

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.09

6061-T6 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊角接头 焊接工艺研究

张 亚¹, 赵云峰¹, 戴忠晨¹, 孙 博², 胡 霞², 施海霞²

1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031
2. 航天工程装备(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215104

摘 要: 开展了 6061-T6 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊(SSFSW)角接头焊接工艺试验, 研究了不同焊接速度(200、300、400 mm/min)和旋转速度(2 500、2 750 和 3 000 r/min)对角接头宏观成形、微观组织和力学性能的影响规律。结果表明, SSFSW 技术能够有效焊接 6061-T6 铝合金角接头, 并获得成形良好的角接头, 无孔洞型等缺陷, 焊接工艺稳定。SSFSW 角接头的搅拌区平均晶粒尺寸、热机影响区宽度、热影响区平均晶粒尺寸随焊接热输入的升高而增大, 随焊接热输入的降低而减小。焊接接头显微硬度分布呈 W 形, 热影响区和重叠的搅拌区硬度值较低, 为接头的软化区。随着热输入的增加, 重叠的搅拌区和热影响区的软化现象更加明显。

关键词: 静止轴肩搅拌摩擦焊; 6061-T6 铝合金; 工艺参数优化; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG453+9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0064-09

Research on the Welding Process of Corner Joint of 6061-T6 Aluminum Alloy with Stationary Shoulder Friction Stir Welding

ZHANG Ya¹, ZHAO Yunfeng¹, DAI Zhongchen¹, SUN Bo², HU Xia², SHI Haixia²

1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China
2. Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215104, China

Abstract: In this study, the welding process of stationary shoulder friction stir welding 6061-T6 aluminum alloy corner joint was carried out, and the influence of different welding speeds (200, 300, 400 mm/min) and rotation speeds (2 500, 2 750 and 3 000 r/min) on the macroscopic forming, microstructure and mechanical properties of the corner joint was investigated. The results demonstrate that, under the specified welding parameters, well-formed corner joints can be obtained without the presence of holes or other defects, and that the welding process is stable. The average grain size of the stirring zone, width of the heat affected zone, and average grain size of the heat affected zone of SSFSW corner joints increase with the increase of welding heat input, and decrease with the decrease of welding heat input. The microhardness distribution of the welded joints exhibits a W-shaped pattern, with the hardness value of the heat-affected zone and overlapping of stir zone being relatively low, indicating a softening zone within the joint. As the heat input increases, the softening phenomenon in the aforementioned overlapping zone and heat-affected zone becomes more pronounced.

Keywords: stationary shoulder friction stir welding; 6061-T6 aluminum alloy; optimization of process parameters; microstructure; mechanical properties

引用格式: 张亚, 赵云峰, 戴忠晨, 等. 6061-T6 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊角接头焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 64-72.

Citation: ZHANG Ya, ZHAO Yunfeng, DAI Zhongchen, et al. Research on the Welding Process of Corner Joint of 6061-T6 Aluminum Alloy with Stationary Shoulder Friction Stir Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 64-72.

收稿日期: 2024-10-20 修回日期: 2025-02-21

作者简介: 张 亚(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事轨道交通车体制造。E-mail: crs Zhangya@163.com。

0 引言

搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding, FSW)已在航空航天、造船、汽车等制造业中占据重要地位^[1-4]。但是,传统FSW由于轴肩位置较高,导致焊缝沿厚度方向温度梯度大、焊接应力也随之增大,同时传统FSW工艺在焊接时会不可避免地产生焊接飞边,这些飞边在焊接完成后需通过额外的机械加工手段去除,这无疑增加了生产工序和劳动强度,进而降低了生产效率^[5-7]。静止轴肩搅拌摩擦焊(Stationary Shoulder Friction Stir Welding, SSFSW)是在FSW基础上发展而来的,其特点是在FSW过程中轴肩固定不旋转,仅提供顶锻力,所有产热均来源于轴针的旋转与工件的摩擦,使周围金属塑性变形较小且不参与产热,极大降低了焊缝沿厚度方向的温度梯度,提高了工艺稳定性,并显著改善了焊缝整体的微观组织与力学性能均匀性。此外,这种焊接方式在焊接完成后,焊缝表面光滑且相较于母材几乎没有减薄现象,在一定程度上降低了后续工序的复杂度^[9-12]。

基于FSW的特殊结构,传统SSFSW技术最初仅适用于板材或简单形状的型材的对接,但随着焊接技术发展需求的不断增长,对于复杂形状工件的焊接研究逐渐成为该领域的重点方向。为突破SSFSW在复杂形状焊接方面的局限,诸多学者展开了相关研究。例如,郝云飞等^[13]创新设计了适用于角焊缝的静止轴肩,攻克了角焊缝的FSW技术难题,并且在焊接工装夹具的简化方面取得了一定成果。吉华等^[14]针对6061-T6铝合金T型接头的FSW工艺进行了深入研究,结果表明在优化的参数下能够获得外观成形良好、接头性能优异的T型焊接接头,同时,小幅度增加焊接速度在一定程度上有利于提高接头的抗拉强度。曾申波等^[15-16]对6082-T6铝合金T型接头SSFSW的缺陷进行了研究,结果表明T型接头SSFSW角接时,虽可获得表面成形良好且无明显缺陷的焊缝,但在焊缝区内部搅拌针中上部易出现孔洞缺陷,且这些孔洞主要集中在焊缝的前进侧。

