

# 7075铝合金FSW接头不同板厚的微观组织和腐蚀

Microstructure and Corrosion of 7075 Aluminum Alloy  
FSW Welded Joints with Different Thickness

北京航空制造工程研究所 何淼 张健 李光 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 付瑞东 康举



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接头腐蚀方面的研究工作。

7075 铝合金是超硬铝合金,其强度高于硬铝,塑性较低,对应力集中的敏感性强,耐热性较差。母材热处理状态为 T6(CS),即淬火后完全人工时效。7075 该类合金属于 A1-

搅拌摩擦焊现已广泛用于制造 7075 高强铝合金航空器,国内外对铝合金搅拌摩擦焊的工艺做了大量的研究。本课题以 7075 铝合金为研究对象,对其不同厚度的板材组织和在酸性盐雾试验下的腐蚀行为进行了研究。

Zn-Mg-Cu 系,还含有少量的 Mn。在超硬铝中可形成  $\eta$  相 ( $MgZn_2$ ) 和 S 相 ( $CuMgAl_2$ ) 等强化相,故合金可热处理强化。强化效果随主强化相的增多而增大,但塑性降低。加锰可减少铁的有害作用,提高耐蚀性。7075 超硬铝合金主要用于制造飞机的主要受力零件,如大梁、隔框、蒙皮、翼肋、起落架零件等。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)现已广泛用于制造 7075 高强铝合金航空器,国内外对铝合金搅拌摩擦焊的工艺做了大量的研究。本课题以 7075 铝合金为研究对象,对其不同厚度的板材组织和在酸性盐雾试验

下的腐蚀行为进行了研究。

## 试验方法

试验选用厚度分别为 3mm 和 8mm 的 7075 铝合金,试件材料为板材。搅拌摩擦焊所用设备型号: FSW-3LM-2010 搅拌摩擦焊机,焊接头旋转速度为 600 ~ 800 r/min,焊接速度为 60 ~ 80mm/min。

采用 YWX/Q 系列盐雾腐蚀试验箱,对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头进行酸性连续盐雾加速腐蚀试验(模拟城市污染大气和酸雨环境)。试验条件:盐溶液质量百分比为 5% 的 NaCl 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1~2ml,取样时间为144h。试验后用KYKY-2800型扫描电镜对试样的微观腐蚀形貌进行观察。

### 试验结果与分析

#### 1 7075 铝合金 FSW 焊接头 3mm 板厚的金相组织

7075 薄板焊接头的金相组织如图1所示,从图中可以看出,焊缝不同区域的组织有明显的不同。2024 铝合金母材的金相组织如图1(a)所示。从图中可以看出,铝合金母材的微观组织是典型的轧制经淬火加工人工时效的组织,晶粒为呈明显方向性的板条状,这是由于轧制过程中的变形引起的,晶粒的长度达到数百微米,厚度约为数十微米。

2024 铝合金的时效强化相主要是S相( $Al_2CuMg$ )和 $\theta$ 相( $CuAl_2$ )。FSW 焊接头组织分为5个区域:母材区、热影响区、焊核区、前进侧和后退侧热机影响区。

图1(b)为前进侧热机影响区,从图中可以看出,两区域有明显的分界线,母材中被拉伸的晶粒沿着焊核呈流线形分布,界面两侧的晶粒尺寸相差很大。

图1(c)为焊核区,与母材、热机影响区和热影响区组织具有明显的不同。旋转的搅拌头在前进时使材料产生塑性变形,使焊核区组织与母材明显不同,非常细小,远小于母材中晶粒的大小。金属在搅拌针作用下,使材料温度升高,应变速率大,搅拌针使晶粒破碎,晶粒回复再结晶,发生有限的长大,晶粒细小均匀,为等轴晶,但需要指出的是,薄板接头焊核区晶粒的尺寸过于细小,从其放大图(f)中可以看出等轴晶不明显,原因可能是在搅拌针扎入的过程中,热输入量大,温度升高速率很快,

