

# 2024铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头热循环及组织特征

冯家铖<sup>1,2</sup>, 宫文彪<sup>1,2,3</sup>, 鞠川<sup>4</sup>, 李于朋<sup>1,2</sup>, 孙雨萌<sup>1,2</sup>, 朱芮<sup>1,2</sup>

(1. 长春工业大学先进结构材料教育部重点实验室, 长春 130012; 2. 长春工业大学材料科学与工程学院, 长春 130012; 3. 吉林省泰浩轨道客车装备有限公司, 长春 130500; 4. 枣庄学院, 山东 枣庄 277000)

**摘要:** 采用双轴肩搅拌摩擦焊(Bobbin tool friction stir welding, BT-FSW)对4 mm厚2024铝合金进行焊接, 研究了焊接热循环温度对焊缝组织与性能的影响。结果表明: 后退侧峰值温度高于前进侧, 温度差约为20 °C; 焊核区平均晶粒尺寸为10.1 μm, 后退侧各区域平均晶粒尺寸大于前进侧, 小角度晶界占比小于前进侧; 焊核区形成了细小的沉淀相S相, 热影响区沉淀相数量减少和尺寸的增加导致力学性能下降; 接头显微硬度呈“W”型分布, 后退侧热机影响区与热影响区交界处硬度值最小, 约为72.3 HV。

**关键词:** 金属材料; 2024铝合金; 双轴肩搅拌摩擦焊; 热循环; 组织及性能

**中图分类号:** TG453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3184-08

**DOI:** 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20230054

## Thermal cycle and microstructures characteristic of bobbin tool friction stir welded 2024 aluminum alloy

FENG Jia-cheng<sup>1,2</sup>, GONG Wen-biao<sup>1,2,3</sup>, JU Chuan<sup>4</sup>, LI Yu-peng<sup>1,2</sup>, SUN Yu-meng<sup>1,2</sup>, ZHU Rui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Structural Materials, Ministry of Education, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 3. Jilin Province Taihao Railway Vehicles Facilities Co., Ltd., Changchun 130500, China; 4. Zaozhuang University, Zaozhuang 277000, China)

**Abstract:** Bobbin tool friction stir welding (BT-FSW) was used to weld 2024 aluminum alloy with thickness of 4 mm, and the effect of thermal cycle temperature on the microstructure and mechanical properties of the joint was analyzed. The results show that the peak temperature on the Retreating Side (RS) is higher than that on the advancing side (AS), with a temperature difference of about 20 °C. The average grain size in the stir zone (SZ) is 10.1 μm, the average grain size in each region on the RS is larger than that of the AS, and the proportions of small-angle grain boundaries is smaller than that on the AS. The fine S-phase precipitates are formed in the SZ, reduced number and increased size of precipitates in the heat affected zone (HAZ) resulting in the mechanical properties are reduced. The hardness of the joint is

收稿日期: 2023-01-17.

基金项目: 吉林省科技厅项目(20220201031GX).

作者简介: 冯家铖(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 材料先进连接技术. E-mail: Fengjc1208@163.com

通信作者: 宫文彪(1966-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 焊接及材料表面热喷涂改性. E-mail: gwbiao@163.com

distributed in a "W" shape, with the smallest hardness value of approximately 72.3 HV at the junction of the thermal-mechanically affected zone (TMAZ) and the HAZ on the RS.

**Key words:** metallic materials; 2024 aluminum alloy; bobbin tool friction stir welding; thermal cycle; the microstructure and mechanical properties

## 0 引言

2024 铝合金由于具有强度高、硬度大及可热处理强化的优点,在航天航空、船舶等行业广泛用于制作各种高负荷的零件和构件。采用常规熔化焊方法,接头中的气孔、裂纹等问题很难避免<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着单轴肩搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)的研究与应用的深入,上述铝合金的焊接性问题得到了很好的解决<sup>[2]</sup>。但是单轴肩 FSW 在实际应用中也带来了另外的问题,如薄板焊接时在根部易产生未焊透或过度焊透而将母材焊接在垫板上;无支撑筋板中空型材无法采用单轴肩 FSW 进行焊接等问题。为了解决这些问题,近年来双轴肩搅拌摩擦焊(Bobbin tool friction stir welding, BT-FSW)的研究与应用受到广泛关注<sup>[4,5]</sup>,在焊接过程中,上下两个轴肩随搅拌针旋转并与焊接金属相互作用形成致密焊缝<sup>[6-8]</sup>,下轴肩不仅起到刚性支撑作用,还提供了额外的摩擦热源<sup>[9]</sup>,很好地解决了单轴肩 FSW 接头根部弱连接缺陷<sup>[10-12]</sup>。

