

## 铝合金 T 型接头双激光束焊接断裂行为研究\*

## Research on Fracture Behavior of Aluminum Alloy T-Joint Welded by Double Laser Beam

中国商飞国家商用飞机制造工程技术研究中心 邓景煜 刘红兵 李昊 王玉华 秦涛  
哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 陶汪

**[摘要]** 为推动双光束激光焊接在国产大型客机机身壁板上的应用,系统研究了 6000 系列铝合金 T 型接头 CO<sub>2</sub> 激光焊接试验件的断裂行为。试验表明:在横向拉伸、纵向拉伸和剪切这 3 种检测方式下,T 型接头的起裂位置均为焊趾处,裂纹沿着下熔合线扩展,下熔合线区为 T 型焊接接头的薄弱区。

**关键词:** 双激光束焊接 T 型接头 断裂行为 铝合金

**[ABSTRACT]** To accelerate the application of double laser beam welding on fuselage panel of domestic large-type aircraft, fracture behavior of 6000 aluminum alloy T-joint welded by double-sided CO<sub>2</sub> laser beam is researched. The results show that in the transverse and axial tensile and shear tests, the failure of T-joint originates at the weld toe on the skin side, the crack grows along the bottom fusion line and the bottom fusion zone is the weakest area.

**Keywords:** Double laser beam welding T-joint Fracture behavior Aluminum alloy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.011

在航空、航天领域,铝合金以其重量轻、比强度高、加工性能好及耐腐蚀性强等特点成为非常重要的飞机结构材料。随着产品制作精度的提高,对铝合金焊接质量的要求也越来越高,激光焊接技术因此越来越多地应用于铝合金的焊接中<sup>[1-3]</sup>。

激光焊接以其独有的深宽比大、焊缝宽度小、热影响区小、变形小、焊接速度快、焊缝质量好和易实现自动化等优点,在航空航天等领域受到高度重视,因此得以迅速发展,并发挥着非常重要的作用<sup>[4-5]</sup>。其中,双光束激光焊接以其可以扩大匙孔的开口、提高焊接过程稳定性的优势成为激光焊接的新的发展方向<sup>[6]</sup>。

目前对于铝合金激光焊接工艺研究报道较多,但是多数侧重于对接焊缝的研究,对于航空结构件中的蒙皮-长桁链接 T 型接头而言,由于其结构形式的特殊之处,

其力学性能评价方法也不同于一般的对接接头,本文重点针对 T 型结构不同方向的断裂行为进行测试,并分析焊缝的时效机制,为后续典型构件的工艺参数优化以及力学性能评价提供数据支撑。

## 1 试验条件及方法

试验中的蒙皮材料为 6156 铝合金,长桁材料为 6056 铝合金,蒙皮和长桁厚度均为 1.8mm,填充焊丝材料为直径为 1.2mm 的 ER4047 铝合金焊丝,它们化学成分及含量如表 1 所示。

表1 试验材料化学成分 %

材料	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Ti	Al
6056	0.9	1.0	0.8	0.6	0.4	—	—	余量
6156	0.9	1.0	0.9	0.6	—	—	—	余量
ER4047	0.01	11.52	<0.001	0.01	0.001	0.2	0.01	余量

试验所采用的 2 台激光器为德国 ROFIN-SINAR 公司生产射频激励扩散冷却 CO<sub>2</sub> 激光器,最大输出功率分别为 3kW 和 4kW,波长为 10.6 μm,最小光斑直径均为 0.16mm,模式均为 TEM<sub>01</sub>,其能量分布为高斯模式。送丝系统采用奥地利福尼斯(Fronius)送丝系统,送丝速度在 0.03~9.99m/min 范围内精确可调,保证焊丝匀速平稳地送达焊接位置。拉伸试验在 Instron5500R 电子万能材料试验机上进行。

## 2 断裂行为试验结果

基于前期工艺研究获得优化的工艺参数基础上,重点开展 T 型接头的断裂行为测试及评价研究工作。包括拉伸性能、剪切性能等静载性能,其中拉伸性能包括:纵向拉伸性能(沿桁条方向的拉伸)和横向拉伸性能(沿蒙皮方向的拉伸)两种拉伸形式,拉伸速度均为 2mm/min。

### 2.1 纵向拉伸

纵向拉伸试件及其尺寸如图 1 所示。对纵向拉伸试验后的断裂件进行分析。焊缝熔深不同,纵向拉伸断裂的形式不一样。通过试验研究发现焊: T 型焊接接头在纵向拉伸下,主要有 2 种断裂形式,如图 2 所示。

