第 28 卷第 2 期 Volume 28 Number 2 2018 年 2 月 February 2018

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.02.06

低于 *β* 相相变温度时 TC4 钛合金 搅拌摩擦焊接头的成形及拉伸性能



王 月1, 姬书得1, 李政玮1, 柴 鹏2

(1. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136;2. 北京航空航天大学 机械工程与自动化学院, 北京 100191)

摘 要:利用轴肩直径为 15 mm 的钨铼合金搅拌头对 2.5 mm 厚 TC4 钛合金进行搅拌摩擦焊,重点分析接头成形、 显微组织与拉伸性能。结果表明:焊核区的横截面形貌呈现典型的"碗形";当转速小于 200 r/min 时,焊接过程 中的温度峰值低于 *β* 相相变温度。组成焊核的搅拌针作用区常出现"撕裂"型缺陷,其主要与焊接过程中的焊接 拉应力有关;降低搅拌头的旋转速度有利于减小、甚至消除"撕裂"型缺陷。低于相变温度下获得的无缺陷焊接 接头的抗拉强度几乎与母材的等同,拉伸测试后的断口由大量韧窝组成,为典型的韧性断裂。

关键词: TC4 钛合金;搅拌摩擦焊;抗拉强度;撕裂型缺陷;相变温度 文章编号: 1004-0609(2018)-02-0260-07 中图分类号: TG453 文献标志码: A

钛及钛合金因高的比强度、比刚度和良好的抗腐 蚀性能,被广泛用于航空航天、汽车及医疗器械等行 业^[1-2]。而如何实现钛合金高质量的连接一直是研究者 所追求的目标。在传统熔化焊连接钛合金过程中,焊 缝温度峰值超过母材(Base material, BM)熔点,易产生 热裂纹、大变形及粗大组织等缺陷^[3-4]。英国焊接研究 所于 1991 年发明的搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是一种固相连接技术,其焊接温度峰值低于材料 熔点,目前 FSW 已被广泛用于焊接铝、镁等低熔点 合金^[5-8],且在钛合金连接方面亦有着巨大潜力^[9-14]。

与熔化焊相同,在 FSW 过程中温度场是决定焊 缝组织的关键因素,其相关报道较多。姬书得等^[9]利 用 Abaqus 有限元软件研究 FSW 过程的温度场,指出 TC4 钛合金沿板厚方向的温度梯度是造成焊核区 (Nugget zone, NZ)组织不均匀的主要因素,这与 YOON 等^[11]的报导类似。SONG 等^[15]利用 Deform 软 件建立了 FSW 的 3D 有限元模型,研究温度对动态再 结晶晶粒大小及位错密度的影响。目前,研究较多的 TC4(Ti-6Al-4V)合金是一种双相合金,温度峰值是决 定焊接过程中是否发生相变的主要因素,进而影响到 力学性能。FALL 等^[3]、LIU 等^[13]及 ZHOU 等^[12, 14]研 究了焊接温度峰值低于 β 相相变点时 TC4 钛合金的 FSW 过程,得出 NZ 由双态或完全等轴的动态再结晶 晶粒组成。SANDERS 等^[16]及 ZHANG 等^[17]的研究中 指出,温度峰值高于 β 相相变点时 NZ 由完全片层状 组织构成。KITAMURA 等^[18]研究了 FSW 过程中温度 峰值对于 NZ 试样拉伸性能的影响,当温度峰值高于 β 相变点时,NZ 强度随热输入增加而减小;温度峰值 低于 β 相相变点时 NZ 的强度高于母材的。综上所述 可知,温度峰值对于双相 TC4 钛合金的显微组织及力 学性能至关重要,而低于相变温度时易获得更优力学 性能的 FSW 接头;已报道文献重点研究在低于相变 点下的织构、典型区域的组织及力学性能^[3, 12-13]。

因此,本文作者以应用较广泛的 α+β 型 TC4 钛合 金为研究对象,在低于相变点下分析焊接工艺参数对 FSW 接头的成形、显微组织与拉伸性能的影响,重点 分析焊缝内部缺陷的形成与转速的关系。

