

热输入对铝合金光纤激光穿透焊缝成形的影响

许 飞 杨 璟 巩水利 毛智勇 芦 伟

(北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘要 在 2.5 mm 厚 6061 铝合金光纤激光穿透焊接实验的基础上, 着重研究了焊接热输入对焊缝成形的影响。结果表明, 光纤激光穿透焊的焊缝熔宽随焊接热输入的增加而增加, 且背面熔宽的增幅更快。激光功率越高, 获得稳定全熔透焊缝的热输入调节范围越大。焊接接头熔合区附近为柱状晶组织, 焊缝中心为柱状晶和等轴晶的混合组织。随焊接热输入的逐渐降低, 焊缝区显微组织逐渐细化, 且混合组织中柱状晶所占比例逐渐减少。另外, 随热输入的逐渐降低, 焊缝区的平均显微硬度缓慢增长, 焊缝区上部和下部的显微硬度数据分散性逐渐减小, 当焊接热输入约为 90 J/mm 时, 焊缝上部和下部的显微硬度对称性最好。

关键词 激光技术; 6061 铝合金; 光纤激光焊接; 穿透焊; 焊缝成形; 显微组织; 显微硬度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1203001

Effect of Heat Input on Weld Appearance for Fiber Laser Beam Full Penetration Welding Aluminum Alloy

Xu Fei Yang Jing Gong Shuili Mao Zhiyong Lu Wei

(Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract Based on the experiments of fiber laser beam welding 6061 aluminum alloy with 2.5 mm thickness, the effects of heat input on full penetration weld appearance are investigated. The results show that the weld width of the penetration weld increases with increasing the heat input, and the change amplitude of the weld back is greater than that of the weld front. When the stable fully penetration weld is used, a higher laser power results in a broader adjustable range of the heat input. Fine columnar microstructure is formed near the fusion zone, and the mixed microstructures (including columnar grains and equiaxed grains) is distributed in the center of the weld. When the heat input is reduced, the microstructures of the weld zone tend to fine, and the proportion of the equiaxed grains in the mixed microstructures decreases. In addition, with the heat input decreasing, the microhardness of the weld zone increases slightly, and the microhardness data dispersity between the weld up and weld bottom decreases. When the heat input is about 90 J/mm, the microhardness symmetry of weld up and weld bottom is best.

Key words laser technique; 6061 aluminum alloy; fiber laser beam welding; penetration welding; weld appearance; microstructure; microhardness

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 350.3390

1 引 言

激光焊接具有高焊接速度、低热输入和热损伤、低残余应力等优点, 相对于常规焊接方法, 激光焊接更加适合于铝合金的焊接^[1-3]。大功率高亮度光纤激光是激光技术发展的飞跃, 为激光焊接提供了更大的发展空间。相对 YAG、CO₂ 等其他类型激光, 光纤激光具有更好的光束质量和激光亮度^[3]。激光亮度是指光源在单位面积上向某一方向单位立体角

内发射的功率。光纤激光的亮度比 YAG 激光或 CO₂ 激光高 1~2 个数量级, 且光束可靠性高, 电光转化效率提高至 25%~30%^[4], 抽运源寿命高于 50000 h。光纤激光功率的大幅度提升, 使大功率高速焊接成为可能, 这不仅将进一步降低焊接热效应和结构焊接变形, 而且可以实现便携式现场移动焊接, 提高了激光焊接的工程适应性。目前对 CO₂ 激光或 YAG 激光开展的激光焊接方面的研究较

收稿日期: 2014-05-26; 收到修改稿日期: 2014-07-15

作者简介: 许 飞(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铝合金激光焊接方面的研究。E-mail: xufei_0623@163.com

多^[5-6],关于光纤激光焊接方面的研究已逐渐引起重视^[7-8],但是对激光穿透焊条件下的焊缝成形研究却很少。本文采用大功率光纤激光焊接系统对6061铝合金进行了激光穿透焊接实验,着重研究了焊接热输入对焊缝成形的影响规律,为航空铝合金的推广应用提供数据参考。

表1 6061铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Ti	Al
0.66	0.42	0.27	0.93	0.05	0.08	0.08	0.04	Bal

