

6005A 铝合金的双轴肩搅拌摩擦焊: 焊缝更均匀, 强度更高

Stronger and Cleaner Welds: How Double-shoulder Friction Stir Welding Improves 6005A Aluminum

供稿|郭钊 / GUO Zhao

内
容
导
读

在固定搅拌头转速和焊接速度的条件下,对 3.3 mm 厚 6005A 铝合金进行双轴肩搅拌摩擦焊实验,研究焊接接头的表面成型、微观组织、力学性能及耐蚀性。实验结果表明,焊接接头表面成型美观、纹路均匀,焊接变形小,无明显缺陷,焊缝位置呈典型的“哑铃”状,上下端较宽,中间略窄。焊接接头可分为焊核区(WNZ)、热力影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)及母材区(BM)4个区域,其中焊核区的晶粒细小,第二相粒子基本溶入基体;热力影响区的晶粒在机械能和热能作用下被拉长且具有一定的方向性。焊接接头显微硬度分布呈不规则的“W”型,其中母材硬度最高,焊核区硬度次之,焊核区与热力影响区交界处硬度最低。此外,后退侧(RS)的热力影响区宽度大于前进侧(AS)。接头平均抗拉强度为 201.94 MPa,达到母材强度的 71.6%,平均伸长率为 2.2%,断面收缩率为 16.96%,表现出良好的塑性。同时,室温下焊缝的电阻率与母材基本一致,表现出优异的耐蚀性。当搅拌头转速为 800 r/min、焊接速度为 600 mm/min 时,可得到表面成型美观、综合性能良好的焊接接头。

随着现代科技的不断进步,运输业蓬勃发展,现代化车辆工程对车体材料性能提出更高的要求,以满足节能、环保、低碳以及经济可持续发展的需求。6005A 铝合金属于 Al-Mg-Si 合金,强度大、密度小、塑性好、耐蚀性及热挤压性佳,并具有优异的机械加工性能,已成为铝材的主要选择之一,被广泛应用于高速列车、双层客车和轻轨列车等现代化车辆工程制造领域^[1]。采用传统熔焊方法施焊时,

焊缝易出现气孔、热裂纹等焊接问题;同时,由于该合金线膨胀系数大、导热性强,焊接接头易出现翘曲变形,在一定程度上限制了其应用发展。搅拌摩擦焊(FSW)是一种用于固相连接的焊接技术,具有使用功率小、金属不熔化、无焊材消耗、无有害气体产生、自动化程度高、无紫外和电磁辐射等优点;由于其固相焊接特性,能有效避免裂纹、气孔、孔隙率等焊接缺陷^[2],被广泛应用于铝及铝合金焊接,

作者单位:海东市中等职业技术学校,青海 海东 810799

一度被视为解决铝合金焊接问题最为有效的方法^[3]。然而,在大直径贮箱和大型中空结构件焊接中,常规搅拌摩擦焊存在装夹困难、装夹夹具成本高等难题,在此背景下,双轴肩搅拌摩擦焊作为一种变体工艺应运而生。双轴肩搅拌摩擦焊的搅拌头配备上、下2个轴肩,焊接过程中2个轴肩与搅拌针一同旋转并作用于试件(如图1所示),从而实现焊接。相较于常规搅拌摩擦焊,该工艺可以有效解决无法焊透等缺陷问题^[4]。

