

等温变形对惯性摩擦焊 IMI834/Ti6246 双钛合金组织与性能的影响

赵张龙, 宋旭阳, 曹澜川, 徐文馨, 姚泽坤, 郭鸿镇

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 采用惯性摩擦焊与等温变形相结合的复合技术制备出 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘, 分析了等温变形对惯性摩擦焊双钛合金缩比盘组织与性能的影响。结果表明: IMI834/Ti6246 双钛合金经惯性摩擦焊后焊缝组织细小, 但两侧热影响区内组织粗大, 超声波无损检测发现焊后双合金缩比盘内局部存在有缺陷。而 IMI834/Ti6246 双钛合金经等温变形后, 焊后缺陷得到有效消除, 焊缝两侧热影响区组织发生了明显改变, 中心焊缝和两侧热影响区过渡更加均匀。惯性摩擦焊 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘等温变形后焊缝得到有效强化, 惯性摩擦焊+等温变形工艺可用于制备高性能双钛合金盘件。

关键词: 双合金盘; 等温变形; 惯性摩擦焊; 组织; 性能

中图分类号: TG453^{+.9}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)07-2388-05

航空发动机工作时内部轮盘和叶片处于高温高速旋转状态, 盘芯到盘缘及叶片部位的受力和受热状态差别较大, 导致盘芯到盘缘及叶片部位存在较大的温度梯度和应力梯度, 因此发动机轮盘盘芯和盘缘部位往往要求具有 2 种不同的使用性能, 即双重性能要求^[1,2]。采用锻造或热处理方法使单一合金不同位置获得不同组织的单合金双组织-双性能盘工艺, 以及将 2 种不同合金相连接的双合金-双性能盘工艺, 是满足盘芯到盘缘及叶片部位双性能要求的两种可行路径^[3-7]。双合金-双性能盘因可以通过发挥 2 种材料各自的性能优势, 可承受的温度梯度和应力梯度更大, 应用范围更广。

摩擦焊技术作为先进的固相焊接工艺, 以其独特的技术优势在高性能材料、特殊结构的连接上得到大量应用, 是航空发动机转子部件制造的核心技术^[8-10]。郎波等人^[8]阐明了 TC11/TC17 异种钛合金线性摩擦焊过程依次经历了摩擦产热、TC11 变形产热、TC11 和 TC17 共同变形产热 3 个阶段, 产热行为的差别直接导致了接头形成过程的不同。季亚娟等人^[9]将 TC11 和 TC17 直接进行摩擦焊接研究, 发现 TC11/TC17 接头显示出较好的综合性能, 其抗拉强度及屈服强度基本与母材 TC11 相当, 焊缝处发生动态再结晶, 组织为等轴晶。Bang 等人^[10]对比了摩擦焊和普通焊 Al6061-T6/Ti6Al4V 双合金接头, 发现 Al6061-T6/Ti6Al4V 摩擦焊接头的抗拉强度比普通焊接头高

24%, 可达母材 Al6061-T6 焊接的 91%, 同时具有更高的塑形和韧性。然而, 异种双钛合金摩擦焊后易残留有气孔、裂纹、粗晶等缺陷, 造成零部件使用性能下降^[11]。通过发挥形核、动态再结晶的塑性变形技术不仅可以有效细化合金的显微组织^[12], 还可以闭合焊接孔洞, 消除焊接缺陷, 改善异种钛合金焊件连接界面组织, 提高连接界面力学性能^[13-15]。Medvedev 等人^[13]发现 Ti-6Al-4V/Ti17 双合金轧制板材界面上的纳米晶和亚晶组织可以增强界面原子扩散, 剪切变形有利于界面熔合区强度。李凯、Qin 等人^[14,15]通过等温变形试验改善了电子束焊 Ti60/Ti2AlNb、TC11/Ti2AlNb 双合金焊缝组织, 提高了双合金焊缝区过渡性能。

