

# 飞机铝合金搅拌摩擦焊与铆接 接头力学性能对比

Mechanical Property Comparison Between FSW and Rivet Joints  
of Aircraft Aluminum

北京航空制造工程研究所 佟建华 李从卿 张 健 郭晓娟  
中国搅拌摩擦焊中心



佟建华

毕业于北京科技大学,现就职于北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心,主要从事搅拌摩擦焊技术工艺及机理方面的研究。

由于传统焊接对 2000 及 7000 系航空铝合金材料具有“难焊性”和“不可焊性”,目前飞机制造中零部件的装配连接使用了大量的铆接和螺栓连接结构。搅拌摩擦焊(FSW)技术很好地解决了 2000 及 7000 系铝合金的焊接问题。与铆接相比,搅拌

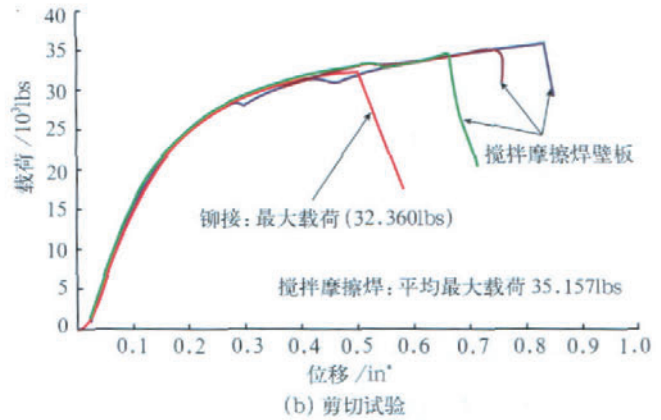
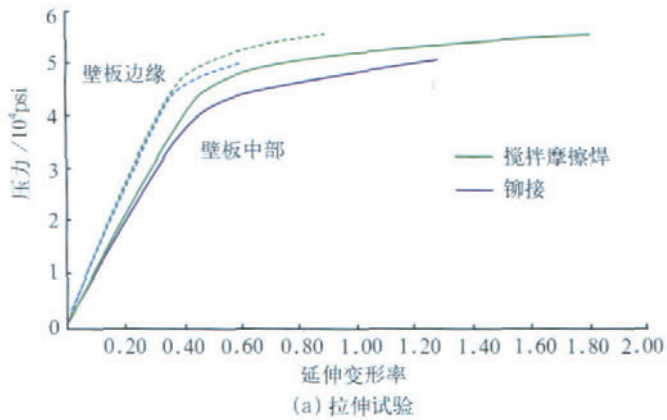
在搅拌摩擦焊接头与铆接接头力学性能对比试验中,所有试样均在铆接处发生失效断裂,而搅拌摩擦焊缝完好无损,这说明搅拌摩擦焊接头静态力学性能明显优于铆接接头,为搅拌摩擦焊代替铆接提供了有力依据。

摩擦焊一方面具有更快的制造速度,另一方面在减少制造过程库存零部件的同时可大大减轻飞机连接装配的重量,使飞机低成本、大件加工、机械连接方式变为低成本、小件焊接、整体成型结构方式,有效提高飞机制造装配的效率。

针对飞机零部件,世界范围内开展了搅拌摩擦焊研究,并取得广泛应用。Bryant Tweedy 等分别采用 FSW 及铆接技术将 2 条 1mm 的 7050-T6 肋条搭接在 1mm 的 2024-T3 蒙皮上制成试验件。对其进行抗拉、剪切测试分析,结果表明 FSW 结构较铆接结构抗拉强度提高 10%,剪切承载能力增加 8%,拉伸极限变形能力增大 41%,剪切拉伸极限变形能力增大 33%。德国 Airbus 材料和连接技术

总工程师 Daniela Lohwasser 称,对于机身材料中 AA 6056/AA6013-T6, FSW 连接强度是母材的 80%~90%;疲劳性能是母材的 90%,是铆接接头的 150%。

波音公司在航空领域首先将搅拌摩擦焊应用于美国空军现役 T45 教练机起落架制造,其后将搅拌摩擦焊应用于 C-17 军用运输机舱内地板的制造。Eclipse 公司制造的 N500 型全 FSW 商务飞机采用 FSW 技术代替 70% 的铆钉连接,节约成本 2/3,相对于自动铆接速度快 6 倍,相对于手动铆接快 60 倍。Eclipse 公司对 FSW 焊接的机身舱段在模拟环境下进行了 46 万个循环、相当于 23 次飞行周期的压力循环测试,测试结果表明,FSW 焊接的机身性



