

# 5A05 铝合金薄板搅拌摩擦焊装配因素 对焊缝质量的影响\*

王 涛,冯杏梅

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

**摘 要:**文中通过5A05铝合金薄板搅拌摩擦焊对接试验,进行了力学性能分析和X射线探伤,研究接头错边量和间隙量对搅拌摩擦焊对接接头缺陷和力学性能的影响。试验结果表明当错边量大于0.5 mm或间隙量大于0.8 mm时焊缝力学性能下降并伴随下压量增大和缺陷的产生,接头缺陷与拉伸试验断裂部位大多在焊缝前进侧。错边量和间隙量对铝合金薄板搅拌摩擦焊对接接头力学性能及内部质量有重要影响,为保证焊接生产质量,搅拌摩擦焊焊接过程中应该严格控制接头错边量和间隙量。

**关键词:**搅拌摩擦焊;5A05铝合金;装配因素;错边量;配合间隙

**中图分类号:** TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2016)05-0050-03

## Influence of Assembly Parameters of 5A05 Aluminum Alloy Thin Plate Friction Stir Welding on Welding Quality

WANG Tao, FENG Xing-mei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** In this study, thin 5A05 aluminum alloy plates are welded by friction stir welding, mechanical property analysis and X-ray detection are performed, and the effect of the misalignment and clearance on the imperfections and mechanical properties of the joints are studied. It is found that when the amount of misalignment exceeds 0.5 mm and clearance exceeds 0.8 mm, the mechanical properties of the joint will degrade and the imperfections will begin to appear, which are mostly located at the advanced side. In order to improve the quality of the joint, the misalignment and clearance must be controlled strictly.

**Key words:** friction stir welding; 5A05 aluminum; assembly parameter; misalignment; clearance

## 引 言

5A05铝合金因具有高的比强度、疲劳及断裂韧性,被广泛应用于航空航天和电子等领域。采用传统的熔焊方法(如:TIG/MIG)进行焊接,接头易出现热裂和强度下降的问题<sup>[1]</sup>。搅拌摩擦焊(FSW)作为一种固相连接方法,具有焊接温度低、接头残余应力小、焊接工件变形小和焊缝强度高优点,为铝合金等轻金属材料的连接提供了新的方法和途径<sup>[2-4]</sup>。从2002年北京航空制造工程研究所引入搅拌焊并成立中国搅拌摩擦焊中心至今,搅拌摩擦焊在我国轻金属焊接领域得到了快速的发展和推广。对接接头是铝合金搅拌

摩擦焊工艺性和应用性最好的接头类型,其装配因素(接头间隙和错边量大小)对焊接接头缺陷和性能有着非常重要的影响,但是目前国内外的研究很少,因此迫切需要进行相关试验研究搅拌焊对接过程中装配因素对焊缝质量的影响<sup>[5-6]</sup>。本文通过5A05铝合金薄板搅拌摩擦焊对接试验,并进行了力学性能分析和X射线探伤,研究了接头错边量和间隙量对接头缺陷和力学性能的影响。

## 1 试验材料及装配工艺因素

### 1.1 试验材料

试验选用厚度为4 mm的退火态5A05铝合金薄板

\* 收稿日期:2016-06-16

对接,5A05 型铝合金为 Al-Mg 系合金,其化学成分及实测抗拉强度见表 1。

表 1 5A05 型铝合金化学成分(质量分数/%)和抗拉强度

抗拉强度/ MPa	化学成分	
	元素	质量分数/%
332.47	Fe	0.5
	Si	0.5
	Mn	0.6
	Cu	0.1
	Mg	5.5
	Zn	0.2
	Al	余量

1.2 样件结构形式

对接式样为长  $L=300$  mm、宽  $B=100$  mm、厚度  $H=4$  mm 的板材。错边量实验式样焊接结构如图 1 所示,  $h_1$  为前进侧,  $h_2$  为后退侧,通过改变  $h_1$  和  $h_2$  来控制焊接装配错边量的大小,设置错边量为 0 mm,  $\pm 0.5$  mm,  $\pm 0.9$  mm,其中  $h_1$  大时错边量为负,反之为正。

