

# 基于高通量测试方法的高功率激光焊接工艺特性分析

杨义成<sup>1,2,3</sup>, 冷冰<sup>1</sup>, 黄瑞生<sup>1</sup>, 聂鑫<sup>1</sup>, 马一鸣<sup>1</sup>, 武鹏博<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028; 2. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京, 100044;  
3. 北京科技大学, 材料先进焊接与连接技术研究室, 北京, 100083)

**摘要:** 为了更加高效、精准的获得工艺参数对高功率激光焊接工艺特性的影响规律, 提出了激光焊接特性分析用高通量测试方法, 并借助高速摄影和图像处理技术对测试过程中的光致羽辉和飞溅进行了统计分析. 结果表明, 随着激光功率增加, 焊接过程中飞溅数量与波动程度增加, 对应焊后表面成形质量变差, 内部裂纹增加; 对于万瓦级激光焊接, 相较于正离焦焊接, 负离焦量焊接时的焊缝成形更为优异, 焊接过程飞溅数量得到有效抑制, 熔深波动程度也得到明显改善; 实际焊接结果与激光焊接特性高通量测试结果高度一致, 这说明基于高通量测试方法的激光焊接特性分析方法可以真实、快速的反映出工艺参数变化时对焊接特性的影响规律, 是一种切实可行的激光焊接特性分析新方法.

**创新点:** 基于高通量思想, 提出了激光焊接特性分析用高通量测试方法, 并设计出了测试试板及测试计算流程, 利用该方法通过少次试验即可高效、精准的分析出工艺参数变化对高功率激光焊接特性的影响规律.

**关键词:** 高通量; 测试技术; 高功率激光焊接; 工艺特性

**中图分类号:** TG 456.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20210825002

## 0 序言

激光焊接技术经过近 40 年的快速发展和完善, 在工业领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>. 随着高功率激光器核心制造技术的不断突破和高功率激光加工技术研究的不断深入, 高功率激光焊接有望解决厚壁构件常规焊接时焊接效率低、焊接热输入大、焊后变形不宜控制等技术难题, 实现中厚板构件的高效优质焊接<sup>[2]</sup>.

万瓦级高功率激光焊接过程涉及的科学问题极为复杂, 对其焊接特性的研究也一直是国内外学者研究的重点. 已有研究表明, 激光功率达到万瓦级以上时, 焊接过程可控性下降, 焊接工艺窗口变窄<sup>[3]</sup>, 焊缝表面成形和内部质量均较差<sup>[4]</sup>, 难以找到可满足实际工程需要的焊接工艺区间. 一些学者指出高激光能量密度作用下, 剧烈波动的羽辉对激光传输过程的影响<sup>[5-6]</sup>、液态熔池中剧烈波动的匙孔壁对激光能量稳定吸收的影响<sup>[7-8]</sup>、匙孔与熔池流

动的双向耦合<sup>[9]</sup>等都会对焊接质量产生不可忽视的重要影响. 如何更为高效、准确的获取焊接工艺参数对焊接特性的影响规律则是优化提升高功率激光焊接技术的前置条件. 基于高通量思想开发出的测试方法, 近年来在材料研发<sup>[10]</sup>、工艺优化<sup>[11]</sup>等方面获得广泛应用, 极大的缩短了工艺开发流程, 提高测试数据的准确性. 然而该方法在焊接技术领域应用较少, 王星星等人<sup>[12]</sup>以钎焊技术为背景, 综述了高通量测试方法在钎焊技术研究中的优势和不足之处.

针对高功率激光焊接工艺影响因素多, 不易保证试验数据的可靠性, 基于高通量思想提出激光焊接特性高通量测试方法, 利用该方法通过少次焊接试验即可获得工况条件一致、精准、可靠的连续试验数据, 为高功率激光焊接工艺数据库的建立提供了准确、可靠的数据支撑, 也为高功率激光焊接工艺的优化提供了明确的指导方向.

