

# 飞机铝合金型材结构 FSW 焊接

柴鹏, 张小剑, 简波, 栾国红

(中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

**摘要:**提出了搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding, FSW)技术的3个基本要素,对铝合金型材FSW焊接件在航空结构中的几个典型应用进行了分析。并简要介绍了中国搅拌摩擦焊中心在铝合金型材搅拌摩擦焊接方面的研究成果。中国搅拌摩擦焊中心的研究表明,采用搅拌摩擦焊技术焊接铝合金能够得到比较满意的接头强度。

**关键词:**搅拌摩擦焊接;铝合金挤压型材;航空结构

**中图分类号:** TG457.1      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1001-2303(2005)09-0023-24

## Friction stir welding of aluminum extrusions in aviation

CHAI Peng, ZHANG Xiao-jian, JIAN Bo, LUAN Guo-hong

(China FSW Center, Beijing 100024, China)

**Abstract:** In this paper, three elements of FSW are put forward, several representative applications of FSW welded aluminum extrusions in aerospace structure were analyzed, and studies of aluminum extrusions FSW welding in China FSW Center were introduced. The results by CFSWC shows that the satisfied strength can be acquired.

**Key words:** FSW; aluminum extrusions; aerospace structure

## 简介

由于铝合金挤压型材具有组织性能均匀、整体性好、制造精度高等优点<sup>[1]</sup>,因而在宇航、船舶、轨道车辆等领域得到了越来越多的应用。但是挤压型材的宽度一般不超1 m,国际上实现大型铝合金型材结构制造的有效方式是窄幅型材拼接(焊接)——采用焊接方法将窄幅铝合金型材连接在一起形成工业制造中需要的整体壁板结构。目前,在铝合金型材焊接中应用比较多的是搅拌摩擦焊接技术<sup>[2]</sup>。

搅拌摩擦焊接过程是一个将机械能转换为热能的过程,利用焊接过程中产生的摩擦热和塑性变形能实现材料连接。所以搅拌摩擦焊接是一个固态连接过程。其基本特征可用3个要素来描述:搅拌头、刚性夹具以及能够提供足够焊接锻压力的搅拌摩擦焊接设备。搅拌头形状及尺寸需要根据接头厚度、形式以及被焊材料等确定。由于搅拌摩擦焊接过程中伴随着较大的焊接锻压力(通常以t计,如焊接3 mm厚的2A14铝合金需要约1.2 t的锻压力),所以搅拌摩擦焊技术不仅需要能够提供足够焊接锻

压力的设备,还需要刚性夹具——通常为专用夹具。采用搅拌摩擦焊接技术焊接铝合金尤其是2XXX和7XXX高强度铝合金,通常能得到较高的连接强度,因而搅拌摩擦焊接技术在飞机制造领域有广阔的应用前景<sup>[3,4]</sup>。

在此主要对飞机制造中可能采用或已经采用的铝合金挤压型材结构进行分析,并对中国搅拌摩擦焊中心在铝合金型材搅拌摩擦焊接方面的研究进展进行了介绍。

## 1 铝合金挤压型材在飞机制造中的应用研究

铝合金型材结构整体翼板的FSW焊接<sup>[5]</sup>如图1所示。从图中可以看出,整体翼板的基本构成是型材单元,采用FSW技术将多个型材单元两两对接,即形成一个整体。由于单个型材单元的尺寸比较小,因而容易挤压成形,且成本低廉。而采用FSW技术将型材单元焊接在一起,由于不需要填充焊丝、也不需要保护气等耗材,且焊接过程容易实现自动化,焊前焊后的处理程序也比较简单,所以具有比较大的成本优势。另外,如前所述,采用FSW技术焊接铝合金材料也能获得较大的接头系数,所以采用FSW技术

收稿日期:2005-08-05

作者简介:柴鹏(1976—),男,山西垣曲人,工程师,硕士,主要从事搅拌摩擦焊技术的研究工作。



专题讨论

有色金属焊接工艺及设备

制造铝合金型材结构整体翼板也具有比较大的质量优势。

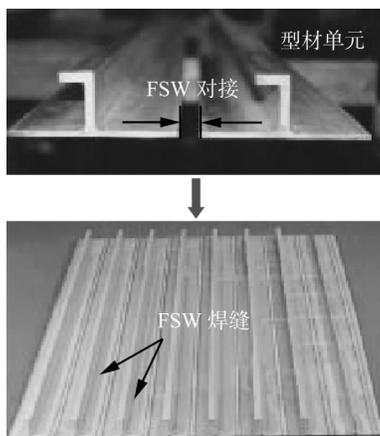


图 1 铝合金型材结构整体翼板的 FSW 焊接

飞机翼板的传统制造方法是按翼板厚度选择等厚的铝合金板材(如图 2 中的虚线框所示),然后采用机械加工方法将多余材料加工掉。显然,采用这种办法将造成大量材料浪费,且需要大量的时间对原材料进行机械加工,从而使飞机翼板制造的材料成本和加工成本大大提高。

