

# 搅拌针形状对 6082-T6 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响

张忠科<sup>1,2</sup>, 李轩柏<sup>1</sup>, 蒋常铭<sup>1</sup>, 熊健强<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 采用 4 种形状的搅拌针对 3 mm 厚的 6082-T6 铝合金板进行静轴肩搅拌摩擦焊接(SSFSW), 研究了不同形状搅拌针焊接接头的宏观形貌、微观形貌及力学性能, 以及搅拌针的产热。结果表明, 三角形搅拌针与四边形搅拌针产热较低, 动静体积比较大, 接头处塑性金属流动性强, 焊接过程中焊缝顶部与底部温差较小, 可以形成无缺陷的 SSFSW 接头; XRD 分析表明, 焊核区无新的物相产生, 三角形搅拌针焊接接头焊核区微晶尺寸最小; 各接头的硬度均呈“U”形分布, 最低点位于后退侧热机影响区与焊核区交界处, 三角形搅拌针接头的硬度整体略高; 三角形搅拌针焊接接头的抗拉强度与断后伸长率最高, 分别为 202.9 MPa 和 3.8%; 拉伸断口形貌分析表明, 所有接头均为韧性断裂。

**关键词:** 6082-T6 铝合金; 静轴肩搅拌摩擦焊; 搅拌针形状; 力学性能

**中图分类号:** TG456; TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)09-3443-08

随着航空航天与轨道交通等领域地快速发展, 材料轻量化要求也愈发严格, 大量的钢制结构已由铝合金代替<sup>[1]</sup>。由于固相焊接过程不涉及母材的熔化, 完全避免了采用熔焊在焊接铝合金时, 容易出现的裂纹、气孔和夹渣等缺陷<sup>[2]</sup>。自 1991 年英国焊接研究所发明了搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW), 就引起了工业领域的广泛关注。但传统搅拌摩擦由于轴肩的产热, 容易造成接头组织与性能在厚度方向的不均匀<sup>[3]</sup>。静轴肩搅拌摩擦焊(stationary shoulder friction stir welding, SSFSW)是英国焊接研究所在 FSW 基础上提出的一种搅拌针与轴肩分离的新型固相焊技术<sup>[4]</sup>。很多研究表明, 与 FSW 相比较, SSFSW 接头组织均匀, 力学性能更高, 残余应力低<sup>[5-7]</sup>。

由于搅拌针形貌对接头性能有很重要的影响, 很多学者对此做了研究。Wang 等人<sup>[8]</sup>采用 4 种不同形貌的搅拌针, 研究了搅拌针形貌对 FSW 接头力学性能和焊核区晶粒尺寸的影响。Kim 等人<sup>[9]</sup>采用模拟的方法发现, 圆柱形搅拌针不会产生垂直方向的流动, 并且搅拌针周围塑性金属粘度较高。Kang 等人<sup>[10]</sup>发现通过调整搅拌头的偏移量, 可以改善异种金属接头的性能。Mao 等人<sup>[11]</sup>发现采用三角平面的搅拌针可以增强焊缝水平方向抽吸一挤压效应, 提高焊缝接头性能。邹等人<sup>[12]</sup>

发现提高搅拌针动静态体积比可以提高接头力学性能。Mugada 等人<sup>[13]</sup>采用了 5 种形状的搅拌针焊接 6 mm 厚的 6082-T6 铝合金板, 研究了焊接过程塑性金属的流动性, 发现四边形搅拌针可以增强材料的混合度。Mohanty 等人<sup>[14]</sup>建立了搅拌针形状与轴肩直径对焊缝影响的响应面模型, 反应了两者对接头性能的交互作用。Dawood 等人<sup>[15]</sup>研究了 3 种不同形状搅拌针对 4 mm 厚的 6061 铝合金板 FSW 接头力学性能与组织的影响, 发现三角形搅拌针可以实现接头的最佳冶金结合。

由于静轴肩搅拌摩擦焊接过程, 材料塑化与流动的能量全部来源于搅拌针的旋转。因此研究搅拌针形状对接头性能的影响有重要意义。本工作采用 4 种不同形貌的搅拌针, 研究了不同形貌搅拌针焊接过程的产热, 以及对接头性能与组织的影响。

## 1 实验

本试验采用如图 1 所示 4 种不同形状搅拌针对 3 mm 厚 6082-T6 铝合金板进行焊接, 其化学成分如表 1 所示。试验在兰州理工大学自主设计研制的静轴肩搅拌摩擦焊装置上完成, 焊接前用砂纸打磨掉焊接区域表面氧化膜, 并用丙酮清洗。通过大量试验, 最终确定的最佳焊接工艺参数为转速 1600 r/min, 焊速 35 mm/min, 下压量 0.05 mm。

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 甘肃省科技重大专项(18ZD2GC013)

