

# ZL114A 铝合金搅拌摩擦焊接头的 显微组织与性能

秦占领<sup>1</sup>, 孙德超<sup>1</sup>, 邢 丽<sup>1</sup>, 辜纯明<sup>2</sup>, 甘武奎<sup>2</sup>

(1. 南昌航空工业学院, 江西 南昌 330063; 2. 洪都航空工业集团, 江西 南昌 330024)

**摘要:**研究了 ZL114A 铸造铝合金的搅拌摩擦焊。通过观察接头的显微组织, 发现在焊核处均匀分布着大量细化的硅粒子, 同时母材的铸造孔洞消失; 与母材相比, 焊核区的硬度分布较均匀, 变化幅度小, 拉伸试验大都断裂在接头热影响区处, 接头的抗拉强度可达母材的 70% 左右, 表现出了较好的机械性能。试验结果表明, 搅拌摩擦焊焊接 ZL114A 铝合金, 可以得到成形美观、内部无缺陷、几乎无变形的焊接接头。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; ZL114A; 显微组织

**中图分类号:** TG407

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2303(2007)12-0046-04

## Joint microstructure and properties of ZL114A by friction stir welding

QIN Zhan-ling<sup>1</sup>, SUN De-chao<sup>1</sup>, XING Li<sup>1</sup>, GU Chun-ming<sup>2</sup>, GAN Wu-kui<sup>2</sup>

(1. Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063, China; 2. Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China)

**Abstract:** This paper studied the friction stir welding (FSW) for ZL114A cast aluminium alloy. The results showed that defect free weld was produced by FSW. Comparing with the coarse dendrite microstructure of base metal, the eutectic Si particles are homogeneously dispersed in nugget zone without visual defects. Hardness distribution of nugget zone is well-distributed and less fluctuation. The result of tensile properties shows that many joints fractured at Heat-affected Zone (HAZ), the transverse tensile strength of FSW ZL114A joint reached about 70% of that of the base metal.

**Key words:** friction stir welding; ZL114A; Microstructure

## 0 前言

ZL114A 铝合金是在 ZL101A 铝合金基础上增加镁含量的 Al-Si-Mg 系高强度铸造铝合金, 组织由  $\alpha$  固溶体及  $(\alpha + \text{Si})$  共晶、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ti}$  等相组成。它既具有较 ZL101A 合金更高的力学性能, 又具有优良的铸造工艺性能和可焊性, 适合于制造较大承载力的复杂薄壁结构件。在航空制造业中, 利用该合金制造一些重要部件的大型薄壁结构件来代替铝合金结构组合件, 具有较好的经济效益<sup>[1]</sup>。

对于铸造铝合金, 一般采用 TIG 焊或钎焊连接, 但焊缝强度较低, 且易产生气孔、夹渣、未焊透等缺陷。搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种固相连接技术, 与传统

的焊接方法相比, 具有优质、高效、低耗、焊接变形小、无污染, 接头性能好等优点<sup>[2]</sup>。这种焊接技术正被广泛用于铝合金的焊接, 尤其用熔焊方法难焊的热处理强化铝合金<sup>[3-4]</sup>, 也可用于镁、钛、铜、钢等合金的连接。关于铸造铝合金的搅拌摩擦焊一些学者已做了相应的研究, W.B.Lee、H.J.Liu、Sunggon Lim、M.L. Santella 等人分别对铸造铝合金 A356、AC4A、A356、A319 的搅拌摩擦焊进行了研究<sup>[5-8]</sup>, 大都集中于搅拌摩擦焊接头力学性能的研究。在此通过对 ZL114A 铸造铝合金搅拌摩擦焊的研究, 分析了接头的显微组织和机械性能。

## 1 试验方法和条件

试验选用厚 5 mm 的 ZL114A 铸造铝合金板, 在搅拌摩擦焊机上进行对接试验。所用的搅拌头轴肩直径 15 mm, 搅拌针直径 5 mm, 焊接所选用的工

收稿日期: 2006-12-26; 修回日期: 2007-07-20

基金项目: 江西省工业发展基金资助项目 (BC200201014)