1 实验

实验选用 2.5 mm 厚轧制退火态 TC4 钛合金进行 平板对接焊,试板尺寸为 200 mm×100 mm,BM 的 力学性能见表 1。FSW 实验在由北京赛福斯特技术有

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204111);辽宁省自然科学基金资助项目(2014024008);辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划资助 (LJQ2015084)

收稿日期: 2016-11-02; 修订日期: 2017-07-10

通信作者: 姬书得, 教授, 博士; 电话: 024-89723472; E-mail: superjsd@163.com

限公司制造的型号为 FSW-3LM-4012 设备上进行。 实验所用搅拌头由高温钨铼合金(75%钨、25%铼,质 量分数)制造而成,其形状参数如下:轴肩直径为 15 mm、锥形搅拌针的根部与尖端直径分别为 7.2 mm 与 5.0 mm、搅拌针长度为 2.14 mm。项目组前期对比了 常规工艺与背部加热下的 TC4 钛合金 FSW,指出背 部加热利于扩宽焊接工艺参数范围,但研究重点在于 NZ 内部的完全片层状组织^[19],而不是本研究中提及 的低于β相相变点的焊接。由焊接速度与搅拌头受力 间的关系可知^[20],搅拌头受作用力随焊速的增加而增 加。因此,根据本课题组前期的研究成果,本文作者 采用 30 mm/min 的焊接速度以减少搅拌头的磨损与避 免其折断。同时,为了实现低于 β 相相变点的焊接,基 于文献及项目组前期研究结果^[21],本研究中采用的旋 转速度为 200、150、120 与 100 r/min。同时,本实验 中采用轴肩下压量与主轴倾角分别为 0.2 mm 与 2.5°。

在焊接过程中, 钛合金在 250 ℃吸氢、400 ℃吸 氧、600 ℃吸氮, 这会降低其塑性与韧性^[22], 因此, 在焊接过程中采用气管中通氩气对焊接位置进行随焊 保护(见图 1)。实验前将焊接区域用酒精擦去表面油污 等杂质。焊后, 金相试样与拉伸试样用线切割机沿垂 直于焊缝方向制备, 拉伸试样的尺寸按《GB/T 2651-2008 焊接接头拉伸试验方法》制定(见图 2)。经 打磨、抛光、腐蚀后,横截面形貌、显微组织分别采 用光学显微镜(OM, Olympus-GX71)与扫描电镜 (SEM, SU3500)进行观察, 腐蚀液为 Kroll 试剂(13 mL HF+26 mL HNO₃+100 mL H₂O)。室温拉伸实验在 Instron 8801 型试验机上以恒定速度 5 mm/min 进行, 断口形貌用 SEM 观察。拉伸实验之前剔除焊缝表面 飞边,不再机加工消除其表面弧纹。

表1 TC4 钛合金母材的力学性能

Tal	ble	1	Mec	hanical	Prop	perties	of	TC4	titanium	all	oy
-----	-----	---	-----	---------	------	---------	----	-----	----------	-----	----

Thickness/	Tensile strength/	Yield strength/	Elongation/
mm	MPa	MPa	%
2.5	1024	970	12.5



图1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding process



图2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen (Unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 横截面形貌与显微组织

图 3 所示为不同旋转速度下的接头表面成形。本研究中焊接速度为定值,因此焊接温度峰值主要受旋转速度的影响,其随旋转速度的增加而提高。在焊接过程中,搅拌头后方的材料仍处于高温状态,且此高温区域范围及经历的时间会随着 NZ 温度峰值的提高而增加。因此,在有限范围的氩气保护下,当旋转速度为 200 r/min 时,过高的温度仍使焊缝表面有轻微污染(见图 3(a))。



图 3 不同转速下的接头表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of joints under different rotating speeds: (a) 200 r/min; (b) 150 r/min; (c) 120 r/min; (d) 100 r/min

为进一步确定蓝色污染物,对图 3(a)中标示的区 域进行成分分析。如图 4 所示,蓝色物质中含有氧元 素,未发现氮元素,因此可确定蓝色物质为氧化物。 同时,随转速降低,焊缝表面呈现银亮色,无氧化现 象出现(见图 3(c)~(d))。不同转速下接头表面成形的对 比说明,低热输入焊接更有利于避免钛合金表面氧化 现象的出现。

