

# Study on Microstructure and Properties of Friction Stir Welding Aluminum-Lithium Alloy in Lapped Joints

Bingyang Liu, Wenchao Chen, Decheng Kong, Enzhi Gao

School of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning  
Email: enzhidan@hotmail.com

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2017; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The friction stir lap welding process for 1.5 mm 5A90 aluminum-lithium alloy was researched. The effect of welding speed on microstructure and hardness of lap joint was analyzed. The results show that when the rotational speed is 1200 r/min and the welding speed is 100 mm/min, the microstructure of the joint is compact, and the weld nugget zone is a fine uniform equiaxed grain; The grain bending or elongation occurs in the thermal-mechanically affected zone, and the grain size of the heat affected zone is coarsening. The hardness of the base metal zone is the highest, and decreases in the thermal-mechanically affected zone and heat affected zone, and increases in the nugget zone. The hardness at the junction of the nugget zone and the thermal-mechanically affected zone will mutate.

## Keywords

Friction Stir Welding, Aluminum-Lithium Alloy, Microstructure, Property

---

# 铝锂合金搅拌摩擦搭接焊接头组织与性能研究

刘冰洋, 陈文超, 孔德成, 高恩志

沈阳航空航天大学, 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳  
Email: enzhidan@hotmail.com

收稿日期: 2017年12月6日; 录用日期: 2017年12月20日; 发布日期: 2017年12月28日

---

## 摘要

以厚度为1.5 mm的5A90铝锂合金为研究对象, 开展了铝锂合金搅拌摩擦搭接焊工艺研究, 分析不同焊

接速度对搭接接头组织及硬度的影响。结果表明：当转速为1200 r/min，焊接速度为100 mm/min时，焊接接头组织致密，焊核区为细小均匀的等轴晶粒；热机影响区出现弯曲或拉伸变形，热影响区晶粒尺寸发生粗化。搭接接头母材区的硬度最高，在热机影响区和热影响区硬度下降，在焊核区硬度上升。在焊核区与热机影响区的交界处硬度会发生突变现象。

## 关键词

搅拌摩擦焊，铝锂合金，组织，性能

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铝锂合金因具有低密度、高的比强度和比刚度、耐腐蚀以及良好的焊接性等优异的综合性能，已成为航空航天领域发展迅速的轻量化结构材料[1]。许多航空航天结构件制造过程中，采用焊接工艺可以减轻重量，提高结构件连接强度，从而提高经济效益[2]。而采用传统焊接技术连接铝锂合金结构件时，由于锂元素比较活泼，较高的焊接温度易造成孔洞、裂纹等缺陷，限制了其应用。搅拌摩擦焊接是一种新型的固态连接技术[3]，在焊接过程中，搅拌针高速旋转并插入被焊工件，通过摩擦产热使材料发生剧烈的塑性变形，随着搅拌针与工件之间的相对移动形成焊缝。由于焊接过程温度低，因此具有焊后变形小、焊件力学性能好等优点，是铝锂合金结构件有效连接的先进方法之一[4]。另外在航空结构件制造中，存在许多搭接结构[5]，目前对铝锂合金搅拌摩擦搭接焊的研究较少，因此本文以 5A90 铝锂合金为研究对象，开展工艺参数对其搭接接头微观组织及力学性能影响的研究工作。

## 2. 试验方法

试验材料使用的 5A90 铝锂合金是一种新型的国产化铝锂合金，其化学成分如表 1 所示，厚度为 1.5 mm。本次试验使用的锥形搅拌头是由 H13 模具钢制成，内凹轴肩直径为 12 mm，搅拌针的直径为 4 mm，长度为 2.5 mm。试验切取 50 mm × 90 mm 规格大小的板材试样重叠放置，重叠宽度为 60 mm。在焊接之前，可以先使用专用的研磨砂纸抛光铝锂合金重叠表面以除去成分复杂的氧化膜以及其它杂质；焊接转速为 1200 r/min 逆时针旋转插入待焊薄板的重叠位置，分别采用不同的焊接速度(100/200/300 mm/min)进行搅拌摩擦搭接焊。试验后沿垂直焊缝方向截取试样，对搅拌摩擦焊搭接接头进行宏观及微观组织观察。并使用数显维氏硬度计来测量接头不同位置的硬度。

