

# 光纤激光焊接机身壁板 T 型结构焊缝成形控制

张淦龙<sup>1</sup> 陶汪<sup>1,2</sup> 陈彦宾<sup>1</sup> 陈洁<sup>3</sup> 刘红兵<sup>3</sup> 姜梦<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>3</sup> 国家商用飞机制造工程技术研究中心, 上海 200436

**摘要** 采用双侧光纤激光同步焊接 2060/2099 铝锂合金机身壁板 T 型结构(蒙皮和桁条),对成形控制和横向(LT)拉伸性能进行研究及简要分析。研究表明:光束入射角度在可调范围内尽量小,以实现蒙皮与桁条形成良好的熔合;当光束入射位置偏移桁条 0.1 mm 时,焊缝轮廓角度在 45°~50°之间,T 型接头横向拉伸强度达到最大;严格控制光束间距实现双侧熔池相互贯通以保证双侧焊缝组织的均匀性和提高接头力学性能;匹配合送丝速度和焊接速度合理的比值,以实现焊缝表面平滑过渡。对于焊缝熔合充分且组织均匀的焊接接头,焊缝熔深是制约横向拉伸强度的关键因素,熔深控制在 1 mm 以内,接头横向拉伸强度平均为蒙皮母材强度的 80.1%,最大可达蒙皮母材强度的 82.1%。

**关键词** 激光技术; T 型接头; 双侧激光同步焊接; 铝锂合金; 力学性能

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1203006

## Shaping Control of Welds for Fiber Laser Welding T-Section of Fuselage Panels

Zhang Yunlong<sup>1</sup> Tao Wang<sup>1,2</sup> Chen Yanbin<sup>1</sup> Chen Jie<sup>3</sup>  
Liu Hongbing<sup>3</sup> Jiang Meng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>3</sup> National Engineering Research Center for Commercial Aircraft Manufacturing, Shanghai 200436, China

**Abstract** Double-sided fiber laser beam welding is used to synchronously weld T-section of fuselage panels (skins and stringers) for aluminum-lithium alloy 2060/2099 and shaping control is analyzed as well as long transverse (LT) tensile performance. The results indicate that a good fusion between skins and stringers can be obtained by using incident beam angle as small as possible in an adjustable range. The LT tensile strength reaches the maximum when the incident beam position is 0.1 mm on the stringer yielding a 45°~50° weld beam angle. To ensure weld microstructure uniformity and improve the T-joints' mechanical properties, beam separation distance must be strictly controlled to achieve the fusion of the double-sided welds in a common molten. In order to realize smooth transition of the weld surface, the ratio of wire feeding speed to welding speed should be matched with a reasonable value. For welds with a fully fusion and uniform microstructure, the key factor restricting the LT tensile strength is weld penetration. The average LT tensile strength reaches 80.1% of that of the base materials and the maximum rises up to 82.1%, when weld penetration is controlled in 1 mm.

**Key words** laser technique; T-joint; double-sided laser beam welding; aluminum-lithium alloy; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2013-05-21; 收到修改稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC12-JS-15-009)、上海市科委启明星计划(12QB1401900)

作者简介: 张淦龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事铝合金激光焊接方面的研究。E-mail: tangyuan-888@163.com

导师简介: 陶汪(1981—),男,讲师,硕士生导师,主要从事激光焊接方面的研究。

E-mail: taowang81@sina.com(通信联系人)

# 1 引 言

铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度及比刚度等特点,采用铝锂合金替代常规铝合金,可使构件质量减轻 10%~20%,刚度提高 15%~20%<sup>[1]</sup>。空中客车公司在 A330/A340 飞机的次要结构上试用了铝锂合金<sup>[2]</sup>,在 A350/A380-F 飞机主要结构机身壁板采用了铝锂合金,减重、低成本、节能得到了很好的发挥<sup>[3-4]</sup>。2000 年以后,美国又研制成功了 2198、2060、2099 等新型铝锂合金,该合金主要用于飞机蒙皮和板、型材零件<sup>[5-7]</sup>。铝锂合金被认为是 21 世纪主要的航空结构材料。

