

焊接距离对钛合金搅拌摩擦焊搅拌头磨损的影响

张泽龙¹, 刘 强¹, 孙晨阳¹, 程国文¹, 邵 帅², 陈 宜¹, 黄永德¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 上海发那科机器人有限公司, 上海 200000)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 技术对 TC4 钛合金热轧板进行焊接。通过失重法、3D 影像仪和扫描电镜及能谱仪对 TC4 钛合金 FSW 过程中 DZ22 高温合金搅拌头磨损情况进行了表征, 主要研究了焊接距离对 TC4 钛合金 FSW 搅拌头磨损的影响。实验结果表明: 搅拌头磨损率与焊接距离成正相关, 焊接距离达到 180 mm 后搅拌头磨损严重, 搅拌针长度缩短 0.24 mm, 磨损率为 0.97%; 轴肩深度缩短 0.4 mm, 磨损率为 1.73%; 搅拌头质量减少 0.15 g, 磨损率为 0.74%。在 FSW 过程中, 高温高压是造成搅拌头磨损的主要原因, 搅拌头磨损形式主要有机械磨损、磨粒磨损、粘结磨损和氧化磨损, 搅拌头的磨损是这几种磨损形式相互作用的结果。搅拌头的磨损物会对焊缝造成污染, 形成孔洞等缺陷。

关键词: 搅拌摩擦焊 (FSW); TC4 钛合金; 搅拌头磨损; 磨损形式

中图分类号: TG453^{+.9}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)07-2525-08

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是一种先进的新型固相连接技术。与传统的熔焊方法相比, FSW 具有高效低能耗、环境友好、残余应力低、工件变形小等优点^[1-5]。目前 FSW 主要应用于低熔点、低强度金属。在对铝、镁、铜^[6-8]等低熔点金属成功焊接的基础上, 对钛合金等高强度、高熔点金属的连接也有不错成效, 对钛合金 FSW 的工艺、组织、性能等的研究也在不断加深^[9-12]。TC4 钛合金, 由于其密度小、比强度高、韧性好、耐高温、无磁无毒等优异的综合性能, 被广泛应用于航空航天、生物医疗等领域^[13-15]。

在 FSW 焊接过程中, 其峰值温度一般达到焊件母材熔点的 80% 以上, 而 TC4 钛合金在 FSW 过程中的峰值温度可以达到 1000 °C 以上^[16-18], 这要求搅拌头具有良好的耐高温性能, 同时, 作为 FSW 的“心脏”, 搅拌头应具有良好的耐磨性。搅拌头的磨损不仅影响其寿命, 还对焊缝材料的流动性和力学性能有一定的影响^[19]。目前 TC4 钛合金 FSW 的搅拌头材料一般有 WC、聚晶立方氮化硼 (PCBN)、钨基合金和钴基合金等。Fall 等^[20]使用圆台型 WC 搅拌头焊接 2 mm 厚 TC4 钛合金板材, 研究讨论了搅拌头磨损对焊接接头质量的影响及对显微组织造成的损伤, 并在试验中发现使用较低的焊接转速和焊速时, 搅拌头发生严重磨损, 其最大磨损量位

于距离搅拌针根部中心约 1 mm 处。Farias 等^[21]使用圆台型 WC 搅拌头焊接 2 mm 厚 TC4 钛合金板材, 分析接头组织后认为, 在焊接过程中搅拌头发生严重磨损导致焊缝内部出现碎片夹杂和表面质量下降, 并认为搅拌头退化机制为热粘合。栾云婷^[22]使用 ANSYS Workbench 对焊接过程中搅拌头进行受力模拟分析, 认为在搅拌头的扎入阶段由于热输入比较低, 材料还未软化, 搅拌头根部应力大, 对搅拌头的损伤较大。谢飞飞^[23]使用圆台形高温合金 DZ22 搅拌头焊接 2 mm 厚 TC4 板材, 在合适的参数下得到表面成形良好、无缺陷的焊缝, 接头拉伸强度保留 92% 以上。在焊接 400 mm 后搅拌头磨损严重, 无法继续进行焊接。由于 WC 搅拌头成本较高, 本试验选用成本低廉、性能优越的 DZ22 搅拌头来评估不同焊接长度后的搅拌头磨损情况。

本研究的重点是在 TC4 钛合金板材 FSW 焊接不同距离后, 对 DZ22 搅拌头磨损进行定量评估, 利用 SEM 表征和 EDS 成分分析对搅拌头磨损进行详细的显微组织和成分研究, 以明晰搅拌头的磨损机理和焊接距离对搅拌头磨损的影响。

1 实 验

采用的试验材料为 100 mm×100 mm×2 mm 的退火

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (52065048); 江西省优势科技创新团队重点项目 (2018BCB19002); 南昌航空大学博士启动基金 (EA202103241)

作者简介: 张泽龙, 男, 1995 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: zzl2432126061@163.com

态 TC4 钛合金板材，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。

采用普通圆台内凹形轴肩搅拌头进行 FSW 试验。搅拌头材质选用 DZ22 定向凝固柱状晶高温合金，其化学成分如表 2 所示。其中，轴肩直径为 12 mm，内凹面深度为 0.4 mm，搅拌针根部直径为 5 mm，端部直径为 3 mm，长度为 1.8 mm，搅拌头形状如图 1 所示。

为了防止在下压阶段搅拌头磨损严重，在板材上预

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy plate (wt%)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.19	4.23	0.09	0.022	0.011	0.0013	0.12	Bal.

