

# 热处理对6061-T6 FSW 接头力学性能的影响\*

Influence of Heat Treatment on Tensile Properties of Friction  
Stir Welded 6061-T6 Joint

北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心 佟建华 李 光 董春林 李从卿 栾国红



佟建华

硕士,主要从事搅拌摩擦焊技术工  
艺及机理研究。

90年代初,英国焊接研究所发明了一种新型的固相焊接方法——搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW),近来得到了广泛关注和应<sup>[1-2]</sup>。与传统熔化焊相比,FSW焊接过程无飞溅、无烟尘、无气孔,不需添加焊丝和保护气体,是一种绿色制造技术,而且FSW的接头具有晶粒细小,疲劳性能、拉伸性能

\* 国家科技十五支撑计划重点项目(2006BAF04B09)资助。

对6061-T6铝合金进行搅拌摩擦焊工艺试验研究,分析焊前及焊后热处理对接头性能的影响,以期获得优良的强度系数和延伸率。

和弯曲性能良好等特点。

6061-T6铝合金是Al-Mg-Si系可热处理强化铝合金,在高温下具有良好的塑性,虽然强度不高,但具有优良的耐蚀性,没有晶间腐蚀倾向,焊接性能良好,常用于制造中等载荷零件、形状复杂锻件和模锻件。

采用搅拌摩擦焊获得的6061-T6接头强度一般高于其他焊接方法<sup>[3]</sup>,但接头性能与母材仍有一定差距。人们通过优化工艺参数和搅拌头形貌等手段得到的焊态下接头强度也仅为母材的66%左右<sup>[4-6]</sup>。K. Elangovan等<sup>[5]</sup>采用固溶处理、

表1 6061-T6铝合金的化学成分

w/%

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
1.06	0.53	0.38	0.33	0.043	0.17	0.016	0.033	余量

表2 6061 FSW接头拉伸力学性能

焊 接 状 态	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	强度系数 /%
T6 态母材	325	16.4	—
第1组(焊态)	233	6.45	72
第2组(焊后人工时效)	270	5.24	83
第3组(焊前退火)	145	20.52	—
第4组(焊后退火)	145	12.25	—
第5组(退火+固溶+人工时效)	277	10.52	85

人工时效、固溶处理加人工时效3种方法对接头进行焊后热处理,结果表明,人工时效比固溶处理和固溶加时效处理效果好,人工时效处理后接头强度系数从焊态的66%提高到77%,而 $Mg_2Si$ 强化相细小、均匀分布,晶粒细小和高密度位错是人工时效比另外2种方法好的主要原因。K. N. Krishnan<sup>[7]</sup>同时也指出固溶热处理可提高焊接接头的硬度,但焊接接头却未能通过弯曲测试,这是由于热处理减小了晶粒尺寸,但并没有提高焊缝韧性。G. Madhusudhan Reddy等<sup>[8]</sup>发现在焊态和焊后时效条件下,拉伸断裂位置在热影响区。焊后固溶处理加时效的拉伸试样断裂位置在前进侧热影响区,屈服强度和抗拉强度有很大提高。时效处理过程使大量细小强化相 $Mg_2Si$ 聚集,延伸率明显下降40%左右。目前,还未发现国内对6061搅拌摩擦焊焊后热处理的相关报道。

本课题对6061-T6铝合金进行搅拌摩擦焊工艺试验研究,分析焊前及焊后热处理对接头性能的影响,以期获得优良的强度系数和延伸率。

## 试验材料与方法

### 1 试验材料与设备

试验材料选用6061-T6铝合金,其化学成分如表1所示。试板尺寸为 $300\text{mm} \times 100\text{mm} \times 6\text{mm}$ ,沿试板长度方向进行对接。焊接设备为自主研制的大型悬臂式数控搅拌摩擦焊设备。搅拌头轴肩直径为15mm,搅拌针直径为3.5mm,长度为5.75mm,带有螺纹结构,焊接倾角为 $2.5^\circ$ 。

### 2 试验方法

为比较不同热处理方法,分析材料不同的热处理状态对接头性能的影响,进行了5组试验。第1组试验对T6态材料进行焊接;第2组试验对T6态6061焊接后进行人工时效处理;第3组试验为对T6态材料退火

后进行焊接;第4组试验对T6态材料焊接后进行退火;第5组试验在第3组试验的基础上再进行固溶淬火及人工时效处理。

焊前对试板表面进行机械清理,并用酒精擦拭。焊接参数为前期



图1 焊缝横截面宏观形貌

试验优选出来的,即旋转速度1400 r/min,焊接速度400mm/min。退火规范为 $415^\circ\text{C}$ 保温2h后随炉冷却;固溶处理规范为 $535^\circ\text{C}$ 保温50min后流水淬火;人工时效规范为 $200^\circ\text{C}$ 保温8h后空冷。