铆接技术几十年以来一直是先进的飞机机身接合技术<sup>[8]</sup>,为了克服传统铆接技术带来的机身重量大、生产效率低以及成本大的不利限制,空客公司将激光焊接技术应用于 A318/A340-600/A380 飞机壁板上,并进而取代传统铆接形式<sup>[9-11]</sup>。空客 A318 在相同的结构刚度下,采用激光焊接技术机身减重约 20%,节约成本 25%,同时生产效率大幅度提高<sup>[12-13]</sup>。德国空客公司 Schumacher 等<sup>[14]</sup>提到光束入射位置对接头力学性能具有较大影响,并且随着蒙皮厚度的不同,光束入射位置具有一定的差异。铝合金焊接容易产生热裂纹,采用 Si 含量较高的焊丝可以显著降低焊接热裂纹<sup>[14-17]</sup>。祁俊峰

等<sup>[18]</sup>研究了激光焊接船用 T 型材的成形控制和气孔研究,提出激光束作用在对缝处时比作用在竖板上更容易产生气孔,这从另一方面印证了偏移桁条的重要性。

本文采用双侧光纤激光对 2.0 mm 厚 2060/2099 铝锂合金机身壁板 T 型结构(蒙皮和桁条)焊缝成形控制进行了系统的研究,主要考察光束入射角度、光束入射位置和光束间距对焊缝成形的影响规律以及送丝速度与焊接速度的比值匹配关系对焊缝成形的影响,并初步分析了焊缝成形对横向拉伸性能的影响因素。

# 2 试验材料与方法

采用蒙皮板材 AA2060-T8 与桁条型材 AA2099-T83 铝锂合金作为试验材料,直径为 1.2 mm 的 ER4047 铝硅焊丝为填充材料,材料的化学成分及含量如表 1 所示。试件尺寸为:蒙皮 400 mm×130 mm,桁条 500 mm 长,厚度均为 2.0 mm。试验前对母材采用化学试剂清洗,先用丙酮擦拭表面油污,然后用 40℃~60℃ 体积分数为 10% 的 NaOH 溶液去除表面氧化膜,清水冲洗后浸入体积分数为 30% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液进行中和,清水再次清洗后在 80℃ 烘干炉中烘干;焊后未进行热处理。

表 1 试验材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the experimental materials (mass fraction, %)

Materials	Cu	Li	Si	Mg	Zn	Mn	Zr	Ag	Sr	Fe	Al
Skin: 2060-T8	3.9	0.8	0.02	0.7	0.32	0.29	0.1	0.34	—	0.02	Bal.
Stringer: 2099-T83	2.52	1.87	—	0.50	1.19	0.31	0.08	—	0.06	—	Bal.
Filler wire: 4047	<0.001	—	11.52	0.01	0.001	0.01	—	—	—	0.02	Bal.

试验所采用的两台激光器均为德国 IPG 公司生产的光纤激光器,型号分别为 YLS 10000 和 YLS 5000,最大输出功率分别为 10 kW 和 5 kW,波长均为 1.06 μm,最小光斑直径均为 0.26 mm,其能量分

布模式为多模分布。保护气为 Ar 气,气流量为 15 L/min,配合奥地利 FRONIUS KD4010 送丝系统进行试验。试验采用双侧光纤激光同步填丝焊接方法,T 型结构尺寸及焊接方法如图 1 所示。图中

