

脉冲激光填丝焊对镍基合金薄板焊缝成形及微观组织的影响

吴冬冬, 柴东升, 马广义, 周思雨, 于京令, 吴东江

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 为了解决激光自熔焊接时薄板焊缝易产生负余高的问题及满足高装配精度的要求, 提出了激光填丝焊接(LWFW)工艺, 开展了 Hastelloy C-276 屏蔽套材料的 LWFW 实验, 研究了工艺参数对焊缝形貌的影响, 分析了接头不同区域的显微组织、元素分布及显微硬度特征。结果表明, 运用 LWFW 可以获得上下表面正余高可控的焊接接头, 在优化工艺参数条件下可获得上下余高、接触角基本一致的焊缝形貌。焊缝晶粒细化明显, 母材与熔化线交界处无明显热影响区, 焊缝不同熔化区域元素分布均匀, 没有明显的元素宏观偏析, 但柱状枝晶区 Mo 元素存在显微偏析。接头不同熔化区域显微硬度分布均匀, 硬度值与母材的基本相当。

关键词 激光技术; 激光填丝焊接; Hastelloy C-276; 焊缝成形; 显微组织

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.031404

Effect of Pulsed Laser Welding with Filler Wire on Weld Forming and Microstructures of Thin Nickel-Based Alloy Sheet

Wu Dongdong, Chai Dongsheng, Ma Guangyi, Zhou Siyu, Yu Jingling, Wu Dongjiang

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

Abstract The process of laser welding with filler wire (LWFW) is presented to solve the problem of negative reinforcement of thin sheet weld seam, and to satisfy the requirement of high precision assembly in laser self-fusing welding. LWFW experiment about Hastelloy C-276 shielding materials is carried out, and the effects of process parameters on the weld forming are studied. The microstructures, element distribution and micro-hardness of weld joints in different zones are analyzed. The results indicate that the weld joints with controllable positive reinforcements on both top and bottom surfaces by using LWFW can be obtained, and the weld appearance with uniform reinforcements and contact angles on upper and lower surface is available under the optimized process parameters conditions. Obvious grain refinement in weld joint and no obvious heat-affected zone at the junction of base metal and fusion line are observed. The element distribution of weld is uniform in different melting zones, and macro segregation is not found, but micro segregation of Mo in columnar dendrite zone is significant. The micro-hardness of weld joint is well-distributed in different regions and the value is basically equivalent to that of base metal.

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

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390; 160.3900

收稿日期: 2016-11-09; **收到修改稿日期:** 2016-11-15

基金项目: 国家 973 计划(2015CB057305)、创新研究群体科学基金(51321004)、中央高校基本科研业务费专项资金 [DUT16RC(3)012]

作者简介: 吴冬冬(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: 799130512@qq.com

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

E-mail: djwudut@dlut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

Hastelloy C-276 是一种固溶强化的镍基合金材料,具有很强的耐腐蚀性能,是 CAP1400 核主泵屏蔽套材料。CAP1400 型压水堆核电机组装机功率大,安全性和可靠性要求高,其屏蔽套的套体板厚为 0.3~0.7 mm,长度甚至大于 4000 mm,直径大于 600 mm,对直径精度要求较高,这对屏蔽套的焊接成形提出了较高的要求^[1-2]。

Hastelloy C-276 材料的焊接主要采用氩弧焊接、电子束焊接和激光自熔焊接。Manikandan 等^[3-4]分析了 Hastelloy C-276 直流和交流钨极气体保护填丝焊后焊缝的显微组织及元素显微偏析,其中 PCGTA 填丝焊获得的焊缝显微偏析较小且无明显二次相生成,焊缝晶粒尺寸较大,焊缝边缘存在晶粒粗大的热影响区。李新和等^[5]研究了钨极氩弧填丝焊接 Hastelloy C-276,焊丝为 ERNiCrMo-4,有大量析出相产生,接头抗拉强度降低。Ahmad 等^[6]发现真空环境中电子束焊接 Hastelloy C-276 的焊缝晶粒明显细化,硬度较母材提高了 35%,并无明显脆性相生成。Manikandan 等^[7]研究了连续 Nd:YAG 激光焊接 Hastelloy C-276 合金的微观组织和力学性能,焊缝晶粒尺寸比脉冲激光焊接的大。Ventrella 等^[8]研究了 100 μm 的 Hastelloy C-276 薄片脉冲 Nd:YAG 激光搭接焊,探索了激光功率对焊缝形貌及力学性能的影响。吴东江等^[9]研究了脉冲激光自熔焊接工艺参数对薄板 Hastelloy C-276 焊缝形貌的影响规律,发现脉冲激光焊接较低的热输入和快速冷却作用使得接头晶粒明显细化,无明显脆性相生成,元素偏析程度较低^[10]。激光自熔焊可替代氩弧焊接工艺作为屏蔽套焊接成形的重要技术手段,但激光自熔焊接焊缝易产生负余高,影响屏蔽套的整体使用性能。

