

搅拌头轴肩形状对 6061 铝合金 FSW 过程中轴向力的影响

牛文涛¹, 谢吉林^{1,2}, 黄永德¹, 张昊³, 陈玉华¹

(1. 南昌航空大学, 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌, 330000; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150001;
3. 上海汽车集团股份有限公司乘用车福建分公司, 宁德, 352000)

摘要: 为了机器人 FSW 工程化应用, 研究搅拌头轴肩形状对轴向力的影响. 采用平面与凹面两种轴肩形状的搅拌头, 对 6061-T6 铝合金板材进行搅拌摩擦焊, 测量、记录和分析焊接过程中的轴向力, 建立轴肩受力模型, 综合分析轴向力的分布及变化规律. 结果表明, 平面轴肩搅拌头焊接所得焊缝形貌优于凹面轴肩搅拌头; 平稳焊接阶段轴向力分布曲线呈锯齿状波动, 平面轴肩对应曲线的波动幅度较小; 当搅拌头转速为 1500 r/min、焊接速度为 95 mm/min 时测得轴向力最低, 采用平面轴肩时所测轴向力为 3 828 N, 而凹面轴肩则为 4 018.5 N. 分析认为凹面轴肩产生的焊接热输入较小, 材料上下方向塑性流动的阻力较大, 相应的反作用力也较大. 另外, 根据受力分析, 采用凹面轴肩焊接时, 搅拌头前进方向的移动会叠加一定的轴向分力, 导致凹面轴肩搅拌头焊接过程中所受的轴向力较大.

创新点: (1) 从焊接热输入及材料塑性状态的角度, 分析了轴肩形状对 FSW 轴向力的影响.
(2) 建立轴肩受力模型, 分析了 FSW 轴向力的变化规律.

关键词: 搅拌摩擦焊; 6061-T6 铝合金; 轴肩形状; 轴向力

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20201210001

0 序言

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 作为一种性能优异的固相连接技术, 具有高效率、低能耗、焊接接头质量高、方便连接同种和异种材料的优点, 传统的 FSW 由于其二维平面的局限, 已经很难满足日趋复杂的高柔性焊接要求^[1-2]. 机器人 FSW 凭借其高柔性焊接特点, 逐渐成为焊接复杂产品的重要焊接技术, FSW 技术与工业机器人相结合, 将有利于 FSW 的进一步发展^[3].

在机器人 FSW 过程中, 焊接设备要承受很大的载荷, 而 FSW 的核心是搅拌头^[4]. 根据周利等人^[5]建立的搅拌头受力模型可知, 焊接时, 搅拌头受到轴向力、前进力、侧向力以及旋转扭矩等诸多力的联合作用. 其中, 轴向力是机器人位姿调控、焊接质

量监制的重要过程参数, 机器人手臂在轴向力的作用下容易发生弹性变形, 导致焊具偏离预定焊缝轨迹而产生焊接缺陷, 甚至造成焊接失败. Zhang 等人^[6]采用数值模拟的方法研究了 FSW 的轴向力, 结果表明轴向力对于 FSW 的成败起到关键作用. 为此, 了解 FSW 过程中轴向力的变化规律是推动机器人 FSW 产业化应用、提高焊接质量关键所在.

现有研究表明, FSW 轴向力与搅拌头/工件之间的产热机制密切相关^[7]. 李程锦等人^[8]通过建立铝合金 FSW 焊接过程的完全热力耦合模型认为, 焊接缺陷的产生主要是由于焊接过程中热输入的不足, 而搅拌头轴肩与工件的摩擦生热是 FSW 热输入的主要来源^[9]. 而 FSW 热输入的大小决定了焊缝金属的塑性程度以及流动情况, 廖美玲^[10]通过设计不同形状轴肩的搅拌头, 研究了焊缝金属的塑性流动, 结果表明当轴肩形状发生变化时, 焊缝金属的流动以及组织性能发生明显变化; 张忠科等人^[11]的试验结果表明, 轴肩形状的改变对 FSW 温度有着重要影响, 故轴肩形状的改变对 FSW 搅拌头的

受力及热输入的大小会产生重要影响。

减小焊接轴向力,对 FSW 的发展具有重大意义。尽管已经报道了轴肩形状对 FSW 受力的影响,如张威等人^[12]详细分析了轴肩形状及焊接工艺参数对 FSW 搅拌头受力的影响,得出轴肩形状对焊接过程中的热输入及搅拌头受力有着重要影响。但是还没有研究表明轴肩形状的不同对焊接过程中轴向力有何影响,因此设计了两种不同形状的轴

肩,在不同焊接工艺参数下进行焊接,以此来研究轴肩形状对 6061 铝合金 FSW 过程中轴向力的影响。

1 试验方法

采用的试验材料为 250 mm × 80 mm × 5 mm 的 6061-T6 铝合金板材,其化学成分如表 1 所示。焊接设备是由 X53K 立式铣床改装而成的 FSW 焊机。

表 1 6061-T6 铝合金板材化学成分 (质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of 6061-T6 aluminum alloy sheet

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.4~0.8	≤0.7	0.15~0.4	≤0.15	0.60~1.2	≤0.6	≤0.6	余量

