

铝合金薄板高转速 FSLW 焊接界面形成及迁移行为

秦鼎强, 傅莉, 倪昱, 毛悦, 肖旋

(西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究 0.8 mm 厚 2024 铝合金薄板在高转速搅拌摩擦搭接 (FSLW) 时对其焊接界面的影响规律。**方法** 通过采用铜粉作为标记材料, 探究了高转速 FSLW 接头的微观组织、焊接界面形成及迁移的特征, 揭示了高转速 FSLW 接头中转速对焊接界面迁移的影响规律。**结果** 焊接界面是由于原始界面上距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属因受到的热循环和机械力不足, 难以形成原子间的结合, 之后伴随塑性金属的流动, 原始界面上距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属流向焊缝当中, 进而形成未熔合界面。焊接界面的迁移是由于焊缝塑性金属发生了摩擦和挤压, 进而引起了焊接界面的向上或向下迁移。**结论** 铝合金薄板高转速 FSLW 时, 焊接界面在前进侧向上迁移, 在后退侧向下迁移。随着转速增加, 焊接界面迁移的垂直距离 (沿板厚方向) 逐渐减小。

关键词: 2024 铝合金薄板; 高转速; 搅拌摩擦搭接焊; 焊接界面; 迁移

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.016

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0108-06

Formation and Migration Behaviour of Aluminium Alloy Thin Plate Welding Interface during High Rotational Speed FSLW

QIN Ding-qiang, FU Li, NI Yu, MAO Yue, XIAO Xuan

(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)

ABSTRACT: The paper aims to study the effect law of 0.8 mm thick 2024 aluminium alloy sheet on the welding interface during high rotational speed FSLW. The microstructure, welding interface formation and migration characteristics of FSLW joints with high rotational speed were investigated with copper powder marker. The influence of the rotational speed on the welding interface migration in high rotational speed FSLW joints was revealed. The welding interface was the non-fusion interface formed by the metal on both sides of original interface from the weld centerline to about shoulder radius. Because of thermal cycling and insufficient mechanical force, the atomic bond was not formed but flowed with the flow of plastic metal into the weld. The migration of the welding interface was due to friction and extrusion of plastic metal, which caused upward or downward migration of the welding interface. The welding interface migrates upward at advancing side and migrates downward at retreating side. With the increase of rotational speed, the vertical distances (along the direction of the plate thickness) of the welding interface migration gradually decrease.

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51575450)

作者简介: 秦鼎强 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超薄板高转速搅拌摩擦焊接及加工。

通讯作者: 傅莉 (1968—), 女, 教授, 主要研究方向为异质材料特种焊接机理及质量控制技术和光电半导体材料与器件制备机理。

KEY WORDS: 2024 aluminium alloy thin plate; high rotational speed; friction stir lap welding; welding interface; migration

2024 铝合金, 俗称硬铝, 具有高强度和良好的切削加工性能、可进行热处理强化等优点, 被广泛应用于飞机结构、导弹、铆钉、螺旋桨、卡车轮毂等, 尤其是应用于机翼和蒙皮^[1]。在其实际应用中, 制造业对搭接连接方式具有较大的需求。当采用铆钉连接技术时, 其制造工艺复杂, 成本较高且不利于结构的轻量化。而采用传统熔焊工艺焊接该类高强铝合金时, 由于其熔点低、热膨胀系数高和热导率大等特点, 容易在接头中出现许多缺陷和问题, 例如焊核区的气孔和裂纹, 焊后热变形和残余应力较大, 焊缝组织粗大^[2], 接头力学性能下降较严重。这些因素均导致难以利用常规连接技术实现高质量的连接。

搅拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding, FSW) 是英国焊接研究所 (The Welding Institute, TWI) 于 1991 年发明的一种适用于低熔点合金板材的固相连接技术^[3]。相较于传统熔焊方法, FSW 具有焊缝成形美观、力学性能优异^[4]、焊后残余应力与变形小、材料不易熔化进而可以避免熔焊中的冶金缺陷、焊前对焊件无需复杂处理、焊接中无需填充材料和保护气体、绿色环保等诸多优点, 是一种高效、清洁的连接方法。而在一些应用中, 搭接结构已经通过 FSW 技术成功实现, 因而衍生出搅拌摩擦搭接焊 (Friction Stir Lap Welding, FSLW)^[5-6]。

