

# 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束 激光焊接工艺

杨武雄 张心怡 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 铝锂合金被认为是航空航天飞行器轻量化的理想材料之一。针对大型飞机整体壁板结构,采用高亮度固体激光器进行 2 mm 厚的 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束焊接,研究了焊接气孔、裂纹和接头的力学性能。结果表明,焊前需至少去除 0.15 mm 厚的表面层,才能有效避免宏观氢气孔的产生;采用 AlSi12 焊丝和合适的坡口设计,可完全消除焊接热裂纹;接头环向拉伸强度可达 385~415 MPa,为 2060-T8 铝锂合金蒙皮强度的 82.5%;熔合区是接头最薄弱部位。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 铝锂合金; 气孔; 裂纹; 机械性能

**中图分类号** TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0703001

## Dual-Beam Laser Welding of T-Joint of Aluminum-Lithium Alloy 2060-T8/2099-T83

Yang Wuxiong Zhang Xinyi Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Aluminum-lithium alloy is considered to be one of the promising light-weight materials for aerospace applications. In the experiment, T-joint of 2060-T8/2099-T83 aluminum-lithium alloy with thickness of 2 mm is welded by using two high brightness solid state lasers from the two sides of the stringer aimed to integral aircraft fuselage panels. The weld porosity, cracking and joint mechanical properties are investigated. The results show that macro hydrogen pores can be avoided only when the surface layers are removed at least 0.15 mm thick, while the hot cracking can be completely eliminated with filler wire of AlSi12 and an appropriate bevel design. The hoop tensile strength of laser-welded T-joints is among 385~415 MPa, 82.5 % of that of the 2060-T8 skin sheet. The bond is the weakest region of the joint.

**Key words** laser technique; laser welding; aluminum-lithium alloy; porosity; cracking; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

### 1 引 言

研制和发展大型飞机是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》十六个重大科技专项之一。采用先进轻质材料和整体结构,降低飞机机身重量,减少燃油消耗,提高运载能力,是现代飞机设计制造的重要发展方向<sup>[1-3]</sup>。

铝锂合金是现代铝合金的新发展,具有密度低、

弹性模量高、比强度高以及良好的低温性能、抗疲劳裂纹扩展性和抗应力腐蚀性等特点。在铝中每添加质量分数为 1% 的锂,可使合金密度降低 3%,弹性模量增加 6%。用高强铝锂合金代替常规高强铝合金,可使结构重量减轻 10%~15%,刚度提高 15%~20%。因此,铝锂合金被认为是航空航天飞行器结构制造的理想材料之一<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2013-01-30; 收到修改稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)

作者简介: 杨武雄(1976—),男,博士研究生,主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail: bbgei@126.com

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造理论与技术等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S0420111435)

激光焊接具有能量密度高度集中、焊接速度快、柔性高、焊接变形小等特点,是实现铝合金及与异种金属复合结构连接的最具技术和经济优势的工艺方法之一<sup>[6-10]</sup>。目前,欧洲空中客车公司已率先采用激光焊接技术制造铝合金整体壁板,替代传统的铆接结构,提高了材料利用率,降低了制造成本,减轻了机身重量,提高了飞机性能,受到了航空业界的高度关注<sup>[11-13]</sup>。

铝锂合金激光焊接中可能会存在气孔和裂纹等焊接缺陷及接头软化等问题<sup>[14-15]</sup>。有研究表明,在无焊前预处理条件下,采用双光束激光可以控制1420铝锂合金焊接中的焊缝气孔<sup>[16]</sup>。采用激光焊接1420铝锂合金的接头强度要显著高于传统电弧焊接接头强度<sup>[17]</sup>。Dittrich等<sup>[18]</sup>对激光焊接2198铝锂合金飞机壁板结构进行了初步探索,最终获得

表1 2099和2060铝锂合金名义化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal composition of aluminum alloys 2099 and 2060(mass fraction, %)

	Cu	Li	Mg	Mn	Zn	Zr	Si	Fe	other	Al
AA2099	2.4~3.0	1.6~2.0	0.10~0.50	0.10~0.50	0.40~1.0	0.05~0.12	0.05	0.07	0.10 Ti	Bal.
AA2060	3.4~4.2	0.6~0.9	0.6~1.1	0.10~0.50	0.30~0.45	0.04~0.18	0.05	0.10	0.10~0.50 Ag	Bal.

