

# 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺的研究

张浩楠<sup>1</sup>, 熊江涛<sup>1</sup>, 李京龙<sup>1</sup>, 石俊秒<sup>1</sup>, 豆建新<sup>1,2</sup>, 柴鹏<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接技术重点实验室, 西安 710072; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

**摘要:** **目的** 研究搅拌头转速和轴套下压量对异质铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头的组织及力学性能的影响。**方法** 采用回填式搅拌摩擦点焊技术对 7050 铝合金和 2524 铝合金进行搭接焊试验, 焊接完成后利用光镜、体式显微镜、扫描电镜对组织进行观察, 另外, 测试拉伸剪切载荷和显微硬度分布, 最后对断裂行为进行了研究。**结果** 接头区域可以分为焊核区、热力影响区、热影响区、母材 4 个区域, 焊核区晶粒呈细小等轴状, 热力影响区晶粒呈粗大长条状。随搅拌头转速的增大, 拉剪载荷降低, 当转速为 1500 r/min 时拉剪载荷值最高, 其值为 7.499 44 kN。热影响区的显微硬度比母材低, 最小值为 HV106。接头的断裂方式可以分为剪切型断裂、塞型断裂、剪切-半环型断裂。**结论** 在一定工艺参数范围内, 通过适当降低搅拌头转速能显著提高接头的拉剪载荷, 轴套下压量对接头的断裂方式影响显著。

**关键词:** 异质铝合金; 回填式搅拌摩擦点焊; 组织; 拉剪载荷

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.008

**中图分类号:** TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0047-06

## Refill Friction Stir Spot Welding Process of Dissimilar Aluminum Alloy

ZHANG Hao-nan<sup>1</sup>, XIONG Jiang-tao<sup>1</sup>, LI Jing-long<sup>1</sup>, SHI Jun-miao<sup>1</sup>, DOU Jian-xin<sup>1,2</sup>, CHAI Peng<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. AVIC Manufacture Technology Institute, Beijing 100024, China)

**ABSTRACT:** The aim was to study the effect of tool rotational speed and sleeve plunging depth on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded joints of dissimilar aluminium alloy. The lap welding of 7050 and 2524 aluminum alloys were carried out through refill friction stir spot welding technology. After welding, the microstructure evolution was examined with optical microscopy, scanning electron microscopy and stereomicroscopy. In addition, the microhardness distribution and tensile-shear load bearing capacity were measured. Finally, the fracture behavior was studied. The joint area could be divided into four zones: nugget zone, heat affected zone, thermo-mechanically affected zone and base metal. The grains in nugget area were fine equiaxed and the grains in heat affected area were thick and long. The tensile shear load decreased with the increase of the rotational speed of the stir tool. When the rotational speed was 1500 r/min, the tensile shear load was the highest, which was 7.499 44 kN. The microhardness of heat affected zone was lower than that of base metal, and the minimum value was HV106. The fracture modes of joints could be divided into shear fracture, plug fracture and shear-semi-ring fracture. Within a certain range of process parameters, the tensile shear load of the joint can be significantly increased by properly reducing the rotational speed of the stir tool. The sleeve

收稿日期: 2019-08-30

作者简介: 张浩楠(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金摩擦焊接头的组织及力学性能。

通讯作者: 熊江涛(1974—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为扩散焊、摩擦焊等焊接技术及理论, 焊接界面演变热力学等。

plunging depth has significant effects on the fracture mode of the joint.

**KEY WORDS:** dissimilar aluminium alloy; refill friction stir spot welding; microstructure; tensile shear load

近年来,铝合金因其低密度、高比强度、良好的抗腐蚀性和优异的导电导热性能而被广泛应用于航空、航天、船舶、机械制造等领域<sup>[1]</sup>。2524 铝合金是继 2024 铝合金和 2124 铝合金之后被开发出来的 Al-Cu-Mg 系合金,其主要用作飞机的蒙皮;7050 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系可热处理高强铝合金,主要应用于中厚板挤压件、自由锻打件与模锻件<sup>[2-3]</sup>。目前飞机结构件的主要连接方法为铆接,但由于铆接需要先在连接位置开孔,然后安装铆钉。外露的铆钉头破坏了飞机外蒙皮的整体性,严重影响结构强度、可靠性,因此迫切需要一项新工艺来取代传统铆接技术<sup>[4]</sup>。

