

# 焊透深度和前进侧位置对 FSW 贮箱 锁底接头性能的影响

郝云飞<sup>1</sup> 王国庆<sup>2</sup> 厉晓笑<sup>1</sup> 赵衍华<sup>1</sup> 刘伟<sup>1</sup>

(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** 开展了 2219MCS 叉形环和 2219C10S 短壳组成的锁底接头的搅拌摩擦焊工艺试验,详细分析了搅拌针长度和前进侧位置对锁底接头 Hook 型缺陷、力学性能、断裂方式的影响规律。结果表明:搅拌摩擦焊锁底接头在短壳一侧存在 Hook 型缺陷,短壳位于前进侧时的搭接界面上翘曲率和迁移量均大于叉形环位于前进侧,且随着搅拌针长度的增加,搭接界面的向上迁移量逐渐增大。相同的焊透深度时,叉形环位于前进侧的力学性能优于短壳位于前进侧;相同的前进侧位置时,随着焊透深度的逐渐增加,接头力学性能逐渐降低。锁底接头搭接界面缺陷形貌及迁移量的变化是引起力学性能变化的主要原因。优化的试验结果显示,当焊透深度和短壳板材厚度相同,且叉形环位于焊缝前进侧的力学性能最优,常温可达到 300 MPa,低温可达到 370 MPa,延伸率均超过 3.5%。锁底接头的拉伸断裂方式与焊缝前进侧位置密切相关。当短壳位于前进侧时,从短壳一侧热力影响区断裂;当叉形环为前进侧时,从焊缝焊核区断裂。

**关键词** 锁底接头,搅拌摩擦焊接,Hook 型缺陷,力学性能

中图分类号: TG4

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.004

## Effect of FSW Pin Length and AS Location on Mechanical Properties of Lock Joint of Tank

HAO Yunfei<sup>1</sup> WANG Guoqing<sup>2</sup> LI Xiaoxiao<sup>1</sup> ZHAO Yanhua<sup>1</sup> LIU Wei<sup>1</sup>

(1 Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

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

**Abstract** An extensive investigation has been carried out on the friction stir welded lock joint consisted of a 2219MCS ring and a 2219C10S barrel, and the effect of the FSW pin length and AS location on the Hook defect, mechanical property and fracture mode of the lock joint has been systematically analyzed in this paper. As the results indicated that, there is a hook defect located in junction of the assembly interface and nugget zone, and the warping rate and the migration amount of the junction when 2219C10S barrel located in AS location is greater than 2219MCS ring located in AS. And the migration amount of the junction increased with the FSW pin length. The results of the tensile tests indicated that the mechanical performance of the lock joint with the 2219MCS ring located in AS is better than the 2219C10S barrel located in AS, and the mechanical properties reduced gradually with the increase of the FSW pin length. As analyzed, the morphology of the hook defect and the migration amount are the main reasons for the change of the mechanical properties with the AS location and FSW pin length. The optimized investigation results show that the room temperature mechanical strength can be up to 300 MPa, the low temperature strength is 370 MPa, and the ductility is all more than 3.5%. The tensile failure mode of the FSWed lock joint is closely related to the AS location of the 2219MCS ring or 2219C10S barrel.

**Key words** Lock joint, Friction stir welding, Hook defect, Mechanical property

收稿日期:2014-07-16

作者简介:郝云飞,1984 年出生,硕士,工程师,主要从事搅拌摩擦焊、摩擦塞补焊、运载火箭贮箱研制等工作。E-mail:haoyunfei1234@163.com

## 0 引言

运载火箭贮箱锁底环缝是连接前(后)短壳与箱底叉形环的一条环缝。熔焊锁底环缝接头结构较为特殊,通常焊缝正面开坡口,焊缝背部存在1个特殊结构的焊漏槽(图1)。在实际工程应用中锁底环缝存在“焊接缺陷多”等问题。本文通过将熔焊锁底接头结构改进为插接结构(图2),并采用搅拌摩擦焊技术进行火箭贮箱锁底环缝的焊接。改进后的锁底接头是“具有一定深度的对接接头和1/2 搭接接头”组成的复合接头。因此既要保证对接接头焊缝内部质量,也要重点考虑搭接接头搅拌摩擦焊特有的“Hook”型缺陷对锁底接头性能的影响。本文以2219铝合金锁底接头为研究对象,重点分析焊透深度和前进侧位置对搅拌摩擦焊锁底接头 Hook 缺陷、力学性能、断裂方式等的影响,以获得优化的锁底接头搅拌摩擦焊工艺。