综上所述,尽管SSFSW在不断发展,但针对6061-T6铝合金T型角焊缝的研究成果相对较少。鉴于此,本研究以6061-T6铝合金为对象,开展无飞边T型角焊缝SSFSW研究。主要研究了不同搅拌头转速及焊接速度对接头组织和性能的影响,为SSFSW工业化应用提供试验数据支持。

1 试验材料与方法

选取6061-T6铝合金轧制板材进行SSFSW角接焊接试验,底板规格为340 mm×140 mm×10 mm,立板规格为300 mm×75 mm×6 mm,板材化学成分如表1所示。

表1 6061-T6铝合金的化学成分(质量分数,%)

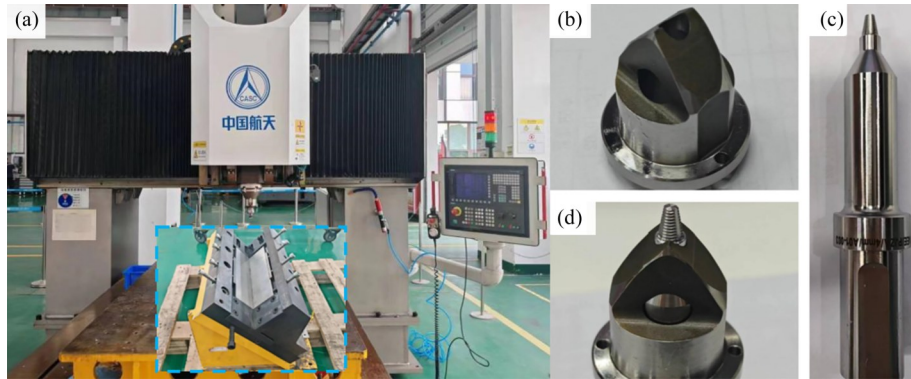
Table 1 Chemical composition of 6005A-T6 aluminum alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.64	0.46	0.22	0.089	0.98	0.04	0.12	0.03	余量

试验设备采用龙门式搅拌摩擦焊设备,型号为HT-JM8×22/2,其外观如图1a所示;焊接选用带三斜面的右旋螺纹锥形搅拌头,搅拌头针长为7.5 mm,根部直径6.5 mm,端部直径3.5 mm。搅拌针和静止轴肩材质均为H13钢,其中静止轴肩为仿形设计,与试板接触的两个端面夹角为92°,静止轴肩与搅拌针的具体形状分别如图1b、图1c所示,静止轴肩与搅拌工具配合的实物图如图1d所示。焊前采用机械打磨的方法去除试板表面氧化膜,之后使用酒精清洗表面油污。将两块铝合金试板按T字形放置在静止轴肩角焊缝专用焊接夹具上,并用压板刚性固定,装配位置为船型位置平焊,如图1a所示。为了便于试板反面的焊接,在完成第一道角焊缝焊接后,打磨焊缝表面以去除焊缝首尾局部突起。之后翻转试板进行反面装配,进而完成第二道角焊缝的焊接,第一道与第二道焊缝的相对焊接方向相反。

由于FSW的热输入与搅拌头转速及焊接速度密切相关,本研究设计了搅拌头转速-焊接速度正交试验,研究了SSFSW不同焊接工艺参数对焊接接头外观成形、微观组织及力学性能的影响。具体焊接工艺参数如表2所示。

焊接结束后,垂直于焊接方向切取金相试样,如图2a所示。对金相试样进行逐级粗磨、精磨和抛光,



(a)龙门式搅拌摩擦焊机;(b)静止轴肩;(c)搅拌针;(d)静止轴肩与搅拌工具配合实物

图1 龙门式搅拌摩擦焊机和静止轴肩搅拌头

Fig. 1 Gantry-style friction stir welding machine and stationary shoulder stir tool

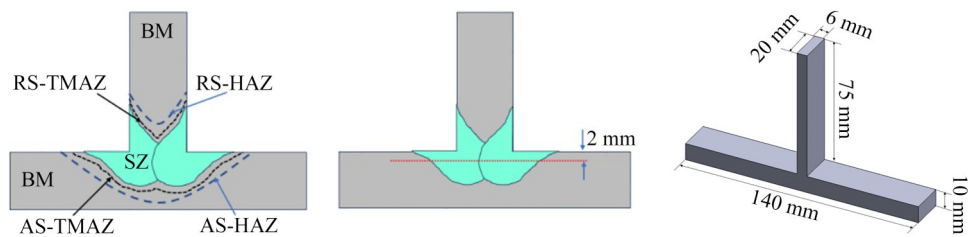
表2 搅拌摩擦焊焊接参数

Table 2 Friction stir welding parameters

序号	旋转速度 $/(r \cdot \min^{-1})$	焊接速度 $/(mm \cdot \min^{-1})$	下压量 $/mm$	接头 编号
1	3 000	200	0.1	3000-200
2	2 750	200	0.1	2750-200
3	2 500	200	0.1	2500-200
4	3 000	300	0.1	3000-300
5	3 000	400	0.1	3000-400

然后使用Keller试剂($\text{HF}:\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:3:5:190$)腐蚀制备好的金相试样60 s,采用OLYMPUS-DSX-WZ体式显微镜对焊接接头的宏观形貌进行观察。为观察焊接接头各区晶粒组织特征,对制备好的金相试样进行阳极覆膜,阳极覆膜溶液为 H_2SO_4 :

