

2219 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊接头组织及性能

武颖¹ 李迎² 张玉芝²

(1 太原理工大学机械工程学院,太原 030024)

(2 首都航天机械有限公司,北京 100076)

文 摘 采用静止轴肩搅拌摩擦焊的方法获得了 2219C10S 铝合金焊接接头,研究了焊接接头典型的宏观、微观组织特征、焊接工艺参数对焊缝成形特征及焊接接头力学性能的影响规律。结果表明:相对常规搅拌摩擦焊,由于静止轴肩式搅拌头的结构特点,焊接过程中可有效避免飞边和焊缝内部缺陷;随着焊速的增加,接头焊核由“碗状”变为“腰鼓”状,体积也逐渐减小,还出现了轴肩影响区这一特殊组织特征;焊接接头的显微硬度分布呈现出独特的“U”形,焊核区的显微硬度最低;当焊接速度 ≤ 250 mm/min,随着焊接速度的增加,接头的拉伸性能逐渐增加;当焊接速度增加至 300 mm/min 时,由于在焊接接头中出现了沟槽缺陷,拉伸性能急剧下降。

关键词 静止轴肩式搅拌摩擦焊,2219C10S 铝合金,组织,拉伸性能

中图分类号: TG4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.012

Microstructure and Properties of 2219 Aluminum Alloy Joint Obtained by Stationary Shoulder Friction Stir Welding

WU Ying¹ LI Ying² ZHANG Yuzhi²

(1 College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

(2 The Capital Aerospace Machinery Co., LTD, Beijing 100076)

Abstract 2219C10S aluminum alloy welded joints were obtained by stationary shoulder friction stir welding (SSFSW). The paper presented the typical macroscopic and microstructural characteristics of welded joints, the influences of welding parameters on the forming characteristics and the mechanical properties of welded joints. The results showed that as compared with the traditional friction stir welding (C-FSW), flash and the defects of the weld could be effectively avoided during welding due to the structural characteristics of the stationary shoulder mixing head. With the increase of welding speed, the joint nuclear changed from “bowl” to “waist drum”, and the volume decreased, and the welded joint was also specially characterized with the shoulder-affected zone. The microhardness distribution of the welded joints presented a unique “U” shape, and the nuclear was the lowest. With the increase of welding speed which was under 250 mm/min, structure property increased; when welding speed reached to 300 mm/min, the structure property fell sharply.

Key words Stationary shoulder friction stir welding, 2219C10S aluminum alloy, Microstructure, Structure property

0 引言

静止轴肩搅拌摩擦焊(SSFSW)是一种新型的搅拌摩擦焊技术,与常规搅拌摩擦焊(C-FSW)相比,其焊接过程发生了明显的变化^[1-5],见图1。静止轴肩搅拌摩擦焊过程中仅通过搅拌针高速旋转实现材料连接,焊接过程产热少、焊接变形小、接头性能损失小;另外,由于静止轴肩不压入焊缝,故不存在焊缝减薄的现象。在常规搅拌摩擦焊中,在“搅拌头、母材、背部垫板”间形成动态封闭挤压模,封闭挤压模的体

积大,产热量大;而对于静止轴肩搅拌摩擦焊,封闭挤压模体积更小,其最大直径处与搅拌针的光滑圆柱段相当或略大,再者,在较大直径静止轴肩的顶锻、挤压等作用下,可以更加有效地将塑性金属拘束在封闭挤压模内,几乎不产生由于封闭挤压模内塑性金属外溢造成的飞边,因此静止轴肩搅拌摩擦焊的封闭挤压模更加稳定。从封闭挤压模的稳定性这个角度来看,静止轴肩搅拌摩擦焊焊接工艺对于保证焊缝内部质量、防止出现孔洞、沟槽等焊接缺陷是非常有利的。

