

7A60 铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能分析*

Research on Welding Process and Mechanical Properties of 7A60 Aluminum Alloy Friction Stir Welding

中航工业北京航空制造工程研究所
北京赛福斯特技术有限公司

董继红 董春林 谭锦红 赵华夏 栾国红

[摘要] 采用搅拌摩擦焊方法对厚度为 6mm 的 7A60 超高强铝合金进行了焊接试验,分别测试了搅拌头形状、工艺参数搅拌摩擦焊接头对抗拉强度的影响。结果表明:搅拌头的形状对焊缝接头强度有一定的影响;在旋转速度为 300r/min,且焊接速度为 200mm/min 时,可以获得较好的焊接性能,抗拉强度可以达到 488.69MPa,为母材的 75%;接头显微硬度最低值出现在焊接热影响区而不在焊核区,主要是焊核区经过动态再结晶形成了细小的等轴晶粒所致;断口形貌分析显示,接头断裂模式为脆性和韧性的混合型断裂。

关键词: 搅拌摩擦焊 抗拉强度 工艺参数
7A60 铝合金

[ABSTRACT] Friction stir welds of 7A60 aluminum plate of 6 mm thickness are completed in a single pass welding. The influence of welding tool and parameters on the tensile strength are investigated. The experiment results demonstrate that the tensile strength is affected by welding tool figuration. When the rotating speed is 300 r/min and the welding speed is 200 mm/min, the good weld is achieved, and the tensile strength of the joint reaches 488.69 MPa, about 75% of the ultimate strength of the base material with higher welding efficiency. Furthermore, the minimal micro-hardness locates on the heating affected zone while doesn't locate on the weld nugget, which primarily results from fine grain equiaxed structure developed by dynamic recrystallization. The fracture analysis shows that the fracture mode of the joint is brittle / ductile mixed fracture.

Keywords: Friction stir welding Tensile strength
Process parameter 7A60 aluminum alloy

7A60 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金,具有比重小、强度高、加工性能好和抗腐蚀性能好等特点,被广泛应用于航天航空和民用工业等领域,尤其在航空工业中占有十分重要的作用^[1-2]。该合金通常采

用传统的铸锭冶金工艺制备,但由于铸锭冶金工艺的冷却速度较低,导致晶粒粗大,成分偏析严重,合金元素的极限固溶度降低等不足,严重影响了铸锭的最终使用性能。对于这种高强铝合金,采用熔焊技术进行焊接,一是熔焊温度过高,材料中某些元素成分遭到破坏,致使接头性能大大下降。目前有关高强铝合金研究在国外较多,在国内鲜见,尤其是对 7A60 铝合金的搅拌摩擦焊目前还没相关报道。利用搅拌摩擦焊技术可以很好地保持基体材料的力学性能,焊接变形小,残余应力低,焊接缺陷少。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding,简称 FSW)是一种新型固相连接技术^[3],由于可以连接常规熔焊无法连接的高强铝合金,且能够得到质量好、性能优良的焊接接头,在航空、航天领域上的应用越来越受到关注。搅拌头采用一定方式夹持在焊接主轴上,搅拌针缓慢的旋转插入焊缝中间,直至轴肩也进入工件一定厚度(压入量)。通过轴肩、搅拌针与焊缝金属的不断摩擦产生的摩擦热,导致搅拌头周围金属的塑性软化,从而进一步诱发材料塑性变形能的释放。焊接过程中,金属没有经过熔化-凝固过程,只是不断软化形成金属塑流在搅拌头周围迁移,从而使焊缝两侧金属形成固相连接。

影响搅拌摩擦焊接头质量的主要因素是焊接过程中搅拌摩擦的发热量和待焊材料在搅拌头作用下的塑性流动过程,它与搅拌头的形状、焊接工艺参数有关。本文作者选取 6mm 7A60 铝合金板进行对接搅拌摩擦焊试验,研究该合金的搅拌摩擦焊工艺与组织性能特点,讨论了搅拌头和焊接工艺参数对接头抗拉强度的影响。

