

# 铝锂合金双激光束双侧同步焊接各向拉伸性能分析

占小红<sup>1</sup>, 陈纪城<sup>1</sup>, 陈洁<sup>2</sup>, 陶汪<sup>3</sup>, 刘红兵<sup>2</sup>, 陈彦宾<sup>3</sup>, 魏艳红<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016;

2. 上海飞机制造有限公司 航空制造技术研究所, 上海 200436;

3. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点试验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:**以新型航空铝锂合金 2060 为主要研究对象,采用经前期试验验证的较优的激光焊接工艺参数开展焊接试验,制取接头试样,并设计了不同方向的拉伸试验。研究了焊接接头在纵向、环向等各个方向上的拉伸强度性能,分析了激光功率、焊接速度等工艺参数对接头拉伸性能的影响。结果表明,2060 铝锂合金具有较好的激光焊接工艺适应性,但在接头软化、拉伸性能控制等方面有待开展进一步研究。

**关键词:**铝锂合金, 双激光束双侧同步焊接, 各向拉伸性能

**中图分类号:** TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)05-0033-04

## 0 序 言

T 形连接结构双激光束双侧同步焊接工艺是一种全新的工艺。与传统的 T 形结构单面焊接双面成形工艺不同,双激光束双侧同步焊接工艺保证了底板(蒙皮)外表面的完整性,因而大量应用在飞机机身壁板等对蒙皮外表面气动外形完整性要求较高的结构中<sup>[1,2]</sup>。空中客车公司经过多年的研发,在其主流产品 A318, A340, A380 等型号中大量采用了此种工艺<sup>[3]</sup>。

随着航空航天工业的飞速发展,铝及铝合金激光焊接技术在最近十几年来取得了长足的进步<sup>[4-6]</sup>。作为航空制造业的一种全新金属材料,第三代铝锂合金的激光焊接工艺尚处于起步阶段<sup>[7,8]</sup>。为此,针对铝锂合金这一新材料与双激光束双侧同步焊接这一新工艺的研究,目前国内并不成熟。

开展新型航空铝锂合金 2060 双激光束双侧同步焊接工艺研究,基于前期试验获取的较优化的焊接工艺参数开展焊接,获取较优的焊接试样,重点分析了 T 形焊接接头在环向、纵向等不同方向的力学性能。

针对牌号为 2060 的新型航空铝锂合金开展双激光束对侧同步焊接工艺及接头性能检测研究,主要包括以下两个部分:一是采用基于前期试验

获取的较优的焊接工艺参数开展铝锂合金激光焊接,获取成形良好、焊接缺陷较少的焊接试样,二是对不同工艺参数下的焊接试样接头进行拉伸性能检测,重点分析 T 型焊接接头在环向、纵向等不同方向的力学性能。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

研究中所用的蒙皮材料为 2060 铝锂合金,桁条材料为 2099 铝锂合金。蒙皮和桁条厚度均为 2.0 mm,它们组成 T 形接头,如图 1 所示。T 形结构特征件尺寸为 400 mm × 130 mm。填充焊丝为直径 1.2 mm 的 ER4047 和 ER2319。



图 1 T 形接头双激光束双侧同步焊接系统

Fig. 1 Dual laser-beam bilateral synchronous welding system for T-joint

收稿日期: 2013-11-10

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金资助项目 (SAMC12-JS-15-009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (NS2015058)

考虑到铝合金氧化膜对焊接性能的影响,焊前试件均严格清洗试件表面,进行去油和除氧化膜处理,并且存放时间不超过 24 h,如果超过 24 h,再次使用前需二次清洗. 具体的处理方法如下:丙酮除油→去除氧化膜处理(40~60 ℃的 6%~10% 氢氧化钠水溶液碱洗 4 min)→清水冲洗→中和光化(浸入 30% 硝酸溶液 3 min)→清水冲洗→烘干(100~120 ℃).

## 1.2 试验设备

试验所采用的两台激光器均为德国 ROFIN 公司生产的射频激励扩散冷却 CO<sub>2</sub> 激光器,型号分别为 DC 030 和 DC 040,最大输出功率分别为 3.0 kW 和 4.0 kW,波长均为 10.6 μm,最小光斑直径均为 0.15 mm,模式均为 TEM<sub>01</sub>,其能量分布为高斯模式. 采用 Fronius 送丝系统,送丝速度在 0.03~9.99 m/min 范围内精确可调.

## 1.3 试验过程

飞机机体结构是非常复杂的,蒙皮-桁条激光焊接工艺只是其中的一道工序. 为充分说明问题,示意性绘制了机身壁板与“蒙皮-桁条激光焊接接头”的位置关系,如图 2 所示.

