

6061-T6 铝合金的静止轴肩搅拌摩擦焊工艺及组织性能

申 浩, 杨新岐, 李冬晓, 崔 雷

(天津大学 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 采用自主研发的静止轴肩搅拌摩擦焊工具系统成功获得了 6061-T6 铝合金的对接接头。对该接头的焊缝成形、显微组织、硬度分布以及拉伸性能分别进行了试验研究。结果表明, SSFSW 工艺所得 6061-T6 铝合金接头具有非常美观的焊缝成形, 与常规的 FSW 工艺相比, 几乎没有出现焊缝减薄的现象; 焊缝组织分区也有明显的不同, TMAZ 非常窄, 只有几百微米; 接头的硬度呈“W”形分布; 在转速 1 000 r/min, 焊速为 200 mm/min 时, 接头的抗拉强度和断后伸长率达到最大, 分别为母材的 71.5% 和 44.6%; 拉伸试样均断裂在热影响区, 它是接头发生断裂的最薄弱区域。

关键词: 铝合金; 静止轴肩搅拌摩擦焊; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG 452+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)05-0119-05

0 序 言

静止轴肩搅拌摩擦焊(SSFSW)是一种新型的搅拌摩擦焊(FSW)技术, 在焊接过程中, 只有内部的搅拌针转动, 而轴肩不转动只沿着焊接方向摩擦移动^[1,2], 因而沿板厚度方向摩擦热比较均匀, 在钛合金、不同厚度对接及角焊缝的搅拌摩擦焊(FSW)接头方面具有明显优势。

国外学者对 SSFSW 进行了研究, 但公开报道较少。Davies 等人^[3]使用这项技术成功地焊接了钛合金, 并研究了 Ti-6Al-4V 的微观组织。Ahmed 等人^[4]通过试验证明了通过使用静止轴肩, 6082 铝合金焊缝顶部的轴肩影响区尺寸减小, 而这对于减小热影响区的尺寸是很重要的。Widener 等人^[5]利用固定的轴肩辅助实现了高转速下 6061-T6 铝合金的焊接。结果表明, 在高转速 FSW 过程中, 固定轴肩的使用可以显著地改善表面成形和减少焊缝缺陷。Martin 等人^[1]和 Buffa 等人^[6]还将 SSFSW 应用到 T 形接头角焊缝的焊接中, 得到了无缺陷焊缝, 这极大地

拓宽了 SSFSW 的应用范围。在国内, 对于 SSFSW 的研究甚少。李金全等人^[7-8]设计了外部不旋转的轴肩辅助 FSW 焊接了 2219-T6 铝合金, 发现了组织和硬度的分布是不对称的, 并报导了搅拌头旋转速度对微观组织和拉伸性能的影响。试验结果表明, 旋转速度在 600 ~ 900 r/min 范围内, 可以得到无缺陷的接头; 在 800 r/min 时, 接头的拉伸强度最大, 可达到母材的 69%。

文中采用自主研发 SSFSW 工具系统, 进行了 6061-T6 铝合金的对接焊接工艺试验, 对 SSFSW 所得接头的焊接速度与焊缝成形、显微组织、硬度分布以及拉伸性能的相互影响作用进行了分析讨论。

1 试验方法

试验材料为 5 mm 厚的 6061-T6 铝合金, 化学成分及力学性能见表 1。对接试验用的焊板尺寸为 200 mm×90 mm。焊板使用夹具固定, 并在接缝处下面垫上垫板, 采用 FSW-RL31-010 型搅拌摩擦焊机进行对

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy

材料	质量分数(%)						抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al		
AA6061-T6	0.4~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	其余	331	11.67

接试验,焊接方向沿着轧制方向,自主研发了与该摩擦焊机主轴头配合的固定式静止轴肩搅拌工具系统. 采用 H13 钢加工的带螺纹的圆锥形搅拌针,并配合上不旋转的轴肩,搅拌工具如图 1 所示. 搅拌针根部直径为 8 mm,顶部直径为 5 mm,长度为 4.8 mm;静止轴肩的内径为 8 mm,外径为 16 mm;焊接时搅拌头倾斜角度为 2.5° . 在进行的 6061-T6 铝合金静止轴肩 FSW 对接工艺试验时,旋转速度固定为 1 000 rpm,焊接速度分别为 50, 100, 150, 200 mm/min.