收稿日期:2018-04-04

第一作者简介:武颖,1980年出生,博士研究生,研究方向为机械工程。E-mail:51555651@qq.com

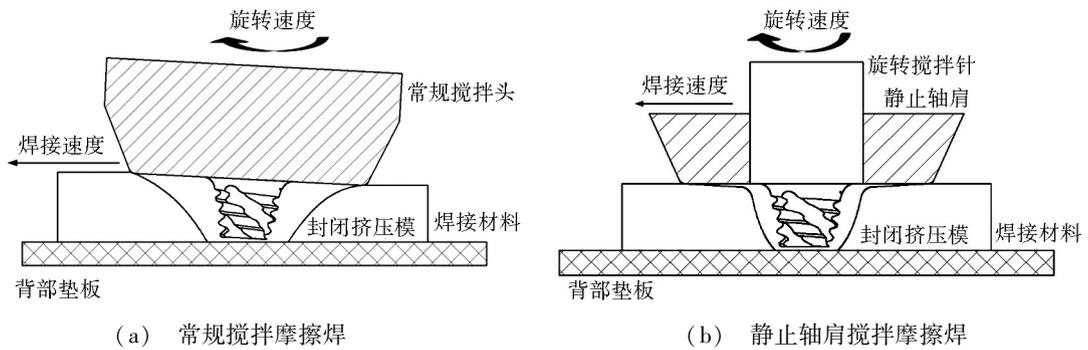


图 1 常规搅拌摩擦焊和静止轴肩搅拌摩擦焊示意图

Fig.1 Schematic of conventional friction stir welding and stationary shoulder friction stir welding

基于上述静止轴肩搅拌摩擦焊的优点,采用自主研发的静止轴肩搅拌摩擦焊工具(图 2)进行 5 mm 厚 2219C10S 高强铝合金的焊接工艺研究。分析焊接速度、搅拌头旋转速度对静止轴肩搅拌摩擦焊焊缝成形、力学性能等的影响规律,并获得优化的焊接工艺参数。

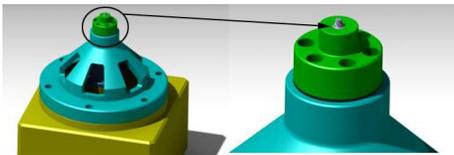


图 2 自主开发的静止轴肩搅拌摩擦焊工具
Fig.2 Self-developed tool of stationary shoulder friction stir welding

1 试验

1.1 材料及试验过程

采用 2219C10S 高强铝合金板材作为试验材料,焊接母材规格为 5 mm×300 mm×100 mm,在 FSW-5M 型搅拌摩擦焊试验设备上采用自主研发的静止轴肩搅拌摩擦焊工具进行对接焊接试验,其结构主要

尺寸为:静止轴肩外径为 $\Phi 20$ mm,内径为 $\Phi 9.3$ mm;内部旋转搅拌头的小轴肩直径 $\Phi 9$ mm,根部直径 $\Phi 7$ mm;搅拌针有效长度 4.8 mm。

焊接过程中搅拌头倾角设定为 1° ,轴肩压入量约为 0.10~0.15 mm(折算为焊接压力约为 10~12 kN),将旋转速度固定为 800 r/min,焊接速度从 50 mm/min 逐渐增加,直至焊缝出现焊接缺陷或主机发生停转。

1.2 性能评价

用 OLYMPUS 光学显微镜下进行典型区域金相组织和显微硬度分析,使用 SEM 扫描电镜进行显微组织分析,在 MTS-810 电子拉伸试验机上按 GB/T228.1—2010 测试接头的拉伸性能。