作者简介: 张忠科, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: zhangzke@lut.cn

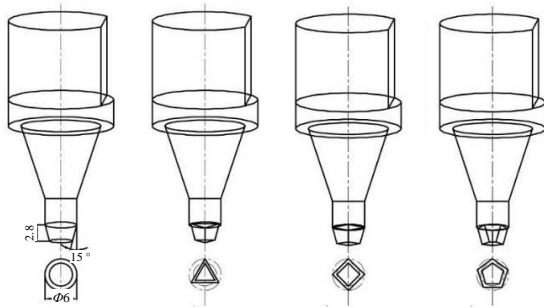


图 1 试验使用的 4 种搅拌头形状示意图

Fig.1 Schematic diagrams of four types of tools used in the test

表 1 6082-T6 铝合金主要化学成分

Table 1 Chemical composition of 6082-T6 aluminum alloy (wt%)

Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
1.04	0.98	0.62	0.32	0.27	0.05	0.01	0.02	Bal.

采用线切割在图 2 所示位置截取试样。金相试样经打磨与抛光后,采用 50 °C 的 2% 氢氧化钠溶液浸泡 90 s, 在 Axio Scope A1 光学显微镜(OM)下观察 SSFSW 接头显微组织; 按照 GB/T228-2010《金属材料室温拉伸试验方法》截取标准拉伸试样, 采用 SHIMADZU 系列电子万能拉伸机进行拉伸试验; 采用 WILSON VH1102 维氏硬度仪检测焊缝横截面的硬度分布(载荷 0.98 N, 保压时间 10 s, 测试点间距 0.5 mm); 采用 GRAPHTEC GL240 测温设备配合 K 型热电偶检测焊接过程中距焊缝中心 8 mm 处的温度变化, 如图 3 所示; 用 FEG-450 热场发射扫描电子显微镜(SEM)观察 SSFSW 接头拉伸断口形貌。图 4 为母材区显微组织, 呈现扁平纤维状。

## 2 结果与分析

### 2.1 SSFSW 接头宏观形貌

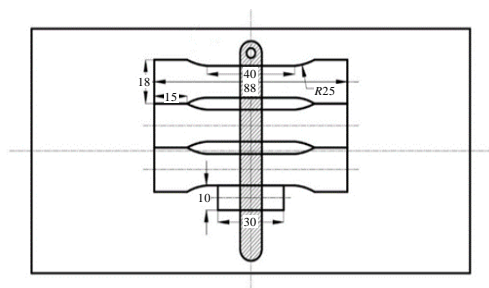


图 2 试样截取位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sample interception position

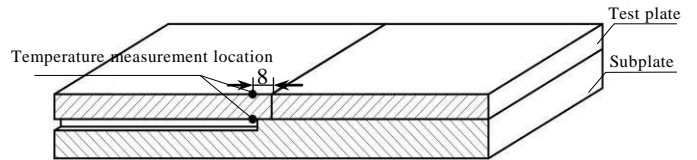


图 3 测温位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of temperature measurement location

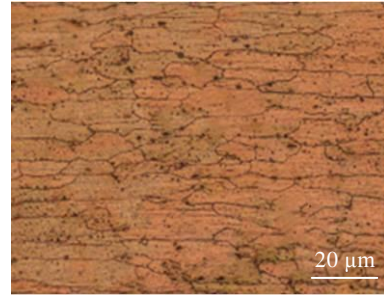


图 4 母材区显微组织

Fig.4 Microstructure of base metal area

图 5 为不同形状搅拌针焊接的 SSFSW 接头宏观形貌。可见, 接头上宽下窄, 呈现“碗”状。但在不同形状搅拌针的热力耦合作用下, 焊核区呈现出不同的形貌与特征。与 FSW 接头相似, SSFSW 接头也可以分成 4 个区域, 母材区(bass metal, BM), 热影响区(heat affected zone, HAZ), 热机影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)和焊核区(nugget zone, NZ)。但由于 SSFSW 只有搅拌针产热, 焊接过程产热较低, 接头存在很窄的热机影响区与热影响区。圆形与四边形搅拌针焊接接头的焊合区面积明显大于三角形与五边形搅拌针焊接接头焊核区的面积, 这表明采用前两者搅拌针焊接时, 带动了搅拌针周围较多的塑性金属。采用圆形搅拌针焊接的接头存在严重的隧道型缺陷, 采用五边形搅拌针焊接的接头存在孔洞缺陷, 这主要是由于材料塑化程度低或者塑性材料流动不充分导致的<sup>[16]</sup>。而采用三角形搅拌针与四边形搅拌针焊接的接头均未发现明显缺陷。