试验设计了平面形与内凹形两种轴肩形状不同的搅拌头,搅拌头材料为定向凝固 GH4169 高温合金,除轴肩形状外,其余尺寸参数均保持不变,搅拌头关键部分具体尺寸如图 1 所示,搅拌针开左螺纹,轴肩均开有阿基米德螺旋线形花纹,如图 2 所示,增加了轴肩对塑形金属的包拢效果与对材料驱动能力。

焊接时,保持搅拌头倾角为 0、下压量为 0.2 mm 不变,轴肩压入工件材料后预热 10 s,根据设定的转速及焊接速度进行焊接试验。采用 3 种转速 (750, 1 180, 1 500 r/min) 及 3 种焊接速度 (95, 190, 300 mm/min) 不同的工艺参数组合进行焊接。

采用 4XB-TV 型倒置金相显微镜对接头显微组织进行观察与分析。为了研究轴肩形状对轴向力的影响,采用轴向力实时测量系统对焊接过程中轴向力的值进行测量。图 3 为所用轴向力实时测量装置图,图 3a 为系统实物图,图 3b 为系统示意图。轴向力实时测量装置的量程标定为 0~10 kN,测量误差为 0.115%,能灵敏测量焊接过程中轴向力的变化,传感器输出的电信号经信号放大器处理,以数字的形式显示并自动记录轴向力随时间的变化,利

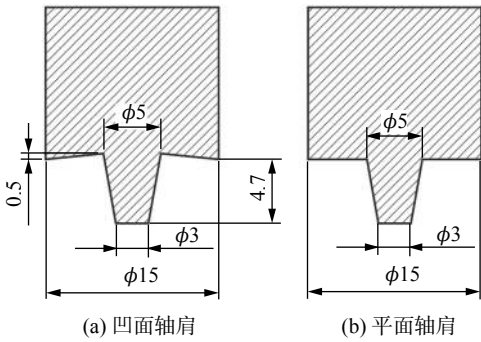


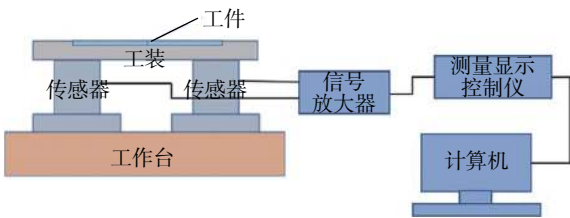
图 1 搅拌头尺寸参数
Fig. 1 Tool size parameters. (a) concave shoulder; (b) flat shoulder



图 2 阿基米德螺型花纹轴肩
Fig. 2 Archimedes screw pattern shoulder



(a) 实物图



(b) 示意图

图 3 轴向力实时测量装置
Fig. 3 Axial force measurement device. (a) physical drawing; (b) schematic drawing

用 Origin 软件将数据处理为轴向力分布曲线。

2 结果与分析

2.1 不同工艺参数条件下的轴向力

图 4 为搅拌头转速为 1 180 r/min、焊接速度为 95 mm/min 下所得不同阶段 FSW 轴向力的分布曲线。经分析, FSW 曲线变化特点类似, 都分搅拌针插入阶段、轴肩下压阶段、预热阶段、稳定焊接阶段和搅拌头拔出阶段 5 个不同的阶段^[13], 如图 4 所示, 稳定焊接阶段为 FSW 过程中的主要阶段, 故截取稳定焊接阶段轴向力作为分析对象。

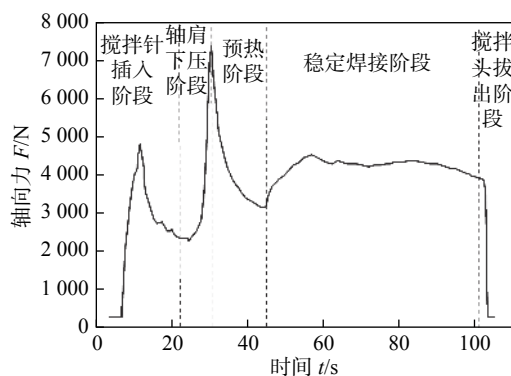
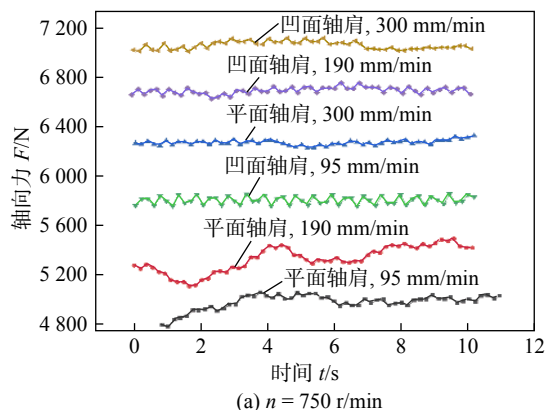


图 4 不同阶段下 FSW 轴向力的分布

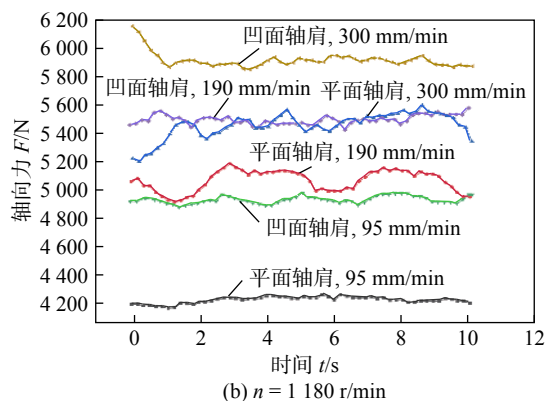
Fig. 4 Distribution of FSW axial forces at different stages

