搅拌针长度及搭接位置对6005A-T6对搭接接头性能的影响

邓守鑫 唐鸿洋 王东辉 李欢 金文福 王乐洋

（辽阳象屿铝业有限公司，辽阳 111003）

摘要：针对3 mm 6005A-T6铝合金对搭接搅拌摩擦焊工艺，探究了不同搅拌针长度及搭接位置对搅拌摩擦焊对搭接接头性能的影响。结果表明：对搭接接头内部质量良好，当搅拌针长度一定时，搭接板位于后退侧时的焊缝拉断载荷较搭接板位于前进侧时高；搅拌针长度对对搭接接头内部金属流动状态影响较大，当搭接板位于后退侧时，hook缺陷与S线相连，当搭接板位于前进侧时，hook缺陷呈现沿焊核区及热机影响区分界线上勾状形貌，当搭接板位置一定且位于后退侧时，搅拌针长度为3 mm时的焊缝拉断载荷最大，为28 592.9 N，搅拌针长度为5 mm时的焊缝拉断载荷最小，为23 514.7 N。

关键词：hook缺陷 6005A-T6铝合金 前进侧 后退侧

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260018

Effect of Stirring Needle Length and Lap Position on Performance of 6005A-T6 on Lap Joint

Deng Shouxin, Tang Hongyang, Wang Donghui, Li Huan, Jin Wenfu, Wang Leyang

(Liaoyang XMXYG Aluminium Co., Ltd., Liaoyang 111003)

Abstract: For the friction stir welding of 3 mm thick 6005A-T6 aluminum alloy in a lap joint configuration, this paper investigates the effects of varying pin lengths and lap positions on the performance of the welded joints. The results show that the internal quality of the lap joint is sound. When the length of the stirring needle is constant, the tensile load of the weld when the lap plate is on the back side is higher than that when the lap plate is on the forward side. However, the length of the stirring needle has a great influence on the metal flow state inside the butt joint. When the butt plate is located on the backward side, the hook defect is connected to the S line; when the butt plate is located on the forward side, the hook defect presents a hook shape along the welding core area and the boundary line of thermal influence; when the butt plate is located at a certain position and on the backward side, the hook defect is connected to the welding core area. The maximum breaking load of the weld is 28 592.9 N when the length of the stirring needle is 3 mm, and the minimum breaking load of the weld is 23 514.7 N when the length of the stirring needle is 5 mm.

Key words: Hook defect, 6005A-T6 aluminum alloy, Advancing side, Retreating side

1 前言

搅拌摩擦焊作为一种可有效控制焊接变形的固相连接技术，广泛应用于新能源汽车电池托盘及水冷电机壳体制造[1]。与传统熔化焊焊接相比，搅拌摩擦焊可有效消除熔化焊焊接过程中所产生的飞溅、气孔、夹杂或未焊透等缺陷，大幅提升了新能源汽车铝合金结构件的生产效率及成品率。

作者简介：邓守鑫（1993—），女，工程师，学士学位，研究方向为铝合金焊接技术开发。

参考文献引用格式：

邓守鑫, 唐鸿洋, 王东辉, 等. 搅拌针长度及搭接位置对6005A-T6对搭接接头性能的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2026(8): 22-26.

DENG S X, TANG H Y, WANG D H, et al. Effect of Stirring Needle Length and Lap Position on Performance of 6005A-T6 on Lap Joint[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 22-26.

其中,搅拌摩擦焊对搭接接头广泛应用于电池托盘边框与底板封焊结构,该类对搭接接头会产生一种沟状hook缺陷,hook缺陷普遍存在于搅拌摩擦焊搭接及对搭接接头中。吴志明等[2]对6082-T651铝合金进行了搅拌摩擦对搭接焊接试验,结果表明,搭接面位于前进侧或后退侧时,hook缺陷形态不尽相同。汪认等[3]对双面搅拌摩擦焊接对搭接接头性能进行研究,结果表明,双面搅拌摩擦焊可消除对搭接接头所产生的hook缺陷,且当焊接速度为100 mm/min时,接头的拉断载荷最大为14 kN,当焊接速度低于100 mm/min或高于150 mm/min时,对搭接接头断裂模式不同。

为探究搅拌针长度对搅拌摩擦焊对搭接接头性能的影响,本文通过改变搅拌针长度分析其对对搭接接头质量的具体影响,旨在为铝合金搅拌摩擦焊对搭接接头结构的生产制造提供理论依据和技术支撑。