BT-FSW 虽然是在材料固相线以下实现连接,但其本质仍是热-机耦合作用的结果,因此,关于 BT-FSW 焊接过程中的热传导问题仍然是研究重点<sup>[13]</sup>。Trueba 等<sup>[14]</sup>通过红外热像仪测量 6061-T6 铝合金 BT-FSW 温度场时发现热输入量随着转速的加快而增大且接头内部缺陷增多,后退侧温度高于前进侧。由于非接触检测法仅能表征工件表面焊接温度,无法测量工件的内部温度。钮旭晶等<sup>[15]</sup>基于材料的热弹塑性,采用有限元分析法探究 6005A-T6 铝合金 BT-FSW 温度场分布规律,结果表明:焊接温度场沿接头厚度方向对称分布,接头峰值温度约为 520 °C;李于朋等<sup>[16]</sup>利用热电偶测量 6082-T6 铝合金 BT-FSW 过程中特征点瞬时温度,研究发现后退侧温度高于前进侧,温度差值约为 20 °C,随着转速加快,焊接升温速率先升高后降低。为进一步研究焊接温度场与接头组织及性能间的关系,Fuse 等<sup>[17]</sup>分析了在室温(NAC)、水雾(S-RM)、冰水雾喷洒(S-

IM)和室温循环水冷却(CR-J)4种不同条件下 6061-T6 铝合金 BT-FSW 接头的温度场、组织和力学性能,对比 NAC 发现,采用 S-RM、S-IM 和 CR-J 技术可以有效降低焊接峰值温度,晶粒尺寸由 18.68 μm 减小至 10.69 μm,抗拉强度增加至 189.16 MPa。为分析搅拌针形状对焊接温度场分布的影响,Ahmed 等<sup>[18]</sup>使用 3 种不同形状(方形、圆柱形、三角形)搅拌针对 10 mm 厚的 AA1050-H14 搭接接头进行双轴肩搅拌摩擦焊接,结果表明:使用方形搅拌针时,焊核区可获得最高的焊接温度;使用三角形搅拌针时,前进侧温度高于后退侧温度且软化区宽度随焊接速度的增加而减小。Wang 等<sup>[19]</sup>在焊速为 200 mm/min 和 400 mm/min 条件下获得 2219-T87 铝合金 BT-FSW 接头,对比发现随着焊接速度的加快,接头疲劳性能明显增强,疲劳强度达到母材的 78%。

上述 BT-FSW 温度场的研究多集中于 6××× 系铝合金,关于 2××× 系铝合金 BT-FSW 的研究仍关注于工艺参数对接头组织性能的影响,而接头的组织结构本质上与焊接热输入有关,目前对于 Al-Cu-Mg 系的 2024 铝合金 BT-FSW 焊接温度场的研究还未见报道,具体的热循环特征还不清楚。因此,开展该系合金的 BT-FSW 的研究具有一定的理论和工程价值。本文以 4 mm 厚的 2024 铝合金 BT-FSW 焊接接头为研究对象,分析了其焊接热循环与组织性能的关系。

## 1 试验方法

试验选用 400 mm × 150 mm × 4 mm 的 2024 铝合金为基材,以对接形式装夹,焊接用的双轴肩搅拌头上下轴肩直径均为 16 mm,搅拌针外侧有三组互成 120° 角的切面,轴肩端面为内凹阿基米德螺旋线槽。在前期试验基础上选取主轴旋转速度为 1 000 r/min,焊接速度为 500 mm/min 的工艺参数进行焊接。采用 K 型铠装热电偶(测温范围为 -50~850 °C)测量焊接过程中的温度变化情况,测温点沿焊缝对称分布,如图 1 所示。各测温点预加工深度为 2 mm 的孔,将热电偶埋入孔中

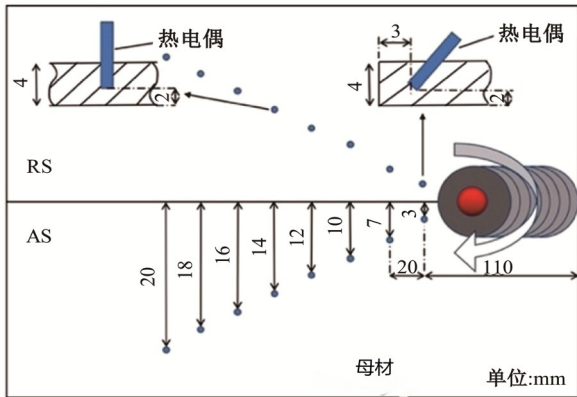


图 1 焊接热循环温度测量位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the welding thermal cycle temperature measurement position

并用高温固溶胶密封,测温开始前先预焊 110 mm,待焊缝成形稳定后用 RX4008BJL 型记录仪开始记录各测温点温度。焊后用线切割垂直焊接方向截取试样,采用 10% HClO<sub>4</sub> 溶液对试样进行电解抛光,电压为 15 V,电解时间为 15 s,利用电子背散射技术(Electron backscattered diffraction, EBSD)采用 ZEISS Supra40 型场发射扫描电镜观察抛光后试样截面各区域晶粒尺寸及晶粒取向分布情况。采用 FEI Talos F200s 透射电镜(Transmission electron microscope, TEM)分析接头微观结构。焊接接头的硬度分布采用 FM700 硬度仪测量,试验载荷为 100 gf,加载时间 10 s,测试位置距上表面 0.5、2、3.5 mm,如图 2 所示。

