

# 转速对 20 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊接件的组织及性能的影响

计鹏飞<sup>1</sup> 张仲宝<sup>1</sup> 赵光辉<sup>2</sup> 王杰<sup>1</sup> 乔森<sup>1</sup>

(1 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

(2 火箭军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076)

**文 摘** 对 20 mm 厚的 2219 C10S 铝合金板材进行搅拌摩擦焊对接试验, 在进给速度为 100 mm/min 的条件下, 对比研究转速为 400~550 r/min 时的对接接头的内部缺陷、宏观形貌及微观组织、显微硬度和拉伸力学性能的差异。结果表明, 当转速为 400~500 r/min 时, 焊接接头无缺陷, 能获得内部质量较高的焊接接头。随着转速的增加, 焊核区“洋葱环”的间距和轴肩影响区的范围增大, 焊核区和热力影响区的硬度的降低越明显。接头的拉伸性能随转速的增大而降低, 拉伸强度最高可达到 334 MPa, 接头断裂模式主要为韧性断裂, 断裂位置发生在后退侧的热力影响区与热影响区的交界处, 与显微硬度最小位置相吻合。当转速增大至 525 r/min 时, 焊缝出现表面点状缺陷; 当转速达到 550 r/min 时, 焊缝出现连续的犁沟缺陷。

**关键词** 搅拌摩擦焊, 厚板 2219 铝合金, 微观组织, 力学性能

中图分类号: TG453.9

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.03.009

## Effect of Rotation Speed on Microstructure and Properties of 20 mm Thick AA2219 Friction Stir Welded Plates

Ji Pengfei<sup>1</sup> ZHANG Zhongbao<sup>1</sup> ZHAO Guanghui<sup>2</sup> WANG Jie<sup>1</sup> QIAO Sen<sup>1</sup>

(1 Capital Aerospace Machinery Co. Ltd, Beijing 100076)

(2 The First Military Representative Office of the Armed Forces in Beijing, Beijing 100076)

**Abstract** The 20 mm thick 2219 C10S aluminum alloy sheets were subjected to friction stir welding. The internal defects, macroscopic morphology, microstructure, micro-hardness and tensile mechanical properties of the welding joints at the speed of 400~550 r/min were compared under the condition of a travelling speed of 100 mm/min. The results show that when the rotation speed is 400~500 r/min, the welded joints with no defects and higher internal quality can be obtained. As the speed increases, the distance between the "onion rings" in the weld nugget zone and the range of the shoulder affect zone increase, and the micro-hardness of the weld nugget zone and the thermo-mechanical affect zone decreases more obviously. The tensile mechanical property of the joints decreases with the increase of the rotation speed. The maximum tensile strength can reach 334 MPa. The fracture mode of the joint is mainly ductile fracture occurring at the junction of the thermo-mechanical affect zone and the heat affect zone on the retreating side. It coincides with the position of the minimum micro-hardness. Point defects were observed on the surface of the weld joint when the rotation speed increased to 525 r/min and continuous furrow defects were observed inside the weld joint when the rotation speed increased to 550 r/min.

**Key words** Friction stir welding, AA2219 thick plates, Microstructure, Mechanical properties

### 0 引言

搅拌摩擦焊接 (Friction stir welding, FSW) 作为一种固态连接方法<sup>[1]</sup>, 适合于铝合金、镁合金等轻质合金的焊接, 与传统的熔化焊接工艺相比, 具有无弧

光、噪声、粉尘等污染的优点。此外, 搅拌摩擦焊接的焊接残余应力更低、工件焊后变形更小<sup>[2-4]</sup>。经过近 30 年的发展, 目前搅拌摩擦焊已广泛应用于汽车、高铁、船舶以及航空航天等领域<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2021-02-01

第一作者简介: 计鹏飞, 1988 年出生, 博士研究生, 主要从事铝合金搅拌摩擦焊接及焊接残余应力研究工作。E-mail: jipengfei-2@163.com

