

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.005

# 摆动工艺参数对铝合金激光焊焊接质量的影响

王健强, 贾正, 邢健, 李家曙

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为了研究铝合金激光焊接过程中摆动参数对焊接结果的影响,文章采用单因素的变量试验,在其他参数固定为功率4 kW、焊接速度80 mm/s、离焦量0的情况下,分别分析激光摆动频率、摆动幅度等参数对2 mm厚的6k21和5754铝合金薄板焊缝成型、焊接质量的影响。试验结果表明:随着摆动幅度的增加,焊缝熔深减小,熔宽先增加后减小;随着摆动频率的增加,熔深、熔宽均减小;在焊缝没有焊接缺陷的情况下,试件的剪切力与熔宽成正相关。文章研究结果可为汽车轻量化全铝车身连接中的激光焊接工艺提供一定的理论参考。

**关键词:**激光焊;摆动焊接;铝合金;控制变量法

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)05-0606-06

## Effect of oscillating parameters on laser welding quality of aluminum alloy

WANG Jianqiang, JIA Zheng, XING Jian, LI Jiashu

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the influence of oscillating parameters on welding quality during laser welding of aluminum alloy, a single factor variable experiment was adopted in this paper, and under the conditions of 4 kW power, 80 mm/s welding speed and 0 defocus, the effects of laser oscillating frequency and oscillating amplitude on weld forming and welding quality of 2-mm-thick 6k21 and 5754 aluminum alloy sheet were analyzed. The experimental results show that with the increase of oscillating amplitude, the weld penetration depth decreased, and the weld width increased first and then decreased. With the increase of oscillating frequency, the weld penetration depth and width decreased. In the absence of welding defects, the shear strength of the specimen was positively correlated with the weld width. The research results can provide theoretical reference for laser welding process of automotive lightweight all-aluminum body connection.

**Key words:** laser welding; oscillating welding; aluminum alloy; control variable method

由于铝合金具有强度高、韧性好、耐腐蚀性能良好、相对密度较低等特点,在汽车制造业中逐渐取代钢材成为实现汽车轻量化发展的重要途径之一。激光焊接以高密度能量的激光作为热源,是一种能量集中、高效精密的焊接方法,在航空航天与汽车生产领域已经获得了广泛应用<sup>[1]</sup>。而铝合金因导热性强、线性膨胀系数大等特点,在焊接时容易出现接头软化、热裂纹、气孔等焊接缺陷。现

代研究表明,若在激光焊接的过程中使激光轨迹发生摆动,则可以明显改善焊接质量<sup>[2-4]</sup>。

文献[2]通过对铝合金扫描激光焊接结果进行数值模拟,对比了不同振荡轨迹与常规激光焊熔池的温度梯度,并分析了扫描频率和扫描幅度的变化对熔池温度场的峰值温度以及温度梯度的影响;文献[3]通过计算焊接过程中的能量输入分布空间和观测熔池表面的流动行为,分析了不同

收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-04-03

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202103a05020024)

作者简介:王健强(1964—),男,浙江宁波人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

摆动轨迹、摆动参数对焊缝形貌成型的影响,得出在多种激光摆动轨迹中,以“∞”形摆动轨迹形成的焊缝表面质量最好的结论,并得出在“∞”形轨迹下的最佳焊接工艺参数;文献[4]采用正交试验和单因素试验分析了摆动工艺参数对接头组织及力学性能的影响,得到焊缝气孔率随摆动幅度、摆动频率的增加而减小的结论,并通过观察不同工艺下焊缝接头的金相组织,得出激光摆动能够抑制柱状晶生长、减少先天裂纹的结论;文献[5]分析了激光摆动频率、摆动幅度对焊缝气孔率产生的影响,得出能够获得无明显气孔的焊缝的工艺窗口,经试验验证焊缝的抗拉强度可以达到母材的88%。

为了分析摆动工艺参数对铝合金焊缝成型的具体影响,文章采用单一因素变量的控制试验,分别对激光摆动频率和摆动幅度对厚度为2 mm、型号为6k21、5754铝合金薄板的焊缝成型和焊接质量的影响规律进行分析,对6k21、5754铝合金摆动激光焊在汽车轻量化方面的工业应用具有一定的指导意义。

## 1 试验设备、材料与方法

### 1.1 试验设备以及试验材料

试验所用材料为6k21、5754型号的铝合金板材,材料尺寸为2 mm×40 mm×100 mm。焊接前使用95%的乙醇溶液清洗板材样件表面,去除表面油污,然后将样件放入干燥箱进行干燥处理。

