

铝合金可回抽搅拌摩擦焊接头组织和性能

郝云飞 李延民 周庆 罗军 李超

(首都航天机械公司,北京 100076)

文 摘 针对 8 mm 厚 2219 铝合金进行可回抽搅拌摩擦焊工艺试验,详细分析了回抽过程中搅拌针运动轨迹、不同回抽位置的接头组织形态及力学性能。结果表明:搅拌针的运动轨迹是焊接速度与搅拌针相对于轴肩回抽速度的合成运动轨迹,并呈现出一定的线性关系。回抽结束处和回抽起始处的接头组织形貌为典型的常规搅拌摩擦焊接头,位于中间回抽区域的焊接接头可以认为是 100% 焊透的焊接接头与“相同直径的轴肩+(100%~0%) \times L 的搅拌针”形成的焊透深度逐渐变浅的常规搅拌摩擦焊接头复合形成的。接头力学性能测试结果表明:回抽结束处的性能最高,回抽起始处的性能次之,中间回抽区域的力学性能最低,并且随着回抽距离的逐渐增加,中间回抽区域的力学性能逐渐增加。不同回抽位置的搅拌摩擦焊接头均呈现出典型的韧性断裂形貌。

关键词 可回抽搅拌摩擦焊,回抽轨迹,组织形态,力学性能

中图分类号: TG4

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.02.009

Retractable Friction Stir Welding Technology of 2219 Aluminium Alloy

HAO Yunfei LI Yanmin ZHOU Qing LUO Jun LI Chao

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract An extensive investigation was carried out on the retractable friction stir welding of 2219 aluminium alloy with the thickness of 8 mm, and the retractable track, microstructure and mechanical properties of the welding joint at the different locations have been analyzed. The results indicated that the actual trajectory of the RPT is the combination of welding speed and retracting speed, and showed a linear relationship. The morphology at the beginning and end of the retractable FSW welded seam showed a typical conventional FSW microstructure, while the joint located in the middle of the retractable FSW welded seam can be considered as the composite of a 100% penetration welded joint and a joint with gradually shallower depth. The results of the tensile test indicated that the mechanical property of the joint at the end of weld seam is the highest, followed by the joint located at the beginning and middle of the retractable FSW welded seam. With the retracting distance increasing gradually, the performance of the joint in the middle of the retractable FSW welded seam also gradually increased. The fracture mechanism of the joint at different position is all ductile fracture.

Key words Retractable friction stir welding technology, Retractable track, Microstructure, Mechanical property

0 引言

可回抽搅拌摩擦焊工艺是搅拌摩擦焊技术一个新的发展方向,最早由美国 NASA 的焊接工程师为消除环缝搅拌摩擦焊匙孔问题而提出的^[1-4]。环缝焊接时采用一种特殊结构的搅拌头,称之为可回抽搅拌头(RPT),轴肩和搅拌针采用分体式结构设计,如图 1 所示。在环缝 0°~360°焊接时搅拌针长度保持不

变,当搅拌头穿过起始焊接点时,搅拌针缓慢向轴肩内部收缩,焊接深度越来越小,最后缩进至轴肩内部,形成一条无匙孔的封闭环缝,如图 2 所示^[5-7]。由于该技术不需要外来填充材料即可消除环形工件的尾端匙孔,已经在欧美等宇航机构贮箱类产品的焊接上获得了工程化应用。美国 SpaceX 公司的 Falcon9 运载火箭贮箱箱体环缝采用了 RPT 技术进行焊接,并

成功通过了飞行试验考核。我国在可回抽搅拌摩擦焊工艺方面的基础研究和公开文献资料非常少,工程化应用也仅局限在航空航天领域的少数产品。本文以 2219C10S 铝合金为试验对象,开展可回抽搅拌摩擦焊工艺试验,对回抽过程中搅拌针运动轨迹、焊缝组织形态和力学性能进行着重分析,为可回抽搅拌摩擦焊工艺的推广应用提供理论基础。