\* 上海市青年科技启明星计划(B类)资助项目(12QB1401900)。

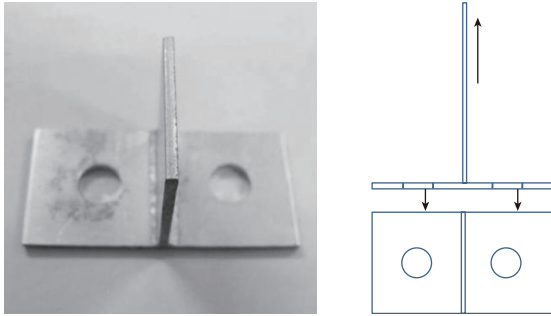
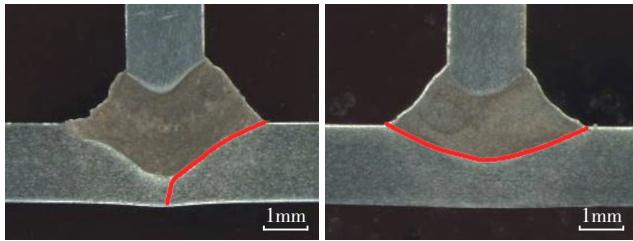


图1 纵向拉伸试件尺寸  
Fig.1 Longitudinal tensile specimen size



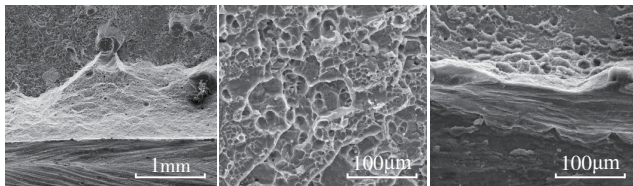
(a) 焊缝熔深小于蒙皮 1/2 (b) 焊缝熔深大于蒙皮 1/2  
图2 T型接头纵向拉伸时断裂形式  
Fig.2 Fracture modes of T-joint for longitudinal tensile test

焊缝的断裂形式、路径和焊缝的熔深存在很大的关系:

(1) 当焊缝的熔深小于等于蒙皮厚度的 1/2 时,其断裂形式如图 2(a) 所示,焊缝裂纹在焊趾处形成之后,沿着焊缝的下熔合线扩展,最后贯穿下熔合线断裂;

(2) 而当焊缝的熔深大于蒙皮的厚度 1/2 时,其断裂形式如图 2(b) 所示,焊缝裂纹在一侧焊趾处形成之后,裂纹沿下熔合线附近扩展,到达熔池底部之后,断裂于蒙皮母材。

以上 2 种断裂形式中,无论以何种方式断裂,均起裂于蒙皮的焊趾处,且这 2 种断裂的机制一致,其断口形貌扫描电镜图如图 3 所示。



(a) 宏观照片 (b) 断口中心 (c) 断口边缘  
图3 纵向拉伸试件断口形貌  
Fig.3 Fracture morphology of longitudinal tensile test

可以发现: 整个断口由中心部位大量聚集的韧窝区和试样边缘少量平坦的剪切区组成,是金属韧性断裂 2 种宏观断裂模式——韧窝断裂模式与剪切断裂模式的组合。

## 2.2 横向拉伸

横向拉伸试件及其尺寸如图 4 所示。

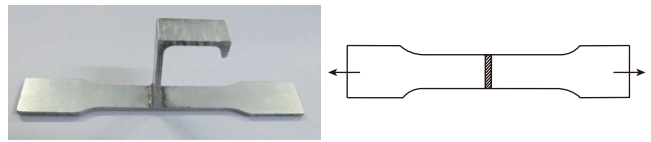
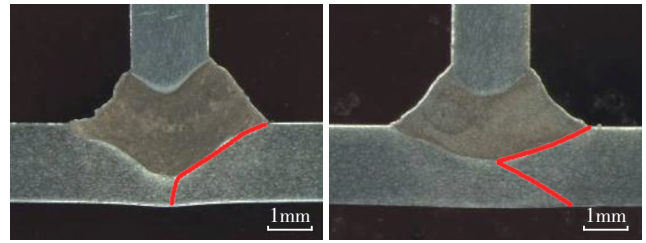