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料及设备

试验采用德国 IPG Photonics 公司生产的 YLS-

30000 型光纤激光器, 最大输出功率为 30 kW, 焦点位置处光斑直径 0.69 mm. 焊接试样用行走机构为德国 KUKA 公司生产的 KR 60-4 KS-F 型机器人, 其负载可达 60 kg, 重复定位精度在  $\pm 0.06$  mm 以内. 实际焊接过程中, 激光枪在机器人手臂的带动下, 平稳的沿着水平方向以设定的速度移动. 试验用“锯齿板”的材料为 Q345 钢, 其尺寸为  $400\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 利用线切割加工出尺寸完全一致的“锯齿板”. 试验前, 首先采用机械清理的方法去除氧化皮, 然后利用超声清洗的方法去除“锯齿板”表面的油污. “锯齿板”的关键尺寸如图 1 所示, 包括锯齿宽度  $w_1$ 、齿槽宽度  $w_2$ 、锯齿之间的距离  $w_0$ 、“锯齿板”中锯齿的有效长度  $L$  等. 试验过程中, 将“锯齿板”以一定的角度  $\theta$  固定在试验平台上, 激光束沿着水平方向从位置 1 移动到位置 2 时, 激光束焦点位置由试板表面上方连续移动到试板表面下方. 为了保证试验条件的一致性, 整个焊接过程中保护气体作用的位置相对于激光辐照的位置不变.

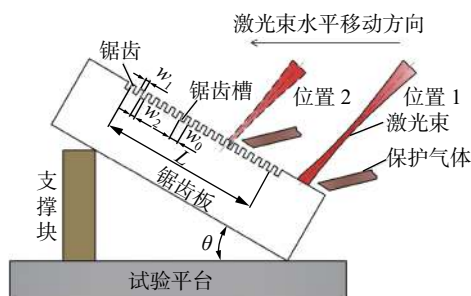


图 1 激光焊接特性高通量测试方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-throughput laser welding characteristics test method

激光枪沿着水平方向移动时, 激光束焦点相对于“锯齿板”表面的距离随之发生变化, 激光枪和“锯齿板”的空间位置关系确定后, 就可以得到激光焊接过程中“锯齿板”不同位置处激光束的焦点相对于“试板表面”的距离, 进而建立起“锯齿板”每个锯齿的位置和激光束离焦量的一一对应关系.

## 1.2 试验分析方法

通过测量“锯齿板”不同位置处锯齿熔化宽度就可以间接反映出实际焊接过程中理论焦距对焊接过程的影响, 由此判断出焊接工艺参数对焊接质量的影响规律. 由锯齿熔化宽度间接反映出光斑尺寸的依据是, 当高能量密度的激光快速通过锯齿宽度较小的区域时, 激光停留的时间极短, 试板依靠热传导形成熔池的区域极小. 此外, 锯齿熔化的金属会快速的流淌到锯齿槽中, 有效地降低了液态金

属热量累积对锯齿熔化宽度的影响. 因而, 锯齿熔化宽度几乎只和激光光斑有效辐照区域的直径存在紧密联系, 两者之间可建立起一一对应关系.

通过图 2 中激光束、“锯齿板”的空间位置, 以及激光束水平移动时和“锯齿板”上表面空间位置关系的变化, 不仅可以确定出“锯齿板”焦距的测量范围, 还可确定出不同位置处的锯齿与实际离焦距的关系. 此外, 激光束从一个锯齿移动至相邻锯齿时, 激光束焦点和“锯齿板”上表面距离的变化值, 即为“锯齿板”离焦量变化测量的最小分辨率.

