

新型铝合金 T 形连接结构双激光束双侧同步焊接接头微观组织研究*

Research on Microstructure of New Aluminum Alloy T-Connection Weld Structure With Double Laser Bilateral Synchronous Welding Technology

同济大学经济与管理学院 陈洁
中国商飞上海飞机制造有限公司 占小红 刘红兵 李昊

[摘要] 采用双侧双激光束同步填丝焊工艺焊接新型铝合金薄板 T 形结构,对其接头进行微观组织和成分分布的分析。研究表明,热影响区晶粒粗大且晶界明显。微观组织中明显出现双激光束双侧同步焊接所特有的两个熔合线,且两个熔合线附近的组织形态不尽相同。析出相在焊缝中分布均匀,但在熔合线附近成片状排列分布。成分分析表明,由于填充焊丝的 Si 含量较高,使 Si 元素在焊缝中略有增加,但是激光束对焊缝底部 Si 元素烧损比较严重。

关键词: 铝锂合金 双激光束双侧同步焊接 微观组织

[ABSTRACT] The microstructure and composition distribution of the new aluminum alloy T-connection structure welded by double laser bilateral synchronous welding technology is analyzed. The results of the study show that the coarse grains and grain boundaries emerge in the heat-affected zone obviously. There are two fusion lines emerging clearly which only appear in the process of the double laser bilateral synchronous welding. The forms of organization near the two fusion lines are not the same. The precipitated phases in the welding line distribute uniformly, but distribute into arrangement near the fusion lines. The element composition analysis results show that the Si element increases slightly in the weld line because of the relatively high content of the Si element in the weld wires, but the Si element vapor loses obviously on the bottoms of the weld lines due to the laser beams.

Keywords: Aluminum-lithium alloy Double laser bilateral synchronous welding Microstructure

铝及铝合金激光焊接技术是最近十几年来才发展

起来的一项新技术^[1-2]。近年来,随着大功率、高性能激光加工设备的不断研制成功,铝合金激光焊接技术已经进入工程实用阶段^[3-6]。作为航空制造业的一种最有前途的新金属材料,铝锂合金的激光焊接工艺尚处于起步阶段。同时,在蒙皮壁板 T 形连接结构中,T 形连接结构双激光束双侧同步焊接工艺也是一种全新的工艺。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,如图 1 所示。

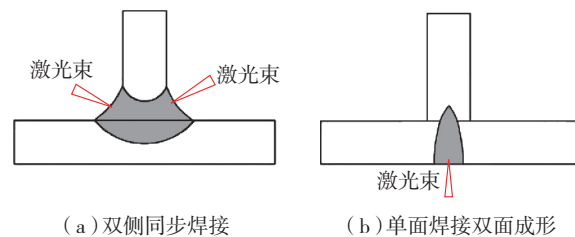


图1 双侧同步焊接与单面焊接双面成形工艺
Fig.1 Double laser bilateral synchronous welding and one-side welding with back formation

空中客车公司经过多年的研发,在其主流产品 A318、A340、A380 等型号的飞机中就大量采用了此种工艺。空中客车公司在 A318、A340、A380 等多种机型上采用了激光焊接的整体机身壁板制造技术取代原有的铆接工艺,极大地减轻了机身重量,并且提高了生产效率、降低了制造成本^[2]。然而,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,目前国内的研究并不成熟。

本文通过优化试验条件下的焊接工艺参数,获得了较优的焊接接头试样,并对接头进行金相组织观察等微观组织结构分析,初步研究了铝锂合金双激光束双侧同步焊接接头的组织形态。