2 结果与分析

2.1 焊缝成形

2.1.1 焊接参数对焊缝成形特征的影响

图 3 是旋转速度为 800 r/min,不同焊接速度下静止轴肩搅拌摩擦焊缝形貌。

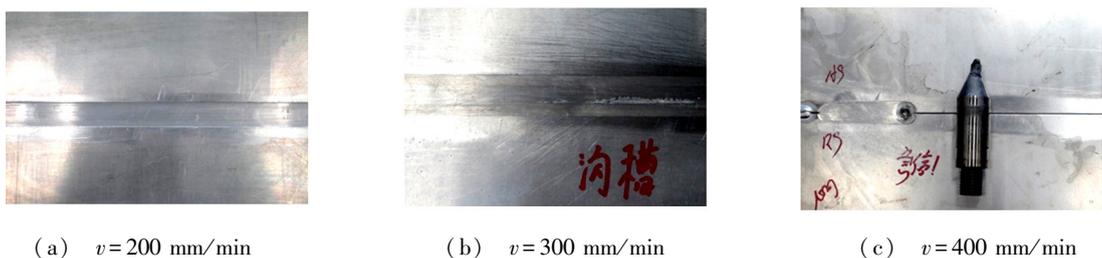


图 3 不同焊接速度条件下的静止轴肩搅拌摩擦焊缝形貌

Fig.3 Weld appearance of stationary shoulder friction stir welding under different speed

从图中可以看出:当焊接速度为 200 mm/min 时,焊缝表面光滑且与母材分界处无明显台阶,即焊缝几乎不存在减薄现象;在焊缝两侧存在少量飞边,但其与 C-FSW 焊缝的飞边形貌截然不同[图 3(a)].前者呈片状,无可塑性变形特征,这是由于焊接过程产热较小,焊接件受焊接热影响较小,且静止轴肩压入焊接件的深度较小,而 C-FSW 焊缝的飞边是轴肩压入焊缝导致封闭挤压模内的塑性金属外溢造成的。

当焊接速度增至 300 mm/min 时,在焊缝表面的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

前进侧出现断续的沟槽缺陷[图 3(b)],这主要是由于产热量过低而导致封闭挤压模(图 1)内的塑性金属流动不充分造成的。

当焊接速度达到 400 mm/min 时,焊缝长度达到 70 mm 时停止焊接,搅拌针有明显的氧化痕迹,并伴有显著的变形[图 3(c)],其变形方向与焊接方向相反。这主要是由于焊接扭矩过大、焊接过程中的前进抗力过大造成。

2.2.2 焊缝成形特征

理论上讲,SSFSW 焊接过程中旋转搅拌针与试

样表面的相互作用时刻会产生表面鱼鳞纹,鱼鳞纹直径与旋转搅拌针的光滑圆柱段直径相当,但随着静止轴肩的同步跟进,在滑动摩擦和顶锻力作用下试样表面还处于塑性状态的鱼鳞纹会瞬间消失,变为光滑状态。SSFSW 焊接过程中会形成一个较小的封闭挤压模,而静止轴肩对提供顶锻、挤压作用力、拘束塑性金属及保持封闭挤压模的完整性具有非常重要的作用。在较小的焊接速度范围内(50~200 mm/min),焊接热输入较大,塑性金属量较大、流动也较为充分,在较小的焊接压力或压入量时,即可形成表面无缺陷、内部质量良好的焊缝。而当焊接速度较大时,焊接热输入较小,封闭挤压模内的塑性金属流动不充分,易在焊缝前进侧产生孔洞、沟槽缺陷,而通过适当增加轴肩下压量,可在一定程度上促进塑性金属回填,消除焊接缺陷。

与 C-FSW 类似,SSFSW 焊接时也存在轴向顶锻力和焊接方向的前进抗力(图 4),但存在差异。静止轴肩与旋转搅拌针施加于试样表面的顶锻力约为 10~12 kN,静止轴肩的前进抗力主要来自于与试样表面的滑动摩擦力 F_f ,滑动摩擦因数 μ 约为 0.61,故滑动摩擦力约为 7.32 kN;而搅拌针的前进抗力与热输

入呈反比关系,热输入越小,前进抗力越大。当热输入较大时,搅拌针的前进抗力低于 F_f ,焊接过程中搅拌针与轴肩不会发生摩擦接触,不会使搅拌针受到损伤破坏;而当热输入较小时,搅拌针的前进抗力则大于 F_f ,会发生与焊接方向相反的变形,甚至会与静止轴肩后侧发生滑动摩擦接触,导致搅拌针弯曲变形、高温氧化等,如图 3(c)所示。