钛合金 FSW 接头的横截面可分为 NZ、热影响区 (Heat affected zone, HAZ)和 BM, NZ 又可分为轴肩作 用区(Shoulder affected zone, SAZ)和搅拌针作用区(Pin



图 4 在图 3(a)中标示的蓝色物质的 EDS 谱

Fig. 4 EDS spectrum of blue materials marked in Fig. 3(a)

affected zone, PAZ)。图 5 中所有试样的横截面均呈碗型,这与搅拌头特定的形状有关,而碗型的大小与产热密切相关。图 5(d)所示为转速为 100 r/min 时的横截面,PAZ 相比于其他试样的横截面减小。观察图 5(a)和(b)可知,在高转速(200 r/min)下,焊缝底部出现了较大的不连续的缺陷,此缺陷平行于焊缝表面,且几乎贯穿于整个 PAZ。当转速在 120~200 r/min 之间时,缺陷随转速的减小而减小。当转速进一步减小到 100 r/min 时,缺陷消失,得到 NZ 内部无缺陷的 TC4 钛合金 FSW 接头。

尽管 FSW 的焊接温度低,但受热膨胀的 NZ 材料 在冷却时收缩,易产生焊接拉应力。TC4 钛合金较小 的热导率系数(约为铝合金的 1/6),使焊缝沿板厚方向 产生较大的温度梯度,导致焊接拉应力进一步增 加。当冷却过程中的焊接拉应力大于材料的抗拉强度 时,焊缝材料发生断裂,进而在 NZ 内部产生体积型 缺陷^[23]。对于铝合金的 FSW 来说,由于热输入不



图 5 不同转速下的横截面形貌

Fig. 5 Morphologies of cross sections at different rotating speeds: (a) 200 r/min; (b) 150 r/min; (c) 120 r/min; (d) 100 r/min

足而导致的孔洞或隧道缺陷一般出现在 NZ 的前进 侧,且缺陷尺寸往往随转速的增加而减小。这与图 5 涉及的缺陷尺寸与转速间的关系相反。同时,铝合金 FSW 接头的孔洞或隧道形态与图 5 中的缺陷亦存在明 显不同。因此,本研究与已报道的文献^[19,24]将由焊接 拉应力引起的缺陷称之为"撕裂型"缺陷。

众所周知,焊接热输入与焊接工艺参数密切相关。 当焊速一定时,焊接热输入随搅拌头旋转速度的降低 而减小,使焊接温度峰值也降低,利于减小焊接拉应 力。同时,项目组的前期研究结果表明,低转速可降 低在焊接过程中沿板厚方向的温度梯度,亦利于减小 焊接拉应力^[24]。综上所述可知,由焊接拉应力导致的 NZ内部撕裂型缺陷尺寸随转速降低而减小(见图 5(a)、 (b)与(c))。当转速为 100 r/min 时,可获得无内部缺陷 的接头(见图 5(d))。另外,焊后 FSW 接头的 NZ 因搅 拌头下压导致厚度有轻微减小,实际的 NZ 厚度约为 2.3 mm,略小于 BM 值(2.5 mm)。

在 FSW 过程中,高速旋转的搅拌头带动与其接触的金属流动;高速流动的材料也会带动其附近材料流动,从而形成间接作用区。因此,为避免与垫板直接接触,搅拌针尖端通常到焊件背面间存在 0.1~0.2 mm 的距离;尽管如此,根部未焊透陷在合理的工艺参数下仍可避免。图 6 给出了图 5(c)焊件背面的局部放大图,分析可知未见根部未焊透缺陷。



图 6 120 r/min 时 NZ 底部的放大图 Fig. 6 Enlarged image of NZ bottom at 120 r/min

图 7 所示为母材及焊缝不同区域的显微组织。如 图 7(a)所示的 TC4 钛合金,BM 由初级 α 相和细长 β 相组成,二者在 SEM 下分别呈现灰色和白色; β 相均 匀的包围在 α 相周围,使 α 相呈现等轴状。

