验。结合焊接熔池的浮力效应和 Marangoni 对流, 研究了脉冲宽度、单脉冲能量、脉冲频率和焊接速度对焊缝形成规律的影响。实验表明, 单脉冲能量和焊接速度对熔池流动机制的影响相似, 适当的参数条件下可以改变 Marangoni 对流和浮力效应的强弱趋势; 而脉冲宽度直接决定了对流机制的形成条件, 对焊缝的形成影响显著; 脉冲频率的改变决定了相对热作用时间, 影响了熔池对流条件, 进而影响焊缝形貌特征。

**关键词** 激光应用; Hastelloy C-276; 脉冲激光焊接; 浮力效应; Marangoni 对流; 焊缝形貌

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603014

## Weld Joint Forming of Thin Hastelloy C-276 Sheet of Pulsed Laser Welding

Ma Guangyi Wu Dongjiang Wang Zhanhong Guo Yuquan Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** The pulsed laser welding experiment of Hastelloy C-276 of 0.5 mm thickness is conducted. According to buoyancy force and Marangoni convection, the influences of pulse duration, pulse energy, pulse repetition rate and welding velocity on weld joint are investigated. It is indicated that the pulse energy and welding velocity present the same impact on the forming of weld joint, and suitable parameters can affect the interaction between buoyancy effect and Marangoni convection. The pulse duration can decide the pool liquid flow, and further significantly impact the forming of weld joint. In addition, the variation of repetition rate determines the relative thermal action and impacts the pool flow, and finally varies the weld joint.

**Key words** laser application; Hastelloy C-276; pulsed laser welding; buoyancy effect; Marangoni convection; weld joint

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 160.3900

## 1 引言

Hastelloy C-276 作为一种镍基耐腐蚀合金已经广泛应用于石油化工和核工业等大型结构管道、外壳以及极端环境的场合, 在制造过程中需要对材料进行焊接成形。目前基于 Hastelloy C-276 的焊接技术研究主要集中在氩弧焊接。1986 年 Cieslak 等<sup>[1~3]</sup>便开始研究 Hastelloy C-276 的氩弧焊接特

性, 针对 3 mm 厚度 Hastelloy C 系列合金进行氩弧焊接的对比研究, 研究了焊接后 C 系列合金相变过程以及焊后时效处理对材料性质的影响。2003 年, Rowe 等<sup>[4]</sup>对 Hastelloy C 系列合金的焊接特性作了比较详尽的报道, 提出了氩弧、激光、电子束以及离子束焊接 Hastelloy 合金的可行性, 分析了氩弧焊接对 C 系列合金的影响规律。2005 年, Ahmad

收稿日期: 2011-01-17; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724307)资助课题。

作者简介: 马广义(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光精密制造等方面的研究。E-mail: gyuma@mail.dlut.edu.cn

导师简介: 吴东江(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光精密制造以及先进制造技术等方面的研究。

E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

等<sup>[5]</sup>利用电子束焊接技术实现了3 mm厚的Hastelloy C-276焊接成形,并分析了电子束焊接对材料组织结构的影响。现阶段国内针对Hastelloy C-276的焊接报道大多基于工程实践,主要讨论厚板材的焊接工艺,对焊缝成形机制的分析涉及较少<sup>[6~8]</sup>。

激光焊接作为一种先进连接技术,具有焊缝窄、热变形小、焊后晶粒易细化以及热影响区极窄的特点<sup>[9~11]</sup>,利于保证焊后零件的成形精度和材料特性,目前已经广泛应用于超薄板材的焊接制造领域

表1 Hastelloy C-276合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Hastelloy C-276 alloy (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Co	W	Fe	V	Ni
0.004	0.03	0.5	0.01	16.0	15.7	0.1	3.3	5.6	0.35	Bal.

