

搅拌针对 FSSW-B 接头界面组织与力学性能的影响

刘文阔¹, 谢吉林^{1,2}, 陈玉华^{1,3}, 汪洪伟¹, 张体明¹, 王善林¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(3. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院, 重庆 401331)

摘要: 铝/镁异种金属复合结构在结构轻量化领域具有极大的应用价值。采用新型搅拌摩擦点焊-钎焊技术 (friction stir spot welding-brazing, FSSW-B) 对铝/镁异种金属进行搭接点焊, 同时与搅拌摩擦钎焊 (friction stir spot brazing, FSSB) 工艺进行对比, 研究焊接工具中搅拌针的存在对接头界面组织与力学性能的影响。FSSW-B 接头界面中间层分为明显上下 2 个部分, 上层界面主要为 MgZn₂ 相, 下层界面主要为 Mg₇Zn₃ 相; FSSB 接头主要为 MgZn₂ 相。接头的断裂模式主要为界面剥离断裂, 由于搅拌针的存在, 出现了眉状断裂模式。搅拌针的存在提高了接头的抗拉剪性能与疲劳性能, FSSW-B 接头的最大抗拉剪力为 7600 N, 疲劳极限为 3366.6 N; 搅拌针使抗拉剪性能提升了 53.5%, 使疲劳性能提升了 11.4%; FSSW-B 中搅拌针的存在增加了接头疲劳性能的分散性。

关键词: 搅拌针; 搅拌摩擦点焊-钎焊; 界面组织; 力学性能; 疲劳极限

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)07-2468-10

铝合金和镁合金具有优异的综合性能^[1-2], 这 2 种合金可以大大减轻构件的质量, 在汽车轻量化、高铁、航空航天领域具有较大的应用前景。但是, 由于铝/镁的物理性能和化学性能差异较大, 用传统的熔焊方法对铝/镁进行焊接时, 在焊缝中容易形成气孔、裂纹、夹杂等缺陷, 导致接头性能下降^[3-5]。因此, 对铝/镁异种合金焊接技术的研究具有一定的现实意义。

搅拌摩擦焊是一种固态焊接技术, 在焊接过程中, 主要包括旋转、插入、热塑化、焊接几个步骤, 搅拌针插入待焊工件中, 在搅拌头的旋转以及轴肩压力的作用下实现金属的连接^[6]。焊缝金属未经过熔化的过程, 适合异种金属的焊接, 能有效避免冶金熔化过程产生的金属间化合物。并且搅拌摩擦焊是一种操作简单, 无污染、无烟尘、无辐射的焊接方法。钎焊可以实现大面积复合板焊接, 焊接效率高, 操作方便, 焊接工艺易于控制^[7], 异种金属间添加钎料可以有效调控界面金属间化合物^[8]。搅拌摩擦点焊-钎焊 (friction stir spot welding-brazing, FSSW-B) 是一种新型的焊接技术, 主要应用于异种金属焊接, 该技术结合了搅拌摩擦焊与钎焊 2 种焊接方式的优势。

对铝/镁合金在采用搅拌摩擦焊技术的同时采用钎焊加以辅助, 中间层钎料在一定程度上可以避免

铝/镁母材直接接触产生金属间化合物, 从而对接头造成影响^[9-11]。采用搭接形式对铝/镁进行搅拌摩擦点焊, 同时在铝/镁中间层预置钎料, 利用摩擦热进行钎焊, 在钎料熔化以及轴肩压力的作用下, 铝合金、钎料、镁合金之间发生冶金结合。FSSW-B 技术为铝/镁异种金属的连接提供了良好的解决方案。

搅拌针对搅拌摩擦焊过程有较大影响^[12], 主要体现在焊接完成后, 匙孔的存在影响接头的性能。一方面, 搅拌针的存在增加了材料塑性流动, 有利于提高接头的性能; 另一方面, 搅拌针破坏了母材结构, 导致接头力学性能降低。另外, 除了拉伸断裂外, 疲劳断裂是金属材料失效的一种主要形式^[13], 在搅拌摩擦点焊接头中, 搅拌针形成的匙孔导致接头界面组织不均匀, 在该位置容易形成应力集中, 产生疲劳裂纹源。而对搅拌针对于接头性能影响的过程和具体因素缺少相关的研究。

本工作在铝/镁合金 FSSW-B 焊接的基础上, 设置对照组试验, 采用没有搅拌针的焊接工具对板材进行焊接, 即搅拌摩擦钎焊 (friction stir spot brazing, FSSB)。通过对比 2 种焊接方式在接头宏观形貌、界面微观组织、抗拉剪性能以及疲劳性能的区别, 研究搅拌针的存在对 FSSW-B 接头组织与性能方面的影

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51865035, 5210535); 江西省科技合作专项 (20212BDH81007); 江西省教育厅科技项目 (DA202103162)

作者简介: 刘文阔, 男, 1995 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: liuwenkuo2015@163.com

响。通过对接头静力学性能与动力学性能的分析, 为铝/镁异种金属连接在不同服役条件下的工程应用做指导。

1 实验

采用 FSSW-B 技术对 2A14-T4 铝合金和 AZ31 镁合金进行搭接点焊, 由于铝合金比镁合金具有更好的塑性流动性, 将铝合金板材放在上层更容易获得良好的接头^[14]。2 种板材的尺寸均为 80 mm×40 mm×3mm, 采用厚度为 0.5 mm、纯度为 99.99 % 的锌箔作为中间层钎料。为了对比搅拌针的存在对接头组织与性能的影响, 采用相同的工艺参数对板材进行 FSSB 焊接。

焊接试验所使用的设备是由奈尔斯西蒙斯赫根赛特中机有限公司生产的 CMTJ2068 型搅拌摩擦焊机; 宏观形貌观察采用东莞市天勤仪器有限公司生产的 SVS3020 型号影像式精密测量仪; 微观组织观察以及断口观察采用日立 SU1510 钨灯丝扫描电子显微镜, 扫描电镜配备了牛津 INCA X-act 能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS); 采用美国 FEI Talos F200X 场发射透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM); 抗拉剪性能测试采用美特斯 Exceed40 系列微机控制电子万能试验机; 疲劳性能测试采用英斯特朗公司生产的 8872 型号电液伺服疲劳试验机。

