

2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊与熔焊交叉接头的组织及性能

魏瑞刚 郝云飞 赵刚 李聪颖 陈文千

(首都航天机械公司,北京 100076)

文 摘 对 2219C10S 铝合金进行双轴肩搅拌摩擦焊接,之后沿垂直于双轴肩搅拌摩擦焊方向进行变极性 TIG 焊接制备交叉接头,并对比分析了交叉接头与单一 TIG 接头的组织和力学性能。交叉接头与单一 TIG 接头的组织特征既有相同之处也存在差异。相同之处为焊缝区均由直流氦弧焊作用下的柱状区和交流脉冲氩弧焊作用下的碗状区组成;不同之处在于两者的母材区分别为细小等轴晶和轧制板条晶粒,而热影响区都是在母材晶粒上发生粗化长大。显微硬度测试结果表明,两类接头的横截面显微硬度分布均呈“W”型,单一 TIG 接头的显微硬度分布梯度大于交叉接头,但交叉接头的软化区宽度更窄。拉伸测试结果得出,两类接头均断裂于接头的热影响区。沿 SR-FSW 焊缝方向的交叉接头的抗拉强度系数为 66.14%,略低于单一 TIG 接头,但接头延伸率比单一 TIG 接头高约 30%。断口形貌研究表明,交叉接头的断口形貌为典型的韧性断裂,而单一 TIG 接头还可观察到部分脆性断裂特征。

关键词 双轴肩搅拌摩擦焊,熔焊,交叉接头,组织,力学性能

中图分类号: TG4

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.013

Microstructure and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy Cross-Welded Joints Made by Self-Reacting Friction Stir Welding and TIG Welding

WEI Ruigang HAO Yunfei ZHAO Gang LI Congying CHEN Wenqian

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract The 2219C10S aluminium alloy is first subjected to self-reacting friction stir welding, followed by TIG welding in the direction perpendicular to the friction stir welding, and then the cross-weld joint is made. In this paper the microstructure and mechanical properties of the cross-welded joint and TIG joint are comparatively analyzed. The microstructural characteristics of the two kinds of joints present similarities and differences. The similarities are that the weld zone of the two kinds of joints are all composed of the column section by the direct helium arc welding and the bowl area by AC pulse argon arc welding. The differences are that both the parent metal zones respectively are the small isometric grains and rolling plate strip grains, and the heat affected zones are coarsening on the basis of the parent metal zone. Microhardness test results show that the microhardness distribution trend of the two kinds of joints is “W” type, and the microhardness distribution gradient of the TIG joints is greater than that of the cross joint which has a relatively narrower softened area. Tensile test results reveal that two types of joints are broken in the heat affected zone. The tensile strength factor of the cross joint in the SR-FSW direction is 66.14% which is slightly lower than the TIG joints, while the elongation rate of the former is about 30% higher than that of the latter. The fracture surface of the cross joint is typically ductile fracture, and the TIG joint has some brittle fracture characteristics besides the ductile fracture characteristics.

Key words Self-reacting friction stir welding, TIG welding, Cross-welded joints, Microstructure, Mechanical properties

0 引言

双轴肩搅拌摩擦焊(SR-FSW)是搅拌摩擦焊技术的一个最新发展方向^[1]。和目前我国运载火箭贮

箱制造领域普遍应用的常规搅拌摩擦焊技术(C-FSW)相比,该技术的焊接转速更低,焊接速度更快,接头力学性能与常规搅拌摩擦焊接头相当,且从根本

收稿日期:2017-08-21

基金项目:十三五装备预研共用技术课题资助项目(41423050128)