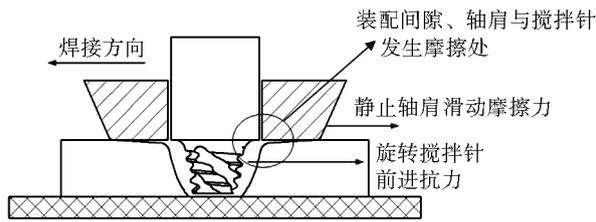


图 4 焊接过程中静止轴肩和搅拌针的前进抗力示意图
Fig.4 Resistance of stationary shoulder and stirring tip for forward during welding

2.3 焊接头宏观与微观组织形貌

2.3.1 宏观形貌

图 5 为不同焊接速度条件下的静止轴肩搅拌摩擦焊接头横截面宏观形貌图。

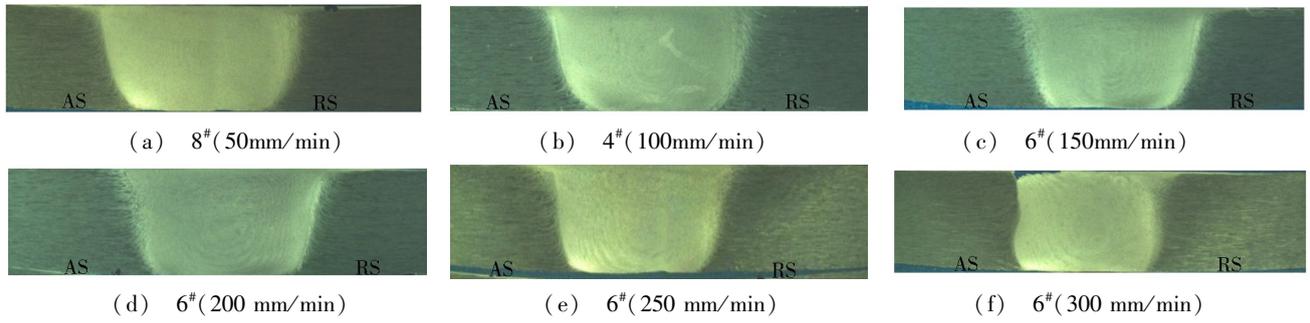


图 5 不同焊接速度下的静止轴肩搅拌摩擦焊接头横截面宏观形貌

Fig.5 Cross section of SSFSW joints at different welding speeds 6.5x

从图中可以看出:无缺陷的焊接接头中焊核的宏观形貌呈典型的“碗状”,即上宽、下窄,这一方面是由旋转搅拌针的圆锥螺纹结构决定的,另一方面,也与焊接时的散热状态有关系,即静止轴肩散热较慢,而背部焊接垫板的散热较快。接头焊核区正面与母材表面平整光滑,无焊缝减薄现象,焊接过程中轴肩未压入焊缝,主要作为封闭挤压模的组成部分来顶锻、挤压塑性金属。

SSFSW 焊接接头的碗状焊核体积较小,塑性金属总量也较小,但在接头焊核内部依旧可观察到明显的“洋葱环”结构特征。这说明在较小的封闭挤压模内,由搅拌针旋转驱动的塑性金属运动规律与 C-FSW 是相同的。

随着焊接速度的增加,接头形貌及体积也呈现一定的规律性。首先,在接头厚度方向的中心,使用电子显微测距测量得到接头两侧热机影响区的间距依次为 8.268、7.543、7.276、6.961、6.835 mm,随着焊接

速度的增加,热输入下降,接头宽度也逐渐下降。其次,当焊接速度较小时,热输入较大,接头两侧热机影响区与焊核区的分界线均非常明显,但两者不对称,主要表现为:前进侧分界线逐渐向外扩展,而靠近焊缝上部的后退侧热机影响区逐渐向焊核内部楔入[图 5(a)和(b)];而当焊接速度提高时,热输入逐渐下降,前进侧热机影响区与焊核的分界线较为清晰,位于后退侧的分界线也表现出向外扩展的趋势,且两侧热机影响区轮廓以接头宽度中心展现出较好的对称性[图 5(c)、(d)和(e)];焊接速度为 300 mm/min 时[图 5(f)],在前进侧上方存在沟槽缺陷,且接头从“碗状”变为了“腰鼓状”。

