

# TC17 ( $\alpha + \beta$ ) / TC17 ( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头组织与力学性能

## Structure and Mechanical Property of TC17( $\alpha + \beta$ ) and TC17( $\beta$ ) Linear Friction Welding Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 李 菊 张田仓 郭德伦 郎 波 江乐天

**[摘要]** 针对用 TC17( $\alpha + \beta$ )、TC17( $\beta$ ) 钛合金材料, 开展了线性摩擦焊接头组织和力学性能研究。结果表明: 焊接接头共分为 TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材区、TC17( $\alpha + \beta$ ) 热力影响区、焊缝区、TC17( $\beta$ ) 热力影响区、TC17( $\beta$ ) 母材区 5 个部分; 力学性能测试结果表明, 试验温度为室温、200℃、300℃、400℃ 时, TC17( $\alpha + \beta$ ) / TC17( $\beta$ ) 线性摩擦焊接头抗拉强度均达到母材的 97%, 试验温度为 400℃ 时, 持久强度达到母材的 95%。

**关键词:** 线性摩擦焊 TC17 钛合金 组织 力学性能

**[ABSTRACT]** The microstructure and mechanical properties of linear friction welded TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) joint are investigated. The results show that five different structures are existed in linear friction welded joint, i.e. TC17( $\alpha + \beta$ ) base metal, thermomechanically affected zone (TMAZ) of TC17( $\alpha + \beta$ ), weld zone, thermomechanically affected zone (TMAZ) of TC17( $\beta$ ), TC17( $\beta$ ) base metal. The tensile strength of joint reaches to about 97% of the base metal under the conditions of the room temperature, 200℃, 300℃ and 400℃. The creep rupture strength of joint reaches to about 95% of the base metal.

**Keywords:** Linear friction welding TC17 Titanium alloy Microstructure Mechanical property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.068

TC17 钛合金名义成分为 Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr, 不但具有 ( $\alpha + \beta$ ) 型钛合金的特点, 也具有  $\beta$  型钛合金的某些特点。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和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求<sup>[1]</sup>。该合金主要用于制造发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件。良好的综合力学性能使得 TC17 钛合金在航空工业上得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。

用于焊接 TC17 钛合金的方法有氩弧焊、电子束焊、钎焊、扩散焊等方法<sup>[3]</sup>, 这些焊接方法虽然能够实现

TC17 钛合金的焊接, 但是对待焊界面的焊前清理要求严格, 焊接过程需要保护气或者必须在真空条件下进行焊接, 而且焊接接头的性能不稳定。而线性摩擦焊技术以其固态连接形成的高质量焊缝、无烟尘和飞溅、无需填充材料和气体保护、焊缝缺陷少等优点, 可以克服上述焊接方法存在的一些缺点。

文中针对 TC17( $\alpha + \beta$ ) 和 TC17( $\beta$ ) 钛合金材料, 开展异种组织钛合金线性摩擦焊工艺研究, 分析了线性摩擦焊接头组织及力学性能。

### 1 试验材料及方法

试验件尺寸为 130mm (L)  $\times$  20mm (W)  $\times$  75mm (H) 的 TC17( $\alpha + \beta$ ) 钛合金和 TC17( $\beta$ ) 钛合金, 焊接面积 1500mm<sup>2</sup>, 其化学成分如表 1 所示。

表1 TC17钛合金的化学成分(质量分数) %

	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	O	N	C	H	Fe
基体	4.6	1.72	1.91	4.01	3.81	0.137	0.011	0.023	0.056	< 0.1	

待焊试件装夹在线性摩擦焊设备上, 焊前用丙酮擦拭待焊界面, 焊后沿着垂直于摩擦面方向截取金相试样和力学性能试样, 对金相试样研磨抛光并用氢氟酸、硝酸的水溶液腐蚀后, 利用光学显微镜(OPM)和扫描电镜(SEM)进行接头微观组织观察。