作者简介: 秦占领 (1980-), 男, 陕西汉中, 人, 硕士, 主要从事铝合金搅拌摩擦焊的研究工作。

艺参数为:搅拌头旋转速度  $n=600\sim 1\ 180\text{ r/min}$ ,焊接速度  $v=75\sim 118\text{ mm/min}$ 。

焊后制取搅拌摩擦焊接头的金相试样,用 Keller 试剂腐蚀,观察焊缝的宏观形貌,并分析焊缝的组织;用 401MVD 型数显显微硬度计测量焊接接头的显微硬度;对表面光滑没有缺陷和背部焊合较好的焊接板,按照国家标准 GB/T228-2002 加工成拉伸试样,在 100 kN 材料试验机上测量接头的拉伸性能。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 FSW 接头的显微组织

图 1 为铸造铝合金焊接接头截面的宏观形貌,在此焊接过程中,搅拌头旋转方向与前进方向相同的一侧称为前进边(Advancing Side),相反的一侧称为返回边(Retreating Side),焊接接头由母材(Base metal)、焊核(Nugget)、热影响区(Heat Affected Zone,简称 HAZ)、热力影响区(Thermal Mechanical Affected Zone,简称 TMAZ)组成,其中热力影响区和焊核受到搅拌头的搅拌作用,称为搅拌区。由图可见,在母材中存在由于铸造工艺造成的孔洞(图中缺陷部位),在焊核区可观察到洋葱环状形貌,它的形成是由于当搅拌头旋转沿焊缝走过时,不断向搅拌头的返回边挤压塑性金属流的结果。另外,焊核与热力影响区之间的分界线在焊缝的前进边和返回边明显存在差异,焊缝前进边处分界线较明显,而返回边分界线较模糊,出现这种现象是由于在搅拌摩擦焊过程中,焊缝金属受到搅拌头摩擦、挤压作用不同而造成焊缝两侧塑性金属材料产生了不同的流变行为的结果。

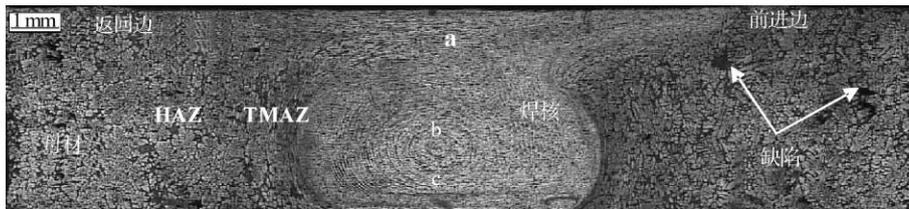


图 1 ZL114A 搅拌摩擦焊接头横截面宏观形貌

焊接接头各区域的显微组织如图 2 所示。由图可见,母材由粗大的树枝状  $\alpha$  相和铝硅共晶结构(图 2a 图中的黑色区域)组成,母材中的( $\alpha + \text{Si}$ )共晶体沿  $\alpha$  相晶界分布。热影响区与母材相比,枝状晶受到热的作用有所长大,硅粒子的大小分布没有显著的变化,这是由于在搅拌摩擦焊过程中,材料所受到的摩擦热不足以导致母材中的硅粒子发生溶解、长大。搅拌区的显微组织与母材的显微组织显然不同,在热力影响区,树枝状  $\alpha$  相被拉长或扭曲,硅粒子的尺寸比母材的更小并沿一定的方向分布,同时母材的铸造孔洞缺陷也消失,焊核区的宽度与搅拌头探针直径的大小相当,其微观组织中,无明显的树枝  $\alpha$  相,细化的硅粒子均匀地分布在铝基体上。这主要是因为搅拌区在搅拌头的搅拌作用下受到热和塑性变形的双重影响,热力影响区的组织在塑性金属流动的作用下被拉长,片状硅粒子被粉碎但仍沿树枝  $\alpha$  相晶界分布,焊核区由于发生了动态再结晶,枝状晶消失,且母材的硅粒子被粉碎细化,均匀地分布在整个焊核区。