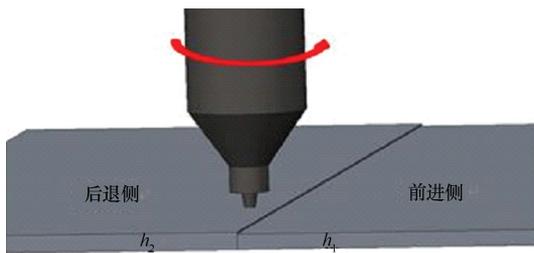


图 1 错边量焊接样件结构式样

间隙量实验式样结构如图 2 所示,改变装配间隙量的大小,分别设置间隙量为 0 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm。

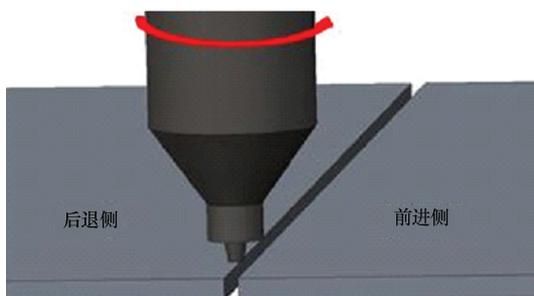


图 2 间隙量焊接样件结构式样

1.3 实验设备及参数

搅拌摩擦焊实验在二维定梁龙门式搅拌摩擦焊设备(型号 FSW-LM2-3012)上进行,实验使用的是带右旋螺纹的搅拌头,轴肩直径为 12 mm,搅拌针的长度为 4 mm,焊接过程中搅拌头顺时针旋转,实验参数如表 2 所示,实验采用单一变量原则。拉伸实验在龙门拉伸

试验机(型号 GT-7001-MS)上进行,X 射线探伤采用便携式工业 X 射线探伤仪(型号 ERESO65MF4)。

表 2 实验参数

焊接速度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	旋转速度/ (r · min <sup>-1</sup> )	焊接倾角/(°)
120 ~ 150	1 000 ~ 1 200	2 ~ 3

2 试验结果及讨论

2.1 装配错边量对接头性能影响

(1) 目视检验

检验结果如表 3 所示,错边量为  $\pm 0.9$  mm 时接头的前进侧表面有大量咬边,错边量为  $-0.9$  mm 时接头后退侧表面有大量微裂纹。

表 3 错边量试验目视检验结果

错边量/mm	0	0.5	0.9	-0.5	-0.9
下压量/mm	0.11	0.39	0.41	0.37	0.46
表面缺陷	无	无	大量咬边	无	微裂纹

(2) X 射线无损检验

检测结果如表 4 所示,错边量为 0.9 mm 时接头内部有隧道型孔洞且贯穿整个焊缝,错边量为  $-0.9$  mm 时接头后退侧表面有大量微裂纹并有隧道型孔洞且贯穿整个焊缝。错边量为 0.9 mm 时焊缝外观和 X 射线检测结果如图 3 所示,错边量为  $-0.9$  mm 时焊缝表面微裂纹和焊缝宏观金相如图 4 所示。

表 4 错边量试验 X 射线无损检测结果

错边量/mm	0	0.5	0.9	-0.5	-0.9
X 探伤缺陷	无	无	隧道型孔洞	无	隧道型孔洞

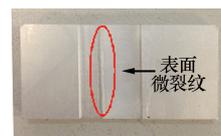


(a) 焊缝宏观形貌

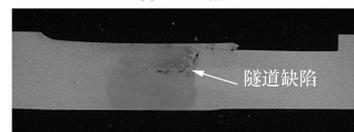


(b) X 射线检测结果

图 3 错边量为 0.9 mm 时宏观焊缝形貌和 X 射线检测结果



(a) 表面微裂纹



(b) 焊缝宏观金相

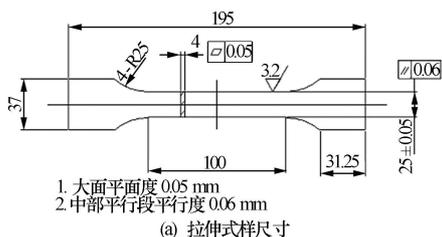
图 4 错边量为  $-0.9$  mm 时表面微裂纹及焊缝宏观形貌

## (3) 拉伸性能

按照 GB 2649—89《焊接接头机械性能试验取样方法》和 GB 2651—89《焊接接头拉伸试验方法》进行取样和拉伸试验,拉伸试样如图5所示,拉伸结果如表5所示。

表5 错边量试验缺陷验证及焊缝拉伸试验结果

错边量/mm	0	0.5	0.9	-0.5	-0.9
抗拉强度/MPa	315.04	293.97	134.33	297.77	214.08
拉伸断裂位置	前进侧	前进侧	缺陷处	前进侧	缺陷处