在应用该技术焊接时, 在前进侧或者后退侧的结合面上会出现勾状特征, 学者们针对这一重要且特殊的特征进行了广泛的研究^[7]。该勾状特征的存在使接头的有效承载截面积减小, 迁移的焊接界面尖端处应力集中, 会降低搭接接头的力学性能。据现有文献报道, 勾状特征是一种固有的缺陷, 其不能通过优化刀具设计或焊接参数来消除, 这都归因于焊缝垂直方向的塑性金属流动^[8-10], 并且强调了搭接焊接过程中的焊接参数对控制材料流动和焊接界面形貌的重要性。国内外研究学者认为, 采用特殊形貌的搅拌头将界面打碎, 并削弱焊接界面迁移的畸变程度, 可提高接头的连接质量, 同时也认为焊接界面的迁移也与焊接参数有关, 且提出当焊接界面在焊缝厚度方向上的迁移量减小时, 接头的力学性能能够获得提高。至今, 对于 1 mm 以下的铝合金薄板高转速 FSLW 研究的有关报道少之又少。而且, 国内外科研工作者对于搅拌摩擦焊技术的研究大多是针对工艺过程本身, 尤其对于薄板, 主要集中在焊接工艺方面, 相关于焊缝成形等机理性的资料还很缺乏, 尤其在高转速 FSLW 焊接界面的形成及其迁移行为方面的研究更为稀少, 因此有必要分析薄板高转速 FSLW 焊接界面的形成及其迁

移行为, 这对减轻钩状缺陷等焊接缺陷具有指导意义, 也对后续研究其焊缝成形的机理, 获得高质量搭接接头具有工程价值。

Dubourg 等^[11]研究了工艺参数对 7075-T6 和 2024-T3 铝合金异质搭接接头的焊接界面形貌及其力学性能的影响, 结果表明接头焊接工艺参数对剪切性能和焊接界面的迁移影响较大, 并认为钩状缺陷是由上下工件之间的界面向上弯曲迁移引起的。Yin 等^[12]提出, 由轴肩和搅拌针扎入工件的驱动力使较下方的工件材料向上迁移, 从而产生勾状缺陷。为了研究铝合金薄板高转速 FSLW 焊接界面形成原因及迁移行为, 文中参考了研究 FSW 塑性流动的实验方法。目前针对 FSW 焊缝金属塑性流动的实验法主要包括有标记材料法^[13-16]、急停技术^[17]、异质材料焊接、微观组织观察法等, 实验法是依据焊后可视化信息来反映焊缝金属的塑性流动。

文中主要工作是通过标记材料法研究 0.8 mm 厚的 2024-T6 高强铝合金在高转速时薄板搭接接头焊接界面的形成原因及迁移行为, 揭示了不同焊接工艺参数对搭接接头焊接界面迁移行为的影响规律, 并为将来揭示其焊缝成形机理提供理论基础。

1 材料与试验方法

选用 T6 状态的 2024 铝合金作为试验材料, 尺寸为 180 mm×65 mm×0.8 mm。焊前需将焊件的待焊表面用丙酮或无水乙醇进行清洗并吹干, 去除待焊表面的氧化物、灰尘、油污等杂质以提高焊接效果。

试验设备为 FSW-TS-F08-DZ 无倾角微型台式高转速搅拌摩擦焊机; 采用的搅拌头主要由三螺旋线型沟槽的轴肩和三爪齿形的搅拌针组成, 轴肩直径 8 mm, 搅拌针长 1.2 mm, 焊接方式为搭接焊, 焊接参数中转速分别为 1500, 3000, 6000 r/min, 固定焊速为 900 mm/min, 扎入深度为 1.25 mm。

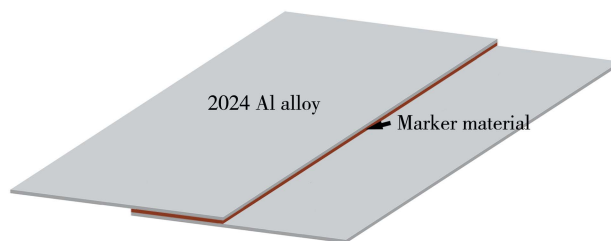


图 1 搭接焊标记材料嵌入位置示意图
Fig.1 Schematic diagrams of marker insert placement in lap joint

