

铝合金搅拌摩擦焊力参量对缺陷的响应规律研究

曹鹏¹, 管卫²

1. 济宁市港航事业发展中心 山东济宁 272000

2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300354

摘要: 力参量是搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 缺陷形成的重要信息载体, 在缺陷预测中具有重要作用。利用测力平台实现了铝合金FSW过程中前进阻力、侧向力和轴向压力的原位测量, 分析了力参量对缺陷形成及缺陷尺寸的响应规律。结果表明: 在典型工艺参数下, 焊接过程中三向力呈现出先增加、后稳定、最后快速降低的变化趋势。在低转速 ($\leq 750\text{r/min}$) 或高焊接速度 ($\geq 240\text{mm/min}$) 条件下, 焊缝内部产生隧道缺陷, 力参量变化主要体现在轴向压力降低和侧向力增加。侧向力与隧道缺陷尺寸呈正相关, 相关系数为 0.92; 轴向压力与缺陷尺寸呈正相关, 相关系数为 -0.60。轴向力的降低是由于轴肩对焊缝材料的挤压作用减弱, 焊缝材料难以被包裹并迁移至焊缝表面, 从而导致隧道和沟槽缺陷产生; 侧向力的增加是由于搅拌针驱动材料的能力减弱, 导致搅拌针前方材料在焊缝后退侧堆积, 加剧了搅拌针对后退侧材料的挤压, 进而导致搅拌针后方材料回填困难, 形成隧道缺陷。

关键词: 铝合金; 搅拌摩擦焊; 力参量; 缺陷; 响应规律

Research on the response of force characteristics to defect in aluminum alloy friction stir welding

CAO Peng¹, GUAN Wei²

1. Jining Port and Shipping Development Center, Jining 272000, Shandong, China

2. School of Materials and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China

Abstract: Force components serve as the information carriers for defect evolution in aluminum alloy friction stir welding, playing a crucial role in defect prediction and identification. This paper employs a force measuring platform to conduct in-situ measurements of traverse force, lateral force, and plunge force during the welding process. It further analyzes the relationship between force characteristics and the formation and size of defects. The results indicate that welding force initially increases, then stabilizes, and ultimately decreases rapidly during the welding process. Tunnel defects are observed within the weld under conditions of low rotation speed ($\leq 750\text{r/min}$) or high welding speed ($\geq 240\text{mm/min}$). The variations in welding force are primarily characterized by a reduction in plunge force and an increase in lateral force. Notably, the lateral force exhibits a positive correlation with the size of tunnel defects, with a correlation coefficient of 0.92, while the plunge force shows a negative correlation with defect size, with a correlation coefficient of -0.60. Furthermore, the reduction in plunge force is attributed to the diminished extrusion effect of the shoulder on the weld material, making it difficult for the material to be wrapped and migrated to the weld surface, thereby leading to the formation of tunnel and groove defects. The increase in lateral force results from the reduced ability of the stirring pin to drive the material, causing a buildup of material in front of the

基金项目: 航空科学基金 (20240011048001)。

stirring pin on the retreating side of the weld. This exacerbates the extrusion of materials on the retreating side by the stirring pin, making it challenging for the materials behind the stirring pin to backfill, which ultimately leads to the formation of tunnel defects.

Keywords: aluminum alloy; friction stir welding; force characteristics; defect; response

1 序言

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是英国焊接研究所于1991年发明的一种固相焊接技术, 广泛应用于航空航天、轨道交通和新能源汽车等领域中轻量化构件的焊接^[1, 2]。随着FSW技术的大规模应用, 生产企业对焊接质量的重视程度越来越高。然而, FSW焊接质量受到试板尺寸偏差、装配误差、搅拌工具磨损及焊接过程热累积等多因素影响。在焊接过程中, 搅拌工具界面摩擦产生的热量以及焊缝材料塑性变形产生的热量不稳定, 导致焊缝材料流动性差, 焊缝缺陷率偏高, 制约了高质量FSW技术的发展和应^[3, 4]。有效识别和预测焊接缺陷是高质量FSW技术的重要前提。

