

# 搅拌摩擦搭接焊 界面成形机制及影响因素\*

Joint Interface Forming and Influential Factor of Friction Stir Overlap Welding

北京航空制造工程研究所 郭晓娟 李 光 李丛卿 栾国红  
中国搅拌摩擦焊中心



郭晓娟

硕士,主要从事航空高强铝合金搅拌摩擦焊工艺技术研究。

自 1991 年英国焊接研究所发明搅拌摩擦焊技术至今已 17 年,在这 17 年中,这项技术在工程领域得到了越来越多的应用,同时该技术本身也得到了深入的研究。各研究机构针对塑性流动、应力变形以及搅

\*“十一五”武器装备预研项目(51318050116)和国家科技“十一五”支撑计划重点项目(2006BAF04B09)。

自 1991 年英国焊接研究所发明搅拌摩擦焊技术至今已 17 年,在这 17 年中,这项技术在工程领域得到了越来越多的应用,同时该技术本身也得到了深入的研究。各研究机构针对塑性流动、应力变形以及搅拌摩擦焊热过程都进行了大量的探索研究工作,得到了普遍的规律。

拌摩擦焊热过程都进行了大量的探索研究工作,得到了普遍的规律<sup>[1]</sup>。但到目前为止,针对这项技术在工程应用中出现的的问题所进行的研究还很有限且不全面。

目前,国外许多大型飞机制造商已经将搅拌摩擦焊技术应用在飞机结构的连接上<sup>[2]</sup>。美国波音公司<sup>[3]</sup>在飞机起落装置、方向导流装置以及机身蒙皮等多种结构上,采用搅拌摩擦焊技术。欧洲空客公司<sup>[4]</sup>将该技术应用在飞机结构(包括机翼结构)多种零部件的连接上,同时也对该技术进行了大量的试验

验证研究,从静强度、疲劳性能、寿命等方面研究了搅拌摩擦焊技术的可行性和可靠性。Eclipse 公司<sup>[5]</sup>在日蚀 500 飞机上首次大量使用搅拌摩擦焊技术作为连接主要结构的方法。在航空飞机上,结构件的连接方式主要为对接、搭接以及 T 形接头等形式,本课题主要研究搅拌摩擦焊搭接接头形式。这种形式与铆接相似,在航空飞机结构上的应用

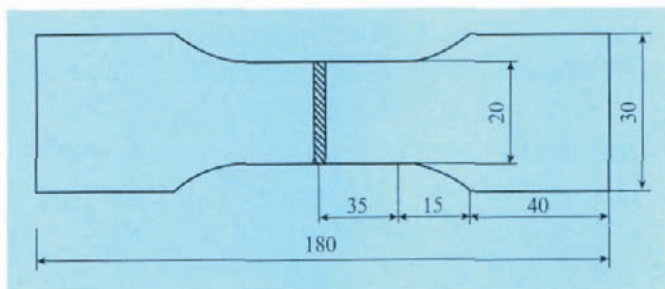


图1 拉伸试样

也较多。但是由于搭接界面材料塑性流动不充分而导致搭接接头界面成形出现缺陷,其中主要有前进侧的界面畸变(或减薄)和后退侧的“冷搭接缺陷”等2种界面缺陷<sup>[6]</sup>。本课题主要研究影响界面缺陷形成的因素以及界面缺陷对接头结构的静强度影响。

### 试验材料和方法

试验采用1.6mm2024-T3铝合金材料,表面包铝层厚度为0.06mm。焊接材料均在中国搅拌摩擦焊中心制造的二维搅拌摩擦焊机上施焊。焊接材料选用平行于轧制方向的板材,焊前对试板焊接面和搭接面进行砂轮打磨,焊后不做热处理。将试板加工成如图1所示的拉伸试件,在ZWICK100KN电子万能材料试验机上对试件进行室温拉伸。

