

异种高强铝合金搅拌摩擦焊搭接接头的缺陷和拉伸性能

宋友宝, 杨新岐, 崔 雷, 申志康, 侯晓鹏

(天津大学 材料科学与工程学院 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊对 5 mm 厚 2024/7075 异种高强铝合金进行上下板交换位置的搭接焊试验, 分析接头的缺陷特征和拉伸性能。结果表明: 材料位置和焊接速度对缺陷和拉伸性能有较大影响。当 2024 铝合金为上板时, 接头中存在大面积孔洞缺陷, 焊缝表面粗糙, 尤其在 300 mm/min 焊速下存在较严重的起皮缺陷; 钩状缺陷为搭接接头的典型缺陷, 低焊速(50 和 150 mm/min)下钩状缺陷向上扩展距离较大, 7075 铝合金为上板时高焊速(225 和 300 mm/min)下后退侧钩状缺陷水平向焊核区扩展距离较大; 在低焊速下, 7075 铝合金为上板的接头强度较高; 在高焊速下, 2024 铝合金为上板的接头强度较高; 钩状缺陷严重减小接头的有效板厚和有效搭接宽度, 是接头强度降低的主要因素, 优化搅拌摩擦焊搭接工艺必须同时增大有效板厚和有效搭接宽度。

关键词: 2024/7075 铝合金; 搅拌摩擦焊; 搭接接头; 缺陷; 拉伸性能

中图分类号: TG453

文献标志码: A

Defects and tensile properties of friction stir welded lap joints for dissimilar high-strength aluminum alloys

SONG You-bao, YANG Xin-qin, CUI Lei, SHEN Zhi-kang, HOU Xiao-peng

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Materials Science and Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Lap joints of 5 mm-thick dissimilar 2024/7075 aluminum alloys were fabricated by friction stir welding (FSW) with changing the top and bottom sheet material position. The defect features and tensile properties of the joints were compared and analyzed. The results show that the defects and tensile properties are significantly affected by material position and welding speed. When 2024 alloy is placed as the top sheet, extensive void defects are found in the joints, the weld surface is coarse and severe peeling defect appears at 300 mm/min especially. As a typical defect in the lap joints, hook extends a large distance upwards at low welding speeds (50, 150 mm/min). At high welding speeds (225, 300 mm/min), the retreating side hook propagates largely into the stir zone horizontally when 7075 alloy acts as the top sheet. At low welding speeds, the joint strength is higher when 7075 alloy acts as the top sheet. While the joint shows higher strength at high welding speeds when 2024 alloy is placed as the top sheet. The hook defect reduces the effective sheet thickness (EST) and effective lap width (ELW) of joints severely, which is the main factor reducing the joint strength. So, the EST as well as the ELW should be increased simultaneously to optimize the friction stir lap welding process.

Key words: 2024/7075 aluminum alloy; friction stir welding; lap joint; defect; tensile property

2×××和 7×××系列铝合金具有很高的强度, 被广泛用于制造航空航天结构件。例如飞机的机身是由 7×××铝合金纵梁铆接在 2×××铝合金蒙皮上^[1]。但铆接

接头会增加结构质量, 不利于飞机结构的轻量化。传统的 TIG 或激光焊等熔焊方法在焊接 2×××和 7×××系列铝合金时, 易产生气孔和裂纹等缺陷, 并且接头变

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775159)

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2014-03-10

通信作者: 杨新岐, 教授, 博士; 电话: 13820035153; E-mail: xqyang@tju.edu.cn

形严重、强度较低^[2-3]。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种新型固相连接技术,在焊接高强铝合金方面具有很大优势,已被考虑作为替代铆接的一种新工艺在航空航天领域使用^[4]。

2024 和 7075 为高强铝合金的常用牌号,目前针对这两种铝合金 FSW 的研究主要集中在对接接头方面,国外有不少学者对 2024 和 7075 铝合金 FSW 对接接头的显微组织、材料流动、力学性能等方面展开了深入研究^[5-10]。航空航天结构件中会经常涉及到异种材料的搭接接头,而 2024 和 7075 铝合金 FSW 搭接接头方面的研究很少, CEDERQVIST 等^[11]和 DUBOURG 等^[12]研究了工艺参数对 2024-T3/7075-T6 铝合金 FSW 搭接接头性能的影响,但未对这两种铝合金 FSW 搭接接头的缺陷进行深入讨论。对于异种材料搭接而言,上下板材料的放置位置改变是否会对接头组织和力学性能产生影响也不是十分清楚。本文作者选取 5 mm 厚 2024 和 7075 铝合金进行调换上下板材料位置的两组搅拌摩擦焊搭接试验,研究焊接速度和材料位置对搭接接头缺陷特征和拉伸性能的影响,为 2024/7075 异种铝合金 FSW 搭接工艺的优化提供依据。

