

## 6061 铝合金激光穿透焊的焊缝成形

## Weld Appearance of 6061 Aluminum Alloy by Laser Beam Full Penetration Welding

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 许飞 陈俐 郭路云

[摘要] 分别采用光纤激光和 YAG 激光对 2.5mm 厚的 6061 铝合金开展了激光穿透焊接试验,研究了主要焊接参数对焊缝成形的影响规律。结果表明,与 YAG 激光相比,高能量密度的光纤激光更易于实现穿透焊接,且光纤激光获得良好焊缝成形的工艺区间更大。在穿透焊接条件下,焊缝截面形貌分为钉头形和近 X 形两种。当激光功率较高时,光纤激光焊缝更趋向于生成近 X 形截面,YAG 激光焊缝更易于生成钉头形截面。焊缝成形受激光功率密度和焊接热输入双重因素的影响。随激光功率密度和焊接热输入的增大,光纤激光焊缝截面形貌逐渐由钉头形向近 X 形转变。

关键词: 6061 铝合金 光纤激光 YAG 激光 焊缝成形

[ABSTRACT] The welding experiments of 6061 aluminum alloy with 2.5mm thickness, are carried out by fiber laser beam and YAG laser beam. The effects of major welding parameters on weld appearance are investigated. The results show that the fiber laser beam with high energy density is easier to realize full penetration welding than YAG laser beam. And the processing tolerance (the good weld appearance could be obtained easily) of the former is also broader than that of the latter. When the joints are fully penetration welded, the cross-sections of the weld seams present two types of nail shape and near X shape. The weld with near X shape cross-section character is tendency to be obtained by fiber laser beam with high power, while the weld with nail shape cross-section character is helpful to be obtained by YAG laser. The weld appearance is influenced intensively by heat input and laser power density in welding. With heat input and laser power density increasing, the cross-section of weld by fiber laser beam transforms from nail shape to near X shape.

Keywords: 6061 aluminum alloy Fiber laser beam YAG laser beam Weld appearance

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.099

与常规熔焊方法相比,激光焊接具有能量密度集

中、热输入低、焊接变形和残余应力小、接头质量优良、易于实现自动化柔性高效作业等优点,因此更加适合于铝合金结构的焊接<sup>[1-2]</sup>。大功率高亮度光纤激光是 2002 年以后发展起来的新型激光。与 YAG 激光相比,光纤激光具有更好的光束质量和激光亮度<sup>[2]</sup>。光纤激光的亮度比 YAG 激光高 1~2 个数量级,且光束可靠性高,光电转换效率可高达 25%~30%<sup>[3]</sup>,故光纤激光具有更高的输出功率和更小的聚焦光斑,即激光的功率密度很高。光纤激光是激光技术发展的飞跃,更加促进了激光焊接技术的发展<sup>[2]</sup>。目前,采用 YAG 激光或光纤激光对铝合金的焊接性方面的研究相对较多<sup>[4-8]</sup>,而对这 2 种方法的对比研究相对较少。因此,开展此方面的研究,对推动光纤激光焊接技术的发展具有积极意义。

在实际工程应用中,激光焊接接头的力学性能一直是研究技术人员关注的对象,而焊缝横截面宏观形貌(形状)与焊接质量、焊接参数合理性、焊接参数控制稳定性以及接头力学性能都具有密切的联系<sup>[8-10]</sup>。因此,开展焊接参数对焊缝横截面宏观形貌的影响研究,具有一定的实际应用意义。

## 1 试验条件和方法

试验材料为 2.5mm 厚 6061-T651 铝合金,其化学成分如表 1 所示。6061 铝合金是 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金,具有中等强度,其耐蚀性能好,成形性和工艺性能良好,在航空航天和现代建筑等领域获得了广泛应用。铝合金板材被加工成 200mm × 100mm,焊前用化学清洗方法彻底去除试板表面的油污和氧化膜。

试验采用 YLS-5000 型光纤激光器和 HL3006D 型 YAG 激光器,激光器的主要技术指标如表 2 所示。激光通过光纤传输并反射聚焦于工件表面。焊接过程中工作台静止,由 ABB 机械手带动激光头相对运动来实现激光焊接。为减小反射光对激光器和外光路光学元件的损害,焊接过程中激光头的中轴线逆着焊接方向偏转

