

铝合金薄板搭接高速FSW缺陷及断裂行为

肖旋, 秦鼎强, 倪昱, 毛悦, 魏至男, 傅莉

(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)

摘要: **目的** 为了拓展搅拌摩擦焊技术应用, 对薄板搭接结构高速搅拌摩擦焊工艺优化与工程应用提供借鉴与指导。**方法** 采用圆锥无螺纹搅拌针, 进行了6061铝合金薄板搭接高速搅拌摩擦焊接, 对接头界面缺陷及其断裂模式进行分析, 探讨了转速对6061铝合金薄板搭接接头成形及性能的影响规律。**结果** 发现在无螺纹圆锥搅拌针、高转速(6000~9000 r/min)条件下, 接头塑性金属在后退侧易形成飞边流出, 导致下板前进侧出现孔洞缺陷, 且随转速增大, 界面缺陷尺寸逐渐增大, 当转速达到10 000 r/min时, 孔洞尺寸有所减小, 此时接头拉剪强度最高, 为123 MPa。对试样拉剪断裂位置分析发现, 高速搭接接头断裂位置主要有两种, 分别断裂在结合界面处或在前进侧下板, 且转速在9000 r/min以上越趋向于在结合界面断裂。**结论** 高转速搭接焊接必须协调轴肩相貌、焊接工装约束等条件, 保证接头塑性金属充分流动而不流失, 才能获得成形良好无缺陷的接头。

关键词: 高速搅拌摩擦焊; 6061 铝合金薄板; 搭接接头; 界面缺陷; 断裂位置

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.020

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0135-06

Defects of High Speed Friction Stir Welding and Fracture Behavior of Aluminum Alloy Thin Plate Lap Joints

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

(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 expand the application of friction stir welding technology and provide reference and guidance for process optimization in engineering application of high-speed friction stir welding of thin plate lap joint structure. In this paper, the high-speed friction stir welding of 6061 aluminum alloy lap joints was carried out with conical screwless stirring pin. The joint interface defects and fracture modes were analyzed. And the influence of welding speed on the forming and performance of 6061 aluminum alloy thin plate lap joint was discussed. The results showed that the plastic metal of the lap joint weld nugget area was easy to form a flash edge on the retreating side under the condition of high speed (6000-9000 r/min), which lead to hole defects on the advancing side at lower plate. The size of the interface defects gradually increased with the increase of the rotational speed. When the rotational speed reached 10 000 r/min, the hole size decreased; and under this experimental conditions, the tensile strength of the joint was the highest, which was 123 MPa. The analysis of the tensile fracture position of the sample showed that there were two main types of tensile fracture at high speed lap joints, which were respectively broken at the joint interface or at the lower plate of the advanc-

收稿日期: 2019-08-29

作者简介: 肖旋(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦焊接搭接焊、薄板曲面焊接工艺、摩擦焊过程数值模拟。

通讯作者: 傅莉(1968—), 女, 博士, 教授, 陕西省重点科技创新团队“西北工业大学特种焊接技术与设备”的带头人, 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“II—IV 族半导体材料与器件制备机理”, 以及旋转摩擦焊、线性摩擦焊、搅拌摩擦焊、激光焊、电子束焊等特种焊接工艺, 以及半导体器件封装技术等。

ing side; as the speed reached above 9000 r/min, the fracture position tended to be at the joint interface. The high-speed lap joint welding must coordinate the conditions of the tool shoulder and the welding tooling constraints to ensure that the plastic metal of the joint flows sufficiently without loss, so that a well-formed defect-free joint can be obtained.

KEY WORDS: high-speed FSW; 6061 aluminum alloy sheet; lap joint; interface defect, fracture position

搅拌摩擦焊接是一种新型固相焊接技术,是利用搅拌头与工件产生的摩擦热作为焊接热源,在低于工件材料熔点的条件下消除待焊界面形成焊接接头。其优势在于能够消除熔焊过程中的气孔、夹杂等缺陷,获得近母材性能的焊缝,应用前景广阔^[1-2]。搅拌摩擦焊技术已应用于航空航天、轨道交通、船舶制造等领域的铝合金及其他轻合金的焊接^[3-4],而搅拌摩擦焊搭接接头存在的 Hook 和 Cold Lap 缺陷常常是影响其接头力学性能的重要因素^[5-6],因此探讨搅拌摩擦焊工艺参数对搭接接头缺陷形成原因及其对接头力学性能与断裂行为的影响规律等具有重要的意义。