采用对焊方式,试样尺寸为50 mm×25 mm;焊接前使用乙醇对焊缝处进行擦洗。

焊接实验采用GSI LUMONICS公司JK701H型Nd:YAG脉冲激光器,为防止材料表面剧烈氧化,保护气体使用体积分数为99.99%的氩气,焊接参数范围如表2所示。利用线切割以垂直于焊缝方

表2 焊接参数范围

Table 2 Ranges of welding parameters

Parameter	Pulse energy /J	Pulse duration /ms	Welding velocity /(mm/min)	Repetition rate /Hz
Value	1.0,1.5,2.0,2.5	3,5,6,7,8,9	100,150,200	20,30,40

### 3 结果与分析

图1焊缝形貌(焊接条件:1.5 J,6 ms,100 mm/min,30 Hz)具有表面平整、焊缝窄以及无明显热影响区的特点。由于焊接材料厚度较薄,且焊接所使用激光峰值功率密度最大为 $10^5$  W/cm<sup>2</sup>量级,因此焊接过程属于激光传导焊接。实验结果表明脉冲激光可以实现对0.5 mm厚度Hastelloy C-276的焊接成形。

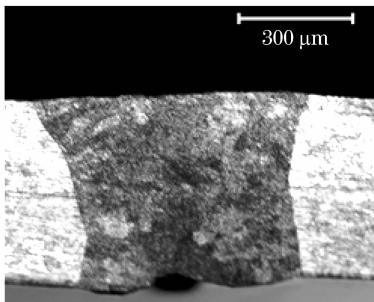


图1 焊缝形貌

Fig.1 Weld joint shape

(移动电话外壳制造以及车身制造等)。本文针对超薄Hastelloy C-276合金材料使用环境苛刻以及成形精度高等特点,采用脉冲激光实现了0.5 mm Hastelloy C-276焊接成形,结合焊接过程中浮力效应和Marangoni对流,研究不同参数条件下超薄材料焊缝形成规律。

### 2 实验方法

实验材料为精轧0.5 mm厚Hastelloy C-276合金,化学成分如表1所示。

向对样品取样,腐蚀前依次使用600#,800#,1200#,1500#和2000#砂纸对截面打磨,利用强氧化酸性溶液对焊缝处进行腐蚀(HCl和HNO<sub>3</sub>的体积比为3:1),腐蚀时间30 s。使用Olympus MX40光学显微镜观察焊缝形貌特征。

液态金属将会产生流动,而且流动速度较大,毫秒脉冲激光点焊时熔池区域液态金属流动速度可以达到 $10^2$  mm/s甚至 $10^3$  mm/s量级<sup>[12]</sup>,因此焊缝的形成主要受到熔池内部液态金属流动特征的影响。影响熔池内液态金属流动的主要驱动力包括浮力、熔池表面张力梯度引起的剪切力、洛伦兹力和等离子体引起的剪切力<sup>[13]</sup>。由于在激光传导焊接过程中,熔池区域并不存在电流以及等离子体,因此熔池形成的驱动力以熔池表面张力梯度引起的剪切力和浮力为主,而相应的熔池流动机制分别为Marangoni对流和浮力效应引起的对流。Marangoni对流主要由熔化区域的表面张力梯度所引起,其依赖于焊接过程中焊缝区域的温度梯度大小,对熔池深度有较明显影响,通过Marangoni数( $M_a$ )表示, $M_a$ 越大则Marangoni对流效应越强。 $M_a$ 的计算为

$$M_a = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial T} \left( \frac{\Delta T}{L} \right) L^2 \right| \frac{1}{K \mu \alpha} \quad (1)$$

式中 $\partial \gamma / \partial T$ 代表表面张力温度系数; $\Delta T / L$ , $L$ , $\mu$ 和 $\alpha$

根据焊接冶金学理论,焊接过程中熔池区域的

分别代表熔池表面的温度梯度、熔池半径、动力粘度和热扩散系数； $K$  为常数<sup>[14~16]</sup>。

浮力效应引起的对流主要形成在熔池近表面，由材料热胀冷缩引起，对流方向由焊缝中心指向焊缝边缘，熔池表面区域温度梯度越大，则对流效应越强，对材料近表面熔池宽度有一定影响，但较强的 Marangoni 对流可以限制其对焊缝宽度的影响<sup>[13~15]</sup>。以上两种对流机制均受到焊接过程温度梯度的影响，温度梯度越大则对流趋势越强，特别是对 Marangoni 对流的影响。(1)式表明温度梯度越大，则  $M_a$  越大，说明增强了 Marangoni 对流强度，有利于增加熔池深度和宽度；温度梯度持续时间越长，则对流持续时间越长，有利于增加熔池的宽度和深度。在脉冲激光焊接过程中，热输入量和相对热作用时间直接影响了温度梯度的大小。热输入量增大提高了焊缝区域的温度梯度，相对热作用时间的增加延长了温度梯度的持续时间，进而影响了熔池内部对流的强弱和持续时间的长短，最终产生了不同的熔深和熔宽。热输入量大小通过单脉冲线能量密度  $E_l$  表征；而考虑到脉冲激光离散作用特点，相对热作用时间通过脉冲占空比  $D_c$  表征，占空比越大，则说明相对热作用时间越长。 $E_l$  和  $D_c$  的计算式分别为