在FSW过程中, 高速旋转的搅拌头驱动焊缝金属流动, 搅拌头与焊缝金属之间相互作用产生了焊接力, 焊接力是焊缝成形和缺陷演变的信息载体。在三维空间上, 焊接力包括前进阻力 (F_x)、侧向力 (F_y) 和轴向压力 (F_z) 3个分量^[5, 6]。研究发现, 力参量与焊缝材料流动、接头质量之间存在密切关联。例如, F_x 和 F_y 是搅拌头对焊缝材料挤压和剪切作用下所产生的沿X轴和Y轴方向的合力, 其中, 搅拌头和焊缝材料接触界面上的剪切摩擦力是搅拌针周围材料流动的驱动力, 理论上与材料流动速度和流动层厚度线性相关^[7, 8]。 F_x 和 F_y 周期性波动波形反映了焊缝材料的周期性流动和回填行为^[9]。 F_x 和 F_y 的3次谐波振幅、功率谱密度和波形畸变程度的增加通常意味着焊接缺陷的形成^[10, 11]。显然, 力参量在FSW缺陷预测和识别方面具有重要的应用潜力。然而, 研究人员对FSW过程中力参量的基本特性的认识仍然有限, 对于力参量对缺陷演变响应规律及潜在的响应机理仍缺乏深入研究。

本文针对8mm厚AA-5A06铝合金开展FSW焊接试验, 通过自主研发的测力装置实现了力参量的原位测量, 分析铝合金搅拌摩擦焊接过程中基本特征

和变化规律, 研究旋转速度和前进速度对焊接力参量和缺陷演变的影响, 并阐述力参量对缺陷形成的响应规律和机理, 为基于力参量的焊接缺陷预测提供指导依据和准则。

2 试验及方法

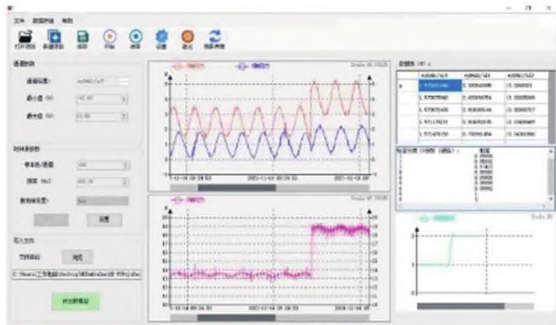
试验采用尺寸为250mm×50mm×8mm的AA-5A06铝合金。焊接试验在龙门式二维FSW设备上^{进行}, 设备型号HT-JM16/25/2。搅拌头材质为H13工具钢, 轴肩直径为18mm, 加工有环形凹槽。搅拌针长度为7.9mm, 端部和根部直径分别为4mm和8mm, 侧面加工有螺纹和三锥面。旋转速度设定为350~1400r/min, 焊接速度为80~480mm/min, 轴肩下压量为0~0.2mm, 焊接倾角为2.5°。采用对接焊接, 焊接方向平行于试板的轧制方向。

采用自主研发的测力装置测量铝合金焊接过程中的力参量。测力装置包括工作台、三分量力传感器、信号放大器、信号采集卡和信号采集分析软件, 其中工作台和信号采集软件界面如图1所示。传感器尺寸为160mm×160mm×60mm, 以2×2形式均匀安置在上下两垫板之间, 主要性能指标见表1。为了尽可能保留力参量中的细节信息, 力参量采样频率设置为7800Hz。采用红外测温仪采集焊缝表面温度, 测温点位于搅拌针后方5mm位置, 采样频率为20Hz。

焊接完成后, 沿垂直于焊缝方向制备尺寸为30mm×10mm的金相试样。经过400#、600#、800#、1000#和1500#砂纸水磨及机械抛光后, 用凯勒试剂 (HF: HCl: HNO₃: H₂O = 4mL: 3mL: 5mL: 90mL) 腐蚀焊缝横截面15s。在OLYMPUS GX51光学显微镜下观察焊缝宏观形貌和缺陷特征。通过图像处理技术提取缺陷的面积, 包括对焊缝截面形貌进行灰度化处理和灰度阈值划分, 统计焊缝横截面灰度值低于0.3的区域面积 (缺陷面积)。



a) 工作台



b) 软件界面

图1 FSW测力系统

表1 力传感器的主要技术参数

序号	参数指标	参考值
1	F_x 、 F_y 、 F_z 额定载荷/kN	40、40、60
2	F_x 、 F_y 、 F_z 灵敏度/(mV/V)	1.0、1.0、0.9
3	非线性 (%)	0.15
4	滞后误差 (%)	0.25
5	各向综合误差 (%)	<0.3
6	各向耦合误差 (%)	<0.1
7	允许使用温度/℃	-20~+80
8	允许过载 (%)	150

