

# 2024-T4 超薄铝合金机器人搅拌摩擦焊接头组织及力学性能

王春桂<sup>1</sup>, 赵运强<sup>1</sup>, 邓军<sup>1,2</sup>, 董春林<sup>1</sup>, 尤佳庆<sup>1,3</sup>

(1. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东省现代焊接重点实验室, 广州, 510651; 2. 广东省机器人数字化智能制造技术企业重点实验室, 广州, 510553; 3. 沈阳工业大学, 沈阳, 110870)

**摘要:** 机器人作为搅拌摩擦焊系统的载体时, 由于其关节采用串联模式进行连接, 在焊接过程中关节易发生变形, 而变形的释放会导致焊漏等缺陷, 制约了机器人搅拌摩擦焊系统在超薄板焊接过程中的应用。针对上述问题, 文中对 0.5 mm 厚超薄 2024-T4 铝合金板进行了机器人搅拌摩擦焊工艺研究。结果表明, 增加下压量或提高主轴转速成功实现薄板铝合金焊接, 在主轴转速为 2 500 r/min, 焊接速度为 600 ~ 1 000 mm/min 工艺参数内, 接头强度呈现升高趋势, 最高可达 408 MPa, 达到母材 90%。接头硬度呈双“W”形分布, 其断裂形式为韧性断裂。

**创新点:** (1) 采用机器人搅拌摩擦焊实现了 0.5 mm 厚超薄铝合金的焊接。

(2) 分析了超薄铝合金搅拌摩擦焊接头成形、微观组织及力学性能特点。

**关键词:** 机器人搅拌摩擦焊; 超薄铝合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 453.9

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20201208002

## 0 序言

经过多年的发展, 搅拌摩擦焊技术 (friction stir welding, FSW) 越来越受到工业技术领域的重视, 在航空航天、船舶、电子等行业都已经获得广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。其作为一种固相焊接技术, 具有焊接效率高、热输入小、焊接变形小的特点<sup>[5]</sup>。目前搅拌摩擦焊主要适用于 1 ~ 6 mm 中厚板铝合金, 此厚度区间内板材具有较大的刚度, 焊接过程中焊接属不易发生屈服, 薄板的搅拌摩擦焊主要适用于 0.7 ~ 1 mm 厚度区间; 而 0.5 mm 以下的超薄铝合金目前研究较少<sup>[6-8]</sup>。

超薄铝合金在轨道列车的侧墙、地板、蒙皮、枕梁上已经得到了应用, 它的应用显著减轻列车的重量; 同样在汽车行业, 轻量化概念及节能减排的提出, 对于超薄板的普及应用至关重要。铝合金车身是目前汽车发展的方向, 超薄铝合金代替钢或其它

普通铝合金可大大减轻汽车重量, 从而达到节能减排的作用<sup>[9-10]</sup>。

在上述高端制造业中, 空间结构的焊接需求越来越多, 但是传统搅拌摩擦焊接设备无法满足需求, 而机器人自由度高, 与搅拌摩擦焊结合可充分发挥其优点, 不但可以实现空间结构的焊接, 而且可以极大的提高焊接效率, 实现与冲压、装配等工位自动化配合, 提高搅拌摩擦焊的自动化水平<sup>[11-13]</sup>。

采用 0.5 mm 厚 2024-T4 超薄铝合金为研究对象, 并采用自主开发的机器人搅拌摩擦焊系统进行焊接。由于机器人关节采用串联模式进行连接, 焊接过程中关节易发生变形, 而变形的释放, 会出现焊漏等情况, 限制了机器人搅拌摩擦焊在铝合金超薄板中的应用。

针对上述问题, 结合搅拌摩擦焊在铝合金焊接中的优势, 通过对 0.5 mm 厚 2024-T4 铝合金进行了机器人搅拌摩擦焊, 并对焊缝成形、接头微观组织和力学性能进行分析, 揭示超薄铝合金的搅拌摩擦焊焊接工艺机理, 并对机器人搅拌摩擦焊特征进行了分析, 为超薄板在实际生产过程中的应用提供理论指导。

