

TC11/TC17 线性摩擦焊飞边及焊缝微区特征分析

Micro-Area Characteristic Analysis of TC11/TC17 Linear Friction Welding Flash and Weld

中航工业北京航空制造工程研究所航空焊接与连接技术航空科技重点实验室

季亚娟 张田仓
李晓红 郭德伦

[摘要] 对 TC11/TC17 异种钛合金线性摩擦焊飞边和接头的组织进行了分析。研究表明,焊接飞边组织不是 2 种钛合金的混合组织而是由 TC11 钛合金、过渡区和 TC17 钛合金组成。而线性摩擦焊接头由 TC11 母材、TC11 侧热力影响区、焊合区、TC17 侧热力影响区、TC17 母材组成,两侧热力影响区组织沿着飞边挤出方向被拉长,而两侧焊合均发生动态再结晶,并在焊合线处形成了共生晶粒。

关键词: 线性摩擦焊 钛合金 显微组织

[ABSTRACT] TC11 and TC17 titanium are usually used in the aero-engine blisk. TC11 and TC17 are connected by LFW, and the microstructure of its welding flash and joint is investigated in the paper. The results show that the flash is composed of TC11, intermixture of TC11 and TC17, TC17 rather than is only mixed by TC11 and TC17. The joint is divided into TC11 base metal, TC11 thermal mechanical affected zone (TMAZ), welding zone, TC17 TMAZ and TC17 base metal. The phases and grain in the TMAZ are elongated along the direction of friction. Dynamic recrystallization happens in the welding zone and common grains are formed in the interface.

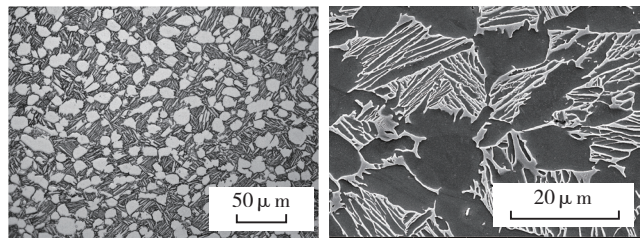
Keywords: Linear friction welding Titanium alloy Microstructure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.062

随着战斗机的不断更新换代,对发动机提出了更高的要求,以满足其推力和减重的要求。整体叶盘就是实现这一目标的关键结构之一,它具有减重、简化结构、增效等优点,已用于我国第四代战斗机发动机。线性摩擦焊在异种钛合金整体叶盘加工方面有独特的优势,具有接头性能好、焊接质量稳定、可实现异种材料焊接、焊接过程可自动化控制等优点,国外已经将该技术用于异种钛合金整体叶盘的制造。TC11 和 TC17 钛合金具有良好的室温和高温性能,是发动机整体叶盘的常用材料。因此,本文针对 TC11 和 TC17 钛合金线性摩擦焊接头开展组织分析研究,为 TC11 和 TC17 钛合金线性摩擦焊整体叶盘研制奠定基础。

1 试验材料及方法

本试验选用的是航空发动机钛合金整体叶盘常用的 TC11 钛合金和 TC17 钛合金。TC11 钛合金是一种综合性能良好的 $\alpha-\beta$ 型热强钛合金,在 500℃ 以下有优异的热强性能(高温强度、蠕变抗力等),并且具有较高室温强度^[1]。其主要化学成分见表 1,母材由等轴 α 相和 β 转变组织组成, α 相约占 60%,尺寸约为 15 μm ,见图 1。



(a) 金相组织

(b) 扫描电镜组织

图1 TC11母材组织

Fig.1 Microstructure of TC11 base metal

TC17 钛合金是一种富 β 相的 $\alpha-\beta$ 型钛合金,该合金具有高强度、断裂韧度好、淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点^[1],用于航空发动机整体叶盘制造,主要化学成分见表 1。其组织为典型的网篮组织,由片层 α 和 β 相组成, α 相长度约为 10~30 μm ,宽度约为 0.5~1 μm ,见图 2。