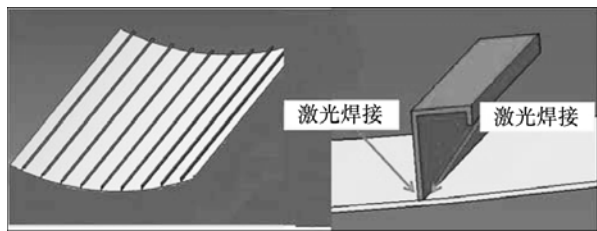


图 2 机身壁板与焊接接头的关系

Fig. 2 Relationship between fuselage panels and welded joints

考虑到 T 形接头双激光束双侧同步焊接的特殊性,同时结合商飞项目需求,设置了相关的力学性能试验,包括轴向拉伸性能(沿桁条方向或平行于航行方向的拉伸)、环向拉伸性能(沿蒙皮方向且垂直于航行方向的拉伸)和纵向拉伸性能(垂直于蒙皮所在平面的拉伸)等三种拉伸形式,如图 3 所示. 考虑到服役状态载荷情况,文中重点考虑了环向拉伸、纵向拉伸等.

为保证夹具对焊缝无拘束(即夹具离焊缝与焊趾有一定的距离),同时为了实现拉伸过程中蒙皮的变形程度尽量的小,夹具采用螺栓紧固的方式,如图 4 所示. 同时,考虑到要求拉伸结果的离散性尽可能小,取拉伸试件的长度为 25 mm,每个 T 形焊接件上取三个拉伸试件,取其结果平均值表示接头沿桁条方向的拉伸试验结果.

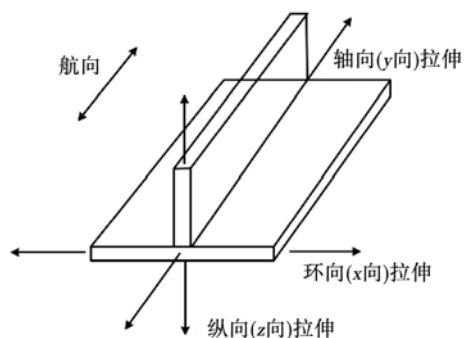


图 3 三种拉伸方向示意图

Fig. 3 Three types of tensile directions

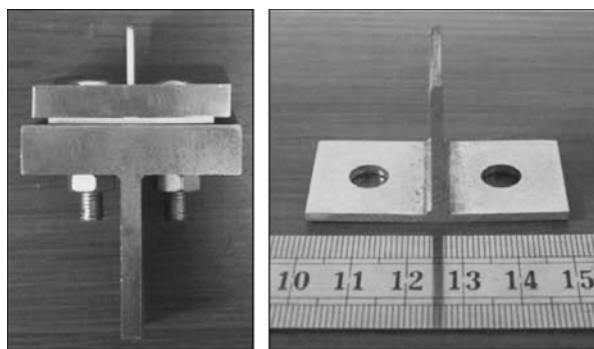


图 4 纵向拉伸夹具和试件及其尺寸

Fig. 4 Longitudinal tensile fixtures, test-piece and its size

根据美国材料与试验学会标准 ASTM E 8M-04 《金属材料拉伸试验方法[公制]》,设计环向拉伸试验试件,如图 5 所示.

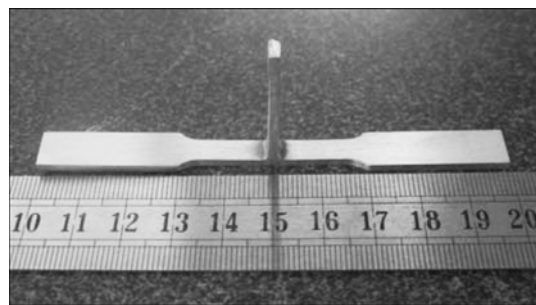
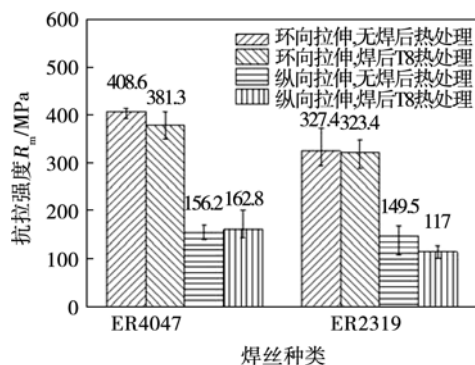


图 5 环向拉伸试件及其尺寸

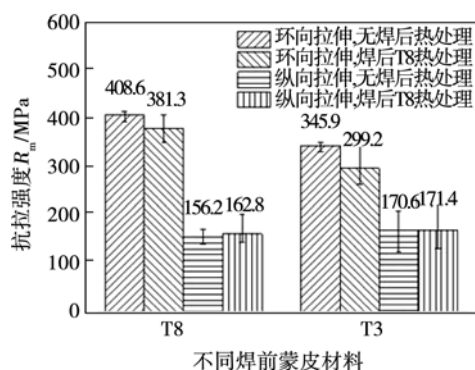
Fig. 5 Hoop tensile test-piece and its size

## 2 试验结果分析

按照上述的试验方法开展拉伸性能测试,分别考察不同焊丝及焊后热处理、焊前蒙皮状态及焊后热处理,以及激光功率、热输入(焊接速度)、送丝速度等因素对焊缝环向和纵向拉伸性能的影响,得到结果如图 6 所示.



