

# 铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及组织特征分析

李超<sup>1</sup> 张玥<sup>1</sup> 高原<sup>2</sup> 周利<sup>3</sup> 王宁<sup>1</sup>

(1 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

(2 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

(3 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接重点实验室, 威海 264209)

**文 摘** 对2219+5A06铝合金进行了回填式搅拌摩擦点焊试验,研究了搅拌头旋转速度,下压-回抽速度和压入量等工艺参数对点焊接头力学性能的影响。对不同参数焊接的点焊接头进行了剪切拉伸抗力试验。结果表明:搅拌头旋转速度和下压-回抽速度对点焊接头的力学性能影响较大,而压入量对力学性能的影响较小。对点焊接头的微观组织分析表明,焊点接头可分为焊核区、竖直面热机影响区和水平面热机影响区三个部分。焊核区及水平面热机影响区为细小的等轴晶粒,水平面热机影响区形成与板材平行的结合面,竖直面热机影响区及焊点根部的hook缺陷是焊点力学性能的薄弱区域。

**关键词** 回填式搅拌摩擦点焊,拉剪性能,显微组织

中图分类号: TG444

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.015

## Analysis of Process and Microstructure Characteristics of Aluminum Alloy Refill Friction Stir Spot Welding

LI Chao<sup>1</sup> ZHANG Yue<sup>1</sup> GAO Yuan<sup>2</sup> ZHOU Li<sup>3</sup> WANG Ning<sup>1</sup>

(1 Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd., Tianjin 300462)

(2 Capital Space Machinery Co. Ltd., Beijing 100076)

(3 Key Laboratory of Special Welding Technology of Shandong Province, Harbin Institute of Technology(Weihai), Weihai 264209)

**Abstract** Refill friction stir spot welding test was carried out on 2219+5A06 aluminum alloy. The effect of technological parameters such as the rotation speed of the stirring head, the downward pressure-withdrawal speed and the indentation amount on the mechanical properties of the spot welded joint was studied. Shear tensile resistance test was carried out on spot welded joints with different parameters. The results show that the rotation speed of the stirring head and the downward pressure-withdrawal speed have a greater impact on the mechanical properties of the spot welded joint, the indentation amount has little effect on the mechanical properties. The test analyzes the microstructure of the spot welded joint, and weld joints can be divided into three parts: NZ (nugget zone), VTMAZ (vertical thermomechanical affected zone) and HTMAZ (horizontal thermomechanical affected zone). The NZ and VTMAZ are small equiaxed grains, The HTMAZ forms a joint surface parallel to the plate, the VTMAZ and the hook defect at the root of the solder joint is a weak area of the mechanical properties of the solder joint.

**Key words** RFSSW, Tensile shear performance, Microstructure

### 0 引言

搅拌摩擦点焊是在传统搅拌摩擦焊基础上发展而来的一种新型点连接技术,作为一种固相连接技术,由于其接头质量高、焊接变形小及绿色节能等优点在航空航天及汽车等领域得到了广泛关注。基于搅拌针可回抽的回填式搅拌摩擦点焊方法,可得到平整无匙孔的点焊接头,在无外来填充材料的条件

下就可得到填充致密的焊接接头。回填式搅拌摩擦点焊采用搅拌针和搅拌套分体的特殊搅拌头,通过精确控制搅拌针和搅拌套的相对运动,在焊接的最后阶段采用搅拌套下压,搅拌针回抽或搅拌针下压,搅拌套回抽两种工艺方式,使匙孔附近被挤出的塑态化金属材料重新回填在焊接过程中形成的孔隙里,得到成型质量更好,力学性能更佳,点焊接头,