## 3. 结果与讨论

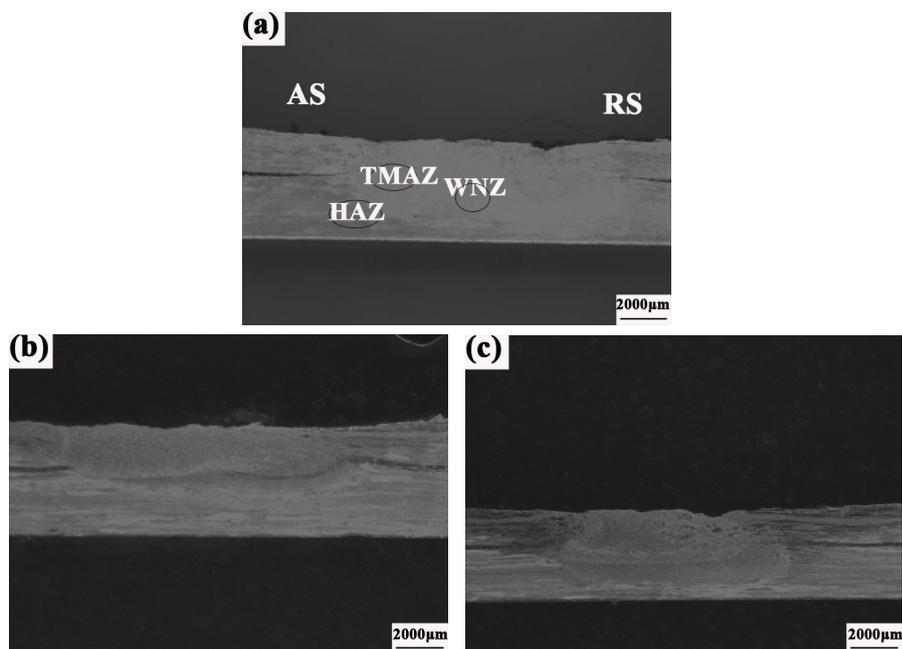
### 3.1. 搭接接头微观组织

图 1 所示为 5A90 铝锂合金在搅拌头旋转速度为 1200 r/min 时，分别在不同焊接速度下进行搅拌摩擦

**Table 1.** Composition analysis of 5A90 aluminum-lithium alloy (mass fraction, %)

**表 1.** 5A90 铝锂合金的化学成分含量(质量%)

Mg	Li	Zr	Fe	Si	Cu	Al
5.2	2.1	0.11	0.07	0.03	0.03	余量



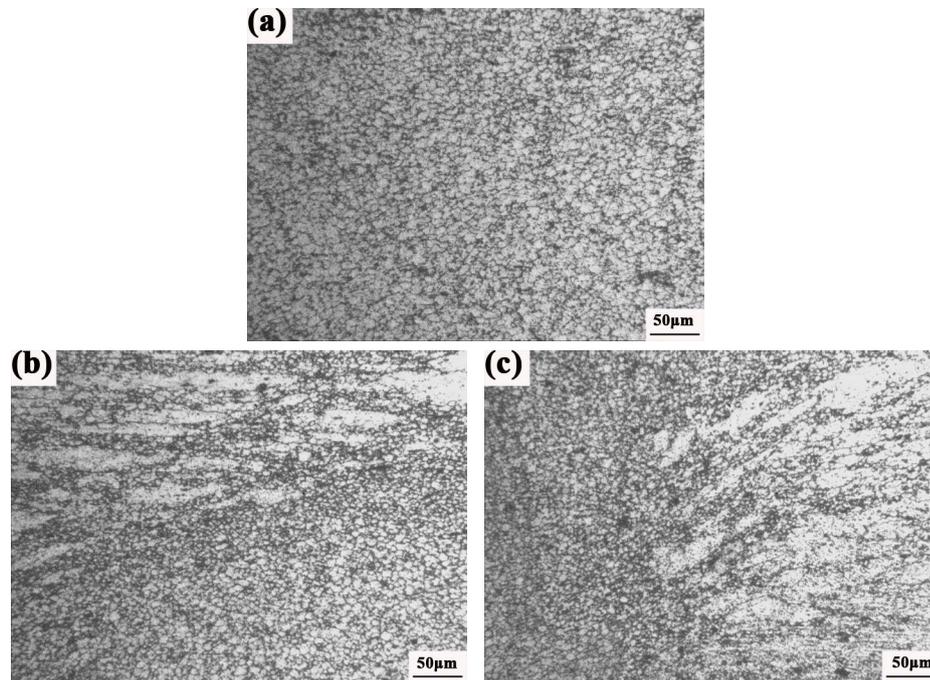
**Figure 1.** Microstructure of 5A90 Al-Li alloy lap joint at different welding speeds: (a) 100 mm/min; (b) 200 m/min; (c) 300 mm/min

