

铝合金薄板 FSLW 界面 hook 沟成形特征及其对接头力学性能的影响

王金锴¹ 毛育青¹ 戴浩² 彭倩群¹ 李智勇² 刘泽宇² 柯黎明¹

(1. 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

2. 江西昌河航空工业有限公司, 景德镇 333002)

摘要: 本文选用 1mm 厚 2A12-T4 铝合金薄板进行搅拌摩擦搭接焊实验, 通过改变焊接速度, 研究其对焊接界面 hook 沟成形特征及接头力学性能的影响。结果表明, hook 沟成形特征受焊接热输入影响较大, 当采用 95mm/min 低焊接速度焊接时, 由于焊接热输入大, 塑性金属沿焊缝厚度方向上发生剧烈的环形迁移运动, 促使 hook 尾部向上弯曲并堆积大量金属氧化物, 有效搭接厚度较小; 增加焊接速度至 118mm/min 时, 焊接热输入降低, 焊核区塑性金属挤压界面冷金属向上迁移的能力下降, 导致 hook 沟尾部开始向下弯曲; 继续提高焊接速度至 235mm/min 时, hook 尾部受到塑性金属向下迁移的力大于向上迁移的力, 迫使其向下弯曲, 但在尾部产生了机械互锁效应, 且焊缝有效搭接厚度明显增大, 所获的接头拉剪力最大, 高达 3.790kN, 其平均抗拉线强度为 400N/mm, 接头呈现明显的韧性断裂; 继续增大焊接速度, 则不利于提高接头成形质量。

关键词: 铝合金薄板; 搅拌摩擦搭接焊; hook 沟; 成形特征; 力学性能

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A

Formation Characteristic of hook at the Interface and Its Influence on Mechanical Properties of Friction Stir Welding Aluminum Alloy Sheet Joints

Wang Jinkai¹ Mao Yuqing¹ Dai Hao² Peng Qianqun¹ Li Zhiyong² Liu Zeyu² Ke Liming¹

(1. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063;

2. Jiangxi Changhe Aviation Industry Co., Ltd., Jingdezhen 333002)

Abstract: In this paper, 2A12-T4 aluminum alloy sheet with a thickness of 1mm were selected for friction stir lap welding (FSLW), and influence of welding speed on hook formation characteristic and mechanical properties of FSLW joints was studied. The results show that, the formation characteristic of the hook is greatly affected by welding heat input. When a low welding speed of 95mm/min is used during FSLW process, as the welding heat input is large, weld plastic metal generates a violent circular migration along the thickness direction, and which causes the end of hook bending upward and a large amount of metal oxides accumulate, resulting in a small effective sheet thickness. When the welding speed is increased to 118mm/min, the welding heat input decreases, and the ability of cold metal to migrate upward decreases at the welding interface, resulting in the hook end beginning to bend downward. Increasing continuously welding speed to 235mm/min, the driving force of migration downward of the hook end is greater than that of the migration upward, causing the hook end bending downward. Moreover, a phenomenon of mechanical interlocking forms at the end, and the effective sheet thickness of the weld significantly increases, which can result in a maximum tensile shearing force of 3.790kN. The average tensile shearing strength is 400N/mm. The fracture mode of the joints presents obvious ductile fracture. It is not conducive to improving the forming quality of the joints with further increasing the welding speed.

Key words: aluminum alloy sheet; friction stir lap welding; hook; formation characteristic; mechanical properties

基金项目: 国家自然科学基金(52****45); 江西省主要学科科学技术带头人培育计划青年人才项目(2021****23028); 江西省杰出青年基金项目(2022****214012); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2****9)。

