

2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析

赵衍华¹ 李延民¹ 郝云飞¹ 陈玉耘¹ 王国庆²

(1 首都航天机械公司,北京 100076)

(2 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

文 摘 对 2219 铝合金进行了双轴肩搅拌摩擦焊工艺试验,详细分析了焊缝成型、接头组织形态及力学性能。结果表明:2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊缝正反面成型美观,内部无缺陷,几乎无焊缝减薄。接头宏观形貌呈典型的“哑铃型”,焊缝上下表面宽,中间略窄。从显微组织角度看,接头的焊核区、热机影响区、热影响区等组织特征与常规搅拌摩擦焊相似。双轴肩搅拌摩擦焊接头显微硬度分布趋势与常规搅拌摩擦焊接头相似,均为典型的“W”型,但双轴肩搅拌摩擦焊接头不存在各层异性。接头力学性能试验表明:双轴肩搅拌摩擦焊接头抗拉强度达到了 318.3 MPa,延伸率为 5.5%。接头断口形貌呈典型的韧性断裂。

关键词 双轴肩搅拌摩擦焊,2219 铝合金,组织形态,力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of Self-Reacting Friction Stir Welding of 2219 Aluminium Alloy

Zhao Yanhua¹ Li Yanmin¹ Hao Yunfei¹ Chen Yuyun¹ Wang Guoqing²

(1 Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

(2 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract An extensive investigation was carried out on the SR-FSW of 2219aluminium alloy with the thickness of 6 mm, and the weld appearances, microstructure and mechanical properties of the SR-FSW joint has been analyzed. The results indicated that the SR-FSW joint had excellent top and underside appearances without inner defects, distortion and seam thinning if the parameters were carefully chosen. Typical macrosections of the joint were slightly hourglass shaped, and the width of the top and underside surface was slightly greater than the mid-thickness of the joint. As analyzed, the macrosection of the joint was related with the change of the SRPT, heat production and heat transfer. The microstructure of the joint also consisted of nugget zone, thermal-mechanically affected zone, heat affected zone, and within each zone, the microstructure was the same as C-FSW joint. The SR-FSW joint and C-FSW joint had the similar hardness distribution with the typical “W” type, but the former had no anisotropic. The mechanical property shown that the tensile strength of the joint can reach 318.3 MPa, and the ductility can get to 5.5%. The fracture mechanism of the joint was ductile fracture.

Key words Self-reacting friction stir welding, 2219 aluminium alloy, Microstructure, Mechanical property

0 引言

截至目前,欧美宇航机构和我国航天领域均实现了常规搅拌摩擦焊技术(FSW)在运载火箭贮箱筒段纵缝、箱底上的工程化应用。然而在尝试应用到贮箱总装环缝等特殊结构时,遇到了许多技术难题,主要有:需要大型复杂的焊接工装以支撑搅拌摩擦焊过程中的焊接压力从而增大了操作难度。双轴肩搅拌摩擦焊技术(SR-FSW)解决了上述问题。该技术通过

上下两个轴肩以及搅拌针与工件的相互作用实现被焊材料的连接。由于上、下轴肩的自支撑平衡特点大大降低了轴向方向上的锻压力,简化了装夹机构,节省了刚性支撑的制造成本,同时增加了零件装配及施焊的灵活性,非常适合于火箭贮箱箱体环缝的焊接^[1-4]。据文献[5]报道,NASA、洛克希德·马丁公司等人在 SR-FSW 方面开展了大量工作,并应用在新—代“猎户座号”载人飞船(Orion Crew Module)、新

收稿日期:2012-09-18;修回日期:2012-10-15

作者简介:赵衍华,1977 年出生,工学博士,高级工程师,主要从事运载火箭贮箱先进焊接技术的研制工作。E-mail:zanyanhua@sohu.com

型重型运载火箭(SLS)的贮箱环缝上。我国在SR-FSW基础研究及工程应用方面还处于起步阶段,上海航天设备制造总厂和北京航空制造工程研究所进行了该项技术的探索。

本文以我国新一代运载火箭贮箱选用的2219铝合金为研究对象,进行了SR-FSW工艺试验,对其焊缝成型、焊缝组织形态和力学性能进行了着重分析。

1 实验

1.1 材料

所用材料为2219铝合金板材,规格为400 mm×150 mm×6.0 mm,抗拉强度为440 MPa,延伸率为15%,其主要化学成分见表1。

表1 2219铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2219 aluminium alloy