1 试验材料及方法

试验材料选用厚度为 6mm 的 7A60-T6 铝合金轧制板,焊接尺寸规格为 300mm × 150mm,焊接方式为单道对接焊。试验材料主要化学成分如表 1 所示。

搅拌摩擦焊试验在自行设计制造的静龙门搅拌摩擦焊设备上进行。试验中采用不同规格搅拌头,在不同的焊接工艺参数下进行焊接,对试件的焊缝进行 X 光检测、金相分析、拉伸测试及硬度测试,分析研究搅拌

* 航空科学重点基金项目(2009ZE25007)资助。

表1 7A60铝合金的化学成分 %

Zn	Mg	Mn	Cu	Cr	Ti	Fe	Si	Al
8.89	2.74	0.01	2.26	0.01	0.014	0.028	0.022	94.916

头形状和焊接工艺参数对焊接接头抗拉强度的影响。

2 试验结果及分析

2.1 搅拌头形状对接头强度的影响

在搅拌摩擦焊过程中,搅拌头是搅拌摩擦焊技术的核心部分。搅拌头的形状决定了焊缝金属受热、塑性流变和受力方式;搅拌头的尺寸决定了焊缝的大小、焊接速度和搅拌头自身强度;搅拌头的型体设计对于成功地实现搅拌摩擦焊工艺至关重要。结构理想的搅拌头会提高焊接区域摩擦产热功率,使焊缝金属达到热塑性

螺线和三切面,接头强度相差不大。对于不同轴肩不同搅拌针的焊接接头进行对比分析,轴肩大的搅拌头,焊接热输入足以使焊缝区域的材料达到塑性状态,形成焊核区的材料也增多,从而出现焊缝表面过热现象,因此焊接接头性能下降;轴肩小的搅拌头,热输入量略小,但达到材料塑性流动状态,形成的焊核区较小,热量比较集中,热塑性状态的金属在较小的区域流动,金属流动性好,因此焊接接头机械性能好。由于搅拌针也是影响焊接成形的重要部分,是搅拌头的核心,如图1(a)和(b)所示。

采用图1(a)所示的圆锥螺纹搅拌针时,在焊缝前进侧接近上表面位置出现内凹尖角特征,该尖角处存在的应力集中将对接头的疲劳性能产生有害影响。相反,采用图1(b)所示的三平面搅拌针可以明显改善焊缝

表2 不同轴肩及不同搅拌针焊接接头强度对比

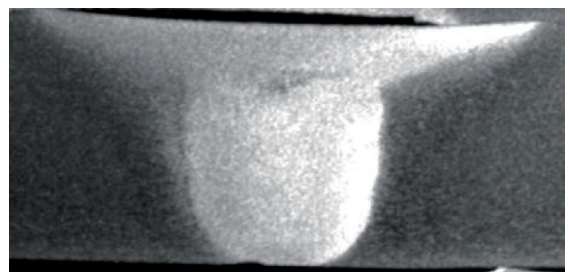
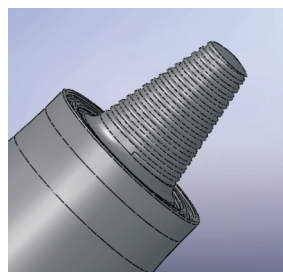
工具编号	轴肩/mm	工艺参数 ω/v	针类型	轴肩类型	平均抗拉强度/MPa
1#-1-1	15	400/100	三切面	双环	373.28
1#-1-2	15	400/100	螺纹	双环	373.55
1#-2-1	15	400/100	三切面	内凹	404.36
1#-2-2	15	400/100	螺纹	内凹	400.46
2#-1-1	12	400/100	三切面	双环	421.33
2#-1-2	12	400/100	螺纹	双环	419.76
2#-2-1	12	400/100	三切面	内凹	458.09
2#-2-2	12	400/100	螺纹	内凹	464.40