3 结果分析与讨论

3.1 FSW焊接过程三向力的变化规律

图2所示为典型工艺参数下焊接过程中三向力的变化规律。由图2可知，在焊接过程中，三向力呈现先增加、随后保持稳定、最后迅速降低的趋势。在0~150s时，高速旋转的搅拌头逐渐扎入待焊工件，随着下压量的增加， F_z 先增加，随后保持恒定，最后快速增加， F_x 和 F_y 数值为0kN。在150~500s时，搅拌头沿着焊接方向前进，此时， F_x 、 F_y 和 F_z 数值分别保持在2.8kN、1.5kN和26.2kN。在500s时，搅

拌头回抽，与试板分离，三向力迅速降至0kN。

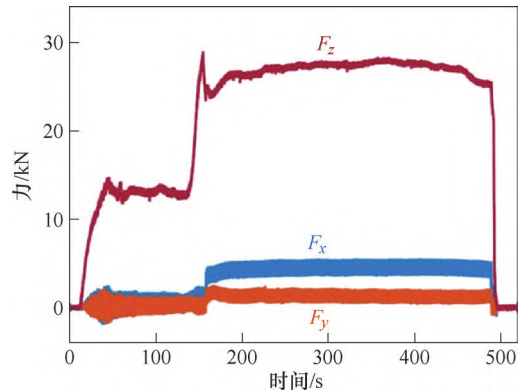


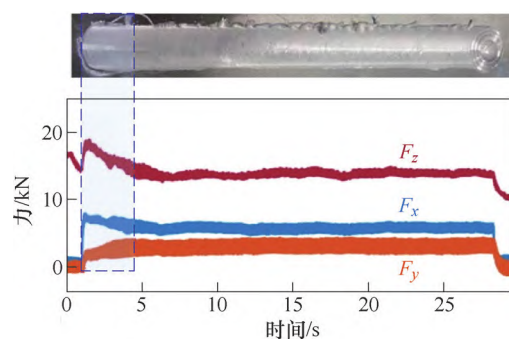
图2 铝合金FSW焊接过程中三向力的变化规律

3.2 典型工艺参数下力参量对缺陷的响应规律

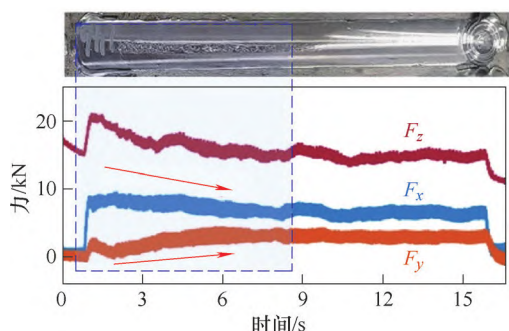
图3所示为3组不同工艺参数下焊接过程中的三向力数据和焊缝表面形貌。由图3a可知，在焊缝起点处，焊缝表面出现飞边缺陷。这一阶段， F_y 从1.5kN升高至2.5kN， F_z 从18.5kN降低至14.0kN。在随后焊接过程中，焊缝表面质量良好，未观察到飞边缺陷， F_y 和 F_z 保持恒定。由图3b可知，焊缝表面前半段存在沟槽缺陷，焊缝后半段成形良好。焊接过程前半段， F_z 持续降低， F_y 持续增加；焊接过程后半段，三向力保持恒定。由图3c可知，在焊接时间为2s时，搅拌针断裂并遗留在焊缝内部，随后焊接过程中仅轴肩对试板表面施加摩擦作用。