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 国家重点研究计划 (2018YFB1306404); 国家自然科学基金资助项目 (51905112); 广州市科技计划项目 (201807010063); 广东经济技术开发区国际科技合作项目 (2019GH15)。

## 1 试验方法

试验件尺寸为  $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 其化学成分及力学性能如表 1 所示。2024-T4 铝合金是可热处理强化铝合金, 其强化相为  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  及  $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ <sup>[14]</sup>, 试验采用广东省科学院中乌焊接研究所自行开发研制的机器人搅拌摩擦焊系统, 搅拌头尺寸为轴肩 8 mm, 针长 0.45 mm, 轴肩角度为  $3^\circ$ , 焊接时搅拌头角度为  $0^\circ$ , 焊前采用砂纸对试件表面进行打磨处理, 将表面氧化膜进行去除, 并用酒精将表面油污清除, 试验采用

主轴转速为 500 r/min, 焊接速度为  $600 \sim 1000 \text{ mm/min}$ , 焊接过程中采用 HKM-SK1.0 力学传感器对焊接过程中作用力进行实时检测。焊后沿垂直焊缝方向采用线切割截取试样, 经打磨抛光后采用 Keller 试剂 ( $95 \text{ mL H}_2\text{O} + 2.5 \text{ mL HNO}_3 + 1.5 \text{ mL HCl} + 1.0 \text{ mL HF}$ ) 进行腐蚀处理, 采用 ArioImager M2 m 光学显微镜对接头的显微组织进行观察, 采用 HVS-1000 显微硬度仪对接头硬度分布进行测试, 采用 QuantaTM 250 扫描电镜对接头的晶粒分布等进行了分析, 采用拉伸机对接头抗拉强度进行测试, 每个参数截取 3 个标准试样, 以其平均值为评价标准。

表 1 2024-T4 铝合金化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 2024-T4 aluminum alloy

质量分数w(%)						抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$
Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al	
3.8~4.9	0.3~1	1.2~1.8	0.10	0.25	余量	450

## 2 试验结果及分析

### 2.1 机器人搅拌摩擦焊特性

为了研究设定下压量与实际下压量的关系, 采用主轴转速为 2500 r/min、下扎速度为 20 mm/min, 扎入下压量分别为 0.2 与 0.35 mm 进行焊接, 扎入停留 1 s 后搅拌头抬起, 将匙孔从中间切开后观察其宏观形貌, 如图 1 所示, 当下压量为 0.2 mm 时, 板材尚有 0.1 mm 尚未焊透, 图 1a; 当下压量增加到 0.35 mm 时, 板材实现扎透, 图 1b.

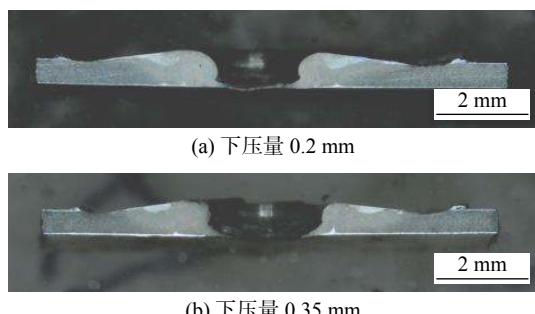


图 1 匙孔宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of keyhole. (a) plunge depth 0.2 mm; (b) plunge depth 0.35 mm

由于机器人为关节串联式结构, 关节间采用电机驱动连接, 在焊接作用力下, 各关节间易发生变形, 因此下压量与设定下压量存在偏差, 当其设定

0.35 mm 大于其理论焊透值 0.15 mm 时才能实现焊透, 并且此设定值会随着板子厚度的增加而增加。

采用压力传感器对焊接过程中的压力变化进行采集, 压力传感器采集速度为 0.25 s, 得到的趋势如图 2 所示, 可分为扎入阶段、焊接阶段及结束阶段, 扎入阶段: 搅拌头与板材发生刚性接触, 随着搅拌头的下压, 压力持续增加, 当轴肩接触到板材时, 压力达到最大, 当搅拌头继续扎入时, 轴肩周围金属塑化, 压力减小; 焊接阶段: 搅拌针不断与焊接方向前方金属发生剪切变形, 前进阻力增加, 压力增大; 结束阶段: 焊接结束后, 搅拌针抬起, 压力减小。