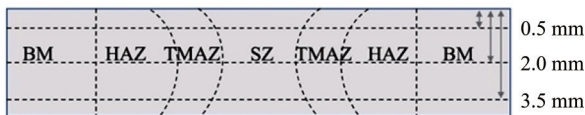


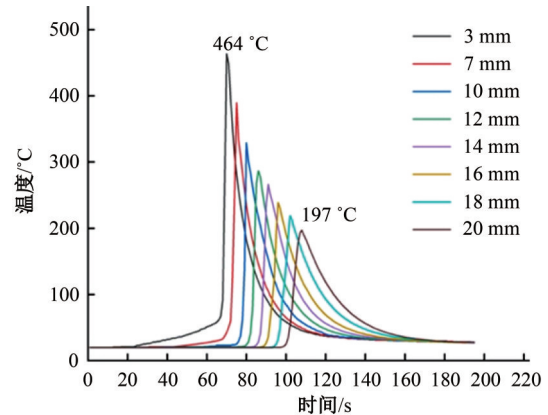
图 2 硬度测试位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hardness test position

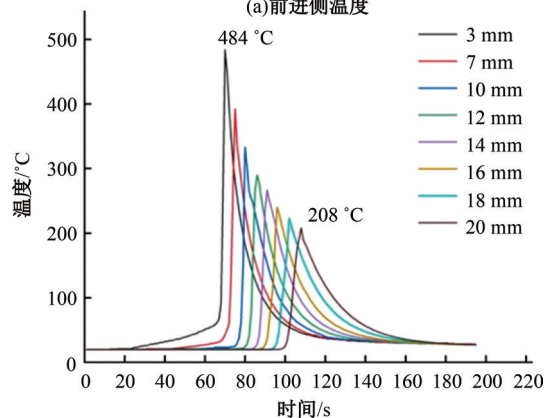
## 2 结果与分析

### 2.1 焊接热循环温度特性

图 3 为 2024 铝合金 BT-FSW 过程中焊接接头不同测温点的热循环温度曲线,从图中可以看出,各测温点在达到焊接峰值温度前的升温阶段曲线斜率均接近 90°,说明 BT-FSW 焊时温度升高极快,与单轴肩 FSW<sup>[20]</sup>不同,BT-FSW 后退侧(Retreating side, RS)峰值温度高于前进侧(Advancing side, AS),在距焊缝中心 3 mm 处分别达到 484 °C 和 464 °C,温差约为 20 °C;距焊缝中心 20 mm 处温度最低,分别为 208 °C 和 197 °C。产生这种现象的原因是在焊接过程中被焊金属处于悬空



(a)前进侧温度



(b)后退侧温度

图 3 各测温点焊接热循环温度曲线

Fig. 3 Temperature profile of the welding thermal cycle at each temperature measurement point

状态且只和上下轴肩接触,AS 塑性金属随着搅拌头的旋转迁移至 RS 的同时,部分热量也随塑化的金属转移至 RS 侧,而单轴肩 FSW 焊接时热量首先传递给刚性垫板,因此,BT-FSW 的 RS 温度高于 AS,这是 BT-FSW 和单轴肩 FSW 的重要区别。BT-FSW 焊接过程中的热量主要来源于轴肩、搅拌针与母材(Base metal, BM)间的摩擦热以及金属的塑性变形热,接头中心区域金属在搅拌头机械作用下发生塑性变形,塑性变形热的释放,叠加轴肩的摩擦热使得焊核区(Stir zone, SZ)峰值温度最高,热量向低温区传递时,与空气间存在辐射热的散失,导致热影响区(Heat affected zone, HAZ)峰值温度低于焊缝中心处,BM 因距焊缝中心最远,因此,峰值温度最低。

### 2.2 接头组织

图 4(a)为焊缝横截面形貌,SZ 与前进侧热机影响区(Thermal-mechanically affected zone, TMAZ)分界明显,产生这一现象的原因是前进侧塑性金属流动方向与母材金属变形方向相反,