本研究采用惯性摩擦焊与等温变形相结合的复合技术来制备 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘, 通过超声波无损检测、显微组织观察、力学性能测试等方法, 研究了等温变形对 IMI834/Ti6246 惯性摩擦焊双钛合金缩比盘组织与性能的影响, 发现等温变形可以有效消除摩擦焊残余缺陷, 改善双钛合金的组织与性能, 对于双合金-双性能盘件制备工艺的发展具有实际指导意义。

1 实验

本实验用原材料为 IMI834 和 Ti6246 钛合金棒材, 其主要化学成分见表 1。IMI834 合金棒材原始材料为典型的等轴组织, 组织内均匀分布有大量初生等轴 α 相,

收稿日期: 2019-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51974259); 陕西省自然科学基金资助项目 (2019JM005)

作者简介: 赵张龙, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88492642, E-mail: zlzhaol@nwpu.edu.com

平均尺寸约为 20 μm , 等轴 α 相间参差着少量 β 相, 如图 1a 所示。Ti6246 合金棒材原始组织为典型的双态组织, 在 β 基体上均匀分布着一定数量的不连续等轴状 α 相, 等轴 α 相尺寸明显小于 IMI834 合金, 如图 1b 所示。

将 IMI834/Ti6246 合金机加工为缩比圆环和内轴, 分别作为旋转端和移动端进行惯性摩擦焊, 如图 2a、2b 所示, 焊后获得双合金缩比盘毛坯尺寸如图 2c 所示。IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘惯性摩擦焊工艺参数为转速: 为 500 r/min(第 1 阶段)+400 r/min(第 2 阶段); 顶锻力为约 2 MPa(第 1 阶段) 约 4 MPa(第 2 阶段); 转动惯量为 2000.48 $\text{W}\cdot\text{K}^{-2}$ (第 1 阶段)+3000 $\text{W}\cdot\text{K}^{-2}$ (第 2 阶段); 保压时间为 20 s。在等温锻平台上对 IMI834/Ti6246 双钛合金惯性摩擦焊缩比盘坯进行等温变形, 具体参数为变形温度为 940 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.01 s^{-1} , 变形量为 20%, 变形后进行空冷。对焊后和等温变形后的缩比盘进行超声波检测、显微组织观察和力学性能测试。

2 结果与分析

2.1 等温变形对双合金缩比盘超声波探伤的影响

为了检测 IMI834/Ti6246 双合金盘焊后质量, 在 LS-200LP 超声波探伤系统上, 选择公称尺寸为 10 MHz 的 HGE-5827-A 探头、 $\Phi 0.8$ mm 平底孔 Ti6Al4V 对比块, 对焊态双合金缩比盘进行超声波水浸探伤。探头从旋转双合金盘外端开始步进, 以 133 mm/s 的线速度进行扫查, 双合金盘每旋转一圈, 探头步进 1 mm, 直至探头扫描完整个缩比盘, 如图 3a 所示。将扫查结果沿圆周 360 $^{\circ}$ 展开如图 3b 所示, 从扫描图像中可以观察到, 在 IMI834/Ti6246 双合金缩比盘靠近平面端有明显的发射信号, 说明 IMI834/Ti6246 双合金盘连接不充分, 内部存在较大尺寸的孔洞缺陷。

为了消除 IMI834/Ti6246 双合金缩比盘焊后缺陷, 对缩比盘进行等温变形, 然后采用同样的参数再次进

行超声波水浸探伤, 检测结果如图 4 所示。从检测结果可以看出, 在整个检测区域内均未发现尺寸 $\geq \Phi 0.8$ mm 平底孔反射波, 说明惯性摩擦焊 IMI834/Ti6246 双合金盘内原先残留的孔洞缺陷在等温变形中得到了有效焊合, 双合金盘质量得到改善。

表 1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of as-received titanium alloys (wt%)

Alloy	Al	Zr	Mo	Si	Nb	O	Fe	Ti
IMI834	6.00	3.71	0.51	0.40	0.65	0.069	0.03	Bal.
Ti6246	6.10	3.80	6.05	0.08	-	0.09	0.12	Bal.