比较图 5a、5d 与图 5b、5c, 可以明显发现后两者焊核区的“洋葱环”特征更加密集且均匀, 这表明在焊接过程中三角形搅拌针与四边形搅拌针使得焊缝中塑性金属的流动更加充分<sup>[17]</sup>。这是由于三角形搅拌针与四边形搅拌针动静体积比较大, 在旋转时可以充分地带动塑性金属, 从而增强了焊缝塑性金属的流动性。并且前两者焊核区的轴肩影响区面积明显大于后两者的, 这是由于焊接时向上流动的塑性金属较多或者焊缝金属塑性程度低, 静止轴肩作用于焊缝的轴向力较大所导致。

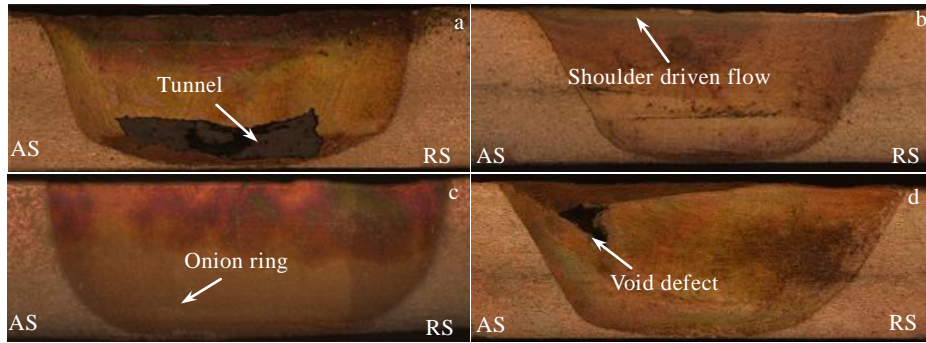


图 5 不同形状搅拌针 SSFSW 焊接接头宏观形貌

Fig.5 Macro morphologies of SSFSW joints welded by different shape tools: (a) circular tool; (b) triangle tool; (c) quadrangle tool; (d) pentagon tool

### 2.2 SSFSW 接头显微组织

图 6 为不同形状搅拌针焊接接头各区域的显微组织。在不同的热耦合作用下, 各接头的热机影响区存在较大的差异。圆形与四边形搅拌针焊接接头热

机影响区的晶粒存在长大与拉长的现象; 三角形与五边形搅拌针焊接接头热机影响的晶粒只存在长大的现象, 未出现明显变形。Chen 等人<sup>[18]</sup>认为, 采用 FSW 焊接时焊缝中塑性金属主要受挤压与剪切作用。这表