表 1 6061 铝合金的化学成分(质量分数) %

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

表2 激光器的主要技术指标

激光器类型	最大输出功率 / kW	波长 / $\mu\text{m}$	模式	焦距 $f/\text{mm}$	焦斑直径 $\phi/\text{mm}$
光纤激光器	5	1.06	多模	150	0.28
YAG 激光器	3	1.06	多模	223	0.60

10°,同时通入2路纯氩气保护熔池和焊缝高温区的正反面成形。所有焊接的离焦量均采用零。焊接试验采用平板堆焊方式。金相试样从焊缝中截取,经2%~3%的NaOH碱溶液腐蚀后,采用Olympus S231TR体式显微镜观察接头横截面形貌。在焊接工艺基础上,对比光纤激光和YAG激光对6061铝合金焊缝成形的影响。

### 2 不同激光作用下的焊缝成形

分别采用光纤激光和YAG激光对6061铝合金母材开展激光焊接试验,获得的焊缝横截面形貌如图1所示(1.5m/min,3kW)。可以发现,在相同焊接参数条件下,光纤激光焊缝横截面呈现X形,而YAG激光焊缝横截面为钉头形。这与激光的功率密度密切相关。经计算,此时光纤激光的功率密度约为 $4.87 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ ,而YAG激光的功率密度仅为 $1.06 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 。当激光的功率密度高于 $10^6 \text{W/cm}^2$ 时,激光可以使金属瞬间熔化、汽化,并逐渐形成“小孔效应”深熔焊接<sup>[11]</sup>。当熔池贯穿母材壁厚时,即形成穿透焊接。在较高能量密度的光纤激光作用下,母材更易于实现穿透焊接,而且焊接小孔能够始终保持贯穿熔池状态。此时,焊接小孔和作用于熔池上、下表面附近的高温金属蒸气/等离子体的热辐射可以看作是“两点一线”热源<sup>[12]</sup>,故光纤激光焊缝横截面更易于形成近X形。而在YAG激光作用下,虽然可以实现熔池穿透,但却无法维持小孔的稳定穿透,而瞬间的小孔穿透,无法为熔池下表面提供足够的高温金属蒸气/等离子体,故此时也仅能认为是“一点一线”热源,故在YAG激光作用下,更趋向于生成钉头形焊缝形貌。

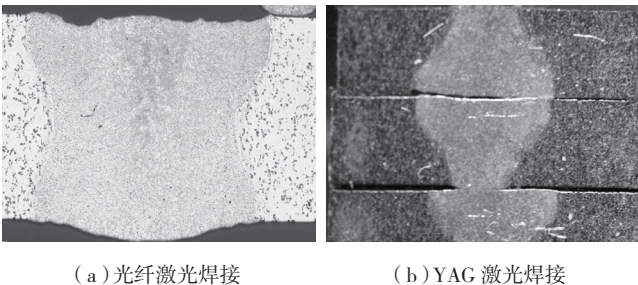


图1 不同光源作用下的接头横截面形貌

Fig.1 Cross-section shaping of joints by different light sources

### 3 焊接速度对焊缝成形的影响

当激光功率恒定时,焊接速度对焊缝横截面形貌的

影响如图2所示。可以发现,当采用高功率密度的光纤激光焊接,激光功率为3kW时,焊接速度在较大的范围内(1.5~4.5 m/min)变化均可以获得稳定全熔透焊缝。而YAG激光焊接速度仅能在0.8~1.8m/min范围内获得稳定全熔透焊缝。当光纤激光焊接速度低于1.5m/min,或YAG激光焊接速度低于0.8m/min时,焊缝表面会产生严重的焊塌,进而影响接头表面质量。当光纤激光焊接速度高于4.5m/min或YAG激光焊接速度高于1.8m/min时,激光焊接虽然继续保持“小孔效应”深熔焊接,但却无法实现稳定全熔透焊接,焊缝内部会产生大量气孔<sup>[13]</sup>,焊接接头质量明显恶化。同时还发现,当焊接速度增大时,光纤激光焊缝横截面形貌逐渐由近X形向钉头形转变,而YAG激光焊缝横截面形貌的钉头形特征更加明显。

