

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.005

# 入射角度对铝合金激光焊接质量影响的研究

王健强, 李家曙, 赵而远, 贾正

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为了研究激光入射角度对铝合金角接焊接质量的影响,文章以 1.5 mm S600 铝合金和 1.5 mm S600 铝合金角接为研究对象,采用单一控制变量法,获得在不同激光入射角度时的焊缝熔深、熔宽,同时测量得到在不同激光入射角度下焊缝的抗拉强度。试验结果表明:随着入射角度的增大,焊缝熔深减小,焊缝的熔宽先增大后减小,焊缝的抗断裂最大拉力也是先增大后减小;当入射角度为 30°时,焊缝抗拉强度比垂直入射时增加约 35%。研究表明,通过调整激光的入射角度,角焊缝能获得更好的外观质量,同时也能提高焊缝的抗拉强度。

**关键词:**激光焊接;铝合金;控制变量法;入射角度;抗拉强度

**中图分类号:** TG456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)08-1042-04

## Study on the effect of incident angle on the quality of laser welding of aluminum alloys

WANG Jianqiang, LI Jiashu, ZHAO Eryuan, JIA Zheng

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

**Abstract:** In order to study the effect of laser incident angle on the welding quality of aluminum alloy fillet joints, this paper takes 1.5 mm S600 aluminum alloy and 1.5 mm S600 aluminum alloy fillet joints as the research objects, and uses a single controlled variable method to measure the weld penetration and weld width at different laser incident angles and the tensile strength of the weld at different laser incident angles. The test results show that with the increase of the incident angle, the weld penetration decreases, the weld width increases first and then decreases, and the maximum tensile force against fracture of the weld also increases first and then decreases. When the incident angle is 30°, the tensile strength of the weld increases by about 35% compared with that under normal incidence. By adjusting the incident angle of the laser, a better appearance quality of fillet weld can be obtained and the tensile strength of the weld can also be improved.

**Key words:** laser welding; aluminum alloy; controlled variable method; incident angle; tensile strength

汽车车身约占汽车整车装备质量的 35%,车身的轻量化制造将有助于提高新能源汽车电池的续航能力。铝合金材料的密度约为钢的 30%,但强度接近优质钢,且具有良好的冲压性及耐腐蚀性,是制造轻量化车身的首选材料<sup>[1-2]</sup>。

激光焊接自 20 世纪 80 年代就开始应用在汽车领域,按照焊接原理可以分为激光热传导型焊接和激光深熔焊接两大类。铝合金激光深熔焊不

需要填充材料,焊缝通过铝合金试件吸收高能量密度的激光束而熔化,并依靠两侧母材熔液间的扩散、凝固而形成,具有自动化程度高、焊接速度快等特点,且对零件形状的适应性较好;该方法焊接质量稳定、可靠且搭接量小,有利于车身轻量化和降低制造成本。奇瑞某款新能源铝合金车身的侧围及底盘就应用了激光深熔焊接工艺<sup>[3]</sup>。

目前关于铝合金激光焊接的研究有:文献[4]

收稿日期:2022-03-03;修回日期:2022-04-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0104603);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(J2020K03)

