DOI: 10.3901/JME.2020.20.059

无针搅拌摩擦点焊材料流动行为及其与接头宏观形貌、晶粒特征的相关性^{*}

丁旺震 张勇 芦甜 王溥泽 褚强 李文亚

(西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室 西安 710072)

摘要: 搅拌摩擦焊接头材料流动行为是优化焊接工艺的根本所在, 目前关于无针搅拌摩擦点焊流动行为尚未形成统一的认识。以 0.02 mm 镍箔为示踪材料, 采用轴肩端面具有渐开线凹槽的无针搅拌头, 改变旋转速度和焊接时间进行 1.8 mm 厚 2198-T8 铝锂合金搭接搅拌摩擦点焊试验, 借助微焦点锥束三维 CT 设备、扫描电镜等测试手段, 研究材料流动行为及其对接头宏观形貌、晶粒特征的影响。结果表明, 轴肩下方的金属在轴肩挤压和摩擦热作用下先软化, 以螺旋形向下向内流动形成搅拌区; 随着焊接时间的延长, 搅拌区金属向上和向外流动增强, 致使搅拌区外缘界面翘曲, 形成 Hook 缺陷。随旋转速度或焊接时间增大, 搅拌区金属向下和向上向外流动加剧, 焊核的深度和直径增大、晶粒更细小; 下板金属软化程度加强, 搅拌区外缘下板更多的塑化金属向上向外流动, 致使 Hook 更翘曲。研究结果为深入了解无针搅拌摩擦点焊材料流动行为和优化焊接工艺提供了理论基础。

关键词: 无针搅拌摩擦点焊; 材料流动行为; 接头形貌; 晶粒特征; 2198 铝锂合金

中图分类号: TG453

Materials Flow Behavior during Probeless Friction Stir Spot Welding and Its Correlation with Macroscopic Morphology and Grain Characteristics of Joints

DING Wangzhen ZHANG Yong LU Tian WANG Puze CHU Qiang LI Wenya

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: The materials flow behavior during friction stir welding joints is very important for optimizing the welding process. At present, there is no unified understanding of the flow behavior during probeless friction stir spot welding. 1.8 mm thick sheets of the AA2198-T8 Al-Li alloy are lap-welded with probeless friction stir spot welding by changing the rotation speed and dwell time. The tracer material used in the present study is Ni with 0.02 mm in thickness, and the tool is machined the involute groove on the shoulder surface. The materials flow behavior and its correlation with macroscopic morphology and grain characteristics of joints are investigated with a three-dimensional X-ray tomography and scanning electron microscopy. The experimental results showed that materials softened by friction heat and extrusion will flow radially inwards and flow downwards with a spiral pattern, forming the stir zone(SZ). With the increase of dwell time, the tendency of the materials in the SZ to flow upwards and outwards, causing the interface on the outer edge of the SZ to warp and forming the Hook defect. With the increase of rotation speed and dwell time, the materials of the SZ flow downwards, upwards and outwards more intensely, thus the depth and diameter of the SZ increase and the size of grains decrease; also the softening degree of the bottom sheet materials is strengthened, so the more materials of the outer edge of the stir zone flowed upwards and outwards, causing the Hook to be more warped. The results provide a theoretical basis for understanding the flow behavior during probeless friction stir spot welding materials and optimizing the welding process.

Key words: probeless friction stir spot welding; materials flow behavior; morphology of joint; grain characteristics; 2198 Al-Li alloy

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51574196)。20191202 收到初稿, 20200511 收到修改稿

0 前言

搅拌摩擦点焊(Friction stir spot welding, FSSW)是在搅拌摩擦焊基础上发展起来的一种固相点焊技术,因其焊接热量仅能达到金属产生热塑性变形温度,能够避免金属熔化及结晶过程带来的冶金缺陷,已成功应用于低熔点合金特别是铝合金的点连接。但传统的搅拌摩擦点焊焊后会留下“匙孔”,不仅影响接头的完整性和美观性,还会降低接头的耐腐蚀性和力学性能^[1-3]。针对 FSSW “匙孔”缺陷问题,发明了回填式 FSSW 和无针 FSSW。回填式 FSSW 焊后无“匙孔”,接头强度高,质量好,但搅拌头结构复杂,设备控制精度要求很高,且工艺参数多^[4];无针 FSSW 仅依靠搅拌头轴肩端面的凹槽挤压、产热并促使焊点金属流动,形成一个塑性金属流动区,使焊接界面消失,可有效避免“匙孔”缺陷,且设备简单、工艺参数少^[5]。但无针搅拌摩擦点焊金属流动行为极为复杂,控制焊接过程金属流动行为是焊接工艺优化的根本所在^[6]。