### 2 接头组织分析

#### 2.1 接头宏观组织

图 1 为 TC17( $\alpha + \beta$ ) / TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头宏观组织。TC17( $\alpha + \beta$ ) / TC17( $\beta$ ) 线性摩擦焊接头可以划分为 5 个区域, 分别是: TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材区、TC17( $\alpha + \beta$ ) 热力影响区(TMAZ)、焊缝区、TC17( $\beta$ ) 热力影响区、TC17( $\beta$ ) 母材区。

#### 2.2 母材组织

图 2 (a) 为 TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材微观组织, 从图中可以看到母材组织由  $\beta$  转变组织及等轴  $\alpha$  相组成, 这些

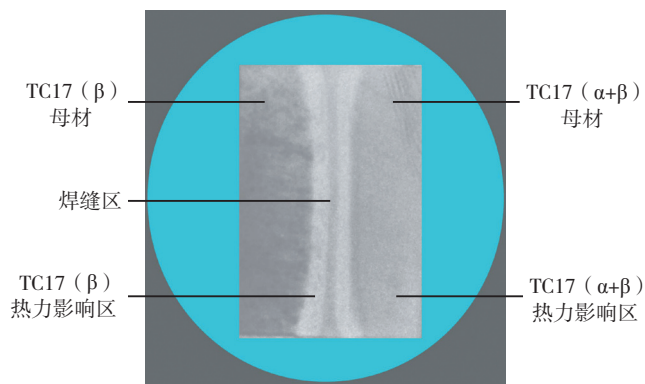


图1 接头宏观组织

Fig.1 Macrostructure of joints

等轴状的  $\alpha$  分布在转变  $\beta$  基体上,数量不超过 50%,为双态组织。图 2 (b) 为 TC17 ( $\beta$ ) 母材显微组织,从图中可以观察到片层状的  $\alpha$  相从原始  $\beta$  相中以一定的方向性析出,由于  $\beta$ -Ti 晶胞的 6 个滑移面和 2 个滑移方向可以为  $\alpha$  相的析出提供最多 12 个不同的取向,因此便呈现出图中所示的非常有特色的组织——网篮组织。网篮组织一般断裂韧性好,持久强度高,具有高的热强性和抗蠕变性能<sup>[4]</sup>。

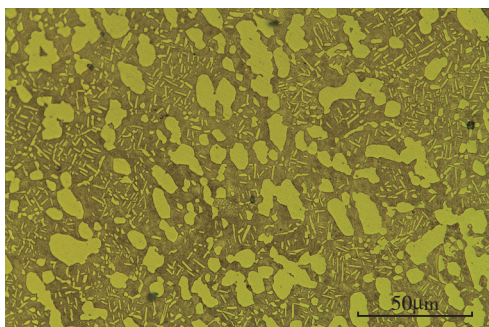
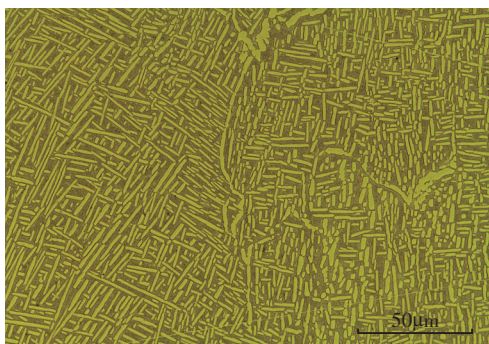
(a) TC17( $\alpha+\beta$ ) 母材(b) TC17( $\beta$ ) 母材

图2 母材微观组织

Fig.2 Microstructure of parent metal

### 2.3 热力影响区 (TMAZ) 组织

图 3 为 TC17 ( $\alpha+\beta$ ) 热力影响区,由高度变形的  $\alpha$  相和  $\beta$  相晶粒组成,与母材组织相似,只是母材等轴  $\alpha$  相在该区沿着受力方向被压扁。这种组织的存在表明,

