

6061-T4 铝合金无倾角搅拌摩擦焊接头组织与性能研究

梁 宇 廖铭健
(中南大学高性能复杂制造国家重点实验室)

摘 要 采用了厚度为 5 mm 的 6061-T4 铝合金板,使用无倾角搅拌摩擦焊进行单道平板对接焊,研究了不同焊接参数对接头组织和性能的影响。结果发现,在搅拌头的焊接速度达到 300 mm/min 时,随着转速提升,热输入不断增加,晶粒的尺寸变大。焊接温度是影响焊核区晶粒变化的主导因素,焊缝抗拉强度先上升后下降,并在转速为 1 200 r/min 时,焊缝的抗拉强度达到最大值 200.58 MPa,为母材的 93%;当转速提高至 800 r/min 后,试样断口均出现在焊缝前进侧热影响区。

关键词 6061-T4 铝合金;组织性能;无倾角搅拌摩擦焊
中图分类号 TG453.9;TG113.25 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joint of 6061-T4 Aluminum Alloy

Liang Yu, Liao Mingjian

(State Key Laboratory of High Performance Complex System, South China University)

Abstract: 6061-T4 aluminum alloy plate with a thickness of 5 mm was adopted, and single pass butt welding of flat plates was carried out by friction stir welding without inclination angle. The effects of different welding parameters on microstructure and properties of joints were investigated. The results indicate that when the welding speed of stirring head reaches 300 mm/min, the heat input is increased, and the grain size becomes larger with the increase of rotating speed. The grain transformation in the nugget zone is dominated by welding temperature. The tensile strength of weld is increased firstly and then decreased, which achieves the maximum value of 200.58 MPa at the rotating speed of 1 200 r/min, reaching 93% of the base metal. When the rotating speed is increased to 800 r/min, fractures of specimens occurs in the heat affected zone at the front side of the weld.

Key Words: 6061-T4 Aluminium Alloy, Microstructure and Properties, Friction Welding without Inclination Angle

收稿日期:2022-11-17;**修改稿收到日期:**2022-12-01
第一作者简介:梁宇,男,1997 年出生,硕士研究生,长沙(410083),E-mail:793554863@qq.com
引用格式:梁宇,廖铭健. 6061-T4 铝合金无倾角搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 256-1 260.
LIANG Y, LIAO M J. Microstructure and properties of friction stir welded joint of 6061-T4 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 256-1 260.

[10] 王庆娟,孙亚玲,双翼翔,等.新型 β 钛合金的时效机制和相变动力学研究[J].稀有金属,2019,43(10):1 103-1 108.

[11] LI T, KEN T D, SHA G, et al. New insights into the phase transformations to isothermal omega and omega-assisted alpha in near beta-Ti alloys[J]. Acta Materialia, 2016, 106: 353-366.

[12] DONG R F, LI J S, KOU H C, et al. Precipitation behavior of α phase during aging treatment in a β -quenched Ti-7333[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 275-280.

[13] DEMA KOV S L, KARABANALOV M S, OLENEVA O A, et al. Transformation of metastable beta-solid solution in alloy VTI-4[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2015, 56(9/10): 489-494.

[14] BALACHANDRAN S, KASHIWAR A, CHOUDHURY A, et al. On variant distribution and coarsening behavior of the α phase in a metastable beta titanium alloy[J]. Acta Materialia, 2016, 106: 374-387.

[15] 王文婷,李沛,寇文娟,等.时效温度对 Ti1023 和 Ti5553 合金微观组织与析出硬化的影响规律[J].稀有金属材料与工程,2020,49(5):1 707-1 714.

[16] 张英明,韩明臣,倪沛彤,等.热处理对 TB3 钛合金棒材组织和性能的影响[J].钛工业进展,2010,27(6):30-33.

[17] KENT D, WANG G, WANG W, et al. Influence of ageing temperature and heating rate on the properties and microstructure of β Ti alloy, Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al[J]. Materials Science & Engineering, 2012, A531(1): 98-106.