### 2.2 FSW 接头的显微硬度分布

ZL114A 铸造铝合金搅拌摩擦焊接头的显微硬

度分布如图 3 所示。从图中可以看出,焊缝前进边的显微硬度比返回边低,与母材相比,焊核区的硬度值大致两边对称,其硬度分布较均匀,变化幅度小。在焊核区,由于树枝  $\alpha$  相消失,硅粒子均匀地分布在铝基体上,强度和韧性较好,显微硬度分布较均匀,变化幅度也比较小。而母材组织主要由粗大的树枝  $\alpha$  相和铝硅共晶结构组成,且强化质点分布

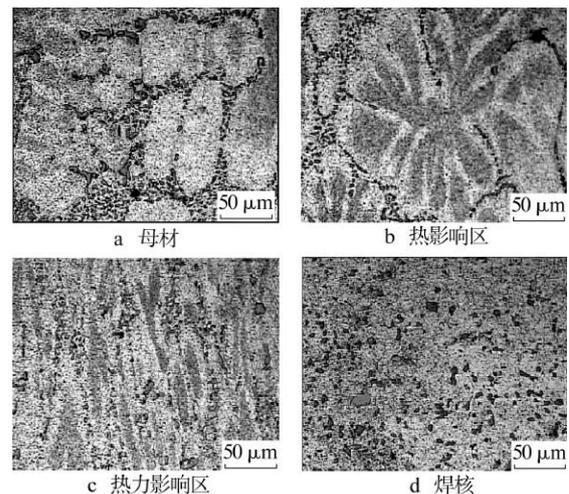


图 2 焊接接头的显微组织

度分布如图 3 所示。从图中可以看出,焊缝前进边的显微硬度比返回边低,与母材相比,焊核区的硬度值大致两边对称,其硬度分布较均匀,变化幅度小。

在焊核区,由于树枝  $\alpha$  相消失,硅粒子均匀地分布在铝基体上,强度和韧性较好,显微硬度分布较均匀,变化幅度也比较小。而母材组织主要由粗大的树枝  $\alpha$  相和铝硅共晶结构组成,且强化质点分布

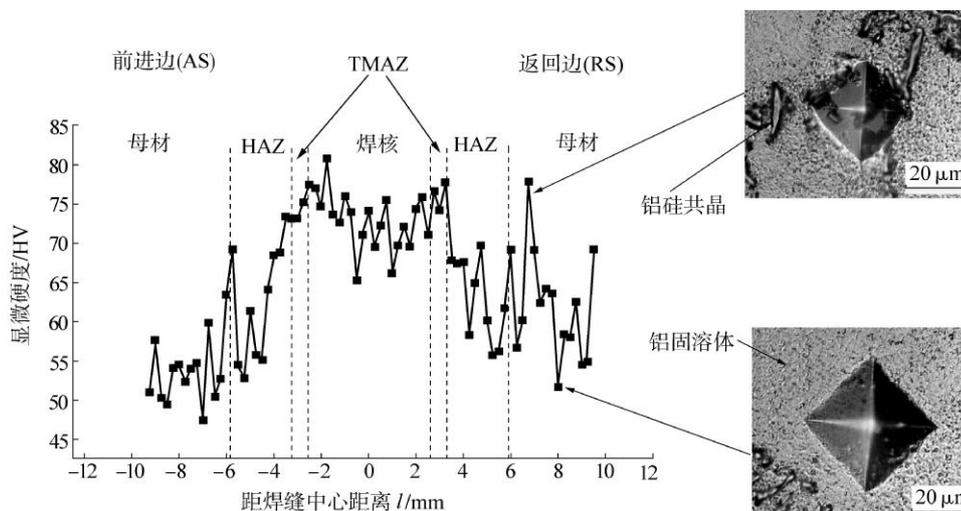


图 3 ZL114A 搅拌摩擦焊接接头显微硬度分布

不均匀,当硬度计的压头靠近较软的铝固溶体时,显微硬度值较低,当压头靠近铝硅晶时,其显微硬度值较高。热力影响区因受到热和力的双重作用,晶粒被拉长或扭曲,生成了许多细小的等轴晶粒,且不同部位的晶粒受到搅拌头的热、力作用不同,晶粒尺寸差异大,变形不均匀,变形阻力大,强度急剧下降,表现为显微硬度值下降。热影响区受到搅拌摩擦热的影响,晶粒长大,内部组织主要为粗大的白色树枝状 $\alpha$ 相和铝硅共晶组织,其显微硬度分布与母材相似。搅拌摩擦焊焊接铸造铝合金时,接头前进边热影响区受到的摩擦热比返回边要高,其晶粒长大倾向相对较明显,如图 4 所示,因此,接头前进边的显微硬度相对于返回边的硬度下降的趋势更明显。