柯黎明等^[7]采用铝合金与铜箔交替叠放的方式,研究了左旋螺纹、右旋螺纹、无螺纹 3 种搅拌头对搅拌摩擦焊过程材料塑性流动的影响规律,并根据螺纹旋向和焊接转向的模型分析,提出了“抽吸-挤压”理论来解释搭接接头界面迁移缺陷形成问题。Wang M 等^[8]在其研究中对钩状缺陷和冷搭接缺陷的成形机理进行了阐述,认为 FSW 搭接焊过程中搅拌针及轴肩引起塑性材料的流动是其成因。Liu H 等^[9]在其研究中探究了搅拌摩擦搭接中材料流动行为,描述了界面缺陷的形成过程,发现钩状缺陷与冷搭接缺陷的形成与搅拌针有直接的关系。目前未见 1 mm 及以下薄板搭接结构的搅拌摩擦焊接的报道。

与传统搅拌摩擦焊相比,高速搅拌摩擦焊因其焊接速度快,对周围区域影响较小,接头的热影响区和热力影响区分布较小,工艺参数可调范围宽等特点,越来越受到关注^[10-11]。刘奋军等^[12-14]在其研究中采用高转速微型搅拌摩擦焊接工艺实现了 0.8 mm 厚 6061-T6 铝合金薄板的对接焊接,发现在高转速下焊缝 Mg₂Si 析出相增多、硬度升高,在 1500 r/min, 800 mm/min 的焊接工艺参数下可获得抗拉强度达到 301.8 MPa 的接头,为母材的 85.8%。目前尚未见有关薄板搭接的高速搅拌摩擦焊工艺的研究报道。

文中采用圆锥形无螺纹搅拌针进行了 6061 铝合金 1 mm 厚薄板搭接无倾角高转速搅拌摩擦焊接试验,分析了高速搅拌摩擦焊接头的成形缺陷及其拉剪断裂行为,以期对薄板搭接结构的高速搅拌摩擦焊工艺优化与工程应用提供借鉴与指导。

1 试验方法

本试验是在 FSW-TS-F08-DZ 微型台式高转速搅

拌摩擦焊接设备上进行的。待焊材料为厚度 1 mm 的 6061 (T6) 铝合金薄板,如表 1 所示,尺寸为 200 mm×80 mm,搭接宽度为 30 mm。焊接搅拌头采用三螺旋轴肩形貌,搅拌针为无螺纹圆锥形状,针长为 1.5 mm,轴肩直径为 8 mm。焊接下压量为 1.51 mm,顺时针旋向,焊接规范参数如表 2 所示。

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 6061-T6 aluminum alloy

元素	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
质量 分数/%	1.06	0.69	0.7	0.15	0.15	0.25	0.15	余量

焊后选取不同焊接接头制成金相试样,采用凯勒试剂 (2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCL+1 mL HF+95 mL H₂O) 进行腐蚀后,采用金相显微镜观察显微组织以及接头界面缺陷形态;参考国标 GB 2651—89 拉伸标准样,将焊后板材加工成为宽度为 1 mm 的拉剪试样,在 INSTRON 3382 万能力学性能实验机上进行性能试验,拉伸速率为 1 mm/min,前进侧为加载移动端。

表 2 焊接参数选择
Tab.2 Selection of welding parameters

编号	焊速/ (mm·min ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	转速 焊速比
1	1500	6000	4
2	1500	7000	4.67
3	1500	8000	5.33
4	1500	9000	6
5	1500	10 000	6.67

2 结果及分析

转速对 6061 铝合金薄板搭接接头高转速搅拌摩擦焊接宏观形貌及焊接界面形貌的影响如图 1 所示。可知,在不同转速 (6000~9000 r/min) 下所得搭接接头的表面都具有良好光洁的弧纹,表面成形良好,但在搭接界面处存在一些缺陷。由于焊接过程中采用顺时针旋向,焊缝中 Hook 缺陷均呈向下偏转,Hook 端部出现孔洞,并且随着转速增加,孔洞尺寸逐渐增大,形成隧道缺陷;后退侧 Cold Lap 缺陷随着转速的升高向上板迁移的距离增大,会影响接头有效搭接

