

# 飞机高强铝合金搅拌摩擦焊 接头盐雾腐蚀试验\*

Corrosion Test of Friction Stir Welding Joint for Aircraft High Strength Aluminum Alloy in Salt Spray

北京航空制造工程研究所 何淼 张健 董春林 栾国红  
燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室 康举 付瑞东



何淼

硕士研究生,毕业于燕山大学,主要从事航空高强铝合金搅拌摩擦焊接头腐蚀方面的研究工作。

高强铝合金具有高的比强度、断裂韧度和疲劳强度,同时还具有良好的成形工艺性和良好的焊接性,因此成为在航空工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料<sup>[1]</sup>,也是军用飞机和民用飞机的主要结构材料。

\* 总装备部: 搅拌摩擦焊项目资助。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明并在世界范围内获得专利保护的\*\*新型固相连接方法,也是世界焊接技术发展史上从发明到工业应用时间间隔最短,且发展最快的一项神奇的焊接技术。它在铝合金结构件制造中具有独特的优势,可以焊接各种铝合金材料,且接头的性能良好。

尽管目前复合材料较多地应用于飞机结构中,但铝合金在飞机结构中所占的比重仍然很大,高强铝合金是飞机结构中必备的材料之一。应用于航空领域的2000系列和7000系列高强铝合金采用传统的熔焊后性能很差,飞机结构蒙皮及其他结构的连接通常采用铆接,但铆接后飞机的重量会增加,且工艺繁琐,而采用搅拌摩擦焊技术焊接飞机结构则可避免以上问题。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明并在世界范围内获得专利保护的\*\*新型固相连接方法,也是世界焊接技术发展史上从发明到工业应用时间间隔最短,且发展最快的一项神奇的焊接技术<sup>[2]</sup>。它在铝合金结构件制造中具有独特的优势,可以焊接各种铝合金材料,且接头的性能良好。

FSW可以代替铆接广泛应用于

表1 2024铝合金化学成分

材料 2024	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al
质量分数	0.5	0.5	3.8 ~ 4.9	0.3 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.1	0.25	0.15	0.15	余量

航空高强铝合金的焊接来。飞机的服役期一般都在 20 年以上,随着飞机服役期的增加,飞机结构会产生腐蚀情况,并会不断扩散和加重,其损伤程度的大小,会影响飞机寿命和机群的出勤率,所以研究飞机结构的腐蚀是非常必要的。本文以 2024 铝合金为对象,对其搅拌摩擦焊接头的微观组织和在酸性盐雾试验下的腐蚀行为进行了研究。

### 盐雾腐蚀试验方法

试验选用厚度为 3mm 的 2024 铝合金,试件材料为板材,其成分见表 1。

搅拌摩擦焊接所用设备型号: FSW-3LM-2010 搅拌摩擦焊机;

焊接头旋转速度:600 ~ 800r/min;

焊接速度:60 ~ 80mm/min。

采用 YWX/Q 系列盐雾腐蚀试验箱,利用连续酸性盐雾环境模拟城市大气污染和酸雨环境,试验条件为盐溶液  $w(\text{NaCl})=5\%$  溶液,按照 GB6459-86 标准执行;加冰醋酸将 PH 值调节到 3.1 ~ 3.3,冰醋酸含量在 0.1% ~ 0.3%,试验箱温度为 35℃,喷雾量控制在 1 ~ 2 ml;取样时间设定为 8h、32h、72h、144h、168h 和 240h;试样的被测面与垂直方向成 15° ~ 30° 角,让盐雾自由沉降于被测面,不能直接喷射。

试验后用数码相机拍摄试样表面宏观腐蚀形貌,用 KYKY-2800 型扫描电镜对试样的微观腐蚀形貌进行观察,并用 EDS 分析试样的腐蚀产物成分。

### 试验结果与分析

#### 1 组织特征

图 1 为接头各区域的透射电镜观察结果。从图 1 (a)、(d) 和(e) 中可以看出,母材和热机械影响区的晶粒尺寸很大,一般为十几到几十微米,母材和热机械影响区中棒状