实验以高功率光纤激光器为核心的激光焊接系统来实现焊接。采用六轴机械手来实现机械传动。激光通过光纤传输并反射后聚焦于工件表面,聚焦镜焦距为160 mm,焦斑直径为 $\Phi 0.28$ mm。激光束的中轴线与焊接平面法线成 10° ,焊接过程中工作台静止,由机械手带动激光头相对运动来实现激光焊接。焊接过程中采用零离焦,通入两路氩气对焊接高温区进行全方位保护:背保护(流量20 L/min)和侧吹保护(流量15 L/min)。

焊接实验采用平板堆焊方式,金相试样从焊缝中直接截取。用Olympus PMG3光学显微镜观察接头显微组织,腐蚀剂为2%~3% NaOH碱溶液。用HXD-1000硬度测试仪测量接头的显微硬度分布,沿焊缝→熔合区→母材依次进行测试,间隔为0.2 mm,测量载荷为0.2 N,加载时间为15 s。比较系统地对比分析了不同焊接热输入对光纤激光焊缝宏观形貌、接头微观组织和显微硬度分布的影响。

2 实 验

实验材料为2.5 mm厚6061-T651铝合金,其化学成分如表1所示。板材尺寸为200 mm×100 mm,焊前用化学清洗方法彻底去除试板表面的油污和氧化膜。

3 结果与讨论

3.1 热输入对焊缝几何尺寸的影响

焊缝背宽比 R_w 是焊缝背面熔宽与正面熔宽之比,可表征焊接的全熔透性和热源作用的强弱,同时也可以反映穿透性小孔形成的稳定性^[9]。利用背宽比定量表征焊缝成形,具有一定的实际意义。图1所示为焊接热输入对光纤激光焊缝熔宽和背宽比的影响。可以看出,当焊接热输入低于某一阈值时,焊接接头熔透性由稳定全熔透变为不稳定半熔透或未熔透。不稳定半熔透状态的焊缝背面熔宽呈断续状,内部弥散分布大量工艺气孔,无法满足焊缝质量要求。实现全熔透焊接是获得无气孔焊缝和性能良好焊接接头的前提条件^[10]。由于光纤激光的光斑直径非常小,激光功率密度非常大,因此全熔透焊接的临界热输入阈值与激光功率关系不大,临界热输入阈值较低(35~40 J/mm)。

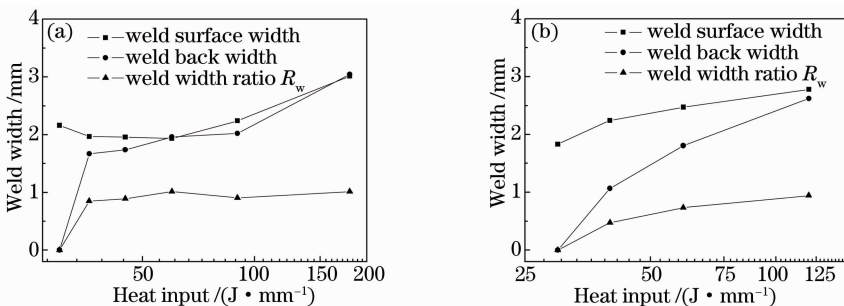


图1 热输入对焊缝熔宽的影响。(a) 4.5 kW; (b) 3 kW

Fig. 1 Effect of heat input on weld width. (a) 4.5 kW; (b) 3 kW

当实现稳定全熔透焊接时,焊缝正面熔宽和背面熔宽均随焊接热输入的增加呈增长趋势,且背面熔宽的增长更快。由于激光穿透焊时熔池上、下表面附近均存在高温金属蒸气/等离子体的热辐射和熔池流动传热,此时激光的热作用可以看作是“两点一线”热源^[11]。当焊接热输入增加时,金属蒸气和

等离子体的热辐射和熔池流动传热作用均增强,尤其熔池背面的增幅高于熔池正面,导致焊缝背面的增幅更大。但是,焊接热输入对焊缝背宽比的影响较小。实验表明,当焊缝背宽比 R_w 大于0.6且焊缝成形较好时,焊缝的性能较好且数据分散性较小。光纤激光焊接由于非常高的功率密度导致焊接熔池

非常小,当采用大功率(4.5 kW)穿透焊接时,随热输入的增加,正面熔宽和背面熔宽差异较小,焊缝背宽比始终保持在0.8以上,即焊缝横截面上下几何形状基本对称,如图2所示。当采用较小功率(3 kW)实现穿透焊时,随热输入的增加,正面熔宽和背面熔宽差异逐渐缩小,但背面熔宽始终小于正面熔宽。因此,采用高功率的光纤激光焊接是非常好的连接方法,可以获得熔宽均匀、焊缝横截面上下几何形状对称度高的焊缝,而且激光功率越高,获得稳定全熔透焊缝的焊接热输入调节范围更宽。

