

工艺参数对 Ti/Zn/Al 异种金属搅拌摩擦焊接头力学性能的影响

张 鑫, 陈玉华, 王善林

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

摘 要: 以 3 mm 厚 2A14 铝合金和 TC4 钛合金为对接材料, 0.05 mm 厚 Zn 薄片为中间层材料进行搅拌摩擦焊对接。研究了不同焊接参数对钛/铝异种金属搅拌摩擦焊对接接头宏观形貌、微观组织、力学性能的影响。结果表明: 当焊接速度为 75 mm/min, 旋转速度为 375~950 r/min, 偏移量 2.5 mm 时, 均可获得表面成形良好的焊接接头。但随着旋转速度的增加, 焊缝表面粗糙度先减小后增大, 而对接头抗拉强度逐渐降低; 当旋转速度为 600 r/min, 焊接速度从 60 mm/min 增大到 95 mm/min 时, 焊缝的飞边逐渐减少。当旋转速度为 375 r/min, 焊接速度为 75 mm/min, 偏移量 2.5 mm 时, 抗拉强度达到最大值 237.3 MPa, 达铝合金母材抗拉强度的 56.7%。

关键词: Ti/Al 对接; 搅拌摩擦焊; 中间层材料; 力学性能

中图分类号: TG453⁺.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)01-0247-05

铝合金密度低, 价格低廉, 是目前航空航天、武器装备等高新技术领域中广泛应用的金属材料; 钛合金由于具有质轻、比强度高以及抗冲击等优点而成为航空航天重点发展的新材料之一^[1]。随着航空发动机和飞机结构设计对“减轻重量、提高推重比、增加有效载荷”的要求越来越高, 对铝合金与钛合金复合结构的需求越来越迫切^[2]。铝-钛复合构件具有强度/重量比高、抗疲劳性能好, 稳定性好及抗振极限较高等优良性能^[3], 在航空航天、武器装备、交通运输等领域拥有广阔的应用前景。但铝/钛焊接时, 由于两者热物理性能差异大, 焊后接头残余应力大、易变形, 且在焊缝界面极易形成脆性相而使接头抗拉强度降低^[4]。

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所 (简称 TWI) 于 1991 年发明的一种固相连接技术。与传统的熔化焊相比, 其被焊材料不熔化, 接头焊后残余应力小、不易变形, 是制备轻合金构件的一种理想的焊接方法。目前, 国内外关于钛/铝异种金属搅拌摩擦焊的研究报道较少。陈玉华等^[5]对钛/铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头的组织结构进行了深入研究, 获得了焊缝成形良好、无孔洞和裂纹等缺陷的搭接接头。Aonuma 等^[6]研究了 AA2024-T3 及 AA7075-T651 铝合金分别与 TC4 的搅拌摩擦焊接头的成形规律及力学性能, 发现在相同工艺参数下, Ti/AA2024 接头强度高于

Ti/AA7075 接头。在接头界面处存在一个钛合金和铝合金的混合区, 拉伸试验过程中, 接头容易从此区域发生断裂, XRD 分析结果表明, 该区域存在 TiAl₃ 金属间化合物。Dressler 等^[7]对 TC4 钛合金和 AA2024-T3 铝合金的 FSW 对接进行了研究, 在旋转速度为 800 r/min、焊接速度为 80 mm/min 时, 接头抗拉强度达铝合金母材强度的 73%。但 Y. C. Chen 等^[8]报道, 铝合金和钛合金的搅拌摩擦焊搭接强度只有铝合金母材的 62%, 认为接头界面处由于 Al/Ti 扩散反应生成了金属间化合物 TiAl₃, 使得接头性能降低。同样, R. Jiangwei^[9-13]等人也发现 TiAl₃、Ti₃Al、TiAl 等金属间化合物的存在是降低 Al/Ti 异种金属接头的最主要因素。目前, 尚未有对 Al/Ti 异种金属接头中对金属间化合物进行控制的报道。因此, 本工作提出通过添加中间层材料 Zn 抑制 TC4 钛合金和 2A14 铝合金异种金属焊缝中产生金属间化合物, 研究了工艺参数对焊缝成形、接头抗拉强度的影响, 为促进钛/铝异种金属搅拌摩擦焊结构的工程应用提供实验依据。

