

# 光纤激光工艺参数对 Q235 钢穿透点焊缝形状和尺寸的影响

李世康<sup>1</sup>, 童金钟<sup>2</sup>, 韩红彪<sup>1</sup>, 李梦楠<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学, 河南 洛阳 471003; 2. 中石化华北石油工程有限公司, 郑州 450006)

**摘要:** 为了研究光纤激光工艺参数对穿透点焊缝形状和尺寸的影响, 采用单因素试验方法, 进行了不同激光功率、摆动幅度和焊接时间下的穿透点焊试验, 分析了激光的功率密度分布、点焊缝的形状和尺寸的变化规律。结果表明, 光纤激光光斑内的功率密度分布影响点焊缝的形状和尺寸。随着激光功率的增大, 未摆动高斯光束形成点焊缝的形状由抛物线状逐渐转变为钟铃状, 点焊缝的熔宽、熔深、深宽比和熔宽比都随之增大。光束摆动增大了激光与材料的作用面积, 改变了功率密度分布和点焊缝的形状和尺寸。随着摆动幅度的增大, 点焊缝的形状由钟铃状逐渐转变为碗盆状, 点焊缝的熔深和深宽比都逐渐减小而熔宽比逐渐增大。当激光功率密度不变时, 焊接时间对点焊缝的形状影响不大。随着焊接时间的增大, 点焊缝的熔深和熔宽都逐渐增大, 但深宽比基本保持不变。

**关键词:** 光纤激光; 穿透点焊; 激光功率; 摆动幅度; 焊接时间

中图分类号: TG456 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220219001

## Influence of fiber laser process parameters on the shape and size of penetration spot weld of Q235 steel

Li Shikang<sup>1</sup>, Tong Jinzhong<sup>2</sup>, Han Hongbiao<sup>1</sup>, Li Mengnan<sup>1</sup>

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China; 2. Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** In order to study the influence of fiber laser process parameters on the shape and size of the penetration spot weld, the single factor test method was used to conduct the penetration spot welding under different laser power, wobble amplitude and welding time. The power density distribution of laser and the shape and size of the spot weld were analyzed. The results show that the power density distribution in fiber laser spot affects the shape and size of spot weld. With the increase of laser power, the shape of spot weld formed by non-oscillating Gaussian beam gradually changes from parabolic shape to bell shape, and the weld width, weld depth, depth-to-width ratio and fusion width ratio of spot weld increase accordingly. The wobble of light beam increases the interaction area between laser and material, changes the power density distribution and the shape and size of spot weld. With the increase of wobble amplitude, the shape of spot weld gradually changes from bell shape to bowl shape, and the weld depth and depth-to-width ratio of spot weld gradually decrease while the fusion width ratio increases. Since the laser power density is basically unchanged, the welding time has little effect on the shape of spot weld. With the increase of welding time, the weld depth and weld width of spot weld gradually increase, but the depth-to-width ratio remains roughly the same.

**Key words:** fiber laser, penetration spot welding, laser power, wobble amplitude, welding time

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375146); 国家智能制造综合标准化项目 (2018ZNX01-02); 河南省高等学校重点科研项目 (17A460012)。

## 0 前言

随着激光技术的发展,激光焊接已广泛应用于航空航天、新能源以及汽车制造等众多行业<sup>[1-4]</sup>。对比其它传统的焊接方法,激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、热影响区小、可焊接材料范围广等优点<sup>[5]</sup>,特别适合穿透精密点焊。