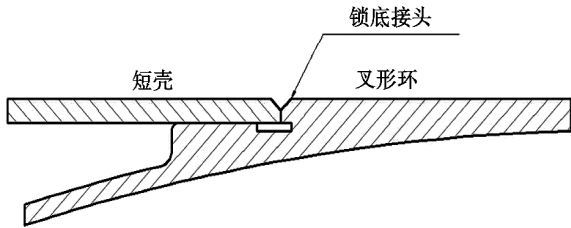


图1 火箭贮箱锁底接头结构示意图(熔焊)

Fig.1 Structure of lock joint used for fusion arc welding

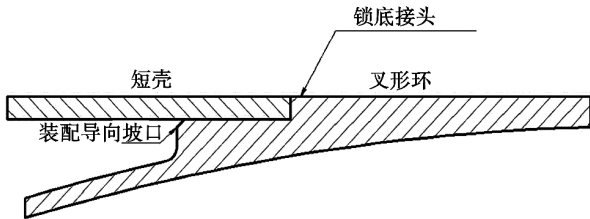


图2 适用于搅拌摩擦焊工艺的锁底接头结构设计

Fig.2 Schematic diagram of lock joint used for FSW process

## 1 试验

### 1.1 材料

所用的叉形环为2219MCS( $\sigma_b=440$  MPa, $\delta=4\% \sim 6\%$ ),规格为“实际产品横截面 $\times 400$  mm(图2)”,槽深为6 mm;短壳一侧材料为2219C10S( $\sigma_b=440$  MPa, $\delta=15\%$ ),规格为 $400$  mm $\times 150$  mm $\times 6$  mm。2219 铝合金的主要化学成分如表1所示。

表1 2219 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2219 aluminium alloy

							wt%	
Cu	Mn	Fe	Si	Ti	Zr	V	Al	
5.8~6.8	0.20~0.40	0.30	0.20	0.02~0.10	0.10~0.25	0.05~0.15	余	

### 1.2 试样制备

搅拌摩擦焊设备和工装均为自制。试验方案如下:(1)选用搅拌针长度为5.5、6.0、6.5、7.0 mm的搅拌头进行焊接,其轴肩直径为20 mm,轴肩结构为 $10^\circ$ 内凹斜面,搅拌针根部直径均为7.0 mm,结构为 $20^\circ$ 圆锥螺纹;(2)每一焊透深度,分别将叉形环和短壳试片置于焊缝前进侧位置。搅拌头旋转速度为800 r/min,焊接速度为150 mm/min,倾角为 $2.7^\circ$ 。

### 1.3 性能评价

用X射线探伤与超声相控阵检测搅拌摩擦焊锁底接头的缺陷。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 HNO<sub>3</sub>+95 mL H<sub>2</sub>O)溶液对抛光后的试样进行腐蚀,在O-LYMPUS光学显微镜下进行不同焊透深度和前进侧位置匹配下的典型锁底接头的横截面宏观金相组织分析以及搭接界面的弯曲形貌及变形规律分析,并进行显微硬度测试。从每一组试样取样进行常温和低温( $-196^\circ\text{C}$ )拉伸性能测试。在测试时,锁底接头拉伸试样的背部均保留(图3),其延伸率测试标距为45 mm。