2 结果与分析

2.1 接头横截面宏观形貌

采用有针搅拌头和无针搅拌头搭接点焊接头的宏观形貌如图 1 所示, 两者的区别是 FSSW-B 接头有匙孔, 并存在明显的搅拌区 (SZ)。FSSW-B 接头搅拌区附近区域受到搅拌针的作用比较明显, 中间层界面的锌钎料在焊接过程中被挤出, 上下板材直接接触, 没有形成较好的钎焊界面; 热力影响区 (TMAZ) 在焊接过程中形成较好的点焊-钎焊界面, 是接头界面形成的主要区域; 热影响区 (HAZ) 位于轴肩影响的边缘位置, 对于中间层钎料, 存在熔化与未熔化的过渡区域。没有搅拌针的 FSSB 接头, 仅存在热力影响区和热影响区, 界面连接比较连续, 点焊界面的形状近似圆形。

2.2 接头界面处微观组织

由于接头热力影响区的界面处成形较好, 选择该位置进行微观组织观察, 结果如图 2 所示。FSSW-B 接头的微观组织如图 2a 所示, 界面中间层分为明显的上下 2 部分, 上层界面与铝板接触, 比较平缓, 下层界面呈现出波浪形状。对界面处的位置点进行 EDS 分析(表 1), 中间层界面产生 Mg-Zn 系化合物^[15], 根据

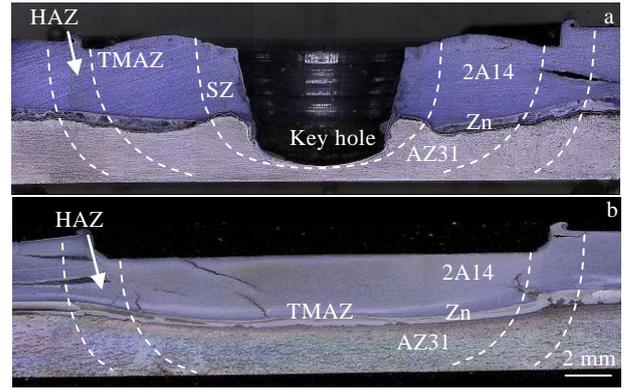


图 1 搭接点焊接头横截面宏观形貌

Fig.1 Macro morphologies of cross section of lap spot welded joints with (a) and without (b) stirring pin

元素原子分数分析可得, 上层界面存在的相为 $MgZn_2$ 以及 Al 的固溶体相, 下层界面为 Mg_7Zn_3 相, 其中存在 $MgZn$ 第二相。当焊接工具不存在搅拌针, 即 FSSB 焊接, 接头的微观组织如图 2b 所示, 中间层界面相比于 FSSW-B 接头的厚度较小, 下侧的波浪界面更加明显。中间层界面厚度与搅拌头的设计有关, 由于搅拌针的存在, 在轴肩位置设计了凹槽, 用于固定受搅拌针影响溢出的母材, 因此轴肩凹槽位置对板材下压距离较小, 对界面影响较小。而不带搅拌针的搅拌头, 轴肩近似平面, 在下压力为 0.5 mm 时, 整个平面对板材的下压距离较大, 焊接过程中, 锌钎料发生熔化, 部分母材位置发生塑化, 下压力对中间层界面影响更加强烈。因此, 在下压力相同时, FSSB 接头界面厚度较薄, 且界面更加不平整。另外, FSSB 接头界面分层不明显。对下界面进行放大, 如图 2c 所示, 根据能谱分析(表 1)可知, 中间层界面主要为 $MgZn_2$ 相, 下侧相存在较薄的一层 Mg_7Zn_3 , 其中也析出了 $MgZn$ 第二相。

为了对界面处微观组织进一步分析, 试验采用透射电镜对焊缝接头的界面处进行观察。TEM 视野位于中间层的下界面, 即 Mg-Zn 界面。图 3 为接头界面处 TEM 明场像及选区电子衍射花样。图 3a 左侧为锌钎料一侧, 右侧为镁板材, 可以清楚看出钎料的熔化。对界面处进一步放大, 如图 3b 所示, 除了锌钎料外, 在中间层还生成了另一种相, 在 TEM 视野下呈现出暗场。对特定区域进行选区电子衍射 (SAED) 分析, 选取位置如图 3b 所示, 相应的选区电子衍射花样如图 3c-3e 所示, 根据花样标定可知, 锌钎料一侧的基体组织为 Mg_7Zn_3 , 生成的第二相为 $MgZn$, 而右侧组织为 Mg 相, 进一步证实了前文的论述。

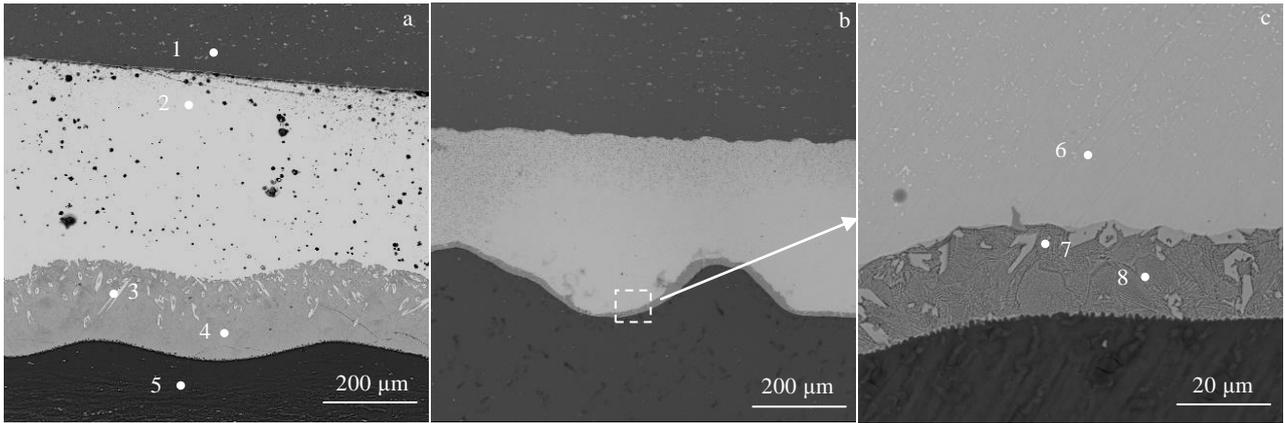


图 2 焊接接头界面微观组织

Fig.2 Microstructure of welded joint interface of FSSW-B joint (a) and FSSB joint (b), the enlarged view of marked area in Fig.2b (c)

表 1 图 2 中不同位置点 EDS 分析结果及可能相

Table 1 EDS analysis result and possible phases of different positions in Fig.2(at%)

