

# TC17 合金焊接接头显微组织与疲劳裂纹扩展特性

于广娜<sup>1</sup> 吴素君<sup>1</sup> 何胜春<sup>2</sup> 刘颖<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100191)

(2 北京航空制造工程研究所,北京 100024)

**文 摘** 研究了 TC17 钛合金惯性摩擦焊焊接接头的疲劳裂纹扩展规律,并利用光学显微镜、扫描电镜对材料的显微组织和断口形貌进行分析。结果表明:TC17 钛合金母材为  $\alpha+\beta$  网篮状组织,晶粒较大;焊缝区和热影响区内可以看到明显的原  $\beta$  相晶界,焊缝区的原  $\beta$  晶粒较细小,热影响区的原  $\beta$  晶粒较粗大,晶粒内部存在细小的  $\alpha$  相。在室温下,当  $\Delta K \leq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时,焊缝区疲劳裂纹扩展速率较小,而当  $\Delta K \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时,焊缝区的扩展速率最大,其次是热影响区,母材的裂纹扩展速率最小;在高温下,焊接接头各部位的裂纹扩展速率相差不大,均小于室温。

**关键词** TC17 钛合金,惯性摩擦焊,焊接接头,疲劳裂纹扩展速率

## Microstructure and Fatigue Crack Growth Characteristics of Welded Joints of TC17 Titanium Alloy

Yu Guangna<sup>1</sup> Wu Sujun<sup>1</sup> He Shengchun<sup>2</sup> Liu Ying<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

(2 AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024)

**Abstract** The fatigue crack growth rate of inertia friction welded joints of TC17 titanium alloy was studied. The microstructure and the fracture surface were analyzed by means of optical microscopy and scanning electron microscopy. The results show that the microstructure of TC17 titanium alloy is  $\alpha+\beta$  phase with bigger grain. The microstructure of weld zone and heat affected zone is tiny  $\alpha$  phase and clear  $\beta$  phase grain boundary, the original  $\beta$  grain of weld zone is smaller, the original  $\beta$  grain of heat affected zone is bigger. At room temperature; when  $\Delta K \leq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , the fatigue crack growth rate of weld zone is smaller; when  $\Delta K \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , the fatigue crack growth rate of weld zone is the largest. The next is heat affected zone, the growth rate of parent metal is the smallest. At high temperature, the fatigue crack growth rate of different parts of welded joints shows little difference, but all lower than those tested at room temperature.

**Key words** TC17 titanium alloy, Inertia friction welding, Welded joints, Fatigue crack growth rate

### 0 引言

TC17 合金是一种富  $\beta$  稳定元素的  $\alpha+\beta$  型两相钛合金,其名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr。该合金强度高、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度范围宽,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,最高工作温度是 427℃,因而被广泛用来制造航空部件,如发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件<sup>[1-2]</sup>。TC17 钛合金适合各种焊接方式,惯性摩擦焊技术由于工艺参数较少,焊接质量稳定,在航空高温转子部件中得到广泛应用。这些部件的工作环境温度较高,在这种服役条件下,TC17 钛合金部件和焊接结构往往承受很大的疲劳载荷,研究其疲劳裂纹扩展速率具有重要的理论意义<sup>[3]</sup>。

对于 TC17 钛合金焊接接头的组织和疲劳裂纹扩

展特性研究较少<sup>[4-10]</sup>,尤其是对 TC17 钛合金惯性摩擦焊焊接接头疲劳裂纹扩展特性的报道几乎没有,因此本文针对 TC17 钛合金惯性摩擦焊焊接接头显微组织、疲劳裂纹扩展速率以及断口进行分析,探讨其室温和高温疲劳裂纹扩展规律的内在本质和规律,以期较全面地了解该合金的疲劳裂纹扩展特性。

### 1 实验

选用轧制态 TC17 棒材,其化学成分见表 1。焊接过程选择的设备为美国 MTI 公司生产的 MOD-EL300BX 惯性摩擦焊机,其转速和轴向压力由工控机控制,无级可调;转动惯量为随机配备的飞轮组合后的惯量。材料焊后的热处理制度是:在  $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$  固溶处理 4 h,水冷至室温;然后在  $630^\circ\text{C}$  时效 8 h,空冷至室温;最后在  $550^\circ\text{C}$  时去应力退火 4 h,空冷至室温。