“断针”位置三向力发生明显变化： F_z 从15.1kN降低至10.7kN， F_x 从6.7kN降低至0.6kN， F_y 从2.4kN降低至-1.4kN。考虑到断针之前的焊接力来自于轴肩和搅拌针对焊缝材料的搅拌作用，断针后的焊接力仅来源于轴肩对焊缝材料的摩擦作用，因此断针瞬间降低的焊接力来源于搅拌针对焊缝内部材料的挤压作用^[11]。基于断针时刻三向力的降低幅度可发现， F_x 和 F_y 主要来源于搅拌针对焊缝材料的搅拌作用， F_z 则来源于轴肩对焊缝材料的锻压作用。

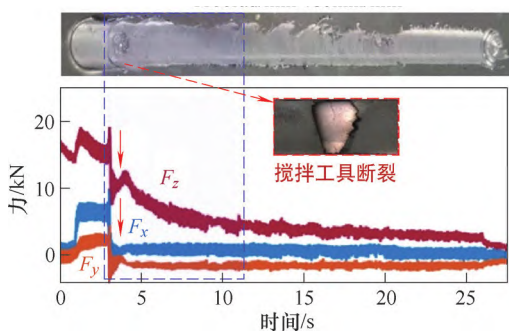
图4所示为不同旋转速度下的接头横截面形貌及三向力数据。在6组试验中，焊接速度恒定为280mm/min，轴肩下压量保持在0.1mm。由图4a可知，在低旋转速度（≤750r/min）下，焊缝存在隧道缺陷；当旋转速度增加至1000r/min和1200r/min时，焊缝成形良好。然而，当旋转速度进一步提高到1400r/min时，焊缝表面出现沟槽缺陷。 F_z 随着旋转速度的增加而增加， F_x 随着旋转速度的增加保持



a) 焊缝成形良好 (1200r/min、440mm/min)



b) 表面存在沟槽 (1400r/min、480mm/min)

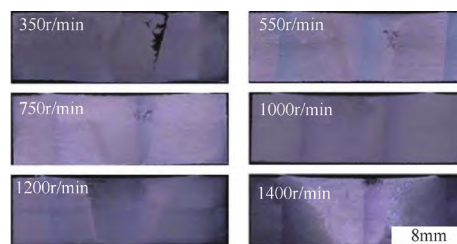


c) 搅拌工具断裂 (1100r/min、480mm/min)

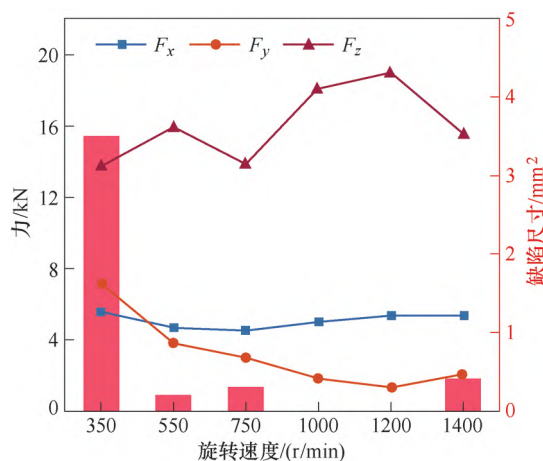
图3 力参量对焊缝成形的响应

恒定, 而 F_y 随着旋转速度的增加而降低, 且降低幅度在三向力中最为明显。这主要是因为旋转速度增加意味着搅拌针周围材料流动更加充分, 缓解了焊接过程中焊缝前进侧和后退侧之间的非对称性, F_y 因此降低^[9]。同时, 在低旋转速度下, 焊缝通常存在隧道缺陷, F_z 数值较低, F_y 高于 F_x ; 当旋转速度升高到适当范围内, 焊缝成形良好, 未出现缺陷, 此时 F_z 数值较高, F_x 高于 F_y 。

