

激光成形 TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织与力学性能

金俊龙^{1,2}, 郭德伦^{1,2}, 刘琦¹, 张田仓^{1,2}, 季亚娟^{1,2}

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 2. 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 立足航空发动机整体叶盘叶片发生损伤后采用线性摩擦焊进行修复的背景需求, 针对航空发动机常用的 TC17 钛合金, 开展激光成形制备一侧焊接台后再线性摩擦焊的典型接头组织分析、力学性能测试以及断口分析, 重点分析了接头中激光沉积区组织在线性摩擦焊前后演变特征及与力学性能影响关系, 结果表明, 缩短量的大小决定了接头中含有的激光成形区组织多少, 参与焊接过程的激光成形沉积区组织发生了明显的再结晶, 原始的粗大晶粒破碎, 晶粒内部析出细小 α 相, 三种典型接头的拉伸性能均与母材相当, 当焊缝中挤出去除沉积区组织时, 接头高周疲劳强度可达到母材的 90% 以上。

关键词: 激光成形; 线性摩擦焊; 组织; 疲劳性能; 断口

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400166

0 序 言

整体叶盘是新一代高效、低油耗航空发动机所采用的关键结构。但同时因为整体叶盘是一体式结构, 若因个别叶片损伤而更换整个叶盘则面临巨额费用。因此, 整体叶盘损伤修复技术是制约整体叶盘能否经济性使用的关键技术。修复所选用的工艺方法需满足修复后叶盘的结构力学和空气动力学要求^[1-3]。线性摩擦焊技术可用于整体叶盘的制造与损伤修复^[4-5], 德国 MTU 公司在巴黎航展公布的整体叶盘修复方案中, 较小尺寸损伤采用激光熔覆或熔焊补片修复, 较大尺寸损伤则采用线性摩擦焊进行叶片替换修复。但是线性摩擦焊的接头形式受到限制, 不能直接焊接形状复杂或薄壁低刚性构件, 需要制备专用的焊接凸台, 采用激光成形制备焊接凸台是一种可行的办法, 英国罗罗公司申请了采用激光成形方法制备专用焊接凸台并进行叶片线性摩擦焊修复的专利^[6]。采用该方法由于直接在轮盘上进行激光成形制备凸台, 焊接过程将无法完全挤出激光成形组织, 由于激光成形产生的是熔化组织, 线性摩擦焊是固相焊接过程, 所形成的接头性能是否满足使用要求在国内外未见报道。文中针对航空发动机风扇整体叶盘等承力构件常用的 TC17 钛合金, 开展激光成形后线性摩擦焊接头的

组织与力学性能研究, 为整体叶盘的叶片损伤修复技术奠定基础。

1 试验方法

试验选用的 TC17 钛合金是一种富 β 相的 α - β 型钛合金, 其名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr。该合金具有强度高、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点^[7-9]。所用材料化学成分如表 1 所示。试验所用试样如图 1 所示, 振动侧试样尺寸为 75 mm × 45 mm × 20 mm, 顶锻侧试样尺寸为 75 mm × 45 mm × 20 mm, 其中一端 6 mm 的高度为激光成形区, 20 mm × 75 mm 的面为焊接面。激光成形试验选用粒径为 70 ~ 100 μ m 的 TC17 球形粉, 试验之前粉末经过真空烘干处理。所有激光成形后的试块均通过无损探伤检查。线性摩擦焊选用经过优化后的工艺参数进行焊接, 采用控制缩短量变化的方式进行了三组试样的焊接, 1 ~ 3 号试样分别取自三组试样, 其缩短量由小到大。焊后截取金相试样采用 Leica DM6000M 光学显微镜和 Quanta 250 FEG 扫描电子显微镜分析显微组织形貌。每组试件分别按照国标加工拉伸与高周疲劳性能试样, 拉伸试验采用 Z100 数字拉伸试验机测量, 高周拉压疲劳试验使用 QBG100 高频疲劳试验机测量, 并观察力学试样断口形貌。