收稿日期:2020-09-17

第一作者简介:李超,1986年出生,工程师,硕士,主要从事运载火箭燃料贮箱焊接工作。E-mail:15201229964@163.com

生产效率高且易于实现自动化<sup>[1]</sup>。回填式摩擦塞点焊的焊接过程分为四个阶段<sup>[2]</sup>：

(1) 旋转预热阶段, 搅拌工具向工件施加一定的轴向压力, 在压力作用下, 搅拌针和搅拌套旋转与工件摩擦产生摩擦热使周围的材料软化, 如图 1 中(a)所示；

(2) 搅拌套下压, 搅拌针回抽阶段, 塑性金属在搅拌套的压力下向上流动, 填充搅拌针回抽后留下

的空间, 如图 1 中(b)所示；

(3) 搅拌套回抽, 搅拌针下压回填阶段, 塑性金属在搅拌针的压力下回流, 填充搅拌套上升后留下的空间, 如图 1 中(c)所示；

(4) 搅拌工具焊接完成回撤阶段, 当搅拌套和搅拌针平齐时同时离开工件表面, 形成平整焊点, 如图 1 中(d)所示。

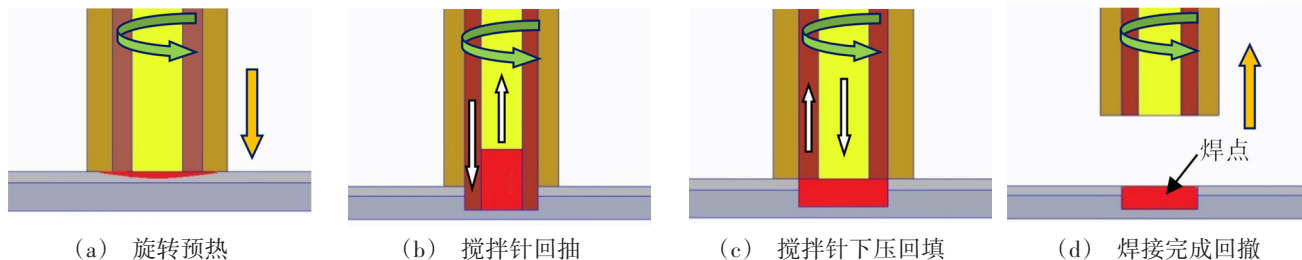


图 1 填充式搅拌摩擦点焊示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of RFSSW

本文针对 2219+5A06 铝合金材料组合, 进行回填式搅拌摩擦点焊试验, 研究不同焊接参数对 2219+5A06 铝合金材料组合的点焊接头力学性能的影响, 确定其主要影响因素, 并对工艺参数优化的焊接接头微观组织进行分析。

## 1 实验

### 1.1 材料及方法

采用上下两块板材搭接方式, 下层板材为 2219 铝合金, 厚度 8 mm, 上层板材为 5A06 铝合金, 厚度 2 mm, 2219 及 5A06 铝合金主要化学成分见表 1 和表 2。

表 1 2219 铝合金主要化学成分

Cu	Mn	Ti	Zr	Si	Fe	Al
6.38	0.32	0.064	0.18	0.084	0.18	-

表 2 5A06 铝合金主要化学成分

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ti	Al
5.8~6.8	0.5~0.8	≤0.4	≤0.4	≤0.1	0.02~0.1	余量

采用的焊接工具搅拌针直径为 5.2 mm, 搅拌套直径为 9.1 mm, 压紧套直径为 20 mm, 试验平台及搅拌工具如图 2 所示。以厚度为 2 mm 的上层板材为焊接压入点。焊接前, 对 2 mm 5A06 板材正、反面待焊区域及 8 mm 板搭接区域进行打磨清理, 去除氧化膜, 将试验板材安装固定于焊接设备垫板上。

试验时, 先使压紧套压紧板材待焊位置, 搅拌套与搅拌头以相同速度旋转, 并同时下压 0.1 mm, 使搅

拌套和搅拌头与母材充分接触并产生摩擦热, 这段时间为摩擦预热时间, 试验中将摩擦预热时间 T1 固定为 1.0 s。在摩擦预热过程中, 与搅拌套和搅拌头接触的母材金属被软化, 为后续阶段焊接中金属的充分流动提供基础。摩擦预热后, 在程序的控制下, 搅拌套开始下压, 同时搅拌针回抽, 搅拌套下压深度即为焊接压入量, 之后搅拌针下压, 搅拌套回抽, 直至搅拌针与搅拌套齐平, 完成焊点的焊接。焊点直径由搅拌套直径决定, 为 9.1 mm, 焊接完成后, 对焊点表面进行圆滑处理, 去除毛刺及凸起等。