1 实验

焊接试验使用的材料为 5 mm 厚 2024-T3 和 7075-T6 铝合金轧制板材,试板尺寸为 200 mm×150 mm,其化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所列。试板搭接宽度为 50 mm,焊接时使后退侧靠近上板边缘位置。所用搅拌摩擦焊机型号为 FSW-RS32-015(中国搅拌摩擦焊中心制造),搅拌头为凹面轴肩和截锥形螺纹搅拌针,轴肩直径为 15 mm,搅拌针长度为 6 mm,顶端和底端直径分别为 4.6 和 6 mm。轴肩下压量和倾角分别为 0.20 mm 和 2.5°。焊前用砂纸打磨搭界面,采用 1500 r/min 转速和 50、150、225 和 300 mm/min 焊速 4 组参数,并交换上下板材料位置共进行 8 组试验。焊后分别去除焊缝起始段和收尾段各 20 mm,在中间取 3 个拉伸试样和 1 个金相试样。在 CSS-44100 电子万能试验机上进行拉伸试验,机头前进速度为 1.5 mm/min。为减小拉伸过程中的额外弯曲应力,在拉伸试样两端分别垫上两个 5 mm 厚垫片,拉伸试样和垫片形状和尺寸如图 1 所示。采用成分为 2 mL HF、3 mL HCl、5 mL HNO₃、190 mL H₂O 的 Keller 试剂,30 s 腐蚀时间腐蚀金相试样,在 OLYMPUS-GX51 光学显微镜上观察微观组织。用 Hatchi-4800 扫描电镜观察

拉伸试样断口形貌。

表 1 2024 和 7075 铝合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of 2024 and 7075 Al alloys (mass fraction, %)

Material	Cu	Zn	Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Cr	Al
2024	4.0	0.25	1.2	0.5	0.5	0.6	0.15	—	Bal.
7075	1.6	5.7	2.4	0.4	0.6	0.3	—	0.2	Bal.

表 2 2024 和 7075 铝合金的力学性能
Table 2 Mechanical properties of 2024 and 7075 Al alloys

Material	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
2024-T3	369	477	18
7075-T6	417	464	12

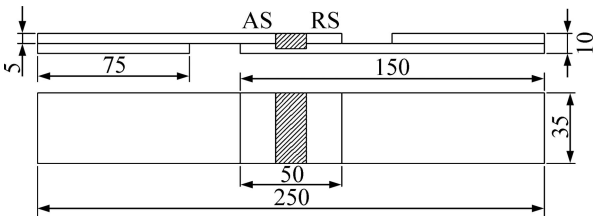


图 1 拉伸试样和垫片的形状及尺寸
Fig. 1 Shape and size of lap shear specimens and spacers (Unit: mm)

2 结果与分析

2.1 焊缝表面缺陷

焊后观察各组参数下焊缝表面形貌,发现 2024 铝合金作为上板所得焊缝表面较粗糙,特别是在 300 mm/min 高焊速下出现较大面积的起皮现象。而 7075 作为上板时各种焊速下焊缝表面成形美观,为较光滑的鱼鳞纹。图 2 所示为 300 mm/min 焊速下两种材料位置下焊缝表面形貌。2024 和 7075 两种铝合金化学成分的差异导致二者的高温塑性变形能力和流动性有一定差异。事实上,与 7075 铝合金相比,2024 铝合金的高温塑性变形能力和流动性较差,适于较高热输入的焊接,300 mm/min 焊速对 2024 铝合金而言热输入较小,导致轴肩的摩擦作用不足,无法在焊缝表面形成有效的流动和较好的塑性变形,因此焊缝表面粗糙。

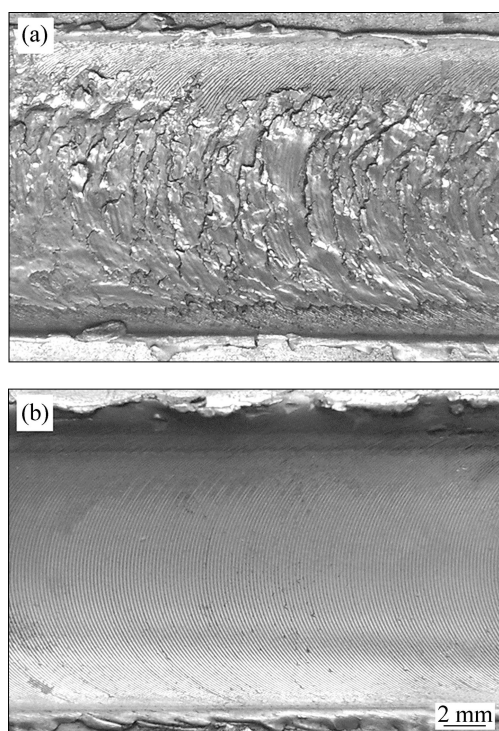


图 2 300 mm/min 焊速下焊缝表面形貌

Fig. 2 Surface appearance of welds obtained at 300 mm/min:

(a) 2024 alloy, top; (b) 7075 alloy, top

2.2 钩状缺陷

图 3 所示为接头截面典型宏观形貌, 焊缝可分为 3 个区: 焊核区(Stir zone, SZ)、热机械影响区(Thermal mechanical affected zone, TMAZ)和热影响区(Heat affected zone, HAZ)。根据转速和焊速的方向差异, 可将接头分为两部分。方向相同的为前进侧(Advancing side, AS), 方向不同的为后退侧(Retreating side, RS)。

另外, 从图 3 可以看出, 搅拌针外围两侧的原始搭接界面均向上偏移, 这种界面偏移现象在 FSW 搭接接头中被称为钩状缺陷^[13-15]。钩状缺陷实际为搅拌针外围材料在 FSW 过程中发生垂直方向运动而形成的上下板未结合的裂纹状界面。由图 3 可知, 钩状缺陷均出现在热机械影响区。焊核区材料升温塑化并在带螺纹搅拌针的搅拌作用下发生垂直方向流动, 并带动热机械影响区材料发生垂直流动, 因此, 原始搭接界面在热机械影响区发生弯曲。热机械影响区材料受到的热作用和搅拌作用相对有限, 上下板搭接面上的包铝层及氧化膜未被破碎, 故形成未冶金结合的间隙。图 4 所示为钩状缺陷局部放大图。可见上下板表面包铝层发生弯曲, 并且包铝层间存在较大的间隙。钩状缺陷沿垂直和水平两个方向扩展, 其垂直扩展会减小有效板厚^[11](Effective sheet thickness, EST, 指钩状缺陷端部到上板上表面或下板下表面的最小垂直距离), 其水平扩展会减小接头的有效搭接宽度(Effective lap width, ELW, 指前进侧和后退侧钩状缺陷末端之间的水平距离), EST 和 ELW 如图 3(b)所示。为定量评估钩状缺陷对接头强度的影响, 在此测量了 EST 和 ELW 并讨论其与接头强度的关系。

焊接速度和材料位置影响钩状缺陷的形状和尺寸。在 50 mm/min 低焊速下, 如图 3(a)和(c)所示, 钩状缺陷向上扩展的距离较大, 并且前进侧和后退侧的钩状缺陷形状和尺寸相似, 均以相似的倾角向上部焊核区偏移。在 225 mm/min 高焊速下, 前进侧和后退侧钩状缺陷形状差别较大。如图 3(b)和(d)所示, 钩状缺陷在前进侧向上扩展较小距离即终止, 而在后退侧先向上扩展较小距离后发生折曲再向下扩展, 最终终止在焊核区。前进侧焊速和转速方向相同, 焊核区材

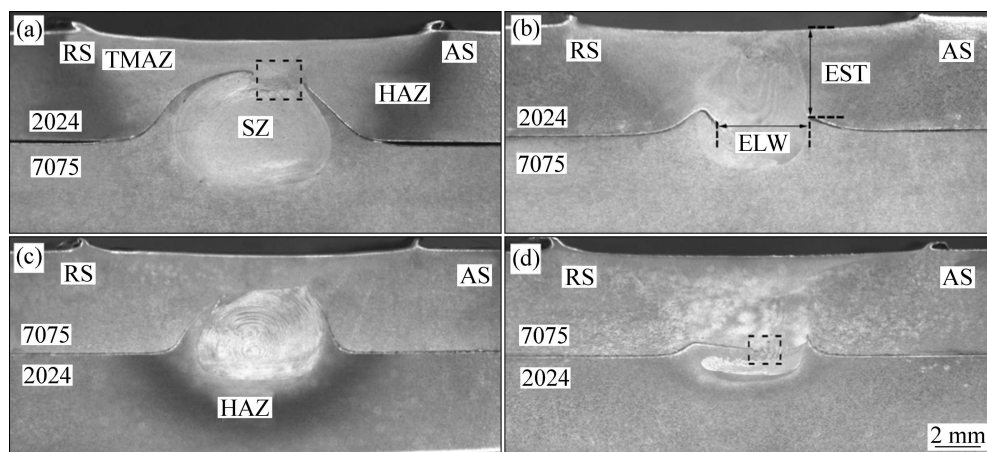


图 3 不同焊速下搭接接头横截面典型宏观形貌

Fig. 3 Typical transverse cross sections of lap joints at different welding speeds: (a) 2024 alloy, top, 50 mm/min; (b) 2024 alloy, top,