收稿日期:2010-07-30

作者简介:于广娜,1987 年出生,硕士研究生,主要从事结构完整性研究。E-mail: yuguangna@126.com; wsj1212@126.com

表 1 TC17 钛合金化学成分

Tab.1 Chemical compositions of TC17 titanium alloy

wt%

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
4.5-5.5	1.6-2.4	1.6-2.4	3.5-4.5	3.5-4.5	0.30	0.05	0.05	0.0125	0.08-0.13	余

取母材、焊缝区和热影响区作为疲劳裂纹开缺口的试验部位,首先利用金相腐蚀剂对焊接接头进行简单腐蚀,即可显示整个焊缝的形貌,其中焊缝区取在焊缝芯部,热影响区取在熔合线处,金相腐蚀剂为  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:5$ 。试样采用紧凑拉伸试样(CT 试样),如图 1 所示,试样厚度为 4 mm。试验严格按照 GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法<sup>[11]</sup>和 HB 7680—2000 金属材料高温疲劳裂纹扩展速率试验方法<sup>[12]</sup>进行,每组至少测试三个试样。疲劳裂纹扩展试验在 MTS 810.23M 试验机上进行,应力比 0.1,最大载荷范围为 1 700—2 500 N,频率 6 Hz。采用恒力增  $K$  法,在诱发裂纹萌生后,采用恒力使疲劳裂纹扩展,引伸计记录缺口处张嘴位移量的变化,通过柔度法,应用给定的弹性模量  $E$  和屈服强度  $\sigma_y$ ,计算得到裂纹长度,进而得出疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  与裂纹尖端应力强度因子幅值  $\Delta K$  的关系。

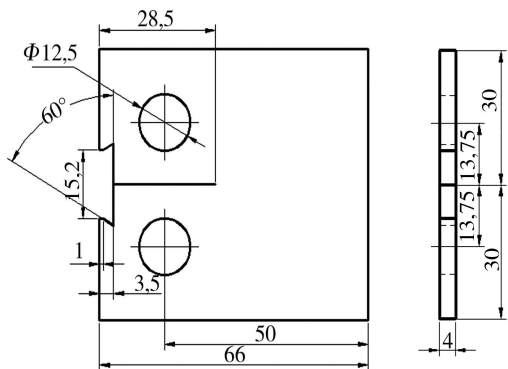


图 1 疲劳裂纹扩展试样的形状及尺寸

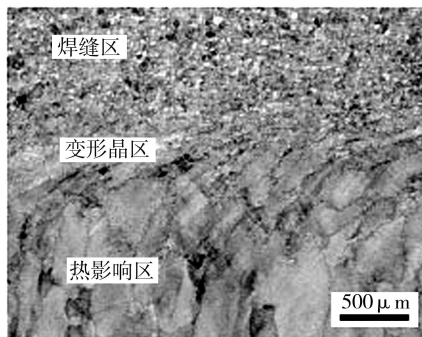
Fig.1 Shape and dimension of fatigue crack propagation specimen