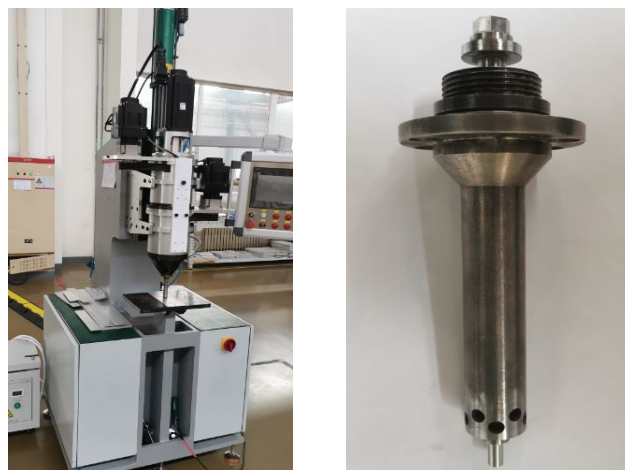


图 2 试验平台及搅拌工具

Fig. 2 Test platform and mixing tool

### 1.2 性能测试

对回填式搅拌摩擦点焊接头进行拉剪试验, 试验前需要在试样两端加 2 块与母材同等厚度的垫片进行厚度补偿, 防止拉剪时造成试样的弯曲, 如图 3 所示。采用美国英斯特朗的 Instron5967-30KN 万能

材料试验机进行拉剪试验,加载速度1 mm/min。金相试样采用电火花数控切割机沿焊点中心进行切割,用自动金相镶嵌机制成金相试样,经粗磨,精磨,抛光后,用凯乐试剂(1.5 mL HCl、1 mL HF、2.5 mL HNO<sub>3</sub>、95 mL H<sub>2</sub>O)对试样进行20 s的腐蚀,用水将表面洗净,并用酒精冲洗,用风吹干。然后采用日本OLYMPUS的DSX510光学数码显微镜对接头的焊点成形及典型结构进行观察分析。

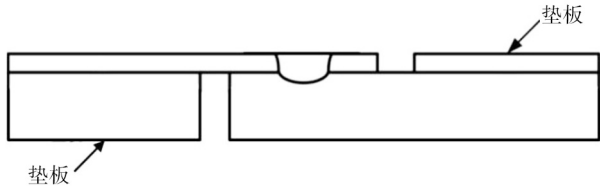


图3 剪切拉伸试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shear tensile test

## 2 结果及讨论

### 2.1 焊接工艺参数及力学性能分析

影响回填式搅拌摩擦点焊接头性能的主要工艺参数包括:搅拌头旋转速度 $S$ ,下压-回抽速度 $V$ ,压入量 $L$ 。为了准确快速的找到优化的工艺参数,使用正交试验方案,采用 $L_9(3^3)$ 正交表安排试验,根据初步的试验和计算,确定3个因子的水平如表3所示。

表3 回填式搅拌摩擦点焊试验各因子水平  
Tab. 3 Factor levels of RFSSW test

水平/因子	旋转速度 $S/r \cdot \text{min}^{-1}$	下压-回抽速度 $V/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	压入量 /mm
水平1	1000	20	2.0
水平2	1200	35	2.2
水平3	1500	50	2.5

通过对焊点进行剪切拉伸抗力试验,分析工艺参数对焊点接头力学性能的影响。观察焊点断裂宏观形貌可得,剪切拉伸时,接头处上板产生严重翘曲,焊点沿竖直面热机影响区从上层板整圈脱落并留在下层板上,上层板形成与焊点尺寸一致的孔洞,断裂模式均为塞形断裂。拉剪断裂形貌见图4。