(b) 实验拉伸试样  
图5 实验拉伸试样

由试验结果可知,5A05 铝合金薄板搅拌摩擦焊对接时,焊接装配过程中错边量的增大会导致下压量的增加、焊缝强度的降低、表面缺陷和内部隧道型缺陷的产生,焊缝无缺陷时焊缝强度超过母材强度的 88%,而有缺陷时最低仅为母材强度的 40%。

错边量增大时,由于补充材料不足、搅拌头轴肩摩擦产热不足以及单边轴肩压力不足,使达到塑化状态的材料不足,材料流动不充分而导致焊缝内部形成材料未完全闭合的现象,会在焊缝产生隧道型缺陷并贯穿整条焊缝。前进侧低时,由于前进侧热输入不足且无足够材料填充,容易导致焊缝表面出现咬边;后退侧低时,材料由前进侧流入后退侧,由于后退侧热输入不足,无法压实,导致微裂纹出现。焊缝前进侧为焊缝薄弱区,且焊接缺陷大部分出现在前进侧,所以拉伸断裂位置均为焊缝前进侧。

## 2.2 装配间隙量对接头性能影响

## (1) 目视检验

检验结果如表6所示,间隙量在 0.8 mm 内焊缝表面无缺陷。

表6 间隙量试验目视检验结果

间隙量/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8
下压量/mm	0.11	0.19	0.27	0.26	0.30
表面缺陷	无	无	无	无	无

## (2) X 射线无损检测

检验结果如表7所示,间隙量在 0.8 mm 内焊缝

无明显内部缺陷。

表7 间隙量试验 X 射线探伤结果

间隙量/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8
X 探伤缺陷	无	无	无	无	无

## (3) 拉伸性能

拉伸结果如表8所示,间隙量的增大对焊缝强度无明显影响,拉伸断裂位置均为焊缝前进侧。

表8 间隙量试验焊缝拉伸试验结果

间隙量/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8
抗拉强度/MPa	315.04	320.33	322.35	318.14	317.95
拉伸断裂位置	前进侧	前进侧	前进侧	前进侧	前进侧

由试验结果可知,5A05 同种材料搅拌摩擦焊对接时,焊接装配过程中在一定范围内间隙量的增大对焊缝缺陷和力学性能的影响不明显,但是会明显增加下压量,影响结构尺寸。

随着间隙量的增加,搅拌针与搅拌头轴肩摩擦产热减少,焊缝热输入降低,塑化材料也随着变少,在相同下压量的情况下,焊缝易产生隧道型缺陷。为保证焊缝质量,当间隙量增加时,可以通过增加下压量来增加搅拌头轴肩产热量,保证足够焊缝热输入和填充材料,但是下压量增加会影响接头尺寸。

## 3 结束语

4 mm 5A05 铝合金搅拌摩擦焊装配时应该严格控制错边量,当错边量大于 0.50 mm 时,会导致焊缝力学性能下降、下压量增大、焊缝缺陷产生。

4 mm 5A05 铝合金搅拌摩擦焊装配时间隙量在 0.8 mm 范围内对焊缝缺陷和性能没有明显影响,但是随着间隙量增大会导致下压量明显增加,影响结构尺寸,且实际焊接过程中间隙量增大会导致底部未焊透。

4 mm 5A05 铝合金搅拌摩擦焊拉伸接头断裂大多集中在前进侧,证明前进侧是搅拌摩擦焊焊缝的薄弱部位。

## 参考文献

- [1] 栾国红,郭德伦,张田仓,等. 搅拌摩擦焊在飞机制造业中的应用[J]. 航空制造技术, 2002(11): 20-24.
- [2] Hitachi, Ltd. Ezumi, Masakuni Hitachi Ltd. Friction Stir Welding Method: European Union, EP1206995 [P/OL]. 2002-05-22[2016-07-15]. <http://172.16.41.51>.
- [3] 布伦特·克里斯特纳. 搅拌摩擦焊的方法: 中国, CN1675019[P/OL]. 2003-08-05[2016-06-02]. <http://cpquery.sipo.gov.cn>.
- [4] MIYAMOTO KENJI, NAKAGAWA NARIYUKI. Friction Stir Welding Method: Japan, JP2007289988[P/OL]. 2006-04-24[2016-07-10]. <http://172.16.41.51>.