注: ω 为旋转速度(r/min); v 为焊接速度(mm/min)。

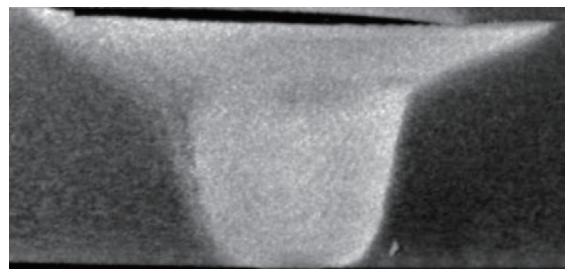
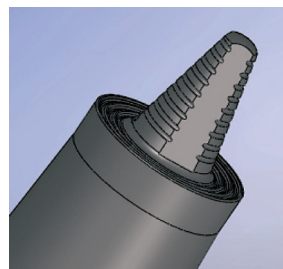
状态而易于流动,焊接工艺性好。目前搅拌头的形状很多,从轴肩不同来看,种类有内凹形、双环形、涡状线形等;从搅拌针不同来看,种类有柱状形,圆锥形、螺旋形、偏心形、三切面、左右旋 Flute 槽等。而摩擦热和材料的塑性流变是决定接头成形和机械性能的重要因素,为增加接头内部的塑性金属流动,提高焊缝的性能,国内外学者一直在努力创造新型的搅拌头形式,这包括对搅拌针型面结构和轴肩形式的改进。

在试验中采用4种不同的轴肩、两种不同搅拌针相组合的搅拌头在相同工艺参数下进行焊接,焊接接头强度如表2所示。

根据表中的试验结果可以看出,相同轴肩形貌,不同搅拌针形貌,即



(a)圆锥螺纹搅拌针



(b)三平面搅拌针

图1 不同结构的搅拌针及焊缝形貌

Fig.1 Welding pins with different structures and metallographys

形貌,焊缝在材料厚度方向上的尺寸变化呈均匀过度趋势,这有利于保证焊接接头力学性能的均匀与连续。从上表知,2#-2-1 搅拌头接头性能较好,同时根据焊核区形貌特征,因此在此次试验中采用轴肩直径 12mm、内凹型和搅拌针为三平面的搅拌头。

2.2 焊接工艺参数对接头强度的影响

2.2.1 力学拉伸性能特征

在研究搅拌摩擦焊焊接工艺规范对接头质量的影响时,研究了搅拌旋转速度和焊接速度对接头强度和延伸率的影响。将两块 300mm × 150mm × 5.6mm 的 7A60 铝合金板对接进行焊接,每条焊缝加工 4 个拉伸试样,测定焊缝平均强度及延伸率。表 3 为所选搅拌头进行的一系列工艺试验,表 4 为不同工艺参数下接头强度对比。

表3 不同工艺参数下的焊缝成型

旋转速度 / (r·min ⁻¹)	焊接速度 / (mm·min ⁻¹)					
	100	120	150	200	250	300
600	○	○	◎	◎	◎	※
400	○	○	○	○	○	◎
300	○	○	○	○	◎	—
250	○	○	◎	◎	—	—
200	○	◎	◎	—	—	—

注:“※”表示焊缝表面成形良好,但尾孔有缺陷;“◎”表示焊缝虽然表面成形良好,但 X 光检测焊缝内部有“隧道”缺陷;“○”表示焊缝成形良好,且 X 光检测没有缺陷,“—”表示没进行相关试验。

表4 不同工艺参数下焊接接头抗拉强度测试结果

编号	旋转速度 / (r·min ⁻¹)	焊接速度 / (mm·min ⁻¹)	平均延伸率 / %	平均抗拉强度 / MPa
A1	600	100	1.2	415.7
A2	400	100	3.5	458.1
A3	300	100	4.1	464.6
A4	200	100	4.8	447.0
B1	600	150	3.6	433.0
B2	400	150	3.4	464.5
B3	300	150	3.9	433.0
C2	400	200	3.5	463.4
C3	300	200	4.5	488.7

从表 4 可以发现,当焊接转速为 200~600r/min,焊接速度为 100~200mm/min 时,焊接接头的平均抗拉强度可达到 430.9MPa 左右,其最大抗拉强度为 488.7MPa,可达母材 648.3MPa 的 75%。在搅拌头转速为 300r/min,焊接速度为 200mm/min 时为最佳工艺。