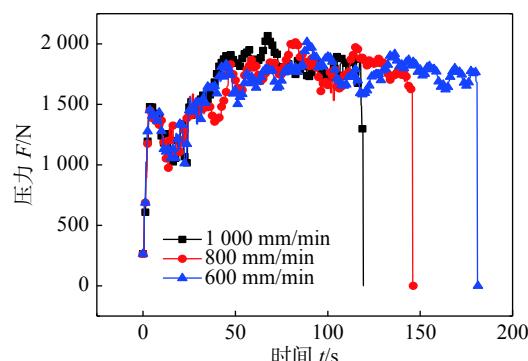


图 2 压力变化曲线

Fig. 2 Pressure curve

随着焊接速度从 600 mm/min 增加到 1000 mm/min, 其热输入减小, 金属塑化程度降低, 从

图 2 中可以看出, 其焊接作用力不断增加, 但在整个焊接阶段, 压力值波动较大, 表明其焊接过程呈不稳定状态, 其主要是因为当采用恒定下压量控制方式时, 搅拌工具与高低不一的金属发生摩擦, 导致金属的塑化程度不同, 引起的机器人关节形变的累积和释放不均匀, 从而使得压力产生较大波动。而超薄板采用恒压力控制模式时, 即使压力的轻微波动都易导致焊漏等缺陷, 只有采用超高精度的传感器才能解决此问题。

## 2.2 焊缝表面形貌

图 3 为不同焊接速度焊缝的表面成形, 在相同下压量及主轴转速下, 随着焊接速度从 600 mm/min 增大到 1 000 mm/min, 其热输入不断减小, 焊缝表面鱼鳞纹越明显; 在此工艺区间内可得到成形良好, 无缺陷的焊缝表面形貌。从图中可以看出在相同的下压量下, 随着焊接速度的减小, 其飞边越来越严重, 产生此现象主要原因是随着焊接速度减小, 热输入增加, 金属塑化程度提高, 机器人累积变形量得到释放, 从而使得扎入深度增加, 飞边更严重。

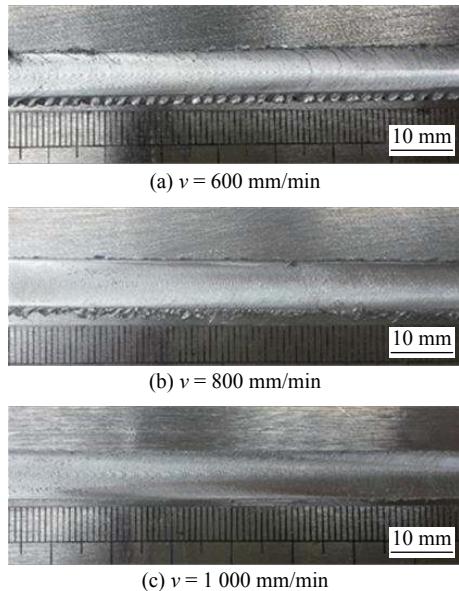


图 3 不同焊接速度焊缝表面成形

Fig. 3 Surface formation under different welding speed.  
(a)  $v = 600 \text{ mm/min}$ ; (b)  $v = 800 \text{ mm/min}$ ; (c)  $v = 1000 \text{ mm/min}$

## 2.3 微观组织

图 4 为焊后典型接头截面形貌, 焊缝区域可分为母材区、焊核区、热力影响区、热影响区及轴肩区, 因为采用大轴肩小针设计(轴肩尺寸约为针尺寸 20 倍), 焊核区只占整个焊接区域的 1/3, 热力影响区位于焊核区附近, 热影响区位于轴肩边缘处, 此处热量聚集区, 轴肩区位于焊核区与热影响区之