在试验参数范围内,随着搅拌头旋转速度 $S$ 的增加,焊点剪切抗力逐渐增大,当增加到一定值时,力学性能随着旋转速度的继续增加略有下降。随着下压-回抽速度的增加,焊点剪切抗力有增大的趋势,当下压-回抽速度超过35 mm/min时,力学性能基本维持在同一水平。随着压入量 $L$ 的增加,焊点剪切抗力略有增加,当增加到一定值后,力学性能基本维持不变。试验选择搅拌头旋转速度1 200 r/min,下压-回抽速度35 mm/min,压入量2.2 mm为优化后工艺参数进行重复性焊接,获得的拉剪力平均载荷为10.51 kN。

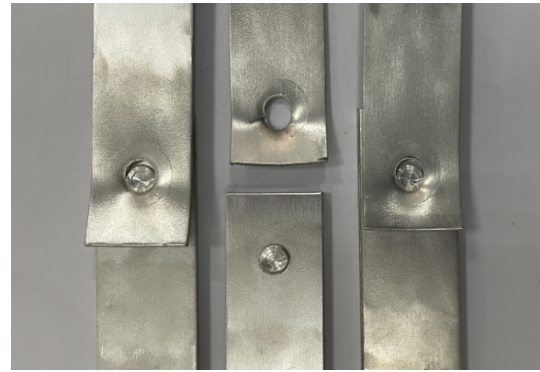


图4 拉剪断裂形貌

Fig. 4 Shear tensile fracture morphology

同时对影响焊点表面成型质量的主要因素进行了分析,影响焊点表面成型的主要因素为搅拌头的旋转速度 $S$ 和下压-回抽速度 $V$ 。当 $S$ 及 $V$ 合理时,焊点表面光滑,无环沟槽、起皮和粘黏现象,如图5中(a)所示。当搅拌头旋转速度过低,下压-回抽时间过小时,搅拌工具产生的摩擦热输入不足,搅拌工具无法对焊点金属起到充分的机械搅拌作用,塑态金



(a) 成型良好的焊点



(b) 环沟槽



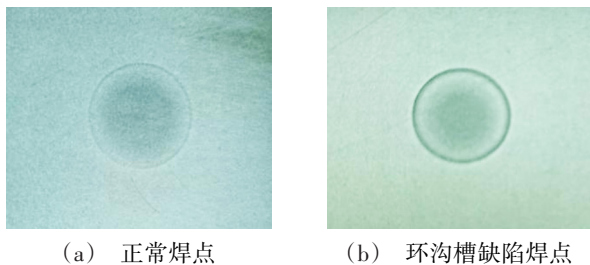
(c) 表面粘黏

图5 焊点表面成型

Fig. 5 Surface morphologies of solder joints

属流动回填不充分,使得焊点内产生空腔和环沟槽等体积型缺陷,恶化焊点的表面成型和力学性能<sup>[4-5]</sup>,如图5中(b)所示。当搅拌头旋转速度过高,下压-回抽时间过长时,焊点热输入过大,使焊点表面出现起皮和粘黏现象,如图5中(c)所示。

受焊点下凹结构影响,X光检测图像显示焊点边缘呈环形阴影(图6),这种环形阴影为正常的结构影像,对于焊点表面的环沟槽缺陷,在X光影像中呈现明显的暗度较大的黑线特征。



(a) 正常焊点 (b) 环沟槽缺陷焊点

图6 焊点X光成像

Fig. 6 X-ray image of solder joints

## 2.2 焊点接头显微组织分析

对工艺参数为旋转速度1 200 r/min、下压-回抽速度45 mm/min、压入量为2.2 mm的点焊接头显微组织进行了分析。根据焊点的组织形态特点,可将焊点接头分为焊核区(NZ),竖直面热机影响区(VTMAZ)和水平面热机影响区(HTMAZ)三个部分<sup>[6]</sup>。其中,竖直面热机影响区分界面明显,可清晰观察到焊点金属在搅拌头的机械搅拌和摩擦热作用下的过渡界面和扭曲变形的晶粒。在焊核区,可观察到由搅拌针和搅拌套联合作用下所形成的环状分层,在竖直面热机影响区和水平面热机影响区交界处为Hook缺陷,Hook缺陷的存在,使整个焊核区呈“碗”状。在拉剪力的作用下,起裂点往往首先出现在Hook缺陷处,并沿Hook缺陷环向扩展形成连续裂纹,导致接头失效,Hook缺陷形貌如图7所示。