$$E_l = \frac{E}{vt}, \quad (2)$$

$$D_c = tf, \quad (3)$$

式中  $E$ ,  $v$ ,  $f$  和  $t$  分别代表单脉冲能量、焊接速度、脉冲频率和脉冲宽度，可通过激光器直接设定。实验过程中单脉冲线能量密度不大于  $10^2$  J/mm 量级，属中低能量输入。

由于所使用 Hastelloy C-276 为低硫材料，因此其表面张力随温度升高而降低<sup>[13]</sup>，在焊接过程中可产生沿着焊缝中心向外的表面张力梯度，进而形成指向焊缝边缘方向的对流。

### 3.1 单脉冲能量对焊缝形貌的影响

通过焊接实验发现，焊缝上下表面宽度随着单脉冲能量的增加而增大(如图 2 所示)，但在单脉冲能量为 1 J 时，出现了较宽的焊缝上表面，同时下表面几乎未焊透。这是由于当单脉冲能量较小时，焊接过程输入能量较小，从而导致焊缝区熔池流动的浮力效应引起的对流相对于 Marangoni 对流作用较明显，因此熔池对流主要集中在近表面，而且此时厚度方向上热扩散传递的热量相对于对流所传导的热量较多，利于产生较宽的上表面熔池形貌。随着

单脉冲能量不断增加，输入能量随之增大，此时虽然浮力效应依然存在，但由于逐渐增强的 Marangoni 对流，弱化了浮力效应引起的对流，使得熔池内部对流速度和深度增加，直接增大了对流在厚度方向的传热量，抑制了上表面焊缝宽度。脉冲能量继续增加时，由于焊接过程已达到全焊透条件，较大的单脉冲能量继续增加单位时间的热输入量，使得焊缝区域内部的 Marangoni 对流趋势继续加强，导致上下表面熔池区域继续增加，结合脉冲激光热源离散输入以及下表面的界面效应，最终在 2.5 J 条件下形成了上下表面宽度一致的焊缝形貌。实验结果表明，在脉冲激光焊接超薄板材的过程中，单脉冲能量的变化可以改变熔池对流的流动趋势，最终影响了焊缝形貌。实验中通过改变单脉冲能量可得到小于 1 mm 的平整焊缝以及上下表面等宽的焊缝形貌。

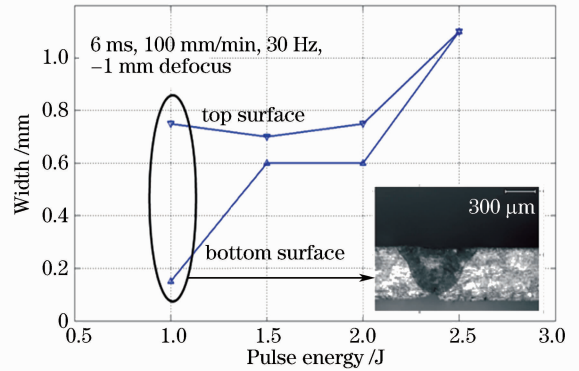


图 2 单脉冲能量对焊缝宽度的影响

Fig. 2 Influence of single pulse energy on weld joint

### 3.2 焊接速度和脉冲频率对焊缝形貌的影响

表 3 给出了不同焊接速度条件下的焊缝形貌特征。由(2)式知，当扫描速度增加时，单脉冲线能量密度减小，即热输入量减小，在焊接过程中使得焊缝区域变窄。但在实验中发现当焊接速度为 150 mm/min 时，焊缝区域上表面宽度出现了增大现象，此时单脉冲线能量密度与图 2 中单脉冲能量为 1 J 时的单脉冲线能量密度一致。结果说明当焊接速度为 150 mm/min 时，由于减小了同一位置激光能量输入，在一定程度上减弱了焊接稳态条件下 Marangoni 对流强度，使得浮力效应引起的对流作用相对增强，进而出现了焊接速度增加而焊缝上表面变宽的现象。随着焊接速度的继续增加，热输入量进一步降低，导致焊接过程中两种对流过程继续减弱，最后使得焊缝上下表面宽度减小。实验结果表明焊接速度的变化对熔池对流机制的影响与单脉冲能量的影响规律相似，通过热输入量的改变决定