**图 1.** 5A90 铝锂合金在不同焊接速度下的搭接接头组织:(a) 100 mm/min;(b) 200 m/min;(c) 300 mm/min

搭接焊接头组织, 5A90 铝锂合金经过焊接之后会在其搭接接头处形成除母材之外的 3 个不同的显微组织区域: 在搭接接头焊缝的中心区域称为焊核区(weld nugget zone, WNZ); 靠近焊缝中心的区域称为热机械影响区(thermal-mechanically affected zone, TMAZ); 在焊缝的边缘区域是与母材组织相似的区域称为热影响区(heat affected zone, HAZ)。由图 1(a)可以看出, 焊接速度为 100 mm/min 时的接头组织更为致密, 焊接的结果较好。图 1(b)中的焊核区域组织形貌与其它区域相比有较大区别, 区域内可以看到明显的氧化物沉积带, 表现为一条细黑线, 且焊核区与热机械影响区的分界面比较明显; 它的焊接结果比较不理想。从图 1(c)中可以看出, 由于焊接速度过大使得金属塑性流动性不足, 所以在搭接接头内出现了空洞焊接缺陷。

图 2 为搅拌头转速 1200 r/min、焊接速度 100 mm/min 情况下焊接接头微观组织, 从图 2(a)中可以看出, 在焊核区的组织会受到搅拌针剧烈的旋转搅拌和轴肩挤压变形的双重作用, 该区域会产生大量的热量, 使得周围的金属母材塑化并且充分流动, 经过较高温度的焊接热循环及搅拌力的作用下, 焊核区的母材组织就会发生动态再结晶, 并且不断形成新的晶核, 新的晶粒来不及长大就被剧烈旋转的搅拌针搅碎, 所以母材组织变为细小的等轴再结晶组织。

热机械影响区紧靠焊核区, 焊接过程中会同时受到搅拌针的机械搅拌和焊接热循环的共同作用, 母材被拉长或者弯曲, 部分组织会在热循环的作用下发生再结晶反应, 在弯曲变形组织内形成再结晶组织。从图 2(b)、图 2(c)中能够看出, 在前进侧(advancing side, AS)与后退侧(retreating side, RS)的分界线是不完全相同的。前进侧的分界面更为清晰明显, 即前进侧的热机械影响区面积较大。前进侧和后退侧分界不同的原因与接头两侧金属的塑性流动不同有关。前进侧与后退侧的金属组织塑性流动的速度有差异, 所以会在两侧形成不同的组织形貌。由于焊核区与热机械影响区的晶粒组织形貌明显不同, 并且区域之间缺乏平稳光滑的过渡, 所以在焊核区与热机械影响区的连接处通常是焊接缺陷集中出现的区域, 同时也是力学性能的薄弱区域。在焊接过程中, 搭接接头热影响区域内的组织只受到焊接热循环作用, 而没有受