根据文献 [4-6] 所述,搅拌摩擦焊本质上是摩擦热

作为焊接热源的焊接方法,所以采用热输入评价接头质量的优劣最直接、最有效。根据推导,搅拌摩擦焊的功率可表示为:

$$Q = k\mu\omega F \quad (1)$$

式中 Q 为热功率; k 为形状因子,取决于搅拌头的设计尺寸与形状以及搅拌效果; μ 为摩擦系数; ω 为搅拌头转速; F 为焊接压力。

所以,搅拌摩擦焊的热输入 q_E 为:

$$q_E = \frac{Q}{v} = k \frac{\mu\omega F}{v} = k\mu F \frac{\omega}{v} = k' \frac{\omega}{v} \quad (2)$$

由于搅拌摩擦焊稳态焊接时,摩擦系数和焊接压力均为稳定值,忽略不同工艺参数对 μ 的影响,将摩擦系数与焊接压力、形状因子合并为新的常量系数 k' 。由此可见,参数 ω/v 直接表征了焊接热输入的大小,我们称之为速比因子。

对于给定的焊接过程,系数 k' 为常量,接头的质量只能取决于速比因子 ω/v 。其值过小,不利于焊缝的固态扩散连接,接头质量下降;反之, ω/v 过大,焊缝输入热量过多,易产生组织过热和飞边,损害接头质量。

根据热输入不变准则,由式子(2)可以得到不同焊接压力的速比因子为:

$$\left(\frac{\omega}{v}\right)_2 = \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{\omega}{v}\right)_1 \quad (3)$$

式中 $\left(\frac{\omega}{v}\right)_1$ 为焊接压力为 F_1 时对应的速比因子; $\left(\frac{\omega}{v}\right)_2$ 为焊接压力为 F_2 时对应的速比因子。

由式(3)知,随着焊接压力的变化,速比因子容限会沿着 X 轴左右移动(焊接压力增大,向左移;反之,向右移),但容限区间宽度不变。所以通过一组参数优化出来的速比因子容限,通过式(2)可以直接获得不同焊接压力下的速比因子容限,进而得到转速和焊速的优化匹配。

为了更好地分析 ω/v 比值对接头性能的影响,将表 4 中的 ω/v 比值进行了计算,并将 ω/v 比值对抗拉强度、延伸率的影响绘于图 2 中。

图 2 表明,当速比因子 ω/v 的取值在 1.5~4 之间时,可以获得优良的接头抗拉性能;而相应的接头延伸率也分布在较高的取值区间 3.4~4.8。在进行 7A60 铝合金焊接搅拌摩擦焊时,为防止搅拌头的轴肩过热,其转速一般取值 200~400r/min,由图 2 可知速比因子应取 1.5~2,由此可得到与其匹配的焊接速度为 150~200 mm/min。从上图 2 中可以得出与前述表 4 相同的结论,当 ω/v 比值在 1.5~2 范围内时,焊缝具有合适的焊接热输入,可获得抗拉强度高的优质接头及成形美观的焊缝,接头抗拉强度可达到 430MPa 以上,是同状态母材抗拉强度(648.3MPa)的 70% 以上。

由此可见,对于给定的搅拌头和焊接压力,在FSW过程中接头的质量主要取决于速比因子 ω/v 。对于待连接的母材而言,存在一个速比因子容限,在该容限内均可获得满意的接头质量。

2.2.2 显微硬度特征

接头不同区域的显微组织差异往往会通过不同区域的硬度差异表现出来。图3为不同工艺参数下焊缝横截面上距焊缝上表面

0.8mm位置处显微硬度分布曲线。可以看出,前进侧与后退侧显微硬度沿焊缝中心分布不对称。分布呈现两侧母材区硬度高,焊缝区显微硬度值较低趋势。前进侧过渡区一般比较明显,材料从母材到焊核组织变化较快,硬度分布存在较大差异,而搅拌摩擦焊材料的流动主要集中在焊接接头的后退侧,后退侧的过渡区域较大,硬度分散差异较小,因此焊缝显微硬度的最低值出现在前进侧,说明前进侧的热影响区(TMAZ/HAZ)是焊缝的薄弱环节。