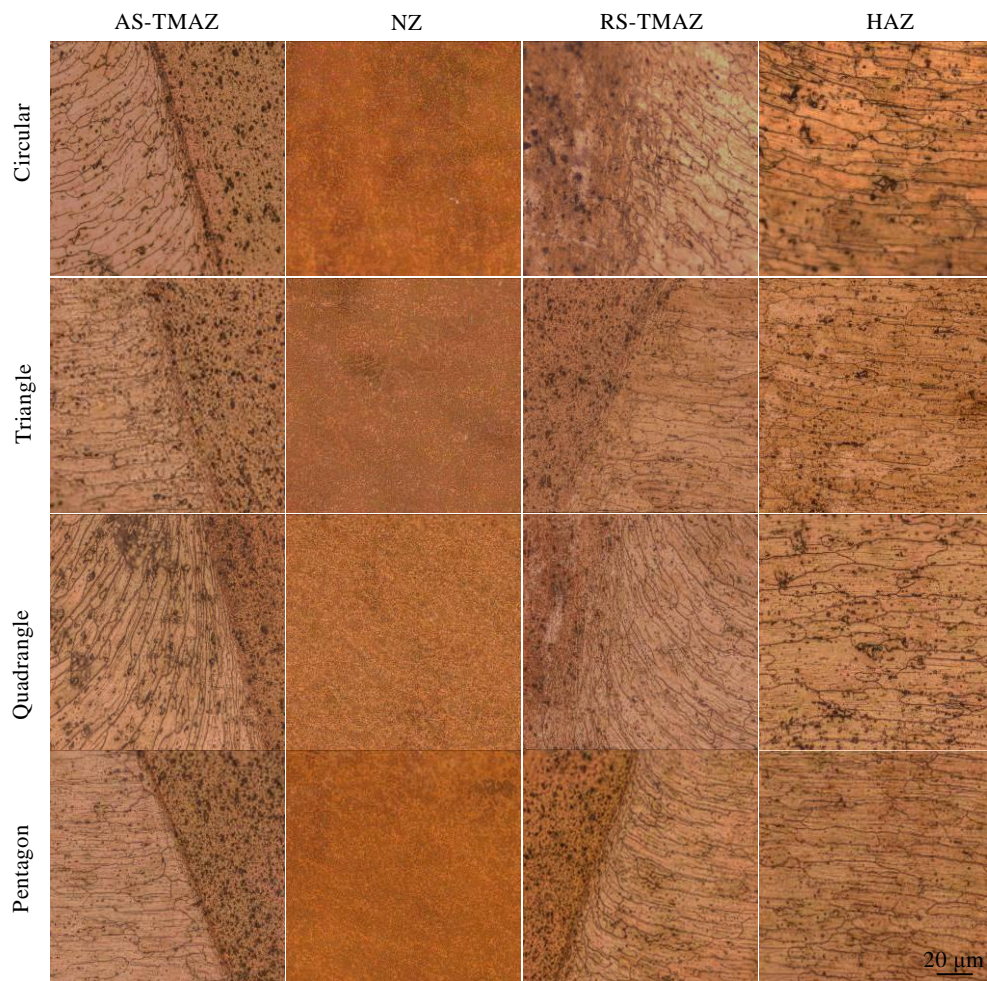


图 6 不同形状搅拌针焊接接头各区域的显微组织

Fig.6 Microstructures of each area of the welded joints by different shape tools

明采用圆形与四边形搅拌针焊接时，搅拌针周围金属受挤压作用较大，增加了塑性金属之间的黏性流动，使得热机影响区晶粒发生了明显变形。而采用三角形与五边形搅拌针焊接时，搅拌针周围金属受搅拌针边缘剪切作用较大，塑性金属未发生明显的黏性流动。并且热机影响区受到搅拌针较大的热耦合作用，靠近焊合区部分晶粒发生了动态再结晶。前进侧热机影响区与焊核区存在清晰的界线，而后退侧热机影响区与焊核区界线较为模糊，过渡较为均匀。这主要是由于两侧所受搅拌针作用力不同，塑性金属的流动状态不同导致<sup>[19]</sup>。在焊接过程中，搅拌针将塑性金属由前进侧带向后退侧，使得前进侧初始温度低于后退侧。并且前进侧塑性变形方向和金属流动方向与焊接方向相同，受到的剪切作用大于后退侧。焊核区在搅拌针剧烈搅拌的作用以及充分的热循环作用下，发生了动态回复与再结晶，形成细密的等轴晶。由于热影响区只受到焊接热循环作用，晶粒发生长大，但依旧保持与母材一样的扁平纤维状。

2.3 不同形状搅拌针的产热

图 7 为不同形状搅拌针焊接过程中顶部与底部温度变化曲线。如图 7 所示，为采用不同形状搅拌针焊接时，距焊缝中心 8 mm 处，顶部与底部的温度变化曲线。每组曲线形状相同，表明结果较为准确。由于

搅拌针均为锥形结构，相对搅拌针下部，搅拌针上部面积较大，与母材摩擦产生的热量较多。并且底部存在刚体垫板，其导热率高于空气，导致焊接过程中，底部温度一直低于顶部的。当搅拌针脱离焊缝后，由于铝合金较高的导热率，其顶部温度与底部温度迅速接近。图 8 为采用不同形状搅拌针焊接时顶部与底部峰值温度对比图，采用圆形搅拌针焊接时，顶部与底部的峰值温度均高于其他形状搅拌针的，这是由于相对其他形状搅拌针，圆形搅拌针面积最大，焊接时产生的摩擦热最高。由图 8 可知，采用圆形搅拌针与五边形搅拌针时，顶部与底部的峰值温度相差较大，分别为 53.3 和 31 °C；采用三角形搅拌针与四边形搅拌针时，相差较小，分别为 17.7 和 13.1 °C。表明三角形与四边形搅拌针增强了塑性金属流动性，使得塑性金属混合充分，降低了上层与下层温度差。

2.4 XRD 分析

图 9 为母材与不同形状搅拌头焊接接头焊核区的 XRD 图谱。可见，各焊核区衍射峰与母材相似，只有部分位置的衍射强度存在较大差异。这说明由于 SSFSW 焊接时产生的热量较低，焊接前后未产生新的物相。并且在搅拌针强烈的搅拌作用下，改变了原来轧制板材的织构或择优取向。通过 Jade 6.0 软件测得衍射峰的半高宽，根据德拜-谢勒法测算出母材与各