第一作者简介:魏瑞刚,1987年出生,硕士,工程师,主要从事运载火箭贮箱研制等工作。E-mail:441058632@qq.com

上消除了弱结合缺陷或未焊透缺陷^[1-3]。随着该技术的技术成熟度越来越高,其在火箭贮箱制造领域将会逐步替代常规搅拌摩擦焊技术,尤其是大直径火箭或者是需要长期服役的型号。但是从常规搅拌摩擦焊技术在我国航天领域运载火箭贮箱上的应用步伐(筒段长直纵缝—箱底空间曲线焊缝—大直径封闭环缝)来看,双轴肩搅拌摩擦焊技术未来的应用路线必然也是先易后难,逐步应用^[4]。然而在分阶段应用过程中,势必会出现双轴肩搅拌摩擦焊缝与熔焊焊缝的交叉接头现象,例如:火箭贮箱的双轴肩搅拌摩擦焊筒段纵缝与熔焊环缝的“十字”接头,或者与箱底叉形环的“丁字”接头。目前已经有诸多文献报道了常规搅拌摩擦焊与氩弧焊缝或等离子弧焊缝形成的交叉接头的性能^[5-6]。但是关于双轴肩搅拌摩擦焊与熔焊交叉接头的性能如何,还未见报道。本文旨在分析 SR-FSW 与 TIG 交叉接头的综合性能,为其在火箭贮箱上的应用提供技术基础。

1 实验

板材为 6 mm 厚 2219C10S 高强铝合金板材 ($\sigma_b = 440 \text{ MPa}$, $\delta = 15\%$), 板材规格为 600 mm×150 mm×6 mm。首先沿板材长度方向进行平板对接接头的双轴肩搅拌摩擦焊接。试验采用自主研发的分体式双轴肩搅拌头,上、下轴肩直径为 $\Phi 20 \text{ mm}$,搅拌针直径为 $\Phi 10 \text{ mm}$;焊接过程搅拌头旋转速度为 300 r/min,焊接速度为 400 mm/min,焊接倾角为 0°。双轴肩搅拌摩擦焊接试片无损检测合格后,沿垂直焊缝方向切成 300 mm×150 mm 的试样,之后沿试样长度方向进行熔焊焊接,焊接方式为变极性 TIG 悬空焊接,具体工艺流程为直流氩弧打底焊+交流脉冲氩弧填丝盖面焊。直流氩弧打底焊工艺规范为:焊接电流为 200~210 A,He 气流量为 12~14 L/min,焊接速度为 15~18 m/h;盖面焊工艺规范为:焊接电流为 350~370 A,Ar 气流量为 13~15 L/min,焊接速度为 8.5 m/h,变极性频率 60 Hz,所用焊丝为 $\Phi 2.4 \text{ mm}$ ER2319 焊丝,送丝速度为 1.5 m/min。

鉴于运载火箭飞行过程中贮箱纵/环缝交叉接头的轴向受力近乎环向受力的 1.5~2 倍^[7],因此重点分析贮箱轴向方向交叉接头的组织特征和力学性能。采用交叉接头制备方法共计制备 11 块试样,其中 1 块试样用于交叉接头和单一熔焊接头的金相组织和显微硬度分析,取样位置如图 1 所示;5 块试样沿 SR-FSW 焊缝方向取 5 个交叉接头和 20 个单一熔焊接头;5 块试样沿熔焊焊缝方向取 5 个交叉接头和 20 个 SR-FSW 接头。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 光学显微镜下进行金相组织分析。拉伸试样按 GB/T228.1-2010 进行取样,并在 MTS-810 电子拉伸试验机上进行拉伸试验,测