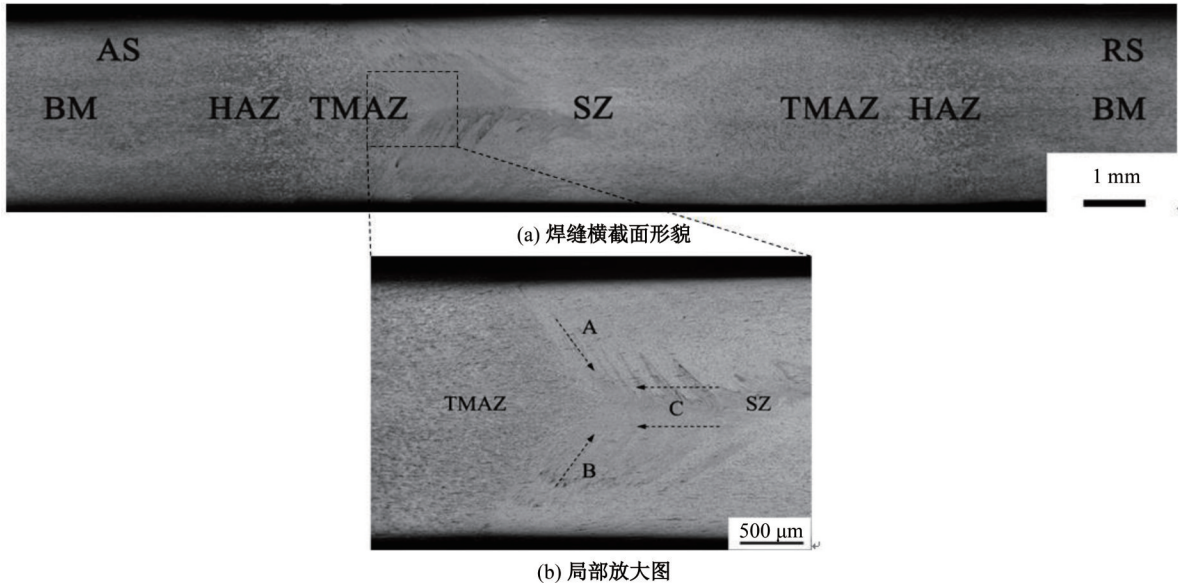


图 4 2024 铝合金 BT-FSW 焊接接头横截面形貌

Fig. 4 The cross-section morphology of 2024 aluminum alloy BT-FSW welded joint

两者之间存在相对变形差,而后进侧塑性金属流动方向与母材金属的变形方向相同,焊缝塑性金属过渡平滑<sup>[21,22]</sup>。此外,在SZ与AS-TMAZ交界处有灰白色条带状组织生成,对该区域放大观察,如图4(b)所示,该区域组织由A、B、C三个区域塑性金属聚集形成。焊接过程中,A、B区域的金属首先吸收轴肩的摩擦热发生塑性变形,在轴肩约束下向中心迁移,同时搅拌针直接作用的C区域塑性金属在搅拌针的带动下做近似圆周运动,最终和A、B区域迁移的塑性金属在交界处形成特殊的具有方向性的条带状结构。

图5为接头各区域组织的EBSD取向成像图。图5(a)为BM的取向成像图,平均晶粒尺寸为 $29.3\ \mu\text{m}$ 。SZ[见图5(b)]由于受到热-机耦合作用的影响,发生了剧烈的塑性变形,再结晶后形成了均匀细小的等轴晶粒,平均尺寸为 $10.1\ \mu\text{m}$ ;图5(c)(d)分别为AS和RS的TMAZ组织,由于受到搅拌针的机械作用和焊接热循环的影响,晶粒发生了不同程度的弯曲和长大,AS-TMAZ平均晶粒尺寸为 $16.2\ \mu\text{m}$ ,RS-TMAZ平均晶粒尺寸为 $19.1\ \mu\text{m}$ ;图5(e)(f)分别为AS-HAZ和RS-HAZ组织,该区域只受热循环影响,组织仍保持BM轧制态形貌,但晶粒有所长大,由于RS温度高于AS温度,RS金属的高温停留时间长,晶粒受热发生长大使得RS各区域晶粒尺寸均大于

AS,AS-HAZ平均晶粒尺寸为 $27.9\ \mu\text{m}$ ,RS-HAZ平均晶粒尺寸为 $30.8\ \mu\text{m}$ ,与温度场测量结果相符。图6为焊接接头各区域晶界取向角分布图。图6(a)显示BM在轧制过程中由于发生了大量的塑性变形,生成了小角度晶界、亚晶界和位错,经过BT-FSW加工后,SZ内的亚晶界在再结晶过程中持续吸收位错,取向差相近的亚晶粒逐渐合并成一个大的亚晶粒,最终小角度晶界转变为大角度晶界,然而SZ在焊后冷却过程中位错交互作用又会形成新的小角度晶界,经计算SZ小角度晶界所占比例仅为 $6.79\%$ ,如图6(b)所示。对比图6(c)(d)(e)(f)发现,RS-TMAZ和HAZ小角度晶界占比小于AS,这是由于焊接过程中RS温度高于AS,较高的峰值温度和较长的高温停留时间使得部分小角度晶界吸能后转变为大角度晶界,越靠近SZ的区域小角度晶界的占比越低。

2024铝合金的性能与沉淀相的大小、类型及密度有关<sup>[23]</sup>。图7为BT-FSW接头各区域TEM明场像,如图7(a)所示,BM晶粒内部存在大量胶囊状第二相和少量的板条状沉淀相S相( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ),S相尺寸约为 $100\ \text{nm}$ ,根据相关文献的研究<sup>[24]</sup>,确定第二相为与基体共格的T相( $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ ),T相可以阻碍晶界滑移,提高BM的力学性能。由前文可知,焊接峰值温度为 $484\ ^\circ\text{C}$ ,而S相溶解温度为 $510\ ^\circ\text{C}$ <sup>[25]</sup>,大量的塑性

