Al-Li 合金搅拌摩擦焊搭接接头的疲劳性能

张丹丹 曲文卿 杨模聪

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (上海飞机制造厂, 上海 200436)

柴 鹏

(北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

摘 要: 通过疲劳寿命试验、疲劳断口和金相组织分析,研究了 Al-Li 合金搅拌摩擦焊搭接接头的疲劳性能,分析了接头前进侧热机影响区(TMAZ, Thermal-Mechanically Affected Zone)出现的"钩状缺陷"对其疲劳性能的影响. 结果表明,钩状缺陷容易引起裂纹萌生及扩展,减小接头的有效承载板厚,适当缩短搅拌针长度可以改善钩状缺陷,提高接头力学性能. 母材与搭接接头的疲劳 *S-N* 曲线研究表明:在高疲劳应力下,接头的疲劳寿命接近母材,但随着疲劳应力水平降低,接头的疲劳寿命急剧下降,200 万循环周次下的疲劳强度仅达到 80 MPa,为母材的 35%.

关 键 词: 搅拌摩擦焊; 铝锂合金; 疲劳性能; 钩状缺陷

中图分类号: TG 453.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)05-0674-05

Fatigue property of Al-Li alloy friction stir welded lap joints

Zhang Dandan Qu Wenqing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Yang Mocong

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd, Shanghai 200436, China)

Chai Peng

(National FSW Center, Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Through the fatigue test, fracture characteristic and microstructure analyses, the fatigue property of the Al-Li alloy friction stir welded lap joints and the effect of "hooking defect" appearing at the thermal-mechanically affected zone(TMAZ) of advancing side on the joint fatigue property were studied. The results show that the cracks can easily initiate and extend from the location of hooking defect, leading to the decrease in the "effective sheet thickness"(EST) of material and damage to the joint fatigue behavior. The appropriate reduction of the pin length is proved one way of to improve the defects and mechanical property of joints. Furthermore, the established *S-N* curves show that the fatigue life of lap joints is close to base metal on the high fatigue stress. As the fatigue stress decreasing, the joint fatigue life sharply declines and the fatigue strength of joints at fatigue life $N=2\times10^6$ is only 80 MPa, only equivalent to 35% that of base metal.

Key words: friction stir welding(FSW); Aluminum-Lithium alloy(Al-Li); fatigue; hooking defect

收稿日期: 2012-05-29; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1104.017.html

基金项目: 北京航空航天大学创新基金资助项目

作者简介: 张丹丹(1987-),女,四川乐山人,硕士生,ashlyn_up@163.com.

搅拌摩擦焊(FSW,Friction Stir Welding)是一种利用高速旋转的搅拌探头与工件摩擦产生的热量,使被焊材料局部塑化的新型固相连接工艺,尤其适用于连接常规熔焊工艺难于连接的航空航天用铝锂合金材料,可避免合金元素的烧损、气孔及凝固裂纹的产生,同时能提高接头的力学性能,减轻结构重量,降低制造成本[1-4]. FSW 过程节能环保、易于控制,应用于航空航天领域具有明显的经济和技术优势.

在航空航天结构中,“工”形、“Z”形和“L”形搭接结构非常普遍,采用 FSW 搭接技术代替传统的铆接,具有减重和提高结构整体性能的优势[5-6]. 在 FSW 搭接结构中,抗疲劳断裂特性是评定结构件使用性能最重要指标之一,深入研究各种工艺参数、焊接缺陷、组织结构等因素对接头疲劳性能的影响,将为航空航天制造领域推广和应用 FSW 技术、建立合理有效的疲劳评定规范提供重要的依据[7-10].

国外研究表明,FSW 搭接接头性能不低于铆接,且界面成形对接头力学性能十分重要. 研究认为搭接接头界面区域存在两个类似裂纹的缺陷,被 Brent Christner 等人定义为界面畸变(hooking)和减薄(thinning),这些缺陷均是微裂纹或微孔洞的富集带,会导致搭接接头连接界面的减小,从而降低接头的强度和寿命. Raj Talwar 等人通过对飞机结构件的失效评定认为,FSW 搭接结构疲劳失效位置 25% 出现在前进侧界面畸变位置,75% 在后退侧减薄位置出现裂纹[11]. 本文针对 2 mm 厚的 Al-Li 合金搅拌摩擦焊搭接接头进行疲劳试验,绘制母材与接头的疲劳 *S-N* 曲线,分析界面成形缺陷对其疲劳性能的影响.