回填式搅拌摩擦点焊 (Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW) 技术是德国 GKSS 中心于 2002 年发明的一种新的点焊技术,其使用更为复杂的搅拌头结构和运动方式,可消除匙孔缺陷<sup>[5]</sup>。回填式搅拌摩擦点焊主要分为 4 个步骤:① 压紧环压在上板表面,套筒和搅拌针开始同步旋转并与待焊材料摩擦并产生摩擦热进而使材料塑化;② 搅拌针和套筒分别向上向下运动,套筒将塑性金属挤入搅拌针向上运动所留下的空腔;③ 下压量到达一定值后,搅拌针下压将塑性金属挤入套筒回抽所留下的空腔;④ 搅拌头撤离焊件表面。当套筒和搅拌针分别回到试板的上表面时,二者仍需在焊点表面停留一定时间并保持旋转,以得到表面成形良好的焊点<sup>[6]</sup>。目前,同质铝合金 RFSSW 接头的组织性能研究较多<sup>[7-12]</sup>,而 7050-2524 异种铝合金的 RFSSW 研究尚未见诸报道,因此研究 7050-2524 异种铝合金的 RFSSW 对于拓展这两种铝合金的应用及飞机蒙皮结构的高质量连接非常重要。文中主要研究了搅拌头转速和轴套下压量对 7050-2524 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头的组织及力学性能的影响,并对接头的断裂行为进行了分析。

## 1 材料与方法

本次试验中,设计了不同的焊接工艺参数(包括轴套下压量 2.8, 3, 3.2 mm, 焊接时间 6, 7, 8 s, 搅拌头转速 1500, 1900, 2300 r/min)。采用搭接的形式对 7050-T74511 铝合金(上板, 2.6 mm×100 mm×30 mm)和 2524-T3 铝合金(下板, 2.6 mm×100 mm×30 mm)进行搅拌摩擦点焊,焊接设备是由北京赛福斯特设计的点焊机头与 KUKA 机器人集成,搅拌针直径为 6 mm,搅拌套外径为 9 mm。

焊接完成后利用电火花切割设备沿焊点中心横

截面切取金相样品,随后进行打磨抛光并利用凯乐试剂进行腐蚀,腐蚀时间控制在 15 s 左右。利用日本生产的 OLYMPUS 型光学显微镜(OM, Optical Microscope)观察接头的微观组织,利用 LECO 型显微硬度计对其进行显微硬度测试,测试位置为上板厚度的 1/2 处沿平行于上下板界面的方向。压痕间距 0.5 mm,载荷 100 g,保压时间 10 s。利用电子万能材料试验机对焊件进行拉伸-剪切试验,点焊焊接试样结构及尺寸示意图如图 1 所示,拉伸速率 1 mm/min,拉剪试验完成后利用 AOSVI 型体视显微镜观察断口宏观形貌,利用 TESCAN VEGA3 LMU 型钨灯丝扫描电镜(SEM, Scanning Electron Microscope)对拉伸-剪切断口进行观察,最后对试验结果进行分析。