$\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=38:43:19$ 的混合溶液,电压和电流分别设置为20 V和0.2~0.3 A,覆膜时间为80 s。采用OLYMPUS-BX 53M金相显微镜在偏振光模式下观察经过阳极覆膜的金相样品。采用Wilson-Wolpert 401MVD数显显微维氏硬度计对SSFSW角接接头显微硬度进行测试,测试位置如图2b所示,横向硬度线距离底板表面2 mm,每两个硬度点之间的间隔为1 mm,共计测试40个点,竖向硬度线居中,每两个硬度点之间的间隔为1 mm,共计测试20个点。加载载荷为100 g,保载时间为10 s。采用电子万能试验机在室温条件下进行焊接接头的拉伸性能测试,拉伸速率为2.0 mm/min,拉伸试样尺寸如图2c所示。



(a)横截面形貌;(b)硬度测试位置;(c)拉伸试样尺寸

图2 焊接接头横截面和硬度测试位置示意及拉伸试样尺寸

Fig. 2 Schematic diagram of cross-sectional and hardness testing locations for welded joints and dimensions of tensile specimens

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头的宏观形貌

不同焊接工艺条件下SSFSW角接接头横截面宏观形貌如图3所示,SSFSW角接接头可划分为母材区(BM)、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)

和搅拌区(SZ)。SSFSW角接接头两道焊缝之间存在约1 400 μm 的重叠区,两道焊缝的前进侧均位于底板一侧,后退侧则位于立板一侧。在表2的焊接参数条件下,获得的焊接接头均成形良好,无孔洞型等缺陷,表明在本研究中采用的高热输入和低输入焊接参数均可保证焊接接头的良好成形,焊接工

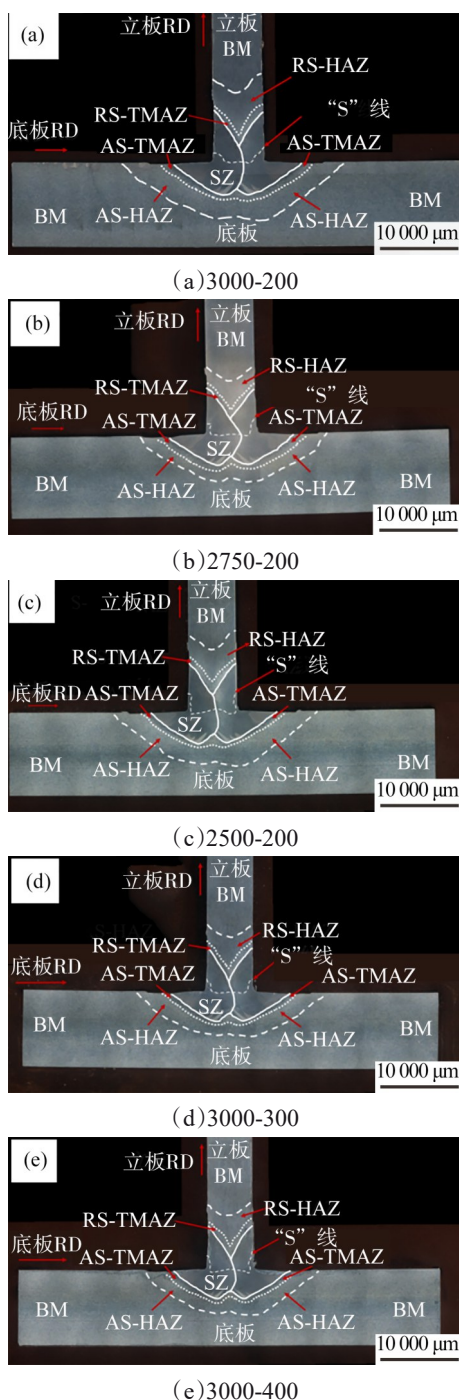


图3 不同焊接参数下SSFSW角接头横截面宏观形貌
Fig. 3 A cross-sectional macroscopic morphology of SSFSW corner joints under varying welding parameters

艺稳定。由于静止轴肩仅与板面接触滑动,不参与摩擦产热,相比于FSW接头,焊缝表面无轴肩影响区存在,仅出现轻微的母材减薄现象^[17]。

在固定转速(3 000 r/min)不变的条件下,采用不同焊接速度(200、300、400 mm/min)进行SSFSW,

获得的角接头横截面宏观形貌如图3a、3d、3e所示。在立板的重叠搅拌区内观察到了明显的“S”线特征,主要分布在立板与底板的交界面。当旋转速度固定时,随着焊接速度的增加,“S”线与立板表面之间的区域变窄,“S”线沿立板和底板原始界面位置的分布长度增加。

在固定焊接速度(200 mm/min)不变的条件下,采用不同转速(3 000、2 750、2 500 r/min)进行SSFSW,获得的角接头宏观形貌如图3a、3b、3c所示。当焊接速度固定时,随着旋转速度的增加,“S”线与立板表面之间的区域变宽,“S”线沿立板和底板原始界面位置的分布长度缩短。