表 1 TC17 钛合金化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of TC17 titanium alloy

Al	Mo	Zr	Cr	Sn	Ti
5.25	4.34	2.1	4.12	2.2	余量

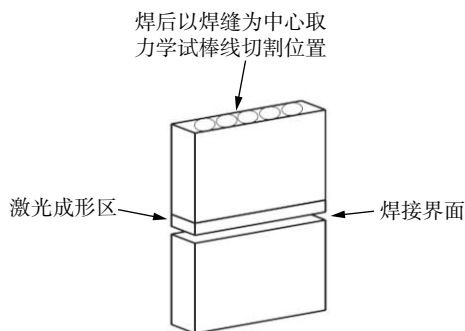


图 1 试验试样

Fig. 1 Specimen of experiment

2 试验结果及分析

2.1 接头组织

2.1.1 接头宏观组织

图 2 所示为进行线性摩擦焊之前试样的激光成形组织形貌,可见其组织明显分为沉积区和热影响区两部分,沉积区的特征明显,表现为贯穿多个熔覆层呈现出外延生长的粗大的柱状晶形态,晶粒宽度在 0.5 ~ 2 mm 不等,长度可达到 3 mm,并且不同的熔覆层间可以观察到鱼鳞状的层带结构,而热影响区由于热输入的作用可见晶粒发生一定程度长大,并与母材区之间有明显的分界线。

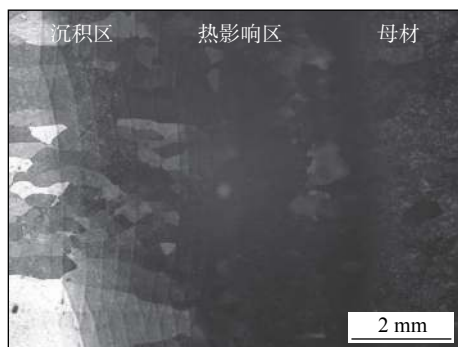
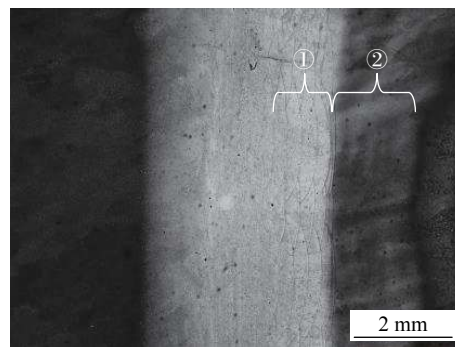


图 2 激光成形区组织特征

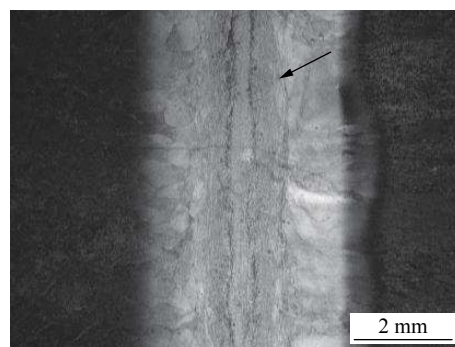
Fig. 2 Structure characteristics of laser forming

图 3 所示为三组试验的焊接接头组织形貌,由于线性摩擦焊过程随着焊接过程的进行,界面上的塑性金属不断消耗,被挤出焊缝形成飞边,1 ~ 3 号试样的缩短量由小到大,观察接头金相组织照片,根据激光沉积区的鱼鳞状层带结构特征可以判断,