相对于熔焊焊接,铝合金搅拌摩擦焊在焊前的结构件的清理、焊接过程控制及气氛保护和焊后焊缝的处理上均大大简化,焊接过程中人为干涉项目也更少<sup>[6]</sup>,更利于实现铝合金结构件焊接的自动化和智能化,因此在航天领域的应用越来越广泛。随着运载火箭运载能力要求的不断提高,运载火箭燃料贮箱的结构正向着大型化、系列化、组合化的方向发展<sup>[7]</sup>,采用搅拌摩擦焊接工艺的铝合金结构件的体积和焊接区厚度也逐渐增大,对厚板高强铝合金的搅拌摩擦焊接件的制造工艺和性能也提出了更高的要求。

厚板铝合金搅拌摩擦焊接的难度在于由于板厚较大,轴肩与板材上表面的摩擦作用带来的材料流动效应和摩擦热输入较难作用于远离轴肩的板材下表面附近,造成焊缝背部由于材料流动和热输入的不足,产生未焊透、弱结合等焊接缺陷;然而,仅通过提高转速来解决厚板焊缝背部的材料流动性和热输入不足的问题,又可能造成焊缝正面的过热问题,影响焊缝表面成形和焊接质量,甚至带来新的缺陷。因此,需要通过优化搅拌头转速和进给速度的匹配来解决铝合金厚板搅拌摩擦焊接的问题。同时,高转速焊接工艺在2219铝合金上还存在着析出相长大导致焊缝强度下降的问题<sup>[8]</sup>。因此,本文研究在较低转速焊接工艺条件下,不同转速对厚板2219铝合金搅拌摩擦焊接件组织及性能的影响。

## 1 试验材料与方法

将规格为600 mm×150 mm×20 mm的两块2219C10S铝合金平板试样进行对接焊,将搅拌头的进给速度保持为100 mm/min,搅拌头倾角设置为2.5°,通过改变搅拌头旋转速度(400~550 r/min),选择7组参数进行焊接。焊接完成后,剔除焊缝正面的飞边并打磨圆滑,获得的平板对接焊接试样经目视检查表面成型情况,并采用X光和超声相控阵进行焊缝内部质量的无损检测。根据无损检测结果,在少缺陷和无缺陷的焊接样品上截取垂直于焊缝方向截面的金相试样,进行焊接接头典型区域的金相组织分析;并选取拉伸试样,考虑到搅拌摩擦焊接过程中焊接起始阶段与热稳定阶段时接头性能的差异,各组参数样品的拉伸试样均选择距焊缝起始端约200 mm开始取样,进行拉伸试验,取样位置如图1所示。焊接工艺参数为:1#~7#转速 $\omega$ 分别为400、425、450、475、500、525、550 r/min;进给速度为 $v$ 100 mm/min。

