

14 μm 芯径激光搅拌焊接铝合金工艺研究王力波¹, 马修泉^{1,2}, 朱政武^{1,2*}¹华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;²湖北光谷实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 以 14 μm 小芯径激光作为热源, 通过分析搅拌焊接过程中运动轨迹与能量密度的变化, 开展了 2 mm 厚 2A12 铝合金激光焊接的工艺研究。结果表明: 相同参数下 14 μm 小芯径激光焊接中的峰值能量密度最高为 100 μm 芯径激光的 15 倍以上; 在未焊透母材前, 随着搅拌频率和焊接速度的变化, 接头的深宽比维持在 0.68, 这得益于 14 μm 小芯径激光的匙孔生成阈值是常规 100 μm 芯径激光的 19.1 倍, 是 200 μm 芯径激光的 54.0 倍; 不同焊接参数下, 焊缝未发现明显气孔、裂纹缺陷, 最终在焊接速度为 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、搅拌频率为 200 Hz 时, 获得了表面成形质量最佳的焊缝。

关键词 激光技术; 小芯径; 铝合金; 搅拌焊接; 焊缝成形

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230886

1 引言

铝合金具有比强度高、耐腐蚀、密度小等优点, 是现代工业实现产品性能改善、结构减重的一种关键材料, 被广泛应用于汽车、航空航天等领域^[1-2]。目前, 铝合金的连接方法主要包括激光焊、搅拌摩擦焊、电子束焊等^[3]。激光焊凭借其能量密度高、热影响区小、环境要求低和非接触式等优点而成为铝合金焊接的理想热源^[4]。然而, 铝合金具有高反射率、低沸点、高膨胀系数等特点, 在焊接过程中容易出现激光能量利用率低、气孔率高、焊缝成形差^[5-6]等问题, 这成为了激光铝合金焊接中亟待解决的问题。

随着振镜技术的快速发展, 将激光与振镜结合的激光搅拌焊接为铝合金焊接拓宽了应用范围。Hagenlocher 等^[7]采用 100 μm 芯径激光证明了振荡激光束可促进 6016 铝合金中等轴晶的形成, 降低焊接过程中热裂纹形成敏感性。Wang 等^[8]在 0.4 mm 光斑直径下通过研究不同搅拌形状对 5A06 铝合金焊接质量的影响, 发现无限搅拌模式下焊缝具有更少的焊接缺陷和更好的力学性能。Ma 等^[9]通过新型星系激光搅拌焊的形式研究了 2A12 铝合金的成形过程, 发现同时存在的搅拌力与无序热扩散强化了自由形核过程, 促进了柱状晶向等轴晶的转变。蔡创等^[10]通过熔化极惰性气体(MIG)焊接结合搅拌激光焊接技术, 有效提高了熔滴过渡的稳定性, 抑制了飞溅、气孔等缺陷的产生。

尽管激光搅拌焊接已经得到了广泛研究, 但焊接过程中仍然会出现熔池直径增加、熔池深度降低的问题, 焊接成形质量受到影响。因此, 学者开展了不同激光光束对焊接成形质量的研究。张明军等^[11]通过可调环形光斑发现当中心激光和环形激光功率分别为 2000 W 和 1000 W 时, 能获得接头抗拉强度为 215 MPa 与延伸率为 14.0% 的镁合金焊接接头。Dimatteo 等^[12]通过更改聚焦焦距研究了光斑直径对铜铝异质焊接的影响, 结果表明, 较小的光斑直径能够提高焊缝成形质量。彭进等^[13]研究了光斑尺寸对焊接熔池的影响, 发现随着光斑半径的增大, 匙孔的深度明显减小, 熔池的尺寸逐渐增大。

因此, 为了改善搅拌焊接过程中激光能量利用率低(大熔宽、浅熔深)的现象, 本文以 2 mm 厚 2A12 铝合金为研究对象, 通过研究小芯径激光经准直聚焦后形成的小尺寸光斑对铝合金焊接成形质量的影响, 探究了不同焊接工艺参数下小芯径激光运动轨迹与能量密度对焊缝成形的影响规律。

2 试验方法

2.1 试验材料与设备

本文采用的试验材料为 2A12 铝合金, 尺寸为 100 mm \times 200 mm \times 2 mm, 相关化学成分如表 1 所示。试样表面用钢丝球打磨以除去表面氧化膜, 并用丙酮溶液擦拭表面油污。

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-06-15; 录用日期: 2023-06-21; 网络首发日期: 2023-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(52175406, 52205463)、中央高校基本科研业务费专项资金(YCJJ202202015)

通信作者: *zwzhu0916@hust.edu.cn

表 1 2A12 铝合金的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 2A12 aluminum alloy

Element	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Ni	Al
Mass fraction / %	≤0.50	1.20-1.80	3.80-4.90	0.30-0.90	≤0.30	≤0.15	≤0.10	Bal.

小芯径激光搅拌焊接平台示意图如图 1 所示。试验采用的是光纤激光器,最大输出功率为 1500 W,激光波长为 1080 nm,光纤芯径为 14 μm;焊接头为摆动焊接头,最大承载功率为 6000 W,在准直焦距为 100 mm 的准直镜和聚焦焦距为 200 mm 的聚焦镜下,

激光成像理论光斑直径为 28 μm;为了避免初始铝合金表面对激光的高反射导致镜片、激光器受损,采用 5° 焊接角度;采用的高速摄像仪的传输速率为 5000 frame/s,曝光时间为 20 μs。