(a) 焊丝及焊后热处理对抗拉强度影响



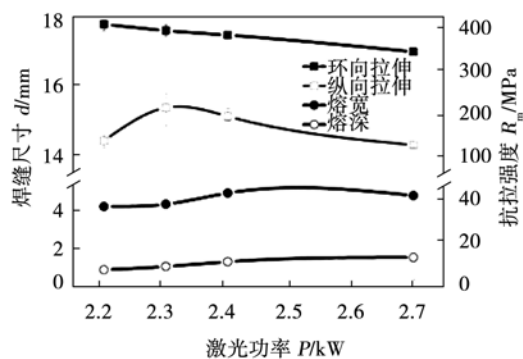
(b) 焊前蒙皮及焊后热处理对抗拉强度影响

图6 焊丝、焊前蒙皮及焊后热处理对抗拉强度的影响

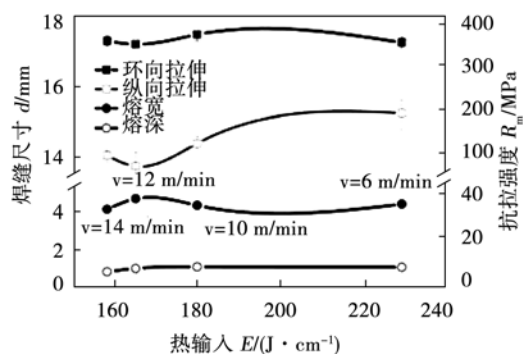
Fig. 6 Effect of welding stick, welding skin and postweld heat treatment on tensile strength

使用 ER2319 焊丝进行的激光焊接,其 T 形接头环向抗拉强度和纵向抗拉强度普遍低于使用 ER4047 焊丝焊接所得到的接头。主要因为 ER2319 焊丝富铜,Cu 元素的裂纹敏感性高;ER4047 焊丝富硅,流动性好,有良好的裂纹“愈合”作用,造成了 ER2319 焊丝焊接裂纹明显多于 ER4047 焊丝焊接,接头抗拉强度偏低,如图 6a 所示。由图 6b 可以发现,母材初始热处理 T3 态焊接后的接头强度明显低于 T8 态,这从焊后是否进行热处理都可以看出来。

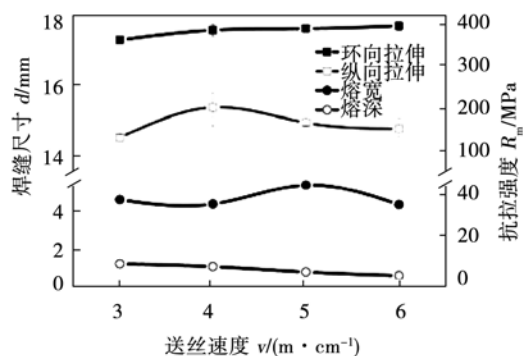
通过观察不同工艺参数下获得的 ER4047 焊丝焊接的 T 形接头可知:随着焊接功率的提升,焊缝熔深呈增大趋势,环向抗拉强度呈下降趋势;当焊接功率取 2.3 kW 时,焊缝熔深近 1 mm、熔宽约 4 mm,此时轴向抗拉强度出现极大值,如图 7a 所示。随着热输入的提高(焊接速度降低),焊缝熔深小幅度增大,环向抗拉强度无规律变化;当热输入取 165 J/cm 时,焊缝熔深近 1 mm、熔宽约 5 mm,此时纵向抗拉强度出现极小值,如图 7b 所示。随着送丝速度的增加,焊缝熔深呈减小趋势,环向抗拉强度呈增大趋势;当送丝速度取 4 m/min 时,焊缝熔深近 1 mm、熔宽约 4 mm,此时纵向抗拉强度出现极大值,如图 7c 所示。



(a) 抗拉强度随激光功率变化



(b) 抗拉强度随热输入变化



(c) 抗拉强度随送丝速度变化

图7 焊接工艺参数对抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of welding parameters on tensile strength