受激光光斑直径的影响,薄板激光填丝焊接(LFW)对送丝精度的要求较高,焊丝的添加可强化焊缝性能,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^[11-16],适用于大径厚比 Hastelloy C-276 屏蔽套的焊接。本文研究了 Hastelloy C-276 薄板 LFW 过程中工艺参数对焊缝形貌的影响规律,观察并分析了接头显微组织、元素分布及其显微硬度特征。

2 实验材料及方法

实验采用 0.5 mm 厚的 Hastelloy C-276 板,尺寸为 100 mm \times 40 mm;根据美国焊接协会标准 AWS A5.11/A5.14 焊接标准选用直径为 0.5 mm 的 ERNiCrMo-4 焊丝,母材与焊丝的化学成分见表 1。焊接实验采用英国 GSI LUMONICS 公司 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器;采用自主改进送丝系统,可实现 0.5 mm 直径焊丝的稳定输送。焊接采用前置送丝方式,送丝角度 α 为 30°,光丝间距 d 为 0.3 mm,并采用体积分数为 99.9% 的氩气作为保护气以防止焊接过程中材料表面发生剧烈氧化,焊接装置如图 1 所示。

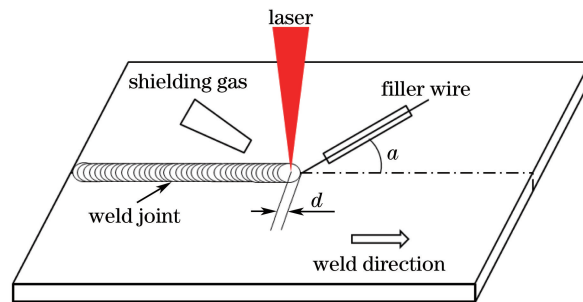


图 1 LFW 实验图

Fig. 1 Schematic of LFW experiment

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, %)

Sample	Element											
	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

采用平板堆焊方式进行 LFW 实验,分析脉冲频率 f 、焊接速度 v 和送丝速度 v_f 对焊缝形貌的影响,焊接参数见表 2。焊缝几何特征如图 2 所示,其中 W_1 和 W_2 分别表示上、下熔宽;S 代表焊缝总熔化面积,

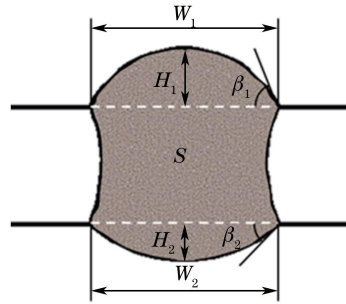


图2 LFWF焊缝几何特征示意图

Fig. 2 Schematic diagram of weld geometrical feature in LFWF

即图中阴影部分面积; H_1 和 H_2 分别表示上、下余高; β_1 和 β_2 分别表示上、下接触角, 计算公式为

$$\beta_i = 2\arctan(2H_i/W_i), \quad (1)$$

式中 i 取 1, 2。选取优化工艺参数进行对接填丝焊接实验, 截取对接焊接接头横截面, 经研磨抛光后用王水溶液腐蚀 30 s, 采用德国 Zeiss Supra55 扫描电子显微镜对接头不同区域进行观察分析; 采用日本岛津公司 EPMA-1600 电子探针 (EPMA) 检测焊缝区宏观元素分布情况; 利用能谱仪 (EDS) 检测焊缝不同区域的显微偏析特征; 采用上海集敏测试仪器有限公司 WVC-1000B 维氏硬度计测量接头显微硬度, 加载载荷为 100 g, 保载时间为 15 s。

表2 LFWF工艺参数

Table 2 Process parameters in LFWF

Parameter	Range
Pulse energy /J	1.25
Pulse duration /ms	6
Frequency f /Hz	50, 60, 70, 80, 90
Weld speed v /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	250, 300, 350, 400, 450
Wire feeding speed v_f /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	300, 350, 400, 450

3 结果与讨论

3.1 焊缝形貌特征

当焊接速度和送丝速度均为 350 mm/min 时, 脉冲频率对焊缝宏观形貌的影响规律如图 3、4 所示。在填丝量不变的情况下, 随着脉冲激光频率的增大, 焊缝宽度增大, 下表面宽度增加更加明显; 焊缝上表面余高和接触角明显减小, 下表面余高逐渐增大而接触角基本保持不变, 焊缝总熔化面积增大。这主要是由于脉冲频率增大时脉冲激光占空比增大, 激光相对热作用时间变长, 焊缝热积累增加, 高温持续时间变长, 因此熔池表面张力的收缩作用变弱, 焊缝上表面余高逐渐减小甚至出现负余高, 同时上表面接触角逐渐减小; 下表面余高受重力影响较大, 在实验条件下当表面张力和重力达到平衡时, 焊缝下表面接触角基本稳定在 $40^\circ\sim 50^\circ$ 范围内。