图 5 为平稳阶段轴向力随时间的变化规律。从图 5 可以看出, 当搅拌头转速为 1 500 r/min、焊接速度为 95 mm/min 时, 平面轴肩所受轴向力最低 (3 828 N), 而此参数对应的凹面轴肩所受轴向力为 4 018.5 N。轴向力分布曲线波动呈锯齿状, 这可能与材料在不同焊接热输入和塑性变形下的状态有关。当焊接热输入较低时, 金属材料的塑性变形不足, 材料会对搅拌头施加一定的变形抗力, 轴向力增大, 曲线波动较大。当焊接热输入量增加时, 塑性程度提高, 这种曲线波动逐渐稳定。在相同的焊接参数下, 如图 5a 所示, 轴向力分布曲线所对应的平面轴肩的波动幅度小于凹面轴肩, 这可能是由于两种轴肩与材料的接触状态不同^[14-15]。平面轴肩与工件的接触面积较大, 产生了较高的热输入, 且金属材料的塑性变形充分, 材料的阻力和轴向力减小^[16]。

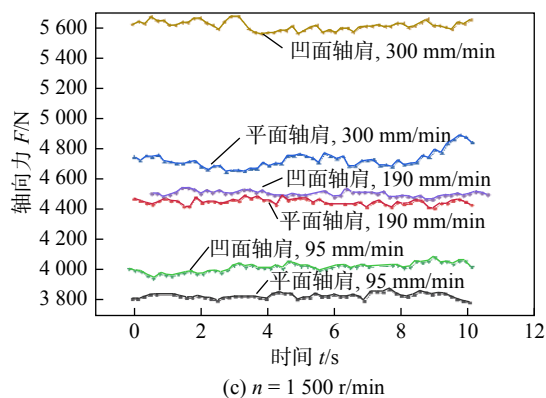
图 6 和图 7 为不同工艺参数组合下轴向力的变化曲线。当转速不变, 搅拌头焊接速度加快时, 作用在两种形状轴肩上的轴向力均随之增加。分析认为, 焊接轴向力与焊接过程中的热输入有关, 当转



(a) $n = 750$ r/min



(b) $n = 1\,180$ r/min



(c) $n = 1\,500$ r/min

图 5 平稳阶段轴向力随时间的变化规律

Fig. 5 Variation law of axial force with time in stable stage. (a) $n = 750$ r/min; (b) $n = 1\,180$ r/min; (c) $n = 1\,500$ r/min

速增大时, 产热增多, 材料受热软化, 变形抗力减小, 轴向力随之减小。当搅拌头转速不变, 焊接速度增大时, 产热减小, 材料软化程度下降, 变形抗力增加, 轴向力也随之增加^[17]。

对比图 6a 和图 6b, 当搅拌头焊接速度不变时, 随着转速的提高, 两轴肩对应的轴向力差值逐渐减小。当搅拌头转速为 750 r/min、焊接速度为 190 mm/min 时, 两轴肩焊接所产生的平均轴向力差值约为 1 450 N (凹面轴肩轴向力约为 6 750 N, 平面轴肩轴向力约为 5 300 N)。当转速提高到 1 500 r/min 时, 两轴肩对应的轴向力差值减小到 20 N 左右 (凹

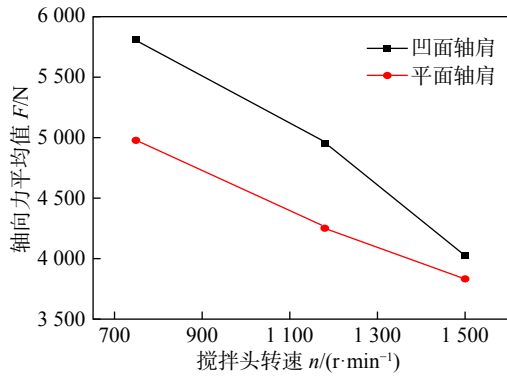
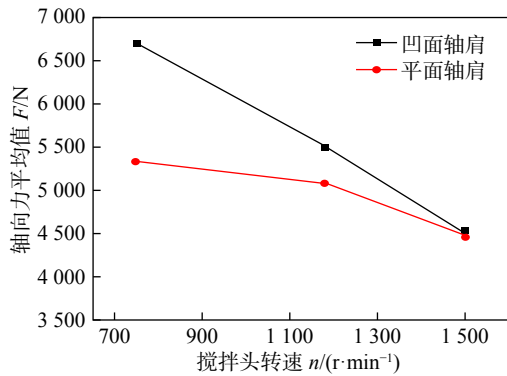
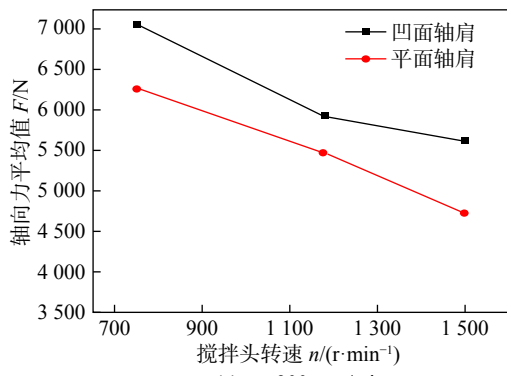
(a) $v = 95 \text{ mm/min}$ (b) $v = 190 \text{ mm/min}$ (c) $v = 300 \text{ mm/min}$

