

# T 型接头双侧激光同步焊接特性研究

杨志斌<sup>1</sup> 陶汪<sup>1,2\*</sup> 刘申<sup>1</sup> 陈洁<sup>3</sup> 陈彦宾<sup>1</sup> 李俐群<sup>1</sup> 陈磊<sup>3</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** 以国产大型客机机身壁板铝合金 T 型接头双侧激光同步焊接技术的开发为背景, 系统地研究了焊接工艺参数与光束姿态对焊缝成形质量的影响, 初步探讨了接头的微观组织特征。试验结果表明: 采用双侧激光同步焊接方法可以实现机身壁板 T 型接头的焊接, 获得了成形质量良好的接头。激光功率和焊接速度的匹配应使热输入控制在 25~35 J/mm 之间, 同时应匹配合理的送丝速度以保证焊缝表面平滑过渡; 在满足熔深及熔合面积要求的前提下, 应采用较小的光束入射角度以降低热输入对蒙皮背部的热影响; 当光束入射位置偏移桁条 0.2 mm 左右时, 焊缝角度为 45°~50°, 同时 T 型接头的拉伸强度达到最大值; 必须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对称和提高力学性能。T 型接头微观组织存在等轴晶区、柱状晶区、部分熔化区、过热区和母材区等 5 个特征区域, 部分熔化区随着远离焊缝中心越来越窄且蒙皮侧较桁条侧明显。

**关键词** 激光技术; T 型接头; 双侧激光同步焊接; 焊缝成形; 组织特征; 铝合金

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0503007

## Study on the Characteristics of Double-Sided Laser Beam Welding for T-Joints

Yang Zhibin<sup>1</sup> Tao Wang<sup>1,2</sup> Liu Shen<sup>1</sup> Chen Jie<sup>3</sup> Chen Yanbin<sup>1</sup>  
Li Liqun<sup>1</sup> Chen Lei<sup>3</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** With the development of double-sided laser beam welding technique of aluminum alloy T-joints for domestic aircraft fuselage panels as the ground, the effects of welding parameters and laser posture on the welding seam formation quality are studied in details, and the microstructure characteristics of the T-joints are also preliminarily discussed. The experimental results show that it can realize the welding of T-joints for aircraft fuselage panels by double-sided laser beam welding and can obtain good welding appearance. In order to get adequate weld, the heat input will be controlled between 25 J/mm and 35 J/mm by matching laser power to suitable welding speed. Moreover, the wire feeding speed must be reasonable matched to guarantee the smooth transition of the weld surface. It is better to adopt low incident beam angle under the requests of weld penetration and fusion area, which is good for reducing the heat effects of the heat input. The optimal incident beam position is determined to be 0.2 mm on the stringer yielding a 45°~50° seam angle, and the maximum tensile strength reaches a maximum value. In order to

**收稿日期**: 2012-12-26; **收到修改稿日期**: 2013-01-22

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175115)和国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC12-JS-15-009)资助课题。

**作者简介**: 杨志斌(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事铝合金激光焊接及其数值模拟等方面的研究。

E-mail: yangzhibin@hit.edu.cn

**导师简介**: 陈彦宾(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: taowang81@sina.com

keep the double-sided weld symmetry and improve the mechanical properties of T-joints, the beam separation distances must be strictly controlled to realize the double-sided welds fused in a common molten. Five distinct zones are identified which consist of the cellular dendrite zone, parallel dendrite zone, partially melted zone, over-aged zone, and base material. The partially melted zone become narrower further from the fusion zone center and which on the skin side is obviously than that on the stringer side.