接头处的硬度值的这种分布变化,可能与接头组织中的沉淀强化相析出的情况有关。在热影响区和热机影响区,由于温度的作用,可能使弥散分布的细小强化相发生了丛聚,晶粒发生了长大,较大晶粒降低了硬度,导致强度下降。在焊核处尽管强化相可能已全部溶解于基体,但材料发生动态再结晶,使弥散分布焊核区内部的位错密度显著降低,强度和硬度出现明显下降。

从图3可以看出,不同工艺参数下的显微硬度值有所不同。从不同规范的实验结果看,在选定的实验规范内, ω/v 比值为1.5的显微硬度比 ω/v 比值为6的显微

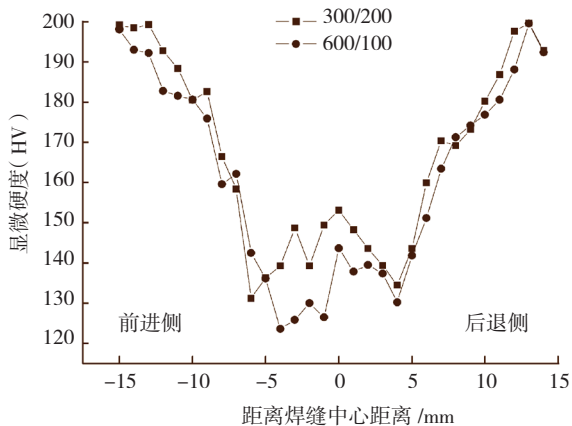


图3 7A60铝合金FSW接头硬度分布曲线

Fig.3 Micro-hardness distribution curve of welded joint

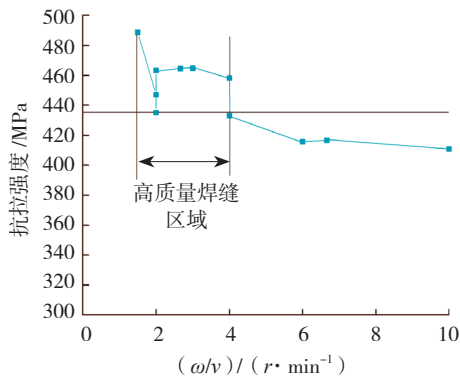
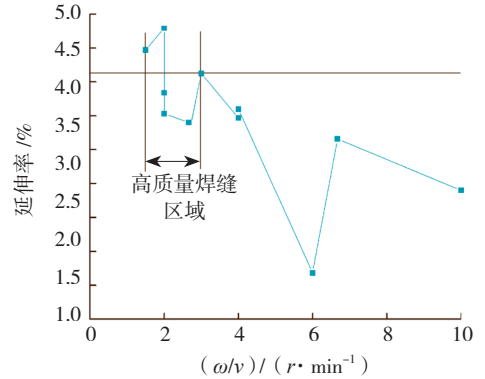


图2 ω/v 比值与7A05铝合金FSW接头性能间的关系

Fig.2 Relationships between property of joint and ω/v



硬度值要大,比较明显的部位为焊核区,这与前述结论也相吻合。

2.2.3 接头组织特征

焊接前,7A60铝合金母材的微观组织是典型的轧制组织,如图4(a)所示,经过T6处理后,轧制组织由再结晶组织与变形的板条状组织组成,母材晶粒呈明显方向性的板条状,晶粒的长度达到数百微米。