收稿日期: 2023-08-22

1 引言

1991年,英国焊接研究所(TWI)发明了一种新型的固相焊接技术——搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW),与其他传统的熔焊技术相比,FSW通常能避免低熔点金属元素的烧损、气孔及裂纹等焊接缺陷的产生^[1~5]。由于其具有低成本、无污染、高效率、峰值温度低和接头质量高等优势,目前已成功应用于航空航天、压力容器、汽车制造等领域^[6~10]。作为一种可热处理强化的Al-Cu-Mg系合金,2A12铝合金由于具备密度小、强度高、韧性好等特点,已经被广泛用于航空、航天、汽车等零部件制造^[11]。当采用搅拌摩擦搭接焊(Friction Stir Lap Welding, FSLW)技术焊接铝合金时,接头中常会出现一种沟状缺陷,称其为hook沟^[12]。比如Ghiasvand等人^[13]采用4mm厚的5754铝合金和AZ31镁合金进行FSLW焊,采用旋转速度为600r/min、焊接速度为30mm/min和45mm/min焊接时,接头热机影响区出现了由下板向上板弯曲的hook缺陷,且焊接参数的变化只会影响hook沟缺陷的大小。Robitaille等人^[14]选用3.175mm厚的2024-T3铝合金在不同表面处理状态下进行FSLW焊,当采用600r/min旋转速度、61mm/min焊接速度焊接时,hook沟缺陷均沿搭接界面结合处沿焊核区边界向上板延伸,断裂位置均沿hook沟处断裂,这是由于hook沟处存在大量的氧化物导致其力学性能下降。Liu等人^[15]通过改变焊接工艺对7B04-T74铝合金进行搅拌摩擦搭接焊时,发现在焊核区也产生了明显的hook沟,在旋转速度为800r/min情况下,当焊接速度为50mm/min时,接头前进侧hook沟沿着焊核区边界向上弯曲;而在焊接速度为200mm/min时,则hook沟向焊核区内延伸,并在拉剪测试期间在搅拌区中形成潜在的裂纹扩展路径。综上所述可知,采用不同工艺参数焊接时,接头界面hook沟成形规律并不相同,hook沟形态及几何特征存在明显差异,且对接头力学性能的影响也不明确。

因此,拟以1mm厚的2A12-T4航空铝合金为研究对象,采用不同的焊接速度进行焊接实验,分析不同焊接速度下搅拌摩擦搭接焊接头成形及hook沟的变化特征,研究hook沟局部形态及几何特征变化对接头力学性能及断裂行为的影响。

2 试验过程

采用1mm厚的2A12-T4铝合金板材为研究对象,待焊试板加工尺寸为200mm×100mm×1mm。试验设备选用X53K型立式焊机,搅拌头材料选用4Cr5MoSiV1

热作模具钢,搅拌头轴肩直径为12mm,搅拌针直径为4mm,针长为1.6mm,搅拌针螺纹为左螺纹,螺距为0.5mm,轴肩内凹角为2°。焊接工艺参数选择如下:旋转速度为600r/min,焊接速度范围为95~300mm/min,搅拌头倾角为2°,下压量为0.1mm。为了测量焊接热循环曲线,将K型热电偶插入到搭接界面的距离焊缝中心2mm的位置,在焊接过程中热电偶刚好接触针尖的边缘,焊接过程示意图如图1所示。

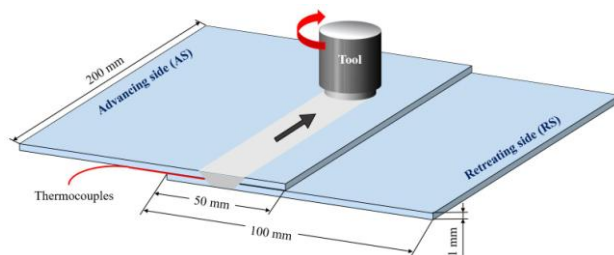


图1 搅拌摩擦焊接过程示意图

焊接完成后,沿垂直于焊接方向的接头中心位置截取金相试样和拉剪性能测试试样,其中拉剪试样尺寸如图2所示。随后,金相试样被磨抛处理后,采用Keller腐蚀剂对其进行腐蚀,接头的宏观形貌采用Zeiss型图像分析仪进行观察,采用Phenom XL扫描电镜对微观组织及断口进行分析。根据国际标准GB/T2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》要求加工拉剪试样,采用WDS-100型万能拉伸试验机对接头力学性能进行测试,测试过程中的加载速度为0.5mm/min。