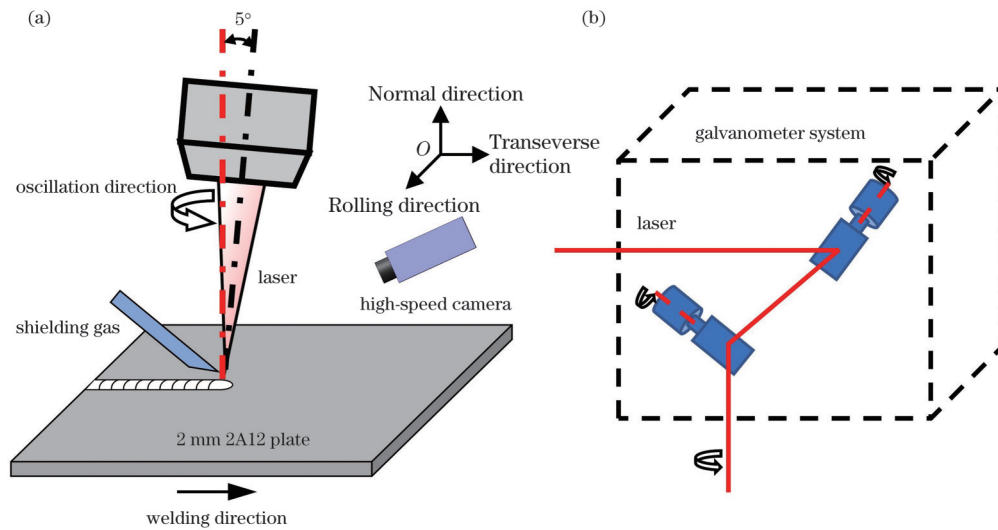


图 1 小芯径激光搅拌焊接平台示意图。(a)焊接平台;(b)振镜系统

Fig. 1 Schematics of small-core-diameter laser oscillation welding platform. (a) Welding platform; (b) galvanometer system

2.2 试验原理

采用平板焊的形式对 2A12 铝合金进行搅拌焊接,具体焊接参数如表 2 所示,利用二维振镜实现激光光束的环形运动,其搅拌轨迹如图 2 所示。焊接后通过金相显微镜观察焊缝表面形貌特征,并沿垂直焊缝方向制备金相试样,金相试样经镶样、打磨抛光后,采用 Kroll 溶液 (1 mL HF + 1.5 mL HCl + 2.5 mL HNO₃ + 95 mL H₂O) 进行腐蚀,通过场发射扫描电子显微镜观察焊缝组织。

表 2 2A12 铝合金激光摆动焊接参数

Table 2 Welding parameters of 2A12 aluminum alloy with laser oscillation

Process parameter	Value
Laser power /kW	1.5
Welding speed / (mm·s ⁻¹)	15, 20, 25, 30
Beam oscillation frequency /Hz	50, 100, 150, 200, 250
Beam oscillation amplitude /mm	0.05
Defocusing /mm	0
Focal spot diameter /mm	0.028

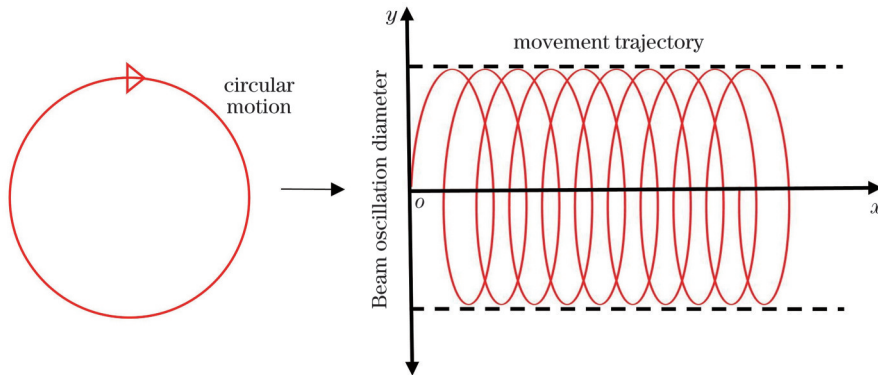


图 2 运动轨迹示意图

Fig. 2 Schematics of motion trajectory

3 分析与讨论

3.1 激光能量分布规律

激光焊接主要是利用高能激光辐照母材,对局部区域进行加热形成熔池,而激光搅拌焊接中的搅拌轨迹与能量分布会极大影响焊缝的成形质量。因此,为探究 14 μm 小芯径激光搅拌焊接与其余芯径搅拌焊接的不同,利用 MATLAB 程序进行了运动轨迹的模拟与能量分布的计算,如图 3、4 所示。其中,图 3 显示了在 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 焊接速度、 0.05 mm 搅拌振幅下不同搅拌频率对运动轨迹的影响。当移动速度和搅拌振幅固定时,随着搅拌频率的提升,运动轨迹逐渐在中心区发生重叠。激光光束的运动轨迹与时间的关系式^[14]为

$$\begin{cases} x(t) = v_w t + A \sin(2\pi f t + \varphi_x) \\ y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi_y) \end{cases}, \quad (1)$$

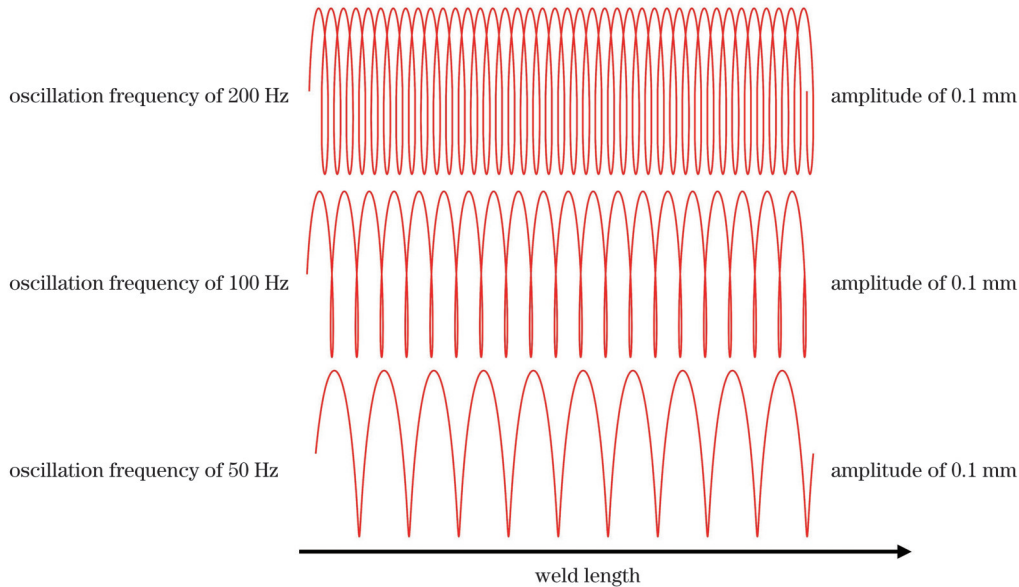


图 3 不同搅拌频率下的光束运动轨迹示意图

Fig. 3 Schematics of beam motion trajectories under different oscillation frequencies