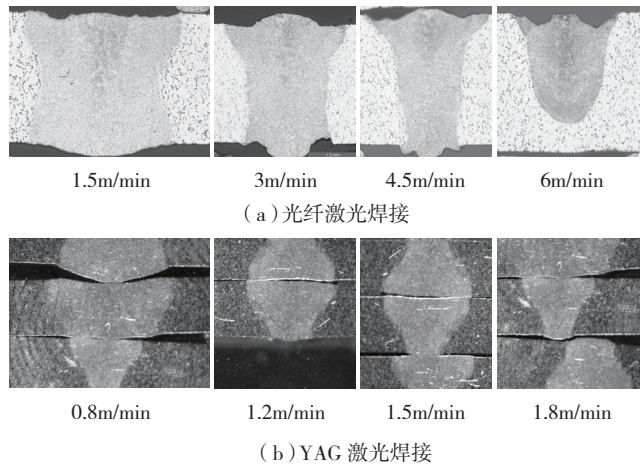


图2 焊接速度对焊缝横截面形貌的影响

Fig.2 Effect of welding speed on weld cross-section shaping

当采用较高的激光功率(4.5kW)时,焊接速度对光纤激光焊缝横截面形貌的影响如图3所示。与图2对比发现,当激光功率较高时,光纤激光焊缝生成近X形截面的工艺区间更大(1.5~6m/min);当激光功率较低时,光纤激光焊缝生成钉头形截面的工艺区间更大(3~4.5m/min)。故当激光功率较高时,光纤激光焊缝更趋向于生成近X形截面形貌。而YAG激光受激光器额定功率限制,无法输出更高的激光功率,故更易于生成钉头形焊缝截面形貌。

### 4 激光功率对焊缝成形的影响

当焊接速度恒定(3m/min)时,激光功率对光纤激光焊缝横截面形貌的影响如图4所示。可以发现,随着激光功率的逐渐增加,焊缝横截面逐渐由钉头形向近X形转变。当激光功率高于某一阈值且逐渐增加时,焊接小孔始终贯穿熔池,并且在熔池下表面附近形成越来越强烈的高温金属蒸气/等离子体,故焊缝横截面的近X

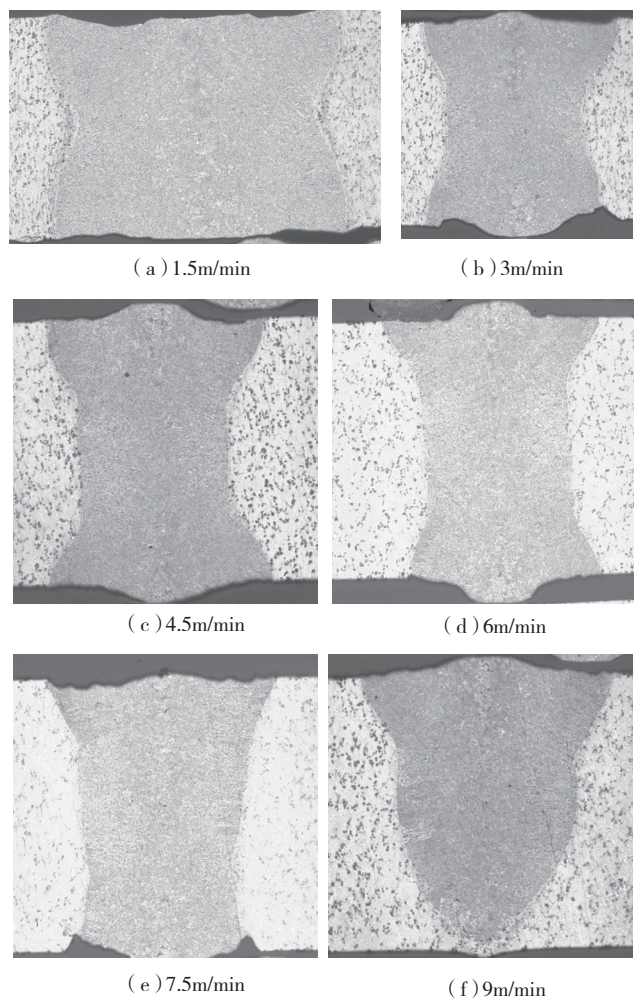


图3 焊接速度对光纤焊缝横截面形貌的影响

Fig.3 Effect of welding speed on weld cross-section shaping by fiber laser beam

形特征也愈加明显。

## 5 焊接热输入对焊缝成形的影响

焊接热输入是激光功率和焊接速度的比值,用来表征焊接过程中的能量输入。从焊接速度和激光功率对焊缝横截面形貌的影响分析发现,随着焊接速度的逐渐降低或激光功率的逐渐增加,即焊接热输入的逐渐增大,激光焊缝横截面形貌逐渐由钉头形向近 X 形转变。与 YAG 激光焊接不同的是,光纤激光焊缝横截面为近 X 形时,焊接过程更加稳定,更易于获得质量优良的焊接接头。