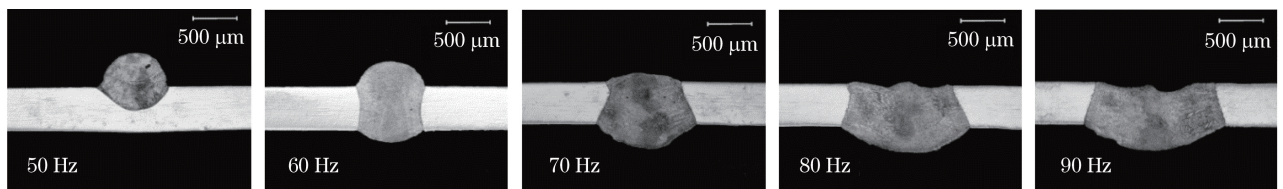


图3 不同频率下的焊缝宏观形貌

Fig. 3 Weld macro morphology at different frequencies

当脉冲频率为 60 Hz、送丝速度为 350 mm/min 时, 焊接速度对填丝焊缝形貌的影响规律如图 5、6 所示。随着焊接速度的提高, 焊缝宽度和余高减小, 且下表面比上表面变化明显, 焊缝接触角无明显变化, 焊缝总熔化面积减小。随着焊接速度的提高, 单位时间内同一位置的填丝量减少, 焊缝热输入降低, 熔池表面的 Marangoni 对流减弱, 最终造成焊透情况下的下表面宽度和余高减小, 但焊缝表面张力梯度分布规律和焊缝下接触角无明显变化。