目前,一些国内外学者曾对激光点焊进行了深入研究。吴家洲等人<sup>[6]</sup>建立了激光穿孔点焊三维数值计算模型,对激光穿孔点焊瞬态过程进行了数值分析。朱国仁等人<sup>[7]</sup>对 SUS301L 不锈钢熔透型和非熔透型激光焊接头及电阻点焊接头进行拉力和疲劳试验,发现非熔透型激光焊具有较熔透型激光焊和电阻点焊更高的疲劳强度。Jaehun 等人<sup>[8]</sup>为了分析镀锌层对小孔动力学的影响,采用 2 kW 多模光纤激光器在零间隙搭接结构下研究了镀锌层和未镀锌层 DP590 钢板的小孔动力学,发现环境压力的降低引起能量吸收减少和熔池变小,导致焊接质量变差。Pardal 等人<sup>[9]</sup>采用不同的激光焊接参数,对不同织构的焊缝进行了测试,发现采用织构钢制备的 Fe-Al 接头的最大拉剪载荷比未采用织构钢制备的接头高 25%。Cai 等人<sup>[10]</sup>采用脉冲激光点焊方法对铝合金条带的交点进行了焊接,研究了焊缝尺寸、组织及焊缝的腐蚀行为,发现随着激光峰值功率或发射脉冲数量的增加,焊缝的宽度增大而凸度减小。Martinson 等人<sup>[11]</sup>对钢板的激光点焊和电阻点焊进行了试验和数值研究,对比分析了不同几何形状路径的激光点焊与传统电阻点焊的残余应力分布。熊剑等人<sup>[12]</sup>采用低功率脉冲激光对铍青铜和 20 号钢进行点焊试验,分析了工艺参数对点焊接头的焊缝成形、力学性能和元素含量的影响规律。任逸群等人<sup>[13]</sup>采用激光螺旋点焊进行镀锌钢板的点焊,研究了搭接间隙对焊点成形和力学性能的影响,分析了不同间隙下高压锌蒸气的逃逸过程和缺陷的成因。Zhang 等人<sup>[14]</sup>采用脉冲 Nd:YAG 激光对 AZ31 镁合金进行点焊,研究了脉冲激光点焊工艺参数与焊接方式、尺寸、组织及缺陷的关系。Wei 等人<sup>[15]</sup>采用光纤激光对 TRIP980 钢进行点焊试验,研究不同的氩气屏蔽条件、激光功率和离焦量对点焊缝的表面形貌、截面宏观组织、微观结构、硬度、拉伸剪切性能和疲劳性能的影响。为了减少激光深熔焊接 A356 铝合金过程中产生的气孔, Li 等人<sup>[16]</sup>分析了激光功率、焊接速度以及离焦量等工艺

参数对气孔造成的影响,发现激光功率为 5 kW、离焦量为 0、焊接速度为 2.0 m/min 时,气孔率达到最小值。

对于穿透点焊的一些应用场合,需要对点焊缝的形状和尺寸(熔深和熔宽等)进行精确的控制。例如:在动力电池与极片和回流片的激光点焊时,熔池的大小影响了接头的强度和导电能力,熔深过大则会造成电池的损坏<sup>[17]</sup>。在预置焊丝增材制造中,需控制点焊缝的形状和熔深,减小热输入和热变形,确保预置焊丝与基体的紧密结合<sup>[18]</sup>。对于普通没有摆动功能的激光焊,点焊缝的形状和尺寸主要受到激光输出特性、焦点直径、功率和离焦量等参数的影响。相对于 CO<sub>2</sub> 气体激光器和 YAG 固体激光器,光纤激光器和摆动焊接头逐渐在焊接行业获得应用。在不改变离焦量的情况下,采用摆动焊接头可增大熔池的流动性,改变熔池的形状,增大点焊缝的尺寸。文中采用摆动焊接头,主要研究光纤激光工艺参数对穿透点焊缝形状和尺寸的影响规律,便于在实际的生产应用中,根据点焊缝的尺寸要求选择合适的工艺规范。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

试验采用 HY-PTBZGQ-1000 型光纤激光自动焊接机,主要由 1 000 W 的单模连续光纤激光器、摆动焊接头、三维运动工作台和控制系统等组成。激光的波长为 1 080 nm,由 50 μm 芯径的光纤传输到焊接头,经准直和聚焦后,焦点处光束的最小光斑直径  $d_0$  约为 0.133 mm。摆动焊接头的摆动方式有圆形、1 字形、8 字形等,摆动幅度  $a$  为 0~5 mm,摆动频率 0~46 Hz,单模光纤激光器的输出接近高斯光束,能量集中且方向性好,光束发散角约为 0.01 rad,离焦量的变化对光斑直径和焊缝宽度的影响较小,因此,试验选用圆形摆动方式,以通过改变摆动幅度的方法来改变激光辐射面积大小,进而改变焊缝宽度。

### 1.2 试验材料及方法

试验材料选用 Q235 碳钢,下板的尺寸为 15 mm × 15 mm × 3 mm,上板的尺寸为 10 mm × 2 mm × 0.3 mm。试验前依次用 400, 800, 1000 号砂纸对上板和下板表面进行打磨,然后用无水乙醇溶液进行擦拭,除去表面的氧化层及油污,采用夹具将上板和下板压紧固定后进行穿透点焊。