焊缝形貌。

另一方面,焊缝宽度随着脉冲频率的增加而增加,如表 4 所示。当脉冲频率增加时,脉冲之间的冷却时间缩短,即占空比增大,使得相对热作用时间增加,导致相同热量输入条件下非激光作用阶段熔池上表面的热扩散行为减弱,而相邻的脉冲作用又使得热积累作用增强,在一定程度上强化了激光作用效果,利于延长稳态 Marangoni 对流的作用时间,在全焊透条件下使得焊缝变宽。实验中脉冲频率为 40 Hz 时同样可以得到上下等宽的焊缝形貌,焊缝宽度为 0.8 mm。

表 3 不同焊接速度条件下焊缝宽度

Table 3 Widths of weld joint under various welding velocity conditions

Welding velocity / (mm/min)	Width of top surface / mm	Width of bottom surface / mm
100	0.7	0.6
150	0.8	0.6
200	0.6	0.5

表 4 不同脉冲频率条件下焊缝宽度

Table 4 Widths of weld joint under various repetition rate conditions

Repetition rate / Hz	Width of top surface / mm	Width of bottom surface / mm
20	0.6	0.4
30	0.7	0.6
40	0.8	0.8

### 3.3 脉冲宽度对焊缝形貌的影响

脉冲宽度对焊缝的影响如图 3 所示。随着脉冲宽度的增加,焊缝上下表面宽度也在增加。脉冲宽度与单脉冲线能量密度成反比关系,因此脉冲宽度的增加相当于减小热输入量,导致焊缝区域的减小;而脉冲激光焊接属于一种离散热量输入准稳态物理过程,脉冲宽度的增加还直接增加了相对热作用时

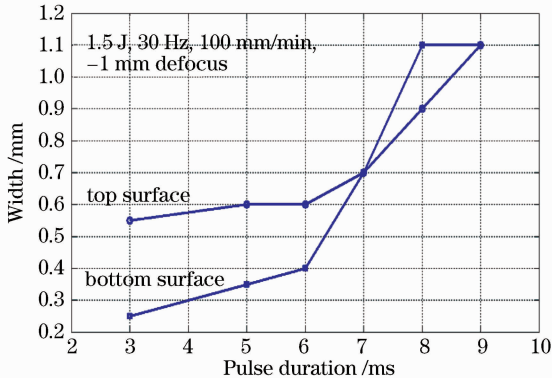


图 3 脉冲宽度对焊缝宽度的影响

Fig. 3 Influence of pulse duration on weld joint

间,有使焊缝宽度增大的趋势。在频率不变的条件下,较长的脉冲宽度利于焊缝表面的热量积累,而冷却时间的缩短(非激光作用时间)又减少了单纯热量扩散时间,造成脉冲占空比增大,使得相对热作用时间增加,强化了稳态熔池对流,最终导致即使在减小热输入条件下,脉冲宽度的增加反而引起焊缝区域增大。因此脉冲宽度影响的相对热作用时间是改变熔池对流状态的主要因素,直接决定了焊缝成形规律。

当脉冲宽度为 3~6 ms 时,焊缝宽度变化并不显著,可认为此时由于相对热作用时间较短而热输入量较大,两者矛盾的相互作用使得熔池对流机制的变化相对较弱。而当脉冲宽度为 6~9 ms 时,焊缝宽度的变化显著,此时随着脉冲宽度的增加,热输入量不断减小,而相对热作用时间则不断增加,其作用效果逐渐增强,使得在长脉冲宽度条件下相对热作用时间比热输入量对熔池对流机制的影响显著,最终形成了如图 3 所示的焊缝宽度变化趋势。在脉冲宽度为 8 ms 时,出现了上窄下宽的焊缝形貌。这是由于此时脉冲占空比较大,即相对热作用时间较长,同时焊缝下表面的冷却过程较上表面弱,强化了焊缝下表面的热积累和对流作用,最终形成了上窄下宽的形貌特征;但随着脉冲宽度的继续增加,这种强化的焊缝下表面热积累和对流作用由于继续增强的上表面熔池对流过程而相对减弱,最终出现了 9 ms 时焊缝上下表面宽度一致的形貌特征。在全焊透条件下,可以获得不大于 0.6 mm 的焊缝,同时也得到了上下等宽的焊缝形貌。