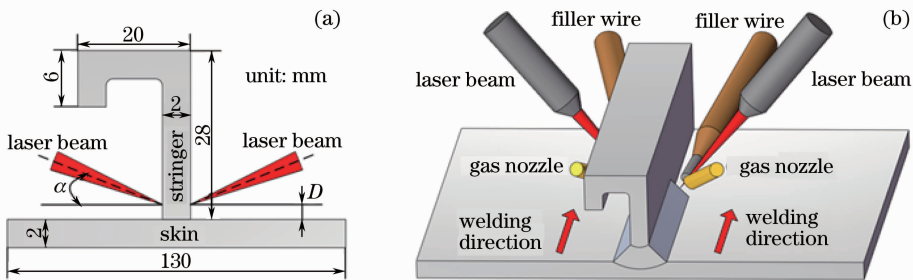


图 1 T 型结构及双侧激光同步焊接试验装置示意图(未按比例)。(a) 主视图;(b) 立体图

Fig. 1 Schematic diagram of T-section and double-sided laser beam welding process (not to scale).

(a) Front view; (b) stereogram

$\alpha$  为光束入射角度,  $D$  为光束入射位置。

根据 ASTM E 8M-04 标准《金属材料拉伸试验方法[公制]》, 利用 Instron-5569 电子万能材料试验机对接头进行横向拉伸试验, 拉伸速度为 2 mm/min, 横

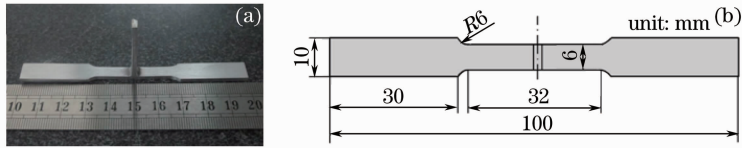


图 2 T 型接头横向拉伸性能测试试验件。(a) 实物图; (b) 俯视示意图(未按比例)

Fig. 2 Specimen of T-joints for long transverse tensile test. (a) Actual picture; (b) schematic top view (not to scale)

### 3 试验结果与分析

优质 T 型接头焊缝成形包括以下几个方面<sup>[13]</sup>: 焊缝表面无裂纹、烧伤、气孔等缺陷; 焊缝熔深不超过蒙皮厚度的一半; 焊缝左右两侧充分熔合; 焊缝外部轮廓左右对称且过渡平滑, 焊缝轮廓角度  $\beta$  在  $45^\circ \sim 50^\circ$  之间。试验中考察光束入射角度  $\alpha$ 、光束入射位置  $D$ 、光束间距  $w$ 、激光功率  $P$ 、焊接速度  $v$  及送丝速度  $v'$  对焊缝成形的影响, 图 3 为焊缝成形参数示意图。

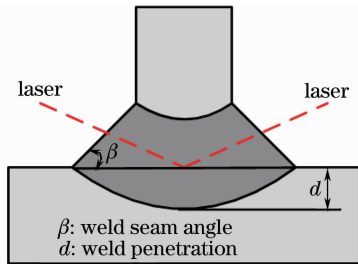


图 3 焊接成形参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of weld formation parameters

#### 3.1 光束入射角度对焊缝成形的影响

在飞机机身壁板上, 采用多根桁条平行并列分布、并与蒙皮进行焊接(图 4)的方式, 达到对整体机身壁板刚性固定的效果。由于受到桁条间距的限制及焊接工作头空间结构尺寸的影响, 光束入射角度  $\alpha$  仅在  $20^\circ \sim 35^\circ$  之间可调, 调节范围受到严重影响。

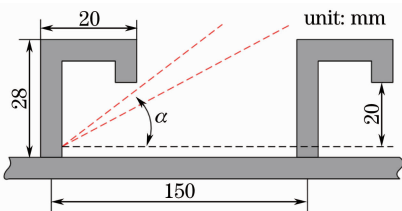


图 4 多桁条试件主视图(未按比例)

Fig. 4 Front view of specimen with several stringers (not to scale)

向拉伸试验件实物图及俯视示意图如图 2 所示。采用 VHX-1000E 超景深光学显微镜对接头的组织进行观察与分析, 利用 HITACHI S-3400N 扫描电镜进行拉伸断口分析。