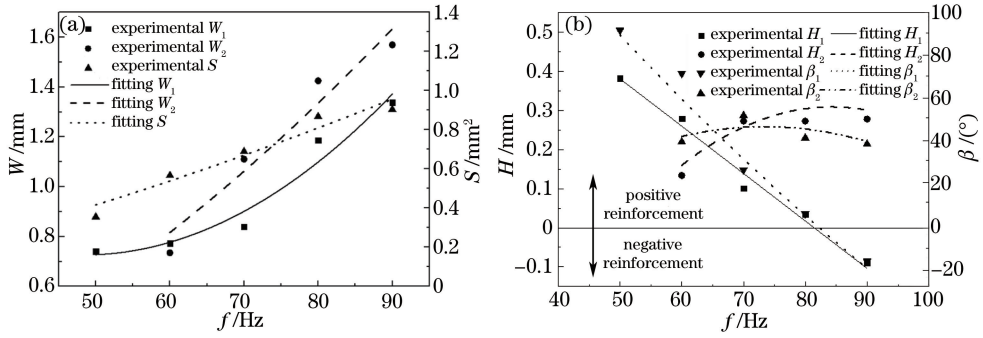


图 4 频率对 LFWW 焊缝形貌的影响

Fig. 4 Influence of frequency on weld appearance in LFWW

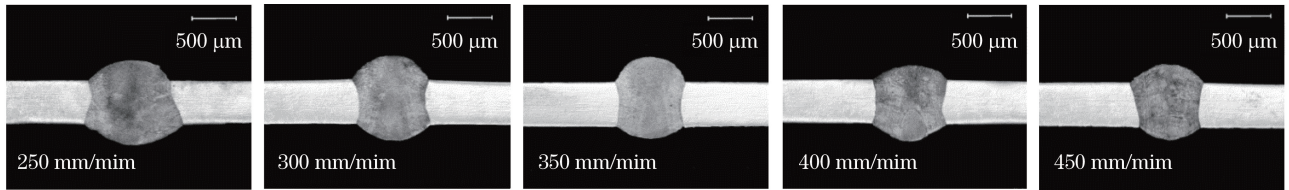


图 5 不同焊接速度下的焊缝宏观形貌

Fig. 5 Weld macro morphology at different welding speeds

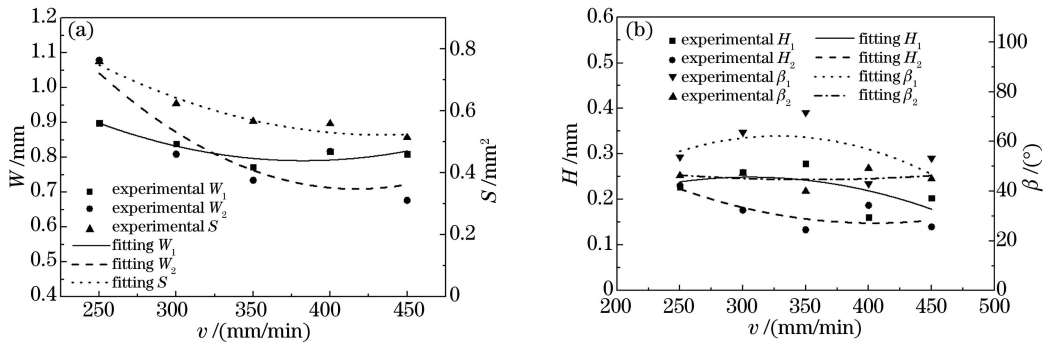


图 6 焊接速度对 LFWW 焊缝形貌的影响

Fig. 6 Influence of welding speed on weld appearance in LFWW

当脉冲频率为 60 Hz、焊接速度为 350 mm/min 时,送丝速度对填丝焊缝形貌的影响规律如图 7、8 所示。在一定速度范围内,送丝速度对焊缝宽度的影响并不显著;随着送丝速度的提高,焊缝上余高和接触角逐渐增大,下余高和接触角的变化正好相反,焊缝总熔化面积无明显变化。金属填充量的变化对焊缝热输入和热积累作用无较大影响,在一定范围的金属填充量内,送丝速度对焊缝表面对流强弱作用影响较小。焊丝熔化的能量一方面来源于激光的直接照射,另一方面来源于已形成的熔池;随着送丝速度的继续提高,焊丝对激光的遮挡作用增强,更多的激光能量直接作用于焊丝表面;同时,焊丝的熔化吸收了更多的熔池能量,导致母材熔化面积减小,焊缝下表面宽度明显减小。随着填充金属量的增加,填充的焊丝在焊缝上表面呈现出一定的堆积效应,造成上余高和接触角逐渐增大,下余高和接触角逐渐减小。

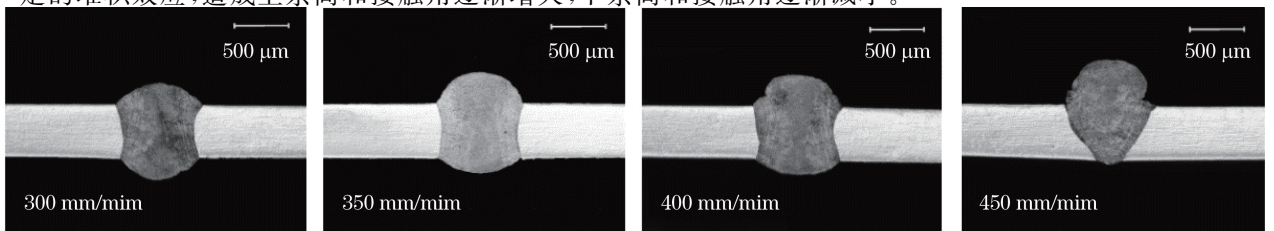


图 7 不同送丝速度下的焊缝宏观形貌

Fig. 7 Weld macro morphology at different wire feeding speeds

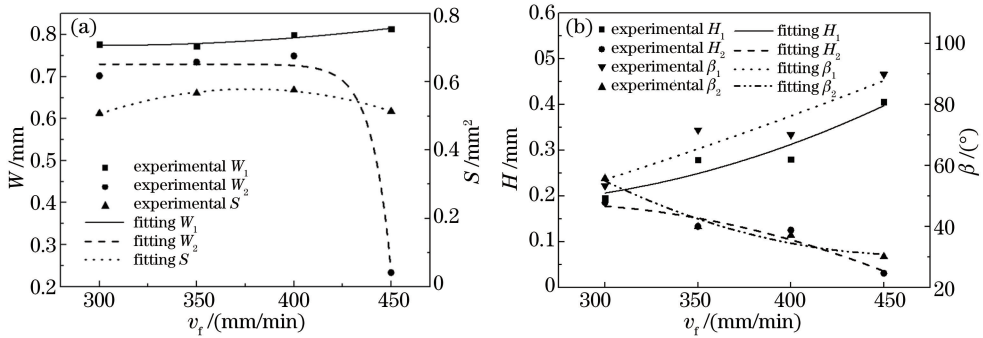


图 8 送丝速度对 LFWW 焊缝形貌的影响规律

Fig. 8 Influence of wire feeding speed on weld appearance in LFWW

通过合理选择 LFWW 工艺参数,可获得上下表面正余高可控的焊缝形貌,强化焊缝性能,提高接头力学性能。当激光脉冲频率为 60~70 Hz、焊接速度为 300~400 mm/min、送丝速度为 300~350 mm/min 时,可获得上下熔宽、余高、接触角近似一致的焊缝形貌。