225 mm/min; (c) 7075 alloy, top, 50 mm/min; (d) 7075 alloy, top, 225 mm/min

料和热机影响区材料塑性变形差较大,热机影响区材料受到的向上驱动作用力较大,故前进侧钩状缺陷垂直向上扩展的趋势较明显。而在后退侧,焊速和转速方向相反,焊核区材料和热机影响区材料塑性变形差较小,热机影响区材料受到较小的向上驱动作用力,故后退侧钩状缺陷向上扩展趋势较小,取而代之的是向焊核中心沿水平方向扩展。

FSW 焊接过程中产热量(H_i)可以用公式 $H_i = \omega^2 / v$ 来表征^[16]。其中, ω 和 v 分别为转速和焊速, H_i 为热指数,热指数越大,FSW 产热量越多。在本试验中,转速保持不变,焊速增加时,热指数减小,产热量减少,焊核区材料塑化程度降低,流动性变差,搅拌针外围材料向上的流动能力减弱,故钩状缺陷向上扩展距离减小。在低焊速下,热指数大,产热量多,焊核区材料温度高、流动能力强,带动热机影响区材料向上的流动趋势明显。此种情况下,前进侧和后退侧材料不同变形流动能力被焊核区较强的流动能力所削弱,故在低焊速下,前进侧和后退侧的钩状缺陷向上扩展距离均较大,并且形貌也相似。

需要指出的是,材料位置不同时,钩状缺陷形貌也不一样。如图 4 所示,2024 铝合金为上板时前进侧钩状缺陷倾斜向上扩展至焊核区消失,而 7075 铝合金为上板时前进侧钩状缺陷几乎垂直向上扩展且端部较尖锐;2024 铝合金为上板时后退侧钩状缺陷先向上扩展一定距离,再以较大角度折弯向下扩展较小距离即

消失;而 7075 铝合金为上板时,后退侧钩状缺陷以较小角度折弯后几乎水平地向焊核区延伸较大距离。2024 和 7075 两种铝合金的化学成分差别较大,二者在热传导系数、线膨胀系数等物理性能方面差别较大,导致两种铝合金 FSW 过程中的流动能力不同,因此,当材料位置改变时,形成的钩状缺陷形貌也不同。

2.3 孔洞和弱连接

对两组试验焊缝进行显微观察发现,2024 铝合金为上板的 4 组焊速下焊缝中均存在较大面积的孔洞缺陷,并且在 150 mm/min 焊速下焊缝中孔洞面积最大,然后孔洞面积随焊速增大而减小。孔洞出现的位置如图 3(a)中虚线框所示,在焊核区上部、前进侧和后退侧两热机影响区之间。孔洞放大形貌如图 5(a)所示,可见焊缝中存在较多数量的不连续孔洞,孔洞周围为细小的等轴晶粒。在相同焊速下,7075 铝合金为上板的焊缝中无孔洞出现。在 FSW 中,转速对焊接质量的影响比焊速要更大。转速较高时,产热量较大,焊核区材料塑化程度过高而黏度大幅降低,无法与搅拌针发生有效摩擦,焊核区材料不能被搅拌针充分搅拌,搅拌针前进时留下的瞬时空腔无法被后面搅拌至前方的材料及时填满,导致孔洞出现。而 2024 铝合金的高温塑性变形能力较差^[17],焊核区材料在 1500 r/min 的较高焊速下塑化程度过于严重,与搅拌针无法形成有效摩擦,进而导致搅拌针前进过程中留下的空腔无法