图 6 轴向力平均值随转速的变化规律

Fig. 6 Variation law of the average axial force with the rotation speed. (a) $v = 95 \text{ mm/min}$; (b) $v = 190 \text{ mm/min}$; (c) $v = 300 \text{ mm/min}$

面轴肩轴向力约为 4 500 N, 平面轴肩轴向力约为 4 480 N). 而这种趋势在图 7 中并不明显. 这可能与转速相对于焊接速度对焊接轴向力影响较大有关^[18].

从图 6 和图 7 可以看出, 当焊接速度一定时, 凹面轴肩和平面轴肩搅拌头所受轴向力均随搅拌头转速增加而减小. 当搅拌头转速一定时, 凹面轴肩和平面轴肩搅拌头所受轴向力均随焊接速度增大而增大, 且在相同的焊接参数下, 凹面轴肩搅拌头所受轴向力更大. 分析认为, 这与不同形状轴肩的产热机制不同有关, 且在焊接过程中两种不同形状的轴肩与板材的摩擦方式不同, 导致凹面轴肩所

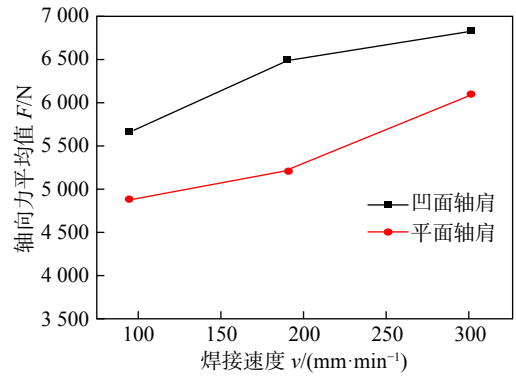
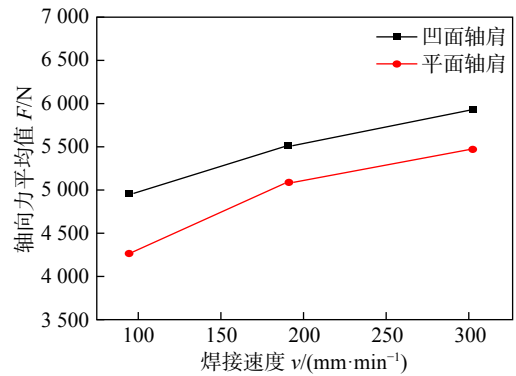
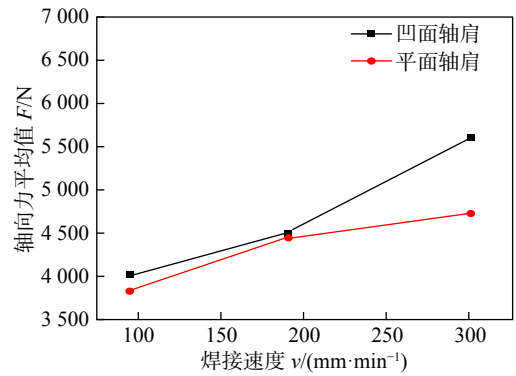
(a) $n = 750 \text{ r/min}$ (b) $n = 1\,180 \text{ r/min}$ (c) $n = 1\,500 \text{ r/min}$

图 7 轴向力平均值随搅拌头焊接速度的变化规律

Fig. 7 Variation of the average value of axial force with the travel speed of the tool. (a) $n = 750 \text{ r/min}$; (b) $n = 1\,180 \text{ r/min}$; (c) $n = 1\,500 \text{ r/min}$

受轴向力更大.

2.2 轴肩形状对焊接热输入的影响

根据 FSW 的“抽吸-挤压”^[19] 理论, 在焊接过程中, 搅拌头下的塑性金属沿螺纹表面轴向流动. 轴肩对塑性金属的驱动力会反作用于轴肩, 产生轴向力. 当焊接热输入充足时, 金属塑性程度高, 变形抗力减小, 轴向力变小. 当焊接热输入不足时, 金属的塑性程度降低, 变形抗力增大, 轴向力变大. 因此, 有必要分析轴肩形状对焊接热输入的影响^[20].

图 8 为搅拌头工作时轴肩与母材有效摩擦面积示意图. 从图 8a 可以看出, 对于平面轴肩, 肩部

的表面与母材表面平行,与母材接触充分.在焊接过程中,肩部与母材之间的摩擦会产生更多的热输入.对于凹面轴肩,由于轴肩下压量为 0.2 mm,而凹面轴肩端点到根部的垂直距离为 0.5 mm,故轴肩的平面与材料有一定的角度(图 8b).在焊接过程中,母材与凹面轴肩之间的有效摩擦面积主要集中在搅拌针的后面.在搅拌针前方,凹面轴肩与母材接触不足,该区域的摩擦热产生不足.由以上分析可知,平面轴肩与母材的有效摩擦面积大于凹面轴肩,平面轴肩产生的焊接热输入更多.

