

回填时间对 RFSSW 接头断裂行为的影响

姬书得¹, 王 月¹, 马 琳¹, 柴 鹏², 高双胜¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136;

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究回填时间对回填式搅拌摩擦点焊接头断裂模式和断裂机理的影响, 对上下板厚度分别为 1.5 mm 和 2 mm 的 LY12 铝合金板材进行了点焊试验, 并对焊后接头进行拉剪试验。结果表明, 当回填时间较短时, 套筒作用区与热力影响区间界面上的原子扩散效果差, 甚至在近表面附近出现开裂, 导致接头的剪切-塞型断裂。当回填时间足够长时, 焊接接头的断裂模式转化为剪切断裂, 裂纹主要沿着上下板搭接面扩展。同时, 显微结构、硬度与断口形貌的试验结果验证了文中对断裂机制的解释。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; LY12 铝合金; 回填时间; 断裂

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)05-0040-04

0 序 言

为减轻结构质量, 具有高比强度的铝合金在航空、汽车等领域有着广泛的应用, 而搭接结构是典型的铝合金金属结构^[1,2]。作为一种新型固相连接技术, 德国 GKSS 研究中心于 1999 年提出的回填式搅拌摩擦点焊 (refill friction stir spot welding, RFSSW) 由搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 发展而来^[3,4]。RFSSW 工艺可克服一系列熔化焊的缺点且焊点表面无匙孔, 是一种具有广阔应用前景的适用于搭接结构的点焊技术。

国内外对 RFSSW 的研究主要集中在流场、显微组织、力学性能以及疲劳性能等方面^[5-8]。Kalagara 等人^[5]采用标识材料的方法对搅拌针下扎式 RFSSW 的下扎阶段的材料流动规律进行了研究。王联凤等人^[7]指出 5A06 铝合金点焊接头的显微组织主要为 α 固溶体, 且在搅拌头转速为 2 000 r/min 时接头抗拉剪载荷的能力最强。朱小刚等人^[8]的疲劳试验结果表明, 减小钩状缺陷的尺寸及降低缺口处的应力集中有利于提高接头的疲劳性能。

由目前的报导可知, 对于 RFSSW 的拉剪接头来说, 其断裂形式主要包括剪切、剪切-塞型与塞型三种, 但目前的研究多偏重于断口形貌^[2,4], 而有关断裂机理缺乏详细分析。文中以可获得更大面积焊点的套筒下扎式 RFSSW 工艺来焊接 LY12 铝合金, 从

材料流动与原子扩散等方面分析回填时间对断裂模式的影响机制。文中的研究对于深入了解 RFSSW 的焊接机理, 优化焊接工艺参数具有重要意义。

1 试验方法

文中试验材料选用上下板厚度分别为 1.5 mm 和 2 mm 的 LY12 铝合金。尺寸均为 140 mm × 60 mm; 在焊接过程中, 搭接部分尺寸为 50 mm × 60 mm。焊接前将试板用砂纸打磨并用丙酮去除油污等杂质, 利用型号为 RPS100 SK10 的回填式点焊设备进行拉剪试样的焊接。各焊接参数, 如转速、下扎深度、下扎时间、停留转速和停留时间分别为 2 000 r/min, 1.8 mm, 2.5 s, 800 r/min 和 0.5 s。试验所用搅拌头由压紧环、套筒与搅拌针组成。压紧环外径、套筒外径与搅拌针直径分别为 14.5, 9 与 5 mm; 套筒内径稍大于搅拌针直径, 为 5.2 mm。

RFSSW 试样用电火花线切割设备沿焊点中心切割, 并经砂纸打磨和抛光制成金相试样。用标准凯勒试剂对金相试样腐蚀, 然后利用型号为 Olympus-GX71 的光学显微镜对焊点的横截面形貌及显微组织进行分析。拉剪试验在型号为 RG4300 的拉伸试验机上进行, 然后用型号为 ZSA403 的体视显微镜观察试样的断裂位置。