表 2 搅拌头高温合金 DZ22 的化学成分

Table 2 Chemical composition of high-temperature alloys DZ22 for tool (wt%)

C	Cr	Co	W	Al	Ti	Fe	Nb	B	Zr	Hf	Ni
0.12-0.16	8.0-10.0	9.0-11.0	11.5-12.5	4.75-5.25	1.75-2.25	≤0.35	0.75-1.25	0.01-0.02	≤0.10	1.0-2.0	Bal.

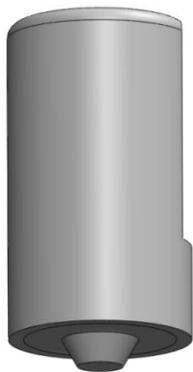


图 1 搅拌头形状示意图

Fig.1 Schematic diagram of tool profile

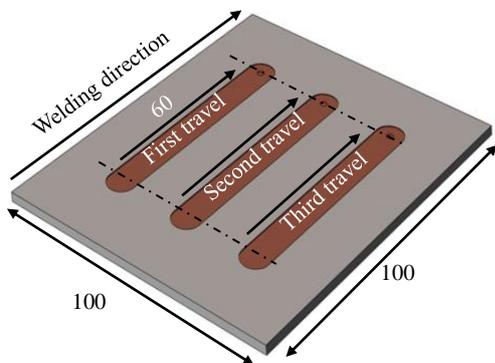


图 2 焊接流程示意图

Fig.2 Schematic of welding process

留导向孔，其直径为 4 mm，深度为 1.8 mm。焊前使用砂纸将 TC4 板材表面打磨干净，去除表面氧化物，用丙酮清洗，吹干后待焊。焊接时全程用氩气进行保护防止氧化。焊接工艺参数：焊接速度为 23.5 mm/min；搅拌头旋转速度为 475 r/min，倾斜角为 2.5°；轴肩下压量为 0.1 mm。一共焊接 180 mm，每焊接 60 mm 后使用 3D 影像仪对搅拌头外轮廓进行观察拍照，比较焊接前后搅拌头轮廓。焊接流程示意图如图 2 所示。

由于焊接后部分钛合金会粘结在搅拌头表面，焊后使用氢氟酸去除搅拌头表面的粘结，采用失重法对焊接前后搅拌头磨损量 (Q) 进行比较，采用式 (1) 和 (2) 对搅拌头磨损率进行量化分析：

$$Q = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中， m_i 为搅拌头初始质量 (g)， m_f 为焊后搅拌头的质量 (g)； L_i 为搅拌针初始长度 (mm)， L_f 为焊后搅拌针的长度 (mm)。

使用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对搅拌头进行表征，观察搅拌头的磨损情况，探讨搅拌头的磨损类型和磨损机理。

2 结果及讨论

2.1 搅拌头磨损情况

图 3a~3d 为未焊接，焊接距离达 60、120、180 mm 后搅拌头宏观形貌，如图 3 所示，随着焊接距离的增加搅拌针磨损量显著增加。当焊接距离为 60 mm 时，搅拌针表面开始出现凹凸不平的小坑并且已经发生氧化，搅拌针表面出现蓝色的氧化膜。当焊接距离达 120 和 180 mm 后，搅拌针磨损加剧，表面出现深浅不一的划痕且氧化严重，搅拌针端部直径变化明显，根部未见明显损耗。

当焊接环境中惰性气体浓度不足时，由于钛合金化学活性活跃，在高温情况下很容易吸收焊接环境中残留的氮、氢、氧进而形成硬而脆的外皮，从而加剧搅拌头磨损。焊接过程中，部分钛合金粘结在搅拌头上并发生氧化，导致搅拌头表面出现了金色或蓝色脆而硬的氧化

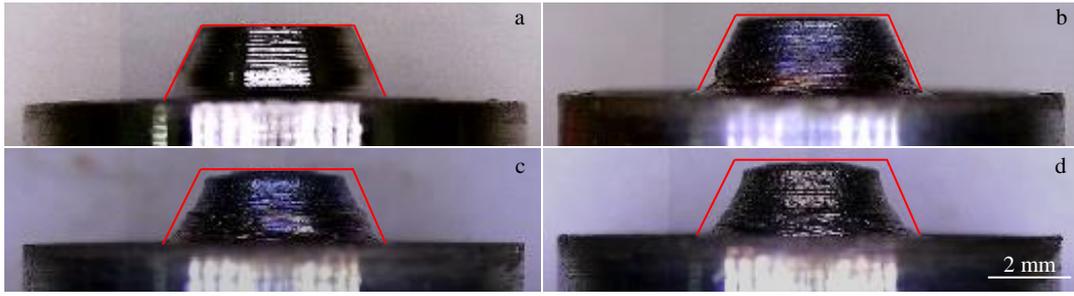


图 3 焊接不同距离后搅拌针宏观形貌

Fig.3 Appearances of tool pin after welding for different travel length: (a) 0 mm, (b) 60 mm, (c) 120 mm, and (d) 180 mm