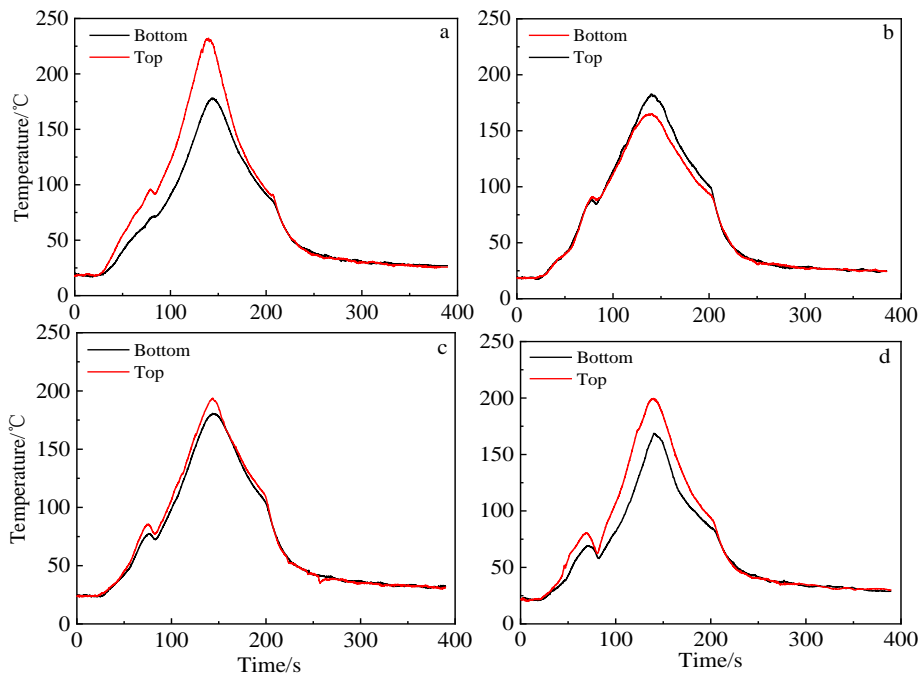


图 7 不同形状搅拌针焊接过程中顶部与底部温度变化曲线

Fig.7 Temperature change curves of the top and bottom of different shape tools during the welding process: (a) circular, (b) triangle, (c) quadrangle, and (d) pentagon

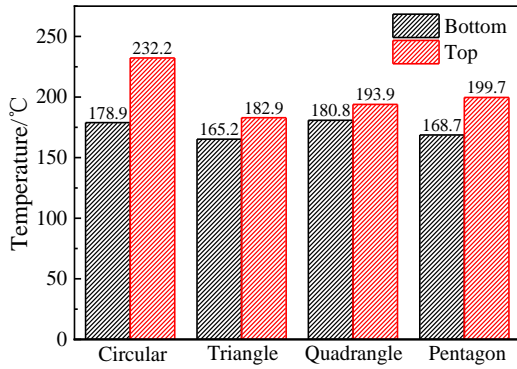


图 8 不同形状搅拌针焊接时顶部与底部峰值温度对比

Fig.8 Comparisons of peak temperature between top and bottom of different shape tools during the welding process

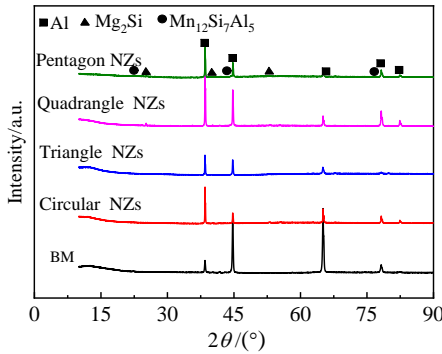


图 9 母材与不同形状搅拌头焊接接头焊核区的 XRD 图谱

Fig.9 XRD patterns of BM and NZs welded joint by different shape tools

焊核区的微晶尺寸, 如表 2 所示。4 种搅拌针焊接接头的焊核区微晶尺寸均大于母材, 其中三角形搅拌针焊接接头的微晶尺寸最小为 69.6 nm, 圆形搅拌针焊接的接头焊核区微晶尺寸最大为 93.6 nm。这是因为采用三角形搅拌针焊接时, 温度较低, 搅拌能力强, 晶核形成速度较快, 长大速度较慢。而采用圆形搅拌针焊接时, 则相反。

2.5 SSFSW 接头第二相的分布与力学性能

图 10 为三角形搅拌针焊接接头不同区域的第二相分布, 接头存在黑色与白色 2 种第二相, 黑色第二相大都存在于晶界处, 而白色第二相大都存在与晶界内。EDS 能谱分析结果如图 11 所示, 查阅文献可知白色第二相为 AlMnFeSi, 黑色第二相为 Mg<sub>2</sub>Si<sup>[20]</sup>。由图 10 可知, 在热影响区这 2 种第二相分布与母材区相同, 但由于受到热循环作用, Mg<sub>2</sub>Si 有所长大和增多; 在热机影响区由于还受到机械作用, 2 种第二相均有被打碎的迹象。而在焊核区由于峰值温度最高, Mg<sub>2</sub>Si 大量析出。但在搅拌针强烈的机械作用下, 2 种第二相均被打碎混合, 以细小的颗粒状弥散分布于焊核区。