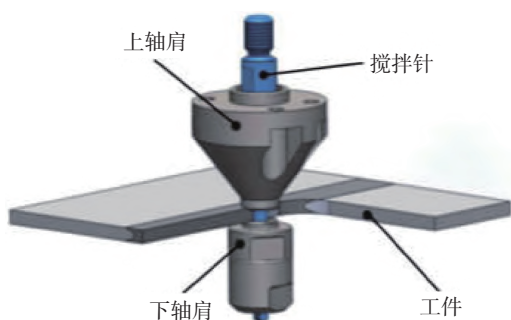


图1 双轴肩搅拌摩擦焊示意图

近年来,国内外学者对铝合金的双轴肩搅拌摩擦焊开展了大量研究。姬书得等^[5]设计一种上轴肩向内凹陷、下轴肩向外凸起且不同直径的双轴肩搅拌头,对5 mm厚的6005A铝合金实施焊接,接头抗拉强度达到190 MPa。张欣盟等^[6]对3.3 mm厚的6005A-T6铝合金进行双轴肩搅拌摩擦焊实验,并对接头进行疲劳实验,分析型材平行段宽度及厚度对试件疲劳性能的影响,研究表明在转速1000 r/min、焊接速度100 mm/min时,接头的拉伸断裂位置位于后退侧热影响区,型材接头前进侧热力影响区晶粒组织的特征会影响型材疲劳裂纹产生与开动。张颖川等^[7]建立双轴肩搅拌摩擦焊工具结构尺寸特征值与待焊工件厚度之间的工程模型,并对焊接工艺参数进行优化。刘威等^[8]采用双轴肩FSW对某型动车组3.3 mm厚的6005A-T6铝合金中空型材进行焊接,研究接头的显微组织、力学性能及电化学性能。长期以来,铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头的组织与性能一直都是研究热点,旨在推动该技术在工程中的应用。本文以3.3 mm厚的6005A铝合金为研究对象,参考文献[8]中的焊接工艺参数,固定搅拌头转速为800 r/min,焊接速度为600 mm/min,

开展双轴肩搅拌摩擦焊实验,对焊缝外观成型、显微组织、力学性能进行分析。研究结果可为大规模焊接工艺实验提供参考,有助于丰富材料焊接基础理论,促进6005A铝合金在工程中的广泛应用,提升焊接质量与生产效率,从而推动双轴肩(FSW)技术的工程化进程。

实验材料与方法

实验材料为3.3 mm厚的6005A铝合金板,尺寸为3.3 mm×300 mm×640 mm,主要化学成分及力学性能见表1。

表1 6005A 母材化学成分及力学性能

质量分数/%							抗拉强度/ 屈服强度/ 伸长率/		
Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Zn	Al	MPa	MPa	%
0.46	0.63	0.17	0.2	0.01	0.01	余量	282	189	14

实验采用FSW-LM-AL16-2D型搅拌摩擦焊机,结构形式为静龙门式,机床的横梁、立柱和床身构成封闭式框架结构,具有良好的刚性和强度,可在满载荷工况下实现稳定焊接。选用H13材质的双轴肩搅拌头,轴肩直径为16 mm,轴肩间距为3.1 mm。焊接装配前,先用丙酮清洗待焊件表面的油污,去除装配面周围的氧化膜,然后通过专用夹具将焊件紧固在搅拌摩擦焊机的工作台上。实验过程中,固定搅拌头转速为800 r/min,焊接速度为600 mm/min,双侧下压量为0.2 mm。焊接完成后,对中截取金相试样,在水磨砂纸上磨样,再用质量分数为10%的NaOH腐蚀液对试样进行腐蚀处理。采用OLYMPUS SZ61型体式显微镜观察焊接接头的形貌,通过ZEISS Vert.A1倒置金相显微镜分析焊接接头各区域的显微组织,然后进行硬度测试、拉伸实验、耐蚀实验,以探究搅拌头转速和焊接速度对异种铝合金FSW焊缝成型、显微组织及力学性能等的影响。

实验结果与讨论

接头表面形貌

在搅拌头转速800 r/min、焊接速度600 mm/min的工艺参数下,焊缝外观成型如图2所示,其中搅拌头旋转方向与焊接方向相同的一侧称为前进侧(AS),搅拌头旋转方向与焊接方向相反的一侧称

为后退侧（RS）。由图 3 可知，焊缝成型良好，表面鱼鳞环纹清晰且纹路均匀，焊接变形较小，后退侧焊缝表面存在少量缺陷，这是由于焊接热输入过大，导致搅拌针作用区域金属塑化时间过长，金属从后退侧挤出。