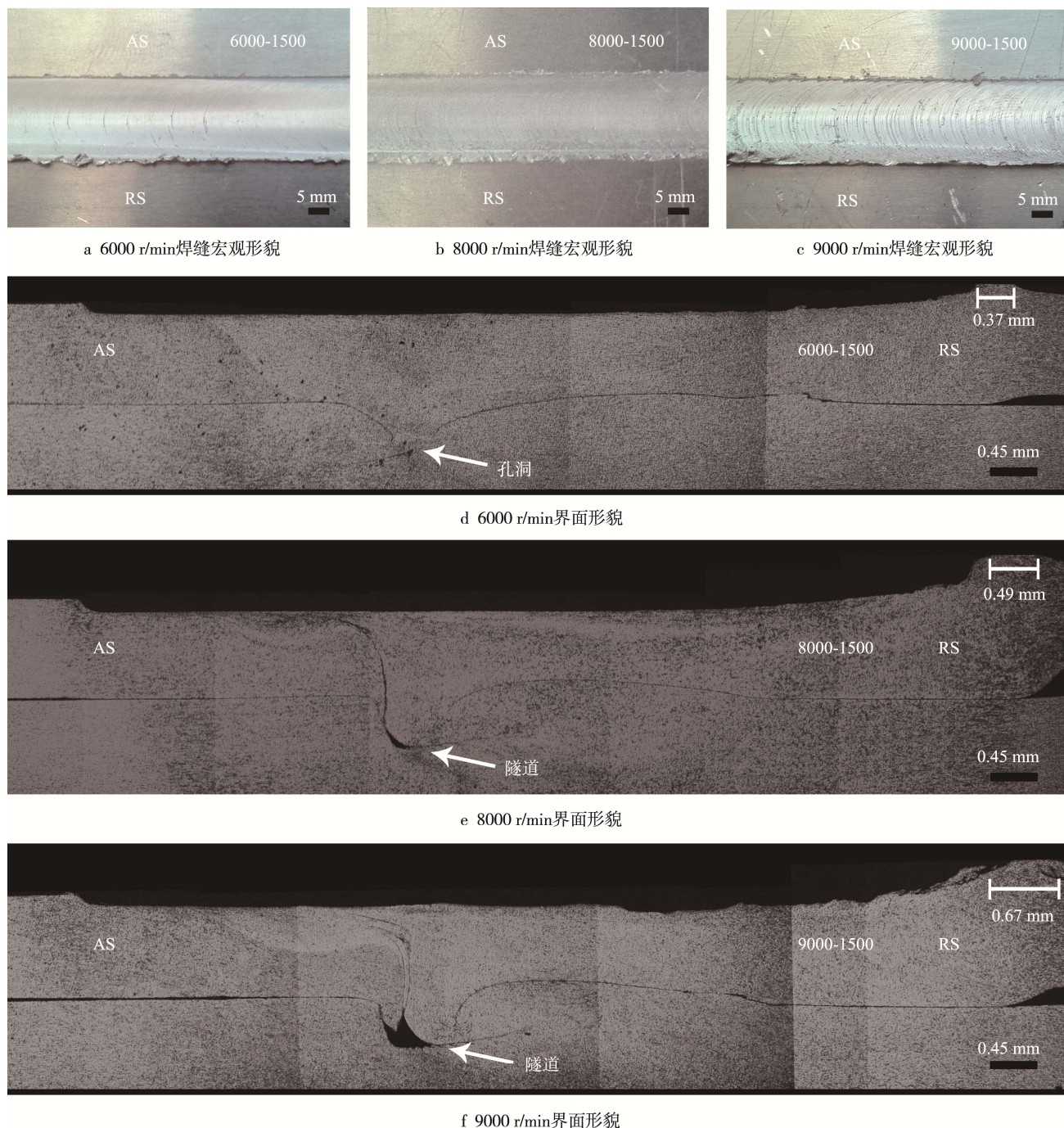


图 1 转速对搭接接头表面宏观及界面形貌的影响

Fig.1 Effect of rotating speed on macroscopic and interface morphology of lap joints

承载面积, 进而影响接头性能。

结合搅拌摩擦焊接头成形过程塑性流动理论可知, 搅拌摩擦焊接头在成形过程中, 塑性金属从前进侧 (Advancing side, AS) 搅拌针端部向后退侧搅拌针根部流动, 在前进侧搅拌针端部形成瞬时空腔, 在后退侧 (Retreating side, RS) 堆积材料并与轴肩共同作用形成挤压作用回填空腔, 最终形成接头^[7,9]。在转速高达 6000 r/min 以上时, 搅拌针的机械作用变得更为突出, 其带动前进侧塑性金属流动的速率大于后退侧回填速率, 而采用本研究的圆锥形状无螺纹搅拌针