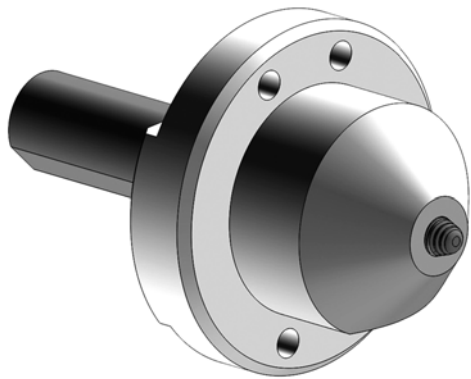


图 1 搅拌工具示意图

Fig. 1 Schematic view of tool system for SSFSW

焊后沿垂直于焊缝的方向切取试样,用于金相分析、硬度测试和拉伸试验. 金相试样经过磨光、抛光之后,使用配制的混合酸水溶液进行腐蚀,并在 OLYMPUS-GX51 光学显微镜下观察焊缝成形和接头不同区域的显微组织. 在抛光好的横截面的中间厚度处,使用 432SVD 型维氏硬度计进行维氏硬度分布的测量. 加载载荷 300 g,停留时间 10 s. 拉伸试样按照国家标准 GB/T 228.1-2010 的规定,在 CSS-44100 电子万能试验机下进行,加载速度为 2 mm/min. 拉伸试验后,用光学显微镜对拉伸试样的断裂位置进行分析,并用 Hitachi-s4800 型场发射扫描电镜(SEM)观察断口特征.

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形与组织

在所选择的焊接工艺参数下,应用静止轴肩 SSFSW 工具系统焊接后焊缝成形美观无宏观缺陷,在焊接过程中几乎没有产生在常规 FSW 过程中经常出现的飞边缺陷,焊缝表面光滑不存在旋转波纹. 由于不产生飞边焊接过程中几乎无材料损失,因此不需要搅拌工具压入母材,焊缝区几乎无减薄现象,典型焊缝外观形貌如图 2 所示.