焊接前用细软毛刷在待焊两块板间预置一层薄薄的铜粉,如图1所示。焊后沿垂直焊接方向切取制备试样,将所取试样经镶样磨抛后,采用Keller试剂对金相试样进行腐蚀35s。腐蚀后利用OM观察接头显微组织;采用SEM背散射电子成像方法,观察铜粉标记材料在铝合金薄板基体上分布形态,进而分析FSLW焊接界面的迁移规律。

2 焊接接头组织

图2是FSLW接头的焊缝表面宏观形貌。焊缝表面成形良好,无沟槽等缺陷。在较低转速时,焊缝表面弧纹较清晰;而在较高转速时的焊缝表面略显粗糙,表面弧纹较模糊,这是由于在较高转速下焊缝塑性金属未及时冷却下来就粘附于搅拌头的轴肩表面,形成毛刺,进而使得焊缝表面变得粗糙。

图3是2024铝合金薄板FSLW接头整体典型的宏观组织形貌,该焊接参数中转速和焊速为6000 r/min和900 mm/min。对图3观察可知,搭接接头被分成4个部分,分别为焊核区(Nugget Zone, NZ)、热力影响区(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)与母材区(Base Material, BM)。由于在前进侧焊缝处的塑性金属主要流向后方,母材处的塑性金属流向前方,

两者之间有着明显的相对变形差,焊缝处的塑性金属和母材处的塑性金属之间的相对流动存在差异,因此在接头的TMAZ和HAZ之间存在分界线,前进侧的分界线较为明显;而在后退侧塑性金属与之母材处的塑性金属流动方向相同,因此后退侧的分界线不显著。相比其他铝合金搅拌摩擦焊搭接接头中常见的盆形宏观形貌^[17],该接头的TMAZ与HAZ的分界线接近垂直,水平流动更为充分,这是因为搅拌针侧面加工带有齿状形状的结构,有利于增加焊缝处金属的水平塑性流动,起到抑制钩状缺陷尺寸、增加搭接接头有效承载板厚的作用。

3 搭接接头焊接界面迁移的特征

3.1 搭接接头焊接界面迁移的定性分析

图4为转速6000 r/min和焊速900 mm/min搭接焊后铜粉在焊缝横截面分布情况。由图4可以看出,焊接前,在水平方向上原本连续的铜粉,焊后被搅拌针分割,同时在焊缝两侧进行了迁移运动。前进侧和后退侧的铜粉均向焊缝中心迁移;前进侧标记材料向上迁移,而后退侧的标记材料虽位于搭接原始界面的上方,但其前端却向下弯曲,表明标记材料有向下迁移的趋势,由此说明焊核区前进侧的焊接界面向上迁

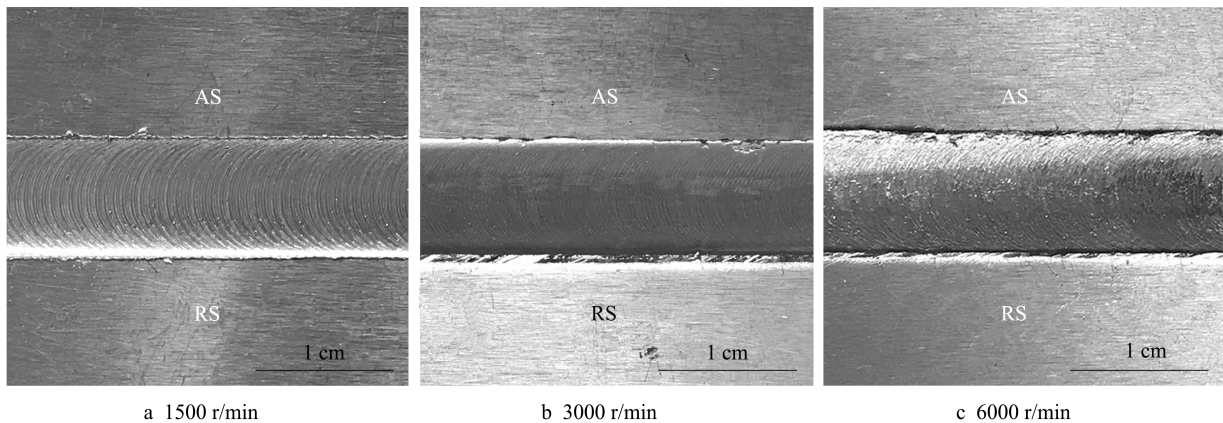


图2 焊速900 mm/min时搭接接头焊缝表面宏观形貌
Fig.2 Surface morphology of lap joints at 900 mm/min