表 2 母材与不同形状搅拌头焊接接头焊核区微晶尺寸

Table 2 Size of the crystallites in BM and NZs welded joint

by different shape tools

Area	Crystallite size (111), D/nm
Base material	46.3
Circular NZs	93.6
Triangle NZs	69.6
Quadrangle NZs	88.5
Pentagon NZs	75.4

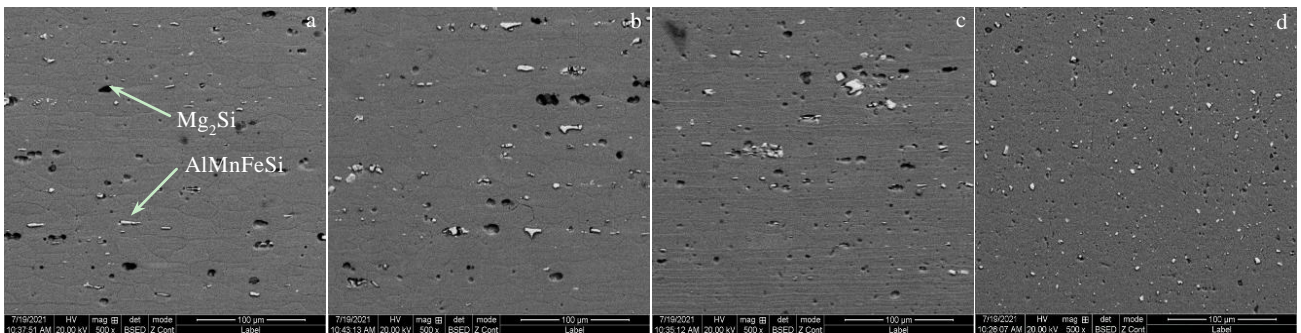


图 10 三角形搅拌针焊接接头不同区域第二相分布

Fig.10 Distributions of the second phase of the welding joint welded by triangle tool in different areas: (a) BM, (b) HAZ, (c) TMAZ, and (d) NZ

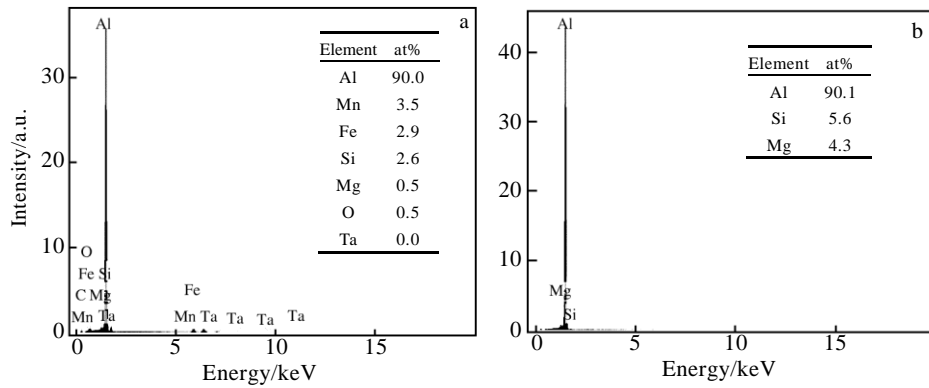


图 11 三角形搅拌针焊接接头不同区域第二相 EDS 能谱分析

Fig.11 EDS analysis results of the second phase of the welding joint welded by triangle tool: (a) white second phase and (b) black second phase

图 12 为不同形状搅拌针焊接接头断裂位置与拉伸性能。除五边形搅拌针焊接接头断裂于前进侧热机影响区，其他接头均断裂于焊核区。三角形搅拌针焊接接头的抗拉强度与断后伸长率最高，分别为 202.9 MPa 和 3.8%；圆形搅拌针焊接接头的最低，分别为 143.7 MPa 和 2.1%。由于圆形搅拌针与五边形搅拌针焊接的接头存在缺陷，使得接头有效横截面面积减小，导致其强度降低。因为采用三角形搅拌针焊接时静止轴肩作用于焊缝的轴向力高于四边形的，使得焊缝组织更加致密，所以相比于四边形搅拌针焊接接头的抗拉强度，三角形搅拌针焊接接头的相对较高。

图 13 为不同形状搅拌针焊接接头硬度，焊缝整体硬度呈中心对称分布，为典型的“U”形。越靠近焊核区，硬度越低。最低点位于后退侧热机影响区与焊核区之间，大约为母材的 1/2。因为该区受到较大的热循环作用，出现晶粒长大和第二相粗化的现象，严重影响了该区硬度。采用三角形搅拌针焊接时，由于产热较低，对材料软化作用较小，所以三角形搅拌针焊接接头的硬度整体偏高。