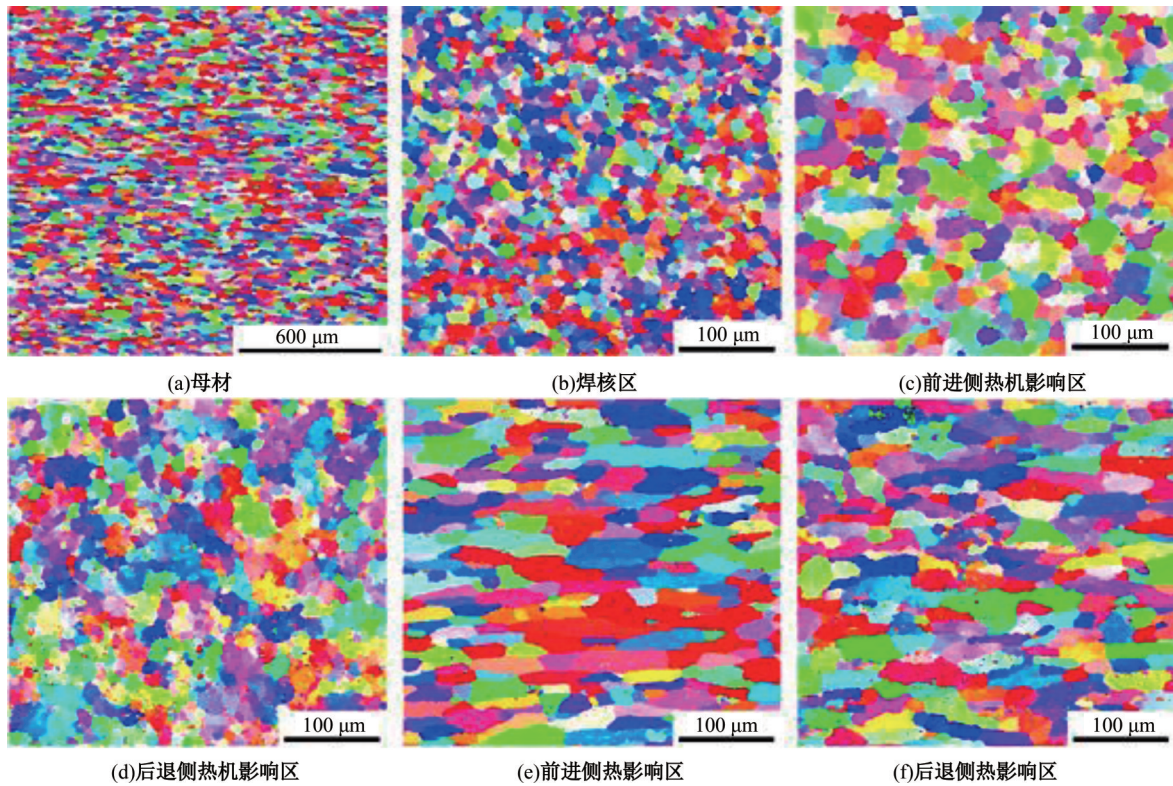


图 5 2024 铝合金 BT-FSW 接头 EBSD 取向成像

Fig. 5 EBSD morphology of the 2024 aluminum alloy BT-FSW joint

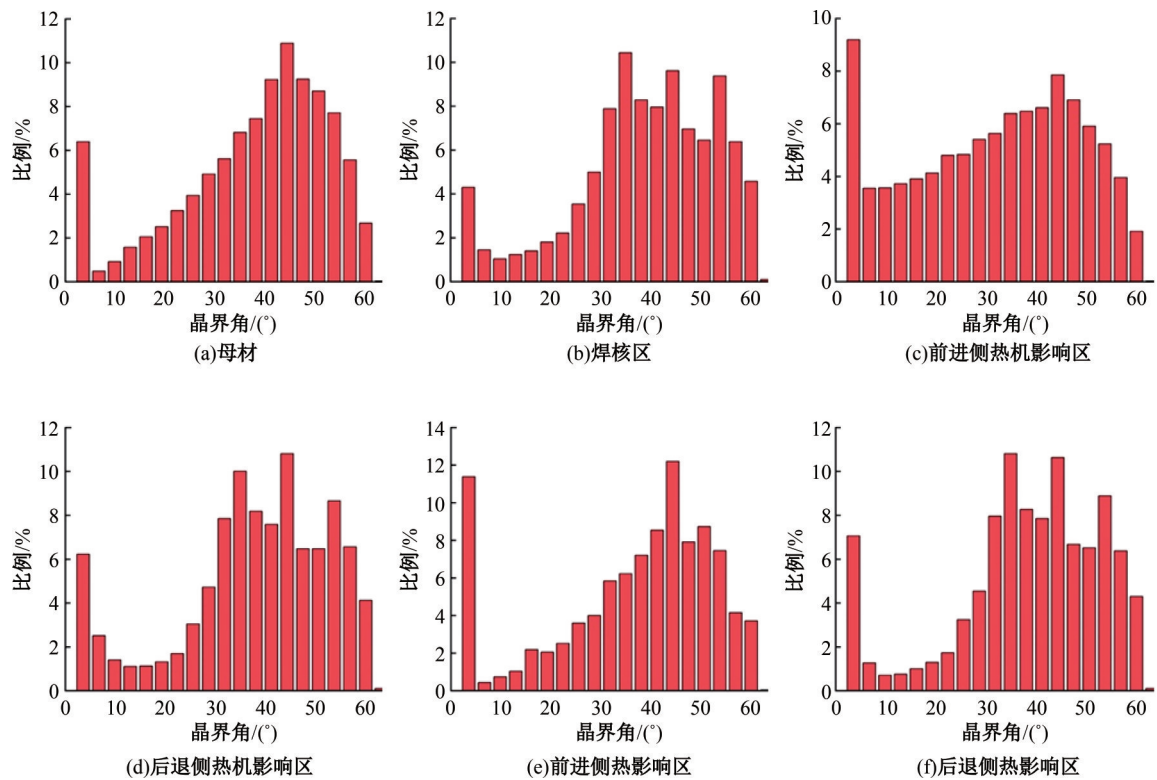


图 6 2024 铝合金 BT-FSW 接头晶界取向角分布