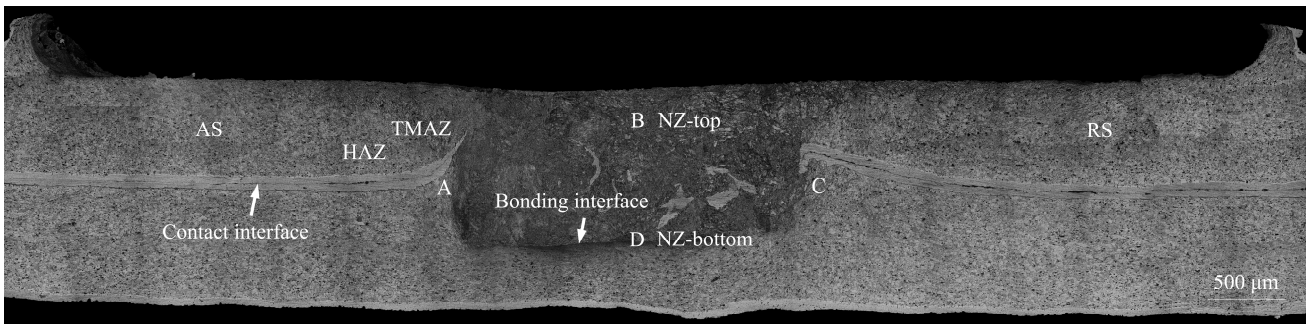


图3 转速6000 r/min和焊速900 mm/min时2024铝合金FSLW接头宏观组织形貌
Fig.3 Macrostructure of 2024 Al alloy FSLW joint at 6000 r/min-900 mm/min

移, 后退侧的焊接界面向下迁移。在远离焊缝中心线约轴肩半径距离的界面由于没有受到搅拌针的作用而保持一条直线(对应图 4 中的 A 区域); 再往焊缝中心靠近则是焊接界面和原始界面的交界处, 该区域的界面开始发生弯曲变形(对应图 6 中的 B 区域); 继续往焊缝中心靠近处的界面进而弯曲而出现断裂现象(对应图 4 中的 C 区域); 最后在焊缝中心区域, 界面消失不存在(对应图 4 中的 D 区域)。由于越靠近焊缝中心的位置, 界面两侧的金属受到的热循环作用越大, 搅拌针及轴肩的作用力也越大, 界面上下两侧的塑性材料间的距离变窄进而结合在一起, 这就使得焊缝处的焊接界面在搅拌摩擦搭接焊过程中经历了一个弯曲变形、断裂分离、进而消失的过程, 因此, 焊接迁移界面的形成原因是: 原始界面上距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属

因受到的热循环和机械力不足, 难以使其形成原子间的结合, 之后伴随塑性金属的流动, 原始界面上距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属流向焊缝当中, 进而形成未熔合界面。

对图 4 进一步分析可知, 当焊缝两侧界面迁移至焊缝上半部分时, 两侧的界面既受到了焊缝金属材料向上挤压的作用, 又受到了搅拌头的轴肩搅拌以及其下方热塑性金属的旋转摩擦作用。焊缝后退侧的界面跟随附近组织旋转向焊缝中心迁移, 但前进侧的界面在搅拌头前方未塑化的金属材料的反作用下不能跟随轴肩旋转, 故在前进侧的界面往焊缝中心的迁移距离较后退侧的小, 因此, 搭接接头焊缝两侧的界面迁移是因为其对焊缝金属材料的挤压和摩擦共同作用引起焊接界面的向上或向下迁移。而且, 随着距焊缝上表面距离的减小, 搭接界面的结合宽度增大。