当激光功率为 1.5 kW 、焊接速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、搅拌频率为 50 Hz 、搅拌振幅为 0.05 mm 时,不同芯径激光产生的光斑能量密度分布如图 4 所示。在 50 Hz 低搅拌频率下,能量轨迹分布不均匀,搅拌周期之间存在能量盲区,而随着光斑半径的不断增大,峰值激光能量的覆盖范围不断增大,如图 4 中矩形框所示,但是伴随着峰值激光能量密度的迅速降低。光斑半径为 0.014 mm 时峰值能量密度高达 $1.8\times 10^4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,如图 4(a) 所示,远大于半径为 0.106 mm 时的峰值能量密度 ($1200\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$),因此利用 $14\text{ }\mu\text{m}$ 小芯径激光能在较低功率下获得较高的能量密度和较深的焊接熔深,焊接中熔池的深宽比受到极大的影响。

为进一步探究 $14\text{ }\mu\text{m}$ 小芯径激光搅拌焊接中能量分布的变化规律,并获得最佳的焊接工艺参数,在相应参数下进行了激光能量密度分布仿真,如图 5、6 所示。

式中: t 为时间; $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为光束运动过程中光斑的横、纵坐标; v_w 为焊接速度; A 为搅拌振幅; f 为激光搅拌频率; φ_x 、 φ_y 为初始相位。

激光光束能量分布近似服从高斯分布,其激光热源模型^[15]为

$$I(r_0) = \frac{3P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{3r_0^2}{r^2}\right), \quad (2)$$

式中: I 为激光的光强分布; P 为激光功率; r 为光斑半径; r_0 为到光斑中心的距离。

$$E(x, y) = \int_0^t I(x, y, t) dt, \quad (3)$$

式中: $E(x, y)$ 为激光辐照材料表面的能量密度; $I(x, y, t)$ 为 t 时刻 (x, y) 位置处激光的光强分布。将式(1)、(2)代入式(3)后,可以得到激光光束搅拌过程中的能量分布。

当搅拌频率为 50 Hz 、搅拌振幅为 0.05 mm 时不同焊接速度下的激光能量分布图如图 5 所示。可以得出:随着焊接速度从 $15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升到 $30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,峰值能量密度从 $2.9\times 10^4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 下降到 $7.1\times 10^3\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,激光能量基本集中在运动轨迹单侧且轨迹距离不断减小;激光能量密度的不断降低将导致焊缝面积逐渐减小,而且能量分布的不对称性容易造成母材熔化不均匀、匙孔失稳,出现飞溅、塌陷等缺陷。

当焊接速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、搅拌振幅为 0.05 mm 时,不同搅拌频率下的能量分布仿真图如图 6 所示。结合图 5(b) 可以得出:当搅拌频率从 50 Hz 增加到 100 、 150 、 200 Hz 时,峰值能量密度从 $1.8\times 10^4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 分别下降到 8.6×10^3 、 3.8×10^3 、 $2.8\times 10^3\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,激光能量逐渐从单侧向另一侧移动,最终在两侧形成能量双峰;在搅拌频率提高到 300 Hz 后,激光能量会向中