[18] LI T, AHMED M, SHA G, et al. The influence of partitioning on the growth of intragranular α in near- β Ti alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 643: 212-222.

[19] 张浩宇,黎小辉,林立,等.时效温度对一种新型 β 钛合金组织演变及力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2019,48(12):3 812-3 818.

[20] SONG Y, CUI X F, YU Y, et al. TTT curve of Ti-6Cr-5V-5Mo-4Al-1Nb alloy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 907(1): 12 046-12 049.

[21] 李成林,于洋,惠松晓,等. Ti-6554 钛合金的 TTT 曲线测定[J].中国有色金属学报,2010,20(S1):560-564.

(编辑:刘晨辉)

搅拌摩擦焊是一种固相焊接新技术,具有绿色、优质等特点,在轨道交通、航天制造和船舶制造等领域应用广泛^[1]。搅拌摩擦焊搅拌头的轴中线与工件接触面法线会呈现一定角度,且这一角度一般为 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。这有利于改善焊接时材料的流动方式,增加热量流动,减小残余应力^[2]。随着搅拌摩擦焊技术的发展,机器人搅拌摩擦焊在工程上有着重要的应用。但是,因为有倾角的存在,在机器人焊接曲线和曲面的焊缝时,搅拌头的倾角要实时调节,这会使焊接工序更加繁琐,焊接设备更加复杂,提升了焊接的难度^[2]。采用无倾角的焊接方法对机器人搅拌摩擦焊的发展具有重要的作用^[3]。

6061 铝合金主要含 Mg 和 Si 两种合金元素,并以 Mg_2Si 为主要的强化相,同时其具有低密度、耐蚀性、易成形等特性^[4]。本研究采用 5 mm 厚 6061-T4 铝合金板进行无倾角的搅拌摩擦焊焊接,研究不同焊接参数对接头性能和组织的影响,以期为机器人搅拌摩擦焊的应用提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验材料为 6061-T4 铝合金板,其化学成分见表 1,板材尺寸为 150 mm×60 mm×5 mm。

表 1 6061 铝合金主要的化学成分

w_B								
Ti	Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Al
0.15	0.15	0.50	0.70	0.15	0.80	0.21	0.25	余量

1.2 试验工艺

根据课题组以往的经验设计了无倾角的搅拌头,其中搅拌头的轴肩向内呈现一部分的倾角,为外高内低的形式,同时搅拌头也设计增加了阿基米德螺旋线型花纹,并且在搅拌针上面加上左旋螺纹。搅拌头尺寸示意图见图 1。

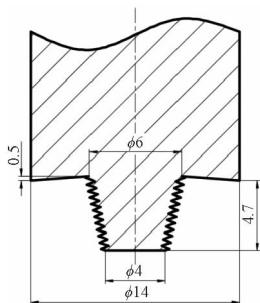


图 1 搅拌头尺寸示意图

将两块铝板打磨去除毛刺以及氧化膜,置于工装上,使其对接整齐严密。使用 FSW1609K 型搅拌摩擦焊机上 进行焊接试验。进给速度固定为 300 mm/min, 主轴转速分别为 600、800、1 000、1 200、1 400 和 1 600 r/min 具体的焊接参数见表 2。

表 2 6061 FSW 工艺试验参数

Tab.2 FSW process parameters for 6061 alloy

试验编号	主轴转速/(r · min ⁻¹)	进给速度/(mm · min ⁻¹)
1	600	300
2	800	300
3	1 000	300
4	1 200	300
5	1 400	300
6	1 600	300

使用 HV-5 型维氏硬度计测量试样硬度,载荷为 4.9 N,间隔为 1 mm,保压时间为 15 s;使用 Tescan Mira3 LMU 扫描电镜对焊缝粗大相及断面形貌进行观察;拉伸试验使用 CMT5105 万能电子拉伸试验机进行,拉伸试样的尺寸见图 2,拉伸速率为 1 mm/min;使用 VHX5000 超景深显微镜对焊缝的整体宏观形貌进行观察拍摄。