2　研究材料与方法

2.1　研究材料

本文旨在研究搅拌针长度对6005A-T6铝合金搅拌摩擦对搭接接头性能的影响,搭接板采用厚度为3 mm的6005A-T6挤压铝合金板材,被搭接板采用厚度为10 mm的6005A-T6挤压铝合金板材,使用专用二维搅拌摩擦焊设备进行对搭接焊接,2种板材化学成分相同,如表1所示。焊接时,选用长度分别为3 mm、4 mm、5 mm的右螺纹搅拌针进行对搭接焊接,搅拌针轴肩具有同心圆内凹式导流槽,便于焊接轴肩位置的塑性金属在焊缝区流动。

表1　6005A-T6铝合金板材化学成分(质量分数)　%

元素	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
质量分数	0.65	0.12	0.12	0.56	0.23	0.12	0.08	0.05	余量

2.2　研究方法

在试验中,搅拌针与母材成2.5°前倾角,焊接时压入量约为0.2 mm,为避免不同焊接工艺参数对焊缝性能的影响,将焊接工艺参数控制为旋转速度为600 r/min,焊接速度为200 mm/min,相关工艺参数设置如表2所示。

表2　焊接工艺参数

试验序号	搅拌针长度/mm	旋转速度w/r·min^{-1}	行进速度v/mm·min^{-1}	搭接板位置
1-1	3	600	200	前进侧(AS)
1-2				后退侧(RS)
2-1	4	600	200	前进侧(AS)
2-2				后退侧(RS)
3-1	5	600	200	前进侧(AS)
3-2				后退侧(RS)

在焊前将厚度为10 mm的被搭接板铣出深度为3 mm的台阶,并将厚度为3 mm的6005A-T6搭接板置于台阶处,如图1所示。焊前使用碗刷将待焊处氧化膜去除,并用酒精充分擦拭,尽可能降低氧化膜对焊缝性能的影响。当采用不同长度的搅拌针焊接时,分别将搭接板置于前进侧(Advancing Side,AS)及后退侧(Retreating Side,RS),焊后去除头、尾各50 mm焊缝后截取力学性能及低倍金相试样进行对比分析。

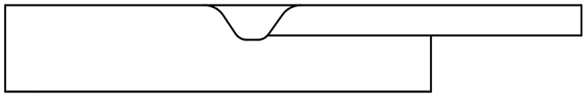
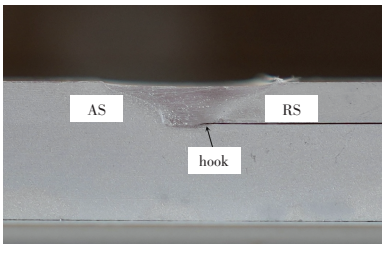


图1　焊接结构示意

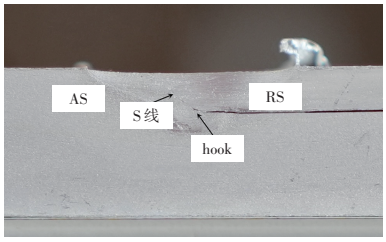
3　研究结果及分析

3.1　搭接板位置对接头形貌的影响

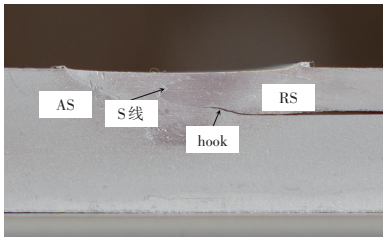
图2、图3所示为搅拌针长分别为3 mm、4 mm、5 mm时,搭接板分别位于后退侧、前进侧时的焊缝截面低倍金相图,由图可知,对搭接板材在焊后发生了原始界面迁移现象,即产生了hook缺陷。无论搅拌针长度如何变化,对搭接接头焊缝内部均存在hook缺陷,且hook缺陷既可能出现在前进侧,也可能出现在后退侧。



