

## LF6 铝合金双光束激光点焊工艺研究

马轶男<sup>1</sup>, 陶汪<sup>1,2</sup>, 陈彦宾<sup>1</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 国防科技热加工重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 以 LF6 铝合金为实验材料, 进行了双光束激光点焊实验, 对比了双光束激光点焊接头与普通单光束激光点焊的接头, 并且研究了激光功率、点焊持续时间、能量比等对点焊接头形貌和熔合面尺寸的影响。实验结果表明: 在相同的功率下, 双光束点焊增大了匙孔的直径, 提高了匙孔的稳定性, 与单光束激光点焊相比, 焊点内部气孔数量大大减少, 并且熔合面尺寸有了很大的提高; 当激光功率不同时, 焊点的上表面尺寸变化差距不大, 小功率条件下焊点呈“钉状”; 双光束激光的能量比会影响焊点表面的下塌量, 能量比为 1:1 的情况下焊点的下塌量要明显小于能量比为 1.5:1 的情况。

**关键词:** 激光点焊; 双光束; 铝合金; 熔合面; 激光功率

**中图分类号:** O436   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0707-05

## Laser spot welding of LF6 aluminum with double laser beams

Ma Yanan<sup>1</sup>, Tao Wang<sup>1,2</sup>, Chen Yanbin<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute Technology, Harbin 150001, China;
2. National Key Laboratory of Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Experiment of laser spot welding of LF6 aluminum with double laser beams was carried. The cross-section of laser spot welding joints with single laser beam and double laser beams were compared, and the effects of laser power, pulse duration and power ratio on the weld joint dimension were investigated. The experimental results indicate that when the power is fixed, the double laser beams can increase the keyhole diameter and improve the stability of the keyhole, decreasing the number of pores, increasing the dimension of fusion area. It is discovered that the dimension of top sheet's change is small, when the laser power changes. And the area of weld joint in the bottom sheet is smaller than that in the top sheet when the laser power is low. At the same total input power, the crater depth with the laser power ratio 1:1 is much smaller than that of laser power ratio 1.5:1

**Key words:** laser spot welding; double laser beams; aluminum alloy; fusion area; laser power

收稿日期: 2013-07-05; 修订日期: 2013-08-03

作者简介: 马轶男(1982-), 男, 博士生, 主要从事激光点焊方面的研究。Email: tigerman7@163.com

导师简介: 陈彦宾(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光加工基础及应用方面的研究。Email: chenyb@hit.edu.cn

## 0 引言

铝合金是一种航空航天工业中常用的材料,具有高的比强度,好的可成型性,低温下仍具有良好的机械性能以及优良的抗腐蚀性能。点焊技术是一种常用的材料连接技术,应用也较为广泛。但是由于铝合金表面常常覆盖有一层高熔点、高密度、低导热率的氧化膜,在点焊的过程中接触电阻幅值大且不稳定,焊点的质量会随着焊接工艺参数的变化波动非常大,导致焊点的可靠性明显下降<sup>[1]</sup>。

激光点焊技术由于其自身速度快、精度高、热输入量小、工件变形小等特点,近年来激光焊受到了很大的关注<sup>[2-5]</sup>。但是由于铝合金特殊的物理性质,在焊接过程中极易产生各种缺陷<sup>[6-9]</sup>。其中气孔是铝合金激光焊接过程中的一种非常严重的问题,它会极大的恶化焊缝的机械性能<sup>[10]</sup>。产生气孔的原因有很多,但其中铝合金在激光焊接锅中匙孔的不稳定性是重要原因之一,这是由于匙孔较窄,容易产生颈缩造成的。而通过已有研究<sup>[11]</sup>发现,双光束激光可以很好地降低铝锂合金焊接过程中产生气孔的倾向。

针对于此,文中提出采用双光束激光的方法,扩张并稳定匙孔,从而减少铝合金激光焊过程中气孔的产生。并就工艺参数对双光束点焊的焊接规律进行了初步的研究。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验用母材为 LF6 铝合金。LF6 属于 Al-Mg 系合金,为非时效强化铝合金。LF6 铝合金的强度比纯 Al 高,焊接性好。该铝合金在常温下的组织为  $\alpha$  固溶体和  $\beta$  相 ( $Al_3Mg_2$ ) 及弥散分布的二次强化相  $\beta'$  ( $Mg_{23}Al_{30}$ )。试样尺寸为 100 mm×25 mm×1 mm,其主要的化学成分如表 1 所示。