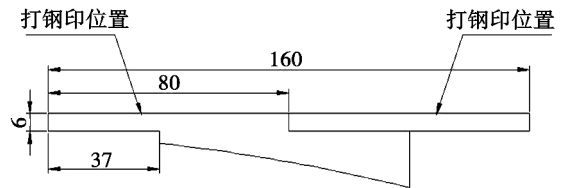


图3 搅拌摩擦焊锁底接头拉伸试样剖视图

Fig.3 Structure and dimension for the tensile test species of the lock joint

## 2 结果与分析

### 2.1 锁底接头宏观组织形貌

图4是短壳和叉形环分别位于前进侧的搅拌摩擦焊锁底接头的横截面宏观形貌。可以观察到2个显著特点:(1)锁底接头焊核两侧的2219MCS叉形环和2219C10S短壳母材组织存在显著的差异,叉形环一侧组织粗大,而短壳一侧组织较细小,锁底接头的一侧及下方为2219MCS围绕,另一侧为2219C10S。并且随着搅拌针长度的逐渐增加,焊缝焊透深度随之增加,且搅拌针末端进入2219MCS叉形环的深度也在逐渐增加;(2)可以认为是“1个6 mm对接接头+1/2个搭接接头”复合而成的锁底接头,在搅拌头作用范围内的对接接头和1/2搭接接头的原始搭接界面被完全搅碎。但是在短壳一侧6 mm深度的2219C10S与2219MCS之间的原始界面非常清晰,两者组成的1/2搭接接头的搭接界面在短壳一侧的影响区均向上弯曲变形,其变形轨迹与短壳一侧的影响

区组织取向相同。另外,位于弯曲变形界面上下的2219MCS和2219C10S材料结合不紧密,该界面类似于弱结合缺陷。从图中还可以看出随着焊透深度的变化、短壳位于焊缝前进侧或后退侧位置的变化,搭接界面向上的弯曲变形形貌及变形程度也在变化。

值得说明的是,这种发生弯曲变形的搭接界面在搭接接头的搅拌摩擦焊中称之为“Hook”型缺陷,这在搭接接头的搅拌摩擦焊过程中是不可避免的,是由其工艺特点自身决定的<sup>[1-4]</sup>。

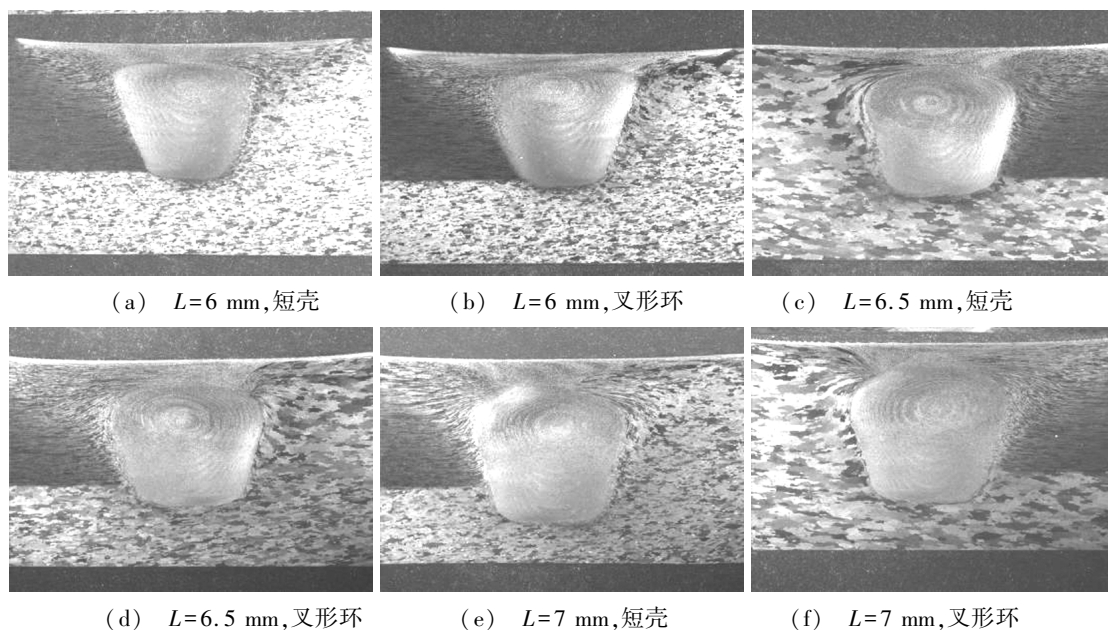


图4 不同搅拌针长度和前进侧位置匹配下的锁底接头横截面宏观形貌 (5×)