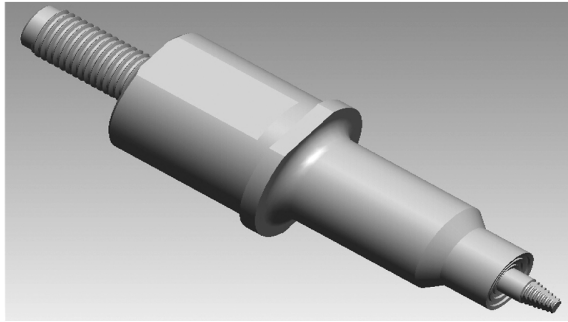


图 1 可回抽搅拌头结构示意图
Fig. 1 Structure of retracting pin tool

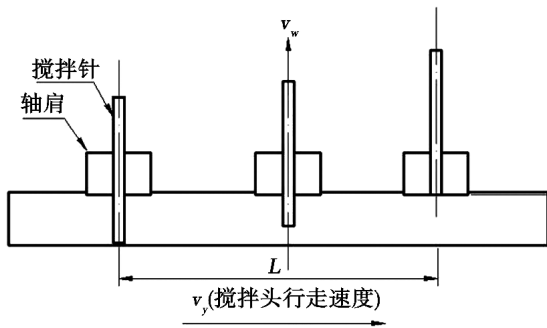


图 2 可回抽搅拌摩擦焊工艺原理
Fig. 2 Principle of retractable FSW technology

1 试验

1.1 材料

2219C10S 铝合金板材 ($\sigma_b = 440 \text{ MPa}$, $\delta = 15\%$) 的规格为 $400 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$, 主要化学成分如表 1 所示。

表 1 2219C10S 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 试验方法

工艺试验在自制的搅拌摩擦焊设备和工装上进行,搅拌头旋转速度为 800 r/min , 焊接速度为 180 mm/min , 焊接过程中可回抽搅拌头与平板试样法线方向夹角为 2.7° 。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 2 期

1.2.1 回抽模拟试验

无匙孔可回抽搅拌摩擦焊模拟试验如图 3 所示。

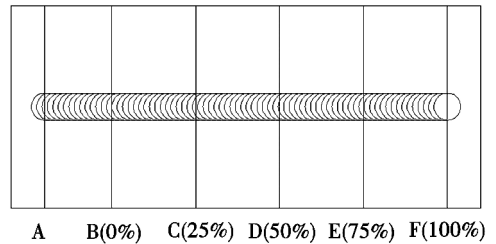


图 3 铝合金母材上模拟搅拌针回抽工艺

Fig. 3 Simulation of Retractable FSW technology on the parent metal

起始焊接时搅拌针长度为 7.8 mm , 从板材的 A ~ B 点 (50 mm) 保持搅拌针长度不变, 从 B 点搅拌针开始回抽, 直至 F 点结束, B ~ F 点的回抽距离为 200 mm 。为了分析搅拌针的回抽运动轨迹, 分别从搅拌针开始回抽处 (B 点)、回抽 25% 处 (C 点)、回抽 50% 处 (D 点)、回抽 75% 处 (E 点) 以及回抽结束处 (F 点) 沿焊缝横截面取金相试样, 以及在 B ~ C、C ~ D、D ~ E、E ~ F 之间平行于焊缝方向从焊缝中心取金相试样, 观察接头宏观形貌和测量焊透深度。

1.2.2 平板回抽对接试验

可回抽搅拌摩擦焊接头采用平板对接方式, 试验方法如图 4 所示。

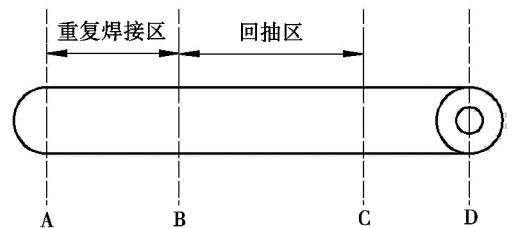


图 4 可回抽搅拌摩擦焊接头制备试验思路

Fig. 4 Preparation of the Retractable FSW joint

首先采用可回抽搅拌头焊接 1 条 FSW 焊缝, 焊接过程中搅拌针长度保持不变, 焊接起始点为 A 点, 结束于 D 点。之后将可回抽搅拌头回到 A 点, A ~ B 焊接过程中搅拌针长度依旧保持不变, B ~ C 区域内搅拌针开始回抽, 搅拌针长度开始逐渐变短, 当达到 C 点时, 搅拌针末端端面与轴肩端面齐平, 可回抽搅拌头开始脱离焊缝表面, 焊接结束。图 4 中 A ~ B 之间为重复焊接区, B ~ C 为回抽区域。在此基础上从回抽区域的开始回抽处, 回抽 25%、50%、75%, 以及回抽结束处进行取样, 进行相关的金相和拉伸性能分析, 一方面分析回抽距离对回抽区域力学性能的影响, 另一方面分析回抽区域的不同位置的性能是否存在差异。