wt%				
Cu	Mn	Fe	Si	Al
5.8~6.8	0.20~0.40	0.30	0.20	余量

1.2 试样制备

SR-FSW工艺试验在自制的搅拌摩擦焊设备和工装上进行,采用平板对接方式。焊前对试片酸洗以去除其表面的油污等,之后对平板试样对接面进行机械铣切,保证平板对接间隙<0.3 mm。搅拌头采用自主设计的6 mm双轴肩搅拌头(图1),轴肩结构为阿基米德螺旋线结构,搅拌针为双向反螺纹结构。工艺试验中搅拌头旋转速率为300~400 r/min,焊接速率为150~250 mm/min,搅拌头与平板试样法线方向夹角为0°。

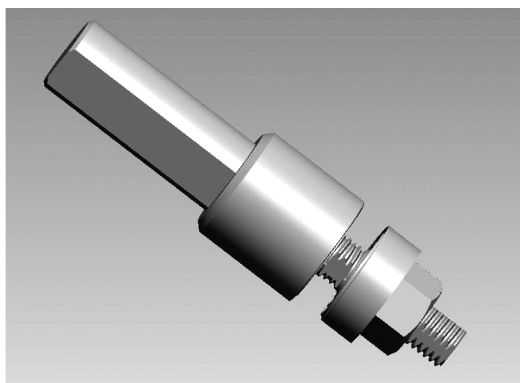


图1 双轴肩搅拌头结构

Fig.1 Structure of self-reacting pin tool

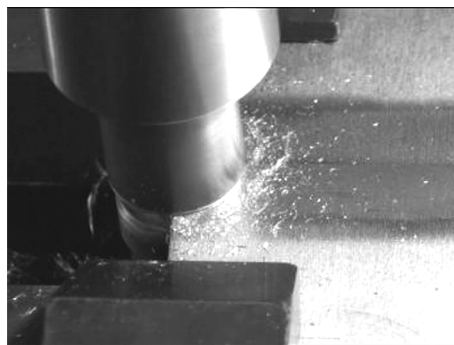
1.3 性能评价

用X射线探伤与相控阵超声波检测SR-FSW接头是否存在焊接缺陷。合格后沿垂直于焊缝方向切取金相试样,用混合酸(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)溶液对抛光后的试样进行腐蚀,在OLYMPUS光学显微镜下进行典型区域金相组织分析及显微硬度测试。在MTS-810电子拉伸试验机上进行拉伸试验,在JSM-5910LV扫描电镜下观察试样拉伸断裂的断口形貌。

2 结果与分析

2.1 SR-FSW过程特点

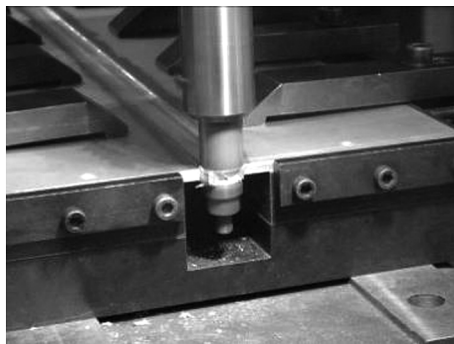
平板试片SR-FSW过程如图2所示,可以看出平板试片背部没有刚性支撑垫板,SR-FSW是一种“悬空”状态的搅拌摩擦焊接。焊接过程中依靠上、下轴肩、搅拌针和未塑化基体之间形成的封闭挤压模完成焊接。上轴肩与搅拌针上部分相当于一个独立的搅拌头,下轴肩与搅拌针下部分相当于另一个独立的搅拌头,二者之间以试片厚度中心镜像对称,同时SR-FSW过程二者的温度场、应力场、作用力等也基本上以试片厚度中心镜像对称,因此焊接过程中搅拌头轴向方向上的力非常小。TWI、NASA、ESAB等机构的研究结果表明:搅拌头轴向方向上的受力只有常规搅拌摩擦焊的1/5~1/4^[6-7]。