注: 1lbs=0.4536kg, 1in=2.54cm, 1psi=6.895kPa

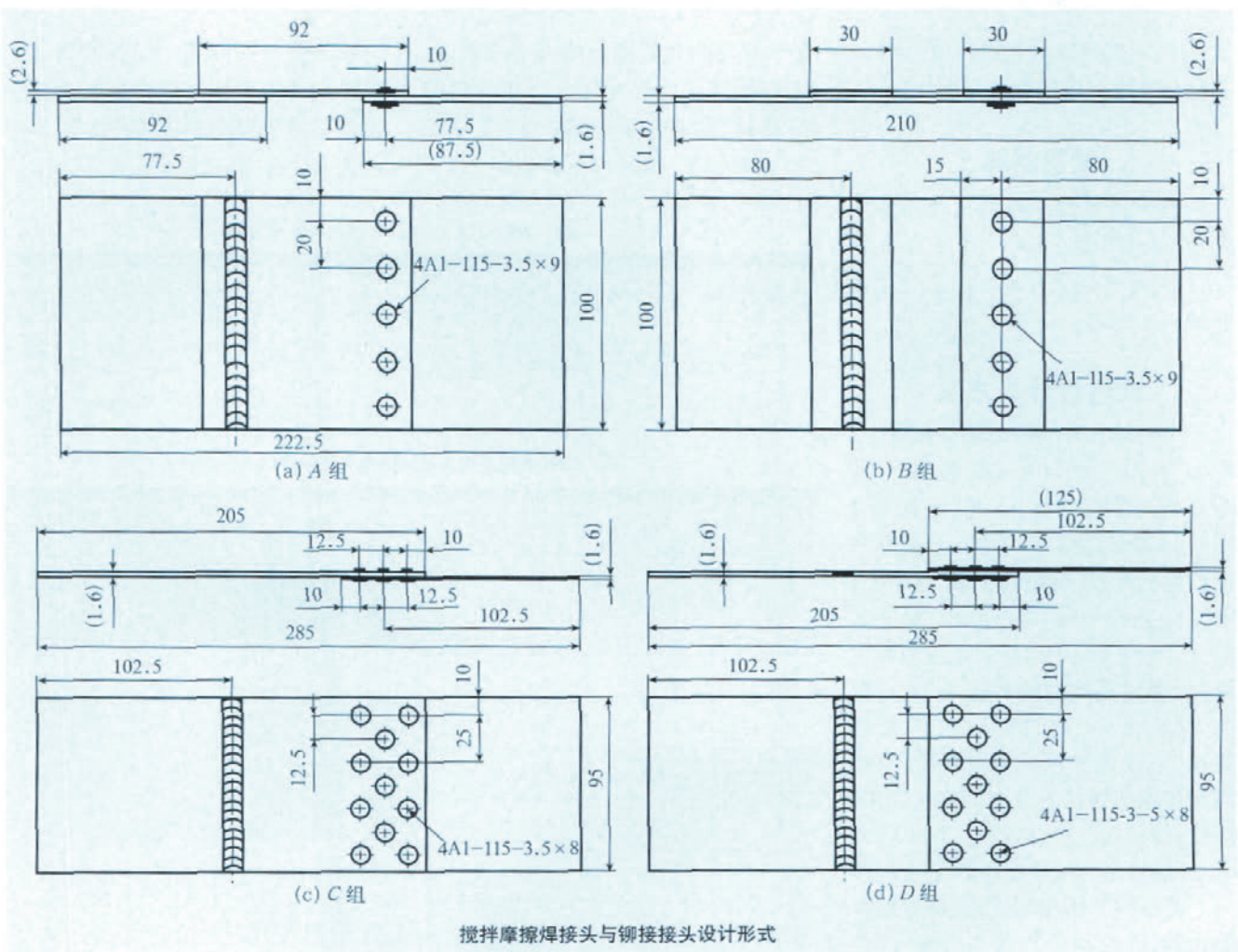
搅拌摩擦焊与铆接结构抗拉、剪切性能对比试验结果

能优异。空客公司将搅拌摩擦焊应用于大型飞机机身蒙皮制造。A350机身蒙皮数量由A330的7块变为4块,连接长度减重0.9kg/m,结构连接重量减少了40%,制造周期减少了