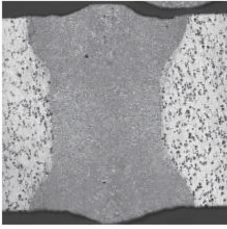


图2 光纤激光焊接接头典型形貌(4.5 kW,60 J/mm)
Fig. 2 Cross-section of fiber laser beam welding joint (4.5 kW, 60 J/mm)

当焊接热输入超过某一阈值时,焊接接头熔透性由稳定全熔透变为过熔透状态。过熔透状态的焊

缝正面熔宽和背面熔宽均较大,虽然焊缝内部很少出现气孔等缺陷,但是经常伴随着焊缝正表面下塌、缩沟、成形不良等现象,严重时甚至出现焊漏缺陷,因此过熔透焊缝在工程实践中也受到一定的限制。

3.2 热输入对接头显微组织的影响

当激光功率为4.5 kW时,不同热输入条件下的焊接接头显微组织如图3所示。可以看出,母材晶粒呈多边形,几何形状比较规则,显微组织为 α -Al和弥散分布的强化相 Mg_2Si ,接头的热影响区和熔合区均很窄。与母材组织相比,焊缝组织非常细小。柱状晶组织以熔合区局部熔化的晶粒为现成界面形核,沿最大温度梯度方向(即与熔合线相垂直的方向)呈联生结晶,外延长大^[12]的方式向焊缝中心生长。柱状晶的生长将大量溶质元素推向液体前沿,液体金属成分过冷最终导致熔池中心柱状晶被抑制,为等轴晶的形核提供了条件。熔池中未熔化的悬浮质点进一步加剧了等轴晶的形核和长大。由于光纤激光焊接能量密度高度集中、熔池体积小、焊接速度快,所以在熔池快速凝固过程中,焊缝中心呈现出柱状晶和等轴晶的混合组织,如图3(d)~(f)所示。

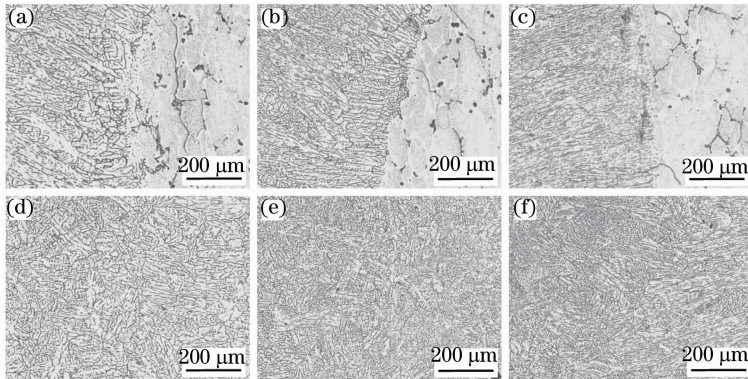


图3 光纤激光焊接接头熔合区(a), (b), (c)和焊缝中心(d), (e), (f)显微组织。(a)和(d) $E=180$ J/mm;
(b)和(e) $E=90$ J/mm; (c)和(f) $E=45$ J/mm

Fig. 3 Microstructure of (a), (b), (c) fusion zone and (d), (e), (f) weld center by fiber laser beam welding.
(a) and (d) $E=180$ J/mm; (b) and (e) $E=90$ J/mm; (c) and (f) $E=45$ J/mm

对比不同热输入条件下的接头显微组织可以发现,当焊接热输入高达180 J/mm,即焊接接头处于过熔透状态,熔合区附近的柱状组织比较粗化,如图3(a)所示。热影响区的范围较宽(60~80 μm),焊缝中心呈现出较为粗大的混合组织,等轴晶所占比例较多。这是由于过熔透状态时的焊缝较宽,焊接熔池体积较大,熔池凝固时间相对较长,等轴晶有足够的时间长大,二次枝晶相对比较发达。当焊接接