### 3 测试分析方法

所焊试样经X射线检测无缺陷后,沿垂直于焊接方向切割试样,用数控铣床加工成标准拉伸试样,在Z100电子万能材料试验机上进行常温拉伸测试,并以3个试样的平均值作为评定结果。拉伸测试后,采用CAMBRIDGE-S360型扫描电镜对接头拉伸断口进行分析。

## 试验结果与分析

### 1 焊缝成形及X射线检测

各状态下的6061焊接成形均良好,经X光检测未发现缺陷。图1为典型的焊缝横截面宏观形貌。

### 2 接头力学性能

各组试验的接头拉伸性能如表2所示。采用优化的工艺参数,焊态下的接头抗拉强度达到233MPa,为母材强度的72%。经人工时效处理后,接头抗拉强度显著提高,达到270MPa,为母材强度的83%,但延伸率由焊态的6.45%降低到5.24%。图2(a)和(b)给出了焊态和人工时效对应接头

的拉伸断裂位置。可以看出,接头断裂位置均在焊缝的后退侧,位于热机影响区与热影响区的交界处,断裂方向与应力方向呈 $45^\circ$ 。

为使接头获得良好的塑性,对接头进行了退火处理。结果表明,焊前与焊后退火所得到的接头强度相当,均为145MPa左右,但延伸率却相差很大。焊后退火接头的延伸率达到了20.52%,而焊前退火接头的延伸率达到了12.25%。由图2(c)和(d)可以看出,焊后退火接头断裂位置仍在焊缝的后退侧,而焊前退火接头断裂位置在母材处。

第5组试验中先对T6态6061进行退火,搅拌摩擦焊后再进行固溶淬火与人工时效处理,得到的接头抗拉强度达到了277MPa,为T6态母材强度的85%,延伸率保持在10%以上。由图2(e)可见,断口呈 $45^\circ$

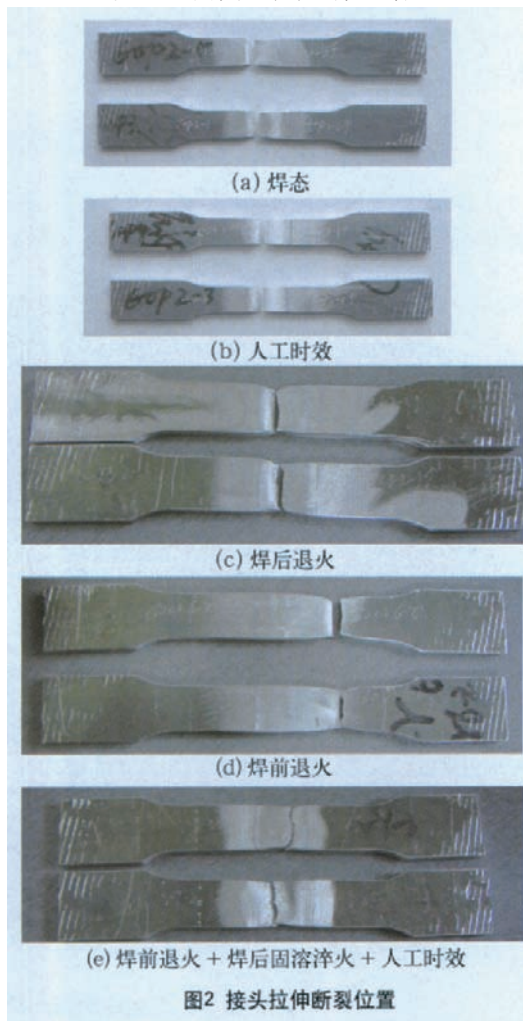


图2 接头拉伸断裂位置

斜口断裂,断裂位置在焊缝后退侧或前进侧。

### 3 断口扫描分析

图3给出了断口扫描电镜照片。由图3(a)可以看出,母材断口主要由细小的等轴状韧窝组成,韧窝尺寸很小而且很深,大小均匀,表现为穿晶韧性断裂特征,所以母材表现出了较好的延伸率。图3(b)为焊态下接头断口形貌,可以看出,焊态下接头断口由许多尺寸较大的韧窝组成,与母材相比,韧窝尺寸较大并且数量较少。与焊态下接头断口相比,人工时效处理后接头断口(图3(c))具有一定的韧窝,但是比焊态下的韧窝尺寸更小、更浅,并且伴随着第二相粒子的析出,形成了包含有第二相粒子的韧窝型断裂,表现出了更低的塑性。经固溶处理的接头断口虽析出了更多的第二相粒子,但其韧窝更小、更深,在具有较高强度的同时也保留了较高的塑性。

### 讨论

由试验结果可以看出,焊态下的焊缝强度较母材低很多,焊后人工时

效可使焊缝强度由焊态的233MPa提高到270MPa,这是因为焊接过程使强化相 $Mg_2Si$ 粒子溶解或长大,降低了焊缝的强度<sup>[5]</sup>。焊后人工时效增大了 $Mg_2Si$ 粒子的密度,并且 $Mg_2Si$ 均匀分布,使焊缝强度大大提高,但同时也降低了延伸率。