## 4 结 论

通过焊接实验发现,合理的脉冲激光焊接参数可以实现对 0.5 mm 厚度 Hastelloy C-276 的焊接成形,并可控制焊缝上下表面熔宽。结合浮力效应和 Marangoni 对流,通过分析脉冲宽度、焊接速度、单脉冲能量以及脉冲频率对热输入量和相对热作用时间的影响规律,研究了不同参数条件下超薄 Hastelloy C-276 板材焊接过程焊缝的形成规律,得到如下结论:1) 单脉冲能量和焊接速度的变化直接改变了焊接过程的热输入量,进而影响熔池内部的 Marangoni 对流和浮力效应状态。2) 脉冲频率的变化直接影响了相对热作用时间,进而改变 Marangoni 对流状态,对焊缝形貌有一定的影响。而脉冲宽度的改变虽然同时影响了热输入量和相对热作用时间,但其影响熔池对流机制的主要因素为

相对热作用时间,且对焊缝宽度的影响随着脉冲宽度的增加而逐渐增强。3)在全焊透条件下,通过改变单脉冲能量、脉冲宽度、焊接速度和脉冲频率都可以得到小于1 mm的平整焊缝,同时在特定条件下可以获得上下表面等宽的焊缝形貌。

### 参 考 文 献

- 1 M. J. Cieslak, T. J. Headley, A. D. Romig *et al.*. The welding metallurgy of Hastelloy alloys C-4, C-22, and C-276 [J]. *Metallurgical Trans. A*, 1986, **17**(11):2035~2047
- 2 M. J. Cieslak, G. A. Knorovsky, T. J. Headley *et al.*. The use of new PHACOMP in understanding the solidification microstructure of nickel base alloy weld metal [J]. *Metallurgical Trans. A*, 1986, **17**(12):2107~2116
- 3 J. S. Ogborn, D. L. Olson, M. J. Cieslak. Influence of solidification on the micro structural evolution of nickel base weld metal [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1995, **203**(1-2):134~139
- 4 M. D. Rowe, P. Crook, G. L. Hoback. Weld ability of a corrosion-resistant Ni-Cr-Mo-Cu alloy [J]. *Welding Journal*, 2003, **82**(11):313-s~320-s
- 5 M. Ahmad, J. I. Akhter, M. Iqbal *et al.*. Surface modification of Hastelloy C-276 by SiC addition and electron beam melting [J]. *J. Nucl. Mater.*, 2005, **336**(1):120~124
- 6 Chen Gongmin. The welding of corrosion-resistant Hastelloy alloys [J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2005, (10):51~52  
陈恭珉. 哈氏抗腐蚀合金的焊接[J]. *上海化工*, 2005, (10):51~52
- 7 Tang Yuansheng, Zheng Shunxian. The tube welding of Hastelloy C-276 in PTA project [J]. *Installation*, 2008, (3):31~32
- 8 唐元生,郑顺贤. PTA 工程中哈氏合金(Hastelloy-C-276)管道的焊接[J]. *安装*, 2008, (3):31~32
- 8 Bao Guoping. The welding process of Hastelloy C276 alloy [J]. *Heavy Casting and Forging*, 2008, (4):33~35
- 包国平. HastelloyC276 合金的焊接[J]. *大型铸锻件*, 2008, (4):33~35
- 9 C. Dawes. *Laser Welding* [M]. New York: McGraw-Hill, 1992
- 10 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants [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
- 11 Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4):1132~1137
- 石 岩,张 宏,渡部武弘等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4):1132~1137
- 12 X. He, P. W. Fuerschbach, T. DebRoy. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**(12):1388~1398
- 13 S. Kou. *Welding Metallurgy* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002
- 14 C. Limmaneevichitr, S. Kou. Visualization of Marangoni convection-in simulated weld pools [J]. *Welding Research Supplement*, 2000:126-s~135-s
- 15 C. Limmaneevichitr, S. Kou. Experiments to simulate effect of marangoni convection on weld pool shape [J]. *Welding Research Supplement*, 2000:231-s~237-s
- 16 E. J. Ha, W. S. Kim. A study of low-power density laser welding process with evolution of free surface [J]. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 2005, **26**(4):613~621