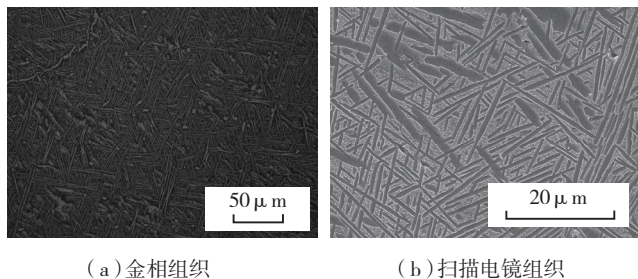
表1 TC11和TC17钛合金的化学成分(质量分数) %

钛合金	Al	Mo	Zr	Cr	Sn	Ti
TC11 钛合金	6.7	3.5	1.8	—	—	余量
TC17 钛合金	5.0	4.2	1.9	3.9	2.0	余量

待焊试样尺寸: 130mm × 75mm × 20mm,焊接面积为 75mm × 20mm,焊后对接头和飞边截取试样,进行金相组织、扫描电镜组织和透射电镜组织观察,研究飞边及接头组织特点,揭示线性摩擦焊接头组织形成规律。

2 接头组织分析

2.1 焊接飞边组织分析



(a) 金相组织 (b) 扫描电镜组织
图2 TC17母材组织
Fig.2 Microstructure of TC17 base metal

线性摩擦焊过程是待焊两试件通过摩擦生热,使母材发生塑化,塑化金属在温度和力的作用下,挤出形成飞边,因此飞边组织的演变能在一定程度上反映线性摩擦焊接头组织的形成过程。

TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头外观形貌如图3所示,飞边颜色呈现青黄色,从飞边的尺寸来看,沿着振动方向的飞边(称为纵向飞边)长度较长,且呈现波纹状的纹理,该纹理的数量与线性摩擦焊过程总的振动有关,横向飞边的长度相对较短,飞边卷向较硬的 TC17 钛合金一侧。

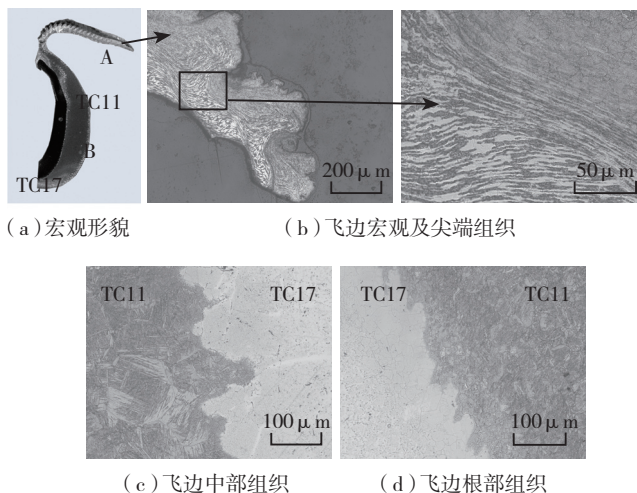


图3 接头外观形貌
Fig.3 Appearance of joint

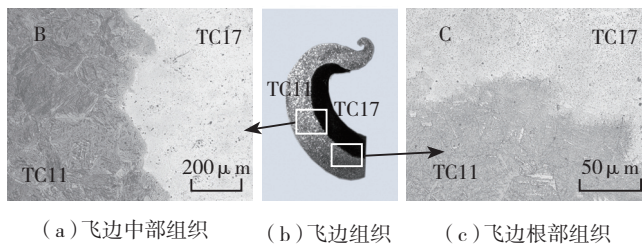
对横向飞边和纵向飞边解剖并进行金相组织观察,宏观金相见图4和图5,从图中可以看出,异材焊接时,挤出的飞边并不是两种合金的均匀混合组织,图4飞边宏观组织中颜色较深侧为 TC17 钛合金,另一侧为 TC11 钛合金, TC11 侧飞边的厚度大约为 TC17 侧的 2~3 倍。从图4宏观形貌图中还可以看出, TC11 钛合金先被挤出,然后 2 种材料同时挤出形成飞边。如图4(a)纵向飞边的尖端由发生变形的组织及发生动态再结晶的组织组成,分析认为产生该现象的原因是在摩擦的初始阶段,位于摩擦面近区的金属在摩擦力和摩擦热的作用下,发生动态再结晶,而相邻金属发生塑化,金属的强度

急剧下降,发生再结晶的金属在被挤出形成飞边时,将附近未发生再结晶的金属一同带出,形成该组织特征。而飞边中部及根部组织(见图4(c)和(d))均为发生动态再结晶的组织,并在界面处形成了共生晶粒,同时晶粒内部组织为细小的片层组织,表明焊接过程的温度超过钛合金的再结晶和相变温度。