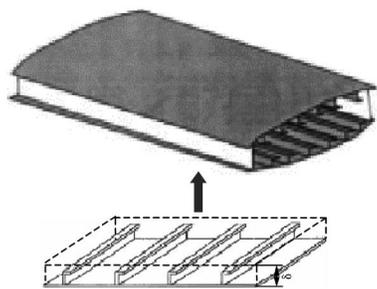


图 2 机械加工成形的飞机翼板

从以上比较可以看出,相对于传统制造方法,采用 FSW 技术制造铝合金型材整体翼板结构具有明显的成本优势。

图 3 为 C-17 运输机上的活动铝合金载物底板<sup>[9]</sup>(Slipper-aluminum aircraft-adapter pallet system)。载物底板的基本结构为三明治结构,对于该结构波音公司尝试了 5 种制造方案,包括 FSW 技术、GMAW 技术以及各种机械连接方法。其中只有 FSW 技术不仅满足了产品的性能要求,也满足了美国空军对该项目的成本要求。如图 3 所示,该“Slipper”结构由 7 块 6005A 铝合金挤压型材焊接在一起,每两块型材之间由上下两道 FSW 接头连接而成。焊后对 6005A 铝合金挤压型材搅拌摩擦焊接头进行各种抗腐蚀性能试验表明:



图 3 Slipper 结构的 FSW 焊接

- a. 按照 ASTM 标准进行 48 h 的剥落腐蚀试验,没有明显的腐蚀痕迹;经过 96 h 的剥落腐蚀后,产生了少量的腐蚀斑点。
- b. 按照 ASTM 标准进行 24 h 晶间腐蚀试验,接头表面出现了少量腐蚀痕迹。
- c. 经过中性盐雾浸泡,在接头表面 0.076 mm 范围内发现了腐蚀痕迹。
- d. 按照 ASTM 标准,在酸性盐雾中浸泡两周,结果与试验 c 相似。

## 2 几种典型铝合金材料的 FSW 焊接

### 2.1 接头性能分析

表 1 为几种典型铝合金材料母材及 FSW 接头强度对比。从表中可以看出,5A06 铝合金和 7A52 铝合金的 FSW 接头在进行拉伸试验时,断裂均发生在母材上,分别如图 4、图 5 所示。延伸率方面,5A06 铝合金 FSW 接头的延伸率几乎与母材相同。所以采用 FSW 技术焊接 5A06 和 7A52 铝合金可以达到与母材等强。

2A14、2219 以及 6063 均属于可热处理强化铝合金,采用 FSW 技术焊接的接头系数分别为 83.7%、79.2%和 82.9%。显然,这 3 种铝合金的接头性能均

表 1 几种典型铝合金 FSW 接头强度

试样类别	断裂位置	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%	接头系数/%
2A14-T6	焊缝	397.59	355.30	4.25	83.7
2219-T4	焊缝	355.25	—	5.5	79.2
5A06-O	母材	394.91	193	24	100
6063-T651	焊缝	252	—	6.9	82.9
7A52-T4	母材	371.9	—	7.5	100



图 4 5A06 铝合金 FSW 接头拉伸试样断口



专题讨论

有色金属焊接工艺及设备



图 5 7A52 铝合金 FSW 接头拉伸试样断口

受到了 FSW 焊接过程热循环的影响,尤其是强化相的分布受焊接过程热循环的影响更为明显。对 6063FSW 焊接过程中强化相分布的研究表明,焊后焊核区溶质元素(强化相)过饱和固溶在基体金属之内,微观几乎观察不到针状沉淀相,因此焊核区的微观硬度比母材低<sup>[7]</sup>。由此说明,经过 FSW 焊接过程热循环,强化相几乎完全溶解在铝基体中,从而丧失了部分强化作用,降低了接头性能。

另外,热影响区金属虽然没有经受剧烈的搅拌、摩擦与碾压等机械作用,但是却受到了焊接热循环的影响——热影响区温度<sup>[8]</sup>高于晶粒回复温度(约 240 °C),从而影响了热影响区强化相的分布以及晶粒尺寸。这一点可以从 2A14 和 6063 铝合金 FSW 焊接试样拉伸断口的分析中得到证明。如图 6、图 7 所示,2A14 和 6063 铝合金的 FSW 焊接试样在拉伸过程中,断裂均发生在焊缝边缘,近似 45°断口,断裂面距离 FSW 接头迹线(搅拌头作用区的边界线)约有 2~3 mm,所以,尽管搅拌摩擦焊接过程属于固相连接,焊接温度比较低,但焊接热循环仍然影响到了 2A14 等可热处理强化铝合金的接头强度,尤其是热影响区的强度,从而形成了 FSW 接头中的薄弱环节。所以,对于可热处理强化铝合金的 FSW 接头,应从控制焊接热循环方面采取措施提高接头强度。