图4 横向拉伸试件尺寸  
Fig.4 Transverse tensile specimen size

对横向拉伸试验后的断裂件进行分析。焊缝熔深不同,纵向拉伸断裂的形式不一样。T 型焊接接头在横向拉伸下有如下 2 种断裂形式,如图 5 所示。

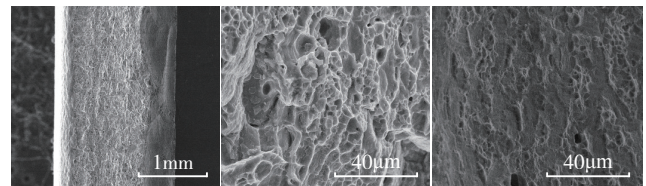


(a) 焊缝熔深小于蒙皮厚度 1/2 (b) 焊缝熔深大于蒙皮厚度 1/2  
图5 T型接头横向拉伸断裂形式  
Fig.5 Fracture modes of T-joint for transverse tensile test

横向拉伸试验中,焊缝的断裂形式与焊缝的熔深同样存在的很大的关系:

(1) 当焊缝的熔深小于等于蒙皮厚度 1/2 时,其断裂形式如图 5(a) 所示,裂纹在焊趾处形成后,沿下熔合线扩展至最大熔深处后,再反方向断裂于蒙皮母材;(2) 当焊缝的熔深大于蒙皮厚度 1/2 时,其断裂形式如图 5(b) 所示,裂纹在焊趾处形成后,焊缝沿下熔合线扩展到熔深最大处,依然按照原来的方向断裂于蒙皮母材。

以上 2 种断裂形式中,无论以何种方式断裂,均起裂于蒙皮的焊趾处,且断裂机制也一致。横向拉伸试验的断口扫描电镜图如图 6 所示。



(a) 宏观照片 (b) 断口中心 (c) 断口边缘  
图6 横向拉伸断口形貌  
Fig.6 Fracture morphology of transverse tensile test

从断口的扫描电镜照片发现,焊缝处断口为韧窝断裂,但是韧窝较浅,且存在明显的塑性断裂,但其间也包含一定的脆性断裂;而焊缝边缘的断裂其实呈现的是母材的断裂形式。

## 2.3 剪切性能

剪切试件及其尺寸如图 7 所示。不同于纵向拉伸

和横向拉伸, T型接头的焊缝剪切断裂形式与焊缝的熔深不具有关联性,其断裂形式只有一种,如图8所示。

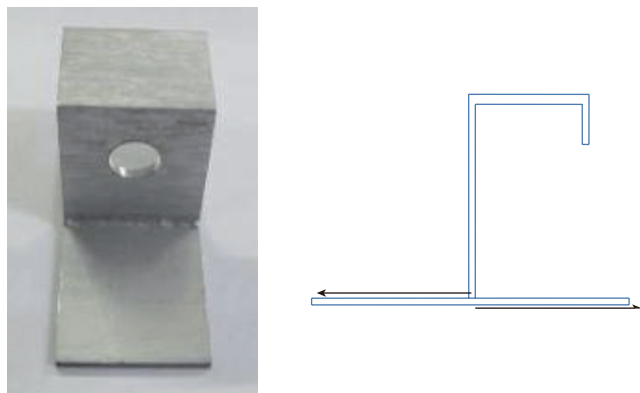


图7 剪切拉伸试件尺寸  
Fig.7 Shear test specimen size

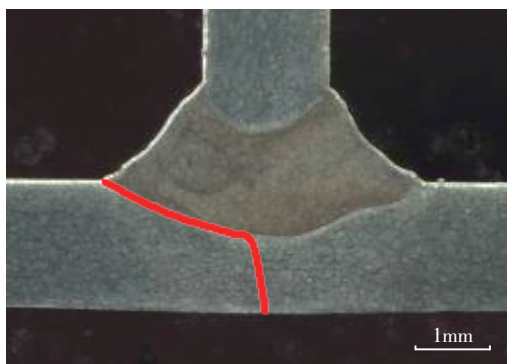


图8 T型接头抗剪切断裂形式  
Fig.8 Fracture mode of T-joint for shear test

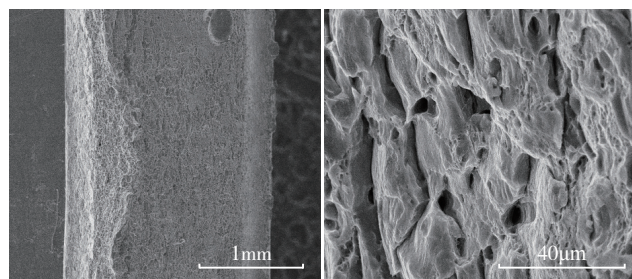
T型接头剪切时起裂于蒙皮焊趾处,之后沿下熔合线附近扩展达到最大熔深处, T型接头沿蒙皮母处断裂。断口的扫描电镜图如图9所示。