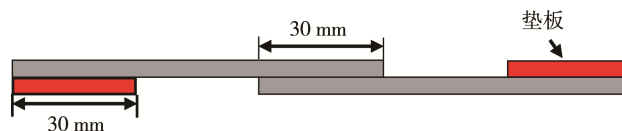


图 1 回填式搅拌摩擦点焊焊接试样结构及尺寸  
Fig.1 Configuration and size of RFSSW specimens

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接接头组织形貌

如图 2 所示为本次试验中获得的 7050-2524 铝合金 RFSSW 横截面组织形貌,其焊接参数为轴套下压量 3 mm,搅拌头转速 1500 r/min,焊接时间 8 s。图 2a 为焊点宏观组织形貌,根据所受温度和力的不同可以将焊接区域由焊点中心依次往外分为焊核区(SZ, stir zone)、热力影响区(TMAZ, thermo-mechanically affected zone)、热影响区(HAZ, heat affected zone)、母材(BM, base material)。图 2b—d 为图 2a 中区域 B, C, D 的放大图,由图 2b 可观察到 TMAZ 与 SZ 区存在明显的套筒退出线,套筒退出线左右两侧的晶粒取向及尺寸存在较大的区别,左侧的 TMAZ 区晶粒粗大且取向具有方向性,这是由于 TMAZ 区受到搅拌头的作用较小,温度较低,不足以发生动态再结晶,组织与母材并未发生较大的变化。在套筒回抽末期,套筒对 TMAZ 区的塑性金属有向上的摩擦力作用,导致 TMAZ 区的晶粒呈向上弯曲的分布;右侧的 SZ 受到搅拌头的剧烈作用,温度与变形度足够发生动态再结晶,因此组织呈细小的等轴状动态再结晶晶粒。图 2c 为上下板搭接界面区域,在套筒退出线底端存在有孔洞缺陷。2524 与 7050 铝合金属于航空领域常用铝合金,板材表面包覆一层纯铝称为包铝层,在焊接过程中包铝层将会在搅拌针与搅拌套的作用下发