## 2.2 实验条件

图1所示为T型接头双光束激光焊接实验布置示意图。激光器为4 kW的DS040HQ型碟片激光器和6 kW的YLS-6000型光纤激光器,激光波长分别为1030 nm和1070 nm,两台激光器的光束质量相当,均采用芯径为200 μm光纤传输,并使用焦距为200 mm准直镜和300 mm聚焦镜聚焦,聚焦光斑直径约为0.3 mm,激光束与底板蒙皮夹角为20°。焊接时激光功率 $P=3$  kW,焊接速度 $v=6$  m/min,送丝速度 $w$ 为3~9 m/min,填充焊丝从熔池前方送入。焊接保护气为Ar,保护气喷嘴位于熔池后方。

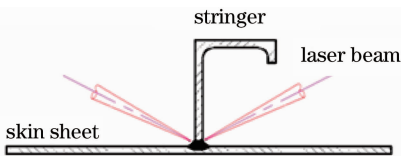


图1 双光束激光焊接实验布置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for dual-beam welding

焊后采用渗透着色法检测焊缝表面裂纹,然后截取并制备金相试样,Keller试剂腐蚀后,采用OLYMPUS GX51型金相显微镜观察焊接气孔和裂纹形态,采用日本Future-tech公司FM-300e型显微硬度计测量接头显微硬度;采用德国Zwick电子万能试验机测试接头环向拉伸性能,拉伸速率为

无裂纹且成形良好的T型接头,其接头强度显著高于2139常规铝合金接头强度。

本文针对我国商用大型飞机研制备选的2060-T8和2099-T83蒙皮与桁条材料,采用高亮度固体激光器进行T型接头双光束焊接,研究解决铝锂合金激光焊接常见的气孔和裂纹等问题,并考察接头力学性能。

## 2 实验条件

### 2.1 实验材料

蒙皮与桁条材料分别为Alcoa公司生产的2060-T8和2099-T83新一代航空高强铝锂合金,板材厚度均为2 mm,其名义化学成分在表1中列出。填充焊丝选用ER4047(AlSi12),焊丝直径为1.2 mm。

5 mm/min。环向拉伸试样尺寸如图2所示。

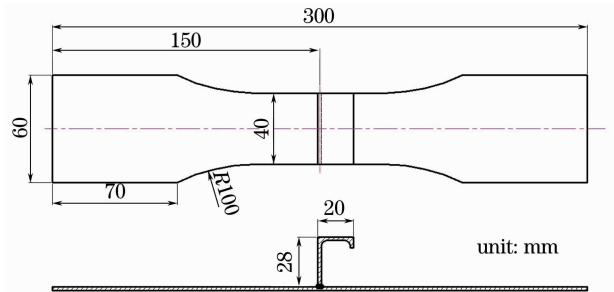


图2 T型接头环向拉伸试样尺寸

Fig. 2 Specification of the hoop tensile T-joint test sample

## 3 实验结果与分析

### 3.1 焊接气孔

在焊接熔池得到有效保护的情况下,铝合金焊缝中氢气孔的产生主要与材料表面的氧化膜有关<sup>[6]</sup>。由于化学活性较高的Li元素极易在材料表面形成含有Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、LiOH、Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和Li<sub>3</sub>N等化合物的表面层,其厚度显著高于常规铝合金的表面氧化层厚度,更容易吸附周围环境中的水分,铝锂合金焊接时氢气孔敏感性极高<sup>[14]</sup>。采用机械去除或者化学铣削等焊前表面预处理方法去除一定厚度的表面层,有助于减少工件表面的氢含量,有效防止铝锂合金中氢气孔的产生<sup>[19]</sup>。研究表明,铝锂合金激光对接焊时,焊前去除