图5所示为不同旋转速度下力参量与缺陷尺寸的相关系数。由图5可知, F_x 、 F_y 与隧道缺陷尺寸呈正相关, 相关系数分别为0.51和0.74。 F_z 与隧道缺陷尺寸呈负相关, 相关系数为-0.73。结果表明, 在不同旋转速度下, F_y 与隧道缺陷尺寸相关性程度最



a) 接头横截面形貌



b) 三向力数据

图4 不同旋转速度下的接头横截面形貌及三向力数据

高, F_y 越高, 缺陷尺寸越大。 F_z 与隧道缺陷尺寸相关性次之, F_z 越高, 缺陷尺寸越小。

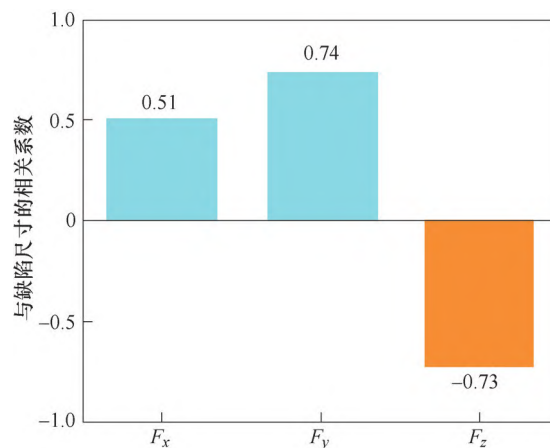
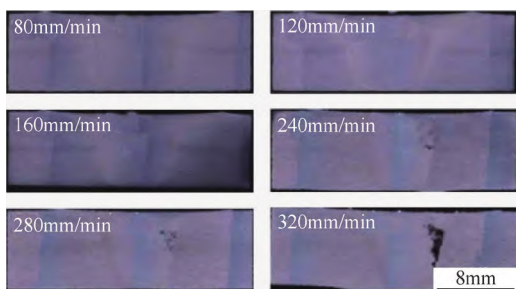


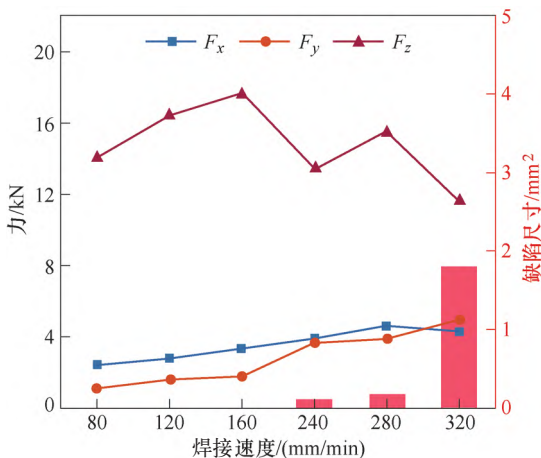
图5 不同旋转速度下力参量与缺陷尺寸的相关系数

图6所示为不同焊接速度下焊接接头横截面形貌及三向力数据。在6组试验中, 旋转速度恒定为550r/min, 下压量恒定为0.1mm。由图6可知, 当焊接速度 ≤ 160 mm/min时, 焊缝成形良好; 当焊接速度 > 160 mm/min时, 焊缝内部出现隧道缺陷。 F_x 和 F_y 随着焊接速度的增加而增加, F_z 则呈现先增加后降低的变化规律。通常情况下, 焊接速度越高, 焊

接热输入越低,焊缝材料软化程度降低。此外,搅拌头每旋转一圈时带动更多材料沿旋转方向流动,焊缝前进侧和后退侧材料的不对称性随之增加,因此焊接力也随着转速的增加而增加^[7]。 F_z 随着焊接速度增加而降低的原因可能与试验过程中试板装配的偏差、轴肩下压量的误差等因素有关^[12]。由上述可知,力参量特征对缺陷演变存在明确的响应。当焊缝表面存在沟槽缺陷时,力参量的响应主要体现为 F_z 降低和 F_y 增加。当焊缝内部出现隧道缺陷时,力参量的响应同样表现为 F_z 降低和 F_y 增加。当隧道缺陷尺寸 $>1.5\text{mm}^2$ 时, F_y 的数值高于 F_x 。



a) 接头横截面形貌



b) 三向力数据

图6 不同焊接速度下焊接接头横截面形貌及三向力数据

图7所示为不同焊接速度下力参量与隧道缺陷尺寸的相关系数。由图7可知, F_x 、 F_y 与隧道缺陷尺寸呈正相关,相关系数分别为0.59和0.92; F_z 与隧道缺陷尺寸呈负相关,相关系数为-0.6。

