

异种铝合金搅拌摩擦点焊工艺研究

尹玉环¹ 郭立杰¹ 胡绳荪² T. H. North³

(1 上海航天设备制造总厂,上海 200245)

(2 天津大学材料科学与工程学院,天津 300072)

(3 多伦多大学材料科学与工程学院 M5S 3E4)

文 摘 研究了搅拌针长度对 Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头力学性能的影响。结果表明,在保持轴肩压入深度为 500 μm 条件下,搅拌针长度从 1.6 mm 增加到 2.0 mm 的过程中,点焊接头的力学性能无明显变化;当搅拌针长度继续增加到 2.2 mm 时,点焊接头的力学性能迅速提高。通过分析提出高度锯齿状的 HOOK 形貌是点焊接头力学性能提高的主要原因。

关键词 搅拌摩擦点焊,铝合金,搅拌针长度,力学性能,HOOK

中图分类号: TG459.9

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.017

Research on Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Alloys

YIN Yuhuan¹ GUO Lijie¹ HU Shengsun² T. H. North³

(1 Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245)

(2 School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(3 School of Material Science and Engineering, University of Toronto, Toronto 300072)

Abstract The influence of pin length on the mechanical properties of dissimilar Al5754/Al6111 friction stir spot welds has been investigated. The mechanical properties show no obvious changes when the pin length increases from 1.6 mm to 2.0 mm. However, the mechanical properties of spot welds improve a lot when the pin length increases to 2.2 mm, which is the basically caused by highly serrated hOOK profiles.

Key words Friction stir spot welds, Al-alloys, Pin length, Mechanical properties, HOOK

0 引言

目前在现役型号的铝合金舱体、箭体的结构制造中,铆接工艺仍是最主要的连接方法之一,但其不能有效减重、加工过程会产生大量多余物以及噪声污染严重。相比,搅拌摩擦点焊可以实现板材之间的直接连接,不会产生多余物,工作环境清洁,无噪音污染,是一种高质量、高效率、高可靠、绿色环保的连接技术,同时能够避免铆钉引入所带来的增重问题,实现铝合金结构的有效减重。因此在航天工业领域,具有替代铆接工艺的潜在优势。

关于铝合金搅拌摩擦点焊,存在许多相互矛盾的结论,例如关于搅拌头压入深度对接头力学性能影响^[1-4]。鉴于上述现状,本文主要对搅拌头压入深度和铝合金搅拌摩擦点焊接头微观结构、力学性能之间的关系进行研究。以这种方式设计实验,可以消除轴

肩压入深度的变化对接头力学性能的影响,只考察搅拌针长度变化所带来的压入深度的影响,因此可以保证焊点具有良好的可比性。

1 试验

试验材料分别为 1.6 mm 厚的 Al5754 和 1.5 mm 厚的 Al6111 板材,尺寸为 100 mm \times 25 mm,其中 Al5754 为上板材料。所有试验中均采用 500 r/min 的搅拌头旋转速度,2.5 mm/s 的下压速度和 s 的停留时间,保持轴肩压入深度为 500 μm 。搅拌摩擦点焊设备为位移控制型;搅拌头材料为 H13 钢,经热处理后其硬度达到 46~48 HRC,轴肩直径为 10 mm,搅拌针直径为 4 mm,搅拌针长度分别为 1.6、1.8、2.0、2.2 mm。搅拌头形状如图 1 所示。

剪切试验采用 AWS D17.2/D17.2M:2007 标准,试板尺寸为 100 mm \times 25 mm,如图 2 所示。每组

参数重复实验四次,一个用于金相分析,其余三用于剪切试验。

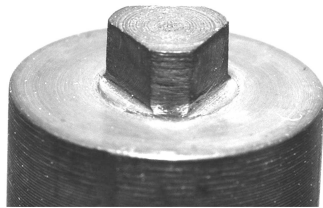


图1 搅拌头
Fig.1 Tool design

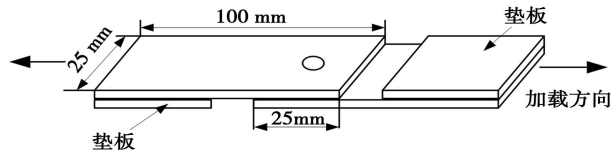


图2 剪切试验示意图
Fig.2 Schematic of shearing test

2 结果与讨论

2.1 搅拌针长度对接头微观结构的影响

图3所示为随搅拌针长度的变化,Al5754/Al6111搅拌摩擦点焊接头微观结构的横截面微观结构图。在搅拌摩擦点焊接头中,一个重要的指标就是接头的结合宽度,该宽度包括接头部分冶金结合以及完全结合区域两个部分的宽度^[5]。