2种板材样件的化学成分见表1所列。

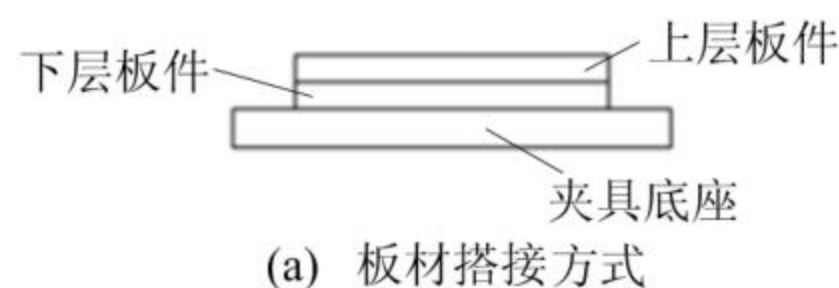
表1 2种铝合金板材的化学成分及其质量分数 %

元素	6k21 铝合金	5754 铝合金
Mg	0.40~0.80	2.60~3.60
Si	0.30~0.60	≤0.40
Fe	≤0.35	≤0.40
Mn	0.05~0.20	≤0.50
Cu	≤0.25	≤0.10
Cr	≤0.20	≤0.30
Ti	≤0.10	≤0.15
Zn	≤0.10	≤0.20
Al	余量	余量

焊接试验设备包括:KUKA六轴机器人,额定负载为60 kg,最大作用范围为2 033 mm;卡门哈斯生产的激光焊接头,可控制激光光束沿焊缝摆动;锐科生产的C6000X型激光发生器,最大功率为6 kW,激光波长为(1 080±5) nm,可调制激

光频率为5~50 kHz,采用芯径0.1 mm的光纤进行传输;WDW-50微机控制电子式万能试验机,拉伸速度可选范围为5~200 mm/min。

焊接板件的搭接形式为叠焊,采用6k21(2 mm)+5754(2 mm)的叠放方式,焊接时试件的搭接和夹持方式如图1a、图1b所示,剪切力测试中试件夹持方式如图1c所示。



(b) 试件焊接时夹持方式



(c) 剪切力测试时试件夹持方式

图1 试验板材的搭接与夹持方式

### 1.2 试验设计及数据处理方法

为探究摆动参数对焊缝成型以及焊接质量的影响程度,本文采用正弦波的摆动形式,分别设计了2组以摆动幅度和摆动频率为单一变量的控制变量试验,试验参数见表2、表3所列。

在试验开始前根据实际生产中的经验,对其余参数进行优化。确定其他参数如下:功率为4 kW,焊接速度为80 mm/s,离焦量为0,焊缝长度为25 mm。

表2 摆动幅度变量控制试验

试验编号	摆动幅度/mm	摆动频率/Hz
1	1.0	85
2	1.5	85
3	2.0	85
4	2.5	85
5	3.0	85

表 3 摆动频率变量控制试验

试验编号	摆动幅度/mm	摆动频率/Hz
6	2.0	50
7	2.0	65
8	2.0	80
9	2.0	95
10	2.0	110

按照表 2、表 3 中的试验参数,对每个编号的试验参数均进行 3 次试验,共计 30 次试验,以减少偶然性因素的影响。

对焊接试样进行切割、预磨、NaOH 溶液浸泡 5 min、风干等处理,使焊缝浮显于母材表面;利用 VMM2.2C 视觉测量系统对处理后的试样焊缝进行观察,记录每组工艺参数下 3 组试验中试件的熔深、熔宽,并计算熔深、熔宽平均值以及深宽比。