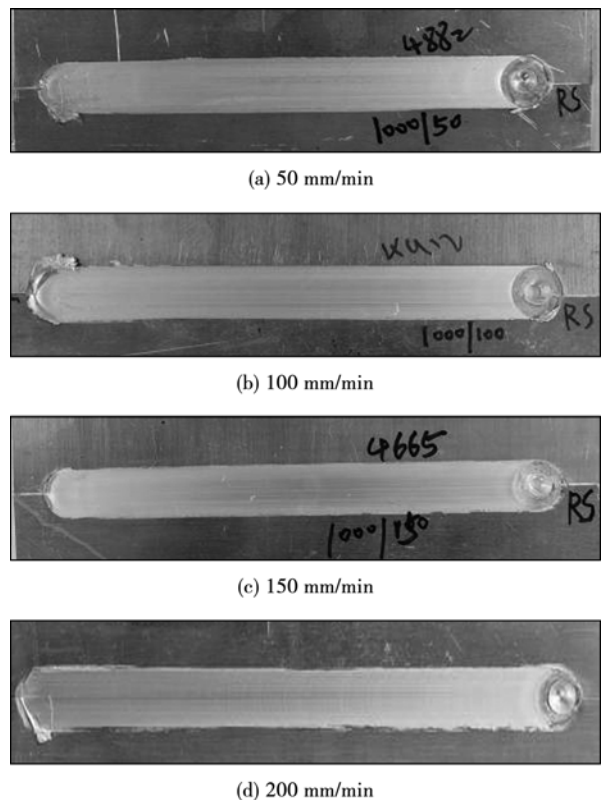


图 2 不同焊接速度 SSFSW 接头的表面形貌

Fig. 2 Welding surfaces of SSFSW joints

图 3 表示在不同焊速下焊缝横截面的宏观金相照片. 通过观察发现,在所选择的焊接参数下,均得到了无内部缺陷及致密焊缝宏观组织结构,焊缝厚度几乎与原板厚度相等,再次证实不存在常规 FSW 中经常产生的焊缝局部厚度减薄的现象. 在给定旋转速度下,随焊接速度的增加,焊核宏观截面宽度稍有减少,形状基本类似,均呈现上宽下窄的“碗状”,焊核中未观察到“洋葱环”流动特征;与常规 FSW 焊核形状比较有较大差异.

静止轴肩接触面焊核尺寸宽、底部窄表明沿板厚度方向仍存在一定温度差异,这主要是由于底板接触面积大传热快所导致的,随焊接速度增加即摩擦热输入降低,在与底板接触的焊核宽度减小更明显. 但相对于常规 FSW,由于无轴肩的摩擦加热作用,沿板厚度加热均匀化趋势明显增加.

由于试样表面与静止轴肩之间无旋转摩擦热作用,静止轴肩对热输入(主要由搅拌针产生)大小几乎无影响,但静止轴肩在顶锻、挤压和回填由旋转搅拌针挤出的金属而形成焊缝过程中起到关键作用.

图 4a 给出了转速为 1 000 r/min,焊接速度为 100 mm/min 时典型的接头横截面组织形貌. 可以看出,静止轴肩 SSFSW 接头仍可划分为焊核区(WNZ),热力影响区(TMAZ),热影响区(HAZ)和

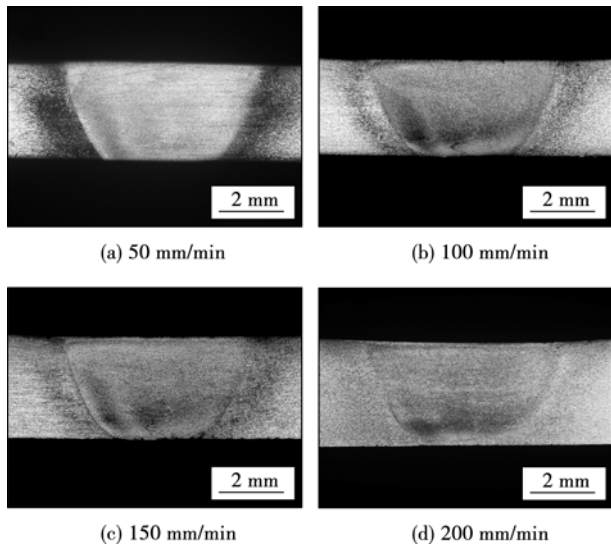


图3 不同焊接速度 SSFSW 焊缝横截面的宏观形貌
Fig. 3 Macroscopic appearances of transverse sections for SSFSW joints