试验分为 3 部分内容,采用单因素试验方法,将

其它因素都固定,分别研究激光功率  $P$ 、摆动幅度  $a$  和焊接时间  $t$  对点焊缝形状和尺寸的影响。具体的试验参数见表 1。在试验过程中,调整激光光斑的直径  $d$  为最小光斑直径  $d_0$ ,保护气体(氩气)的流量为 6 L/min,激光摆动方式选择圆形,摆动频率为 20 Hz,每 50 ms 旋转一圈。

表 1 试验参数表

试验号	编号	激光功率 $P/W$	焊接时间 $t/ms$	摆动幅度 $a/mm$
试验一	1	250	50	0
	2	300	50	0
	3	350	50	0
	4	400	50	0
	5	450	50	0
试验二	1	450	50	0
	2	450	50	0.2
	3	450	50	0.4
	4	450 </td <td>50</td> <td>0.6</td>	50	0.6
	5	450	50	0.8
试验三	1	300	50	0.4
	2	300	100	0.4
	3	300	150	0.4
	4	300	200	0.4
	5	300	250	0.4

每次试验进行 3 次,试验后采用 SRL-7045 型双目连续变倍体式显微镜观察穿透点焊缝的截面形貌,测量出点焊缝的特征尺寸如图 1 所示,并计算出点焊缝形状的特征参数(深宽比  $b_1$  和熔宽比  $b_2$ ),最后取点焊缝各特征值的平均值作为试验结果进行对比分

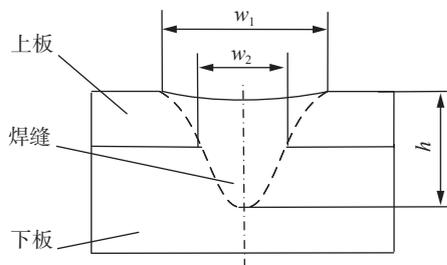


图 1 穿透点焊缝的截面和特征尺寸

析。深宽比  $b_1$  以及熔宽比  $b_2$  为:

$$b_1 = h/w_1 \quad (1)$$

$$b_2 = w_2/w_1 \quad (2)$$

式中:  $h$  为点焊缝的熔深;  $w_1$  为点焊缝的表面熔宽;  $w_2$  为点焊缝的有效熔宽,即下板的表面熔宽。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 激光功率对点焊缝形状和尺寸的影响

在焊接时间为 50 ms 和激光未摆动情况下,不同激光功率下的点焊缝截面形貌如图 2 所示,随着激光功率的增大,点焊缝的形状由抛物线状逐渐变化为钟铃状,钟铃状的边缘逐渐增大,总高度逐渐增大。激光功率对点焊缝尺寸和特征参数的影响如图 3 所示。由图 3a 可知,点焊缝的表面熔宽和熔深随着激光功率的增大而增大。由图 3b 可知,随着激光功率的增大,点焊缝的深宽比和熔宽比都逐渐增大,说明熔深的增大速度大于熔宽的增加速度,有效熔宽也逐渐增大。

由于单模光纤激光器输出为高斯光束,则其作用在工件表面的功率密度分布  $E^{[19]}$  和光斑内的平均功率密度  $E_{av}$  为:

$$E = \frac{kP}{\pi(d/2)^2} \exp\left(-k \frac{x^2}{(d/2)^2}\right) \quad (3)$$

$$E_{av} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (4)$$

式中:  $k$  为激光集中程度的系数;  $d$  为激光光束作用在工件表面的光斑直径;  $x$  为工件表面任意点到光斑中心轴的距离。

根据式(3),在激光功率为 250, 350, 450 W 时,高斯激光光束横截面的功率密度分布示意图如图 4 中的  $E_1, E_2, E_3$  所示,对比图 2a、图 2c 和图 2e 中的点焊缝形状,相对应点焊缝的轮廓分别如图 4 中的  $H_1, H_2, H_3$  所示。由此可以看出,点焊缝的形状与激光功率密度的分布形状相似,激光的功率密度呈高斯分布,以其为热源所形成点焊缝的轮廓必然与之相似,呈高斯分布或正态分布。由于光斑直径不变,激光功率增大,功率密度分布的峰值和平均值  $E_{av}$  随着增大,点焊缝的尺寸也随着增大,但熔深和深宽比的增大更快。

根据式(4),当激光功率  $P = 350$  W 和光斑直径  $d = d_0$  时,可计算出  $E_{av} = 2.5 \times 10^4$  W/mm<sup>2</sup>。在图 2d 和图 2e 的点焊缝中均出现了气孔,而图 2c 的点焊缝中未出