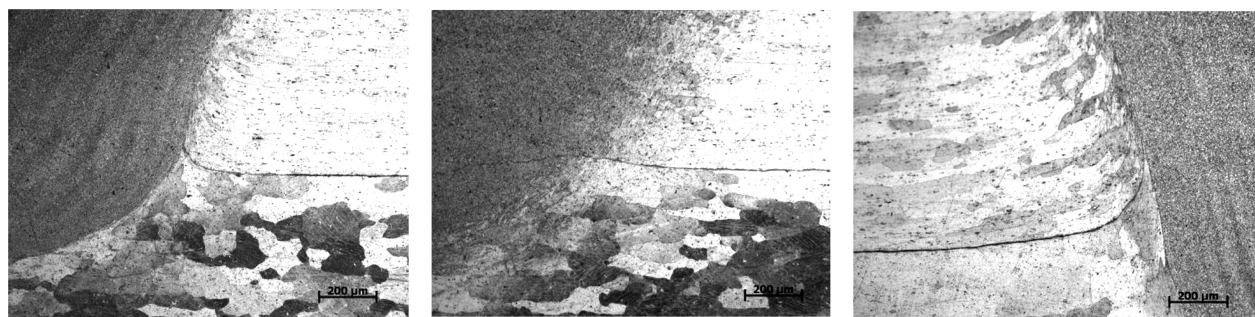
Fig.4 Transverse cross section of lock joint with the match of different pin length and AS location

需要特别说明的是,搅拌摩擦焊锁底接头短壳一侧区向上翘起的“Hook”型缺陷的存在,相当于降低了锁底接头的有效承载厚度(EST, Effective sheet thickness),这里的有效承载厚度指的是短壳板材的有效厚度<sup>[4-5]</sup>。在实际承载过程中,该类缺陷造成锁底接头的有效承载面积减小,必然会影响锁底接头的力学性能。

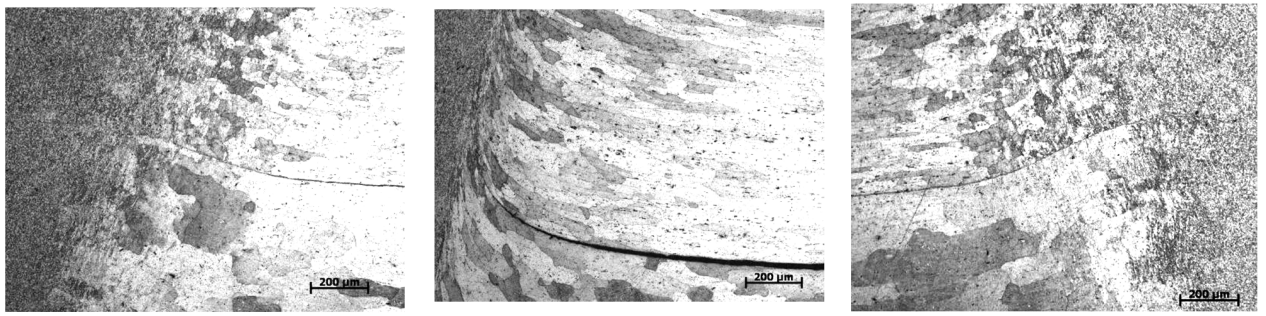
## 2.2 搅拌针长度和前进侧位置对搭接界面弯曲形貌及变形程度的影响规律

图5是锁底接头的“Hook”型缺陷的100倍微观组织形貌放大图。可以看出以下3个特点:(1)搭接界面弯曲变形形貌与短壳在焊缝中的相对位置有直接关系。当短壳位于焊缝前进侧时,呈“吊钩状”的变形;当短壳位于焊缝后退侧时,搭接界面仅仅发生一定程度的向上弯曲,但是上弯的曲率较小;(2)在

相同的焊透深度时,短壳位于焊缝前进侧时的搭接界面上翘曲率(上翘界面切线与原始界面的夹角)及迁移量均大于其位于焊缝后退侧,这也直接导致短壳位于后退侧的锁底接头的实际有效承载厚度要大一些。例如:当搅拌针长度为6.5 mm时,短壳位于前进侧的迁移量为391.91 μm,位于后退侧的迁移量为191.12 μm;(3)当短壳的焊缝分布位置相同时,可以发现随着搅拌针长度的逐渐增加,搭接界面上翘曲率及迁移量也在逐渐增加,且短壳一侧影响区的弯曲变形晶粒也逐渐粗大。例如:当短壳位于焊缝前进侧时,6、6.5、7.0 mm搅拌针长度对应的搭接界面迁移量分别为87.24、391.91、554.93 μm;反之,搭接界面迁移量依次为45.52、191.12、273.12 μm。因此随着搅拌针长度的逐渐增加,必然导致锁底接头的有效承载厚度下降。



