

7475 铝合金回填式 FSSW 接头的 微观组织与力学性能

卢振洋, 龚文韬, 陈树君, 袁 涛, 李晓旭

(北京工业大学, 北京 100124)

摘 要: 针对 7475 铝合金回填式搅拌摩擦点焊 (FSSW) 展开研究, 首先采用不同工艺参数对 2 mm 7475 铝合金进行焊接, 然后对焊点表面和横截面进行观察, 同时对试样进行硬度测量和拉伸剪切测试。结果表明, 根据焊缝微观组织可以将焊点分为 4 个部分, 不同部位的晶粒尺寸不同; 并在微观组织中发现了 Hook、孔洞和未连接等由于材料流动性不佳造成的微观组织缺陷; 同时, 母材区和搅拌区的硬度明显高于热影响区和热机影响区; 另外, 焊点的最高硬度和拉伸剪切强度随着焊具旋转速度、搅拌套下压深度的变化而呈现规律性变化, 但是搅拌套运动速率对焊点力学性能的影响不明显。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; 微观组织; 工艺参数; 断裂模式

中图法分类号: TG456.9; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1267-08

目前, 能源和环境问题得到全世界越来越多的关注, 运载工具的轻量化成为了研究热点。铝合金具有质轻、耐腐蚀、弹性好、比强度和比刚度高、抗冲击性能好、易表面着色、良好的加工成型性以及极高的再回收率和再生性等一系列优良特性, 而这样的特性使铝合金在航空、航天、汽车、火箭制造等领域得到了广泛应用^[1,2]。

7475 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 这种合金被广泛应用于航空航天领域, 用于机身的板材、机翼骨架、桁条等及其他既要有高的强度又要有高的断裂韧性的零部件制造^[3,4]。但是 7000 系铝合金焊接性差, 使用传统熔化焊如氩弧焊或压力焊如电阻点焊都容易造成焊点内部产生各种冶金缺陷, 降低焊接件的力学性能。传统焊接方法的局限性制约了铝合金在工业生产中的广泛应用, 传统的焊接方法包括熔焊和钎焊等都存在不同的焊接缺陷, 例如: 利用电阻点焊焊接铝合金时存在焊接变形大、能耗高、焊接不稳定等缺点; 采用钎焊技术则存在制造工艺复杂、生产成本低和生产环境恶劣等问题。因此有文献提出利用固相焊接技术, 如搅拌摩擦点焊 (FSSW), 来得到力学性能良好的接头^[1]。

然而对于传统搅拌摩擦点焊 (FSSW) 来说, 在焊接完成后的焊点中部留下一个匙孔, 匙孔会大大减少焊接头的有效承载面积, 并且焊接接头的外观发生

急剧变化易引起应力集中^[5,6]。为了解决传统搅拌摩擦点焊产生的问题, 名为回填式搅拌摩擦点焊 (refilled friction stir spot welding, RFSSW) 的新型技术得到开发。回填式 FSSW 的焊接工具由三部分组成: 压紧环、搅拌套和搅拌针, 如图 1a 所示。焊接过程分为 4 个阶

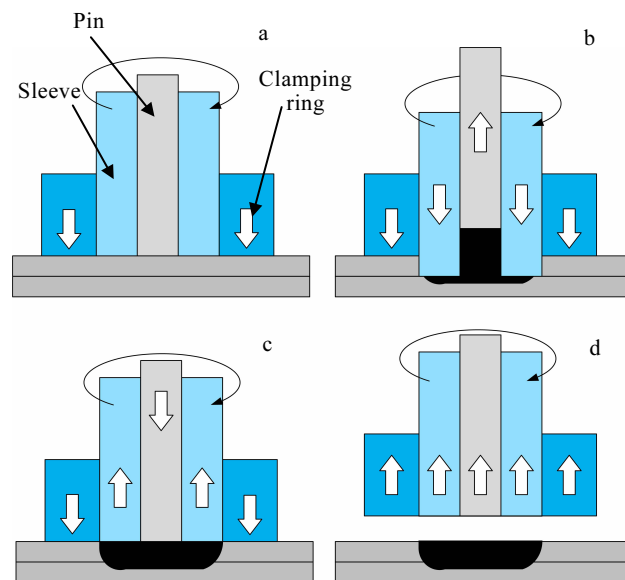


图 1 回填式搅拌摩擦点焊焊接过程

Fig.1 RFSSW welding process: (a) fixed plate, (b) push down, (c) backfill, and (d) recycling

收稿日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51704013); 中国博士后基金 (2016M600881)

作者简介: 卢振洋, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 北京工业大学汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124, E-mail: lzy@bjut.edu.cn

段,即固定板件(图 1a)、搅拌套下压(图 1b)、搅拌针回填(图 1c)和焊具回收(图 1d)。对于 RFSSW,主要的焊接参数是焊具旋转速度、搅拌套插入深度和搅拌套运动速率。