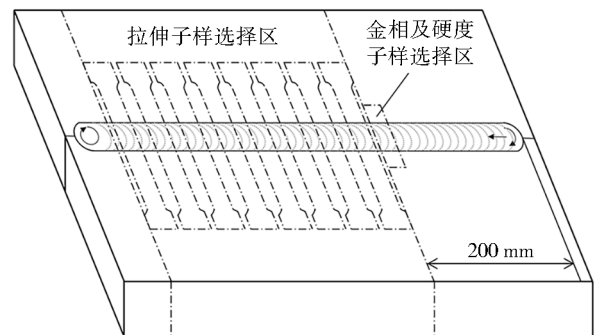


图1 金相及拉伸试样选择区域示意图

Fig. 1 Scheme of regions of metallographic and mechanical testing specimens

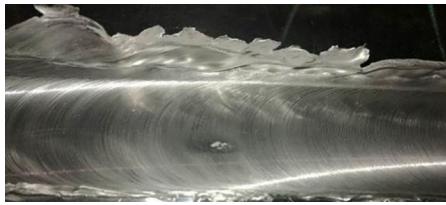
## 2 无损检测及微观组织分析

### 2.1 焊接接头表面成型及无损检测

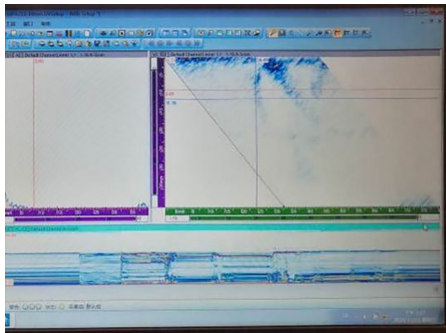
对7组不同转速焊接的平板对接焊接试样经目视检查表面成型情况,并采用X光和超声相控阵进行无损检测。结果表明:搅拌头旋转速度 $\omega$ 为400~500 r/min时,焊缝表面成型目视检查均无缺陷,X光和超声相控阵等无损检测均合格,不存在焊接缺陷,焊缝内部质量均可以达到航天行业标准QJ20043—2011和QJ20045—2011中A级焊缝的质量要求。但在 $\omega=525$  r/min和 $\omega=550$  r/min焊接试样表面发现存在表面缺陷[图2(a)(c)]。当 $\omega=525$  r/min时,焊接试样表面存在局部的点状缺陷,从其超声相控阵检测信号[图2(b)]可判断该表面缺陷是从焊缝内部延伸至焊缝表面的;而随着转速的增大、焊接热输入的增加,当 $\omega=550$  r/min时,焊接试样的缺陷已从内部全部延伸至焊缝表面,发展成连续的犁沟状缺陷。

550 r/min试样表面缺陷产生的原因,一方面,是由于在前进侧搅拌针旋转速度和进给速度的叠加,导致在搅拌针前进侧被焊材料流出的速度大于后退侧被焊材料流入的速度而实时产生了一个空腔,该空腔又随着搅拌头的向前运动被后流入的被焊材料填充而实时消失,当搅拌头的搅拌头旋转速度 $\omega$ 和进给速度 $v$ 的匹配不合理、或者搅拌针形貌设计失调导致被焊材料的流动无法填满空腔时,就会打乱该瞬时空腔实时产生和实时消失的过程,导致在前进侧出现体积型缺陷;另一方面,由于搅拌头旋转速度较快,导致焊接过程中焊接热输入较大,使得焊缝靠近上表面的部分过热,造成体积型缺陷。在搅拌头进给速度保持为100 mm/min,搅拌头旋转速度在400~500 r/min的工艺参数区间内,20 mm厚2219 C10S铝合金的搅拌摩擦焊接热输入为合理的,可以保证焊接接头的质量。





(a) 6#试样焊缝表面缺陷形貌



(b) 6#试样焊缝表面缺陷的超声相控阵信号



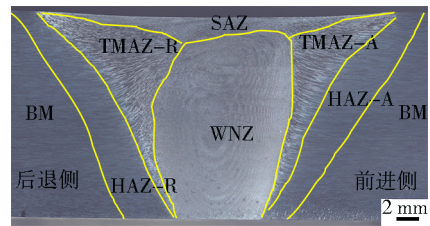
(c) 7#试样整体形貌及表面缺陷

图2 转速过快导致的焊接缺陷

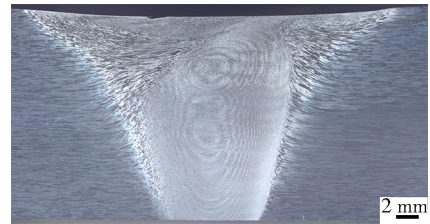
Fig. 2 Welding defects caused by the mismatch of rotation speed and travelling speed

## 2.2 焊接接头宏观和微观组织形貌分析

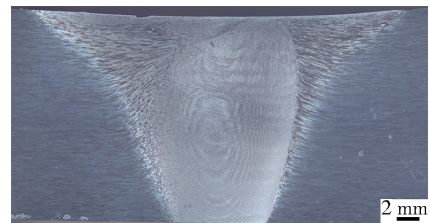
图3为20 mm厚2219C10S铝合金在不同搅拌头旋转速度下的搅拌摩擦焊接接头宏观组织形貌。从总体上看,焊接接头的宏观组织形貌非常相似,均由轴肩影响区(SAZ)、焊核区(WNZ)、前进侧/后退侧热力影响区(TMAZ-A/R)、前进侧/后退侧热影响区(HAZ-A/R)和母材区(BM)等组成,各个区域的位置如图3(a)所示。其中,前进侧热力影响区与焊核区的分界线几乎为一条直线,呈倒三角状,越接近焊缝上表面的热力影响区越宽,在靠近下表面的1/3厚度范围内热力影响区的范围很小,晶粒的拉长和扭曲变形相对很小;后退侧热力影响区呈楔形,进入焊缝内部约至焊核区宽度的1/2,其上部为轴肩影响区,下部为焊核区。轴肩影响区靠近焊缝上表面,后退侧轴肩影响区的范围明显大于前进侧,且随着搅拌头旋转速度的增大而增大。热力影响区和轴肩影响区的组织在前进侧与后退侧的差异,是由母材在焊接过程中受到不同的搅拌作用力、从而导致金属的塑性流动模式的差异造成的。在前进侧,母材金属组织主要受到搅拌针的剪切作用,因此塑性流动的方向矢量沿厚度方向的分量较大;而后退侧金属的