(a) L=6 mm, 短壳位于前进侧 (b) L=6 mm, 叉形环位于前进侧 (c) L=6.5 mm, 短壳位于前进侧



(d)  $L=6.5$  mm, 叉形环前进侧 (e)  $L=7$  mm, 短壳位于前进侧 (f)  $L=7$  mm, 叉形环位于前进侧  
图5 锁底接头搭接界面弯曲形貌及变形程度 (100×)

Fig. 5 Morphology for the Hook defect of the lock joint

可以推断,锁底接头存在的“Hook”型缺陷以及搅拌针长度和前进侧位置对“Hook”型缺陷形貌、上翘曲率及迁移量的影响,必然会对锁底接头力学性能产生较大的影响。

### 2.3 锁底接头搭接界面“Hook”型缺陷随参数变化的原因

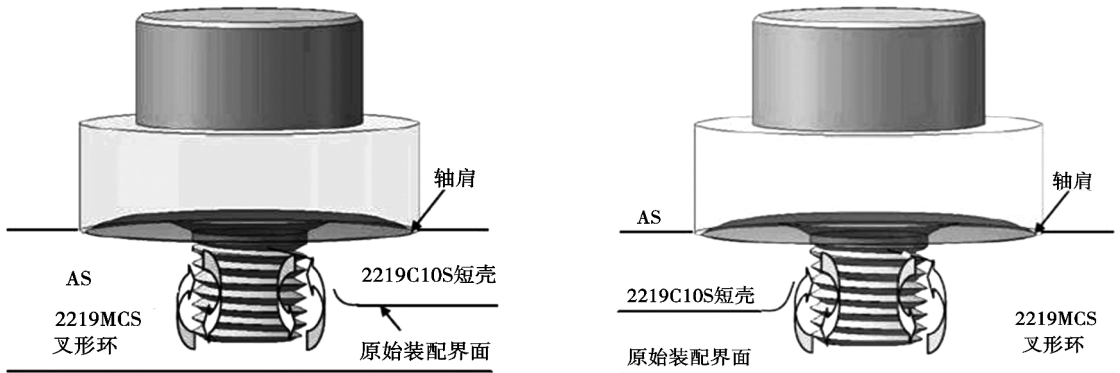
值得说明的是,搭接接头出现“Hook”型缺陷且随着参数的变化其缺陷形式及变形程度也在逐渐变化,这与锁底接头内部塑性金属流动模式是密不可分的<sup>[6-7]</sup>。

(1)图6是锁底接头横截面上的塑性金属运动模型(搅拌针为左旋螺纹,搅拌头顺时针旋转)。在搅拌针旋转过程中,邻近搅拌针的塑性金属向下运动,当运动至焊缝底部时,由于受到底部的阻碍作用,迫使塑性金属向温度较高、阻力较小的焊缝上部运动,从而形成一个封闭环流流动场。从该模型中可知,邻近焊缝边缘的焊核区塑性金属主要是向上运

动,而短壳一侧的影响区也必然发生向上的弯曲变形。锁底接头的原始搭接界面位于焊核区的部分完全被搅碎,但是位于影响区的搭接界面由于此处受到的搅拌能力较弱,仅仅发生一定程度的向上弯曲变形,且界面上下侧金属没有发生有效的结合,从而表现为“Hook”型缺陷。

(2)当短壳位于前进侧时,前进侧塑性金属的速度矢量是焊接速度和旋转速度的正向叠加;而当短壳位于后退侧时,短壳一侧塑性金属的速度矢量是两者的反向叠加,从而造成前者的塑性金属运动速度和梯度均要大于后者。这也直接导致前者的搭接界面的变形形貌表现为前进侧影响区形貌,且搭接界面的向上迁移量更大。

(3)随着搅拌针长度的增加,搭接界面距离搅拌针端部的距离也越来越大,而搭接界面处塑性金属运动的速度和梯度也越来越大,从而导致此处向上的迁移量也越来越大。



(a) 叉形环位于前进侧 (b) 短壳位于前进侧  
图6 叉形环/短壳位于焊缝前进侧时的焊缝内部塑性金属流动模型

Fig. 8 Flow model for the inner plastic metal when 2219C10S/2219MCS located in the AS location