由以上试验数据分析可知,接头环向抗拉强度受焊缝熔深影响较大,熔深越小,环向抗拉强度越大,故其与蒙皮熔深的关系取值呈现反比关系;而纵向抗拉强度不仅受蒙皮熔深的限制,还受到蒙皮熔宽、桁条熔深和焊缝轮廓角度的影响,故其与蒙皮熔深的关系取值较离散,如图 8 所示。

由图 8 可知,当焊缝熔深大小在 0.57 ~ 1.05 mm 之间时接头的抗拉强度较其他值时要高些,其强度值在 390 MPa 左右,可达母材抗拉强度的 80%,纵向抗拉强度为 160 MPa 左右,可达母材抗拉强度的 31.4%。不仅如此,焊缝的抗拉强度还与焊缝的熔宽具有一定的关系,在满足一定熔深的前提下,焊缝熔宽越小,其抗拉强度越大。

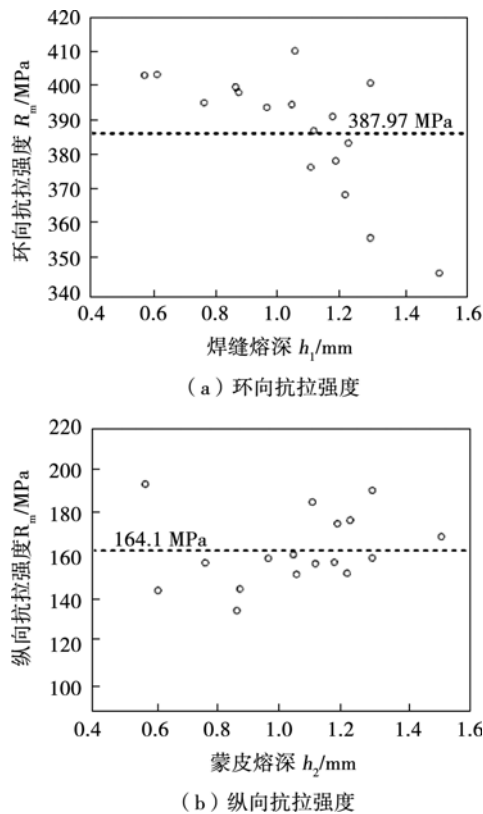


图 8 蒙皮熔深对环向抗拉强度和纵向抗拉强度的影响  
Fig. 8 Influence of skin welding penetration on hoop and longitudinal tensile strength

### 3 结 论

(1) T 形焊接接头环向抗拉强度受焊缝熔深影响较大. 熔深越小, 环向抗拉强度越大, 因此其与熔深的关系取值呈现反比关系.

(2) 2060 铝锂合金具有较好的激光焊接工艺适应性, 在经过工艺优化后能获得较为优良的焊缝外观成形、较优的接头组织和性能.

(3) 铝锂合金激光焊接工艺要应用于民机质量体系所要求的焊接结构件, 还有待更深入的研究, 特

别在工艺稳定性、缺陷控制、高疲劳和损伤容限性能优化等领域.

### 参考文献:

- [1] 占小红, 欧文敏, 陈洁, 等. 飞机壁板先进焊接技术应用现状[J]. 航空制造技术, 2013, 22: 42-44.  
Zhan Xiaohong, Ou Wenmin, Chen Jie, *et al.* Application status of advanced welding technology of aircraft panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 22: 42-44.
- [2] Zhan Xiaohong, Chen Jie, Wei Yanhong, *et al.* Heat source analyses of dual laser-beam bilateral synchronous welding for T-joint[J]. China Welding, 2011, 20(1): 28-33.
- [3] Dittrich D, Standfuss J, Liebscher J, *et al.* Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 113-122.
- [4] Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloys[J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 206-208.
- [5] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 1 版. 北京: 科学技术出版社, 2005.
- [6] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 崔丽, 李晓延, 贺定勇, 等. 5A90 铝锂合金激光焊缝微观组织特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 77-80.  
Cui Li, Li Xiaoyan, He Dingyong, *et al.* Microstructure investigation of Nd: YAG laser welded 5A90 aluminium alloys[J]. China Welding, 2010, 31(9): 77-80.
- [8] 何恩光, 巩水利, 杨涛, 等. 5A90 铝锂合金 T 形接头激光填充丝焊接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 99-102.  
He Enguang, Gong Shuili, Yang Tao, *et al.* Microstructure and properties of 5A90 Al-Li alloy T-joints by laser welding with filler wire[J]. China Welding, 2013, 34(9): 99-102.

**作者简介:** 占小红, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授. 主要从事焊接过程数值模拟及仿真、激光加工制造技术、航空航天先进制造工艺等研究工作. 发表论文 30 余篇. Email: xzhzhan@nuaa.edu.cn