横向飞边的组织与纵向飞边类似,如图5所示,即 TC11 先被挤出形成飞边,飞边中部(图5(a))和根部(图5(c))均为动态再结晶组织,并且在界面处形成共生晶粒。



(a) 宏观形貌 (b) 飞边宏观及尖端组织
(c) 飞边中部组织 (d) 飞边根部组织
图4 纵向飞边组织
Fig.4 Microstructure of flash along oscillation



(a) 飞边中部组织 (b) 飞边组织 (c) 飞边根部组织
图5 横向飞边组织
Fig.5 Microstructure of flash perpendicular to oscillation

从某种程度上讲,飞边内微观组织特征反映了焊缝内微观组织的演变过程。在一定的焊接参数下,随着摩擦时间的延长,界面温度增加, TC11 钛合金先发生塑化被挤出焊缝,随着摩擦的进行, TC17 钛合金也达到塑化状态,形成异种材料飞边挤出,飞边的界面处均发生了再结晶,并且形成了共生晶粒。摩擦阶段后期界面温度趋于恒定,界面塑性金属层将处于稳定的流动状态,飞边挤出均匀,从而为获得成形良好的线性摩擦焊接头创造了条件。通过对飞边微观组织的分析,仅能获得界面处金属初始挤出过程微观组织演变过程。而为了更全面地了解线性摩擦焊各阶段金属微观组织的演变过程,还

需对接头微观组织的演变行为进行系统研究。

2.2 接头组织

2.2.1 宏观组织

TC11/TC17 线性摩擦焊接头的宏观形貌见图 6, 可以看出, 经过腐蚀后, 焊缝呈现腰鼓形状。TC17 侧能观察到明显晶粒。从图 6 中可以看出, 接头明显分为 5 个区域: TC11 母材、TC11 侧热力影响区 (Thermal Mechanical Affected Zone, TMAZ)、焊合区 (Weld zone, W)、TC17 侧热力影响区和 TC17 母材。从图 7 接头上

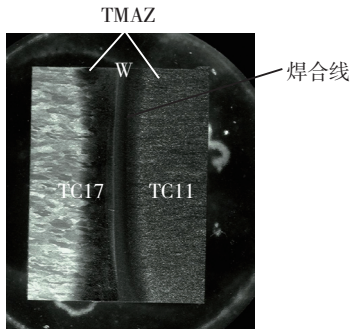
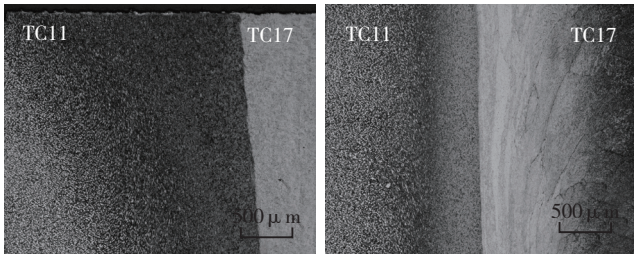