Position	Al	Mg	Zn	Possible phases
1	98.96	1.04	-	Al
2	15.81	27.39	56.8	MgZn ₂ +Al solid solutions
3	5.25	48.37	46.38	MgZn
4	4.37	68.22	27.41	Mg ₇ Zn ₃
5	2.15	97.12	0.73	Mg
6	6.91	29.89	63.02	MgZn ₂ +Al solid solution
7	4.56	49.34	46.10	MgZn
8	2.92	68.42	28.66	Mg ₇ Zn ₃

焊接过程中，在力与热的作用下，中间层锌钎料首先与下侧镁板发生反应，生成 MgZn₂ 化合物，随着反应继续进行，在下界面处生成 Mg₇Zn₃ 相，并析出 MgZn 第二相。另外在反应过程中，上侧铝板中的元素向中间扩散，形成铝的固溶体相。当焊接工具不存在搅拌针时，由于采用相同的焊接工艺，缺少了搅拌针进入板材产生的热与力的作用，焊接过程中反应温度相对较低，刚达到 Mg₇Zn₃ 相生成条件时焊接结束，因此 Mg₇Zn₃ 相只有较薄的一层。

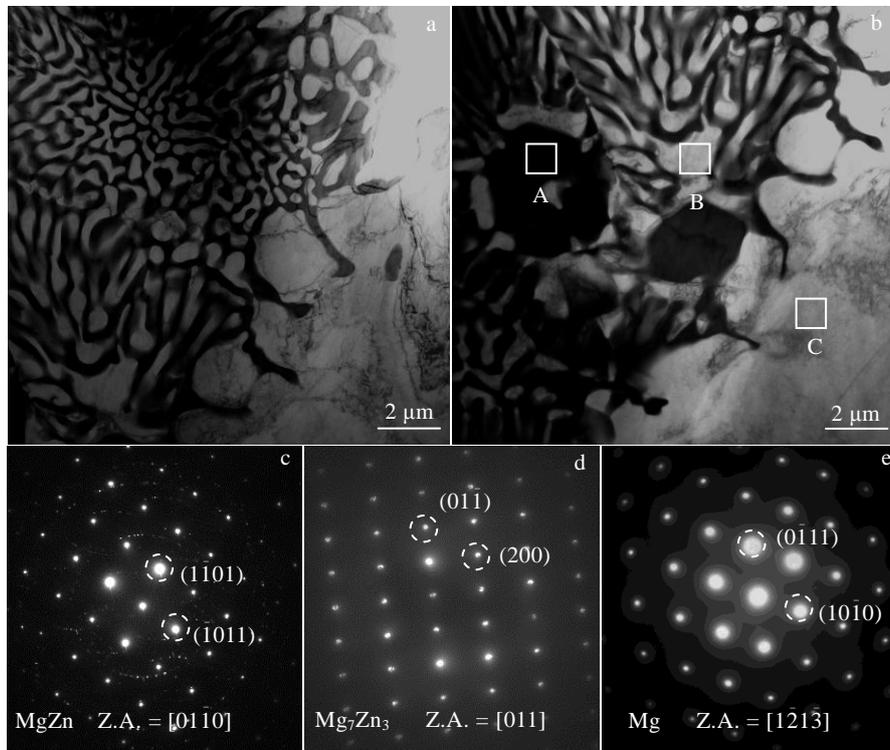


图 3 接头界面处 TEM 明场像及 SAED 花样

Fig.3 TEM bright field images (a-b) of welded joint lower interface and SAED patterns of area A (c), area B (d), and area C (e) in Fig.3b

2.3 接头的抗拉剪性能

对于搭接点焊，被焊板材不在同一水平面，因此添加与板材等厚的垫片进行力学性能测试，图 4 为接头抗拉剪性能的测试试样示意图。使用拉剪力的大小表征载荷^[16]。由于点焊接头无法使用引伸计，因此使用试验过程中的位移表征应变量。FSSW-B 接头与 FSSB 接头的拉剪力-位移曲线如图 5 所示。在相同的工艺参数下，带有搅拌针的 FSSW-B 接头的最大抗拉剪力大于 FSSB 接头。在拉剪过程中，接头出现了明显的二次断裂。进行多次试验，取平均值作为接头的最大抗拉剪力，如表 2 所示，FSSW-B 接头的平均最大抗拉剪力为 7600 N，FSSB 接头的最大抗拉剪力为 4950 N。搅拌头的存在增强了接头的抗拉剪性能，对抗拉剪性能的提升率为 53.5%。

焊接过程中，搅拌区的锌钎料被挤出，铝镁板材直接接触，产生 Al-Mg 系金属间化合物^[17-18]，在拉剪过程中，该位置直接受力发生断裂，而热力影响区的点焊-钎焊连接区域未发生失效，产生藕断丝连的效果，因此，接头会发生二次断裂。由于搅拌针的存在，在轴肩没有接触板材时，搅拌针首先进入板材，在旋转下压过程中，产生热量，相当于轴肩接触板材前有预热处理。因此，在整个焊接过程中，FSSW-B 热输

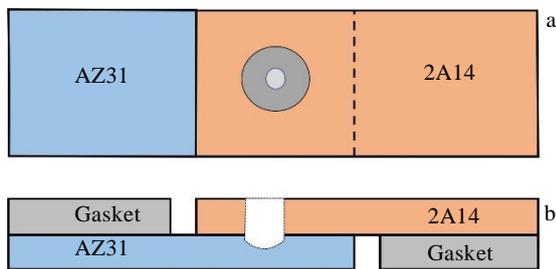


图 4 拉剪试验与疲劳试验测试试样示意图

Fig.4 Schematic diagram of test specimens for tensile shear test and fatigue test: (a) tip view and (b) side view

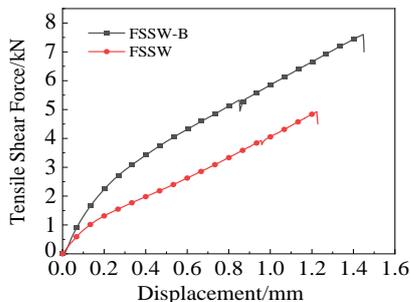


图 5 焊接接头拉剪力-位移曲线

Fig.5 Tensile shear force-displacement curves of welded joints

表 2 焊接接头拉剪性能

Welding method	Specimen	Maximum tensile shear force/N	Average value/N
FSSW-B	1	7720	7600
	2	7450	
	3	7630	
FSSW	1	4830	4950
	2	5100	
	3	4920	

入高于 FSSB，界面反应更加完全，产生了有利于界面结合的 Mg-Zn 系化合物。另外，搅拌针作用于板材产生匙孔的同时，影响搅拌区的材料发生塑性流动，在该位置产生类似机械结合，增加了界面连接强度。因此，搅拌针的存在有利于增强接头的抗拉剪性能。