**Figure 2.** Microstructure of lap joint: (a) WNZ; (b) AS; (c) RS  
**图 2.** 搭接接头微观组织: (a) 焊核区; (b) 前进侧; (c) 后退侧

到搅拌针激烈旋转搅拌作用, 所以不会发生明显变形现象, 并且热影响区受到的焊接热循环作用比焊核区的热循环作用小得多, 不会发生动态再结晶, 只发生回复反应。

### 3.2. 搭接接头显微硬度

图 3 为 5A90 铝锂合金在旋转速度为 1200 r/min, 焊接速度分别是 100、200、300 mm/min 时搭接接头横截面不同区域沿水平方向的硬度分布情况。从图中可以看出, 在接头的各个区域表现出不同的维氏硬度。母材区的维氏硬度在 128 HV 左右, 焊核区的维氏硬度值在 122 HV 左右, 母材区的维氏硬度最高, 从母材区到热影响区和热机影响区内的硬度下降明显并在热机影响区出现最低维氏硬度, 在焊核区与热机影响区域的交界处会出现硬度突变现象, 这是由于两种不同区域交界处微观组织差异造成的。不同焊接速度时搭接接头的最低维氏硬度变化不大, 焊接速度为 100 mm/min 时, 最低硬度约为 103 HV; 焊接速度为 200 mm/min 时, 最低硬度约为 101 HV; 焊接速度为 300 mm/min 时, 最低硬度约为 101 HV, 由此可以看出不同焊接速度对热影响区最低硬度影响不是很多。焊核区在焊接速度为 100 mm/min 时显微硬度约为 124 HV, 稍高于焊接速度为 200 mm/min 时的 122 HV 和焊接速度 300 mm/min 时的 120 HV, 因为焊接速度过大时容易在搭接接头焊核区内出现孔洞缺陷, 孔洞会降低搭接接头显微硬度, 在一定范围速度内焊接速度较低时的焊核区维氏硬度高一点, 在不同焊接速度时的各个搭接接头硬度在相同的组织区域内区别不是特别大。

## 4. 结论

1) 焊接速度对 5A90 铝锂合金搭接接头组织存在影响, 在转速为 1200 r/min、焊接速度为 100 mm/min 条件下, 接头组织致密、无明显缺陷。

2) 5A90 铝锂合金搭接接头组织特点: 焊核区组织晶粒为均匀细小的再结晶等轴晶粒, 热机影响区组织晶粒表现为扭曲或拉伸变形后的组织形态, 在热影响区的组织发生粗化现象。

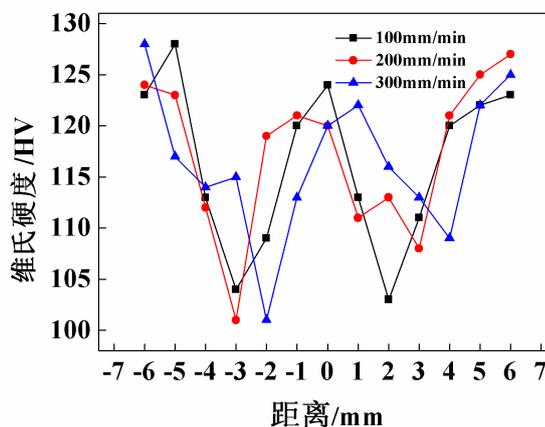


Figure 3. Hardness distribution of lap joint  
图 3. 搭接接头的硬度分布

3) 5A90 铝锂合金的搅拌摩擦焊搭接接头在母材区的硬度最高, 在热影响区和热机影响区的硬度下降, 在热机影响区会出现最低硬度值, 在焊缝中心区域的焊核区硬度上升, 在焊核区与热机影响区的交界位置会发生硬度突变现象, 不同焊接速度对搭接接头的硬度变化影响不大。

### 资助信息

国家自然科学基金: 51405310; 沈阳航空航天大学大学生创新创业项目: X1611102。

### 参考文献 (References)

- [1] 李红萍, 叶凌英, 邓运来, 等. 航空铝锂合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(11): 856-862.
- [2] 黄燕, 王少刚, 赵雅萱, 等. 新型铝锂合金焊接技术研究现状[J]. 有色金属加工, 2017, 46(2): 1-5.
- [3] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. (2005) Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering R*, **50**, 1-78.
- [4] 宋晓村, 朱政强, 陈燕飞. 搅拌摩擦焊的研究现状及前景展望[J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 5-7.
- [5] 魏鹏, 邢丽, 徐卫平. 轴肩下压量对搅拌摩擦焊搭接焊缝界面迁移的影响[J]. 材料工程, 2011(6): 43-47.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-474X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [jast@hanspub.org](mailto:jast@hanspub.org)