1.2.3 性能评价

用X射线探伤与相控阵超声波检测可回抽搅拌摩擦焊接头回抽区域是否存在焊接缺陷。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。在MTS-810电子拉伸试验机上测试接头的拉伸性能。

2 结果与分析

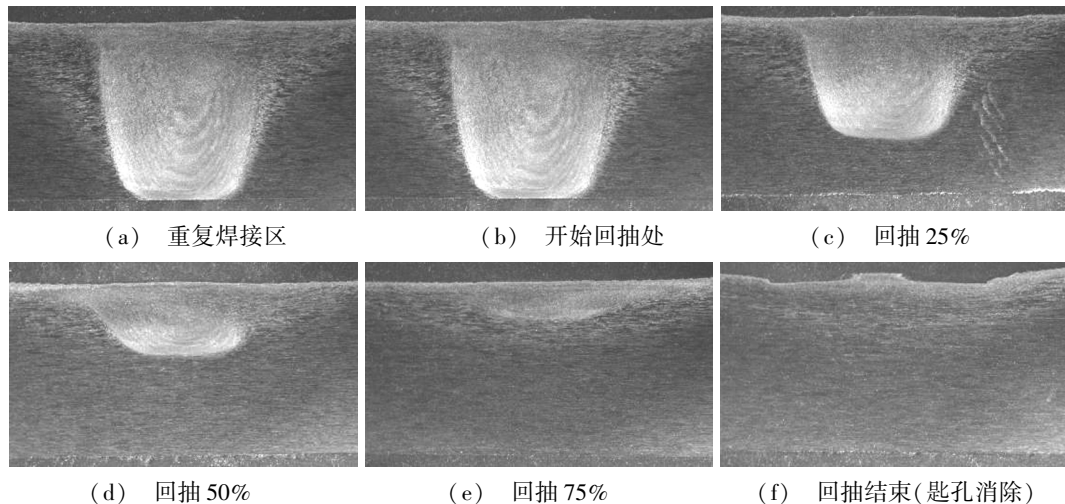


图5 回抽工艺模拟焊缝中不同位置的横截面宏观形貌

Fig.5 Sectional morphologies of weld seam for simulation of retractable FSW technology