1　试验方法和材料

搅拌摩擦焊选用 2 mm 厚 2099 和 Al-Li-S4 铝锂合金轧制板材作为母材,采用焊机 FSW2-4CX-006 焊接获得“Z”型搭接接头,如图 1 所示.

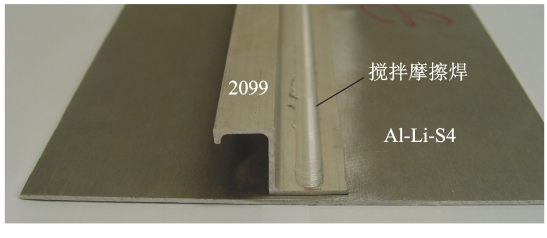


图 1　“Z”型搭接结构示意图

FSW 搅拌头采用直径 10 mm 的双圆环轴肩和直径3.4 mm的圆锥形搅拌针,焊接工艺参数中旋转速度为 800 r/m,焊速为 200 mm/min,采用长度为2.8 mm和 2.5 mm 搅拌针进行焊接,分别得到搭接接头 1 和搭接接头 2. 母材 Al-Li-S4 的化学成分见表 1.

表 1　Al-Li-S4 铝锂合金母材的化学成分

成分	Li	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Ag	Al
质量分数%	0.72	0.026	3.56	0.3	0.72	0.34	0.025	0.086	余量

焊后沿垂直焊缝的方向截取试样,经打磨抛光后利用光学显微镜观察微观组织. 拉伸试验选用标准中板形试样,试样宽度为 30 mm,总长为 190 mm,标距为 70 mm,采用 WDW3050 型试验机进行拉伸. 疲劳试验按照航标 HB5287-96《金属材料轴向加载疲劳试验方法》在 GZ-100C 型高频疲劳试验机上进行,正弦波形,振频 100Hz,应力比 $R=0.1$. 疲劳试样如图 2 所示,试样中部为焊缝,两侧受到疲劳拉伸循环应力作用. 另外采用 JSM-5800 扫描电镜(SEM, Scanning Electron Microscope)观察试样的疲劳断口形貌,分析断裂位置. 力学性能试验中每组试样 5 个,取平均值.

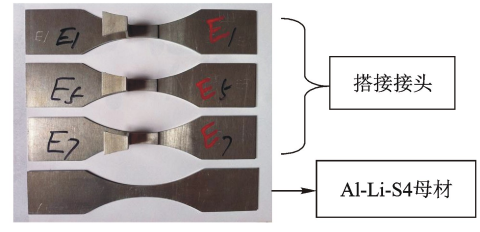


图 2　疲劳试样

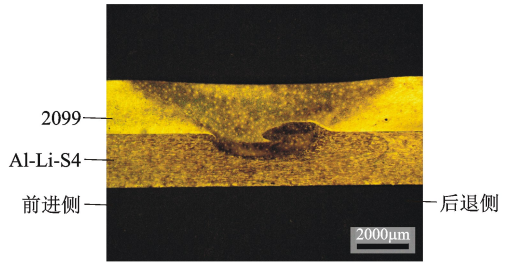
2　试验结果与分析

2.1　微观组织分析

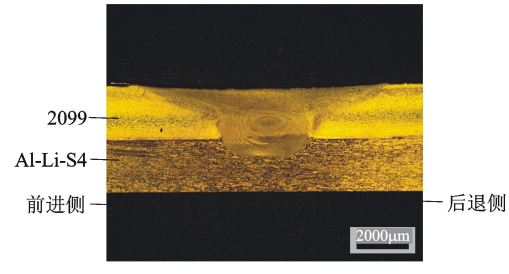
如图 3 搭接接头的宏观形貌所示,搅拌针长度极大影响塑性材料的流动和热输入量,最终形成不同的焊核区形态. 当搅拌针长度为 2.8 mm 时,焊核区塑性材料从前进侧流动到后退侧出现堆积(图 3a). 当搅拌针长度为 2.5 mm 时,塑性材料流动较均匀,在搭接界面位置形成典型的“洋葱环”结构(图 3b). 另外,在两种搭接接头的后退侧都形成“冷搭接缺陷”,这是由于后退侧的界面金属存在两个方向的流动,两个方向的材料在流动过程中出现交叉混合,材料顺着搅拌针向着焊缝内部流动,就会出现搭接界面平移的现象[6].