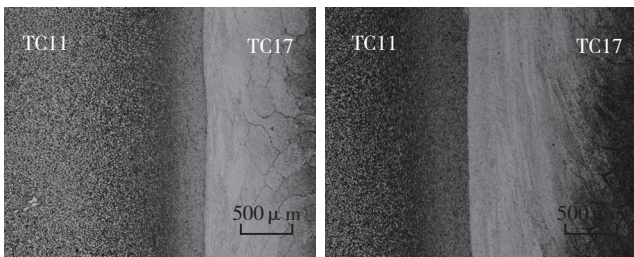
图6 接头宏观组织

Fig.6 Macrostructure of joint



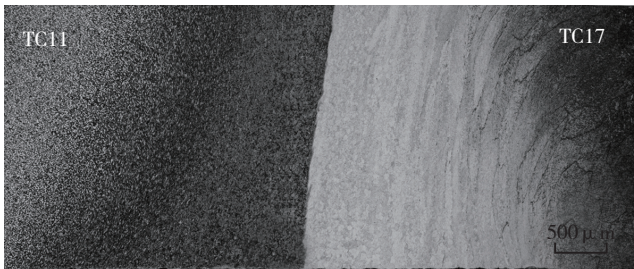
(a) 接头上部

(b) 接头中部偏上



(c) 接头中部

(d) 接头中部偏下



(e) 接头下部

图7 接头不同部位宏观组织

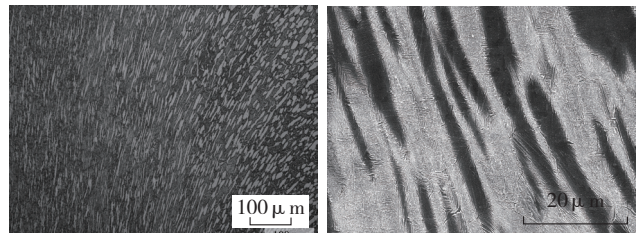
Fig.7 Microstructure of different locations of joint

部、中间和下部组织可以看出, 与图 6 相对应, 上部和下部的焊缝较宽, 宽度约为 2mm, 中间较窄约为 1mm, 这与焊接接头形成过程有关。中部金属塑化在接头上下两端挤出形成飞边, 同时挤出的飞边对焊缝边缘有再加热; 上部和下部的组织均沿着飞边挤出方向被拉长, 而且离边缘越近, 晶粒变形越剧烈, 而接头中部的组织未被拉长, 见图 7 (c), 且 TC17 侧热力影响区为明显的等轴晶粒。

2.2.2 显微组织分析

(1) TC11 侧热力影响区组织。

TC11 侧热力影响区由高度变形的 α 相和 β 转变组织组成, 见图 8。 α 相由原来母材的等轴晶粒沿着飞边挤出方向被拉长^[2-4], 靠近母材侧的拉长 α 相尺寸较大而接近焊合区时 α 相完全溶解, 热力影响区与母材组织相似, 表明 TC11 侧热力影响区的温度未超过 β 转变温度, 只发生了 α 相和 β 相晶粒沿受力方向重新排列。