试接头拉伸性能。

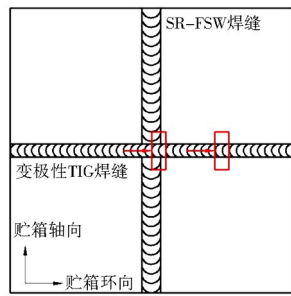


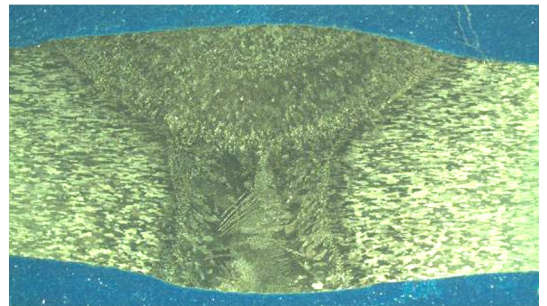
图 1 交叉接头试样金相分析取样位置示意图

Fig.1 The sample position of cross-welded joints for metallographic analysis

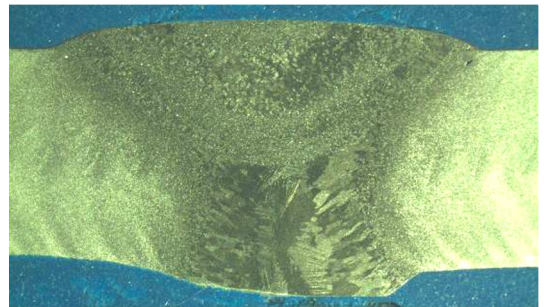
2 结果与分析

2.1 宏观组织形貌

单一的变极性 TIG 接头是 2219C10S 铝合金母材在“直流氩弧打底焊+交流脉冲氩弧盖面焊”的直接作用下得到的。而交叉接头是 2219C10S 铝合金母材先经历了双轴肩搅拌摩擦焊接后,又在垂直于双轴肩搅拌摩擦焊方向上进行“直流氩弧打底焊+交流脉冲氩弧盖面焊”后得到的。图 2 为两类接头的横截面宏观形貌。



(a) 单一 TIG 接头



(b) 交叉接头

图 2 单一 TIG 接头与交叉接头横截面宏观形貌 6.5×

Fig.2 The macroscopic morphology of the TIG joint and the cross-welded joint

可以看出两者的接头组成大致相同,均由直流氩弧焊作用下的“柱状”区域和交流脉冲氩弧焊作用下的“碗状”区域组成,但是两类接头的母材区和热影响区存在较大的差异。对比图 2(a)、2(b)还可以发现,两者的热影响区宽度存在较大的差异,单一变极性 TIG 接头的热影响区宽度较宽,而交叉接头的热影响区宽度较小,这与不同结构的晶粒在热作用下的抑宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

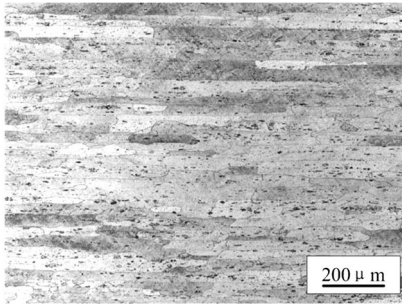
制晶粒长大的能力密不可分^[8]。

2.2 微观组织形貌分析

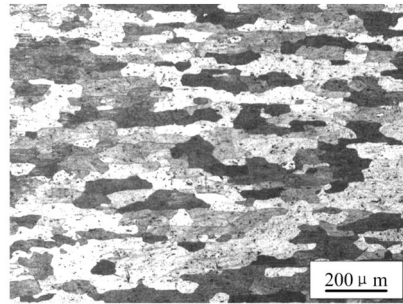
2.2.1 母材区、热影响区

单一变极性 TIG 接头的母材区组织为 2219C10S 铝合金母材,具有明显轧制方向的板条状组织[图 3(a)];在电弧作用下热影响区的原始轧制板条状晶粒发生粗化,板条状晶粒变短、变粗[图 3(b)]。而交叉

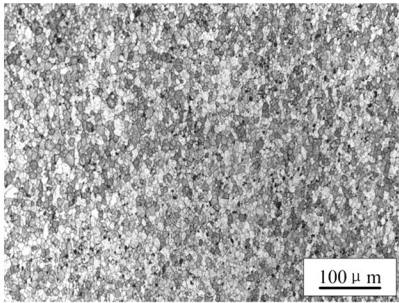
接头的母材区组织为双轴肩搅拌摩擦焊接头的焊核区组织[图 3(c)],即为细小的等轴晶组织,从图 2(b)的母材区的上、下部位都可以观察到环状结构,且沿厚度中心对称分布,需要说明的是上下部为的环状结构的间距与双轴肩搅拌摩擦焊缝上、下表面的鱼鳞纹间距是一致的;交叉接头的热影响区也是等轴晶结构,只是其晶粒有所长大,约为原始等轴晶的 2 倍[图 3(d)]。