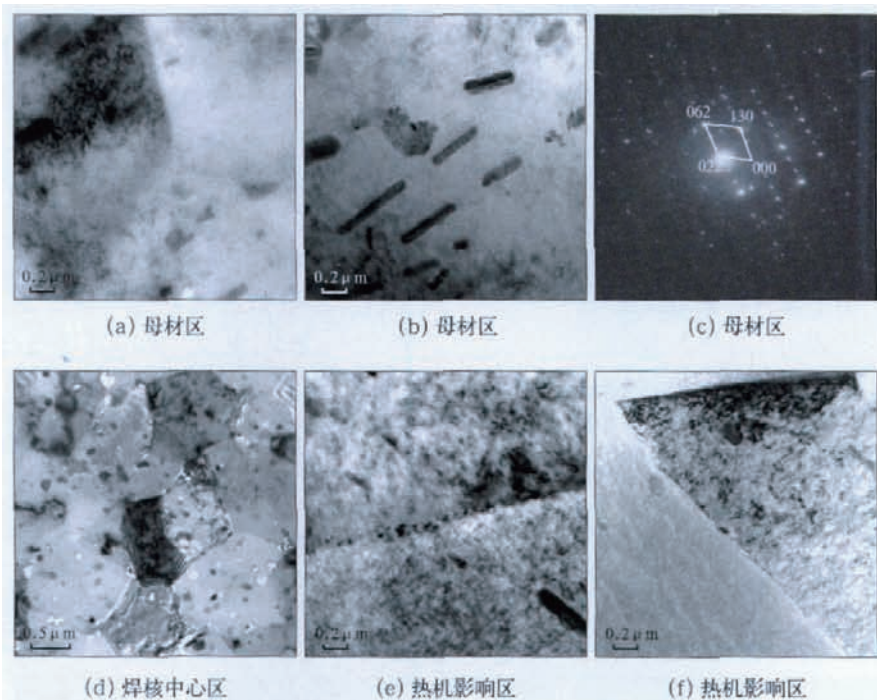


图1 透射电镜观察结果

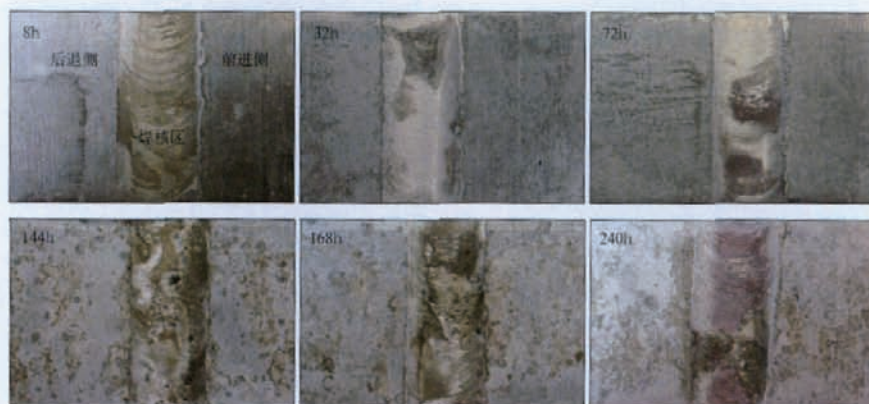


图2 2024铝合金接头酸性连续盐雾宏观腐蚀形貌

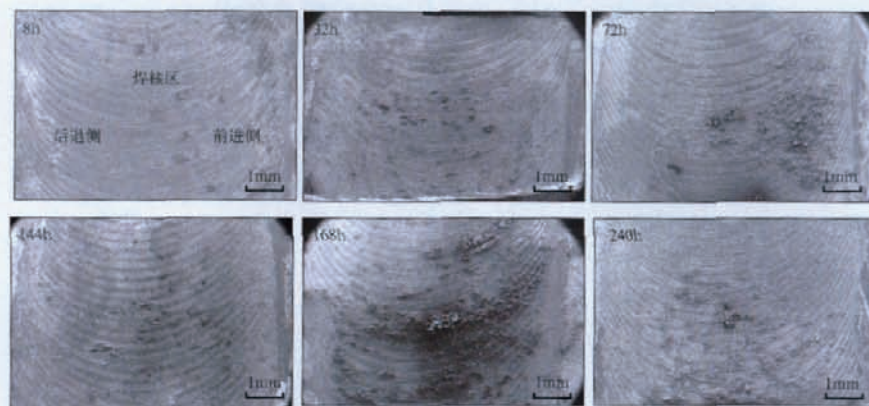


图3 酸性连续盐雾宏观腐蚀形貌(SEM)

