

表面状态对铝锂合金填充式摩擦点焊接头性能的影响

Influence of Surface State on the Performance of Aluminum-Lithium Alloy Joint by Filled Friction Spot Welding

上海航天设备制造总厂 张成聪 李颖 封小松 郭立杰

[摘要] 研究了不同表面处理状态对 5A90 铝锂合金填充式摩擦点焊接头性能的影响。结果表明,母材表面经过化学清洗的试样剪切拉伸抗力最大;表面状态影响搭接界面的有效承载面积,进而影响焊点的剪切拉伸性能,水平界面处的“虚焊”缺陷是降低焊点连接质量的最主要因素。

关键词: 铝锂合金 填充式摩擦点焊 显微组织 力学性能

[ABSTRACT] The influence of different surface states on the performance of 5A90 aluminum-lithium alloy joint by filled friction spot welding is studied. The results show that after chemical cleaning the spot weld can bear the highest shear tensile resistance, and surface states influence the effective bearing area on the lap interface, consequently, the shear tensile properties can be different. The defect on the joint horizontal interface is the most important factor to lower the quality of the spot weld.

Keywords: Aluminum-lithium alloy Filled friction spot welding Microstructure Mechanical performance

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.014

铝锂合金具有低密度、高比强度和高比刚度的特点,与一般铝合金相比,在强度相当的情况下,密度降低 10%,而弹性模量提高 10%^[1],在航空航天领域具有广阔的应用背景。在航空航天飞行器制造中,搭接接头是关键连接形式之一,如飞机机身蒙皮、加筋板、机翼框架和航天飞行器非密封舱体等^[2-3]。铝锂合金焊接接头的连接质量是其应用的关键,然而在铝锂合金传统熔焊过程中易产生气孔、裂纹等缺陷,特别是由于锂元素的活泼性造成的不利影响,使得固相焊成为其理想的连接方式^[4]。

填充式摩擦点焊(Friction Spot Welding,简称 FSpW)是在搅拌摩擦缝焊的基础上新近研究开发的一种创新的焊接技术^[5],其原理如图 1 所示,焊接过程包括摩擦预热阶段(见图 1(a))、下压搅拌阶段(见图 1(b))、材料回填阶段(见图 1(c))、形成平整焊点(见图

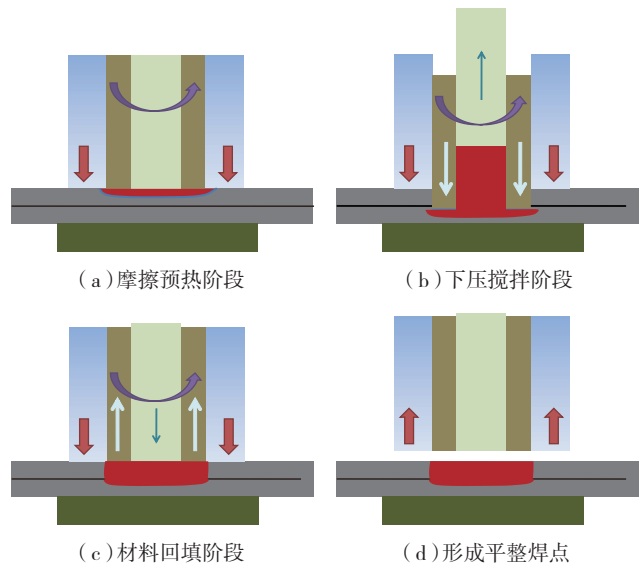


图 1 填充式摩擦点焊过程示意图

Fig.1 Diagram of FSpW process

1(d))4 个阶段,焊后可获得无匙孔的表面光滑的焊点。

填充式摩擦点焊采用的搅拌工具具有分离的搅拌针和搅拌套,两者之间可以相对运动,通过搅拌工具与被焊工件之间的摩擦热,使得材料处于塑性状态并发生流动,同时通过精确控制搅拌针与搅拌套的相对运动,在搅拌套回撤过程中完成材料的回填,以实现无中心孔的点焊连接^[6]。与常规的点连接技术如铆接和电阻点焊相比,摩擦点焊具有减重、高效、节能、环保等优点,是轻金属材料理想的点连接方法^[7]。