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。

通过改变焦点位置研究热处理铝合金 Al 6061-T6 薄板的搭接焊接性,结果表明在激光功率为 2 kW、焊接速度为 2 m/min、焦点位置 0.8 mm、氮气保护气流量为 10 L/min 时形成了声珠,最佳焊接条件下的焊缝强度为母材强度的 52%;文献[5]对 5182 铝合金进行了 YAG 激光填丝焊接特性的研究,方差分析表明,激光功率对焊缝的拉伸强度和埃里克森比的影响较大,同时还发现拉伸强度与埃里克森比密切相关;文献[6]对 1.5 mm 厚 5052 铝合金的连续和脉冲激光焊接工艺进行了研究,通过对焊接试样焊缝成形、力学性能、微观组织和显微硬度的分析,得到最佳的铝合金连续和脉冲激光焊接工艺参数;文献[7]采用试验与模拟相结合方法,探究了激光深熔焊接铝合金过程中气孔的特征、焊接工艺对气孔形成的影响规律,并提出合理控制小孔型气孔的方法;文献[8]建立了 1 mm 厚 6061 铝合金激光焊接的三维数值模拟模型,完成了激光深熔焊铝合金的温度场数值模拟,获得激光焊接铝合金薄板的工艺参数对焊缝成形的影响规律;文献[9]对 6061-T6 铝合金中厚板激光熔透焊接工艺进行了研究,结果表明,在保证熔透焊缝的前提下,不同的工艺参数能获得 3 种不同的焊接接头形状,分别为钉形焊缝、酒杯形焊缝和楔形焊缝,其中钉形焊缝的力学性能最佳;文献[10]对 1.5 mm 厚 3003 铝合金开展了焊接工艺试验,结果表明在表面聚焦下,当焊接速度为 40 mm/s、激光功率为 1 350 W、脉冲频率为 100 Hz、摆动直径为 0.3 mm 时能获得成形良好的焊接接头。而关于激光入射角度对铝合金薄板激光焊接角焊缝成形及焊接质量的研究较少,不同的激光入射角度将影响激光在焊缝表面的能量密度分布以及改变熔化材料的流动方向,因此激光入射角度将对铝合金薄板的角焊缝成形及质量也有着一定的影响。

角焊比叠焊搭接面积更小,因此能进一步节省材料,降低车身的质量。本文以 1.5 mm S600 铝合金和 1.5 mm S600 铝合金角接为研究对象,探讨在不同激光入射角度的条件下焊缝熔深、熔宽和焊缝抗拉强度的变化规律,所得结论将对铝合金角焊工艺具有一定的指导意义。

## 1 试验材料、设备、方法

### 1.1 试验材料

试验中以 1.5 mm 厚 S600 铝合金板作为试验对象,板材尺寸为 100.0 mm × 40.0 mm ×

1.5 mm。S600 铝合金样件中其他金属元素及其质量分数见表 1 所列。试验中对材料进行化学除油、并置于干燥箱中干燥。

表 1 S600 铝合金中其他金属元素及其质量分数 %

元素	$\omega$	元素	$\omega$
Cu	$\leq 0.25$	Si	0.30~0.95
Fe	$\leq 0.35$	Mg	0.40~0.85
Mn	$\leq 0.15$		

### 1.2 试验设备

试验中采用卡门哈斯生产的摆动激光焊接头,焊接时可控制激光沿焊缝圆弧摆动;采用武汉锐科公司生产的型号为 C6000X 光纤激光器,其最大输出功率为 6 kW,连续输出,激光波长为  $(1\ 080 \pm 5)$  nm,采用芯径为 0.1 mm 光纤进行传输;焊接机器人为 KUKAR60Hal 六轴机器人,其额定负载 60 kg,最大作用范围为 2 033 mm。

焊接板件搭接形式是上层板 S600/1.5 mm + 下层板 S600/1.5 mm,如图 1 所示,焊接时板件夹持如图 2 所示。

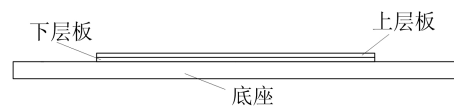


图 1 板件搭接方式



图 2 板件夹持装置

### 1.3 试验方法

为探究不同入射角度对焊缝成形及焊接质量的影响程度,本文设计了一个以入射角度为单一变量的控制变量试验,见表 2 所列。

表 2 控制变量试验设计

试验编号	入射角度/(°)	试验编号	入射角度/(°)
1	0	5	40
2	10	6	50
3	20	7	60
4	30		

试验前期对激光焊接的其余参数进行优化,

确定其余焊接参数为:焊接功率  $P=4\ 000\ \text{W}$ , 焊接速度  $v=80\ \text{mm/s}$ , 离焦量  $f=0\ \text{mm}$ 。

本试验中,激光头保持垂直工作台,通过调整夹持板件夹具的倾斜角度来控制激光相对角焊缝的入射角度。在夹具的一端垫一定数量的物块,通过调整物块的数量,调节夹具的倾斜角度,以此实现激光对角焊缝入射角度的调整。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验数据处理