## 2 结果与讨论

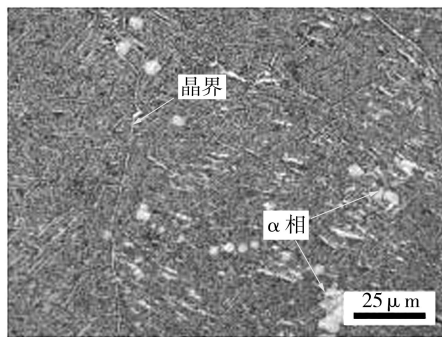
### 2.1 显微组织

图 2 为 TC17 惯性摩擦焊焊接接头焊后热处理显微组织的金相照片。图 2(a)焊缝区为等轴晶区,晶粒细小均匀,直径约 50  $\mu\text{m}$ ,为典型的动态再结晶组织;热影响区晶粒粗大,直径在 200  $\mu\text{m}$  以上;在焊缝区与热影响区中间存在着变形晶区,此处晶粒发生变形,晶界处有细小的晶粒组织;焊接接头内部均可以看到水淬后保留下来清晰的原  $\beta$  相晶界。这是因为在摩擦过程中,当温度超过同素异构转变温度时,密排六方的  $\alpha$  相向体心立方的  $\beta$  相转变,新转变的  $\beta$  相在塑性变形中发生动态再结晶,细化晶粒尺寸,形成焊缝区。靠近焊缝区的材料由于承受压力较大,晶粒发生较大变形,虽然该区温度稍低于焊缝区,但该区同样存在部分动态再结晶现象,再结晶晶粒分布在变形晶粒的晶界上;由于热影响区距离摩擦面较远,受温度的影响有限,不足以发生动态再结晶,晶粒只有一定程度的长大。而当摩擦焊停止时,焊缝区的温度下降较快,等轴细小的  $\beta$  相晶粒被保留下来。图 2(b)中晶内为针状的  $\alpha+\beta$  的两相网篮状组织,有不同取向的针状  $\alpha$  相,层片束之间为短小的次生  $\alpha$  相,大块的浅色组织为弥散的  $\alpha$  相,此外,可以看到由  $\alpha$  相镶边的原  $\beta$  相晶界,晶粒尺寸较大。

图 3 为 TC17 惯性摩擦焊焊接接头的扫描电镜组织。图 3(a)可以看到明显的原  $\beta$  相晶界,晶内为细小的  $\alpha$  相,这是淬火后形成亚稳的  $\beta$  相晶粒在时效保温过程中析出的,由于焊缝区晶粒较细, $\alpha$  相形核位置较多,导致形成的  $\alpha$  相片束小于母材。图 3(b)可以看到针状的  $\alpha+\beta$  的两相网篮状组织, $\alpha$  片束的取向形成 60° 三角形结构,组织较焊缝区粗大。



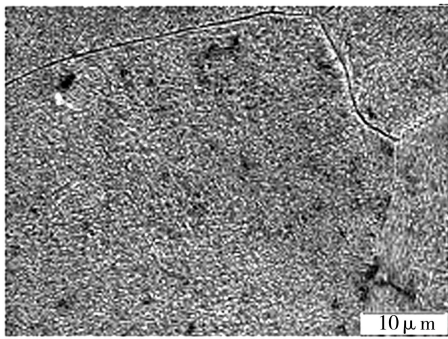
(a) 焊接接头



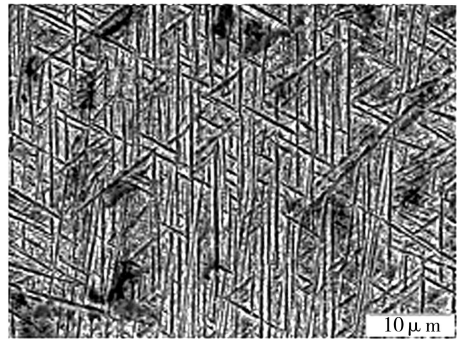
(b) 母材

图 2 TC17 惯性摩擦焊焊接接头的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of inertia friction welded joints of TC17 titanium alloy



(a) 焊缝区



(b) 母材

图3 TC17 惯性摩擦焊焊接接头的扫描电镜组织

Fig.3 SEM of inertia friction welded joints of TC17 titanium alloy

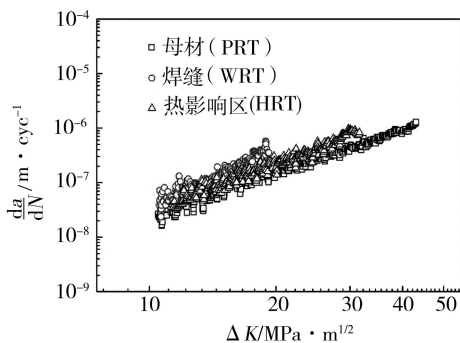
## 2.2 疲劳裂纹扩展特性

在不同温度下拉伸性能测试结果见表2。可以看出断裂部位均在母材,说明在23和400℃下,该合金惯性摩擦焊焊接接头的焊缝区及热影响区强度高于母材,随着温度的升高,材料的强度下降,塑性提高。