0.05~0.1 mm 厚的表面层就几乎可以避免氢气孔<sup>[20]</sup>。但是,T 型接头焊接时,焊前采用刮刀去除焊接区 0.1 mm 厚的表面层,仍会产生大量氢气孔,如图 3 所示, $P=3\text{ kW}$ , $v=6\text{ m/min}$ , $w=9\text{ m/min}$ 。气孔形状为圆形,内壁光滑,独立分布于焊缝内。尺寸较大的气孔聚集于焊缝熔合线附近,而小尺寸气孔均匀分布于焊缝内。当焊接区表面层的去除厚度增加到 0.15 mm 时,气孔率从 10.03% 显著降低到 0.54%,最大气孔直径则从 0.47 mm 下降到 0.14 mm。这是由于 T 型接头是直接蒙皮表面进行焊接,单位体积内材料表面的熔化量较多,使焊缝内的氢含量增加。与对接接头相比,T 型接头材料表面层的影响显著增加,为了防止氢气孔,必须增加材料表面的去除厚度。

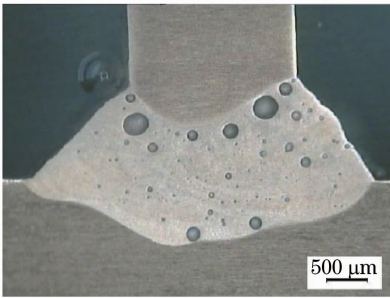


图 3 焊缝中的氢气孔

Fig. 3 Hydrogen pores in the weld

### 3.2 焊接热裂纹

由于研制时没有考虑焊接性问题,2060 和 2099 两种铝锂合金的焊接热裂纹敏感性很大。图 4 所示为这两种合金 T 型接头激光焊接裂纹形貌,具有明显沿晶界开裂特征。图 5 所示为在 400 mm 长的焊缝中裂纹总数量与送丝速度的关系。随着送丝速度的增加,裂纹数量显著减少。送丝量越大,熔池中填充金属越多,熔池凝固结晶时将生成更多的 Al-Si 共晶,对裂纹的“愈合”能力越强。但是,当送丝速度过大( $w=9\text{ m/min}$ )时,焊缝成形不良,且仍不能完

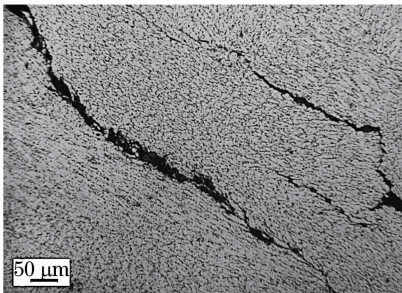


图 4 焊接裂纹形貌

Fig. 4 Morphology of the cracking

全避免裂纹产生。

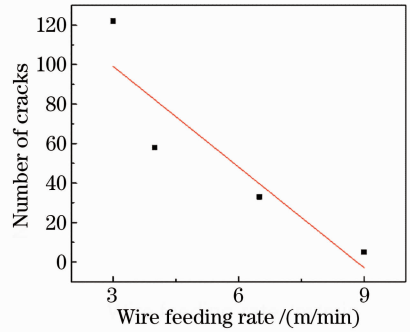


图 5 裂纹数量与送丝速度的关系

Fig. 5 Relationship between the number of cracks and wire feeding rate

为了提供足够多的填充金属以避免焊接裂纹,同时获得良好的焊缝成形,对长桁进行开坡口处理。试验结果表明,当坡口角度为  $60^\circ$ ,且钝边宽度为 1 mm 时(如图 6 所示),即可获得无裂纹、无宏观气孔、焊缝成形良好的焊接接头,如图 7 所示。