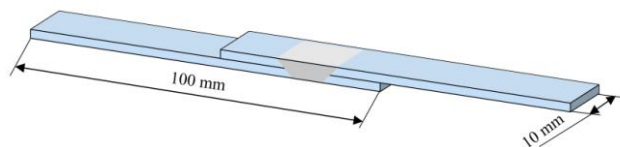


图2 拉剪试样尺寸

3 试验结果与讨论

3.1 横截面形貌

图3为保持600r/min旋转速度不变的情况下,通过改变焊接速度焊接时获得的FSLW接头横截面形貌。由图3可见,所有接头成形良好,横截面上无明显缺陷,且均呈现典型的FSW特征,焊缝由焊核区(Nugget Zone, NZ)、热机影响区(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、热影响区(Heat Affected Zone)、HAZ及母材区(Base Metal, BM)组成。观察焊核区两侧可知,所有接头焊核区的前进侧(Advancing Side, AS)及返回侧(Retreating Side, RS)均产生hook沟。这是由于在搅拌摩擦焊接过程中,焊缝区内的塑化金属在搅

拌针螺纹的驱动下向焊缝底部迁移并挤压周边冷金属,使得搭接界面处冷金属发生迁移,从而形成 hook 沟^[16]。此外,界面处 hook 沟成形受焊接速度差异的影响,前进侧与返回侧的 hook 沟特征变化明显。当焊接速度为 95mm/min 时,前进侧 hook 沟尾部向上弯曲;随着焊接速度增加至 118mm/min 时,前进侧 hook 沟尾部先向上再逐渐向下弯曲;继续增加焊接速度至 235mm/min 时,前进侧 hook 沟尾部直接向下弯曲。与此同时,在搅拌针螺纹的驱动下,焊缝塑化金属从前进侧迁移至返回侧,逐渐在返回侧处产生大量堆积,导致返回侧的 hook 沟向焊核区延伸的距离大于前进侧, hook 沟的迁移高度也大于前进侧。

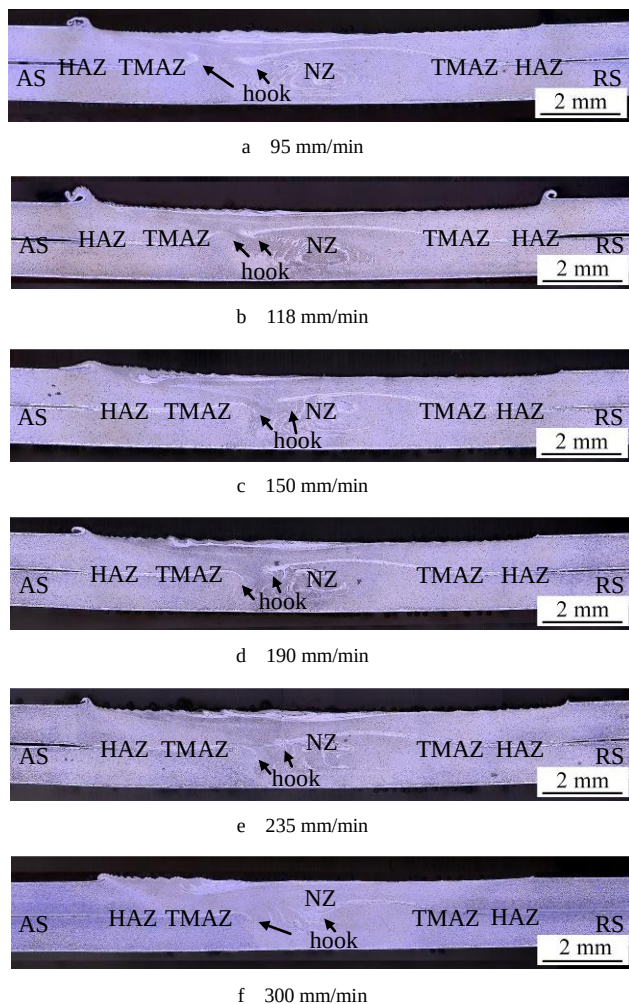


图3 不同焊接速度下 FSLW 接头横截面形貌

另外, hook 沟的产生严重影响了焊缝的有效搭接厚度 (Effective Sheet Thickness, EST) 及结合宽度 (Bonded Width, BW), 如图 4 所示。通过对所有焊缝的 EST 和 BW 进行测量, 统计结果如表 1 所示。发现随着焊接速度的增加, AS-EST 及 RS-EST 的尺寸逐渐增大, AS-hook 由焊核区上层逐渐向下板延伸,