### 搅拌摩擦搭接焊界面成形

搅拌摩擦搭接焊界面成形是研究搭接接头性能的主要方面。图2显示了搅拌摩擦搭接焊缝横截面的宏观形貌,其中白色物质为材料表面的纯铝层,试验中将纯铝层作为示踪元素,观察搭接界面的成形情况。

由图2可知搭接接头横截面总体呈大致对称的碗状,左右两边自轴肩影响区均向内缓慢收缩,前进侧材料向上翘起,而后退侧材料向下弯曲。出现类似特征的主要原因为:在焊速方向上,搅拌头前方金属由前进侧向后退侧流动,搅拌头后方金属由后退侧向前进侧流动;在厚度方向上,前进侧方向下板金属向上流动进入上板,与母材形成明显的分

界线,后退侧方向上板金属向下流动进入下板,与母材的分界线模糊。在搅拌头端部呈现由中心焊核向左右两边均势扩展的形态,且呈现明显的回流。图3显示了材料流动的主要方向。

界面畸变和“冷搭接缺陷”都是一种搭接界面前进侧材料混合流动不充分的体现。在焊接过程中,前进侧的界面金属存在2个方向的流动:顺着搅拌针旋转方向的

金属流动和沿着搅拌针垂直方向先下后上的流动。这2种流动方向在界面处出现“碰撞混合”,材料容易在界面处沿着过渡区向上流动,如图4(a)所示,而后退侧的界面金属也存在2个方向的流动,这2个方向的材料在流动过程中出现“交叉混合”,材料顺着搅拌针向着焊缝内部流动,这样搭接界面上的材料就会出现向焊缝内平移的现象,从而形成“冷搭接缺陷”,如图4(b)所示。

### 搅拌针长度对界面成形的影响

搭接接头的承载部位主要在搭接界面上,因此搭接界面成形的好坏直接影响着接头性能。界面畸变的存在减小了焊接板的有效承载厚度,而“冷搭接缺陷”则严重影响着搭接接头的有效搭接宽度,使得搭

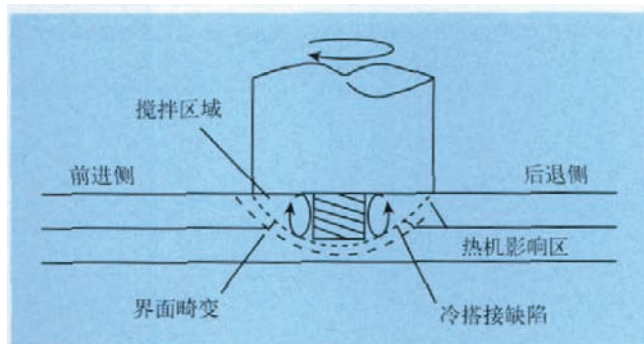


图3 搭接焊接材料流动方向示意图

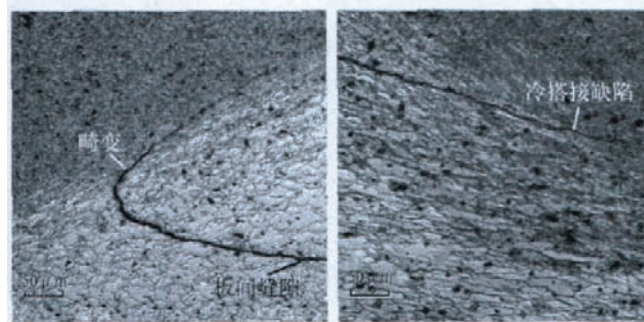


图4 搭接界面过渡区域的微观形貌

接界面的承载面积减小,这样的缺陷都会严重影响接头性能。

搭接接头的界面成形除了与焊接参数有一定的联系以外,搅拌头的形貌和搅拌针的尺寸对界面成形的影响也十分重要。试验中主要考虑在相同的搅拌头形貌、不同搅拌长度的情况下来观察搭接界面的成形情况以及对接头剪切力的影响。本试验采用2.6mm2024-T3+1.6mm2024-T3铝合金材料,搭接形式为R-loaded试样,焊前对搭接试板进行打磨,测量出其准确厚度为2.54mm。试验所得搭接力学性能结果如表1所示。