通常铝合金表面极易生成一层致密的氧化膜,氧化膜的存在将会对接头的连接质量造成一定的影响,本文以 5A90 铝锂合金为研究对象,分析了不同表面处理状态对铝锂合金填充式摩擦点焊接头性能的影响。研究结果将为深刻理解铝锂合金填充式摩擦点焊过程提供支持,并为将该项技术的工程应用提供技术依据。

1 试验材料与方法

试验材料为 5A90 铝锂合金板材,厚度 1.5mm,采用上下板搭接接头形式,接头上下板等厚。铝锂合金化学成分如表 1 所示。

表1 5A90铝合金化学成分 %

Mg	Li	Zr	Fe	Si	Ti	Al
4.5~6.0	1.8~2.3	0.08~0.15	<0.2	<0.15	<0.05	其余

采用德国 RPS100 型填充式摩擦点焊机系统进行试验,采用的填充式摩擦点焊工具由搅拌针、压紧套和搅拌套组成,压紧套 $\phi = 16\text{mm}$ 、搅拌套 $\phi = 9\text{mm}$ 、搅拌针 $\phi = 5.2\text{mm}$ 。

为分析表面状态对填充式摩擦点焊接头性能的影响,分别对机械打磨、化学清洗、不处理 3 种方法得到的铝锂合金填充式摩擦点焊接头进行力学性能测试和显微组织分析。对于焊点力学性能主要考察焊点抗剪切力,图 2 为焊点剪切拉伸试样示意图,接头力学性能试验采用万能试验机进行试验。焊点接头沿直径截取制备金相试样,采用金相显微镜、扫描电镜观察焊点接头截面宏观和微观组织形貌。

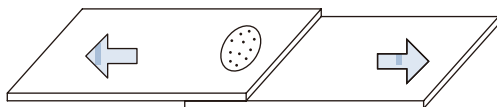


图2 焊点剪切拉伸试验示意

Fig.2 Diagram of shear tensile test for welding spot

2 试验结果与讨论

2.1 焊点力学性能分析

图 3 所示为旋转速度 2000r/min、焊接时间 3.5s 时,3 种表面处理方式的试件在不同下压量下的接头剪切拉伸试验结果。可见,试件焊前表面处理方式对填充式摩擦点焊接头的剪切拉伸抗力有着重要的影响,化学清洗后的试样剪切拉伸强度最高,机械打磨试样次之,不作任何处理的试样最低;压入量为 1.4mm 时剪切拉伸抗力最低,随着压入量增加,剪切拉伸抗力增加,经过机

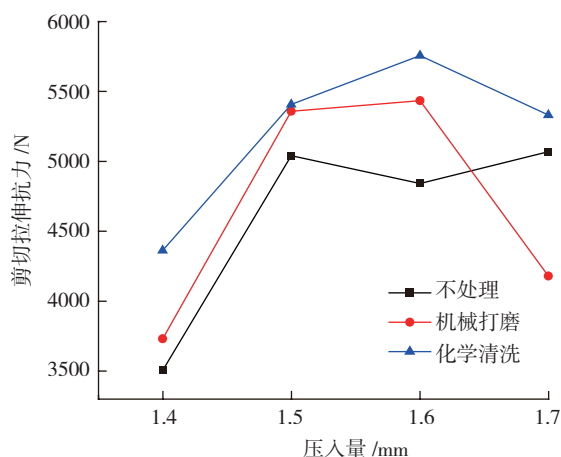


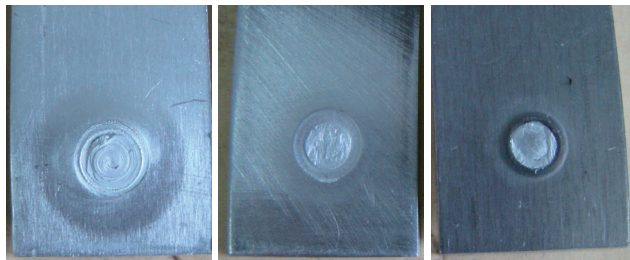
图3 力学性能测试结果

Fig.3 Testing results of mechanical performance

械打磨和化学清洗的试样在 1.6mm 时达到最大值,不作处理的试样变化不明显。

对于 1.5mm 厚的板材,当压入量小于板厚时,由于焊接工具没有触及上下板的搭接界面,没能有效地促进界面处的材料流动,不利于形成有效的连接,因此其剪切拉伸抗力较低;当压入量继续增大,由于焊接工具对搭接界面的搅拌摩擦作用,使得其连接强度提高,因此剪切抗力增大。