2 试验结果与讨论

2.1 断裂模式机理分析

试验结果表明, 当搅拌头的最大下扎深度为

1.8 mm,即套筒扎入下板时,随回填时间增加,RFSSW 接头主要出现两种断裂模式:剪切-塞型断裂与剪切断裂,如图 1 所示. 塞型断裂模式与下扎深度有关^[2,4],而在文中的固定下扎深度下该模式未出现. 可以看出,回填时间较短时主要发生剪切-塞型断裂;而回填时间较长时主要发生剪切断裂. 剪切-塞型断裂模式下,焊点留在下板,裂纹主要沿套筒回抽路径从钩状缺陷开始一直延伸到焊点上表面. 剪切断裂模式下,上下板剥离,裂纹沿着上下板搭接面处的连接韧带扩展.

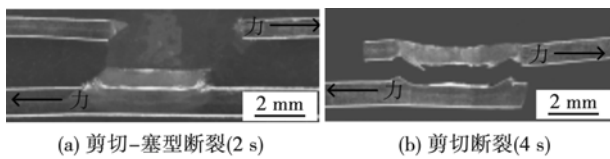


图 1 不同回填时间下 RFSSW 接头的断裂形貌

Fig. 1 Fracture morphology of RFSSW joint under different refilling time

图 2 给出了不同回填时间下的 RFSSW 接头横截面形貌. 图 3 是 RFSSW 过程示意图,焊接整个过程中压紧环始终紧贴焊板表面,套筒与搅拌针做高速旋转. 摩擦阶段,高速旋转的套筒和搅拌针与材料摩擦产生焊接所需要的热;下扎阶段,套筒扎入到下板设定深度,同时搅拌针回抽;回填阶段,套筒向上运动并逐渐从扎入板材的状态运动到上板表面,搅拌针向下运动直到与上板表面接触. 在此过程中,套筒向上运动留下空腔,搅拌针挤压套筒内的材料并使其流动到空腔;成型阶段,压紧环、套筒及搅拌针同时撤离板面,焊接完成. 其中影响焊接质量的最主要阶段是回填阶段. 因此,在套筒作用区 (sleeve stir zone, SSZ) 与热力影响区 (thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 之间有一界面,界面两侧的材料被挤到一起,并发生类似于固相扩散焊的过程. 除上述界面外,SSZ 内其它区域的材料受到强烈的搅拌作用而流动,造成与套筒直接接触的板材搭接界面两侧包铝层 (纯铝) 被不同程度地打碎,并随着套筒的下扎与回抽运动而发生迁移. 由图 2 可知,焊点边缘附近的包铝层向上运动的位移量随着到 SSZ 与 TMAZ 间界面距离的减小而增加;且长的回填时间有利于增加 SSZ 内包铝层的向上迁移. 事实上,对于 RFSSW 工艺来说,除 SSZ 外,搅拌区 (stir zone, SZ) 还包括搅拌针作用区 (pin stir zone, PSZ). 在 SZ 内,SSZ 材料在套筒的旋转下做高速流动,进而带动邻近区域的材料运动. 对于金属材料来说,温度越高,流动应力越低. 但较大的材料粘度

还会使远离套筒壁的材料流动速度迅速降低. 因此,PSZ 区的包铝层被打碎的程度非常小,尤其在焊点中间位置 (如图 2a,b). 因此,PSZ 内焊点搭接界面处亦主要发生固相下的原子扩散. 综上,材料流动与原子扩散对于 RFSSW 来说是两个非常重要的现象,而接头的断裂机制与其相关,下面进行详细介绍.