综上所述,在不同的焊接参数下,力参量对隧道缺陷表现出较强的响应能力。通常情况下, F_z 降低及 F_y 增加对应着焊接过程中隧道缺陷形成。此外, F_y 与隧道缺陷尺寸相关性最高,正相关系数达到0.92; F_z 与隧道缺陷尺寸呈负相关。

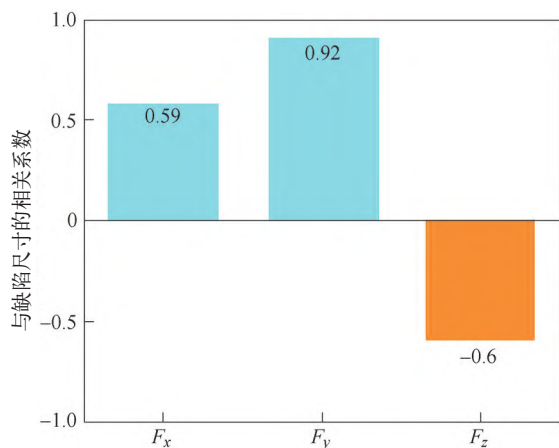


图7 不同焊接速度下力参量与隧道缺陷尺寸的相关系数

3.3 热力耦合下力参量对缺陷成形的响应机制

为了探究力参量对缺陷形成的响应机理,需要对热力耦合作用下的焊缝成形过程进行分析。图8所示为铝合金FSW焊接过程中三向力和温度信号,其中测温点位于焊缝表面轴肩后方5mm位置。为了较为直观地体现出FSW三向力和温度之间的耦合关联,焊接过程中轴肩下压量从0.1mm持续降低至-0.1mm,即开始时刻轴肩压入试板0.1mm,结束时刻轴肩与试板表面间隙为0.1mm。

焊接过程中, F_y 持续增加, F_z 持续降低,焊缝表面温度同样持续降低,如图8所示。结果表明,轴向力降低、侧向力增加与焊接热输入降低密切相关,即力参量对缺陷成形的响应机制与焊接热输入密切相关。此外,结合断针试验结果可知, F_z 主要来源于轴肩对焊缝表面材料的挤压作用, F_y 则主要来源于搅拌针对焊缝材料的挤压作用。在此基础上,分别探究热力耦合作用下 F_z 降低及 F_y 增加对缺

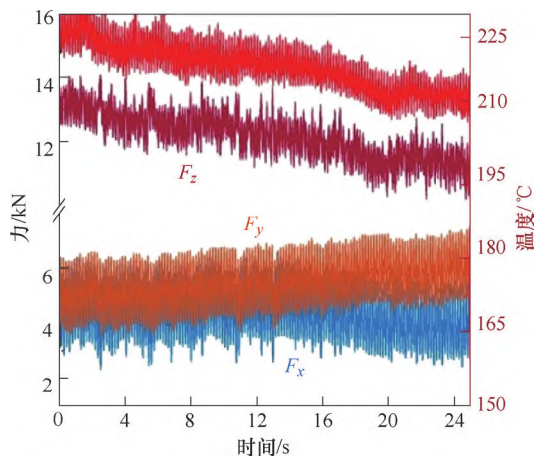


图8 焊接过程中三向力和温度变化规律

陷形成的响应机制。

图9所示为轴向压力对缺陷形成的响应。 F_z 主要来源于轴肩对焊缝表面的挤压作用,同时,轴肩与焊缝表面之间的摩擦产热行为满足库伦摩擦定律。当轴肩与焊缝表面材料紧密接触时,轴肩对焊缝表面材料施加载荷高,两者之间剧烈的摩擦作用产生充足的摩擦热量,焊缝材料充分软化,轴肩影响区材料流动充分,同时轴肩对焊缝表面材料起到良好的包覆作用。相反,当轴肩下压量不足时,轴肩对焊缝表面材料的挤压作用减弱,导致焊缝表面摩擦热不足,材料的软化程度降低,变形抗力增加。轴肩对焊缝表面材料的包覆作用减弱,焊缝材料容易迁移至焊缝表面,从而导致焊缝表面沟槽缺陷或焊缝内部隧道缺陷的形成^[12, 13]。