热力影响区内的温度未超过 TC17 钛合金的  $\beta$  转变温度,且并未发生动态再结晶过程。与 TC17 ( $\alpha+\beta$ ) 母材相比,线性摩擦焊过程中试件的往复运动使等轴状的初生  $\alpha$  相被扭曲、拉长,且  $\beta$  转变组织体积分数相对增加。这表明此区域内的温度处于  $\alpha+\beta$  两相区内, $\alpha$  相部分转变为  $\beta$  相,而使接头冷却后热力影响区内的  $\beta$  转变组织体积分数增加。

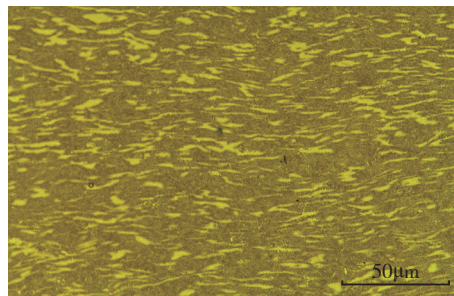
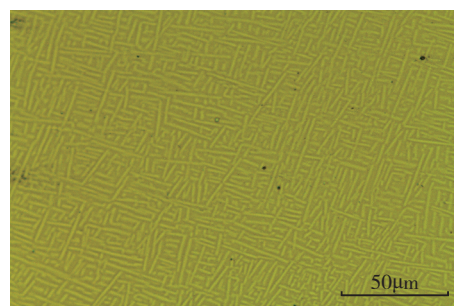
图3 TC17( $\alpha+\beta$ )热力影响区Fig.3 Microstructure of TC17( $\alpha+\beta$ ) TMAZ

图 4 为 TC17 ( $\beta$ ) 热力影响区,其热力影响区内片层状的  $\alpha$  相沿受力方向发生了重新排布,因网篮组织中的片层  $\alpha$  数量较多,所以其变形程度要比双态组织低,方向性不明显,只是原始  $\beta$  晶界变得模糊不清。次生  $\alpha$  相 ( $\alpha'$ ) 已开始向  $\beta$  相转变,且未发生动态再结晶过程。这表明此区域内温度未超过 TC17 钛合金的  $\beta$  转变温度 ( $890^{\circ}\text{C}$ ),而处于  $\alpha+\beta$  两相区内。

图4 TC17( $\beta$ )热力影响区Fig.4 Microstructure of TC17( $\beta$ ) TMAZ

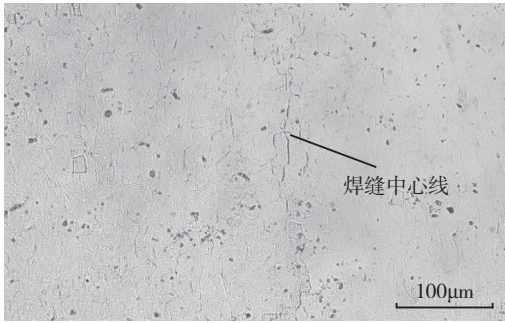
### 2.4 焊缝区组织

图 5 为焊缝区组织,从图中可以看出焊接结合面没有明显的分界。线性摩擦焊原始摩擦界面 TC17 母材内  $\alpha$  和  $\beta$  相转变为等轴状的初生  $\beta$  晶粒,表明焊缝内已发生了  $\alpha$  相向  $\beta$  相的完全转变,且初生  $\beta$  晶粒发生了动态再结晶过程。此外,线性摩擦焊过程中 TC17 钛合金动态再结晶也发生在  $\alpha$  相完全转变为  $\beta$  相之后。

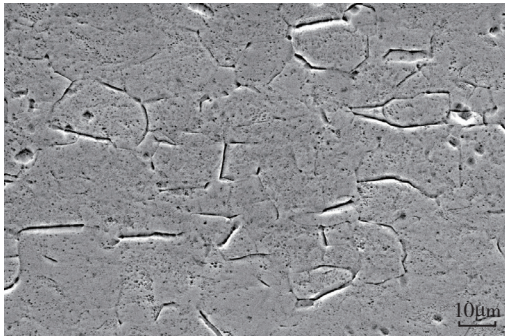
## 3 力学性能测试分析

### 3.1 拉伸性能

对 TC17 ( $\alpha+\beta$ )/TC17 ( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头