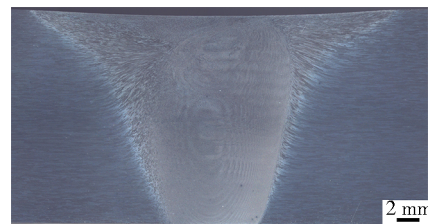
(a) 1#试样



(b) 2#试样



(c) 3#试样



(d) 4#试样



(e) 5#试样



(f) 6#试样

图3 接头宏观组织形貌(右侧为前进侧) 6.5×

Fig. 3 Macro-structure of the welding joints (advancing side on the right side)

塑性流动方向与搅拌针的旋转方向一致性较好,热力影响区、轴肩影响区与邻近的母材组织均发生塑性变形,因此不仅造成后退侧的热力影响区及轴肩影响区

的范围更大,且与母材的交界面也不如前进侧清晰。

焊核区中心的“洋葱环”状结构在靠近上表面1/3板厚处明显地分为上下两部分,且分界线随着搅拌头旋转速度的增大而向下表面移动。

2219C10S母材的微观组织(图4),由一系列具有明显轧制方向的板条状晶粒组成,这和板材通过轧制成型经受10%的冷加工变形过程相关,且在晶粒内部及晶间分布有大量其细小的第二相,主要为析出强化相。

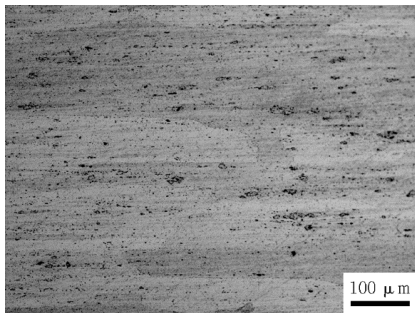
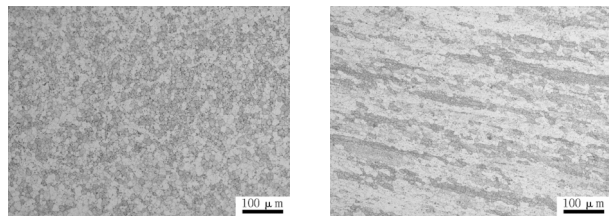


图4 2219C10S母材微观组织形貌

Fig. 4 Microstructure morphology of the base metal of the AA2219 C10S plate

焊核区为细小的等轴晶组织[图5(a)],由于受到搅拌针的搅拌作用和摩擦热影响,原有母材的组织结构均被打破,属于再结晶组织;轴肩影响区与焊核区类似,主要为再结晶组织,不同的是轴肩影响区受到轴肩的影响,一方面由于热输入量较大,局部温度较高,存在一定程度的晶粒长大,另一方面材料的流动性更强,晶粒呈现出一定的取向特征。

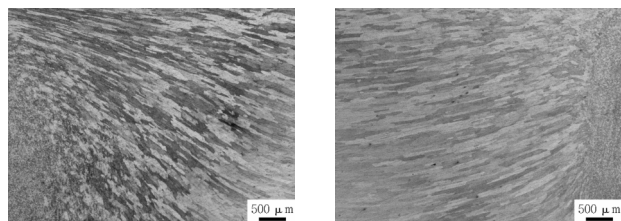
图6为试样前进侧、后退侧热力影响区的组织形貌。可以看出,前进侧热力影响区发生了较大程



(a) 焊核区 (b) 轴肩影响区

图5 焊核区和轴肩影响区微观组织形貌 200×

Fig. 5 Microstructure morphology



(a) 前进侧 (b) 后退侧

图6 接头热力影响区微观组织形貌

Fig. 6 Microstructure morphology of thermo-mechanical affected zone of the welding joint