图 5 为光束入射角度示意图, 光束入射角度即激光束与蒙皮之间的夹角。由此可以将入射激光能量分解为两个方向的分量: 垂直分量, 主要影响蒙皮的熔透能力, 表现为焊缝熔深的大小; 水平分量, 主要影响蒙皮与桁条的熔合能力, 表现为蒙皮与桁条之间是否存在未熔合缺陷。

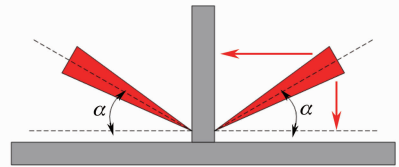


图 5 光束入射角度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the incident beam angle

试验中选取光束入射角度  $\alpha$  为  $22^\circ$  和  $30^\circ$  进行研究, ( $v = 10$  m/min,  $v' = 4$  m/min,  $D = 0$  mm,  $w = 0$  mm), 得到不同光束入射角度下的焊缝成形, 如图 6 所示。可以发现: 当光束入射角度较小时 ( $\alpha = 22^\circ$ ), 蒙皮和桁条之间较容易熔合, 然而增大光束入射角度 ( $\alpha = 30^\circ$ ), 在蒙皮和桁条之间出现未熔合缺陷, 这主要是由入射激光能量的水平分量决定的, 当增大入射激光功率  $P$  时, 未熔合缺陷消失, 此时入射激光总能量增大, 相应的水平分量同比增大, 故消除了未熔合缺陷, 但此时带来了熔深增大的代价。入射激光能量的垂直分量影响焊缝熔深, 光束入射角度由  $22^\circ$  增加到  $30^\circ$ , 由于角度变化量较小, 焊缝熔深变化不明显; 而当入射激光功率从 3000 W 增加到 3300 W 时, 熔深变化较明显, 已经超出蒙皮板厚一半。由此可知, 对 2 mm 厚的 2060/2099 铝锂合金来说, 仅通过增大入射激光功率可以解决未熔合缺陷, 但是焊缝熔深较大; 而光束入射角度在可调范围内尽量小, 可以消除焊缝未熔合缺陷, 同时焊缝熔深可以控制在板厚一半, 光束入射角度的工艺窗口较小。

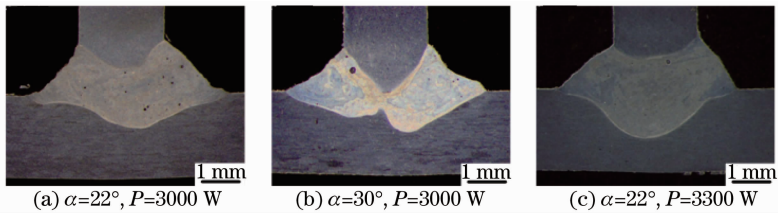


图 6 不同光束入射角度下的焊缝成形

Fig. 6 Weld appearances with different incident beam angles

### 3.2 光束入射位置对焊缝成形的影响

由空间限制和焊接效果来看,光束入射角度工艺窗口较小,可以消除焊缝未熔合缺陷,但无法进一步获得更小的焊缝熔深。因此,在确定光束入射角度的基础上( $\alpha=22^\circ$ ),通过调节光束入射位置  $D$  来改变焊缝熔深。光束入射位置  $D$  是指位于桁条处的激光束照射斑点偏离蒙皮上表面的距离,参数示意图见图 1。照射斑点偏离蒙皮上表面的距离越大,传递到桁条的激光能量越多,而传递到蒙皮的激光能量越少,从而对焊缝熔深有一定的控制作用。