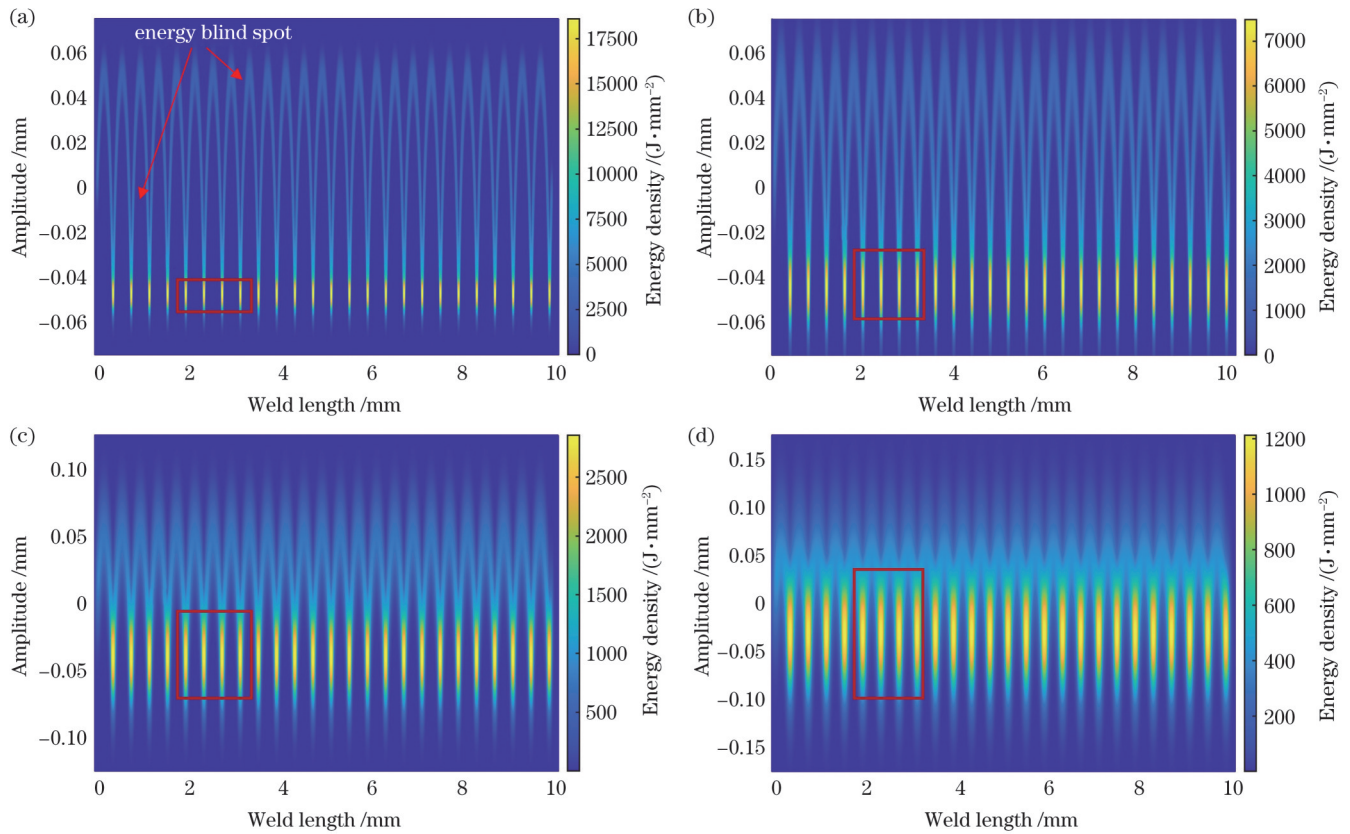


图 4 光斑半径对能量分布的影响。(a) 0.014 mm; (b) 0.028 mm; (c) 0.056 mm; (d) 0.102 mm
 Fig. 4 Effect of spot radius on energy distribution. (a) 0.014 mm; (b) 0.028 mm; (c) 0.056 mm; (d) 0.102 mm

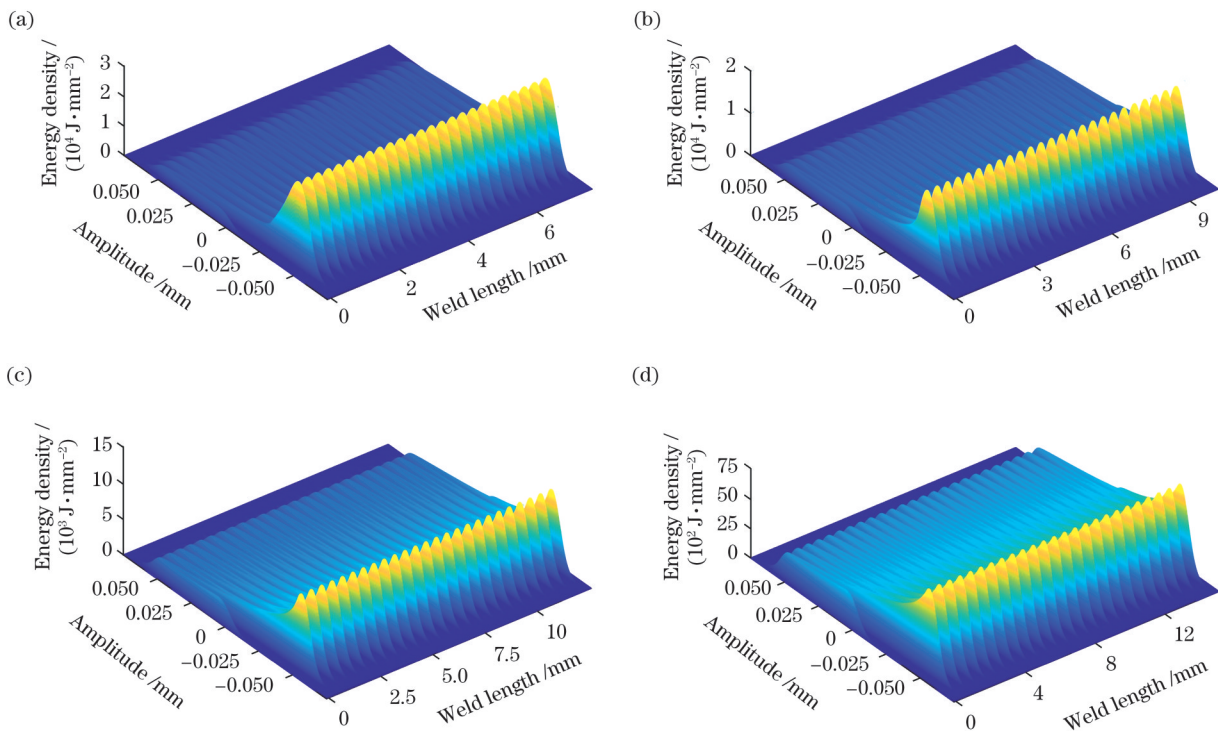


图 5 焊接速度对能量分布的影响。(a) $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 Fig. 5 Effect of welding speed on energy distribution. (a) $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, (c) $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, (d) $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

间区域聚集, 峰值能量密度可达到 $2.4 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$, 相较于 200 Hz 搅拌频率时[图 6(c)]几乎没有发生衰

