

TC11 钛合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能研究

王欣¹, 谢文辉¹, 娄正计¹, 刘宏¹, 杨冠军¹, 何光宇², 周利³

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

(3. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209)

摘要: 在不同转速下开展了 TC11 钛合金搅拌摩擦焊试验, 分析了接头的微观组织和力学性能, 建立了焊接工艺、接头组织与性能之间的内在联系。结果表明: 接头搅拌区 (SZ) 为完全的 β 转变组织, 其细小晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相以及针状 α' 相的双重强化作用, 致使 SZ 硬度最高。热影响区 (HAZ) 和热机影响区 (TMAZ) 均由残余初始 α 相和 β 转变组织组成, 但后者具有一定的流变特征, 且距 SZ 越近, 转变组织占比越大, 强化效果越明显。随着转速的上升, SZ 中晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相的尺寸增加, 晶内针状 α' 相的含量降低, 这引起了其硬度的降低。与硬度规律相同, 各转速下接头拉伸均断裂在母材区 (BM), 且各转速下 SZ 抗拉强度明显高于 BM, 并随转速上升而下降。此外, SZ 中细小的晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相, 也导致各转速下 SZ 延伸率高于 BM, 使其展现出良好的塑性, 且随着转速上升, 因晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相尺寸增加, SZ 延伸率有所降低。

关键词: 搅拌摩擦焊; TC11 钛合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)04-1436-06

钛合金具有比强度高、高温性能突出等优点, 被广泛应用于航空航天领域^[1,2]。TC11 属于 $\alpha+\beta$ 双相强型钛合金, 能在较高的工作温度和动态负载条件下服役, 常用于制造关键构件。作为一种重要的制造及维修技术, 焊接在各类构件的加工中发挥着重要作用。因此, 开展 TC11 钛合金焊接研究十分必要。

近些年, TC11 钛合金焊接研究主要集中在熔化焊方面, 包括钨极氩弧焊、电子束焊、激光焊等。万晓慧等^[3]对 TC11 进行了钨极氩弧焊, 采用同种材料进行填丝处理, 得到了无缺陷且成形良好的焊缝, 接头强度可达到基材的水平。王世清等^[4,5]对 TC11 实施了真空电子束焊, 发现熔化区为马氏体组织, 而热影响区为马氏体与初始相的混合组织, 接头沿厚度方向存在较大的硬度差异, 接头抗拉强度接近母材, 接头冲击韧性高于母材。虞鸿江等^[6]开展了 TC11 钛合金激光焊, 在合适的工艺参数下获得了良好的焊接成形, 熔化区是马氏体组织, 距离焊缝越近热影响区中马氏体占比越大, 焊缝处硬度高, 热影响区和母材硬度低。

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种新颖的固相焊技术。

随着技术进步, 可焊材料已从铝、镁等低熔点金属扩展到了钢、钛等高熔点金属^[7-9]。相对于熔化焊过程中易产生焊接缺陷和组织粗大等问题, FSW 过程中被焊材料不发生熔化, 随后在动态再结晶作用下可获得无缺陷的细化组织^[10-12]。此外, FSW 还具有接头强塑性好、焊接变形小及残余应力低等优势^[13,14]。然而, 目前有关 TC11 搅拌摩擦焊接头组织性能的研究报道较少。本研究在不同转速下开展了 TC11 钛合金搅拌摩擦焊, 分析了接头微观组织和力学性能, 建立了焊接工艺、接头组织与性能之间的内在联系。该研究旨在推动 FSW 技术在关键航空构件制造及维修领域的发展。

1 实验

TC11 钛合金的名义成分为 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, 本实验采用的 TC11 为锻造退火态, 厚度为 4 mm, 直径为 150 mm。搅拌工具为分体式结构, 搅拌头材质为钨钼合金 (W-25Re)。轴肩直径为 16 mm, 搅拌针的根部直径 7.3 mm, 端部直径 3 mm, 针长 2.5 mm, 轴肩和搅拌针上加工有逆时针螺旋槽。整个焊接过程进

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51305335)

作者简介: 王欣, 男, 1996 年生, 硕士, 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049, E-mail: wangxin_18@stu.xjtu.edu.cn

行水循环冷却以避免搅拌头的过热, 并进行氩气主吹保护以减少焊接中的氧化。FSW 试验中, 搅拌头行进速度为 75 mm/min, 压入量为 0.5 mm, 搅拌头转速分别为 250、350 和 450 r/min。