迄今已有学者专门就无针搅拌摩擦点焊金属流动行为开展了研究。TOZAKI 等^[7]以 6 mm 厚的 6061 铝合金为焊接材料,在上板表面钻孔并加入铜粉,进行无针搅拌摩擦点焊试验研究。结果表明,当采用无针搅拌头时,因摩擦热而塑化的金属在轴肩表面凹槽作用下先运动到焊核中心,然后受焊核中心金属约束而向下板流动,最后受下板未塑化金属挤压而流向焊核外缘。BAKAVOS 等^[8]采用金箔及 X 射线层析成像技术研究了无针搅拌摩擦点焊过程中金属流动行为,发现金属的流动与焊接时间及搅拌摩擦工具端面形貌相关,使用无凹槽的平面轴肩时,金属流动性很弱,带有凹槽的轴肩能增加金属的流动性。采用具有渐开线凹槽轴肩焊接时,轴肩外缘温度最高,外缘金属先软化在轴肩作用下先向焊核区内缘运动,但是在焊核区中心位置,温度较低,金属流动性很小,形成“死区”;外缘流动金属流向下板增加焊核深度,受未塑化金属约束后向外流动形成 Hook 缺陷。YANG 等^[9]基于试验和数值模拟方法,研究了 Al2198-T8 无针搅拌摩擦点焊材料流动模型,发现表面塑化材料首先向内流动,然后向下向内流动,同时下板材料受挤压向上流动,轴肩外缘向上流动的塑化材料最终形成飞边。综上所述,已有研究关于无针搅拌摩擦点焊接头金属流动行为尚未形成统一的认识,且对流动行为与接头宏观形貌、微观组织之间的联系关注较少。

铝锂合金相比其他铝合金,具有更高的比强度和比刚度,在航空航天领域已得到较为广泛的应用^[10]。为推进无针搅拌摩擦点焊工艺方法在航空航天等领域重要结构的应用,本文以 Ni 箔作为示踪材料,开展 2198 铝锂合金无针搅拌摩擦点焊试验研究,应用工业 CT 仪、扫描电镜 EDS 面扫等技术观察 Ni 在接头中的分布情况,研究接头塑性金属流动行为及其与接头宏观形貌、晶粒特征之间的关系。

1 试验材料与方法

本文采用的 AA2198-T8 铝合金,其化学成分如表 1 所示,焊接试样尺寸为 40 mm×30 mm×1.8 mm,采用搭接方式,将厚度 0.02 mm 的 Ni 箔放置在上下板界面位置,如图 1 所示。

表 1 AA2198-T8 铝合金化学成分 %

化学成分	Al	Li	Cu	Si	Mg	Zn	Ti	Zr	Fe
质量分数	余量	0.97	3.35	<0.08	0.33	0.01	0.03	0.11	0.05

图 1 镍箔放置位置示意图

搅拌头用 H13 模具钢制作,其轴肩直径为 15 mm,端面加工有 3 条深度为 0.3 mm 的渐开线凹槽,搅拌头形貌如图 2 所示。

图 2 无针搅拌头

试验时保持下压速度 30 mm/min、下压量 0.3 mm 不变,改变搅拌头旋转速度和焊接时间,以研究主要工艺参数对接头形貌的影响,试验参数如表 2 所示。焊接后沿垂直板材轧制方向对焊点进行切割制备金相试样,用 OLYMPUSPMG3 型光学显微镜,观察焊接接头形貌和组织特征。

表 2 试验工艺参数

试样编号	旋转速度/(r/min)	焊接时间/s
1#	600	6
2#	750	6
3#	950	6
4#	1 180	6
5#	950	3
6#	950	9
7#	950	12

添加 Ni 箔的接头金属流动行为试验, 采用表 2 中 3# 和 6# 组合参数。焊接完成后, 首先用 CBCT-450-2048 型微焦点锥束三维 CT 设备从 XYZ 三个方向同时对焊接接头进行扫描, 生成接头的完整三维 CT 图像, 通过 Avizo 软件的三维重构获得接头内部 Ni 的分布信息, 然后再将接头制备成金相试样并采用扫描电镜 EDS 技术观察接头纵截面 Ni 的分布情况。