目前对 FSSW 的研究方向主要有接头界面形态^[7,8]、微观组织^[9-12]、材料流动行为、搅拌头的设计^[13]、以及工艺参数对接头力学性能的影响^[14]。其中 Uematsu 等人指出通过改进工艺可以提高焊接件的拉伸强度^[15]。Rosendo 等人在 AA6181-T4 铝合金上进行 RFSSW 研究焊接参数对显微组织和机械性能的影响,得出需要足够的焊接热量输入来获得良好的 RFSSW 接头^[10]。然而过多的热量输入可能会使接头的力学性能下降,其他焊点缺陷如孔洞、环状凹槽等也会影响 RFSSW 接头的拉伸剪切性能^[12]。Zhao 等人研究了搅拌套下压深度对 7B04-T74 铝合金 RFSSW 焊点的力学性能和微观组织的影响规律,随着下压深度的增加,Hook 高度增加,包铝层向下迁移,搅拌区硬度下降^[16]。Shen 等人研究了 6061-T4 铝合金的微观组织和力学性能,认为在较低的焊具旋转速度下可以获得较好的焊接质量^[17]。Cao 等人研究了 6061-T6 铝合金的 RFSSW 焊点中的 Hook 成型及焊点内组织、织构和力学性能,根据位置确定了 2 种不同类型的 Hook 缺陷,这些位置与下压深度密切相关^[8,18]。

本工作研究了工艺参数对 7475 铝合金 RFSSW 焊点微观组织和力学性能的影响。进行不同工艺参数如焊具旋转速度、搅拌套下压深度和搅拌套运动速率的 RFSSW 焊接,并对其力学性能、微观组织和缺陷特征进行了分析和讨论。

1 实 验

实验所用材料为厚度 2 mm 的 7475 铝合金板材,化学成分如表 1 所示。7475 铝合金是在 7075 的基础上,通过控制 Fe、Si 等杂质元素含量开发的,不仅具有较高的强度,更具有优良的超塑性加工性能,主要用于结构复杂、强度要求高的零件。

采用 FSSW-100 型回填式搅拌摩擦点焊机设备进行 RFSSW 试验。压紧环外径 14.5 mm,搅拌套外径 8.9 mm,搅拌针外径 5.2 mm。RFSSW 试样由 2 块尺寸为 80 mm×30 mm 的板材搭接组成,搭接面积为 30 mm×30 mm,焊接位置位于搭接面的中心,如图 2 所示,试样按照 ISO 14273 标准进行制备,焊后可直接用于拉剪性能测试^[19]。经过前期实验,结合焊接效果选定在实验过程中主轴转速(ω)、搅拌套扎入深度(p)、搅拌套运动速率(v)分别在 1500~2500 r/min, 2~3 mm 和 0.5~1 mm/s 的范围内变化,实验方案如表 2 所示,

表 1 7475 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7475 aluminum alloy (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
0.1	0.12	1.2~1.9	0.06	1.9~2.6	0.18~0.25	-	5.2~6.2	Bal.

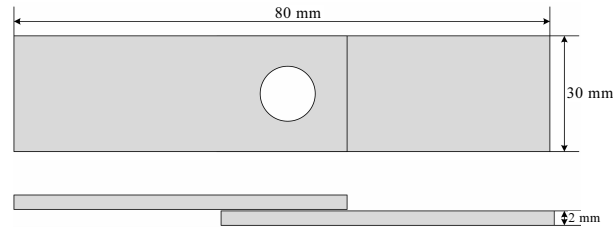


图 2 回填式 FSSW 焊接试样

Fig.2 RFSSW welding sample

表 2 工艺参数实验方案

Table 2 Experimental scheme of process parameters

Process Parameter No.	Depth of depression, p /mm	Spinning speed, ω /r·min ⁻¹	Movement rate, v /mm·s ⁻¹
1	2	1500	1
2	2.5	1500	1
3	3	1500	1
4	3	1500	1
5	3	2000	1
6	3	2500	1
7	3	1500	0.5
8	3	1500	0.75
9	3	1500	1

焊接过程中保持搅拌套与搅拌针在扎入过程和回填过程是相同的运动速率。

焊接完成后对试样进行切割,经过粗磨、精磨和抛光处理后对试样进行腐蚀。使用 Olympus LEXT OLS4100 光学显微镜对焊点微观组织进行观察分析。

在焊接接合面上使用 HVS-1000Z 型数显显微维氏硬度计进行显微硬度测量,测量间距为 0.5 mm,测量载荷为 1.96 N,载荷持续时间为 10 s。在 CSS-1110 电子万能试验机上进行拉伸剪切试验。通过 3 个拉伸剪切试样评估每个焊接参数下 RFSSW 接头的拉伸剪切破坏强度。

2 结果与讨论

2.1 焊点表面宏观形貌

图 3 显示了在搅拌套下压深度为 2.5 mm 时的 RFSSW 接头上表面,可以看到通过 RFSSW 方法焊接的焊点消除了匙孔,形成了表面平整的焊点。但是,在图 3a 中可以观察到普通 RFSSW 会产生环沟槽缺陷,环沟槽是环状沟槽缺陷的简称,容易在搅拌套和