度的弯曲变形,同时由于经受了一定程度的回复反应,粗大组织晶粒有所减小;后退侧热力影响区与焊核区过渡较为平滑,且过渡区域较宽。

### 3 显微硬度及拉伸性能分析

#### 3.1 焊接接头横截面显微硬度分析

图7为厚板搅拌摩擦焊接接头横截面显微硬度测试点分布位置的示意图,分别测试板厚中心层(M)以及距板厚中心层7mm的焊缝近上表面层(T)和焊缝近下表面层(B)的硬度分布,测试点为距焊缝中心左右±23mm(底层(B)只测距焊缝中心±13mm)的范围每隔2mm测一个点,规定距离为负的测试点位于后退侧。

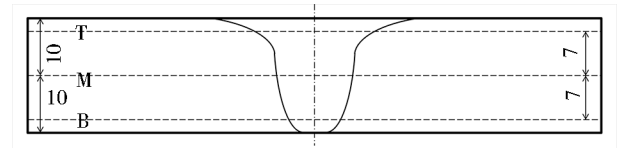


图7 接头显微硬度测试点分布位置

Fig. 7 Distribution of the micro-hardness testing points of the welding joints

图8为不同参数组合下的搅拌摩擦焊接接头横截面上、中、下三层显微硬度的对比。从总体上看,不同参数组合下的搅拌摩擦焊接接头横截面显微硬度具有相似的分趋势。

(1)在板厚中心层均呈现出典型的“W”型,接头两侧母材的显微硬度最高,当跨入到热影响区后显微硬度逐渐降低,热力影响区最低,而跨入到焊核区后显微硬度又逐渐升高,但不会超过母材。这是由于焊接所用的2219C10S高强铝合金为固溶与时效强化态,在焊接过程中受到焊接热输入和搅拌头的机械搅拌的共同作用下,焊接区中部分细小的沉淀相发生了不同程度的再次固溶并重新析出、长大,而析出强化相的形成、聚集和长大的程度不同,导致焊接区中不同区域之间的显微硬度的变化,其中热机影响区受到的热影响最大,由于过时效作用而造成的软化最明显,其显微硬度最低。

(2)在近上表面层,与板厚中心层呈现出相似的“W”型,区别是焊缝中心附近的硬度回升区主要是轴肩影响区,其影响范围要大于板厚中心层的焊核区,且硬度回升的数值要大于焊核区,主要的原因轴肩影响区的热输入量比焊核区更大,存在一定的析出相强化作用;在近下表面层呈现出近似于“V”型分布,这是由于靠近焊缝下表面附近的热力影响区的范围很窄,在硬度分布上没有体现。通过板厚方向上焊接区的最小硬度也可以看出,焊缝近上表面层、中心层和近下表面层的力学性能逐渐下降。这是由于靠近上表面的金属受到轴肩和搅拌针的双重作用,加工硬化效果更加显著,造成三层之间越靠近



下表面,焊缝区域的强度下降越明显。

(3)不同转速的样品,转速越高,焊核区和热力影响区的硬度降低越大;且焊缝近上表面层的硬度受到转速的影响更为明显,在近下表面层,不同转速的试样接头硬度几乎没有差别。