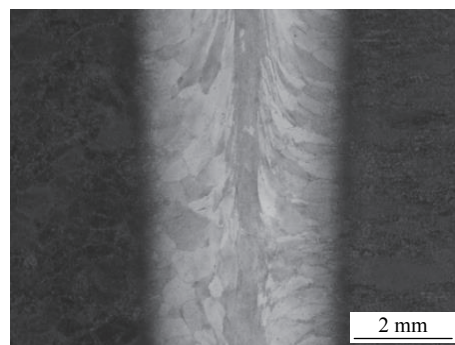
1 号试样中激光成形钛合金侧还可观察到约 1.5 mm 厚的沉积区组织,即图 3a 中标示为①的区域,其与线性摩擦焊的热力影响区重叠,标示为②的区域则为激光成形过程产生的热影响区,从左到右分别为母材、热力影响区、焊合区、热力影响区(激光沉积区组织)、激光热影响区、母材。2 号试样缩短量增大,通过飞边金属的挤出,在焊合区边缘仅仅可见约 0.2 mm 厚的沉积区组织(图中箭头所示),激光热影响区有约 2/3 与热力影响区重叠,另外 0.3 ~ 0.6 mm 在热力影响区外侧,从左到右分别为母材、热力影响区、焊合区、热力影响区、激光热影响区、母材。3 号试样缩短量进一步增大,已经完全挤出去除了激光成形沉积区和热影响区组织,接头组织为母材、热力影响区、焊合区的对称分布形式。



(a) 1 号试样接头组织形貌



(b) 2 号试样接头组织形貌



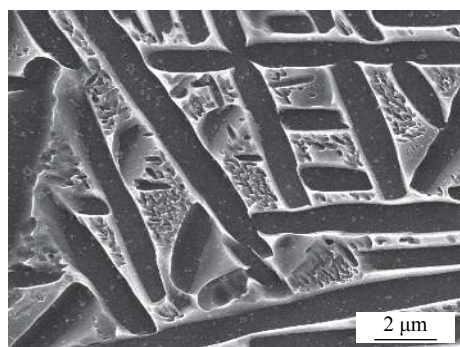
(c) 3 号试样接头组织形貌

图 3 三组试样接头组织

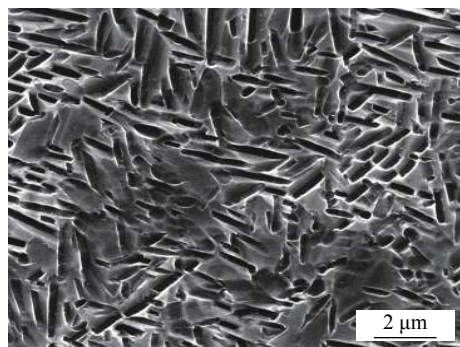
Fig. 3 Joint microstructure of three groups of samples

2.1.2 接头微观组织

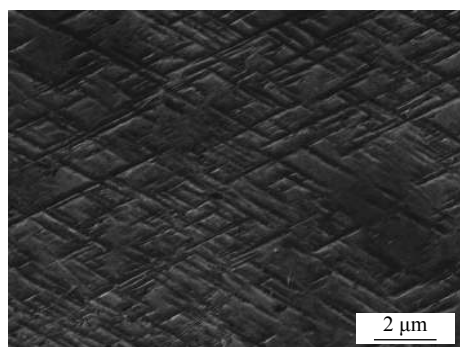
激光成形原始组织. 图4为激光成形 TC17 钛合金一侧母材、热影响区与沉积区三个区域的显微组织, 其中母材为 TC17 钛合金典型的网篮组织, 为初生板条 α 相 + 次生 α 析出 + β 转变组织, 初生 α 相的长度在 $5 \sim 30 \mu\text{m}$, 宽度则在 $1 \mu\text{m}$ 上下, 在 β 转变组织的基体上析出大量细小羽毛状次生 α 相, 长度普遍不足 $1 \mu\text{m}$. 热影响区可见初生板条 α 相和次生 α 相发生溶解, 由于冷却速度较快, 析出的 α 相尺寸较小, 长度一般在 $3 \mu\text{m}$ 以内, 宽度不足 $1 \mu\text{m}$. 沉积区显微组织为 β 基体上分布狭小针状马氏体组织, α' 马氏体互交织、取向随机, 分析是由于激光成形过程中沉积区历经快速加热与快速冷却的过程, α 相来不及析出, 形成了该马氏体组织