进一步观察发现,搭接接头 1 前进侧搭接界面向下部 Al-Li-S4 母材弯曲,在热机影响区(TMAZ, Thermal-Mechanically Affected Zone)出现“钩状缺陷”. 同时在钩状尖端还发现 3 个不同方向的裂纹扩展,容易引起应力集中,在受到疲劳载

荷时,应力集中区会发生微区循环塑性变形,并受到周围弹性区的约束,这种局部塑性循环区会导致疲劳裂纹的扩展,影响接头的疲劳寿命. 另外,钩状缺陷使原始搭接界面深入到下部母材当中,令接头受拉承载的有效板厚减少,降低接头的力学性能(如图 4a). 通过图 4b 观察看出,当搅拌针长度变为 2.5 mm 时,前进侧钩状缺陷的形状尺寸较接头 1 有了明显改善,即原始搭接界面沿 90°方向扩展约 0.05 mm,钩状尖端无裂纹扩展. 已有研究表明:钩状缺陷是由塑性金属在垂直方向上流动所造成的界面畸变,常常出现在搭接接头中,与所选焊接工艺参数、搅拌头形状尺寸等因素有关[12].

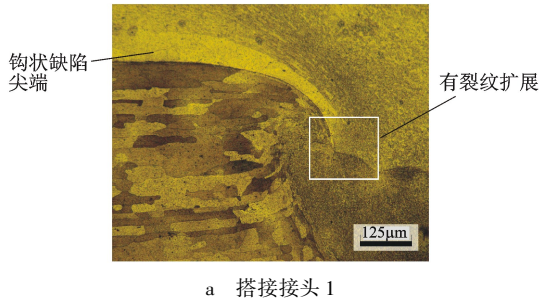


a 搭接接头 1

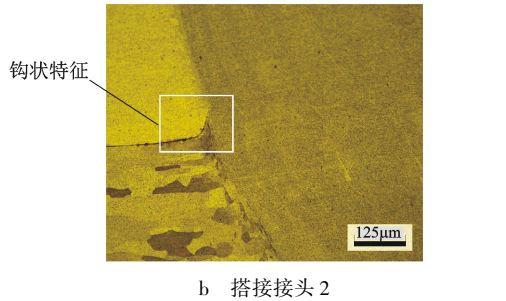


b 搭接接头 2

图 3 FSW 搭接接头的宏观形貌



a 搭接接头 1



b 搭接接头 2

图 4 搭接接头前进侧 TMAZ 的“钩状”缺陷

通过测试搭接接头 2 的显微硬度发现(如图 5):焊核区的硬度低于 HAZ,仅为母材硬度的 70% ~ 80%,且前进侧 TMAZ 硬度最低,说明 TMAZ 的钩状缺陷会降低接头硬度. 另外由于 TMAZ 受到不平衡的热机作用,存在较大的残余应力、晶粒变形与粗大以及不均匀分布的析出相,且前进侧受到的剪切应力与组织变形程度均高于后退侧,因此前进侧的 TMAZ 硬度最低.

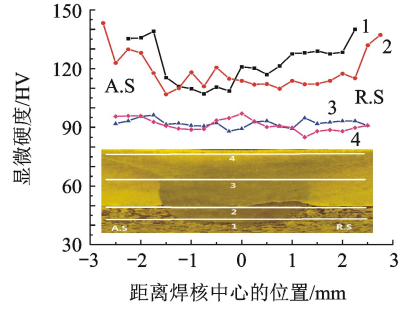


图 5 FSW 搭接接头 2 显微硬度

接头不同区域的硬度值变化,与不同的晶粒尺寸、析出强化相以及组织状态等因素有关,焊核区再结晶晶粒虽然较 HAZ 细化,但由于直接受到搅拌针的搅拌摩擦作用,峰值温度最高,沉淀相粒子将发生固溶、析出过程,影响焊核区硬度.