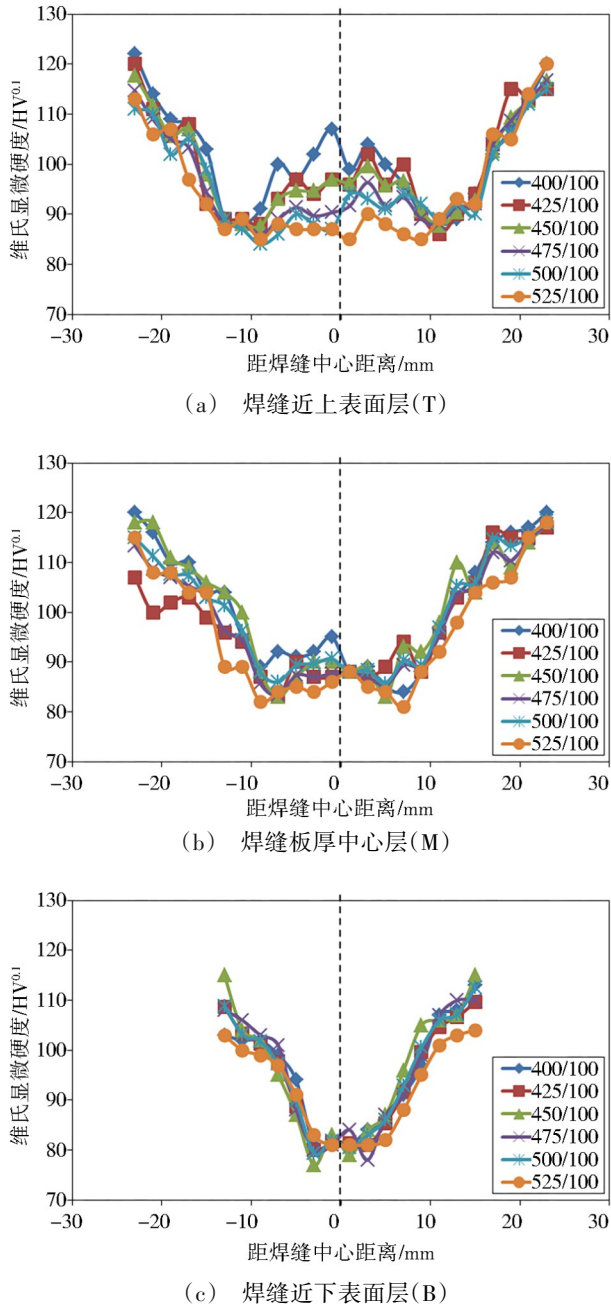


图8 不同转速下接头横截面显微硬度的对比

Fig. 8 Comparison of Comparison of cross-section micro-hardness of friction stir welded joints at different rotation speed

### 3.2 焊接接头拉伸力学性能分析

图9为搅拌头旋转速度对搅拌摩擦焊接接头拉伸力学性能的影响趋势。可以看出,当搅拌头旋转速度为400~500 r/min时,20 mm厚板搅拌摩擦焊接接头的拉伸性能相差不大,最高可达到334 MPa,延伸率 $\delta_5$ 均超过5%、 $\delta_{50}$ 均超过12%。随着搅拌头转速

的增大,焊接接头的力学性能有下降的趋势,这也与接头横截面显微硬度对搅拌头转速的增大而减小的趋势是一致的。

此外,由于搅拌头旋转速度越低,焊接热输入量越小,焊后残余应力和焊后变形将会越小,若综合考虑焊缝成形、焊后变形和力学性能的测试结果,在100 mm/min的焊接速度下,较优的旋转速度区间为400~500 r/min,1#样品所采用的100 mm/min、400 r/min为较优的参数组合。

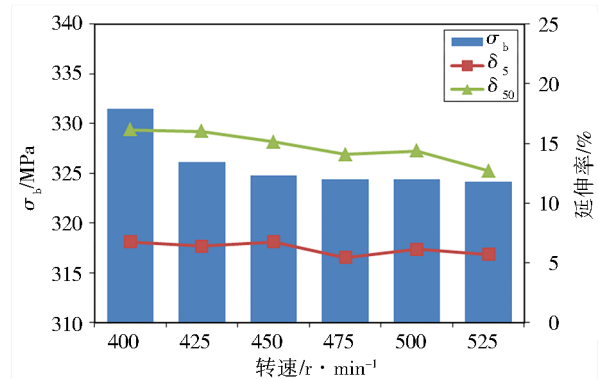
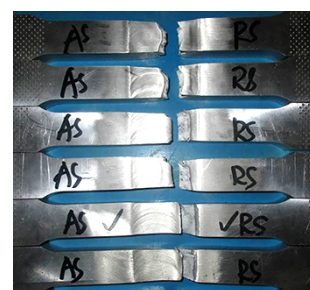


图9 不同旋转速度焊接接头的拉伸力学性能

Fig. 9 Tensile mechanical properties of the welded joints at different rotation speed

### 3.3 断口形貌分析

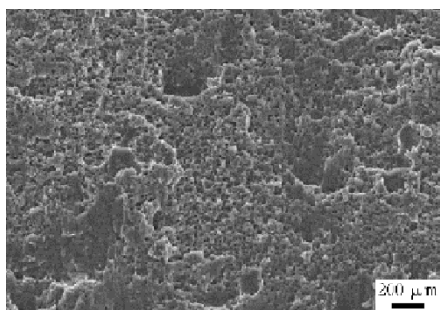
图10是对1#样品的拉伸断裂试样的子样断裂位置、宏观和微观断口形貌分析结果。从图10(a)中可以看出,拉伸子样断裂位置均位于后退侧,这也与接头后退侧的显微硬度较小的规律相对应。从图10(b)~(d)中可以看出,在断裂面上展现出大量细小的