* 国家自然科学基金(50904038)资助。

1 试验材料与设备

本试验所用的母材材料为2mm厚 Al-Cu-Li 系铝锂合金; 填充焊丝采用铝合金 ER4047, 焊丝直径为1.2mm; 母材焊前为 T8 状态。

试验所采用的两台激光器均为德国 ROFIN 公司生产射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器, 型号分别为 DC 030 和 DC 040, 最大输出功率分别为 3.0kW 和 4.0kW, 波长均为 10.6 μm, 最小光斑直径均为 0.15mm, 模式均为 TEM01, 其能量分布为高斯模式。采用 Fronius 送丝系统, 送丝速度在 0.03~9.99m/min 范围内精确可调, 保证焊丝匀速平稳地送达焊接位置。

2 焊接接头显微组织分析

由于不同工艺参数下焊接的试件, 其组织不会发生改变, 所以本试验选出一组成型较好的试样进行显微组织分析。

从图 2 中可以看出, 铝合金激光焊接接头包括焊缝区、熔合区、热影响区和母材。

图 3 为 T 形接头不同区域的金相显微组织。一般情况下, 成分过冷的程度决定晶体的生长方式。由于成

分过冷等因素的影响, 焊接接头焊缝区、熔合区、热影响区都具有各不相同的独特的组织形态。

2.1 焊缝区

在激光焊接熔池凝固过程中, 熔池结晶是从熔合线或尚未熔化的母材晶粒部分开始的。从熔合线向焊缝中心, 液相的温度梯度由大变小。

由于熔合线附近的温度梯度 G 最大、结晶速度 R

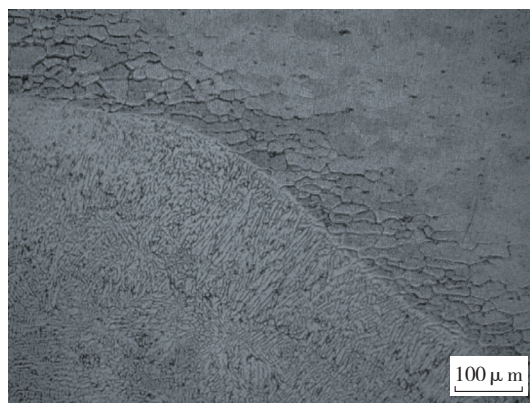
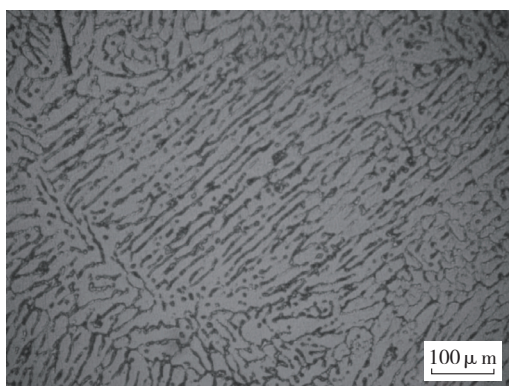
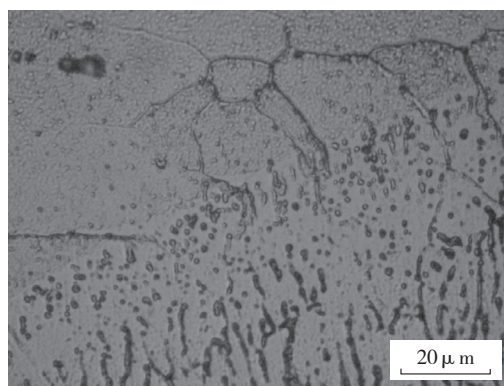


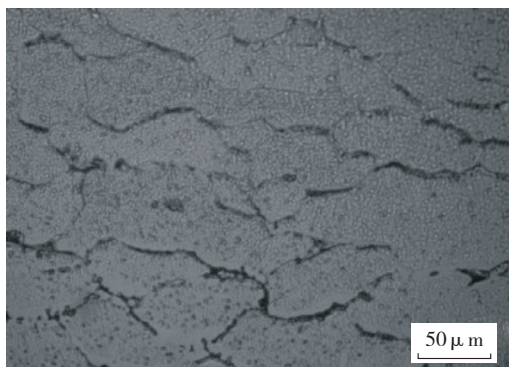
图2 激光焊T形接头显微金相
Fig.2 Microstructure of T-shape joint welded by laser