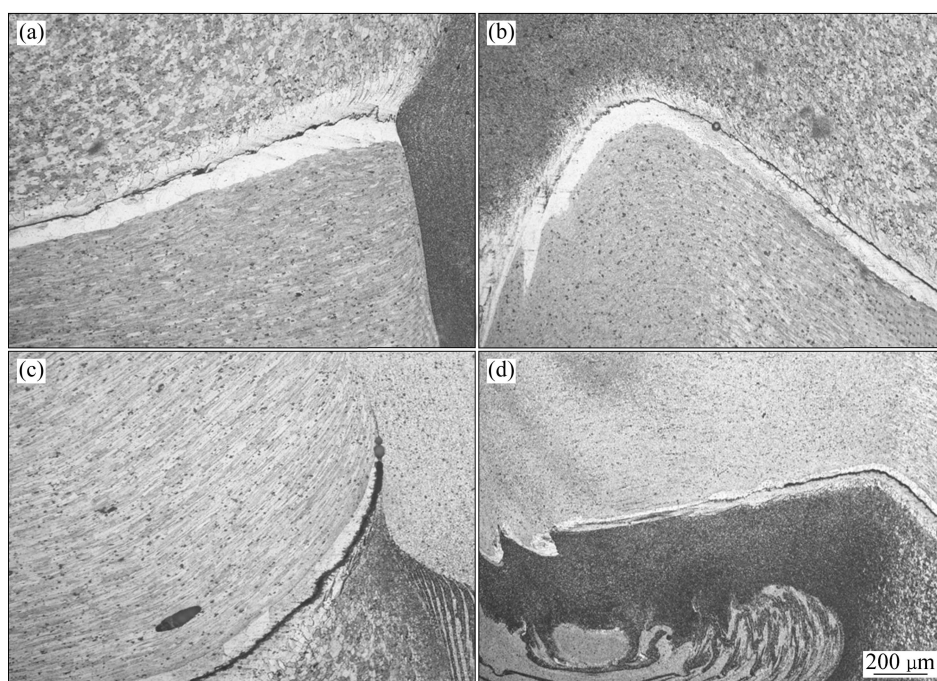


图 4 225 mm/min 焊速下钩状缺陷放大形貌

Fig. 4 High magnification morphologies of hooking defect at high welding speed of 225 mm/min: (a) AS, 2024 alloy, top; (b) RS, 2024 alloy, top; (c) AS, 7075 alloy, top; (d) RS, 7075 alloy, top

被及时填满,因此,在2024铝合金为上板时焊缝中出现孔洞缺陷。

除钩状缺陷外,FSW搭接接头中较容易出现的一种缺陷是弱连接缺陷,这种缺陷主要在高焊速接头中出现,两组接头中均存在。弱连接是搭接面的包铝层或氧化膜在焊接过程中未被充分破碎,断续、无固定形态分布的未冶金结合缺陷。弱连接多出现在焊核区,起始于后退侧钩状缺陷,并且贯穿于整个焊核区,图3(d)中虚线框中的弱连接缺陷放大图如图5(b)所示。由图可见,两种铝合金未发生有效混合,白色部分7075铝合金上包铝层未被破碎,与黑色部分2024铝合金未结合到一块,中间有明显的缝隙。弱连接缺陷是间断的,并且在焊核区被细小等轴晶所包围。FSW搭接过程中,搅拌工具与搭接面垂直,搭接面上的氧化膜较之对接更难被破碎。在高焊速下,焊核区温度低,塑化程度低,因此,搭接面上的氧化膜不能被充分破碎,易残留在焊核区,形成弱连接缺陷。

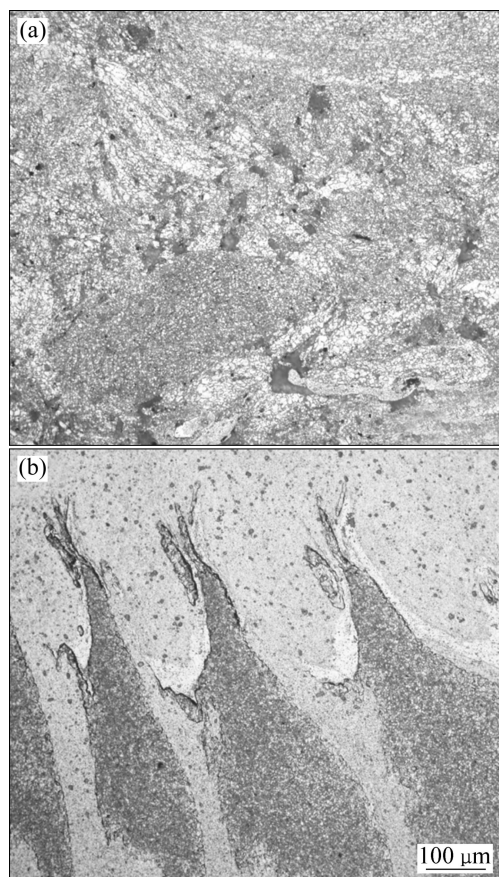


图5 孔洞和弱连接缺陷形貌

Fig. 5 Morphologies of voids (a) and lack of bond defects (b)

2.4 接头拉伸强度

有效板厚 EST 和有效搭接宽度 ELW 是影响搭接接头强度的主要因素。各组焊速下的 EST 和 ELW 如

图6(a)所示。总体来说,EST 随焊速的增加而增加。由前面的分析可知,焊速增加产热量减少,材料流动性降低,因此钩状缺陷向上扩展距离减小,EST 增加。对于 ELW,当2024铝合金为上板时,ELW 随焊速增加而增加;当7075铝合金为上板时,焊速从150 mm/min 低焊速过渡到225 mm/min 高焊速时,ELW 减小,其原因是高焊速下后退侧钩状缺陷向焊核区扩展较大的水平距离。