(a)搅拌针长度3 mm

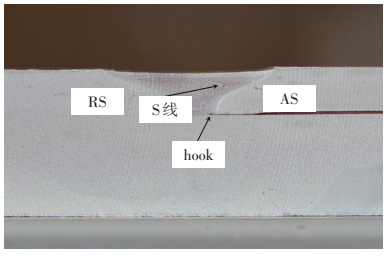


(b)搅拌针长度4 mm

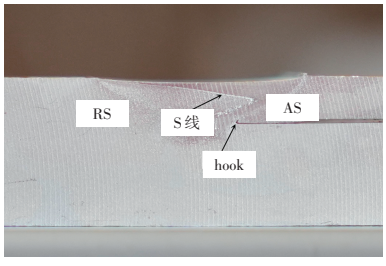


(c)搅拌针长度5 mm

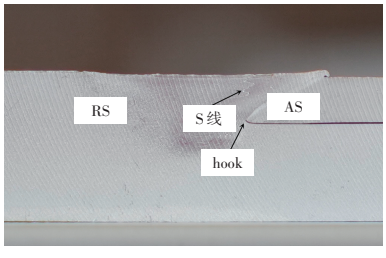
图2 搭接板位于后退侧低倍金相图



(a)搅拌针长度3 mm



(b)搅拌针长度4 mm



(c)搅拌针长度5 mm

图3 搭接板位于前进侧低倍金相图

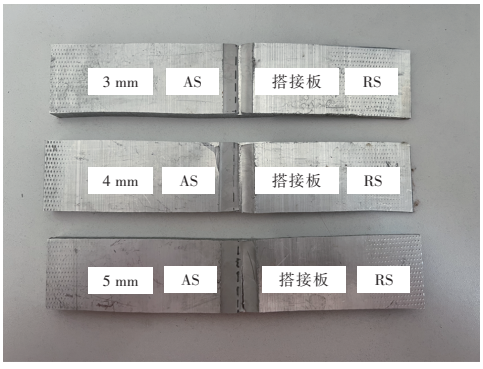
当搭接板位于后退侧时,hook缺陷呈现向上部焊核区延伸或向下(被搭接板)延伸的形貌,这是由于当搭接板位于后退侧时未受到搅拌针前进侧的切削作用,而是不断受到前进侧切削、搅拌、旋转的塑性金属的挤压作用,此时后退侧金属的流动情况较为复杂,该部分塑性金属在焊缝内部及热机影响区分界线位置的迁移情况具有不稳定及不确定性[4-10]。由于本文选用的搅拌针带有右螺纹,且搅拌针长度不一,焊接时焊核区塑性金属的流动情况不同,因此,当搭接板位于后退侧时,hook缺陷可呈现向上或向下延伸以及延伸趋势较为平缓的微观形貌。当搭接板位于前进侧时,前进侧焊缝金属受到右螺纹搅拌针的切削作用而向上迁移,因此,前进侧hook缺陷呈现向焊核区与热机影响区分界面上部延伸的上勾状形貌,大幅减小了对搭接接头的有效焊缝承载面积,后退侧hook缺陷则由于上述原因呈现向上或向下延伸以及平缓延伸趋势的微观形貌,消失于被搭接板侧,对有效焊缝承载面积影响较小。

此外,由图2可知,hook缺陷除延伸趋势较为平直外,还与对搭接接头内部的S线相连,这是由于焊前部分氧化膜残留,在搅拌针的切削、打碎及旋转作用下与焊缝区塑性金属一起流动,并由后退侧向前进侧移动,此时后退侧塑性金属同时发生界面迁移,产生向焊核区延伸的hook缺陷,故hook缺陷与S线相连;由图3可知,hook缺陷呈上勾状,未与焊核区的S线相连,这是由于前进侧的金属受到搅拌针切削作用后的流向是向上的,沿着焊核区与热机影响区边界向上延伸,故不与焊核区的S线相连。

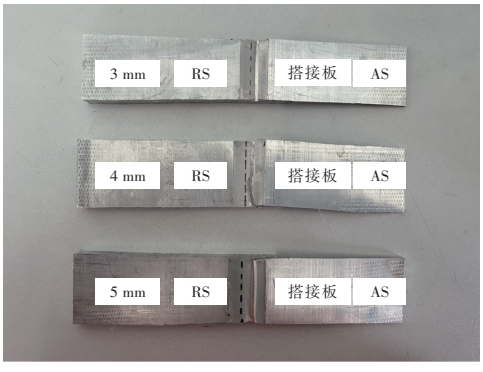
3.2 搅拌针长度及搭接板位置对接头性能的影响

对上述焊缝进行力学性能检测,图4所示为上述不同搭接板所在位置的焊缝力学性能检测试件断裂情况,虚线位置为焊核中心区域。由图4a可知,当搭接板位于后退侧时,力学拉伸断裂试样断裂位置靠近焊核中心区域,如图4b所示,当搭接板位于前进侧时,力学拉伸断裂试样的断裂位置则更加靠近焊核区与热机影响区的分界面位置,这是由于当搭接板位于后退侧时,后退侧hook缺陷与焊核区的S线相连,见图2。hook缺陷与S线作为接头的薄弱环节,成为了力学拉伸性能断裂位置,而当搭接板位于前进侧时,前进侧在焊核区与热机影响区分界面产生的hook缺陷大幅减小了焊缝的有效承载面积,见图3,且hook缺陷对焊缝性能的影响大于S线对焊缝性能的影响,导致了焊缝