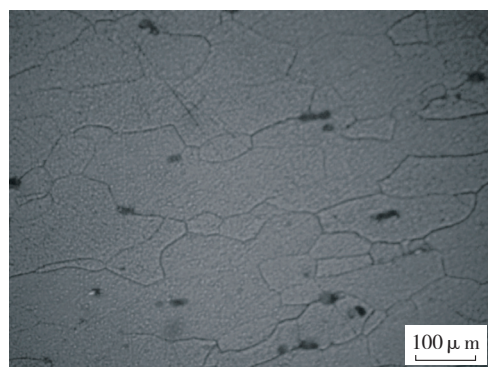
(a) 焊缝



(b) 熔合区



(c) 热影响区



(d) 母材

图3 不同区域的金相显微组织
Fig.3 Microstructure at different zones

最小,不易产生成分过冷,因此,熔池液态金属主要依附母材晶粒的现成表面形成固态晶核并继续向焊缝中心生长,其晶粒取向与母材晶粒的取向相同,故称为联生结晶。由于各晶粒取向不同,取向与散热方向一致的晶粒优先生长,偏离散热方向的晶粒生长被抑制。结晶学理论认为,随着过冷(或过热)状态不同,在沿熔合线往熔池中心方向上可能出现平面晶、胞状晶、树枝状等不同的结晶形态。随着熔池凝固界面的推进,大量合金元素向焊缝中心区聚集,有可能造成焊缝中心达到非均匀成核的过冷度,此时,焊缝中心形成大量晶核,沿各方向均匀生长,形成中心等轴区。如图3所示,在光学金相显微镜下观察,从熔合线到焊缝中心的凝固组织依次为:柱状的平面晶、胞状晶、胞状树枝晶、树枝状晶及等轴晶。图3(a)为焊缝中心等轴晶。

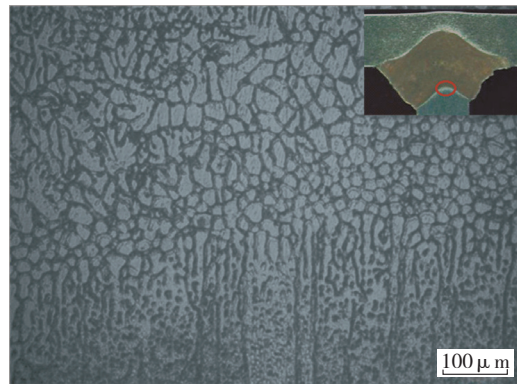
2.2 熔合区

熔合区可分为两个小区,其一是母材只发生局部的熔化;另一小区母材全部熔化,成为焊缝边缘部分。两小区的组织形态不均匀,如图3(b)为下熔合区光学显微照片。T形接头激光焊接存在异于平板焊接的特殊现象——双熔合线(区)。型材上的熔合线(区)位于焊缝的上部,称为上熔合线(区);板材上的熔合线(区)位于焊缝的下部,称为下熔合线(区)。由于T形结构的特殊性,以及两个熔合区冷却速度不同而导致熔合区附近的组织与性能有一定差异。差异体现在从上熔合线向焊缝中心的晶粒形态由柱状晶转变为树枝晶明显快于下熔合线。并且两熔合线以外的热影响区晶粒差异更明显,如图4所示。