不同焊速下接头拉伸强度如图6(b)所示。可知在低焊速(50, 150 mm/min)下,7075铝合金为上板时接头强度大于2024铝合金为上板时接头强度;在高焊速(225, 300 mm/min)下,2024铝合金为上板时接头强度大于7075铝合金为上板时接头强度。且两组试验中的接头强度均在150 mm/min 焊速下达到最小值,在300 mm/min 焊速下达到最大值。在150 mm/min 焊速下,2024铝合金为上板时,接头中孔洞缺陷面积最大,且钩状缺陷向上扩展的距离也较大,孔洞和钩状缺陷大幅减小了接头有效承载面积,故接头强度最低;7075

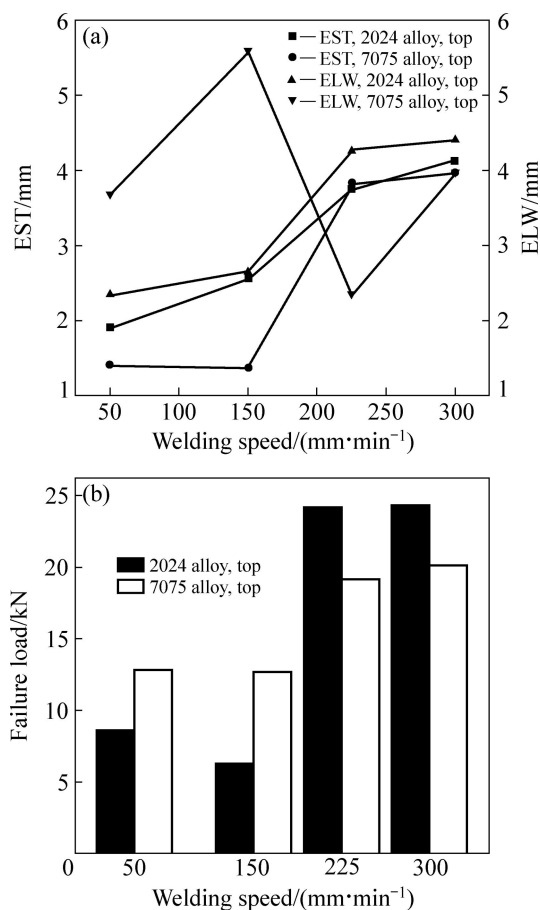


图6 不同焊速下有效板厚、有效搭接厚度及失效载荷

Fig. 6 EST, ELW (a) and failure load (b) at various welding speeds

铝合金为上板时,前进侧钩状缺陷的倾斜角度最陡,几乎是垂直向上扩展,导致应力集中严重,且接头有效板厚也最小,故强度最低。需要指出的是,在低焊速下,2024 铝合金为上板时接头中出现较严重的孔洞缺陷,降低了接头承载面积,而 7075 铝合金为上板时接头中无孔洞存在,所以在低焊速下 7075 铝合金为上板时接头强度要高于 2024 铝合金为上板时的接头强度。而在高焊速下,由于 7075 铝合金为上板时接头的 ELW 较小,导致搭接面附近焊核区强度较低,而 2024 铝合金为上板时接头具有较大的 ELW,因此,高焊速下 2024 铝合金为上板时接头强度更高。因此,在优化 FSW 搭接工艺时,必须在增大 EST 的同时增加 ELW,只有同时具有较大 EST 和 ELW 的接头,才会有较高的接头强度。

2.5 断裂模式及断口形貌

不同参数下拉伸试样的断裂模式如图 7 所示。拉伸试样有 3 种断裂模式:沿着前进侧钩状缺陷的拉伸断裂(见图 7(a), (b))、沿着搭接界面的剪切断裂(见图 7(c))、拉伸断裂和剪切断裂都有的混合断裂(见图 7(d))。2024 铝合金为上板时所有焊速下接头均发生拉伸断裂,7075 铝合金为上板时,50、150 mm/min 低焊速下接头发生拉伸断裂,在 225、300 mm/min 高焊速下分别发生剪切断裂和混合断裂。断裂模式与有效板厚和有效搭接宽度有较大关系。如图 6(a)所示,当 2024 铝合金为上板时,接头的 EST 值均小于 ELW 值,有效承载板厚小,并且钩状缺陷附近有较严重孔洞缺陷存在,导致上板焊核区为接头薄弱区域,所以接头