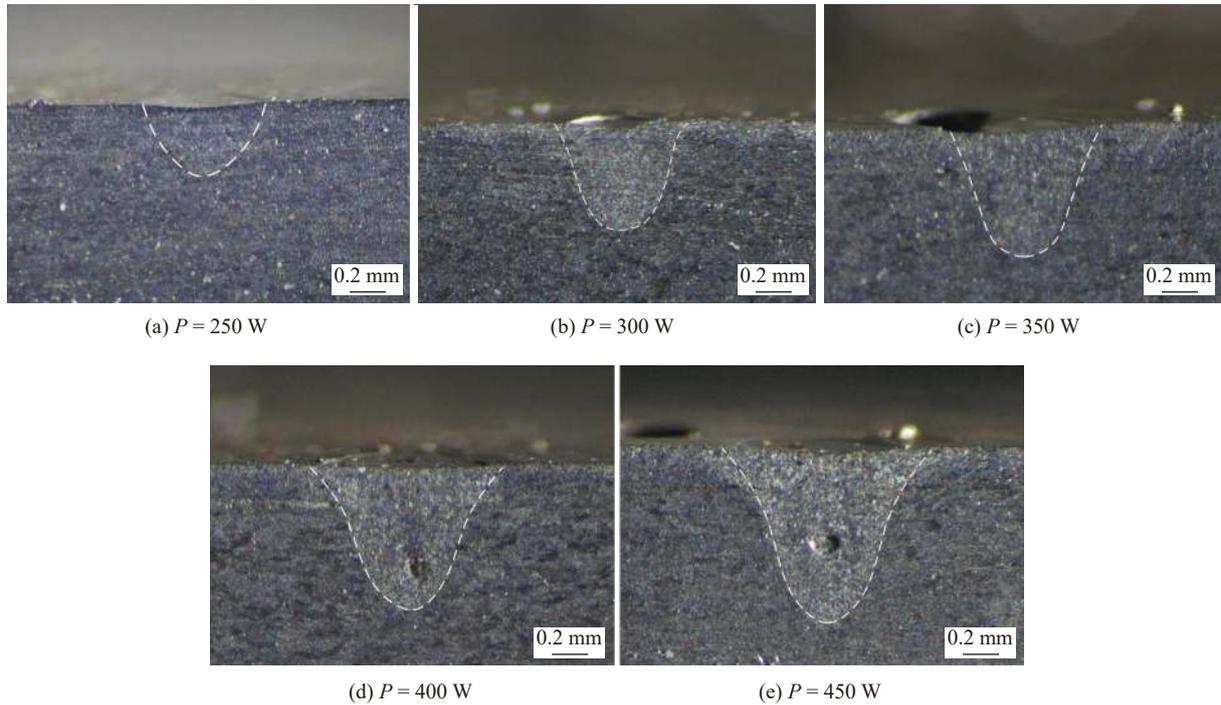


图2 不同激光功率下的点焊缝截面形貌

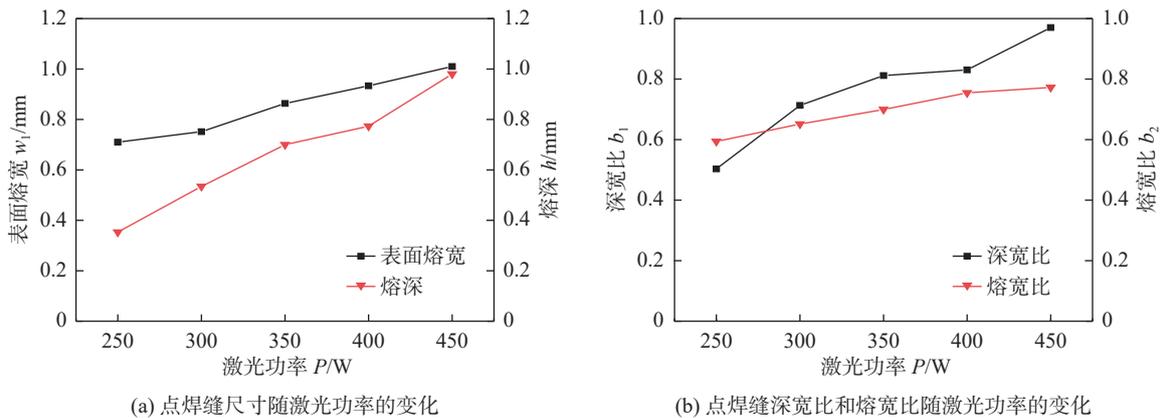


图3 激光功率对点焊缝尺寸和特征参数的影响

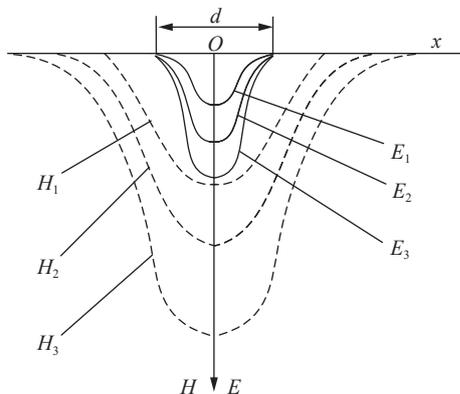


图4 高斯激光光束横截面的功率密度分布和对应点焊缝轮廓

现气孔,由此说明,采用单模连续光纤激光对 Q235 钢进行点焊时,当激光平均功率密度大于  $2.5 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$  时,点焊缝中容易出现气孔,激光焊接模式由热导焊向深熔焊逐渐转变。

### 2.2 摆动幅度对点焊缝形状和尺寸的影响

在激光功率为 450 W 和焊接时间为 50 ms(光束摆动 1 圈)情况下,不同摆动幅度下的点焊缝截面形貌如图 5 所示。对比各图可以看出,随着摆动幅度的增大,点焊缝的表面熔宽和熔池横截面面积变化不大,边缘变得逐渐陡峭,底部逐渐变平,形状由钟铃状逐渐变化为碗盆状。摆动幅度对点焊缝尺寸和特征参