2.3.2 微观组织形貌

静止轴肩搅拌摩擦焊接头由母材区[图 6(a)]、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)、焊核区(NZ)及轴肩影响区(SAZ)组成。可以看出:热影响区[图 6(b)]的组织形貌、晶粒尺寸与母材区非常相似,焊

接过程中并没有受到显著的热影响。热机影响区的组织发生了剧烈的塑性变形,并且发生了向上的弯曲变形[图 6(c)、(d)]。但从图中可以发现:热机影响区的范围非常窄,且与 C-FSW 接头相比,其塑性变形程度及弯曲程度均较小,这主要受狭小封闭挤压模内塑性金属在垂直方向上的运动影响;焊核区由细小的、发生回复再结晶的等轴晶晶粒组成,晶粒尺寸仅

为 5~10 μm [图 6(e)]。

和有关静止轴肩搅拌摩擦焊接的诸多报道不同的是,本文的静止轴肩搅拌摩擦焊接接头中轴肩影响区微观组织特征明显[图 6(f)]。在接头的轴肩影响区,即接头表面,存在一层致密、细小、约为数十微米厚,且与母材的板条状晶粒、焊核区的等轴晶晶粒截然不同的组织。

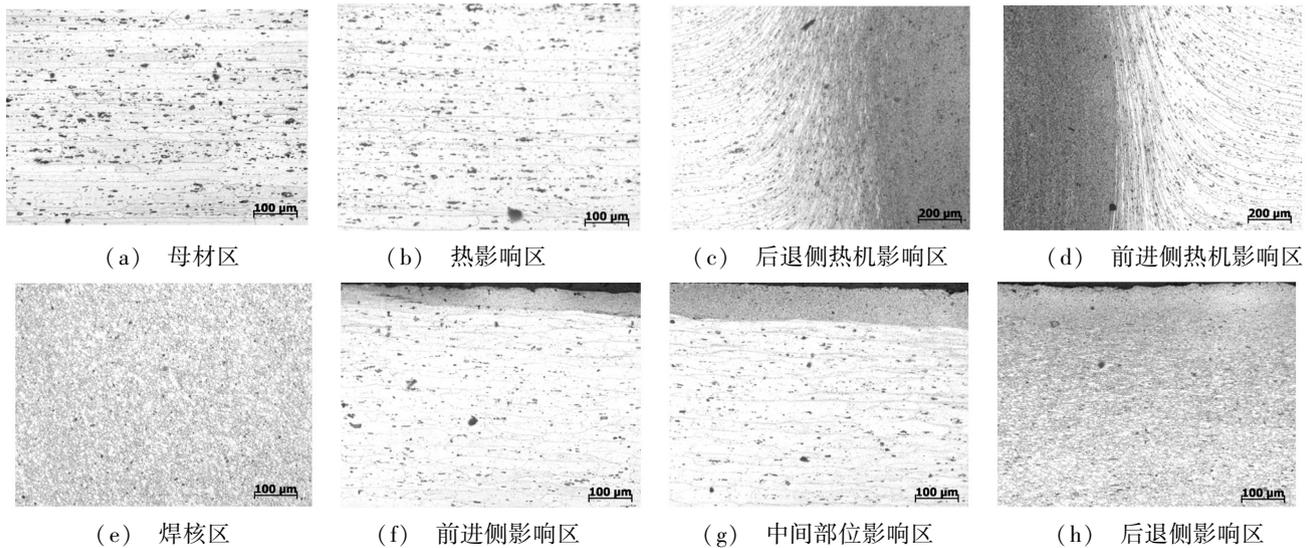
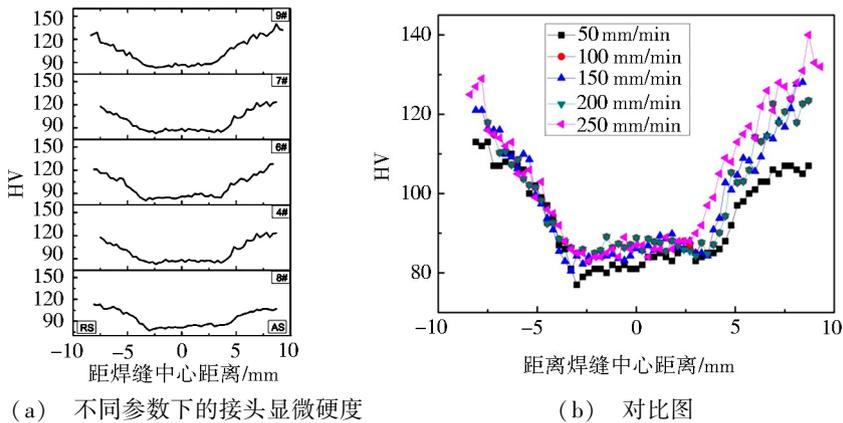