2.4 接头的疲劳性能

接头疲劳性能试验的应力水平根据 GB/T 3075—2008《金属材料—疲劳试验—轴向力控制方法》标准制定。疲劳试验最大载荷选取焊接接头最大抗拉剪力的 80%、60%、40%、20%，以 20%为梯度进行选取，在疲劳试验过程中，补充了最大载荷为最大抗拉剪力 70%的应力水平。每个应力水平选取 3 个试样，直至达到设定的疲劳循环次数（ 10^5 次）或者焊接接头发生失效停止试验。

本试验选用幂函数表达式对焊接接头疲劳性能 S-N 曲线进行拟合，并采用最小二乘法对拟合结果进行验证。疲劳试验的波形选择正弦波，频率为 20 Hz，应力比为 0.1，用力的大小表征应力载荷，疲劳试验结果如表 3 所示。

表 3 FSSW-B 接头疲劳试验结果

Test number	Maximum load/N	Cycle number	Median value
1		16 580	
2	6080	14 321	16 580
3		25 630	
4		27 634	
5	5320	36 748	27 634
6		26 993	
7		42 620	
8	4560	73 582	42 620
9		39 267	
10		10^5	
11	3040	10^5	10^5
12		94 581	
13		10^5	
14	1520	10^5	10^5
15		10^5	

对于疲劳性能测试结果，常用式 (1) 的幂函数表达式分析：

$$S^m N = C \tag{1}$$

其中， S 为应力水平； N 为疲劳循环次数； m 和 C 是 2 个常数，与材料的性质、试样的状态和加载方式有关，由疲劳试验确定。简化式 (1) 得到式 (2)：

$$S = aN^b \tag{2}$$

其中： $a = C^{\frac{1}{m}}, b = -\frac{1}{m}$

由于疲劳试验中，当循环周次达到 10^5 时强制停止试验，因此对表 3 中最后 3 组试验数据不进行拟合处理。以表 3 中循环周次为横坐标，最大载荷为纵坐标，根据式 (2) 对疲劳寿命进行非线性拟合，拟合得到的 $S-N$ 曲线如图 6 所示。

FSSW-B 接头在较高的疲劳载荷应力下，疲劳寿命有一定的分散性，在较低应力水平下，得到较一致疲劳寿命。相关系数 $r=0.86118$ ，幂函数表达式为：

$$S = 156\ 503.487\ 85N^{-0.331\ 51} \tag{3}$$

根据式 (3) 和 $N = 10^5$ ，可以计算得出铝/镁 FSSW-B 接头的疲劳极限为 3443.3 N。

采用最小二乘法对拟合结果进行验证，对式 (2) 两边取对数，可得：

$$\lg S = A + B \lg N \tag{4}$$

根据最小二乘法原理，式中 A 、 B 值的表达式为：

$$B = \frac{\sum \lg S_i \lg N_i - \frac{1}{n} (\sum \lg S_i) (\sum \lg N_i)}{\sum (\lg S_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \lg N_i)^2} \tag{5}$$

$$A = \frac{1}{n} \sum \lg N_i - \frac{B}{n} \sum \lg S_i \tag{6}$$

根据表 3 的疲劳试验数据以及最小二乘法公式，可以计算得出 $A = 5.373\ 09$ ， $B = -0.371\ 18$ ，对式 (4) 有：

$$\lg S = 5.373\ 09 - 0.371\ 18 \lg N \tag{7}$$

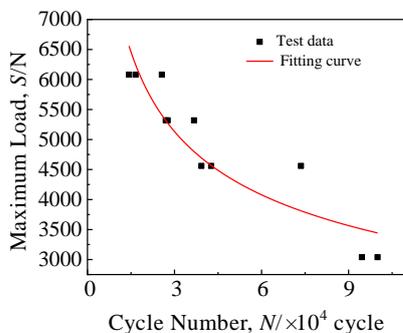


图 6 FSSW-B 接头幂函数拟合的 $S-N$ 曲线

Fig.6 Fitting $S-N$ curve by power function for FSSW-B joint

FSSW-B 接头双对数 $\lg S-\lg N$ 曲线如图 7 所示。根据式 (7) 和 $N=10^5$ ，可由最小二乘法得到铝/镁 FSSW-B 接头的疲劳极限为 3289.9 N。

综上所述，通过幂函数拟合和最小二乘法计算得到的铝/镁 FSSW-B 接头的疲劳极限分别为 3443.3 和 3289.9 N。利用幂函数拟合和最小二乘法 2 种方法得到的材料参数 m 与 C 在数值上比较接近，因此具有一定的可信度^[19]。本试验中，将采用 2 种方法得到的平均数作为铝/镁 FSSW-B 接头的疲劳极限，即 3366.6 N。

对 FSSB 接头的疲劳试验采用与 FSSW-B 接头一样的参数，应力循环模式选择正弦波形，频率为 20 Hz，应力比为 0.1，疲劳试验最大载荷选取焊接接头最大抗拉剪力的 80%、70%、60%、40%、20%。在疲劳试验过程中，对每个应力水平选取 3 个试样，当试验达到设定的疲劳循环次数 10^5 次或者焊接接头发生失效停止试验。疲劳试验的结果如表 4 所示。

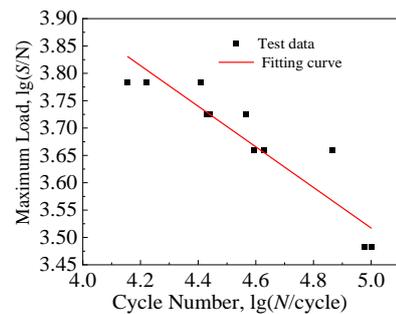


图 7 FSSW-B 接头最小二乘法计算的双对数 $\lg S-\lg N$ 曲线
Fig.7 Fitting double logarithm $\lg S-\lg N$ curve by least square method for FSSW-B joint

表 4 FSSB 接头疲劳试验结果

Table 4 Fatigue test results of FSSB joint			
Test number	Maximum load/N	Cycle number	Median value
1		17 644	
2	3960	10 752	12 397
3		12 397	
4		45 908	
5	3465	51 030	47 222
6		47 222	
7		81 620	
8	2970	10^5	89 023
9		89 023	
10		10^5	
11	1980	10^5	10^5
12		10^5	
13		10^5	
14	990	10^5	10^5
15		10^5	