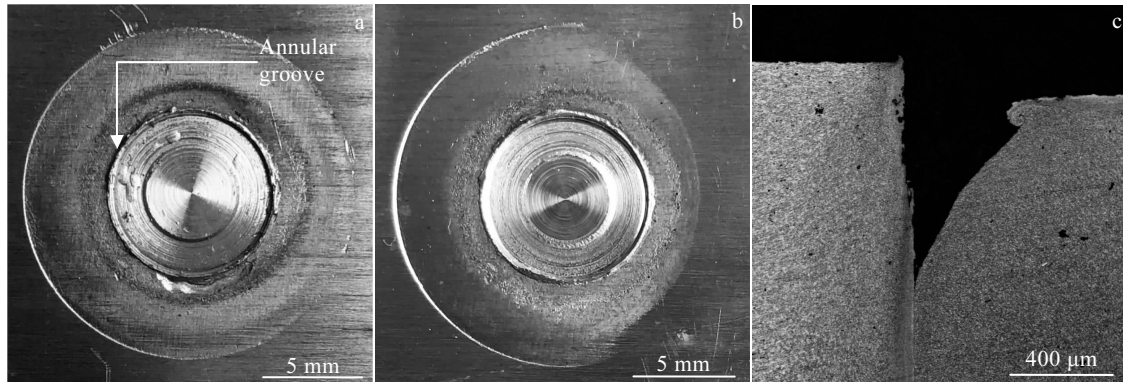


图3 RFSSW 接头上表面及环沟槽缺陷示意图

Fig.3 Surface and ring groove defects of RFSSW joints: (a) a ring groove on welding joint, (b) no ring groove on welding joint, and (c) ring groove defect

压紧环的交界位置产生,如图3c所示。Shen等人^[12]和Rosendo等人^[10]把环沟槽缺陷归因为焊具转速和搅拌套插入深度的不适当导致塑性材料的流动性不佳。然而,赵运强^[20]和Cao^[18]等人认为,随着焊具旋转速度增加、搅拌套下压深度增加以及搅拌套运动速率的降低,焊接中产生的热量增大,塑性材料的流动性也随之增加,并且Zhao观察到焊具中有焊接材料残留^[21]。

通过在实验后观察焊具,也发现搅拌针与搅拌套缝隙,搅拌套与压紧环缝隙间确实均存在焊接材料残留,但是通过观察横截面微观组织(图3c)发现焊点上端呈弧形,这是由塑性材料的流动性不佳导致的。因此,认为环沟槽主要是由RFSSW期间的材料损失引起的,在RFSSW过程中塑性较高的材料被挤入搅拌套与搅拌针和压紧环之间的缝隙中,这部分材料无法回填到焊点内,所以剩余的塑性材料不足以完全填充焊缝,从而产生了环沟槽缺陷,但同时环沟槽缺陷也会受到材料流动性不佳及材料热胀冷缩的影响。为避免环沟槽缺陷造成的影响,本研究采用了本实验室正在研究的一种新的焊接工艺,通过填补材料来消除环沟槽缺陷,并且得到了成型良好的焊接点,如图3b所示。

此外,通过观察部分试样(图3a)还发现焊点表面并不平滑,这是由于焊具在离开试件表面时焊具旋转速度过高导致焊具表面与焊点产生粘连,当焊具上升时,焊点表面一部分金属材料便被剥离。

2.2 焊点微观组织特征与缺陷特征

2.2.1 焊点微观组织特征

图4为焊具旋转速度1500 r/min、搅拌套下压深度2.5 mm、搅拌套运动速率为1 mm/s的焊接条件下,焊缝横截面的宏观及微观图。如图4a所示,焊点相对

于搅拌头轴线对称,并且RFSSW接头的横截面可以根据微观组织结构特征分为4个区域:即母材(BM),热影响区(HAZ),热机影响区(TMAZ)和搅拌区(SZ)。图4b~4f分别显示了图4a中区域B~F的放大图。

如图4b所示,BM区没有经历焊接热循环也没有发生任何塑性变形,晶粒尺寸较大并沿轧制方向伸长。图4c所示的HAZ区经历了焊接热循环,但同样没有经历任何塑性变形,并且RFSSW热输入较低,HAZ晶粒无明显长大,因此HAZ显示与BM类似的晶粒结构。

图4d中的TMAZ在RFSSW过程中同时承受焊接热循环和剪切应力,从图中可以通过晶粒结构进一步分成左右2个区域,在距离焊点中心更远的区域受到了适度的应变速率和热量输入,如图4d中右半部分所示,通过观察可以发现此区域中发生了部分动态再结晶以及较小的晶粒变形,这是由于本研究采用的材料为7475铝合金,相比于7075等7系铝合金,其母材晶粒细小,塑性高,变形抗力大,不易发生晶粒变形。在靠近焊点中心的区域,可以观察到不均匀的细小晶粒,这意味着该区域在较高的应变速率和温度下发生了完全动态再结晶,如图4d中左半部分所示。

图4e、4f均为SZ区域,SZ直接受搅拌针与搅拌套搅拌,可以观察到细小的等轴晶粒,这意味着SZ在剧烈的塑性变形和高温作用下也发生了完全动态再结晶。并且通过对比图4e、4f的晶粒大小发现,SZ内图4f区域的晶粒相比于图4e区域的晶粒更加细小,这可能是由于焊点中心的热量更高导致图4f区域的动态再结晶更加充分。