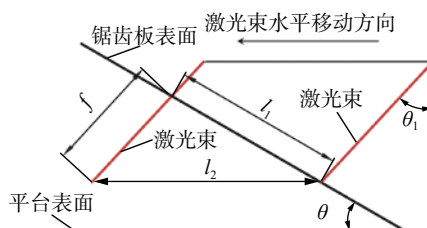


图 2 “锯齿板”激光束离焦量确定方法

Fig. 2 Determination method of defocus of “sawtooth plate” laser beam

从图 2 可以看出, 当激光束沿水平方向移动  $l_2$  时, 激光束在“锯齿板”表面移动的距离为  $l_1$ , 此时离焦量的变化值  $f$  可由式 (1) 计算获得.

$$f = \frac{l_1 \sin \theta}{\sin(90 - \theta_1)} \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 当“锯齿板”的有效长度  $L$  为 248 mm、激光束相对垂直方面的倾斜角  $\theta_1$  为  $9^\circ$ 、“锯齿板”相对水平面的倾斜角  $\theta$  为  $20^\circ$  时, 离焦量的变化值  $f$  测试范围可以达到 42.3 mm.

锯齿宽度  $w_1$  为 2 mm, 齿槽宽度  $w_2$  为 4 mm, 锯齿之间的距离  $w_0$  即为 6 mm, 进一步由式 (1) 可以计算得到“锯齿板”的最小测试分辨率为 1 mm, 即激光束从一个锯齿水平移动到相邻锯齿时, “锯齿板”离焦量变化测量的最小分辨率为 1 mm.

图 3 为锯齿熔化宽度测量示意图. 焊接完成

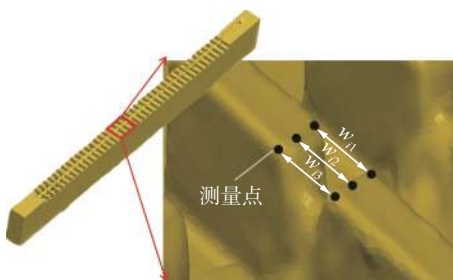


图 3 锯齿熔化宽度测量示意图

Fig. 3 Schematic of sawtooth melting width measurement method

后,利用三维坐标仪对“锯齿板”形貌进行高分辨率扫描,精准复现“锯齿板”焊接完成后的三维形貌,其完整和局部形貌特征如图 3 所示.从图 3 可以看出,锯齿三维轮廓清晰锐利,在计算每个锯齿实际熔化宽度  $d$  时,为了提高测试方法的数据精度,降低测量误差,采用 3 个测量数值的平均值作为第  $i$  个锯齿熔化后的实际宽度,记为  $d_i$ ,其计算方法为

$$d_i = \frac{w_{i1} + w_{i2} + w_{i3}}{3} \quad (2)$$

式中: $i$  的取值范围为  $1 \sim 42$ ;  $w_{i1}$  为第  $i$  个锯齿一侧的熔化宽度;  $w_{i2}$  为第  $i$  个锯齿中间位置的熔化宽度;  $w_{i3}$  为第  $i$  个锯齿另一侧的熔化宽度.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 离焦量对焊缝成形的影响

图 4 为不同激光功率下离焦量对“锯齿板”焊缝成形的影响规律.图中符号代表成形质量有所差异,其中圆点所在区域代表该位置焊缝成形较好,五角星所在区域代表该位置处焊缝成形较差,三角形所在区域则代表该位置处焊缝成形良好.图 5 为焊接速度  $4 \text{ m/min}$ 、试板厚度  $25 \text{ mm}$  时焊缝成形情况.从图 4 可以看出,激光功率  $5 \text{ kW}$  时,任意离焦量下的焊缝成形均匀一致;随着激光功率提升至  $10 \text{ kW}$  以上时,焦点(离焦量  $0 \text{ mm}$ )附近区域的焊

缝成形变差,激光功率越高焊缝成形越不稳定;随着激光功率增加,飞溅产生的数量及程度均较为严重,离焦量为负时的焊缝成形要明显优于离焦量为正时的焊缝成形.从图 5 可以看出,所得结果与“锯齿板”的测试结果基本一致.

