- [7] Lü S X, Huang Y X, Xu Y Q, et al. Investigation on TIG arc welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys with Al based fillers [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 17(7): 519-524.
- [8] Enjyo T, Ikeuchi K, Kanai M, et al. Diffusion welding of aluminum to titanium [J]. Transactions of JWRI, 2013, 6(1): 123-130.
- [9] Kato K, Tokisue H. Dissimilar friction welding of aluminium alloys to other materials [J]. Welding International, 2004, 18(11): 861-867.
- [10] Wu A P, Song Z H, Nakata K, et al. Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminum alloy 6061 [J]. Materials & Design, 2015, 71, 85–92.
- [11] Chang S Y, Taso L C, Lei Y H, et al. Brazing of 6061 aluminum alloy/Ti-6Al-4V using Al-Si-Cu-Ge filler metals [J].

Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 8-14.

- [12] He H, Wu C G, Xie Z H, et al. Effects of alloyed fluxes on spreading behavior and microstructures of aluminum-titanium TIG brazing interface [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2017,6(1): 82–88.
- [13] Kumar G, Prabhu K N. Review of non-reactive and reactive wetting of liquids on surfaces [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2007, 133(2): 61-89.
- [14] Cooke W E, Wright T E, Hirschfield J A. Furnace brazing of aluminum with a non-corrosive flux [J]. SAE Transactions, 1978: 1357-1363.
- 作者简介: 景艳,1972年出生,硕士。主要研究方向为金属材料 组织与性能,已发表论文6篇,申请发明专利3项。

7050-T7451 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头 组织与性能研究

张华¹ 赵常宇¹ 林三宝² 石功奇³

(1.北京石油化工学院 机械工程学院,北京 102617; 2.哈尔滨工业大学 先进焊接与连接技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 3.英国焊接研究所,坎布里奇,英国)

摘要 采用 SSFSW 技术成功实现了 7050-T7451 高强铝合金的焊接。对该接头的外观形貌、显微组织、硬度分 布及力学性能分别进行了试验研究。结果表明,与常规 FSW 相比,SSFSW 的接头成形美观,表面光滑,焊缝无减薄 现象;焊缝组织结构也有明显的不同,热影响区范围明显窄小,前进侧 TMAZ 只有 60 μm;接头硬度呈典型的"W" 形分布,最低硬度出现在靠近焊核的热影响区附近,显微硬度为 128 HV;接头的抗拉强度为 487 MPa,达到了母材 的 91%,力学性能良好。断裂发生在热影响区,为微孔聚集型断裂。

关键词: 静轴肩搅拌摩擦焊 7050 铝合金 显微组织 力学性能 中图分类号: TG453⁺.9

0 前言

7系列高强铝合金例如7050,7475,7075等是目

收稿日期: 2018-05-14

前航空飞行器结构件应用最广泛的铝合金^[1-3]。尽管 采用固相搅拌摩擦焊接技术(Friction Stir Welding, FSW)可以获得较好的接头力学性能^[4-7],但FSW 表 面易出现飞边等缺陷,造成材料减薄,对接头性能造 成影响^[8]。同时,在现代航空航天和大型船舶舰艇焊 接构件中,存在大量角接和T形接头,常规FSW无法 对其进行焊接,大大限制了FSW的应用。该技术在

基金项目:先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金资助项目 (AWJ-16-Z01)

2004 年底至 2005 年初由英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI) 开发, 与传统的 FSW 技术相比, SS-FSW 有更大的优势, 例如, 接头表面成型光洁度能达 到母材水平; 更低的热输入; 焊缝可与母材等厚, 防止 FSW 过程中焊缝减薄导致接头性能降低; 可以应用于 不同的接头形式等^[9-11]。

国外学者对 SSFSW 的公开报道较少。Davies 等 人^[12]使用SSFSW技术实现了钛合金的焊接,并对其组 织结构进行了研究。Ahmed 等人^[13]研究发现,SSFSW 技术能够得到更小的热影响区和轴肩影响区,并且有 效的改善了表面成形、减少了焊接缺陷。同时,SSFSW 技术还被应用于 T 形接头^[14]和角焊缝^[15]的焊接当中, 并取得了很好的焊接效果,这大大拓宽了 SSFSW 的应 用前景。而国内对 SSFSW 的研究极少。姬书得等 人^[16]探究了旋转频率对 SSFSW 的力学性能影响规律, 发现接头的软化程度随旋转频率的增加而增加。何方 舟等人^[17]对 SSFSW 的组织非均质性进行了研究,阐明 了其对力学性能的影响。李金全等人^[18-19]自主设计了 SSFSW 搅拌头,实现了对 2219 铝合金的焊接。张坤等 人^[20]对 6005 铝合金 SSFSW 的力学及疲劳性能进行了 研究,发现热影响区为疲劳性能薄弱区。