1 实 验

实验材料为 200 mm×80 mm×3 mm 的 TC4 钛合金和 2A14 (T4 态) 铝合金, 中间层材料为 0.05 mm 厚纯 Zn 箔。由于 TC4 钛合金具有熔点高、耐磨性好等特点, 为了减小搅拌头的磨损, 将搅拌针向 2A14 铝合金

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51265042); 江西省自然科学基金 (20114BAB206006); 南昌航空大学卧龙之星培养计划项目 (201302)

作者简介: 张 鑫, 男, 1990 年生, 硕士, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863023, E-mail: zhangxin_nchkedu@163.com

一侧偏置。因为铝合金熔点低、塑性好，将铝合金置于返回边时，有助于铝合金在搅拌针的搅拌作用下被带到 TC4 钛合金一侧而形成紧密结合^[4]。焊接过程中，钛合金和铝合金的相对位置如图 1 所示。搅拌头材料为 DZ125 高温合金，搅拌头轴肩直径为 18 mm，搅拌针直径为 6 mm，且表面加工有左螺纹。实验在 X53K 铣床改装的搅拌摩擦焊机上进行，搅拌头旋转速度为 375~950 r/min，焊接速度为 60~95 mm/min，搅拌头倾角为 2°、偏向铝合金侧的偏移量为 2.5 mm。

2 结果与分析

图 2 为焊接速度为 60 mm/min 时不同旋转速度下接头宏观形貌。从图 2 可知，随旋转速度增加，焊缝表面先变光滑后变粗糙；当旋转速度增加到 600 r/min 时，焊缝边缘产生飞边；当旋转速度为 750 r/min 时，焊缝表面出现起皮现象；而当旋转速度为 950 mm/min 时，接头出现裂纹。通常认为，随旋转速度增加，焊接热输入增

大，焊缝金属塑性流动更加充分，结合更加致密，因此成形更好。但旋转速度过高，导致热输入过大，焊缝金属过度塑化；在搅拌针搅拌和轴肩挤压的双重作用下，塑化金属易沿轴肩边缘溢出，形成飞边。由于大量金属被挤出，使得焊缝金属减少，在接头中形成几何突变而使焊接残余应力增大最终导致开裂。

旋转速度为 600 r/min 时，不同焊接速度下接头宏观形貌如图 3 所示。随着焊接速度增加，焊缝的飞边逐渐减少。因为随着焊接速度的增加，单位焊缝长度的热输入逐渐减小，搅拌头周围温度降低，塑化金属流动性下降，因此，被挤出的金属量下降。

图 4 是工艺参数为 $n=375$ r/min、 $v=75$ mm/min 时接头横截面距上表面 1.5 mm 处显微硬度分布曲线。从图 4 中可以看出，当接头添加 Zn 后，焊缝近钛侧显微硬度较未添加 Zn 时有所下降（图中 N 区所示）。在焊接过程中，被搅拌针破碎的 Ti 以颗粒状随着搅拌针的运动而规律性的分布于焊缝中，且与铝合金生成金属间化合物，对焊缝强度和硬度均有一定程度的增强作用。当添加中间层 Zn 后，Zn 的存在在一定程度上减少焊缝中的 Ti 颗粒或 Ti-Al 金属间化合物，使得焊缝硬度和强度均出现下降。在图 5a 的 M 点出现一硬度值极大的异常点，如图 4 所示。经过对接头的宏观和微观分析认为，分布于近铝侧的钛颗粒与铝合金生成了图 5b 中所示厚度较大的脆性相，使得硬度出现急剧上升并高于母材钛。

图 6 为不同工艺参数下接头的抗拉强度。从图 6 中可以看出，在相同的焊接速度下，旋转速度越大，接头强度越低。在焊接速度为 75 mm/min 条件下，接头抗拉强度由旋转速度 375 r/min 时的 237.3 MPa 降低到旋转速度为 950 r/min 时的 10 MPa。分析认为，焊缝存在的裂