### 2.2 离焦量对锯齿板熔化宽度的影响

图 6 为不同激光功率下离焦量对锯齿熔化宽度的影响.随着激光功率增加,不同锯齿同一位置处的熔化宽度逐步增加.激光功率  $5 \text{ kW}$  时,锯齿宽度和离焦量的关系成较为规则的束腰状;而当激光功率高于  $10 \text{ kW}$  时,束腰状特征变得越来越不明显,尤其是激光功率高于  $15 \text{ kW}$  时,锯齿熔化宽度波动的程度尤为明显.从离焦量上看,激光功率在万瓦级以上时,离焦量在  $0 \text{ mm}$  附近,“锯齿板”熔化宽度的波动较为剧烈,整体上正离焦“锯齿板”熔化宽度的波动程度要大于负离焦,且只有在负离焦量较大时,锯齿熔化的宽度才可得一定的改善.

### 2.3 离焦量对焊缝纵截面熔深的影响

在平板上进行  $10$  和  $30 \text{ kW}$  激光能级下的自熔焊接试验,研究不同激光功率下离焦量对焊缝纵截面熔深及内部缺陷的影响.激光功率  $10 \text{ kW}$  时,不同离焦量对焊缝纵截面熔深的影响如图 7 所示.在激光功率不变的情况下,负离焦时焊缝熔深的稳定性较好,正离焦时焊缝熔深稳定性较差,同时正离焦量下焊缝内部有明显的气孔产生.

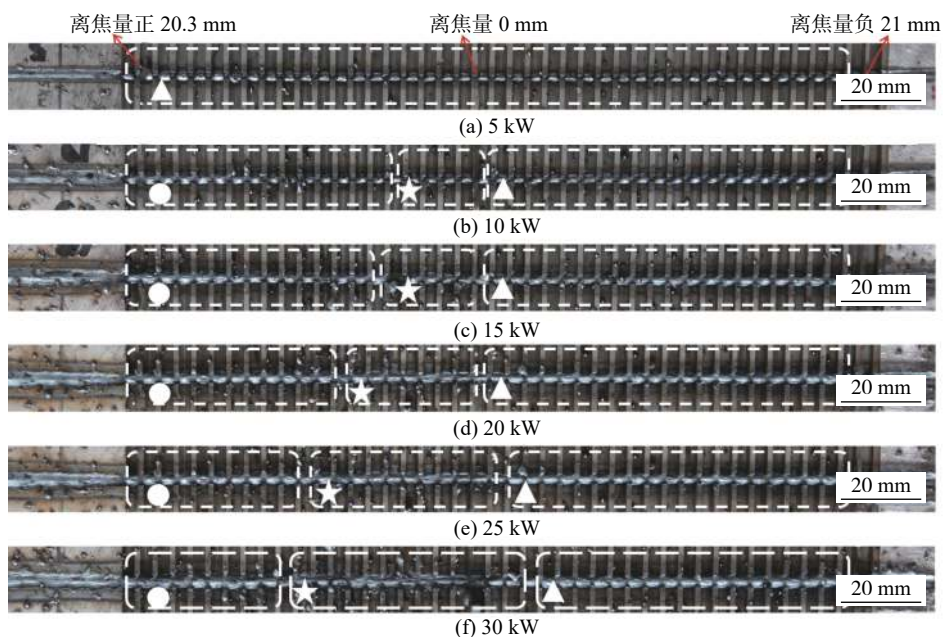


图 4 激光功率对“锯齿板”表面不同位置处焊缝成形的影响

Fig. 4 Effect of laser power on weld formation at different positions on sawtooth plate surface. (a)  $5 \text{ kW}$ ; (b)  $10 \text{ kW}$ ; (c)  $15 \text{ kW}$ ; (d)  $20 \text{ kW}$ ; (e)  $25 \text{ kW}$ ; (f)  $30 \text{ kW}$