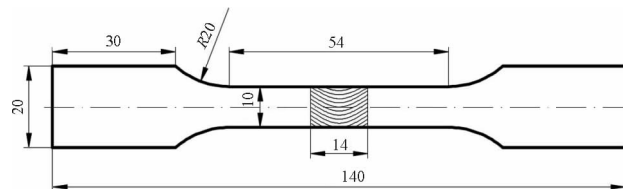


图 2 拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 不同焊接工艺下的表面形貌

图3为不同工艺下焊缝的表面形貌。可以看出,当焊接转速较低时(600、800 r/min),搅拌摩擦焊焊缝表面成形粗糙,局部位置出现了金属颗粒、毛刺与飞边,这是由于焊接过程中搅拌头产热较少,金属的塑性流动不足,造成轴肩与金属板材之间发生粘连,导致金属颗粒和毛刺产生。当主轴转速提高到1 000 r/min后,焊缝的表面成形明显改善,但是仍然存在细小的毛刺。继续将焊接转速增大至1 200 r/min及以上时,发现焊缝表面成形光滑,纹理清晰均匀且无毛刺产生。

不同焊接工艺下焊缝截面的宏观形貌见图4。可以看出,当焊接转速较低(600、800 r/min)时,焊缝底部存在隧道型缺陷;随着转速增加,当转速达到1 000 r/min及以上时,焊缝隧道型缺陷消除。在FSW焊接过程中,焊接热输入量对焊缝成形起着至关重要的

作用。而在搅拌摩擦焊过程中的能量和温度可由焊接

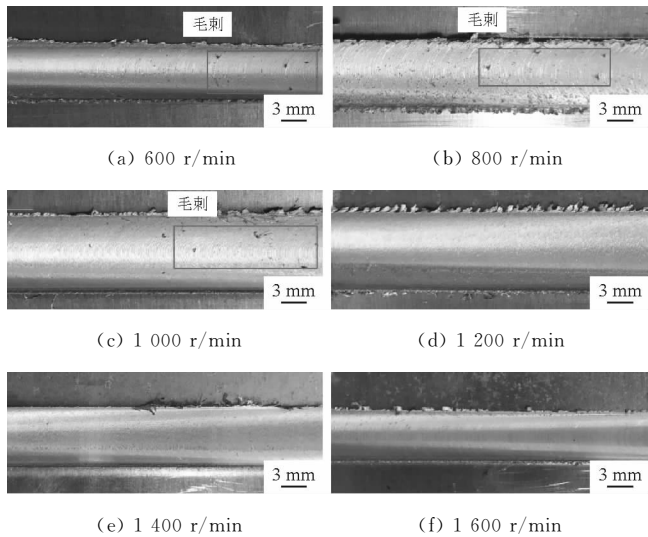


图3 焊缝的表面成形图像

Fig.3 Forming images of weld joint surface

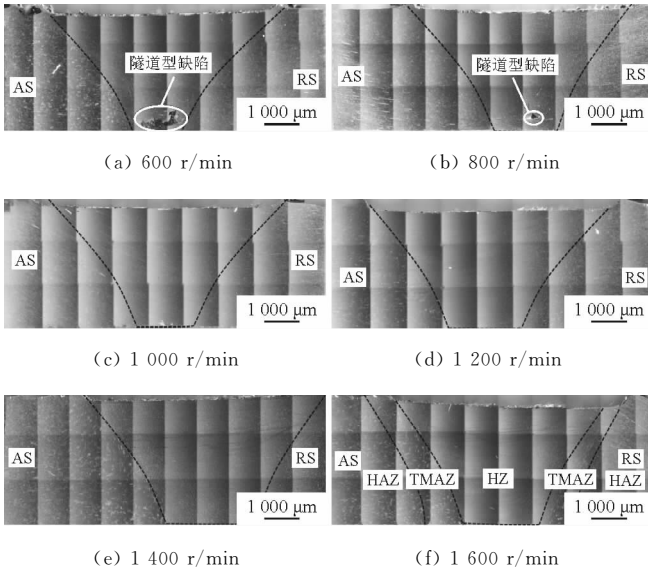


图4 焊缝横截面宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of cross section of weld joint
工艺参数表述,具体如下^[5]:

$$Q=K\mu F\omega \tag{1}$$

$$\frac{T}{T_m}=K\left(\frac{\omega^2}{10^4 v}\right)^\alpha \tag{2}$$

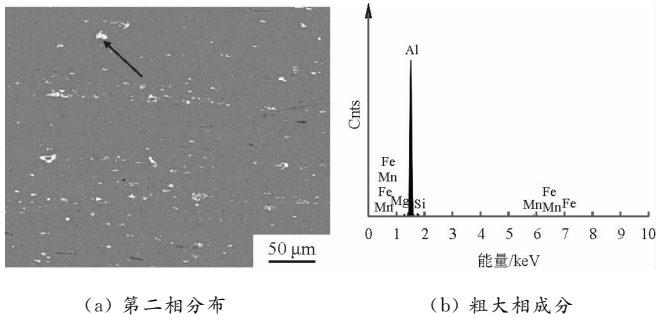
式中, Q 为能量; K 为常数,一般而言与搅拌头的形状与大小相关; μ 为摩擦因数; F 为顶锻力; ω 为主轴转速; T 为焊接温度; T_m 为焊接材料的熔点; v 为焊速; α 为常数。

由式(1)可知,主轴转速与焊接热输入之间呈线性正向关联。由式(2)可知,在焊接过程中,主轴转速的增加与焊速的下降均会使焊接温度上升。ZHU Y 等^[6]建立了搅拌摩擦焊接过程中材料的塑性流动模型,发现

搅拌针底部附近材料的塑性流动速率最低。主轴转速低时,焊接热输入不足,材料塑性流动不足,焊缝上部的金属没有及时填充到下部,导致下部产生隧道型缺陷。缺陷的出现不仅会影响焊接接头的力学性能,并且使其断裂方式发生改变。同时,由图 4 可以看出,所有工艺参数的焊缝均有着明显的“U”形焊核边界;研究表明^[7],在 FSW 焊接过程中,接头由于受到来自搅拌头的剧烈搅拌作用,会形成母材、焊核区、热机影响区和热影响区等 4 个不同的区域。

2.2 不同焊接工艺下的第二相

6061 作为一种析出强化型铝合金,焊缝的力学性能与其内部的第二相粒子紧密相关。6061 铝合金母材的第二相分布见图 5。可以看出,母材内部存在较多形状不规则且大小不一的第二相粒子,其均沿着轧制方向排列。通过 EDS 能谱分析表明,粗大相中含有 Al、Mg、Si、Mn 和 Fe 等元素。



(a) 第二相分布 (b) 粗大相成分
图5 6061-T4 铝合金母材第二相分析
Fig.5 Second phase analysis of 6061-T4 aluminum alloy
base metal

不同焊接工艺下焊核区内部的第二相形貌和 EDS 分析见图 6。与母材相比,焊核区内的第二相粒子较为稀少且分布随机,这是由于焊接过程中搅拌头的高速旋转破碎第二相并改变其分布。通过能谱分析可知,其主要成分为铝铁化合物(如 FeAl_3 、 Fe_2Al_5 等)。

在试验中暂未发现焊核区内含有 Al、Mg、Si 等元素的粗大第二相。分析认为,可能是由于 FSW 焊接过程中焊核区内部受到剧烈的热力学耦合作用, β 相 (Mg_2Si) 被破碎并溶解至基体内。BANIK A 等^[8]、TARASOV S Y 等^[9]认为焊核区内部铝铁化合物 (FeAl_3 、 Fe_2Al_5 等)可能是在焊接过程中搅拌头与板材之间发生界面扩散现象的产物。这些易碎的化合物通过搅拌头引入,同时又会受搅拌头的搅拌作用而破碎。另外,值得注意的是,随着转速增加,焊核区内部的粗大第二相粒子逐渐减少(见图 6),说明温度与应变速率是影响这些粗大相粒子存在的主要因素。