表 1 LF6 铝合金化学成分(wt.%)

Tab.1 Chemical composition of LF6 aluminum (wt.%)

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Content	0.4	0.4	0.1	0.5-0.8	5.8-6.8	0.2	0.01-0.2	margin

### 1.2 实验方法

焊接试验采用德国 ROFIN-SINAR 生产的射频激励扩散冷却 CO<sub>2</sub> 激光器。最大功率为 3 kW,光束最小直径为 0.2 mm。图 1 所示为在实验中的双光束激光点焊的示意图。

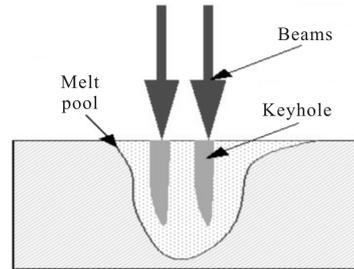


图 1 双光束激光点焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser spot welding with double laser beams

在焊接试验进行之前,首先用丙酮去除工件表面上的油污,然后将试件放入 40~60 °C 的 NaOH 溶液中碱洗 5 min,再将带有挂灰的试件放入 30% 的硝酸中漂洗 3 min 左右,最后用清水再将试件冲洗一遍。清洗完后,用压缩空气将残留在试件表面的水吹干。并将试件放入烘干炉中,在 50 °C 左右的炉温中烘干约 15 min。

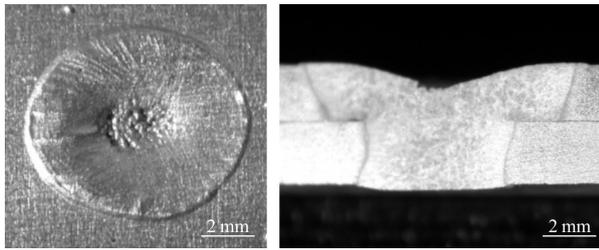
焊后将接头进行垂直切割,并将镶好的试样利用砂纸磨光,然后用直径为 1  $\mu$ m 的金刚石抛光剂进行抛光,抛光后的试样采用腐蚀剂(HF 1 ml:HCl 1.5 ml:HNO<sub>3</sub> 2.5 ml:H<sub>2</sub>O 95ml)腐蚀。

利用 OLMPUS 金相显微镜对接头成型进行观察;在 INSTRON-5569 电子万能材料试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 1.0 mm/min。

## 2 实验结果及讨论

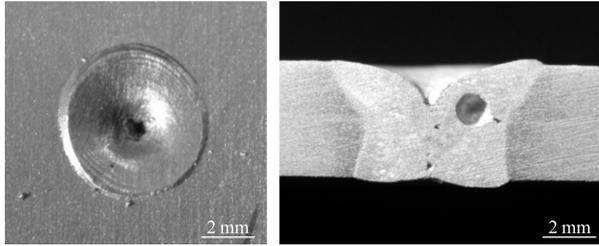
### 2.1 铝合金单光束与双光束激光焊接头形貌对比

图 2 是单光束与双光束的激光点焊焊点上表面与横截面形貌对比,单光束的焊点表面为圆形,焊点的中心处存在明显的下塌。双光束点焊的表面呈椭圆形,并且在焊点中心位置未出现明显的下塌,主要原因是热源并不是完全对称造成的,与双光束光斑同轴的方向焊点宽度较大,垂直方向宽度较小,并且双光束的作用使得熔池的凝固规律也发生变化,液态金属回填变得溶液,减少了出现下塌的倾向。