**Key words** laser technique; T-joint; double-sided laser beam welding; weld appearance; microstructure characteristics; aluminum alloy

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

在飞机制造业中,蒙皮与桁条组成的机身壁板结构主要依靠传统的铆接技术进行连接<sup>[1]</sup>。为了克服铆接存在的机身重量增加和生产效率较低的局限性,德国空中客车有限公司率先开展了双侧激光同步焊接技术的研究以代替传统的铆接技术,以实现机身壁板轻质、高效、低成本的加工制造<sup>[2,3]</sup>。经过十余年的发展,该技术于2003年首先应用在空客A318的批量化生产中,在相同的结构刚度情况下,机身重量减轻约20%,制造成本降低约25%,同时生产效率得到大幅度提高<sup>[4,5]</sup>。目前,这一技术已成功地在空客A318、A340、A350、A380等型号的批量化生产过程中。

目前,铝合金机身壁板T型接头双侧激光同步焊接技术的公开报道很少,仅限于德国空客公开的专利与报告中零星的宏观介绍<sup>[6~8]</sup>。1994年,Heider<sup>[9]</sup>首次对该项技术进行了简单的介绍。Schumacher等<sup>[10]</sup>指出光束入射位置对接头的成形质量影响显著,并显著影响接头的力学性能。针对Al-Mg-Si系列铝合金材料焊接容易产生热裂纹<sup>[11~13]</sup>,采用Si含量较高的焊丝可以显著降低焊接热裂纹的产生倾向<sup>[14,15]</sup>。国内该方面的研究工作刚刚起步,相关文献报道极少。陈洁等<sup>[16]</sup>采用两

侧分别施焊的方法初步探讨了该技术在国产大型客机机身壁板结构制造上的应用前景,该文献从侧面反应了采用双侧同步焊接的必要性。胡连海等<sup>[17]</sup>研究了焊接工艺参数对船用T型接头焊缝成形及内部缺陷的显著影响。祁俊峰等<sup>[18]</sup>指出为了降低T型接头内部的气孔缺陷,在满足焊缝熔透要求的情况下应增加激光束的入射角度。

本文以国产大型客机机身壁板铝合金T型接头双侧激光同步焊接技术开发为背景,以1.8 mm厚6056/6156铝合金为研究对象,利用CO<sub>2</sub>激光器进行T型接头双侧激光同步焊接工艺试验,系统地研究了焊接工艺参数与光束姿态对焊缝成形质量的影响,初步分析了接头的微观组织特征,对国产大型客机实现轻质、高效、低成本的加工制造具有重要的现实意义。

## 2 试验材料及方法

桁条与蒙皮分别采用1.8 mm厚6056-T4与6156-T6铝合金,它们由加拿大铝业公司专门为机身下壁板结构研制生产<sup>[19]</sup>;为了抑制焊接热裂纹,填充焊丝采用直径为1.2 mm的4047铝硅焊丝,它们的化学成分及含量如表1所示。试验前严格清洗待焊试件表面以去除油污和氧化膜。

表1 试验材料化学成分及含量(质量分数,%)

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

Materials	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Al
6056-Stringer	0.9	1.0	0.8	0.6	0.4	—	Bal.
6156-Skin	0.9	1.0	0.9	0.6	—	—	Bal.
4047-Filler wire	0.01	11.52	<0.01	0.01	0.001	0.2	Bal.

试验设备采用德国ROFIN-SINAR公司生产的DC030型和DC040型扩散冷却板条CO<sub>2</sub>激光器,其最大输出功率分别为3 kW和4 kW,波长为10.6 μm,光束半径为0.15 mm,光束模式为TEM<sub>01</sub>。T型结构尺寸及双侧激光同步焊接装置示意图如图1所示。保护气为He气,流量为15 L/min,配合奥地利FRONIUS KD4010型送丝系统进行试验。

焊后将接头垂直切割,将镶好的试样用240#,500#,800#和1000#水砂纸逐级磨光,然后用粒径为1 μm的金刚石抛光剂进行抛光,抛光后的试件清洗干净用混合酸进行腐蚀(1 mL HF:1.5 mL HCl:2.5 mL HNO<sub>3</sub>:95 mL H<sub>2</sub>O)4~10 s。利用OLMPUS GX71型金相显微镜对接头成形、微观组织观察分析。