2.2 焊接接头的微观组织特征

不同焊速(200、300、400 mm/min)条件下SSFSW角接头横截面各区的显微组织如图4所示。当旋转速度(3 000 r/min)固定时,随着焊接速度的增加,SSFSW角接头搅拌区的平均晶粒尺寸从8.4 μm减小至6.1 μm,如图4a、4d、4g所示;热机影响区宽度从85 μm缩小到32 μm,如图4b、4e、4h所示;热影响区平均晶粒尺寸从160 μm减小到80 μm,如图4c、4f和4i所示。这表明当搅拌头旋转速度固定不变时,焊接速度增加导致焊接热输入降低,SSFSW角接头的搅拌区平均晶粒尺寸、热机影响区宽度、热影响区平均晶粒尺寸均呈下降趋势。

不同转速(2 500、2 750、3 000 r/min)条件下SSFSW角接头横截面各区的显微组织如图5所示。当焊接速度(200 mm/min)固定时,随着旋转速度的增加,SSFSW角接头搅拌区的平均晶粒尺寸从6.3 μm增大至8.4 μm,如图4a、图5a和5d所示;热机影响区宽度从47 μm增加至85 μm,如图4b、图5b、5e所示;热影响区的平均晶粒尺寸从90 μm增大到160 μm,如图4c、图5c、5f所示。这表明当焊接速度固定不变时,随着旋转速度增加,焊接热输入升高,SSFSW角接头的搅拌区平均晶粒尺寸、热机影响区宽度、热影响区平均晶粒尺寸均呈上升趋势。

SSFSW角接头的搅拌区组织较其他区组织细小,为细小等轴晶,这是因为在焊接过程中该区域直接受到搅拌针剧烈的机械搅拌作用,且晶粒受到较高温度的热循环,组织发生动态再结晶而形成细小的等轴晶。热机影响区主要为拉伸变形的晶

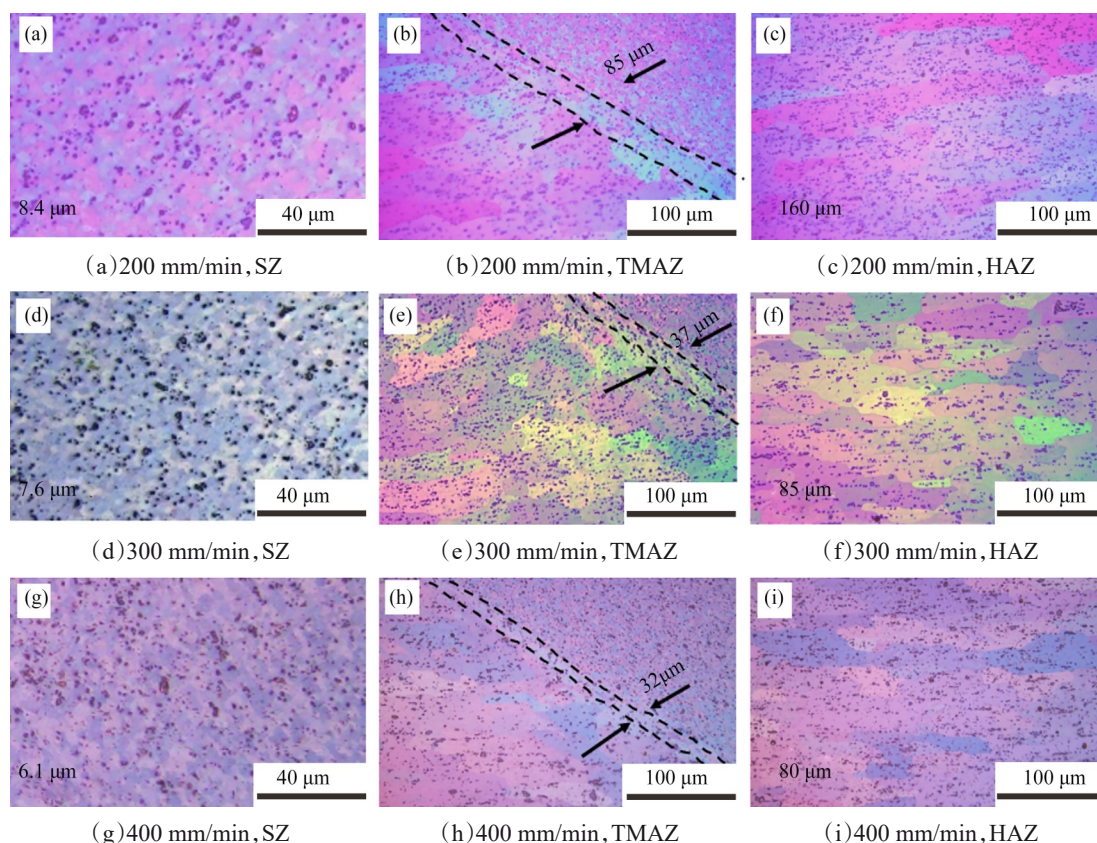


图4 不同焊速条件下SSFSW角接头各区微观组织

Fig. 4 Microstructure of each zone of SSFSW corner joint under different welding speeds