时, 堆积在后退侧的塑性金属在挤压作用下不易回填到前进侧, 从而在前进侧搅拌针端部易形成孔洞等缺陷, 且随着转速升高, 会使这种回填不充分加剧, 导致缺陷尺寸有所增大, 如图 2d、图 2e 和图 2f 所示。而图 2g、图 2h 和图 2i 为后退侧 Cold Lap 缺陷的根部形貌, 在 6000 r/min 和 9000 r/min 的转速下后退侧 Cold Lap 缺陷的根部迹线有明显的波动, 说明后退侧金属的挤压回填前进侧下方和搅拌针作用向上流动在相互产生反作用; 在 8000 r/min 转速下其形态更为平缓, 说明转速升高后退侧金属的挤压回填受到限

制,搅拌针机械作用影响后退侧金属向上流动的趋势增大,表现为 Cold Lap 缺陷随着转速的升高向上板

迁移的距离增大,减小有效搭接板厚。

图 3a 所示为搭接接头抗拉载荷及抗拉强度随焊

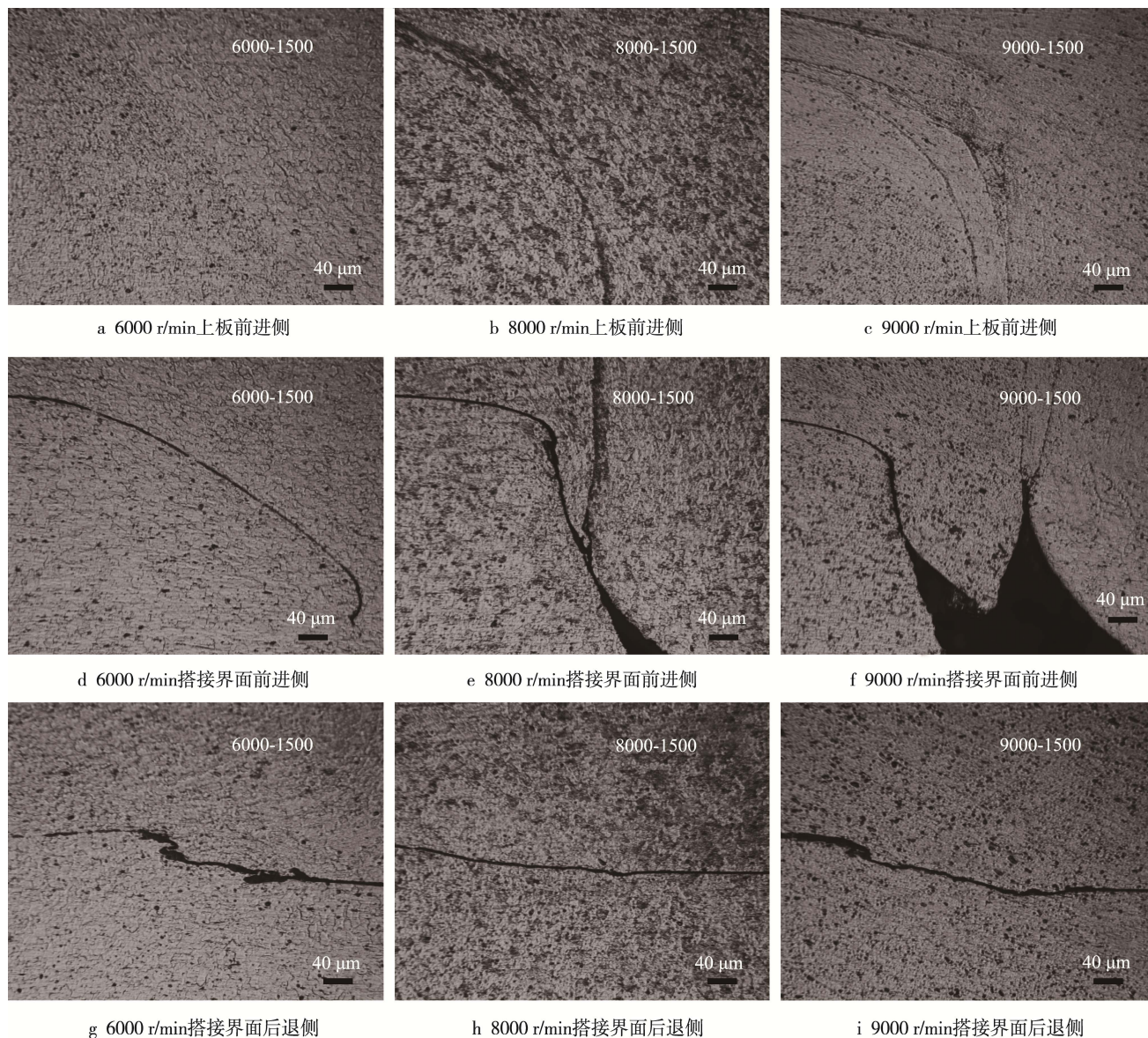


图 2 搭接接头缺陷形貌
Fig.2 Topography of lap joint defect

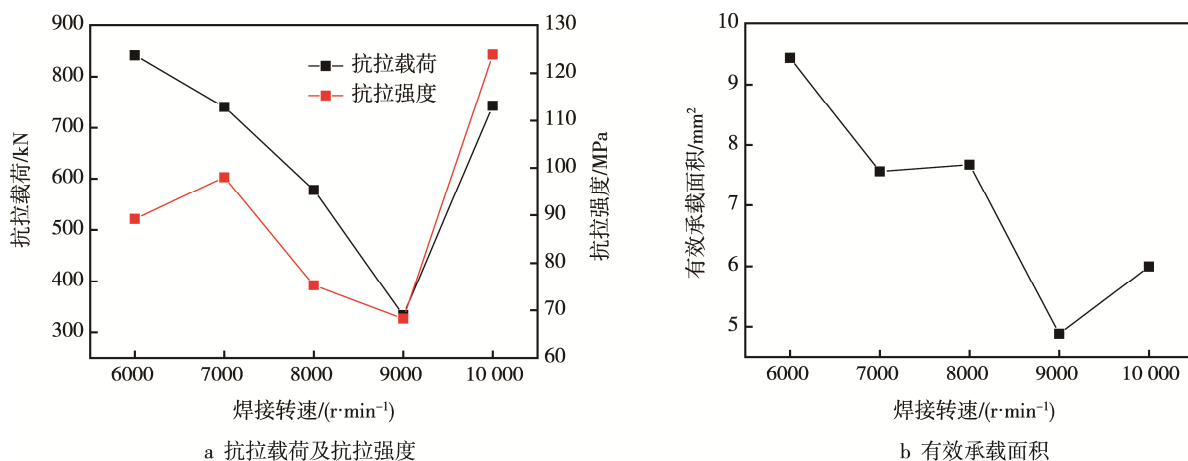


图 3 搭接接头性能随焊接转速变化曲线
Fig.3 Curve of lap joint performance as a function of welding speed

接转速变化曲线,可知随着焊接转速的升高,接头的抗拉载荷先减小后增大,抗拉强度的变化规律为先略微增大后减小到最小再增大,采用 10 000 r/min 转速、1500 mm/min 焊速时,搭接接头拉剪性能最优。这与随着转速升高搭接接头缺陷尺寸先增加,在 10 000 r/min 时缺陷尺寸又减小有关,如图 4 所示。接头缺陷尺寸的变化也使搭接接头有效承载面积随转速升高呈现先减小后增大的规律,如图 3b 所示。

搭接接头存在的孔洞缺陷是影响其接头拉剪断裂行为的重要因素。在 6000~8000 r/min 转速下,由于搭接接头前进侧下方存在孔洞缺陷且 Hook 向下偏转,因而拉剪过程中易在前进侧孔洞缺陷位置发生断裂,如图 5 所示。在 9000~10 000 r/min 的转速下,由于搭接接头后退侧 Cold Lap 缺陷的形态变化,裂纹易沿后退侧缺陷扩展,最后在接头结合界面位置发生断裂。