RS-hook 也逐渐远离轴肩区表面。一般情况下, 当焊接速度较低时, 焊接热输入更大, 焊缝金属在搅拌区域的塑性变形程度更大; 随着焊接速度增大, 焊接产热较低, 且高温停留时间减少, 焊缝单位区域内热循环时间减少导致焊缝金属的流动性降低, 迁移的塑性金属总量减少, 焊缝金属沿垂直方向的塑性流动不足, 挤压界面冷金属向周围迁移的距离减小, 导致焊缝的 EST 增加, BW 减小。而焊缝 EST 和 BW 的变化将会对焊接接头的剪切性能产生显著的影响^[14]。

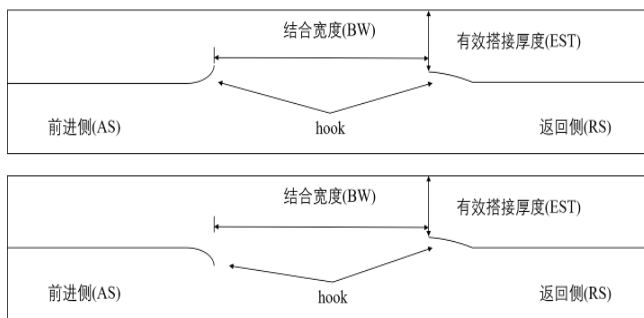


图4 FSLW 接头横截面 hook 沟几何特性示意图

表1 FSLW 接头 hook 沟尺寸统计结果 mm

试样	BW	AS-EST	RS-EST
600-95	1.487	0.519	0.342
600-118	0.478	0.515	0.377
600-150	0.852	0.656	0.393
600-190	0.776	0.748	0.469
600-235	0.509	0.831	0.497
600-300	1.045	0.886	0.555

3.2 hook 沟成形规律

hook 沟为 FSLW 搭接接头出现的普遍现象, 其从搭接焊界面冶金接合边缘开始, 止于热机影响区和焊核区的边界处。一般情况下, hook 沟尾部朝向会随着搅拌针螺纹的方向的变化而变化, 当搅拌针为左螺纹时, hook 沟尾部会向上弯曲; 当搅拌针为右螺纹时, hook 沟尾部会向下弯曲^[17]。图 5 为不同焊接速度条件下获得的界面 hook 沟局部形貌。由图 5 可知, hook 沟在 FSW 的热力作用下发生形变, 当距离焊核区越近时, hook 沟尾部弯曲程度越大, hook 沟两侧的微观结构也有明显区别。根据“抽吸-挤压”理论可知^[18], 在搅拌针左螺纹的驱动下, 焊核区塑性金属会向下流动, 下侧的塑性金属受到上面的挤压而向两边流动。受螺纹的驱动力影响, 上层金属在螺纹的一端形成瞬时空腔, 周围塑化金属将被吸向此空腔, 从而使得高温塑化金属在焊缝厚度方向形成剧烈的环形迁移运动。如图 5a 所示, 采用 95mm/min 低焊接速度焊接时, 焊核区塑性金属发生了环形迁移的剧烈运动, 焊核区底部的向上流动的塑性金

属驱使 hook 沟尾部向上迁移,而上层未被充分破碎的塑性金属在向下迁移时被向上迁移的 hook 沟阻挡,导致在 hook 沟的弯曲处形成堆积。而随着焊接速度的提高至 118mm/min 时,下层的塑性金属材料向上迁移的能力开始降低, hook 沟尾部先向上迁移后又开始向下弯曲。继续增加焊接速度达 235mm/min 时,塑性金属向上迁移的力则远远小于 hook 沟所能阻挡焊缝塑性金属流动的力,导致 hook 沟尾部逐渐向下弯曲,如图 5e 所示。当焊接速度增大到 300mm/min 时,由于焊接热输入显著降低, hook 沟尾部直接垂直向下弯曲。