(a) 母材



(b) 激光热影响区



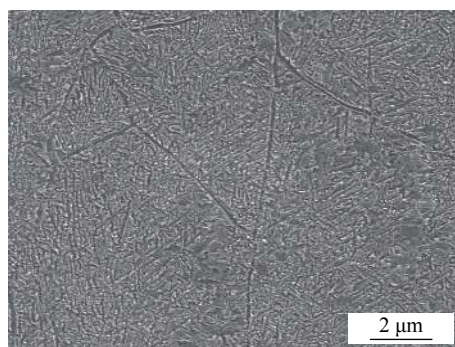
(c) 沉积区

图4 激光成形各区域组织

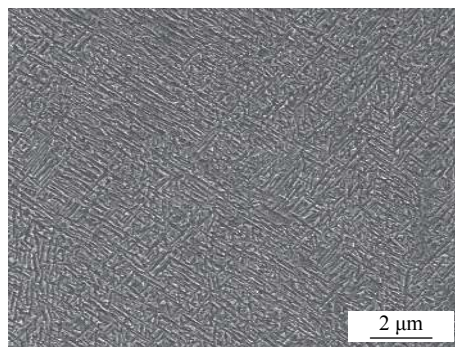
Fig. 4 Microstructures of various regions of laser forming

形貌特征.

线性摩擦焊后接头组织演变. 1号试样中的激光沉积组织一部分进入焊合区, 残留一部分位于线性摩擦焊接头的热力影响区范围内, 对焊合区和热力影响区组织进行观察如图5所示, 图5a为激光成形钛合金一侧的焊合区微观组织, 相比焊前状态(图4c)发生了明显的再结晶, 由于线性摩擦焊过程中, 该区域金属发生剧烈剪切变形与流动, 原始的粗大晶粒破碎发生动态再结晶, 焊接过程停止后再结晶晶粒长大, 晶界与晶粒内部析出 α 相, 晶粒内部 α 相呈细小羽毛状, 尺寸与母材中的次生 α 相基本一致, 晶粒尺寸基本在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 以内. 位于热力影响区的沉积组织, 如图5b所示, 也发生了明显转变, 原 α' 马氏体消失, 转变为细小针状交错的 α 相 + β 转变组织.



(a) 焊合区



(b) 位于热力影响区的沉积组织

图5 1号试样各区域组织

Fig. 5 Microstructures of No.1 sample

2号试样上大部分沉积区金属已进入发生剧烈金属流动行为的焊合区, 热力影响区与部分激光成形热影响区重叠, 对这部分组织进行观察, 如图6所示, 可见初生条状 α 相宽度窄, 排列细密, 形成平行、平直的 α 束特征, 并且在初生 α 束之间析出了大量尺寸较小的次生 α 相, 这是由于焊接过程中该区域材料在热输入与大应力引起的变形作用下原始初生 α 相溶解, 同时晶粒沿某一特定方向被拉长