3.2 显微组织特征

对脉冲频率为 60 Hz、焊接速度和送丝速度均为 350 mm/min 条件下获得的焊缝进行显微组织观察,根据接头填丝特征将焊缝分为图 9 所示的三个区域:上余高区(TRZ)、下余高区(BRZ)和中部自熔区(BMZ)。

图 10 所示为 Hastelloy C-276 母材显微组织,主要是晶粒平均尺寸为 40~60 μm 的等轴枝晶,并伴有退火孪晶组织。焊缝区显微组织跟母材相比有明显细化现象,这主要与焊丝添加增大了熔池过冷度以及 LFWW 较高的冷却速度有关。

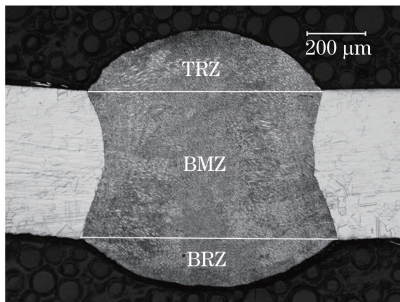


图 9 焊缝截面形貌

Fig. 9 Weld cross section morphology

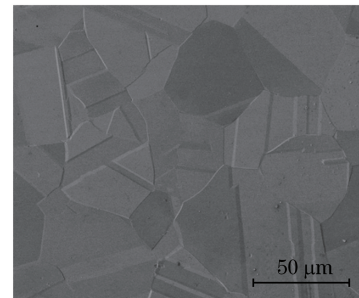


图 10 Hastelloy C-276 母材显微组织

Fig. 10 Microstructure of Hastelloy C-276 base metal

图 11(a)、(b)分别为以细密的等轴枝晶为主的 TRZ 和 BRZ 中心区域显微组织,该区域位于熔池中心,成分过冷严重,有利于细密等轴枝晶的生成。图 11(c)、(d)为以柱状枝晶为主的 TRZ 和 BRZ 边缘区域显微组织,受温度梯度的影响,该区域晶粒近似平行于熔池边界方向生长。

图 12(a)为 BMZ 中心区域显微组织,其中 i 表示晶内点,ii 表示晶界点。该区域晶粒以均匀细密的等轴枝晶为主,该区域位于焊缝中心线上,温度梯度和生长速率的比值(G/R)较小,有利于等轴枝晶的生成。图 12(b)为 BMZ 边缘区域显微组织,生长有薄层平面晶,该区域为熔池与母材接触区域, R 近似为零, G/R 较大,有利于平面晶的生成;随着固液界面的推进, G/R 的减小抑制了平面晶的长大,导致平面晶厚度较薄,且在母材与熔合线交界处未见明显热影响晶粒粗大区。图 12(c)为位于中心区和边缘区之间的 BMZ 过渡区域显微组织,以柱状枝晶为主,其中 iii 为晶内点,iv 为晶界点。该区域柱状枝晶出现竞争生长现象,这主要是由温度梯度与晶体择优生长方向共同作用决定的。

Hastelloy C-276 LFWW 接头显微组织分布如图 13 所示。在焊缝与母材之间存在一条清晰的熔合线,生长有薄层平面晶;焊缝中部以细密的等轴枝晶为主,该区域宽度为 150~250 μm ,且等轴枝晶尺寸没有明显的纵向差异;两区域之间以细长的柱状枝晶为主,该区域宽度为 250~300 μm 。根据文献[10],Hastelloy C-276 激光自熔焊中心等轴枝晶晶粒平均尺寸为 3~5 μm ,而 LFWW 焊缝中心等轴枝晶晶粒平均尺寸为 4~6 μm ,略有增大,这与 LFWW 时热输入量较大有关。