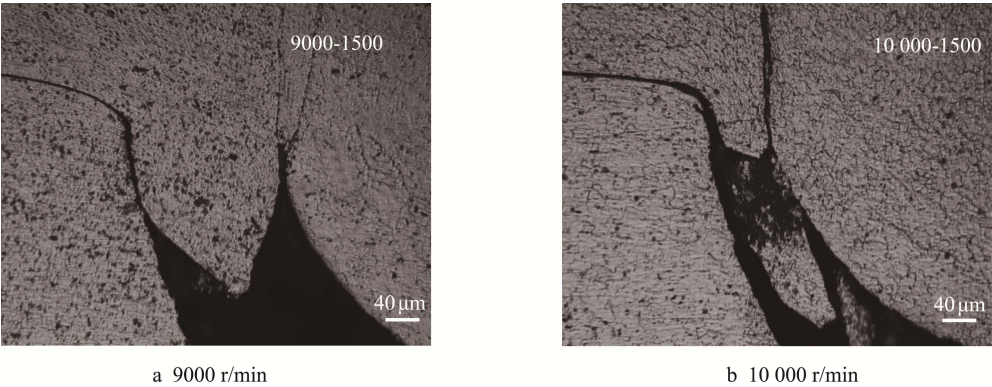


图 4 搭接接头缺陷形貌
Fig.4 Lap joint defect morphology

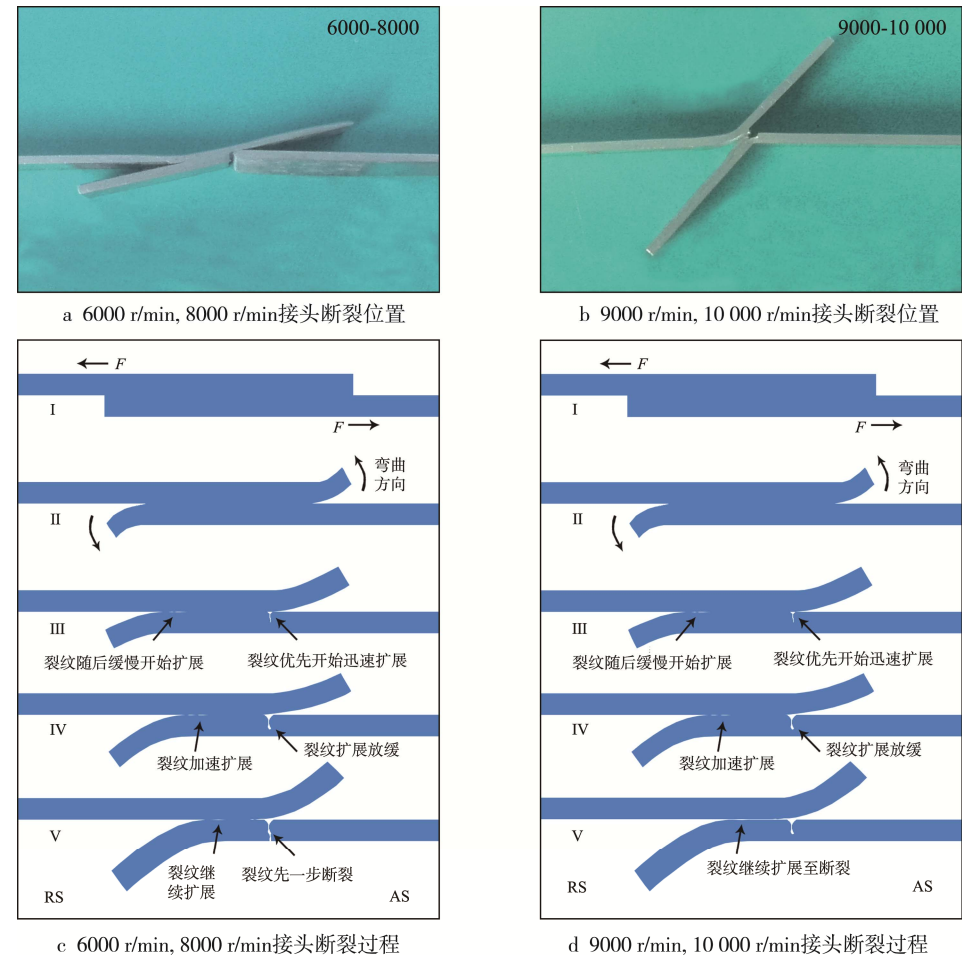


图 5 断裂模式分析
Fig.5 Fracture mode analysis

3 结论

1) 采用无螺纹圆锥搅拌针和高转速(6000~10000 r/min)进行6061铝合金薄板搭接接头搅拌摩擦焊接时,随着转速增大,焊接出现的孔洞缺陷尺寸呈现先增大而后减小的规律。转速为10000 r/min时,搭接接头拉剪强度最高,为123 MPa,接头断裂位置为结合界面处。