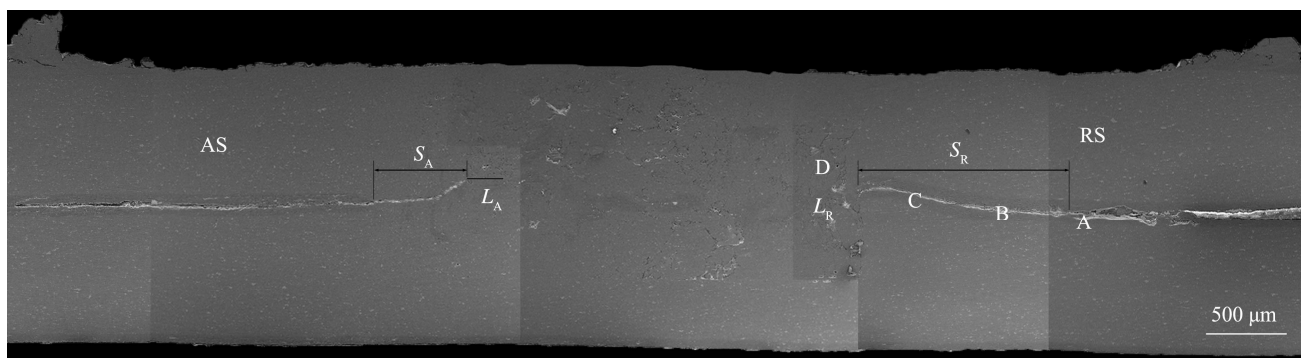


图 4 转速 6000 r/min 和焊速 900 mm/min 时铝合金 FSLW 接头标记材料分布形态
Fig.4 Distribution of marked material of the FSLW joint at 6000 r/min-900 mm/min

3.2 搭接接头焊接界面迁移的定量分析

对图 4 中的标记材料进行定量分析, 其中 L_A 和 L_R 分别代表前进侧和后退侧标记材料的垂直迁移距离, S_A 和 S_R 分别代表前进侧和后退侧标记材料的水平迁移距离。以 2024 铝合金薄板搭接初始界面为基准, 标记材料垂直迁移的最远处为终止位置, 以这两个位置之间沿板厚方向上和沿水平方向上的距离来表示搭接界面向上或向下迁移的垂直距离和水平距离。经测量, 转速 6000 r/min 和焊速 900 mm/min 时, 搭接界面在垂直方向上的迁移距离 L_A 和 L_R 分别为 0.143 mm 和 0.164 mm。后退侧界面垂直迁移的距离略大于前进侧界面垂直迁移的距离。焊缝两侧的搭接界面在水平方向上的迁移距离 S_A 和 S_R 分别为 0.693 mm 和 1.228 mm, 后退侧界面的水平迁移距离明显大于前进侧。通过对界面迁移的垂直距离和水平距离对比分析可知, 垂直迁移距离相差不大, 但水平迁移距离相差较大, 说明焊缝前进侧的界面弯曲变形程度较后退侧的大。

3.3 转速对搭接接头焊接界面迁移的影响

图 5 和图 6 为固定焊速 900 mm/min 时, 采用不

同转速时搭接接头标记材料的分布形态, 其对应的转速分别为 1500 r/min 和 3000 r/min。从这两图能够看出, 前进侧的标记材料往上迁移, 后退侧的标记材料往下迁移, 这表明未熔合界面在前进侧往上迁移, 在后退侧往下迁移。对比两图可知, 转速 1500 r/min 时前进侧搭接界面的弯曲程度较 3000 r/min 时的大; 而转速为 3000 r/min 时后退侧搭接界面的弯曲程度较大。当转速提高时, 前进侧和后退侧两侧搭接界面前端相距的水平距离逐渐增大, 搭接界面的结合宽度逐渐增大。此外, 焊缝中心区域的标记材料较少, 这说明随着转速增大, 焊缝中的未熔合界面逐渐消失。

经测量, 固定焊速 900 mm/min 时不同转速下搭接界面垂直迁移距离如图 7 所示。观察可知, 转速 1500 r/min 时的 L_A 和 L_R 分别为 0.384 mm 和 0.395 mm, 转速 3000 r/min 时的 L_A 和 L_R 分别为 0.217 mm 和 0.322 mm; 焊速一定时, 后退侧搭接界面的垂直迁移距离大于前进侧搭接界面的垂直迁移距离; 且随着转速增加, 搭接界面的垂直迁移距离减小。这是因为转速提高时, 热输入提高, 焊缝中心区域的金属材料塑化程度较大, 但材料的粘度值较低, 焊缝塑性金属和搅拌针之间容易发生相对滑动, 导致高转速时搭