按照试验组的参数设置进行剪切力测试,作为焊接接头质量的判断依据。剪切力测试采用 WDW-50 微机控制电子式万能试验机,拉伸速度设置为 20 mm/min。

试验中,激光头与工作台表面的倾角为  $10^\circ$ ,防止铝合金板反射的激光对设备造成损害。

## 2 焊缝成型结果的处理分析

### 2.1 焊缝成型结果处理

试件焊缝成型的试验结果见表 4 所列。

表 4 10 组试验中试件的熔深、熔宽及深宽比

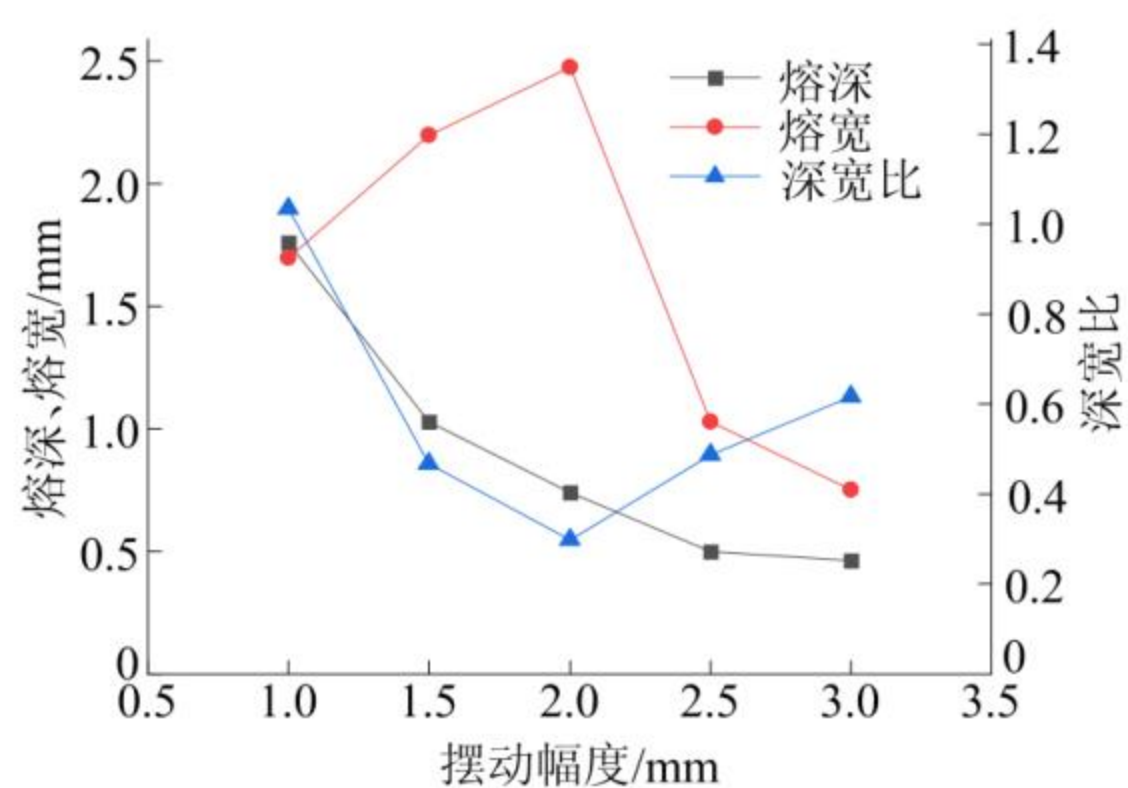
试验编号	熔深/mm	熔宽/mm	深宽比
1	1.757	1.697	1.035
2	1.027	2.197	0.467
3	0.740	2.473	0.299
4	0.500	1.027	0.487
5	0.463	0.750	0.617
6	1.240	2.440	0.512
7	1.030	2.343	0.444
8	0.706	2.313	0.314
9	0.743	2.337	0.330
10	0.673	2.230	0.300

### 2.2 焊缝成型结果分析

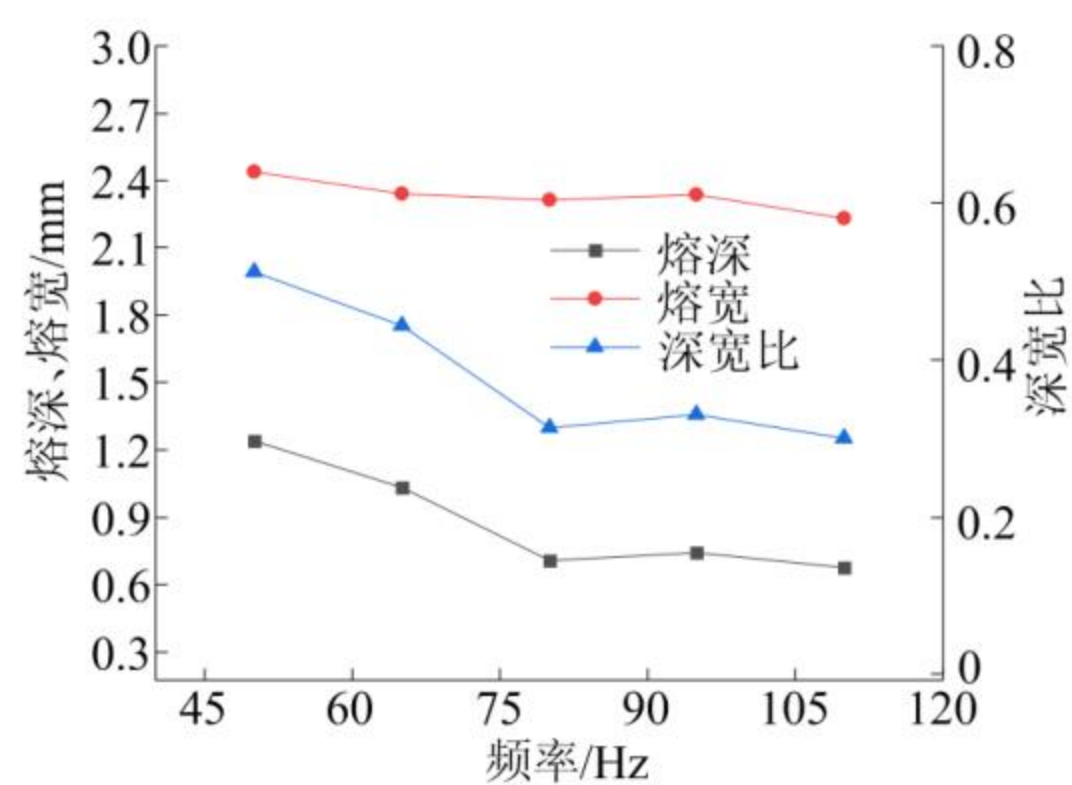
激光热传导焊和激光深熔焊都属于激光焊接,对比适用于薄板材料的热传导焊,激光深熔焊要求更高的能量密度。当激光的能量密度达到一