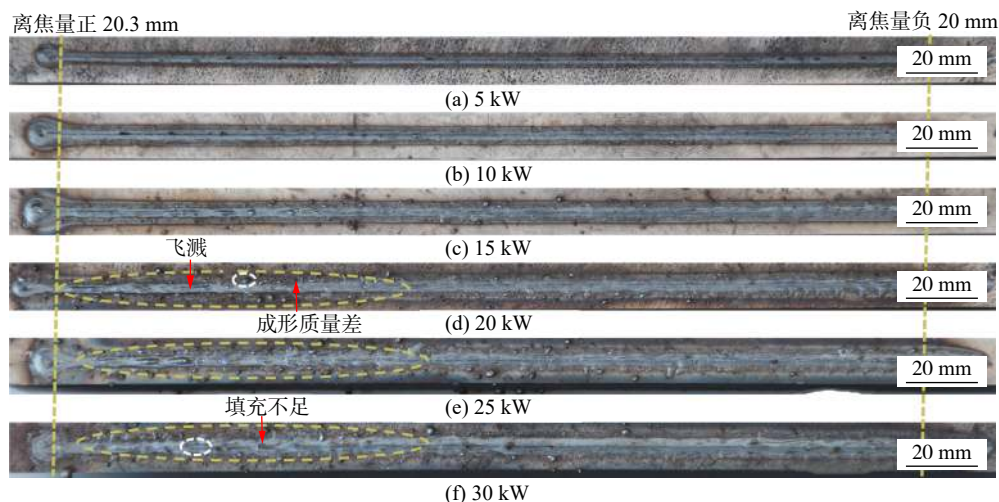


图 5 激光功率对焊缝表面成形质量的影响

Fig. 5 Effect of laser power on weld surface forming quality. (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 15 kW; (d) 20 kW; (e) 25 kW; (f) 30 kW

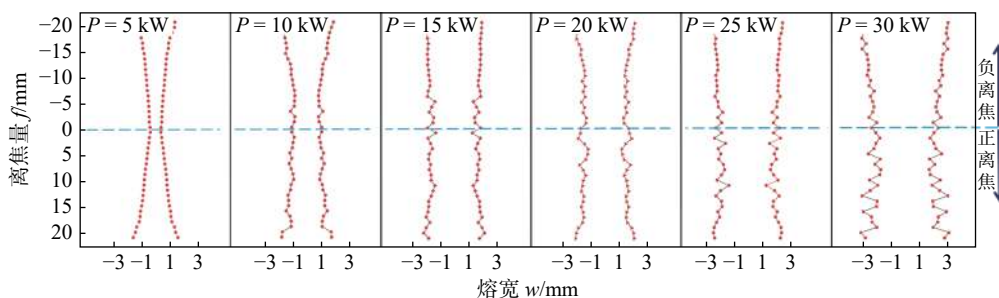


图 6 不同激光功率下离焦量对锯齿熔化宽度的影响

Fig. 6 Relationship between different defocusing distance and sawtooth melting width

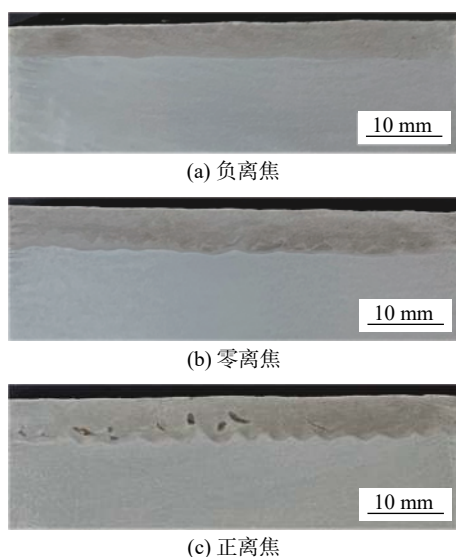


图 7 10 kW 时离焦量对熔深波动程度的影响规律

Fig. 7 Influence of defocus on penetration fluctuation at 10 kW. (a) negative defocus; (b) zero defocus; (c) positive defocus

激光功率 30 kW 时, 不同离焦量对焊缝纵截面熔深的影响如图 8 所示. 在激光功率不变的情况

下, 正离焦时熔深存在明显的波动, 负离焦时熔深相对稳定, 但不同离焦量下焊缝底部均有裂纹产生, 方向沿焊缝底部熔合线, 距底部约 1.5 mm.