综上所述,采用不同长度的搅拌针带来不同的焊核区形态,也影响接头的界面成形性能. 典型的界面缺陷——钩状缺陷的形状尺寸与搅拌针的长度有关,若搅拌针长度不适宜,容易导致金属材料流动不均匀,使 TMAZ 出现钩状缺陷,引起应力集中和裂纹扩展,降低接头的力学性能. 另外,选择良好的焊接工艺参数是获得良好接头疲劳性能的前提. 其中,不同的焊接工艺参数决定了不同的热输入量,这就在很大程度上决定了焊接过程中的冶金转变,如增溶作用、二次析出和沉淀相长大等,同时决定焊缝组织的强度,从而影响接头的疲劳性能.

2.2 搭接接头的疲劳试验

表 2 给出了 Al-Li-S4 母材及两种搭接接头的静力拉伸性能,在拉伸过程中,搭接接头的塑性变形能力较弱,屈服阶段不明显,接头的延伸率低,最高仅达到母材的 24%. 究其原因,主要是由于搭接接头前进侧存在“钩状缺陷”,引起应力集中,导致裂纹的萌生及扩展,同时减小了焊接板的有效承载厚度. 而后退侧的“冷搭接缺陷”则会严重影响搭接接头的有效搭接宽度,使得搭接界面的承载面积减小,最终降低接头的力学性能.

另外,通过对比可以看出,搅拌针长度对搭接接头的拉伸力学性能有明显影响,搭接接头 2 的

强度及延伸率较接头 1 分别提高了 18% 和 16%,抗拉强度为 467 MPa,达到母材的 94%.

表 2　母材与搭接接头拉伸性能

类型	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa	延伸率/%
母材(Al-Li-S4)	421	498	13.6
搭接接头 1(2.8 mm)	375	387	1.1
搭接接头 2(2.5 mm)	407	467	3.2

如图 6 所示,疲劳试验对比了不同搭接接头与 Al-Li-S4 母材在 3 个不同疲劳应力(即疲劳循环应力中最大应力)水平下的疲劳寿命. 搭接接头 1 在较低的疲劳应力 200 MPa 条件下,疲劳寿命不超过 2 万次,说明搭接接头 1 的疲劳性能很差. 当搅拌针长度改为 2.5 mm 时,搭接接头 2 的疲劳寿命有了明显提高,在 280 MPa 疲劳应力下,接头疲劳寿命达到 6.2 万次;但在 200 MPa 疲劳应力下,母材达到 200 万次未断,而接头 2 疲劳寿命仅为 15 万次.

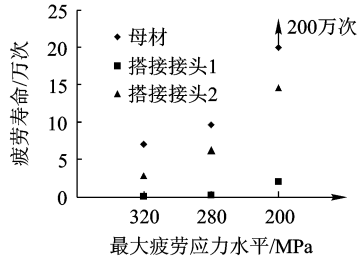


图 6　母材与搭接接头疲劳性能对比

图 7 建立了搭接接头 2 与 Al-Li-S4 母材的疲劳 S-N 曲线,分析可知:搭接接头在高疲劳应力水平下,疲劳寿命接近母材,但随着疲劳应力水平降低,接头疲劳寿命急剧下降,200 万循环周次下的疲劳强度为 80 MPa,仅是母材的 35%.