定阈值时,金属材料会在激光能量的作用下迅速融化和汽化,金属蒸汽由于激光照射会电离生成等离子体;熔化的固液界面在金属蒸汽的压力、流体静压力和流体表面张力的作用下向下凹陷,待孔内达到动态平衡时激光达到匙孔底部;匙孔随着激光照射路径在动态平衡中向前推进,相对向后移动的熔池冷却凝固形成焊缝<sup>[6]</sup>。

对表 4 中的数据进行处理,利用 Origin 软件绘制散点图,结果如图 2 所示。从散点图中可以看出,试件熔深、熔宽及深宽比随摆动幅度和摆动频率变化的规律。



(a) 摆动幅度对深宽比的影响



(b) 摆动频率对深宽比的影响

图 2 熔深、熔宽及深宽比随摆动幅度和摆动频率变化的规律

在激光焊接过程中,激光焊的热源可以近似看作二维高斯分布<sup>[3]</sup>,在 MATLAB 中对焊接过程中的能量分布情况进行数值模拟<sup>[7-11]</sup>。

正弦波摆动轨迹的运动方程为:

$$x(t) = vt \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{A}{2} \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

其中: $v$ 为激光焊接速度; $A$ 为激光轨迹摆动幅度; $f$ 为激光轨迹摆动频率; $t$ 为焊接所需时间。

激光能量在试验板材上的瞬时能量分布近似为:

$$e(x, y, t) = \frac{2\eta P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

其中: $x$  为板件上某点与激光落点之间在平行于焊缝方向上的距离; $y$  为板件上某点与激光落点之间在垂直于焊缝方向上的距离; $r_0$  为激光光斑半径; $P$  为激光功率; $\eta$  为焊缝对激光能量的吸收率; $r$  为焊缝某点距激光热源中心的距离。 $r$  的计算公式为:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (4)$$

考虑到材料导热性能的影响,使用与材料热力学性能有关的参数热传递层  $\delta$  的  $1/2$  代替激光光斑半径  $r_0$ <sup>[12]</sup>, $\delta$  计算公式为:

$$\delta = 4 \sqrt{\alpha t'} \quad (5)$$

其中: $\alpha$  为试件的热扩散系数; $t'$  为激光对材料的作用时间。 $t'$  的计算公式为:

$$t' = \frac{2r_0}{v_{\text{合}}} \quad (6)$$

$$v_{\text{合}} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \quad (7)$$

其中, $v_{\text{合}}$  为激光光斑的合成速度。

更新后的激光瞬时能量分布公式为:

$$e(x, y, t) = \frac{8\eta P}{\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{8r^2}{\delta^2}\right) \quad (8)$$

由于激光摆动周期的大部分时间是照射在熔池中,在焊接过程中试件对激光的吸收率更接近金属液体对激光的吸收率。为了简化计算,将焊接过程中试件对激光的吸收率视为常数,取  $\eta$  为 0.3;式(1)~(8)中部分仿真参数设置<sup>[13]</sup>见表 5 所列<sup>[13]</sup>;摆动幅度、摆动频率根据表 2、表 3 中的试验 1、试验 3、试验 5、试验 6、试验 8、试验 10 设置。

表 5 MATLAB 仿真参数

参 数	数 值
激光功率/kW	4
焊缝长度/mm	25
焊接速度/(mm/s)	80
光斑半径/mm	0.15
激光吸收率	0.3
热扩散系数/(mm <sup>2</sup> /s)	31