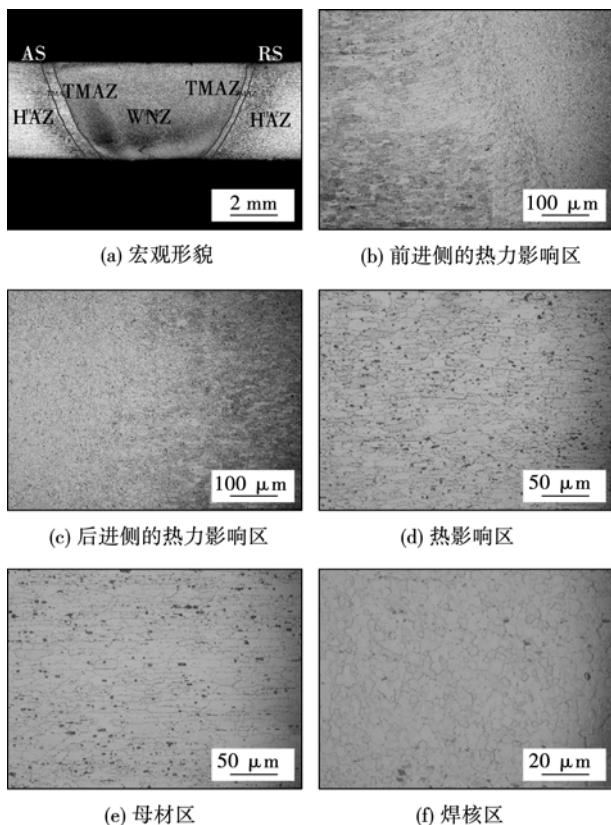


图4 SSFSW 焊缝的微观组织
Fig. 4 Microstructures of SSFSW joints

母材区(BM)四部分构成。但与常规FSW的接头有明显差异,SSFSW接头具有非常窄的TMAZ,前进侧(AS)的TMAZ可观察到流动变形、其宽度近似为 $600\ \mu\text{m}$ 左右(图4b),而后退侧(RS)为几乎无变形趋势的过渡区、其宽度为 $300\ \mu\text{m}$ 左右(图4c)。

图4b-f表示板中间厚度处取自TMAZ,HAZ,BM,WNZ的微观组织形貌。TMAZ是由于周围材料塑性流动造成的剪切应力而形成的,因此晶粒是沿着最大剪切应力方向拉长的,如图4b,c所示。

由于轴肩不转动和无飞边导致材料损失,产生的热量和材料流动主要来自搅拌针的螺纹旋转搅动,垂直方向的材料流动不如常规FSW强烈,而有限的材料流动就造成了晶粒的拉长和很窄的TMAZ。高度拉长的晶粒在前进侧(AS)的TMAZ和WNZ之间形成了明显的分界面,而后退侧(RS)的TMAZ和WNZ的分界面则很模糊。HAZ在焊接过程中只受到焊接热循环的作用,在这个区域没有塑性变形,因此HAZ表现出与母材晶粒类似的结构,而母材组织沿轧制方向呈扁平状分布,如图4d和图4e所示。WNZ是在搅拌针的作用下,在SSFSW过程中经历了高温和强烈的塑性变形。与BM粗大的晶粒相比,WNZ的微观组织发生了动态再结晶,形成了十分细小的等轴状晶粒,如图4f所示。

2.2 接头的硬度分布

在转速 $1\ 000\ \text{rpm}$ 下,四种焊接速度下沿中间厚度处的硬度分布如图5所示。可以看出,硬度呈“W”形分布,最低硬度平均为 $58.4\ \text{HV}$;焊核中心硬度平均为 $78.8\ \text{HV}$,与母材比较降低了 24.2% 。所有接头的最低硬度均出现在软化的热影响区处,这是由热影响区经历高温热循环,组织粗化和强化相长大造成的;随着距离焊缝中心线的距离减少,硬度值在焊核中心处附近达到最大,这与焊核区是由动态再结晶形成的十分细小的晶粒构成有关。另外,随着焊接速度的增加,焊核区的硬度值也基本呈增大的趋势。

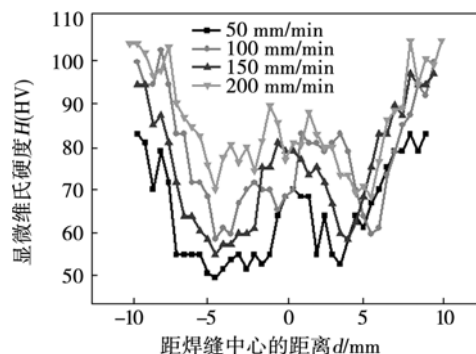


图5 SSFSW 接头的硬度分布

Fig. 5 Hardness distributions of SSFSW joints

2.3 接头的拉伸性能

表2给出了在不同的焊接速度下,接头的拉伸性能情况。可以看出,抗拉强度和延伸率随焊速变

表 2 接头的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of joints

焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
50	201.4	3.6
100	216.4	4.0
150	227.05	4.75
200	236.6	5.2

化的趋势相同. 在转速 1 000 r/min 下,随着焊接速度的增加,接头抗拉强度以及延伸率有较大增加;在焊接速度为 200 mm/min 时,其抗拉强度和断后伸长率都达到最大,分别为 236.6 MPa 和 5.20%,抗

拉强度可达到母材的 71.5%,而延断后伸长率相当于母材的 44.6%. 这表明增加焊接速度降低热输入有助于提高接头拉伸强度及塑性.