减, 较高的能量密度会造成中心区域能量过高, 容易引发母材漏液缺陷。

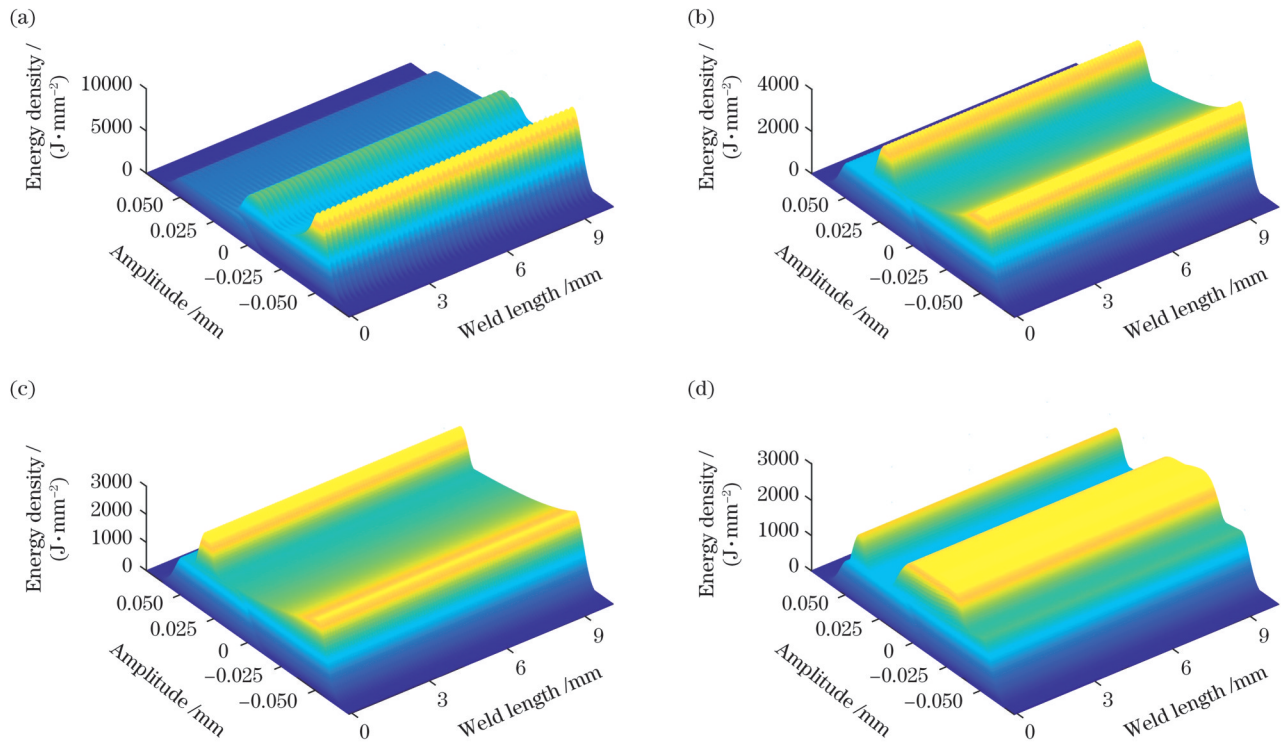


图 6 搅拌频率对能量分布的影响。(a) 100 Hz; (b) 150 Hz; (c) 200 Hz; (d) 300 Hz

Fig. 6 Effect of oscillation frequency on energy distribution. (a) 100 Hz; (b) 150 Hz; (c) 200 Hz; (d) 300 Hz

3.2 成形质量

利用图 1 所示的小芯径激光搅拌焊接平台对 2 mm 厚 2A12 铝合金板进行焊接试验, 图 7 为焊接过程中熔池的高速摄像图。从拍摄结果可知: 当搅拌频率为 50 Hz 时, 匙孔开口面积大, 飞溅严重; 随着搅拌

频率从 50 Hz 增加到 200 Hz, 匙孔开口面积缩小, 飞溅现象减弱, 符合图 6 中能量密度分布规律的仿真结果, 搅拌频率的提高在降低峰值能量密度的同时, 会促进激光能量的均匀分布, 提高匙孔稳定性, 进而提高成形质量。

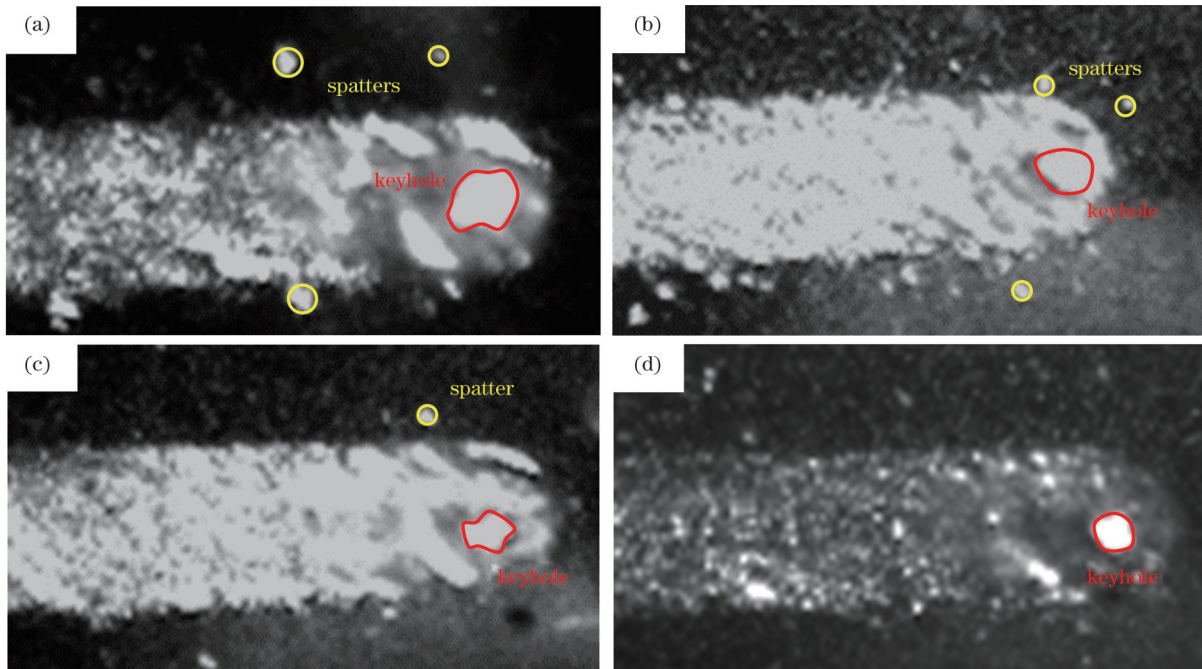


图 7 不同搅拌频率下焊接过程的高速摄像图。(a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz; (d) 200 Hz