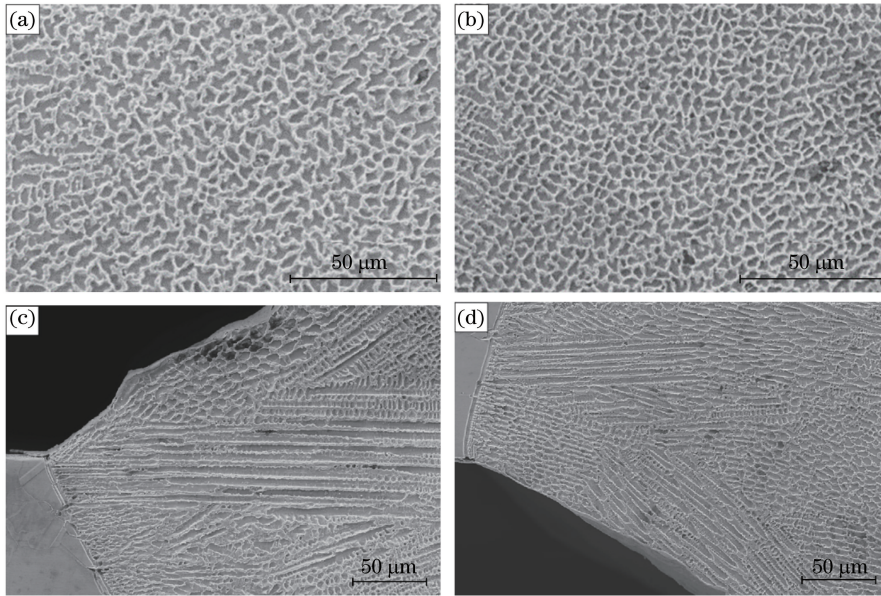


图 11 上余高区和下余高区显微组织。(a)上余高中心区;(b)下余高中心区;(c)上余高边缘区;(d)下余高边缘区

Fig. 11 Microstructure of TRZ and BRZ. (a) Center zone of TRZ; (b) center zone of BRZ;

(c) edge zone of TRZ; (d) edge zone of BRZ

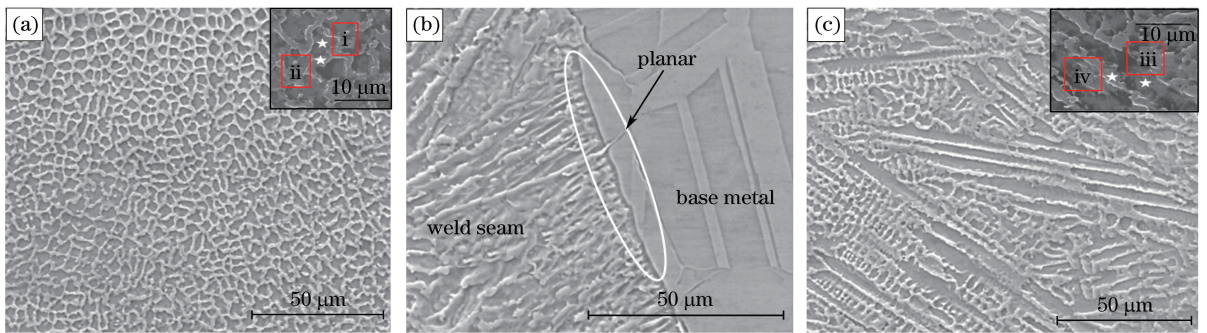


图 12 中部自熔区显微组织。(a)中心区;(b)边缘区;(c)过渡区

Fig. 12 Microstructure of BMZ. (a) Center zone; (b) edge zone; (c) transition zone

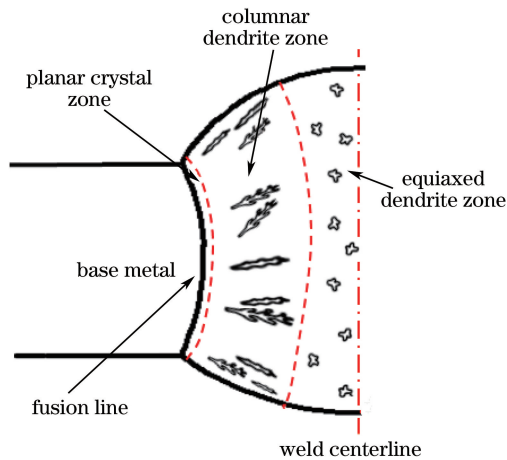


图 13 焊缝组织分布示意图

Fig. 13 Schematic diagram of weld microstructure distribution

3.3 元素分布规律

焊缝中 Ni、Cr、Mo、W 和 Fe 五大元素宏观分布 EPMA 检测结果如图 14 所示。图 14(a)为元素横向和

纵向扫描路径;图 14(b)、(c)为元素横向宏观分布情况,其中横坐标零点为焊缝横向中心位置;图 14(d)、(e)为纵向元素分布情况,其中横坐标零点为焊缝上表面扫描起点位置。可以看出焊缝五大元素横向宏观分布均匀一致,未受到不同晶粒形态生长的影响,且分布规律与母材一致;在纵向上,焊缝 TRZ、BMZ 和 BRZ 不同熔化区域元素宏观分布均匀,未受到焊丝添加的影响,未发生明显宏观偏析现象。