容易在该区域发生拉伸断裂。

当 7075 铝合金为上板时,在 50、150 mm/min 低焊速下,接头 EST 小于 ELW,有效承载板厚较小,上板前进侧为薄弱区域,接头易在此区域发生拉伸断裂;并且低焊速下有效板厚均较小,所以接头强度也较低。在 225 mm/min 焊速下,从图 6(a)中可看出,EST 值大于 ELW 值,有效承载板厚较大,上板焊核区不易发生断裂;而有效搭接宽度较小,底部搭接界面处承载抗剪应力的有效搭接面积较小,导致接头在搭接面处发生剪切断裂。而在 300 mm/min 焊速下,EST 值约等于 ELW 值,上板焊核区强度和底部搭接面处强度相当,裂纹在接头拉伸过程中同时沿钩状缺陷向上扩展和沿搭接面水平扩展,所以出现了混合断裂。并且在高焊速下,由于 EST 和 ELW 值均较大,上板焊核区和搭接界面处分别提供较大的抗拉应力和抗剪应力,所以接头强度也较高。另外,本试验中,所有接头上板前进侧在拉伸过程中承受最大载荷^[11],并且钩状缺陷向上扩展,故接头易在上板前进侧发生断裂。

图 8 所示为焊速 300 mm/min 时拉伸试样的典型断口形貌。从图中可看出,断口上分布着大量大小不同的韧窝,大韧窝下有稠密的细小韧窝,大韧窝之间有明显的撕裂棱。从断口形貌可知拉伸试样为典型的塑性断裂。2024 铝合金为上板的接头断口韧窝中有第二相颗粒析出,断口颜色偏暗;7075 铝合金为上板的接头断口韧窝中无第二相颗粒,断口颜色偏暗。断口形貌的差异是 2024 和 7075 两种铝合金成分不同、强化相不同所致。

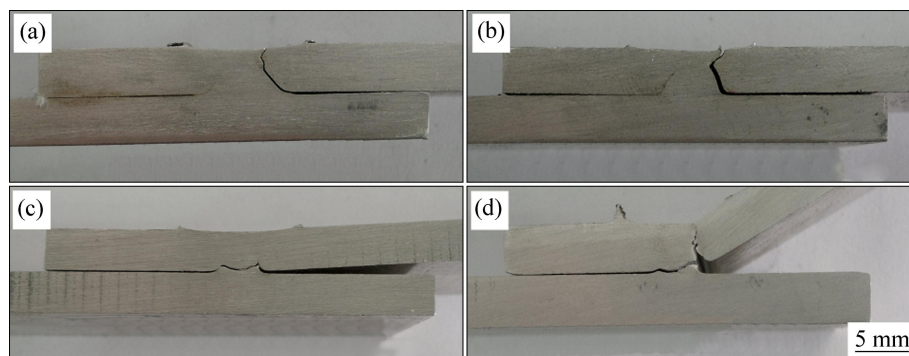


图 7 不同焊速下拉伸试样断裂模式

Fig. 7 Fracture modes of lap shear specimens at different welding speeds: (a) Tensile mode, 50 mm/min, 2024 alloy, top; (b) Tensile mode, 50 mm/min, 7075 alloy, top; (c) Shear mode, 225 mm/min, 7075 alloy, top; (d) Mix mode, 300 mm/min, 7075 alloy, top

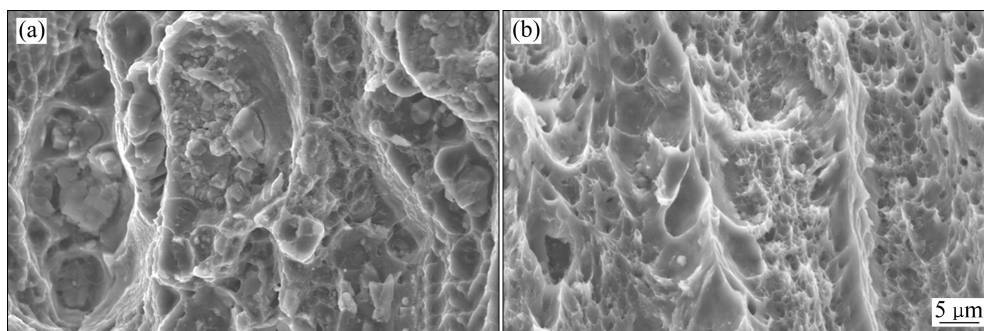


图8 焊速 300 mm/min 时搭接接头断口形貌

Fig. 8 Fractographs of lap joints at welding speed of 300 mm/min: (a) 2024 alloy, top; (b) 7075 alloy, top

3 结论

1) 在本试验所采用的参数(1500 r/min, 50、150、225、300 mm/min)中, 2024 铝合金为上板时, 搭接焊缝表面较粗糙, 在高焊速下出现较严重的起皮缺陷, 并且接头中有较大面积的孔洞缺陷。7075 铝合金为上板时焊缝表面光滑, 成形美观, 接头中无孔洞缺陷。在高焊速下, 两组接头中均出现弱连接缺陷。

2) 在低焊速(50、150 mm/min)下, 前进侧和后退侧钩状缺陷向上扩展距离较大且形貌和尺寸相似; 在高焊速(225、300 mm/min)下, 钩状缺陷向上扩展距离较小, 且在 7075 铝合金为上板的接头中, 后退侧钩状缺陷向焊核区水平扩展距离较大。