图 6 静止轴肩搅拌摩擦焊接头各组成区域的微观形貌

Fig.6 Microstructure of each component of SSFSW joint

2.4 焊接头横截面显微硬度

图 7 为不同焊接速度下静止轴肩搅拌摩擦焊接



(a) 不同参数下的接头显微硬度

(b) 对比图

图 7 不同焊接工艺参数下的静止轴肩搅拌摩擦焊接头横截面显微硬度及对比图

Fig.7 Cross section microhardness and comparison chart of SSFSW joints under different welding parameters

可以看出:静止轴肩搅拌摩擦焊接头显微硬度分布呈现出独特的“U”形,即接头焊核区的显微硬度最低,两侧热机影响区与焊核区的交界处为显微硬度分布曲线转折点。从转折点开始,随着与焊缝中心距离增大,显微硬度逐渐升高。当焊接速度较低时(即热输入较大),后退侧热机影响区与焊核区转折点附近的显微硬度略低于前进侧;而当焊接速度增加至 200~250 mm/min 时,两侧几乎无明显差异。随着焊接速度增大,接头的显微硬度呈现出升高的趋势,其中,前进侧热影响区和热机影响区的增加趋势最为明显,焊核区次之,后退侧无显著差异。和 C-FSW 接宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

头典型的“W”形显微硬度分布趋势相比,SSFSW 的显微硬度分布趋势发生了显著的变化,尤其是在热机影响区,其不再是整个接头中的最低处。2219C10S 铝合金为热处理强化铝合金,时效热处理后的强化相增强作用是母材呈现出高强度的原因所在。而静止轴肩搅拌摩擦焊接过程导致焊接接头两侧热影响区、热机影响区发生过时效,强化相脱溶长大,从而导致接头软化。

2.5 焊接速度对接头拉伸性能的影响

图 8 为不同焊接速度条件下获得的接头拉伸强度曲线,可以看出,随着焊接速度的增加,热输入逐渐

减小,接头软化程度也在逐渐减小,因而接头抗拉强度 σ_b 和延伸率 δ 逐渐升高,当焊接速度达到250 mm/min时,接头性能达到最优值($\sigma_b = 345 \sim 350$ MPa, $\delta = 6\% \sim 6.5\%$)。而当焊接速度高于300 mm/min时,由于在接头中出现沟槽缺陷,接头拉伸性能急剧降低。

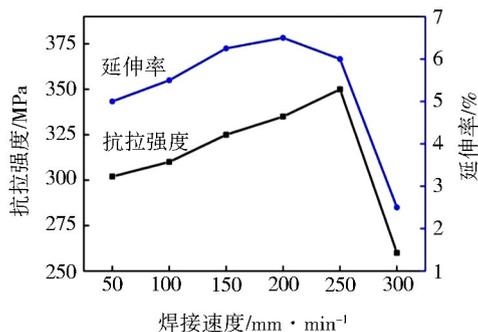
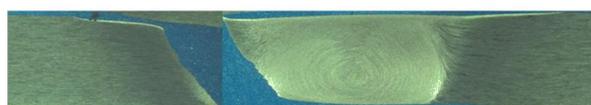