FSW 完成后, 沿垂直焊接方向截取试样进行微观组织观察和力学性能测试。精磨和机械抛光后, 采用 Kroll 试剂(2% HF+6% HNO₃ 的水溶液, 体积分数)腐蚀, 通过 Nikon ECLIPSE MA200 倒置金相显微镜和 HITACHI SU6600 型扫描电镜进行组织观察。接头显微硬度测试采用 HXD-1000TMC/LCD 维氏硬度计, 在载荷 2.94 N, 保载时间 15 s 条件下沿截面中心水平进行, 硬度点间隔为 0.2 mm。拉伸试样有 2 种, 分别是接头试样和搅拌区试样, 试验采用 INSTRON 5982 电子万能试验机进行测试, 拉伸速率为 2 mm/min。

2 结果与分析

2.1 典型接头各区微观组织研究

不同转速下搅拌摩擦焊接头的宏观形貌如表 1 所示。可以看出, 各参数下的接头呈“碗”形结构, 随着转速的上升, 碗口的直径和碗的深度均有所增加, 这表明高转速焊接过程中热力作用范围更大。值得注意的是, 转速为 250 r/min 时, 在搅拌区底部出现了内部缺陷, 形成原因是低转速下产热不足, 且钛合金热导率低, 在厚度方向上存在较大温度梯度, 导致底部塑性流动不充分。通过提高转速增大热输入以增强材料流动, 可以有效防止缺陷产生, 故 350 和 450 r/min 接头无内部缺陷。

350 r/min 转速下典型接头各区域微观组织如图 1 所示。根据经历的热力过程, FSW 接头可以分为 4 个区域: 母材区 (BM)、热影响区 (HAZ)、热机影响

区 (TMAZ) 和搅拌区 (SZ)。

BM 由粒状或拉长状的初始 α 相(黑色相)和初始 β 相(白色相)组成, 拉长特征表明其仍保留着一定的变形加工痕迹。SZ 为完全的 β 转变组织, 即为晶界 α 相、晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相和晶内针状 α' 相的混合组织, 这说明 SZ 峰值温度已高于 $T_{\beta\text{-trans}}$ 。冷却过程中, 晶界 α 相在 β 晶界处优先析出, 随后在 β 晶内形成片层状 $\alpha+\beta$ 相, 最后在 β 晶内生成少量针状 α' 相。

HAZ 由残余初始 α 相和 β 转变组织组成。与 BM 相比, HAZ 的初始 α 相含量明显降低, 这是因为 HAZ 中焊接峰值温度位于 $\alpha+\beta$ 两相区, 高温下部分 α 相转变成 β 相, 冷却后 β 相形成转变组织。TMAZ 仍由残余初始 α 相和 β 转变组织组成, 但其组织呈一定的流变特征, 变形方向与 SZ/TMAZ 边界平行。与 HAZ 相比, TMAZ 中残余 α 相的含量进一步降低, 这是因为 TMAZ 距离 SZ 更近, 焊接峰值温度更高, 导致更多的 α 相转变成 β 相。

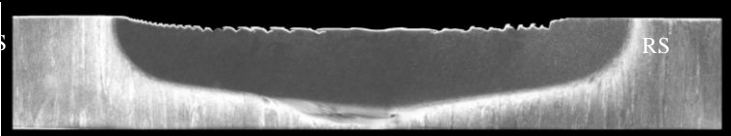
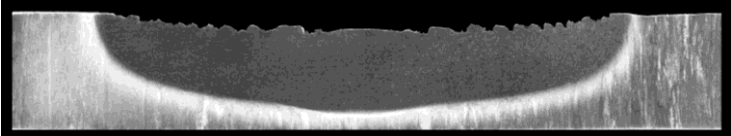
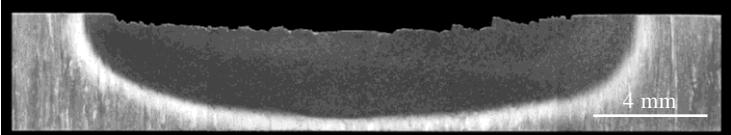
2.2 转速对搅拌区组织影响研究