采用相同的方法对疲劳试验数据进行幂函数拟合，拟合得到的 $S-N$ 曲线如图 8 所示。相关系数 $r = 0.919 57$ ，幂函数表达式为：

$$S = 14\ 244.541\ 71N^{-0.134\ 42} \tag{9}$$

根据式 (8) 和 $N = 10^5$ ，可以计算得出 FSSB 接头的疲劳极限为 3030.7 N。

为了进一步估算接头的疲劳极限，采用最小二乘法对数据进行计算，得出的函数表达式为：

$$\lg S = 4.177\ 89 - 0.139\ 8\lg N \tag{10}$$

根据最小二乘法的结果得到双对数 $\lg S-\lg N$ 曲线，如图 9 所示。

根据公式 (9) 和 $N = 10^5$ ，可以计算得出 FSSB 接头的疲劳极限为 3012.2 N。由幂函数拟合和最小二乘法计算得到的材料疲劳性能相关系数 m 和 C 在数值上比较接近，取 2 种拟合方式的均值作为 FSSB 接头的疲劳极限，即 3021.5 N。

2.5 接头的疲劳断口

在 FSSW-B 接头疲劳试验中，接头主要出现了 2 种断裂模式，分别为界面剥离断裂和眉状断裂。图 10a 和 10b 为界面剥离断裂，图 10c 为眉状断裂。界面剥离断裂发生在铝板和镁板连接的中间层界面处，沿着连接处的界面发生剥离。由于在搭接焊接过程中添加了锌钎料

料，界面剥离断裂分为 2 种类型，一种是在上界面发生剥离，如图 10a 所示，在疲劳试验过程中，铝/锌界面处发生剥离，锌钎料主要附着在镁板侧；另一种是在中间层界面下侧发生剥离，如图 10b 所示，断裂主要发生在镁/锌界面处，锌钎料在铝板和镁板侧都有附着。眉状断裂发生在镁板母材，断裂发生在焊点边缘，并贯穿整个板材，如图 10c 所示，根据断裂处的形状，称这种断裂为眉状断裂。在疲劳试验过程中，未发现断裂发生在铝板母材侧，基本上都在镁板侧发生断裂。

统计疲劳试验结果可以发现，界面剥离断裂主要发生在高应力疲劳试验中，眉状断裂主要发生在低应力试验中。疲劳试验的最大载荷选取接头最大抗拉剪力的 80%、70%、60% 时主要失效断裂模式为界面剥离断裂，在最大载荷选取接头最大抗拉剪力的 60% 和 40% 时，发现了眉状断裂的试样。在疲劳试验开始时，界面处为主要受力部位，在焊点的匙孔附近以及界面缺陷处产生应力集中，随着疲劳试验的进行，这些位置容易产生裂纹，并随着裂纹的扩展最终发生界面失效，在界面处断开。

疲劳试验中 FSSB 接头的断裂模式为界面剥离断裂，断口的宏观形貌如图 11 所示。在试验过程中，发现了上界面剥离断裂（图 11a），以及下界面剥离断裂（图 11b），未发现眉状断裂。与 FSSW-B 接头相比，在上层铝板侧没有搅拌针留下的圆孔，下侧界面比较平整，中间位置没有搅拌针底部的影响区域。剥离断裂的形式与 FSSW-B 接头相同，一种是从上界面直接剥离，断裂发生在锌钎料与铝板的结合层；另一种是从焊点边缘开始撕裂，最后沿着接头界面发生剥离。

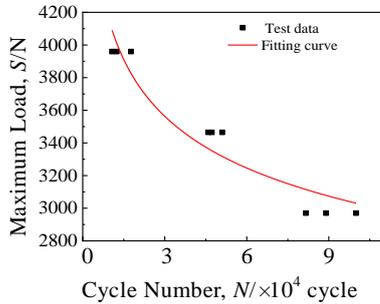


图 8 FSSB 接头幂函数拟合的 $S-N$ 曲线

Fig.8 Fitting $S-N$ curve by power function for FSSB joint

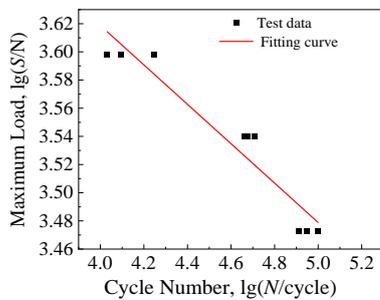


图 9 FSSB 接头最小二乘法计算的双对数 $\lg S-\lg N$ 曲线

Fig.9 Fitting double logarithm $\lg S-\lg N$ curve by least square method for FSSB joint

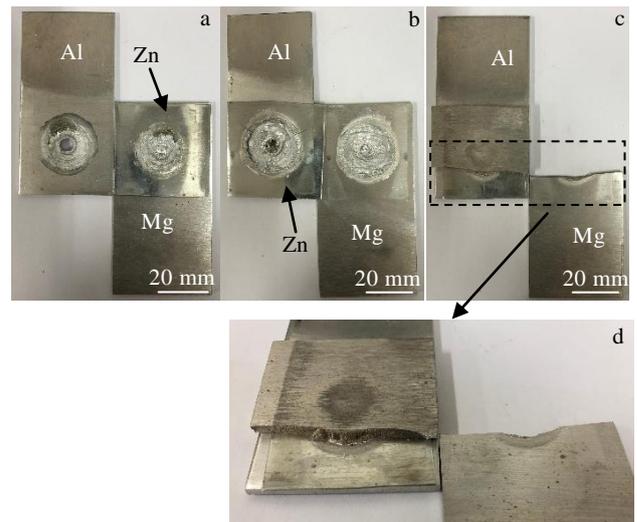


图 10 FSSW-B 接头疲劳断口宏观形貌

Fig.10 Fatigue interfacial peeling fracture morphologies of FSSW-B joint at the upper (a) and the lower (b) intermediate layer; eyebrow shaped fracture morphologies (c, d)

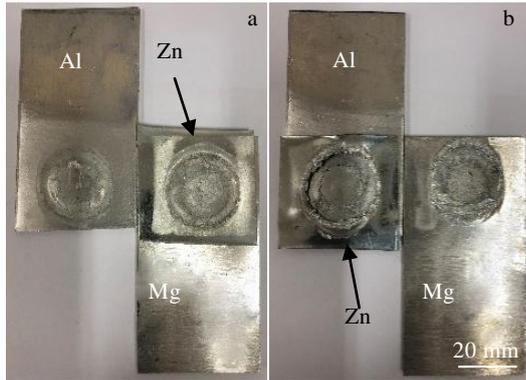


图 11 FSSB 接头疲劳断口宏观形貌

Fig.11 Macro morphologies of FSSB joint fatigue interfacial peeling fracture at the upper (a) and the lower (b) intermediate layer