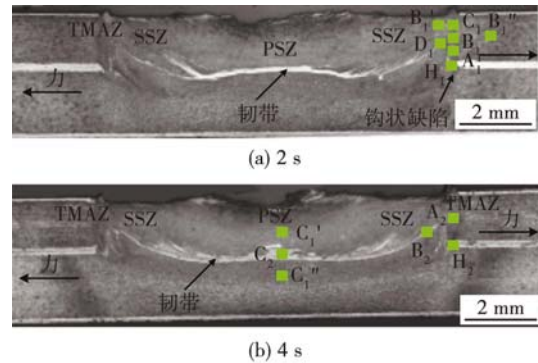


图 2 不同回填时间下焊点的横截面

Fig. 2 Cross section of welding spot under different refilling time

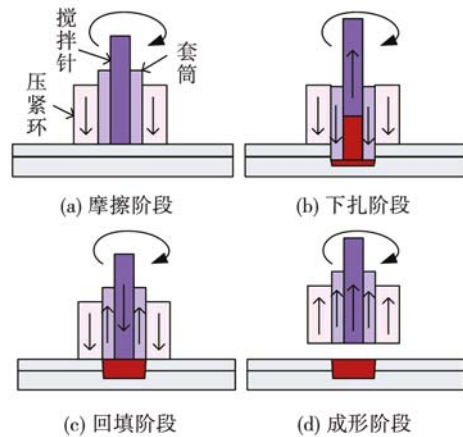


图 3 套筒下扎式 RFSSW 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of RFSSW sleeve plunging

2.1.1 剪切-塞型断裂的机理

为了解释剪切-塞型断裂的机理,在图 2a 上的典型位置进行了标示. 其中点 H_1 位于钩状缺陷的尖端;点 A_1, B_1 与 C_1 分别位于 SSZ 与 TMAZ 的界面.

由前面的分析可知,类似于固相扩散焊的焊接过程发生在 SSZ 与 TMAZ 的界面处,而原子扩散效果决定了界面处的连接强度. 原子扩散效果主要受温度、压力与时间的影响. 由于焊接温度主要与搅拌头的转速有关,而铝合金的热传导系数非常高,因

此,文中假定不同区域的焊接温度相同.在回填阶段,受搅拌针挤压而“回流”到空腔的材料依次经过点 A_1 , B_1 与 C_1 , 因此点 A_1 的原子扩散时间最长,进而获得高的连接强度.相应地,点 B_1 与 C_1 处的原子扩散时间短,连接强度较弱.点 A_1 , B_1 与 C_1 均是位于焊接的高温区,因此在焊后的冷却过程中承受拉应力,因此接近上板表面的位置比较容易出现裂纹等缺陷.

图 2a 中的点 D_1 处是点 H_1 邻近且出现包铝层较多的区域;与点 A_1 相比,被打碎的纯铝与板内部 LY12 混合,并在较大的垂向力及较长的时间下发生原子扩散,因此当点 A_1 处的扩散时间短时,点 D_1 位置的承载能力较大.点 B_1' 位于 SSZ, 此处的材料经历大应变与应变速率,动态再结晶必然发生,进而获得细小的等轴晶(图 4a);点 B_1'' 位于 TMAZ, 此区域材料将发生软化现象,其显微组织为变形的粗大晶粒(图 4b).同时,点 B_1' 与 B_1'' 处均不同程度地发生由高温加热而引起的强化相溶解,这对于材料的硬度是不利的.

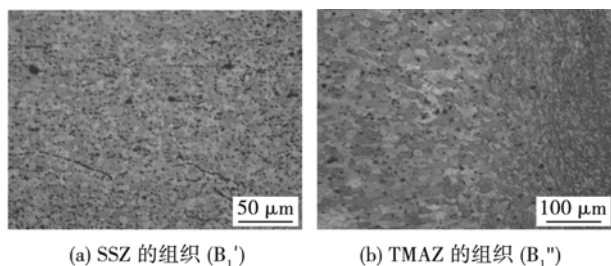


图 4 TMAZ 与 SSZ 的显微组织

Fig. 4 Microstructure of TMAZ and SSZ

图 5 给出的焊缝区硬度分布曲线图证明了上述说法.但由于回填时间非常短,点 B_1 处经历的原子扩散时间小于 1 s, 因此,很难获得高的承载能力.因此,在 B_1 , B_1' 与 B_1'' 中,点 B_1 处的承载能力最差,为