从图6可以看出,金相取样位置与焊缝焊透深度呈线性关系,回抽过程中搅拌针的运动速度(v)是焊接速度(v_1)与“搅拌针相对于轴肩的收缩速度”的合成速度(图7)。

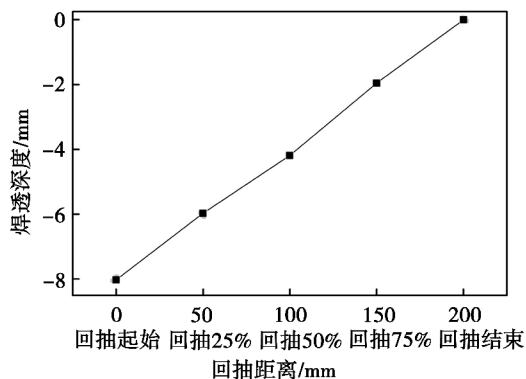


图6 金相取样位置与焊透深度相对关系

Fig.6 Relation of weld depth and sampling location

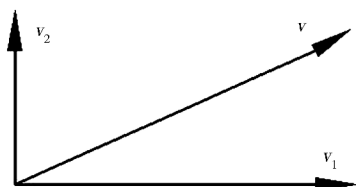


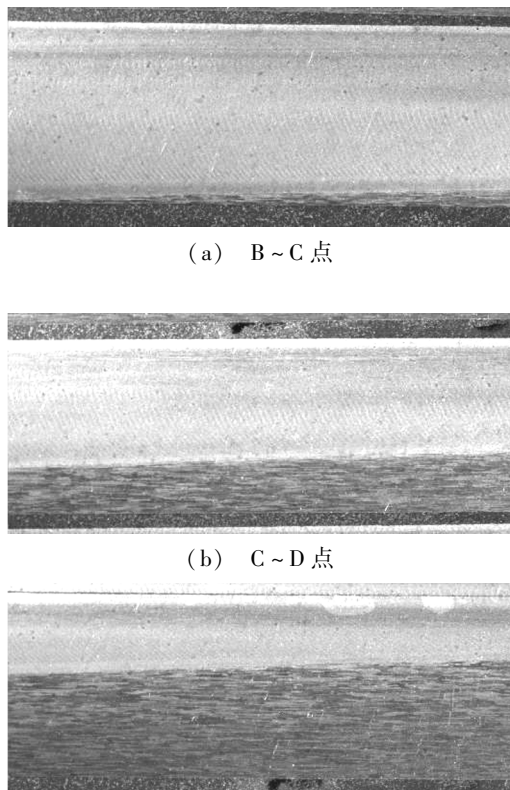
图7 模拟试验中搅拌针运动轨迹示意图

Fig.7 Schematic diagram of retractable track

2.1 回抽工艺模拟试验

从图5可以看出,A~F点的横截面宏观形貌均为典型的搅拌摩擦焊接头,焊透深度逐渐变浅,可以认为是“相同直径的轴肩+(100%~0%)×L的搅拌针”组成的搅拌头焊接的常规搅拌摩擦接头。B点的搅拌摩擦焊接头深度为8.03 mm、C点为5.98 mm、D点为4.19 mm、E点为1.96 mm、F点是搅拌头轴肩与母材表面相互作用的结果,是受到轴肩高速旋转摩擦产热造成的,焊透深度为0 mm。

图8是沿B~C、C~D、D~E、E~F之间平行于焊缝从焊缝中心取样的金相观察。



(a) B~C点

(b) C~D点

(c) D~E点



(d) E~F点

图8 铝合金平板回抽模拟焊缝上沿焊缝中心取样金相

Fig. 8 Macro-structure longitudinal welding section of the retractable welding joint

可以看出,上方是母材在搅拌针高速旋转摩擦发生动态再结晶形成的焊核区,可以观察到明显的洋葱

环结构,其微观组织呈细小的等轴晶(5~8 μm),下方是母材区,由一系列具有明显方向性的板条状晶粒组成。两者之间的界限是一条倾斜的直线,其斜率由焊接速度和搅拌针相对于轴肩的回抽速度共同决定。同时该直线也是试验中搅拌针的运动轨迹。

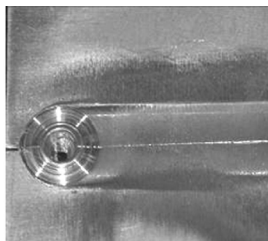
2.2 可回抽搅拌摩擦焊缝外观形貌

图9是回抽距离为150 mm的可回抽搅拌摩擦焊缝,可看出焊缝外观成型良好,在焊接结束时匙孔完全消除。从图10可看出,当采用搅拌摩擦焊回抽工艺时,当搅拌针完全收回轴肩,并且轴肩离开焊缝表面时,焊缝尾部的匙孔完全消除。