图 4 所示为 3 种表面处理方式下得到的焊点的典型断裂位置宏观形貌。剪切拉伸试样的断裂基本发生在上下板的搭接界面处,说明搭接界面是试样剪切拉伸的主要承载位置,其连接质量也是决定焊点抗剪能力的最重要因素。由图 4 看出,焊点断裂区域的面积从大到小依次是化学清洗、机械打磨和不处理,这一结果与力学性能测试结果一致。因此,试样的表面状态影响焊点的有效承载面积,进而影响其抗剪切拉伸性能。



(a) 化学清洗 (b) 机械打磨 (c) 不处理

图4 断裂位置宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphology of fracture

2.2 焊点微观形貌特征

为了进一步理解表面状态对铝锂合金填充式摩擦点焊接头质量的影响,对典型工艺参数下的焊点形貌进行了金相显微镜观察和分析。图 5 给出了工具旋转速度 2000r/min、焊接工具压入量 1.6mm、焊接时间 3.5s 时不同表面处理方法得到的焊点横截面形貌。

从图 5 中可见,不作任何处理的焊点搅拌针作用位置有一明显的黑色区域(区域 A),而在搅拌套作用位置则出现了黑色的界面(区域 B)。

图 6 所示的是 3 种焊前表面处理方法得到的焊点的 A 区域组织特征,此处的黑色组织呈条状分布,随着表面清理的程度增加,该黑色组织逐渐变淡。图 7 所示为 3 种焊前处理得到的焊点的 B 区域组织特征,此处上下板间具有明显的界面,由于该界面的存在,减小了焊点的有效连接面积,使得其抗剪切性能减小,随着表面清理的程度增加,该界面长度减小,直至消失,这一结果与力学性能的结果一致。

为了进一步深入分析表面状态的影响,分别对不作任何处理的试样的 A、B 区域进行了高倍 SEM 分析,如

图8和图9所示。

由图8、图9可知,在A区域上下板之间没有明显的界面存在,产生了有效连接,但是有大量弥散分布的氧化物夹杂,这些夹杂是由于母材表面的氧化膜在焊接工具的摩擦搅拌作用下破碎而呈弥散状分布在搭接界面处的,氧化物夹杂的存在会降低接头的承载能力。

表2所示为图8中箭头所示位置的能谱分析结果,该处含有较多的氧元素,说明该处分布有弥散的氧化物夹杂。

在B区域,上下板之间由于氧化物的存在,产生了

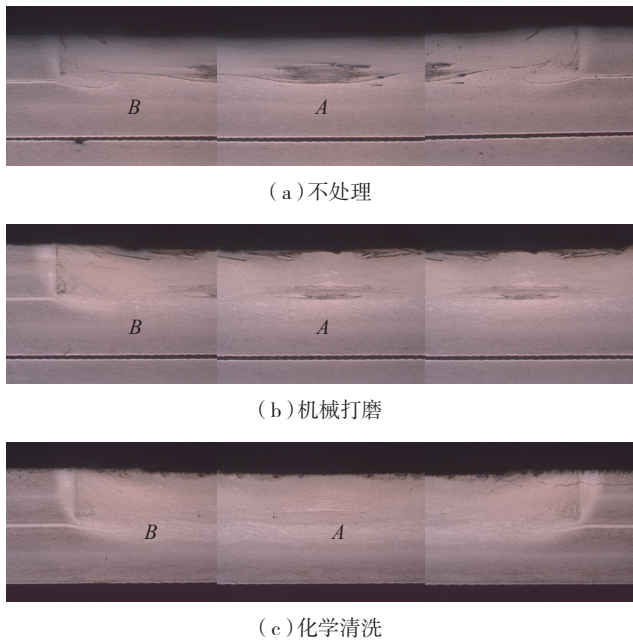
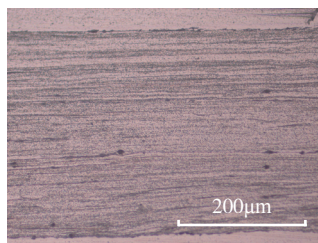
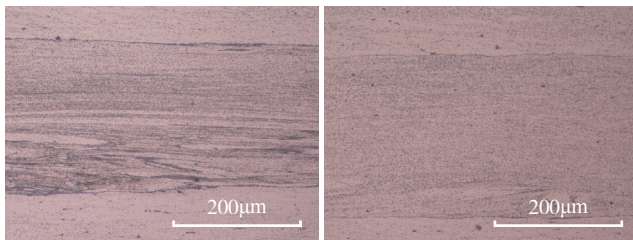