生破碎、迁移，包铝层的形貌对接头的力学性能有很大影响<sup>[13—14]</sup>。图 2d 为焊核底端包铝层，包铝层没有

明显的裂纹，表明焊核底端上下板包铝层结合良好。图 3 为焊接时间为 7 s 时不同的搅拌头转速和轴

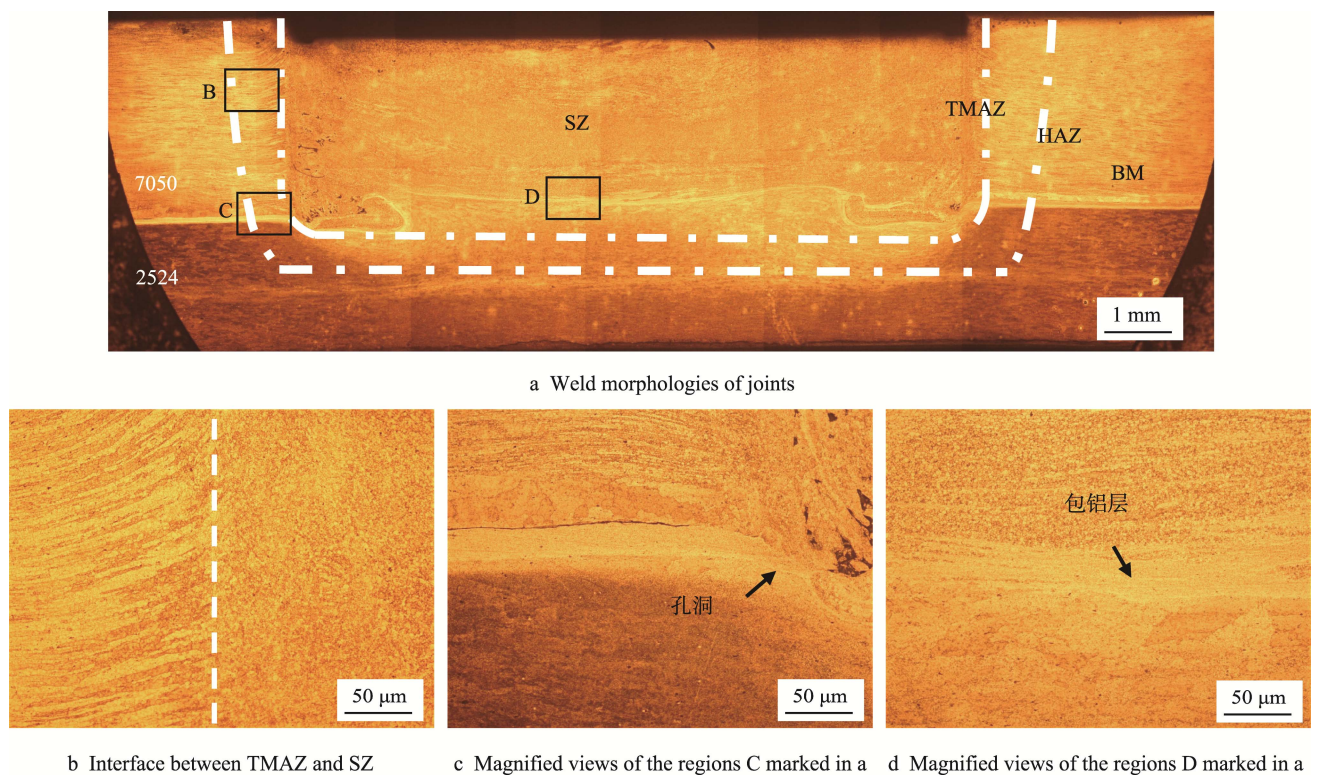


图 2 回填式搅拌摩擦点焊接头横截面  
Fig.2 Cross-section of RFSSW joints

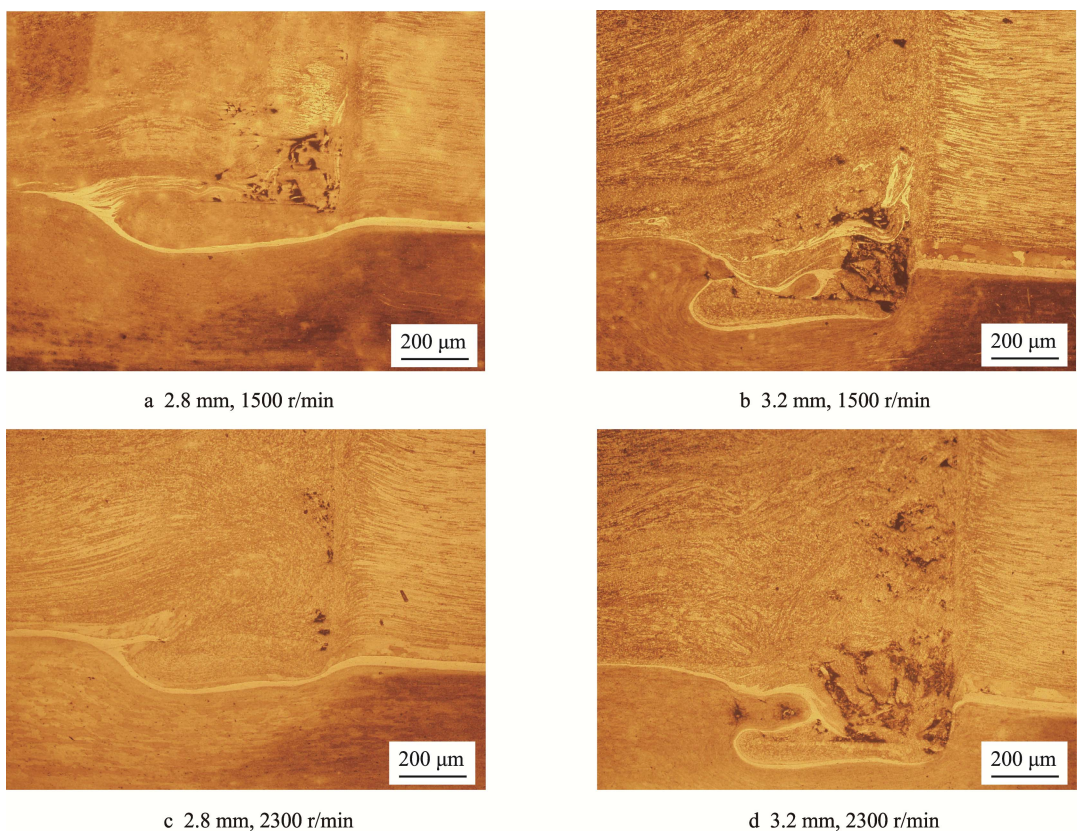


图 3 不同转速和下压量对应的包铝层以及孔洞缺陷形貌  
Fig.3 Morphology of aluminum cladding and void defect at different tool rotational speeds and sleeve plunging depths