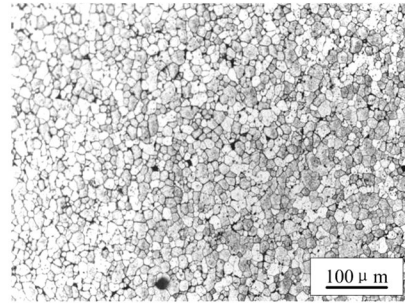
(a) 单一 TIG 接头母材区



(b) 单一 TIG 接头热影响区



(c) 交叉接头母材区



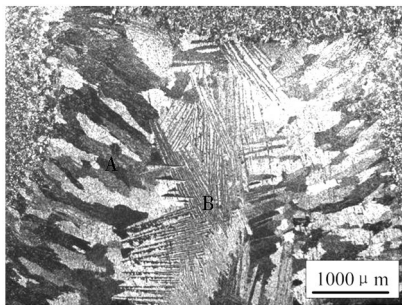
(d) 交叉接头热影响区

图 3 两类接头的母材区与热影响区组织

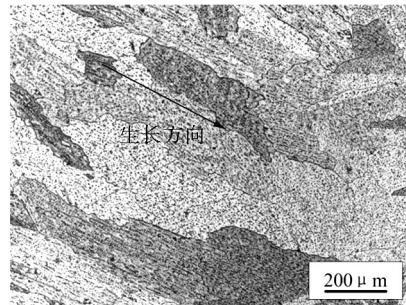
Fig.3 The parent metal zone and the heat affected zone of the two types of joints

2.2.2 直流 He 弧焊作用区

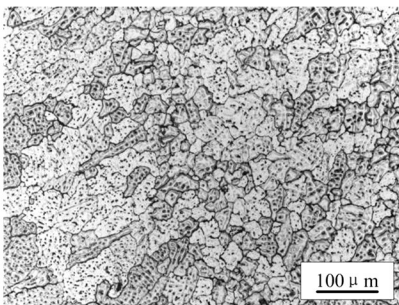
交叉接头 He 弧区微观组织如图 4 所示。



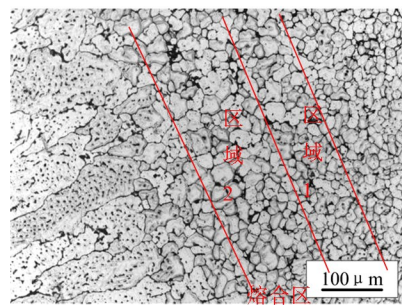
(a) 直流 He 弧作用区宏观形貌



(b) He 弧作用区(A)粗大晶粒



(c) He 弧作用区(B)细小晶粒



(d) 熔合区组织

图 4 交叉接头 He 弧区微观组织

Fig.4 The microstructure of the He arc region of the cross-welded joint

可以从图 4(a) 看出:交叉接头直流 He 弧作用区的宏观形貌类似“柱状”,主要是由于直流 He 弧是

一种介于常规熔焊与高能束焊之间的一种亚能束焊接方法,电弧能量相对集中造成的。图 4(b) 显示氩弧打底焊的焊缝区组织为具有方向性的粗大柱状树枝晶,生长方式为典型的外延结晶方式,生长方向与焊缝散热方向相反,即从两侧向焊缝内部生长,但是柱状晶并没有完全生长至焊缝中间。在两侧柱状晶之间观察到了尺寸较小、形状不规则的等轴晶和等轴枝晶,位于焊缝中心,为自由结晶模式。图 4 显示在氩弧打底焊的焊缝区与热影响区之间存在一个过渡区域,即熔合区,宽度约为 $400 \sim 500 \mu\text{m}$,为等轴晶组织。该区域经历的焊接热循环峰值温度较低、高温停留时间短,且位于焊缝边缘的熔池中未完全溶解的硬质颗粒较多,导致该区域的组织为细小等轴晶^[9]。对熔合区进一步放大[图 4(d)],发现该区域内的等轴晶晶粒尺寸大小不一,大略可分为 2 个小区域,区域 1 为邻近热影响区的宽度约为 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ 的细小等轴晶区,晶粒尺寸约为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,大约与热影响

区的等轴晶晶粒尺寸相当;区域 2 为邻近焊缝区的宽度约为 $300 \sim 400 \mu\text{m}$ 的等轴晶区,晶粒尺寸增大至 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

