

# TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织与性能

## Structure and Mechanical Property of TC11/TC17 Linear Friction Welding Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 季亚娟 张田仓 李晓红

**[摘要]** 针对航空发动机钛合金整体叶盘的典型材料 TC11 和 TC17 开展对异种钛合金线性摩擦焊的研究,其中包括飞边形貌、接头组织及拉伸性能等。研究表明:TC11/TC17 异种钛合金线性摩擦焊沿振动方向的飞边较长;焊接接头明显分为 3 个区域:母材、热机械影响区和焊缝区,其中 TC11 母材为双态组织、TC17 母材为网篮组织、热机械影响区的组织沿着受力方向被拉长,焊缝发生了动态再结晶,组织为等轴晶。

拉伸测试结果表明:接头的抗拉强度及屈服强度能达到与 TC11 等强,拉伸试样均断在 TC11 母材一侧,随着测试温度提高,强度呈线性下降趋势;而断面收缩率均超过 TC17 母材,随着测试温度提高,变化不明显。

**关键词:** 线性摩擦焊 钛合金 组织 性能

**[ABSTRACT]** The linear friction welding(LFW) process of dissimilar titanium alloys used in aeroengine blisks made of, TC11 is TC17, is studied. The joints morphology, microstructure and tensile properties are observed and tested. The welding flash of TC11/TC17 LFW joint is longer along the oscillating direction than that along the non-oscillating direction. The joints include three apparent zones, base metal (BM), thermal-mechanical affected zone (TMAZ) and welding zone (W). The TMAZ microstructure are elongated along the stress direction, whereas recrystallization occurs and equiaxial structure is formed in the weld zone.

Tensile tests show that the tensile strength values of the joints are equal to those of the TC11 BM, and all the specimens break at the TC11 side. The tensile strength values decrease when the testing temperature rises. The joint percentage reduction of area is higher than those of TC17 BM, and has no obvious variation as the testing temperature rising.

**Keywords:** Linear friction welding Titanium alloy Microstructure Mechanical property

整体叶盘是 20 世纪 80 年代中期西方发达国家在新型航空发动机设计中采用的最新结构和气动布局形

式,代表了第四代、第五代高推重比航空发动机技术的发展方向,具有减重、简化结构、增效等优点。线性摩擦焊是一种固相连接技术,在整体叶盘的制造上具有独特的优势,如接头质量优良、可实现空心叶片与轮盘的连接及异种材料焊接、可对损坏的叶片进行修理等。与整体机械加工制造叶盘相比,线性摩擦焊可节省大量贵重金属材料,并大量减少加工工时。

TC11 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,并且具有较高的室温强度。该合金还具有良好的热加工工艺性,可以进行焊接和各种方式的机加工。该合金主要用于制造航空发动机的压气机盘、叶片、鼓筒等零件,也可用于制造飞机结构件<sup>[1]</sup>。

TC17 合金是一种富含  $\beta$  稳定元素的  $\alpha-\beta$  型两相钛合金,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,能够满足损伤容限设计的需要以及高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求。

TC11/TC17 主要用于制造发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件<sup>[1]</sup>。

基于以上优点,本课题针对航空发动机的常用材料 TC11/TC17 钛合金,开展异种钛合金线性摩擦焊研究。

### 1 试验方法

试验所用材料为 TC11/TC17 钛合金,合金的名义化学成分如表 1~2 所示<sup>[1]</sup>。试样尺寸:长(L)130 mm,宽(W)20 mm,高(H)100 mm,焊接面积(S)2000mm<sup>2</sup>。

试验在线性摩擦焊设备上,焊前用丙酮擦拭待

表1 TC11钛合金的质量分数 %

Al	Mo	Zr	Si	Ti
5.8 ~ 7.0	2.8 ~ 3.8	0.8 ~ 2.0	0.2 ~ 0.35	余量

表2 TC17钛合金的质量分数 %

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Ti
4.5 ~ 5.5	1.6 ~ 2.4	1.6 ~ 2.4	3.5 ~ 4.5	3.5 ~ 4.5	余量

焊界面,焊后沿着垂直于摩擦面方向截取金相试样以及拉伸性能试样并进行焊后热处理。金相试样研磨抛光并用氢氟酸、硝酸的水溶液腐蚀后进行光学显微镜观察和扫描电镜观察。焊后接头的拉伸性能按照 GB/T228-2002 标准进行测试。