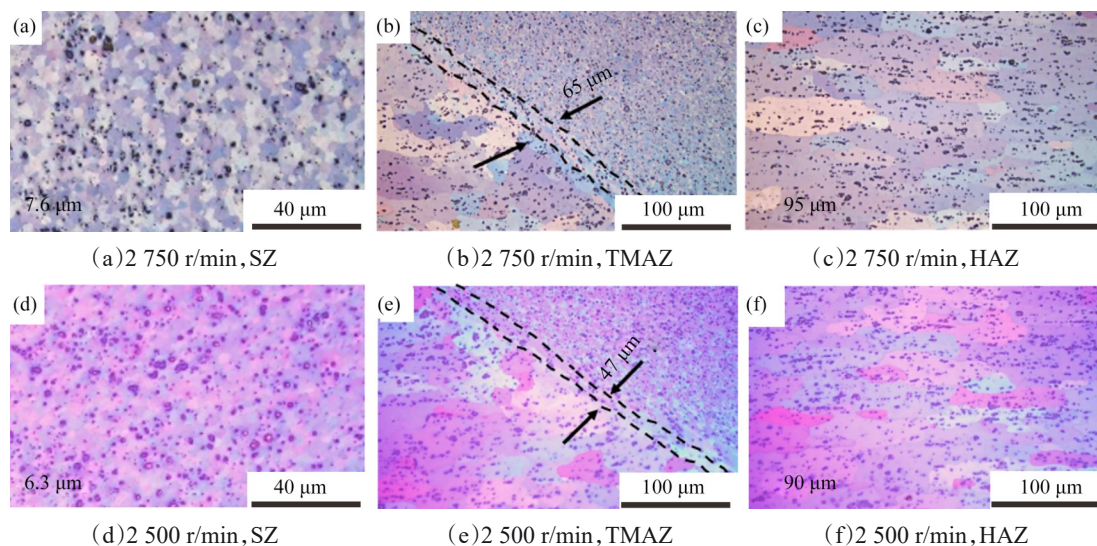


图5 不同转速条件下SSFSW角接头各区微观组织

Fig. 5 Microstructure of each zone of SSFSW corner joint under different rotational speeds

粒,这是因为热机影响区位于热影响区与搅拌区之间,焊接过程中热机影响区受到的焊接热循环温度低于搅拌区,晶粒的再结晶程度低于搅拌区,且受到剪切力的作用。前进侧热机影响区晶粒有明显

的分界线,靠近搅拌区一侧近似为等轴晶,靠近热影响区一侧为细小拉长的变形晶粒。后退侧无明显分界线。前进侧热机影响区中晶粒细化区的产生与金属塑性流动有关,焊接过程中,搅拌针侧面

切线方向的剪切力与母材金属流动相反,导致前进侧的塑性变形程度较大。后退侧母材金属流动方向与前进侧相反,其变形程度较小,后退侧未出现晶粒细化区,主要为变形晶粒。热影响区组织最为粗大,这是因为焊接过程中该区域受到焊接热循环的影响,但未受到机械力的作用,导致热影响区内晶粒发生长大^[18]。

2.3 焊接接头的显微硬度

不同焊接工艺参数条件下 6061-T6 铝合金 SSFSW 角接头显微硬度分布如图 6 所示。由图 6a、图 6b 可知,SSFSW 角接头的横向沿底板的显微硬度呈“W”形分布,母材区硬度最高,从母材区向

焊缝中心靠近,随着与搅拌区距离的减小,接头硬度逐渐降低,直至靠近紧邻热机影响区的热影响区硬度达到一个极小值,随后在热机影响区和搅拌区硬度开始升高,但最终在搅拌区重叠位置,硬度急剧下降,出现了焊接接头硬度最低值。由图 6c、图 6d 可知 SSFSW 角接头的纵向沿立板的显微硬度变化规律与横向沿底板的显微硬度变化规律相似。

图 6a 为搅拌头转速为 3 000 r/min 时,不同焊接速度下对 6061-T6 铝合金 SSFSW 角接头搅拌区横向显微硬度分布的影响。搅拌区的硬度随着焊接速度的增加而提高,在焊接速度为 400 mm/min 时搅拌区硬度最高。这与不同焊接速度条件下的热