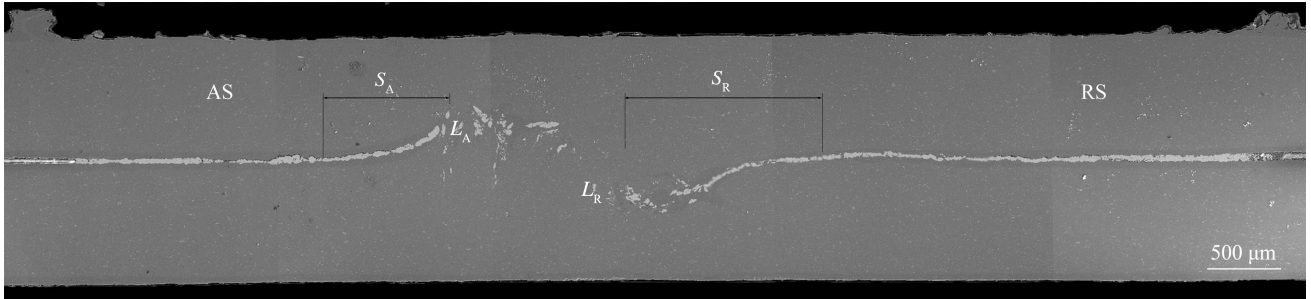


图5 转速 1500 r/min 和焊速 900 mm/min 时搭接接头标记材料分布形态
Fig.5 Distribution of marked material of the FSW lap joint at 1500 r/min-900 mm/min

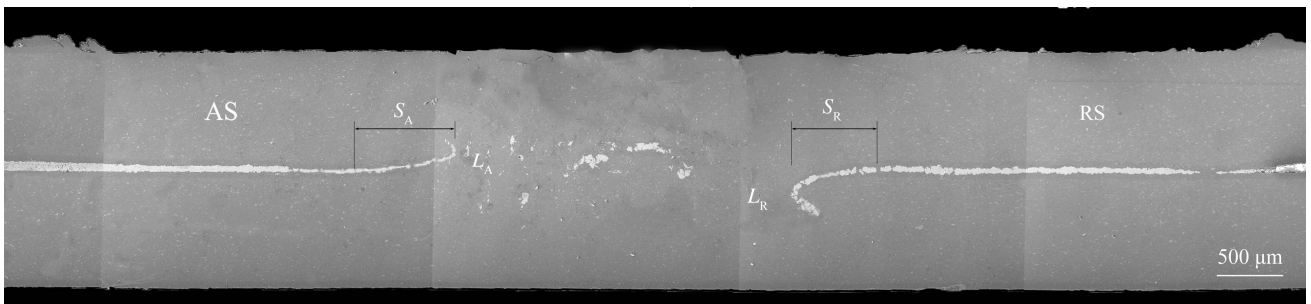


图6 转速 3000 r/min 和焊速 900 mm/min 时搭接接头标记材料分布形态
Fig.6 Distribution of marked material of the FSW lap joint at 3000 r/min-900mm/min

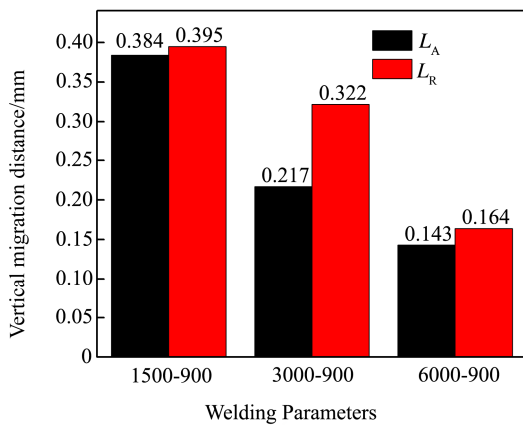


图7 固定焊速 900 mm/min 时转速对铝合金薄板 FSW 搭接界面的垂直迁移距离 L_A 和 L_R 的影响
Fig.7 Vertical migration distance L_A and L_R of Al alloy FSW lap interface at 900 mm/min