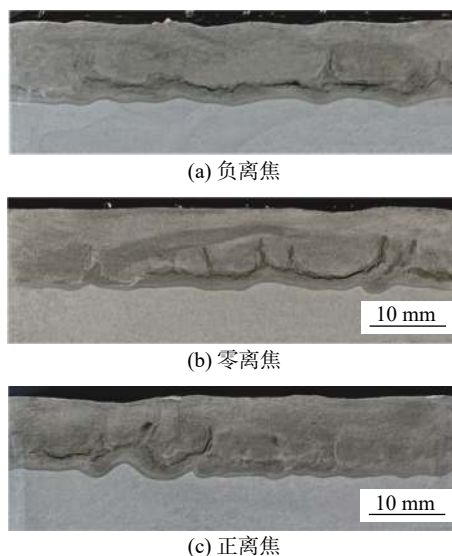


图 8 30 kW 时离焦量对熔深波动程度的影响规律

Fig. 8 Influence of defocus on penetration fluctuation at 30 kW. (a) negative defocus; (b) zero defocus; (c) positive defocus

## 2.4 离焦量对飞溅的影响

沿着焊接方向,“锯齿板”上的离焦量由 +20 mm 变化至 -20 mm,使用高速摄像采集了焊接过程中的飞溅图像,并对图像进行二值化处理,获得了图像中飞溅的总面积和飞溅个数随时间的变化规律,其中面积是计算飞溅在拍摄方向上的投影面积之和. 激光功率 10 和 30 kW 下,飞溅面积及个数随时间的变化规律分别如图 9 和图 10 所示. 在两种激光功率下,正离焦量时焊接过程中的飞溅数量及面积均大于负离焦;激光功率 30 kW 时,与负离焦相比,正离焦量下飞溅数量及面积存在明显的波动,如图 10 所示.

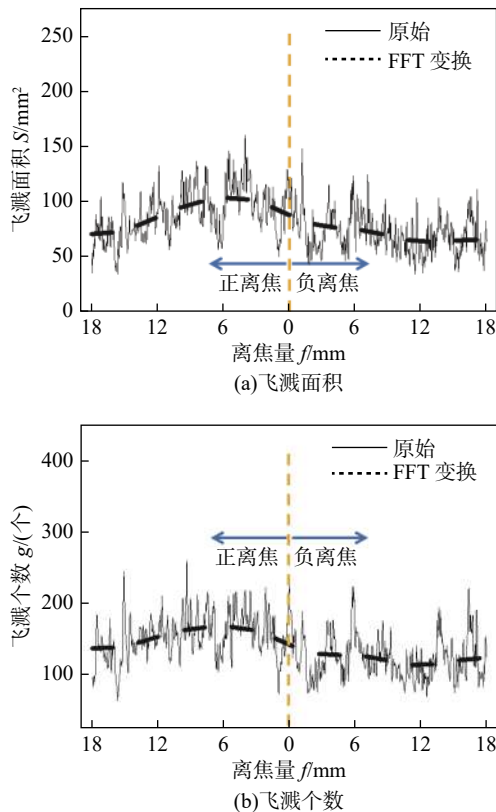


图 9 10 kW 时离焦量对飞溅形成规律的规律  
Fig. 9 Effect of defocus on spatter formation at 10 kW. (a) variation of spatter area; (b) number of spatter varies

当激光焊接中的匙孔稳定时,熔池内液态金属的波动性较小,焊接过程中产生的飞溅较少. 离焦量由正离焦变化至负离焦,飞溅程度减小,说明在 10 kW 级和 30 kW 级两种激光功率下,负离焦量时的焊接过程均比正离焦稳定,这一规律在铝合金的激光焊接<sup>[13]</sup>中同样适用.