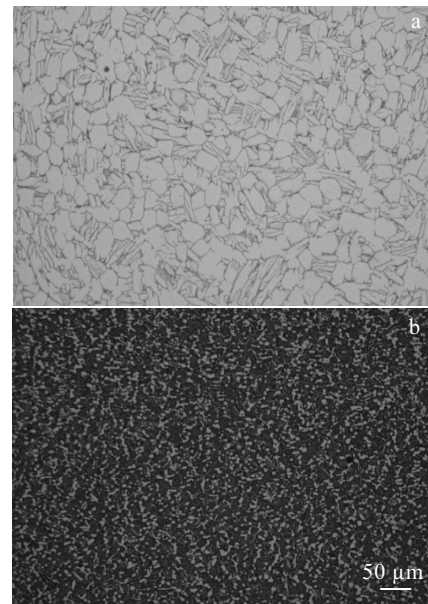


图 1 试样用原材料显微组织

Fig.1 Primary microstructures of raw material: (a) IMI834 alloy and (b) Ti6246 alloy

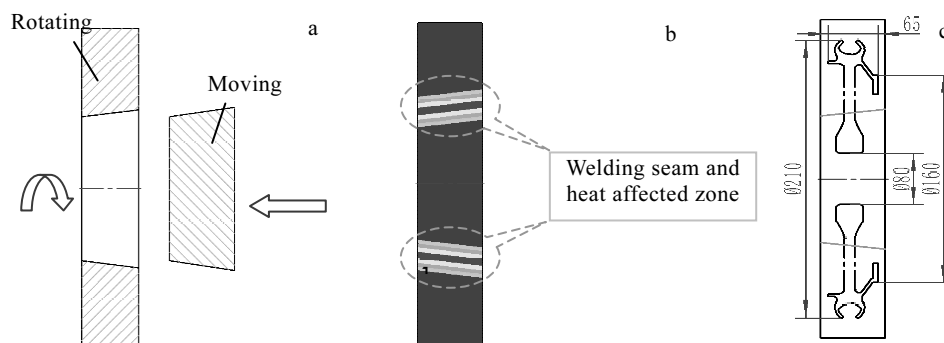


图 2 IMI834/Ti6246 双合金惯性摩擦焊接示意图

Fig.2 Schematic diagrams of IMI834/Ti6246 dual alloy inertial friction welding process: (a) before welding, (b) after welding, and (c) the scaled disk after welding

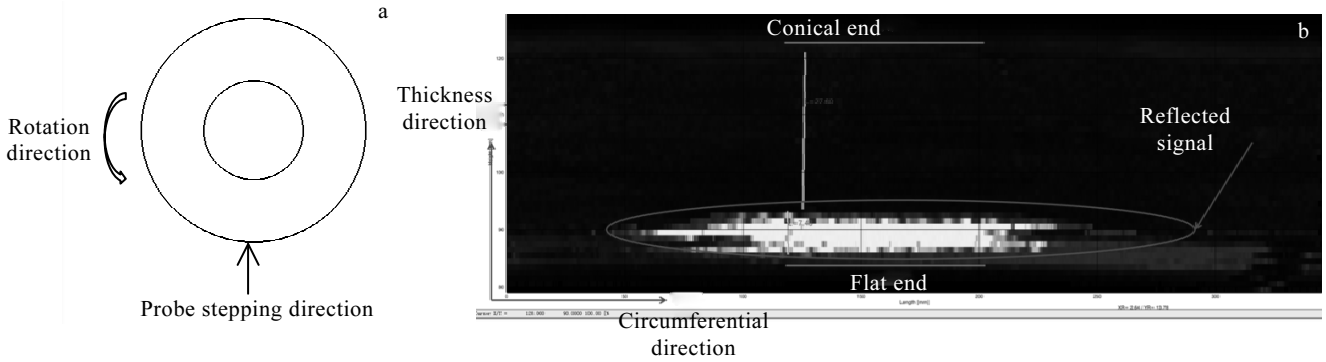


图 3 焊后双合金缩比盘超声波扫描过程及结果

Fig.3 Ultrasonic scanning path (a) and scanning image (b) of double alloy scaled disk after welding