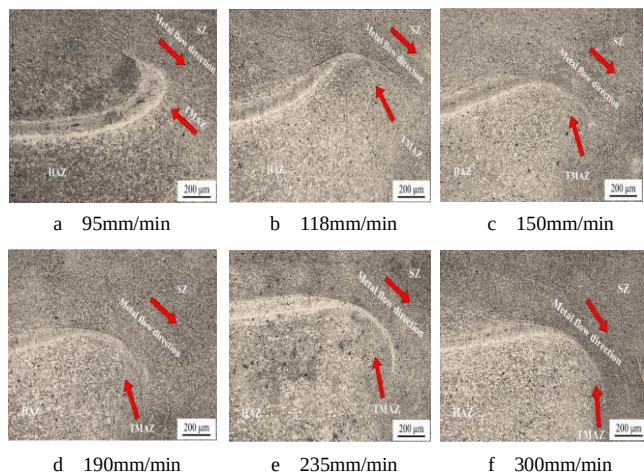


图 5 不同焊接速度下接头 hook 沟形貌特征

图 6 为不同焊接速度条件下搭接界面前进侧热机影响区的热循环曲线。由图 6 可知,随着焊接速度的提高,热机影响区的峰值温度逐渐降低。当焊接速度为 95mm/min 时,峰值温度为 440.9℃,而当焊接速度提高至 300mm/min 时,峰值温度则下降至 341.9℃,高温停留时间也从约 20s 降低至 7s。由此证明,改变焊接速度会显著改变焊接热循环,从而改变焊缝塑性金属的流动状态,影响 hook 沟的形态及几何特性。

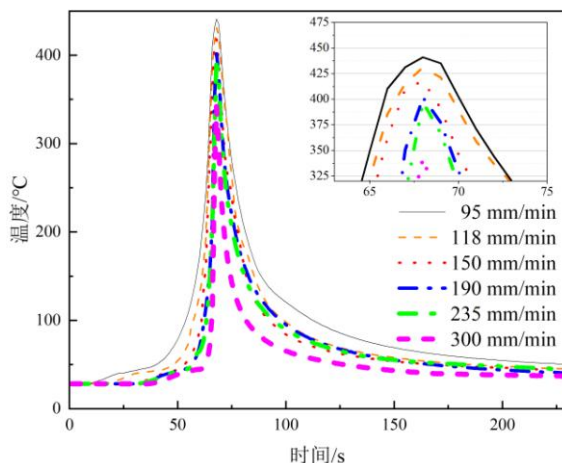


图 6 不同焊接速度接头界面处 TMAZ 处的温度曲线

图 7 为采用焊接速度分别为 95mm/min 和 235mm/min 焊接时所获得的焊缝前进侧 hook 沟显微结构。通过对 hook 沟尾部显微组织观察可见,当焊接速度为 95mm/min 时, hook 沟尾部堆积了大量的氧化铝,且细小的二次相颗粒仅有少量在焊核区存在;而当焊接速度提高至 235mm/min 时, hook 沟尾部的氧化铝消失,在 hook 沟两侧出现大量的二次相颗粒,这将有助于提高其接头的力学性能。

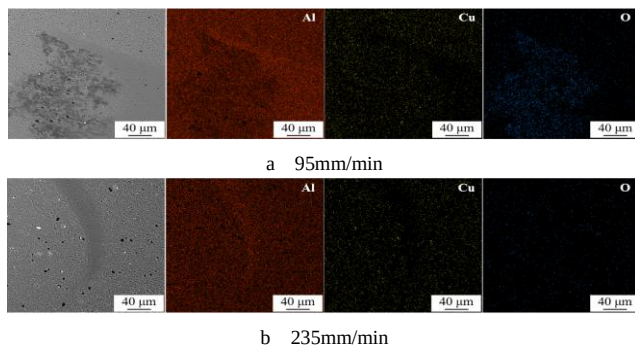


图 7 不同焊接速度下 hook 沟尾部显微结构

3.3 接头力学性能

图 8 为不同焊接速度下对 FSLW 接头的拉剪性能曲线分布。由图 8 可知,当旋转速度保持在 600r/min 不变情况下,随着焊接速度从 95mm/min 增加到 235mm/min 时, FSLW 搭接接头的拉剪载荷逐渐增大;继续增加焊接速度至 300mm/min 时,接头的拉剪载荷开始减小。其中,当采用 600r/min 旋转速度、235mm/min 焊接速度的焊接时,获得的 FSLW 接头的拉剪载荷最大,达 3.790kN,其平均抗拉线强度为 400N/mm。而采用 95mm/min 焊接速度焊接时获得的接头拉剪力最小,仅为 3.370kN,其平均抗拉线强度降至 347.7N/mm。