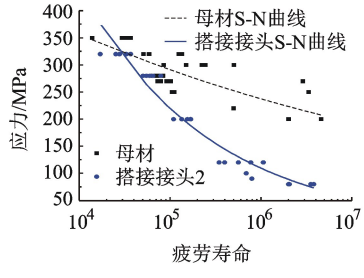


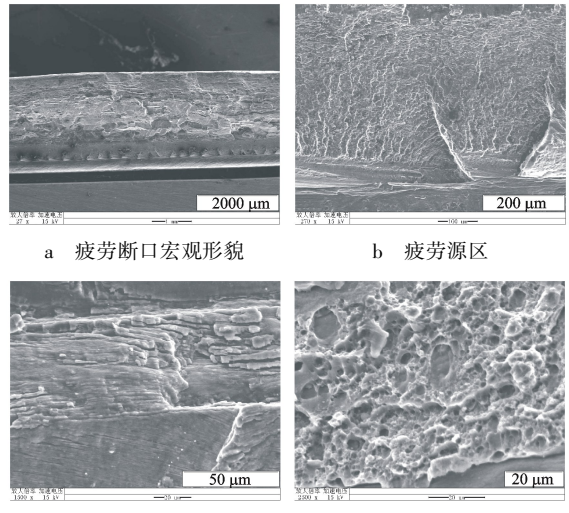
图 7　母材与搭接接头疲劳 S-N 曲线

根据断裂力学理论,一个含有初始裂纹(长度为 a_0)的构件,当承受静载时,只有当应力水平达到临界应力 σ_c 时才会发生失稳扩展. 但如果构件承受疲劳循环应力作用时,初始裂纹一开始就会发生缓慢扩展,当裂纹长度达到临界裂纹长度 a_c 时,构件就会发生破坏. 故在高周疲劳范围,应力集中即 TMAZ 钩状缺陷位置,对于裂纹的萌生和扩展起决定性的影响,是发生疲劳破坏的薄弱环节,控制结构的疲劳寿命.

2.3　疲劳断口形貌

图 8a 和图 8b 分析认为,搭接接头 1 疲劳断裂是从前进侧的“钩状缺陷”起裂,疲劳源呈现线源特征,说明钩状尖端的裂纹引起缺口效应,导致局部塑性应变集中,引发疲劳裂纹的早期扩展. 图 8c 为疲劳扩展区的疲劳条带以及垂直于扩展方向的二次裂纹,疲劳条带是疲劳断口典型的微观特征,其粗细间距与交变应力有近似对应的关系. 图 8d 为瞬断区断口形貌,由于裂纹的不断扩展,使剩余面积逐渐减小,当剩余面积不足以承受外载荷时,裂纹就发生失稳扩展以至断裂. 图中韧窝分布不均,细小且浅,说明瞬断区塑性变形少.

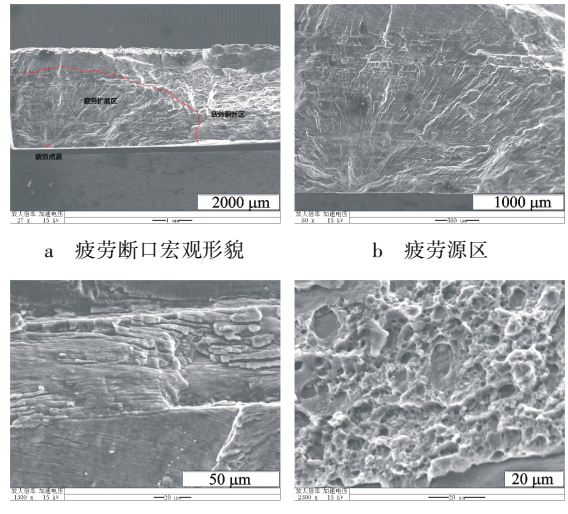
通过图9分析可知,搭接接头2的疲劳断裂



a　疲劳断口宏观形貌　　b　疲劳源区

c　扩展区疲劳条带　　d　瞬断区韧窝

图 8　搭接接头 1 疲劳断口(SEM)



a　疲劳断口宏观形貌　　b　疲劳源区

c　扩展区疲劳条带　　d　瞬断区韧窝

图 9　搭接接头 2 疲劳断口(SEM)

从前进侧 TMAZ 起裂,呈现典型的单源特征,同时疲劳扩展区的疲劳条带明显,说明接头 2 的疲劳性能有所改善. 由于 TMAZ 受到探针的剪切作用,晶粒发生较大变形,同时受到钩状缺陷的影响,硬度值最低,所以接头容易在 TMAZ 发生疲劳破坏. 从图 9d 瞬断区形貌可以看出,韧窝是微孔聚集长大的结果,韧窝内大多包含一个夹杂物或第二相,图中韧窝细小且浅,存在撕裂棱.