## 2 试验结果分析

### 2.1 焊接接头外观形貌

利用线性摩擦焊可以实现 TC11/TC17 异种钛合金的焊接,且接头成形良好,焊接接头的外观形貌如图 1 所示。



图1 焊接接头的外观形貌  
Fig.1 Welding joint appearance

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,且飞边呈现波纹状的纹理,这是焊件往复运动的结果。纹理的数量与线性摩擦焊过程总的振动次数有关,且该飞边基本与对接面平行;垂直于振动方向的飞边(称为横向飞边)呈现较细的纹理,从表面观察较光滑,长度较短,并卷向 TC17 一侧,初步分析这是由于在高温时两种材料的强度不同所导致的。TC11 高温时强度较低,发生塑化的金属较多,因此 TC11 金属挤出量较大,导致飞边卷向 TC17 一侧。

### 2.2 接头的组织分析

#### 2.2.1 宏观组织

图 2 为 TC11/TC17 异种钛合金线性摩擦焊接头宏观形貌,线性摩擦焊接头由母材(BM)、焊缝(W)区和热机影响区(TMAZ)组成。如图 2 所示,TC11/TC17 钛

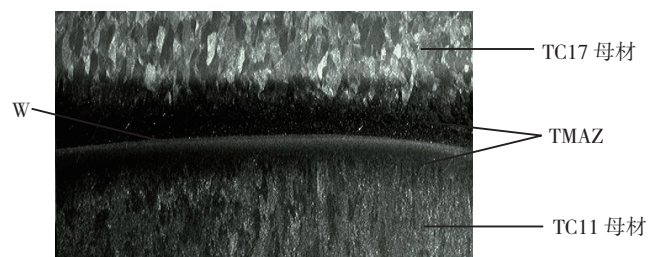


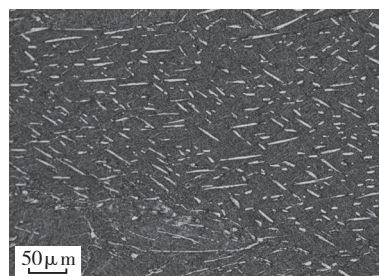
图2 接头宏观形貌  
Fig.2 Macrostructure of joints

合金线性摩擦焊焊缝呈现形状边缘宽、中间细的特征,经初步分析认为这是由于焊接过程中焊缝不同位置温度分布存在差异及焊接过程中材料的流动导致的。

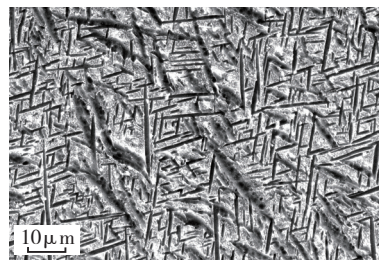
#### 2.2.2 母材组织

如图 3 (a)所示,TC17 母材为网篮组织,长条的初生  $\alpha$  相分布在片层状  $\alpha + \beta$  组织上,如图 3 (b)所示,初生  $\alpha$  相的长度为 5~15  $\mu\text{m}$ ,宽度为 1~2  $\mu\text{m}$ ,而次生  $\alpha$  相的长度为 3~10  $\mu\text{m}$ ,较细者为 1  $\mu\text{m}$ 。 $\alpha$  相有多个取向,是因为  $\beta$ -Ti 晶胞的 6 个滑移面和 2 个滑移方向能为  $\alpha$  相提供最多 12 个不同取向,这种取向变化通过图 3 的显微组织反映出来, $\alpha$  相片层束按照上述 12 种取向关系形核并长大,大量(最多 12 种)的取向导致层片束的取向多次重复,结果形成了一种非常有特色的显微组织—网篮组织。

如图 4 (a)所示,TC11 母材组织由  $\beta$  相的转变组织及等轴  $\alpha$  相组成,等轴  $\alpha$  相所占的比例约为 50%,如图 4 (b)所示, $\beta$  相的转变组织也存在多个取向。



(a)金相照片



(b)扫描电镜照片

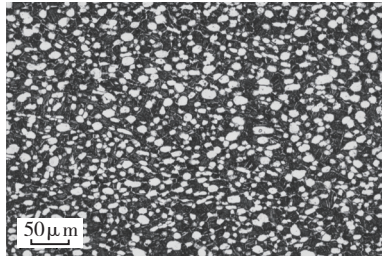
图3 TC17母材组织

Fig.3 Microstructure of TC17 BM

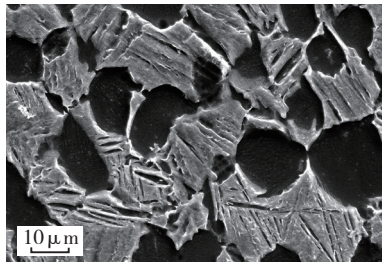
#### 2.2.3 热机械影响区

图 5 (a)为 TC17 侧热机械影响区的金相照片,初生的长条  $\alpha$  相已经发生球化,但是如图 5 (b)所示,该区的组织特征还是网篮形式。

图 6 中 TC11 热机影响区的组织中  $\alpha$  相由原来母材的等轴状转变为沿着受力方向被拉长,组织特征为拉长了的  $\alpha$  相分布在片层  $\beta$  转变组织上。这表明接头两侧的热机械影响区的温度未达到  $\beta$  相转变温度,只发生了  $\alpha$  相和  $\beta$  相晶粒沿受力方向的重新排列。