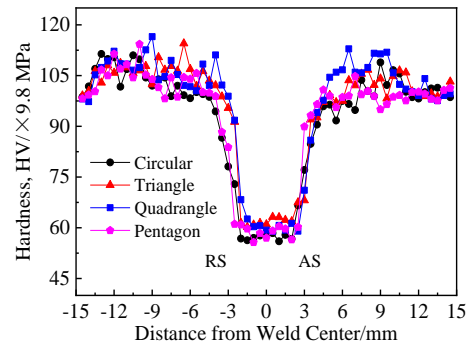


图 13 不同形状搅拌针焊接接头硬度分布

Fig.13 Hardness distribution of welded joints by different shape tools

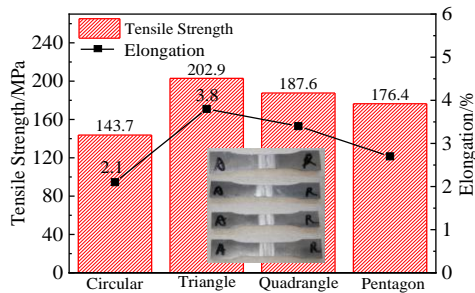


图 12 不同形状搅拌针焊接接头的抗拉强度与延伸率

Fig.12 Tensile strength and elongation of welded joints by different shape tools

### 2.6 断口形貌分析

图 14 为不同搅拌针焊接接头的断口宏观形貌。可见，圆形搅拌针焊接接头的内部存在由不同形状的孔洞连接的隧道缺陷，五边形搅拌针焊接接头内部存在些许孔洞，但并未连接，均单独存在。三角形搅拌针与四边形搅拌针焊接接头未发现焊接缺陷。

图 15 为不同搅拌针焊接接头中部的断口微观形貌。可见，各接头断口微观形貌相似，均由大量韧窝构成，韧窝内壁光滑，为典型的韧性断裂。说明焊接参数选择合理，接头力学性能下降的主要原因是，塑性材料流动性不足形成缺陷所致。部分韧窝中心存在第二相小颗粒，是由于试样在拉伸时，第二相粒子与基体界面首先开裂形成裂纹源。随着变形量的增大，韧窝逐渐撕裂，韧性较好的材料，撕裂棱较明显。三角形与四边形搅拌针焊接接头断口的撕裂棱更为突出且密集，表明这 2 种接头韧性较好。

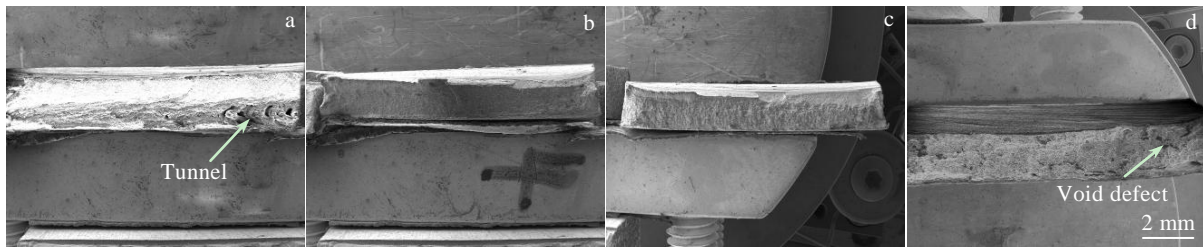


图 14 不同形状搅拌针焊接接头断口宏观形貌

Fig.14 Macroscopic fracture morphologies of the welded joints by different shape tools: (a) circular, (b) triangle, (c) quadrangle, and (d) pentagon

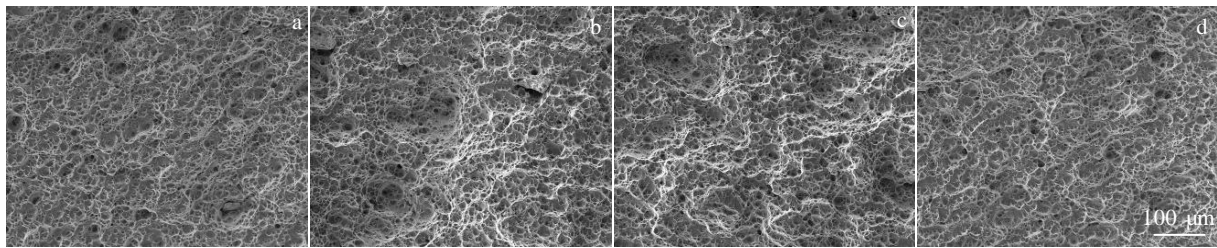


图 15 不同形状搅拌针焊接接头断口微观形貌

Fig.15 Microscopic fracture morphologies of the welded joints by different shape tools: (a) circular, (b) triangle, (c) quadrangle, and (d) pentagon