(a) 旋转,起始焊接



(b) 稳定状态焊接



(c) 焊接结束

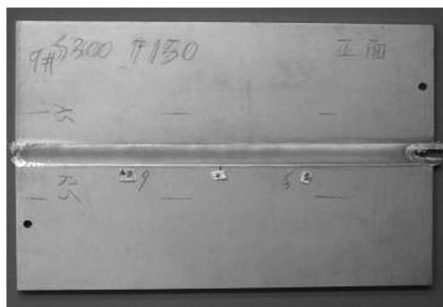
图2 平板试片SR-FSW过程

Fig.2 Process of SR-FSW for the plate specimen

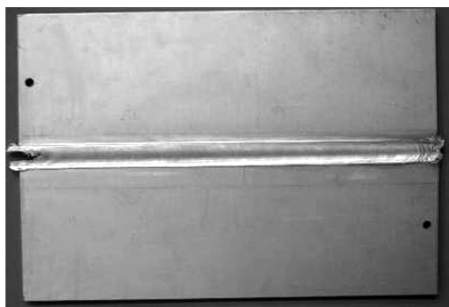
2.2 焊缝成型分析

SR-FSW试片的表面成型非常好(图3),其正反

面焊接成型无论是起始焊接处、稳定焊接状态区间还是焊接终止处均呈鱼鳞状,纹路均匀,焊缝变形很小。



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝反面

图3 双轴肩搅拌摩擦焊缝正反面外观形貌

Fig. 3 Top(a) and underside appearances of a SR-FSW butt weld made in 6 mm thick alloy 2219

2.3 接头横截面宏观金相组织

图4可看到,其组织形貌变化显著,主要表现在:

(1) 接头呈典型的“哑铃型”,焊缝上、下表面的宽度接近于搅拌头上下轴肩的直径,而焊缝中心的横截

面宽度明显>搅拌针直径;(2) 焊缝横截面上的焊核区沿厚度方向存在两个开口相反的扁平同心半圆环结构(开口朝外),并且两者以焊缝厚度中心和宽度中心均对称;(3) 焊缝横截面两侧的热机影响区的分布和形貌均以焊缝厚度中心对称,但是两者组织形貌存在显著差别,并且后退侧热机影响区宽度要显著地大于前进侧热机影响区。从图4还可以看出,SR-FSW接头横截面厚度与两侧基体厚度非常相近,没有发生显著的焊缝减薄。和两侧母材基体相比,焊核区与母材基本上是水平一致的,焊核区并没有产生明显的下凹或上凸,这也间接验证了SR-FSW沿搅拌头轴向方向上的锻压力非常小。

和常规搅拌摩擦焊相比,SR-FSW搅拌头横截面宏观组织形貌的显著变化与双轴肩搅拌头结构、产热方式以热传递方式的变化是密不可分的。双轴肩搅拌头存在上、下两个轴肩,通过与焊缝上、下表面的塑性金属旋转摩擦产生热量,并且热输入方式是从焊缝上下表面向焊缝中心传递。这种热输入方式与常规搅拌摩擦焊的从焊缝上表面向下表面的单向热输入相比,热输入量大且均匀,对于改善焊缝性能非常有利^[6,8]。由于下轴肩代替了常规搅拌摩擦焊的背部刚性垫板,因此从根本上消除了常规搅拌摩擦焊时的背部弱连接(kiss bonding)或未焊透(incomplete of joint penetration)问题。该问题的解决对于有效减少焊缝背部打磨处理、保证焊缝区有效厚度、提高搅拌摩擦焊生产效率等具有重要的意义。

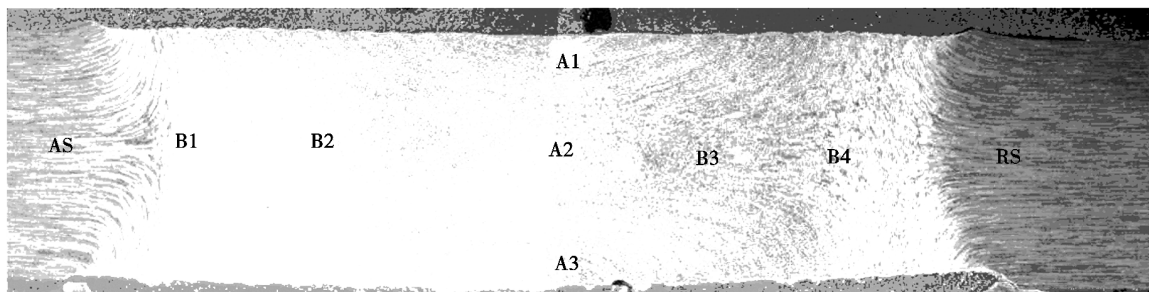


图4 SR-FSW接头横截面宏观金相组织 6.5×

Fig. 4 Transverse cross section of a butt joint using self-reacting pin tool

2.4 接头横截面微观组织形貌

虽然SR-FSW焊缝与常规搅拌摩擦焊横截面宏观组织形貌差异较大,但是SR-FSW接头微观组织形貌主要由母材区(parent metal)、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)、焊核区(NZ)组成。