焊前退火与焊后退火时接头所表现出来的强度相当,但延伸率相差较大(表2),断裂位置也不同(图2(c)和(d)),前者断于母材,后者断于焊缝内。焊后退火时,搅拌摩擦焊过程发生在材料较硬的T6态,焊缝处仍为薄弱环节,且需要较大的能量。

焊前退火使材料处于较软的状态,更容易形成较为致密的搅拌摩擦焊接头,强度优于O态母材。在此基础上进行固溶处理和人工时效处理,相当于对O态材料进行T6处理,接头强度得以恢复,延伸率也保持了较高的水平。

### 结论

(1)焊态下的6061-T6(6mm)接头强度可达233MPa,为母材的72%;人工时效可将强度系数提高到

83%,但延伸率由焊态的6.32%下降到5.24%。

(2)焊前退火使焊后材料保持了良好的延伸率,经过固溶淬火与人工时效处理使其强度有所恢复,得到的接头强度达到277MPa,为母材的85%,延伸率在10%以上。

(3)焊态、人工时效、焊前退火+固溶淬火+人工时效下的接头在拉伸测试中大多在焊缝的后退侧出现断裂,拉伸断口具有明显的韧窝特征。

### 参考文献

[1] 梁国红,关桥. 搅拌摩擦焊——革命性的宇航制造新技术. 航天制造技术, 2003,4(8):16-23.

[2] 张田仓,郭德伦,梁国红. 固相连接新技术——搅拌摩擦焊技术. 新工艺,新技术,新设备,1999(2):35-36.

[3] 赵勇,付娟,张培磊,等. 焊接方法对6061铝合金接头性能影响的研究. 江苏科技大学学报(自然科学版),2006,20(1):90-94.

[4] Liu Huijie, Chen Yingchun. Friction stir welding characteristics of 6061-T6 aluminum alloy sheet. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(43):1-8.

[5] Elangovan K, Balasubramanian V. Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloy joints. Materials Characterization, 2008, 59(9):1168-1177.

[6] Zeng W M, Wu H L. Effect of tool wear on microstructure, Mechanical properties and acoustic emission of friction stir welded 6061 Al alloy. Acta Metall Sin (Engl Lett), 2006, 19(1):9-19.

[7] KRISHNAN K N. The effect of post weld heat treatment on the properties of 6061 friction stir welded joints. Journal of Materials Science, 2002, 37:473-480.

[8] Reddy G Madhusudhan, Mastanaiah P. Microstructure, residual stress distribution and mechanical properties of friction-stir AA 6061 aluminium alloy weldments. National Seminar on Non-Destructive Evaluation, 2006, 8(12):7-9.

(责编 良辰)

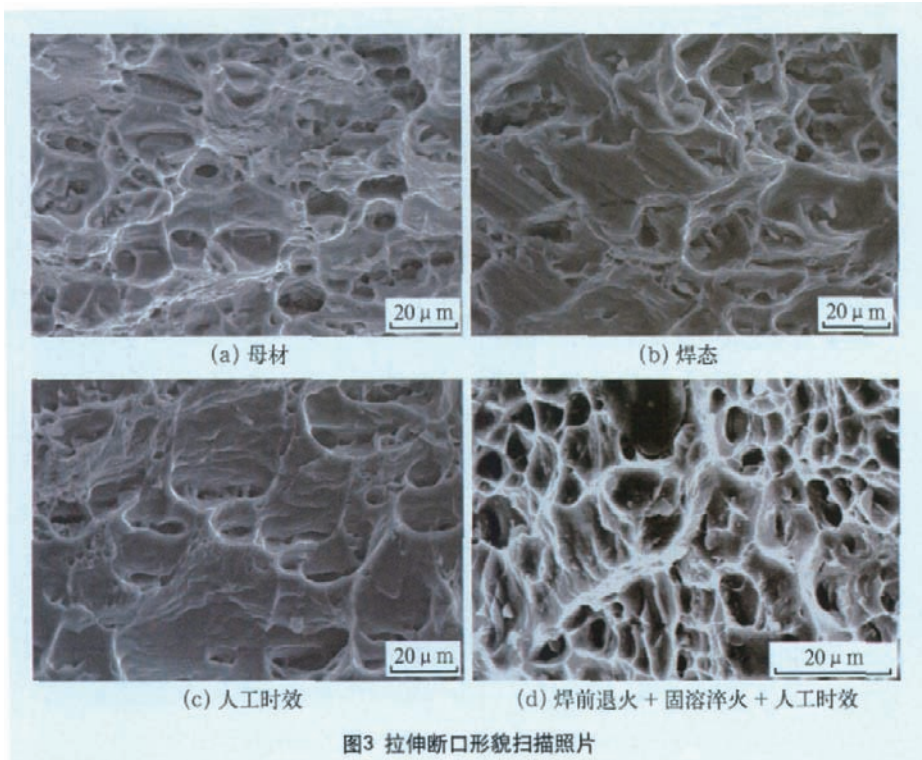


图3 拉伸断口形貌扫描照片