图5 焊点典型横截面金相照片
Fig.5 Typical cross-section metallograph of welding spot



(a) 不处理

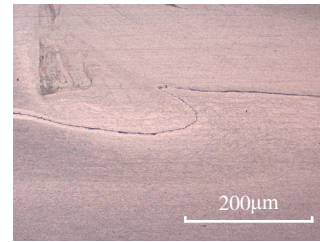


(b) 机械打磨

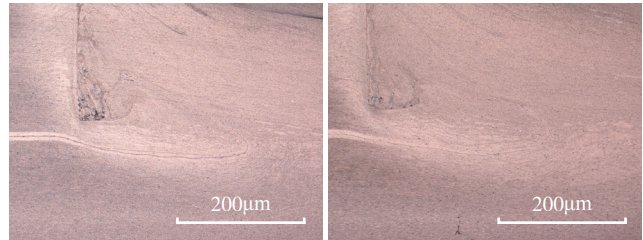
(c) 化学清洗

图6 A区域焊点水平界面金相照片

Fig.6 Metallograph of horizontal interface of welding spot in A area



(a) 不处理



(b) 机械打磨

(c) 化学清洗

图7 B区域焊点垂直界面金相照片

Fig.7 Metallograph of vertical interface of welding spot in B area

表2 水平界面处化学成分 %

化学成分	质量百分比	原子百分比
O	12.69	19.52
Mg	8.28	8.39
Al	79.03	72.09

表3 垂直界面处化学成分 %

化学元素	质量百分比	原子百分比
O	40.06	52.19
Mg	17.79	15.25
Al	42.15	32.56

一条明显的“虚焊”界面,界面在高倍下呈断续分布。该界面的存在,使得焊点在承受剪切拉伸载荷时易在该处产生裂纹而导致破坏。结合图4所示断裂方式的试验结果,该界面处实际并未形成有效的连接,而是由氧化物等杂质分割而“虚焊”在一起,降低了搭接界面的有效连接面积,其对接头抗剪切能力的害处远大于A区域弥散分布的氧化物,是影响填充式摩擦点焊接头抗剪切能力的最主要因素。

表3所示为图9中箭头所示位置的能谱分析结果,该处的氧元素含量明显高于图8所示的水平界面处的氧元素含量,主要是由于该处的氧化物夹杂呈聚集状分布,受到焊接工具的搅拌作用较弱,保留了母材表面原始的氧化物形态。