不同搅拌针长度焊接得到的搭接接头横截面的宏观形貌如图5所示。对比各图可以看出宏观形貌中没有明显的界面畸变,但后退侧均出现了类似于裂纹缺陷的“冷搭接缺陷”,该缺陷沿着搭接界面向焊核延伸,并且随着搅拌针长度的增加,这种冷搭接缺陷越来越明显且严重。对比各搭接接头的剪切力可知,冷搭

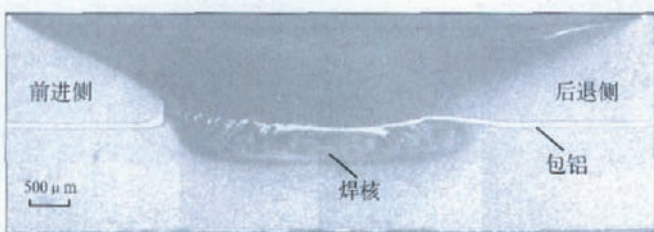


图2 搭接接头的宏观形貌

表1 搭接力学性能

搅拌针长度 /mm	理论压入深度 /mm	剪切力 /kN	断裂位置
2.92	0.508	10.505	下板前进侧
2.80	0.408	10.720	下板前进侧
2.70	0.290	11.165	搭接面撕裂
2.60	0.206	7.223	搭接面撕裂

接缺陷的出现对剪切力有一定的影响。

搭接接头另一种固有缺陷为界面畸变,图6为2种不同长度搅拌针焊接得到的焊缝前进侧的界面畸变情况。从图中可以看出搅拌针的长度对界面畸变有一定的影响,2.54mm 2024-T3 与 1.58mm 2024-T3 焊接时,搅拌针长度为 2.7mm 时焊得的接头畸变为 0.13mm,而搅拌针长度伸长 0.1mm,接头畸变为

0.18mm,有了明显的增加。对比试样的剪切力可以得知界面畸变也是影响接头性能的因素。而且从微观形貌中可以看出,界面畸变是搭接界面处出现的向上弯曲的缺陷,它可以使上焊接板减薄,从而使接头的有效焊接厚度减小,降低接头性能。

对比试样的剪切力以及试样剪切断裂形式,可以认为搭接接头中固有存在着界面畸变和“冷搭接缺陷”,如果“冷搭接缺陷”作为主要失效类型,试样就会沿搭接面撕裂(除去未焊合所造成的原因);如果界面畸变作为主要失效类型,试样则会沿

焊缝前进侧断裂。

### 焊接形式对界面成形的影响

通常条件下,焊接形式为单道焊接,则焊缝前进侧和后退侧分布明显,因而不同区域的界面成形情况只能通过搅拌头形貌或焊接条件的改变而改变。但是改变焊接形式也可以改变搭接接头的界面成形情况。图7显示了不同焊接条件下的焊缝表面成形情况。由图可知在单道焊情况下,焊缝表面成形较为粗糙,且有凸起的固态颗粒分布,而焊缝表面由于热输入的关系形成了焊接花纹,如图7(a)所示。而在原焊缝上进行重叠二次焊接时,由于下压量增大(见表2),而且材料表面包铝层已经被第一道焊缝破坏,因此二次焊接焊缝成形非常光滑。图7(c)表示的也是在原焊缝上进行二次焊接,但焊接中心间距为 2mm,与图7(b)相似,二次焊焊缝表面成形光滑。