套下压量所对应的轴套作用区的组织形貌。随转速的增大,轴套作用区的产热增加,材料的流动性增强,一方面孔洞缺陷的尺寸减小,另一方面包铝层受到塑性金属的剪切力减小,向外迁移量减少;随下压量的增大,孔洞缺陷的尺寸增大,另外,轴套下压量增大了破坏了界面包铝层的连续性。

## 2.2 焊接接头的力学性能

图4为焊接时间为7 s时拉剪试验得出的点焊接头拉剪载荷,可以发现,当转速为1500 r/min、轴套下压量为2.8 mm时拉剪载荷值最高,其值为7.499 44 kN。随转速的增大,接头的拉剪载荷下降。对其原因进行分析,转速增大,材料的流动加剧,塑性金属对包铝层的剪切力减小,包铝层向外迁移较少,如图3所示。包铝层为纯铝,强度硬度低,裂纹更加容易沿包铝层扩展,因此接头的拉剪载荷降低。轴套下压量对拉剪载荷没有显著的影响。

图5为焊接参数为搅拌套转速1500 r/min、焊接时间为7 s时不同下压量对应的接头显微硬度分布,可以看出,HAZ区硬度相比原始母材发生了明显的降低,最小值为HV106,这是由于HAZ只受到焊接热作用,沉淀相发生了粗化,降低了其硬度。SZ内温度高,固溶强化效果显著,沉淀相数量显著降低且尺寸粗大,第二相强化作用不明显,此外,由于SZ内发生了动态再结晶,一方面晶粒显著细化,提高了SZ区的硬度值,另一方面位错密度的降低使硬度值降低,因此SZ区显微硬度与母材相比并未发生较大变化。TMAZ硬度值稍高于母材且随下压量的增大而降低,这是由于TMAZ温度低且存在一定的塑性变形,位错强化作用较为显著,轴套下压量增加,热输入增加,沉淀相发生一定程度的粗化,降低了其硬度值。TMAZ与SZ的交界处硬度值较低,这是由于套筒退出线为弱连接,两侧金属结合差。

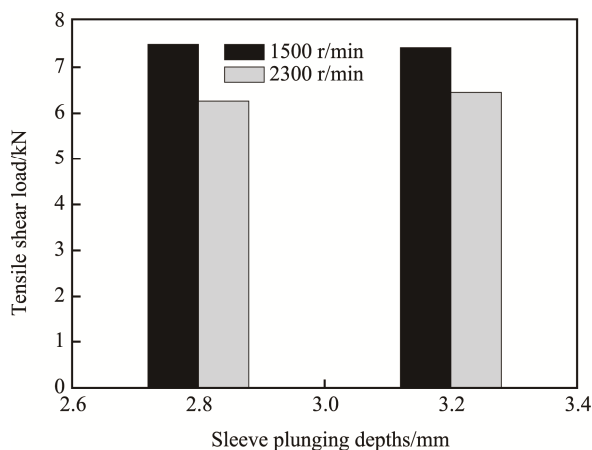


图4 焊接时间为7 s时焊接接头的拉剪载荷  
Fig.4 Tensile shear load of welded joint when welding time is 7 s

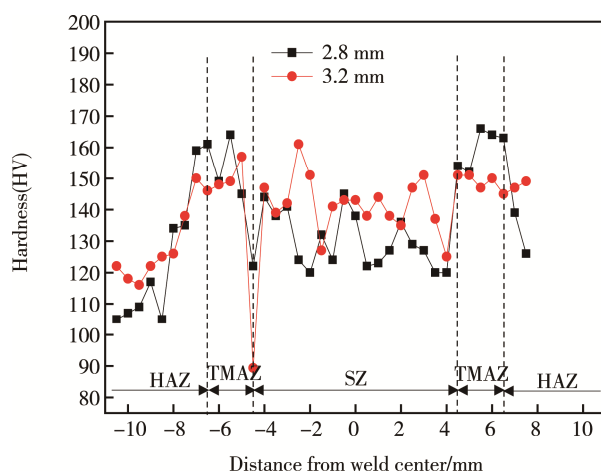


图5 下压量分别为2.8 mm和3.2 mm对应的显微硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution corresponding to the sleeve plunging depths of 2.8 mm and 3.2 mm, respectively