2.4.1 母材区

图5为2219铝合金母材微观组织,主要由一系列具有明显方向性的板条状晶粒组成,这和母材的轧制成型过程密切相关。

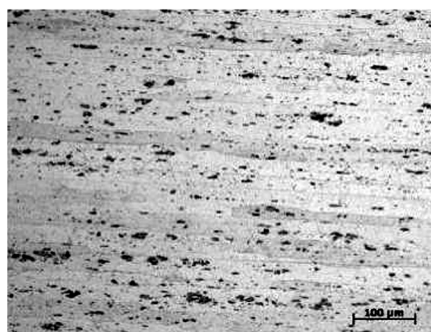


图5 2219铝合金母材微观组织 200×

Fig. 5 Microstructure of parent metal for alloy 2219

2.4.2 热机影响区

图6为SR-FSW接头前进侧与后退侧分别位于焊缝上、中、下部位的热机影响区组织,其形貌特点如下:(1)图6(a)~(c)分别为前进侧不同部位的热机影响区形貌,主要由弯曲狭长的变形板条状晶粒组成,依旧保持着原始母材轧制晶粒的边界形貌,并且前进侧热机影响区与焊核区的过渡界面比较急剧。可以看出位于焊缝上部、下部的热机影响区晶粒取向分别从焊缝中心向焊缝上表面和下表面弯曲。从组织形貌和晶粒取向上看,两者沿焊缝厚度中心均匀对称,并且弯曲狭长变形晶粒在焊缝中部相对粗大,而

在焊缝表面时逐渐趋于狭窄[如图6(b)、6(c)所示];(2)图6(d)~6(f)为后退侧热机影响区组织,其组织形貌、晶粒取向与前进侧相似;但后退侧热机影响区组织与焊核区的过渡界面比较平滑,过渡区域也比较宽,呈“楔形”逐渐从热机影响区的弯曲狭长变形晶粒过渡到“数十微米级别的粗大等轴晶”、“粗大等轴晶与细小等轴晶的混合区”直至焊核区的细小等轴晶粒(图7);(3)前进侧与后退侧沿焊缝宽度中心不对称,但均以焊缝厚度中心对称;前进侧、后退侧与焊核区的过渡界面形成了“哑铃型”的两侧边界。