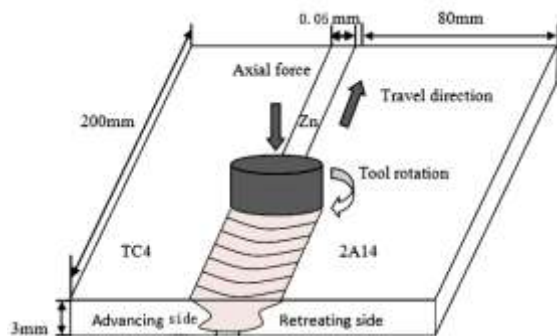


图 1 钛合金、锌与铝合金相对位置示意图

Fig.1 Sketch of relative position among Ti alloy, Zn and Al alloy

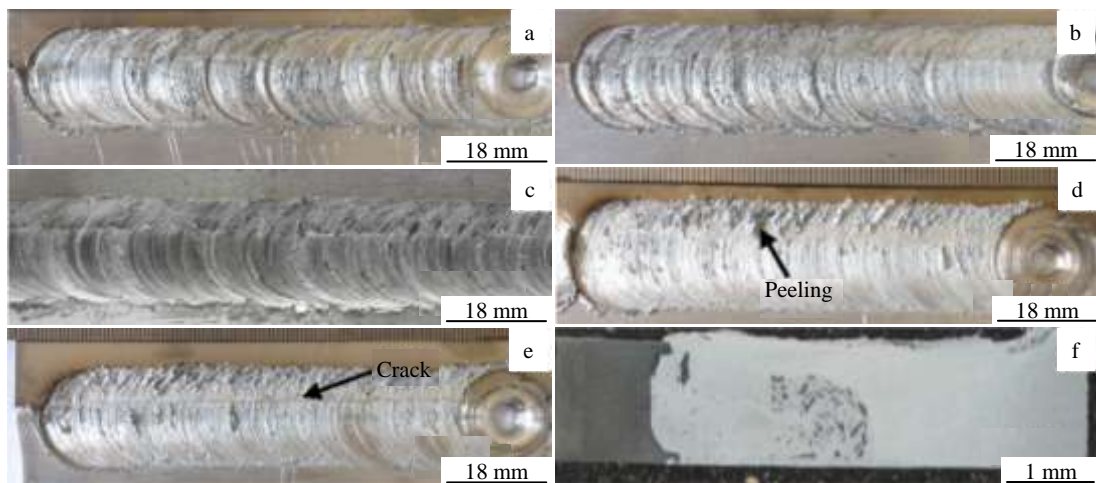


图 2 不同旋转速度下接头宏观形貌

Fig.2 Macromorphologies of joint at different rotational speeds ($v=60$ mm/min): (a) $n=375$ r/min; (b) $n=475$ r/min; (c) $n=600$ r/min; (d) $n=750$ r/min; (e) $n=950$ r/min; (f) cross-section of sample in Fig.2a

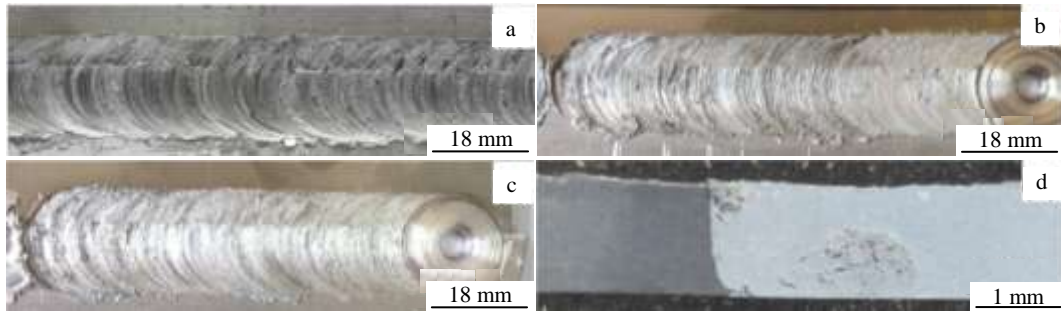


图 3 不同焊接速度下接头宏观形貌 ($n=600$ r/min)