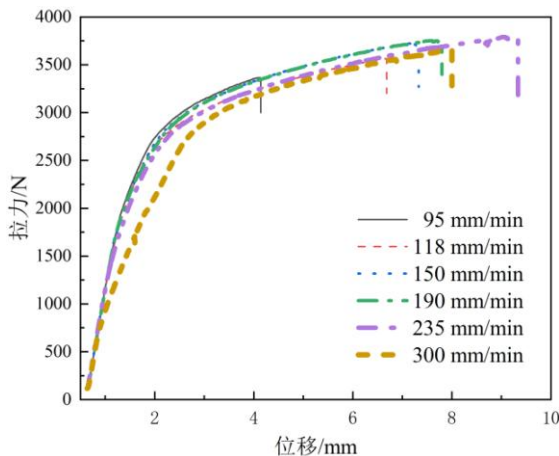


图 8 不同焊接速度下获得的接头拉剪曲线

图 9 为不同焊接速度条件下的接头拉伸试样断裂位置。由图 9 可知,采用 95mm/min 低焊接速度焊接时,裂纹沿着 hook 沟尾部逐渐向焊缝表面延伸,直至断裂,如图 9a 所示。随着焊接速度增加,逐渐向下层金属板材弯曲,前进侧的 EST 逐渐增大,随着加载载荷逐渐增大,搭接界面处冶金结合区边缘裂纹沿 hook 沟扩展,回弯状的 hook 沟尾部将阻挡裂纹的进一步扩展^[19, 20],断裂位置则向上层或下层的热机影响区和热影响区转移。如图 9f 所示,当焊接速度增大至 300mm/min 时,由于焊接热输入低,焊核区内塑性金属及氧化物未充分破碎,焊核区及轴肩区堆积大量未发生动态再结晶的氧化物,从而导致接头的力学性能下降^[21, 22]。