图 7 为不同光束入射位置下的焊缝成形。分别

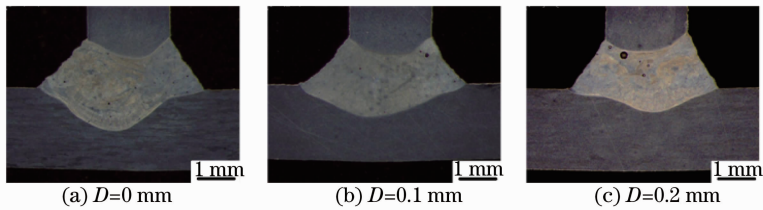


图 7 不同光束入射位置下的焊缝成形

Fig. 7 Weld appearances with different incident beam positions

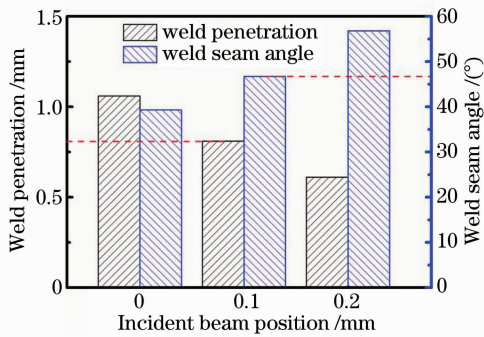


图 8 不同光束入射位置下的焊缝熔深与焊缝轮廓角度

Fig. 8 Weld penetrations and seam angles with different incident beam positions

### 3.3 光束间距对焊缝成形的影响

光束间距是指双侧激光束斑点在焊接方向上偏离的距离(如图 9 所示),光束间距是调试激光器时容易出现的问题,在焊接实际生产过程中,为了减少调试激光器时间、提高生产效率,容易忽略双侧激光束在焊接方向上的严格对齐,继而带来一些组织和性能

选取光束入射位置  $D$  为 0、0.1、0.2 mm 进行研究, ( $P=3000\text{ W}$ ,  $v=10\text{ m/min}$ ,  $v'=4\text{ m/min}$ ,  $\alpha=22^\circ$ ,  $w=0\text{ mm}$ )。研究发现,随着激光束斑点偏移桁条越多(离蒙皮越远),焊缝熔深逐渐减小,这是因为热输入是一定的,而传递到蒙皮上的能量逐渐减小;同时,焊缝轮廓角度逐渐增大,可能是由于熔化的填充焊丝凝固时堆积在桁条上,来不及平铺于蒙皮上。由图 8 可知,当光束入射位置  $D=0.1\text{ mm}$  时,焊缝熔深  $d$  约为 0.81 mm,焊缝轮廓角度  $\beta$  约为  $46.7^\circ$ ,在  $45^\circ\sim 50^\circ$  之间,此时焊缝熔深与轮廓角度满足优质焊缝成形的要求。

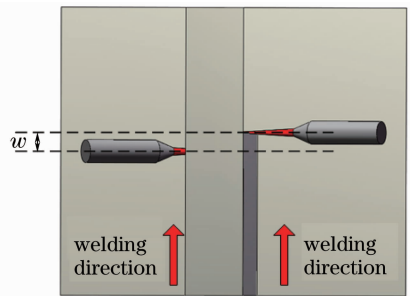


图 9 光束间距示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the beam separation distance 方面的问题。此处讨论光束间距对焊缝成形的影响(如图 10 所示),随着光束间距的增加,出现了焊缝不对称的现象,这主要是由于后束激光对前束激光束形成的焊缝进行了二次重熔的原因,在接头内部产生鱼鳞纹状焊缝,促使焊缝两侧不对称;直到光束间距增加到 2.0 mm 时,在图 10(e)显微组织可以清楚地看到焊缝内部出现了明显的分界,已出现了熔池不贯通的现象。同时,从光束间距与接头横向拉伸强度关系