的析出物尺寸和分布未发生明显变化。而焊核区的晶粒尺寸很小,为1~5 μm左右,焊核区发生了再结晶,晶粒发生了细化,第二相粒子也发生了细化且分布较均匀,棒状析出物消失。与母材区和焊核区相比,在热机影响区晶粒边界析出更多的第二相,存在高密度的第二相粒子。

图(c)是(b)中棒状颗粒的选区电子衍射花样,标定结果表明:棒状的析出物为Al<sub>2</sub>CuMg(S相),属于正交晶系,晶格常数为0.4nm×0.925nm×0.715nm。S相是2024铝合金一种主要的析出相。从图(f)中可以看出,晶界上有贫铜带的析出。

## 2 宏观腐蚀形貌

图2所示为酸性连续盐雾下2024铝合金搅拌摩擦焊缝表面不同腐蚀时间的形貌。

2024铝合金焊缝表面,8h取出的试件的表面布满腐蚀点,腐蚀产物很细也较薄,呈细沙粒状,随着试验时间的延长,细密的腐蚀产物层逐渐生成并变厚,腐蚀产物呈红褐色。这可能是由于该合金中存在S相(Al<sub>2</sub>CuMg)和θ相(CuAl<sub>2</sub>),在腐蚀环境下,第二相发生了阳极溶解,溶掉了其中的Al和Mg,出现了Cu元素富集,而Cu则作为阴极加速Al和Mg的溶解,然后Cu又被阴极吸氧腐蚀的中间产物所氧化,形成红褐

色铜的氧化物的原因。又由于宏观腐蚀照片上显示有暗红色物质,可以推测腐蚀产物中有Cu<sub>2</sub>O存在。

## 3 微观腐蚀形貌

图3为酸性连续盐雾下包铝的2024铝合金搅拌摩擦焊接头的宏观腐蚀形貌(SEM)。

从图3中可以看出,2024试样表面有局部的蚀点且前进侧机械影响区比后退侧热机械影响区的腐蚀坑明显增多,前进侧热机械影响区比后退侧热机械影响区的腐蚀要严重。当腐蚀时间8h时,焊缝表面出现不连续的腐蚀点;当时间为32h时,焊缝表面的腐蚀坑增多;当时间为72h时,出现大量细密的白色腐蚀产物;当时间为144h时,有大量的剥蚀产物脱落;当腐蚀时间为168h时,焊缝表面严重变色,腐蚀产物层较厚,腐蚀严重;当时间为240h时,有大量的金属剥落,剥蚀程度很严重。

图4为焊缝表面后退侧热机械影响区的腐蚀形貌。

从8h腐蚀图中可以看出试样表面有轻微的腐蚀点,在点的边缘有轻微鼓起;32h时试样表面出现了晶间腐蚀,由于2024铝合金主要是由Al-Cu-Mg元素组成,在时效脱溶处理后,晶界处形成一条贫Cu的无沉淀带固溶体,其电位较负构成阳极。而在晶界上析出的第二相粒子为Al<sub>2</sub>CuMg(S相)、CuAl<sub>2</sub>(θ相)等。CuAl<sub>2</sub>(θ相)的电位较正,同时晶粒为含Cu较高的固溶体,电位也较正,它们同时构成阴极相,这样构成一个多电极系统的局部微电池,并且在这个系统中作为阳极的贫铜固溶体无沉淀带的面积较作为阴极的晶粒小得多,其结果是无沉淀带的铝不断溶解最后导致晶界的腐蚀<sup>[4]</sup>;72h时试样表面的晶间腐蚀发展为剥落腐蚀;144h时试样表面大量的剥蚀产物脱落,留下了大量的腐蚀坑,腐蚀进一步向基体内部发展;168h时有大量的白色腐蚀产物覆盖在试样的表面;