在进行力学拉伸性能测试时,前进侧的上勾状hook缺陷成为起裂点,进而成为力学拉断试验的断裂位置。



(a)搭接板位于后退侧



(b)搭接板位于前进侧

图4　焊缝力学性能断裂图

图5所示为不同长度搅拌针焊接时,搭接板分别位于后退侧及前进侧时的力学拉伸性能对比,由图5可知:当搅拌针长度相同时,搭接板位于后退侧时的力学性能高于搭接板位于前进侧时的力学性能,这是由于搭接板位于前进侧时产生的hook缺陷会大幅减小焊缝的有效承载面积(图3);而当搭接板位置均相同时,搅拌针长度为3 mm时的力学拉断载荷最高为28 592.9 N,针长为5 mm时的力学拉断载荷最低为23 514.7 N,这是由于搅拌针长度为3 mm且搭接板位于后退侧时,焊缝区域金属受到前进侧切削、旋转作用的金属相对于采用5 mm搅拌针时的少,因此,塑性金属流动的量较少,故搭接面产生的界面迁移量少,后退侧的hook缺陷延伸趋势较为平直,而当搅拌针长度为5 mm时,金属流动量大,因此界面迁移也大,hook缺陷的延伸趋势也较大,见图2,故针长为3 mm时对焊缝的有效承载面积削弱程度较小,焊缝的拉断载荷最高。

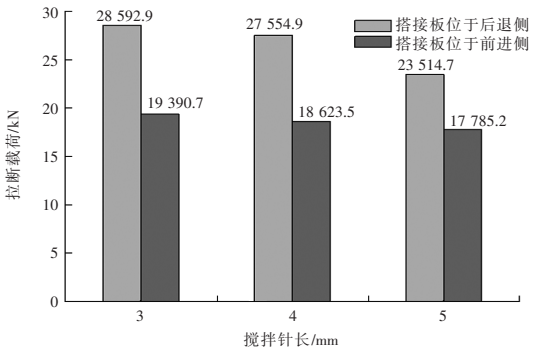


图5　焊缝力学性能对比

4　结论

a. 对搭接接头的hook缺陷既可出现在前进侧,也可出现在后退侧:当搭接面位于后退侧时,hook缺陷可呈现向焊核区的向上或向下延伸以及延伸趋势较为平缓的微观形貌;当搭接面位于前进侧时,hook缺陷呈现向焊核区与热机影响区分界面上部延伸的上勾状形貌。

b. 对搭接接头内部前进侧hook缺陷对焊缝质量影响大于后退侧hook缺陷,前进侧hook缺陷会大幅减小焊缝的有效承载面积。

c. 搭接板位置为后退侧时的拉断载荷大于搭接位置为前进侧时的拉断载荷,且当搅拌针长度为3 mm时,搭接板位置为后退侧时的拉断载荷最大为28 592.9 N。

参考文献:

[1] 沈其明, 徐伍刚, 谷晗, 等. 铝合金水冷电机外壳的搅拌摩擦焊工艺流程[J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(2): 76-80.

[2] 吴志明, 吴坚定, 马正斌, 等. 铝合金搅拌摩擦焊对搭接接头Hook缺陷研究[J]. 航空制造技术, 2014(16): 57-60+64.

[3] 汪认, 刘雪松. 双面搅拌摩擦焊消除搭接接头的钩状缺陷研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(3): 77-81.

[4] 侯艳喜, 徐荣正, 李慧, 等. A7N01P-T4铝合金对-搭接结构的搅拌摩擦焊技术研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 95-100.

[5] 杨小宾. 铝合金薄板高转速搅拌摩擦焊搭接接头组织性能及界面迁移行为研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.

[6] 尹启朋, 高嵩, 安少杰, 等. 异种铝合金搅拌摩擦焊搭接工艺试验研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(1): 8-11.

[7] 王钟德. 异种铝合金搅拌摩擦焊搭接接头疲劳寿命研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

[8] 戴俊良, 张琦, 赵庆军, 等. 铸造铝合金电池箱体搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 汽车工艺师, 2023(11): 30−35.

[9] 刘洋, 许鸿吉, 秦志恒. 不同偏移量对 6005A−T6 对搭接搅拌摩擦焊接头力学性能及疲劳性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 95−100.

[10] 柳先, 罗成, 王金凤. 5082 铝合金板搅拌摩擦焊搭接接头性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(7): 54−60.

AT&M