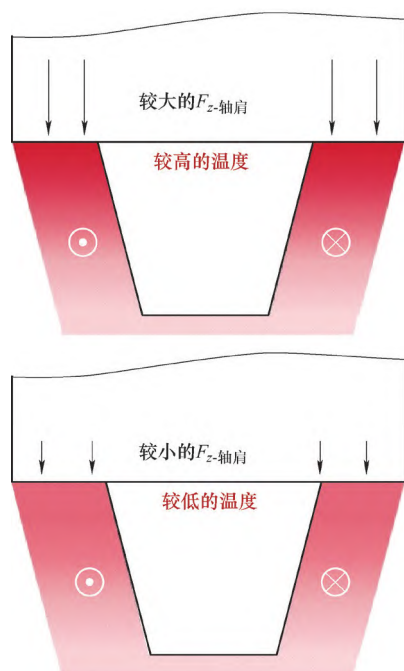


图9 轴向压力对缺陷形成的响应

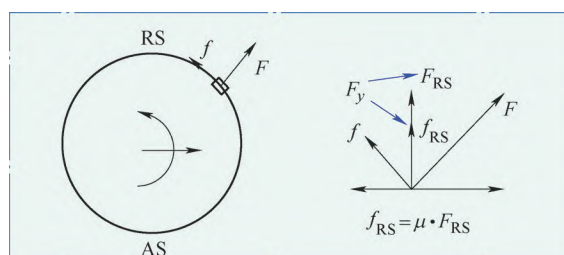
图10所示为侧向力对搅拌针周围材料流动和缺陷形成的响应。需要说明的是,在搅拌针前进过程中,搅拌针后方产生瞬时空腔,搅拌针周围材料流动至焊缝后方时,回填瞬时空腔形成焊缝,因此搅拌针与后方材料的相互作用可忽略不计^[6, 14]。

如图10a所示,搅拌头前方的材料沿搅拌头旋转方向流动至搅拌针后方, F_y 主要来源于搅拌针与后退侧材料的挤压作用,方向指向焊缝后退侧,即 F_{RS} 与 f_{RS} ^[14, 15]。

如图10b所示,当焊接热输入充足时,搅拌针前

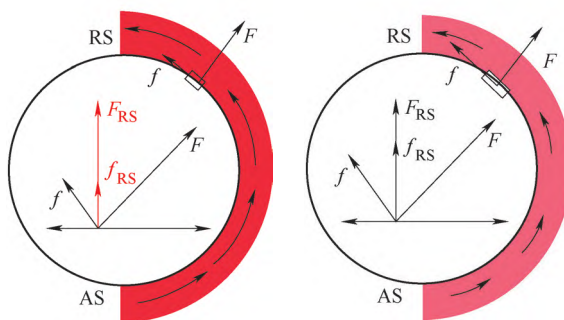
方材料的软化程度较高,搅拌针与焊缝材料近似黏着接触,此时旋转的搅拌针对焊缝材料施加较低的剪切摩擦力即可驱动材料流动^[16, 17],对应搅拌针和焊缝材料接触界面上的剪切摩擦力较低。同时,考虑到剪切摩擦力指向焊缝后退侧的部分是 F_y 的主要构成,因此此时 F_y 数值也相对较低。

如图10c所示,当焊缝内部产热不充分时,焊缝材料软化程度较低,材料流变阻力较高,材料流动速度低。搅拌头与焊缝材料之间呈现近似滑移接触,接触界面上的剪切摩擦力增加,指向焊缝后退侧的分量增加,导致 F_y 值升高。



a) 搅拌摩擦焊受力图

$\mu \downarrow$	流变阻力低	$\mu \uparrow$	流变阻力高
$f_{RS} \downarrow$	材料流速高	$f_{RS} \uparrow$	材料流速低
$F_y \downarrow$	焊缝形成	$F_y \uparrow$	缺陷产生



b) 产热充足

c) 产热不足

图10 侧向力对缺陷形成的响应

综上所述, F_z 的降低和 F_y 的增加对FSW缺陷形成具备良好的响应能力。其中, F_z 主要来源于轴肩对焊缝表面材料的挤压作用,其数值降低意味着轴肩对焊缝表面材料包裹能力减弱,焊缝材料溢出轴肩,从而导致沟槽和隧道缺陷形成。 F_y 主要来源于搅拌针对后退侧的挤压作用, F_y 的增加反映了搅拌针对前方材料的剪切摩擦力增高,焊缝材料的软化程度较低,变形抗力较高,这导致材料沉积在焊缝后退侧,进而在搅拌针后方形成隧道缺陷。

