

# 大厚度飞机铝合金搅拌摩擦焊性能研究

Research on the Properties of Thickness Aluminum Alloy  
for Aircraft by FSW

北京航空制造工程研究所 孙占国 李 光 佟建华 王卫兵  
中国搅拌摩擦焊中心



孙占国

硕士研究生,毕业于西北工业大学,主要从事大厚度铝合金搅拌摩擦焊技术工艺及机理研究。

大厚度航空高强铝合金是飞机机翼框架、油箱底板等飞机结构中常用的材料。以往针对大厚度铝合金结构一般采用熔化极气体保护焊,工艺多采用两面多层焊,工序复杂,生产效率低;焊接过程中需要填充焊丝、使用保护气,生产制造成本高;同时,因多层 MIG 焊的热量输入大,造成焊接接头性能下降,变形量大等

搅拌摩擦焊作为铝合金较为理想的焊接技术,在焊接大厚度铝合金板方面优势更加明显。采用搅拌摩擦焊接以后,不仅焊缝的接头性能有所提高,变形量较小,而且操作简单,生产效率大大提高。

不足。搅拌摩擦焊作为铝合金较为理想的焊接技术,在焊接大厚度铝合金板方面优势更加明显。采用搅拌摩擦焊接以后,不仅焊缝的接头性能有所提高,变形量较小,而且操作简单,生产效率大大提高。同时,整个焊接过程绿色环保,无需填充焊丝和使用保护气,生产制造费用大大降低<sup>[1]</sup>。

在大厚板的研究方面, A. Sullivan<sup>[2]</sup>对 40mm 厚 7449 铝合金搅拌摩擦焊微观性能、强化相进行了分析; M. P. Miles<sup>[3]</sup>等对 50mm 厚 6061 及 7050 焊后的弯曲性能进行了测试分析,发现搅拌摩擦焊过程提高了材料的弯曲性能;国内中航工业北京航空制造工程研究所在 2007 年研制成功国内第一的重型搅拌摩擦焊设备<sup>[4]</sup>,并成功实现 70mm 厚 LF5 铝合金平板的双面焊接。尽管

我国已具备大厚度铝合金 FSW 设备和工艺技术开发能力,但基础研究仍显薄弱。随着大型运输机等飞机型号研制中对大厚度铝合金需求越来越大,本课题针对 40mm 厚 7050 铝合金平板的搅拌摩擦焊接头的基础性能进行研究,为提高大厚度铝合金的搅拌摩擦焊接技术提供借鉴。

## 试验材料及方法

### 1 试验材料

试验材料选用 40mm 厚的 7050 铝合金轧制板材,材料状态为 T7451。材料的主要化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。

### 2 焊接参数

试验采用平板对接的形式。选用锥形带螺纹搅拌针,其轴肩直径为 46mm,搅拌针根部直径为 28mm,顶部直径为 10mm,搅拌针长度为

表1 7050铝合金化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	其余	Al
0.12	0.15	2.0 ~ 2.6	0.10	1.9 ~ 2.6	5.7 ~ 6.7	0.33 ~ 0.4	余量

表2 厚40mm的7050-T7451铝合金力学性能

牌号	状态	厚度 /mm	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%
7050	T7451	40	429.9	294	10.8

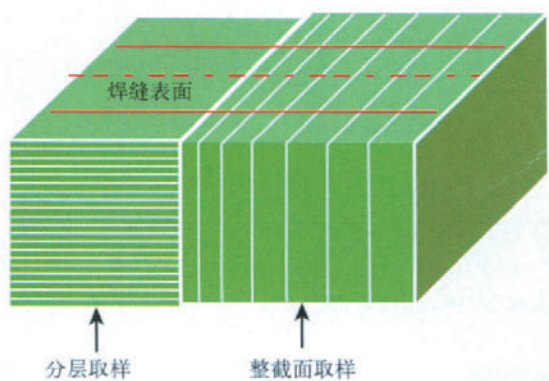


图1 分层试样和整截面试样的截取方式

39.6mm。工艺参数及试样编号如表3所示。

### 3 接头力学性能测试方法

试验完成后,所有焊件表面成形良好,经X射线无损检测,没有发现缺陷。

为了更加全面地获得接头的力学性能数据,本试验对接头分别进行了分层拉伸试验和整截面拉伸试验。图1为分层拉伸试验和全截面拉伸试验中试样的截取方式示意图。

分层拉伸试验按照国标GB2649。对试件沿水平方向进行分层,每层截取的厚度为2.8mm,经打磨、抛光后,制成厚度为2.6mm,长度为140mm的标准拉伸试样。将各层试样在ZWICK100KN电子万能材料试验机上进行力学性能测试。取各层试样力学性能的平均值即为分层拉伸试验得到的接头力学性能。