3) 接头强度受焊速和上下板材料位置影响。在低焊速下, 7075 铝合金为上板的接头强度更高, 在高焊速下, 2024 铝合金为上板的接头强度更高。钩状缺陷严重减小接头有效板厚和有效搭接宽度, 从而降低接头强度。优化 FSW 搭接工艺应该同时增大有效板厚和有效搭接宽度。

4) 拉伸试样有沿前进侧钩状缺陷上部焊核断裂的拉伸断裂、沿搭界面底部焊核断裂的剪切断裂和二者均有的混合断裂 3 种断裂模式, 断口上有较多大小不等的韧窝和撕裂棱, 为典型的塑性断口。

REFERENCES

[1] CHRISTNER B, MC CORY J, HIGGINS S. Development and testing of friction stir welding as a joining method for primary aircraft structure[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, UT, USA, 2003.

[2] 周鹏展, 钟 掘, 贺地求. 7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊[J].

中国有色金属学报, 2006, 16(6): 964-969.

ZHOU Peng-zhan, ZHONG Jue, HE Di-qiu. Friction-stir welding on thick plate of 7A52 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(6): 964-969.

[3] 贺地求, 彭建红, 杨坤玉, 徐少华, 汪 建, 贺署俊. 航空铝合金超声搅拌复合焊工艺及机理[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2743-2748.

HE Di-qiu, PENG Jian-hong, YANG Kun-yu, XU Shao-hua, WANG Jian, HE Shu-jun. Technology and mechanism of ultrasonic stir compound welding of aeronautical aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2743-2748.

[4] DRACUP B J, ARVEGAST W J. Friction stir welding as a rivet replacement technology[C]//Proceedings of the Automated Fastening Conference & Exposition. Nashville, TN, USA, 1999.

[5] DA SILVA A A M, ARRUTI E, JANEIRO G, ALDANONDO E, ALVAREZ P, ECHEVERRIA A. Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2021-2027.

[6] CAVALIERE P, NOBILE R, PANELLA F W, SQUILLACE A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding[J]. International Journal Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(6): 588-594.

[7] KHODIR S A, SHIBAYANAGI T. Friction stir welding of dissimilar AA2004 and AA7075 aluminum alloys[J]. Material Science and Engineering B, 2008, 148: 82-87.

[8] BAHEMMAT P, HAGHPANAHI M, BESHARATI GIVI M K, SEIGHALANI K R. Study on dissimilar friction stir butt welding of AA7075-O and AA2024-T4 considering the manufacturing limitation[J]. International Journal Advanced Manufacture Technology, 2012, 59(9/12): 939-953.

[9] CAVALIERE P, PANELLA F. Effect of tool position on the

- fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206(1): 249–255.
- [10] CAVALIERE P, CERRI E, SQUILLACE A. Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by friction stir welding[J]. *Journal of Material Science*, 2005, 40(14): 3669–3676.
- [11] CEDERQVIST L, REYNOLDS A P. Factors affected the properties of friction stir welded aluminum overlap joints[J]. *Welding Journal*, 2001, 80(12): 281–287.
- [12] DUBOURG L, MERATI A, JAHAZI M. Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin[J]. *Materials & Design* 2010, 31: 3324–3330.
- [13] 徐效东, 杨新岐, 周 光, 佟建华. 铝合金 2024-T4 搅拌摩擦焊接接头组织与性能分析[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(3): 51–56.
- XU Xiao-dong, YANG Xin-qi, ZHOU Guang, TOGN Jian-hua. Analysis of microstructures and fatigue properties of friction stir overlap welds in AA2024-T4 alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(3): 51–56.
- [14] SONG You-bao, YANG Xin-qi, CUI Lei, HOU Xiao-peng, SHEN Zhi-kang, XU Yan. Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 9–18.
- [15] XU Xiao-dong, YANG Xin-qi, ZHOU Guang, TOGN Jian-hua. Microstructures and fatigue properties of friction stir lap welds in aluminum alloy AA6061-T6[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 175–183.
- [16] ARBEGAST W J. Z. Jin (Ed.), *Hot deformation of aluminum alloys (III)*[M]. TMS, 2003.
- [17] 金玉花, 王希靖, 李常锋, 马宁宁. 不同基体组织对搅拌摩擦焊接接头性能的影响[J]. *材料工程*, 2008, 9: 60–63.
- JIN Yu-hua, WANG Xi-jing, LI Chang-feng, MA Ning-ning. Effect of base metal on joint properties of friction stir welded[J]. *Journal of Material Engineering*, 2008, 9: 60–63.

(编辑 龙怀中)