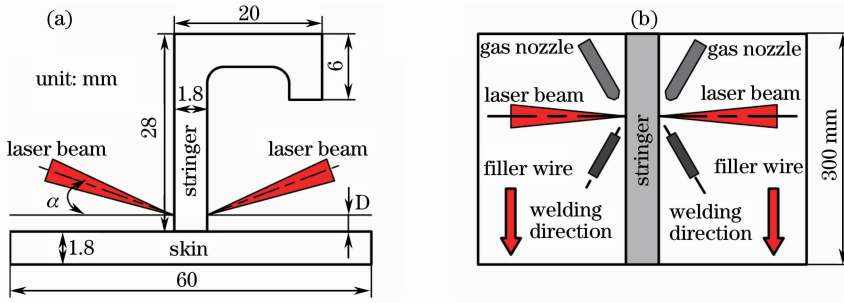


图1 T型结构及双侧激光同步焊接试验装置示意图(未按比例)。(a)主视图;(b)俯视图

Fig.1 Schematic diagram of the joint configuration and double-sided laser beam welding process (not to scale).

(a) Front view; (b) top view

### 3 试验结果与讨论

根据相关文献分析<sup>[5,7,9]</sup>,良好的T型接头焊缝成形应具备以下几个主要特征:1)双侧焊缝具有一定的熔合面积;2)焊缝熔深为蒙皮厚度一半左右;3)焊缝外部轮廓左右对称且平面过渡,焊缝角度约45°;4)蒙皮背部无热影响变形。焊缝成形参数的示意图如图2所示。

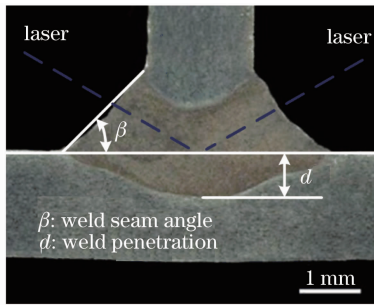


图2 焊接工艺参数及成形参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of weld formation parameters

#### 3.1 焊接工艺参数对焊缝成形质量的影响

##### 3.1.1 激光功率与焊接速度对焊缝成形质量的影响

激光功率和焊接速度对焊缝成形的影响如图3所示,可以发现二者综合以热输入的形式影响焊缝

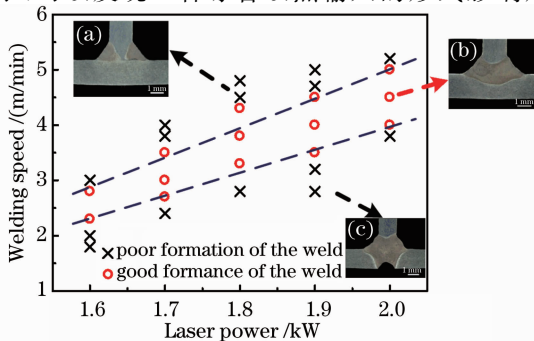


图3 激光功率与焊接速度对焊缝成形的影响

Fig.3 Effects of laser power and welding speed on the weld appearance

熔合面积与熔深。随着热输入的增加(增加激光功率或者降低焊接速度),焊缝的熔深及熔合面积有所增加。

通过大量试验研究发现:在合适的送丝速度条件下,当热输入在25~35 J/mm之间时,可以得到满足质量要求的理想焊缝,如图3(b)所示。降低焊接热输入导致焊缝熔合面积及熔深下降,甚至导致两侧焊缝未熔合,如图3(a)所示,降低了接头的力学性能。增加焊接热输入致使焊缝熔透能力急剧增加,甚至形成熔透型焊缝,该现象在机身壁板加工制造过程中必须避免,如图3(c)所示。因此,在保证焊缝熔深和熔合面积的前提下,确定焊接热输入为25~35 J/mm。

##### 3.1.2 送丝速度与焊接速度对焊缝成形质量的影响

角焊缝焊接需要填充焊丝以保证其力学性能,同时添加有利于提高焊缝质量的合金元素。焊接速度与送丝速度的匹配关系对焊缝成形质量影响显著,尤其是决定了焊缝的外部轮廓。在合适的激光功率条件下,得到的送丝速度与焊接速度对焊缝成形的影响如图4所示。可以发现:在焊接速度一定的情况下,随着送丝速度的增加,焊缝的外部轮廓由