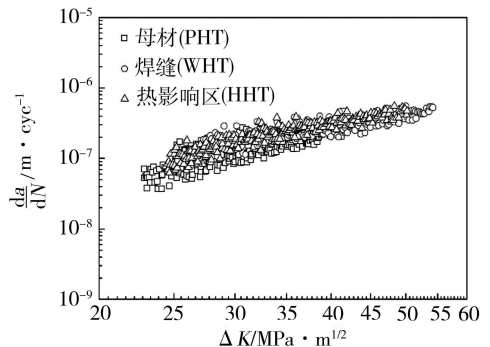
表2 TC17 钛合金惯性摩擦焊焊接接头的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of inertia friction welded joints of TC17 titanium alloy

温度 /℃	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	断裂 部位
23	1078	1128	13.5	29.8	母材
400	833	915	15.7	49.7	母材



(a) 室温



(b) 高温

图4 TC17 焊接接头的室温和高温裂纹扩展第Ⅱ阶段

Fig.4 Stage II of crack propagation of welded joints of TC17 titanium alloy at room and high temperature

从表3和图5中可以看到,23℃时,焊缝区的裂纹扩展速率变化最快,当 $\Delta K \leq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时,焊缝区的扩展速率较慢,随着裂纹的扩展,当 $\Delta K \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时,裂纹扩展速率将超过热影响区和母材,母材的裂纹扩展速率最慢。这是由于焊缝区晶粒细小,晶界较多,疲劳裂纹在开始扩展阶段,需要克服晶界的阻碍,其扩展速率较慢;而随着疲劳裂纹继续扩展,由于晶界处杂质偏析,强度下降,裂纹开始出现沿晶扩展倾向,所以裂纹扩展速率增大,同时焊缝区由于强度较高,根据欧文提出的塑性区尺寸公式( $r = K_1^2 / 2 \pi \sigma_y^2$ ,其中, $K_1$ 为应力强度因子, $\sigma_y$ 为屈服强度)<sup>[13]</sup>可知,对于一定的应力强度因子值,材料屈服

在空气条件下进行疲劳裂纹扩展试验时, $da/dN$ 与 $\Delta K$ 曲线分为三个阶段。本次试验主要研究曲线的第Ⅱ阶段,即中期裂纹扩展阶段,通常提供的 $da/dN$ 数据系指这一阶段的裂纹扩展速率。在双对数坐标系中,这一阶段的 $da/dN-\Delta K$ 关系是一条直线,通常可以用Paris公式来表示,即 $da/dN = C \Delta K^m$ ,式中 $m, C$ 均为常数,可由试验确定。

图4为双对数下TC17钛合金焊接接头的室温和高温 $da/dN$ 与 $\Delta K$ 的关系,利用Paris公式 $da/dN = C \Delta K^m$ 拟合,计算得的 $m, C$ 结果见表3,拟合曲线见图5。

强度越高,裂纹尖端塑性区尺寸越小,疲劳裂纹扩展时所消耗的塑性变形能量越小,所以裂纹扩展越快;另一方面疲劳裂纹扩展速率与裂纹扩展途径的曲折度有关,若裂纹扩展途径曲折,分叉多,则可分散裂纹尖端的应力场,破坏过程所消耗的总能量增大,裂纹扩展减慢。400℃时,焊接接头不同部位的裂纹扩展速率相差不大,母材的高温疲劳裂纹扩展速率最慢,这也与断口中的二次裂纹较多有关。此外,高温时疲劳裂纹扩展速率低于室温,这与材料的变形能力有关,高温材料的屈服强度降低,塑性增加(表2),裂纹尖端塑性变形功增大,裂纹扩展需要消耗更多的能量,使得疲劳裂纹扩展速率降低,因此,在一定高温范



围内,TC17 材料的疲劳裂纹扩展速率低于室温下的速率。

表3 TC17 钛合金焊接接头的疲劳裂纹扩展速率  
Tab.3 Test results of fatigue crack propagation rate of welded joints of TC17 titanium alloy

焊接接头	试样编号	$C/10^{-11}$	$m$	$R^2$
母材	p-23℃	5.21	2.67	0.96
	p-400℃	0.561	1.64	0.74
焊缝区	w-23℃	15.5	4.12	0.83
	w-400℃	0.395	1.78	0.80
热影响区	h-23℃	0.163	2.39	0.86
	h-400℃	0.245	1.94	0.88