(a) 双光束点焊焊点

(a) Joint of laser spot welding with double laser beams



(b) 单光束点焊焊点

(b) Joint of laser spot welding with single laser beam

图2 单双光束点焊焊点表面及截面的形态

Fig.2 Macroscopic of laser spot welding joint with single or double laser beams

由于较大的加热面积,使双光束的点焊接头融合面直径达到7 mm作用,明显大于单光束激光所获得的点焊接头融合面直径。而由于双光束使熔池内小孔的直径增大,并且更加稳定,从而抑制了气孔的产生,使得双光束激光点焊接头内的气孔数量及尺寸明显小于单光束激光点焊接头。

另外,双光束情况下,光束加热的面积更大,因此相对单光束点焊而言,相同热输入下双光束点焊的焊点熔深会相对较浅,但熔宽较大,形成的焊点截面积也就越大。

## 2.2 铝合金双光束激光点焊焊接特性

### 2.2.1 不同功率对焊点成型的影响

表2所示为不同激光功率下双光束点焊的焊点形态以及熔合面尺寸。从表2的不同功率下的双光束点焊的焊点形态照片可以看出,不同功率下,焊点的上表面尺寸变化差距不大,焊点截面的上半部分熔化面积都比较大,小功率下工件下半部分的熔化面积明显小于上半部分,接头呈不连续的T型。

从表2中可以发现,当激光功率为2 000 W时,焊点上下部分熔化尺寸差异较大,焊点下半部的熔化尺寸仅是上半部分熔化尺寸的54%,在这种情况下,融合面的边缘处容易出现气孔缺陷,并且该位置

的应力集中较大,对焊点的力学性能产生不利影响;而当激光功率为2 300 W时,焊点下半部分的熔化尺寸为上半部分熔化尺寸的80%。

表2 不同激光功率下双光束点焊的焊点形态以及熔合面尺寸

Tab.2 Dimensions of fusion area and macroscopic of two laser beams spot welding joint with different laser powers

Laser power/W	Macroscopic	Dimensions of fusion area /mm
2 000		3.4
2 300		5.1
2 500		6.4

这主要是由于双光束激光分摊激光功率,降低了激光的能量密度,弱化了激光的穿透能力,使熔化主要集中在金属板的上板,导致金属上下板熔化情况差异较大。当激光功率提高后,激光束的穿透能力得到提高,增大了金属板下板的熔化面积。而当激光功率提高到2 500 W时,金属上下板的熔化面积基本相同。

实验中双光束是通过激光器自身所带的分光镜将单束的激光一分为二而实现的,因此相对应的激光的总功率也被分为两部分,激光束的穿透能力也随之下降。当激光功率较小时,激光穿透能力较弱,能量主要集中于上部,而随着激光功率的加大,激光的穿透能力加强,下板熔化面积增加。

### 2.2.2 焊接时间对焊点成型的影响

图3所示为相同功率不同焊接时间的双光束激光点焊焊点上表面及横截面形貌。从图中可以看到,与上一小节分析结果相类似,金属板的上半部分首先发生熔化并且很快接近熔化尺寸的极限值。随着

焊接时间的增加,金属板上半部分熔化尺寸变化不大,但是下半部分熔化尺寸增长明显。当焊接时间较短时,主要是上金属板发生熔化,下金属板熔化面积较小,上下金属板的熔化面积相差较大,焊点的横截面呈 T 形;而随着焊接时间的增加,上下金属板熔化面积差距逐渐减小,焊点的横截面形貌也变成 I 形。