图 7(b)及 (c)均取自近轴肩边缘处,即图 5(a)及(d) 中的区域 I 和区域 II 。在焊接过程中,轴肩边缘处经 历了较大的线速度且钛合金较低的热导率,这导致了





此区域的温度最高。因此,轴肩边缘附近区域的显微 组织形态可说明整个焊核区的温度峰值是否超过相变 温度。

由己报道的文献可知^[3, 12-13],当焊核区温度低于相 变点,焊核区有等轴的初生 α 相存在。在高转速(200 r/min)时产热最多,而图 5(a)的区域 I (见图 7(b))由少量 片层状和等轴组织构成,说明此处的焊接温度峰值低于 β 相相变温度。由于 SAZ 的温度峰值较 PAZ 高,因此, 整个 NZ 的焊接温度峰值低于 β 相相变温度。本研究中 其他低转速下 NZ 温度峰值亦低于 β 相相变温度。图 7(c)所示为转速 100 r/min 时所得接头 SAZ 的组织。通 过分析可知,图 5(d)中区域 II 的微观组织因产生动态 再结晶形成细小的等轴晶,尺寸明显小于母材的。

2.2 力学性能

图 8 所示为 TC4 钛合金 FSW 接头不同焊接参数 下的拉伸性能。通过分析可知,有缺陷试样的抗拉强 度均低于无缺陷试样。对于 FSW 接头来说,NZ 内的 缺陷会造成结构的不连续,在受拉伸载荷时会形成应 力集中,最终导致拉伸性能的降低^[25]。对于带有几乎 贯穿于整个 NZ 底部的撕裂型缺陷的 FSW 试样来说, 其抗拉强度仅为母材的 71%。随着缺陷尺寸的减小, 试件的强度逐渐由 89.5%提高到 95.6%。对于 100 r/min 下得到的无缺陷试样,其抗拉强度为母材的 98.9%, 几乎与母材等强。





另外,FSW 接头的伸长率均低于母材的;随着旋转速度的降低,伸长率呈增加趋势(见图 8)。拉伸过程中,焊缝所承受的应力随载荷的不断增加也逐渐增加, 当应力达到焊缝的抗拉强度时,焊缝发生断裂;而焊接接头伸长率的大小与母材是否屈服有关。有缺陷试 样抗拉强度均小于母材屈服强度,因此,焊缝断裂时 母材区未发生屈服,实验测得的伸长率主要来源于相 对较小的焊缝区,其值较低。当焊缝中不存在缺陷时, FSW 接头抗拉强度(1012.76 MPa)超过母材的屈服强 度(970 MPa),在拉伸过程中母材将发生屈服,因此伸 长率较高,其值为母材的 54.4%。

2.3 断口形貌分析

为进一步揭示断裂性能,对断裂位置进行 SEM 观察。图 9 所示为不同转速下的断裂位置及断口形貌。 有缺陷的拉伸试样(120 r/min)断裂于 NZ,组成断口表 面的韧窝较浅。对于转速为 100 r/min 的无缺陷试样, 其断裂位置是 SAZ 边缘。对于 FSW 接头来说, NZ





细小组织对焊缝起到了强化作用;由于表面下凹引起的几何应力集中,SAZ边缘处的材料承受较母材更大的应力。这使拉伸试样最终断裂于轴肩边缘,而不是母材。断口表面均匀细小的韧窝表明TC4 钛合金 FSW 接头呈现典型的韧性断裂。

3 结论

1) 当转速为 200 与 100 r/min 时, SAZ 分别由细 小的双态组织与等轴晶组成,说明实验是在低于相变 温度下进行的。在 NZ 内平行于焊件表面的撕裂型缺 陷随搅拌头旋转速度的降低而减小。当转速为 100 r/min 时,接头 NZ 内的撕裂型缺陷消失。

2) 对于 2.5 mm 厚的 TC4 钛合金,当旋转速度为 100 r/min 且焊接速度为 30 mm/min 时,FSW 接头的 拉伸强度与伸长率分别达到母材的 98.9%与 54.4%。 由韧窝组成的断口形貌说明拉伸试件呈现典型的韧性 断裂。

REFERENCES

 [1] 陈玉华,董春林,倪 泉,柯黎明. 钛合金/铝合金搅拌摩擦 焊接头的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s211-s214.