2.2 等温变形对双合金缩比盘显微组织的影响

IMI834/Ti6246 双钛合金经惯性摩擦焊接后, 缩比盘接头显微组织形态分布如图 5 所示。从组织形态上看, 焊接接头可分为焊缝区(A)、热影响区(B)和基体区(C)。IMI834/Ti6246 双钛合金焊缝呈黑白相间的带状形态, 两侧热影响区组织明显发生了改变, 基体区仍然保持原始组织形态, 这与先前钛合金惯性摩擦焊接接头形态分布类似^[16,17]。

IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘焊后接头区域显微组织如图 6 所示。图 6a 为 IMI834 合金侧热影响区显微组织。从图中可以看到, 组织内以大量条状 α 相为主, 存在少量原始等轴 α 相, 这是因为摩擦生热导致 IMI834 合金侧热影响区温度快速升高, 原始等轴 α 相转变为 β 相, 在随后冷却过程中 β 相转变析出次生条状 α 相。而缩比盘焊缝处却呈明显细小再结晶等轴组织(图 6b), 这主要是由于焊缝区域在外机械力作用下产生高温塑性变形, 高温、高压双重作用有利于动态再结晶发生, 使焊缝处组织细化形成细小的等轴组

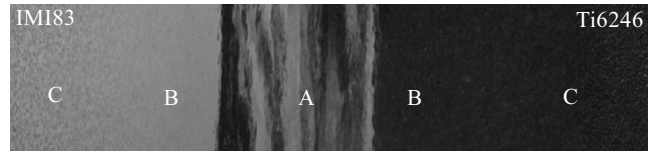


图 5 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘焊后接头组织形态分布
Fig.5 Morphologies of welding joint of IMI834/Ti6246 dual titanium alloy scaled disk

织。Ti6246 合金侧热影响区显微组织粗大(图 6c), 原始双态组织(图 1b)已经完全发生了转变, 等轴 α 相消失, 粗大 β 晶粒出现, 说明摩擦热已经超过 Ti6246 合金相变温度(955 $^{\circ}\text{C}$), 导致合金进入 β 单相区, 形成粗大晶粒, 随后冷却析出细针状 α 相。

IMI834/Ti6246 双合金缩比盘经等温变形后接头区域显微组织如图 7 所示。图 7a 为 IMI834 合金侧热影响区等温变形后的显微组织。可以看出焊后条状 α 相在等温变形后发生破碎, 形成大量等轴 α 相。图 7b 为焊缝等温变形后的显微组织, 主要由短棒状、等轴状的细小 α 相组成。图 7c 为 Ti6246 合金侧热影响区等温变形后的显微组织。可以看出, 焊后粗大 β 晶粒明显发生了破碎, 形成等轴和针状 α 相。对比图 6 和图 7 可以看出, IMI834/Ti6246 双合金接头区域在等温变形作用下, 热影响区粗大针状明显得到改善, 焊缝与热影响区过渡更加均匀。

2.3 等温变形对双合金盘拉伸性能的影响

对等温变形前后 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘进行室温拉伸, 应力-应变曲线如图 8 所示, 可以发现, 等温变形后, 双合金缩比盘强度、塑性均有所提高。测得等温变形后 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘室温的抗拉强度为 1040 MPa, 屈服强度为 979 MPa, 延伸