Fig. 7 High-speed camera images of welding processes under different oscillation frequencies. (a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz; (d) 200 Hz

表面成形如图 8 所示。其中图 8(a)~(d)是当搅拌频率为 50 Hz、搅拌振幅为 0.05 mm 时不同焊接速度下的焊缝成形图,可以得出:在 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低焊接速度下,焊接接头出现了严重的漏液缺陷,极大影响了焊接质量,而随着焊接速度的提高,焊接面积不断减小,从 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 4.319 mm^2 下降到 $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 1.418 mm^2 ,其主要原因是焊接速度的提高使激光轨迹间距变大,激光能量密度下降,进而焊接熔深、熔宽不断下降;在 50 Hz 搅拌频率下焊缝表面容易出现飞溅、塌陷等缺陷,其原因在于该频率下的激光能量单侧富

集,故母材熔化不均匀、匙孔失稳,从而成形质量受到影响,符合图 5 的仿真结果。

当焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、搅拌振幅为 0.05 mm 时,50~250 Hz 搅拌频率下的焊缝表面与截面图如图 8(b)、(e)~(h)所示,可以得出:在 50~200 Hz 搅拌频率范围内,搅拌频率的增加不会对成形面积产生较大的影响,整体维持在 2.1 mm^2 ,从图 8(i)可以看出该搅拌频率范围内的焊缝深宽比保持在 0.68,其原因在于搅拌频率的提高虽然降低了峰值能量密度,但极大提高了能量的均匀性;在 200~250 Hz 搅拌频率范围

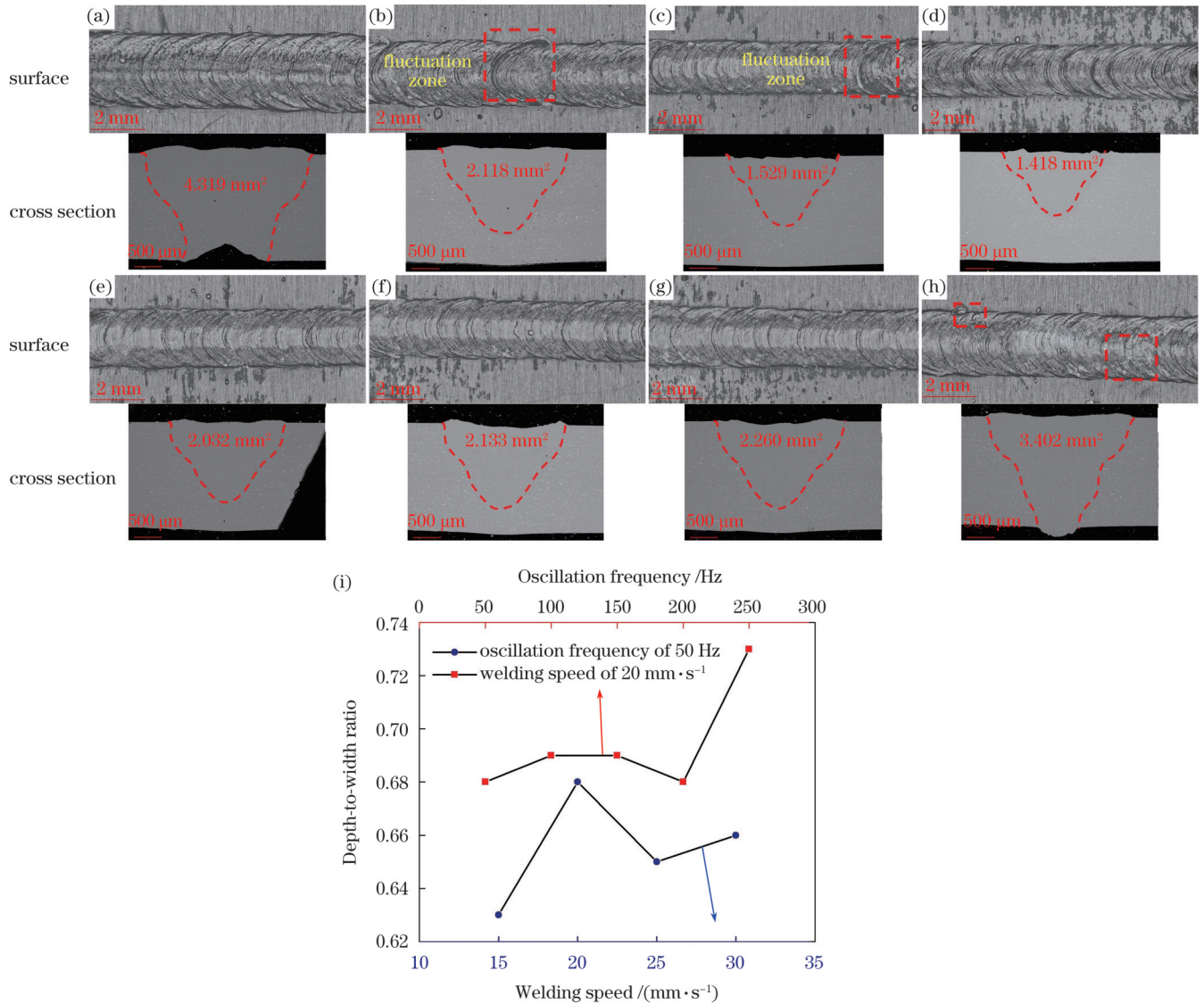


图 8 不同参数下焊缝成形示意图及深宽比。(a)焊接速度为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 50 Hz;(b)焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 50 Hz;(c)焊接速度为 $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 50 Hz;(d)焊接速度为 $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 50 Hz;(e)焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 100 Hz;(f)焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 150 Hz;(g)焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 200 Hz;(h)焊接速度为 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,搅拌频率为 250 Hz;(i)深宽比