3 结论

(1) 母材表面经过化学清洗的试样抗剪切能力最

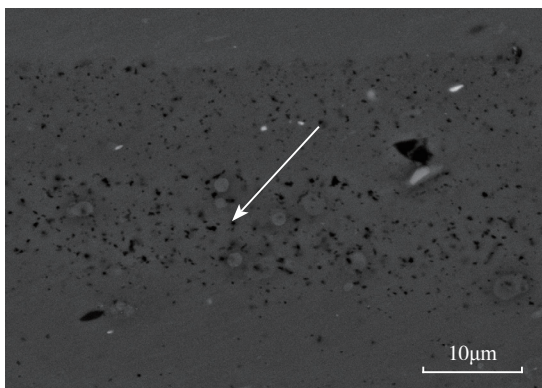


图8 A区域焊点水平搭接界面SEM照片

Fig.8 SEM photo of horizontal interface of welding spot in A area

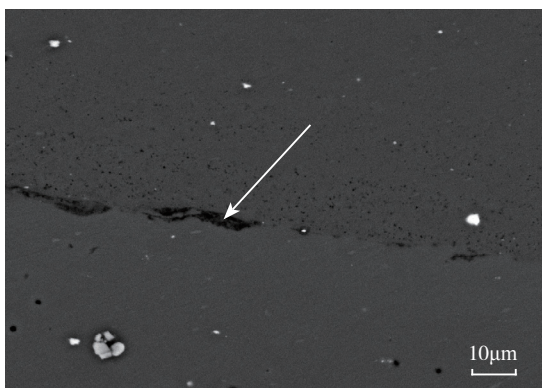


图9 B区域焊点竖直接界面金相照片

Fig.9 SEM photo of vertical interface of welding spot in B area
大。

(2) 试样的表面状态影响焊点的有效承载面积,进而影响其抗剪切拉伸性能。

(3) 搭接界面处的“虚焊”对接头连接质量的害处远大于弥散分布的氧化物,是降低点焊接头抗剪切能力的最主要因素。

参考文献

- [1] 胡德昌,胡小舟.现代工程材料手册.北京:宇航出版社,1992.
- [2] 赵衍华,张丽娜.搅拌摩擦点焊技术简介.航天制造技术,2009(2):1-5.
- [3] 张健,董春林.搅拌摩擦点焊在航空制造领域的应用.航空制造技术,2009(16):70-73.
- [4] Griniv. Special features of welding thin sheet structures of 1420 alloy. Welding Production, 1985, 32(8): 21-23.
- [5] 秦红珊,杨新歧.一种替代传统电阻点焊的创新技术——搅拌摩擦点焊.电焊机,2006,36(7):27-30.
- [6] Allen C D, Arbegast W J. Evaluation of friction spot welds in aluminum alloys. SAE Transactions, 2005, 114(5): 612-618.
- [7] Silva A A M, Santos J F, Rosendo T, et al. Friction spot and friction stir spot welding processes—a literature review. Bull Natl R & D Inst Weld Mater Test BID/ISIM 2007, 16: 36-44. (责编 亿霖)

(上接第13页)

种断裂行为检测中,断裂均起裂于焊缝焊趾处,沿着下熔合线扩展的方式断裂。

在上述分析的基础上,检测T型接头不同区域的显微硬度。

T型接头显微硬度及测定位置表2所示。可以发现:焊缝区域的硬度(94HV)低于长桁(114HV)及蒙皮(152HV),且上下熔合区的硬度软化现象非常明显,其中蒙皮侧的熔合区的硬度低于长桁侧的熔合区的硬度,这也充分证明,蒙皮侧的熔合区是整个焊接接头的薄弱位置。

表2 T型接头不同区域的显微硬度(HV)

区域	硬度值
上熔合线	86
焊缝	94
下熔合线	83

4 结论

(1) 纵向拉伸断裂形式主要为韧窝断裂和剪切断裂,横向拉伸断裂形式主要为韧窝断裂形式,剪切试验断裂形式主要为脆性断裂。

(2) 在横向拉伸、纵向拉伸及剪切测试中,3种断裂形式均起裂于蒙皮焊趾处,沿着下熔合线扩展,下熔合线是焊缝的薄弱区域。

(3) 下熔合线热影响区晶粒比上熔合线热影响区大,同时晶粒晶界也比上熔合线较明显。这是造成下熔合线区是T型接头的薄弱区域的原因。

(4) 针对焊趾总是裂纹萌生处、下熔合线强度低于上熔合线的现象,后期工作将着重于进一步优化工艺参数,提高下熔合线热影响区和焊趾的强度。

参考文献

- [1] 李俐群,陈彦宾,陶汪.铝合金双光束焊接特性研究.中国激光,2008,35(11):1783-1788.
- [2] 翟玉峰,黄坚,李敏,等.6061-T6铝合金高速高功率CO₂激光填丝焊接性的研究.中国激光,2011,38(5):85-90.
- [3] 刁旺战.铝合金双光束激光填丝焊温度场与应力场数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [4] 郑文健.铝合金T型接头双束激光双侧同步焊接的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] 纪春雨,李伟剑,李伟红,等.激光焊接技术发展及其在航空工业领域的应用.航空制造技术,2009(25):126-129.
- [6] 黄瑞.1420铝锂合金的双光束激光焊接[D].北京:北京工业大学,2007.
- [7] 张健,卞鸣煜,冷建兴,等.T型焊接接头疲劳性能研究.船舶工程,2009,31(2):60-63. (责编 叶枫)