变形,在焊后冷却过程中 β 晶粒内部的 α 相再次析出形成片状组织。

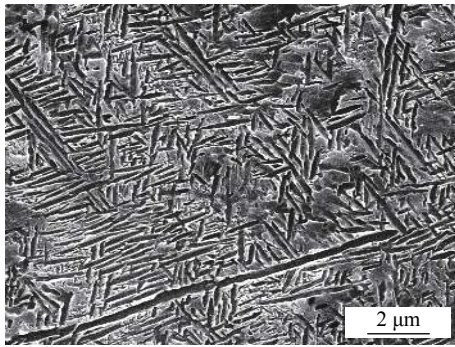


图6 2号试样热力影响区(激光热影响区)组织
Fig. 6 Microstructure of TMAZ of No.2 sample

2.2 性能测试及断口分析

对焊后的焊接接头进行取样加工,按照国标要求进行室温拉伸和疲劳性能测试。拉伸试样均断在母材,测试的具体结果见表2,从表2中可以看出,母材的抗拉强度平均值为1 153 MPa、断后伸长率为13.3%、断面收缩率为31%,1~3号焊接接头的抗拉强度均基本与母材等强,但是断后伸长率和断面收缩率均低于母材。母材应力集中系数 $K_t=1$,循环特征 $R=-1$,循环次数 $N_f=1 \times 10^7$ 条件的高周疲劳强度值为521 MPa,测得1号接头在相同条件下的高周疲劳强度值为395 MPa,2号接头达到了483 MPa,3号接头则基本与母材的疲劳强度等强。

表2 接头性能
Table 2 Mechanical properties of joints

试样编号	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	高周疲劳强度 σ_D/MPa
母材	1 153	13.3	31	521
1号接头	1 148.70	10.95	23.14	395
2号接头	1 147.53	12.77	24.74	483
3号接头	1 141.35	7.872	29.03	518

对断口进行分析,拉伸试样断裂位置均在母材区域,断口属于延性断裂,如图7所示,存在许多韧窝,显示出三组试样均具有较好的静力性能。

三组试样的高周疲劳性能呈现出明显差异,首先,从断裂宏观位置观察看,1号和2号断于试样中心焊缝位置,3号试样未在中心焊缝位置断裂,而是偏向一边位于母材。对疲劳断口进行分析,如图8所示,1号和2号试样的裂纹源均来自试样内部,3号试样的裂纹源来自试样表面,疲劳裂纹通常起源于试件表面边缘,从试件的一侧向另一侧扩展。

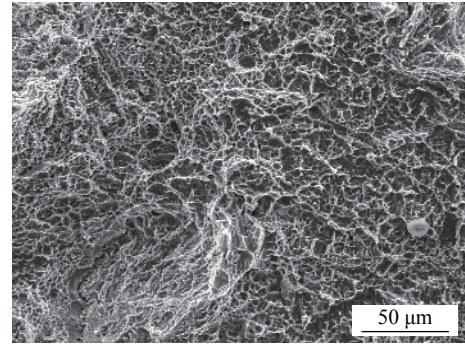
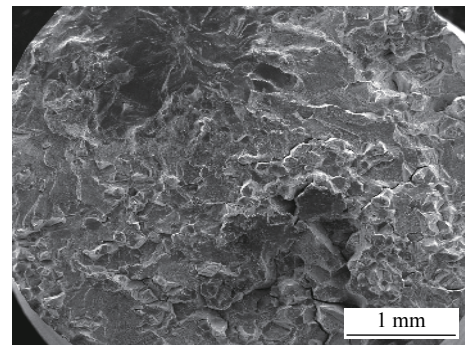
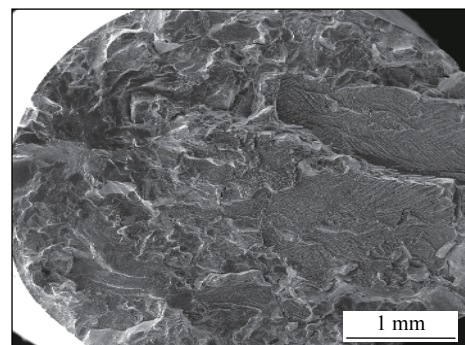


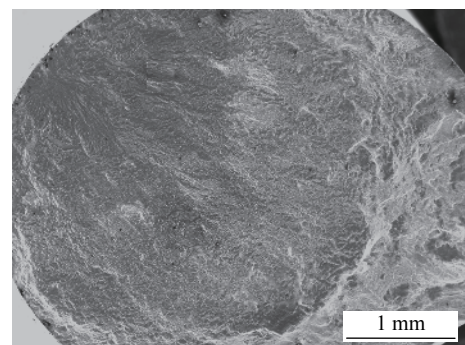
图7 拉伸断口
Fig. 7 Fracture of tensile sample