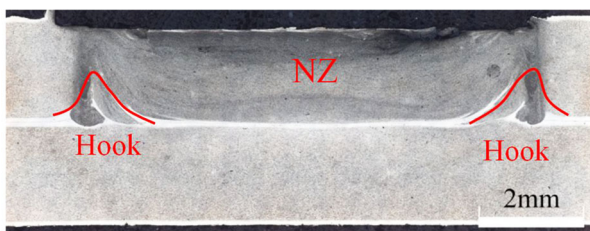


图7 焊点接头宏观形貌

Fig. 7 Macro morphology of solder joint

图8为焊核区微观组织特征,与搅拌摩擦焊焊核区类似,在搅拌头的机械搅拌和摩擦热作用下,焊核区金属发生了动态再结晶,形成了细小的等轴晶,等轴晶平均晶粒尺寸在5~10 μm,晶粒大小均匀,细小等

轴晶的存在强化了接头焊核区的强度。



图8 焊核区微观组织

Fig. 8 Microstructure of NZ

竖直面热机影响区为母材到焊核区的过渡区,在搅拌套下压及回抽焊接过程中,竖直面热机影响区界面晶粒无法受到搅拌工具顶锻力的作用,但受到搅拌工具作用下的线速度差最大,偏向焊核侧的金属受到的机械搅拌作用及热影响均最大,但偏向母材侧的金属则无法直接受到机械搅拌的作用。在摩擦热作用及界面处高速旋转运动金属的带动作用下,偏向母材侧晶粒被拉长,在搅拌套不同焊接阶段的机械搅拌作用下,焊点下端偏向母材侧的晶粒为向下拉伸,而焊点上端偏向母材侧晶粒为向上拉伸。竖直面热机影响区微观形态如图9所示。



图9 竖直面热机影响区

Fig. 9 Microstructure of VTMAZ

受搅拌套的机械搅拌和顶锻力作用,水平面热机影响区的晶粒主要由细小等轴晶组成,形成与板材平行的结合面<sup>[7]</sup>。塑态材料在搅拌套挤压作用下向上流动填补空腔,然后在搅拌针的下压过程中回流,金属经历了较大的塑性变形,因此该处产生与焊核区相同的细晶组织,且与母材组织之间无急剧的过渡界面,有利于焊点接头力学性能的提高。

在焊点根部,因受到搅拌套回抽阶段影响,形成了L形钩状区域,该区域即为Hook缺陷(见图10、图11)。竖直面热机影响区界面金属剧烈的相对运动使得该处产生了明显的界面,与Hook区域相连,是焊点力学性能的薄弱区域<sup>[8-9]</sup>。