文中利用 SSFSW 技术实现了 7050-T7451 高强铝 合金的对接,并对SSFSW接头的外观形貌、显微组织、

硬度分布以及力学性能进行了分析讨论。

1 试验材料与方法

静止轴肩搅拌摩擦焊接技术(Stationary Shoulder Friction Stir Welding: SSFSW) 是一种新型的 FSW 技 术^[21],焊接过程仅仅内部搅拌针旋转,而外部轴肩不转 动,轴肩只沿焊接方向移动,如图 1 所示^[22]。试验材料 为 6 mm 厚的 7050-T7451 铝合金,化学成分见表 1。对 接试验用的焊板尺寸为 500 mm×100 mm。搅拌头尺寸 为:轴肩直径 12 mm,搅拌针直径 8 mm,搅拌针长度为 5 mm。焊接工艺采用焊接速度 200 mm/min,旋转速率 为 500 r/min,搅拌头倾斜角度为2.5°。焊接过程中,轴 向力为 17.5 kN,前进方向压力为 7.7 kN,扭矩达到了 39.1 kN。



表 1 7050-17451 铝合金化学成分 (质量分数,%)

			•••	•.			,			
Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Mn	Ti	Cr	V	Al
6.1	2.2	2.1	0.09	0.06	0.09	0.01	0.04	0.01	0.01	余量

焊后沿垂直于焊缝的方向取试样,用于金相分析、 硬度测试和力学试验。金相试样经过打磨、抛光之后, 使用配制的混合酸水溶液进行腐蚀,利用 Nikon ECLIPSE MA200型光学显微镜观察 SSFSW 接头的显 微组织。在抛光好的横截面的上中下三个厚度处(分 别距离接头上表面 1 mm,3 mm 和 5 mm),使用维氏硬 度计进行硬度测量。加载载荷为 2 000 g,停留时间为 10 s。拉伸试样按照国家标准 GB/T 228.1—2010 的规 定,在电子万能试验机下进行,加载速度为 2 mm/min。 拉伸试验后,对断裂位置进行分析,并用 FEI Quanta250 环境扫描电镜(SEM)观察断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形与组织

在所采用的焊接工艺参数下,得到的 SSFSW 焊缝

成形美观、表面无宏观缺陷。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,焊缝上表 面均匀光滑,有金属光泽,不存在旋转波纹。同时焊接 过程中不需要搅拌头轴肩工具压入母材,所以几乎无 材料损失,焊缝区无减薄现象,焊缝外观形貌如图2所 示。



图 2 SSFSW 接头的表面形貌

6 2018年第9期

图 3 表示 SSFSW 和常规 FSW 焊缝横截面的宏观 金相图片。通过观察发现,SSFSW 接头主要由焊核区 和非常窄的热力影响区和热影响区组成。接头上表面 非常光滑,与母材相比较,在厚度方向上没有任何减 薄。接头的焊核区呈现为对称的"碗状",且在垂直方 向上的宽度相差不大,在焊核区中心位置观察到对称 性良好的洋葱环结构。与常规 FSW 相比, SSFSW 中没 有明显的轴肩影响区, 日热力影响区范围明显狭小。 这主要是由于常规 FSW 过程中热量传递主要由轴肩 旋转摩擦产热,热量从焊接表面向底部传递,造成在厚 度方向上热量分布严重不均匀,焊后接头呈现为上宽 下窄的形貌。而SSFSW过程中轴肩不旋转,无轴肩的