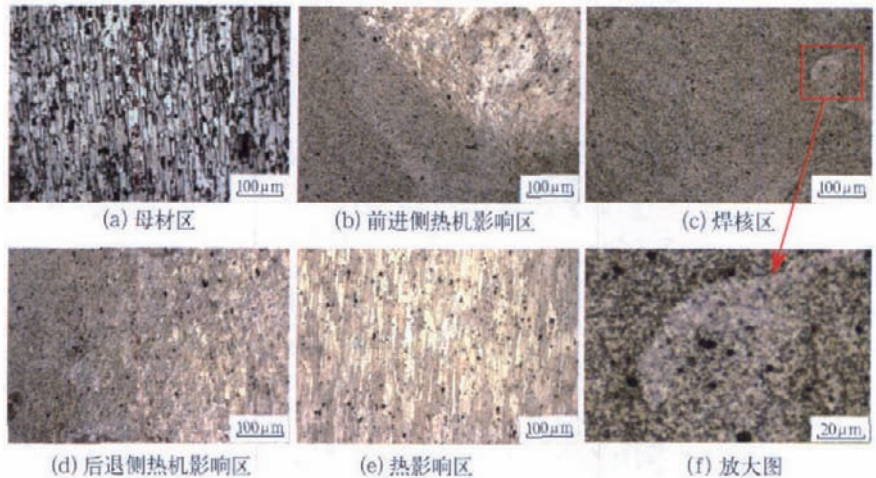


图1 7075薄板焊接头各区域的金相组织

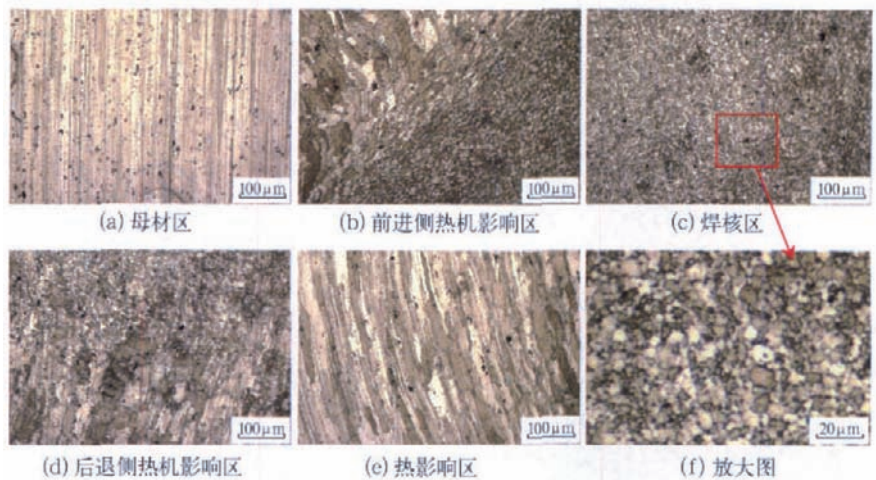


图2 7075厚板焊接头各区域的金相组织

而所用材料板材较薄,散热很快,冷却速度较快,高温停留时间较短,使破碎的晶粒没有充分的时间进行回复再结晶,晶粒长大受限,形成了很细小的晶粒。

图1(d)为后退侧热机影响区,图中焊核区与母材的分界线不明显,焊核区到母材的组织是逐渐过渡的。这是因为在搅拌头的旋转摩擦作用下,前进侧热塑性金属几乎即刻便被搅拌头挤压出去,该部分温度冷却快,因此焊核区与母材分界线明显。后退侧热塑性金属有一个流动过程,部分强化相发生溶解并伴随有晶粒长大的过程,焊核区与母材的分界线不明显。热机影响区的金属承受了较大的拉伸变形和热循环,随着离界

面距离的增大,弧形带状晶粒的宽度增大,离界面更远处,弧形带特征不明显,且晶粒尺寸大于焊核中的晶粒尺寸,这说明铝合金热机影响区的组织一方面在机械的作用下发生了弯曲变形,另一方面在热循环的作用下发生了部分再结晶现象。热影响区为受到了焊接热循环作用但没有受到机械作用的区域。

图1(e)为热影响区的组织,发现其晶粒与母材相似,有不同程度类似于母材中的带状组织出现,晶粒的生长方向沿温度梯度方向。但出现了晶粒粗化现象,仅尺寸稍有长大。而且各个区域的晶粒粗化程度也不同。原因在于该区域的材料受热循环的影响,微观组织和力学性能均发

生了变化,但没有发生塑性变形。

## 2 7075 铝合金 FSW 焊接头 8mm 板厚的金相组织

7075 厚板焊接头的金相组织如图 2 所示,母材区、前进侧热机区、后退侧热机影响区和热影响区的组织都与薄板接头组织类似,前进侧热机影响区有明显的分界线,后退侧分界线不明显。而厚板焊核区的组织与薄板焊核区的组织不同,从其放大图(f)中可以看出,晶粒为明显的等轴晶粒,并且大小约为  $2 \sim 10 \mu\text{m}$ ,这说明 8mm 的厚板焊核区的晶粒在搅拌摩擦焊的过程中有足够的时间长大,形成的明显的等轴晶。

## 3 7075 铝合金 FSW 接头腐蚀行为结果

图 3 (a) 为 3mm 厚 7075 焊接头的腐蚀形貌,试样大部分区域已经发黑,表面出现了黑色的腐蚀斑,且主要集中在热机影响区域,而焊核区的部分表面还具有金属光泽,这说明热机影响区的腐蚀比焊核区的腐蚀要严重,腐蚀现象更明显。从其微观图中可以看出,腐蚀的特征主要是晶间腐蚀,并有少量白色的腐蚀产物。由于 7075 铝合金的主要析出强化相是 S 相 ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) 和  $\eta$  相 ( $\text{MgZn}_2$ ),