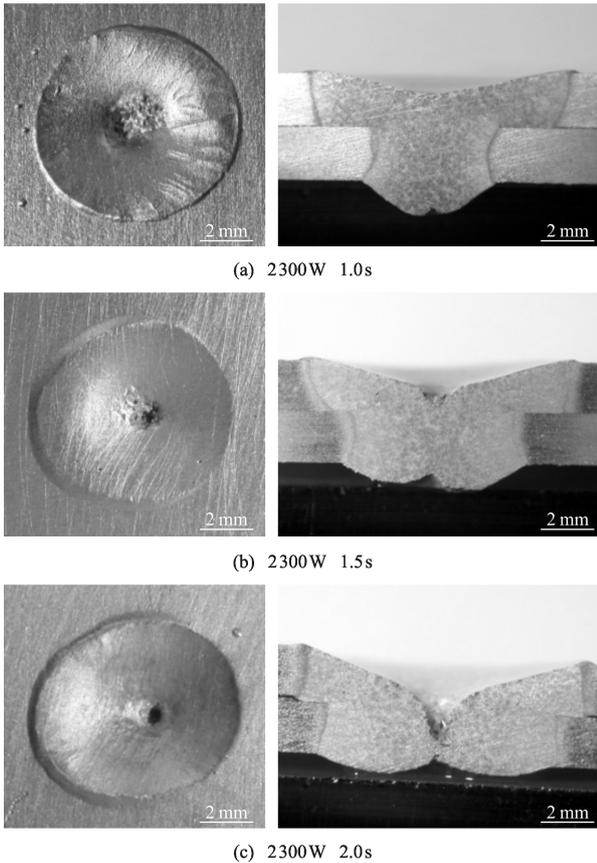


图 3 不同时间下焊点形貌

Fig.3 Macroscopics of weld joints with different joining time

图 4 和图 5 分别所示为熔合面尺寸以及焊点表面下塌量随焊接时间变化的曲线图。从图 4 中,可以很清楚的发现,随着焊接时间的增加,焊点的上下部的熔化面积都有较大的增加,但是当达到焊接时间达到 1.5 s 时,上部的熔化面积基本达到最大值,而下部的熔化面积仍然以较大幅度增加。这主要是由于激光自身的高的热密度和铝合金较高的热导率所导致的。

图 5 所示为焊点上表面下塌量随焊接时间变化的柱状图。从图中可以发现,随焊接时间的延长,焊点上表面的下塌量也会发生明显增加。当焊接时间为 1.5 s 时,焊点上表面的下塌量超过金属板厚度的 50%。

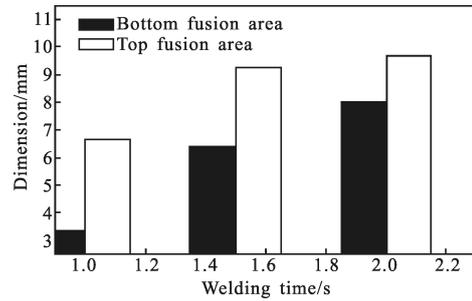


图 4 熔合面随时间变化曲线

Fig.4 Curves of the area of fusion vary with the time

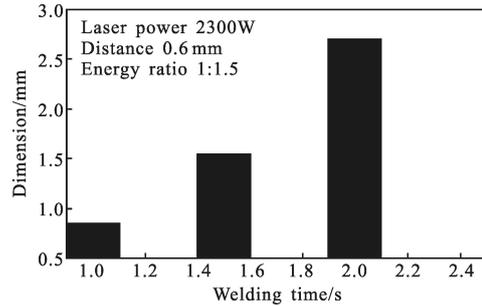


图 5 下塌量随时间变化曲线

Fig.5 Curves of the crater depth vary with the time

### 2.2.3 不同光束能量比对焊点成型的影响

分别采用光束能量比为 1:1 和 1.5:1 的双光束激光进行激光点焊时间,并且对比起所获得的实验结果,如表 3 所示。

表 3 不同光束能量比下双光束点焊的焊点形态

Tab.3 Macroscopic of two laser beams spot welding joint with different energy ratio

Energy ratio	Laser power/W	
	2 300	2 500
1:1		
1.5:1		

当光束能量比为 1:1 时,整体焊点的形貌是对称的,并且当激光功率发生变化时,焊点的熔合面未

出现明显的不连续性,从而可以降低在熔合面处出现缺陷的几率;而当光束能量比为 1.5:1 时,焊点的横截面形貌出现了非对称现象,能量较低一侧会降低激光束的穿透能力,导致下金属板熔化面积较小,上下金属板的熔合面也不连续。除此之外,能量较低的一侧还有可能由在熔合面处出现气孔等缺陷。

不同的能量比会影响焊点局部的激光束密度,从而影响激光的穿透性。当局部激光束的能量密度较低时,会影响激光束的穿透能力,导致熔化主要发生在上金属板,下金属板的熔化不充分,影响最终的焊点上下金属板熔合面的连续性,并且当局部的激光束能量密度较低时,有可能不能将下金属板表面的氧化膜蒸发完全,从而形成气孔等缺陷,影响焊点的力学性能。