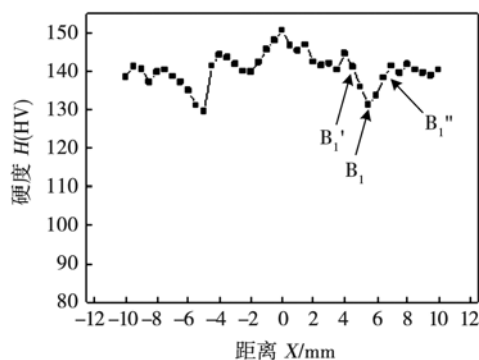


图 5 RFSSW 接头焊缝区的显微硬度分布规律

Fig. 5 Distribution of microhardness in weld of RFSSW joint

较易开裂的位置.当接头承受拉剪载荷时,钩状缺陷的尖端(H_1)首先开裂,然后裂纹依次向承载能力较弱的 A_1 与 B_1 处扩展,最终扩展到点 C_1 处,完成剪切-塞型断裂.

2.1.2 剪切断裂的机理

在图 2b 中给出了接头典型位置的标示,用于解释剪切断裂的机理.其中点 H_2 位于钩状缺陷的尖端;点 A_2 与 C_2 分别位于 SSZ 与 TMAZ 间的界面及搭接接头的界面.

与 LY12 铝合金母材相比,SSZ 与 HAZ 内显微组织发生变化,导致硬度的降低(图 5),但其值应大于纯铝的硬度.因此,对于 RFSSW 接头,发生薄弱环节.随着回填时间由 2 s 增加到 4 s,图 2b 中点 A_2 处的原子扩散效果加强,而以纯铝为主的点 B_2 处的晶粒会由于加热时间的增加而增加,使硬度进一步降低.因此,回填时间的增加对于点 A_2 与 B_2 处的材料硬度来说是截然相反的结果.当回填时间足够长(比如文中的 4 s)时,点 A_2 的材料承载能力大于点 B_2 处,使由钩状缺陷的尖端点 H_2 起裂的裂纹向承载能力较低点 B_2 处扩展,而不是点 A_2 处.

点 C_2 位于搭接接头的界面处,此处的包铝层(韧带)未打碎,主要发生原子扩散.尽管在下扎过程与回填过程,此处的原子扩散始终发生且有较大的压力(界面与垂向力垂直),原子扩散效果好.然而,点 C_2 处发生的是固相下的原子扩散且扩散时间不足 7 s(下扎时间为 2.5 s),因此点 C_2 处的连接强度将小于板材内部的点 C_2' 与 C_2'' . 综上,当裂纹扩展到 B_2 时,将进一步向连接强度弱的点 C_2 处扩展,进而完成 RFSSW 接头的剪切断裂.

2.2 断口形貌分析

图 6 所示为剪切-塞型断裂模式下套筒回抽路径的断口形貌.其中 H_1 为 Hook 缺陷的尖端,此处并未形成有效的连接,因此呈现出不规则的层状结构.如上文所述,在材料回填过程中,随着套筒的回抽和搅拌针的下扎,热塑性材料由于受到挤压力而

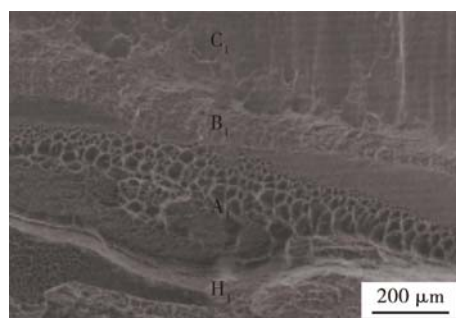


图 6 剪切-塞型断裂模式下断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology under shear-plug fracture mode

依次经过 A_1 , B_1 和 C_1 点,从而逐渐填满焊点. 因此, A_1 , B_1 , C_1 点处 SSZ 的材料和 TMAZ 之间的回填时间依次变短. A_1 点有较多的韧窝,且韧窝尺寸较大、深度较深,说明较长的回填时间在此处形成良好的连接; B_1 由于回填时间较短,而未形成韧窝结构,强度较弱. C_1 处是上文图 2a 所述裂纹区域,此处因未形成连接,因此无韧窝存在.