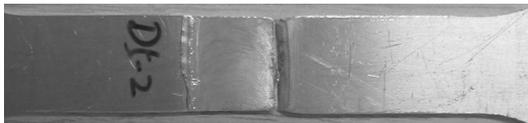


图 6 2A14 铝合金 FSW 接头拉伸试样断口



图 7 6063 铝合金 FSW 接头拉伸试样断口

## 2.2 结构变形分析

FSW 技术一直被当作一种低变形焊接技术,为了验证这一点,中国搅拌摩擦焊中心对 LF6-M 铝合金搅拌摩擦焊接后的残余变形进行了测量。样件尺寸为 1 000 mm×100 mm×3 mm,两两对接,焊后将其平置于一个大理石测量平台上(见图 8),测量其

焊接方向的变形量。选择焊缝起始段的一点作为测量起始点,沿焊接方向相距 100 mm 选择一个测量点,共 11 个。根据测量值得到的焊接变形拟合曲线如图 9 所示。

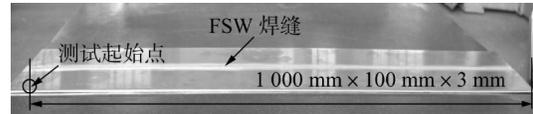


图 8 采用 FSW 技术焊接的 3 mm 铝合金对接

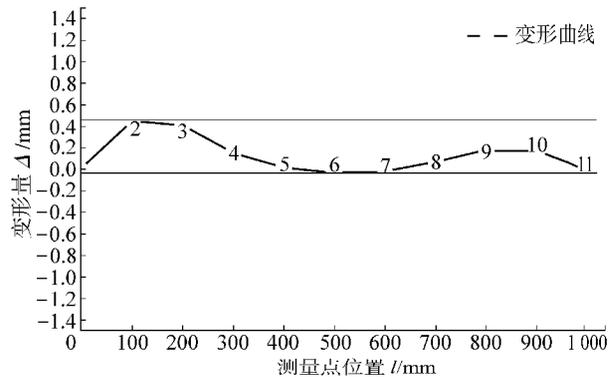


图 9 采用 FSW 技术焊接 3 mm LF6 铝合金的变形曲线

从图 8 可以看出,焊后结构发生了波浪变形,图 9 中的拟合曲线也说明了这一点。起始点 1 作为基准点,其值设为 0;从第 1 个测量点到第 2 个测试点,变形逐渐增大——距台面的实际距离逐渐减小,测量值为 0.45 mm;从第 2 个测量点到第 6 个测量点,变形逐渐减小(相对于起始点),第 6 个点的测量值为-0.03 mm;在第二个波峰上,9 点与 10 点的变形量小于 2 点的变形量,分别为 0.18 mm 和 0.17 mm。由此可以看出,1 000 mm 长的结构在 FSW 焊接后虽然发生了波浪变形,但是总的变形量比较小,仅有 0.48 mm(2 点与 6 点的高度差)。

## 3 结论

a. 铝合金型材 FSW 焊接结构在飞机结构件中的应用前景得到了包括波音等大型飞机制造企业的密切关注,并在整体翼板、载物底板等结构中开展了相应的技术应用研究。

b. 采用 FSW 技术制造飞机铝合金型材结构,可以有效降低材料消耗,具有明显的成本优势和质量优势。

c. 采用 FSW 技术焊接 5A06-O、7A52-T4 铝合金材料,可以得到与母材等强的接头;采用 FSW 技术焊接 2A14-T6、2219-T4 和 6063-T651 等可热处理强化铝合金材料时,接头强度受到焊接热循环的

专题讨论  
——有色金属焊接工艺及设备

影响而有所降低,但仍明显高于熔焊接头。

d. 铝合金搅拌摩擦焊结构变形量比较小,对 1 000 mm×3 mm(长×厚)的 LF6 铝合金搅拌摩擦焊接结构变形的测量表明,最大变形量仅为 0.48 mm。

### 参考文献:

- [1] 刘静安,谢建新.大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [2] Rollin,Collins E.II: The use of friction stir welding technology in maritime applications[C].TMS:Aluminum 2001— Proceedings of the TMS 2001(Aluminum Automotive and Joining Sessions),2001.
- [3] 栾国红,郭德伦,关 桥,等.飞机制造业中的搅拌摩擦焊研究[J].航空制造技术,2002,(10):24-27.
- [4] 栾国红,柴 鹏,孙成彬,等.飞机制造前景技术——搅拌摩擦焊[A].北京:第九届埃森焊接与切割展览会,2004.
- [5] Kumagai M.,Sato H.Integral wing panel for air planes produced by friction stir welded extrusion[C].Kobe:3rd International Friction Stir welding Symposium,2001.
- [6] Bolser D.,Lederich R.Applications of friction stir welding at the Boeing company[C].Osaka:Proceedings of the IIW International Conference,2004.
- [7] Sato Y. S.,Kokawa H.,Enomoto M.,*et al.*Distribution of hardness and microstructure in friction stir weld of Al alloy 6063[C].Kobe:3rd International Symposium on Friction Stir Welding,2001.
- [8] Colegrove P.Steady state and transient thermal modeling of thick section friction stir welded aluminium alloys[C].Australia,2001.