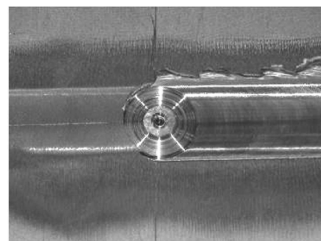


图9 可回抽搅拌摩擦焊缝

Fig. 9 Retractable welded seam



(a) 有匙孔



(b) 无匙孔

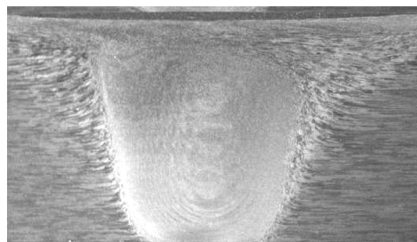
图10 搅拌摩擦焊缝有、无匙孔比较

Fig. 10 Comparison of keyhole and elimination of keyhole

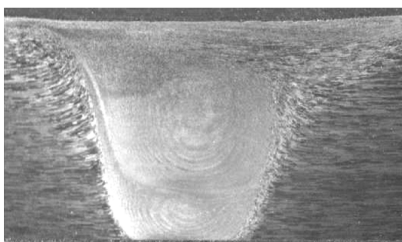
2.3 接头宏观组织形貌

从图11可以看出,可回抽搅拌摩擦焊接头不同

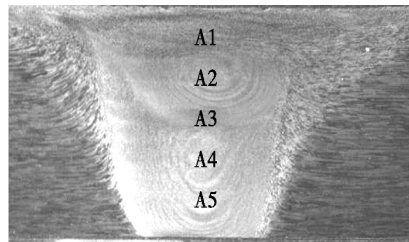
位置的横截面宏观形貌存在较大程度的差异。



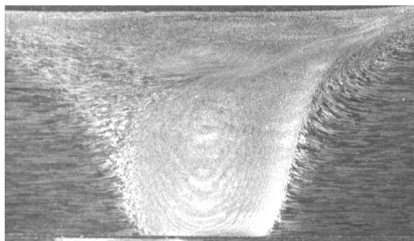
(a) 起始回抽处



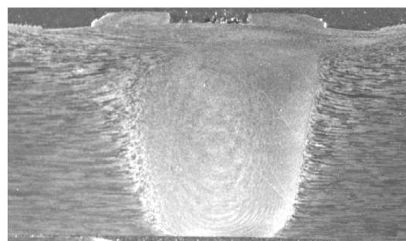
(b) 回抽 25%



(c) 回抽 50%



(d) 回抽 75%



(e) 回抽结束

图11 可回抽搅拌摩擦焊接头不同位置的横截面宏观形貌 6.5×

Fig. 11 Transverse cross-section of the retractable FSW welded joint at different retracting position

主要体现在:(1)起始回抽处为典型的搅拌摩擦焊接头宏观形貌,只有1个焊核,表现为左右不对称的扁平椭圆洋葱圆环结构;值得说明的是该区域相当于采用100%长度的搅拌针进行二次焊接;(2)从图11(b)~(d)中可以发现接头横截面上上下下各存在1

个焊核。随着取样位置逐渐靠近回抽结束点,位于上方的焊核越来越小。从形成机理来看,位于下方的焊核是在第一次焊接时形成的,位于上方的焊核是在回抽焊接时由逐渐缩短的搅拌针作用形成的。位于回抽区域的焊接接头可以认为是100%焊透的一次焊

接区接头与“相同直径的轴肩+(100%~0%)×L的搅拌针”形成的逐渐变浅的常规搅拌焊接头的复合形成的。从图中还可以看出,回抽焊接时形成的焊核与一次焊接时形成的焊核之间存在非常明显的界限,尤其是在前进侧和二次焊核的下方;(3)图 11(e)为典型的常规搅拌摩擦焊接头宏观形貌,且只有 1 个焊核。从焊接过程来看,该区域相当于一次焊接区的焊接接头,仅焊缝表面与轴肩存在短暂的相互作用,没有产生过多的热影响。图 11(e)上表面存在的以焊缝中心轴向对称分布的环状凸起就是搅拌针完全回抽至轴肩内部时,轴肩与搅拌针之间残留塑性金属形成的。

2.4 微观组织形貌

图 12 为 8 mm 可回抽搅拌摩擦焊接头搅拌针回抽 50% 处的接头微观组织形貌。可以看出:(1)图 12(c)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明显;(2)图 12(a)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;(3)回抽 50% 处的搅拌摩擦焊接头中存在 2 个焊核。位于下方的焊核是由“ $\Phi 20$ mm 的轴肩+长度约为 7.8 mm 的搅拌针”组成的搅拌头一次焊接形成的,位于上方的焊核是由“ $\Phi 20$ mm 的轴肩+长度约为 3.9 mm 的搅拌针”组成的搅拌头与一次焊接接头相互作用形成的。二次焊核在横截面方向上的宽度小于一次焊接形成的焊核。可以看出,回抽焊接形成的焊核呈扁平状结构,由围绕同一中心的许多间距不等的椭圆圆环组成,位于前进侧的椭圆圆环窄而密,而位于后退侧的椭圆圆环宽而疏;(4)二次焊核与前进侧之间组织的分界线非常清晰,且二次焊核与前进侧热机影响区之间还残留有较多的一次焊核;同样在垂直方向上,二次焊核与一次焊核的界限同样非常清晰;但是与后退侧热机影响区之间的界限比较模糊,过渡的非常平滑。从图中可以看出二次焊核与一次焊核的分界线上的等轴晶晶粒径存在非常大的差异,且过渡比较急剧[图 12(d)、(e)]。(5)回抽工艺导致焊核区组织不均匀性加剧。