2.2.3 交流脉冲 Ar 弧焊作用区

图 5(a) 为交流脉冲 Ar 弧作用区域的宏观形貌,由于 Ar 弧能量较为发散,因此盖面焊形貌类似“碗状”。图 5(b)、5(c) 为 Ar 弧焊缝区与 He 弧区、母材区的过渡处形貌,可以看出过渡处均可以观察到呈细小等轴晶的过渡区域(类似熔合区),且在细小等轴晶的基础上沿整个界面存在一层向外生长的柱状树枝晶,而在两者之间易出现气孔缺陷。在邻近焊缝正面和整个界面的区域[图 5(a) 中的 B 区域],由于成分过冷度和冷却速度大等原因,其微观组织为 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的等轴晶或等轴枝晶;而 Ar 弧焊缝区域中心[图 5(a) 中的 A 区域]由于高温持续时间长,呈现粗大的等轴晶晶粒($>100 \mu\text{m}$),在晶粒内部及晶界处都可以观察到显著的二次相析出物。

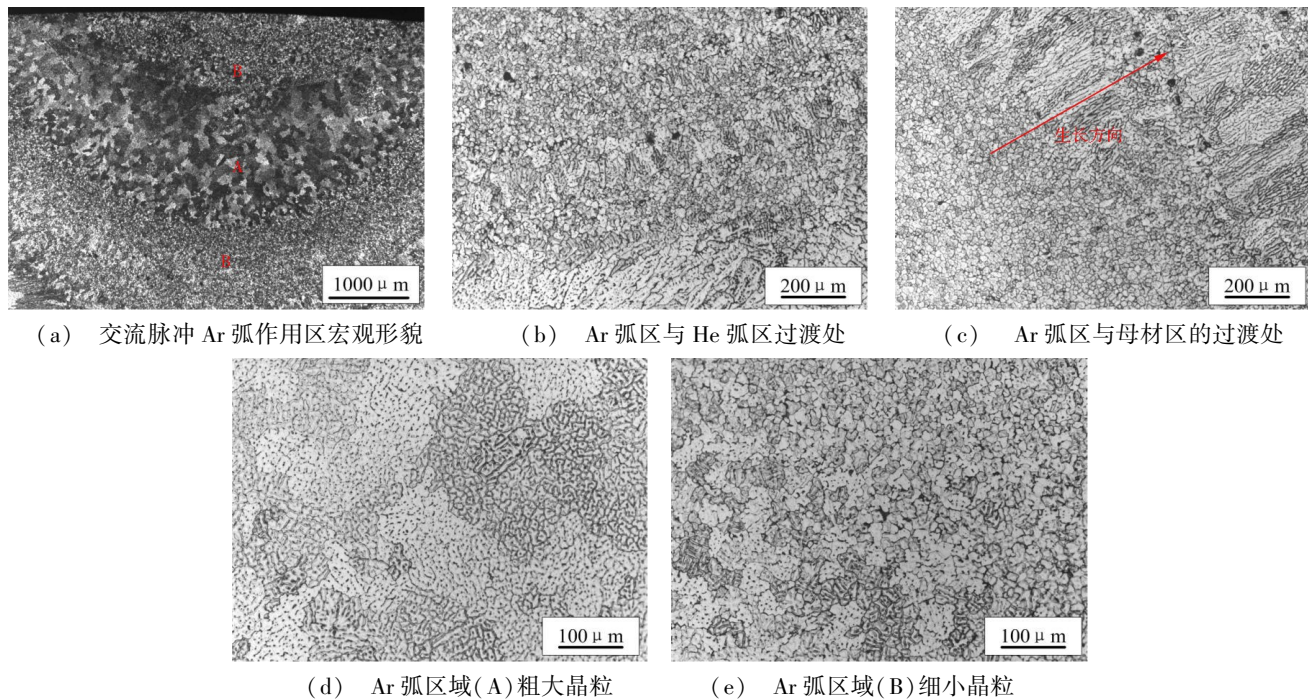


图 5 交叉接头 Ar 弧作用区域微观组织

Fig.5 The microstructure of the Ar arc region of the cross-welded joint

2.3 两类接头的显微硬度

图 6 为两类接头的横截面显微硬度分布趋势,可以看出显微硬度分布趋势均呈现出典型的“W”型,但是两类接头的各区域硬度值及宽度存在较大的差异。首先,两者的焊缝区显微硬度值最低,约为 $75 \sim 85$,焊缝区宽度均约为 6 mm ;再者,热影响区显微硬度次之($85 \sim 95$),刚进入热影响区时由于熔合区组织为细小等轴晶,因此其显微硬度迅速提高。随着越来越远离焊缝中心,由于热影响区组织发生过时效,接头显微硬度逐渐下降,但是也高于焊缝区。就差异性而言,交叉接头的热影响区宽度仅约为 $3 \sim 3.5 \text{ mm}$,而