图 4 接头宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of the joint

间, 此区域轴肩与待焊板材表面摩擦产热, 并产生了 0.1 mm 的焊缝减薄。

对焊缝中不同位置的显微组织进行了观察(图 5), 母材区晶粒(图 5a)为典型的轧制状态组织, 晶粒沿轧制方向分布, 热影响区(图 5b)由于受到摩擦热的作用, 晶粒发生了长大; 轴肩区(图 5c)金属可分为上下两层, 上层金属与轴肩发生摩擦, 晶粒发生了剧烈的塑性变形和动态回复再结晶, 形成了细小的等轴晶组织, 并与焊核连为一个整体; 下层金属只受到热作用, 但热量通过超薄板与垫板之间紧

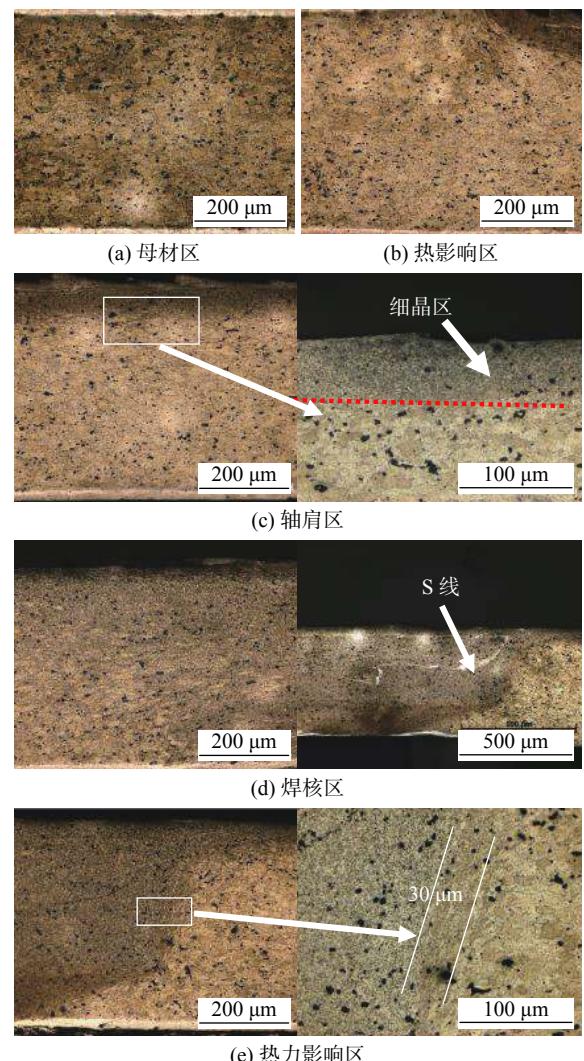


图 5 不同区域焊缝微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure morphology in different regions.  
(a) base material; (b) heat affected zone; (c) shoulder zone; (d) nugget zone; (e) thermal mechanical affected zone

密接触热量被迅速传递出去, 板材内部尚未达到晶粒变化的热力学条件, 下层金属的晶粒尺寸未发生明显变化。焊核区(图 5d)金属在搅拌针作用下发生了剧烈的塑行变形及动态再结晶, 形成了细小等轴晶; 而且在此区域内由于氧化物的聚集, 出现了“S”线。热影响区(图 5e)受到机械扭转力及焊接热作用, 晶粒发生了变形及长大, 此区域宽度为 30 μm, 并且由于金属是从后退侧填充到前进侧, 前进侧金属发生的变形更强烈, 在前进侧热影响区与母材的边界比后退侧更明显。