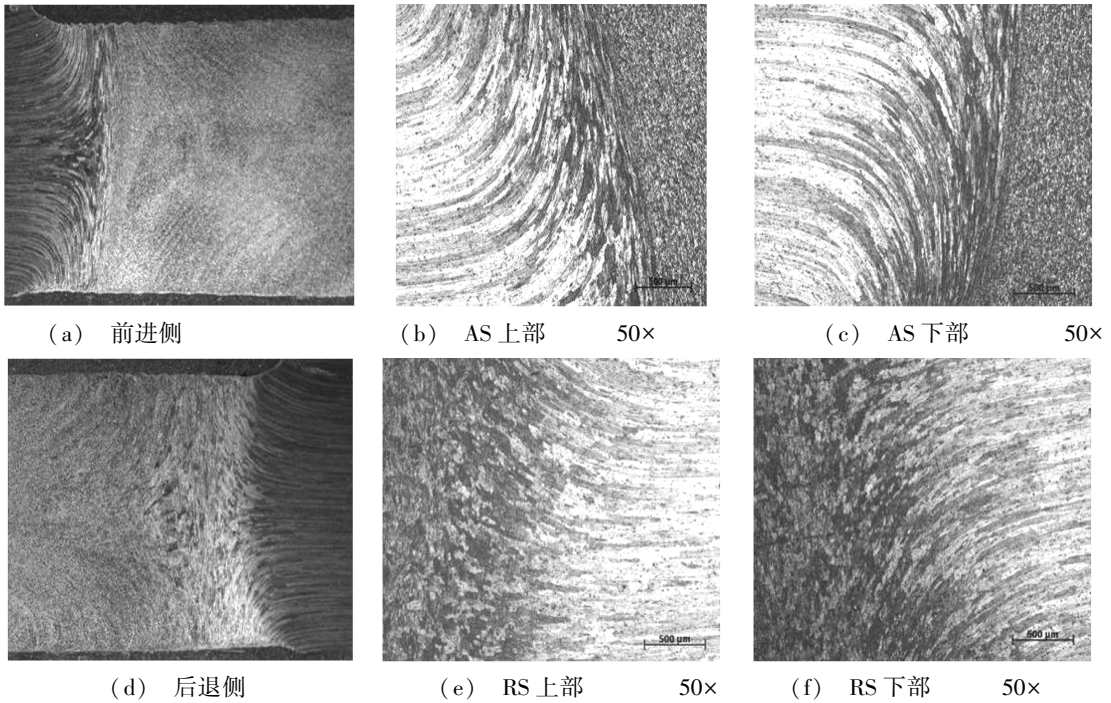


图6 SR-FSW接头热机影响区组织

Fig. 6 Microstructure of the TMAZ for the SR-FSW joint



图7 后退侧热机影响区与焊核区过渡区域形貌

Fig. 7 Morphologies between NZ and retreating TMAZ

SR-FSW焊缝热机影响区组织形成机理与常规搅拌摩擦焊相似,均是由于该区域的塑性金属位于搅拌针边缘,受到的机械搅拌作用较弱,受热循环影响而发生动态回复形成的。

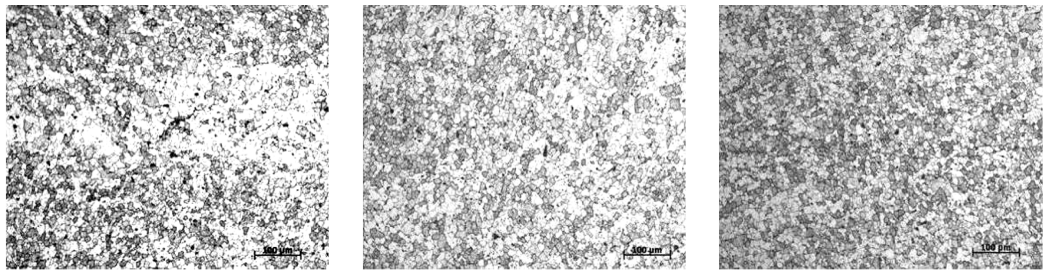
2.4.3 焊核区

图8为沿焊缝厚度方向上不同部位

的焊核区组织形貌,可以看出焊核区呈现出均匀细小的等轴晶组织(6~10 μm),并且不同部位的焊核区等轴晶晶粒尺寸分布一致。这与常规搅拌摩擦焊相比,发生了很大的变化:常规搅拌摩擦焊焊核区上方的等轴晶晶粒尺寸最大,中部的等轴晶晶粒尺寸次之,下方的最小,这与其不同部位经历了不同的焊接热循环是密不可

分的。而 SR-FSW 由于上、下轴肩均匀产热,且从焊缝两表面向焊缝中心传递,从而造成整个 SR-FSW

接头焊核区热输入均匀,经历的焊接热循环一致。



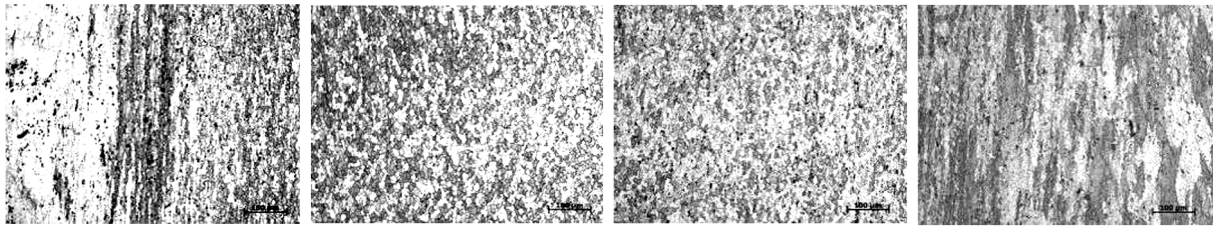
(a) 焊缝上部(A1) (b) 焊缝中部(A2) (c) 焊缝下部(A3)