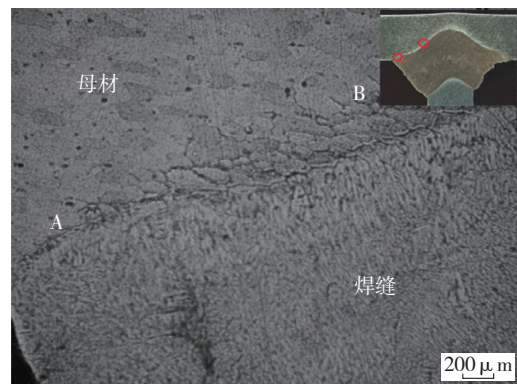
2.3 热影响区

焊接时未发生熔化的母材部分,在焊接热循环作用下,其不同部位受到不同的热影响,相当于经过不同的特殊热处理,其组织和性能均发生变化。由于激光焊接过程光束能量密度大,所以其热影响区相对其他常规焊接方法要小很多。图3(c)所示热影响区(板材)晶粒粗大并且晶界明显,可能是由于过时效引起的。但不同位置的热影响区,其晶界的明显程度也不同,如图4(b)所示,A位置是靠近焊缝外表面的热影响区,B位置是距焊缝表面较远的热影响区。从图中可以看出,A位置中没有明显的晶界,B位置中有比较明显的晶界,这一现象可能是由于位置B处能量较高,并且散热快、温度梯度大,所以晶界明显。

由图4(a)、(b)对比可见,接头上热影响区的晶粒细化,并且未出现下热影响区中的明显晶界。这可能是由于上、下热影响区所受激光束的热处理作用不同、所经受的热循环不同等因素造成的。从晶粒形态来看,上热影响区的性能必然好于下热影响区。



(a) 上熔合区



(b) 下熔合区

图4 两熔合区金相

Fig.4 Microstructure of 2 fusion zones

3 接头 EDAX 能谱分析

为了更深入研究铝锂合金双光束双侧同步焊接接头不同位置金属元素分别,本文还进行了EDAX能谱分析,图5是焊接接头ESEM能谱线扫位置与谱线图,线扫位置图与扫描结果图的相对位置是分别对齐的。

从图5可以看出Al、Cu、Mg元素变化比较均匀,烧损现象不明显。Si元素从母材到焊缝有增加趋势,这是由于母材合金中的Si含量只有0.08%而焊丝中Si含量达到11%,所以焊缝中的Si含量肯定多于母材。但是从图中看出Si含量的在靠近桁条的焊缝位置较高,而底板中下部的焊缝Si含量与母材含量几乎相同。由于Si的沸点远远高于Al、Mg等元素,因此Si元素在焊缝底部被烧损的可能性极小,有可能是因为填充焊丝与熔化母材没有完全互溶,熔池就已冷却结晶,导致焊丝的Si元素大量的留在焊缝顶部而只有少量扩散至焊缝底部。并且Si元素在熔合区和靠近熔合区的焊缝部位变化不稳定,这是由于熔合区和先凝固的焊缝位置晶粒粗大不均匀,当扫描线靠近Al-Si共晶体或者共晶体中的Si元素而远离 α 相时,Si的含量就会很高;同理,若是扫描线靠近 α (Al)固溶体而远离铝-硅共晶体或者共