Fig. 6 Grain boundary misorientation distribution of the 2024 aluminum alloy BT-FSW joint

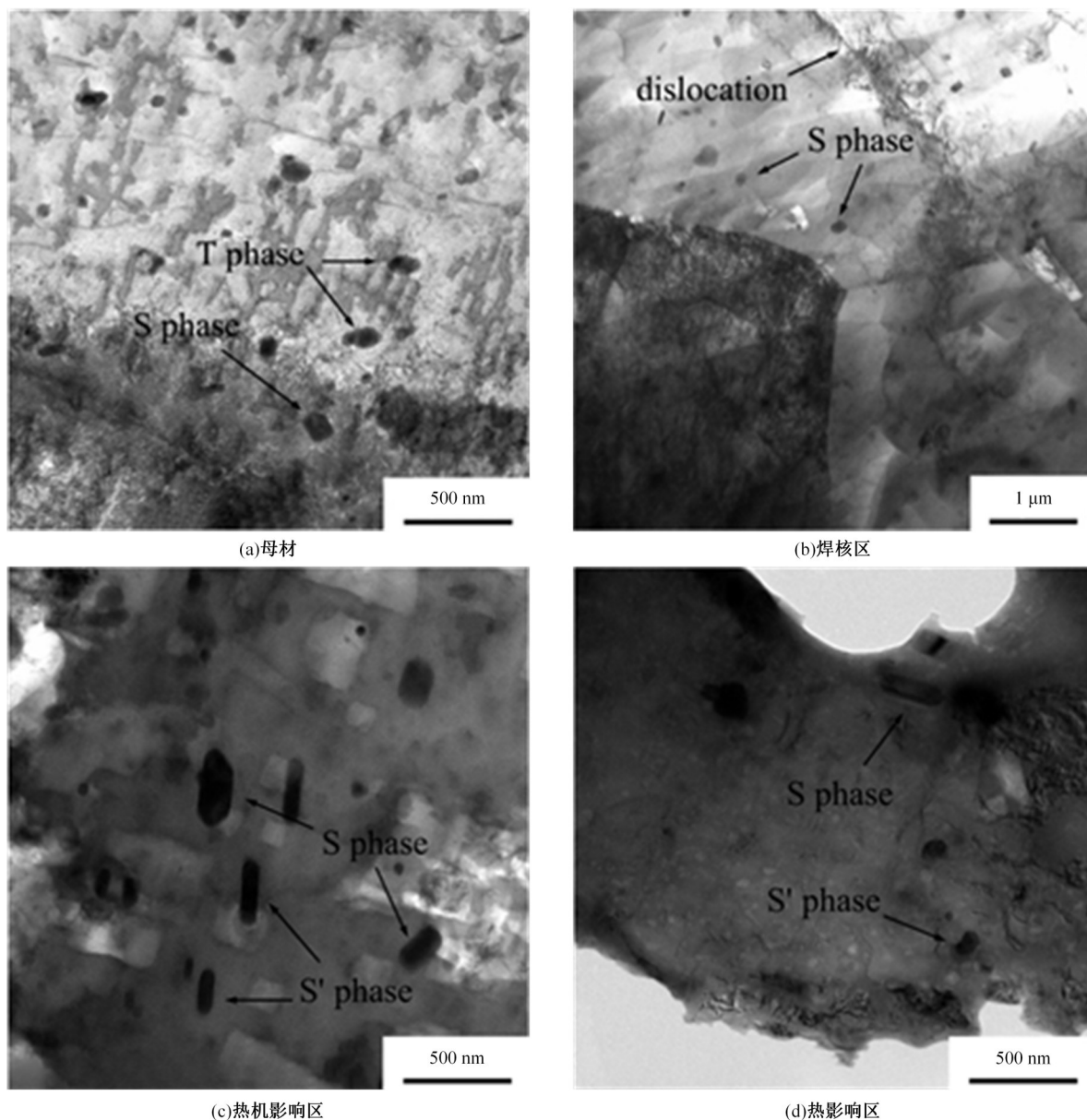


图 7 2024 铝合金 BT-FSW 接头 TEM 明场像

Fig. 7 TEM image and selected area electron diffraction pattern of the 2024 aluminum alloy BT-FSW joint