图8 焊核区沿焊缝厚度方向等轴晶分布情况

Fig. 8 Distribution of the equiaxed grains along the thickness of the joint

图9为沿焊缝宽度方向上不同部位的焊核区组织形貌。图9(a)为临近焊缝前进侧热机影响区的组织形貌,在贴近前进侧区域存在一层80~100 μm的具有沿焊缝厚度方向走向的细小等轴晶组织,其晶粒度相对其余区域更小(3~6 μm),并且该层晶粒走向

与前进侧中心的热机影响区组织取向几乎呈90°。图9(b)、(c)组织形貌一样,均为分布均匀的细小等轴晶组织;而靠近后退侧时,为细小等轴晶与后退侧热机影响区的混合组织,具有一定宽度的过渡区域[图9(d)]。



(a) B1 (b) B2 (c) B3 (d) B4

图9 焊核区沿焊缝宽度方向上等轴晶分布情况

Fig. 9 Distribution of the equiaxed grains along the width of the joint

综上所述:SR-FSW 焊缝焊核区组织为均匀细小的再结晶等轴晶粒,主要是由于焊核区受到搅拌针强烈的机械搅拌作用,经受了较高的焊接热循环,使得焊核区发生动态再结晶,并且发生动态再结晶的晶粒来不及长大而被搅拌针打碎,从而形成细小的等轴晶。根据 Hall-Petch 公式,在一定范围内金属强度和晶粒度呈反比关系,因此焊核区细小的等轴晶组织结构有利于焊缝强度的提高。

2.5 接头显微硬度分析

Top 测量位置距离焊缝上表面 1 mm, Middle 为焊缝厚度中心, Bottom 距离焊缝下表面 1 mm, 其横向测量点涵盖了 SR-FSW 接头的母材区、热影响区、热机影响区以及焊核区。通过不同厚度上的显微硬度测量可以明确地分析出 SR-FSW 接头是否存在各层异性。

图10为6 mm厚2219铝合金SR-FSW接头不同厚度上的显微硬度测量结果:(1)SR-FSW接头不同厚度上的显微硬度分布趋势呈“W”型,与常规搅拌摩擦焊类似。母材的显微硬度最高,在跨入热影响区后显微硬度逐渐降低,在热力影响区附近降到最低,然后在焊核区内又上升,但显微硬度值不会超

过母材硬度;(2)接头不同厚度截面上的显微硬度分布趋势及幅值一致。因此6 mm厚SR-FSW接头不存在各层异性,这与常规FSW接头存在显著的区别。SR-FSW主要由上、下轴肩与焊缝表面塑性金属的旋转摩擦以及搅拌针与内部塑性金属之间的相互作用提供热输入。轴肩与搅拌针的产热功率公式如(1)、(2)式所示,以本文中自主设计的双轴肩搅拌头为例,搅拌针产热仅占11.03%,而上下轴肩的产热占总热输入的88.97%。因此在6 mm厚2219铝合金SR-FSW过程中,上下轴肩主要负责提供热输入,而搅拌针主要保证焊缝内部塑性金属的充分流动。结合温度场数值模拟结果,焊缝横截面上下表面的温差非常小,温度分布非常均匀。正是由于SR-FSW的特殊产热方式、热传递方式导致接头横截面上不存在各层异性;(3)后退侧热机影响区宽度大于前进侧,并且显微硬度分布最低值位于后退侧热机影响区。这主要是由于焊接过程中在搅拌针的作用下,前进侧塑性金属不断地被移动至后退侧,同时后退侧塑性金属的运动速率也低于前进侧,导致后退侧存在塑性金属积累和热量积累,最终导致后退侧温度分布略高于前进侧。SR-FSW接头温度场数值模拟结果也证实

了这一点^[9]。

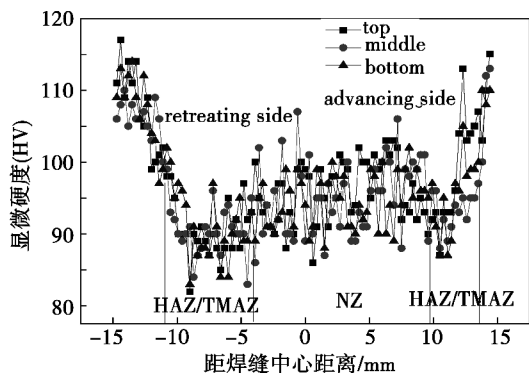


图 10 SR-FSW 接头不同厚度上的显微硬度分布
Fig. 10 Microhardness distribution at the different thickness of SR-FSW joint