此外,通过图4a我们还观察到焊点底部并不是1个呈现连续弧度的碗形,而是呈现为类似w的形状,这是由于在搅拌套下压过程中,由于此时搅拌针

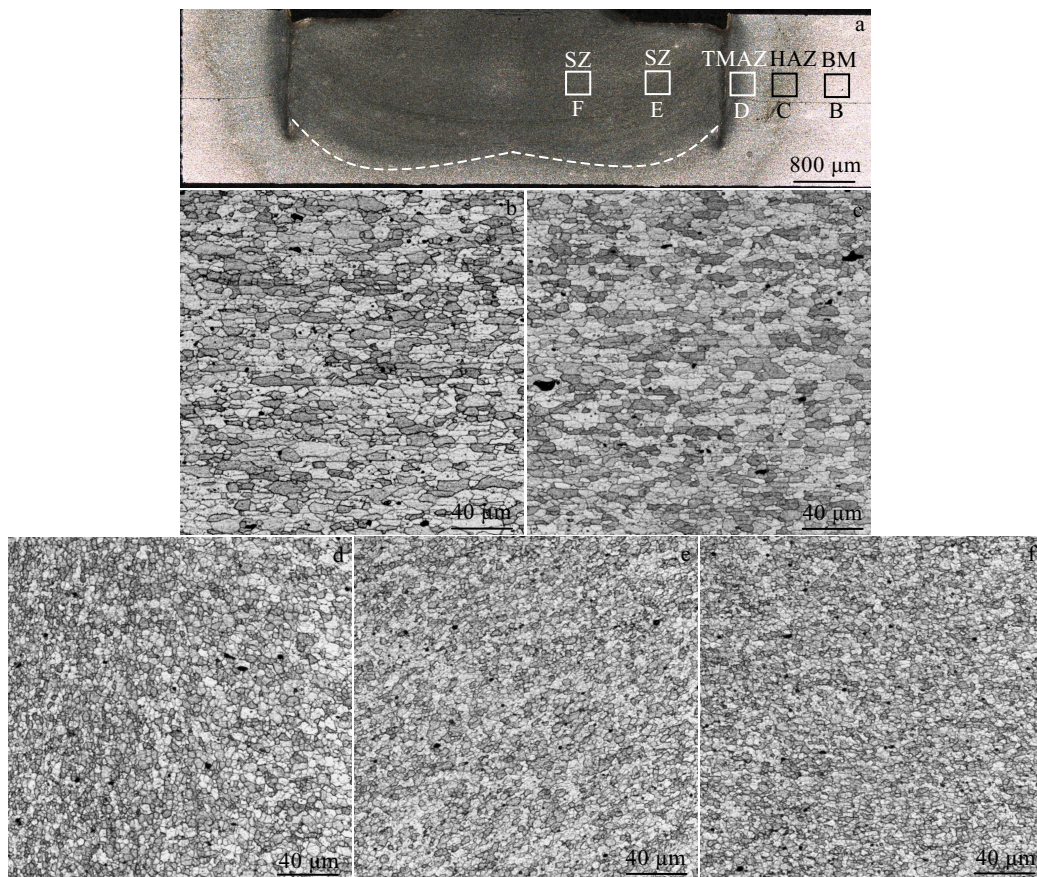


图 4 RFSSW 横截面微观组织

Fig.4 RFSSW cross-section microstructures: (a) weld cross section, (b) BM, (c) HAZ, (d) TMAZ, and (e, f) SZ

处于回抽阶段, 焊点底部中心位置有一小部分母材并没有受到搅拌套搅拌的影响而产生塑性流动, 因此焊点底部会呈现为 w 形状而不是完整的碗状。

2.2.2 微观组织缺陷

如图 5 所示, 所有选用的工艺参数下 RFSSW 试样都能观察到 Hook 缺陷。不同于 Shen^[12]等人观察到的呈现 L 型外观的 Hook 缺陷, 也不同于 Zhao 等人观察到的呈现向上勾起的外观^[21], 本研究中 Hook 多呈现由外到内先上升后下降的形态, 并且在 2 mm 下压深度时仅呈现向下的趋势。Badarinarayan 等^[22]认为 Hook 的形成归因于焊接工具下压到底板引起的接合面向上弯曲, 然而在本研究中并不适用。

从图 5 中可以看到每一个 Hook 都存在下弯的部分, 而上升的部分却不是每种工艺参数下都存在, 因此认为下弯部分是最先产生的。结合 RFSSW 过程中塑性材料流动与焊接过程中搅拌头的移动方式, 可知在 RFSSW 过程中, 由于搅拌套的下压先使接合面向下弯曲, 而后在焊接回填阶段中塑性材料向两侧斜上方挤压导致已经向下弯曲的接合面向上拱起, 从而形

成了先上升后下降的勾状形态。

为了方便研究 Hook 形态对焊点内部造成的影响, 以搭接面为基准, 将 Hook 形成的最大上翘角度定义为 θ 。从图 5 中还可以看出, 随着搅拌套下压深度的增加, Hook 向上翘起的角度 θ 持续增加, 这是由于更大的下压深度会产生更大的热输入使材料塑性变好, 易变形, 造成热影响区与热机影响区增大, 同时有更多的塑性材料回填, 对焊点两侧进行持续的挤压。在不同的焊具旋转速度下, 随着焊具旋转速度的增加, θ 同样持续增大, 这是由于增加焊具旋转速度一方面会令焊接热输入增大使板件更易发生变形, 一方面是由于更高的旋转速度给予了塑性材料更好的流动性和更大的动能, 对焊点周围的冲击力更大。而随着搅拌套运动速率的增加, θ 在逐渐减小, 这是由于搅拌套运动速率的增大会使焊接时间减少, 导致焊接热输入与塑性材料流动性降低, 导致塑性材料对周围两壁的冲击影响减小。