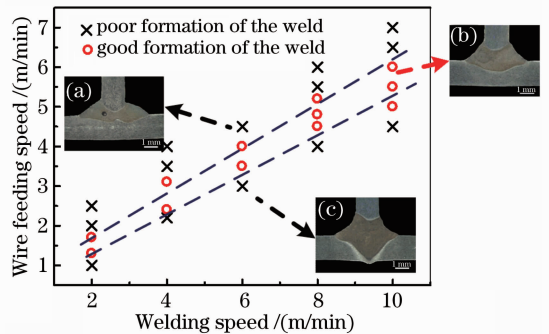


图4 焊接速度与送丝速度对焊缝成形的影响

Fig.4 Effects of welding speed and wire feeding speed on the weld appearance

内凹[如图 4(c)所示]向外凸[如图 4(a)所示]过渡,同时由于增加的焊丝吸收和反射了部分入射激光的能量,导致焊缝的熔深及熔合面积具有一定程度的降低;同时,焊缝成形质量与送丝速度/焊接速度的比值有关,为了保证焊缝的成形质量满足既定的要求,随着焊接速度的增加,送丝速度/焊接速度的比值需要逐渐降低。

### 3.2 光束姿态对焊缝成形质量的影响

#### 3.2.1 光束入射角度对焊缝成形质量的影响

光束入射角度是指激光束与蒙皮之间的夹角。焊接工作头由于受到结构的限制,光束入射角度仅在 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间可调。不同光束入射角度所得到的焊缝

成形如图 5 所示,可以发现:焊缝熔深随着光束入射角度的增加而急剧增加,从而增加了热输入蒙皮背部的热影响而导致变形,甚至出现熔透型焊缝,这是机身壁板结构加工制造过程中必须杜绝的情况,如图 5(c)所示。这主要是由于入射光束与蒙皮之间存在一定夹角,沿垂直方向的能量分量主要影响蒙皮的熔透能力而沿水平方向的能量分量主要影响蒙皮与桁条的熔合能力。当光束入射角度较大时( $\beta=30^{\circ}$ ),降低激光能量以解决熔深过大的问题容易导致双侧焊缝的熔合面积降低甚至未相互熔合,同时试验结果表明,此时焊接工艺窗口十分狭窄。因此,在满足成形的要求下应采用较小的光束入射角度。

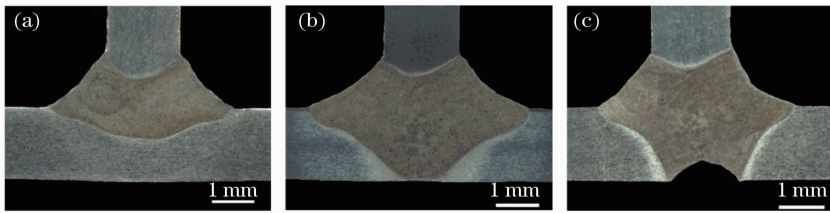


图 5 不同光束入射角度时得到的焊缝成形(激光功率为 1800 W,焊接速度为 3.8 m/min,送丝速度为 2.7 m/min)。

(a)  $\beta=22^{\circ}$ ; (b)  $\beta=25^{\circ}$ ; (c)  $\beta=30^{\circ}$

Fig. 5 Weld appearances with different incident beam angles (laser power of 1800 W, welding speed of 3.8 m/min, and wire feeding speed of 2.7 m/min). (a)  $\beta=22^{\circ}$ ; (b)  $\beta=25^{\circ}$ ; (c)  $\beta=30^{\circ}$