图 6 为不同区域的晶粒形貌及晶粒尺寸分布,

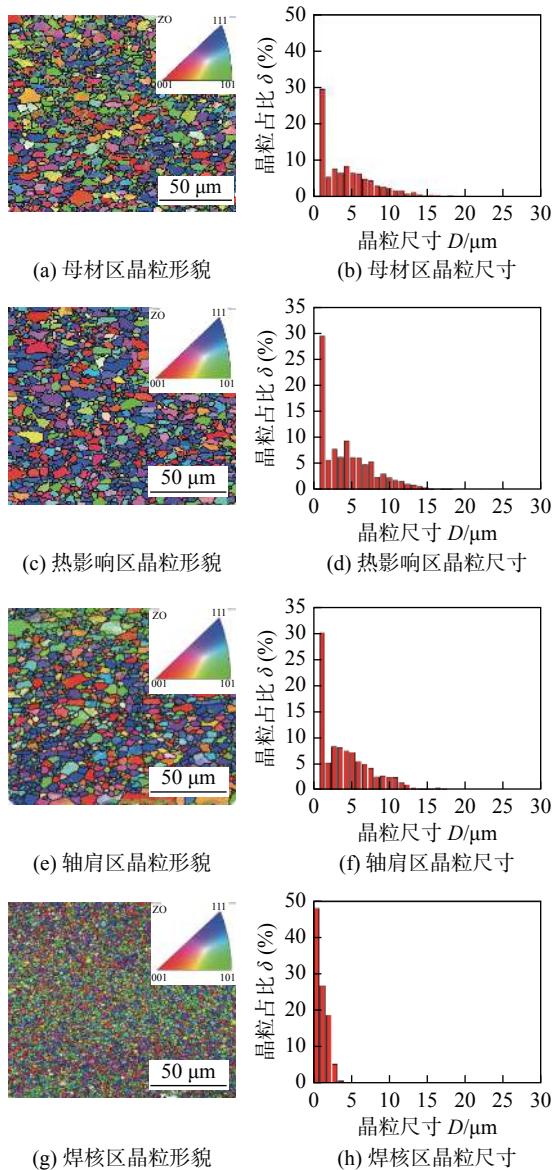


图 6 不同区域的晶粒形貌及晶粒尺寸分布

Fig. 6 Grain morphology and grain size distribution. (a) base material grain morphology; (b) base material grain size; (c) heat affected zone grain morphology; (d) heat affected zone grain size; (e) shoulder zone grain morphology; (f) shoulder zone grain size; (g) nugget zone grain morphology; (h) nugget zone grain size

母材区、热影响区、轴肩区及焊核区平均晶粒尺寸分别为 5.93, 7.14, 5.74, 1.67 μm; 晶粒大小与前面分析一致; 在焊核区, 晶粒呈细小等轴状。

## 2.4 力学性能

图 7 为不同工艺参数下接头的硬度分布, 其硬度分布呈现双“W”形分布, 其中硬度低点位于焊核区及热影响区为 132 HV0.5, 高点位于轴肩区为 147 HV0.5。

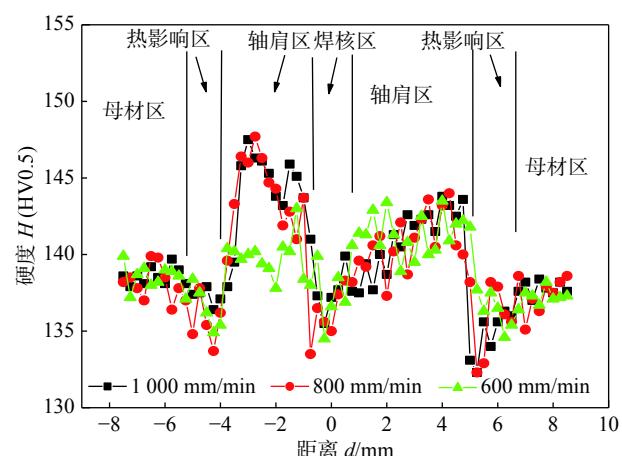


图 7 硬度分布

Fig. 7 Hardness distribution

对母材区、轴肩区、热影响区及焊核区晶粒间取向差分布进行统计: 大于 2° 的为高角晶, 小于 2° 的为小角晶。从图 8a 和图 8c 中可以看出, 在母材区和轴肩区, 小角晶占比高, 此区域其位错密度高, 阻碍了晶界的滑移, 因此其强度高。轴肩区金属在轴肩的锻压作用下温度迅速升高, 但薄板与金属垫板贴合, 散热较快, 焊后金属快速降温, 固溶相溶解度迅速降低, 从图 9b 中可以看出, 轴肩区 Cu 元素发生了聚集, 为析出的第二相颗粒  $\text{Al}_2\text{Cu}$  及  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , 并且轴肩的锻压作用使小角晶界增加, 第二相颗粒及位错密度的增加使搅拌区硬度高于母材区。