Fig. 8 Schematics of welding formation and depth-to-width ratios under different parameters. (a) Welding speed of $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 50 Hz; (b) welding speed of $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 50 Hz; (c) welding speed of $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 50 Hz; (d) welding speed of $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 50 Hz; (e) welding speed of $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 100 Hz; (f) welding speed of $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 150 Hz; (g) welding speed of $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 200 Hz; (h) welding speed of $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and oscillation frequency of 250 Hz; (i) depth-to-width ratio

内,焊缝表面鱼鳞纹发生波动、塌陷,从图 8(h)可以看出在搅拌频率提高到 250 Hz 后,焊缝底部出现一定程度的漏液现象,其原因在于频率大于 200 Hz 后,激光能量开始在中间区域聚集,而能量密度依旧接近 $3.0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$,几乎没有发生衰减,较高的能量密度导致中心区域能量过高,焊接过程中熔深得到提升,进而产生漏液缺陷甚至焊透。

在搅拌参数改变的过程中,常规芯径激光搅拌焊接会遇到焊接模式从深熔焊转变为热导焊,与 $14 \mu\text{m}$ 小芯径激光搅拌焊接中均匀稳定的深宽比明显不同。为进一步揭示焊接过程中熔宽、熔深与匙孔尺寸的变化规律,考虑母材参数和热性能,计算匙孔生成阈值^[16]:

$$H = \frac{\Delta H}{h_s} = \frac{\eta P \sqrt{\alpha}}{\pi k T_m \sqrt{v d^3}} \geq \frac{\pi T_b}{T_m} \approx 8.86, \quad (4)$$

式中: H 为匙孔阈值; ΔH 为比焓; h_s 为熔化温度下的焓值; η 为材料对激光能量的吸收率; α 为热扩散系数; k 为导热系数; d 为光斑直径; v 为瞬时速度; T_m 为材料熔化温度; T_b 为材料沸腾温度。

$$H_M = \frac{H_1}{H_2} = \frac{\sqrt{r_2^3}}{\sqrt{r_1^3}}, \quad (5)$$

式中: H_M 为小芯径匙孔生成阈值与常规芯径匙孔生成阈值的比值; H_1 为 $14 \mu\text{m}$ 小芯径激光匙孔生成阈值; H_2 为常规芯径激光匙孔生成阈值; r_1 为小芯径激光光斑半径; r_2 为常规芯径激光光斑半径。

通过式(5)对 $14 \mu\text{m}$ 小芯径激光与常规芯径激光进行比较,发现小芯径激光匙孔生成阈值是常规 $100 \mu\text{m}$ 芯径激光的 19.1 倍,是 $200 \mu\text{m}$ 芯径激光的 54.0 倍。

小芯径激光在提升搅拌频率过程中,虽然同样出现了峰值能量密度下降的现象,但凭借其较大的匙孔生成阈值,避免了深熔焊向热导焊的转变,保持焊缝宽度和深度基本不变。其中,由于搅拌振幅与搅拌频率的存在,该焊接可以近似于一个大光斑(搅拌振幅)直线焊接,当搅拌振幅维持 0.05 mm 不变时,在搅拌频率从 50 Hz 提升到 200 Hz 后,峰值能量密度下降了 11/13,代入式(4)可得匙孔阈值 $H \approx 12.20 > 8.86$,满足深熔焊条件。甚至在搅拌频率提升到 300 Hz 后,能量向中部地区集中,峰值能量密度依旧维持在 $2.4 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$,激光能量直达匙孔底部,出现匙孔深度提升的现象,在焊缝底部产生较大面积的热影响区。

4 结 论

与传统激光搅拌焊接相比,小芯径激光搅拌焊接形成的光斑尺寸更小,能量更集中,随着频率的提升,激光能量峰值从单峰向双峰转变,最后在中部聚集,最低能量密度始终维持在 $1.0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 以上,满足激光深熔焊焊接条件。

当搅拌频率在 50~200 Hz 区间时,频率的提升有助于激光能量的均匀分布,焊接过程中的飞溅缺陷减

少,匙孔稳定性得到提高。当搅拌频率为 200 Hz 时,焊缝的鱼鳞纹稳定无缺陷,无明显气孔缺陷。

小芯径激光具有较大的匙孔生成阈值,是常规 $100 \mu\text{m}$ 芯径激光的 19.1 倍,是 $200 \mu\text{m}$ 芯径激光的 54.0 倍。在搅拌焊接过程中,焊缝深宽比基本维持在 0.68,焊缝面积维持在 2.1 mm^2 左右。