将能量的瞬时分布函数对时间  $t$  进行积分,得到激光焊接过程中试件吸收的激光能量在试件上的分布情况为:

$$E(x, y) = \int_0^T e(x, y, t) dt \quad (5)$$

其中, $T$  为激光作用于试件表面的总时间。

仿真得到的能量分布结果如图 3 所示。

从 MATLAB 仿真结果可以看出,随着摆动

幅度的增加,焊缝所吸收的峰值能量下降,能量集中的区域由焊缝中心向两侧移动。这是由于在相同的时间内,越是靠近正弦波顶点,激光落点移动的初始位置与末位置距离越近;而在焊接时,激光的能量近似呈二维的高斯分布,因此在靠近正弦波顶点的位置能够获得更多的激光能量;而摆动频率的增加使得激光的能量在焊缝中的分布更加均匀,且随着频率的上升,能量分布均匀程度趋于饱和。

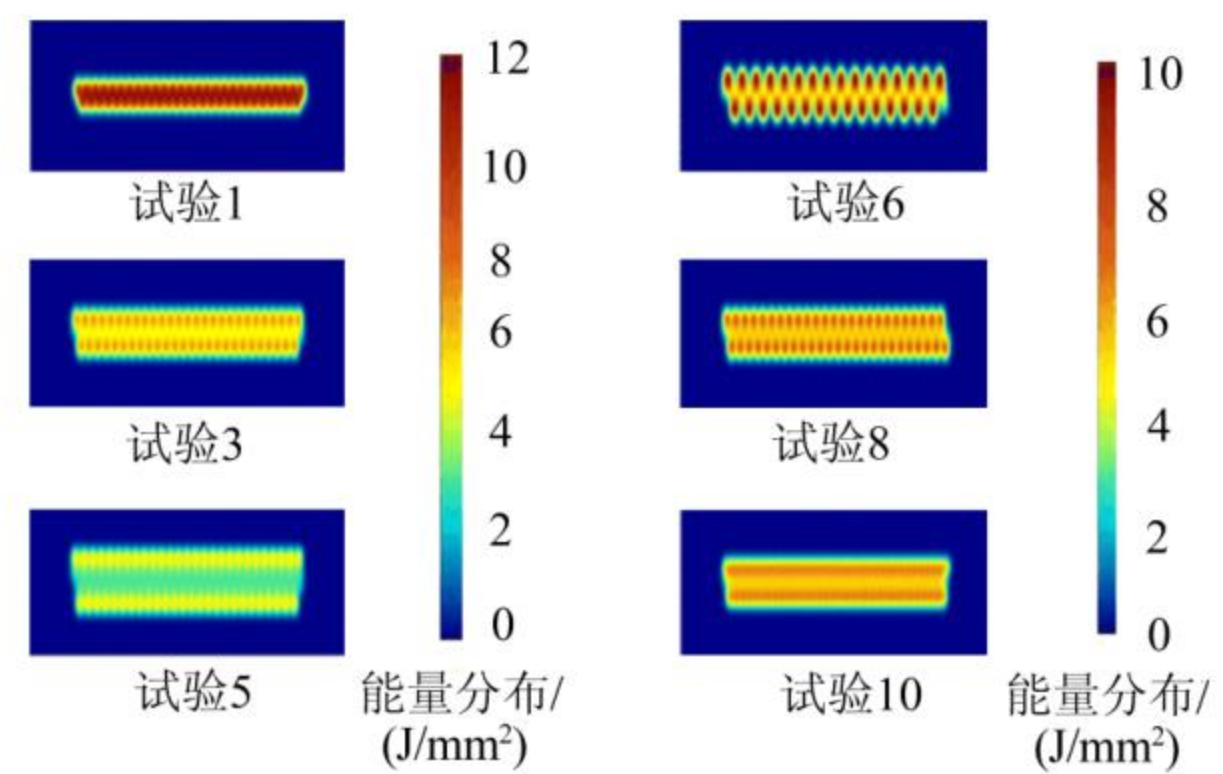


图 3 MATLAB 仿真结果

从表 4 的试验结果可以看出,随着摆动幅度的上升,熔深呈现明显下降的趋势,熔宽先增大后减小。这是由于随着摆动幅度的上升,激光作用在试件材料上的面积增加,能量更为分散,作用于试件表面的能量密度减小,焊接试件表面金属熔池汽化产生的金属蒸汽和等离子体减少,降低了熔池对激光能量的吸收率,并且在激光照射能量密度减小、激光能量吸收率减小的双重作用下导致熔深减小,直至无法达到使下层试件融化的需求,激光在试件表面的作用面积增加,熔宽也随之增加;因为本文以下层试件的焊缝宽度作为焊缝宽度,所以在摆动宽度过大、出现下层试件无法融化的情况时熔宽迅速下降;在摆动幅度达到 3.0 mm 时,仅有焊缝两侧能量较为集中的位置有下层试件融化的现象,中间能量较少的地方无法熔穿下板。