7A60铝合金的搅拌摩擦焊缝同样存在3个组织性能变化区,即焊核区A(WNZ)、热机影响区B(TMAZ)和热影响区C(HAZ);D为母材区。不同区域的微观组织如图4所示。焊核区发生了完全动态再结晶,这是由于焊核区位于焊缝的中间位置,该区域由于受到搅拌针的强烈搅拌作用,以及搅拌头与板材剧烈摩擦产生局部高温作用,组织发生动态再结晶,即由母材的带状轧制组织转变成细小的等轴晶粒组织,见图4(b)。热机影响区发生了塑性变形与动态再结晶,图4(c)和(d)中可以看出,两侧的热机影响区与焊核区之间都有比较明显的过渡区,但前进侧中的过渡区较窄,且过渡区两边的晶粒尺寸相差很大,在接近焊核区,晶粒沿界面方向被拉长,整个区域为呈放射性的条状组织,且晶粒尺寸大于焊核中的晶粒尺寸,表明该区域的金属承受了较大的拉伸变形和热循环作用。而接近热影响附近区域,晶粒发生粗化,形成软化区。从图中还可以看出,图4(d)后退侧的晶粒比前进侧图4(c)要粗大些,且后退侧的过渡区晶粒明显被拉长;但前进侧的过渡区比后退侧窄,且前进侧过渡区晶粒大小的变化要剧烈。

文献[7-8]指出:Al-Zn-Mg铝合金的晶内平衡相 η 相析出少,亚稳相 η' 相析出多且尺寸小而弥散,析出强化相显著。由于焊接中使用的7A60铝合金母材时经过T6热处理,其主要强化相为时效析出的 η' 相。在搅拌头的热机梯度的影响下,母材的这些沉淀相粒子将发生再次固溶、析出和时效等过程,造成焊缝区的组织和性能发生转变,破坏了细小的 η' 相与母材之间的共格关