此外, 在观察焊接缺陷时还发现如孔洞、未结合缺陷等焊接缺陷, 如图 6 所示。孔洞缺陷一般位于搅拌套下压线的根部位置。未结合缺陷主要位于搅拌套下

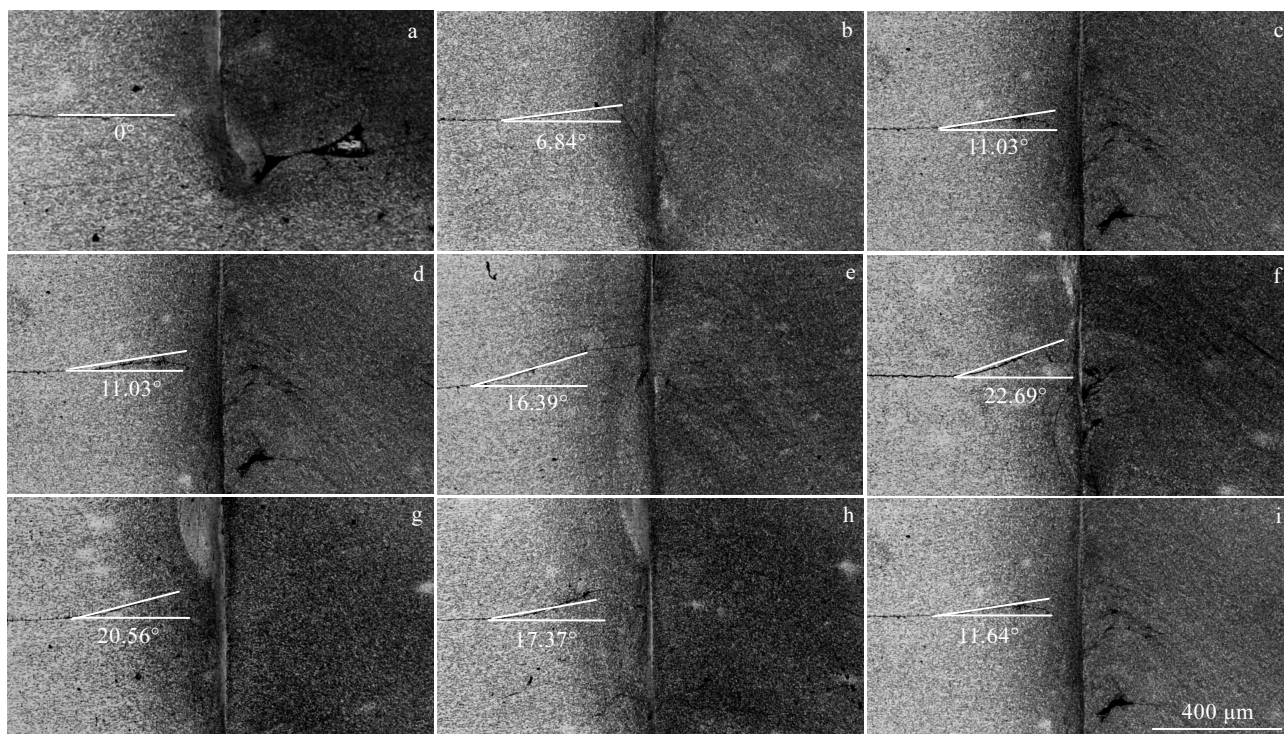


图5 不同工艺参数变量下的 Hook 缺陷

Fig.5 Hook defects under different process parameters: (a) 2 mm depth of depression, (b) 2.5 mm depth of depression, (c) 3 mm depth of depression; (d) 1500 r/min spinning speed, (e) 2000 r/min spinning speed, (f) 2500 r/min spinning speed; (g) 0.5 mm/s movement rate, (h) 0.75 mm/s movement rate, and (i) 1mm/s movement rate

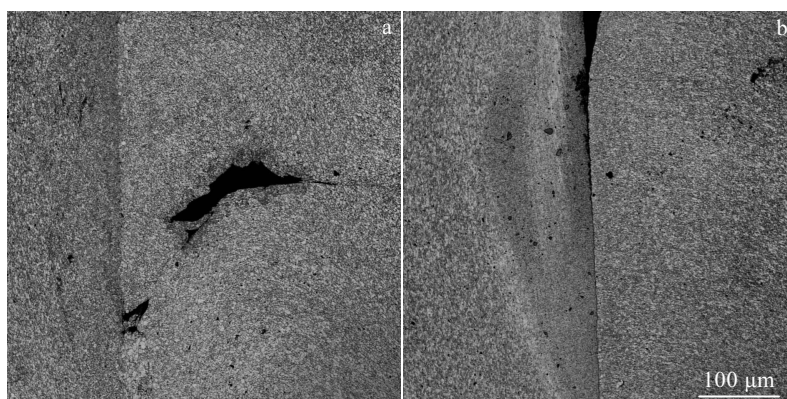


图6 孔洞及未结合缺陷

Fig.6 Holes (a) and not-bonded defects (b)

压线表面位置,其特点为侧面界面处的两侧材料均未发生物理接触,依然存在空隙。而造成这2种缺陷的原因可能是材料的流动性不足,使材料在回填过程中未能有效填补所有的空余空间。并且,在横截面微观组织中没有观察到粘连韧带的缺陷,这是由于在焊接实验前,对所使用的实验板材表面进行了去氧化层处理,因此焊接