Fig.3 Macromorphologies of joint at different welding speeds ($n=600$ r/min): (a) $v=60$ mm/min, (b) $v=75$ mm/min, (c) $v=95$ mm/min; (d) cross-section of the sample in Fig.3a

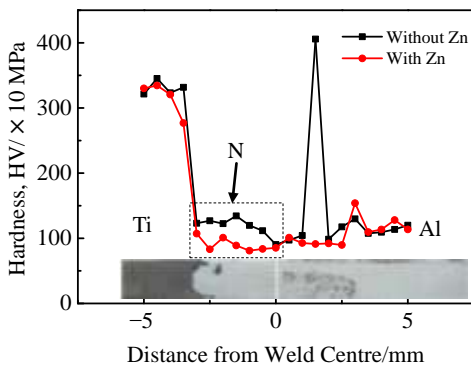


图 4 接头横截面显微硬度

Fig.4 Hardness of the cross-section of the joint ($n=375$ r/min, $v=75$ mm/min)

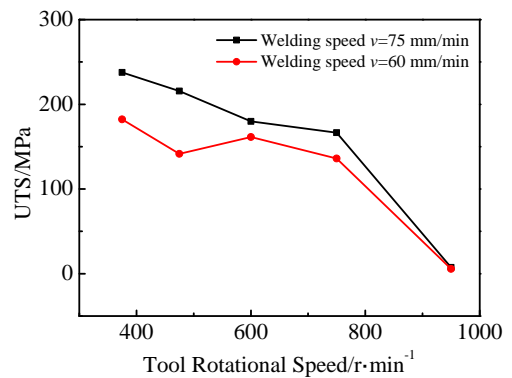


图 6 接头抗拉强度

Fig.6 Tensile strength of the joint

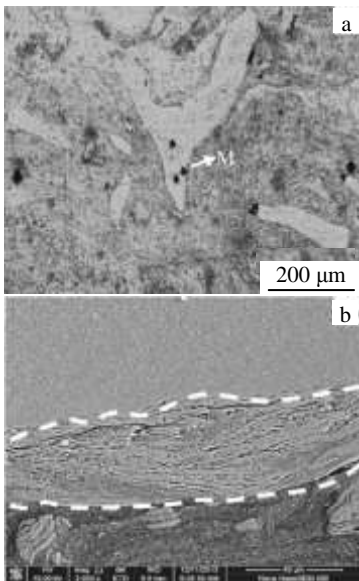


图 5 焊缝显微组织

Fig.5 Microstructure of weld: (a) abnormal point and (b) brittle layer

纹是接头抗拉强度低于 10 MPa 的原因。当旋转速度一

定时,焊速越大,接头强度越高。焊缝最大抗拉强度 237.3 MPa 约为 2A14 铝合金母材的 56.7%。分析认为,因为随着旋转速度的增大,单位线能量增大,焊缝温度升高,可达 500 °C 左右^[15],而 Zn 的熔点只有 419.5 °C,在热输入量大时 Zn 容易熔化,熔化的 Zn 将流出焊缝,在两板之间残留间隙,间隙将由焊缝中其它金属来填充,从而易导致焊缝组织不致密以至于接头力学性能下降^[16]。旋转速度过高,导致焊缝温度过高,促使 Ti 和 Al 之间的原子扩散速度加快,形成大量脆性相,在高的焊接残余应力作用下,接头容易出现裂纹。

图 7a 是未添加中间层 Zn 时 Al/Ti 接头的断口形貌。断口光滑平整,未发现韧窝形貌,是典型的脆性断口。图 7c 为添加中间层 Zn 的接头断口形貌,显然断口的中下部分光滑平整,而上部分出现韧窝,是塑性断裂+脆性断裂的混合型断裂^[17]。

由图 7a 及其方框内放大图 7b 可知,未添加中间层时接头断裂方式为脆性断裂,图 8a 中能谱结果说明接头中生成了 Al-Ti 金属间化合物。图 8b 为图 7c 所示区域 A 的 EDS 能谱。可知,颗粒物由 Al、Cu 元素组成,为铝