物^[24]。图 4a~4d 为未焊接, 焊接距离达 60、120、180 mm 后搅拌头的轴肩宏观形貌。随着焊接距离增加, 搅拌头轴肩的磨损愈发严重。轴肩处出现明显的剥落和环形沟槽, 且氧化十分严重。图 4e 为焊接 180 mm 后轴肩局部放大组织照片, 可以明显观察到轴肩处出现粘结和机械划痕。这是由于搅拌头在下压阶段所受轴向力急剧增加, 搅拌头与母材刚接触时属于干摩擦, 在顶锻力和扭矩的共同作用下, 端部的材料会崩落留在焊缝中; 同时由于热输入不足, 焊缝中有部分材料未达到塑性状态, 为硬质颗粒。根据 FSW 的“抽吸-挤压”理论^[25], 搅拌针表面为光滑表面时, 周围金属主要环绕搅拌针作旋转运动, 随着母材的塑性流动, 硬质颗粒对搅拌头不断地磨擦。在焊接过程中, 由于 TC4 钛合金的粘滞性, 在高温高压下它们易粘结在搅拌头表面, 随着焊接的进行粘结脱落又重新生成, 钛合金粘结脱落时会撕裂搅拌头表面的材料, 对搅拌头表面造成磨损。在 FSW 撤离阶段, 搅拌头处于高温状态, 由于焊接环境中惰性气体浓度不够, 粘结在搅拌头上的钛合金极易发生氧化和溶氧致脆^[26], 在之后的焊接中, 由于氧化膜的脱落会对

搅拌头造成二次磨损。

每焊接 60 mm 后, 使用氢氟酸清洗掉粘结在搅拌头表面的钛合金。通过式 (1) 和 (2) 计算焊接前后搅拌头质量、搅拌针长度、轴肩深度方面的磨损率, 对搅拌头的磨损进行定量分析。图 5 是未焊接, 焊接长度达 60、120、180 mm 时搅拌头质量、搅拌针长度、轴肩深度 3 类磨损率曲线。在焊接 180 mm 后, 搅拌针长度缩短 0.24 mm, 磨损率为 0.97%; 轴肩深度缩短 0.4 mm, 磨损率为 1.73%, 此时, 内凹形轴肩已被磨损为类平面形轴肩; 搅拌头质量减轻 0.15 g, 磨损率为 0.74%。通过观察 3 条曲线斜率变化可知, 在前 60 mm 的焊接过程中, 搅拌头的磨损率增长缓慢, 而在 60~180 mm 的焊接过程中磨损率急剧增长。这是由于在前 60 mm 的焊接过程中, 搅拌头的耐磨性较好, 但依旧会出现轻微磨损, 搅拌头表面粘结少量的钛合金, 氧化后硬而脆。在第 2 次 FSW 下压阶段, 粘结的钛合金剥落并撕裂搅拌头表面的材料, 加剧了搅拌头的磨损。而磨损后的搅拌头表面粗糙度增大, 在相同的焊接条件下更易粘结钛合金, 加剧了搅拌头的粘结磨损和氧化磨损。因此随着焊接距离的

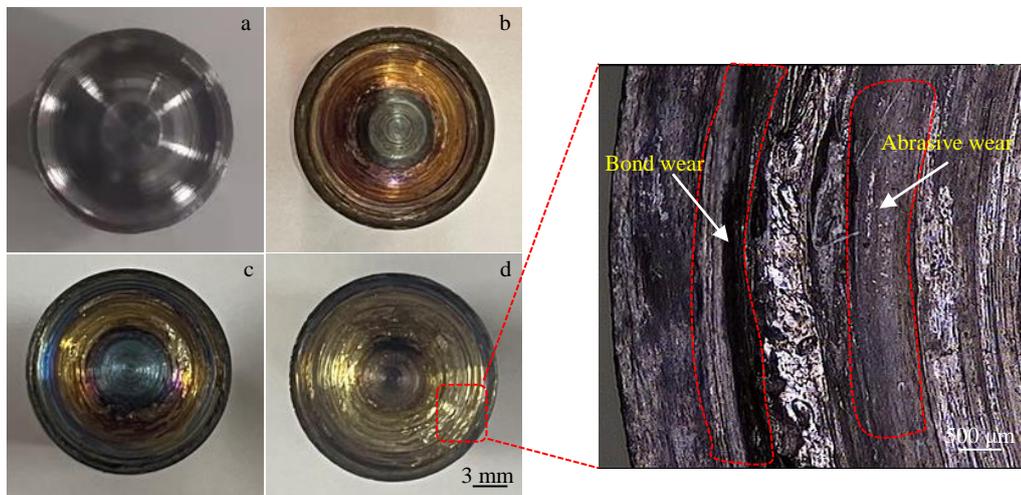


图 4 焊接不同距离后搅拌头的轴肩宏观形貌

Fig.4 Appearances of tool shoulder after welding for different travel length: (a) 0 mm, (b) 60 mm, (c) 120 mm, and (d) 180 mm