另外,从表 3 中还可以发现,不同的激光束能量比还会影响到焊点表面的下塌情况。当光束能量比为 1:1 时,焊点表面下塌区域较为圆滑,且焊点中心部位也没有出现明显的凹坑;而当光束能量比为 1.5:1 时,焊点中心部位有明显的凹坑存在,且随着激光功率的加大,凹坑的深度明显增加。由于凹坑的存在容易导致应力的集中现象,影响焊点力学性能,由此可见,光束能量比为 1:1 较为适合。

由此可知,双光束激光的光束能量比对于点焊接头的成型产生较大的影响。低能量一侧,激光穿透能力弱,大部分能量只能作用在上板,使下板熔化效果较差,上下板焊点之间的连续性也较差。而能量高的一侧,激光穿透能力强,下板接受到的激光能量较多,下板焊点之间的连续性也较好。

### 3 结 论

(1) 双光束点焊增大了匙孔的直径,提高了匙孔的稳定性,减少了焊点内部气孔倾向,并且提高了熔合面尺寸。

(2) 激光功率及持续时间主要影响双光束激光点焊焊点的下半部分的熔化面积,对焊点的上表面尺寸无明显影响。

(3) 不同的能量比对于焊点表面的下塌有着较大的影响,在相同的输入总功率下,激光能量比为 1:1 的情况下焊点的下塌量要小于激光能量比为 1.5:1 的情况。

### 参 考 文 献:

- [1] Tao Wang, Chen Yanbin, Li Liquan, et al. Process characteristic of laser spot welding of aluminum alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 559-663. (in Chinese)  
陶汪, 陈彦宾, 李俐群, 等. 铝合金激光点焊工艺研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 559-663.
- [2] Tao Wang, Chen Yanbin, Li Liquan, et al. An experimental study on laser spot welding of 304 stainless steel[J]. *Applied Laser*, 2005, 25(4): 233-236. (in Chinese)  
陶汪, 陈彦宾, 李俐群, 等. 304 不锈钢激光点焊工艺研究[J]. *应用激光*, 2005, 25(4): 233-236.
- [3] Andreas Ostendorf, Thorsten Temme, Jehad Zeadan. Laser spot welding of electronic micro-parts [C]//Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004, 5662: 306-312.
- [4] Shao Jiaqing, Yan Yong. Automated inspection of micro laser spot weld quality using optical sensing and neural network techniques [C]//Proceeding of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006: 606-610.
- [5] Hans J Herfurth, Stefan Heinemann. Robotic remote welding with state of the art CO<sub>2</sub> lasers [C]//Fraunhofer Center of Laser Technology, 2005: 14-16.
- [6] Jouvard J M, Girard K, Perret O. Keyhole formation and power deposition in Nd: YAG laser spot welding[J]. *Applied Physics*, 2001, 34: 2894-2901.
- [7] Juhl T W Olsen. Assessment of hot crack properties of laser welded stainless steel alloys[C]//SPIE, 2003, 4831: 128-134.
- [8] MYS T, Geiger M. Use of pulse in laser spot welding of materials with high optical reflection [C]//SPIE, 2003, 5063: 221-225.
- [9] Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding [J]. *Welding International*, 2002, 17(6): 431-437.
- [10] Wang Guozhen, Wang Chunming, Wang Jun, et al. Effects of gap on porosity during laser lap joining with filler wire of Al 5754 sheets [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, 39(12): 1203001-1-1203001-6. (in Chinese)  
王国振, 王春明, 王军, 等. 间隙对 5754 铝合金激光填丝搭接焊气孔的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203001-1-1203001-6.
- [11] Chen Kai, Yang Wuxiong, Huang Rui, et al. Porosity control of 1420 Al-Li alloy by dual-beam laser welding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 133-138. (in Chinese)  
杨铠, 杨武雄, 黄瑞, 等. 1420 铝锂合金双光束激光焊接气孔控制[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 133-138.