2) 采用无螺纹圆锥搅拌针和高转速时,6061铝合金薄板搅拌摩擦搭接接头的断裂存在两种模式,分别为结合界面处断裂或前进侧下板断裂,转速在9000 r/min以上时趋向在结合界面断裂。

参考文献:

- [1] NANDAN R, DEBROY T, BHADOSHIA H K D H. Recent Advances in Friction-stir Welding-Process, Weldment Structure and Properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980—1023.
- [2] SMITH C B, HINRICHS J F, RUEHL P C. Friction Stir and Friction Stir Spot Welding-Lean, Mean and Green[C]// Detroit American Welding Society Sheet Metal Conference, 2004.
- [3] 栾国红. 搅拌摩擦焊助力中国航天[J]. 航空制造技术, 2006(5): I0004—I0006.
LUAN Guo-hong. Friction Stir Welding Helps China Aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(5): I0004—I0006.
- [4] 栾国红, 郭德伦. 搅拌摩擦焊在飞机制造业中的应用[J]. 航空制造技术, 2002(11): 20—24.
LUAN Guo-hong, GUO De-lun. Application of Friction Stir Welding in Aircraft Manufacturing Industry[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2002(11): 20—24.
- [5] YUAN W, CARLSON B, VERMA R, et al. Study of Top Sheet Thinning during Friction Stir Lap Welding of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2012, 17(5): 375—380.
- [6] YAZDANIAN S, CHEN Z W, LITTLEFAIR G. Effects of Friction Stir Lap Welding Parameters on Weld Features on Advancing Side and Fracture Strength of AA6060-T5 Welds[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(3): 1251—1261.
- [7] 柯黎明, 潘际銮, 邢丽, 等. 搅拌摩擦焊焊缝金属塑性流动的抽吸—挤压理论[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 89—94.
KE Li-ming, PAN Ji-luan, XING Li, et al. Pumping-extrusion Theory of Metal Plastic Flow in Friction Stir Welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 89—94.
- [8] WANG Min, ZHANG Hui-jie, ZHANG Jing-bao, et al. Effect of Pin Length on Hook Size and Joint Properties in Friction Stir Lap Welding of 7B04 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(5): 1881—1886.
- [9] LIU Hui-jie, HU Yan-ying, PENG Yao-xing, et al. The Effect of Interface Defect on Mechanical Properties and Its Formation Mechanism in Friction Stir Lap Welded Joints of Aluminum Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 244—254.
- [10] 赵慧慧, 封小松, 熊艳艳, 等. 铝合金超薄板无倾角微搅拌摩擦焊接接头组织性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 47—50.
ZHAO Hui-hui, FENG Xiao-song, XIONG Yan-yan, et al. Microstructure and Properties of Aluminum Alloy Ultra-thin Plate without Tilting Micro-stirred Friction Welded Joints[J]. Transactions of the China Welding Society, 2014, 35(7): 47—50.
- [11] 赵慧慧, 封小松, 熊艳艳, 等. 铝合金6061高转速无倾角微搅拌摩擦焊温度分布研究[J]. 电焊机, 2014, 44(4): 71—77.
ZHAO Hui-hui, FENG Xiao-song, XIONG Yan-yan, et al. Temperature Distribution of Aluminum Alloy 6061 High-speed Non-tilting Micro-stirred Friction Welding[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 71—77.
- [12] 刘奋军, 傅莉, 陈海燕. 铝合金薄板高转速搅拌摩擦焊接接头组织与力学性能[J]. 金属学报, 2017, 53(12): 1651—1658.
LIU Fen-jun, FU Li, CHEN Hai-yan. Microstructure and Mechanical Properties of High-speed Friction Stir Welded Joints of Aluminum Alloy Sheets[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(12): 1651—1658.
- [13] LIU Fen-jun, FU Li, CHEN Hai-yan. High Speed Friction Stir Welding of Ultra-thin AA6061-T6 Sheets Using Different Backing Plates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 219—227.
- [14] LIU Fen-jun, FU Li, CHEN Hai-yan. Effect of High Rotational Speed on Temperature Distribution, Microstructure Evolution, and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6061-T6 Thin Plate Joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(5/6/7/8): 1823—1833.
- [15] FADAEIFARD F, MATORI K A, TOOZANDEHJANI M, et al. Influence of Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded 6061-T6 Al Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1004—1011.