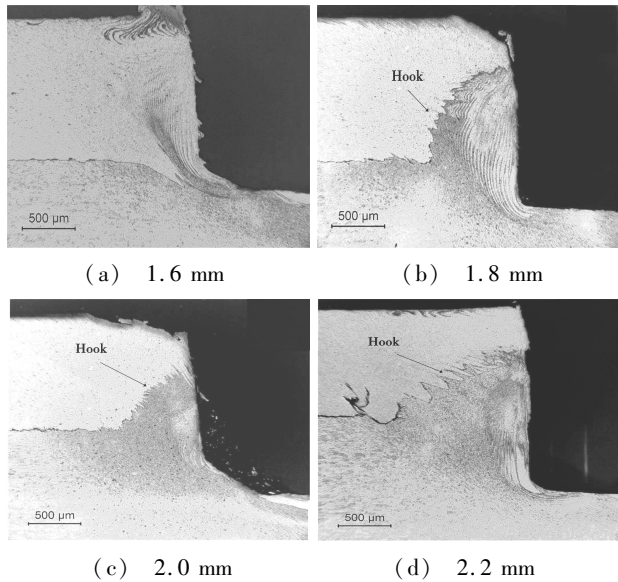


图3 不同搅拌针长度条件下的点焊接头
Fig.3 Friction Stir spot welds under different pin lengths

从图2可以看出,随搅拌头压入被焊工件深度的增加,向上运动的下板材料逐渐增多,而由于轴肩的压入深度保持不变,因此进入搅拌区的上板材料也基本保持不变,所以在两者的共同作用下,点焊接头的结合区域逐渐增大,如表1所示。此外,从图中还可以看出,当搅拌针长度 ≥ 1.8 mm时,上下板之间界面处的HOOK表现为锯齿状,当搅拌针长度为2.2 mm时,锯齿状形貌特征最为明显。

表1 不同搅拌针长度条件下接头的结合宽度

Tab.1 Bonded width of spot welds under different pin lengths

搅拌针长度/mm	结合宽度/mm
1.6	750
1.8	1000
2.0	1070
2.2	1230

2.2 搅拌针长度对接头力学性能的影响

图4所示为Al5754/Al6111搅拌摩擦点焊接头剪切力随搅拌针长度的变化情况。当搅拌针长度为1.8 mm时,所获得点焊接头的剪切力略微高于1.6和2.0 mm,但无较大差别;当搅拌针长度增加到2.2 mm时,点焊接头的剪切力迅速提高,显著高于其余三种情况。

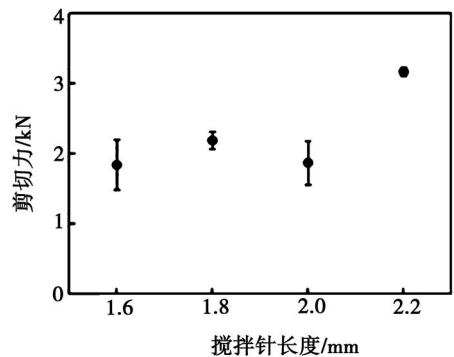


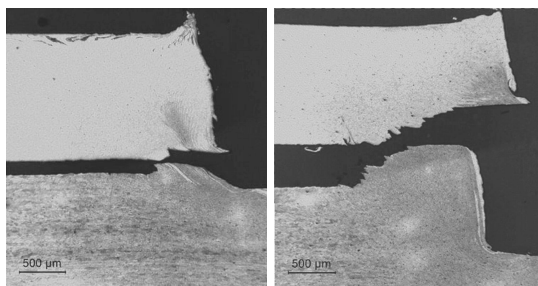
图4 不同搅拌针长度条件下点焊接头的剪切力
Fig.4 Mechanical properties of friction stir spot welds under different pin lengths

图5所示为Al5754/Al6111搅拌摩擦点焊接头的破坏形式。可以看出,Al5754/Al6111搅拌摩擦点焊接头的断裂形式并不会受到搅拌针长度变化的影响,在拉伸试验中,裂纹首先沿HOOK扩展,随后穿过搅拌区而破坏在中心孔的边缘。

由前面的分析可知,随搅拌针长度的增加,点焊接头的结合宽度逐渐增大,这一变化趋势与接头力学性能的变化趋势并不吻合,因此再用结合宽度来解释接头力学性能的变化是不可行的。结合Al5754/Al6111搅拌摩擦点焊接头的断裂方式,HOOK尖端到中心孔边缘的距离是裂纹扩展的最后路径,那么该距离的大小理论上讲对接头的力学性能有直接影响。

表2为HOOK尖端到中心孔边缘距离Y的测量结果,当搅拌针长度分别为1.6和2.0 mm时,Y基本相同;当搅拌针长度分别为1.8和2.2 mm时,Y值也大致相同。虽然当搅拌针长度分别为1.6和2.0 mm时,点焊接头的剪切力基本相同,但是当搅拌针长度分别为1.8和2.2 mm时,点焊接头的剪切性能大不