3 结 论

当采用转速为 800 r/m,焊速为 200 mm/min,搅拌针长度为 2.5 mm 的工艺参数焊接时,接头的强塑性最佳,抗拉强度达到 467 MPa,为母材的 94%.

采用不同长度的搅拌针焊接,产生了不同的焊核区形态,影响了接头的界面成形性能. 典型的界面缺陷——“钩状缺陷”出现在前进侧的 TMAZ,其形状尺寸与搅拌针长度有关. 钩状缺陷容易引发裂纹的萌生及扩展,导致应力集中,减少接头的有效承载厚度,降低其力学性能.

搭接接头疲劳 *S-N* 曲线表明:在高疲劳应力水平下,搭接接头的疲劳寿命接近母材;但随着疲劳应力水平降低,接头的疲劳寿命急剧下降,200 万循环周次下的疲劳强度为 80 MPa,仅达到母材的 35%.

搭接接头的疲劳断口分析表明:搭接接头在前进侧的 TMAZ 发生疲劳破坏,当“钩状”尖端无裂纹扩展时,接头的疲劳性能较好,疲劳源区呈现单点源特征且疲劳条带明显.

参考文献(References)

[1] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 搅拌摩擦焊接 Al-Li 合金接头的微观组织及力学性能[J]. 金属学报,2004,40(5):504-508
Wang Dayong, Feng Jicai, Wang Panfeng. Microstructures and mechanical properties of Al-Li alloy friction stir weld[J]. Journal of Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(5): 504-508 (in Chinese)

[2] Lertora E, Gambaro C. AA8090 Al-Li alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life[J]. Int J Mater Form, 2010, 3: 1003-1006

[3] Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F. 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding: mechanical and microstructural behaviour [J]. Materials and Design, 2009, 30: 3622-3631

[4] Wei Shitong, Hao Chuanyong, Chen Jichun. Study of friction stir welding of 01420 aluminum-lithium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2007, 452: 170-177

[5] 栾国红. 飞机制造中的搅拌摩擦焊技术及其发展[J]. 航空制造技术,2009,20:26-31
Luan Guohong. Fricition stir welding technology and its development in manufacturing of aircraft[J]. Journal of Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 20: 26-31 (in Chinese)

[6] 刘红兵,陈洁,占小红,等. 铝合金搅拌摩擦焊搭接焊的研究概述[J]. 热加工工艺,2011,40(19):126-132
Liu Hongbing, Chen Jie, Zhan Xiaohong, et al. Review on friction stir lap welding of aluminum alloy [J]. Journal of Hot Working Technology, 2011, 40(19): 126-132 (in Chinese)

[7] 曹丽杰,张朝民,郭洋,等. 铝合金搅拌摩擦焊接接头疲劳行为的研究[J]. 兵器材料科学与工程,2010,33(3):92-96
Cao Lijie, Zhang Chaomin, Guo Yang, et al. Fatigue behavior of friction stir welded aluminum alloy joints[J]. Journal of Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(3): 92-96 (in Chinese)

[8] 周才智,杨新岐,栾国红. 搅拌摩擦焊接头疲劳行为研究现状[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(7):1172-1176
Zhou Caizhi, Yang Xinqi, Luan Guohong. Research progress on the fatigue behavior of friction stir welded joints [J]. Journal of Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(7): 1172-1176 (in Chinese)

[9] Fersini D, Pirondi A. Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74: 468-480

[10] Liu H J, Fujii H, Maeda M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 692-696

[11] 郭晓娟,董春林,康举,等. 搅拌摩擦焊搭接界面缺陷初步研究[C]//第十五次全国焊接学术会议论文集. 北京:中国机械工程学会,2010
Guo Xiaojuan, Dong Chunlin, Kang Ju, et al. Preliminary study on interface defects of friction stir welded lap joints[C]//The 15th National Welding Conference. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2010 (in Chinese)

[12] 徐效东,杨新岐,吴铁,等. 铝合金搅拌摩擦焊搭接接头工艺及组织性能研究[J]. 金属铸锻焊技术焊接学报,2010,39(15):125-129
Xu Xiaodong, Yang Xinqi, Wu Tie, et al. Study on microstructure and properties of friction stir welded lap joints of aluminum alloy [J]. Journal of Hot Working Technology, 2010, 39(15): 125-129 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)