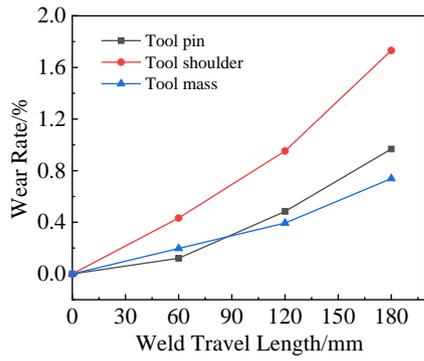


图 5 焊接不同距离后搅拌头的磨损率

Fig.5 Wear rate of tool after welding for different travel length

增加, 搅拌头磨损愈发严重。在整个焊接过程轴肩的磨损率明显高于搅拌针的, 这是由于在 FSW 过程中, 一般认为约 80% 的热输入是由轴肩与母材摩擦产生, 20% 由搅拌针与母材摩擦产生^[27], 而钛合金在高温高压的环境下更易粘结, 同时轴肩处与母材的接触面积较大, 因此轴肩处更容易出现粘结与氧化磨损。

2.2 磨损机理分析

通过 SEM 和 EDS 成分分析对搅拌头的损伤和磨损机理进行进一步分析。图 6 为焊接 180 mm 后焊缝的横截面宏观形貌, 搅拌头在焊接过程中出现明显磨损, 轴肩封闭区域出现缺口, 塑化的材料顺着缺口被挤出, 最

终形成扁平状飞边。在焊缝搅拌区域底部出现污染带 (图 6 区域 1), 并且在前进侧带状结构根部出现孔洞 (图 6 区域 2)。由于磨损而导致搅拌头长度缩短, 将在焊缝的底部产生孔洞, 过度的搅拌头磨损改变了搅拌头形状, 从而增加了缺陷产生的概率, 并可能降低焊接质量。

图 7 为焊缝条带状端部 (图 6 中区域 1) 的 SEM 形貌及 EDS 元素线扫描结果, 从 SEM 形貌中可以看出, 白色颗粒不规则地镶嵌在焊缝中形成条带状结构。为研究条带状结构元素分布, 使用 EDS 分析图 7a 中箭头 A → B 的元素分布。从结果中可以看出, 当扫描到白色颗粒区域时, Ni 元素和 O 元素的含量就会上升。在 FSW 过程中, 搅拌头和焊件之间一直存在一个较大的摩擦力, 搅拌头上的材料由于摩擦而剥落、融入到焊缝中, 同时由于保护气体浓度不足, 在高温下形成氧化物, 由于母材的塑性流动而形成条带状结构。

图 8 为焊缝条带状结构根部 (图 6 中区域 2) SEM 形貌及 EDS 元素面扫描结果, 从 SEM 形貌中可以看出, 在条带状结构的根部存在孔洞缺陷, 孔洞被一些颗粒物质填充。从 EDS 分析结果可以看出, 在孔洞周边主要为 Ti 元素, 并且少量的 Ni 元素也均匀分布在孔洞周围; 而孔洞内颗粒成分主要为 O、Al 和 Cr 元素, 含有少量 Ti 元素, 初步判断为从搅拌头上剥落的氧化物。根据文献[20]对 FSW 过程中金属垂直流动的速度分析, 当转速为 475 r/min 时属于冷焊条件, 较低的转速和温度使

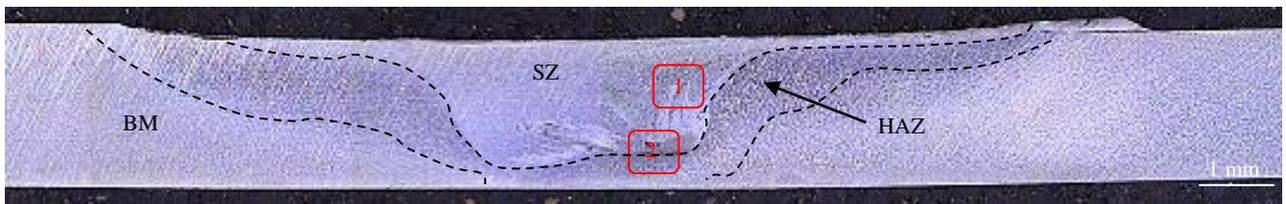


图 6 焊接 180 mm 后焊缝横截面的宏观形貌

Fig.6 Macroscopic image of cross section of the weld after welding for travel length of 180 mm (BM: base metal; SZ: stir zone; HAZ: heat affected zone)