2 结果分析和讨论

2.1 接头金属流动行为

在接头界面加入示踪材料 Ni, 利用 CT 扫描设备和可视化软件 Avizo 重构得到的两种组合参数接头金属三维流动图像如图 3 所示, 其中浅色为示踪材料 Ni。从图 3 可以观察到, 搅拌区(Stirred zone, SZ)均呈现出中间低, 外侧高的碗状形貌。焊接时间不同, 在搅拌区中 Ni 的分布不同。当焊接时间为 6 s 时(图 3a), 搅拌区内部存在较多的 Ni, 其分布呈顺时针螺旋状(与搅拌头轴肩旋转方向一致)且向内收缩。当焊接时间为 9 s 时(图 3b), 在搅拌区中部无 Ni 存在, 在搅拌区临近外缘处呈圆状离散分布有少量 Ni, 在轴肩外缘的环形带聚集了绝大部分 Ni。同时可以发现, 位于搅拌区外缘处的 Ni 呈现顺时针向外离心分布形态。

图 3 不同工艺参数下接头金属流动二维俯视图及三维图像

图 4 为两种组合参数接头纵截面的 EDS 面扫描结果。从图 4 可以看出, 当焊接时间为 6 s 时(图 4a), 在接头纵截面搅拌区下方和搅拌区外缘, Ni 元素基本呈连续分布, 略向上翘曲; 当焊接时间为 9 s 时(图 4b), 搅拌区下方 Ni 元素呈离散分布, 在搅拌区外缘 Ni 元素呈连续分布, 向上翘曲接近上板表面。

分析认为, 当焊接时间较短时, 摩擦产热少, 搅拌区金属软化程度不够, 流动性较差, 对位于界面的 Ni 箔的挤压和破碎作用较弱。随着焊接时间的延长, 摩擦产热量增大, 加之轴肩挤压作用时间也相应增加, 就可能使位于搅拌区下方界面处的 Ni 箔全部破碎, 这些破碎的 Ni 箔受到搅拌区外缘未塑化金属的约束向上向外流动, 从而在 CT 三维流动图像中表现为 Ni 的环形带分布, 在纵截面呈现出向上翘曲形貌。位于搅拌头轴肩边缘处的 Ni, 因旋转搅拌头轴肩产生的离心效应, 呈现出与搅拌头旋转同方向的离心分布形态。

图 4 不同焊接参数下的 EDS 面扫描结果

根据以上分析与讨论, 可建立无针搅拌摩擦点焊塑性金属流动模型, 如图 5 所示。当旋转轴肩与上板接触时, 与轴肩接触的金属首先达到塑化温度发生软化, 在轴肩端面渐开线凹槽作用下以螺旋形向内流动, 并在轴肩挤压作用下以向下流动为主(流动 1), 形成搅拌区。金属向下流动过程中, 受到其底部上板未塑化金属的约束从而形成向上向外流动, 致使搅拌区向外扩展(流动 2)。搅拌区向下扩展越过上下板界面后, 会对其外缘的下板塑化金属产生挤压作用, 使搅拌区外缘下板塑化金属向上向外流动, 致使搅拌区外缘界面翘曲(流动 4)。另外, 在轴肩与上板表面接触外缘, 由于受到搅拌离心作用和轴肩向下的挤压, 部分金属向外流动形成飞边(流动 3)。

图5 无针搅拌摩擦点焊过程金属流动模型

2.2 工艺参数对接头宏观形貌的影响

不同工艺参数得到的焊接接头宏观形貌如图6所示。可以看出,接头整体对称分布,在轴肩与试样上板接触的边缘存在少量飞边,位于接头中心的搅拌区呈碗状。不同参数接头在上板与下板连接处不同程度都存在Hook缺陷,且Hook缺陷向上板翘曲程度、焊核深度以及焊核直径随焊接参数的不同而发生规律性变化。随着旋转速度的增加,焊核深度逐渐增加,旋转速度600 r/min时为1.56 mm,旋转速度1180 r/min时增加到3.00 mm。随焊接时间延长,焊核深度也增大,焊接时间3 s时为1.43 mm,焊接时间12 s时增加到2.69 mm。因为随工艺参数的增大,摩擦产

热量增多,使金属软化程度加强,在轴肩挤压作用下,塑化金属螺旋形向下流动能力增强,搅拌区向下扩展越多,最终使得焊核深度增加。当工艺参数增大使摩擦产热量达到一定程度时,搅拌区向下扩展将越过上下板界面。随着旋转速度或焊接时间的增加,焊核直径也逐渐增大。分析认为,当工艺参数增大时,软化金属流动性增强,金属向下流动过程中,受到搅拌区底部未塑化金属约束向上向外流动的趋势变大,搅拌区更易向外扩展,在宏观形貌中表现为焊核直径增大。当焊接时间为3 s时,Hook缺陷翘曲略高于搭接界面(图6e);随焊接时间增加,Hook缺陷翘曲程度增大,当焊接时间超过9 s时,Hook缺陷已翘曲至上板表面(图6f)。旋转速度变化时也可以观察到同样规律。分析认为,工艺参数增大,搅拌区金属流动性和下板金属软化程度均加强,搅拌区向下扩展越过上下板界面后,对下板塑化金属产生更大的挤压作用,使搅拌区外缘下板更多的塑化金属向上向外流动,从接头宏观形貌上表现为Hook更翘曲。