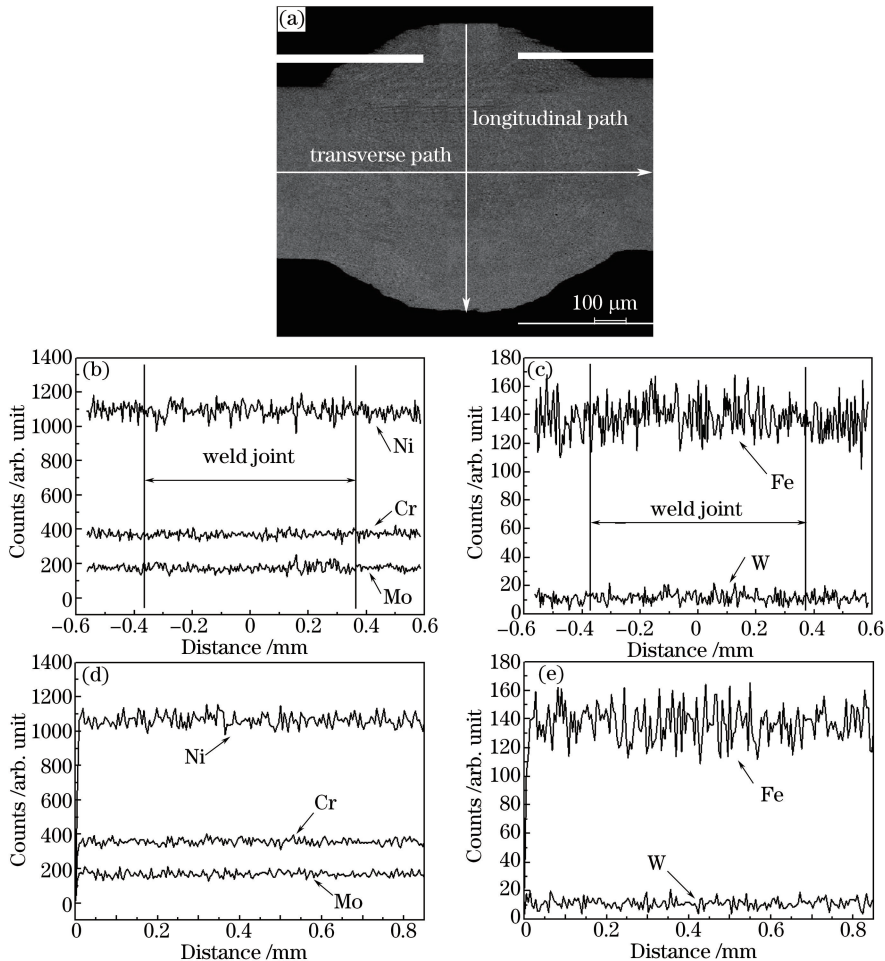


图 14 焊接接头元素分布。(a)扫描路径;(b)Cr-Mo-Ni 横向分布;(c)Fe-W 横向分布;
(d)Cr-Mo-Ni 纵向分布;(e)Fe-W 纵向分布

Fig. 14 Element distributions of weld joint. (a) Scanning paths; (b) Cr-Mo-Ni transverse distribution;
(c) Fe-W transverse distribution; (d) Cr-Mo-Ni longitudinal distribution; (e) Fe-W longitudinal distribution

焊缝内五大元素含量 EDS 检测结果见表 3,取点位置为图 12 中 i~iv 所示位置。可以看出,焊缝等轴枝晶区未有明显元素显微偏析,而焊缝柱状枝晶的显微偏析趋势有所增大,这可能与焊缝不同区域晶粒的凝固速率有关,等轴枝晶区域冷却速度相对较快、凝固时间短,抑制了晶界元素偏析趋势。焊缝元素显微偏析主要表现为晶界处 Mo 元素富集, Ni 元素含量相对减小, Cr、Fe 以及 W 元素含量变化较小,这主要与元素的平衡扩散能力有关。Mo 的原子半径相对于 Ni 原子半径较大,在快速凝固条件下增大了 Mo 元素的平衡扩散难度, Fe 和 Cr 的原子半径与 Ni 的相近,相差不足 1%,偏析趋势较小。

Hastelloy C-276 的 LFWF 焊缝区元素显微偏析趋势与激光自熔焊接^[10]基本一致,焊丝的添加并未对元素的显微偏析造成明显影响。虽然在焊缝区出现了一定的显微偏析,但其元素含量与 Hastelloy C-276 在氩弧焊接中产生的 P 相(质量分数, Ni: 34%; Mo: 40%; Cr: 16%; W: 7%; Fe: 4%) 和 μ 相(质量分数, Ni: 33%; Mo: 41%; Cr: 15.5%; W: 6.23%; Fe: 4.47%)^[17-18] 的元素含量有较大差异,可以认为, Hastelloy C-276 的 LFWF 可以在一定程度上抑制脆性相的生成。

表 3 焊缝元素分布(质量分数,%)

Table 3 Element distribution of weld seam (mass fraction, %)