图 6 所示为不同的焊接速度下,接头的断裂位置. 可以看出,所有的拉伸试样均断裂在轴肩下方的热影响区,这与图 5 所示的接头硬度分布相符合,断裂发生在最低硬度分布的周围,并伴有一定的颈缩现象. 通过扫描电镜进行观察(图 7),断口微观形貌呈典型的韧窝状形貌,在比较大的韧窝的底部,可以发现第二相粒子或者脱落的痕迹,断裂方式属于典型的微孔聚集型断裂.

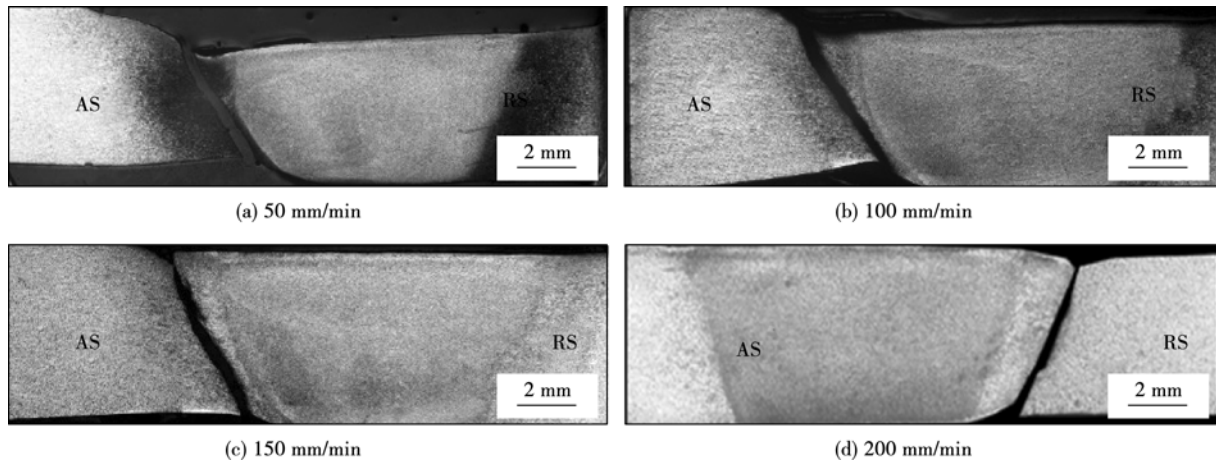


图 6 SSFSW 接头的断裂位置
Fig. 6 Fracture locations of SSFSW joints

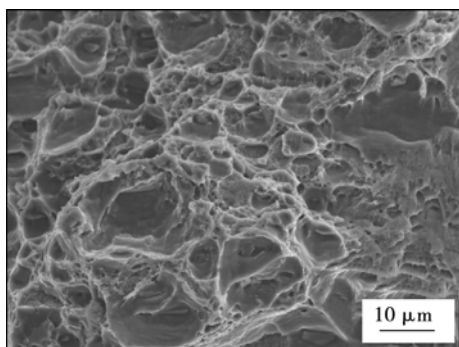


图 7 拉伸试样典型的 SEM 断口形貌
Fig. 7 Typical SEM image of fracture surface for tensile specimens

3 结 论

(1) 采用自主研发的 SSFSW 工具系统,成功获得了 6061-T6 铝合金的对接接头. SSFSW 工艺所得接头的焊缝成形良好,表面形貌美观. 与常规 FSW 工艺相比,基本没有飞边缺陷,且几乎没有出现焊缝

减薄的现象.