#### 3.2.2 光束入射位置对焊缝成形质量的影响

从结构限制和焊接效果分析,光束入射角度不能太小,因此试图从调节光束入射位置来实现 T 型接

头的有效连接并扩大焊接工艺范围。光束入射位置是指激光束照射在桁条上的位置与蒙皮和桁条夹角之间的距离。不同光束入射位置所得的焊缝成形如图 6 所示。

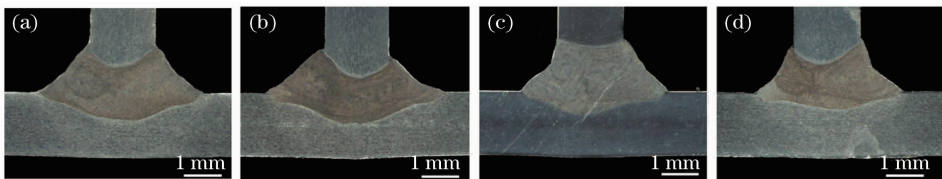


图 6 不同光束入射位置得到的焊缝成形(激光功率为 1800 W,焊接速度为 3.8 m/min,送丝速度为 2.7 m/min)。(a)  $D=0$  mm; (b)  $D=0.2$  mm; (c)  $D=0.4$  mm; (d)  $D=0.6$  mm

Fig. 6 Weld appearances with different incident beam positions (laser power of 1800 W, welding speed of 3.8 m/min, and wire feeding speed of 2.7 m/min). (a)  $D=0$  mm; (b)  $D=0.2$  mm; (c)  $D=0.4$  mm; (d)  $D=0.6$  mm

试验结果表明:随着光束入射位置偏移桁条,焊缝的熔深逐渐减小,这主要是由于到达蒙皮处的激光能量越来越小。同时,焊缝角度越来越大。从图 7 中可以发现,当光束入射位置偏移桁条 0.2 mm 左右时,焊缝熔深约为 0.85 mm,焊缝角度约  $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ,此时焊缝熔深与角度均满足理想焊缝成形的要求。

拉伸试验结果表明:在相同焊接工艺参数条件下,当光束入射位置偏移桁条 0.2mm 左右时,T 型接头的横向拉伸强度和轴向拉伸强度均达到最大值。光束入射位置与 T 型接头拉伸强度的关系如图 8 所示。

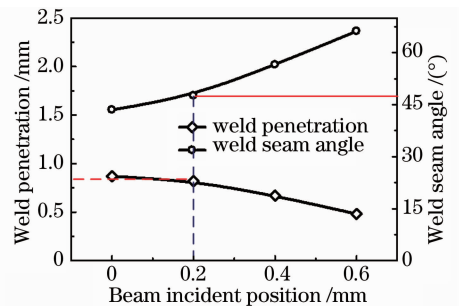


图 7 不同光束入射位置得到的焊缝熔深与焊缝角度  
Fig. 7 Weld penetration and seam angle with different incident beam positions

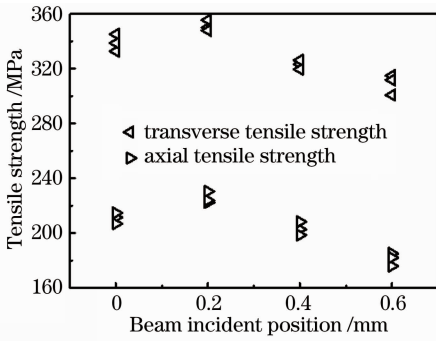


图 8 光束入射位置与接头拉伸强度的关系  
Fig. 8 Relationship between incident beam position and tensile strength

### 3.2.3 光束间距对焊缝成形质量的影响

光束间距(S)是指双侧激光束沿焊接方向之间的距离,图 9 为不同光束间距的焊缝成形。从图中可以发现:随着光束间距的增加两侧焊缝出现了不对称的现象,这主要是由于前束激光对后续激光束有预热的作用,导致后续激光产生的焊缝尺寸更大;当光束间距增加到 1.5 mm 时,两侧焊缝中间出现了明显的分界,如图 9(c)所示,在微观上已出现了不共熔池的现象,如图 9(d)所示。同时,这也在一定程度上降低了焊缝的力学性能,如图 10 所示。因此,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。