## 6 结论

(1) 由于光纤激光的功率密度比 YAG 激光高,故光纤激光更易于保持熔池的小孔穿透焊接,也更趋向于生成近 X 形横截面的焊缝形貌。而 YAG 激光易于生成钉头形横截面的焊缝形貌。

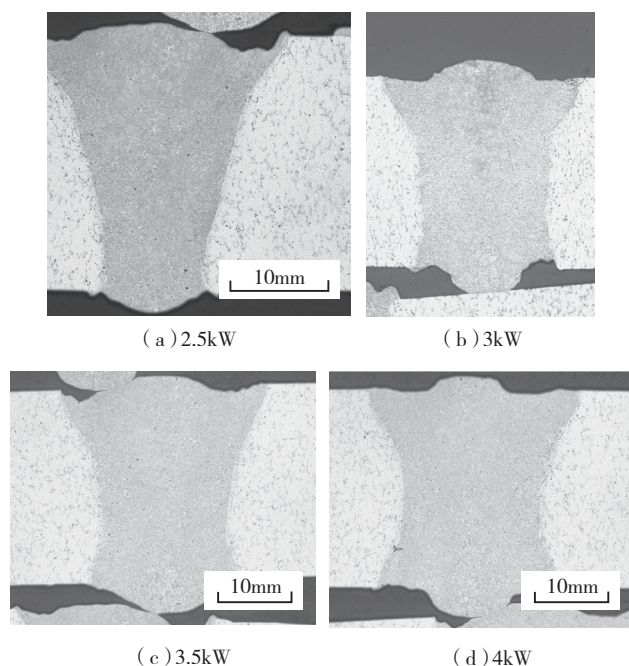


图4 激光功率对光纤焊缝横截面形貌的影响

Fig.4 Effect of laser power on weld cross-section shaping by fiber laser beam

(2) 与 YAG 激光相比,光纤激光焊接时获得稳定全熔透焊缝的工艺区间更大。当焊接速度增大或激光功率降低时,光纤激光焊缝横截面形貌逐渐由近 X 形向钉头形转变,而 YAG 激光焊缝横截面形貌的钉头形特征更加明显。当激光功率较高时,光纤激光焊缝更趋向于生成近 X 形截面形貌。

(3) 焊缝成形受激光功率密度和焊接热输入双重因素的影响。

## 参考文献

- [1] 左铁钊,肖荣诗,陈铠,等. 高强铝合金的激光加工. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 陈俐, 巩水利. 铝合金激光焊接技术的应用与发展. 航空制造技术, 2011(11): 46-49.
- [3] Quintino L, Costa A, Miranda R, et al. Welding with high power fiber lasers—A preliminary study. *Materials and Design*, 2007, 28(4): 1231-1237.
- [4] Cui L, Li X Y, He D Y, et al. Microstructure and Texture Characterization in Nd: YAG laser welds of 5A90 aluminum-lithium alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011(S4): 39-43.
- [5] Xu F, Gong S L, Chen L, et al. Fibre Laser Welding of 2024 Aluminum Alloy with Filling Wire. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42 (S2): 201-204.
- [6] 张婧, 单际国, 雷祥, 等. 铝合金脉冲 YAG 激光焊脉冲调制参数对焊缝形状参数的影响. *焊接学报*, 2008, 29(3): 21-24.
- [7] 林凯莉, 杨武雄, 吕俊霞, 等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究. *中国激光*, 2014, 41(1): 90-95.

(下转第 104 页)

配精度要求较高,且需考虑焊接过程中的焊缝收缩、焊接变形等因素;另外,转子组件尺寸精度、动平衡要求较高,且压气机转子组件往往带有多级焊缝,这都对焊接装配、焊接工艺提出了较高的要求。此外,单面焊双面成形电子束焊工艺必须解决焊缝背面不能焊漏、不能产生飞溅等问题。

采用该接头形式的焊接部位,均通过不同程度的加厚对焊接部位性能下降进行了补偿,而加厚部位的厚度、宽度的确定需通过焊接接头性能测试及结构完整性分析,并根据接头部位的强度设计要求进行计算。此外,由于该接头形式焊后不进行机械加工,焊缝正面、背面均留有余高,因此焊缝成形要求较高,需保证焊缝正面、背面过渡平滑,避免应力集中。