图 7 所示为剪切断裂模式下上下板搭接面处的断口形貌. 图 7a 为点 H_2 和 B_2 的断后形貌,其中 H_2 为 Hook 的尖端,此处未形成有效的连接而呈层状结构,是裂纹的起源处. B_2 因为受到搅拌头的机械搅拌作用,上下板包铝层混合,形成连接,因此有韧窝存在. 图 7b 所示为焊点中心 C_2 区域,该处呈现不规则的层状结构. 这是因为在焊接过程中包铝层的聚集所致,虽然回填时间较长,但是有可能仍未形成有效的冶金结合而无较大的韧窝存在.

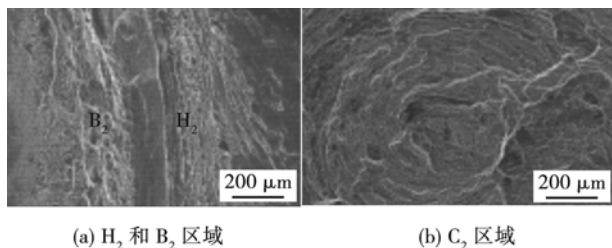


图 7 剪切断裂模式下断口形貌图

Fig. 7 Fracture morphologies under shear fracture mode

3 结 论

(1) 研究了回填时间对 RFSSW 接头断裂行为的影响. 结果表明,随着回填时间的增大,拉剪接头的断裂模式从剪切-塞型断裂转变为剪切断裂. 剪切-塞型断裂模式下裂纹主要沿着套筒回抽路径扩展;剪切断裂模式下裂纹主要沿上下板搭接面扩展.

(2) 套筒回抽路径和上下板搭接面处的原子扩散强度对 RFSSW 拉剪接头的断裂行为有着重要影响. 此结论与断口形貌的结果相一致.

参考文献:

- [1] Silva A A M D, Santos dos J F, Rosendo T R, *et al.* Performance evaluation of 2-mm thick alclad AA2024 T3 aluminium alloy friction spot welding[J]. Sae Technical Papers, 2007.
- [2] Shen Z K, Yang X Q, Zhang Z H, *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.
- [3] Yuan W, Mishra R S, Webb S, *et al.* Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2011, 211(6):972-977.
- [4] Zhao Y Q, Liu H J, Chen S X, *et al.* Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2014, 62(10):40-46.
- [5] Kalagara S, Muci-kuchler K, Arbegast W. Visualization of material flow in a refill friction stir spot welding process using marker materials[J]. Jornal Vascular Brasileiro, 2010, 3(1):628-651.
- [6] 申志康, 杨新岐, 张照华, 等. 铝合金回填式搅拌摩擦点焊组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(6):73-76. Shen Zhikang, Yang Xinqi, Zhang Zhaohua, *et al.* Analysis of microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6):73-76.
- [7] 王联凤, 乔凤斌, 俞忠, 等. 铝镁合金填充式搅拌摩擦点焊接头的显微组织及力学性能[J]. 机械工程材料. 2014, 38(2):24-27. Wang Lianfeng, Qiao Fengbin, Yu Zhong, *et al.* Microstructure and mechanical property of refill friction stir spot welded joint of Al-Mg alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(2):24-27.
- [8] 朱小刚, 王联凤, 乔凤斌, 等. 6061-T6 铝合金回填式搅拌摩擦点焊疲劳性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(4):91-94. Zhu Xiaogang, Wang Lianfeng, Qiao Fengbin, *et al.* Fatigue failure analysis of 6061-T6 aluminum alloy refilled friction stir spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4):91-94.

作者简介: 姬书得,男,1977年生,博士,教授. 主要从事摩擦焊机理、工艺与仿真方面的研究工作. 发表论文30余篇. Email: superjsd@163.com