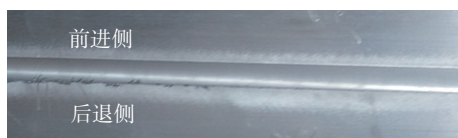


图 2 焊缝外观成型

焊缝横截面形貌如图 3 所示，可见焊缝上表面宽度略大于下表面，前进侧厚度略小于后退侧，这是由于在搅拌针搅拌和搅拌头轴肩下压力的共同作用下，焊缝处的高温金属整体向下轴肩方向产生微小位移。在上、下轴肩与搅拌针作用下，焊缝横截面呈“哑铃”状，即焊缝上、下表面较宽，中间略窄。

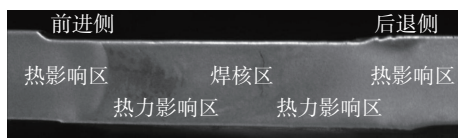


图 3 焊缝横截面

微观组织

由于焊缝区金属材料承受的焊接热作用和摩擦力作用程度不同，其金相组织存在差异，焊接接头

大致划分为 4 个区域，分别为母材区、热影响区、热力影响区和焊核区。如图 3 所示，热力影响区与焊核区、热影响区在前进侧分界明显，在焊接过程中，热力影响区材料流动较为复杂。在搅拌头上、下轴肩和搅拌针共同作用下，材料分别从工件上表面、下表面和搅拌针后方向前进侧聚集形成焊缝。由于材料从 3 个方向流向前进侧，与轴肩相接处存在明显的温度差，导致焊核区与热力影响区在焊缝的前进侧方向呈现明显的“鱼嘴”型分界。

焊接接头各区域显微组织如图 4 所示，其中图 4(a) 为母材的金相组织，主要由 Mg-Al 固溶体和块状析出物组成，这与轧制成型密切相关；图 4(b) 为热影响区组织，由于该区域仅受热循环作用，挤压组织消失，晶粒粗大；图 4(c) 为前进侧的热力影响区组织，晶粒呈弯曲细长的板条状，存在轧制带状特征，焊缝上部和下部的热力影响区晶粒取向分别从焊缝中心向上表面与下表面弯曲，并沿焊缝板厚中心对称均匀分布；图 4(d) 为焊核区组织，晶粒细小且呈等轴状，这是由于焊接过程中焊核区经历搅拌针剧烈的机械搅拌作用及热作用，发生动态再结晶，新生成的晶粒在长大前被搅碎，形成更加细小的等轴晶粒；图 4(e) 为后退侧的热力影响区组织，其组织形貌、晶粒取向与前进侧相似，但热力影响区和焊核区组织的过渡界面不明显，过渡区域较宽大，呈现“楔形”形态，同时热力影响区的弯曲