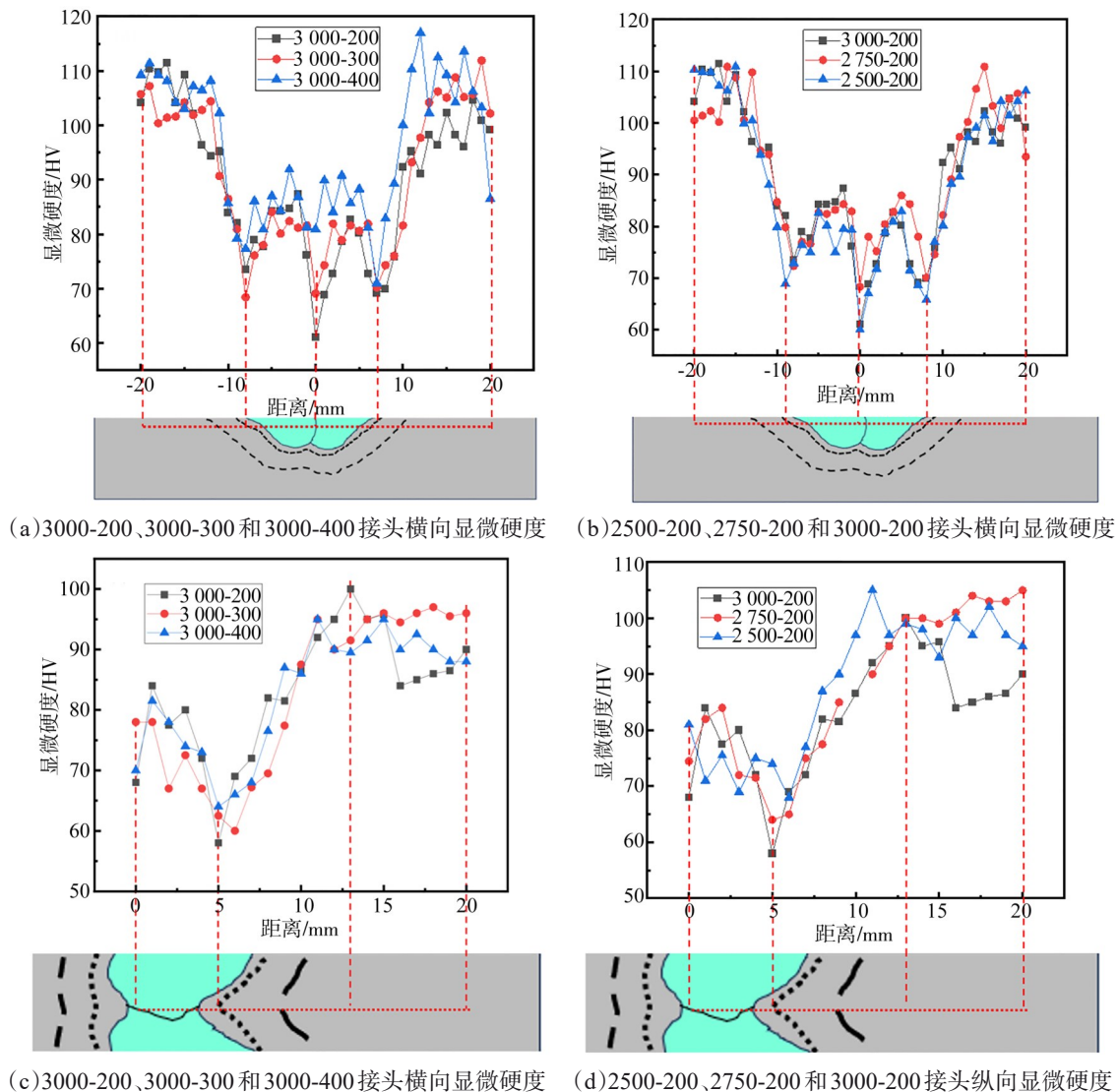


图6 不同焊接参数条件下 SSFSW 角接头显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness distribution of SSFSW fillet joints under different welding parameter conditions

输入有关,低焊接速度导致高热输入,使搅拌区晶粒尺寸增大,硬度降低。

图 6b 为焊接速度为 200 mm/min 时,不同搅拌头转速下对焊接接头横向显微硬度分布的影响。搅拌区的硬度随搅拌头转速的升高呈现先升高后降低的趋势,当搅拌头转速为 2 750 r/min 时,搅拌区硬度最高。这与不同搅拌头转速下的热输入有关,高转速导致高热输入,晶粒尺寸增大,但过高的热输入会导致铝合金中的强化相粒子溶解,从而降低硬度。

图 6c 为搅拌头转速为 3 000 r/min 时,不同焊接速度下的焊接接头纵向显微硬度分布,可观察到接头 RS-TMAZ 的硬度值最低。当搅拌头转速固定为 3 000 r/min 时,焊接接头 RS-TMAZ 的硬度随着焊接速度的增加而增加,在焊接速度为 200 mm/min 的接头 RS-TMAZ 硬度最低。

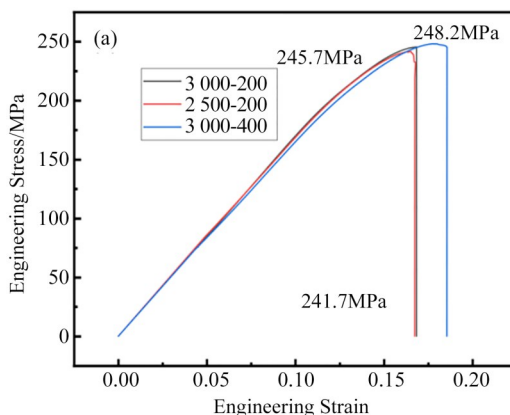
图 6d 为焊接速度为 200 mm/min 时,不同搅拌头转速下的焊接接头纵向显微硬度分布,可以看出接头 RS-TMAZ 的硬度值最低。当焊接速度固定为 200 mm/min 时,焊接接头 RS-TMAZ 的硬度随着搅拌头转速的增加而降低,搅拌头转速为 3000 r/min 的接头 RS-TMAZ 硬度最低。

结合相关研究,搅拌区硬度低于母材的原因在于 SSFSW 过程中搅拌区受搅拌针的剧烈搅拌作用和高温影响,导致该区域内的组织发生动态再结晶,晶粒显著细化。尽管晶粒尺寸得到了细化,但由于 6061 铝合金显微硬度主要受析出相粒子的影响,SSFSW 过程中的高温导致搅拌区内部分析出相粒子粗化和部分发生溶解。在重叠的搅拌区,由于受到两次搅拌和热循环作用,析出相粒子的溶解更为显著,因此硬度值急剧下降。热机影响区同时受到热与机械力的双重作用,但相比于搅拌区,受到的热循环影响温度更低,导致 TMAZ 内的强化相粒子主要发生粗化,使得 TMAZ 的显微硬度较搅拌区的有所降低。HAZ 主要受到焊接热循环的影响,导致 β' 相进一步粗化,最终导致 HAZ 硬度降低^[19]。