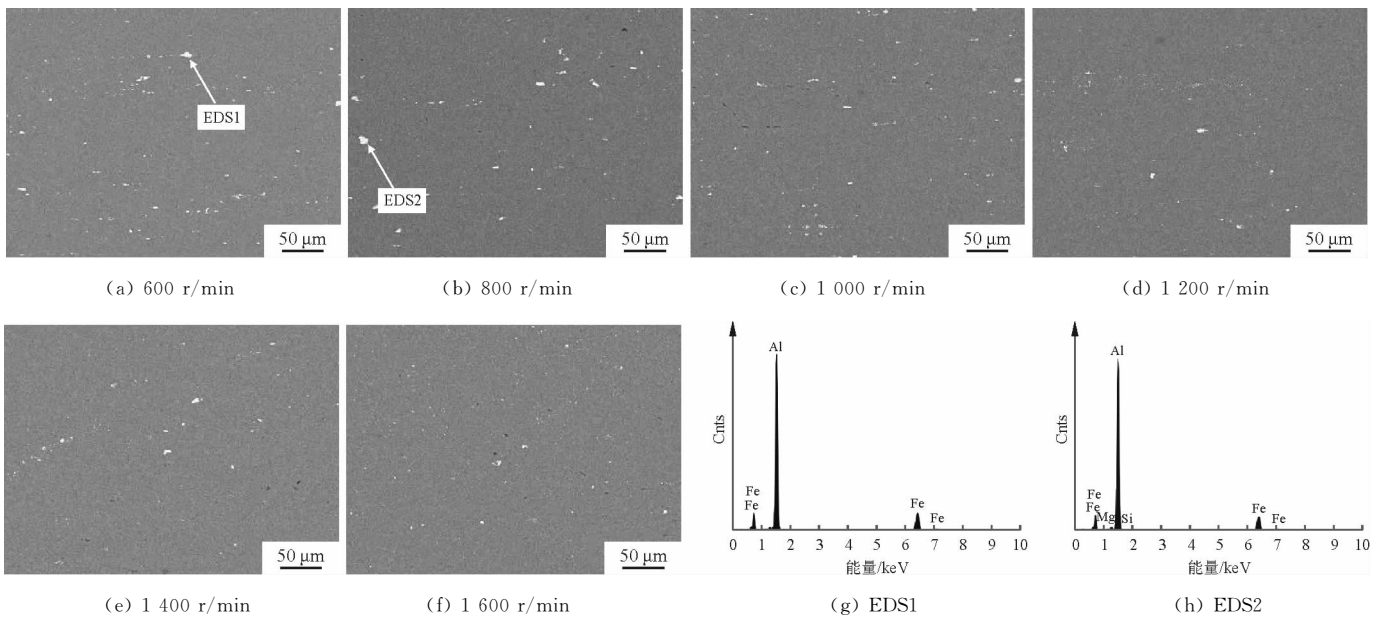


图 6 焊核区第二相分布及 EDS 分析

Fig.6 Distribution and EDS analysis of the second phase in nugget region

2.3 不同焊接工艺下的硬度分布

焊缝的显微硬度和强度之间存在相应的关系。一般来说,焊缝中硬度较低的位置容易发生断裂。图 7 为不同焊接工艺下焊缝显微硬度分布。

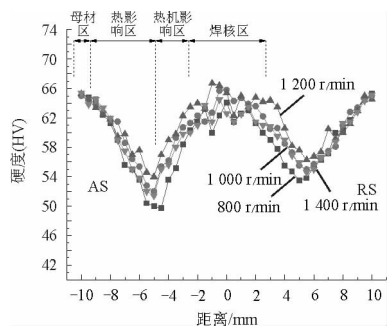


图 7 焊缝显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution of weld joint

可以发现,与焊缝中心的距离不同,硬度也不同:母材区>焊核区>热机影响区>热影响区。母材的平均硬度(HV)最高,达到 72。同时可以观察焊核区由等轴晶细粒组成,因为受到细晶强化的影响,所以焊核区的平均硬度会高于热影响区和热机影响区的平均硬度。热机影响区在焊接过程中受到的动态再结晶程度不如焊核区,其内部晶粒被拉长,使其硬度降低。同时热影响区在搅拌摩擦焊焊接热循环的作用下,内部微观组织发生动态回复,晶粒粗化,导致其平均硬度最低。值得注意的是,焊缝的显微硬度值并没有因为焊接转速的改变而明显变化,当转速为 1 200 r/min 时焊缝的显微硬度总体趋势值稍高,这与焊缝内部的成形质量和微观组织有关。另外,硬度曲线的两端大致呈对称分布,这与焊接过程焊缝前进侧与后退侧温度场分布有关。

2.4 不同焊接工艺下的接头力学性能

不同焊接工艺下接头的力学性能见图 8。可以看出,不同焊接转速下焊缝的抗拉强度、屈服强度和伸长率都随着转速的增加而呈现先增加较快,而后逐渐趋于平稳的态势。当转速为 800 r/min 时,拉伸试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为母材的 80.9%、76.8% 和 57.2%。