图8为不同焊接条件下的搭接接头拉伸试样断裂形式。图中三角标示位置为断裂位置。A所示断裂位置为搭接接头最常见断裂位置之一,而B试样是双条焊缝,且两焊缝

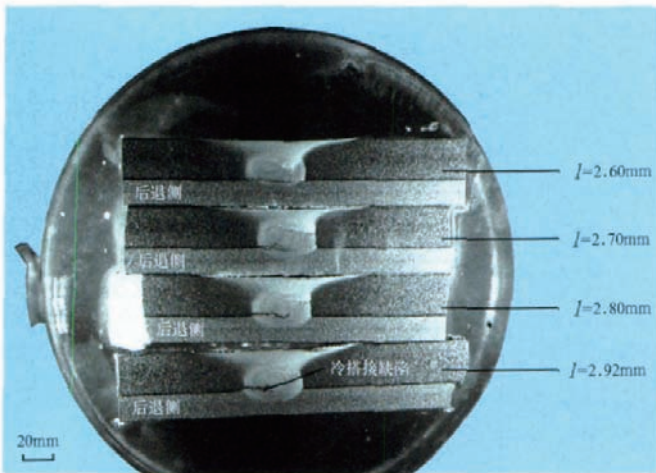


图5 不同搅拌针长度下接头的宏观形貌

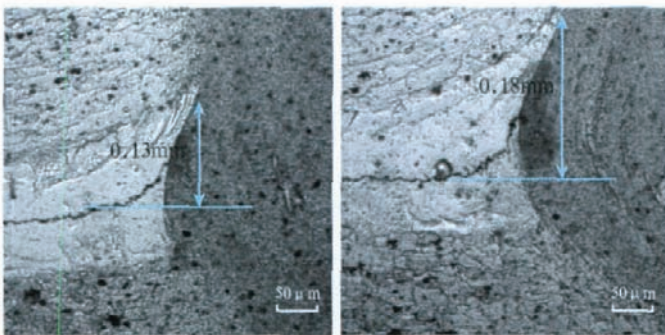


图6 两种搅拌头长度焊接接头前进侧的界面畸变



(a) 单道焊



(b) 双道焊,焊缝中心重合



(c) 双道焊,焊缝后退侧相对,间距 2mm

图7 不同焊接条件下的焊缝表面成形

表2 不同焊接状态下搭接接头的力学性能

焊接条件	拉伸-剪切力/kN	压入深度/mm	断裂位置
单道焊,后退侧承载试样	11.40	0.285	下板前进侧
双道焊,焊缝中心重合	9.85	0.295	第二道焊缝的前进侧
双焊缝,焊缝后退侧相对,间隔2mm	10.83	0.290	第二道焊缝的前进侧

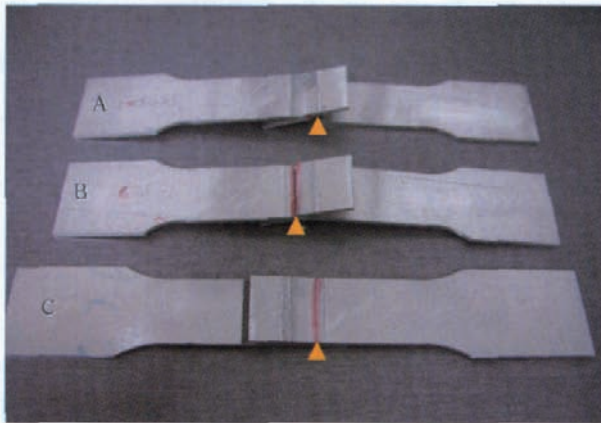
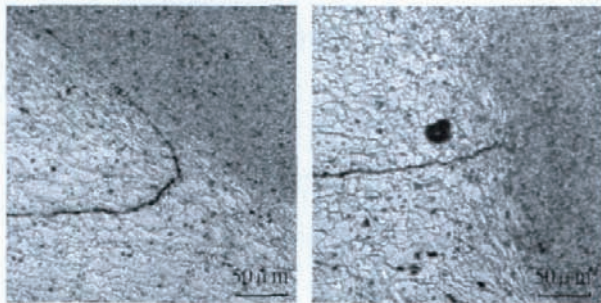
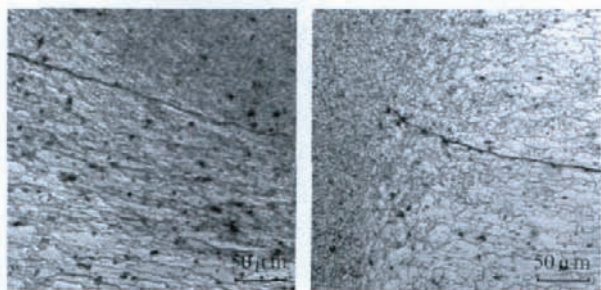