(2) SSFSW 接头由焊核区,热力影响区,热影响区和母材四部分构成. 各个区域由于经历的热循环与塑性变形过程的差异,晶粒也呈现出不同的形态. 但与常规 FSW 的接头有明显差异,SSFSW 接头具有非常窄的 TMAZ.

(3) SSFSW 接头的硬度呈“W”形分布,焊核中心硬度平均为 78.8 HV,与母材比较降低了 24.2%. 所有接头的最低硬度均出现在软化的热影响区. 随着焊接速度的增加,焊核区的硬度值也基本呈增大的趋势.

(4) 在转速 1 000 r/min 下,接头的抗拉强度和延伸率都随焊接速度的增加而增大;焊速为 200 mm/min 时,抗拉强度最大可达到 236.6 MPa,接头系数可达到母材的 71.5%. 热影响区是接头发生断裂的最薄弱区域.

参考文献:

[1] Martin J P, Stanhope C, Gascoyne S. Novel techniques for corner

- joints using friction stir welding [C]. Friction Stir welding and Processing VI. The TMS 2011 Annual Meeting and Exhibition. San Diego, California, USA. A John Wiley and sons Inc Publication. 2011: 179-188.
- [2] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展 [J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 108-112.
Liu Huijie, Li Jinquan, Duan Weijun. Progress in the stationary shoulder friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 108-112.
- [3] Davies P S, Wynne B P, Rainforth W M, *et al.* Development of microstructure and crystallographic texture during stationary shoulder friction stir welding of Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(8): 2278-2289.
- [4] Ahmed M M Z, Wynne B P, Rainforth W M, *et al.* Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium [J]. Scripta Materialia, 2011, 64(1): 45-48.
- [5] Widener C A, Talia J E, Tweedy B M, *et al.* High-rotational speed friction stir welding with a fixed shoulder [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Friction Stir Welding, Montreal. 2006.
- [6] Buffa G, Fratini L, Arregi B, *et al.* A new friction stir welding based technique for corner fillet joints: experimental and numerical study [J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 1039-1042.
- [7] Li J Q, Liu H J. Design of tool system for the external nonrotational shoulder assisted friction stir welding and its experimental validations on 2219-T6 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(5-8): 623-634.
- [8] Li J Q, Liu H J. Effects of tool rotation speed on microstructures and mechanical properties of AA2219-T6 welded by the external non-rotational shoulder assisted friction stir welding [J]. Materials Design, 2013, 43: 299-306.

作者简介: 申浩,男,1989年出生,硕士.主要从事搅拌摩擦焊工艺研究. Email: shenhao30@126.com

通讯作者: 杨新岐,男,教授,博士研究生导师. Email: xqyang@tju.edu.cn

书 讯



书号: 978-7-111-53494-5
作者: 中国机械工程学会焊接学会 编
机电工程数字化手册编制组 制作
定价: 349.00元

◇ 方便快捷查询

◇ 曲线对线取值

◇ 自行创建资源

《焊接数字化手册——焊接方法及设备》

《焊接数字化手册——焊接方法及设备》采纳近几年国内外焊接生产技术飞速发展的成果、现行的国内外标准,以数据表、网页、图像、公式和曲线资源的形式,将电弧焊、电阻焊、高能束焊、钎焊、其他焊接方法、焊接过程自动化技术等的各种资料、技术标准数据软件化,内容简明实用,数据准确、使用方便。

本数字化手册是各个工业部门中从事焊接科研、设计和生产的工程技术人员的必备工具,也可供教学人员参考使用。

编辑热线: 010-88379733 购书热线: 010-88379425 传真: 010-68351729 焊接微信公众号: 进入微信搜索“好焊悦读”
传真购书请注明: 姓名、详细地址、邮编、联系电话、传真、E-mail、所购图书书名、书号、数量、是否需要发票及发票抬头