整截面拉伸试验是在平行于焊缝横截面方向上,截取不同厚度的试样。经打磨、抛光后,制成厚度分

别为2mm、3mm、4mm、5mm、6mm、8mm、10mm的全截面试样。分别测得各试样的力学性能,取其平均值即为焊缝全截面的力学性能。

### 结果与讨论

#### 1 分层拉伸试验结果及分析

图2为焊件及母材沿厚度方向,

由上至下各层试样的力学性能测试结果。

从图中可以看出,母材的力学性能最高,且较为稳定。W5除表层试样力学性能稍低外,接头力学性能沿厚度方向上相差不大。其他各焊件,接头力学性能沿板厚方向差别很大。接近于焊缝表层的

试样接头力学性能偏低,随着厚度的增加,力学性能增加,当厚度到达一定值后,接头力学性能趋于稳定,焊缝底层试样力学性能稍低。

观察拉断后试样发现:接头性能较为稳定的焊件W5,试样断裂位置均处于热影响区,呈45°剪切断裂。而对于其他焊件,焊缝表面几层试样均断裂于焊缝处,其他各层断裂于热影响区。表层试验断口呈锯齿状,如图3所示。从图中可发现,在断口周围出现微孔,发生断裂可能是由于焊缝表层材料疏松所致。

将以上同一焊件不同试样的测试结果取平均值,即为接头的分层拉伸试验结果的最终测试结果如表4所示。

从表4中可以看出,选择不同的工艺参数组合,接头的力学性能差别很大。对比W1、W2、W3,焊接速度均为25mm/min。随着旋转速度的

表3 试样名称及工艺参数

试样编号	焊速 / (mm·min <sup>-1</sup> )	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )
W1	25	200
W2	25	160
W3	25	120
W4	30	140
W5	30	120

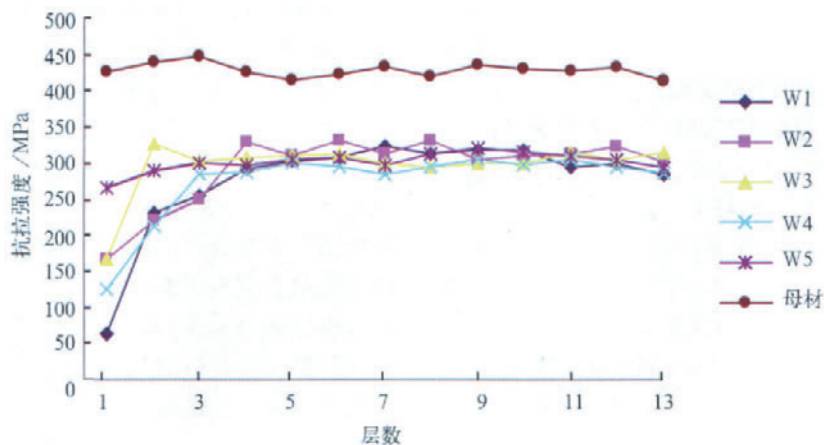


图2 各焊件与母材的分析

表4 分层拉伸试验结果

试样名称	W 1	W2	W3	W4	W5
抗拉强度 /MPa	280	301.28	271.39	283.19	303.14

增加,焊缝的抗拉强度先增加,后减小,在焊速为160r/min时,抗拉强度达到301.28MPa。当焊速选取30mm/min时,搅拌头转速为120r/min时,接头性能最高,达到303.14MPa,为母材强度的70.5%。由于受到设备最大扭矩的限制,焊接时搅拌头的最



图3 W1的表层金属断口形貌

从表5可以发现,W1的所有试样均断裂于焊缝区。W2、W4、W5的试样大部分断裂在热影响区,只有少部分试样断裂于焊缝,主要原因仍是由于部分试样表层出现微孔所致。

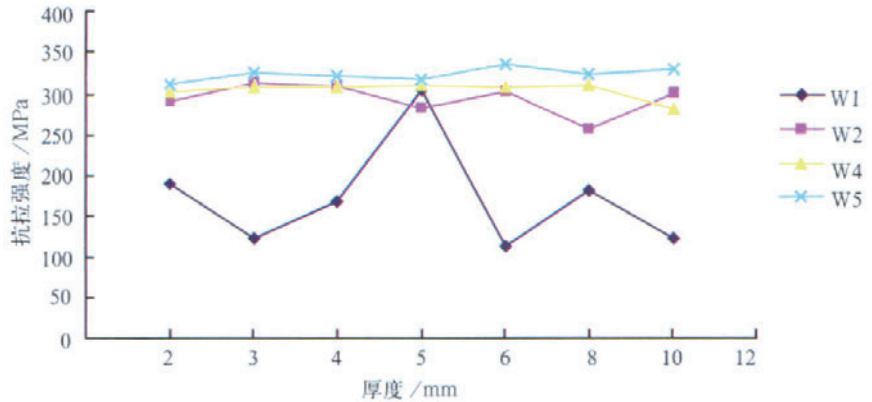


图4 整截面拉伸试验结果

表5 试样的断裂位置

试样名称	厚度/mm						
	2	3	4	5	6	8	10
W1	W	W	W	W	W	W	W
W2	T	T	T	T	T	W	T
W4	T	T	T	T	T	T	W
W5	T	T	T	W	T	W	T