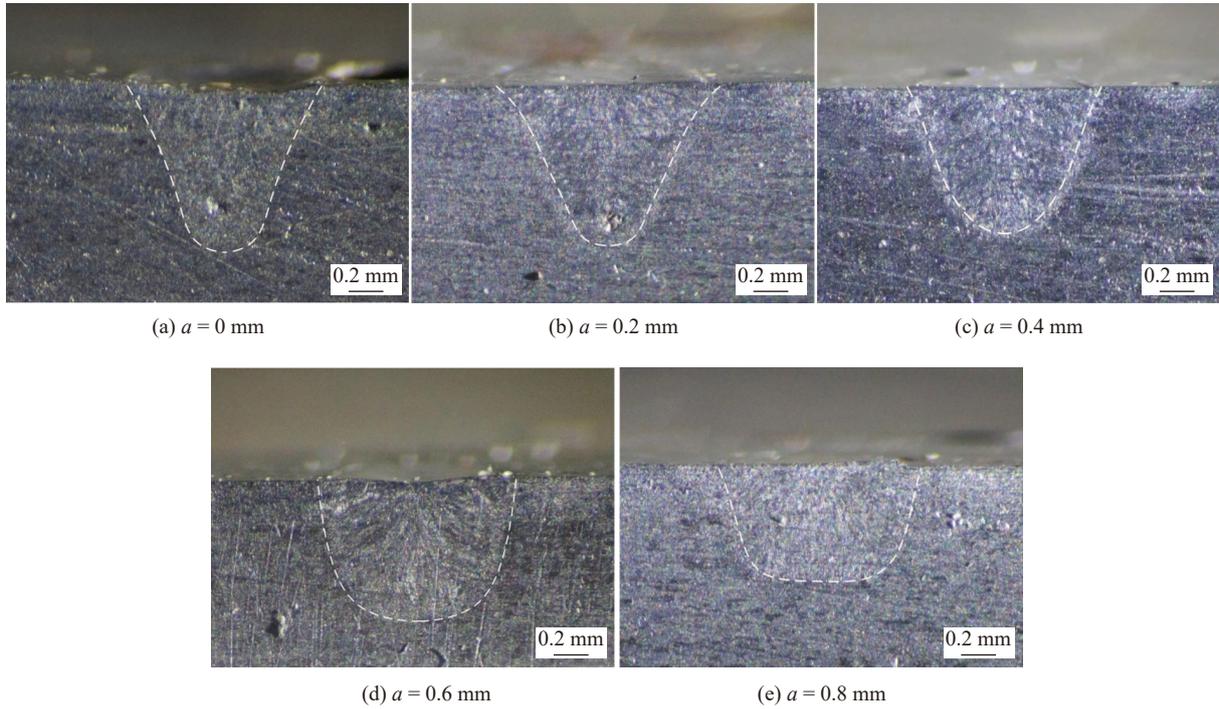


图5 不同摆动幅度下的点焊缝截面形貌

数的影响如图6所示,随着摆动幅度从0.2 mm开始逐渐增大,点焊缝的熔深和深宽比都逐渐减小,表面

熔宽缓慢增大而熔宽比逐渐增大,说明有效熔宽逐渐增大。

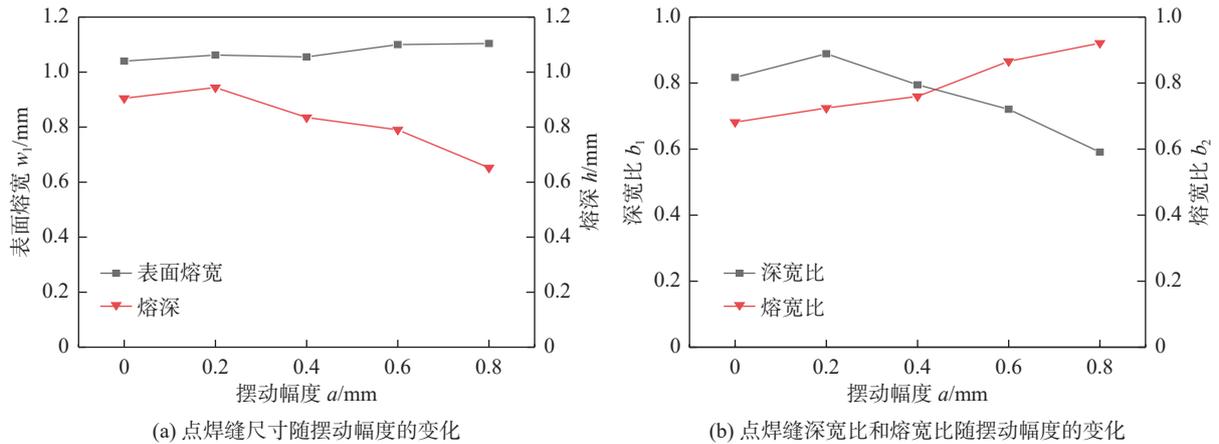


图6 摆动幅度对点焊缝尺寸和特征参数的影响

当光斑直径为  $d$  的激光束以摆动幅度为  $a$  进行圆形摆动时,可以将其扫描形成的圆环看作一个直径为  $a + d$  的圆光斑,则摆动幅度为  $a$  的圆光斑内激光平均功率密度  $E_{av-a}$  为

$$E_{av-a} = \frac{E_{av} \left( \pi a d + \frac{\pi}{4} d^2 \right)}{\frac{\pi}{4} (a + d)^2} = \frac{(4 a d + d^2) E_{av}}{(a + d)^2} \quad (5)$$

摆动圆光斑内的平均功率密度  $E_{av-a}$  与未摆动光斑内的平均功率密度  $E_{av}$  之间的比例系数  $C$  为:

$$C = \frac{E_{av-a}}{E_{av}} = \frac{4 a d + d^2}{(a + d)^2} \quad (6)$$

式中:  $E_{av}$  为光斑直径为  $d$  时光斑内的平均功率密度;  $a$  为激光摆动幅度,即激光圆形摆动的直径。

当光斑直径  $d = d_0 = 0.133 \text{ mm}$  时,由式(6)可计算出不同摆动幅度  $a$  所对应的比例系数  $C$  分别为 1, 1.12, 0.81, 0.63, 0.51 和 0.43。当  $a = 0.2 \text{ mm}$  时,比例系数  $C = 1.12$ , 摆动圆光斑内的平均功率密度  $E_{av-a}$  最大,所对应的点焊缝的熔深和深宽比最大。当  $a$  继续增大时,  $C$  逐渐减小,  $E_{av-a}$  逐渐减小,所对应点焊缝的熔深和

深宽比也逐渐减小。

由图 5e 可知, 直径  $d = d_0$  的激光在摆动幅度  $a = 0.8 \text{ mm}$  时形成点焊缝的横截面轮廓如图 7 中的  $H_a$  所示, 则摆动圆光斑内的功率密度分布形状与该点焊缝的轮廓形状相似, 如图 7 中的  $E_a$  所示, 其形状与多模激光的功率分布形状相似。