在摆动幅度提升的过程中,深宽比明显下降,焊缝截面的形状也由开始细而长的“钉”形逐渐变为“双峰”形,如图 4 所示,仿真结果中的能量分布情况与试验结果一致。

在摆动频率的单因素控制试验中,摆动频率增加,熔宽略微下降,而熔深在摆动频率从 50 Hz 上升至 80 Hz 时下降幅度明显,在 80 Hz 上升至 110 Hz 时下降幅度减弱。

从仿真结果可以看出:摆动频率上升使激光

的能量沿平行于焊缝的方向分布更加均匀,上升至一定程度后近似均匀分布,摆动频率对熔深的影响减小;同时由于频率增加,单位面积上试件表面单次接收的热输入减小,激光焊接过程中形成的匙孔变浅,激光射入匙孔后的折射次数也相应减少,等离子体与金属蒸汽数量减少使焊缝对激光能量的吸收率下降,焊缝所能吸收的总能量减少,熔深、熔宽均发生了一定程度的下降。

此外,在摆动频率上升过程中焊缝出现了咬边的现象,在摆动频率为 95、110 Hz 时发现了咬边现象,这是由于在一定范围内,频率的增加有助于熔池金属多次融化,改善焊缝的连续性,而频率超过一定值时,频率的增加反而减少了熔池金属在液体状态停留的时间,使焊缝的展开性变差,熔池中的金属融化后无法与焊缝边缘融化的金属融合,形成咬边。