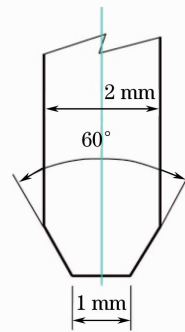


图 6 长桁坡口示意图

Fig. 6 Bevel profile on the stringer

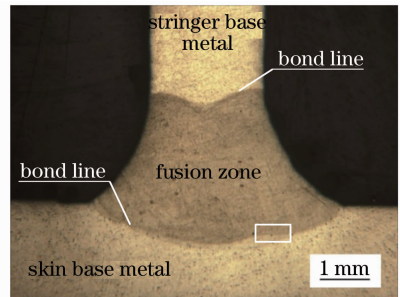


图 7 长桁开坡口 T 型接头焊缝成形

Fig. 7 Weld formation of T-joint with bevel on the stringer

### 3.3 接头力学性能

#### 3.3.1 显微硬度

图 8 所示为接头横截面沿长桁中轴线显微硬度分布。焊缝区硬度在  $125\sim 140\text{ HV}_{0.1}$  之间,熔合区硬度低于焊缝区,且长桁一侧熔合区硬度低于蒙皮

母材(BM)一侧。同时,热影响区(HAZ)存在软化现象,且长桁一侧热影响区大于蒙皮一侧。两侧母材显微硬度相当,均大于焊缝和热影响区。

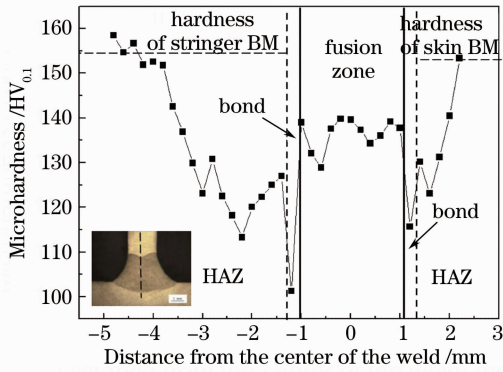


图 8 T型接头显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution of the laser welded T-joint

在熔合区,靠焊缝一侧晶粒熔化,而靠热影响区一侧由于温度较高、高温停留时间较长,晶粒长大、母材时效析出相部分溶解和长大,原始母材强化效果消失,从而造成熔合区硬度大幅度降低,如图 9 所示(为图 7 中方块区域的局部放大)。由于采用 AlSi12 焊丝,焊缝区结晶组织中存在大量 Al-Si 共晶,且由于快速冷却,结晶组织细小,因此焊缝区显微硬度较熔合区高。T 型接头双光束激光焊接时,蒙皮紧贴在焊接工装上,其散热条件较好,冷却速度更快,因此蒙皮一侧焊接热影响相对较小、硬度较高。

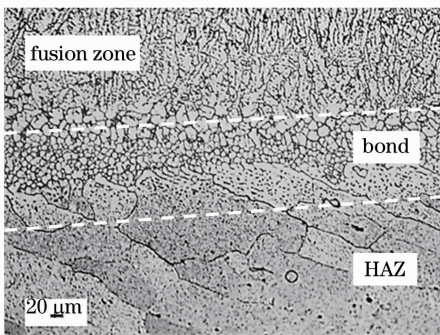


图 9 接头蒙皮熔合区附近的显微组织

Fig. 9 Microstructure near the fusion line on the skin side

### 3.3.2 环向拉伸性能

拉伸结果表明,接头环向拉伸强度在 385~415 MPa 之间,其平均强度可达 2060-T8 母材强度(482.7 MPa)的 82.5%。断裂起始于焊趾,而后裂纹沿熔合线扩展,最终断裂于母材,如图 10 所示。这是由于焊趾处面积突变,在环向拉伸载荷作用下,

会产生较大应力集中,而熔合区是接头最薄弱部位。

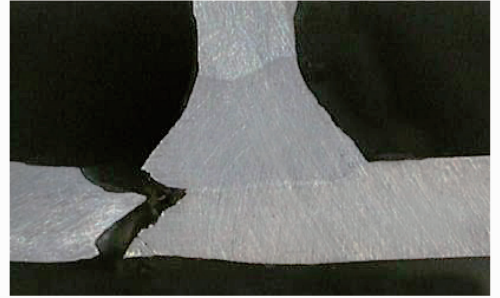


图 10 接头环向拉伸断裂试样

Fig. 10 Fractured hoop tensile test sample

## 4 结 论

1) 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束激光焊接时,焊前需至少去除 0.15 mm 厚的表面层,才可以避免宏观氢气孔的产生。