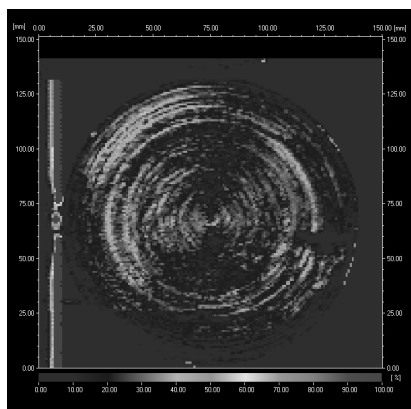


图 4 锻态双合金缩比盘超声波水浸探伤图

Fig.4 Scanning image of ultrasonic wave water immersion of forged dual alloy scaled disk



图 6 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘焊后接头区域的显微组织

Fig.6 Microstructures of welding joint of IMI834/Ti6246 dual titanium alloy scaled disk after inertial friction welding: (a) affected zone of IMI834 side, (b) welding seam, and (c) affected zone of Ti6246 side



图 7 等温变形后 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘接头区域显微组织

Fig.7 Microstructures of welding joint of IMI834/Ti6246 dual titanium alloy scaled disk after isothermal deformation: (a) affected zone of IMI834 side, (b) welding seam, and (c) affected zone of Ti6246 side

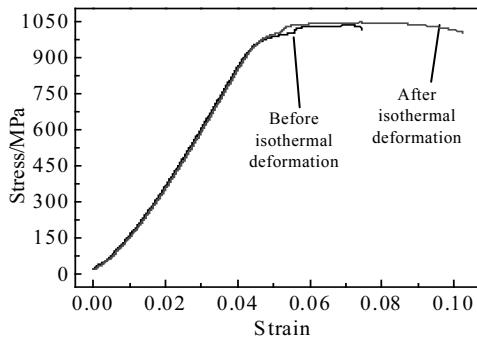


图 8 等温变形前后 IMI834/Ti6246 双合金缩比盘的室温拉伸曲线

Fig.8 Tensile curves of IMI834/Ti6246 dual alloy scaled disk before and after isothermal deformation at room temperature



图 9 IMI834/Ti6246 双钛合金室温拉伸试样

Fig.9 Tensile specimen of the IMI834/Ti6246 dual titanium alloy

率和断面收缩率分别为 6.9%和 24.6%。对比前期文献 IMI834 高温合金^[18]和 Ti6246 钛合金^[19]室温拉伸性能可以发现, IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘经等温变形后的性能与 IMI834 基体合金相当,说明焊缝得到有效强化。从拉伸后的试样(图 9)也可以发现,试样断裂位置位于图左 IMI834 基体合金,中心焊缝处没有发生断裂,说明经等温变形后的 IMI834/Ti6246 双钛合金焊接接头强度高于 IMI834 合金基体。

3 结 论

1) IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘惯性摩擦焊后,经超声波水浸探伤检测发现内部连接不充分,存在有较大尺寸的孔洞缺陷,但等温变形却可以有效消除惯性摩擦焊 IMI834/Ti6246 双合金缩比盘内残留缺陷,改善盘件质量。

2) IMI834/Ti6246 双钛合金惯性摩擦焊过程中,焊缝区发生动态再结晶、组织细小,而两侧热影响区因摩擦温升、组织发生粗化,经等温变形后,两侧热影响区粗大组织明显细化,焊缝区和热影响区组织过渡更加均匀。

3) IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘经惯性摩擦焊+等温变形后的室温拉伸性能与 IMI834 基体合金性能相当, 焊缝区得到有效强化, 接头强度已明显高于 IMI834 侧合金基体, 说明惯性摩擦焊+等温变形工艺可用于制备高性能双钛合金盘件。