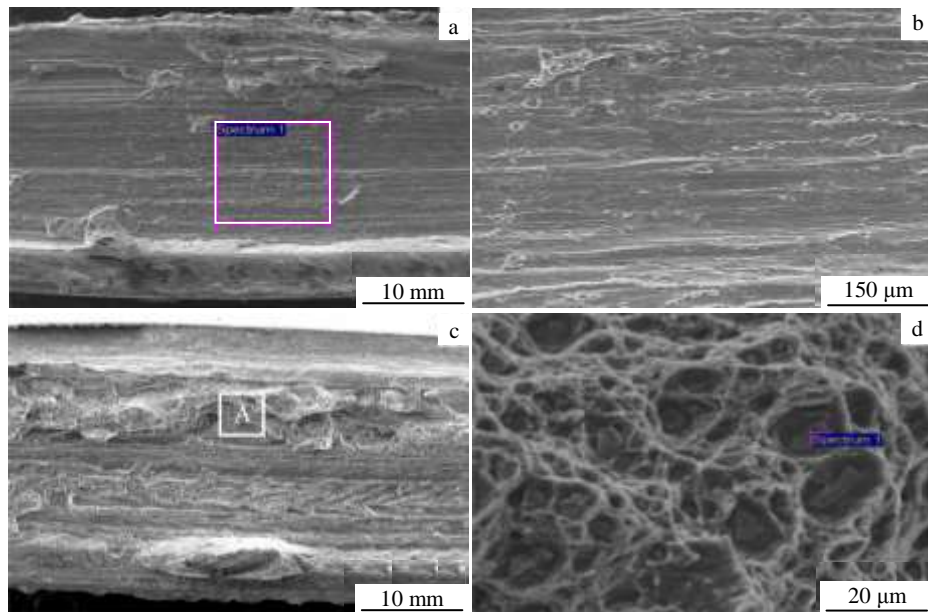


图 7 接头断口形貌分析

Fig.7 SEM micrographs of fracture surface: (a) fracture surface without Zn; (b) magnified view of the region shown in Fig.7a; (c) fracture surface with Zn; (d) magnified view of the region A in Fig.7c

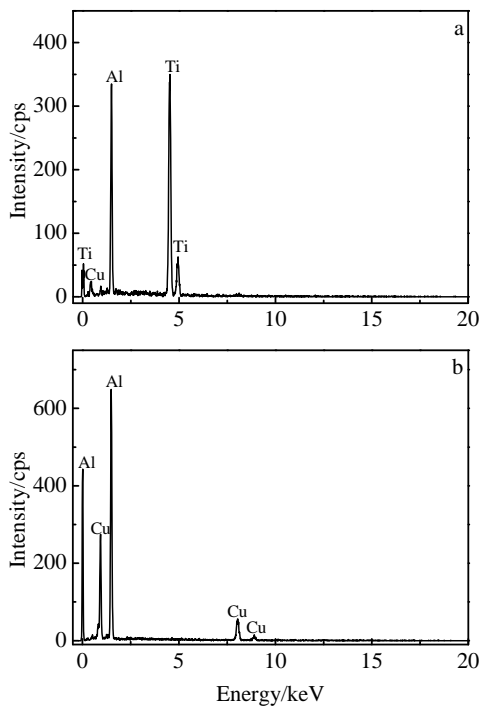


图 8 图 7 中所示区域的能谱分析

Fig.8 EDS spectra of marked region in Fig.7a (a) and region A in Fig.7c (b)

基体中的强化相 $Al_2Cu^{[18]}$ 。由于焊接热作用, T4 态铝合金会析出强化相 θ 相 (Al_2Cu), 或者原有的强化相颗粒长大削弱了对基体的固溶强化效果。对比加入中间层 Zn

和不添加时的接头显微硬度(图 4)及断口(图 7)可知, Zn 能在一定程度上减少接头中金属间化合物的产生, 这样有利于防止裂纹的产生和接头脆性断裂, 具体表现为加入中间层 Zn 后接头断裂方式转变为塑性断裂+脆性断裂的混合型断裂, 且在断口韧窝区很少发现钛。