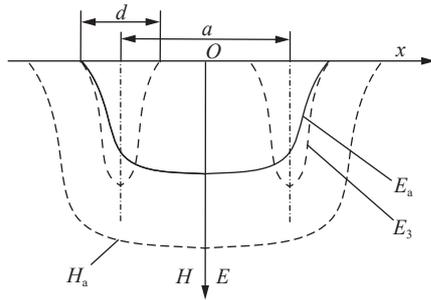


图 7 摆动时激光光束横截面的功率密度分布和对应点焊缝轮廓

由于激光功率和焊接时间不变, 激光能量保持不变, 则形成点焊缝的体积基本不变; 当摆动幅度增大时, 平均功率密度逐渐下降且中心分布逐渐均匀, 相当于在点焊缝熔池体积不变的情况下, 把点焊缝底部逐渐向上挤压, 点焊缝形状由深宽比较大的钟铃

状转变为深宽比较小的碗盆状。

由以上分析可知, 单模激光采用摆动方式相当于增大了光斑直径, 改变了光斑内的功率密度分布, 使中心处的分布变得比较均匀, 功率密度分布由高斯状逐渐转变为杯状和碗盆状, 相当于获得了多模激光的功率密度分布, 从而改变了点焊缝的形状和尺寸; 同时, 光束摆动增大了焊缝的流动性, 导致点焊缝的边缘变陡, 使熔宽比增大。相对于摆动幅度为  $0 \text{ mm}$  的点焊缝, 摆动幅度为  $0.8 \text{ mm}$  的点焊缝形状接近于矩形, 熔深浅而有效熔宽大, 此时, 点焊缝的深宽比较小, 而熔宽比较大, 具有较优的深宽比和熔宽比。

### 2.3 焊接时间对点焊缝形状和尺寸的影响

在激光功率为  $300 \text{ W}$  和摆动幅度为  $0.4 \text{ mm}$  情况下, 在不同焊接时间下点焊缝的形状变化不大, 截面形貌与图 5c 的形状相似。焊接时间对点焊缝尺寸和特征参数的影响如图 8 所示, 随着激光焊接时间的增大, 表面熔宽和熔深都逐渐增加, 熔宽比也逐渐增大, 但深宽比基本保持不变。这说明焊接时间增大时激光能量随着增大, 熔池的体积增大; 但焊接时间的增大并未改变光斑内的功率密度分布, 导致点焊缝的形状和深宽比变化不大, 而点焊缝的熔深和熔宽等尺寸都逐渐增大, 有效熔宽也增大。

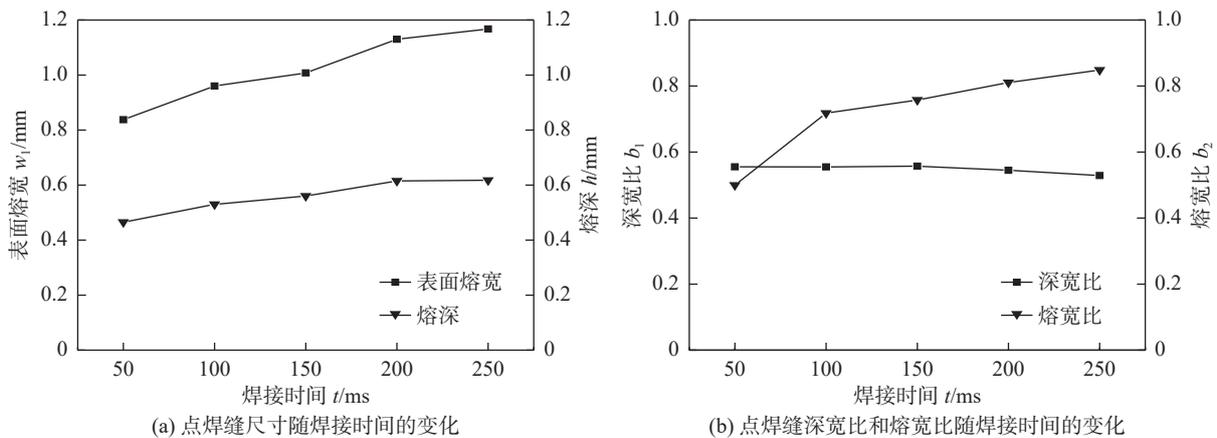


图 8 焊接时间对点焊缝尺寸和特征参数的影响

### 3 结论

(1) 光纤激光光斑内的功率密度分布影响点焊缝的形状和尺寸。随着激光功率的增大, 未摆动高斯光束形成点焊缝的形状由抛物线状逐渐转变为钟铃状, 点焊缝的熔宽、熔深、深宽比和熔宽比都随之增大。