对2219+5A06焊点断口进行了剖切并制备金相试样,并进行了SEM分析(见图12、图13)。起裂源位于Hook缺陷处,裂纹沿竖直面热机影响区向上层板扩展,

最终使整个焊点从上层板脱落,并留在下层板上,焊点的性能薄弱区为Hook缺陷和竖直面热机影响区。

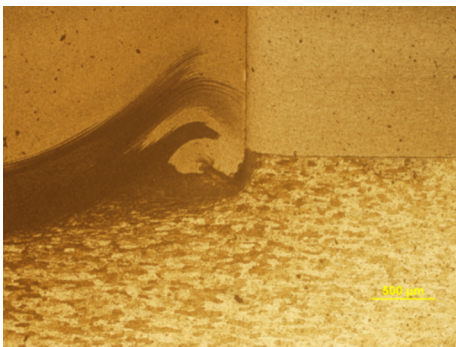


图 10 Hook 缺陷

Fig. 10 Hook defect

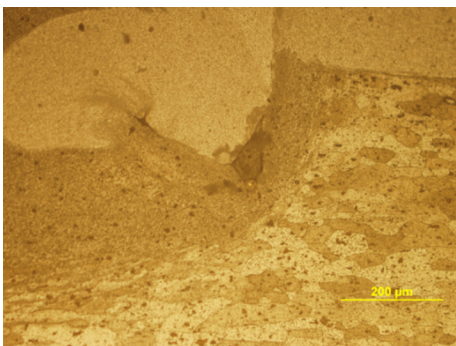


图 11 焊点根部特征

Fig. 11 Root characteristics of spot welding joints

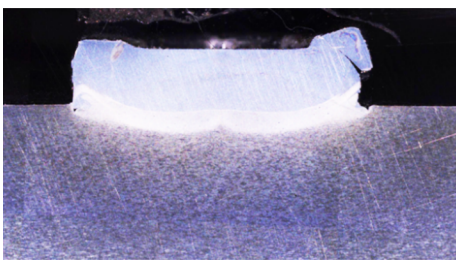


图 12 断口金相

Fig. 12 Fracture metallographic

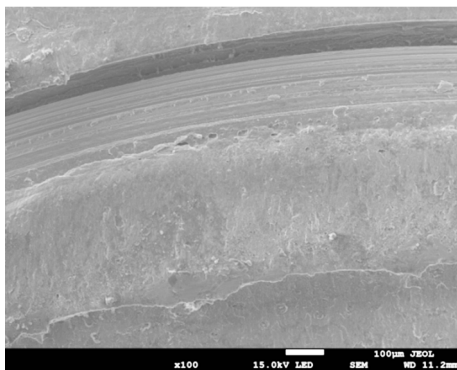


图 13 断口 SEM

Fig. 13 Fracture SEM

### 3 结论

(1)对 2219+5A06 铝合金进行了回填式搅拌摩擦点焊试验,得到了表面成型质量优良、力学性能较高的点焊接头。

(2)分析了不同工艺参数对 2219+5A06 回填式搅拌摩擦点焊接头力学性能的影响,搅拌头旋转速度和下压-回抽速度对接头力学性能影响较大,压入量对接头力学性能影响较小,搅拌头旋转速度及下压-回抽速度对焊点表面成形的影响相对较大。

(3)对填充式搅拌摩擦点焊接头进行了微观组织分析,焊核区及水平面热机影响区主要由细小的等轴晶粒组成,竖直面热机影响区与 Hook 缺陷是焊点力学性能薄弱区域,在拉剪力作用下,裂纹首先出现在 Hook 缺陷处,并沿 Hook 缺陷环向扩展,导致接头的断裂失效。

### 参考文献

[1] 赵衍华,张丽娜. 搅拌摩擦点焊技术简介[J]. 航天制造技术,2009(2):1-5.

ZHAO Yanhua, ZHANG Lina. Introduction of friction stir spot welding technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(2):1-5.

[2] 傅田,李文亚,杨夏炜,等. 搅拌摩擦点焊技术及其研究现状[J]. 材料工程,2015(4):102-114.

FU Tian, LI Wenya, YANG Xiawei, et al. State of the art of friction stir spot welding[J]. Journal of Materials Engineering, 2015(4):102-114.

[3] 张成聪,封小松,郭立杰,等. 铝锂合金填充式摩擦点焊微观组织演化[J]. 焊接学报,2014,35(11):75-78.

ZHANG Chengcong, FENG Xiaosong, GUO Lijie, et al. Microstructure evolution during refill friction spot welding of aluminium lithium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014,35(11):75-78.

[4] SHEN Z, YANG X, ZHANG Z, et al. Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints[J]. Materials and Design, 2013,44:476-486.

[5] ROSENDO T, PARRA B, TIER M A D, et al. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(3):1094-1100.

[6] 张成聪,沈小丽,封小松,等. 2195 铝锂合金填充式摩擦点焊接头显微组织与力学性能[J]. 航空材料学报,2014,34(1):22-26.

ZHANG Chengcong, SHEN Xiaoli, FENG Xiaosong, et al. Microstructure and mechanical properties of refill friction spot welds in 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(1):22-26.

[7] TIER M D, ROSENDO T S, DOS J F, et al. The Influence of refill fssw parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6):997-1005.

[8] LI Z, GAO S, JI S, et al. Effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded 2024 Al alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(4):1673-1682.

[9] ROSENDO T, PARRA B, TIER M A D, et al. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy [J]. Materials&Design, 2011, 32(3):1094-1100.