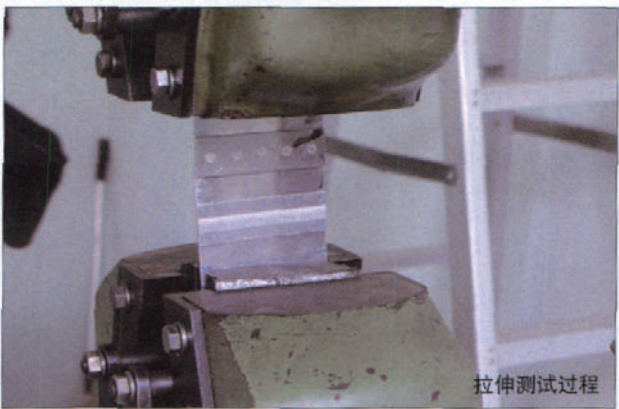
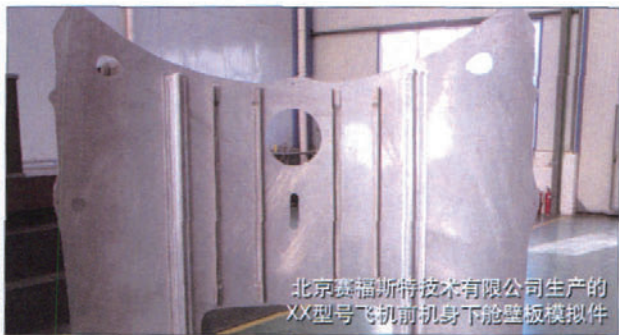
20%。国际上,搅拌摩擦焊技术应用于航空制造中已趋于成熟。在国内,北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心开展了相关研究,现已采用搅拌摩擦焊完成了飞机薄壁结构

件的制造。

搅拌摩擦焊在工艺上取代铆接是可行的,为直观比较搅拌摩擦焊接头与铆接接头性能,本课题首次将搅拌摩擦焊接头与铆接接头置于同一



搅拌摩擦焊接头与铆接接头设计形式



试件中,对其整体结构进行拉伸测试,为搅拌摩擦焊取代铆接提供依据。

### 试验材料

试验材料选用航空工业中常用的 2024-T3 及 2524-T3 铝合金材料,材料厚度均为 1.6mm,其化学成分如表 1 所示。

### 试验设计与方法

飞机结构中,铆接方式主要有 2 种,一种是蒙皮与蒙皮的搭接,一种是长桁与蒙皮的搭接。搅拌摩擦焊搭接与铆接搭接形式类似。根据不同的接头形式,将搅拌摩擦焊接头与铆接接头置于同一试件中。对比试验分 4 组进行, A 组模拟蒙皮与蒙皮搭接,考察连接面的剪切受力,材料为 2024-T3; B 组模拟长桁与蒙皮搭接,下板蒙皮承受主要载荷,主要考察焊接与铆接对蒙皮的削弱作用,搭接材料与蒙皮材料均为 2024-T3; C、D 组分别为搅拌摩擦焊蒙皮对接与 2 种不同的铆接形式,搅拌摩擦焊处为对接,铆接处均为 3 排铆钉,只

是改变了铆接处两板的上下位置,以考察搅拌摩擦焊对接是否能取代铆接搭接,材料分为 2024-T3、2524-T3 两种,同一试件中材料相同。

在每一组试验中,各制造 3 个试样。其中搅拌摩擦焊由北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心按 Q/9S103-2004 标准完成,焊

表1 2024-T3、2524-T3铝合金化学成分

W/%

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2024-T3	0.044	0.36	4.24	0.6	1.34	<0.01	0.076	0.034	余
2524-T3	0.022	0.084	3.69	0.5	1.16	<0.01	0.018	0.027	余

表2 搅拌摩擦焊接头与铆接接头拉伸对比试验结果

组别	材料	最大拉断力/kN	拉断前	拉断后
A组	2024	9		
B组	2024	51.4		
C组	2024	25.4		
	2524	25.5		
D组	2524	23.7		
	2024	17.2		