单一 TIG 接头的热影响区宽度达到了 $8 \sim 9 \text{ mm}$,这与两类接头宏观组织形貌中的观测结果是一致的。这也说明,和单一 TIG 接头的 2219C10S 铝合金母材的板条状晶粒相比,交叉接头母材区仅为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的细小等轴晶在电弧加热作用下的抑制长大能力更强,从而其软化区宽度也更窄;第三,进入母材区后,单一 TIG 接头的显微硬度迅速提高至 110 以上,但是交叉接头的母材区显微硬度仅为 $90 \sim 100$ 。纵观两类接头,单一 TIG 接头横截面上的显微硬度梯度较大,而交叉接头则较小。结合显微组织分析结果,交叉接头的母材区、热影响区、熔合区组织差异性不大,而单一

TIG 接头的差异性则比较显著。考虑到 2219C10S 铝合金母材的抗拉强度为 440 MPa, 延伸率在 12% ~ 15%, 而双轴肩搅拌摩擦焊纵向拉伸试样的抗拉强度为 330~350 MPa, 延伸率在 20%~25%^[1]。

强度为 340.15 MPa, 延伸率为 6.625%。

表 1 交叉接头各向取样力学性能

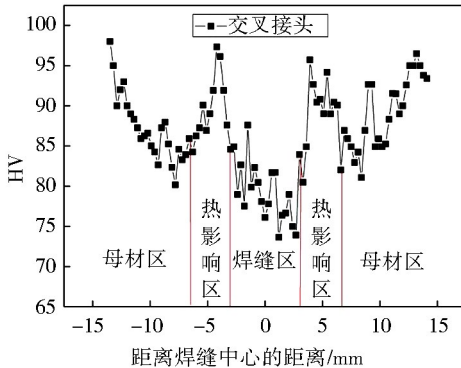
Tab.1 The mechanical properties of the cross-welded joint

| 接头种类 | 抗拉强度 /MPa | 断后延伸率 /% | 抗拉强度系数/% |
|-------------|-----------|----------|----------|
| 沿 SR-FSW 方向 | | | |
| 交叉接头 | 291 | 6.5 | 66.14 |
| 单一 TIG 接头 | 306.85 | 5.025 | 69.74 |
| 沿 TIG 方向 | | | |
| 交叉接头 | 310.2 | 9.0 | 70.50 |
| SR-FSW 接头 | 340.15 | 6.625 | 77.31 |

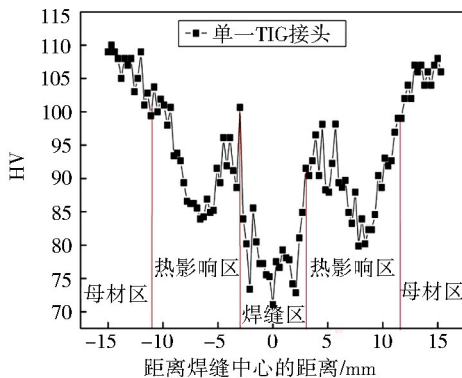
从表 1 可看出:(1) 贮箱筒段纵缝采用双轴肩搅拌摩擦焊技术进行焊接, 总装对接环缝采用熔焊技术, 则沿贮箱轴向的交叉接头的抗拉强度系数超过 60%, 延伸率均超过 3.5%, 但是其综合性能在各类接头中是最低的, 该数据结果对设计部门具有重要意义, 整个贮箱的薄弱之处在于此, 在进行贮箱强度核算时应重点考虑此处;(2) 沿 SR-FSW 方向的交叉接头的延伸率较高, 其在贮箱实际飞行过程中的协调变形能力要优于单一 TIG 接头, 这对于运载火箭贮箱是非常有利的;(3) 另外从文献[5-6]公布的数据来看, 文中 SR-FSW 与 TIG 交叉接头的两个方向的力学性能均要优于“C-FSW 与 TIG 或 VPPA 交叉接头”, 这主要得益于在接头厚度方向上双轴肩搅拌摩擦焊接头的组织、性能均匀性要优于呈“碗状”形貌^[8]的常规搅拌摩擦焊接头。