变形使得 SZ 晶粒细化的同时还形成了更高的位错密度以及更细小的沉淀相 S 相,如图 7(b)所示。S'相和 S 相生成温度为  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[25]</sup>,随着温度的升高,S 相的尺寸增大,故在 TMAZ 析出板条状 S'相和粗大的 S 相(见图 7(c)),相关研究<sup>[24]</sup>表明:S'相与铝基体呈半共格关系,S 相与基体呈非共格关系。图 7(d)为 HAZ 的 TEM 明场像,由于 HAZ 温度较低,该区域仅析出少量的 S'相和 S 相,析出相的强化效果较弱,该区域成为力学性能较薄弱的部位。

### 2.3 接头显微硬度

图 8 为接头横截面不同厚度层的硬度分布图,接头横截面硬度分布均为典型的“W”型,三条硬度曲线显示,不同厚度处的硬度变化趋势相同,除 BM 外,SZ 硬度最高,约为  $83.1\text{ HV}$ ,RS-TMAZ 与 HAZ 交界处硬度值最小,约为  $72.3\text{ HV}$ ,由前述微观结构可知,焊接高温热循环及搅拌针机械搅拌的双重作用使得 SZ 内的 T 相溶于基体,但位错密度显著增加,并且弥散分布的沉淀相和细晶组织的高密度晶界均会提高该区的硬度,因此,SZ 硬度略低于 BM,而高于其他区域。由于 RS 峰值温度高于 AS,导致 RS 区域沉淀相

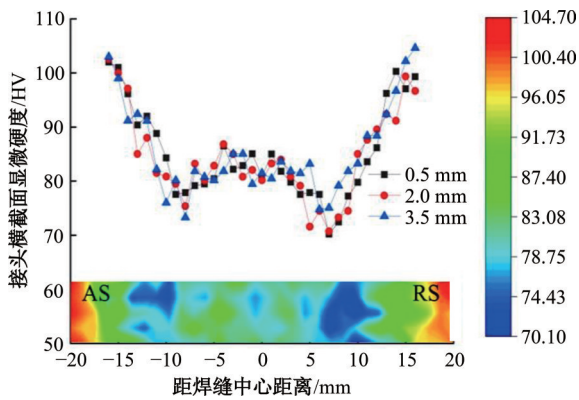


图8 2024铝合金BT-FSW接头横截面不同厚度层显微硬度分布

Fig. 8 Distribution of microhardness of different thickness layers in the cross-section of the 2024 aluminum alloy BT-FSW joint

尺寸增加,强化效果减弱,同时晶粒更为粗大,使得RS-TMAZ与HAZ交界处力学性能下降。

### 3 结 论

(1)在本实验条件下进行2024铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接时发现:接头前进侧焊接峰值温度为464℃,后退侧为484℃,后退侧各特征点峰值温度高于前进侧,随着距焊缝中心距离的增加,焊接峰值温度呈下降趋势。

(2)接头焊核区呈细小等轴状晶粒,平均晶粒尺寸为10.1 μm,小角度晶界占比为6.79%,后退侧热机影响区与热影响区的晶粒尺寸和大角度晶界占比均高于前进侧;受焊接热的影响,焊核区内析出S相,热机影响区存在板条状S'相和粗大的S相,热影响区内部仅有少量的S'相和S相。