根据表 2 的设计进行试验,每个试验编号进行 3 次试验,总共 21 次试验,避免出现偶然性因素。

对试验样件进行切割、预磨、NaOH 溶液浸泡 5 min、风干等处理,利用 VMM2.2C 视觉测量系统对处理后的试验样件进行金相观察,获得每个试验编号下 3 次试验中的熔深、熔宽,并将每个试验编号下的熔深、熔宽的平均值作为最终的统计值,得到每个试验编号下的熔深、熔宽、宽深比,具体见表 3 所列。

表 3 7 组入射角度下的熔深、熔宽及深宽比

试验编号	熔深/mm	熔宽/mm	宽深比
1	1.27	2.45	1.93
2	1.11	3.06	2.76
3	0.87	2.80	3.22
4	0.73	2.90	3.97
5	0.33	1.15	3.48
6	0.21	1.08	5.14
7	0.35	1.46	4.17

对表 3 中的试验数据进行处理,利用 Origin 绘图软件绘制散点图,结果如图 3 所示。

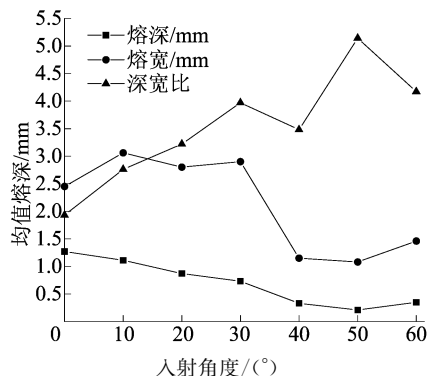


图 3 不同入射角度对焊接熔深、熔宽,宽深比的影响

### 2.2 试验结果分析

激光深熔焊会产生“小孔”效应,激光入射角

度的改变会造成“小孔”作用的熔池位置发生改变。

从图 3 可以看出,熔深与入射角度呈负相关,熔深随着入射角度的增大而减小。这是由于随着入射角度的增大,“小孔”作用的熔池越来越偏离垂直熔深方向,导致熔深的减小;另一方面,熔深随着入射角度的增大而减小可能与焊接时激光能量的利用有关。激光加工铝合金时,会在小孔的上方产生金属蒸气羽烟,金属蒸气羽烟能吸收一部分入射激光的能量,而且随着入射角度的增大,“小孔”上方的蒸气羽烟越来越多,吸收入射激光的能量增多,因而造成能量的利用率降低,焊缝熔深减小。

随着入射角度的增大,下层板中的熔宽与入射角度的关系并不是单一的正相关或负相关。开始时随着入射角度的增大,焊缝的熔宽有增加的趋势;当入射角度大于  $10^\circ$  时,随着入射角度的增大,熔宽并没有增加,反而减小。

下层板中的熔宽可以分为 2 个部分:① 光束直接作用产生的熔宽;② 光束与蒸气复合作用产生的熔宽。

前者受激光入射角度改变的影响很小,后者与激光入射角度密切相关。入射角度在一个小角度范围内增加时,加工产生的金属蒸气大部分停留在熔池内部,金属蒸气对熔池内壁产生一个挤压力,造成熔池的膨胀,因此相较于垂直入射,入射角度小角度范围内增加,下层板中的熔宽会增加;而当入射角度超过  $10^\circ$ ,随着入射角度的增加,激光能量利用降低,熔池位置发生改变,使得熔池到达下层板中的有效面积减小,从而造成下层板中的熔宽减小。

## 3 拉力测试

对表 2 中的 7 组试验进行拉力测试,作为焊接质量的判断依据,焊缝长度为 25 mm。拉力测试采用的是 WDW-50 微机控制电子式万能试验机,工件装夹方式如图 4 所示。