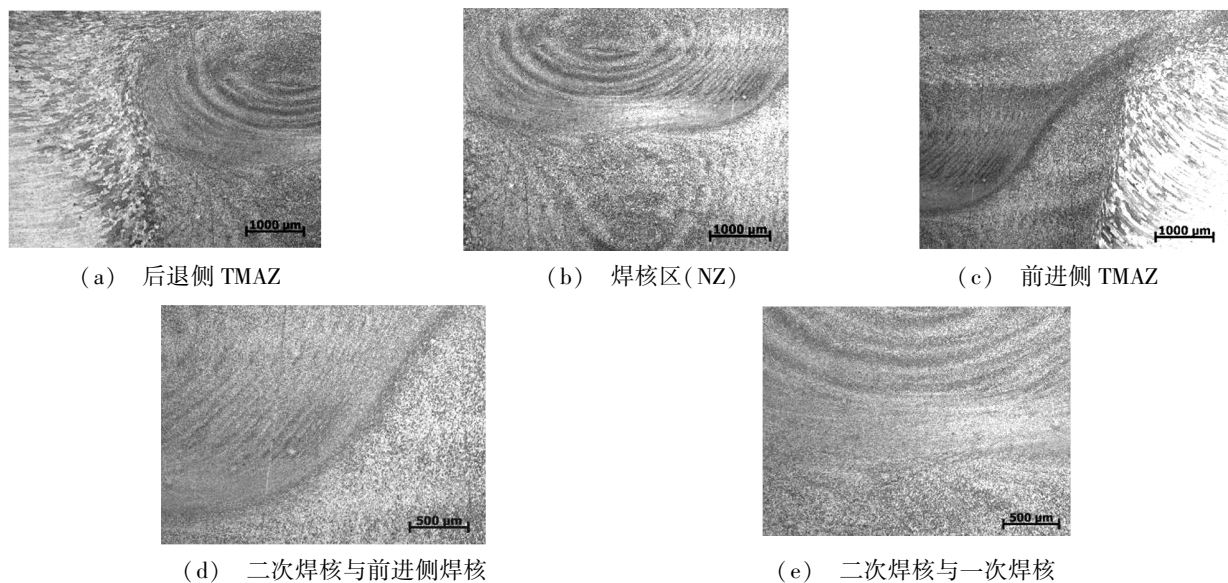
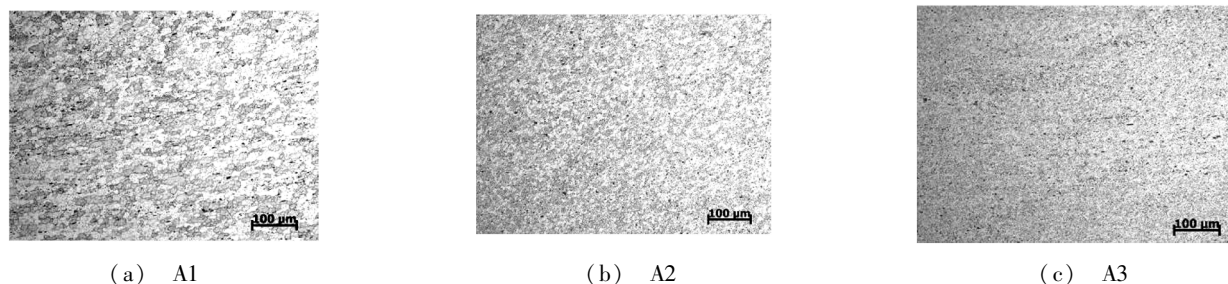


图 12 可回抽搅拌摩擦焊接头回抽 50% 处的微观组织形貌 25×

Fig. 12 Microstructure of the retractable FSW welded joint with the 50% length of the RPT

图 13 是回抽 50% 接头处从焊缝上表面到下表面的焊核区形貌(A1~A5),可以看出均为细小的等轴晶晶粒,但是其晶粒径存在很大的差异,其晶粒径依次为:A1>A4>A2>A3>A5。以上是回抽 50% 处的

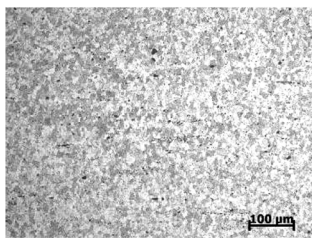
接头微观组织分析结果。值得说明的是,其余回抽区域的微观组织形貌与其非常相似,存在的最大的差异在于二次焊核区体积的变化。