由于搅拌针的影响，FSSW-B 接头在焊点附近产生匙孔，在靠近搅拌区的范围内，受到热和力的作用比较明显，界面处组织成分不均匀，当该区域产生裂纹并发生扩展失效时，界面剥离从中间产生，并迅速延伸到整个界面，发生了图 10a 中的上界面剥离断裂。焊点边缘位置为界面连接处与未连接处的分界线，在疲劳试验中受到循环载荷的影响较大，当此处发生裂纹扩展时，界面从外侧向内侧剥离，并从界面中间断裂，在宏观上为下界面剥离断裂，如图 10b 所示。

当疲劳试验的最大载荷较小时，部分 FSSW-B 接头试样发生了眉状断裂，在眉状断裂断口放大图 10d 中可以发现，断裂发生在下侧镁板处，并经过焊点边缘附近。疲劳载荷较小时，虽然界面处发生了应力集中，但没有发生裂纹扩展；在界面剥离之前，由于焊点边缘位置镁板侧受到热输入的影响较大，镁板与界面接触的位置组织发生变化，该位置在长时间的疲劳应力循环下发生失效，裂纹慢慢从母材边缘位置扩展到母材内部，随着循环次数的增加，最终在母材处发生失效断裂，并且眉状断裂发生在较低载荷且疲劳循环次数较长的情况下，此时未达到发生界面失效的条件，试样首先在母材发生断裂失效。

而对于 FSSB 接头未发现眉状断裂，认为主要原因有两方面：首先，没有搅拌针的作用，热输入不足使得界面反应没有生成更有利于界面结合的化合物，接头中间层厚度较薄，在接头受力过程中，界面更容易失效发生界面剥离断裂；另外，由于没有搅拌针的热与机械搅拌作用破坏母材结构，因此 FSSB 接头不像 FSSW-B 接头那样母材处更容易发生应力集中，在界面没有发生失效时，母材发生断裂。因此，搅拌针的影响主要是在较

低载荷时，由于焊接过程中搅拌针的存在，使得接头容易发生眉状断裂。

根据断口的对称互补性，本试验选择下侧靠近镁板母材的断口进行观察。图 12a~12c 为 FSSW-B 接头上界面剥离断裂断口宏微观形貌，在宏观形貌照片中可以发现，靠近匙孔的位置界面撕裂较为严重。图 12b 显示了界面撕裂位置，右侧出现了明显的撕裂凹坑，由于界面断裂较为剧烈，断裂面发现了二次裂纹。图 12c 中可以观察到明显的界面撕裂，在撕裂面的上侧发现了裂纹，说明界面撕裂起源于裂纹扩展，并扩展到整个界面。上界面剥离断裂断口最初在靠近中间匙孔的位置发生失效，并向外辐射到界面层，首先在镁/锌化合物层发生撕裂，最终扩展到界面上侧固溶体层，界面发生完全断裂。

图 12d~12f 为下界面剥离断裂断口宏微观形貌，断口整体较为粗糙，存在较多的断裂棱，该界面主要断裂在镁/锌化合物层，并且在焊点边缘位置发现了裂纹源，并向内侧扩展。在疲劳试验进行过程中，界面边缘位置受到应力循环的作用开始发生失效，并沿着界面向中间撕裂，最终导致整个界面的断裂。

眉状断裂主要发生在疲劳试验中采用较低的疲劳载荷的试样，在镁板母材侧发生断裂，断裂的位置沿着焊点边缘位置贯穿整个母材横截面。图 12h 为靠近焊点区域的断口微观形貌，可以发现该处存在较多的解离面，断口处发现较小的扩展裂纹。可以推断中间靠近焊点的位置为疲劳失效的起源，在焊接过程中，镁板在热输入的影响下与锌钎料发生反应生成中间层界面，在靠近焊点边缘位置，镁板侧存在组织梯度，在疲劳试验中容易产生应力集中，发生疲劳失效。图 12i 为断口边缘位置的微观形貌，此处的断口有较明显的横向断裂趋势，说明该位置不是断裂源，而是疲劳断裂失效过程中的扩展区域。在疲劳试验失效断裂过程中，主要为瞬间扩展断裂产生的脆性断裂。试验采用较低载荷，减缓了裂纹扩展失效的速度。眉状断裂发生在母材一侧，当界面处的疲劳源还未发生扩展时，镁板母材侧靠近焊点边缘的位置发生失效，并沿着板材向两端扩展，最终发生断裂。

FSSB 接头疲劳试验断口宏微观形貌如图 13 所示。图 13a~13c 为上界面剥离断裂，图 13d~13f 为下界面剥离断裂。可以发现断口中间位置较为平整，没有发现明显的裂纹。图 13c 为较高倍下的断口微观形貌，可以发现存在少量凹坑，这是在界面失效过程中，整个断口发生撕裂导致的。图 13e 和 13f 显示下界面剥离断裂的断口位置在焊点边缘处，可以发现界面较为粗糙，并在该位置发现了孔洞与裂纹，有明显的剥离特征。