过程中搅拌套不会将氧化层搅拌进焊点内部。

2.3 力学性能分析

2.3.1 硬度分析

图7显示了在 RFSSW 接头结合界面处的维氏硬度分布。经过测试,7475 母材维氏硬度约为 1450 MPa,从测试结果可以看出热影响区和热机影响区的硬度均

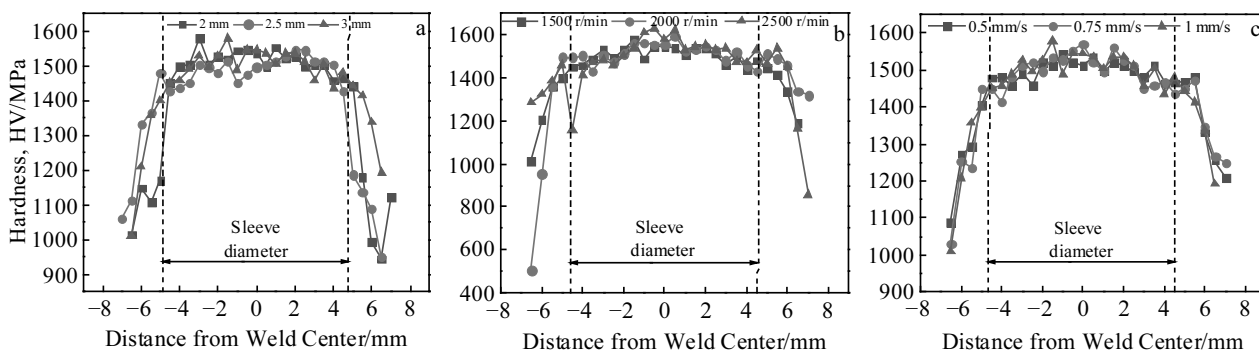


图 7 接头硬度分布

Fig.7 Distribution of joint hardness varying with stirring sleeve depth (a), welding tool rotation speed (b), and mixing sleeve movement rate (c)

低于母材和搅拌区硬度。从图 7a 中可以看到不同搅拌套下压深度下接头接合界面处的硬度分布, SZ 区域的硬度分布较为均匀, 在 TMAZ 和 HAZ 区域的维氏硬度急剧下降, 这是由于与 TMAZ 和 HAZ 相比, SZ 区域发生了完全动态再结晶, 晶粒更加细小, 此外, Feng 等人认为 SZ 中的沉淀物可能会发生溶解, 然后再沉淀^[23], 因此, SZ 的硬度高于 TMAZ 和 HAZ 的硬度。

如图 7a 所示, 随着搅拌套下压深度的增大, TMAZ 和 HAZ 组成的软化区域的宽度增加, 这主要是由于焊接过程中的焊接热输入会随着搅拌套下压深度的增加而增加, 从而导致受到热输入影响的区域范围增大, 并且随着搅拌套下压深度的增加, 焊点内部重新填充时的塑性材料体积越大, 对搅拌区两壁的挤压力也更大, 加大了热机影响区的宽度及晶粒细化程度。

图 7b 显示了不同焊具旋转速度下的接头界面硬度分布, 从图中可以发现, 当焊具旋转速度在 2500 r/min 时, 焊点的最大硬度是最高的, 而随着旋转速度的减小, 接头界面的最大硬度也在减小, 并且随着焊具旋转速度的增加, 焊点内塑性材料受到的搅拌作用更加剧烈, 材料与材料之间的摩擦更加频繁, 焊点内产生的热量也随之上升, 同时塑性材料流动更加快速从而对搅拌区外壁产生更大的冲击力, 增大了搅拌区周围热机影响区的晶粒细化范围, 因此, 随着焊具旋转速度的增加, 使得 TMAZ 和 HAZ 这 2 个受温度影响较大的区域组成的软化区域宽度增加。图 7b 中焊具旋转速度为 2500 r/min 时, 在 -4.5 mm 处出现了明显的波动, 这是由于采集硬度时采集点恰好位于退出线上导致的硬度突然降低。

图 7c 显示了不同搅拌套运动速率下的接头界面硬度分布, 与搅拌套下压深度和焊具旋转速度这 2 个工艺参数对焊点各区域硬度影响不同, 从图中观察到

代表不同搅拌套运动速率的 3 条曲线形貌近乎相同, 说明搅拌套运动速率对 TMAZ 和 HAZ 区域的范围影响不大, 对焊点硬度的影响同样不大。这可能是由于在相同的焊具旋转速度和搅拌套下压深度条件下, 7475 铝合金板材经搅拌后, 搅拌套运动速率仅仅改变了塑性金属的流动时间, 并没有改变塑性金属本身在焊点中的旋转速度以及塑性金属总量的大小。

2.3.2 拉伸剪切性能

图 8 显示了改变不同工艺参数下的接头的拉伸剪切破坏载荷, 参照拉伸剪切破坏载荷的数值发现 RFSSW 焊点的力学性能优于电阻点焊等传统点焊方法^[24]。如图 8a 所示为不同焊具旋转速度下的接头拉伸剪切破坏载荷, 随着焊具旋转速度从 1500 r/min 提高到 2500 r/min, 接头拉伸剪切破坏载荷降低, 这是由于随着焊具转速的提高, Hook 上翘角度 θ 也同样提高, 焊点有效承载面积下降, 使得接头更加容易受拉伸剪切力的影响, 从而引导裂纹扩展造成断裂。