Element	Equiaxed dendrite zone		Columnar dendrite zone		Weld seam in laser self-fusing welding ^[10]	
	Grain body (i)	Grain boundary (ii)	Grain body (iii)	Grain boundary (iv)	Grain body	Grain boundary
Cr	15.12	15.37	14.91	15.43	14.73	16.15
Fe	5.52	5.24	5.34	5.39	5.80	5.53
Ni	61.44	60.64	59.56	55.33	59.81	53.70
Mo	13.85	14.65	14.98	18.91	13.96	17.88
W	4.07	4.09	5.21	4.94	4.60	5.53

3.4 显微硬度分析

焊接接头横截面横向和纵向中心线处显微硬度的分布规律如图 15 所示,横向不同晶粒形态区域以及纵向 TRZ、BMZ 和 BRZ 不同熔化区域的显微硬度分布均匀一致,显微硬度为 240~280 HV,与母材硬度值相当;焊缝边缘未发现明显热影响区软化现象,这与显微组织分析中未观察到热影响区的结果一致;LFWF 接头显微硬度分布规律与激光自熔焊接获得的结果基本一致^[10]。结果表明,LFWF 对焊缝不同区域显微硬度的影响较小,这主要是由于焊缝区晶粒明显细化引起的强化作用与母材的固溶强化作用相当,焊缝处显微硬度并未受到焊丝添加和焊接过程的影响。

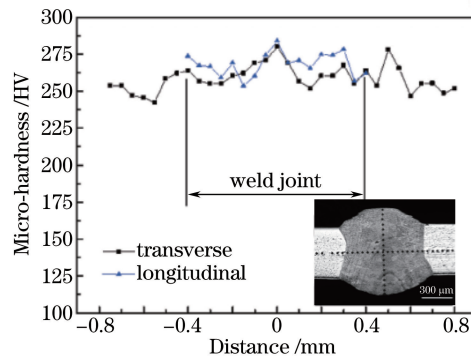


图 15 显微硬度分布

Fig. 15 Micro-hardness distribution

4 结 论

通过研究 LFWF 工艺参数对 Hastelloy C-276 薄板焊缝成形的影响规律及对比分析激光自熔焊接和 LFWF 接头显微组织、元素分布及显微硬度特征,得到如下结论:

1) LFWF 焊缝宏观形貌主要与脉冲 LFWF 热输入、焊缝热积累程度以及相对填丝量有关。热输入和热积累程度越大,焊缝宽度就越宽,在重力作用下焊缝金属向下塌陷;相对填丝量越大,余高就越大,接触角也越大,填充金属在焊缝上表面的堆积效应就越明显;

2) 在优化的工艺参数下,焊缝成形较好,可获得正余高可控的焊缝形貌。当频率为 60~70 Hz、焊接速度为 300~400 mm/min、送丝速度为 300~350 mm/min 时,可获得上下熔宽基本一致、上下余高及接触角近似相等的焊缝形貌;

3) 相对于母材,LFWF 焊接接头晶粒细化明显,焊缝边缘为薄层平面晶,无明显热影响区,中心以细小等轴枝晶为主,两区域之间为细长柱状枝晶;焊缝元素分布均匀一致,未受到 LFWF 的影响,柱状枝晶区 Mo 元素存在一定的显微偏析,偏析程度与激光自熔焊结果类似;

4) 接头不同晶粒形态区域以及不同熔化区域显微硬度分布均匀,没有明显热影响区软化现象,显微硬度分布规律与激光自熔焊接的无明显区别,未受到焊丝添加的影响。

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] Avrin A P, He G, Kammen D M. Assessing the impacts of nuclear desalination and geoengineering to address China's water shortages[J]. Desalination, 2015, 360: 1-7.
- [3] 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.
- [4] Manikandan M, Arivazhagan N, Rao M N, *et al.* Microstructure and mechanical properties of alloy C-276 weldments fabricated by continuous and pulsed current gas tungsten arc welding techniques[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(4): 563-572.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Manikandan M, Hari P R, Vishnu G. Investigation of microstructure and mechanical properties of super alloy C-276 by continuous Nd:YAG laser welding[J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 2233-2241.
- [8] Ventrella V A, Berretta J R, Rossi W D. Pulsed Nd:YAG laser welding of Ni-alloy Hastelloy C-276 foils[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 569-576.
- [9] Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong, *et al.* 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, 等. 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.
- [10] 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.
- [11] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 56-65.
- [12] Sun Z, Salminen S. Current status of laser welding with wire feed[J]. Materials and Manufacturing Processes, 1997, 12(5): 759-777.
- [13] Turichin G, 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Cieslak M J, Headley T J, Romig A D. The welding metallurgy of Hastelloy alloys C-4, C-22, and C-276 [J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17(11): 2035-2047.
- [18] Du Pont J, N, Lippold J C, Kiser S D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2009: 47-150.