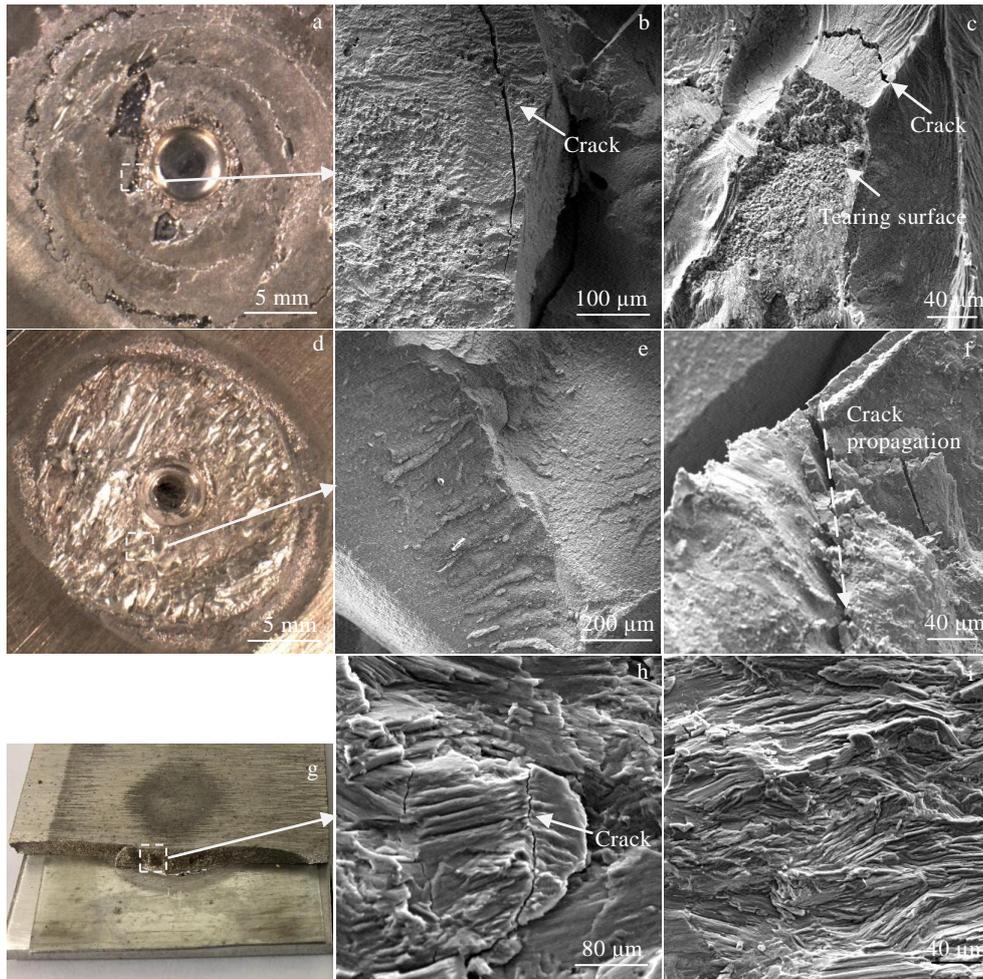


图 12 FSSW-B 接头疲劳断裂断面形貌

Fig.12 Fatigue interfacial peeling fracture morphologies of FSSW-B joint at the upper (a-c) and the lower (d-f) intermediate layers; eyebrow shaped fracture morphologies (g-i)

在疲劳试验过程中，当整个界面发生剥离时，疲劳断口处的界面较为平整，部分区域存在少量凹坑。FSSB 接头不存在中间匙孔位置，界面比较均匀，当发生疲劳失效时，整个界面同时发生剥离，断口处没有 FSSW-B 接头中间靠近匙孔区域的撕裂情况。当疲劳载荷应力较小时，随着疲劳循环的进行，没有达到使得整个界面同时剥离的条件，此时焊点的边缘位置为主要的受力点，当循环进行到一定程度，边缘位置首先发生撕裂，并且整个锌钎料断开，最后中间位置的界面发生剥离。与 FSSW-B 接头相比，FSSB 接头焊接时热输入较小，并且没有搅拌针贯穿铝板作用到下侧镁板，镁板位置界面组织受到热量的影响较弱，镁板与锌钎料发生反应实现接头连接，界面比较均匀，镁板母材侧变化较小，在疲劳循环过程中母材侧没有发生失效，因此在 FSSB 接头疲劳试验中不存在眉状断裂。

2.6 接头的力学性能

将 FSSW-B 接头与 FSSB 接头的疲劳极限进行比较 (表 5)，搅拌针的存在对抗拉剪性能的提升率为 53.5%，对疲劳性能的提升率为 11.4%。另外，根据两者的疲劳数据以及拟合曲线的相关系数提升，能明显发现 FSSW-B 接头的疲劳性能分散性较大。焊接过程中的搅拌针的存在，通过热输入和作用力的影响，提高了接头的抗拉剪性能，但是接头中搅拌区的存在使得 FSSW-B 接头界面连接处组织和性能存在波动性，尤其是靠近匙孔的搅拌区位置。FSSW-B 焊接接头的界面为圆环状，匙孔的位置不存在界面连接，并且在该位置附近容易产生疲劳失效源，降低接头的疲劳寿命^[20-22]。FSSB 接头为均匀的连接界面，疲劳裂纹仅存在于轴肩边缘位置，向接头内部扩展。在疲劳试验中，FSSB 接头失效的机理更单一，数据的分散性更小，表现出更好的疲劳性能稳定性。

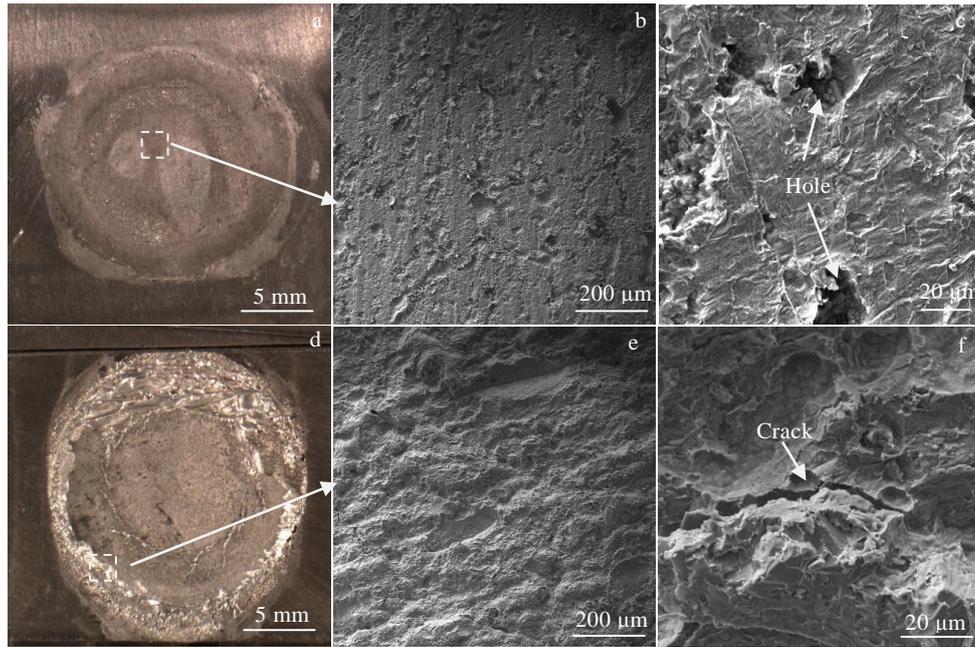


图 13 FSSB 接头疲劳断裂断口形貌

Fig.13 Fatigue interfacial peeling fracture morphologies of FSSB joint at the upper (a-c) and the lower (d-f) intermediate layer