### 2.4 搅拌针长度和前进侧位置对锁底接头力学性能的影响

从图7可以看出:随着搅拌针长度和前进侧位置的变化,锁底接头的常温和低温性能均表现出相同的变化趋势。

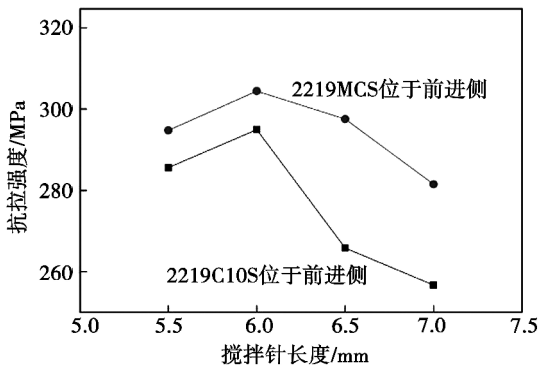
(1)搅拌针为6.0 mm且叉形环位于焊缝前进侧位

置时,锁底接头的常温和低温力学性能最优。常温拉伸接头平均抗拉强度可以达到300 MPa,低温平均抗拉强度可以达到370 MPa,延伸率均可以超过3.5%;

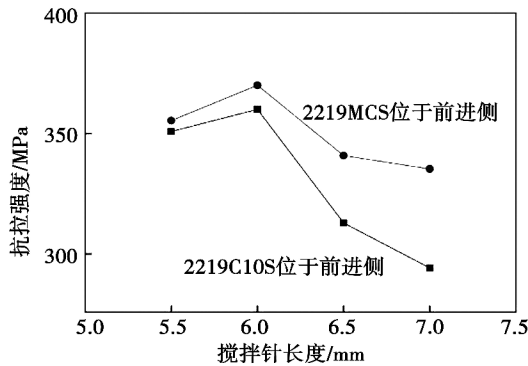
(2)当搅拌针长度相同时,叉形环位于前进侧时的锁底接头的力学性能均优于短壳位于前进侧时的锁底接头;

(3)前进侧位置相同时,当搅拌针长度 $\geq 6.0$  mm时,随着搅拌针长度的逐渐增加,锁底接头的常温和

低温力学性能呈逐渐下降的趋势。



(a) 常温力学性能



(b) 低温力学性能

图7 搅拌针长度和前进侧位置对锁底接头力学性能的影响趋势

Fig.7 Effect of the FSW pin length and AS location on the mechanical property of the joint

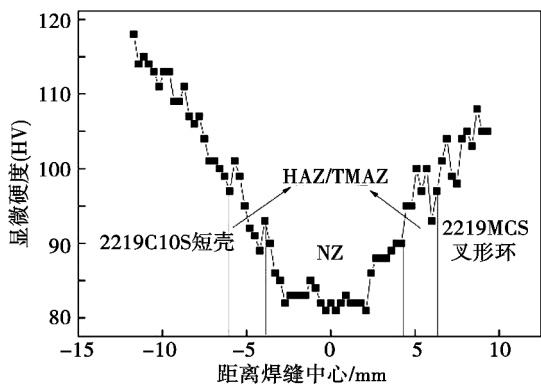
从整个锁底接头的结构来看,短壳一侧搭接界面在热力影响区的向上弯曲变形造成了结构的不连续,在承受轴线拉伸时,必在此处产生较大的应力集中,进而影响接头性能。(1)当搅拌针长度为5.5 mm时,由于锁底接头的对接接头部分没有完全焊透,在其背部存在较大的未焊透缺陷,造成其力学性能不高,同时未焊透缺陷在实际产品中也是不允许的;(2)在相同的搅拌针长度时,叉形环位于前进侧的锁底接头的搭接界面迁移量要小于叉形环位于后退侧时,这必然导致叉形环为前进侧时锁底接头的有效承载厚度要大,有效承载面积也大,因此其力学性能要优于叉形环位于后退侧时的性能;(3)相同的前进侧位置时,由于随着搅拌针长度的增加,搭接界面迁移