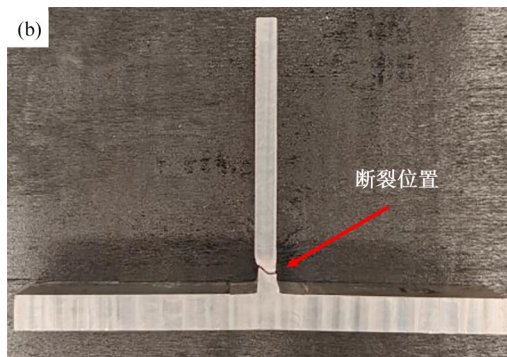
2.4 焊接接头的拉伸性能

不同焊接工艺参数条件下 6061-T6 铝合金 SSFSW 角接头拉伸性能如图 7 所示。3000-200、2500-200 和 3000-400 焊接接头抗拉强度分别为

245.7 MPa、241.7 MPa 和 248.2 MPa,SSFSW 角接头拉伸试样均断裂于接头 RS-TMAZ 的硬度最低区。不同焊接工艺参数下接头拉伸性能差别不大,这是由于 SSFSW 过程焊接热输入较小,不同焊接参数下接头 TMAZ 的微观组织差异不大。SSFSW 角接头抗拉强度均超过 240 MPa,达到母材强度的 77% 以上。



(a) 2500-200、3000-200 和 3000-400 接头拉伸曲线



(b) 拉伸试样断裂后的照片

图 7 不同焊接参数条件下 SSFSW 角接头拉伸力学性能
Fig. 7 Tensile mechanical properties of SSFSW corner joints under different welding parameter conditions

3 结论

本研究对 6061-T6 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊 (SSFSW) 角接头的焊接工艺进行了探索,并重点分析焊接速度和旋转速度对接头组织和性能的影响。主要结论如下:

(1) 在所研究的焊接参数范围内,所有焊接接头均成形良好,无孔洞等缺陷,表明所选参数能够保证接头的稳定焊接。增加焊接速度会导致“S”线

增长,重叠区软化程度减弱;而增加旋转速度则会使“S”线缩短,重叠区软化程度增强。

(2)搅拌区组织为细小等轴晶,热机影响区为拉伸变形晶粒,热影响区晶粒粗大。随着焊接速度的增加,搅拌区平均晶粒尺寸减小,热机影响区宽度缩小,热影响区晶粒长大程度减弱。随着旋转速度的增加,搅拌区平均晶粒尺寸增大,热机影响区宽度增大,热影响区晶粒粗化程度增强。

(3)SSFSW角接头显微硬度呈“W”形分布,母材区硬度最高,搅拌区硬度低于母材,热影响区硬度最低。增加焊接速度会导致搅拌区硬度增加;增加旋转速度会导致搅拌区硬度先升高后降低。

(4)搅拌区晶粒细化和析出相粒子溶解是导致其硬度低于母材的主要原因。重叠区受到两次搅拌和热循环作用,导致析出相粒子溶解,硬度值急剧下降。热机影响区受到热循环和剪切力作用,晶粒粗化程度低于搅拌区,硬度有所降低。热影响区仅受到热循环作用,晶粒粗化程度最高,硬度最低。

(5)不同焊接工艺参数下SSFSW角接头抗拉强度均超过240 MPa,达到母材强度的77%以上,拉伸试样均断裂于接头RS-TMAZ的硬度最低区。

参考文献:

- [1] Khan M A, Romoli L, Fiaschi M, et al. Experimental investigation on laser beam welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap joint configuration [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(10):1340-1353.
- [2] El-Danaf E, El-Rayes M, Soliman M. Friction stir processing: An effective technique to refine grain structure and enhance ductility [J]. *Materials & Design*, 2010, 3(3):1231-1236.
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing [J]. *Materials Science and Engineering R*, 2010, 50(1):1-78.
- [4] 林森,党健,韩晓辉,等. 基于焊接速度的6082铝合金FSW接头组织与力学性能调控研究 [J]. *电焊机*, 2024, 54(9):30-38.
LIN S, DANG J, HAN X H, et al. Research on the Microstructure and Mechanical Properties of 6082 Aluminum Alloy FSW Joints based on Welding Speed [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(9):30-38.
- [5] 马宗义. 搅拌摩擦焊接与加工技术研究进展 [J]. *科学观察*, 2009, 4(05):53-54.
- [6] Ma Z Y. Research progress on friction stir welding and processing technology [J]. *Science Focus*, 2009, 4(05):53-54.
- [7] MA Z Y. Preface to the Special Issue: Friction stir welding and processing [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 33(1):1-2.
- [8] XU W F, LIU J H, LUAN G H, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints in 2219-T6 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(9):3460-3467.
- [9] Jonathan Martin. 固定轴肩搅拌摩擦焊技术的发展 [J]. *电焊机*, 2014, 44(4):31-38.
Jonathan Martin. Stationary shoulder friction stir welding developments [J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(4):31-38.
- [10] Sun T Z, Roy M J, Strong D, et al. Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242:92-100.
- [11] Ji H, Deng Y, Xu H, et al. The mechanism of rotational and non-rotational shoulder affecting the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy friction stir welded joint [J]. *Materials & Design*, 2020, 192:108729.
- [12] Martin J, Stanhope C, Gascoyne S. Novel techniques for corner joints using friction stir welding [M]. John Wiley and Sons, 2011, 101:1-13.
- [13] 贺巍亮,王伟,李华芳,等. 旋转速度对静止轴肩搅拌摩擦焊温度场和应力场的影响 [J]. *电焊机*, 2024, 54(1):86-94.
HE W L, WANG W, LI H F, et al. Effect of Rotational Velocity on Temperature and Residual Stress Field by Stationary Shoulder Friction Stir Welding [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(1):86-94.
- [14] 郝云飞,马建波,毕煌圣,等. 铝合金T形接头静止轴肩搅拌摩擦焊接及组织性能分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7):48-54.
HAO Y F, MA J B, BI H S, et al. Friction Stir Welding and Microstructure Performance Analysis of Static Shoulder of Aluminum Alloy T-shaped Joint [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7):48-54.
- [15] 吉华,徐萌,封小松,等. 静止轴肩搅拌摩擦焊T型接头组织及力学行为 [J]. *电焊机*, 2013, 43(9):37-40.