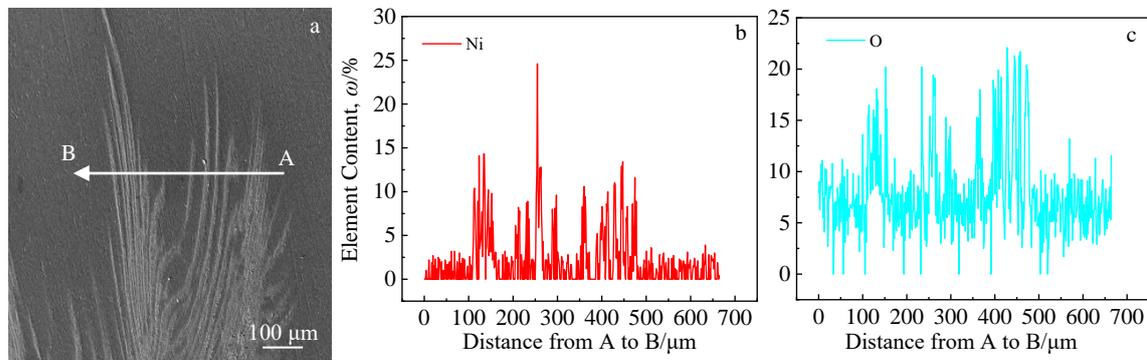


图 7 图 6 中区域 1 的 SEM 形貌和沿箭头 A → B 的 EDS 元素线扫描

Fig.7 SEM morphology of region 1 in Fig.6a and EDS line scanning of Ni (b) and O (c) elements along the arrow A → B

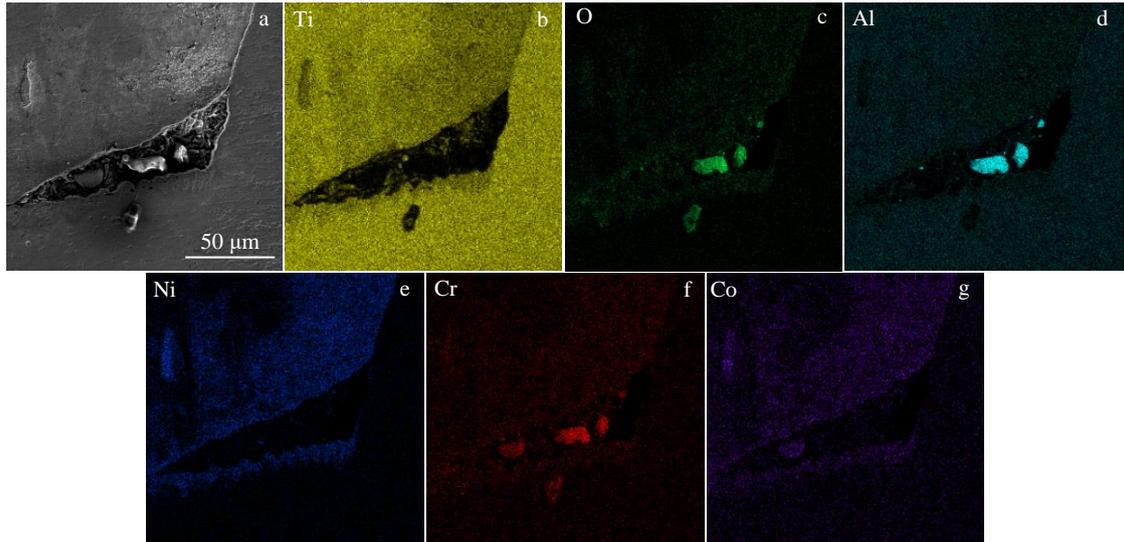


图 8 图 6 中区域 2 的 SEM 形貌和 EDS 元素面分布

Fig.8 SEM morphology of region 2 in Fig.6 (a) and corresponding EDS mappings of Ti (b), O (c), Al (d), Ni (e), Cr (f), and Co (g) element

氧化物颗粒不易移动, 从而限制了氧化物颗粒的垂直到动, 使它们在 SZ-HAZ 边界附近团聚。

图 9a~9c 为焊接 180 mm 后搅拌针端部、搅拌针根部、搅拌头轴肩处的 SEM 形貌 (未使用氢氟酸清洗掉粘结在搅拌头上的钛合金)。由于 FSW 过程中, 搅拌头在运动时经历高摩擦力和应力集中, 搅拌头各部位出

现明显的剥落和划痕。图 9a 显示搅拌针端部区域边缘存在剥落现象, 由于焊接时倾角为 2.5°, 旋转的搅拌头在刚接触工件时轴向力急剧上升, 应力瞬间集中在搅拌针上一“点”, 所受压强过大, 搅拌针受到切向的摩擦力和法向的冲击, 导致搅拌针端部出现脆性剥落现象。搅拌针端部靠近中心的平面部分以及搅拌针的侧面有明显