不同转速下搅拌区高温 β 晶粒形态如图 2 所示, 各转速下接头 SZ 均为完全的 β 转变组织。250~450 r/min 下 SZ 高温 β 晶粒尺寸在 12.6~26.0 μm 范围内, 且随着转速上升高温 β 晶粒尺寸增加。这是由于随着转速上升, SZ 热输入增加, 焊接峰值温度越高, β 相变温度以上的高温停留时间越长, β 晶粒长大越充分。这直接表明 SZ 中晶界 α 相长度也随转速上升而增加, 同时可能意味着晶内单个 $\alpha+\beta$ 片层集束面积增加。

不同转速下搅拌区晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相形态如图 3 所示, 随着转速上升, SZ 热输入增加, 晶界 α 相厚度增加, 与此同时晶内 $\alpha+\beta$ 片层间距也增加。此外, 随着转速上升, 热输入增加, 冷却速率降低, 可能将导致晶内针状 α' 相含量的降低。

表 1 不同转速下搅拌摩擦焊接头宏观形貌

Table 1 Macrostructures of the FSWed joints under different rotational speeds

Rotational speed/r min ⁻¹	Macrostructure	Remark
250		Inner defect
350		No inner defect
450		No inner defect

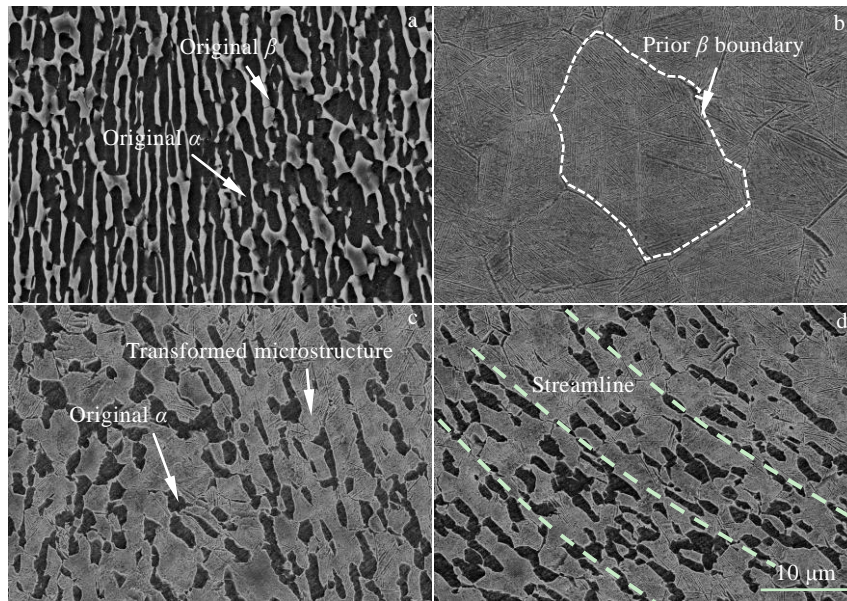


图 1 350 r/min 转速下典型接头各区域微观组织

Fig.1 Microstructures of different regions in the typical joint under the rotational speed of 350 r/min: (a) BM, (b) SZ, (c) HAZ, and (d) TMAZ

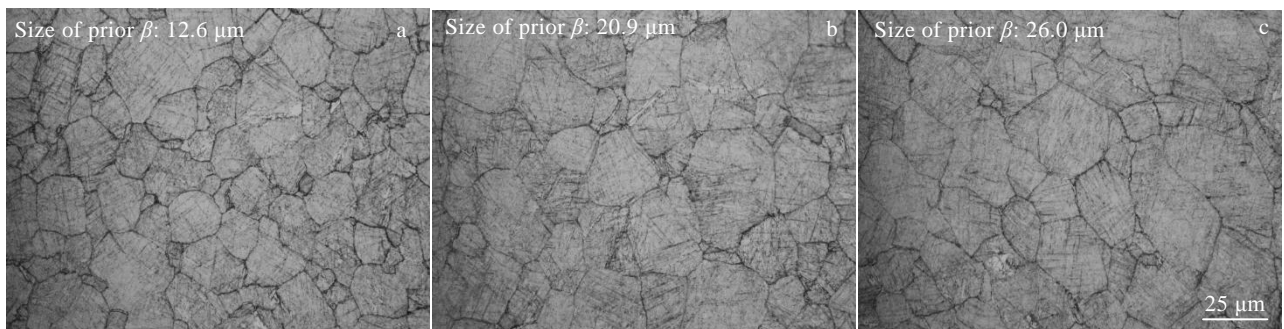


图 2 不同转速下搅拌区高温 β 晶粒形态

Fig.2 Morphologies of prior β grains in the SZ under different rotational speeds: (a) 250 r/min, (b) 350 r/min, and (c) 450 r/min