热影响区(图 8b)金属在焊接热循环作用下晶粒发生了长大, 小角晶转换为高角晶, 高角晶比例占比高, 位错密度低; 从图 9a 可以看出, Cu 元素在热影响区内分布均匀无聚集, 其第二相颗粒在热循环下发生了溶解。因此在热影响区其硬度低。

焊核区(图 8d)金属在搅拌针机械作用下发生动态回复再结晶, 小角晶界转换为高角晶界, 位错密度降低; Cu 元素在此区域内呈均匀分布(图 9c), 说明第二相颗粒在热循环中被溶解。根据 hall-

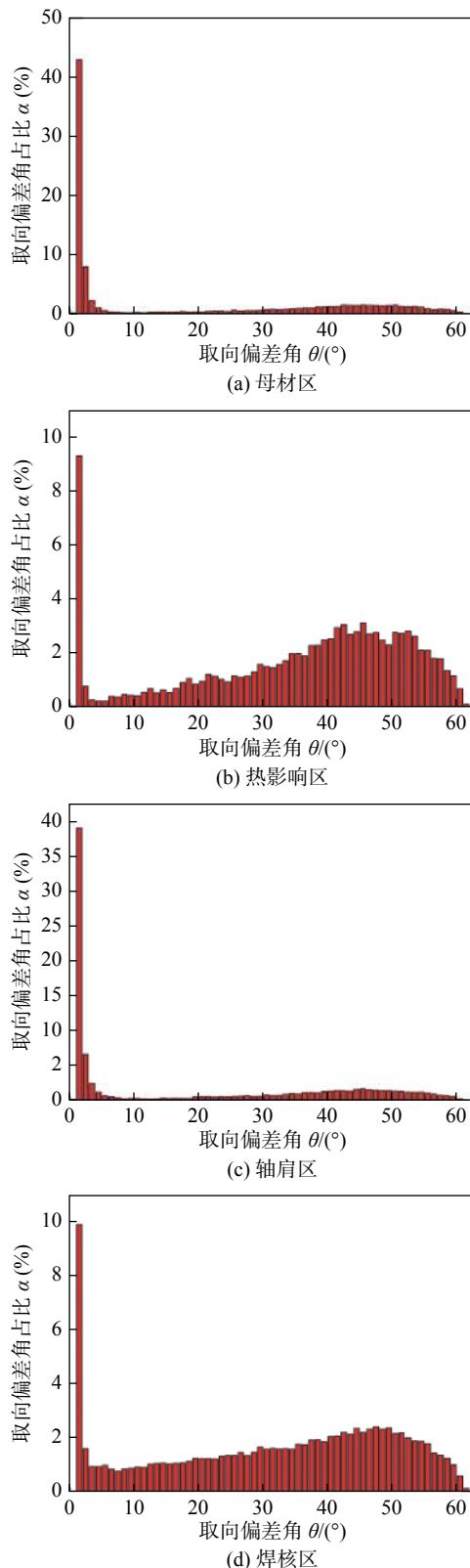


图 8 不同区域晶粒取向

Fig. 8 Grain orientation.(a) base material; (b) heat affected zone; (c) shoulder zone; (d) nugget zone