2.5 两类接头断裂方式及断口形貌

为了分析清楚整个横截面上的断裂位置, 将拉伸断裂后的试样制成金相试样, 见图 7。



(a) 交叉接头



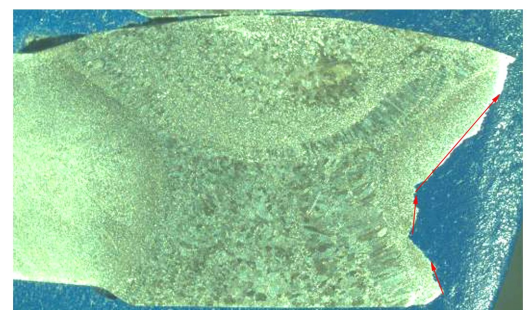
(b) 单一 TIG 接头

图 6 两类接头的横截面显微硬度分布

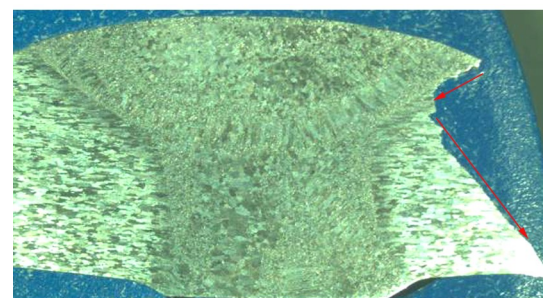
Fig.6 The cross sectional microhardness distribution of the two types of joints

2.4 交叉接头各方向取样力学性能

采用热处理强化铝合金的运载火箭贮箱, 通常要求焊接接头抗拉强度系数要高于 50%, 接头延伸率要高于 3.5%^[10]。表 1 为各类接头拉伸测试结果的平均值。试验结果表明:(1) 沿贮箱轴向和环向的交叉接头、单一 TIG 接头以及 SR-FSW 接头的抗拉强度系数和延伸率均满足运载贮箱的使用要求;(2) 由于实际飞行过程中焊缝沿弹体轴向方向的受力较大, 因此文中更为关注沿 SR-FSW 焊缝方向的交叉接头的性能, 就贮箱轴向来看, 沿 SR-FSW 焊缝方向的交叉接头的抗拉强度平均值为 291 MPa, 延伸率为 6.5%; 而单一 TIG 接头的抗拉强度平均值为 306.85 MPa, 而延伸率为 5.025%。从该方向的性能数据来看, 交叉接头的延伸率高于单一 TIG 接头约 30%, 这主要得益于交叉接头的组织差异性更小, 且接头软化区更窄, 而抗拉强度低于单一 TIG 接头, 主要是由于 2219C10S 铝合金母材的抗拉强度高于双轴肩搅拌摩擦焊纵向拉伸试样的抗拉强度;(3) 就贮箱环向来看, 沿 TIG 方向的交叉接头的抗拉强度平均值为 310.2 MPa, 延伸率为 9.0%; 而 SR-FSW 接头的抗拉



(a) 交叉接头



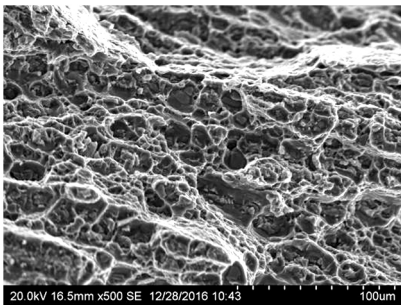
(b) 单一 TIG 接头

图 7 两类接头断裂试样的横截面金相 6.5×

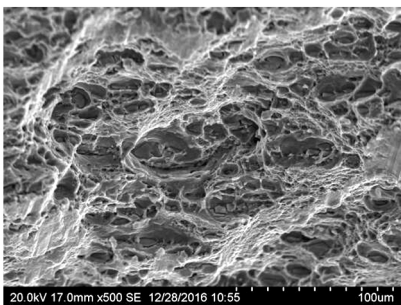
Fig.7 The fracture metallographic of the cross section of two types of joint