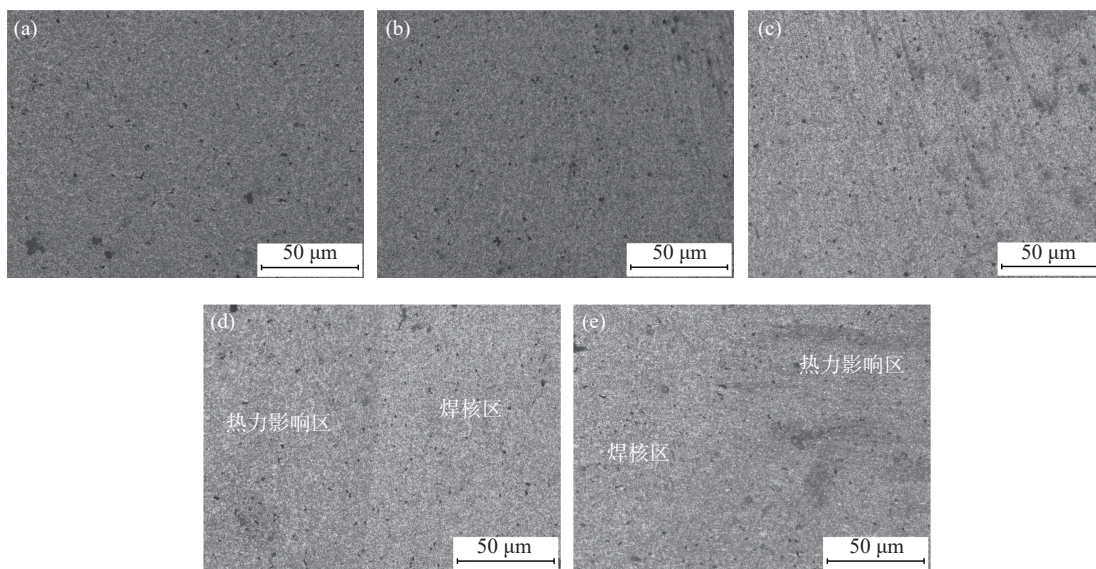


图 4 焊接接头各区域显微组织: (a) 母材组织; (b) 热影响区组织; (c) 前进侧的热力影响区组织; (d) 焊核组织; (e) 后退侧的热力影响区组织

晶粒发展成粗大的等轴晶粒，粗大等轴晶粒与细小等轴晶粒的混合区域最终演变为焊核区的细小等轴晶粒。

显微硬度

距焊缝上、下表面各 1 mm 处，从焊缝中心向两侧母材以 1 mm 为间隔进行硬度测试，焊接接头显微硬度分布如图 5 所示。由图 5 可知，焊接接头在不同厚度方向上的显微硬度均呈不规则“W”型分布，其中母材硬度最高，约为 HV 128.4；整个焊缝区硬度低于母材，最低硬度位于热力影响区与焊核区分界区域。焊核区硬度低于母材，且在该区域内硬度变化较小，主要是由于焊接热输入促使弥散分布的细小强化相聚集，导致部分强化相发生粗化现象，材料出现“过时效”现象，晶粒粗大，显微硬度明显降低。焊接热输入增大导致晶粒粗化的同时，时效强化作用随之增强，基体中析出更多强化相，使得焊核区显微硬度提高^[9]。对比上、下表面硬度分布，焊核区下表面硬度高于上表面，这与搅拌针的机械搅拌作用有关，下表面受到的机械搅拌作用更强，导致晶粒更加细小。

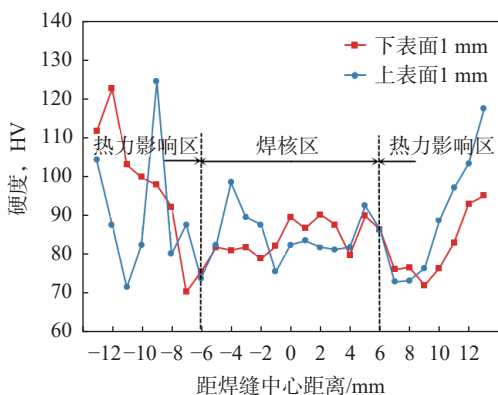


图 5 接头的显微硬度分布

接头拉伸性能

在焊接接头处利用线切割方法随机取 4 个拉伸试样，编号为 B1~B4。在 WDW-200 型电子拉伸试验机上进行拉伸实验，接头抗拉强度、伸长率、断面收缩率如图 6 所示。由图 6 可知，6005A 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头平均抗拉强度为 201.94 MPa，达到母材抗拉强度的 71.6%；接头在焊缝前进侧靠近焊核区的热影响区发生断裂，平均伸长率为

2.2%，断面收缩率为 16.96%，塑性良好。根据拉伸实验试样的断裂情况，所有试样断裂位置均在前进侧的焊核区与热影响区交界处，且断裂面与焊接接头的横截面夹角约为 45°，这主要是由于该交界处组织结构差异显著，组织过渡时急剧变化，晶粒尺寸差异较大，使得该区域成为接头拉伸过程中的薄弱环节。