图8 不同拉伸剪切断裂形式



(a) 单道焊前进侧界面畸变  
(b) 双道焊(焊缝重合)过渡区界面畸变

图9 不同焊接形式下的焊缝界面畸变变化情况



(a) 单道焊后退侧冷搭接缺陷  
(b) 双道焊(焊缝重合)过渡区冷搭接缺陷

图10 不同焊接形式下的焊缝冷搭接缺陷变化情况

重叠,使得上板在第二条焊缝中处于前进侧,由于第一条焊缝后退侧的“冷搭接缺陷”在二次焊接时被搅碎,因此拉伸断裂在前进侧。但是B试

样的拉伸剪切力比A试样要低1.5kN,这主要由于二次焊接使得焊缝热输入过大,从而导致焊缝晶粒粗大,热影响区不稳定所致。C试样与B试样相似,但由于两条焊缝有2mm的间距,从而增大了搭接面积,因此拉伸剪切力要比B试样高1kN左右。

图9显示了单道和双道焊缝界面畸变变化的微观形貌,通过对比可知,双道焊接将原来的前进侧变为后退侧,在二次焊接过程中,搅拌针在旋转过程中将上部分材料向下挤压,使原来的界面畸变沿着搅拌针向下移动,从而形成图9(b)所示形貌。图10显示了2种焊接形式下冷搭接缺陷变化的微观形貌,与界面畸变相似,双道焊接将原来的后退侧变为前进侧,在二次焊接过程中,由

方向、先向下后向上的流动。这2种流动方向将冷搭接缺陷二次搅动,使其在搅拌混合中弥散分布,在过渡区内形成很短的“畸变”,如图10(b)所示。

## 结论

本文通过对2024-T3高强铝合金材料进行搅拌摩擦搭接焊,分析接头的界面成形情况。搭接界面前进侧存在界面畸变,后退侧存在“冷搭接缺陷”。而影响其搭接接头界面成形的因素有很多,通过试验可得到以下初步的结论:

(1) 改变搅拌针的长度可有效地改善界面成形,搅拌针长度多于板材0.2~0.3mm时,接头剪切力较高,且界面成形较好;

(2) 改变焊接状态可以有效地改善界面成形情况;双焊缝焊接可以明显改善搭接接头界面畸变以及“冷搭接缺陷”。

## 参考文献

- [1] 栾国红. 搅拌摩擦焊流变特性研究. 航空制造技术, 2003(11):22-25.
- [2] 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. 航空制造技术, 2002(11):20-24.
- [3] Talwar R, Bolser D, Lederich R, et al. Friction stir welding of airframe structures. The 2nd International Friction Stir Welding Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.26-28.
- [4] Shepherd G E. The evaluation of friction stir welded joints on airbus aircraft wing structure. The 4th International Friction Stir Welding Symposium, Park City, Utah, USA, 2003.14-16.
- [5] Christner B, McCoury J, Higgins S. Development and testing of friction stir welding as a joining method for primary aircraft structure. The 4th International Friction Stir Welding Symposium, Park City, Utah, USA, 2003.14-16.
- [6] Li T, Ritter G, Kapustka N, et al. Friction Stir Lap Joining with Sealant. EWI Report, Report No. MR0608, 2006.

(责编 岩石)