2) 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束激光焊接裂纹敏感性大。采用 AlSi12 焊丝和合适的坡口形式,可以完全抑制热裂纹的产生。

3) 熔合区是 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型双光束激光焊接接头最薄弱部位。环向拉伸时,裂纹起始于焊趾,然后沿熔合区扩展,最终断裂于母材。

## 参 考 文 献

- 1 F Vollertsen, J Schumacher, K Schneider, *et al.*. Innovative welding strategies for the manufacture of large aircraft [J]. *Welding Research Abroad*, 2005, 51(2): 1-17.
- 2 J C Williams, E A Starke. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. *Acta Mater*, 2003, 51(19): 5775-5799.
- 3 K H Rengdigs. Aluminium structures used in aerospace-status and prospects[J]. *Materials Science Forum*, 1996, 242 (11): 11-24.
- 4 J L Enrique, J G Nicholas. Review aluminum-lithium alloys[J]. *Mater Sci*, 1987, 22(5): 1521-1529.
- 5 R K Gupta, N Nayan, G Nagasireesha. Development and characterization of Al-Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, A420: 228-234.
- 6 Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai, *et al.*. *Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-4, 87-89. 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, 87-89.
- 7 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.
- 8 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min, *et al.*. Research on high speed high power CO<sub>2</sub> laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0503001. 翟玉峰, 黄 坚, 李 敏, 等. 6061-T6 铝合金高速大功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接性的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0503001.
- 9 Wang Tao, Zhou Dianwu, Peng Yan, *et al.*. Steel-to-aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling[J]. *Chinese J*

- Lasers, 2012, 39(3): 0303009.
- 王 涛, 周恬武, 彭 艳, 等. 钢/铝异种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303009.
- 10 Dong Peng, Chen Kaihua, Xiao Rongshi. Mechanical properties of aluminum copper joint by laser penetration brazing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603009.
- 董 鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头力学性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603009.
- 11 J Schumacher, I Zerner, G Neye, *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage panels[C]. Proceedings of ICALEO, 2002. 11.
- 12 P Mueller-hummel, S Ferstl, M Sengotta, *et al.*. Laser beam welding of high stressed complex aircraft structural parts[C]. SPIE, 2003, 4831: 438-441.
- 13 B Brenner, J Standfuss, D Dittrich, *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage structures [C]. Proceedings of ICALEO, 2008, 1801: 838-845.
- 14 A Kostivas, J C Lippold. Weldability of Li-bearing aluminium alloys[J]. Int Mater Rev, 1999, 44(6): 217-237.
- 15 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Nd : YAG laser welding of 1420 aluminum lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(s1): 239-241.
- 肖荣诗, 杨武雄, 陈 铠. 1420 铝锂合金 YAG 激光焊接[J]. 中国激光, 2007, 34(s1): 239-241.
- 16 Chen Kai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi. Direct laser welding for Al-Li alloy plate without prior surface cleaning[J]. Lasers in Engineering, 2012, 22(516): 361-369.
- 17 Cai Hua, Xiao Rongshi, Chen Kai. Mechanical property of CO<sub>2</sub> laser welded joint of 1420 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 122-125.
- 蔡 华, 肖荣诗, 陈 铠. 1420 铝锂合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头的力学性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 122-125.
- 18 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, 2011, 12(15): 113-122.
- 19 M B D Ellis. Fusion welding of aluminum-lithium alloys[J]. Welding & Metal Fabrication, 1996, 64(2): 55-60.
- 20 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Porosity characterization in laser welds of Al-Li alloy 1420[J]. Applied Laser, 2007, 27(1): 13-17.
- 肖荣诗, 杨武雄, 陈 铠. 1420 铝锂合金激光焊接气孔行为特性研究 [J]. 应用激光, 2007, 27(1): 13-17.

栏目编辑: 宋梅梅