

Hastelloy C-276 薄板脉冲激光填丝焊接成形工艺

许媛¹, 吴冬冬², 马广义^{2*}¹黄山学院信息工程学院, 安徽 黄山 245021;²大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 基于 0.5 mm 厚 Hastelloy C-276 薄板进行了脉冲激光填丝焊接实验, 研究了激光单脉冲能量和离焦量对焊缝成形的影响规律。研究表明, 单脉冲能量和离焦量主要影响脉冲激光焊接热输入量、光斑大小和激光空间分布, 并且对焊缝成形的宏观形貌影响较大; 随着热输入量的增大, 焊缝上下熔宽增大, 焊缝下余高和下接触角也增大; 在一定离焦量范围内, 激光光斑直径越大, 焊缝熔宽越大; 受激光空间分布的影响, 负离焦时, 焊缝上熔宽总是略大于下熔宽; 在一定工艺条件下, 可获得正余高可控的焊接接头及熔宽、余高和接触角均匀而熔宽较小的焊缝形貌; 焊缝上下表面光滑、均匀, 表现出半圆波浪条纹特征。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 填丝焊接; Hastelloy C-276; 焊缝成形

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111402

Forming Process of Pulsed Laser Welding with Filler Wire for Hastelloy C-276 Sheets

Xu Yuan¹, Wu Dongdong², Ma Guangyi²¹ School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan, Anhui 245021, China;² School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract The experiment of pulsed laser welding with filler wire on 0.5 mm thick Hastelloy C-276 sheets is conducted, and the influence rules of laser single pulse energy and defocusing on the weld joint forming are studied. The study results show that the single pulse energy and the defocusing mainly influence the heat input of pulsed laser welding, spot size and spatial distribution of laser beam, and they also have a great influence on the macroscopic morphology of the weld joint forming. With the increase of the heat input, both of the top and bottom welding widths of weld joints increase, and the bottom reinforcement and the bottom contact angle of weld joints also increase. In a certain range of defocusing, the larger the laser spot diameter is, the wider the weld joint width is. With the influence of the laser beam spatial distribution, the top welding width is always slightly larger than the bottom welding width when the defocusing is negative. Under a certain process condition, the weld joints with controllable positive reinforcement, and the weld joint appearance with uniform weld width, reinforcement and contact angle, but small weld width, can be obtained. The top and bottom surfaces of weld joints are smooth and uniform, which show a feature of semicircular wave stripes.

Key words laser technique; pulsed laser; welding with filler wire; Hastelloy C-276; weld joint forming

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390; 160.3900

1 引言

镍基合金 Hastelloy C-276 具有优良的力学性能和耐腐蚀性能, 已被广泛应用于石油化工、核电等领域^[1]。

收稿日期: 2017-05-04; **收到修改稿日期:** 2017-05-31

基金项目: 安徽省高校自然科学基金(KJH2015B02)

作者简介: 许媛(1982—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事激光加工和激光等离子体数值模拟方面的研究。

E-mail: yuanxu@hsu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: gyma@dlut.edu.cn

目前, Hastelloy C-276 材料的焊接方式主要为氩弧焊接、电子束焊接和激光自熔焊接。研究发现, Hastelloy C-276 氩弧焊接热输入量大, 焊缝显微组织粗大, 有二次相析出, 焊缝边缘存在软化的热影响区, 焊接接头抗拉强度低^[2-3]。Hastelloy C-276 电子束焊接焊缝晶粒明显得到细化, 硬度较母材得到显著提高, 但焊接过程需要在真空环境中进行^[4]。脉冲激光焊接热输入量小、冷却速度快, 薄板 Hastelloy C-276 脉冲激光自熔焊接焊缝成形较好, 焊缝晶粒明显得到细化, 元素偏析程度较低^[5-6]。与氩弧焊接相比, 激光自熔焊具有明显优势, 可替代氩弧焊接作为屏蔽套焊接成形的一种重要技术手段, 但激光自熔焊接焊缝易产生负余高, 影响屏蔽套整体使用性能。

薄板激光填丝焊接(LFWF)具有间隙容错能力强、装夹精度要求低、能量密度集中等特点^[7-12], 较自熔焊更适用于长程大径厚比屏蔽套的焊接。Hastelloy C-276 薄板激光填丝焊接有利于提高焊接接头力学性能, 但易受脉冲激光热输入、光斑大小和激光空间分布的影响。为此, 本文研究了单脉冲能量和离焦量对 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光填丝焊焊缝形貌的影响规律。