(a) 600 r/min, 6 s

(b) 750 r/min, 6 s

(c) 950 r/min, 6 s

(d) 1180 r/min, 6 s

(e) 950 r/min, 3 s

图 6 不同旋转速度和焊接时间的焊点横截面形貌

2.3 接头微观组织及工艺参数对接头晶粒尺寸的影响

对接头进行微观组织观察, 结果如图 7 所示。从图 7a 中可以看到, 搅拌区组织为细小且均匀分布的等轴晶, 在搅拌区内部并未观察到缩孔、夹杂等缺陷。在热力影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)(图 7b)中, 靠近搅拌区边缘可以明显观察到变形的粗大组织, 这是由于 SZ 金属流动对 TMAZ 靠近焊核区金属有黏滞力的作用, 在此力作用下 TMAZ 靠近焊核侧金属被拉长。在原始母材区(图 7d)中, 原始组织为粗大的板条状组织。与母材相对比, 热影响区(Heat affected zone, HAZ)金属的组织在摩擦热的作用下晶粒尺寸略有长大(图 7c)。在图 7e 中可以观察到 Hook 缺陷已经贯穿到上板表面。其原因有二, 一方面在焊接过程中, 由于上、下板受力和受热情况不同, 上板的塑性变形大于下板, 使得两板界面向上板移动; 另一方面, 与此参数下搭接界面处的金属在垂直方向上的流动较强有关。此时, 搅拌区向下扩展已越过上下板界面, 会对其外缘的下板塑化金属产生较大挤压作用, 使搅拌区外缘下板塑化金属向上向外流动增强, 致使搅拌区外缘界面翘曲即 Hook 缺陷加剧, 并最终穿透上表面。

为了研究工艺参数对接头晶粒尺寸的影响, 采用 XRD 测量了 α -Al 相四种典型晶面最强衍射峰对应的衍射半峰宽。表 3 为不同焊接参数下 SZ 与 HAZ 中 α -Al 相四种典型晶面的 XRD 最强衍射峰对应的衍射半峰宽值, 表中 45.068° 、 52.455° 、 77.531° 、 94.249° 分别对应 $\{1,1,1\}$ 、 $\{2,0,0\}$ 、 $\{2,2,0\}$ 、 $\{3,1,1\}$ 四种典型晶面。理论上, 半峰宽越大, 则晶粒越细小^[11]。从表 3 可以发现, 在同样焊接参数下搅拌区

图 7 950 r/min, 9 s 无针 FSSW 接头微观组织

衍射峰的半峰宽基本都大于热影响区的半峰宽, 说明搅拌区晶粒尺寸小于热影响区晶粒尺寸。分析认为, 搅拌区的金属直接受到轴肩摩擦力的作用, 对晶粒会产生破碎作用; 热影响区金属不仅没有在轴肩摩擦力及流动金属的挤压力作用而破碎, 反而在摩擦热的作用下长大。从表 3 还可以看出, 当转速为 950 r/min, 延长焊接时间时, 搅拌区衍射半峰宽均增大, 热影响区衍射半峰宽基本减小, 说明搅拌区晶粒尺寸随焊接时间延长变小, 热影响区晶粒尺寸随焊接时间延长变大; 当焊接时间为 6 s, 转速增加时, 搅拌区和热影响区衍射半峰宽及晶粒尺寸变化也有上述同样规律。这

是因为焊接时间延长或转速增加时,摩擦产热增多,搅拌区金属的流动能力增强,在轴肩作用下会被更充

分搅拌破碎,晶粒变小;而随着产热增多,热影响区晶粒受其影响必然长大。

表 3 不同焊接参数搅拌区与热影响区 α -Al 相四种典型晶面的 XRD 衍射半峰宽 (°)

工艺参数	衍射半峰宽							
	45.068		52.455		77.531		94.249	
	SZ	HAZ	SZ	HAZ	SZ	HAZ	SZ	HAZ
950 r/min, 6 s	0.254 0	0.223 9	0.307 8	0.311 3	0.416 1	0.379 1	0.467 1	0.472 4
950 r/min, 9 s	0.329 0	0.263 7	0.440 2	0.317 7	0.450 6	0.335 1	0.489 6	0.419 7
1 180 r/min, 6 s	0.380 8	0.251 1	0.364 7	0.306 4	0.372 3	0.334 8	0.504 3	0.400 3