系,使焊缝整体强度低于母材。从图4可以看出 η' 相在前进侧热机影响区和热影响区变化相差较大,说明前进

侧是接头的薄弱环节,这与前述分析相吻合。

2.2.4 断口形貌

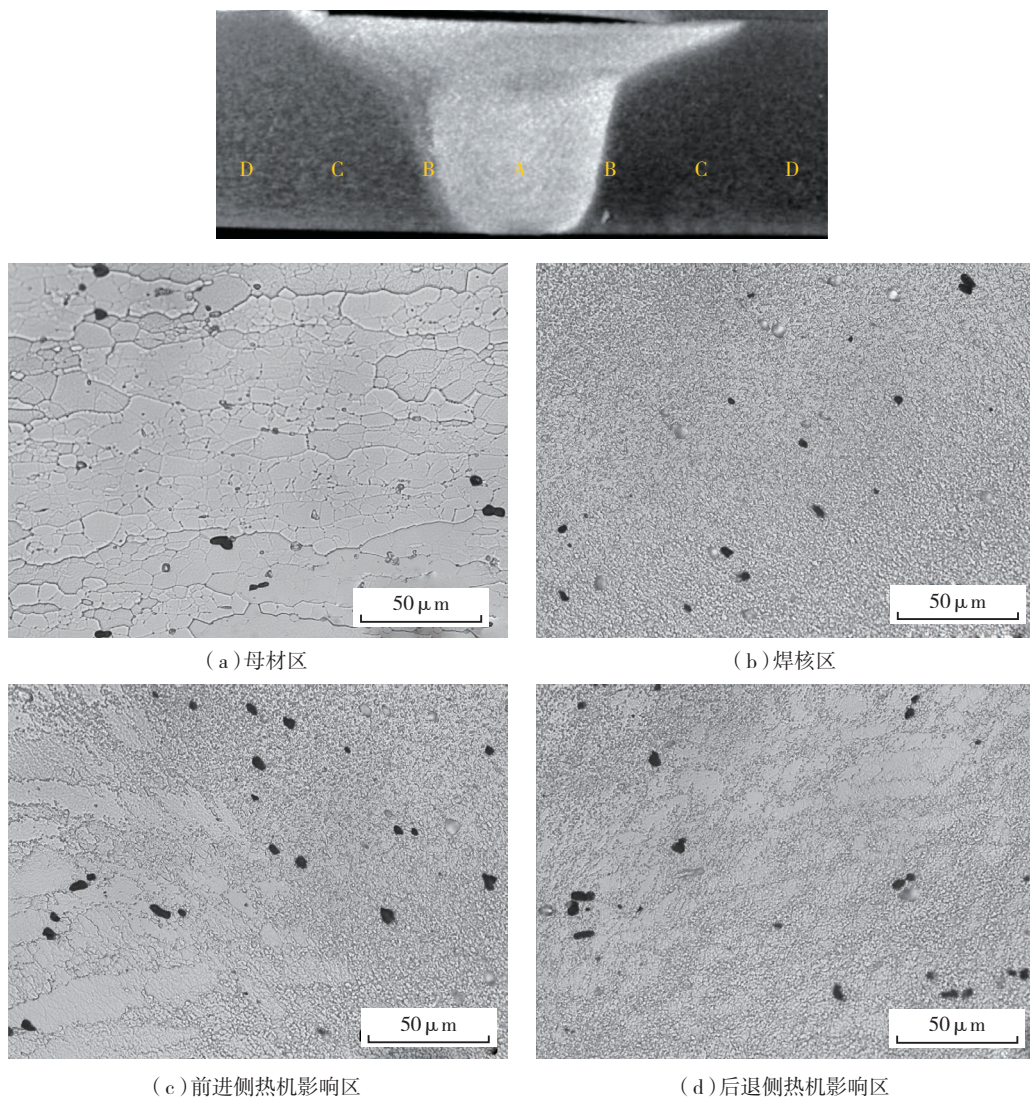


图4 参数300/200下7A60铝合金焊接接头的金相组织
Fig.4 Microstructures of 7A60 welds at 300/200

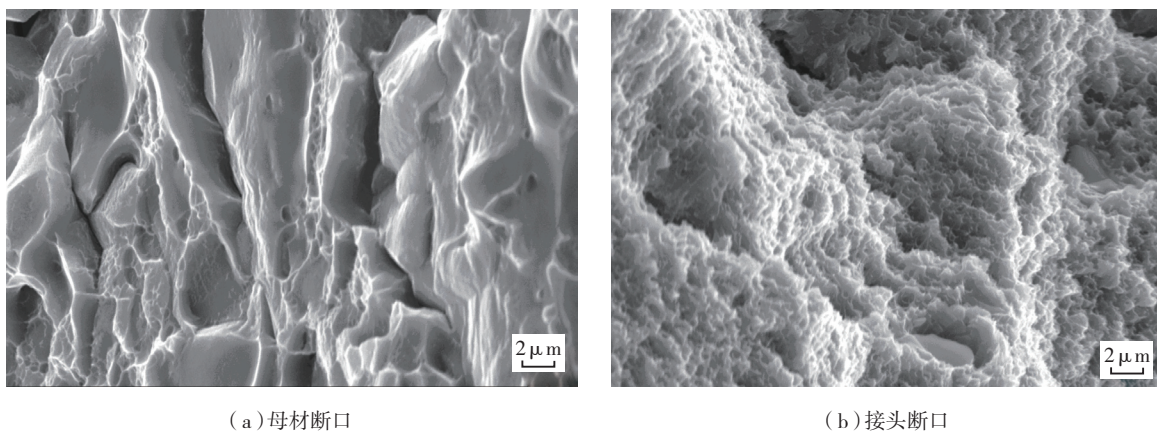


图5 接头断口的扫描电镜的形貌
Fig.5 SEM morphology of FSW joint

图5为母材及搅拌摩擦焊接接头断口形貌,试件断裂于焊接热影响区与热机影响区交界处。搅拌摩擦焊拉伸试样断后稍有颈缩,但不明显。图5(a)是母材拉伸断口微观形貌,断裂面与拉伸轴成45°角剪切断裂,断口存在较大韧窝和撕裂棱,显示出材料具有较好的塑性,为塑性断裂。图5(b)是接头拉伸断口微观形貌,断裂面与最大应力方向垂直,微观断口中存在大量的解理断裂及少量浅韧窝,其断裂形式为脆性为主韧性为辅的混合型断裂。

3 结束语

(1) 搅拌头形状对接头性能有一定的影响。对于6mm厚的7A60铝合金板材,采用直径12mm内凹型轴肩及三切面搅拌针形式的搅拌头进行焊接时焊缝成形美观,没有缺陷,性能优于其他搅拌头。