注: M 代表试样断裂于母材区; T 代表试样断裂于热影响区; W 代表试样断裂于焊缝区

小转速为120r/min。对于厚板的搅拌摩擦焊接,工艺参数发生较小的变动,接头的抗拉强度差别较大,因此,对于厚板的搅拌摩擦焊,获得优良接头选择的工艺窗口较窄。

## 2 整截面拉伸试验结果与分析

图4为不同厚度的整截面试样拉伸试验结果。

从图中可以看出,对于W2、W3、W4,不同厚度的整截面试样的抗拉强度较为稳定,且整体力学性能较为接近。W1试样的抗拉强度变化较大,主要是由于接头表层中存在微孔,材料疏松,导致不同的试样力学性能出现较大的波动。

图5为试验完成后,所有W1整截面拉伸试样的宏观照片。

从图5中可以看出:在焊缝上表面,断裂位置主要集中于焊缝的回退侧,逐渐向焊缝底部中心延伸。焊缝的断口形貌近似呈直线。这是由于W1所选择的转速较高,焊缝区温度过高,原始对接界面可能出现弱结合,导致焊缝沿弱结合面发生断裂。在拉伸试验过程中,由于表层材料出现疏松,焊缝上表面接头性能较低,成为断裂的裂纹源。

将得到焊件的不同

厚度试样的抗拉强度测试结果取平均值,即为接头整截面的抗拉强度,计算结果如表6所示。

整截面试验表明W5的抗拉强度最高,为322.4MPa,达到母材抗拉强度的75%。以上测试结果稍高于分层拉伸试验的测试结果303.14

MPa。整截面拉伸试验和分层拉伸试验所得到的W2、W4、W5的接头力学性能相差不大,性能较为稳定。对于W1接头抗拉强度,整截面拉伸试验结果远远低于分层拉伸试验测试结果,这是由于整截面拉伸试样都受到上层材料疏松的影响,接头性能普遍较低。而在分层拉伸试验中,只有部分试样受到材料疏松的影响,最终接头抗拉强度较高。

分层拉伸试验和整截面拉伸试验都表明W5的力学性能最高,最优的工艺参数组合为:焊速为30mm/min,转速为120r/min。

## 3 分析与讨论

以上试验结果表明,对于大厚度铝合金结构的搅拌摩擦焊接,主要难点在于焊缝表层及次表层金属的力

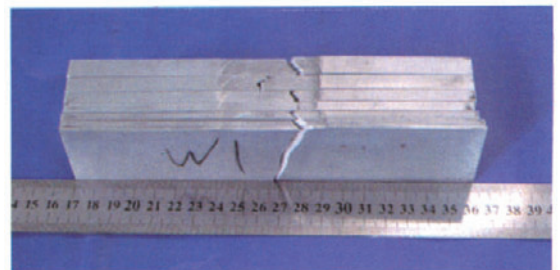


图5 W1整截面拉伸试样

表6 各焊件的力学性能

试样名称	W1	W2	W4	W5
抗拉强度 /MPa	172.0	293.9	304.9	322.4

学性能较低,焊缝沿板厚方向上力学性能差别较大。

Arora、Nandan 等<sup>[5]</sup>人在不同的焊接条件下对接头的温度场进行了测量和计算,结果表明:不同的工艺参数对焊缝沿板厚方向的温度梯度影响较大。柴鹏等<sup>[6]</sup>人认为焊缝沿板厚方向上力学性能的差异正是由于焊缝材料沿板厚方向上的温度梯度较大造成的。