2 实验材料与方法

采用 0.5 mm 厚的 Hastelloy C-276 薄板(100 mm × 40 mm)作为母材, 选用直径为 0.5 mm 的 ERNiCrMo-4 焊丝, 母材与焊丝的化学成分见表 1。采用英国 GSI 公司生产的 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器和自主改进的送丝系统。为保证焊丝的刚直性和稳定性, 调整伸出送丝嘴的焊丝长度为 2 mm。采用前置送丝方式, 送丝角度 α 为 30° , 光丝间距 d 为 0.3 mm, 并保证焊接过程中焊丝端部位于熔池前沿位置处。焊接过程中采用体积分数为 99.9% 的氩气作为保护气, 填丝焊接实验示意图如图 1 所示。

表 1 Hastelloy C-276 和 ERNiCrMo-4 的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Hastelloy C-276 and ERNiCrMo-4 (mass fraction, %)

Item	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Co	Mn	C	Si	P	S	V
Hastelloy C-276	Bal.	5.14	16.00	15.58	3.45	1.26	0.53	0.001	0.02	0.006	0.003	0.01
ERNiCrMo-4	Bal.	5.30	16.00	15.20	3.30	0.11	0.41	0.009	0.03	0.003	0.001	0.01

LFWF 工艺实验采用平板堆焊方式, 研究单脉冲能量 E 和离焦量 D 对焊缝形貌的影响规律, 实验中保持其他工艺参数不变, 其中激光脉冲频率为 60 Hz, 脉宽为 6 ms, 焊接速度和送丝速度均为 350 mm/min 不变。焊缝几何形貌特征如图 2 所示, 其中 W_1 和 W_2 分别为上、下熔宽, S 为焊缝总熔化面积, 即图 2 中阴影面积, H_1 和 H_2 分别为上、下余高, β_1 和 β_2 分别为上、下接触角。

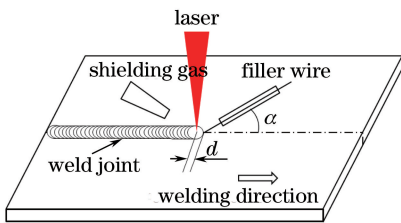


图 1 激光填丝焊接实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of LFWF experimental setup

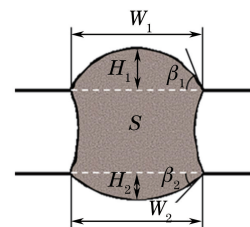


图 2 激光填丝焊接成形焊缝几何特征

Fig. 2 Geometric feature of weld joint formed by LFWF

3 实验结果及讨论

3.1 单脉冲能量对焊缝形貌的影响规律

图 3 所示为单脉冲能量 E 对焊缝成形宏观形貌的影响规律, 其中 W 为熔宽, H 为余高, β 为接触角。图 3 可以看出, 随着单脉冲能量的增加, 焊缝上、下熔宽增大, 上余高和上接触角减小, 下余高缓慢增大, 下接触角基本保持不变, 熔化金属体积增加。当单脉冲能量为 0.75 J 时, 由于热输入量较小, 出现未熔透现象, 填充金属堆积在焊缝上表面, 导致上余高和上接触角较大。当单脉冲能量在 1.25~2.25 J 范围内时, 随着单脉冲能量的增加, 焊缝上、下熔宽增大, 且下熔宽比上熔宽增大明显, 在相对填丝量不变的情况下, 焊缝上余高和上接触角迅速减小, 下余高逐渐增大而下接触角基本保持不变。这主要是因为单脉冲能量影响焊缝热输

入,随着单脉冲能量的增加,焊缝热输入增加,熔池中心温度升高,温度梯度增加,表面张力的收缩作用变弱,熔池上表面 Marangoni 对流明显增强,使得热量向下传递;同时,焊缝下表面未采取吹气冷却,熔池下表面 Marangoni 对流效应强于上表面,导致焊缝下表面熔宽增加更加明显;在表面张力和熔池金属重力作用的共同影响下,焊缝上余高和上接触角迅速减小,下余高逐渐增大而下接触角基本保持不变。

3.2 离焦量对焊缝形貌的影响规律

图 4 所示为离焦量 D 对焊缝成形宏观形貌的影响规律。可以看出,在不同离焦量条件下,焊缝上、下熔宽均基本相近;在零离焦时可获得最窄焊缝,此时金属熔化量最小。离焦量在 $-2 \sim +3$ mm 范围内时,随着离焦量绝对值的增大,光斑作用面积增大,焊缝上、下熔宽增大,上余高和上接触角呈减小的趋势;当离焦量绝对值继续增大时,焊缝熔宽出现下降的趋势。这主要是因为实验所使用的激光峰值功率密度为 10^5 W/cm²,属于传导焊接,离焦量对焊缝宽度的影响主要与激光光斑的大小有关,在一定范围内,离焦量越大,在母材表面作用的光斑尺寸就越大,热作用面积就越大,熔宽就越大,但随着离焦量的继续增大,激光峰值功率密度降低,熔宽减小。在负离焦时,上熔宽总是略大于下熔宽;当离焦量超过 $+2$ mm 时,下熔宽略大于上熔宽。这可能与激光光束空间分布有关,负离焦时,在板厚方向激光束半径逐渐减小,功率密度逐渐增大;正离焦时则恰好相反。离焦量对焊缝余高和接触角的影响主要与光斑作用面积和激光空间分布有关。受激光空间分布的影响,正离焦时焊缝下余高比负离焦时的要大,填丝焊缝表现出一定的下塌现象。