4 结束语

本文分析了铝合金FSW过程中三向力的基本特征和变化规律,统计了旋转速度和焊接速度对力参量和焊缝成形质量的影响规律,发现 F_y 的增加和 F_z 的降低对缺陷形成具有良好的响应。

1) 焊接力的变化较好地反映了搅拌头机械运动及焊缝材料热塑性状态变化。尤其在下压阶段, F_z 呈现先增加、后稳定,最后快速增加的变化规律,准确反映了搅拌针和轴肩对焊缝材料挤压作用的变化。

2) F_z 的降低和 F_y 的增加反映了焊缝隧道和沟槽缺陷的形成。 F_y 与隧道缺陷尺寸呈正相关, F_z 与隧道缺陷尺寸呈负相关。当缺陷尺寸超过 1.5mm^2 时, F_y 高于 F_x 。

3) F_z 的降低主要是由于轴肩对焊缝材料的挤压作用降低,导致焊缝材料难以被包裹并迁移至焊缝表面,从而产生隧道和沟槽缺陷产生; F_y 的增加则由于搅拌针驱动材料能力减弱,搅拌针前方材料堆积在焊缝后退侧,加剧了搅拌针对后退侧材料的挤压作用,造成搅拌针后方材料回填困难,从而产生隧道缺陷。

参考文献:

- [1] 周法权, 张华德, 乔如旺, 等. 多功能一体化搅拌摩擦焊装备研究[J]. 金属加工(热加工), 2013, (12): 62-63, 66.
- [2] 付瑞东, 李艺君. 我国搅拌摩擦焊技术的发展及展望[J]. 金属加工(热加工), 2020(6): 14-18, 28.
- [3] 陈芳浩, 丁凤林, 宋飞, 等. 铝合金搅拌摩擦焊焊缝X射线检测研究[J]. 焊接技术, 2022, 51(11): 35-39.
- [4] 易冠英. 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷的无损检测研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [5] ESLAMI S, MOURAO L, VIRIATO N, et al. Multi-axis force measurements of polymer friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 51-56.
- [6] TRIMBLE D, MONAHGAN J, O'DONNELL G. Force generation during friction stir welding of AA2024-T3[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 9-12.
- [7] ZENG X, XUE P, WANG D, et al. Effect of processing parameters on plastic flow and defect

formation in friction-stir-welded aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(7): 2673-2683.

- [8] SHRIVASTAVA A, PFEFFERKORN F, DUFFIE N, et al. Physics-based process model approach for detecting discontinuity during friction stir welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 605-614.
- [9] JAGADEESHA C. Flow analysis of materials in friction stir welding[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2018, 27(3-4): 20180020.
- [10] GUAN W, CUI L, LIANG H, et al. The response of force characteristic to weld-forming process in friction stir welding assisted by machine learning[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 253: 108409.
- [11] GUAN W, ZHAO Y, LIU Y, et al. Force data-driven machine learning for defects in friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2022, 217: 114765.
- [12] FRANKLE D, RUDRARAJU S, ZINN M, et al. Understanding process force transients with application towards defect detection during friction stir welding of aluminum alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 251-261.
- [13] 康栗, 李冬晓, 李晓光, 等. 铝合金搅拌摩擦焊力的周期性波动特征与机制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 55-63.
- [14] 康栗. 基于三向力特征的铝合金搅拌摩擦焊成形及缺陷预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [15] CHEN G, LI H, WANG G, et al. Effects of pin thread on the in-process material flow behavior during friction stir welding: A computational fluid dynamics study[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 12-21.
- [16] 邢丽, 魏鹏, 宋晓, 等. 轴肩下压量对搅拌摩擦焊搭接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 15-19.
- [17] 王月, 柴鹏, 赵华夏. 下扎深度影响搅拌摩擦焊过程轴向压力的规律研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(19): 135-139.