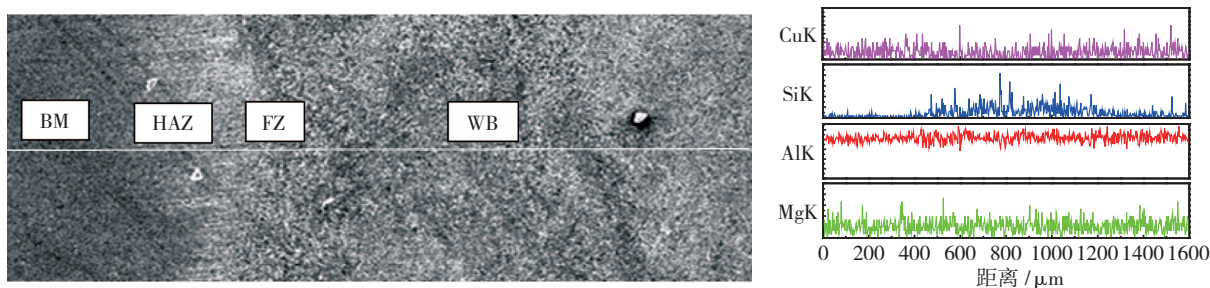


图5 焊接接头ESEM能谱线扫位置与谱线图

Fig.5 ESEM line scanning position and spectral line diagram of welding joint

晶体中的硅就会使得 Si 的含量就会下降。

元素含量的变化在一定程度上也反映显微组织的变化。从结晶学的角度分析,较理想的状态是溶质元素均匀地分布在固溶体之上,这种形态的显微组织是均匀的,此时的力学性能才是最好的。由于焊接成形过程的特殊性,使得各元素的含量一定存在着某种程度的偏析,偏析容易形成缺陷,成为焊接接头的薄弱环节,拉伸断裂往往断裂于此,因此,成分分布状态和接头性能是存在一定关系的。不过从本文扫描结果来看,焊缝偏析现象不明显,只有 Si 元素存在一定的偏析现象。

4 结论

本文针对某一新型铝合金 T 形结构双激光束双侧同步焊接接头的微观组织进行了分析。初步得出如下结论:

(1) 通过金相观察,焊缝中不同区域组织形态特征明显,且与母材组织有显著差别。

(2) 接头存在两个明显的熔合区,且两个熔合区组织性能有差异。

(3) 从线扫描结果看出 Al、Cu、Mg 元素在接头区域内变化比较均匀, Si 元素在焊缝中略有增加。

(4) 初步研究表明,本文所研究的新型铝合金对激光深熔焊接具有较好的工艺适应性,但对于蒙皮桁条 T 形连接结构的双激光束双侧同步焊接,还有诸多问题有待深入研究。

参考文献

- [1] Norris I. Laser welding developments. *Welding Review*, 1998(4): 20-22.
- [2] 肖荣诗,陈铠,左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展. *应用激光*, 2002, 22(2): 206-208.
- [3] 陈彦宾. 现代激光焊接技术. 北京: 科学技术出版社, 2005.
- [4] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接. 北京: 机械工业出版社, 2006: 272-182.
- [5] 张志勇,田志凌,彭云. 铝合金先进焊接工艺. *焊接*, 2003(7): 5-9.
- [6] 杜汉斌,胡伦骥,胡席远. 激光填丝焊技术. *航空制造技术*, 2002(11): 60-63.

(责编 深蓝)

(上接第 114 页)

参考文献

- [1] 张小明. 钛及钛合金的焊接. *稀有金属快报*, 2005(5): 17-20.
- [2] 董宝明,郭德伦,张田仓. 钛合金焊接结构在先进飞机制造中的应用与发展 [A]// 航空、航天焊接国际论坛论文集 [C], 2004, 447-453.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 (4 卷). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 周琦,刘方军,关桥. 电子束流的动态焦点和深穿极值效应. *焊接学报*, 2004(4): 19-23.
- [5] 胡礼木. TC4 钛合金电子束焊接接头的性能研究. *陕西工学院学报*, 1997, 13(4): 43-47.

(责编 亦非)

(上接第 117 页)

4 结束语

本文以航空机床产品为例,研究其形态元素及其语意特征,并通过实验测试获得机床的语意认知集合,根据统计规则和推理公式推导出机床样本的形态语意特征,在此基础上构建了机床形态的形态语意空间,这不仅可以帮助设计师快速定位设计方向,同时也利于设计师了解用户的需求。这种语意空间的构建方法也可推广应用应用到其它产品的形态语意研究中去。

参考文献

- [1] 高敏,谢庆森. 工业艺术造型设计. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 余隋怀,苟秉宸,于明玖. 设计数学基础. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [3] 陈慎任. 设计形态语意学. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] Chan C S. An examination of the forces that generate a style. *Design Studies*, 2001, 22 (4): 319-346.
- [5] 盛骤. 概率论与数理统计 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用. 北京: 科学出版社, 2006.

(责编 小城)