3 结 论

(1) 无针搅拌摩擦点焊时,在轴肩与上板金属之间摩擦热的作用下,与轴肩端面接触的金属先达到塑化温度发生软化,并在轴肩挤压作用下以螺旋形向下向内流动为主,形成搅拌区。与轴肩外缘接触的金属,受到搅拌离心作用和轴肩向下的挤压,向外流动形成飞边。搅拌区向外扩展的同时,受到其底部未塑化金属的约束,使部分塑化金属向上向外流动。搅拌区向下扩展越过上下板界面后,受到其挤压作用,搅拌区外缘下板塑化金属向上向外流动,致使界面翘曲,形成 Hook 缺陷。

(2) 随着转速或焊接时间增大,摩擦产热量增多,金属软化程度加强,搅拌区金属向下和向上向外流动加剧,使得焊核深度和焊核直径增大。在轴肩挤压作用下,搅拌区金属被更充分搅拌破碎,晶粒更细小。

(3) 随摩擦产热量增多,搅拌区金属流动性和下板金属软化程度均加强,搅拌区向下扩展时对下板塑化金属将产生更大的挤压作用,使搅拌区外缘下板更多的塑化金属向上向外流动,致使 Hook 更翘曲。

参 考 文 献

- [1] MAYER A, ISAKOVIC J, 庄鸿寿, 等. 搅拌摩擦点焊[J]. 焊接, 2009(9): 6-10.
MAYER A, ISAKOVIC J, ZHUANG Hongshou, et al. Friction stir spot welding[J]. Welding, 2009(9): 6-10.
- [2] 赵衍华, 张丽娜, 刘景铎, 等. 搅拌摩擦点焊技术简介[J]. 航天制造技术, 2009(2): 1-5.
ZHAO Yanhua, ZHANG Lina, LIU Jingduo, et al. Introduction of friction stir spot welding technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(2): 1-5.
- [3] 徐荣正, 刘春忠, 倪丁瑞, 等. 锌夹层添加对镁-铝异种金属搅拌摩擦点焊接头组织与性能的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 18-25.
- [4] 刘会杰, 赵运强. 回填式搅拌摩擦点焊研究[J]. 焊接, 2014(4): 8-12.
LIU Huijie, ZHAO Yunqiang. Refill friction stir spot welding[J]. Welding, 2014(4): 8-12.
- [5] 傅田, 李文亚, 杨夏炜, 等. 搅拌摩擦点焊技术及其研究现状[J]. 材料工程, 2015, 43(4): 102-114.
FU Tian, LI Wenya, YANG Xiawei, et al. State-of-the-art of friction stir spot welding[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(4): 102-114.
- [6] 代建辉, 赵华夏, 栾国红. 无针搅拌摩擦点焊技术研究现状分析[J]. 航空制造技术, 2013, (11): 52-55.
DAI Jianhui, ZHAO Huaxia, LUAN Guohong. Research status of friction stir spot welding without needle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, (11): 52-55.
- [7] TOZAKI Y, UEMATSU Y, TOKAJI K. A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6-7): 844-851.
- [8] BAKAVOS D, CHEN Y, BABOUT L, et al. Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet[J]. Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science), 2011, 42(5): 1266-1282.
- [9] YANG X, FENG W, LI W, et al. Numerical modelling and experimental investigation of thermal and material flow in probeless friction stir spot welding process of Al 2198-T8[J]. Science and Technology of Welding and

- Joining, 2018, 23(8): 704-714.
- [10] 王浩军, 史春玲, 贾志强, 等. 铝锂合金的发展及研究现状[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 82-85.
- WANG Haojun, SHI Chunling, JIA Zhiqiang, et al, Development and current status of aluminum-lithium alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14): 82-85.
- [11] 丁永根, 孙建辉, 李萍, 等. TA15 钛合金热压缩变形位错演化分析[J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45(1): 61-65, 69.
- DING Yonggen, SUN Jianhui, LI Ping, et al. Dislocation evolution analysis of TA15 titanium alloy during hot compression deformation[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2017, 45(1): 61-65, 69.
-
- 作者简介: 丁旺震, 男, 1996 年出生。主要研究方向为轻合金的点焊技术。
E-mail: 2964237544@qq.com
- 张勇(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为点焊质量控制。
E-mail: hjzhyong@nwpu.edu.cn
- 芦甜, 女, 1994 年出生。主要研究方向为搅拌摩擦点焊技术。
E-mail: ltmelody@163.com