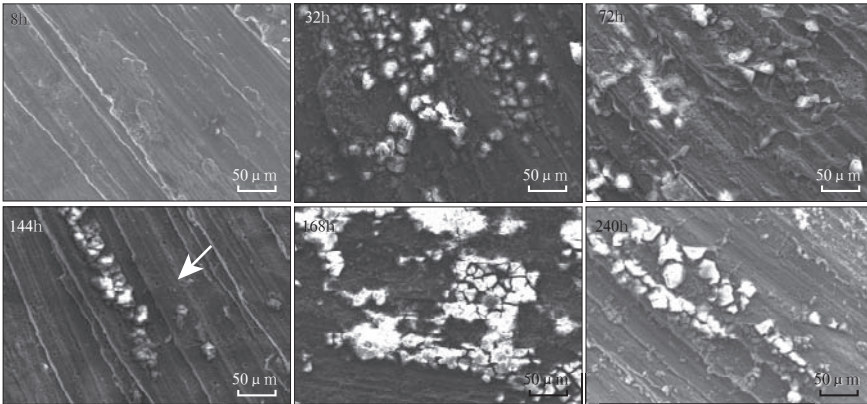


图4 后退侧热机械影响区腐蚀形貌

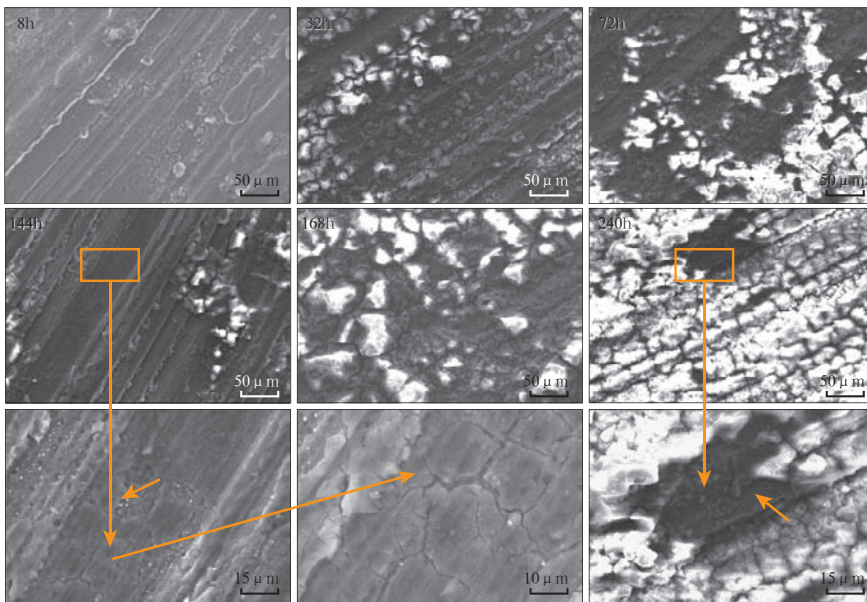


图5 前进侧热机械影响区腐蚀形貌

240h 时试样表面大量的腐蚀产物剥落,出现了分层现象。

图 5 为焊缝表面前进侧热机械影响区的腐蚀形貌。与图 4 后退侧热机械影响区的腐蚀形貌相比,图 5 的腐蚀现象更严重,腐蚀产物更多。从 144h 腐蚀图中可以看出,有大量的腐蚀点和细小的第二相粒子(图中黄色箭头所指处),从放大的腐蚀图看出,腐蚀呈龟裂形,且在裂口边缘堆积了大量的白色细小的第二相粒子,且对于高强铝合金,加入的合金元素作为第二相偏聚在晶界上。由此可以说明,腐蚀是沿着晶界的,孔蚀最初从第二相颗粒附近开始,通过第二相颗粒之间或与铝合金基体形成电偶对,发生阳极溶解。高强铝合金的孔蚀经常诱发其他形式的局部腐蚀(如晶间腐蚀、剥落腐蚀),造成材料力学性能的损失<sup>[5]</sup>。而腐蚀产物的发展过程为腐蚀产物的不断堆积,部分产物出现分层,底层腐蚀产物由于内应力作用出现龟裂,呈块状形貌,而表面腐蚀产物呈团絮状。

随着盐沉积量的增加,腐蚀产物也随之增多。当盐的沉积量较大时,样品表面的腐蚀产物较为密集,覆盖在样品的表面,在一定程度上阻碍了金属基体与环境中氧气和水份的接触,从而减缓了后期腐蚀的进程。这些密集的腐蚀产物似乎会阻止氧气和水份向金属基体扩散,但腐蚀产物膜上存在细微的裂缝,这就为氧气和水份向金属基体扩散提供了通道,促使腐蚀进一步进行。

图 6 为焊核区的腐蚀形貌,从 8h 腐蚀形貌的图中可以看出,在表面上有白色细小的第二相粒子,经过酸性盐雾腐蚀之后,颗粒的边缘起泡,有轻微的裂开。

从 72h 腐蚀形貌的放大图可以看出,表面上白色细小的第二相粒子明显减少,而腐蚀坑增多,说明细小的第二相粒子边缘被腐蚀掉,粒子从腐蚀坑中脱落出来,剩下了较多腐蚀

坑。从 240h 腐蚀形貌图可以看出,试样的表面覆盖了厚的白色腐蚀产物,使细小的第二相粒子被覆盖在产物之下,且随着腐蚀时间的延长,腐蚀产物起着“楔子作用”,引起了侧向拉伸力,导致了未腐蚀金属的分层和剥落。