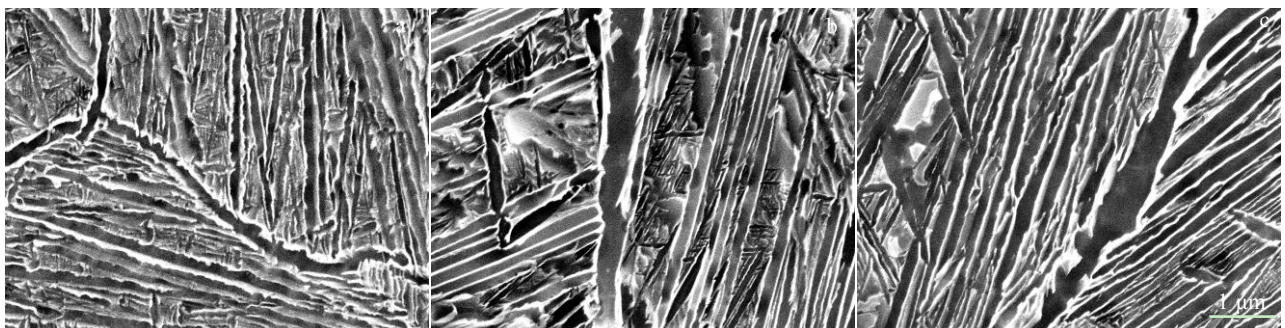


图 3 不同转速下搅拌区晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相形态

Fig.3 Morphologies of grain boundary α phase and intragranular lamellar $\alpha+\beta$ phase in SZ under different rotational speeds: (a) 250 r/min, (b) 350 r/min, and (c) 450 r/min

2.3 接头力学性能研究

图 4 给出了不同转速下接头的显微硬度分布, BM 硬度值(HV)为 3700 MPa 左右, SZ 的硬度值在 4206~4376 MPa 范围内, 各转速下 SZ 硬度最高, BM 最低。HAZ 和 TMAZ 硬度介于 BM 和 SZ 之间, 越接近 SZ 硬度越高。

SZ 硬度高基于 2 个方面原因, 一方面 SZ 转变组织中晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相较为细小, 另一方面 β 转变组织中出现了针状 α' 相。距离 SZ 越近, HAZ 和 TMAZ 中转变组织的占比越大, 强化效果越明显。

另外, 随着转速上升 SZ 硬度降低, 这是因为 SZ 中晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相的尺寸增加, 同时晶内针状 α' 相含量减少。

不同转速下接头拉伸试验结果如表 2 所示。各转速下的 FSW 接头断裂均发生在 BM, 因此各转速下接头抗拉强度与 BM 相当。这说明在 FSW 接头中 SZ、TMAZ 以及 HAZ 的强度均高于 BM, 这与硬度反映的规律一致。

2.4 搅拌区力学性能研究

不同转速下搅拌区拉伸试验结果如表 3 所示。BM 的抗拉强度在 1197.1 MPa 左右, SZ 的抗拉强度在 1403~1433MPa 范围内, 各转速下 SZ 抗拉强度明显高于 BM, 且随着转速上升 SZ 的抗拉强度略有下降, 这也与硬度反映的规律一致。