从图 7(a)可看出,交叉接头的整个断裂面均位于热影响区,具体位置与熔合区有一定的距离,大约位于热影响区显微硬度最低的区域。从整个接头来看,母材区、热影响区、熔合区的组织均为等轴晶,而焊缝区为铸造组织,从组织梯度上看,必然断裂于热影响区或熔合区。由于显微硬度最低点位于热影响区,因此其断裂位置位于热影响区的显微硬度最低点。从断裂面看,其起始断裂位置位于交叉接头背部的焊漏边缘,之后沿着热影响区延伸至焊缝正面余高的边缘。图 7(b)为单一 TIG 接头断裂试样的金相图,可看出其断裂面也均位于热影响区,起始断裂处位于盖面焊紧邻熔合区的热影响区,之后延伸至打底焊的热影响区[从图 6(b)可以看出此处为热影响区显微硬度的最低处],直至焊缝背部。

图 8 为两类接头的断口微观形貌,从图 8(a)可看出交叉接头的断裂面上包含有大量的等轴韧窝,在韧窝边缘的撕裂棱特征明显,且在韧窝底部可观察到第二相粒子,因此交叉接头为典型的韧性断裂。在单一 TIG 接头的断裂面上[图 8(b)]可以观察到尺度不一的等轴/非等轴韧窝特征,但是韧窝数量相对少、深度较浅、撕裂棱高低不一,且可以观察到部分脆性断裂特征[图 8(b)的箭头处],这也是单一 TIG 接头延伸率低于交叉接头的原因所在。



(a) 交叉接头



(b) 单一 TIG 接头

图 8 两类接头的断口微观形貌

Fig.8 The fracture morphology of the two types of joint

3 结论

(1)交叉接头与单一 TIG 接头的组织特征既有相同之处也存在差异。相同之处为焊缝区均由直流氩弧焊作用下的柱状区和交流脉冲氩弧焊作用下的碗状区组成;不同之处在于两者的母材区与热影响区组织。

(2)两类接头的横截面显微硬度分布均呈“W”型,单一 TIG 接头横截面上的显微硬度梯度较大,而交叉接头则较小,且交叉接头的软化区宽度较窄,这与细小等轴晶在电弧热影响区作用下的抑制长大能力更强有关。

(3)沿 SR-FSW 焊缝方向的交叉接头的抗拉强度系数为 66.14%,低于单一 TIG 接头的 69.74%,但前者的接头延伸率比单一 TIG 接头高约 30%。

(4)两类接头的断裂位置均位于接头热影响区的显微硬度最低处。交叉接头的断口形貌为典型的韧性断裂,而单一 TIG 接头还可观察到部分脆性断裂特征。

参考文献

- [1] 赵衍华,李延民,郝云飞,等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J]. 宇航材料工艺,2012,42(6):70-75.
- [2] HILGERT J, SANTOS J F, HUBER N. Shear layer modelling for bobbin tool friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(6):454-459.
- [3] WALDRON D, TERNAN K M, KOKKO E. Bobbin-tool friction-stir welding of thick-walled aluminum alloy pressure vessels[J]. Welding Journal, 2007, 87(4):40-44.
- [4] 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.
- [5] 张海,封小松,刘仁培. 2219 铝合金 FSW-VPPA 交叉焊缝组织与力学性能[J]. 焊接学报,2012,33(7):77-80.
- [6] CHEN Shujun, YU Yang, LI Boatman. Study on defect in the intersection of VPPA and FSW[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(3):124-128.
- [7] 章凌,黄诚,方岱宁等. 大型薄壁贮箱焊接区等应力优化设计[J]. 应用力学学报,2015,32(4):593-596.
- [8] FONDA R W, KNIPLING K E, BINGERT J F. Microstructural evolution ahead of the tool in aluminium friction stir welds[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5):343-348.
- [9] DING Jikun, WANG Dongpo, Wang Ying, et al. Effect of post weld heat treatment on properties of variable polarity TIG welded AA2219 aluminium alloy joints[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2014, 24(5):1307-1316.
- [10] 刘志华,尚育如,宁立芹,等. 新一代运载火箭贮箱焊接工艺评价的概念及应用[J]. 导弹与航天运载技术,2009(4):30-33.