随着转速的增加,焊缝内部的缺陷消失,更多粗大的第二相粒子被破碎回溶,焊缝的力学性能逐渐上升。当转速为 1 200 r/min 时,焊缝的力学性能表现最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率达到母材的 93%、91% 和 76%。当焊接转速度继续增加,焊缝的力学性能逐渐下降,由于转速增加,对焊缝的热输入增加,晶粒长大,焊缝逐渐软化,从而导致焊缝力学性能下降。

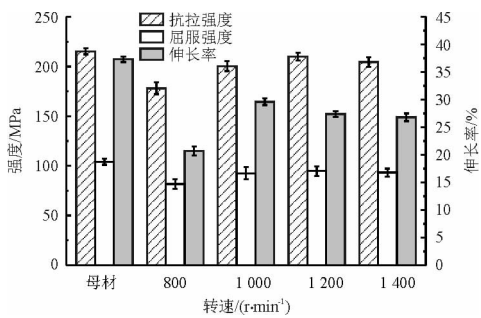


图 8 各个工艺参数焊缝的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of welding joint under different parameters

2.5 断口扫描

图 9 为不同焊接转速下(600、1 200、1 600 r/min)焊缝的断口形貌。可以看出,当转速为 600 r/min 时,

焊缝内部存在的隧道型缺陷。由 Griffith 理论可知,在拉伸的过程中该处出现应力集中现象,易出现裂纹,导致焊缝力学性能下降。且从图 9a 中可以看出,断口内部的韧窝小而浅且数量较少,说明该转速条件下焊缝的塑韧性较差。当转速分别为 1 200 r/min 和 1 600 r/min 时,可以观察到该处的断口形貌中存在着许多大而深的韧窝,并且存在明显的撕裂棱,说明较高转速下

焊缝的断裂方式为韧性断裂,塑性较好。在拉伸过程中,粗大的第二相颗粒在切应力作用下会形成微孔,不断扩展并与其他微孔聚集形成裂纹^[10]。一般而言,韧窝越深、越大也就是表明该焊缝塑性越好,伸长率越高。当焊接转速为 600 r/min 时,断口呈现为塑性-脆性混合断裂,其塑性较差;当焊接转速为 1 200 r/min 和 1 600 r/min 时断口均呈现为韧性断裂,表现出较高的塑性。