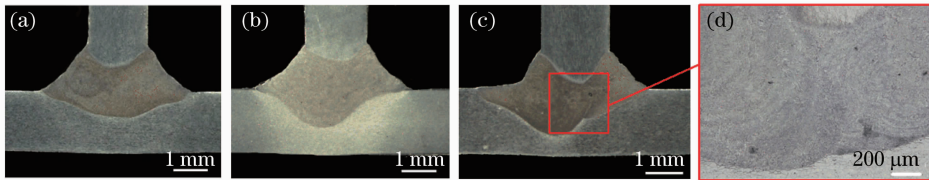


图 9 不同光丝间距得到的焊缝成形(激光功率为 1800 W,焊接速度为 3.8 m/min,送丝速度为 2.7 m/min)。(a) S=0;(b) S=1.0 mm;(c) S=1.5 mm;(d) 图(c)微区放大图  
Fig. 9 Weld profiles with different beam separation distances (laser power of 1800 W, welding speed of 3.8 m/min, wire feeding speed of 2.7 m/min). (a) S=0; (b) S=1.0 mm; (c) S=1.5 mm; (d) enlarged view of Fig. (c)

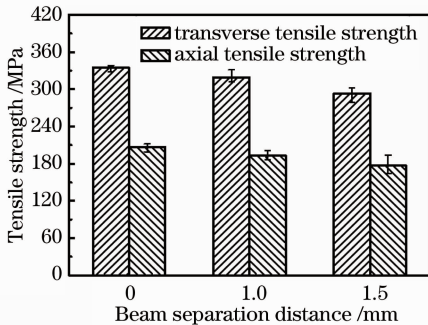


图 10 光束间距与接头拉伸强度的关系  
Fig. 10 Relationship between beam separation distance and tensile strength

### 3.3 组织特征

铝合金 T 型接头双侧激光同步焊接微观组织

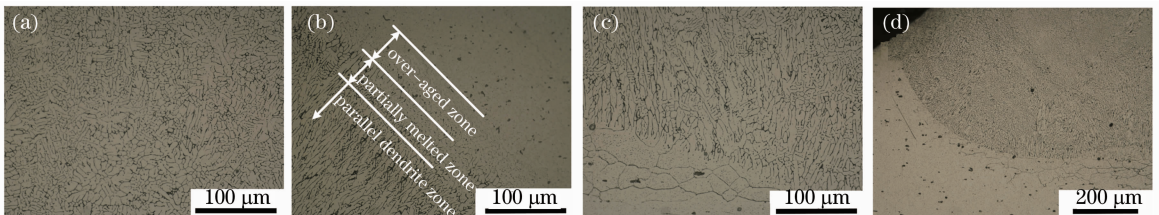


图 11 T 型接头双侧激光同步焊接组织特征示意图。  
(a)焊缝中心,500×;(b)桁条侧熔合线附近,500×;(c)蒙皮侧熔合线附近,500×;(d)蒙皮侧熔合线附近,200×  
Fig. 11 Microstructure characteristics of double-sided laser welded T-joints. (a) Fusion center, 500×; (b) fusion lion of stringer side, 500×; (c) fusion lion of skin side, 500×; (d) fusion lion of skin side, 200×

来越窄,如图 4(d)所示。后续工作将进一步研究以解释出现此情况的原因。

## 4 结 论

1)采用双侧激光同步焊接方法,实现了1.8 mm厚铝合金 T 型接头的焊接,获得了成形良好的焊接接头。

2)激光功率、焊接速度与送丝速度三者的匹配关系对 T 型接头成形质量影响显著,激光功率和焊接速度的匹配应使热输入控制在 25~35 J/mm 之间,同时匹配合理的送丝速度以保证焊缝表面平滑过渡。

3)在满足熔深及熔合面积的要求下应采用较小的光束入射角度以降低热输入对蒙皮背部的热影响;相同工艺参数下,当光束入射位置偏移桁条 0.2 mm 左右时,得到的焊缝角度为 45°~50°,同时 T 型接头的拉伸强度均达到最大值;为了保证双侧焊缝的对称性和提高力学性能,必须严格控制光束间距以实现双侧熔池相互贯通。