CHEN Yu-hua, DONG Chun-lin, NI Quan, KE Li-ming. Microstructures of friction stir welding joint between titanium and aluminum alloy dissimilar alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s211–s214.

- [2] 王玉晓,岳玉梅,姬书得,吕 赞,温 泉. 钛合金搅拌摩擦 焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 40-45.
 WANG Yu-xiao, YUE Yu-mei, JI Shu-de, LÜ Zan, WEN Quan. Recent advances in friction stir welding of titanium alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 40-45.
- [3] FALL A, JAHAZIA M, KHODABANDEHB A R, FESHARAKIB M H. Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded Ti-6Al-4V joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5): 1–13.
- [4] 姚俊歌,贺地求,赖瑞林,李 然,王海军.采用FSW与MIG 工艺补焊 6005A-T6 铝合金的接头力学性能[J].中国有色金 属学报,2015,25(3):589-594.

YAO Jun-ge, HE Di-qiu, LAI Rui-lin, LI Ran, WANG Hai-jun. Mechanical properties of repairing welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy prepared by FSW and MIG processes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 589–594.

- [5] 贺地求,叶绍勇, 汪 建. 20 mm 厚 6063 铝合金搅拌摩擦焊 焊缝 S 曲线控制[J]. 焊接学报, 2013, 34(12): 21-24.
 HE Di-qiu, YE Shao-yong, WANG Jian. Elimination of lazy S defect in friction stir welded joint of 20 mm-6063 alumimum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(12): 21-24.
- [6] 邢 丽,宋 骁,柯黎明. 2198 和 C24S 异种铝锂合金搅拌摩 擦焊接头的显微组织和力学性能[J].中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1714-1720.
 XING Li, SONG Xiao, KE Li-ming. Microstructures and mechanical properties of friction stir welding dissimilar 2198 and C24S Al-Li alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(7): 1714-1720.
- [7] 张 华,林三宝,吴 林,冯吉才,郭和平. 镁合金 AZ31 搅 拌摩擦焊接头的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1510-1513.
 ZHANG Hua, LIN San-bao, WU Lin, FENG Ji-cai, GUO He-ping. Microstructure of friction stir welds in AZ31 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(6): 1510-1513.

[8] 孙景峰,郑子樵,林 毅,贺地求,李红萍,吴秋萍. 2060 合

金 FSW 接头微观组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 364-370.

SUN Jing-feng, ZHENG Zi-qiao, LIN Yi, HE Di-qiu, LI Hong-ping, WU Qiu-ping. Microstructures and mechanical properties of 2060 alloy FSW joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 364–370.

[9] 姬书得,温泉,马琳,李继忠,张利. 钛合金搅拌摩擦 焊厚度方向的显微组织[J]. 金属学报, 2015, 51(11): 1391-1399.
JI Shu-de, WEN Quan, MA Lin, LI Ji-zhong, ZHANG Li.

Microstructure along thickness direction of friction stir welded TC4 titanium alloy joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(11): 1391–1399.

- [10] MUZVIDZIWA M, OKAZAKI M, SUZUKI K, HIRANO S. Role of microstructure on the fatigue crack propagation behavior of a friction stir welded Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 652(2): 59–68.
- [11] YOON S, UEJI R, FUJII H. Effect of rotation rate on microstructure and texture evolution during friction stir welding of Ti-6Al-4V plates[J]. Materials Characterization, 2015, 106: 352–358.
- [12] ZHOU L, LIU H J, WU L Z. Texture of friction stir welded Ti-6Al-4V alloy[J] Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2): 368–372.
- [13] LIU H J, ZHOU L, LIU Q W. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31: 1650–1655.
- [14] ZHOU L, LIU H J, LIU Q W. Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welded joints[J]. Materials and Design, 2010, 31: 2631–2636.
- [15] SONG K J, DONG Z B, FANG K, ZHAN X H, WEI Y H. Cellular automaton modelling of dynamic recrystallisation microstructure evolution during friction stir welding of titanium alloy[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(6): 700-711.
- [16] SANDERS D G, EDWARDS P, CANTRELL A M, GANGWAR K, RAMULU M. Friction stir-welded titanium alloy Ti-6Al-4V: Microstructure, mechanical and fracture properties[J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2015, 67(5): 1054–1063.
- [17] ZHANG Y, SATO Y S, KOKAWA H, PARK S H C, HIRANO S.

Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485: 448–455.

- [18] KITAMURA K, FUJII H, IWATA Y, SUN Y S, MORISADA Y. Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded Ti-6Al-4V joints[J]. Materials and Design, 2013, 46: 348–354.
- [19] JI S D, LI Z W, LV Z, MA L. Joint formation and mechanical properties of back heating assisted friction stir welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials and Design, 2016, 113: 37–46.
- [20] 吴 奇,张 昭,张洪武.搅拌摩擦焊接中焊接速度与搅拌 头受力关系研究[C]// 中国计算力学大会.长沙:湖南大学出版社,2014.

WU Qi, ZHANG Zhao, ZHANG Hong-wu. Force analysis of welding tool during friction stir welding process of different welding speeds based on CFD model[C]// China Congress on Computational Mechanics. Changsha: Hunan University Press, 2014.

- [21] JI S, WANG Y, LI Z W, MA L, ZHANG L G, YUE Y M. Effect of plate thickness on tensile property of Ti-6Al-4V alloy joint friction stir welded below β-transus temperature[J]. High Temperature Materials & Processes, 2017, 36(6): 693–699.
- [22] 王快社,张小龙,沈 洋,徐可为. TC4 钛合金搅拌摩擦焊连 接组织形貌研究[J]. 稀有金属材料与工程,2008,31(11): 2045-2048.

WANG Kuai-She, ZHANG Xiao-Long, SHEN Yang, XU Ke-wei. Microstructure of friction stir weld for TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 31(11): 2045–2048.

- [23] JI S D, LI Z W, ZHANG L G, WANG Y. Eliminating the tearing defect in Ti-6Al-4V alloy joint by back heating assisted friction stir welding[J]. Materials Letters, 2017, 188: 21–24.
- [24] YUE Y, WEN Q, JI S, MA L, LV Z. Effect of temperature field on formation of friction stir welding joints of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. High Temperature Materials & Processes, 2017, 36(7): 733–739.
- [25] FUJII H, SUN Y F, KATO H, NAKATA K. Investigation of welding parameter dependent microstructure and mechanical properties in friction stir welded pure Ti joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 3386–3391.

Formation and tensile properties of friction stir welded TC4 titanium alloy joint below β -phase transus temperature

WANG Yue¹, JI Shu-de¹, LI Zheng-wei¹, CHAI Peng²

(1. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: TC4 titanium alloy with thickness of 2.5 mm was friction stir welded using W-Re rotational tool with shoulder diameter of 15 mm. The formation, microstructure and tensile property of FSW joint were mainly discussed. The results show that nugget zone (NZ) of cross section presents typical bowl-like shape. When rotating speed is lower than 200 r/min, the peak temperature during welding is below β -phase transus temperature. The tearing defect often appears in pin affected zone of NZ, which results from the welding tensile stress during welding. Decreasing the rotating speed is beneficial to reduce and even eliminate the tearing defect. The defect-free FSW joint attained below β -phase transus temperature owns high tensile strength, which is almost equal to that of base metal. The fracture surface is composed of plenty dimples, presenting the typical ductile fracture.

Key words: TC4 titanium alloy; friction stir welding; tensile strength; tearing defect; phase transus temperature

Foundation item: Project(51204111) supported by the National Natural Science Foundation; Project(2014024008) supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China; Project(LJQ2015084) supported by Liaoning Province Outstanding Young Scholars Growth Plans, China

Received date: 2016-11-02; Accepted date: 2017-07-10

Corresponding author: JI Shu-de; Tel: +86-24-89723472; E-mail: superjsd@163.com

(编辑 李艳红)