曲线(图 11)可以看到,焊缝力学性能有了一定程度上的下降。由此可知,光束间距  $w$  会影响焊缝组织的

均匀性,为了提高焊缝的成形质量必须严格控制光束间距以实现双侧熔池相互贯通。

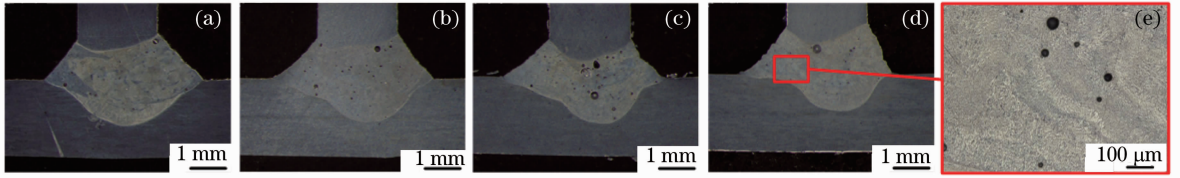


图 10 不同光束间距下的焊缝成形。(P=3000 W, v=10 m/min, v'=4 m/min, α=22°, D=0 mm).

(a)  $w=0$  mm; (b)  $w=1.0$  mm; (c)  $w=1.5$  mm; (d)  $w=2.0$  mm; (e) (d)图放大

Fig. 10 Weld appearances with different beam separation distances. (P=3000 W, v=10 m/min, v'=4 m/min, α=22°, D=0 mm). (a)  $w=0$  mm; (b)  $w=1.0$  mm; (c)  $w=1.5$  mm; (d)  $w=2.0$  mm; (e) enlarged view of Fig. (d)

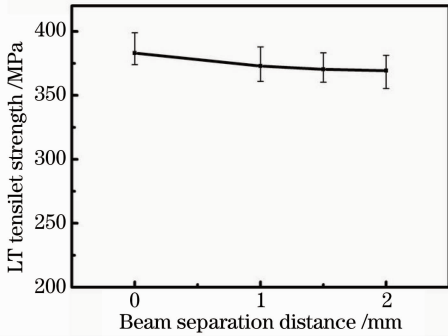


图 11 光束间距与接头横向拉伸强度的关系  
Fig. 11 Relationship between beam separation distance and LT tensile strength

### 3.4 焊接速度与送丝速度的匹配关系

为了减小应力集中, T 型接头需要在角接位置填充加填充焊丝以保证焊缝表面平滑过渡,从而提高接头的力学性能;送丝速度与焊接速度的匹配问题,直接影响焊缝表面成形。在保证双侧熔池贯通且熔深约为蒙皮厚度一半的条件下对激光功率进行合理取值,通过大量试验,考察送丝速度与焊接速度的匹配关系,如图 12 所示。研究发现,固定焊接速度,送丝速度过小时,焊缝表面呈现内凹形态;送丝速度过大时,焊缝表面呈现外凸形态;而只有送丝速度的取

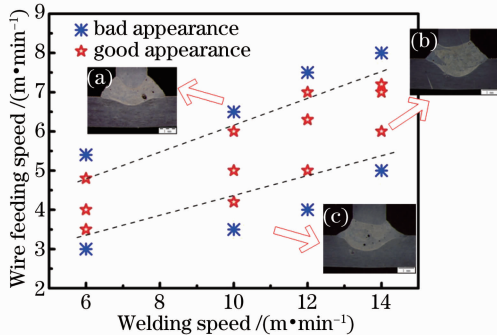


图 12 焊接速度与送丝速度对焊缝成形的影响  
Fig. 12 Effects of welding speed and wire feeding speed on the weld appearance

值合理时,焊缝轮廓角度  $\beta$  为  $45^\circ \sim 50^\circ$  之间,才满足优质焊缝成形要求。通过试验数据比较发现,当送丝速度与焊接速度的比值为  $40\% \sim 80\%$ ,且焊接速度越大、比值越小时,焊缝成形满足要求。焊接速度和送丝速度优化后,得到图 13 所示的 T 型接头试样及焊缝表面。