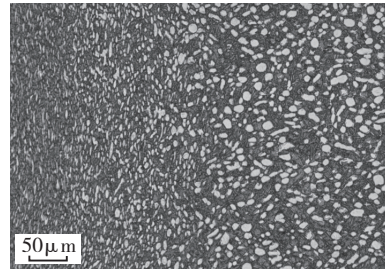
(a) 金相照片



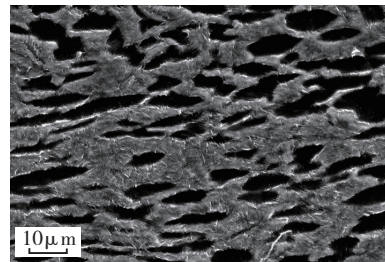
(b) 扫描电镜照片

图4 TC11母材组织

Fig.4 Microstructure of TC11 BM



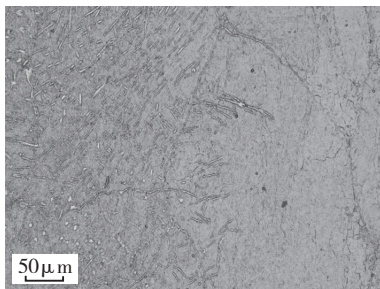
(a) 金相照片



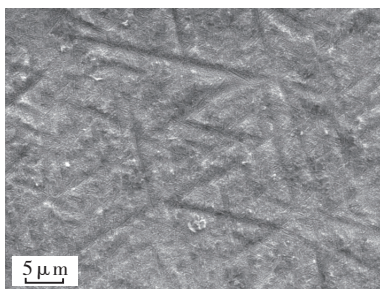
(b) 扫描电镜照片

图6 TC11侧热机械影响区组织

Fig.6 Microstructure of TMAZ (TC11)



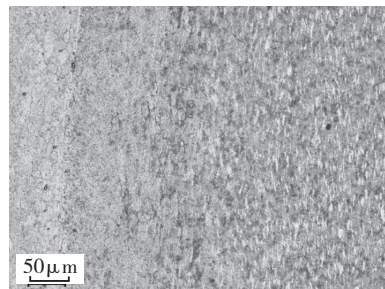
(a) 金相照片



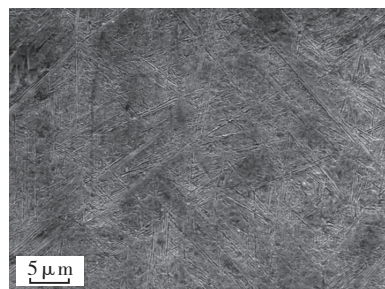
(b) 扫描电镜照片

图5 TC17侧热机械影响区组织

Fig.5 Microstructure of TMAZ (TC17)



(a) 金相照片



(b) 扫描电镜照片

图7 TC11焊缝区组织

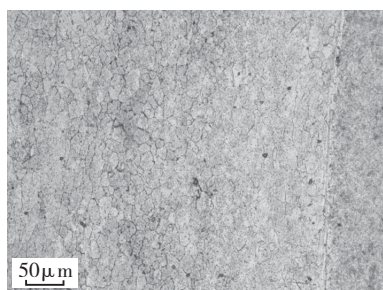
Fig.7 Microstructure of weld(TC11)

#### 2.2.4 焊缝区组织

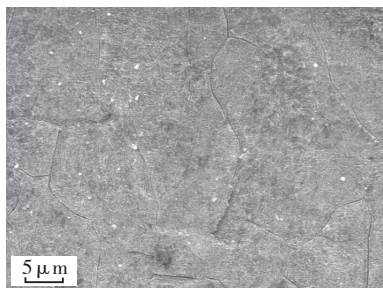
如图7(a)所示,焊缝区组织与侧母材的组织完全不同,如图7(b)所示,TC11侧焊缝区的组织为细小片层状, $\alpha$ 相和 $\beta$ 相呈网篮形态。如图8(a)所示,对于TC17来说,焊缝区发生了动态再结晶生成了等轴 $\beta$ 晶粒,如图8(b)所示,等轴晶粒内部为细小的片层组织。母材组织与焊缝组织的差异说明焊接过程中摩擦界面温度已经超过了钛合金的 $\beta$ 转变温度。