Petch 关系, 材料的强度由晶粒大小及位错密度共同决定, 在焊核区位错密度占主导作用, 其硬度降低。

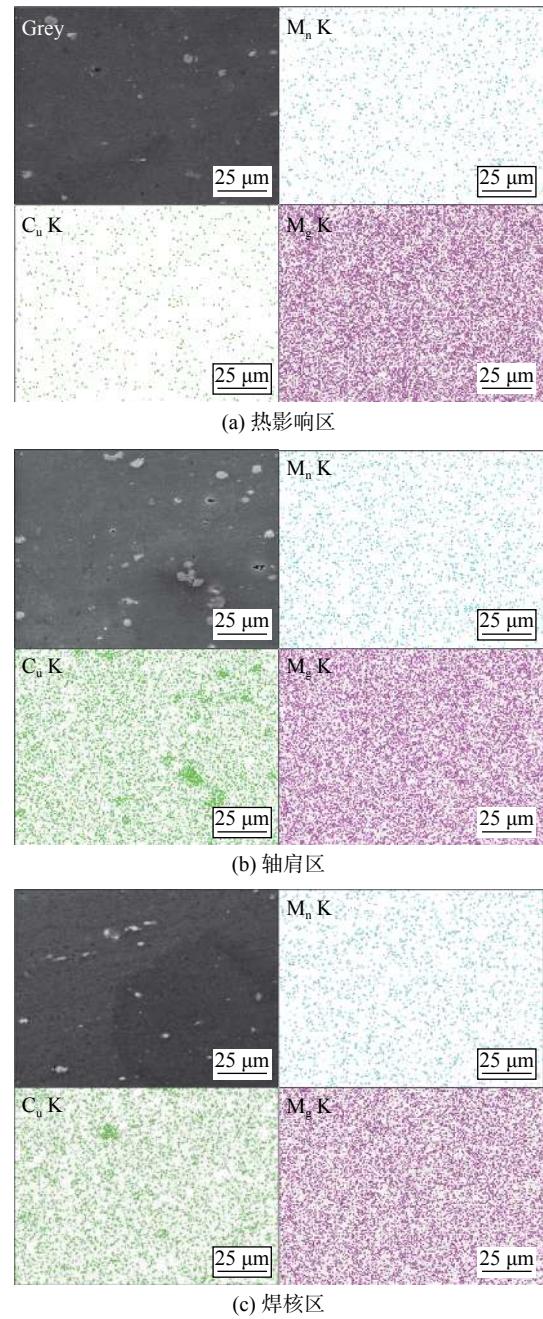


图 9 不同区域铝/铜/镁元素分布

Fig. 9 Distribution of aluminum/copper/magnesium.  
(a) heat affected zone; (b) shoulder zone; (c) nugget zone

图 10 为在不同工艺参数下的接头的强度变化, 当焊接速度为 600 mm/min 时, 由于热输入大, 机器人的形变释放, 使得其实际扎入深度大于设定的扎入深度, 因此其减薄程度较多, 强度降低。随着焊接速度的升高, 热输入逐渐降低, 焊缝减薄程度降低, 接头软化程度降低, 头强度逐渐升高, 当焊接速度为 800 mm/min 时, 其强度最高达到 408 MPa, 当继续增加焊接速度时, 热输入不足, 在此设定下压量下无法完全将板材焊透, 其强度降低。