图 3 7050 对接试板截面形貌

摩擦加热作用。产热主要由搅拌针与材料摩擦产生, 热量分布在厚度方向上较为均匀,日产热明显要低于 常规 FSW 过程,最终形成范围很小的热力影响区和热 影响区。

图 4 给出了典型的接头横截面组织形貌。从图 4a 可以看出,SSFSW 接头仍可划分为焊核区(WNZ),热 力影响区(TMAZ),热影响区(HAZ)和母材区(PM)四 部分。母材 AA7050 经历 T7451 回火热处理后,部分晶 粒发生了重结晶,重结晶晶粒包含小角度晶界,尺寸在 1~10 μm。而未发生重结晶的晶粒包含大角度晶界, 沿轧制方向呈扁平状分布,晶粒尺寸在1 µm,如图 4b 所示。与常规 FSW 的接头相比,SSFSW 接头具有非常 窄的 TMAZ, 后退侧(RS) 的 TMAZ 无明显的变形过渡 现象,宽度为300 µm 左右(图 4c)。而前进侧(AS)的 TMAZ 可以观察到明显的流动变形,方向为搅拌针旋转 方向,其宽度仅为 60 μm 左右(图 4e),由于 SSFSW 过 程主要通过搅拌针的旋转搅动来提供热量和组织流 动,所以沿垂直方向的材料流动不如常规 FSW 强烈, 较小的热输入和局部的材料流动就造成了晶粒的拉长 和很窄的 TMAZ。HAZ 在焊接过程中只受到焊接热循 环的作用,没有受到搅拌针的机械作用,所以是没有发 生塑性变形的,因此 HAZ 表现出和母材晶粒类似的结 构。与母材相比,HAZ 的组织稍微有粗化现象。在 SS-FSW过程中,WNZ在搅拌针的作用下,经历了高温和



(d) 焊核区

图 4 SSFSW 焊缝的微观组织

强烈的塑性变形。与母材粗大的晶粒相比,WNZ的微观组织发生了完全动态再结晶,原始晶粒被打碎,形成 了十分细小的等轴状晶粒,如图 4d 所示。

2.2 SSFSW 接头的硬度分布

SSFSW 沿厚度方向上的硬度分布如图 5 所示。 可以看出,硬度呈"W"形分布,母材硬度达到了165 HV: 最低硬度出现在靠近焊核区的 HAZ 区域(图中 圈出位置),硬度值为128 HV,较母材硬度值低37 HV。焊后由于组织非均质性导致 HAZ 硬度变化较 大,可以将 HAZ 分为两个区域:一个为靠近焊核,在 轴肩内侧的热影响区(HAZ I),另一个为靠近母材, 在轴肩外侧的热影响区(HAZ II)。HAZ II 的宽度在6 mm 左右, HAZ I 的宽度只有 2 mm, 目 HAZ II 区域的 显微硬度要明显高于 HAZ I 区域. 硬度最低处通常出 现在 HAZ I 区域,原因是在焊接过程中该区域热输入 较大,组织较为粗大,属于严重软化区域。WNZ的硬 度值达到了145 HV,仅比母材区低20 HV。在前进侧 和后退侧, WNZ 的显微硬度沿厚度方向表现出了不 同的规律:前进侧(AS)的 WNZ 硬度沿厚度方向上无 明显差别; 而在后退侧(RS), WNZ 上部的显微硬度明 显高于 WNZ 下部区域。



图 5 SSFSW 接头的硬度分布

2.3 SSFSW 接头的力学性能

表 2 给出了 SSFSW 焊接接头与母材的拉伸性能对比,可以看出,SSFSW 的抗拉强度和屈服强度为487 MPa 和 377 MPa,分别达到了母材的 91% 和80%,表现出了非常好的力学性能。母材的断后伸长率为 12.8%,而 SSFSW 接头为 6.55%,达到了母材的51.2%。

图 6 为 SSFSW 接头的断裂位置,可以看到,拉 伸试样断裂在轴肩下方的热影响区(HAZ I),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,这是由于在焊接过程中受到焊接 热循环影响较大,部分沉淀相发生溶解,明显降低了 该区域的力学性能,同时断口伴随有一定的颈缩现 象。通过扫描电镜进行观察(图7),断口微观形貌 由大量细小的韧窝构成,在一些韧窝的底部,可以发 现第二相粒子脱落的现象,断裂方式属于典型的微 孔聚集型断裂。

表 2 SSFSW 接头的拉伸性能

试样类型	抗拉强度 <i>R</i> _m /MPa	屈服强度 R _{p0.2} /MPa	断后伸长率 A(%)		
РМ	535	472	12.80		
SSFSW	487	377	6.55		