参 考 文 献

- [1] Chen C, Yin X N, Liao W, et al. Microstructure and properties of 6061/2A12 dissimilar aluminum alloy weld by laser oscillation scanning[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 2789-2798.
- [2] Xu T Y, Ma X Q, Zhang L, et al. Enhancement of load transfer by interfacial bonding in Al-Cu-Mg joints under the *in-situ* synergistic effect of carbon nanotubes and silicon nitride[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112144.
- [3] Xu T Y, Zhou S W, Ma X Q, et al. Significant reinforcement of mechanical properties in laser welding aluminum alloy with carbon nanotubes added[J]. Carbon, 2022, 191: 36-47.
- [4] Zhang C, Li X W, Gao M. Effects of circular oscillating beam on heat transfer and melt flow of laser melting pool[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 9271-9282.
- [5] 黄瑞生, 邹吉鹏, 孟圣昊, 等. 铝合金激光扫描焊接工艺特性[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 61-66, 163.
Huang R S, Zou J P, Meng S H, et al. Process characteristics of laser scanning welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 61-66, 163.
- [6] Wang L, Gao M, Zhang C, et al. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2016, 108: 707-717.
- [7] Hagenlocher C, Sommer M, Fetzer F, et al. Optimization of the solidification conditions by means of beam oscillation during laser beam welding of aluminum[J]. Materials & Design, 2018, 160: 1178-1185.
- [8] Wang Z M, Oliveira J P, Zeng Z, et al. Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 58-65.
- [9] Ma X Q, Wang L B, Zhu Z W, et al. Planetary laser welding system induced equiaxed and refined grains in 2A12 aluminum alloy weldments[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161: 109162.
- [10] 蔡创, 谢佳, 刘致杰, 等. 铝合金摆动激光-MIG 复合焊接特性及气孔控制[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802002.
Cai C, Xie J, Liu Z J, et al. Welding characteristics and porosity control of weaving laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802002.
- [11] 张明军, 吴乐峰, 毛聪, 等. AZ31B 镁合金可调环形光斑光纤激光焊接试验研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202002.
Zhang M J, Wu L F, Mao C, et al. Experimental study on fiber laser welding of AZ31B magnesium alloy with adjustable annular spot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202002.
- [12] Dimatteo V, Ascari A, Liverani E, et al. Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107495.
- [13] 彭进, 许红巧, 王永彪, 等. 激光光斑尺寸对激光焊接熔池、匙孔行为的影响[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(7): 199-209.
Peng J, Xu H Q, Wang Y B, et al. Effect of laser spot size on the behavior of molten pool and keyhole in laser welding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(7): 199-209.
- [14] Hugger F, Hofmann K, Kohl S, et al. Spatter formation in laser beam welding using laser beam oscillation[J]. Welding in the World, 2015, 59(2): 165-172.
- [15] Wu D S, Hua X M, Li F, et al. Understanding of spatter formation in fiber laser welding of 5083 aluminum alloy[J].

International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 730-740.

[16] Wang L., Gao M., Zeng X Y. Experiment and prediction of weld

morphology for laser oscillating welding of AA6061 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(4): 334-341.

Process Research on 14- μm -Core-Diameter Laser Oscillation Welding of Aluminum Alloy

Wang Libo¹, Ma Xiuquan^{1,2}, Zhu Zhengwu^{1,2*}

¹*School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;*

²*Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China*

Abstract

Objective Aluminum alloys are vital materials for performance improvement and structural weight reduction in automotive, aerospace, and other industries, owing to their high specific strength, corrosion resistance, and low density. However, the physical properties of aluminum alloys, including their high reflectivity, low boiling point, and high coefficient of thermal expansion, have resulted in problems such as low energy utilization, high porosity, and poor weld seam formation in laser welding. With the rapid development of galvanometer scanning technology, the combination of laser technology with galvanometer mirrors, known as laser stir welding, has emerged as a solution to these problems. By investigating the shape of the stirring motion, stirring patterns, and beam diameter during the welding process, researchers have explored effective approaches for achieving high-quality aluminum alloy formation. Nonetheless, challenges persist, including the expansion of the weld pool diameter and the reduction in pool depth, which directly affect the quality of the weld formation. Therefore, to address the low energy utilization (resulting in shallow melting penetration and a large melting width) observed in laser stir welding and to examine the influence of a small spot generated by collimating and focusing a small-core-diameter laser on the weld formation quality of aluminum alloys, this study investigates the aluminum alloy welding seam formation under different welding process parameters with 2-mm-thick 2A12 aluminum alloy as the research object.

Methods Before welding, the surface of the test specimen is prepared by grinding with a steel wire brush to remove the surface oxide film. Subsequently, the surface is wiped with an acetone solution to eliminate any oil contamination. The 2A12 aluminum alloy is subjected to laser stir welding in a flat-plate configuration, and the circular motion of the laser beam is achieved using a two-dimensional galvanometer. After welding, the surface morphology of the welds is examined using a metallographic microscope. Metallographic samples are prepared along the vertical direction of the weld. The metallographic samples are embedded, ground, and polished, followed by corrosion using Kroll's solution (1 mL HF + 1.5 mL HCl + 2.5 mL HNO₃ + 95 mL H₂O). Finally, the weld microstructure is observed using a field-emission scanning electron microscope.

Results and Discussions Trajectory simulation and energy distribution calculations are conducted using MATLAB. The results indicate that a higher energy density is achieved with a 14- μm -core-diameter laser at low power, enabling deeper weld penetration. The depth-to-width ratio of the weld pool is significantly affected (Figs. 3 and 4). Within the stirring frequency range 50–200 Hz, the laser energy gradually shifts from one side to the other as the stirring frequency increases, eventually resulting in dual-energy peaks on both sides. As the stirring frequency increases to 300 Hz, the laser energy is concentrated in the middle region (Figs. 5 and 6). The welding process is observed using a high-speed camera (Fig. 7), which reveals that increasing the stirring frequency not only reduces the peak energy density but also facilitates a more uniform energy distribution, improving the stability of keyhole formation and enhancing the quality of the weld. The investigation of the threshold for deep penetration keyhole formation demonstrates that the threshold for a 14- μm -core-diameter laser is 19.1 times higher than that of a conventional 100- μm -core-diameter laser and 54.0 times higher than that of a 200- μm -core-diameter laser. This effectively prevents the transition from deep penetration welding to heat conduction welding, thereby maintaining a nearly constant weld width and depth (Fig. 8).

Conclusions In the present study, the impact of the trajectory and energy density of a 14- μm -core-diameter laser on weld formation is investigated. The results reveal that the laser with a smaller core diameter exhibits a smaller spot size and a higher concentration of energy during the stirring-welding process. It has a greater threshold for keyhole formation, resulting in a consistent depth-to-width ratio of 0.68 and a weld area of 2.1 mm². The laser energy peak underwent a transition from a single peak to a double peak and ultimately converges in the central region. An increase in the stirring frequency within the range of 50–200 Hz is found to contribute to a more uniform distribution of laser energy, a reduction in spatter defects during the welding process, and an improvement in the stability of keyhole formation. At the stirring frequency of 200 Hz, the weld exhibits stable fish-scale patterns without visible defects or significant porosity.

Key words laser technique; small core diameter; aluminum alloy; oscillation welding; seam formation