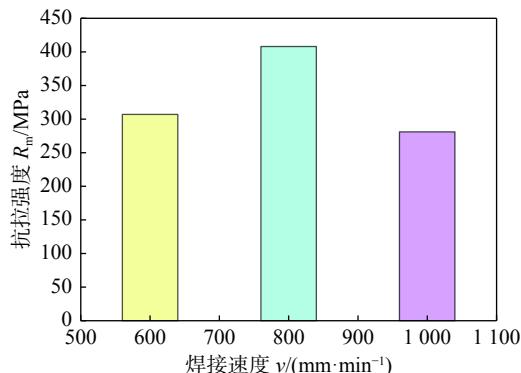


图 10 接头抗拉强度  
Fig. 10 Tensile strength

### 3 结论

(1) 由于机器人是由关节串联连接, 其刚性不足, 为了实现板材的焊透, 其实际扎入深度值要大于理论扎入值。

(2) 接头存在一轴肩区, 轴肩区可分为两层, 上层金属发生了剧烈塑行变形及动态回复再结晶, 下层金属未发生明显变化。

(3) 整个接头硬度呈双“W”形分布, 轴肩区由于小角晶比例高、第二相颗粒析出, 此区域硬度最高。

(4) 接头抗拉强度超过母材 90%, 可达 408 MPa。

### 参考文献

- [1] 宋建岭, 李超. 搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应用与发展 [J]. 焊接, 2018(5): 21–27.  
Song Jianling, Li Chao. Application of FSW technology to tank manufacturing of launch vehicle and its development[J]. Welding & Joining, 2018(5): 21–27.
- [2] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望 [J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91–97.  
Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, et al. Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 91–97.
- [3] Wang G, Zhao Y, Hao Y. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018(1): 73–91.
- [4] 董春林, 栾国红, 关桥. 搅拌摩擦焊在航空航天工业的应用发展现状与前景 [J]. 焊接, 2008(11): 25–31.  
Dong Chunlin, Luan Guohong, Guang Qiao. Prospects of application and development of friction stir welding in aerospace and aviation industry[J]. Welding & Joining, 2008(11): 25–31.
- [5] 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 Chungui, Zhao Yunqiang, Dong Chunlin, 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.
- [6] 赵慧慧, 封小松, 熊艳艳, 等. 铝合金超薄板无倾角微搅拌摩擦焊接头组织性能 [J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 47–50.  
Zhao Huihui, Feng Xiaosong, Xiong Yanyan, et al. Microstructure and properties of micro friction stir welded joint of Al-alloy ultra thin plate with zero tilt angle[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 47–50.
- [7] Liu F J, Fu L, Chen H Y. Microstructure evolution and fracture behaviour of friction stir welded 6061-T6 thin plate joints under high rotational speed[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2017, 23(4): 1–11.
- [8] Liu F J, Fu L, Chen H Y. Effect of high rotational speed on temperature distribution, microstructure evolution, and mechanical properties of friction stir welded 6061-T6 thin plate joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 1823–1833.
- [9] 张铁浩, 韩德成, 刘胜龙, 等. 轨道车辆铝合金车体搅拌摩擦焊的工业化应用 [J]. 焊接, 2013(10): 25–30.  
Zhang Tiehao, Han Decheng, Liu Shenglong, et al. Industrial application of friction stir welding for aluminum alloy body of rail vehicles[J]. Welding & Joining, 2013(10): 25–30.
- [10] Hariharan A, Pandurangan B, Yen C, et al. Development of a robust and cost-effective friction stir welding process for use in advanced military vehicles[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(1): 11–23.
- [11] 董春林, 李继忠, 栾国红, 等. 机器人搅拌摩擦焊发展现状与趋势 [J]. 航空制造技术, 2014, 17: 76–79.  
Dong Chunlin, Li Jizhong, Luan Guohong, et al. Development of robotic friction stir welding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 17: 76–79.
- [12] Zaeh M F, Schmid D, Muenchen I. Robotic friction stir welding of concave shaped surfaces[J]. Aluminium, 2010, 86(10): 58–61.
- [13] 祁若龙, 周维佳, 张伟, 等. 搅拌摩擦焊接机器人大型薄壁零件空间曲线焊缝测量与轨迹生成 [J]. 机器人, 2014, 36(6): 744–750.  
Qi Ruolong, Zhou Weijia, Zhang Wei, et al. Measurement and trace generation of a friction stir welding robot for space weld joint large thin-walled parts[J]. Robot, 2014, 36(6): 744–750.
- [14] Preston R V, Shercliff H R, Withers P J, et al. Synchrotron X-ray measurement and finite element analysis of residual strain in tungsten inert gas welded aluminum alloy 2024[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(12): 3629–3637.

第一作者: 王春桂, 硕士; 主要研究方向为搅拌摩擦焊接加工; Email: wangchg@gwi.gd.cn.

通信作者: 赵运强, 博士; Email: zhaoyq@gwi.gd.cn.