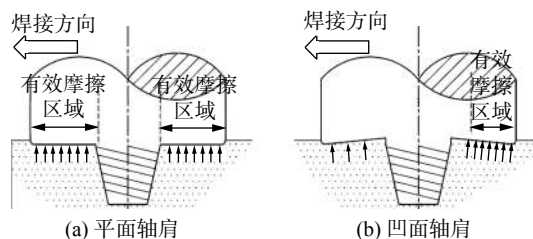


图 8 轴肩产热示意图

Fig. 8 Schematic diagram of heat generation by shaft shoulder. (a) flat shoulder; (b) concave shoulder

图 9、图 10 和图 11 分别为不同工艺参数组合下焊接所得的焊缝表面形貌.可以看出,焊缝表面均无明显焊接缺陷,随着焊接速度的增加,焊缝表面粗糙程度开始增加.当搅拌头转速与焊接速度不变时,凹面轴肩焊接所得焊缝表面粗糙度更大,

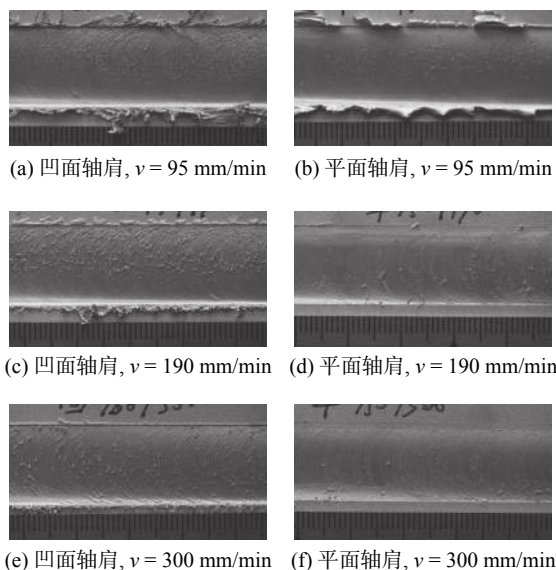


图 9 $n = 750$ r/min 时焊缝表面形貌

Fig. 9 Surface profile of the weld at $n = 750$ r/min. (a) concave shoulder, $v = 95$ mm/min; (b) flat shoulder, $v = 95$ mm/min; (c) concave shoulder, $v = 190$ mm/min; (d) flat shoulder, $v = 190$ mm/min; (e) concave shoulder, $v = 300$ mm/min; (f) flat shoulder, $v = 300$ mm/min

当焊接速度为 95, 190 mm/min 时,随搅拌头转速增加,两种轴肩形状所对应焊缝表面变得越来越光滑,但飞边量却逐渐增多;当焊接速度为 300 mm/min 时,随搅拌头转速增加,焊缝表面先变粗糙后变光滑,转速 1 180 r/min 时焊缝表面成形最差.分析认

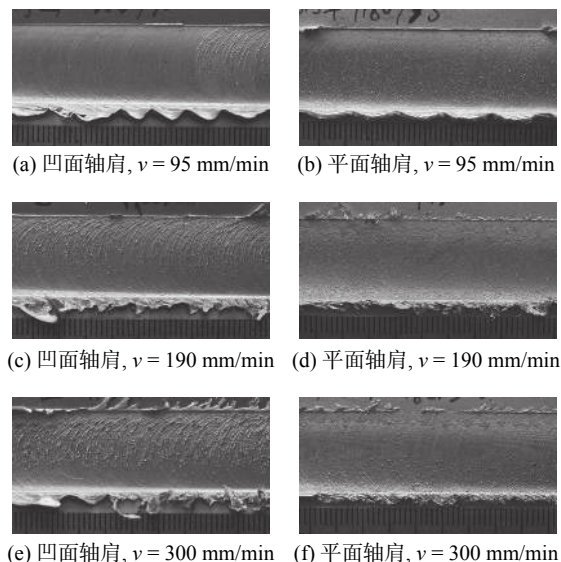


图 10 $n = 1180$ r/min 时焊缝表面形貌

Fig. 10 Surface profile of the weld at $n = 1180$ r/min. (a) concave shoulder, $v = 95$ mm/min; (b) flat shoulder, $v = 95$ mm/min; (c) concave shoulder, $v = 190$ mm/min; (d) flat shoulder, $v = 190$ mm/min; (e) concave shoulder, $v = 300$ mm/min; (f) flat shoulder, $v = 300$ mm/min