3 结 论

1) 当焊接速度一定时, 随着旋转速度的增加, 焊缝表面先变光滑后变粗糙, 并最终出现开裂现象; 当旋转速度一定时, 随着焊接速度的增加, 焊缝飞边减少。

2) 当接头添加中间层 Zn 后, 焊缝显微硬度下降。在工艺参数的旋转速度为 375 r/min、焊速为 75 mm/min 时, 接头抗拉强度为最大值 237.3 MPa, 为 2A14 铝合金母材的 56.7%。

3) 中间层 Zn 的加入在一定程度上能减少 Al-Ti 金属间化合物的生成, 促使接头由脆性断裂向韧性+脆性复合断裂的方式转变。

参考文献 References

[1] Chen Yuhua, Ni Quan, Ke Liming *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(1): 211

[2] Chen Yuhua(陈玉华). *Aeronautical Manufacturing Technology (航空制造技术)*[J], 2012, 21: 42

[3] Zhu Zhengqiang(朱政强), Zeng Chun(曾 纯), Zhang Yifu(张义福) *et al.* *Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2011, 40(7): 118

- [4] Wang Yarong(王亚荣), Teng Wenhua(滕文华), Yu Yang(余 洋) *et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2012, 48(20): 88
- [5] Chen Yuhua(陈玉华), Ni Quan(倪 泉), Huang Chunping(黄春平) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2011, 32(9): 73
- [6] Aonuma M, Nakata K. *Materials Transactions*[J], 2011, 52(5): 948
- [7] Dressler U, Biallas G, Alfaro Mercado U. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 526(1): 113
- [8] Chen Y C, Nakata K. *Materials & Design*[J], 2009, 30(3): 469
- [9] Jiangwei R, Yajiang L, Tao F. *Materials Letters*[J], 2002, 56(5): 647
- [10] Fuji A. *Science and Technology of Welding & Joining*[J], 2002, 7(6): 413
- [11] Chen Y, Ni Q, Ke L. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(2): 299
- [12] Chen Shuhai(陈树海), Li Liqun(李俐群), Chen Yanbin(陈彦宾). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(1): 32
- [13] Yao Wei(姚 为), Wu Aiping(吴爱萍), Zou Guisheng(邹贵生) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(4): 700
- [14] Li B, Zhang Z, Shen Y *et al. Materials & Design*[J], 2014, 53: 838
- [15] Wang Xijing(王希靖), Guo Ruijie(郭瑞杰), A Rong(阿 荣) *et al. Electric Welding Machine(电焊机)*[J] 2004, 34(1): 22
- [16] Huang Hua(黄 华), Dong Shijie(董仕节), Wu Yong(吴 勇) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2006, 35(3): 1
- [17] Lv Shixiong(吕世雄), Yang Tao(杨 涛), Huang Yongxian(黄永宪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(3): 478
- [18] Wang Yarong(王亚荣), Teng Wenhua(滕文华), Yu Yang(余 洋) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2012, 22(12): 3307

Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Ti/Zn/Al Joint Welded by Friction Stir Welding

Zhang Xin, Chen Yuhua, Wang Shanlin

(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: 2A14 aluminium alloy of 3 mm in thickness and TC4 titanium alloy were welded by friction stir welding (FSW) with a 0.05 mm Zn ribbon as the intermediate layer. The effects of process parameters on macro-morphology, microstructure and mechanical properties of the joints were studied. The results indicate that the well-formed joints can be fabricated by friction stir welding with the parameters of welding velocity 75 mm/min, rotation speed 375~950 r/min and offset 2.5 mm between the center of pin and interface of the two plates. The surface roughness decreases and then increases with the rotation speed increasing, while the tensile strength of the joints decreases gradually. However, as the welding velocity increases from 60 mm/min to 95 mm/min, the fins of the weld become less gradually. When the welding velocity, rotation speed and offset are 75 mm/min, 375 r/min and 2.5 mm, respectively, the maximum tensile strength is up to 237.3 MPa, nearly 56.7% of that of the aluminum alloy.

Key words: Ti/Al butt joint; FSW; intermediate layer; mechanical properties

Corresponding author: Chen Yuhua, Ph. D., Professor, National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com