接设备为中心自主生产的C型二维搅拌摩擦焊设备FSW2-4CX-006,对接用搅拌头轴肩直径8mm,搅拌针长1.5mm,焊接参数为旋转速度1000r/min,焊接速度200mm/min;搭接用搅拌头轴肩直径10mm,搅拌针长1.9mm,焊接参数为旋转速度800r/min,焊接速度150mm/min。铆接由中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司按XPS12003标准完成。正式试件在静态力学拉伸测试机上进行室温拉伸。

### 试验结果

表2为搅拌摩擦焊接头与铆接接头拉伸对比试验结果。可以看出,所有试样均在铆接处发生失效断裂。对于A组试样,主要对焊缝和铆钉连接处进行剪切拉伸,铆接由一组5个铆钉相连,在拉伸过程中,铆钉发生逐个断裂,剪切力较小,只有9kN;B组试样铆接也由一组5个铆钉相

连,但在拉伸过程中,受力主要在平板上,拉伸力达到50kN左右,铆接处基体材料沿铆钉撕裂;C、D组为搅拌摩擦焊对接与铆接对比试样,均为3排铆钉结构,铆接板的上下位置有所差别,拉伸结果均为铆钉脱落,而搅拌摩擦焊缝完好无损,最大拉伸力为25.4kN。B组形式的铆接接头性能最高,达到了50kN,A组单排铆钉的接头性能最差,仅9kN。

### 分析与讨论

本试验拉伸过程中,对于蒙皮与蒙皮搭接形式,主要为搭接处承受的剪切力;对于长桁与蒙皮搭接形式,主要为蒙皮承受的拉力。在试验A中,载荷通过搭接板传递,搅拌摩擦焊搭接处与铆接处均承受剪切力,铆接为点接触,而搅拌摩擦焊为线接触,接触面积的增大大大增加了接头承载能力;试验B中,受力主要在平板上,焊接及铆接均对试板产生了削

弱作用,铆接时需在试板上钻孔,对试板削弱作用较为明显,而搅拌摩擦焊只对试板母材组织产生了影响,没有材料的流失,故削弱作用较小;试验C、D中,搅拌摩擦焊缝受拉应力,而铆接处受剪切应力,而经过参数优选,20mm宽的2024-T3搅拌摩擦焊对接接头最大抗拉力可达13kN,简单折算成100mm宽试样,大约可承受65kN的力,这远远超出了铆接接头所能承受的最大力,所以搅拌摩擦焊接头在测试过程中完好无损。

### 结束语

在搅拌摩擦焊接头与铆接接头力学性能对比试验中,所有试样均在铆接处发生失效断裂,而搅拌摩擦焊缝完好无损,这说明搅拌摩擦焊接头静态力学性能明显优于铆接接头,为搅拌摩擦焊代替铆接提供了有力依据。

(责编 小颖)



**EASTWARD**  
伊斯沃公司

在各种产品、零件、整机上打  
印中英文字符或图形标记

欢迎拨打免费热线电话: 800-807-6866

---

ISO9001质量管理体系认证和高新技术认定的外资企业  
为用户设计订做各种工业专用标记机



▲ 气动标记打标机系列

- 气动标记打标机系列
- 无噪声气动标记刻印机
- 无噪声气动标记压印机
- 振镜扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描脉冲激光标记打标机



▲ VIN号数控压字机

- VIN号数控压字机
- 喷砂标记打标机
- 半导体激光打标机系列
- 光纤激光打标机系列
- 汽车零部件专用打标机
- 智能卡激光专用打标机



▲ 光纤激光打标机系列



▲ PMI54轿车底盘  
VIN号数控压字机



▲ 激光标记打标机系列



▲ 激光金属纸标签



▲ 压字机样品

**品牌, 专业, 不打不相识, 伊斯沃为您解决一切标记问题**

中国公司  
地址: 重庆市渝北区花卉东路36号 邮编: 401147  
电话: (023) 67610571 67607455  
传真: (023) 67610577  
网址: www.eastward.com.cn  
E-mail: canada@eastward.com.cn

各地服务热线  
华东服务热线: 13916137046  
华南服务热线: 13452001577  
华北服务热线: 13594322405  
东北服务热线: 13883551512  
重庆服务热线: 13808360345

广告索引号 09-123