图8 焊接速度对静止轴肩搅拌摩擦焊接头拉伸性能的影响

Fig.8 Effect of welding speed on tensile properties of SSFSW joints

图9为不同焊接速度下接头的典型拉伸断裂位置。



(a) $v = 50 \sim 150$ mm/min(后退侧向外 45°)



(b) $v = 200 \sim 250$ mm/min(后退侧向内 45°)



(c) $v = 200 \sim 250$ mm/min(前进侧向内 45°)

图9 不同焊接速度下接头的典型拉伸断裂位置

Fig.9 Effect of welding speed on tensile properties of SSFSW joints

可以看出,当焊接速度较低时(50~150 mm/min),由于接头显微硬度最低值位于后退侧热机影响区与焊核区的交界处,因此,接头断裂面平行于“后退侧热机影响区与焊核区的界面”,呈现出后退侧向外 45° [图9(a)];而当焊接速度较大(200~250 mm/min),接头呈现出两种典型的断裂面:(1)从“接头底部焊核区与后退侧热机影响区的交界点”向焊核内部扩展[图9(b)];(2)从“接头底部焊核区与前进侧热机影响区的交界点”向焊核内部扩展[图9(c)],断裂面与拉伸施力方向均为 45° ,两种断裂方式出现的概率各占50%。

3 结论

(1)相对常规搅拌摩擦焊,由于静止轴肩式搅拌头的结构特点,焊接过程中会形成一个较小的封闭挤压模。在较小的焊接速度时,热输入较大,可形成表面无缺陷、内部质量良好的焊缝;当焊接速度较大时,热输入较小,通过适当增加轴肩下压量,可在一定程度上促进塑性金属回填,消除焊接缺陷。

(2)焊接接头由母材区、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)、焊核区(NZ)及轴肩影响区(SAZ)组成;其中,轴肩影响区是在接头表面的一层致密、细小、约为数十微米厚,且与母材的板条状晶粒、焊核区的等轴晶晶粒截然不同的组织。

(3)不同于常规搅拌摩擦焊接,在一定的转速下,静止轴肩搅拌摩擦焊接头显微硬度分布呈现出独特的“U”形,接头焊核区的显微硬度最低,两侧热机影响区与焊核区的交界处为转折点;随着焊接速度增大,接头的显微硬度呈现升高的趋势。

(4)当焊接速度 ≤ 250 mm/min时,随着焊接速度的增加,接头拉伸性能升高,而当焊接速度 ≥ 300 mm/min时,由于出现沟槽缺陷接头拉伸性能急剧降低;不同的焊接速度条件下,接头的拉伸断裂路径变化明显:当焊接速度较低时,接头断裂面平行于“后退侧热机影响区与焊核区的界面”,呈现出后退侧向外 45° ;而焊接速度较大时,呈现出两种断裂面:(1)从“接头底部焊核区与后退侧热机影响区的交界点”向焊核内部扩展;(2)从“接头底部焊核区与前进侧热机影响区的交界点”向焊核内部扩展,出现的概率各占50%。

参考文献

- [1] 刘会杰,李金全,段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展[J]. 焊接学报,2012,33(5):108-112.
- [2] WIDENER C A, TALIA J E, TWEEDY B M, et al. High-rotational speed friction stir welding with a fixed shoulder[C]. 6th International Symposium on Friction Stir Welding, Montreal, Canada, 2006:10-13.
- [3] WYNNE B P, THREADGILL P L, DAVIES P S. Microstructure and texture in static shoulder friction stir welds of Ti-6Al-4V[C]. 7th International Friction Stir Welding Symposium, Awaji Island, Japan, 2008:20-22.
- [4] 王大勇,冯吉才. 搅拌摩擦焊缝表面弧形纹形成模型[J]. 焊接学报,2003,24(5):42-45.
- [5] LI J Q, LIU H J. Effects of tool rotation speed on microstructures and mechanical properties of AA2219-T6 welded by the external non-rotational shoulder assisted friction stir welding [J]. Materials and Design, 2013, 43:299-306.