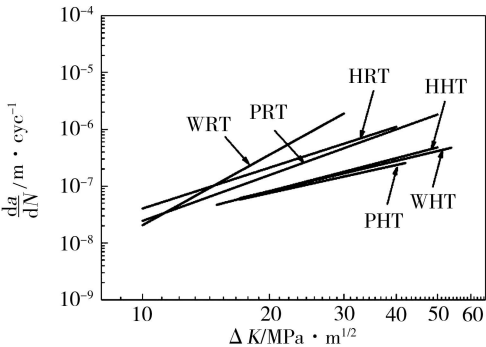
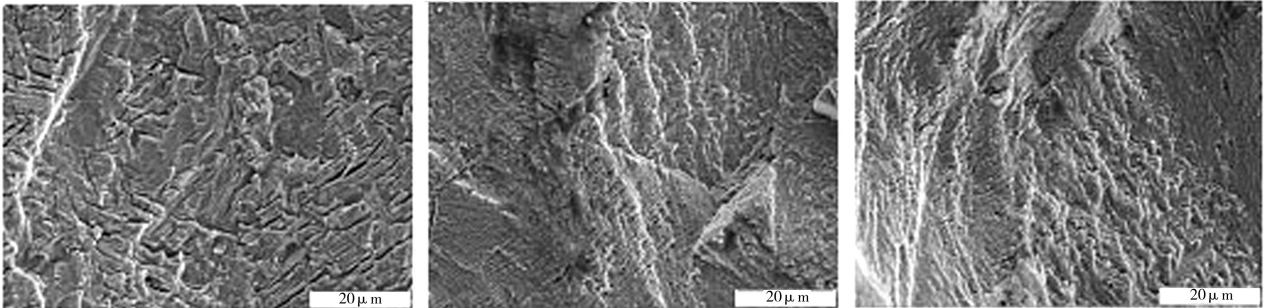


图5 TC17 焊接接头裂纹扩展Ⅱ阶段拟合曲线  
Fig.5 Fitted curves of stage II of crack propagation of welded joints of TC17 titanium alloy

2.3 疲劳断口形貌

图6 是室温疲劳裂纹扩展断口形貌。从图6(a)

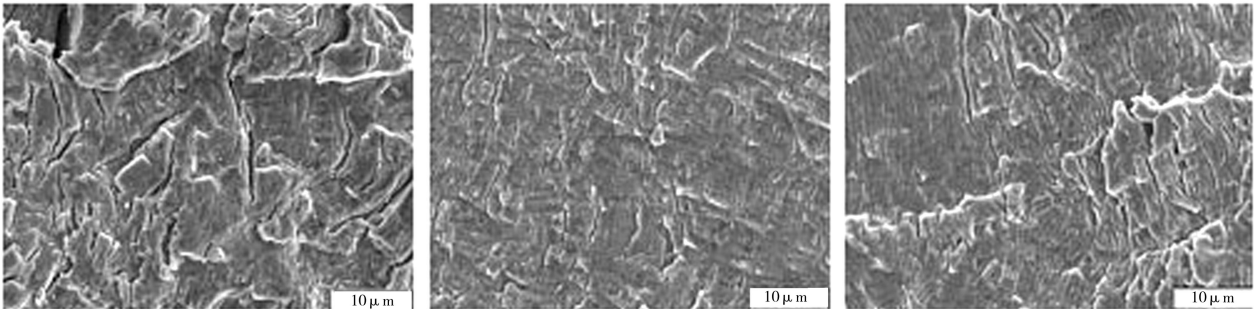
中可以看到明显的层片状开裂以及疲劳条带,大部分二次裂纹与主裂纹方向垂直,同时还有少量二次裂纹互相之间形成60°夹角形貌,对比图3(b),可以知道此处二次裂纹是沿着α相界形成的。从图6(b)中可以看出,尽管疲劳裂纹主要发生在晶粒内部穿晶扩展,但却能看到明显的晶界线。这可能是由于不同晶粒内部的疲劳裂纹走向不同,随着裂纹的扩展,疲劳裂纹在晶界连合,从而使晶粒交界线显示在断口表面上。如果晶界存在杂质元素偏析并使晶界强度降低,则晶界也可能开裂形成较细的二次裂纹。从图6(c)可见疲劳条带及二次裂纹,二次裂纹间距较小,这是因为热影响区晶粒内部α相片束较细。对比三个断口,发现母材断口表面的二次裂纹最多,裂纹扩展曲折度最大,则在扩展过程中需要吸收更多的能量,裂纹扩展速率最慢,这与疲劳裂纹扩展速率测试结果是相符的。图7 是高温疲劳裂纹扩展断口形貌。图7(a)与图6(a)断口相似,断口表面呈层片状开裂,并且在二次裂纹之间分布着疲劳条带。图7(b)显示在高温下裂纹扩展晶界特征不明显,这是因为在高温下晶粒强度降低,裂纹尖端塑性区增大裂纹可以跨晶粒扩展,断口表面上不再显现晶界线,也没有沿晶界形成的二次裂纹特征。图7(c)显示断口表面有更多的疲劳条带,沿着疲劳条带存在大量的垂直于主裂纹方向的二次裂纹。