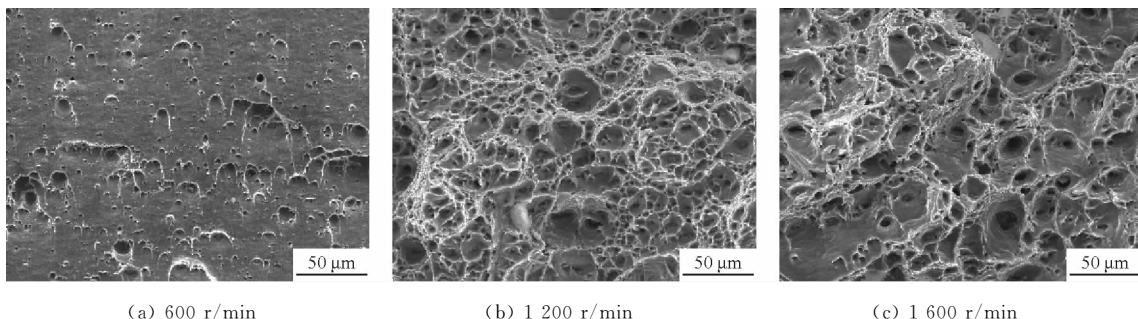


图 9 不同转速下焊缝断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of welding joint at different rotating speeds

3 结 论

(1)焊接转速较低时(600、800 r/min),6061 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的表面成形较差,有较多毛刺存在,焊缝内部出现隧道型缺陷;搅拌头转速提高,搅拌摩擦焊的焊接热输入量相应增加,材料的塑性流动加强,焊缝的表面成形光滑,内部的隧道型缺陷消失。

(2)随着焊接转速不断增加,焊核区内的晶粒尺寸不断增大,粗晶第二相粒子减少,第二相粒子变细,导致力学性能随着转速的增加呈现先增加后稳定下降的趋势,当转速为 1 200 r/min 时焊缝的力学性能达到最佳。

(3)焊接转速的增加改变了焊缝的断裂位置。当转速为 600 r/min 时断裂位置在焊核区;当转速提高至 800 r/min 及以上时,断裂位置在靠近焊缝返回侧的母材处,而显微硬度曲线同样显示该处的硬度值最低。

(4)焊接速度的提高改变了焊缝的断裂方式。当转速为 600 r/min 时,拉伸断裂的方式为脆-韧性混合断裂;当转速提高到 1 200 r/min 及以上时,拉伸断裂方式为典型的韧性断裂。

参 考 文 献

[1] 沈洋,王快社,吕爽,等.7075 铝合金搅拌摩擦焊研究[J].特种铸造及有色合金,2007, 27(2): 145-147.
[2] 吕志军,张昊,郭跃,等. 6061 铝合金无倾角搅拌摩擦焊工艺及性能[J].精密成形工程, 2018, 10(4): 108-113.
[3] 赵慧慧,李颖,封小松,等. 2219 铝合金无倾角式搅拌摩擦焊接头组织性能[J].航空制造技术, 2015(15): 94-97, 100.
[4] 栾国红,郭德伦,张田仓,等.搅拌摩擦焊在飞机制造工业中的应用

[J].航空制造技术, 2002(11): 20-23.

[5] ZOERAM A S, ANIJ DAN S H M, JAFARIAN H R, et al. Welding parameters analysis and microstructural evolution of dissimilar joints in Al/Bronze processed by friction stir welding and their effect on engineering tensile behavior[J]. Materials ence & Engineering, 2017, A687: 288-297.
[6] ZHU Y, CHEN G, CHEN Q, et al. Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction[J]. Materials & Design, 2016, 108: 400-410.
[7] 王春桂,赵运强,董春林等.6063-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能分析[J].焊接学报, 2018, 39(10): 108-112, 133.
[8] BANIK A, ROY B S, BARMA J D, et al. An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties; Friction stir welding of AA 6061-T6 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 395-404.
[9] TARASOV S Y, RUBTSOV V E, KOLUBAEV E A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding(FSW)tools used on an aluminum alloy[J]. Wear, 2014, 318(1-2): 130-134.
[10] 陈振中,马小革,肖尧,等. 航空用铝合金搅拌摩擦焊拉伸特性[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013(5): 49-52.

(编辑:栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com