(a)金相照片



(b)扫描电镜照片  
图5 焊缝区

Fig.5 Microstructure of weld

和母材进行了室温、200℃、300℃、400℃拉伸性能测试，试件均断在两侧母材上，试验结果见表2，拉伸试验后接头照片如图6所示。从表中可以看出，对于TC17(α+β)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接头，在不同试验温度下，接头抗拉强度均能达到母材的97%。

### 3.2 持久性能

针对线性摩擦焊接头，进行了TC17(α+β)/TC17(β)

表2 接头及母材的拉伸性能

试验温度 T / (°C)	材料	抗拉强度 R <sub>m</sub> / (MPa)	屈服强度 R <sub>eL</sub> / (Mpa)	断后伸长率 A / (%)	断面收缩率 Z / (%)
室温	接头	1213.4	1155.2	6.2	15.8
	TC17(α+β)	1177.6	1124.75	13.7	39.2
	TC17(β)	1175.8	1105.2	10.6	18.2
200℃	接头	1006	898	8.6	31.7
	TC17(α+β)	1038	930	15.3	44.5
	TC17(β)	1028	899	12.5	29.4
300℃	接头	978	856	11.2	39
	TC17(α+β)	981	858	14.3	42.9
	TC17(β)	992	839	11.1	28
400℃	接头	927	799	12	42
	TC17(α+β)	925	787	15.4	47.8
	TC17(β)	945	800	10.1	28.7

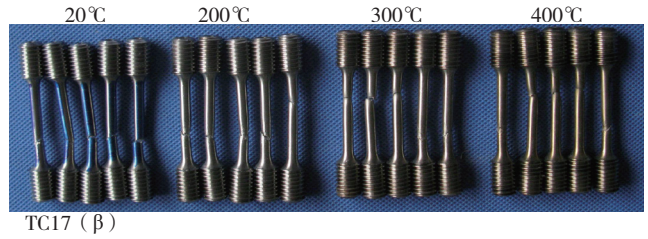


图6 接头拉伸性能试件

Fig.6 Tensile testing pieces of joints

线性摩擦焊接头及母材 400℃持久性能测试，其结果如表3所示，其接头持久强度达到了母材的95%，其断口均断在两侧母材上，试件如图7所示。

表3 接头及母材持久性能

试验温度 / °C	材料	持久强度 / MPa	持久时间 / h
400	接头	810	> 102
	TC17(α+β)	850	
	TC17(β)	850	

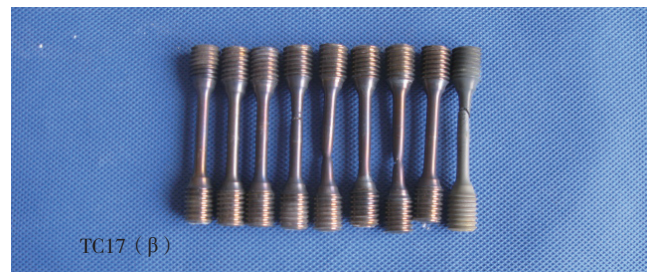


图7 接头持久性能试件

Fig.7 Endurance testing pieces of joints

## 4 结论

(1) TC17(α+β)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接头共分为母材区、热力影响区、焊缝区，其热力影响区与母材组织类似，而焊缝区组织与母材组织不同，发生了动态再结晶。

(2) TC17(α+β)/TC17(β)接头抗拉强度均达到母材的97%；试验温度为400℃时，接头持久强度达到母材的95%。

### 参考文献

- [1] 航空工业总公司第六〇六研究所. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [2] 周军. Ti-17钛合金片状组织球化规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [3] 《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.
- [4] 胡美娟, 刘金合, 康文军, 等. 电子束局部热处理对TC4钛合金焊接接头组织和性能的影响. 焊接学报, 2008, 29(2):104-107.

(责编 小城)