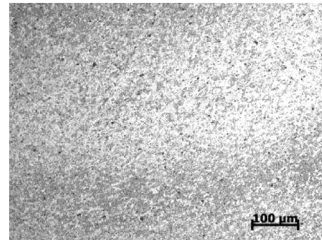
(a) A1

(b) A2

(c) A3



(d) A4



(e) A5

图 13 回抽 50% 处从上表面至下表面的焊核区形貌图 200×

Fig. 13 Distribution of the equiaxed grains along the thickness of the joint

2.5 回抽距离对接头力学性能的影响

图 14 为回抽距离为 100 ~ 300 mm 试样的搅拌针回抽 50% 处的接头力学性能结果,可以看出:搅拌针回抽速度对回抽区域的接头力学性能存在显著的影响。随着回抽距离的逐渐增加,回抽 50% 处接头平均力学性能从 308.3 MPa 逐渐增加至 318.3 MPa,但是对接头延伸率的影响不大(6.0% 左右)。随着回抽距离的进一步增加,接头力学性能可能还会继续增加。但回抽距离过长可能会影响焊缝表面成型,甚至导致接头力学性能不稳定等。因此优化的回抽距离为 300 mm,接头抗拉强度为 315 ~ 320 MPa,其抗拉强度系数 >70%,延伸率达到 5.5% ~ 6.5%。

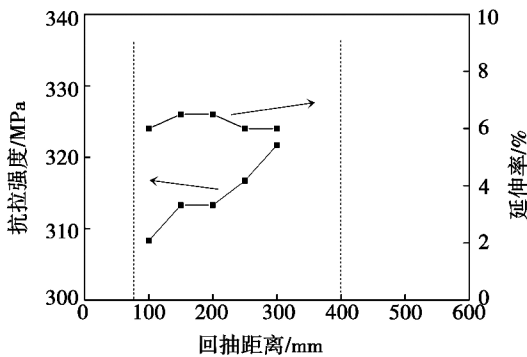


图 14 回抽距离对回抽 50% 处接头力学性能的影响规律

Fig. 14 Effect of retracting distance on the mechanical properties of the retractable FSW joint

搅拌摩擦焊接过程中高速旋转的搅拌针会对焊缝内部塑性金属产生 2 个作用力:(1)向下的作用力($F_{下}$),促使塑性金属从焊缝上部运动至焊缝下部;(2)向着旋转方向的作用力($F_{右}$),促使焊缝内部塑性金属不断地从焊缝前进侧运动至后退侧。回抽区域焊缝相当于在一次焊接接头的基础上采用(100% ~ 0%) $\times L$ 的搅拌针进行二次焊接,因此回抽过程中搅拌针沿主轴方向受到 1 个向上的力,而位于搅拌针上的螺纹也会对塑性金属产生向上($F_{上}$)和反旋转方向的分力($F_{右}$)。回抽焊接过程焊缝内部塑性金属受到向下的作用力为($F_{下}-F_{上}$),受到向旋转方向的作用力为($F_{右}-F_{左}$)。因此回抽焊接过程中促使塑性金属

属向下,以及从前进侧运动至后退侧的作用力会减小,从而导致回抽区域接头力学性能下降。然而,随着回抽距离的逐渐增加,搅拌针回抽速度逐渐减小,回抽过程中搅拌针受到的沿主轴方向向上的力减小(同时向上、向左的分力也逐渐减小),对焊缝内部塑性金属运动的影响也越来越小。因此随着回抽距离的逐渐增加,回抽区域力学性能逐渐增加。

2.6 不同回抽位置的接头力学性能

表 2 是回抽距离为 300 mm 的可回抽搅拌摩擦焊接头的起始回抽处、中间回抽区域以及回抽结束处的力学性能,可以看出:(1)回抽结束处的接头抗拉强度分布在 335 ~ 340 MPa,起始回抽处在 325 ~ 330 MPa,中间回抽区域在 315 ~ 320 MPa;(2)回抽区域不同位置的接头力学排序:“回抽结束处”>“起始回抽处”>“中间回抽区域”。原因分析:(1)回抽结束处相当于一次焊接接头,其力学性能最佳;(2)起始回抽处受到 2 次焊接热影响,接头进一步软化,导致其力学性能下降;(3)中间回抽区域由于焊缝内部组织不均匀性加剧、焊缝内部塑性金属受到的作用力减小以及部分二次热影响导致其力学性能最低。