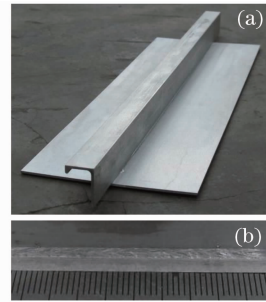


图 13 (a) T 型接头试样及 (b) 焊缝表面  
Fig. 13 (a) T-joint sample and (b) its welding surface

## 4 讨论与分析

在飞机机身壁板的应用中,铝锂合金主要应用于飞机的上机身壁板<sup>[4]</sup>,而上机身壁板主要承受拉应力(或横向拉伸载荷)的作用,故对横向拉伸性能的研究十分有意义。经过大量试验数据显示(图 14),当焊缝熔深超过板厚一半时,随着焊缝熔深的增大,横向拉伸强度呈现减小趋势;而焊缝熔深在板厚一半以内时,横向拉伸强度随焊缝熔深变化不大。取所有焊缝熔深数据测得, T 型接头的横向拉伸强度平均为 390.44 MPa(为 2060 蒙皮母材强度的 77.9%),最大可达 411.30 MPa(为 2060 蒙皮母材强度的 82.1%);控制焊缝熔深在 1 mm 以内, T 型接头的横向拉伸强度平均为 401.62 MPa(为 2060 蒙皮母材强度的 80.1%),此时达到工程使用要求。从 T 型接头的断裂形式来看(图 15),无论熔深大或小,接头断裂均是在应力最集中的焊趾处开始起裂,

沿着蒙皮熔合线进行扩展至熔深最低处,最后反向45°断裂于蒙皮母材。这也从另一方面印证了控制焊缝熔深的重要性,下一步将继续研究并解释出现此情况的原因。

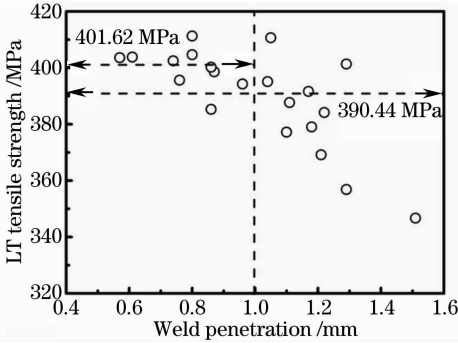


图 14 T 型接头横向拉伸强度与焊缝熔深的关系  
Fig. 14 Relationship between LT tensile strength of T-joints and weld penetration



图 15 T 型接头横向拉伸断裂形式

Fig. 15 LT tensile fracture pattern of T-joints

## 5 结 论

1) 采用双侧光纤激光同步填丝焊接方法,实现了 2.0 mm 厚铝锂合金 T 型接头的焊接,获得了成形良好的 T 型接头。

2) 光束入射角度、入射位置、光束间距以及焊接速度与送丝速度的匹配关系对焊缝成形质量影响较大。光束入射角度在可调范围内尽量小,以实现蒙皮与桁条形成良好的熔合;相同工艺下,当光束入射位置偏移桁条 0.1 mm 时,焊缝轮廓角度在 45°~50°之间,此时焊缝熔深均在 1 mm 以内,T 型接头横向拉伸强度达到最大;为了保证双侧焊缝组织的均匀性以提高接头力学性能,要严格控制光束间距以实现双侧熔池相互贯通;控制送丝速度和焊接速度的比值为 40%~80%且焊接速度越大、比值越小,可以保证焊缝表面的平滑过渡。

3) 焊缝熔合充分且组织均匀的焊接接头,焊缝熔深是制约横向拉伸强度的关键因素。熔深控制在 1 mm 以内,接头横向拉伸强度平均为 401.62 MPa,为蒙皮母材 2060 强度的 80.1%,最大可达