## 2.3 焊接接头的断裂行为

本次试验主要有3种断裂方式,如图6所示,分别为剪切型断裂、塞型断裂、剪切-半环型断裂。下压量对拉剪载荷没有明显的影响,但对断裂方式有很大的影响<sup>[1,15]</sup>。下压量为2.8 mm时,界面包铝层连续分布,此时在外力的作用下,上板与下板沿着包铝层的位置发生脱离,最终形成剪切型断裂。当下压量为3.2 mm时,包铝层分布不连续,而孔洞缺陷为裂纹的萌生位置,套筒退出线附近的焊核区在回抽过程中形成不致密的结构为裂纹的扩展提供了路径,当外载荷进一步增大时焊核与上板脱离,发生塞型断裂。转速的增大使材料的流动更加剧烈,塑性金属对包铝层的剪切力减小,只有部分包铝向外发生了迁移。裂纹会沿着包铝进行向外扩展,最终表现为剪切-半环型断裂<sup>[16]</sup>。

图7为剪切型断裂的下板断口SEM图,图7a为下板断口SEM全貌图,图7b和7c分别为图7a中B和C区域放大图。裂纹萌生于区域B,该区域对应于焊核区边界的热力影响区,随后裂纹将沿着环向向焊核中心扩展,C—F区均有大量的抛物线型韧窝出现,表明轴套外径以内上下板发生了较好的冶金结合,抛物线方向表明材料受到剪切应力的方向,C区中左边韧窝大而深,右边韧窝较小且尺寸不均匀,这表明轴套作用区域发生良好的冶金结合,焊核边缘位置比轴套区域结合差。D—F均出现了韧窝和撕裂棱,这表明在这些区域发生了混合型断裂,抛物线韧窝的变形程度逐渐增加,表明裂纹起源于区域B,随后向右依次扩展,最终断裂于F区域。