头处于全熔透状态时,随焊接热输入的逐渐降低,热影响区的范围逐渐变窄(20~50 μm),熔合区附近的柱状组织和焊缝中心的混合组织均呈现逐渐细化特征,且混合组织中等轴晶所占比例逐渐降低。当热输入降至90 J/mm时,混合组织中等轴晶所占比例小于50%。焊缝组织经历快速熔凝过程后,呈现出亚共晶组织特征,即为初晶 α -Al和细小的共晶组织(α -Al+Si)。由于焊接接头熔合区附近的显微组

织差异最大,因此很可能成为焊接接头的薄弱部位。

3.3 热输入对接头显微硬度的影响

在不同热输入条件下,焊接接头的显微硬度测试结果如图4和图5所示。从图4中可以看出,当热输入较大时,接头的热影响区软化现象较为严重。随着热输入的逐渐减小,焊接接头的热影响区由于其范围变窄导致该区软化现象减弱,焊缝区的平均显微硬度值略有增加。这与焊缝区显微组织随热输入的降低呈逐渐细化的趋势相一致。因此,在保证熔透性且较好成型的前提下,采用较小的焊接热输入能够获得更加细小的显微组织和显微硬度更高的焊缝金属。

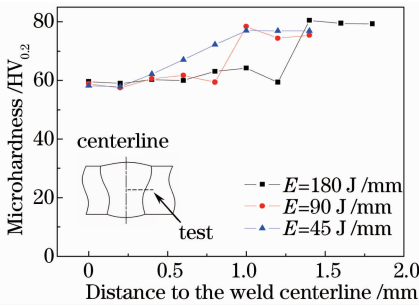


图4 焊接接头横截面的横向显微硬度分布
Fig. 4 Distribution of microhardness of joint in transverse direction

从图5中可以看出,光纤激光焊接接头上部和下部的显微硬度值存在一定的不均匀性。从焊缝背面到焊缝正面,显微硬度值呈逐渐减少的趋势。一方面激光在熔池正面上方的作用时间更长,导致焊缝上部金属吸收的能量多,另一方面在激光焊接过程中小孔的上部存在更多的高温金属蒸气/等离子体,它们通过热传导的方式加热焊缝的表面,进一步增大了焊缝顶部的热输入,致使该区域熔池的冷却速度略微下降,晶粒生长时间相对较长,晶粒相对粗大^[13]进而导致该区域显微硬度略有降低。

对比发现,当焊接热输入较高且接头处于过熔透状态时,焊缝熔宽较宽,焊缝上部和下部组织的显微硬度值相差虽然不大,但数据分散性较大,如图5所示,不利于获得力学性能均匀的焊接接头。随着焊接热输入的逐渐降低,焊缝上部和下部组织的显微硬度数据分散性逐渐减小,如图5(b)和(c)所示。尤其当焊接热输入在90 J/mm附近时,焊缝上部和下部组织的显微硬度值基本对称,此时焊接接头的力学性能均匀性最好。当焊接热输入继续降低时,焊缝上部和下部的显微硬度差异逐渐增加,即焊接接头的力学性能均匀性逐渐降低。