4)T 型接头微观组织存在等轴晶区、柱状晶区、部分熔化区、过热区和母材区等五个特征区域。部分熔化区随着远离焊缝中心越来越窄且蒙皮侧较桁条侧明显。

## 参 考 文 献

- 1 G. Neye. Laserstrahlschweißkonzept für Rumpfschalen-Strukturen[M]. Strahltechnik, Band 5, Bremen, Bias-Verlag, 1997. Hrsg.: Sepold G, Jüptner W. ISBN: 3-9805011-5-9
- 2 P. F. Mendez, T. W. Eagar. Welding process for aeronautics [J]. *Adv. Mater. Proc.*, 2001, **159**(5): 39~43
- 3 D. Dtrich, 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
- 4 W. Zink. Welding fuselage shells[J]. *Industrial Laser Solutions for Manu.*, 2001, **16**(4): 7~10
- 5 B. Brenner, J. Standfuß, L. Morgenthal *et al.*. New technological aspects of laser beam welding of aircraft structures [C]. Düsseldorf: DVS 2004. 19~24
- 6 O. Gedrat, G. Kuck, A. Kolley *et al.*. Verfahren zum schweissen von profilen auf grossformatigen aluminium-

- strukturbauteilen mittels laserstrahlen und vorrichtung zur durchführung des verfahrens [P]. European Patent: Patent Number EP0838301B1, 1997
- 7 B. Brenner B. Laser beam welding of aircraft fuselage structures [C]. Proc. ICALEO 2008, Temecula, USA, Paper # 1801: 838~845
- 8 G. Neye, P. Heider. Laser beam welding of modern Al-alloy for the aircraft industry[C]. Proc. Conf. ECLAT01'94/Dusseldorf: Deutscher Verband für Schweißtechnik 1994. 108~117
- 9 P. Heider. Lasergerechte Konstruktion Und Lasergerechte Fertigungsmittel Zum Schweissengrossformatiger Aluminium-Strukturbauteile [D]. Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik, 1994. 34~35
- 10 J. Schumacher, I. Zerner, G. Neye *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage panels [C]. Proc. ICALEO 2002, Scottsdale, USA, Section A
- 11 J. H. Dudas, F. R. Collins. Preventing weld cracks in high-strength aluminium alloys[J]. *Weld J.*, 1966, **45**(6): 241~249
- 12 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
- 13 S. Lampman S. Weld Integrity and Performance[M]. Materials Park: ASM International, 1997. 283~309
- 14 J. R. Davis. Aluminum and Aluminum Alloys [M]. ASM specialty handbook. 5th ed. Materials Park OH (USA), 1993. 376~389
- 15 Zhang Xin' ge, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Study on characteristics of laser-resistance hybrid welding for aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1404~1408
- 张新戈, 李俐群, 陈彦宾 等. 铝合金激光-电阻复合焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1404~1408
- 16 Chen Jie, Yang Zhibin, Zhan Xiaohong *et al.*. Experimental properties study on both-side laser beam welding of T-joint aluminum alloy[J]. *Applied Laser*, 2011, **31**(2): 130~134
- 陈 洁, 杨志斌, 占小红 等. 铝合金 T 型接头激光双侧填丝焊接工艺研究[J]. *应用激光*, 2011, **31**(2): 130~134
- 17 Hu Lianhai, Huang Jian, Ni Huifeng *et al.*. CO<sub>2</sub> laser hybrid welding processes and microstructures of 10Ni3CrMoV steel in T joint form[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0303003
- 胡连海, 黄 坚, 倪慧峰 等. 10Ni3CrMoV 钢 T 型接头 CO<sub>2</sub> 激光复合焊工艺与组织[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0303003
- 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
- 19 P. H. Lequeu, P. H. Lassince, T. Warner. Aluminum alloy development for the airbus A380-part 2[J]. *Adv. Mater. Proc.*, 2007, **165**(7): 41~44

栏目编辑:宋梅梅