(a) 1号试样



(b) 2号试样



(c) 3号试样

图8 疲劳断口
Fig. 8 Fracture of fatigue samples

这是由于试样准备时,加工的钛合金试件表面难免存在加工痕迹,引起应力集中,成为裂纹源,另外试样表面处于平面应力状态,有利于塑性滑移的进

行, 表面晶粒比内部晶粒更易滑移开裂^[10]. 而裂纹在试样内部萌生的情况, 分析是由于激光沉积区内部的微小缺陷. 这类缺陷尺寸较小, X 射线无损检测不易发现, 1 号试样的疲劳断口瞬断区表现为在粗晶区沿晶断裂, 分析可知这部分粗晶区应为激光热影响区, 2 号试样的线性摩擦焊过程未将激光沉积区组织完全挤出焊缝, 残留的少量沉积区组织内以及进入焊合区的沉积区组织内的微小缺陷可能仍然存在, 成为疲劳裂纹萌生的地方, 其疲劳断口瞬断区未出现大量粗大 β 晶粒, 表现为沿解理面的穿晶断裂, 这主要是由于线性摩擦焊过程将热力影响区的晶粒向某一特定方向拉伸变形所致.

3 结 论

(1) 采用激光成形钛合金线性摩擦焊后接头拉伸性能可以达到与母材等强.

(2) 激光沉积区与热影响区在参加线性摩擦焊过程后组织形貌均发生了明显的改变. 在热力影响区范围内的激光成形组织发生了明显的再结晶, 晶粒内部析出呈细小羽毛状 α 相, 同时晶粒尺寸更加细小. 在热力影响区范围内的激光热影响区晶粒内析出平行、平直的 α 束, 并且在初生 α 束之间析出了大量尺寸较小的次生 α 相.

(3) 在焊缝中挤出去除激光沉积区组织的线性摩擦焊接头高周疲劳强度较好, 可以达到母材性能的 90% 以上.

(4) 断口形貌分析显示试样疲劳裂纹萌生位置可能与激光成形沉积区中的微小缺陷有关.

参考文献:

- [1] Qi H, Azer M, Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 48(1-4): 121 - 131.
- [2] Kelbassa I, Albus P, Dietrich J, *et al.* Manufacture and repair of aero engine components using laser technology[C]//*Proceeding of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2008*. Beijing: 2008: 208 - 212.
- [3] Richter K H, Orban S, Nowotny S. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades[C]//*Proceeding of the 23rd International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics 2004*, San Francisco, California, USA, 2004, 1506.
- [4] 张田仓, 李 晶, 季亚娟, 等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(2): 53 - 56.
Zhang Tiancang, Li Jing, Ji Yajuan, *et al.* Structure and mechanical properties of linear friction welding joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(2): 53 - 56.
- [5] 季亚娟, 刘燕冰, 张田仓, 等. TC4/TC17 线性摩擦焊接头组织及力学性能 [J]. *焊接学报*, 2012, 33(10): 109 - 112.
Ji Yajuan, Liu Yanbing, Zhang Tiancang, *et al.* Structure and mechanical properties of TC4/TC17 linear friction welding joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(10): 109 - 112.
- [6] Trickey P S, Forsdike P E, Daum P E. Method of replacing damaged aerofoil: US20160076376[P]. 2016-03-17.
- [7] 黄伯云, 李成功, 石力共, 等. 中国材料工程大典. 第 4 卷, 有色金属材料工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [8] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [9] 吴 欢, 赵永庆, 葛 鹏, 等. β 稳定元素对钛合金 α 相强化行为的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012(41): 805 - 810.
Wu Huan, Zhao Yongqing, Ge Peng, *et al.* Effect of β stabilizing elements on the strengthening behavior of titanium α phase[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012(41): 805 - 810.
- [10] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

第一作者简介: 金俊龙, 男, 1988 年出生, 硕士, 工程师. 主要从事线性摩擦焊工艺与叶盘修复技术研究. 发表论文 5 篇. Email: kinghit@163.com