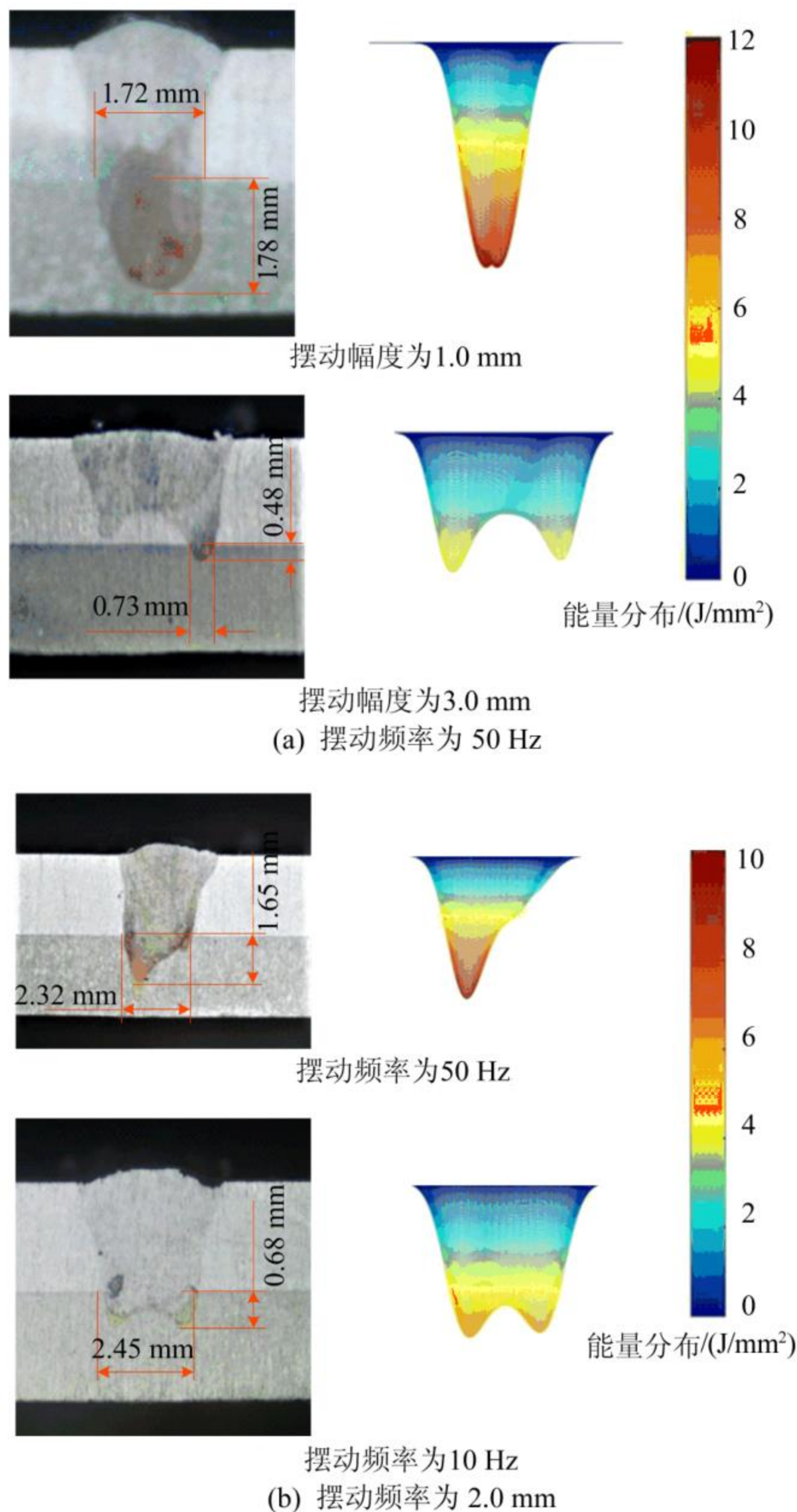


图 4 部分试验结果与 MATLAB 仿真结果的对比

### 3 剪切力测试结果及分析

剪切力测试结果见表 6 所列。

编号	最大剪切力	编号	最大剪切力
1	4.05	6	4.64
2	4.58	7	4.70
3	5.07	8	4.75
4	1.93	9	4.88
5	1.31	10	4.43

试验 1~试验 5 中剪切力和熔深、熔宽的变化曲线如图 5 所示。

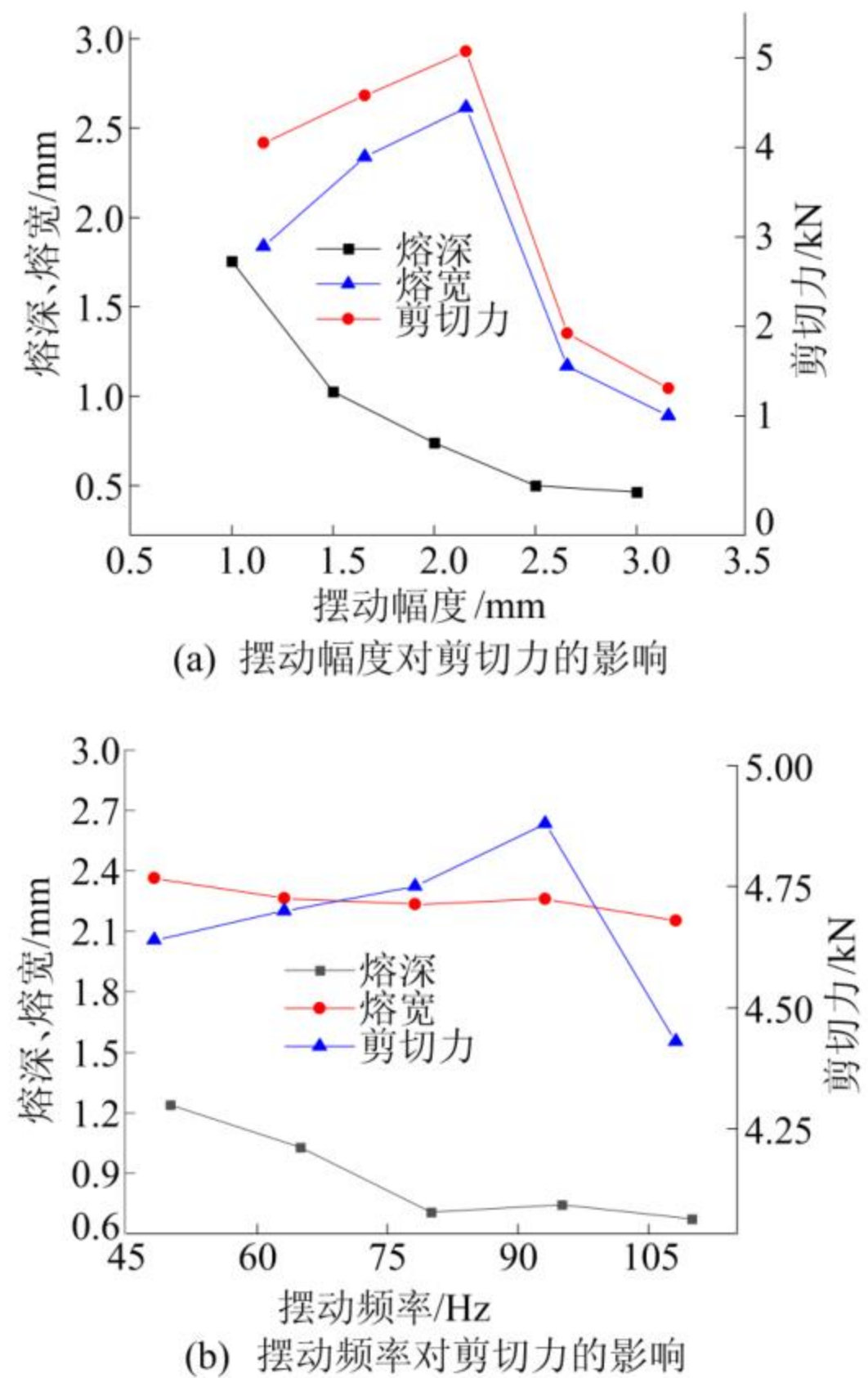


图 5 剪切力随摆动幅度和摆动频率变化的规律

从图 5a 可以看出,试验 1~试验 5 中试件的最大剪切力与焊缝的熔宽呈现出明显的正相关性,在试验 4、试验 5 中,由于焊缝所吸收的激光峰值能量不足,无法使下层试件发生大面积融化,上、下层试件没有完全焊接在一起,使得这 2 组试验中试件的最大剪切力明显下降。