411.30 MPa,为蒙皮母材 2060 强度的 82.1%。

## 参 考 文 献

- 1 Qiu Huizhong, Wu Zhihong. Development of aerospace materials abroad[J]. Hot Working Technology, 1997, (4): 38-45. 邱惠中, 吴志红. 国外航天材料的新进展[J]. 宇航材料工艺, 1997, (4): 38-45.
- 2 Chen Yali. Application of aluminum alloys to aircraft [J]. Nonferrous Metals Processing, 2003, 32(2): 11-17. 陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用[J]. 有色金属加工, 2003, 32(2): 11-17.
- 3 M Knüwer, J Schumacher, H Ribes, et al.. 2198-advanced aluminium-lithium alloy for A350 skin sheet application [C]. Presentation for the 17th AeroMat Conference & Exposition, 2006. 1-27.
- 4 K H Rendigs. Airbus and current aircrafts metal technologies [C]. Presentation for the 8th MMPDS, 2005. 1-60.
- 5 Wang Haojun, Shi Chunling, Jia Zhiqiang, et al.. Development and current status of aluminum-lithium alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14): 82-85. 王浩军, 史春玲, 贾志强, 等. 铝锂合金的发展及研究现状[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 82-85.
- 6 ALCOA. Suite of Technologies Alloys [OL]. [http://www.alcoa.com/aerospace/en/info\\_page/suite\\_alloys.asp](http://www.alcoa.com/aerospace/en/info_page/suite_alloys.asp). [2013-10-18].
- 7 ALCOA. Alcoa and Spirit Aero Systems Show the Future of Next Generation Jetliner Production in Now with an Advanced Aluminum Fuselage Panel at the Paris Air Show[OL]. [http://www.alcoa.com/global/en/news/news\\_detail.asp?pageID=20110619005074en&newsYear=2011](http://www.alcoa.com/global/en/news/news_detail.asp?pageID=20110619005074en&newsYear=2011). [2013-10-18].
- 8 G Neye. Laserstrahlweißkonzept Für Rumpfschalen-Strukturen[M]. Strahltechnik, Band 5, Bremen, Bias-Verlag, 1997.
- 9 P F Mendez, T W Eagar. Welding process for aeronautics[J]. Adv Mater Proc, 2001, 159(5): 39-43.
- 10 D Dittrich, J Standfuss, J Liebscher, et al.. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results [J]. Phys Proc, 2011, 12(1): 113-122.
- 11 F Palm. Can welded fuselage structures fulfil future A/C damage tolerance requirements [C]. First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures, 2007. 1-15.
- 12 W Zink. Welding fuselage shells[J]. Ind Laser Solutions Manuf, 2001, 16(4): 7-10.
- 13 B Brenner, J Standfuß, L Morgenthal, et al.. New technological aspects of laser beam welding of aircraft structures [C]. Düsseldorf: DVS 2004. 19-24.
- 14 J Schumacher, I Zerner, G Neye, et al.. Laser beam welding of aircraft fuselage panels[C]. ICALCO, 2002. 2567-2576.
- 15 D Dittrich, J Standfuss, J Liebscher, et al.. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results[C]. Physics Procedia, Germany (Munich), 2011, 12 (part A): 113-122.
- 16 Xu Guoliang, Cheng Zhaogu, Xia Jin'an, et al.. Study of processing parameters of CO<sub>2</sub> laser welding on aluminum alloys [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(2): 183-186. 许国良, 程兆谷, 夏金安, 等. CO<sub>2</sub> 激光焊接铝合金工艺的研究 [J]. 中国激光, 2000, 27(2): 183-186.
- 17 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1783-1788. 李俐群, 陈彦宾, 陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1783-1788.
- 18 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun, et al.. Control of shaping of welds for CO<sub>2</sub> laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 297-302. 祁俊峰, 牛振, 张冬云, 等. CO<sub>2</sub> 激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 297-302.

栏目编辑: 宋梅梅