(a) 金相组织

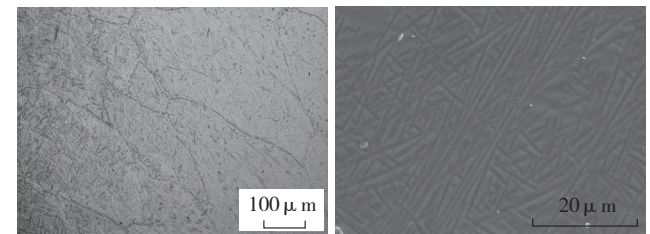
(b) 扫描电镜组织

图8 TC11侧热力影响区组织

Fig.8 Thermal mechanical affected zone of TC11

(2) TC17 侧热力影响区组织。

与 TC17 母材组织相比, 热力影响区原始 β 晶粒沿着受力方向被拉长, 原始母材 β 转变组织的片层宽度大大减薄, 长度也变短, 但是该区组织特征与原始母材



(a) 金相组织

(b) 扫描电镜组织

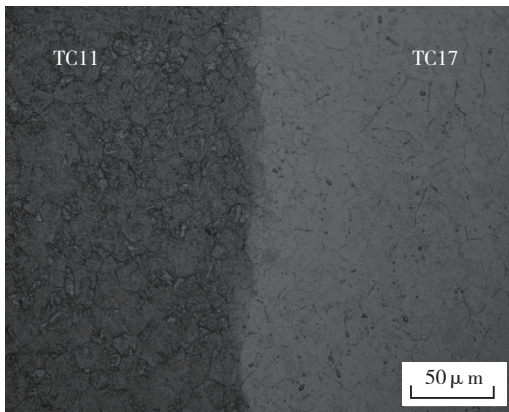
图9 TC17侧热力影响区组织

Fig.9 Thermal mechanical affected zone of TC17

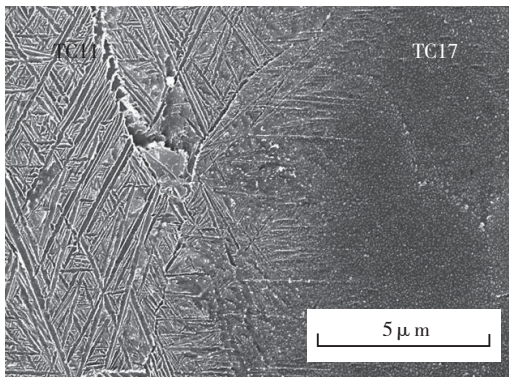
类似(图 9), 说明该区的焊接温度并未达到相变温度。

(3) 焊合区组织。

从图 10 (a) 和(b) 可以看出, TC11 侧组织明显不同于母材组织, 这是由于焊接过程中, 该区的温度



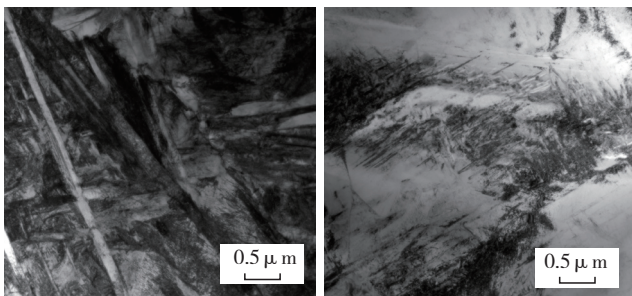
(a) 焊合区金相组织



(b) 焊合区 SEM 组织

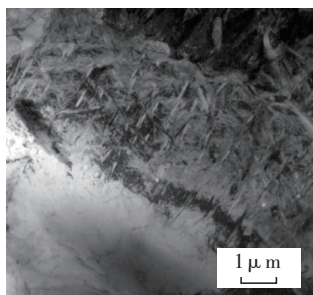
图10 焊合区组织

Fig.10 Microstructure of weld zone



(a) TC11 侧焊合区 TEM 组织

(b) TC17 侧焊合区 TEM 组织



(c) 焊缝线 TEM 组织

图11 焊合区TEM组织

Fig.11 TEM microstructure of weld zone

达到了TC11钛合金的 β 相变温度以上, β 晶粒发生变形,并发生动态再结晶形成等轴 β 晶粒,尺寸约为 $12\sim 16\mu\text{m}$,在焊后冷却过程中,在 β 晶界和晶内析出片层 α 相,形成魏氏组织,其中 α 片层的长度为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 。而TC17侧焊合区则形成了等轴的亚稳态 β 晶粒,晶粒尺寸约为 $5\sim 8\mu\text{m}$ 。而且在焊合线附近的平均晶粒尺寸要小于其他焊合区的晶粒,是由于在近界面处不断有新的晶粒形核且由于摩擦的作用只有在摩擦停止后发生长大,而远离焊合线的晶粒则在焊接过程中发生长大造成的。

而图11透射电镜分析表明TC11和TC17侧焊合区存在高密度位错,这与线性摩擦焊过程中大的应力和应变速率有关,这些位错的存在为摩擦焊过程原子的扩散提供了通道。从图11可以看出在焊合线处存在组织过渡区,结合界面处典型元素的浓度测试,发现该处存在元素扩散层。

综上所述,线性摩擦焊接头焊合区均为等轴晶,且焊接界面处存在组织过渡而未发生组织突变,并且存在 $7\sim 10\mu\text{m}$ 的扩散层,这些都是使线性摩擦焊接头性能良好的原因。

3 结论

(1) TC11/TC17异种钛合金线性摩擦焊飞边不是2种材料的混合组织,而是由TC11钛合金、过渡区和TC17钛合金组成;飞边尖端为TC11钛合金,由发生变形的和再结晶的组织组成;中部和根部均为动态再结晶组织。

(2) 接头宏观组织明显分为5个区域,即TC11和TC17母材区、TC11和TC17侧热力影响区以及焊合区。热力影响区两端组织沿着飞边挤出方向被拉长,中部为等轴晶粒;两侧焊合区均发生动态再结晶,晶粒内部为细小片层组织,在焊合线处存在组织过渡区。

(3) 电子探针测试结果表明,焊接界面处存在 $7\sim 10\mu\text{m}$ 的扩散层,是线性摩擦焊接头性能良好的原因之一。

参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 季亚娟, 刘燕冰, 张田仓, 等. 振幅对线性摩擦焊接头组织和元素分布的影响. 焊接学报, 2012, 33(9):101-104.
- [3] 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. 焊接学报, 2010, 31(2):53-56.
- [4] 季亚娟, 张田仓, 李晓红. TC11/TC17钛合金线性摩擦焊接头组织与性能. 航空制造技术, 2011(8):66-69.

(责编 亿霖)