两种析出相的电位都很负,因此在该合金的局部腐蚀过程中将作为阳极相而优先溶解,而 S 相和  $\eta$  相都在晶界优先析出,使晶界上聚集了大量的第二相粒子,将导致合金产生严重的晶间腐蚀以及剥蚀。

图 3 (b) 为 8mm 厚 7075 焊接头的腐蚀形貌,从图中可以看出,试样两侧的热机影响区域已经被腐蚀成红色,且腐蚀现象很严重,部分区域出现腐蚀坑,说明试样表面部分组织已经脱落,发生了严重的剥落腐蚀现象。而试样表面焊核区的腐蚀现象不如热机影响区的严重,还具有金属光泽,也没有剥落现象。从其微观图中看出,腐蚀以晶间腐蚀和剥落腐蚀为主,大量的腐蚀产物堆积在表面上。腐蚀机理是由于焊接热循环导致晶界析出的强化相如  $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{MgZn}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{CuMg}$  等,相对于晶粒本身为阳极而优先溶解,造成晶间腐蚀。当晶间腐蚀沿着平行于表面的大量狭窄通道进行时,形成的难溶物质占据了大量空间,此空间大于这些材料形成时的原空间。这些大量的腐蚀产物起着“楔子作用”,引起了侧向拉伸力,导致了未腐蚀金属的分

离、剥落或分层。试样在盐雾试验中,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 ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ),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,而 Cu 又被阴极吸氧腐蚀的中间产物所氧化,形成红褐色的铜的氧化物。又由于宏观腐蚀照片上显示有暗红色物质,可以得出,腐蚀产物中可能有  $\text{Cu}_2\text{O}$  存在。

从图 1 和图 2 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,腐蚀严重;当析出相细小,呈球状,腐蚀较轻,焊核区晶粒细小,腐蚀较轻。且热机影响区的晶粒边界上粒子的位错密度更大,和贫铜带、基体所构成的腐蚀微电池更多,腐蚀性能必然下降。对比图 3 (a) 和 (b),可以看出 8mm 厚 7075 焊接头的腐蚀比 3mm 厚 7075 焊接头的腐蚀要严重,腐蚀现象更明显,出现了较多的剥落腐蚀,生成了更多的腐蚀产物。原因可能是一方面,8mm 厚的试样晶粒尺寸平均比 3mm 厚的试样晶粒尺寸大,剥蚀更容易,更严重;另一方面,薄板冷却速度快,高温停留短,而厚板冷却速度慢,高温保持较长,使其组织粗化,更不耐剥蚀,腐蚀性能变差。

## 结束语

(1) 8mm 厚的 7075 铝合金 FSW 接头组织比 3mm 的组织等轴晶粒明显;

(2) 8mm 厚的 7075 铝合金 FSW 接头在酸性盐雾下的腐蚀性能比 3mm 接头的腐蚀性能要差。

(3) 两种 7075 铝合金 FSW 接头的腐蚀都是以晶间腐蚀为主,最后都发展为剥落腐蚀。(责编 岩石)

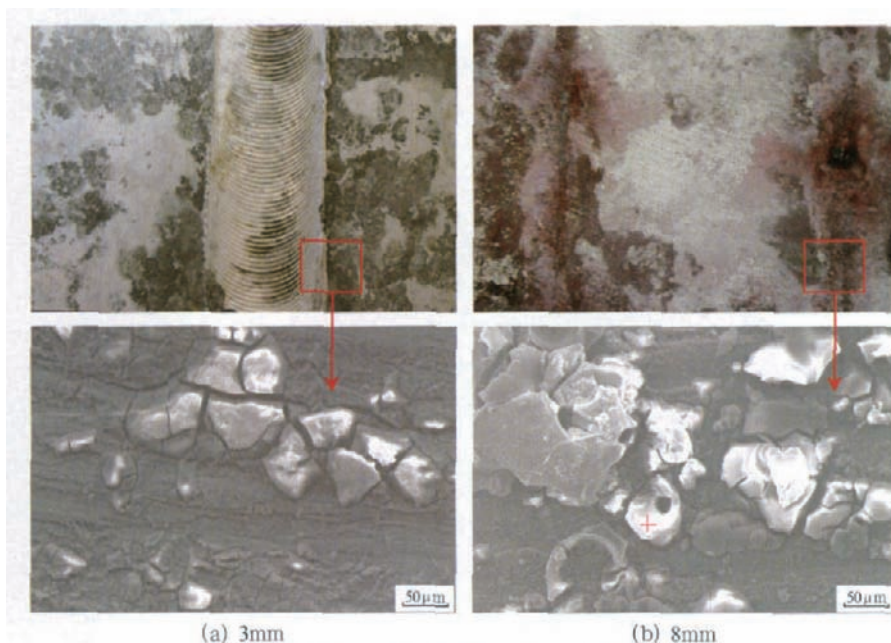


图3 不同厚度7075焊接头腐蚀形貌