量在逐渐增加,导致锁底接头有效承载厚度也在逐渐减小,进而引起锁底接头力学性能逐渐下降。

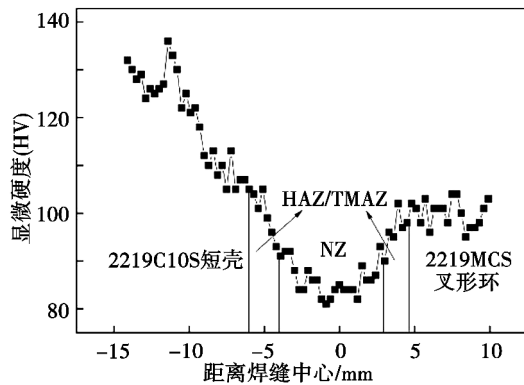
因此搅拌针长度、前进侧位置变化引起的锁底接头搭接界面迁移量的变化导致的承载厚度的变化是引起锁底接头力学性能变化的主要因素。

### 2.5 锁底接头横截面显微硬度

从图8可以看出:2219MCS叉形环与2219C10S短壳经搅拌摩擦焊接后,其接头显微硬度呈典型的“V”型。整个接头中两侧母材的显微硬度最高,其中2219C10S的显微硬度略高于2219MCS,热影响区和影响区次之,焊核区的显微硬度最低。这与传统的热处理强化铝合金对接接头的“W”型显微硬度分布存在显著的差异。



(a) 短壳位于前进侧



(b) 叉形环位于前进侧

图8 搅拌针长度为6.0 mm,短壳/叉形环分别位于前进侧锁底接头的显微硬度分布

Fig.8 Microhardness distribution of the lock joint

### 2.6 搅拌摩擦焊锁底接头断裂方式

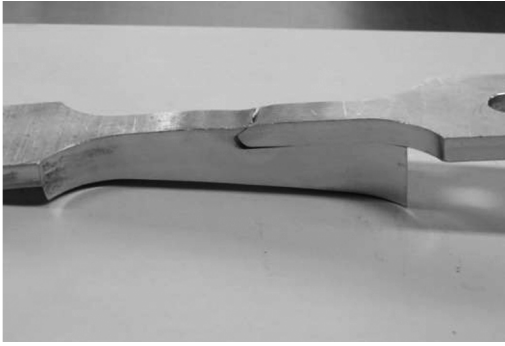
锁底接头的短壳一侧的“Hook”型缺陷是整个接头的薄弱环节,在拉伸时必然从此处起裂。图9(a)~(d)是搅拌针长度 $\geq 6$  mm时的锁底接头的断裂形貌。从图中可以看出:(1)当搅拌针长度 $\geq 6$  mm时,搅拌针长度对锁底接头的断裂方式无显著影响,然而前进侧位置对其存在显著影响;(2)当2219C10S短

壳位于锁底接头前进侧位置时,接头均从搭接界面沿短壳一侧的前进侧热力影响区断裂;当2219MCS位于锁底接头前进侧位置时,接头均从搭接界面开始延伸至焊核区断裂。

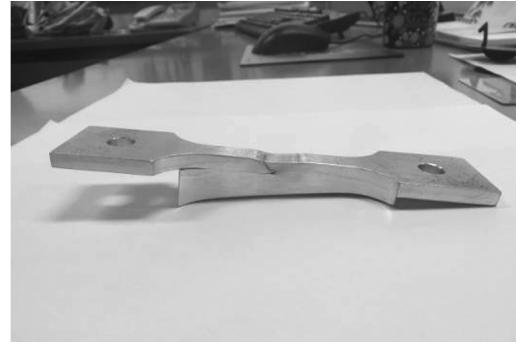
锁底接头的2种典型断裂方式与搭接界面弯曲变形形貌、接头微观组织及其显微硬度分布等密切相关。(1)当短壳位于焊缝前进侧时,搭接界面弯曲变

形呈吊钩状,与前进侧热力影响区组织晶粒取向相同,而焊核区与前进侧热影响区组织过渡急剧,因此拉伸测试时搭接界面必然沿着前进侧热影响区起裂;(2)当短壳位于后退侧时,搭接界面仅仅发生较小的