### 2.3 带凸台,焊后进行机械加工

该种接头形式使焊接部位内外表面均加厚,焊后进行机械加工去除焊缝正面、背面余高,以保证焊缝正面、背面过渡平滑,但加工后焊接部位仍留有凸台。该种接头形式主要应用于焊接面积较小、性能要求较高的部位,如高压压气机末级盘与后鼓筒轴之间、高压涡轮盘与前轴之间等部位的电子束焊缝。

## 3 转子部件电子束焊焊缝焊后检查

### 3.1 转子部件电子束焊焊缝焊后检查

商用航空发动机转子部件电子束焊焊缝焊后需进行目视检查、荧光检查及射线检查。目视检查转子部件电子束焊缝表面,要求成形良好,不允许存在裂纹、气孔等缺陷。对于带锁底的电子束焊接头,完成焊缝凸台及锁底加工后即可进行射线检查<sup>[9]</sup>,不允许存在裂纹、夹杂、未焊透等缺陷。转子部件的电子束焊缝均是荧光检查重点部位,对焊缝区域的缺陷控制要求较高。

### 3.2 高压压气机转子组件焊缝内表面荧光检测

高压压气机盘间距小、盘心孔径小,均使得焊缝内表面的检查较困难,高压压气机转子组件内腔的清洗及渗透检查均是进行高压压气机转子组件焊缝内表面荧光检测的难点。进行高压压气机转子组件清洗时,需对腹板间内腔进行冲洗,确保内腔清洗干净;清洗并干燥后,将整个转子组件浸入渗透剂中,并朝不同方向往复移动转子组件,确保组件内外表面所有位置均与渗透剂充分接触。针对高压压气机转子组件焊缝内表面的检查,需采用专用探头,确保能清晰地观测到焊缝内表面,并能对缺陷进行测量。

## 4 围绕商用航空发动机转子部件电子束焊需开展的研究

电子束焊接已广泛应用于国外商用航空发动机转

子部件,并根据接头性能及焊接部位的性能设计要求选取了不同的接头形式。目前,国内在这方面与国外差距较大。针对商用航空发动机研制需求,还需开展以下两方面研究。

### (1) 焊接接头性能数据积累。

对商用航空发动机转子部件常用材料的电子束焊接头进行性能测试,主要包括拉伸、冲击、扭转、蠕变、持久、疲劳等性能测试,积累接头性能数据,进行接头性能及结构完整性评价,为接头形式设计提供技术支持。

### (2) 焊接接头形式设计研究。

针对商用航空发动机长寿命、高可靠性的特点,以及转子部件电子束焊接部位的性能设计要求,进行接头形式设计研究,确定焊接部位是否需要加厚及加厚部位的厚度、宽度,以及焊后是否需要电子束焊缝正面、背面进行加工,确保焊接接头的可靠性满足使用要求。

## 5 结束语

商用航空发动机对转子部件电子束焊接头提出了长寿命、高可靠性的使用要求,对电子束焊接头的设计、制造和检测均提出了较高的要求,需要设计人员与工艺人员的充分合作,进行接头性能及结构完整性评价,合理地设计焊接接头,制定合适的无损检测方法 & 缺陷控制要求。

### 参考文献

- [1] 韩录宽. 电子束焊在航空发动机风扇盘组件中的应用. 航空发动机, 1995(2): 37-47.
- [2] 康文军, 梁养民. 电子束焊接在航空发动机制造中的应用 // 中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007: 1-5.
- [3] 王一涛. 真空电子束焊及其在航空发动机中的应用. 航空发动机, 2004, 30(1): 47-49.

(责编 谷雨)

(上接第 101 页)

- [8] 许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 热输入对铝合金光纤激光穿透焊缝成形的影响. 中国激光, 2014, 41(12): 65-69.
- [9] 刘昕, 雷永平, 巩水利. 焊缝形状对性能影响的层次分析法综合评价. 焊接学报, 2011, 32(1): 29-32.
- [10] 王亚军, 付鹏飞, 关永军. TC4 钛合金电子束焊缝形状特征分类研究. 航空材料学报, 2009, 29(2): 53-56.
- [11] 北京航空制造工程研究所. 航空制造技术. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [12] 姚伟, 巩水利, 陈俐. 钛合金激光穿透焊的焊缝成形(II). 焊接学报, 2004, 25(5): 74-76.
- [13] 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.

(责编 春早)