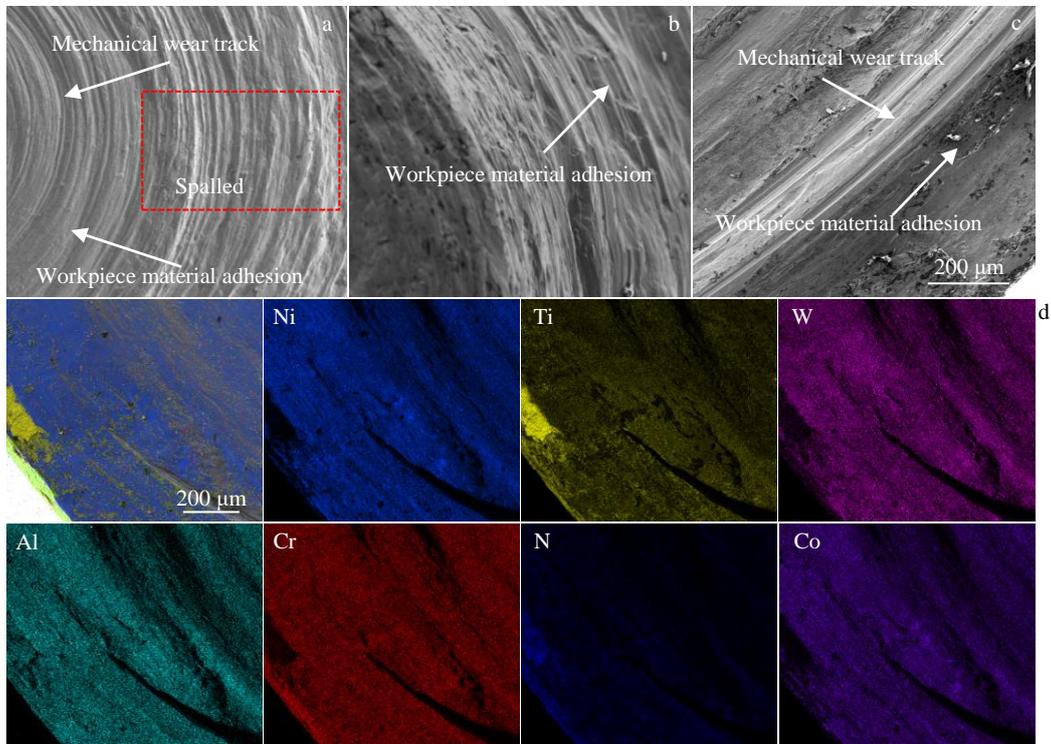


图 9 焊接 180 mm 后搅拌头不同区域的 SEM 形貌和搅拌头轴肩处 EDS 元素面分布

Fig.9 SEM morphologies of tool pin end position (a), root position (b) and tool shoulder (c) after welding for travel length of 180 mm; SEM morphology and corresponding EDS element mappings for the tool shoulder area (d)

的划痕。在搅拌头下压的过程中，由于热输入较低，材料未达到完全塑性状态，搅拌针受到较大的冲击产生磨损，搅拌针上剥落的磨屑会留在焊缝中，随着搅拌头的旋转下压、磨屑持续对搅拌针造成磨损，此为磨粒磨损。图 9b 显示在搅拌针根部位置出现较严重的磨损现象，有机械划痕，并且存在较深的沟槽，这是磨粒磨损和粘结磨损共同作用的结果。如图 9c 所示，搅拌头轴肩处出现机械划痕和粘结，存在磨粒磨损和粘结磨损现象，通过对轴肩进行 EDS 元素面扫描（图 9d），发现粘结物成分主要为钛合金。

在 TC4 钛合金 FSW 过程中，由于钛合金的高熔点高硬度，搅拌头处于高温高压的环境，较长的焊接过程后搅拌头会发生严重的磨损。搅拌头的磨损是一个复杂的过程，伴随着机械磨损、粘结磨损、氧化磨损、磨粒磨损的混合作用。图 10 为搅拌头首次焊接磨损原理示意图，在下压阶段，搅拌针端面最先与工件表面接触，由

于热输入量较低，被焊接材料温度较低、硬度很高，在搅拌针端面与被焊工件接触的瞬间，搅拌针受到较大的冲击产生磨损，搅拌针碎屑会融入到焊缝中，伴随着搅拌头的旋转碎屑不断摩擦搅拌头，产生磨粒磨损；在预热阶段，由于热输入量的限制，焊缝中仍有部分母材未达到塑性状态，为硬质颗粒，硬质颗粒和搅拌针碎屑一起不断摩擦着搅拌头表面，产生磨粒磨损；在行进阶段，钛合金由于其粘滞性，在高温高压下易粘结在搅拌头表面，随着焊接的进行粘结脱落又重新生成，钛合金粘结脱落时会撕裂搅拌头表面的材料，对搅拌头表面造成磨损，产生粘结磨损。在搅拌头行进过程中，搅拌针碎屑、硬质颗粒、粘结剥落随着搅拌头的旋转不断摩擦搅拌头表面，产生磨粒磨损；在撤离阶段，由于焊接过程中保护气体浓度不足，粘结在搅拌头表面的钛合金会发生氧化，脆性提高，产生氧化磨损。