参加文献 Reference

- [1] Liu Yingying(刘莹莹), Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhen(郭鸿镇). *Materials Review(材料导报)*[J], 2007, 21(12): 9
- [2] Gao Jun(高俊), Luo Jiao(罗姣), Li Miaoquan(李淼泉). *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2012, 32(6): 37
- [3] Nishikiori S, Hattori H, Noda T. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 213: 124
- [4] Tsuda O, Kananaru N, Furuta S. *Metal Powder Report*[J], 1991, 46(3): 31
- [5] Su Zuwu(苏祖武), Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhen(郭鸿镇) et al. *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 1999, 32(4): 377
- [6] Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhen(郭鸿镇), Su Zuwu(苏祖武). *Aeronautical Science and Technology(航空科学技术)*[J], 1997(2): 9
- [7] Simpsom T M, Preoe A R. *Advanced Technologies for Superalloy*[C]. PA: MMS, 2000
- [8] Lang Bo(郎波), Zhang Tiancang(张田仓), Tao Jun(陶军) et al. *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2014, 35(9): 37
- [9] Ji Yajuan(季亚娟), Zhang Tiancang(张田仓), Li Xiaohong(李晓红). *Aeronautical Manufacture Technology(航空制造技术)*[J], 2011, 1(8): 66
- [10] Bang H S, Bang H S, Song H J et al. *Materials and Design*[J], 2013, 51: 544
- [11] Ma Tiejun(马铁军), Shi Donggang(史栋刚), Zhang Yong(张勇) et al. *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2009, 29(4): 33
- [12] Wang Tao(王涛), Wang Zhipeng(王志鹏), Sun Yu(孙宇) et al. *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2018, 54(1): 83
- [13] Medvedev A E, Mends A, Lapovok R et al. *Materials Science and Engineering*[J], 2018, 737(11): 253
- [14] Li Kai(李凯), Guo Hongzhen(郭鸿镇), Zhao Zhanglong(赵张龙) et al. *Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2014, 43(9): 1
- [15] Qin C, Yao Z K, Li Y Z et al. *Transactions Nonferrous Metal Society of China*[J], 2014, 24(11): 3500
- [16] He Jianchao(贺建超), Zhang Tiancang(张田仓), He Shengchun(何胜春). *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2017, 53(22): 95
- [17] Zhang Chunbo(张春波), Wu Yanquan(乌彦全), Pu Dongguang(朴栋光) et al. *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2018, 39(12): 44
- [18] Zeng Liying(曾立英), Zhao Yongqing(赵永庆), Hong Quan(洪权) et al. *Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2012, 29(5): 1
- [19] Wang Guoqiang(王国强), Zhao Zibi(赵子博), Yu Bingbing(于冰冰) et al. *Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报)*[J], 2017, 31(5): 35

Effect of Isothermal Deforming on the Microstructure and Property of Inertial Friction Welding IMI834/Ti6246 Dual Titanium Alloy

Zhao Zhanglong, Song Xuyang, Cao Lanchuan, Xu Wenxin, Yao Zekun, Guo Hongzhen
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The combined technology of inertial friction welding and isothermal deforming was used to prepare IMI834/Ti6246 dual titanium alloy scaled disk. The effect of isothermal deforming on the microstructure and property of inertial friction welded IMI834/Ti6246 dual titanium alloy scaled disk was analyzed. The results show that the inertial friction welding forms the fine microstructure in the welding seam of IMI834/Ti6246 dual titanium alloy, with the coarse microstructure of heat affect zone on both sides. The ultrasonic nondestructive testing indicates that there are some defects in local zone of welded dual titanium alloy scaled disk. After isothermal deforming, the residual inertial defects after inertial friction welding are effectively eliminated and the coarse microstructure of heat affected zone on both sides is obviously improved which homogenizes the transition zone between welding seam and both sides. The weld steam of inertial friction welded IMI834/Ti6246 dual alloy scaled disk is effectively strengthened during isothermal deforming. The inertial friction welding and isothermal deforming can be combined to prepare high performance dual titanium alloy disk.

Key words: dual alloy disk; isothermal deforming; inertial friction welding; microstructure; property

Corresponding author: Zhao Zhanglong, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88492642, E-mail: zlzhaol@nwpu.edu.cn