在厚板的焊接过程中,随着焊接厚度的增加,焊接轴向压力也会随之增大。在相同的工艺参数下,焊缝上表层材料由于受到轴肩和搅拌针的作用,瞬时产生了大量的热量,焊接时的热输入过大,表面易出现过热。而焊缝的中部和下部,热量的主要来源是搅拌针和材料的摩擦产热,接触面较小,产热量明显减小。热输入的不均匀导致轴肩作用区同搅拌针作用区的温度差别较大,温度梯度较高,从而在轴肩作用区和搅拌针作用区之间易出现材料疏松现象,甚至可能出现孔洞型缺陷。此外,在厚板的焊接中,为了减小搅拌工具的轴向压力,一般采用的是锥形搅拌针,焊缝下层搅拌针作用区域减小,与周围材料产生的热量也较少,出现焊缝底部热输入量不足,从而导致未焊合等缺陷的产生。对于大厚板的焊接,既要保证焊缝底部产生足够多的热量,又要控制焊缝表层的热输入不能太大。因此,减小焊缝沿板厚方向的温度梯度成为大厚度铝合金搅拌摩擦焊的难题。

针对以上大厚板焊接的难点,可从以下几方面开展进一步研究工作:

(1) 选择较为合理的工艺参数。

对于厚板的焊接,工艺窗口较窄,因此选择合理的工艺参数至关重要。一般选择较低焊速和转速。本

研究中,获得的最优工艺中,转速和焊速都较低。这是由于如果转速选择的较高,则焊缝表面易出现表面过热的情况,温度梯度沿厚度方向太大,接头性能较差。当焊接速度和转速都较低时,焊缝上表面产热量得到控制,同时热传递较为充分,焊缝下部材料的热输入提高,整个焊缝沿厚度方向的温度梯度降低。但是,随着搅拌工具转速的降低,搅拌工具在搅拌过程中受到的扭矩增加,当扭矩达到设备提供的最大扭矩时,转速就不能降低了。本研究中,在工艺参数为 120r/min、30mm/min 时,搅拌工具受到的扭矩达 600N·m 以上,接近设备的最大扭矩,因此,搅拌头的转速很难再降低。同时,如果转速太低,接头热输入量不足,焊缝无法成形。因此,选择合适的工艺参数是大厚板焊接的关键。

(2) 选择合适的搅拌头。

搅拌头是搅拌摩擦焊的心脏。搅拌头的形貌对接头的性能至关重要,对大厚板的焊接更为关键。在厚板的焊接过程中,考虑到搅拌针的刚度和强度要求,搅拌头轴肩一般选择锥形搅拌头,搅拌针直径较大。同时为了防止焊缝表面出现过热现象,搅拌头轴肩直径相对较小。本研究中轴肩直径为 46mm,搅拌针根部直径为 28mm。此外,采用带螺纹的搅拌针以及带螺旋线的轴肩也有利于增加材料流动,减小接头的温度梯度。由于搅拌摩擦焊过程成型机理目前尚不明确,对于搅拌头形貌的探索仍是今后一段时间研究的重点。

(3) 焊前预热。

既然厚板焊接的关键是降低焊缝沿厚度方向的温度梯度,那么在焊接前,对焊件进行预热,将一个预置温度场加载到焊件上,可有效减小焊接过程中焊缝沿厚度方向的温度梯度,提高焊接质量。但由于焊前预热很难控制,因此目前开展的工作相对

较少,但可以作为厚板焊接时,减小温度梯度的一种思路。

## 结论

(1) 对于大厚度铝合金板的搅拌摩擦焊接,获得性能优良的接头可供选择的工艺窗口较窄,选择较低的转速和焊接速度可以实现大厚板的焊接。

(2) 分层拉伸试验表明,接头抗拉强度最高可达到 303.14MPa,为母材的 70.5%;整截面拉伸试验结果表明,接头强度最高可达 322.4MPa,为母材强度的 75%。两种测试结果均表明,对于 40mm 的 7050-T7451 铝合金,最优的工艺参数组合为 120r/min、30mm/min。

(3) 大厚板搅拌摩擦焊接技术的难点在于降低接头沿板厚方向的温度梯度。选择合理的工艺参数、搅拌头形貌以及焊前预热等可能会降低焊缝区的温度梯度。

## 参考文献

- [1] 张传臣,陈芙蓉. 厚板高强铝合金焊接发展现状及展望. 电焊机,2007,37:6-8.
- [2] Sullivan A, Robson J D. Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heat-treated 7449 aluminium alloy thick plate. Materials Science and Engineering A, in press.
- [3] Miles M P, Mahoney M W, Fuller C B. Prediction of Bending Limits in Friction Stir Processed Thick Plate Aluminum. Metallurgical and Materials Transactions, 2006, 12:1199-1209.
- [4] 刘健. 北京赛福斯特技术有限公司设计开发出亚洲焊接能力最大的搅拌摩擦焊专用设备. 焊接,2007,1:10.
- [5] Arora A, Nandan R, Reynolds A P. Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments. Scripta Materialia, 2009, 60:13-16.
- [6] Chai PENG, Guohong LUAN. Characteristics of FSW of Thick Aluminum Alloy. TWI Industrial Members Reports 2008.

(责编 金卯)