此断裂形式主要是脆性断裂,尤其是焊缝与桁条的结合部位,如图9(b)所示,无韧窝存在主要是解理断裂,此为脆性断裂,而焊缝中心部位为韧窝断裂,但是韧窝较浅。而图9(d)为母材的断裂,和图6(c)一致。

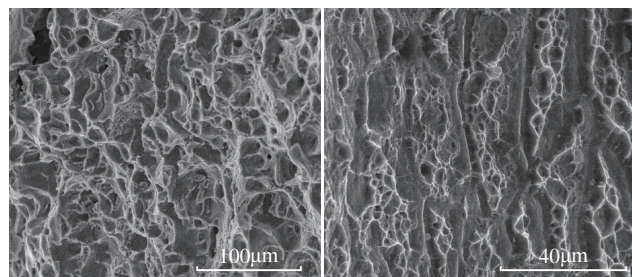
### 3 断裂原因分析

通过对上述3种断裂行为检测结果对比发现,在2种拉伸及剪切试验中,材料断裂发生在蒙皮材料和焊缝之间的熔合区(及下熔合线区),所以下熔合区是焊缝强度的薄弱区。故对比焊缝的上、下熔合线区的金相组织,进行微观组织分析。

从图10(a)~(b)可以看到在焊缝的熔合区靠近上、下熔合线附近,皆有沿熔合线垂直生长的柱状晶,这是因为在焊接过程中形成的焊接熔池存在一定成分过冷区,晶体成长较快,柱状晶前沿向熔池液相中凸出,并深入液相内较长距离,故柱状晶较长。当晶粒生长继续



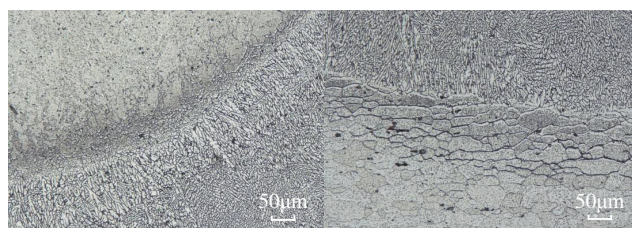
(a) 宏观照片 (b) 焊缝与桁条结合部位



(c) 焊缝中心部位 (d) 焊缝与母材结合部位

图9 剪切断口形貌

Fig.9 Fracture morphology of shear test



(a) 上熔合线微观组织 (b) 下熔合线微观组织

图10 母材与焊缝间的熔合区图像

Fig.10 Microstructure of fusion area between base metal and weld seam

向熔池中心推进时,液相内部产生新的晶核。由于这些晶核周围所处状态相同,可以自由成长,因而形成了几何形状几乎对称的等轴晶粒。

图10(a)与(b)不同的是热影响区。图10(a)上熔合线的热影响区中,未能看到明显的晶粒晶界,这说明合金元素未能在晶粒晶界处有效析出;而图10(b)可以看到下熔合线的热影响区晶粒尺寸比靠近下熔合线的焊缝所形成的柱状晶要大,而且晶粒的晶界非常明显,这说明合金元素在晶界处大量析出。

通过分析上下熔合线微观组织的差别,可发现上熔合线附近的6056母材不但晶粒细小,而且有大量的亚晶粒。而下熔合线附近的6156母材晶粒粗大,而且晶界明显。因此,上熔合线区的强度会比下熔合线区大;同时,对于T型接头结构,焊缝的焊趾处往往也是应力集中的区域<sup>[7]</sup>。在上述2种原因的共同作用下,以上3

(下转第17页)