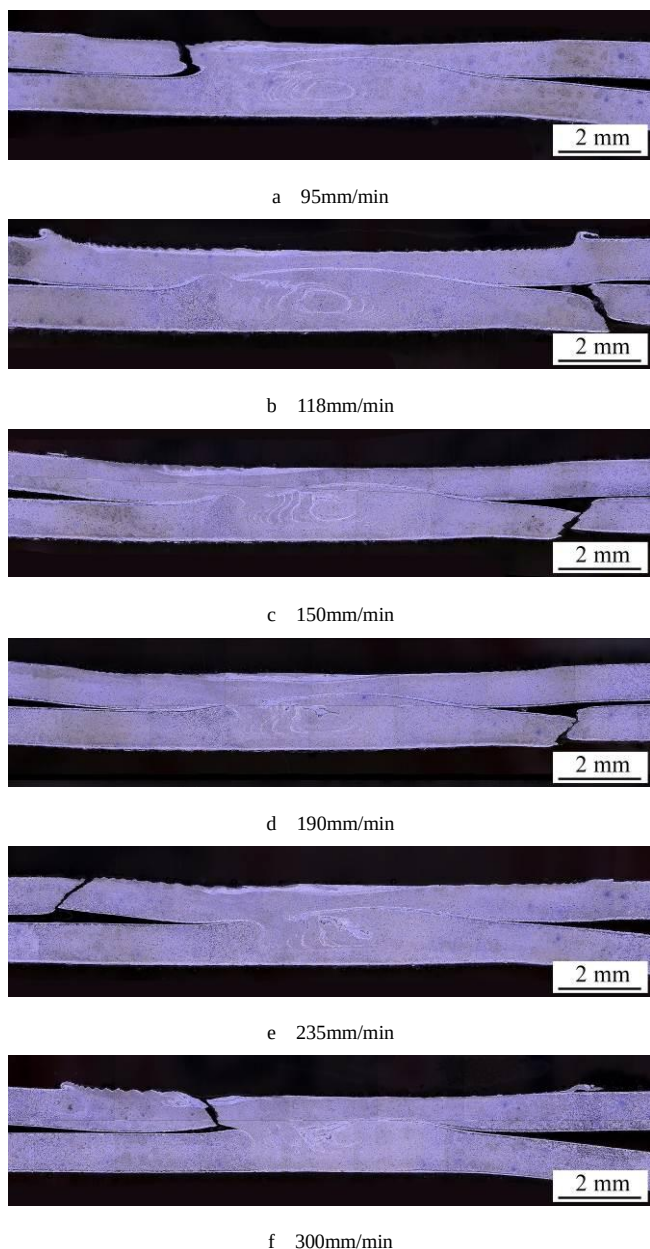


图 9 不同焊接速度下接头的断裂位置

通过对最低和最高拉剪力的两组试样的断口形貌进行观察,结果如图 10 所示。由图 10a 可知,搭接界面处冶金结合区有大量的撕裂棱出现,断口主要为沿晶断裂,而靠近焊缝表面的金属出现大量的韧窝结构,为韧-脆混合型断裂。当焊接速度为 235mm/min 时,在接头断口表面观察到大而深、比较密集的韧窝结构,表现为典型的韧性断裂,如图 10b 所示。

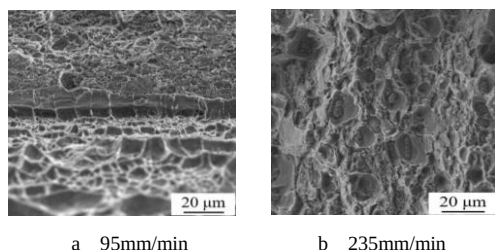


图 10 不同焊接速度下接头断口微观形貌

图 11 为焊接界面处具有不同形态 hook 沟的接头断裂示意图。由图 11 可知,试样在拉剪过程中,由于拉力方向的偏心所导致焊缝区产生了扭矩,搭接接头绕焊核区发生轻微旋转。如图 11a 所示,当 hook 沟尾部向上弯曲时,在焊核区扭矩的作用下,裂纹源在搭接界面冶金结合处边缘开始萌生,沿着 AS-hook 延伸扩展至 hook 尾部尖端处,接头的主要受力位置由焊核区转变为 AS-hook 尖端位置至焊缝表面的 EST 位置,当载荷持续增长时,裂纹从搭接界面冶金结合区边缘开始向焊核区内部逐渐延伸,最终在此处断裂。而当 hook 沟向下弯曲时,由于在拉剪受力状态下 hook 尾部回弯处产生了机械互锁的现象,在拉伸过程中焊缝区所产生的扭矩对焊核区未产生显著影响,接头的受力位置则为焊核区,如图 11b 所示。由此表明,当 hook 向下弯曲时,有利于提高 FSLW 接头的拉剪性能。

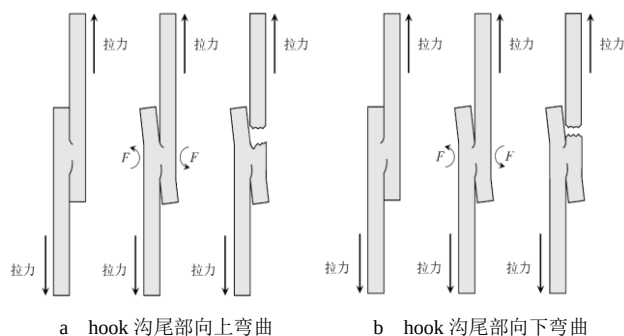


图 11 不同 hook 沟形态的接头断裂示意图

4 结束语

本文以 2A12-T4 铝合金薄板为研究对象,通过改变

焊接速度,研究了搅拌摩擦搭接焊界面 hook 成形规律及其对接头力学性能的影响,主要结论如下:

a. 当焊接速度为 95mm/min 时,焊接界面前进侧的 hook 沟尾部向上弯曲,随着焊接速度增加至 118mm/min 时,前进侧 hook 沟尾部先向上再逐渐向下弯曲,继续增加焊接速度至 235mm/min 时, hook 沟尾部直接向下弯曲,焊缝的有效搭接厚度逐渐增加。

b. hook 沟成形特征受焊接工艺参数及塑性金属流动的影响较大。低焊接速度导致焊接热输入大,塑性金属沿焊缝厚度方向上发生剧烈的环形迁移运动,促使 hook 尾部向上弯曲并堆积大量金属氧化物,有效搭接厚度较小;增加焊接速度会降低焊接热输入,焊核区塑性金属挤压界面冷金属向上迁移的能力下降,导致 hook 沟尾部开始向下弯曲;继续提高焊接速度至 235mm/min 时, hook 尾部受到塑性金属向下迁移的力大于向上迁移的力,迫使其向下弯曲并产生机械互锁,且有效搭接厚度明显增大。

c. 采用 235mm/min 焊接速度所获得接头的拉剪力最大,高达 3.790kN,平均抗拉线强度为 400N/mm,接头断裂形式为韧性断裂,这是由此接头界面 hook 沟形态特征及有效搭接厚度决定的。