从图 5b 可以看出,在试验 6~试验 10 中,虽然频率对熔宽的影响较小,但是熔深的下降使焊缝的深宽比随之下降,有利于焊接过程中熔池中锌蒸汽、氢气等气体的排出,因此试件的最大剪切力呈现上升的趋势。而观察剪切力试验后断裂的

焊缝截面可以发现,随着摆动频率的增加,焊缝中的气孔数量呈现出下降的趋势<sup>[14-15]</sup>,在试验10中由于咬边现象的产生,变相减小了焊缝的有效宽度,使试验的最大剪切力下降。

#### 4 结 论

本文利用2 mm厚的6k21、5754铝合金板材,分别研究了铝合金摆动激光焊中摆动频率和摆动幅度这2个工艺参数对铝合金摆动激光焊焊缝成形及焊接质量的影响,利用2组单因素变量控制试验及MATLAB数值模拟研究了在一定参数范围内摆动幅度、摆动频率这2个因素对焊缝熔深、熔宽的影响趋势,并根据剪切力测试结果对焊接质量进行分析评估,得到以下结论。

1) 摆动激光焊的摆动幅度对焊缝形貌及最大剪切力的影响较大。试验结果表明,激光摆动宽度的增加有利于焊缝熔宽的增加、熔深和深宽比的减小,有利于焊接过程产生的气体溢出。在焊缝合格的情况下,剪切力与熔宽成正相关,适当增加摆动幅度有利于增大试件剪切力;但是摆动幅度的过度增加,会造成焊缝熔池中吸收到的能量峰值下降,直至无法达到使试件融化的要求。当摆动幅度达到2.5 mm时,焊缝的大部分已经无法熔穿下层试件;达到3.0 mm时只有少数能量集中的部位可以使下层试件发生融化。因此对于试验中使用的试件,在激光功率为4 kW、焊接进给速度为80 mm/s、离焦量为0的情况下,摆动幅度应当取2.0 mm最佳。

2) 摆动频率对熔宽的影响较小,对熔深的影响比对熔宽的影响大。随着摆动频率的上升,焊缝深宽比减小。摆动频率的增加能够使试件金属融化的次数增加,有利于焊接过程中产生的锌蒸汽和氢气溢出,减少气孔数量,但金属反复融化的次数过多会使熔池的延展性减弱,产生咬边,反而降低了焊接质量。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨茹娟. 薄板铝合金搭接接头摆动激光焊接热场和流场的数值分析[D]. 济南:山东大学,2020.
- [2] 王文华. 铝合金振荡扫描激光焊接数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
- [3] 陈凯. 6061 铝合金薄板搭接激光搅拌焊接工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [4] 李尚仁. 中厚板铝合金激光摆动焊接工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [5] 余世文,周昆,张威,等. 6.0 mm厚5183铝合金激光摆动焊接工艺研究[J]. 激光技术,2018,42(2):254-258.
- [6] 巴一,韩善果,杨永强,等. 激光摆动路径对钢/铝点焊接头组织与性能的影响[J]. 红外与激光工程,2022,51(8):224-233.
- [7] 熊智军. 铝激光深熔焊热过程数值模拟研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [8] 吴思根,周昕宇,蒋志伟,等. 低频振荡扫描激光焊接铝合金薄板温度场数值模拟[J]. 应用激光,2019,39(3):440-447.
- [9] LU Y, DENG Y C, SHI L, et al. Numerical simulation of thermal flow dynamics in oscillating laser welding of aluminum alloy [J]. Optics and Laser Technology, 2023, 159:109003.
- [10] 严佑锐凌. 激光摆动模式对钢/铝异种金属焊接接头组织性能的影响[D]. 长沙:湖南大学,2021.
- [11] 孙尧. 异种铝合金激光焊接接头组织性能及温度场数值模拟研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2020.
- [12] 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.
- [13] KENNETH C M. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys [M]. Cambridge, Eng.: Woodhead Publishing, 2002:64-67.
- [14] 毛帅. 5052 铝金光纤激光扫描焊接工艺研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [15] 史平安,万强,颜怡霞. 激光深熔焊中小孔型气孔形成机理的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2018,41(3):104-111.

(责任编辑 胡亚敏)

[1] 杨茹娟. 薄板铝合金搭接接头摆动激光焊接热场和流场的