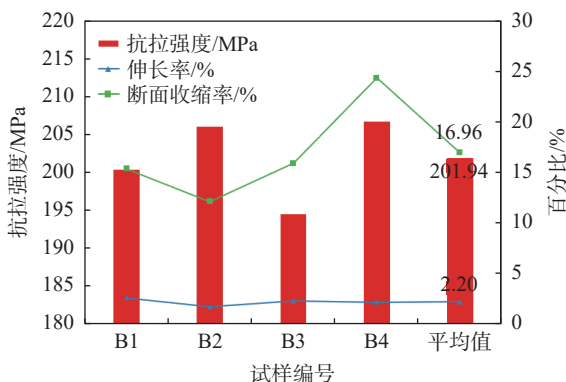


图 6 接头的抗拉强度、伸长率、断面收缩率

耐腐蚀性能

采用线切割机沿着焊缝的横截面和母材方向切割 20 mm×20 mm 的试样，置于质量分数为 3.5% NaCl 溶液开展耐蚀性实验，绘制的动电位极化曲线如图 7 所示。由图 7 可知，在给定的焊接工艺参数下，6005A 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头的电化学腐蚀性能优异。这是由于焊接过程中焊缝经历了剧烈的塑性变形，形成细小等轴再结晶晶粒，使焊缝组织细化致密，降低了晶界和晶粒间的电化学不均匀性，从而提高了焊接接头的耐腐蚀性能。

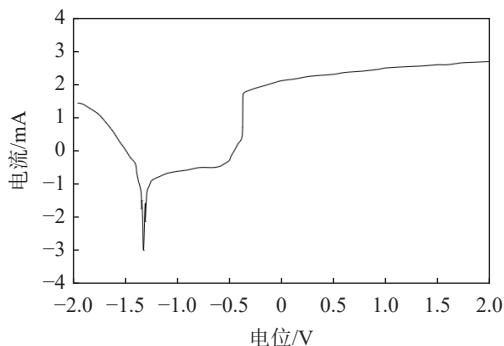


图 7 焊接接头动电位极化曲线

结束语

(1) 6005A 铝合金双轴肩接头呈现典型的“哑

铃”状，焊缝上、下端较宽，中间略窄。焊接接头的显微硬度分布呈现不规则的“W”型，其中母材硬度最高，焊核区硬度次之，热力影响区与焊核区交界处硬度最低。

(2) 针对 3.3 mm 厚的 6005A 铝合金板，当搅拌头转速为 800 r/min，焊接速度为 600 mm/min 时，使用双轴肩搅拌摩擦焊技术可得到表面成型美观、内部基本无缺陷的焊接接头；焊核区形成细小等轴晶粒，焊接接头平均抗拉强度达到母材的 71.6%，其力学性能及耐蚀性能达到预期效果。

参考文献

- [1] 贾志芳, 田董扩, 白云龙. 5083/6005A 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能. 电焊机, 2023, 53(11): 84
- [2] 李志强, 陈辰. 铝合金材料搅拌摩擦焊焊接参数概述. 焊接技术, 2021, 50(11): 1
- [3] 董鹏, 孙大千, 李洪梅, 等. 6005A 铝合金搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀行为. 焊接学报, 2014, 35(5): 105
- [4] 周利, 刘朝磊, 王计, 等. 双轴肩搅拌摩擦焊技术研究现状. 焊接, 2015(6): 14
- [5] 姬书得, 孟祥晨, 黄永宪, 等. 搅拌头旋转频率对静止轴肩搅拌摩擦焊接头力学性能的影响规律. 焊接学报, 2015, 36(1): 51
- [6] 张欣盟, 高士康, 李高辉, 等. 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头疲劳性能分析. 焊接学报, 2023, 44(9): 30
- [7] 张颖川, 马国栋, 代鹏, 等. 6061-T6 铝合金中空薄壁型材双轴肩搅拌摩擦焊工具设计与工艺分析. 焊接学报, 2022, 43(6): 88
- [8] 刘威, 苗子琪, 张军浩. 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能. 长春工业大学学报, 2022, 43(4): 348
- [9] 崔少朋. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及力学行为研究 [学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015

基金项目: 青海高等职业技术学院科研项目经费资助项目 (GZYKY202302)。

作者简介: 郭钊 (1972—), 男, 青海省海东市人, 教师。主要研究方向: 焊接技术应用教育教学。通信地址: 青海省海东市乐都区文教路; E-mail: 1183781578@qq.com。