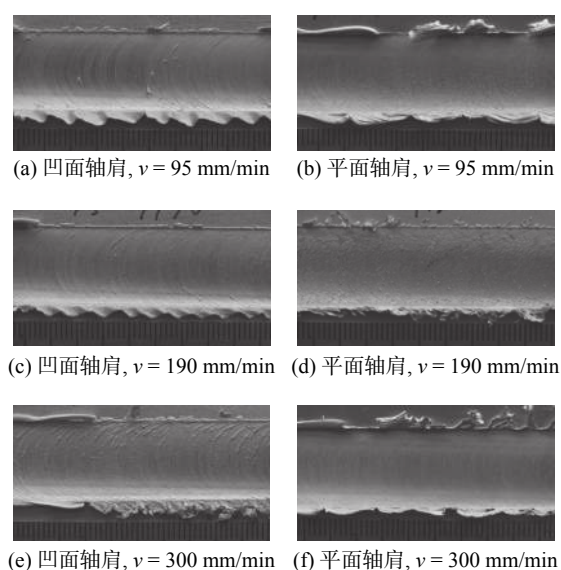


图 11 $n = 1500$ r/min 时焊缝表面形貌

Fig. 11 Surface profile of the weld at $n = 1500$ r/min. (a) concave shoulder, $v = 95$ mm/min; (b) flat shoulder, $v = 95$ mm/min; (c) concave shoulder, $v = 190$ mm/min; (d) flat shoulder, $v = 190$ mm/min; (e) concave shoulder, $v = 300$ mm/min; (f) flat shoulder, $v = 300$ mm/min

为,焊接热输入会影响焊缝表面形貌的成形^[21],当焊接热输入高时,搅拌头周围金属材料塑性程度高,流动性好,更容易脱离轴肩,形成光滑无缺陷的焊缝;而当焊接热输入不足时,金属塑性程度低,流动性变差,不容易脱离轴肩,焊缝表面因此变粗糙,且与平面轴肩相比,由于轴肩形状具有包拢作用,塑性金属更不容易脱离凹面轴肩,导致其在轴肩内互相挤压,随后又不均匀的在搅拌头后退侧排出,使得凹面轴肩搅拌头焊接所得焊缝更加粗糙^[22]。所以,焊接热输入的大小直接影响到金属材料的塑性变形,从而影响轴向力的大小。

图 12 为搅拌头转速为 1 500 r/min、焊接速度为 95 mm/min 时焊核区微观组织形貌。将焊核区的晶粒形状视为圆形,测量直径以表示晶粒的大小。经测量,轴肩形状为凹面时,焊核区的晶粒度为 16.47 μm ,轴肩形状为凹面时,焊核区的晶粒度为 22.21 μm 。可以看出,凹面轴肩下的焊核区晶粒度比平面轴肩下的晶粒度小。这与平面轴肩的产热较大有关。

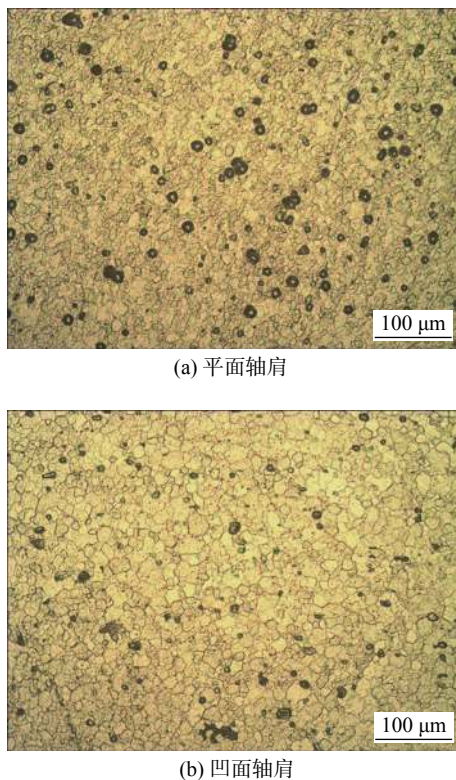


图 12 焊核区微观组织形貌

Fig. 12 Microstructure morphology of the weld core area. (a) flat shoulder; (b) concave shoulder

焊核区的铝合金材料在强烈搅拌作用下被压碎,然后经历高温热循环,使得组织动态再结晶,成为细小的再结晶结构,故热输入越大,晶粒度越大。

而焊接热输入是影响轴向力的关键因素,故焊核区晶粒度的变化会影响 FSW 轴向力,平面轴肩因其有效摩擦面积大,产生的热量多于凹面轴肩^[23]。由于平面轴肩下的温度较高,在焊核区会出现晶粒生长(图 12a)。凹面轴肩的焊接热输入较少,焊核区的晶粒结构不明显。因此,晶粒度相对较小(图 12b)。

2.3 搅拌头行进过程中轴肩的受力分析

为了了解随着搅拌头的行进不同形状轴肩的受力情况,建立了两种轴肩在焊接过程中的受力模型,如图 13 所示。其中图 13b 为凹面轴肩 a 点受力示意图,平面轴肩在焊接过程中其表面与板材充分接触,不受额外阻力影响;而当搅拌头轴肩形状为凹面时,由于轴肩形状的不同,在搅拌头行进时,工件材料会对轴肩产生额外的阻力,定义此阻力为 F_n ,如图 13 所示。将额外阻力 F_n 进行分解,可以分解为一个水平摩擦力和一个垂直于轴肩面的材料弹力,对垂直于轴肩面的弹力 F_1 进行正交分解,得到竖直方向的力 F_3 和水平方向的力 F_4 ,其中, F_3 为凹面轴肩上 a 点所受额外的垂直于工件的分力,正是 F_3 的产生,使凹面轴肩搅拌头所受轴向力增加且大于平面轴肩^[23]。