BM 的延伸率在 12.7%左右, 250~450 r/min 下 SZ 的延伸率在 13.8~15.5%范围内, 各转速下 SZ 的延伸

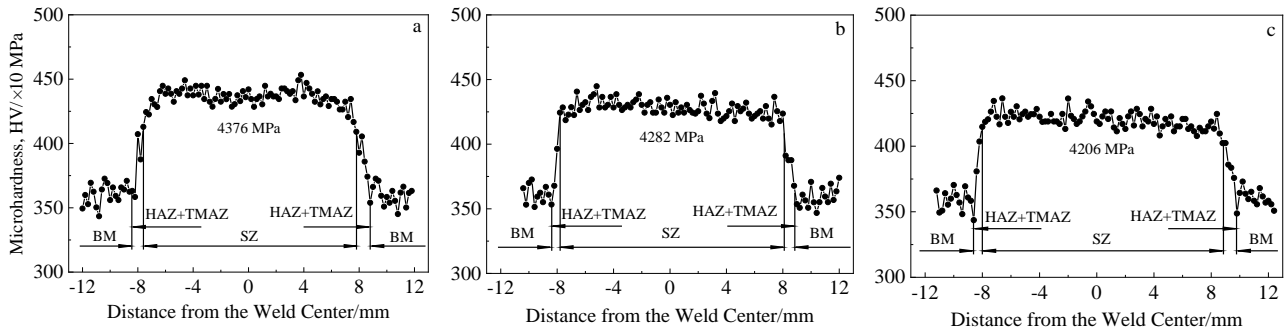


图 4 不同转速下接头显微硬度分布

Fig.4 Microhardness distributions of the joints under different rotational speeds: (a) 250 r/min, (b) 350 r/min, and (c) 450 r/min

表 2 不同转速下 FSW 接头整体试样拉伸结果

Table 2 Tensile results of whole FSW joints under different rotational speeds

Rotational speed/r min ⁻¹	Tensile strength/MPa	Fracture position	Photograph of the tested specimen
BM	1185.8±9.7	BM	
250	1127.2±18.5	BM	
350	1173.0±3	BM	
450	1107.0±27	BM	

表 3 不同转速下搅拌区试样拉伸性能

Table 3 Tensile strength and elongation of SZ under different rotational speeds

Rotational speed/r min ⁻¹	BM	250	350	450
Tensile strength/MPa	1197.1±4.8	1433.0±11.6	1417.3±1.1	1403.0±10.6
Elongation/%	12.7±0.5	15.5±1.1	14.4±0.4	13.8±0.7

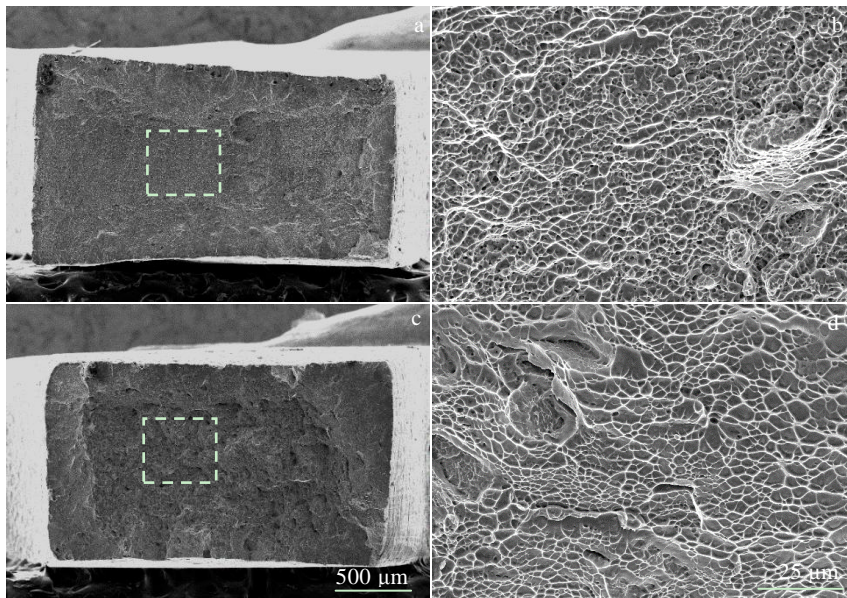


图 5 母材和 350 r/min 下典型接头搅拌区断口形貌

Fig.5 Fracture appearances of BM (a, b) and SZ under the rotational speed of 350 r/min (c, d)

率均高于 BM, 这是由于 SZ 中生成了较为细小的晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相。此外, 随着转速上升 SZ 的延伸率有所降低, 这是因为随着转速的上升, SZ 中晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相的尺寸增加。

母材和 350 r/min 下典型接头 SZ 断口形貌如图 5 所示。与 BM 类似, SZ 断口展现出均匀细小的韧窝形貌, 表现出韧性断裂特征, 再次说明 SZ 具有良好的塑性。

3 结 论

1) 接头中 SZ 为完全的 β 转变组织, 即为晶界 α 相、晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相和晶内针状 α' 相的混合组织; HAZ 和 TMAZ 均由残余初始 α 相和 β 转变组织组成, 但 TMAZ 具有一定的流变特征。