图 8b 为不同搅拌套下压深度的接头拉伸剪切破坏载荷, 可以发现随着焊具旋转速度由 2 mm 增加到 3 mm, 接头的拉伸剪切破坏载荷先增大后减小, 在 2.5 mm 时达到最大值, 原因在于 2 mm 时搅拌套下压深度刚好达到实验板材的厚度, 搅拌套的搅拌作用对下板影响不大, 使得上下板件间没有形成有效的连接, 这使得焊件受拉伸剪切力作用下在 Hook 处产生的裂纹极易沿焊点下端界面扩散造成断裂。而搅拌套下压深度增大到 3 mm 时的 Hook 上翘角度 θ 过大, 从而导致接头拉伸剪切破坏载荷下降, 并且在图 5c 中观察到了孔洞缺陷, 这也使得焊点的有效焊接面积降低。

不同搅拌套运动速率下的接头拉伸剪切破坏载荷如图 8c 所示, 结合图 7c 中不同搅拌套运动速率的硬度变化曲线可以发现, 即使随着搅拌套运动速率的增

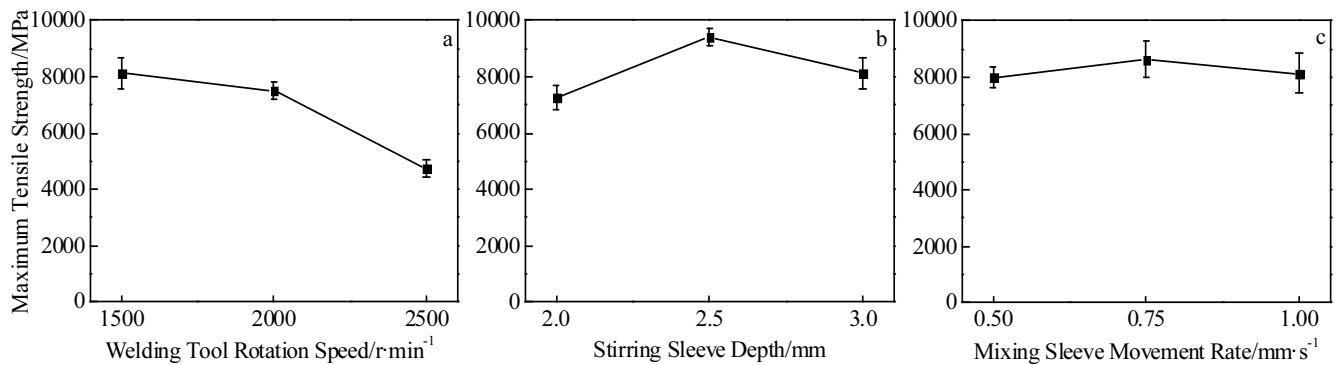


图8 不同工艺参数变量下的拉伸剪切载荷

Fig.8 Tensile shear load under different process parameters: (a) welding tool rotation speed, (b) stirring sleeve depth, and (c) mixing sleeve movement rate

大, Hook 上翘角度 θ 在逐渐减小, 但由于不同搅拌套运动速率对焊点内硬度的影响不大, 焊接试件的拉伸剪切破坏载荷变化也不明显, 这说明除了 Hook 对力学性能有影响外, 还有其它因素会对 RFSSW 焊点的力学性能造成影响。综上所述, RFSSW 接头的拉伸剪切破坏载荷主要取决于 Hook 上翘角度 θ 并且受焊点下端位置、焊点硬度以及焊点内孔洞等其它缺陷影响。

2.3.3 宏观断裂形态

在拉伸剪切试验中观察到了 2 种破坏模式, 分别为界面断裂和纽扣断裂, 断裂方向如图 9 中箭头所示。如图 9a 所示, 界面断裂即断裂发生在搭接面上导致上板件与下板件沿着搭接面分离开来, 这种断裂模式被观察到发生在搅拌套下压深度为 2 mm 时, 其原因是由于当搅拌套下压深度为 2 mm 时, 搅拌套对下板件搅拌不明显从而使得上下板件没有产生有效连接, 拉伸试样受到拉伸剪切力后上下板件分离, 在 Hook 处产生裂纹, 而搅拌套下压深度为 2 mm 时 Hook 上翘角度为 0° , 所以裂纹沿搭接面横向沿伸, 又由于上下板材结合不紧密, 裂纹直接沿着焊点底部沿伸形成界面断裂。

随着搅拌套下压深度的增加, 焊点上下板件经过搅拌作用形成了良好的结合, 裂纹不再沿焊点底部延伸, 断裂模式从界面断裂转变为纽扣断裂, 即焊点固定在下板件并且断裂沿着退出线环绕焊点造成焊点整体从上板件中脱落, 如图 9b 所示, 相应的拉伸破坏载荷较高。纽扣断裂的产生过程为, 当拉伸试样受到拉伸剪切力时, 裂纹首先在 Hook 处产生, 虽然 Hook 的末端均是向下沿伸, 但是裂纹会先随着上翘的角度开裂, 在较高的拉伸力下, 裂纹的沿伸并不会沿着 Hook 的走向沿伸, 而是继续沿 Hook 上翘的角度传播至退出线, 后沿退出线路径扩展, 同时裂纹沿着退出线传播到焊点的另一侧, 从而形成纽扣断裂。