## 2.5 离焦量对焊接缺陷影响机制的分析

对于深熔激光焊接,匙孔的稳定性是决定焊接过程稳定性的关键. 聂鑫等人<sup>[13]</sup>的研究表明万瓦

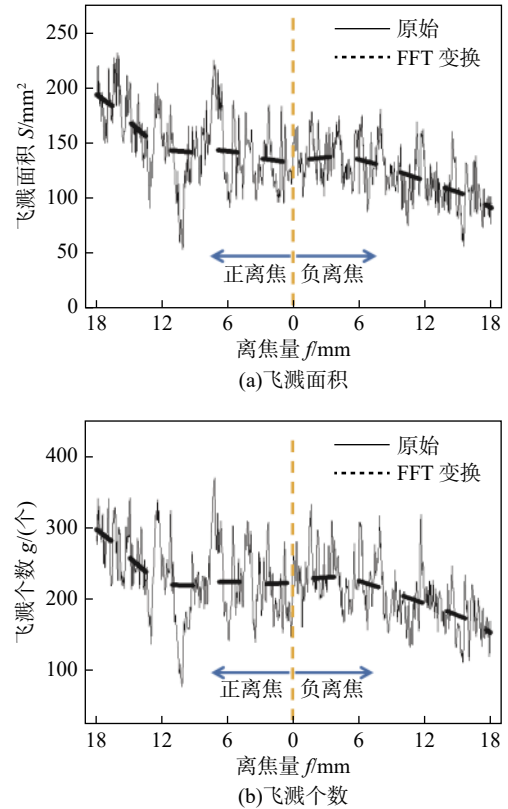


图 10 30 kW 时离焦量对飞溅形成规律的影响

Fig. 10 Effect of defocus on spatter formation at 30 kW; (a) variation of spatter area; (b) number of spatter varies

级高功率激光焊接,负离焦焊接时匙孔开口面积的波动浮动和突变持续时间均小于正离焦,说明负离焦的焊接过程稳定性要优于正离焦,其它研究学者针对万瓦级激光焊接得到了类似的结论<sup>[14-15]</sup>. 在扫描电镜下观察裂纹区域,如图 11 所示,其断裂区域包括裂纹区域和无裂纹的正常断裂区域. 进一步放大可以看出,裂纹区域表面存在大量的微气孔,如图 11b 所示,其尺寸在 10~100  $\mu\text{m}$  之间,且该位置基本位于底部,这也间接说明了该裂纹有可能是由于万瓦级高功率激光焊接过程中光致匙孔底部塌陷卷入大量气体所致,而负离焦焊接时匙孔的稳定性得到改善,因此焊缝内部的缺陷得到一定程度的抑制.

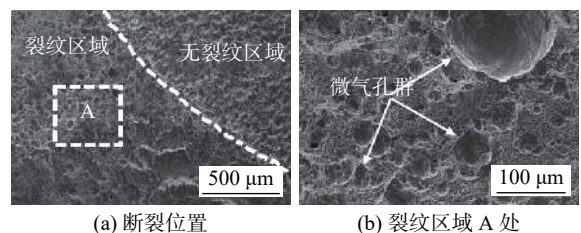


图 11 断口形貌分析

Fig. 11 Fracture morphology analysis. (a) fracture location; (b) crack area A

### 3 结 论

(1) 随着激光功率的增加,“锯齿板”熔化宽度增加,不同熔化宽度整体呈束腰状;激光功率达到 15 kW 以上时,锯齿熔化宽度的波动程度变大,其中正离焦时“锯齿板”熔化宽度的波动程度要大于负离焦。