参考文献

- 1 Meng Xiangchen, Huang Yongxian, Cao Jian, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. Progress in Materials Science, 2021, 115: 100706
- 2 Leitao C, Arruti E, Aldanondo E, et al. Aluminium-steel lap joining by multipass friction stir welding[J]. Materials and Design, 2016, 106: 153~160
- 3 Mao Yuqing, Yang Ping, Ke Liming, et al. Microstructure evolution and recrystallization behavior of friction stir welded thick Al-Mg-Zn-Cu alloys: influence of pin centerline deviation[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35: 745~756
- 4 Wan Long, Huang Yongxian, Lv Zongliang, et al. Effect of self-support friction stir welding on microstructure and microhardness of 6082-T6 aluminum alloy joint[J]. Materials and Design, 2014, 55: 197~203
- 5 Yang Q, Li X, Chen K, et al. Effect of tool geometry and process condition on static strength of a magnesium friction stir lap linear weld[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 2463~2478
- 6 Li Zhengwei, Ji Shude, Ma Yinan, et al. Fracture mechanism of refill friction stir spot-welded 2024-T4 aluminum alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 1925~1932
- 7 Zhang Wenyan, Mao Yuqing, Yang Ping, et al. Effect of Welding Speed on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 2198 Al-Cu-Li Alloy Joints[J]. Materials, 2022, 15: 969

- 8 Silva H B, Zepon G, Bolfarini C, et al. Refill friction stir spot welding of AA6082-T6 alloy: Hook defect formation and its influence on the mechanical properties and fracture behavior[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 773: 138724
- 9 Shah L H, Huda N, Esmaili S, et al. Structural morphology of Al-Mg-Si alloy friction stir welds through tool eccentricity[J]. Materials Letters, 2020, 275: 128098
- 10 Zhang Z H, Li W Y, Feng Y, et al. Global anisotropic response of friction stir welded 2024 aluminum sheets[J]. Acta Materialia, 2015, 92: 117~125
- 11 Mao Yuqing, Yang Ping, Zhang Wenyan, et al. Improving tensile shear properties of friction stir lap welded dissimilar Al/Mg joints by eliminating hook defect and controlling interfacial reaction[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36: 257~267
- 12 Peng Pai, Wang Wen, Zhang Ting, et al. Effects of interlayer metal on microstructures and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar joints of magnesium and aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117362
- 13 Ghiasvand A, Ranjbarnodeh E, Mirsalehi S E. The microstructure and mechanical properties of single-pass and double-pass lap joint of Al 5754H-11 and Mg AZ31-O alloys by friction stir welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 6023~6038
- 14 Robitaille B, Provencher P R, St-Georges L, et al. Mechanical properties of 2024-T4 AlClad aluminum FSW lap joints and impact of surface preparation[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 105979
- 15 Liu Huijie, Zhao Yunqiang, Hu Yanying, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir lap welding joint of Alclad 7B04-T74 aluminum alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78: 1415~1425
- 16 Yue Yumei, Li Zhengwei, Ji Shude, 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: 671~675
- 17 柯黎明, 潘际銮, 邢丽, 等. 搅拌针形状对搅拌摩擦焊焊缝截面形貌的影响[J]. 焊接学报, 2007(5): 33~37
- 18 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
- 19 Li Qinghua, Ma Zhongwei, Ji Shude, et al. Effective joining of Mg/Ti dissimilar alloys by friction stir lap welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116483
- 20 Zhuo Xuebin, Yao Haining, Chen Ke, et al. Friction stir lap welding of AZ31 and TC4: Mechanical properties and bonding mechanism[J]. Materials Characterization, 2023, 195: 112507
- 21 邢丽, 魏鹏, 宋骁, 等. 轴肩下压量对搅拌摩擦焊搭接接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 15~19
- 22 冯天涛, 张晓辉. 三维搅拌摩擦焊传热与塑性流动分析模型[J]. 焊接学报, 2013, 34(7): 105~108+118