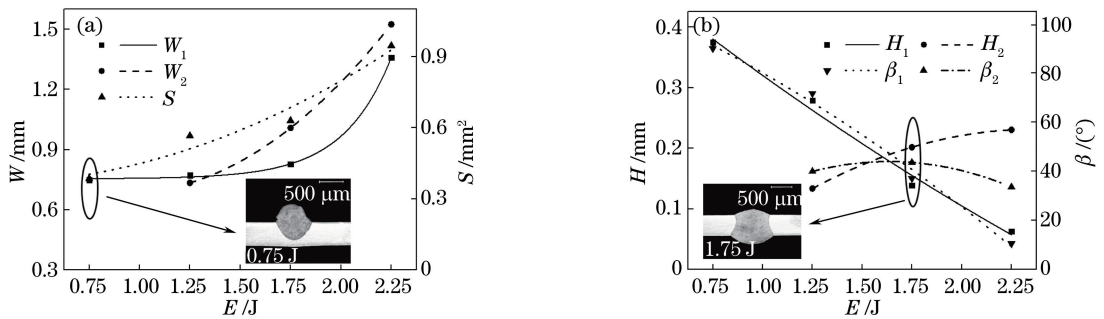


图 3 单脉冲能量对填丝焊接焊缝成形形貌的影响。(a) W 和 S ; (b) H 和 β

Fig. 3 Influences of single pulse energy on weld joint appearance formed by LFWF. (a) W and S ; (b) H and β

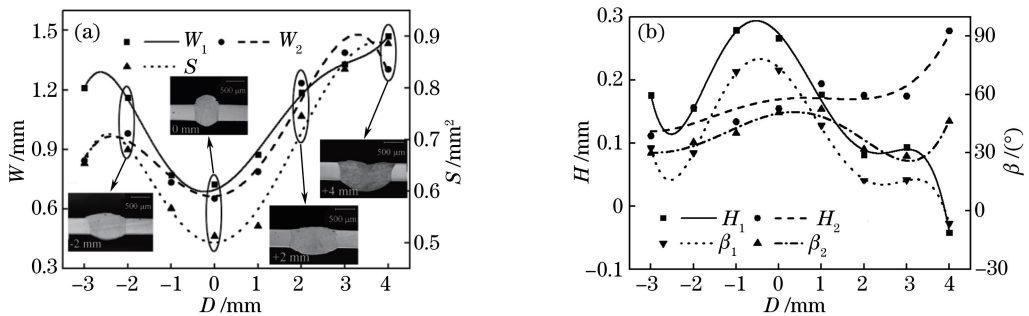


图 4 离焦量对填丝焊接焊缝成形形貌的影响。(a) W 和 S ; (b) H 和 β

Fig. 4 Influences of defocusing on weld joint appearance formed by LFWF. (a) W and S ; (b) H and β

3.3 典型焊缝形貌

根据填丝焊接工艺对焊缝成形形貌的影响规律可知,在单脉冲能量范围为 $1.25 \sim 1.75$ J、离焦量范围为 $-2 \sim +2$ mm 的条件下可获得熔宽较小,且上下熔宽、余高、接触角均近似一致的焊缝形貌。图 5 所示为单脉冲能量为 1.25 J、离焦量为 -1 mm 时获得的焊缝成形截面形貌。图 6 所示为在此工艺条件下的焊缝成形表面形貌。可以发现,填丝焊接焊缝上表面成形光滑、均匀,焊丝添加过程较为稳定。焊缝上表面成形呈现出一定周期性的半圆波浪条纹特征,周边未见明显飞溅物,这主要是因为脉冲激光间断作用使得焊缝上表面经历了多次熔化凝固,其中条纹间距与脉冲频率和焊接速度有关;焊缝下表面成形出现明显的熔化边界,且熔池金属向下形成突起,也呈现出一定的半圆波浪条纹特征,但半圆波浪条纹方向与上表面的相反,主要是

由于焊接过程中冷却速度较大,且焊丝填充焊接产生的余高较大,后一脉冲并不能完全熔透前一脉冲作用形成的下余高金属,即前一脉冲作用形成的下余高最低位置处的金属并未经历重熔过程。