(3)焊接接头硬度呈“W”型分布且无各向异性,焊核区硬度约为83.1 HV,后退侧热机影响区与热影响区交界处硬度最低,约为72.3 HV。

#### 参考文献:

- [1] 虞文军, 陈静. 国产2024铝合金不同连接工艺下组织和性能的研究[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 31-34.  
Yu Wen-jun, Chen Jing. Investigation of 2024 Al-alloy welding joint of different welding technology [J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 31-34.
- [2] 马小革. AA7050/AA2024异种铝合金搅拌摩擦焊疲劳特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学航空航天工程学院, 2013.  
Ma Xiao-ge. Research on fatigue properties of friction stir welding AA7050/AA2024 aluminum alloys [D]. Shenyang: School of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, 2013.
- [3] 桂兵, 张栋梁. 中厚板2024铝合金MIG焊工艺研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(8): 46-48.  
Gui Bing, Zhang Dong-liang. Study on MIG welding process of 2024 aluminum alloy for medium thickness plate[J]. Welding Technology, 2018, 47(8): 46-48.
- [4] 郝云飞, 魏瑞刚, 周庆, 等. 焊接热输入对铝合金双轴肩搅拌摩擦焊缝形貌与接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 84-88.  
Hao Yun-fei, Wei Rui-gang, Zhou Qing, et al. Effect of heat input on weld morphology and tensile properties of bobbin friction stir welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 84-88.
- [5] 张会杰, 王敏, 张骁, 等. 2A14-T6铝合金双轴肩搅拌摩擦焊特征及接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 65-68.  
Zhang Hui-jie, Wang Min, Zhang Xiao, et al. Characteristics and joint microstructure-property analysis of bobbin tool friction stir welding of 2A14-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 65-68.
- [6] Fuse K, Badheka V. Bobbin tool friction stir welding: a review[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2018, 24(4): 277-304.
- [7] Wang F F, Li W Y, Shen J J, et al. Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy[J]. Materials & Design, 2015, 86(5): 933-940.
- [8] Xu W F, Luo Y X, Fu M W. Microstructure evolution in the conventional single side and bobbin tool friction stir welding of thick rolled 7085-T7452 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2018, 138(4): 48-55.
- [9] 李敬勇, 周小平, 董春林, 等. 6082铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场研究[J]. 航空材料学报, 2013, 33(5): 36-40.  
Li Jing-yong, Zhou Xiao-ping, Dong Chun-lin, et al. Temperature fields in 6082 aluminum alloy samples bobbin-tool friction stir welded[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(5): 36-40.
- [10] 吉华, 邓运来, 邓建峰, 等. 焊接速度对6005A-T6铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 24-29.  
Ji Hua, Deng Yun-lai, Deng Jian-feng, et al. Effect of welding speed on mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 6005A-T6 aluminum alloy

- joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 24-29.
- [11] 戴忠晨,云中煌,付宁宁,等. 5 mm 厚 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头的组织及性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(2): 69-73.  
Dai Zhong-chen, Yun Zhong-huang, Fu Ning-ning, et al. Microstructure and properties of bobbin tool friction stir welded joint of 5 mm thick 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(2): 69-73.
- [12] 王春桂,赵运强,董春林,等. 6063-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 108-112.  
Wang Chun-gui, Zhao Yun-qiang, Dong Chun-lin, et al. Analysis on microstructure and mechanical properties of 6063-T6 self-reacting friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 108-112.
- [13] Threadgill P L. Friction stir welding-state of the art [R]. Industrial Member Report, 1999.
- [14] Trueba L, Torres M A, Johannes L B, et al. Process optimization in the self-reacting friction stir welding of aluminum 6061-T6[J]. International Journal of Material Forming, 2017, 11(4): 559-570.
- [15] 钮旭晶,侯振国,鲁二敬,等. 标动铝合金底板双轴肩搅拌摩擦焊的数值仿真[J]. 轨道交通装备与技术, 2019, 2019(6): 26-30.  
Niu Xu-jing, Hou Zhen-guo, Lu Er-jing, et al. Numerical simulation of FSW with double probes for base board of standard EMU[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2019, 2019(6): 26-30.
- [16] 李于朋,孙大千,宫文彪. 6082-T6 铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊温度场[J]. 吉林大学学报:工学版, 2019, 49(3): 836-841.  
Li Yu-peng, Sun Da-qian, Gong Wen-biao. Temperature fields in bobbin-tool friction stir welding for 6082-T6 aluminum alloy sheet[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 836-841.
- [17] Fuse K, Badheka V. Hybrid self-reacting friction stir welding of AA6061-T6 aluminium alloy with cooling assisted approach[J]. Metals, 2020, 11(1): 11010016.
- [18] Ahmed M M Z, Habba M M A, Elsayed M M, et al. Bobbin tool friction stir welding of aluminum thick lap joints: effect of process parameters on temperature distribution and joints' properties[J]. Materials, 2021, 14(16): 14164585.
- [19] Wang Z, Zhang B, Zhang Z, et al. Enhanced fatigue properties of 2219 Al alloy joints via bobbin tool friction stir welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 36: 586-596.
- [20] Zhu R, Gong W B, Cui H. Temperature evolution, microstructure, and properties of friction stir welded ultra-thick 6082 aluminum alloy joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(1/2): 331-343.
- [21] 刘西畅,李文亚,高彦军,等. 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊过程材料流动行为[J]. 焊接学报, 2021, 42(3): 48-56.  
Liu Xi-chang, Li Wen-ya, Gao Yan-jun, et al. Material flow behavior during bobbin-tool friction stir welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(3): 48-56.
- [22] Scialpi A, Filippis D, Cavaliere P. Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy [J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1124-1129.
- [23] Lin Y C, Xia Y C, Jiang Y Q, et al. Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 565: 420-429.
- [24] 吕可欣. 2xxx 系铝合金主要强化相的微观结构研究 [D]. 上海:上海交通大学材料科学与工程学院, 2019.  
Lyu Ke-xin. Study on microstructure of main strengthening phases of 2xxx aluminum alloy[D]. Shanghai: School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [25] Fu R D, Zhang J F, Li Y J, et al. Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 559: 319-324.