表 2 回抽区域不同位置的接头力学性能

Tab. 2 Tensile properties of the retractable FSW joint at different retracting position MPa

起始回抽处	回抽 25%	回抽 50%	回抽 75%	回抽结束处
325 ~ 330	315 ~ 320	315 ~ 320	315 ~ 320	335 ~ 340

2.7 不同回抽位置的焊缝断口

图 15 为回抽距离为 300 mm 的可回抽搅拌摩擦焊缝不同回抽位置的接头拉伸断裂形貌,可以看出:不同回抽位置的接头拉伸试样均断裂于偏离焊缝中心的后退侧区域,该区域是热影响区或热机影响区与焊核区的交界处,并且拉伸试样的断裂面与焊接接头横截面呈典型的 45°。图 16 为可回抽搅拌摩擦焊接头的断口微观形貌,可以看出:在试样的断口上存在大量的韧窝结构和撕裂棱,并且在韧窝内部含有 3 ~

5 μm 左右的第二相粒子。因此从其断口形貌可以判断其断裂机理为韧性断裂。

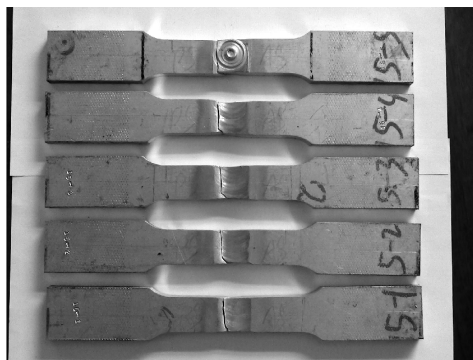


图 15 不同回抽位置的接头拉伸试样断裂形貌

Fig. 15 Fracture specimen of retractable FSW joint after tensile test at different retracting position

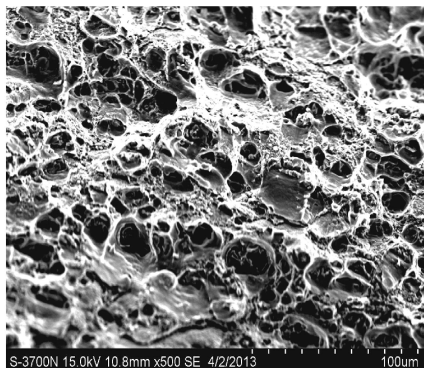


图 16 接头断口微观形貌

Fig. 16 Fracture morphology of the joint

3 结论

(1) 回抽过程中搅拌针的运动速度是“焊接速度”与“搅拌针相对于轴肩回抽速度”的合成运动轨迹,并呈现出一定的线性关系。

(2) 回抽结束处和回抽起始处的接头组织形貌为典型的常规搅拌摩擦焊接头,位于中间回抽区域的焊接接头可以认为是 100% 焊透的焊接接头与“相同直径的轴肩 + (100% ~ 0%) $\times L$ 的搅拌针”形成的焊透深度逐渐变浅的常规搅拌焊接头复合形成的,接头

内部存在 2 个焊核,一次焊核与二次焊核之间界限清晰。

(3) 回抽结束处的接头力学性能最高,回抽起始处的次之,中间回抽区域由于组织不均匀性加剧,焊缝内部塑性金属受到的作用力减小以及部分二次热影响导致力学性能最低。

(4) 随着回抽距离从 100 mm 逐渐增加至 300 mm,中间回抽区域接头平均抗拉强度逐渐增加至 318.3 MPa,但是对接头延伸率的影响不大。

(5) 不同回抽位置的搅拌摩擦焊接头均呈现出典型的韧性断裂形貌。

参考文献

- [1] Uday M B, Fauzi M N A, Zuhailawati H, et al. Advances in friction stir welding process; a review [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(7): 534-588
- [2] Luo J, Wang X J. New technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(7): 650-655
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering, 2005, R50: 1-78
- [4] Thomas W M, Nicholas E D, Smith S D. Friction stir welding-tool developments [C]. The Aluminium Joining Symposium, TWI, 2001: 11-15
- [5] 封小松, 徐萌, 钱纪红. 载人航天器结构件 FSW 制造工艺及应用 [J]. 载人航天, 2011(1): 52-57
- [6] 李宝华, 陈莹, 等. 搅拌摩擦焊收焊匙孔填补的研究 [J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(23): 144-146
- [7] 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, G A, United states, 2008

(编辑 吴坚)