接界面垂直迁移距离较小。在水平方向上, 1500 r/min 和 3000 r/min 时前进侧和后退侧对应的界面水平迁移距离 S_A 和 S_R 分别为 0.859, 1.321, 0.534, 0.565 mm。后退侧的搭接界面水平迁移距离大于前进侧。

4 结论

分析研究薄板高转速 FSLW 焊接界面的形成原因及迁移行为, 对后续研究 FSLW 焊缝成形机理, 避免焊接缺陷, 获得高质量接头具有重要工程价值。结论如下。

1) 搭接原始界面上距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属因受到的热循环和机械力不足, 难以使

其形成原子间的结合, 之后距焊缝中心线约轴肩半径距离的两侧金属伴随塑性金属的流动流向焊缝当中, 进而形成未熔合的焊接界面。

2) 焊接界面经历了一个弯曲变形、断裂分离、进而消失的过程, 且 FSLW 焊接界面的迁移行为是由焊缝塑性金属发生了摩擦和挤压, 进而引起的向上或向下迁移的纤维流线。

3) 固定焊速时, 高转速使焊接界面的垂直迁移距离减小。

参考文献:

- [1] LIU Fen-jun, FU Li, ZHANG Wen-yuan, et al. Interface Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding Joint of 2099-T83/2060-T8 Dissimilar Al-Li Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(3): 281—288.
- [2] LUAN Guo-hong. Friction Stir Welding Promoting the Development of Aeronautical and Astronautical Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(5): 1—3.
- [3] THOMAS W M. Friction Stir Butt Welding: UK, PCT/GB92/0220[P]. 1991.
- [4] DAWES C, THOMAS W M. Friction Stir Joining of Aluminum Alloys[J]. TWI Bulletin, 1995, 6(1): 124.
- [5] YOON T J, JUNG B H, KANG C Y. The Quantitative Investigation of Mechanical Properties and Characterization of Fractured Position for Friction Stir Lap Welded A6111/A5023[J]. Materials & Design, 2015, 83: 377—386.

- [6] MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, MOSTAFAEI A, et al. Tool Geometry, Rotation and Travel Speeds Effects on the Properties of Dissimilar Magnesium/aluminum Friction Stir Welded Lap Joints[J]. *Materials & Design*, 2015, 75: 95—112.
- [7] ZHAO H, SHEN Z, BOOTH M, et al. Calculation of Welding Tool Pin Width for Friction Stir Welding of Thin Overlapping Sheets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(5/6/7/8): 1721—1731.
- [8] SALARI E, JAHAZI M, KHODABANDEH A, et al. Influence of Tool Geometry and Rotational Speed on Mechanical Properties and Defect Formation in Friction Stir Lap Welded 5456 Aluminum Alloy Sheets[J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 381—389.
- [9] YUE Yu-mei, LI Zheng-wei, JI Shu-de, et al. Effect of Reverse-threaded Pin on Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Alclad 2024 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(7): 671—675.
- [10] LIU Hui-jie, ZHAO Yun-qiang, HU Yan-ying, et al. Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welding Joint of Alclad 7B04-T74 Aluminum Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9/10/11/12): 1415—1425.
- [11] DUBOURG L, MERATI A, JAHAZI M. Process Optimisation and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welds of 7075-T6 Stringers on 2024-T3 Skin[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(7): 3324—3330.
- [12] YIN Y H, SUN N, NORTH T H, et al. Hook Formation and Mechanical Properties in AZ31 Friction Stir Spot Welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(14): 2062—2070.
- [13] HUANG Yong-xian, WANG Yao-bin, WAN Long, et al. Material-flow Behavior during Friction-stir Welding of 6082-T6 Aluminum Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1/2/3/4): 1115—1123.
- [14] EDWARDS P D, RAMULU M. Material Flow during Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 218: 107—115.
- [15] MORISADA Y, FUJII H, KAWAHITO Y, et al. Three-dimensional Visualization of Material Flow during Friction Stir Welding by Two Pairs of X-ray Transmission Systems[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(12): 1085—1088.
- [16] GUERRA M, SCHMIDT C, MCCLURE J C, et al. Flow Patterns during Friction Stir Welding[J]. *Materials Characterization*, 2002, 49(2): 95—101.
- [17] WANG Dong, DONG Chun-lin, XIAO Bo-lv, et al. Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding AlCuLi Alloy Joints[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(9): 1109—1115.