图 6 SSFSW 接头的断裂位置



(a) 宏观形貌



(b) 韧窝结构图 7 SSFSW 拉伸试验的 SEM 断口形貌

3 结论

(1)采用 SSFSW 技术,在焊接速度为 200 mm/min,
 转速 500 r/min 工艺条件下成功获得 7050-T7451 铝合
 金的对接接头。SSFSW 接头焊缝成形良好,表面光滑

平整。与常规 FSW 相比,焊接表面基本无飞边缺陷,厚度方向上未出现减薄现象。

(2) SSFSW 接头由焊核区、热力影响区、热影响区 和母材区四部分组成。各区域在焊接过程中吸收的能 量和塑性变形量存在明显差异,晶粒也呈现出了不同 的形态。但与常规 FSW 的接头相比,SSFSW 接头具有 非常窄的 TMAZ,前进侧 TMAZ 宽度只有 60 μm,后退 侧 TMAZ 宽度为 300 μm。

(3) SSFSW 接头硬度呈"W"形分布,焊核区硬度 值较母材区下降了20 HV。热影响区硬度值变化较大, 根据轴肩位置可以将其分为 HAZ I 区和 HAZ II 区,最 低硬度通常出现在靠近焊核区的 HAZ I 区,硬度值为 128 HV,较母材硬度值低37 HV。

(4) SSFSW 接头的抗拉强度和屈服强度为 487 MPa和377 MPa,分别达到了母材的 91%和 80%。断 后伸长率为 6.55%,达到母材的 51.2%。热影响区是接 头发生断裂的薄弱区域,断裂形式为微孔聚集型断裂。

参考文献

- [1] 董春林,栾国红,关桥.搅拌摩擦焊在航空航天工的应 用发展现状与前景[J].焊接,2008(11):25-31.
- [2] Padhy G K, Wu C S, Gao S, Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: a review [J]. Journal of materials Science & Technology. 2018, 34: 1–38.
- [3] 宋建岭,李超.搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应 用与发展[J].焊接,2018(5):21-28.
- [4] Ma Z Y. Friction stir processing technology: a review [J].
 Metallurgical and Materials Transactions, 2008, 39A(3).
- [5] 朱小刚, 王联凤, 孙靖, 等. 厚板铝合金搭接搅拌摩擦焊 组织及力学性能分析[J]. 焊接, 2016(11): 41-43,56.
- [6] 王国庆,赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [7] 陈国庆,柳峻鹏,树西,等. 铝合金焊接工艺的研究进展[J]. 焊接, 2017(9): 7-12.
- [8] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing
 [J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50(1-2):
 1-78.
- [9] 申浩,杨新岐,李冬晓,等. 6061-T6 铝合金的静止轴肩
 搅拌摩擦焊工艺及组织性能 [J].焊接学报,2016,37
 (5):119-123,134.
- [10] 刘仁高, 陈勇. 6005A 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头性 能研究[J]. 技术与市场, 2018, 25(5): 59-60,63.
- [11] 赵峰.机器人静轴肩搅拌摩擦焊技术研究[J]. 现代焊接,

2016(1): 32-33.

- [12] 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.
- [13] 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.
- Martin J P, Stanhope C, Gascoyne S. Novel Techniques for Corner Joints Using Friction Stir Welding [M]. Friction Stir Welding and Processing VI. John Wiley & Sons, Inc. 2011: 177-186.
- [15] 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.
- [16] 姬书得,孟祥晨,黄永宪,等.搅拌头旋转频率对静止轴 肩搅拌摩擦焊接头力学性能的影响规律[J].焊接学报, 2015,36(1):51-54,115-116.
- [17] 何方舟,杨新岐,李冬晓,等.铝合金静止轴肩搅拌摩擦 焊组织非均质性对接头力学性能的影响[J].焊接学报, 2017,38(8):115-118,134.
- [18] 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.
- Ma Z Y. Friction stir processing technology: a review [J].
 Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(3):
 642-658.
- [20] 张坤,方远方,栾国红,等.静止轴肩搅拌摩擦焊接
 6005 铝合金的力学和疲劳性能[J].焊接学报,2017,38
 (10): 25-28,130.
- [21] 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.
- [22] Jonathan Martin. Stationary shoulder friction stir welding developments [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 31-38.
- 作者简介: 张华,1976年出生,博士,教授。主要研究领域为 搅拌摩擦焊、腐蚀与防护等,已发表相关文章40余 篇。