表 5 FSSB 接头与 FSSW-B 接头的力学性能对比

Table 5 Comparison of mechanical properties between FSSB joint and FSSW-B joint

Parameter	FSSW-B	FSSB	Improving rate by stirring needle/%
Tensile shear force/N	7600.0	4950.0	53.5
Fatigue limit/N	3366.6	3021.5	11.4
Fatigue data fitting correlation coefficient	0.861 18	0.919 57	-
Dispersion of fatigue data	High	Low	-

综上所述，搅拌摩擦焊焊接工具中搅拌针的存在提高了接头的抗拉剪性能与疲劳性能，搅拌针对抗拉剪性能的提升率高于疲劳性能，搅拌针的存在增加了接头疲劳性能的分散性。在工程应用中，对于异种金属的连接，当结构件对静力学性能要求较高时，采用带有搅拌针的 FSSW-B 连接方式；当结构件满足静力学性能的基础上，有动态载荷要求时，应采用不带有搅拌针的 FSSB 连接方式。

3 结 论

1) 相较于 FSSB 接头，FSSW-B 接头存在匙孔与搅拌区，接头界面的主要连接区域为热力影响区。

2) FSSW-B 接头界面中间层分为上下 2 层，上层界面为 $MgZn_2$ 相，下层界面为 Mg_7Zn_3 相，其中析出 $MgZn$ 第二相。FSSB 接头界面主要为 $MgZn_2$ 相。

3) FSSW-B 接头疲劳断裂形式包括从铝/镁中间层

失效的界面剥离断裂以及从镁板母材侧失效的眉状断裂，而 FSSB 接头疲劳断裂形式为界面剥离断裂，搅拌针的存在增强了界面的连接强度，但破坏了母材结构。

4) FSSW-B 接头的最大抗拉剪力为 7600 N，搅拌针对抗拉剪性能的提升率为 53.5%。FSSW-B 接头的疲劳极限为 3366.6 N，搅拌针对疲劳性能的提升率为 11.4%。搅拌针的存在提高了搅拌摩擦焊接头的抗拉剪性能与疲劳性能，对抗拉剪性能的提升率高于疲劳性能。另外，搅拌针的存在增加了接头疲劳性能的分散性。

参考文献 References

[1] Qin Guoliang(秦国梁), Ma Hong(马 宏), Wang Shilu(王世路) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2021, 42(7): 1

[2] Mordike B L, Ebert T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 302(1): 37

[3] Yang Tao(杨 涛). *Study on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum and Magnesium Dissimilar Metals Welded by Friction Stir Lap Welding*(铝镁异种金属搅拌摩擦搭接焊接头微观组织与力学性能研究)[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019

[4] Rao H M, Jordon J B, Ghaffari B et al. *International Journal of Fatigue* [J], 2016, 82: 737

[5] Khodabakhshi F, Shah L H, Gerlich A P. *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 112: 349

- [6] Huang Yongbing(黄勇兵). *The Research of Process and Properties of Magnesium Alloys and Steel Friction Stir Welding*(镁/钢异种金属搅拌摩擦焊工艺及性能研究)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013
- [7] Wang Bo(王博), Long Weimin(龙伟民), Lou Yinbin(娄银斌) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(5): 1919
- [8] Liu L M, Ren D X, Liu F. *Materials*[J], 2014, 7(5): 3735
- [9] Zhang H T, Song J Q. *Materials Letters*[J], 2011, 65(21-22): 3292
- [10] Gao Q, Wang K H. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(3): 756
- [11] Liu L M, Zhao L M, Xu R Z. *Materials & Design*[J], 2009, 30(10): 4548
- [12] Han Shiwei(韩世伟), Luo Zhan(罗展), Jiang Xiao(蒋晓) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2021, 13(2): 111
- [13] Zhou Jie(周洁), Mao Hanling(毛汉领), Hang Zhenfeng(黄振峰) *et al. China Measurement & Test*(中国测试技术)[J], 2007(3): 7
- [14] Gao Y, Morisada Y, Fujii H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 711: 109
- [15] Deng H B, Chen Y H, Zhang T M *et al. Materials Letters*[J], 2019, 255: 126 543
- [16] Zhi Q, Ma J M, Tan X R *et al. Welding in the World*[J], 2021, 65: 2047
- [17] Suhuddin U F H, Fischer V, dos Santos J F. *Scripta Materialia*[J], 2013, 68(1): 87
- [18] Mohammadi J, Behnamian Y, Mostafaei A *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 101: 189
- [19] Wang Yue(王月). *Fatigue Performance of Friction Stir Welded TC4 Alloy Joints*(TC4 钛合金搅拌摩擦焊的疲劳性能研究)[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017
- [20] Yang F, Yin S M, Li S X *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 491(1-2): 131
- [21] Zhou Shujun(周曙君), Xing Li(邢丽), Ke Liming(柯黎明) *et al. Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2007, 2(3): 20
- [22] Yang Xinqi(杨新岐), Cui Lei(崔雷), Cui Xiaodong(徐效东) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2013, 33(6): 38

Effect of Stirring Pin on Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of FSSW-B Joint

Liu Wenkuo¹, Xie Jilin^{1,2}, Chen Yuhua^{1,3}, Wang Hongwei¹, Zhang Timing¹, Wang Shanlin¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(3. School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The aluminum/magnesium dissimilar metal composite structure has great application value in the field of structural lightweighting. In this paper, a novel friction stir spot welding-brazing (FSSW-B) technology was used for lap spot welding of aluminum/magnesium dissimilar metals. At the same time, it was compared with friction stir spot brazing (FSSB) technology to study the effect of the stirring pin in the welding tool on the microstructure and mechanical properties of the joint. The results show that the interface layer of FSSW-B joint is divided into two parts: the upper interface is mainly composed of MgZn₂, and the lower interface is mainly composed of Mg₇Zn₃; the FSSB joint interface layer is mainly composed of MgZn₂ phase. The fracture mode of the two kinds of joints is mainly interface peeling fracture, and the eyebrow-shaped fracture mode appears due to the existence of the stirring pin. The existence of the stirring pin improves the tensile shear resistance and fatigue performance of the joint. The maximum tensile shear force of the FSSW-B joint is 7600 N, and the fatigue limit is 3366.6 N; the improving rate of stirring pin to tensile shear performance is 53.5%, and the improving rate to fatigue performance is 11.4%; the existence of stirring pin in FSSW-B increases the dispersion of joint fatigue properties.

Key words: stirring pin; friction stir spot welding-brazing; interfacial microstructure; mechanical properties; fatigue limit

Corresponding author: Xie Jilin, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: j.l.xie@nchu.edu.cn