- JI H, XU M, FENG X S, et al. Research on microstructure and mechanical behavior of T-joint welded by stationary shoulder friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(9): 37-40.
- [15] 曾申波, 陈高强, 张弓, 等. T形接头角接静轴肩搅拌摩擦焊三维流动特征[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 1-5.
- ZENG S B, CHEN G Q, ZHANG G, et al. Three dimensional flow characteristics of T-joint corner joint static shoulder friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 1-5.
- [16] 曾申波, 陈高强, 刘瞿, 等. T型接头角接静轴肩搅拌摩擦焊缺陷研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 207-213.
- ZENG S B, CHEN G Q, LIU Q, et al. Study on Defects of T-joints by Corner Stationary Shoulder Friction Stir Welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 207-213.
- [17] 秦丰, 张春波, 周军, 等. 5A06 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 56-60.
- QIN F, ZHANG C B, ZHOU J, et al. Microstructure and Properties of 5A06 Aluminum Alloy Static Shoulder Friction Stir Welding T-Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 56-60.
- [18] 李志强. 不同焊速下 6061 铝合金 FSW 接头组织及性能[J]. 焊接技术, 2022, 51(4): 25-28.
- LI Z Q. Microstructure and Properties of FSW Joints in 6061 Aluminum Alloy at Different Welding Speeds[J]. Welding Technology, 2022, 51(4): 25-28.
- [19] 李文晓, 范美华, 徐晓霞, 等. 不同接头形式 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊界面迁移特点及性能差异[J]. 轻合金加工技术, 2022, 50(03): 53-59.
- LI W X, FAN M H, XU X X, et al. Interface migration characteristics and property differences of 6061-T6 aluminum alloy friction stir weld with different joint forms[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2022, 50(03): 53-59.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 55 页

- Plant Pipelines[J]. Corrosion and Protection, 2006, 27(2): 21-25.
- [8] 陈海燕, 朱有兰. B10 铜镍合金在 NaCl 溶液中腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(8): 404-407.
- CHEN H Y, ZHU Y L. Corrosion behavior of B10 copper-nickel alloy in NaCl solution[J]. Corrosion and Protection, 2006, 27(8): 404-407.
- [9] Drach A, Tsukrov I, Decew J, et al. Field studies of corrosion behavior of copper alloys in natural seawater[J]. Corrosion Science, 2013, 76: 453-464.
- [10] 李晓孟, 张彦敏, 国秀花, 等. 流动海水中铜镍合金管材的冲刷腐蚀行为[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 10-14.
- LI X M, ZHANG Y M, GUO X H, et al. Erosion and Corrosion Behavior of Copper-Nickel Alloy Pipes in Flowing Seawater[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(3): 10-14.
- [11] 张敏丽. 船舶海水管道系腐蚀的原因及其防护[J]. 腐蚀研究, 2010, 24(6): 5-9.
- ZHANG M L. Causes and Protection of Corrosion in Marine Water Piping Systems[J]. Corrosion Research, 2010, 24(6): 5-9.
- [12] 林乐耘, 刘少峰, 朱小龙. 海水腐蚀导致铜镍合金的沿晶析出[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1997, 17(1): 1-6.
- LIN L Y, LIU S F, ZHU X L. Intergranular precipitation in copper-nickel alloy caused by seawater corrosion[J]. Journal of Corrosion and Protection in China, 1997, 17(1): 1-6.
- [13] 李进, 许兆义, 周卫青, 等. 循环冷却水系统中铜镍合金点腐蚀影响因素分析[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(4): 13-18.
- LI J, XU Z Y, ZHOU W Q, et al. Analysis of factors affecting pitting corrosion of copper-nickel alloy in circulating cooling water systems[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(4): 13-18.
- [14] 杜娟. TUP 紫铜及 B10 铜镍合金流动海水冲刷腐蚀行为研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2007.
- DU J. Study on the Corrosion Behavior of TUP Copper and B10 Copper-Nickel Alloy under Flowing Seawater[D]. Shandong: Ocean University of China, 2007.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>