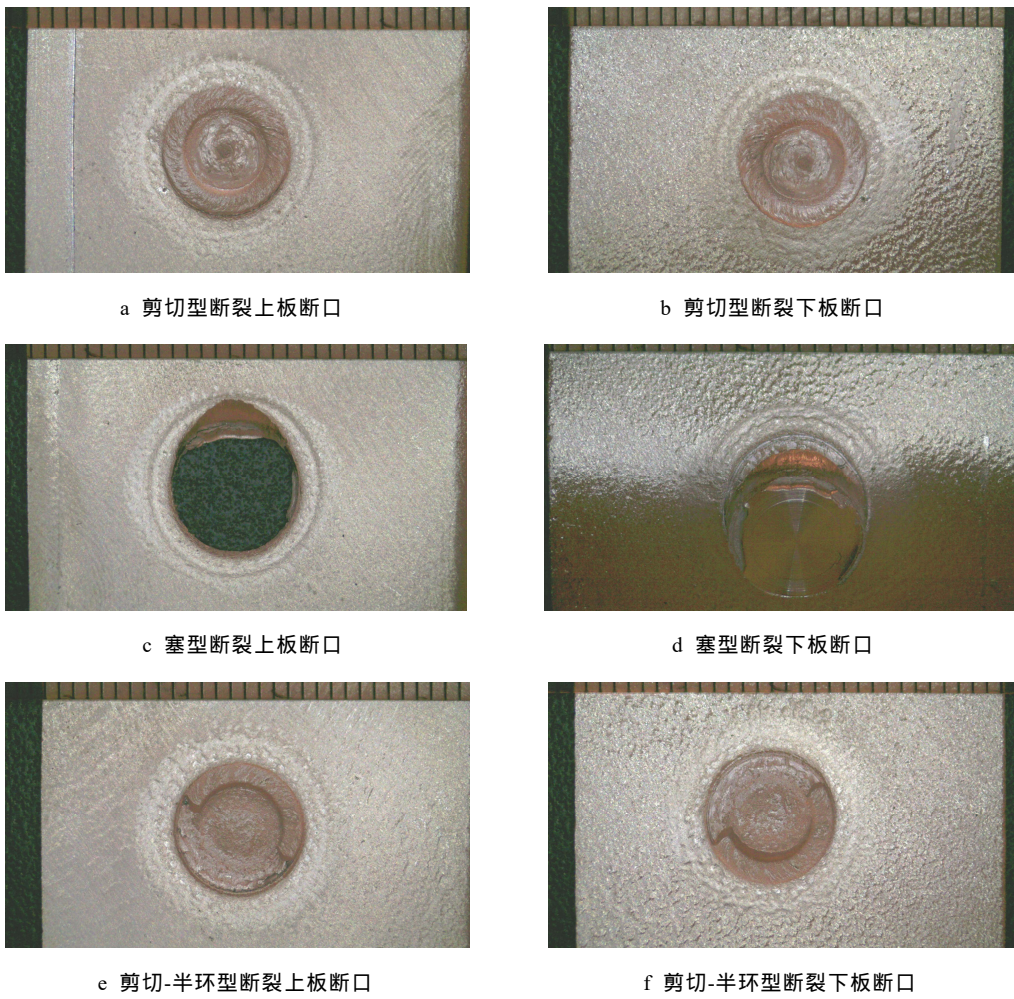


图 6 焊接接头断裂形式  
Fig.6 Fracture modes of welded joints

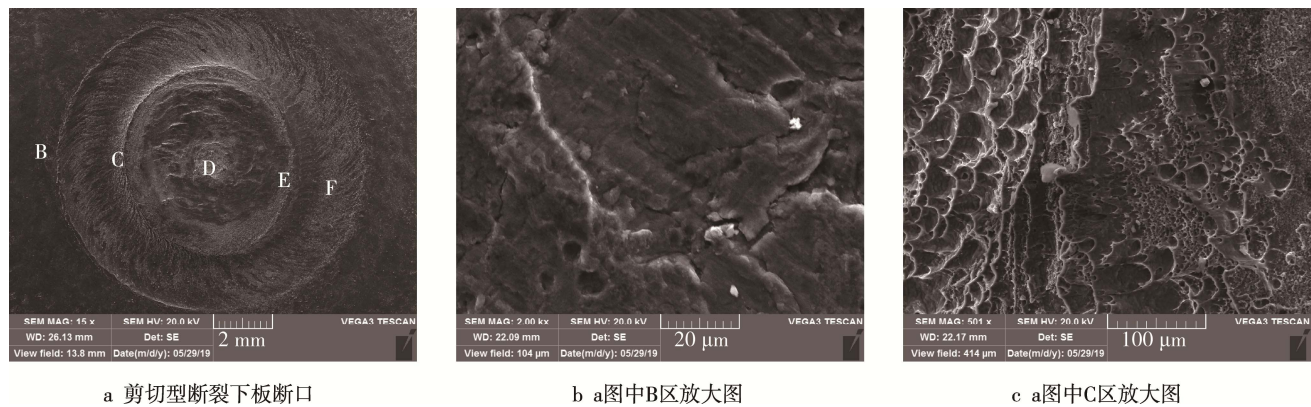


图 7 剪切型断口 SEM 图  
Fig.7 SEM diagram of shear fracture

3 结论

- 1) 焊接区域可以分为焊核区、热力影响区、热影响区、母材。焊核区晶粒呈细小等轴状，热力影响区晶粒呈粗大长条状。
- 2) 搅拌头转速对接头的拉剪载荷影响显著，随