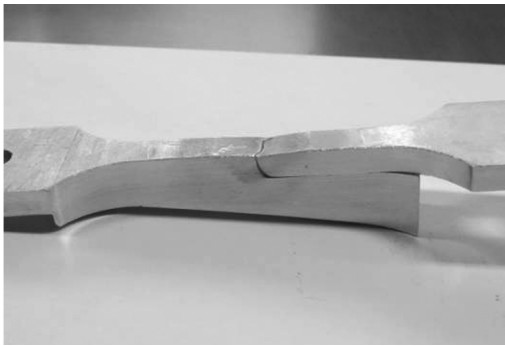
向上弯曲,但是没有延伸至焊核区。在拉伸测试时,由于焊核区细小等轴晶的显微硬度最低,因此搭接界面会延伸至焊核区内部起裂。



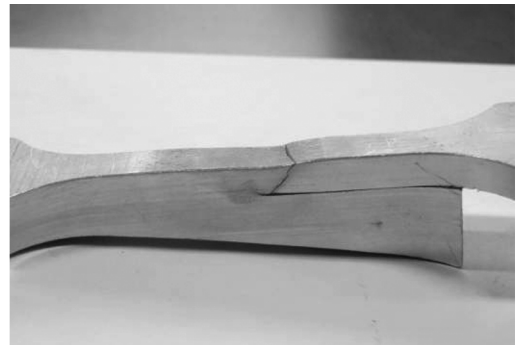
(a)  $L=6$  mm, C10S 位于后退侧



(b)  $L=6$  mm, C10S 位于前进侧



(c)  $L>6$  mm, C10S 位于后退侧



(d)  $L>6$  mm, C10S 位于前进侧

图9 搅拌针长度和前进侧位置对锁底接头拉伸断裂方式的影响

Fig.9 Effect of the FSW pin length and AS location on the Fracture of the joint

值得说明的是,搭接界面穿过焊核区的裂纹扩展阈值要大于穿过前进侧热力影响区的阈值,这也从一定程度上可以说明,叉形环位于前进侧的锁底接头力学性能要优于短壳位于前进侧。

### 3 结论

(1) 搅拌摩擦焊锁底接头在短壳一侧存在“Hook”型缺陷,短壳位于焊缝前进侧时呈“吊钩状”,叉形环位于前进侧时略微向上弯曲,但上翘曲率不大。搭接界面的向上迁移量随着搅拌针长度的增加而逐渐增大。这与锁底接头的内部塑性金属流动模式是密不可分的。

(2) 相同的焊透深度时,叉形环位于前进侧的力学性能优于短壳位于前进侧;相同的前进侧位置时,随着焊透深度的逐渐增加,接头力学性能逐渐降低。锁底接头搭接界面缺陷形貌及迁移量的变化是引起锁底接头力学性能变化的主要原因。

(3) 当搅拌针长度与短壳板材厚度相当,叉形环位于焊缝前进侧的锁底接头力学性能最优,常温力学性能可以达到 300 MPa,低温力学性能可以达到 370 MPa,延伸率均超过 3.5%。

(4) 锁底接头显微硬度呈典型的“V”型分布,焊

核区的显微硬度最低。

(5) 锁底接头的拉伸断裂方式与焊缝前进侧位置密切相关。当短壳位于前进侧时,从短壳一侧热力影响区断裂;当叉形环为前进侧时,从焊缝焊核区断裂。

### 参考文献

- [1] 徐效东,杨新岐,周光. 铝合金 2024-T4 搅拌摩擦焊搭接接头组织与性能分析[J]. 航空材料学报,2012,32(3):51-56
- [2] Dubougr 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 and Welding Journal,2009,62(1):49-58
- [3] 刘守法. 防锈铝搅拌摩擦焊搭接工艺研究[D]. 南京航空航天大学,2008
- [4] 付雷,程荣龙,杨建国,等. 基于有限元的搭接接头应力集中系数分析[J]. 焊接学报,2013(7):61-65
- [5] 张丹丹,曲文卿,杨模聪,等. Al-Li 合金搅拌摩擦焊搭接接头的疲劳性能[J]. 北京航空航天大学学报,2013(5):31-35
- [6] 柯黎明,魏鹏,邢丽,等. 双道焊对搅拌摩擦焊搭接界面及接头性能的影响[J]. 焊接学报,2011(7):52-56
- [7] Khandkar Mir, Zahedul H, Kahn J A. Thermal modeling of overlap friction stir welding for Al-alloys[J]. Mater. Process Manuf. Sci.,2001(10):91-105

(编辑 吴坚)