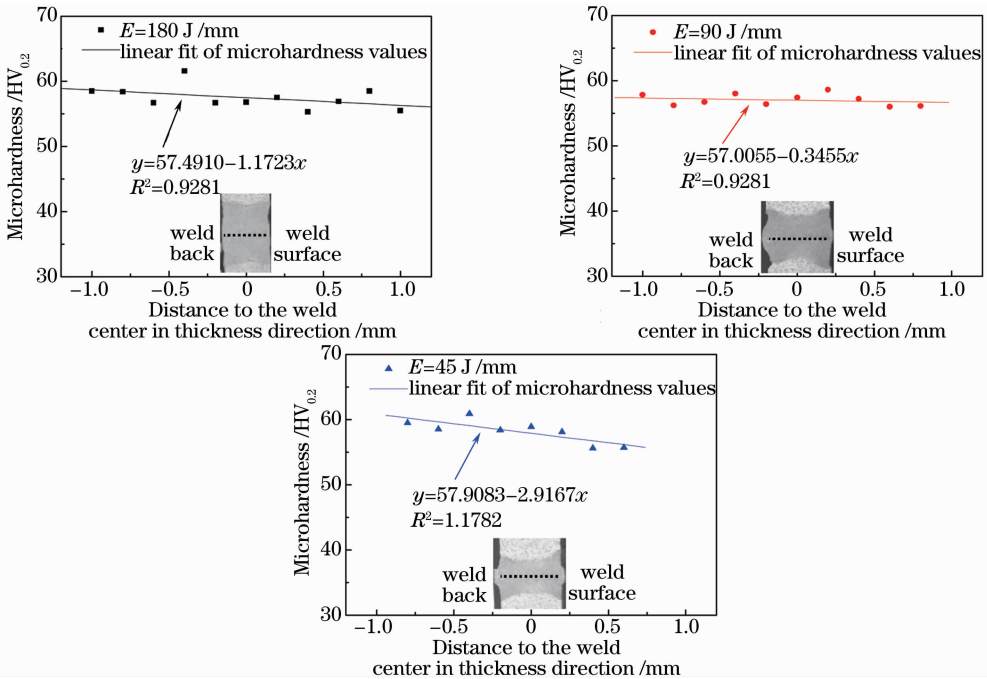


图5 焊接接头横截面的纵向显微硬度分布
Fig. 5 Distribution of microhardness of joint in longitudinal direction

4 结 论

1) 实现光纤激光全熔透焊接的临界热输入阈

值较低,约为35~40 J/mm。焊缝熔宽随焊接热输入的增加而增加,且背面熔宽的增幅更快。采用高

功率激光焊接时,更易获得熔宽均匀、横截面几何形状上下对称的焊缝。且激光功率越高,获得稳定全熔透焊缝的焊接热输入调节范围更大。

2) 接头熔合区附近为柱状晶组织,焊缝中心为柱状晶和等轴晶的混合组织。随焊接热输入的逐渐降低,热影响区逐渐变窄,熔合区和焊缝区的显微组织均逐渐细化,且焊缝中心混合组织中柱状晶所占的比例逐渐减少。

3) 随热输入的逐渐降低,接头热影响区软化现象逐渐减弱,焊缝区的平均显微硬度略有增加,焊缝区上部和下部的显微硬度数据分散性逐渐减小。当焊接热输入在 90 J/mm 左右时,焊缝上部和下部的显微硬度基本对称。当焊接热输入继续降低,焊缝上部和下部的显微硬度差异逐渐增加。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai, *et al.*. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 1-4.
左铁钊,肖荣诗,陈铠,等. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1-4.
- Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 456-461.
许良红,田志凌,彭云,等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 456-461.
- Chen Li, Gong Shuili. Application and development of laser welding technology for aluminum alloy[J]. Welding Technology in Aerospace Industry, 2011, (11): 46-49.
陈俐,巩水利. 铝合金激光焊接技术的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2011, (11): 46-49.
- L Quintino, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers-A preliminary study[J]. Materials and Design, 2007, 28(4): 1231-1237.
- Lü Junxia, Yang Wuxiong, Wu Shikai, *et al.*. Microstructure and mechanical property of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy laser welded joint[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303001.
吕俊霞,杨武雄,吴世凯,等. Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊

- 接头组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303001.
- Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi, *et al.*. Influence of welding parameters on the morphology of Fe-Ni alloy with continuous wave YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303003.
吴东江,张天武,马广义,等. 连续激光焊接 Fe-Ni 合金工艺参数对焊缝形貌的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303003.
 - Lin Kaili, Yang Wuxiong, Lü Junxia, *et al.*. Laser beam welding study of 2198-T851 aluminum-lithium alloy [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103007.
林凯莉,杨武雄,吕俊霞,等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103007.
 - Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO₂ laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603015.
檀财旺,李俐群,陈彦宾,等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO₂ 激光焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603015.
 - Chen Li. A Study on the Full Penetration Stability and Physical Metallurgy of the Laser Welding of Aeronautic Titanium Alloys [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005.
陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
 - Xu Fei. Aluminum Alloy's Welding by Laser with Filling Wire and Laser-Arc Hybrid [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
许飞. 铝合金激光填丝和电弧复合焊接技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
 - Yao Wei, Gong Shuili, Chen Li. Weld shaping for laser fully penetration welding titanium alloy (II)[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 74-76.
姚伟,巩水利,陈俐. 钛合金激光穿透焊的焊缝成形(II)[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 74-76.
 - Chen Boli. Principles of Welding Metallurgy [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. 269-276.
陈伯蠡. 焊接冶金原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991. 269-276.
 - Xu Fei, Chen Li, Gong Shuili, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of Al-Li alloy by laser welding with filler wire[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40(10): 1775-1779.
许飞,陈俐,巩水利,等. 铝锂合金激光填丝焊接头组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1775-1779.

栏目编辑:张雁