#### 2.3 TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头的力学性能

对焊后接头进行热处理,并进行20℃、200℃、300℃、400℃条件下的接头拉伸性能测试,结果显示:拉伸后试样均断在TC11侧母材上,接头的抗拉强度、屈服强度随着测试温度的升高呈线性下降趋势,接头的抗拉强度和屈服强度均与TC11母材等强,接头的延伸率和断面收缩率的变化不太明显,均大于TC17母材,如图9所示。



(a) 金相照片



(b) 扫描电镜照片

图8 TC17焊缝区组织

Fig.8 Microstructure of weld(TC17)

### 3 结论

(1) TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头沿着振动方向的飞边较长,而且呈现一定的纹理。

(2) 对 TC11/TC17 钛合金的线性摩擦焊接头显微组织观察表明:接头分为母材、热机械影响区和焊缝区。热机械影响区的微观结构是由高度变形的  $\alpha + \beta$  相晶粒组成的; TC11 侧焊缝区由针状  $\alpha$  相和晶间  $\beta$  转变组织组成,而 TC17 侧焊缝则由发生再结晶的  $\beta$  晶粒组成。

(3) 在合适的焊接工艺条件下,焊接接头的抗拉强度、屈服强度均与 TC11 母材等强,而且随着试验温度升高,强度基本呈线性下降趋势、延伸率及断面收缩率要高于 TC17 母材,随着测试温度提高,变化不明显。

### 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.

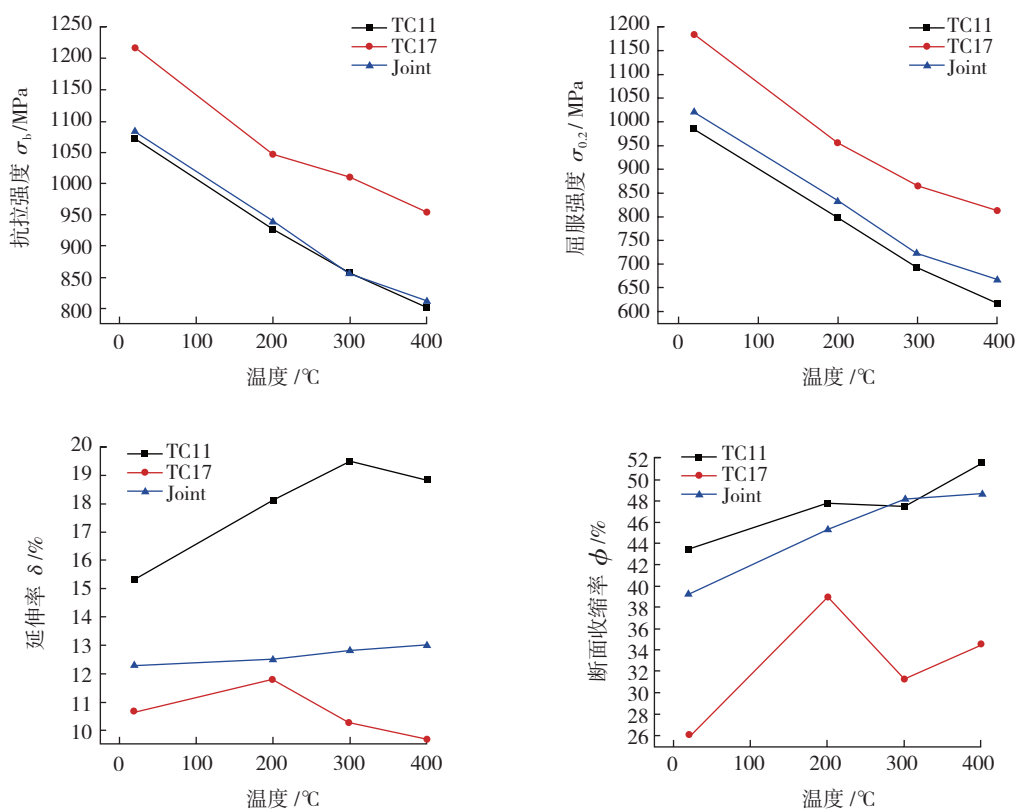


图9 接头及母材力学性能

Fig.9 Mechanical properties of joints and BM

(责编 岭雾)