(2) 搅拌头的转速与焊接速度的比值影响着焊接线能量。对于本文所针对的研究目标,当比值在1.5~2时焊接接头成型好,抗拉强度均在430MPa以上。

(3) 对7A60铝合金搅拌摩擦焊接头的显微硬度进行了分析,焊缝在焊接过程中发生了较大程度的软化,由于热影响区部分再结晶和过时效组织,使其硬度下降。

(4) 微观断口中存在大量的解理断口以及少量的浅韧窝,其断裂形式为脆性为主,韧性为辅的混合型断裂。

参考文献

- [1] Dumont D, DeSchamps A, Brechet Y. On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 356(1-2): 326.
- [2] Wu Y L, Fores F H, Alvarez A, et al. Microstructure and properties of a new super high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy C912. *Materials and Design*, 1997, 18(4-6): 21.
- [3] Thomas W M, Nicholas J C. Friction stir butt welding. England: No 9125978. 8, 1991.
- [4] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 69-75.
- [5] Krishnan K N. On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 327: 246-251.
- [6] 栾国红, North T H, 郭德伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析. *焊接学报*, 2002, 23(6): 62-66.
- [7] Liu H J, Fujii H, Maedaa M, et al. Tensile properties and fracture location of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy. *Journal of Material Processing Technology*, 2003, 142(5): 692-696.
- [8] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 69-75.

(责编 三丰)

(上接第72页)

表2 襟副翼工作站Petri网作业模型的元素语义

变迁	状态库所	资源库所
t_1 : 装配后腹板	p_{s1} : 襟副翼装配开始	p_{r1} : 骨架夹具
t_2 : 装配翼梁	p_{s2} : 后腹板装配完成	p_{r2} : 总装夹具
t_3 : 铆接托板螺母	p_{s3} : 翼梁装配完成	p_{r3} : 补铆夹具
t_4 : 装配下壁板	p_{s4} : 铆接螺母完成	p_{r4} : 检验夹具
t_5 : 装配上壁板	p_{s5} : 下壁板装配完成	p_{r5} : 前部装配人员
t_6 : 补铆上下壁板	p_{s6} : 上壁板装配完成	p_{r6} : 后部装配人员
t_7 : 安装型材	p_{s7} : 补铆上下壁板完成	
t_8 : 安装前肋	p_{s8} : 安装型材完成	
t_9 : 检查外形	p_{s9} : 安装前肋完成	

系统性能分析和过程改进提供基础,本文提出一种基于AND和Petri网关联映射的DAS建模方法。首先基于DAS的典型特征,采用模块化理念给出了装配作业的分级对象建模框架,并提出作业对象的AND定义和构建步骤。然后建立了装配作业DAS与Petri网结构的关联映射方法,实现了作业模型AND向Petri网的自动转化,为计算机环境下的模型特性验证和参数求解奠定了基础。

参考文献

- [1] Hernandez-Matias J C, Vizan A. An integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006(10): 1016-1027.
- [2] 郭春明, 韩之俊. 基于IDEF0的产品生命周期过程建模. *机械制造*, 2005, 43(494): 29-30.
- [3] 牛东, 宁可. 基于IDEF3的过程建模方法及其支持工具. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(12): 30-34.
- [4] Buhr R J A, Casselman R S. *User Case Maps for Object-Oriented Systems*. Prentice-Hall International, Inc. 1996.
- [5] van der Aalst W M P. *A class of Petri Nets for Modeling and Analysing Business Processes*. Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computing Science, 1995.
- [6] Zhou M C, Venkatesh K. *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems-A Petri Net Approach*. Singapore: World Scientific, 1999.
- [7] Frey G. Assembly line sequencing based on Petri-net-invariants. *Control Engineering Practice*, 2000(8): 63-69.
- [8] Zhang W J, Freiheit T. Dynamic scheduling in flexible assembly system based on timed Petri nets model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005(21): 550-558.

(责编 夏宛)