2) 随着转速的上升, SZ 中高温 β 晶粒的尺寸增加, 室温下晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相的尺寸增大, 晶内针状 α' 相的含量降低。

3) 接头中 SZ 硬度最高, 是基于其中细小晶界 α 相和晶内片层状 $\alpha+\beta$ 相以及针状 α' 相的双重强化作用。距离 SZ 越近, HAZ 和 TMAZ 中转变组织占比越大, 强化效果越明显。且随转速上升 SZ 硬度降低。

4) 接头 SZ、TMAZ 和 HAZ 的强度均高于 BM。

各转速下 SZ 抗拉强度明显高于 BM, 且随转速上升 SZ 抗拉强度下降。

5) 不同转速下 SZ 延伸率均高于 BM, 展现出良好的塑性, 随着转速上升, SZ 延伸率降低。

参考文献 References

[1] Zhang Xiyan(张喜燕), Zhao Yongqing(赵永庆), Bai Chenguang(白晨光). *Titanium Alloys and Applications*(钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005

[2] Schutz R W, Watkins H B. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1-2): 305

[3] Wan Xiaohui(万晓慧), Du Yuxiao(杜欲晓). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2011, 16: 78

[4] Yang Hanghang, Yao Zekun, Gao Jun *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2010, 39(1): 22

[5] Wang Shiqing(王世清), Liu Jinhe(刘金合), Wen Guodong(温国栋) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(6): 1150

[6] Yu Hongjiang(虞鸿江), Fan Ruyi(范如意), Huang Jian(黄坚) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(1): 1

[7] Ji S D, Meng X C, Liu J G *et al.* *Materials & Design*[J],

- 2014, 62: 113
- [8] Ji S D, Meng X C, Li Z W *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 84(9-12): 2391
- [9] Liu H J, Zhou L, Liu Q W. *Materials & Design*[J], 2010, 31(3): 1650
- [10] Mishra R S, Ma Z Y. *Materials Science and Engineering R: Reports*[J], 2005, 50(1-2): 1
- [11] Ma Zongyi(马宗义). *Science Focus(科学观察)*[J], 2009(5): 53
- [12] Ren Shurong(任淑荣), Ma Zongyi(马宗义), Chen Liqing(陈礼清). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2007(1): 86
- [13] Gangwar K, Ramulu M. *Materials & Design*[J], 2018, 141: 230
- [14] Mironov S, Sato Y S, Kokawa H. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 34(1): 58

Research on Microstructures and Mechanical Properties in Friction Stir Welded Joints of TC11 Titanium Alloy

Wang Xin¹, Xie Wenhui¹, Lou Zhengji¹, Liu Hong¹, Yang Guanjun¹, He Guangyu², Zhou Li³

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(3. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Friction stir welding test of TC11 titanium alloy was carried out under different rotational speeds, the microstructures and mechanical properties of the welded joints were analyzed, and the relationships among processing parameters, microstructures and properties of the joints were established. The results show that the SZ is characterized by β transformed microstructure, which contains grain boundary α phase, intragranular lamellar $\alpha+\beta$ phases and acicular α' phase. The double strengthening is caused by the fine α phase and $\alpha+\beta$ phases as well as the presence of α' phase, which leads to the highest hardness value in the SZ. The retained original α phase and β transformed microstructure are found in the HAZ and TMAZ, while the TMAZ shows the streamlined deformation characteristics. The proportion of β transformed microstructure in these zones is higher when closer to the SZ, and thus the strengthening effect is enhanced. The sizes of α phase and $\alpha+\beta$ phases increase and the content of α' phase decreases with the rotational speed ascending, which results in the reduction of hardness value in the SZ. Similar to the law reflected from the hardness test, all the joints fracture in BM after tensile test, the tensile strength of the SZ under different rotational speeds are significantly higher than that of BM, and they decrease with the ascent of rotational speed. Besides, the fine α phase and $\alpha+\beta$ phases cause the higher elongation of SZ compared with that of BM, meaning that the SZ has good plasticity. With the rotational speed ascending, the elongation of SZ decreases owing to the increase of the sizes of α phase and $\alpha+\beta$ phases.

Key words: friction stir welding; TC11 titanium alloy; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Liu Hong, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: hongliu@mail.xjtu.edu.cn