(2) 光束摆动增大了激光与材料的作用面积, 改

变了功率密度分布和点焊缝的形状和尺寸。随着摆动幅度的增大, 点焊缝的形状由钟铃状逐渐转变为碗盆状, 点焊缝的熔深和深宽比都逐渐减小而熔宽比逐渐增大。

(3) 激光功率密度不变时, 焊接时间对点焊缝的形状影响不大。随着焊接时间的增大, 点焊缝的熔深和熔宽都逐渐增大, 但深宽比基本保持不变。

## 参考文献

- [1] Abioye T E, Zuhailawati H, Aizad S, et al. Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(4): 667 – 679.
- [2] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源电动汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(23): 3853 – 3861.
- [3] Chen G, Mei L, Zhang M, et al. Research on key influence factors of laser overlap welding of automobile body galvanized steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45(1): 726 – 733.
- [4] Hong Kyung Min, Shin Yung C. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245: 46 – 69.
- [5] 成健, 黄易, 杨新龙, 等. 动力电池用铝合金准连续脉冲激光焊接特性研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(6): 953 – 958.
- [6] 吴家洲, 张华, 李玉龙, 等. 激光穿孔点焊接瞬态过程数值分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 52 – 57.
- [7] 朱国仁, 陈松, 李蒙蒙. SUS301L不锈钢非熔透型激光搭接焊的疲劳特性分析[J]. *焊接学报*, 2016, 37(4): 14 – 18.
- [8] Jaehun Kim, Sehyeok Oh, Myeonggyun Son, et al. A study of keyhole behavior and weldability in zero-gap laser welding of zinc-coated steel sheets at subatmospheric pressures[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 135 – 148.
- [9] Pardal Goncalo, Meco Sonia, Dunn Andrew, et al. Laser spot welding of laser textured steel to aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 241: 24 – 35.
- [10] Cai Chuang, Li Liqun, Tao Wang, et al. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(9): 3783 – 3792.
- [11] Martinson P, Daneshpour S, Kocak M, et al. Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3525 – 3536.
- [12] 熊剑, 黄永德, 李磊, 等. QBe2.5铍青铜与20#钢激光点焊接头性能分析[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(11): 2594 – 2600.
- [13] 任逸群, 李俐群, 宫建锋, 等. 镀锌钢板搭接接头激光螺旋点焊工艺研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 35 – 43.
- [14] Zhang Xiaobin, Cao Zhanyi. Pulsed Nd: YAG laser spot welding of an AZ31 magnesium alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5-8): 3053 – 3063.
- [15] Wei S, Liu R, Lü D, et al. Study on fibre laser spot welding of TRIP980 steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(11): 1271 – 1281.
- [16] Li Kai, Lu Fenggui, Guo Songtao, et al. Porosity sensitivity of A356 Al alloy during fiber laser welding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(8): 2516 – 2523.
- [17] 倪增磊, 杨嘉佳, 李帅, 等. 超声波点焊技术及其在锂电池制造中的研究现状[J]. *焊接*, 2020(5): 31 – 37.
- [18] 王中豪, 韩红彪, 陈俊潮, 等. 一种逐条预置焊丝和逐层重熔的增材制造方法[J]. *焊接*, 2020(3): 35 – 39.
- [19] Debroy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92(1): 112 – 224.

第一作者: 李世康, 硕士研究生; 主要从事金属增材制造的研究工作; 已发表论文 1 篇; 1475142291@qq.com。  
通信作者: 韩红彪, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事电火花表面沉积和金属增材制造方面的科研工作; 已发表论文 60 余篇; lyhhb7157@163.com。

(编辑: 曲畅)

## 本文引用格式:

李世康, 童金钟, 韩红彪, 等. 光纤激光工艺参数对 Q235 钢穿透点焊缝形状和尺寸的影响[J]. *焊接*, 2023(2): 1 – 7.

Li Shikang, Tong Jinzhong, Han Hongbiao, et al. Influence of fiber laser process parameters on the shape and size of penetration spot weld of Q235 steel[J]. *Welding & Joining*, 2023(2): 1 – 7.