从焊核区与前进侧和后退侧热机械影响区在相同腐蚀时间下的腐蚀形貌对比,可以看出焊核区的腐蚀稍轻,可能与焊核区形成了细小的等轴晶有关。

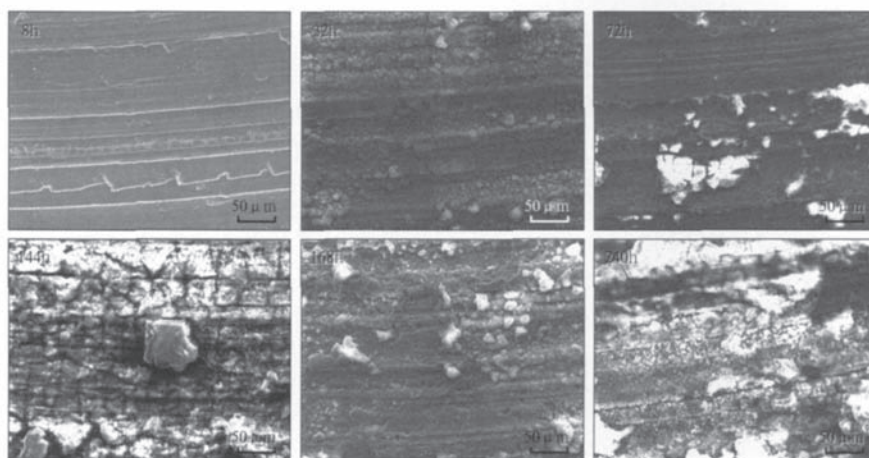


图6 焊核区腐蚀形貌

从 TEM 照片中可以看出,焊核区晶粒细小,热机影响区晶粒比焊核区晶粒粗大很多,而剥蚀与析出相有关:当析出相粗大、扁平时,腐蚀严重;当析出相细小,呈球状,腐蚀较轻,焊核区晶粒细小时,腐蚀要稍轻。且热机械影响区的晶粒边界上析出的第二相粒子较多,和贫铜带、基体所构成的腐蚀微电池也更多,腐蚀性必然下降。而前进侧热机械影响区比后推侧腐蚀严重的原因一方面是两侧的组织不同,前进侧分界线明显,交界上位错密度更大,且前进侧经历了更高的温度,这些因素都使它的抗腐蚀性能变差;另一方面是本次试验所用的铝合金都有包铝层,经搅拌摩擦焊之后,搅拌头把铝合金表面的纯铝层从前进侧搅到后退侧,堆积在后退侧,使后退侧有纯铝的堆积,腐蚀现象要减轻。

## 结论

(1) 母材区和热机械影响区晶粒的尺寸很大,而焊核区的晶粒尺寸明显减小,且在热机械影响区边界聚集了更多的第二相粒子。

(2) 接头在酸性盐雾腐蚀试验环境中最初产生点蚀,随时间延长出现晶间腐蚀,最后发展为剥落腐蚀。

(3) 2024 铝合金 FSW 接头前进侧热机械影响区比后退侧热机影响区、焊核区的腐蚀程度要严重,说明

前进侧热机械影响区对腐蚀更敏感。

(4) 2024 铝合金 FSW 接头焊核区比前进侧热机械影响区、后退侧热机械影响区的腐蚀程度要轻,说明晶粒细小的焊核区耐腐蚀性更好。

## 参考文献

- [1] 张君尧. 铝合金材料的新进展. 轻合金加工技术. 1998(5).
- [2] Knipstrom K E, Ekkari B. Friction Stir welding process goes commercial. Welding Journal. 1997, (9): 55-57.
- [3] Jariyaboon M, Davenport A J, Ambat R, et al. The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351. Corrosion Science. 2007, 49(2): 877-909.
- [4] 李荻, 张琦. LY12cz 铝合金晶间腐蚀模拟试验研究. 北京航空航天大学学报. 1998, 24(1).
- [5] 马腾, 王振尧, 韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀. 腐蚀科学与防护技术. 2004, 16(3).

(责编 淡蓝)