### 3 结 论

1) 三角形搅拌针与四边行搅拌针产热较低, 但较大的动静体积比增强了焊缝金属的流动, 降低了焊缝顶部与底部温度差, 得到无缺陷的 SSFSW 接头。

2) SSFSW 接头受热力循环作用较小, 存在很窄的热机影响区与热影响区。不同形状的搅拌针对焊核区形状和热机影响区组织有较大的影响。前进侧热机影响区与后退侧热机影响区组织受到的热力耦合作用不同, 导致了组织的差异。

3) 不同形状搅拌针焊接接头的硬度, 均呈“U”形分布, 最低点位于后退侧热机影响区与焊核区交界处。三角形搅拌针产热最低, 对焊缝金属软化程度较低, 接头整体硬度较高。各搅拌针焊接接头均为韧性断裂, 三角形搅拌针焊接接头抗拉强度与断后伸长率最高, 分别为 202.9 MPa 和 3.8%。

#### 参考文献 References

- [1] Wang Li(王 丽), Chen Zanping(陈赞平). *China Science and Technology Information*(中国科技信息)[J], 2020, 20: 90
- [2] Mao Y Q, Ke L M, Huang C P *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 83(9): 1637
- [3] Gong Wenbiao(宫文彪), Tian Hongjiao(田洪娇), Liu Wei(刘 威) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 854
- [4] Sinhmar S, Dwivedi D K. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 277: 116 482
- [5] Sun T Z, Roy M J, Strong D *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 242: 92
- [6] Li W Y, Niu P L, Yan S R *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 37: 159
- [7] Vicharapu B, Liu H, Fujii H *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 106(5-6): 1573
- [8] Wang Xijing(王希靖), Ma Xiaofei(马晓飞), Zhang Liangliang(张亮亮). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2017, 38(12): 99
- [9] Kim S D, Yoon J Y, Na S J. *Welding in the World*[J], 2017, 61(5): 915
- [10] Kang Ju(康 举), Fu Ruidong(付瑞东), Luan Guohong(栾国红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 294
- [11] Mao Yuqing(毛育青), Ke Liming(柯黎明), Liu Fengcheng(刘奋成) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2017, 38(6):19
- [12] Zou Qingfeng(邹青峰), Qian Wei(钱 炜), An Li(安 丽) *et al.* *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材

- 料)[J], 2015, 39(5): 37
- [13] Mugada K K, Adepu K. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2019, 29(11): 2281
- [14] Mohanty H K, Mahapatra M M, Kuma P *et al. Journal of Marine Science and Application*[J], 2012, 11(4): 493
- [15] Dawood H I, Mohammed K S, Rahmat A *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(9): 2856
- [16] Debtanay D, Bag S, Pal S. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2021, 26(5): 412
- [17] Jagadeesha C B. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*[J], 2018, 27(3-4): 412
- [18] Chen S J, Han Y, Jiang X Q *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 297: 117 205
- [19] Jin Yuhua(金玉花), Zhang Lin(张林), Wang Xijing(王希靖). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2020, 34(20): 20 107
- [20] Deng Shuhao(邓舒浩), Deng Yunlai(邓运来), Zhang Zhen(张臻) *et al. Journal of Central South University, Science and Technology(中南大学学报, 自然科学版)*[J], 2018, 49(10): 2413

## Effects of the Shapes of Tools on Structure and Properties of 6082-T6 Aluminum Alloy Welded Joints by Stationary Shoulder Friction Stir Welding

Zhang Zhongke<sup>1,2</sup>, Li Xuanbai<sup>1</sup>, Jiang Changming<sup>1</sup>, Xiong Jianqiang<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Stationary shoulder friction stir welding (SSFSW) of 6082-T6 aluminum alloy plate with 3 mm thickness was carried out by four types of tools. Macromorphology, microstructure, and mechanical properties of welded joints by different shape tools, as well as the heat generation of the tools were studied. The results show that the triangle tool and the quadrangle tool produce lower heat and have a relatively large dynamic and static volume, which can enhance the flow of plastic metal at the joint, reduce the small temperature difference between the top and bottom of the weld during the welding process, and form a defect-free SSFSW joint. XRD analysis results show that no new phases are generated during the welding process, and the crystallites size of NZ welded by triangle tool is the smallest. The hardness of each joint is distributed in a “U” shape, and the lowest point is at the junction of RS-TMAZ and NZ, but the hardness of the welded joint by triangle tool is slightly higher. The tensile strength and elongation after fracture of the welded joint by triangle tool are the highest, which are 202.9 MPa and 3.8%, respectively. Analysis of tensile fracture morphology shows that all joints are ductile fractures.

**Key words:** 6082-T6 aluminum alloy; stationary shoulder friction stir welding; the shapes of tools; mechanical properties

---

Corresponding author: Zhang Zhongke, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: zhangzke@lut.cn