搅拌头转速的增大，拉剪载荷降低，轴套下压量对其影响较小。

3) HAZ 区显微硬度发生了明显的降低，SZ 区由于动态再结晶，显微硬度与母材相比未发生明显降低，TMAZ 区由于位错强化机制硬度值反而升高。

4) 接头的断裂方式分为剪切型断裂、塞型断裂、剪切-半环型断裂，轴套下压量是影响断裂方式的主

要因素, 当下压量为 2.8 mm 时接头的断裂方式主要为剪切断裂, 当轴套下压量为 3.2 mm 时, 断裂方式主要为塞型断裂。断裂起始于轴套外径处, 并沿着径向向焊核中心扩展。

#### 参考文献:

- [1] VENUKUMAR S, MUTHUKUMARAN S, YALAGI S, et al. Failure Modes and Fatigue Behavior of Conventional and Refilled Friction Stir Spot Welds in AA 6061-T6 Sheets[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 61(42): 93—100.
- [2] YIN D, LIU H, CHEN Y, et al. Effect of Grain Size on Fatigue-Crack Growth in 2524 Aluminium Alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 84: 9—16.
- [3] BROTZU A, DE L G, FELLI F, et al. Study of Defect Formation in Al 7050 Alloys[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 3: 246—252.
- [4] 张强. 航空高强铝合金搅拌摩擦点焊工艺研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2016.  
ZHANG Qiang. Study on Friction Stir Welding Process of Aviation High Strength Aluminum Alloy[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2016.
- [5] LI Z, JI S, MA Y, et al. Fracture Mechanism of Refill Friction Stir Spot-Welded 2024-T4 Aluminum Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5): 1925—1932.
- [6] 石瑶, 岳玉梅, 吕赞. 回填式搅拌摩擦点焊的研究进展[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2017(6): 1—11.  
SHI Yao, YUE Yu-mei, LYU Zan. Research Progress of Refill friction Stir Spot Welding[J]. *Mechanical Manufacturing Abstracts (Welding Volume)*, 2017(6): 1—11.
- [7] KUBIT A, KLUZ R, TRZEPIECIŃSKI T, et al. Analysis of the Mechanical Properties and of Micrographs of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminium Sheets[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18(1): 235—244.
- [8] VENUKUMAR S, YALAGI S, MUTHUKUMARAN S. Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Conventional and Refilled Friction Stir Spot Welds in AA 6061-T6 Using Filler Plate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(10): 2833—2842.
- [9] TIER M A D, ROSENDO T S, SANTOS J F D, et al. The Influence of Refill FSSW Parameters on the Microstructure and Shear Strength of 5042 Aluminium Welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(6): 997—1005.
- [10] ROSENDO T, PARRA B, TIER M A D, et al. Mechanical and Microstructural Investigation of Friction Spot Welded AA6181-T4 Aluminium Alloy[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1094—1100.
- [11] SHEN Z K, YANG X Q, ZHANG Z H, et al. Microstructure and Failure Mechanisms of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminum Alloy Joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 476—486.
- [12] 郑敏. 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊微观组织与力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
ZHENG Min. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [13] SHEN Z K, DING Y Q, GOPKALO O, et al. Effects of Tool Design on the Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Al Alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 751—759.
- [14] 郑敏, 申志康, 杨新岐, 等. 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊缺陷及力学性能[J]. *焊接学报*, 2016(8): 87—90.  
ZHENG Min, SHEN Zhi-kang, YANG Xin-qi, et al. Defects and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum Alloys in Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016(8): 87—90.
- [15] 岳玉梅, 李政玮, 马轶男, 等. 下扎深度对回填式搅拌摩擦点焊接头断裂行为的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(8): 122—127.  
YUE Yu-mei, LI Zheng-wei, MA Yi-nan, et al. Effect of Plung Depth on Fracture Behavior of Refill Friction Stir Spot Welded Joints[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(8): 122—127.
- [16] 姬书得, 卓彬, 马琳, 等. 回填式搅拌摩擦点焊过程的材料流动规律模拟[J]. *焊接学报*, 2016, 37(4): 39—42.  
JI Shu-de, ZHUO Bin, MA Lin, et al. Simulation of Material Flow in Refill Friction Stir Spot Welding Process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(4): 39—42.