(2) 与激光功率 10 kW 时焊缝成形相比,激光功率达到 30 kW 时,焊缝内部出现沿焊缝底部分布的裂纹,且焊接过程产生飞溅的数量及飞溅的面积均较为严重。

(3) 采用激光焊接特性高通量测试方法获得的试验结果与实际焊接效果相吻合,说明该方法具有较高的可行性。

### 参考文献

- [1] 雷振,徐良,徐富家,等.激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用[J].焊接,2018(12):1-6.  
Lei Zhen, Xu Liang, Xu Fujia, *et al.* Typical applications and research states of laser-arc hybrid welding technology[J]. Welding & Joining, 2018(12): 1-6.
- [2] 王磊,许雪宗,王克鸿,等.中厚板 7A52 铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J].焊接学报,2020,41(10):28-31.  
Wang Lei, Xu Xuezhong, Wang Kehong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of fiber laser beam welded 7A52 alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(10): 28-31.
- [3] Turichin G, Tsubulskiy 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.
- [4] Zhang M, Zhang Z, Tang K, *et al.* Analysis of mechanisms of underfill in full penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 98: 97-105.
- [5] 黄瑞生,杨义成,蒋宝,等.超高功率激光-电弧复合焊接特性分析[J].焊接学报,2019,40(12):73-77.  
Huang Ruisheng, Yang Yicheng, Jiang Bao, *et al.* Analysis of welding characteristics of ultra-high power laser-arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 73-77.
- [6] Shcheglov P Yu, Uspenskiv S A, Gumenvuk A V, *et al.* Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(6): 475-780.
- [7] Zhao H, Niu W, Zhang B, *et al.* Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2011, 44(48): 485302.
- [8] Kawahito Y, Matsumoto N, Abe Y, *et al.* Relationship of laser absorption to keyhole behavior in high power fiber laser welding of stainless steel and aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(10): 1563-1568.
- [9] Artinov A, Bakir N, Bachmann M, *et al.* On the search for the origin of the bulge effect in high power laser beam welding[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022413.
- [10] 赵雷,王辉,杨丽霞,等. Fe-Co-Ni 系组合合金热等静压高通量制备方法初探[J].金属学报,2021,57(12):1627-1636.  
Zhao Lei, Wang Hui, Yang Lixia, *et al.* First exploration of hot isostatic pressing high-throughput synthesis on Fe-Co-Ni combinatorial alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(12): 1627-1636.
- [11] 冯中沛.基于高通量技术的超导组合薄膜制备及其物性研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院物理研究所),2019.  
Feng Zhongpei. High-through investigations of superconducting combinatorial films. [D]. Beijing: Chinese academy of Sciences (Institute of physics), 2019.
- [12] 王星星,何鹏,李帅,等.高通量方法在钎焊领域的应用现状[J].焊接学报,2021,42(1):1-7.  
Wang Xingxing, He Peng, Li Shuai, *et al.* Application of high-throughput methods in the field of brazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 1-7.
- [13] 聂鑫,杨义成,黄瑞生,等.30 kW 光纤激光焊接铝合金离焦量对匙孔行为的影响[J].焊接,2020(7):41-47.  
Nie Xin, Yang Yicheng, Huang Ruisheng, *et al.* Effect of defocusing amount on keyhole behavior in 30 kW fiber laser welding of aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2020(7): 41-47.
- [14] Jiang Z, Hua X, Huang L, *et al.* Double-sided hybrid laser-MIG welding plus MIG welding of 30-mm-thick aluminium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 903-913.
- [15] Zhang M, Chen G, Yu Z, *et al.* Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser[J]. Materials & Design, 2014, 53: 568-576.

第一作者:杨义成,博士研究生;主要从事激光焊接及增材制造、电弧物理等研究工作;Email: hwiyc@163.com.

通信作者:黄瑞生,研究员;Email: huangrs8@163.com.

(编辑: 戴红)