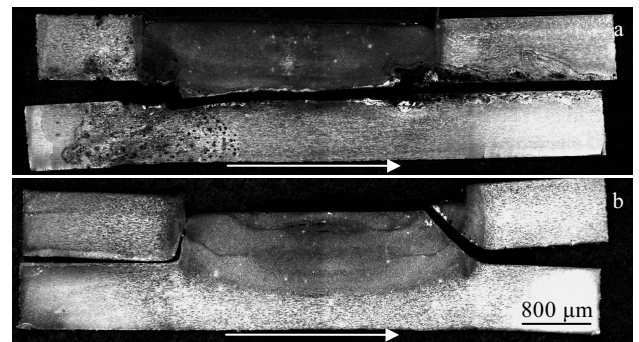


图9 接头断裂模式

Fig.9 Joint fracture mode: (a) shear fracture and (b) tensile-shear mixed fracture

3 结 论

1) RFSSW 接头的横截面可以分为 4 个微观结构区域: BM, HAZ, TMAZ, SZ。HAZ 和 TMAZ 区域会组成软化区域, 硬度明显低于 SZ 和 BM 区域, 且 SZ 硬度高于 BM。此外随着搅拌套下压深度的增加或者焊具旋转速度的增加, 软化区域的宽度增加, 搅拌套运动速率对焊点接合面的硬度影响较小。

2) Hook 缺陷的形成是先由焊具挤压向下弯曲, 后经回填的塑性材料挤压向上拱起形成勾状的, 随着搅拌套下压深度或焊具旋转速度的增加, Hook 向上翘起的角度 θ 增加。随着搅拌套运动速率的增加, θ 逐渐减小。Hook 上翘角度 θ 的增大会降低焊点有效承载面积造成焊点力学性能降低。

3) 随着焊具旋转速度从 1500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 2500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 接头拉伸剪切破坏载荷不断降低。随着搅拌套下压深度从 2 mm 增加到 3 mm, 接头拉伸破坏载荷先

增加后减小。搅拌套运动速率对接头拉伸剪切破坏载荷影响不明显。焊接接头断裂形式主要为界面断裂和纽扣断裂。

参考文献 References

- [1] Liu Zhihua(刘志华), Zhao Bing(赵兵), Zhao Qing(赵青). *Missiles and Space Vehicles*(导弹与航空运载技术)[J], 2002(5): 63
- [2] He Diqu(贺地求), Deng Hang(邓航), Zhou Pengzhan(周鹏展). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2007, 28(9): 13
- [3] Fu Chunkun(付春坤), Bai Gang(白钢), Wang Hongbin(王红宾) *et al.* *Aviation Precision Manufacturing Technology*(航空精密制造技术)[J], 2012, 48(3): 49
- [4] Wang Ting(王廷), Zhu Danyang(朱丹阳), Liu Huijie(刘会杰) *et al.* *Transactions of The China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2009, 30(8): 109
- [5] Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2008, 30(10-11): 1956
- [6] Arul S G, Miller S F, Kruger G H *et al.* *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2008, 13(7): 629
- [7] Yin Y H, Sun N, North T H *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(14): 2062
- [8] Cao J Y, Wang M, Kong L *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 230: 254
- [9] Fujimoto M, Koga S, Abe N *et al.* *Welding International*[J], 2009, 23(6): 403
- [10] Rosendo T, Parra B, Tier M A D *et al.* *Materials and Design*[J], 2011, 32(3): 1094
- [11] Badarinarayan H, Yang Q, Zhu S. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2009, 49(2): 142
- [12] Shen Z K, Yang X Q, Zhang Z H *et al.* *Materials and Design*[J], 2013, 44: 476
- [13] Hirasawa S, Badarinarayan H, Okamoto K *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(11): 1455
- [14] Bozkurt Y, Bilici M K. *Materials and Design*[J], 2013, 51: 513
- [15] Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2008, 30: 1956
- [16] Zhao Y Q, Liu H J, Lin Z *et al.* *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2014, 19(7): 617
- [17] Shen Z K, Yang X Q, Yang S *et al.* *Materials and Design*[J], 2014, 54: 766
- [18] Cao J Y, Wang M, Kong L *et al.* *Materials Characterization* [J], 2017, 128: 54
- [19] ISO 14273-2001[S], 2001
- [20] Zhao Yunqiang(赵运强). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [21] Zhao Y Q, Liu H J, Chen S X *et al.* *Materials and Design*[J], 2014, 62: 40
- [22] Badarinarayan H, Shi Y, Li X *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2009, 49(11): 814
- [23] Feng A H, Chen D L, Ma Z Y. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41(4): 957
- [24] Hayat F. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 556: 834

Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded 7475 Aluminum Alloy Joints

Lu Zhenyang, Gong Wentao, Chen Shujun, Yuan Tao, Li Xiaoxu
(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The 7475 aluminum alloy backfill friction stir spot welding (FSSW) was studied. Firstly, the 2 mm 7475 aluminum alloy was welded by different process parameters, then the surface and cross section of the joint were observed, and the hardness and tensile shear test of the sample were carried out. The results show that the joint can be divided into four parts according to the weld microstructure, and the grain size of different parts is different. Hook, holes and unjointed microstructures due to poor fluidity of the material are found in the microstructure. At the same time, the hardness of the base metal zone and stirring zone is significantly higher than that of the heat affected zone and the thermo-mechanically affected zone; in addition, the highest hardness and tensile shear strength of the joint vary with welding tool rotation speed and the depth of the sleeve. However, the effect of the stirring sleeve movement rate on the mechanical properties of the solder joint is not obvious.

Key words: refilled FSSW welding; microstructure; technological parameter; fracture mode

Corresponding author: Yuan Tao, Ph. D., Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: ty29@bjut.edu.cn