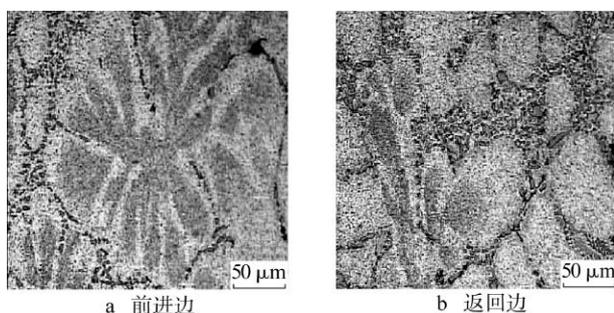


图 4 ZL114AFSW 接头热影响区显微组织

因此,共晶硅原子在基体中的分布对 ZL114A 铸造铝合金搅拌摩擦焊接接头显微硬度的分布有很大的影响。母材区共晶硅沿树枝 $\alpha$ 相晶界分布不均匀,其硬度值分布也不均匀,变化幅度较大,而焊核区共晶硅原子的分布比在母材区的分布更均匀,焊核

区的显微硬度分布相对于母材区也更均匀、稳定,变化幅度也较小。

### 2.3 FSW 接头的拉伸性能

对 ZL114A 搅拌摩擦焊接接头进行拉伸性能测试,试验的结果如表 1 所示。从表 1 可知,ZL114A 铸造铝合金搅拌摩擦焊接接头的拉伸试样大都断裂在接头前进边的热影响区上,接头抗拉强度达到了母材的 70%,延伸率提高。当以大量的片状硅粒子的形式分布在基体中时,合金的塑性较差;当大量的硅粒子被细化后均匀分布在基体中时,合金的塑性和抗拉强度提高。

表 1 FSW 接头的拉伸试验

序号	旋转速度 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$	焊接速度 $v/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	抗拉强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	延伸率 $\delta_s/\%$	断裂位置
1	950	95	173.0	1.80	HAZ(AS)
2	950	118	173.5	2.40	HAZ(AS)
3	600	95	172.4	2.10	HAZ(AS)
4	1 180	95	172.2	1.65	HAZ(AS)
母材	—	—	250.8	1.40	—

母材由于是铸态的,并存在较多的缩孔和大尺寸的片状硅粒子,机械性能较差;焊核区与母材相比,因受到搅拌和挤压,片状硅粒子被粉碎细化并均匀分布在基体中,铸造缺陷在焊缝的形成过程中完全消失,焊核区的微观组织比母材具有较高的连续性,因此其塑性和抗拉强度较高;热力影响区组织受到搅拌作用,晶粒被拉长,有一定的方向性,其脆性程度比母材小;而热影响区受到摩擦热的影响使晶粒变粗大,且有大量脆性的片状硅粒子不均匀地