相同,因此根据 Y 值的大小也不能对此加以解释。



(a) 1.6 mm (b) 2.2 mm

图5 点焊接头的断裂方式

Fig.5 Fracture mode of friction stir spot welds

表2 HOOK 尖端到中心孔边缘的距离 Y

Tab.2 Distance (Y) from the tip of HOOK to the keyhole periphery

搅拌针长度/mm	$Y/\mu\text{m}$
1.6	534
1.8	750
2.0	503
2.2	737

由于上述各因素均不能有效的解释 Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头剪切力的变化趋势,因此进一步对断口形貌进行分析。由图5可以看出,当搅拌针长度不同时,点焊接头的断口具有不同的形貌特征。当搅拌针长度为 1.6 mm 时,HOOK 区域基本上表现为平滑表面[图 5(a)];而当搅拌针长度为 2.2 mm 时,HOOK 区域则表现为明显的锯齿状形貌[图 5(b)]。

对呈锯齿状的 HOOK 区域进行 EDX 分析发现,在锯齿的上边缘 A 处其材料的组成为 95.98wt% Al, 2.35wt% Mg, 1.18wt% Cu 和 0.49wt% Mn,而在锯齿的下边缘 B 处其材料的组成为 96.57wt% Al, 1.83wt% Cu, 0.81wt% Mg 和 0.79wt% O,如图6所示。由于在锯齿下边缘处发现了氧元素的存在,证明了锯齿的下边缘与 HOOK 区域中由氧化物粒子所组成的部分相对应,而锯齿的上边缘则与表现为冶金结合的区域相对应。

在剪切试验过程中,裂纹沿锯齿状的 HOOK 扩展,由于 HOOK 区域由氧化物粒子和局部冶金结合区域组成,当遇到氧化物粒子时,破坏迅速发生;而当遇到表现为冶金结合的区域时,试样破坏则会遇到阻力,表现为剪切性能的提高。当搅拌针长度较小时(例如 1.6 mm),HOOK 区域较为平滑,氧化物粒子 HOOK 均匀分布,因此裂纹产生后迅速扩展,接头的剪切力较小;而当搅拌针长度较大时(例如 2.2 mm),HOOK 区域为高度锯齿状,锯齿中冶金结合区域的存在有效阻止了裂纹的扩展,因此接头的剪切力提高。当搅拌针长度为 1.8 mm 时,与 1.6 和 2.0 mm 相比,显然 HOOK 区域锯齿状形貌更加明显(图3),

因此在这种条件下所获得的点焊接头其剪切力也有所增大,如图4所示。HOOK 区域锯齿状形貌特征形成的影响因素包括搅拌工具几何形状、焊接工艺参数选择等,如何设计合理的搅拌工具并优化焊接工艺以改善 HOOK 形貌,提高接头的力学性能仍有待系统深入的研究。

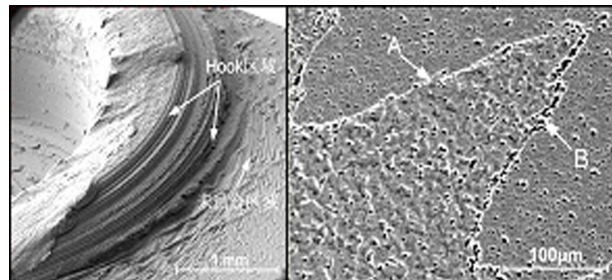


图6 点焊接头的断口形貌及 EDX 分析

Fig.6 Fracture surface and EDX analysis of friction stir spot welds

3 结论

(1) 在保持轴肩压入量为 500 μm 条件下,Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头的结合宽度随搅拌针长度的增加而增大;

(2) 当搅拌针长度从 1.6 mm 增加到 2.0 mm 的过程中,Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头的力学性能无较大变化;而当搅拌针长度增加到 2.2 mm 时,接头力学性能迅速提高,达到最大值;

(3) HOOK 形貌对 Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头的力学性能具有重要影响,高度锯齿状的形貌特征是获得具有良好剪切性能 Al5754/Al6111 搅拌摩擦点焊接头的关键。

参考文献

[1] Johnson Marry Ruth. Friction stir welding takes off at Boeing [J]. Welding Journal, 1999, 78(2): 35-39

[1] Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K. Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminum alloys [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 2230-2236

[2] Lathabai S, Painter M J, Cantin G M D, et al. Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy [J], Scripta Materials, 2006, 55: 899-902

[3] Freeney T, Sharma S, Mishra R. Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot welds [J]. SAE Technical Series, 2006-01-0969

[4] Mitlin D, Radmilovic V, Pan T, et al. Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441: 79-96

[5] Yin Y H, Sun N, North T H, et al. HOOK formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2062-2070

(编辑 任涛)