图 11 为使用后的搅拌头磨损原理示意图，在搅拌头

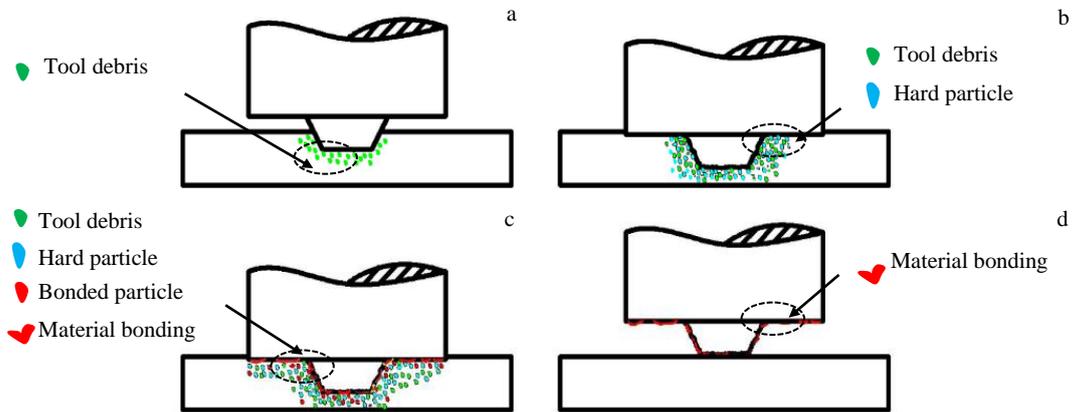


图 10 首次焊接搅拌头磨损原理示意图

Fig.10 Schematic diagrams of tool wear mechanism at different stages of the first welding: (a) the pressing stage, (b) stopping stage, (c) travelling stage, and (d) leaving stage

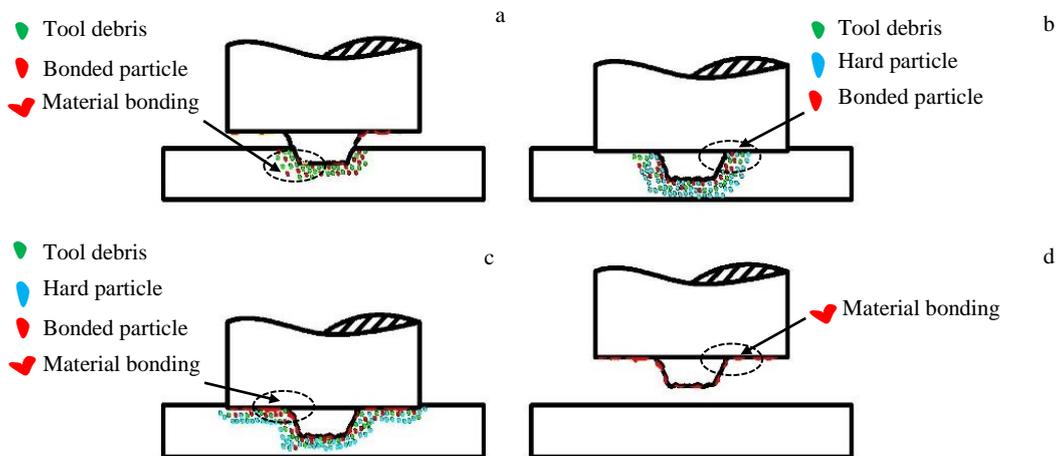


图 11 使用后的搅拌头焊接磨损原理示意图

Fig.11 Schematic diagrams of tool wear mechanism for welding at different stages after the tool being used: (a) the pressing stage, (b) stopping stage, (c) travelling stage, and (d) leaving stage

使用后,搅拌头表面会粘结钛合金氧化物,此时搅拌头表面脆性增加。在下压阶段,钛合金表面的粘结会剥落,撕裂搅拌头材料从而造成磨损。其他各阶段的磨损过程与首次焊接时基本相同,但是由于搅拌头已经出现磨损,其表面粗糙度增加,从而粘结在搅拌头表面的钛合金增多,依此恶性循环,搅拌头表面粘结磨损愈发严重。

3 结 论

1) 当焊接距离达到 180 mm 时,搅拌头磨损最为严重,其中搅拌针长度缩短 0.24 mm,磨损率为 0.97%;轴肩深度缩短 0.4 mm,磨损率为 1.73%;搅拌头质量减轻 0.15 g,磨损率为 0.74%。其中轴肩的磨损最为严重。

2) 当搅拌头发生磨损后,搅拌头掉落的材料会对焊缝造成污染,形成孔洞等缺陷。

3) 在 TC4 钛合金 FSW 过程中,随焊接距离的增加搅拌头磨损率急剧增加。焊接过程中高温高压是造成搅拌头变形和磨损的主要原因。搅拌头磨损形式主要有机械磨损、磨粒磨损、粘结磨损、氧化磨损。