(下转第 56 页)

从 3 个表格对比可看出,硅酮型密封胶在耐候性和使用寿命周期上都好于聚氨酯型和聚硫橡胶,但是硅酮型密封胶对接缝处有污染,在要求绿色环保的今天,已不太适合使用到产品上。聚硫橡胶有较好的耐候性和力学性能,但是使用寿命较短,从表 4 可以看出,7 年后的聚硫橡胶就会有深裂纹出现,雨水会顺着裂纹渗透到外导体内部,形成积水,从而影响天线单元的驻波。聚氨酯型密封胶的耐候性和力学性能较好,使用寿命一般为 15 年,满足产品环境技术指标。

由于注塑表面较光滑,如果直接涂密封胶,会降低密封胶与天线罩表面的粘接强度,工艺上采取了在密封处喷砂工艺,来降低天线罩表面的粗糙度。经试验,可以明显提高粘接力。另外,密封胶的配套底处理剂有优异的防胶接面腐蚀功能,同时能使聚氨酯密封胶与基材的粘接强度大幅度提高,密封胶使用底处理剂与否的剪切强度比较值见表 5<sup>[5]</sup>。

表 5 剪切强度对比

测试项目	不适用底处理剂	适用底处理剂
剪切强度/ MPa	0.3	1.35

为了进一步提高密封胶与接触面的粘接强度,天线罩接触面采用了底处理剂。

### 2.3 表面涂覆

天线罩是直接和严酷环境接触的介质,经常会受到雨水、盐雾和紫外线的侵蚀。为进一步提高天线罩的耐候性,我们选用了常温固化氟涂料作为天线罩的防护涂层。氟碳漆具有以下特征:

- 1) 耐候性好。漆膜无起泡、生锈、开裂、脱落现象。
- 2) 耐化学品及酸碱能力强。涂层交联密度高,孔隙率低,抗渗性好。
- 3) 耐污性好。涂层表面细腻光滑,摩擦系数小,容易清洗。
- 4) 涂层具有阻燃性、耐高温。能抵抗严寒酷暑和干湿交替的复杂环境。
- 5) 优良的机械性能。漆膜附着力强、抗冲击、耐摩擦。

(上接第 52 页)

[5] 黄华,董仕节,吴勇,等. LF21 板搅拌摩擦焊接头组织与焊接工艺关系的研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(3): 1-3.

[6] 冯杏梅,蒋晓虎,刘洪斌. 2A14 铝合金搅拌摩擦焊缝表面鼓包原因分析[J]. 电子机械工程, 2009, 35(3):

该涂料耐老化性能优异,特别是在强紫外线作用下,其树脂也不易分解,防护寿命可达 15 年~20 年;该涂料的施工性能优异,可常温干燥;氟涂料还具有高的疏水性,雨水很难在天线罩表面沉积,既防止了水对高分子材料的侵蚀,又能降低天线的雨水噪声温度。

### 3 结束语

为了验证 PPO 天线罩和密封胶的耐候性,按国军标做了如下试验:高温试验(GJB 150.3A—2009);低温试验(GJB 150.4A—2009);淋雨试验(GJB 150.8A—2009);湿热试验(GJB 150.9A—2009);盐雾试验(GJB 150.11A—2009)。最后测试了天线单元的电性能,满足所设计的技术要求。最后结论:采用 PPO 天线罩满足产品需求。

为了降低成本,采用 PPO 材料代替传统的复合材料;为了提高生产效率,采用注塑和挤压成型工艺;为了增强密封胶与接触面之间的粘结力,采用在连接处喷砂和涂底处理剂。采取以上工艺方法,得到了符合环境要求和电性能要求的天线罩。为大批量生产低成本的天线罩指出了一条新道路。

### 参考文献

[1] 沈利新,孙珮琼. 地面雷达罩材料的发展[J]. 玻璃钢, 2007(3): 22-26.

[2] 张润逵,戚仁欣,张树雄. 雷达结构与工艺(上册)[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.

[3] 杨薇薇,杨红娜,无晓青. 天线罩材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2013(1): 3-8.

[4] 谢明华,敖辽辉. 聚苯硫醚在天线罩上的应用研究[J]. 工程塑料应用, 2006(11): 53-54.

[5] 佟文清,曹立荣. 雷达薄壁天线罩的密封及防护[J]. 电子工艺技术, 2008, 29(4): 225-230.

孙建彬(1984-),男,硕士,主要从事雷达总体工艺设计工作。

35-38.

王涛(1990-),男,硕士,助理工程师,主要从事搅拌摩擦焊和电子束焊工艺研究。