分布在树枝状  $\alpha$  相晶界上,前进边热影响区晶粒长大的现象更为明显,其脆性程度大于母材,为接头中最薄弱的区域,因此拉伸试样大都断裂在此区域。

### 3 结论

(1)ZL114A 铸造铝合金 FSW 接头的焊核组织为铝基体中均匀分布着细化的硅粒子,晶粒细小,组织性能好,未观察到气孔等缺陷。

(2)FSW 焊核区的硬度分布较均匀,变化幅度小。

(3)FSW 接头的拉伸试验大都断裂于热影响区,接头强度达母材的 70%左右。

### 参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册(3)[M].北京:中国标准出版社,2002.
- [2] 张 华.搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J].焊接学报,2003,6(24):91-95.
- [3] 邢 丽.铝合金 LD10 的搅拌摩擦焊组织及性能分析[J].焊接学报,2002,12(23):55-58.
- [4] 刘小文.LY12 搅拌摩擦焊接技术[J].焊接学报,2001,8(22):55-57.
- [5] Lee W B, Yeon Y M, Jung S b. The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2003(355): 154-159.
- [6] Liu H J, Fujii H, Nogi K. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of AC4A Cast Aluminium Alloy[J]. Materials Science and Technology, 2004, 4(20):399-402.
- [7] Sunggon Lim, Sangshik Kim. Tensile Behavior of Friction-Stir-Weld A356-T6/Al 6061-T651 Bi-Alloy Plate[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 9(35):2837-2843.
- [8] Santella M L, Engstrom T. Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356[J]. Scripta Materialia, 2005(53):201-206.

## 钛及钛合金的分类、特性以及常用的焊前清理方法

钛是一种非磁性材料,具有密度小( $4.5 \text{ g/cm}^3$ )、强度高(比铁约高 1 倍)、较好的高温强度和低温韧性以及良好的耐腐蚀性等特点。钛在  $885 \text{ }^\circ\text{C}$  以下时,具有密集六方晶格称为  $\alpha$  钛。在  $885 \text{ }^\circ\text{C}$  产生同素异晶转变,晶格变为体心立方晶格称为  $\beta$  钛。钛长时间在高温停留,晶粒容易长大,快速冷却时,容易生成不稳定的针状  $\alpha$  钛组织称为“钛马氏体”,其强度较高,塑性较低。

钛加入合金元素后可改善加工性能和力学性能,常加的合金元素有 Al、V、Mn、Cr、Mo 等,按照成分和在室温时的组织不同,钛和钛合金可分为:

(1)工业纯钛。按其纯度可分为 TA<sub>1</sub>、TA<sub>2</sub>、TA<sub>3</sub> 等牌号,其中 TA<sub>1</sub> 的杂质最少,少量杂质将使得强度增高、塑性降低,故 TA<sub>1</sub> 的强度最低( $\sigma_b$  为 300~500 MPa)、塑性最好( $\delta$  为 30%)。工业纯钛有良好的焊接性。

(2) $\alpha$  钛合金。钛中加入了 Al、Sn 等元素,牌号为 TA<sub>6</sub>、TA<sub>7</sub>,有良好的高温强度和抗氧化性。

(3) $\beta$  钛合金。钛中加入了 Mn、V、Mo、Cr 等元素,牌号为 TB<sub>1</sub>、TB<sub>2</sub>。热处理后强度较高(TB<sub>1</sub> 的  $\sigma_b$  为 700 MPa),塑性也较好,而且具有良好的加工性,但耐热性稍差,体积质量大、成本高。 $\beta$  钛合金的焊接性不良。

(4) $\alpha + \beta$  钛合金。钛中加入了 Al、Se、Mo、Mn、Cr 等元素,牌号为 TC<sub>1</sub>、TC<sub>2</sub>。可通过热处理强化,加工性能良好,但高温强度低于  $\alpha$  钛合金。 $\alpha + \beta$  钛合金焊接性很差,很少用于焊接结构。

由于钛及钛合金的化学活性大,易被氧、氮、氢所污染,所以不能采用手弧焊、CO<sub>2</sub> 气体保护焊等焊接方法进行焊接。目前常用的焊接方法是氩弧焊、埋弧焊和真空电子束焊等,其中尤以钨极氩弧焊用的最为普遍。钛及钛合金焊件的表面,焊前一定要认真的清理,因污物易在焊缝中产生气孔和非金属夹杂,使焊缝的塑性和耐腐蚀性显著下降。常用的清理方法如下:

(1)机械清理。用切削加工、喷砂、喷丸或钢丝刷清除焊接区的污物和氧化皮等。

(2)化学清理。将焊件及焊丝在酸液中进行清洗,使焊件表面去净氧化物,呈银白色金属光泽为止,酸洗后在流动清水中洗净,焊前再用丙酮或酒精擦净焊丝及焊件焊接区域的表面。