4) 在 TC4 钛合金 FSW 过程中,搅拌头的磨损往往是几种磨损形式交互作用的结果。它们之间相互影响,在下压阶段,搅拌头材料将会崩落(机械磨损)留在焊缝中;在行进阶段,崩落材料和未达到塑性状态的母材随搅拌头的旋转运动不断冲刷搅拌头(磨粒磨损),同时由于在高温高压环境中,钛合金会粘结在搅拌头表面(粘结磨损);在离开阶段,由于保护气体浓度不足,粘结在搅拌头表面的钛合金会发生氧化(氧化磨损)。依此,周而复始对搅拌头造成磨损。

参考文献 References

- [1] Shao M H, Zhang J, Wang W P *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2022, 51(5): 1620
- [2] Ji Pengfei(计鹏飞), Zhang Zhen(张 振), Zhao Guanghui(赵光辉) *et al. Aerospace Material & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2020, 50(3): 11
- [3] Yang H F, Zhao H Y, Xu X X *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2021, 50(11): 3845
- [4] Singh K, Sehgal A K, Singh G *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2022, 60: 2217
- [5] Singh L, Haque M S A, Singh A *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2022, 48: 1718
- [6] Zhang C H, Huang G J, Cao Y *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(10): 3161
- [7] Song B, Zhai Y Y, Zuo D W *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(5): 1483
- [8] Heidarzadeh A, Testik O M, Güleriyüz G *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 53: 250
- [9] Wang Xin(王 欣), Xie Wenhui(谢文辉), Lou Zhengji(娄正计) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(4): 1436
- [10] Zhang Xin(张 鑫), Chen Yuhua(陈玉华), Wang Shanlin(王善林). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 247
- [11] Zhao J H, Shanguan J J, Gu C *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2022, 32(4): 1144
- [12] Du S S, Liu H J, Jiang M H *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 69: 215
- [13] Song Dejun(宋德军), Niu Long(牛 龙), Yang Shengli(杨胜利). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 1100
- [14] Lin Junhui(林俊辉), Dan Zhenhua(淡振华), Lu Jiafei(陆嘉飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 1090
- [15] Zhao X, Yu S, Zheng J M *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2021, 50(1): 35
- [16] Wu Xiaoyan(武晓燕), Luo Wei(罗 巍), Cao Zhiming(曹志明) *et al. Aeronautical Science & Technology*(航空科学技术)[J], 2021, 32(7): 59
- [17] Ji Shude(姬书得), Wen Quan(温 泉), Lv Zan(吕 赞) *et al. China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2016, 27(4): 531
- [18] Ji Shude(姬书得), Zhuo Bin(卓 彬), Gao Shuangsheng(高双胜) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2016(19): 98
- [19] Emamian S S, Awang M, Yusof F *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 106(7): 3217
- [20] Fall A, Fesharaki M H, Khodabandeh A R *et al. Metals*[J], 2016, 6(11): 275
- [21] Farias A, Batalha G F, Prados E F *et al. Wear*[J], 2013, 302(1-2): 1327
- [22] Luan Yunting(栾云婷). *Damage Mechanisms and Lifetime Prediction of Stir Head for FSW*(搅拌摩擦焊搅拌头的损伤机理及寿命预测)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015
- [23] Xie Feifei(谢飞飞). *Research on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joint of TC4 Titanium Alloy*(TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012
- [24] Wang S, Liao Z H, Liu Y H *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2014, 252: 64

- [25] Ke Liming(柯黎明), Pan Jiluan(潘际銮), Xin Li(邢 丽) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(4): 89
- [26] Chen Qian(陈 倩), Xin Li(辛 丽), Teng Yingyuan(腾英元) *et al.* *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection* (中国腐蚀与防护学报)[J], 2012, 32(1): 7
- [27] Trueba Jr. L, Heredia G, Rybicki D *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 219: 271

Influence of Welding Distance on Tool Wear in Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Alloy

Zhang Zelong¹, Liu Qiang¹, Sun Chenyang¹, Cheng Guowen¹, Shao Shuai², Chen Yi¹, Huang Yongde¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Shang Hai Fanuc Robot Co., Ltd, Shanghai 200000, China)

Abstract: The hot rolled plates of TC4 titanium alloys were welded by friction stir welding (FSW). The wear characterization of DZ22 superalloy tool was conducted by mass loss measurement, 3D photographic technique, SEM and EDS analysis during FSW of TC4 titanium alloy. The influence of welding distance on tool wear in FSW of TC4 alloy was investigated. The results indicate that the wear of tool is positively correlated with welding distance. Severe tool wear occurs after welding for 180 mm. The length of tool pin is shortened by 0.24 mm and the wear rate is 0.97%; the depth of tool shoulder is shortened by 0.4 mm and the wear rate is 1.73%; the mass of tool is reduced by 0.15 g and the wear rate is 0.74%. In the process of TC4 FSW, high temperature and high pressure are the main reasons for the wear of tool. Tool wear types include mechanical wear, abrasive wear, adhesion wear and oxidative wear. The wear of tool is usually the result of the interaction of these wear types. The wear products of tool will pollute the FSW joints and form defects.

Key words: FSW; TC4 alloy; tool wear; wear rules

Corresponding author: Huang Yongde, Ph. D., Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863472, E-mail: huangydhm@nchu.edu.cn