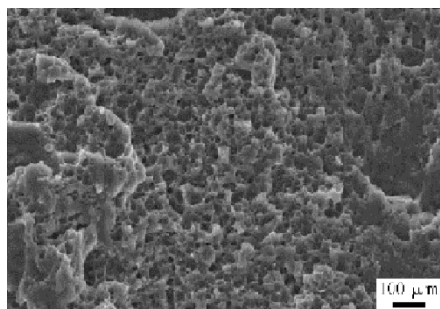
(a) 拉伸子样断裂位置



(b) 断口宏观形貌 6.5×



(c) 断口扫描 500×



(d) 断口扫描 1000×

图10 1#样品接头断口宏观形貌及扫描电镜分析  
Fig. 10 Macro-morphology and SEM analysis of the fracture of sample 1#

韧窝和撕裂棱结构,并且在韧窝内部含有大量的第二相粒子,其断裂方式为典型的韧性断裂。

#### 4 结论

(1)20 mm厚2219C10S铝合金板材适用于低转速焊接,当焊接速度为100 mm/min、搅拌头旋转速度为400~500 r/min范围内时,可获得焊接质量较好的无缺陷焊缝;当焊接速度为100 mm/min、搅拌头旋转速度达到550 r/min时,焊缝出现连续的犁沟缺陷。

(2)不同转速的焊接接头的宏微观组织形貌相差不大,轴肩影响区随着搅拌头旋转速度的增大而增大;焊核区中心的“洋葱环”在靠近上表面1/3板厚处出现分层,且分界线随着搅拌头旋转速度的增大而向下表面移动。

(3)不同转速的样品,转速越高,焊核区和热力影响区的硬度降低越大;且焊缝近上表面层的硬度受到转速的影响更为明显,在近下表面层,不同转速的试样接头硬度几乎没有差别。

(4)拉伸性能随转速的增大而降低,拉伸强度最高可达到334 MPa,接头断裂模式主要为韧性断裂,

断裂位置发生在后退侧的热力影响区与热影响区的交界处,与显微硬度最小位置相吻合。

(5)综合考虑焊接接头质量和焊后变形等因素,在100 mm/min的焊接速度下,400 r/min的搅拌头旋转速度是较优的参数选择。

#### 参考文献

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction-stir butt welding:9125978. 8 [P]. 1991.
- [2] 牛鹏亮,李文亚. 搅拌摩擦焊残余应力研究现状及展望[J]. 精密成形工程,2015(5):1-6.
- NIU P, LI W. Present study and prospect of friction stir welding residual stress [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015(5):1-6.
- [3] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍等. 搅拌摩擦焊接过程的试验测量及分析[J]. 焊接学报,2010,31(2):67-70
- YAN D, SHI Q, WU A, et al. Measurement and analysis of friction stir welding process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2):67-70
- [4] MISHRA R S, MA Z Y, Friction stir welding and processing [J], Materials Science and Engineering R, 2005 (50): 1-78.
- [5] 郝云飞,王国庆,周庆,等. 运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊接工艺及应用[J]. 宇航材料工艺,2016,46(6):11-20.
- HAO Y, WANG G, ZHOU Q, et al. Application of all friction stir welding technology on the launch vehicle tank [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016,46(6):11-20.
- [6] 宋建岭,李超. 搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应用与发展[J]. 焊接,2018(5):21-27.
- SONG J, LI C. Application and development of friction stir welding in rocket tank manufacturing [J]. Welding & Joining, 2018(5):21-27.
- [7] 吴会强,黄诚,常志龙. 国外大型贮箱结构研制现状及展望[J]. 宇航材料工艺,2014,44(Z1):7-13.
- WU H, HUANG C, CHANG Z. Recent progress and prospects of large foreign tank structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014,44(Z1):7-13.
- [8] 贺地求,邓航,周鹏展. 2219厚板搅拌摩擦焊组织及性能分析[J]. 焊接学报,2007(9):13-16.
- HE D, DENG H, ZHOU P. Microstructure and properties analysis of friction stir welding of 2219 thick plate [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007(9):13-16.