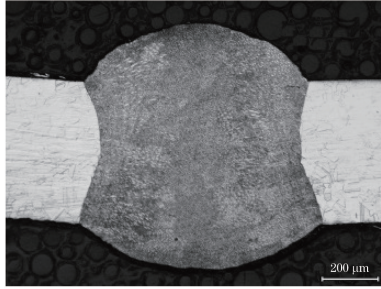


图 5 焊缝截面形貌

Fig. 5 Cross-sectional morphology of weld joint

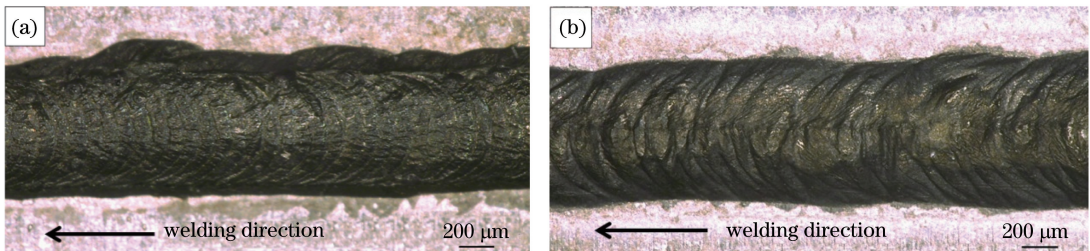


图 6 焊缝表面形貌。(a)上表面;(b)下表面

Fig. 6 Morphologies of weld joint surfaces. (a) Top surface; (b) bottom surface

4 结 论

研究了单脉冲能量和离焦量对 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光填丝焊接中焊缝形貌的影响规律,得到如下结论。

1) 随着单脉冲能量的增大,焊缝熔宽增大,在重力作用下焊缝金属向下塌陷,焊缝上余高和上接触角减小,下余高增大。

2) 在不同离焦量条件下,焊缝上、下熔宽均基本相近;随着离焦量绝对值的增大,光斑直径增大,焊缝熔宽增大;受激光空间分布的影响,负离焦时,上熔宽总是略大于下熔宽,正离焦时,当离焦量超过+2 mm 时,下熔宽略大于上熔宽,且正离焦时焊缝下余高比负离焦时的要大。

3) 在单脉冲能量范围为 1.25~1.75 J、离焦量范围为-2~+2 mm 的条件下,可获得熔宽较小,且上下熔宽、余高、接触角均近似一致的焊缝形貌;焊丝添加过程稳定,焊缝上、下表面成形光滑、均匀,均表现出半圆波浪条纹特征,但下表面半圆波浪条纹方向与上表面的相反。

参 考 文 献

- [1] Zheng M G, Yan J Q, Jun S T, *et al.* The general design and technology innovations of CAP1400[J]. Engineering, 2016, 2(1): 97-102.
- [2] Manikandan M, Arivazhagan N, Rao M N, *et al.* Improvement of microstructure and mechanical behavior of gas tungsten arc weldments of alloy C-276 by current pulsing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 28(2): 208-215.
- [3] Li Xinhe, Yan Yuesheng, Liu Yanping, *et al.* Study on microstructure and properties of welded joint of extra thin Ni-based alloy plate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(6): 91-96.
李新和, 严岳胜, 刘燕平, 等. 镍基合金薄板焊缝组织与性能[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(6): 91-96.
- [4] Ahmad M, Akhter J I, Akhtar M, *et al.* Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 390(1/2): 88-93.
- [5] Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong. Weld joint forming of thin Hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding

- [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603014.
马广义, 吴东江, 王占宏. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603014.
- [6] Ma G Y, Wu D J, Niu F Y, *et al.* Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welded Ni-based superalloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 72: 39-46.
- [7] Turichin G A, Tsibulskiy I, Kuznetsov M, *et al.* Influence of the gap width on the geometry of the welded joint in hybrid laser-arc welding[J]. Physics Procedia, 2015, 78: 14-23.
- [8] Liu Dongyu, Li Dong, Li Kaibin, *et al.* Influence of laser with same line energy on the microstructure and properties of welded[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101402.
刘东宇, 李东, 李凯斌, 等. 相同激光线能量对焊缝组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101402.
- [9] Qi Xiaoyong, Zhang Wei, Yu Shiwen, *et al.* Microstructural and mechanical study on laser welding seam of C18000 alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071405.
祁小勇, 张威, 余世文, 等. C18000 铜合金激光焊缝组织和力学性能的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071405.
- [10] Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.* Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- [11] Wang Qiming, Qiao Junnan, Zou Jianglin, *et al.* Fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0602004.
王启明, 乔俊楠, 邹江林, 等. A7N01 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602004.
- [12] Zhao Yong, Wang Qingzhao, Huang Jian, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203007.
赵勇, 王清瑛, 黄坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203007.