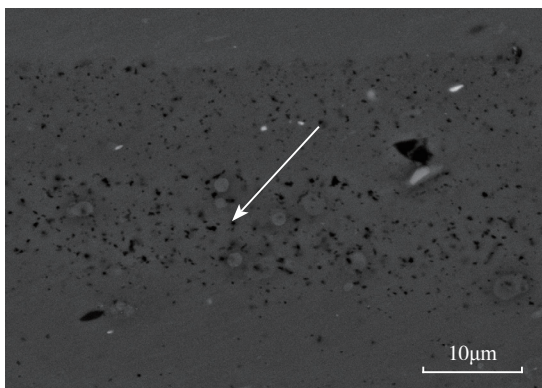


图8 A区域焊点水平搭接界面SEM照片

Fig.8 SEM photo of horizontal interface of welding spot in A area

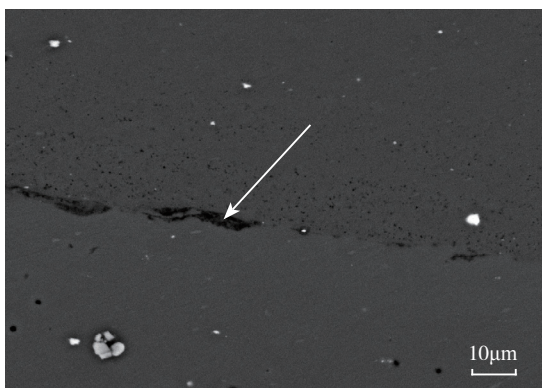


图9 B区域焊点竖直接界面SEM照片

Fig.9 SEM photo of vertical interface of welding spot in B area  
大。

(2) 试样的表面状态影响焊点的有效承载面积,进而影响其抗剪切拉伸性能。

(3) 搭接界面处的“虚焊”对接头连接质量的害处远大于弥散分布的氧化物,是降低点焊接头抗剪切能力的最主要因素。

#### 参考文献

- [1] 胡德昌,胡小舟.现代工程材料手册.北京:宇航出版社,1992.
- [2] 赵衍华,张丽娜.搅拌摩擦点焊技术简介.航天制造技术,2009(2):1-5.
- [3] 张健,董春林.搅拌摩擦点焊在航空制造领域的应用.航空制造技术,2009(16):70-73.
- [4] Griniv. Special features of welding thin sheet structures of 1420 alloy. Welding Production, 1985, 32(8): 21-23.
- [5] 秦红珊,杨新岐.一种替代传统电阻点焊的创新技术——搅拌摩擦点焊.电焊机,2006,36(7):27-30.
- [6] Allen C D, Arbegast W J. Evaluation of friction spot welds in aluminum alloys. SAE Transactions, 2005, 114(5): 612-618.
- [7] Silva A A M, Santos J F, Rosendo T, et al. Friction spot and friction stir spot welding processes—a literature review. Bull Natl R & D Inst Weld Mater Test BID/ISIM 2007, 16: 36-44. (责编 亿霖)

(上接第13页)

种断裂行为检测中,断裂均起裂于焊缝焊趾处,沿着下熔合线扩展的方式断裂。

在上述分析的基础上,检测T型接头不同区域的显微硬度。

T型接头显微硬度及测定位置表2所示。可以发现:焊缝区域的硬度(94HV)低于长桁(114HV)及蒙皮(152HV),且上下熔合区的硬度软化现象非常明显,其中蒙皮侧的熔合区的硬度低于长桁侧的熔合区的硬度,这也充分证明,蒙皮侧的熔合区是整个焊接接头的薄弱位置。

表2 T型接头不同区域的显微硬度(HV)

区域	硬度值
上熔合线	86
焊缝	94
下熔合线	83

#### 4 结论

(1) 纵向拉伸断裂形式主要为韧窝断裂和剪切断裂,横向拉伸断裂形式主要为韧窝断裂形式,剪切试验断裂形式主要为脆性断裂。

(2) 在横向拉伸、纵向拉伸及剪切测试中,3种断裂形式均起裂于蒙皮焊趾处,沿着下熔合线扩展,下熔合线是焊缝的薄弱区域。

(3) 下熔合线热影响区晶粒比上熔合线热影响区大,同时晶粒晶界也比上熔合线较明显。这是造成下熔合线区是T型接头的薄弱区域的原因。

(4) 针对焊趾总是裂纹萌生处、下熔合线强度低于上熔合线的现象,后期工作将着重于进一步优化工艺参数,提高下熔合线热影响区和焊趾的强度。

#### 参考文献

- [1] 李俐群,陈彦宾,陶汪.铝合金双光束焊接特性研究.中国激光,2008,35(11):1783-1788.
- [2] 翟玉峰,黄坚,李敏,等.6061-T6铝合金高速高功率CO<sub>2</sub>激光填丝焊接性的研究.中国激光,2011,38(5):85-90.
- [3] 刁旺战.铝合金双光束激光填丝焊温度场与应力场数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [4] 郑文健.铝合金T型接头双束激光双侧同步焊接的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] 纪春雨,李伟剑,李伟红,等.激光焊接技术发展及其在航空工业领域的应用.航空制造技术,2009(25):126-129.
- [6] 黄瑞.1420铝锂合金的双光束激光焊接[D].北京:北京工业大学,2007.
- [7] 张健,卞鸣煜,冷建兴,等.T型焊接接头疲劳性能研究.船舶工程,2009,31(2):60-63. (责编 叶枫)