图 4 工件装夹方式

统计不同入射角度下的焊缝断裂最大拉力,结果见表 4 所列。

表 4 拉力测试结果

试验编号	拉力/kN
1	3.22
2	3.81
3	4.14
4	4.34
5	4.70
6	2.92
7	2.35

对表 4 中的试验数据进行处理,利用 Origin 绘图软件绘制散点图,结果如图 5 所示。

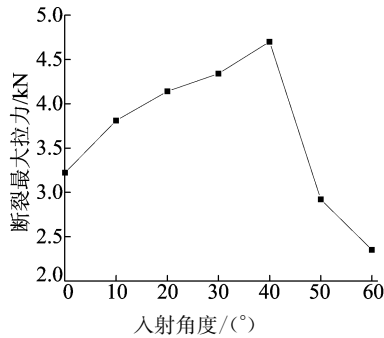


图 5 不同入射角度下的焊缝断裂最大拉力

激光深熔焊中主要的缺陷是气孔,小孔因熔池不稳定而塌陷是造成气孔的主要原因。增大激光入射角度,从流体力学来说,受自身重力及外界大气压力,熔池中的液态金属更容易填充小孔,从而减少小孔的塌陷。

从图 5 可以看出,在一定角度范围内,随着入射角度的增大,角焊缝的抗拉强度会增加,且当入射角度为  $30^\circ$  时,角焊缝的抗拉强度比垂直入射(即入射角度为  $0^\circ$ )时增加约 35%。这是由于入射角度的增大使得焊缝气孔缺陷得到了改善。当入射角度超过某一临界值时,随着入射角度的增大,虽然焊缝气孔缺陷得到了改善,但由于焊缝熔深的减小,角焊缝的抗拉强度会减小;当入射角度为  $60^\circ$ ,角焊缝的抗拉强度为垂直入射的 73%,比垂直入射时的抗拉强度减少约 27%。

由图 5 可知,激光焊接铝合金角焊缝时,选择一个合适的入射角度将能提高焊缝的抗拉强度。

## 4 结 论

本文主要研究不同激光入射角度对铝合金 1.5 mm S600 角接焊缝熔深、熔宽和焊缝抗拉强度的影响,根据试验得出以下结论:

1) 对于 1.5 mm S600 角接,角焊缝的熔深随着入射角度的增大而减小,熔宽随着入射角度的增大,先增大后减小。

2) 对于 1.5 mm S600 角接,角焊缝的抗拉强度随着入射角度的增大,呈先增大后减小的趋势。入射角度不宜过大,过大的入射角度会使获得角焊缝的抗拉强度比垂直入射(入射角度为  $0^\circ$ )时还小。当激光入射角度为  $30^\circ$  时,焊缝质量最佳,角焊缝的抗拉强度相较于垂直入射时增加 35% 左右。

## [参 考 文 献]

- [1] 韩立军. 汽车车身激光焊接技术发展与应用[J]. 电焊机, 2020,50(7):64-73,150.
- [2] 李勇,宋筠毅,程德富,等. 汽车车身铝合金焊接与连接技术[J]. 汽车工艺师,2019(12):57-61.
- [3] 孟原,王成文,李盛良. 激光深熔焊在新能源铝车身上的应用[J]. 时代汽车,2021(22):131-132.
- [4] KIM Y G, KIM M H, JOO S M. Experimental investigation on the laser welding characteristics of 6061-T6 aluminum alloy sheets [J]. Materials Transactions, 2018, 59 (9): 1446-1451.
- [5] PARK Y W, YU J, RHEE S. A study on the weld characteristics of 5182 aluminum alloy by Nd:YAG laser welding with filler wire for car bodies[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(5):729-736.
- [6] 张大文. 铝合金激光焊接工艺研究[D]. 长春:长春理工大学,2012.
- [7] 李凯. 铝合金激光深熔焊接气孔缺陷形成过程研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.
- [8] 张奇奇. 铝合金激光深熔焊温度场数值模拟及改善方案研究[D]. 南昌:南昌大学,2017.
- [9] 丁劲锋,穆绍帅,周注民. 6061-T6 铝合金中厚板激光熔透焊接工艺研究[J]. 热加工工艺,2020,49(17):47-52.
- [10] 范霖康,倪程,徐鸿林,等. 3003 铝合金激光焊接组织和力学性能[J]. 焊接,2021(3):22-25,62.

(责任编辑 胡亚敏)