根据受力模型,平面轴肩所受轴向力如式 (1) 所示。

$$F_z = P_n S_1 = P_n \pi (R_1^2 - R_2^2) \quad (1)$$

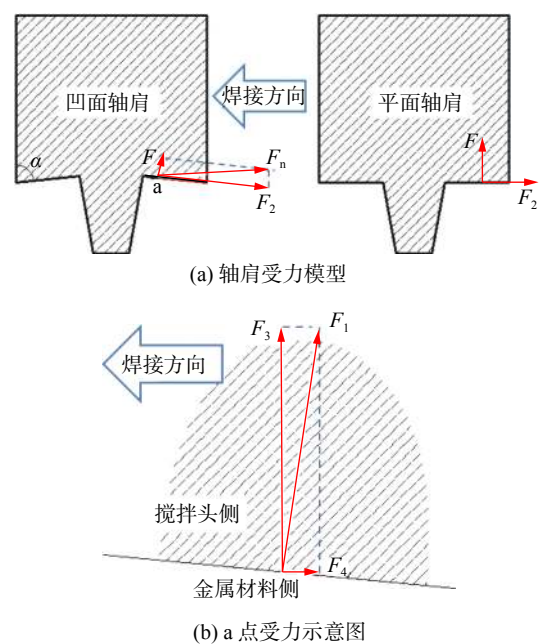


图 13 受力模型

Fig. 13 Force model. (a) shaft shoulder force model; (b) diagram of the force at point a

式中: F_z 为平面轴肩所受焊接轴向力; P_n 为垂直方向作用在轴肩上的力; S_1 为轴肩面积; R_1 为轴肩半径; R_2 为搅拌针根部半径^[8].

凹面轴肩所受力有两种, 一种是板材在垂直方向产生的反作用力, 另一种是在搅拌头行走过程中所产生的分力. 图 13a 中与 a 点处于同一水平面的

$$F'_z = P_n S_2 + \frac{1}{4} F_3 S_2 = P_n \left(\pi R_1 \frac{R_1}{\sin \alpha} - \pi R_2 \frac{R_2}{\sin \alpha} \right) + \frac{1}{4} F_n \cos \alpha \sin \alpha \left(\pi R_1 \frac{R_1}{\sin \alpha} - \pi R_2 \frac{R_2}{\sin \alpha} \right) = \left(\frac{P_n \pi}{\sin \alpha} + \frac{1}{4} F_n \pi \cos \alpha \right) (R_1^2 - R_2^2) \quad (2)$$

式中: F'_z 为凹面轴肩所受竖直分力; S_2 为凹面轴肩面积; α 为轴肩面与搅拌头轴线的夹角^[23].

由上述公式可知, 随着搅拌头的行进轴肩会受到额外阻力, 这个阻力的其中一个分力垂直于轴肩面, 从而使轴向力增加, 平面轴肩无额外阻力, 所以平面轴肩所受轴向力更小.

3 结 论

(1) 在相同的焊接参数下, 平面轴肩的轴向力小于凹面轴肩的轴向力. 当采用平面轴肩且转速为 1 500 r/min、焊接速度为 95 mm/min 时, 轴向力最小, 最小值约为 3 800 N.

(2) 与凹面轴肩相比, 平面轴肩与工件材料接触更良好, 摩擦面积更大, 摩擦产生的焊接热输入大于凹面轴肩.

(3) 在焊接热输入较大的情况下, 平面轴肩对应的焊缝表面形貌比凹面轴肩好. 平面轴肩下的焊核区晶粒尺寸更大, 在转速为 1 500 r/min、焊接速度为 95 mm/min 时, 采用凹面轴肩的焊核区晶粒度为 16.47 μm , 采用平面轴肩的焊核区晶粒度为 22.21 μm .

(4) 随着搅拌头的移动, 母材会对凹面轴肩产生一个阻力, 这种阻力的其中一个分力导致作用在凹面轴肩上的轴向力增大. 而平面轴肩平面与搅拌头行进方向平行, 因此不会叠加额外分力.

参考文献

- [1] 刘西畅, 李文亚, 高彦军, 等. 铝合金双轴肩 FSW 过程材料流动行为 [J]. 焊接学报, 2021, 42(3): 48 - 56.
Liu Xichang, Li Wenya, Gao Yanjun, *et al.* Material flow behavior of aluminum alloy double shaft shoulder stir friction welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021,

轴肩上的其它点与轴线所在平面, 与焊接方向存在夹角. 将轴肩上各点的分力值等效为 F_3 , 但受力面积必须相应小于轴肩面积的一半, 因此将焊接过程中凹面轴肩所受分力的面积定为轴肩总面积的 1/4. 根据上述分析, 凹面轴肩所受轴向力如式 (2) 所示^[23].

42(3): 48 - 56.