(a) 母材 (b) 焊缝区 (c) 热影响区

图6 TC17 钛合金焊接接头室温疲劳裂纹扩展的断口形貌

Fig.6 Fractographs of fatigue crack propagation of welded joints of TC17 titanium alloy at room temperature



(a) 母材 (b) 焊缝区 (c) 热影响区

图7 TC17 钛合金焊接接头高温疲劳裂纹扩展的断口形貌

Fig.7 Fractographs of fatigue crack propagation of welded joints of TC17 titanium alloy at high temperature



### 3 结论

(1) TC17 钛合金惯性摩擦焊的焊接接头由焊缝区、热影响区及母材组成。其中焊缝区原  $\beta$  晶粒相对较细小, 热影响区的原  $\beta$  晶粒较粗大, 晶粒内部存在细小的  $\alpha$  相; 母材晶粒较大, 为  $\alpha+\beta$  网篮状组织。

(2) 在室温下, 当  $\Delta K \leq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时, 焊缝区疲劳裂纹扩展速率较小; 当  $\Delta K \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时, 焊缝区的疲劳裂纹扩展速率最大, 热影响区其次, 母材扩展速率最小。在高温下, 不同部位的裂纹扩展速率相差不大, 均低于室温, 这与材料的塑性及裂纹扩展路径的曲折度有关。

(3) 室温下, TC17 合金母材的疲劳裂纹扩展断口表面较平整, 断口呈层片状开裂, 垂直主裂纹方向存在着较多的二次裂纹; 焊缝区的断口上可看到明显的晶界线; 热影响区断口表面的二次裂纹较短。高温下, 焊接接头各部位的断口形貌相似, 断口表面存在着大量的疲劳条带和二次裂纹, 这与材料在高温下疲劳裂纹扩展速率相近是相符的。

### 参考文献

- [1] Material Properties Handbook: Titanium Alloy. ASM, 1994
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第4卷)钛合金[M]. 北京: 北京标准化出版社, 2001
- [3] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000

[4] 何胜春, 张田仓. TC17 钛合金惯性摩擦焊接头组织特征分析[J]. 焊接, 2008(4): 61-63

[5] Filip R, Kubiak K, Ziaja W, et al. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89

[6] Wu A P, Zou G S, Ren J L, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-24Al-17Nb (at. %) laser beam welding joints[J]. Intermetallics, 2002, 10(7): 647-652

[7] 吴冰, 李晋炜, 巩水利, 等. TC17 钛合金电子束焊接接头的疲劳裂纹扩展规律及疲劳剩余寿命[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 170-173

[8] 张翥, 惠松尧, 路纲. TC17 合金低周疲劳性能与低周疲劳断口形貌[J]. 金属学报, 2002, 38: 267-271

[9] 李四清, 刘瑞民. TC17 钛合金盘件的低周疲劳行为[J]. 材料工程, 2003(增刊): 227-229

[10] Nakajima K, Terao K, Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of  $\alpha+\beta$  titanium[J]. Materials Science and Engineering, 1998, 234: 176-181

[11] GB/6398—2000, 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]

[12] HB/7680—2000, 金属材料高温疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]

[13] 埃沃尔兹 H L, 汪希尔 R J H. 断裂力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1988

(编辑 李洪泉)