轴肩产热功率:

$$W_{\text{shoulder}} = \omega W_{\text{shoulder}} = \frac{2\pi\omega\mu P}{3}(R_1^3 - R_2^3) \quad (1)$$

搅拌针产热功率:

$$W_{\text{pin2side}} = 2\pi\mu\omega PR_2^2 H \quad (2)$$

2.6 接头力学性能

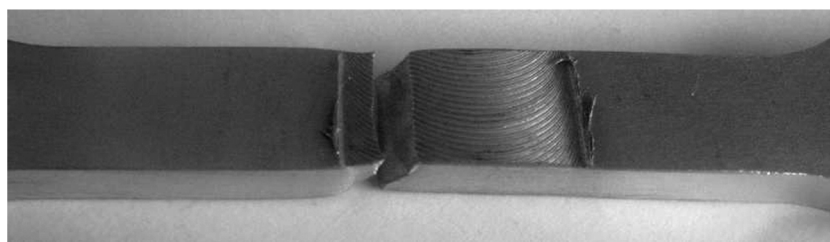


图 11 SR-FSW 接头拉伸试样断裂形貌

Fig. 11 Fracture specimen of SR-FSW joint after tensile test

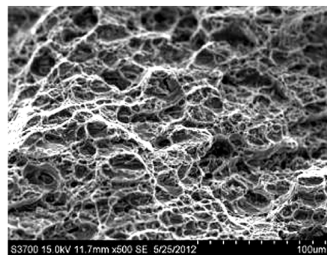


图 12 接头断口微观形貌

Fig. 12 Fracture morphology of the joint

3 结论

(1) 实现了 6 mm 厚 2219 铝合金的 SR-FSW, 焊缝正反面成型相似, 焊缝成型美观, 鱼鳞状纹路均匀明显;

(2) SR-FSW 接头宏观形貌发生了显著的变化, 呈典型的“哑铃型”, 焊缝上下表面宽、中间略窄。这是由双轴肩搅拌头结构、产热方式以及热传递方式的变化造成的;

(3) SR-FSW 接头根据组织特征分为焊核区、热机影响区、热影响区等。焊核区发生了动态再结晶, 呈典型的细小等轴晶组织。热机影响区为弯曲狭长的变形板条状晶粒, 从焊缝中心分别向焊缝上、下表面弯曲;

(4) 接头显微硬度分布趋势呈典型的“W”型, 母材区硬度值最高, 焊核区硬度值次之, 热影响区/热机影响区最低。后退侧热机影响区宽度大于前进侧, 并且显微硬度分布的最低值位于后退侧热机影响区;

(5) 6 mm 厚 2219 铝合金 SR-FSW 接头抗拉强

度达到 318.3 MPa, 延伸率为 5.5%。接头断口形貌呈典型的韧性断裂。

表 2 2219 铝合金 SR-FSW 接头力学性能

Tab. 2 Results of tensile test for SR-FSW joint

抗拉强度/MPa	延伸率/%	强度系数/%
318.3	5.5	72.34

度达到 318.3 MPa, 延伸率为 5.5%。接头断口形貌呈典型的韧性断裂。

参考文献

- [1] Edwards R, Sylva G. Recent advances in welding of aluminium alloys using a self-reacting pin tool (SRPT) approach with application examples [C] // Proceedings of 7th International Conference on trends in welding Research, Georgia, USA, 2005
- [2] 韩文妥, 许鸿吉, 李光, 等. 几种新型搅拌摩擦焊技术 [J]. 航空制造技术, 2008(21): 48-51
- [3] 张健, 李光, 李从卿, 等. 2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对比研究 [J]. 焊接, 2008(11): 50-53
- [4] Thomas W M, Wiesner C S. Recent developments of FSW technologies: Evaluation of root defects, composite refractory tools for steel joining and one-pass welding of thick sections using self-reacting bobbin tools [C] // 8th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, United states, 2008

(下转第 91 页)