- [2] 董林, 李继忠, 栾国红. 机器人 FSW 发展现状与趋势 [J]. 航空制造技术, 2014, 17 (5): 76 - 79.
Dong Lin, Li Jizhong, Luan Guohong. Development of robotic friction stir welding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 17 (5): 76 - 79.
- [3] Cook G E, Crawford R, Clark D E, *et al.* Robotic friction stir welding[J]. Industrial Robot, 2004, 31(1): 55 - 63.
- [4] Soundararajan V, Valant M, Kovacevic R. An overview of R & D work in friction stir welding at SMU[J]. Metalurgija, 2006, 12(4): 275 - 295.
- [5] 周利, 刘会杰, 刘鹏. 搅拌头受力模型及应用 [J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 93 - 96.
Zhou Li, Liu Huijie, Liu Peng. Tool force model and application[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 93 - 96.
- [6] Zhang Z, Zhang H. Numerical studies on effect of axial pressure in friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(3): 226 - 248.
- [7] 张昊. 低轴向力机器人 FSW 工艺基础研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
Zhang Hao. Basic research on friction stir welding of low axial force robot[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [8] 李程锦, 王陆钊, 刘其鹏, 等. 搅拌头几何参数及倾角对 FSW 接质量影响的数值分析 [J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(5): 70 - 74.
Li Chengjin, Wang Luzhao, Liu Qipeng, *et al.* Numerical analysis of tool geometric parameters and tilted angle impact on quality of FSW[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(5): 70 - 74.
- [9] 张成行, 曹宇, 曹玲飞, 等. 异种铝合金 FSW 接头的显微组织、力学及腐蚀性能 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2255 - 2265.
Zhang Chengxing, Cao Yu, Cao Lingfei, *et al.* Microstructure, mechanical and corrosion properties of dissimilar friction stir welded aluminum alloys joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2255 - 2265.
- [10] 廖美玲. 轴肩形貌对 FSW 缝金属塑性流动及组织性能的影响 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

- Liao Meiling. Effect of shoulder morphology on plastic flow and tissue properties of stir friction weld metal[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [11] 张忠科, 王希靖. 搅拌头形状对搅拌头受力和温度的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(4): 17 – 20.
- Zhang Zhongke, Wang Xijing. Effect of tool shape on the force and temperature of stirring head[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(4): 17 – 20.
- [12] 张威, 潘杨, 韩锐, 等. FSW 接过程搅拌头几何对搅拌头受力的影响 [J]. 应用物理, 2019, 9(4): 169 – 176.
- Zhang Wei, Pan Yang, Han Rui, *et al.* The Influence of tool geometry on the force exerted on the tool in friction stir welding[J]. Applied Physics, 2019, 9(4): 169 – 176.
- [13] Zhao Pengcheng, Shen Yixiang, Huang Guoqiang. Numerical simulation of stir friction butt welding of 6061 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals (English Edition), 2018, 28(6): 1216-1225.
- [14] 杨素媛, 张保垒. 厚板 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊焊接接头的组织与性能 [J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 1 – 4.
- Yang Suyuan, Zhang Baolei. Organization and properties of stir friction welded joints of thick plate AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 1 – 4.
- [15] 朱海, 孙龙, 彭春明, 等. 6061 铝合金接头成形质量及性能与 FSW 工艺参数关系的研究 [J]. 焊接, 2017(7): 45 – 48.
- Zhu Hai, Sun Long, Peng Chunming, *et al.* Study on the relationship between forming quality and performance of 6061 aluminum alloy joints and friction stir welding process parameters[J]. Welding & Joining, 2017(7): 45 – 48.
- [16] Rajneesh Kumar, Kanwer Singh, Sunil Pandey. Effect of stir friction welding process parameters on the force and heat input to the stirring head of AA5083 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 288 – 298.
- [17] 曹丽杰, 潘荣秀, 郑钟盛. 铝合金 FSW 插入工艺参数对轴向力和扭矩的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(10): 55 – 58, 62.
- Cao Lijie, Pan Rongxiu, Zheng Zhongsheng. Effect of inserting process parameters on axial force and torque occurred during FSW of aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(10): 55 – 58, 62.
- [18] Yang Min, Bao Ruijun, Liu Xiuzhong, *et al.* Thermo-mechanical interaction between aluminum alloy and tools with different profiles during friction stir welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 495 – 506.
- [19] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. FSW 焊缝金属塑性流动的抽吸-挤压理论 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 89 – 94.
- Ke Liming, Pan Jiluan, Xing Li, *et al.* Sucking-extruding theory for the material flow in friction stir welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 89 – 94.
- [20] 赵亚东, 沈长斌, 刘书华, 等. 5083 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的电化学腐蚀行为 [J]. 大连交通大学学报, 2008, 22(4): 70 – 73.
- Zhao Yadong, Shen Changbin, Liu shuhua, *et al.* Electrochemical corrosion behavior of stir friction welded joints of 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008, 22(4): 70 – 73.
- [21] Kim Y P, Kim C H, Kim Y G, *et al.* Trends of technology development of friction stir welding machine[J]. Journal of Welding and Joining, 2016, 34(3): 1 – 5.
- [22] Giorgi M D, Scialpi A, Panella F W, *et al.* Effect of shoulder geometry on residual stress and fatigue properties of AA6082 FSW joints[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 26 – 35.
- [23] 王希靖, 张忠科, 韩道彬, 等. FSW 中摩擦头前进阻力的检测及分析 [J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 1 – 4.
- Wang Xijing, Zhang Zhongke, Han Daobin, *et al.* Measurements and analysis of onward force on stir-pin in FSW process[J]. Transactions of the China welding Institution, 2010, 31(4): 1 – 4.

第一作者: 牛文涛, 硕士; 主要研究方向为机器人搅拌摩擦技术; Email: 364904899@qq.com.

通信作者: 黄永德, 博士, 教授; Email: huangydhm@nchu.edu.cn.

(编辑: 戴红)