文章编号：1000-8055(2021)12-2482-08 doi：10.13224/j.cnki.jasp.20210440

TiAl合金低循环疲劳行为与寿命预测模型

李 维[1]，蒋康河[1]，马 莉[1]，曾 武[2]，杨俊杰[3]
（1.中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所，湖南 株洲 412002；
2.中国科学院 工程热物理研究所，北京 100190；
3.清华大学 航空发动机研究院，北京 100085）

摘 要：通过400 ℃和750 ℃下的单轴应变控制低循环疲劳(LCF)试验获取了一种TiAl合金循环变形行为和低循环疲劳寿命。合金在应变循环载荷下具有较稳定的循环特性，未出现明显的循环软化或循环硬化现象。Ramberg-Osgood方程能够较好地描述合金的循环应力-应变关系，疲劳寿命与总应变幅值近似呈对数线性关系。材料在750 ℃条件下呈现韧性断裂特征，在400 ℃条件下材料脆性特征较为明显。试件失效以层状组织跨层断裂为主，且层间断裂现象都随应变幅的增加而大幅减少，值得注意的是材料在750 ℃时氧化速度明显加快。与Manson-Coffin模型相比较，Cruse-Meyer模型尽管数学形式更简单，材料常数更少，但对具有低温度高应力的叶片榫头部位的寿命预测精度不高，不宜直接用于钛铝合金叶片寿命预测。

关 键 词：TiAl合金；低循环疲劳(LCF)；循环应力-应变关系；寿命预测；断口形貌
中图分类号：V232.4；O346.2 **文献标志码**：A

Low cycle fatigue behavior and life prediction model of TiAl superalloy

LI Wei[1]，JIANG Kanghe[1]，MA Li[1]，ZENG Wu[2]，YANG Junjie[3]
（1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute，
Aero Engine Corporation of China，Zhuzhou Hunan 412002，China；
2. Institute of Engineering Thermophysics，
Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China；
3. Institute of Aero Engine，Tsinghua University，Beijing 100085，China）

Abstract：Axial strain-controlled low cycle fatigue (LCF) tests were carried out on the TiAl superalloy at 400 ℃ and 750 ℃ to obtain the cyclic behavior and LCF lifetime. The superalloy exhibited stable cyclic characteristics，i.e. no obvious cyclic softening or cyclic hardening during test. The cyclic stress-strain relationship was well described by the Ramberg-Osgood equation. LCF lives at different temperatures had a log-linear relationship with the total strain ranges. Fracture morphology revealed that the TiAl superalloy presented pronounced ductile fracture and significant oxidation at 750 ℃，while the brittle fracture of the material was obvious at 400 ℃. Meanwhile，translamellar fracture was dominant for the lamellar microstructure at both tempera-

收稿日期：2021-08-11
基金项目：航空动力基金(6141B090544)；湖南省自然科学基金(2019JJ50702)
作者简介：李维(1973－)，男，研究员，博士，主要从事航空发动机设计工作。
通信作者：蒋康河(1989－)，男，高级工程师，博士，主要从事航空发动机结构设计工作。E-mail：peamy@126.com

引用格式：李维，蒋康河，马莉，等. TiAl合金低循环疲劳行为与寿命预测模型[J]. 航空动力学报，2021，36(12)：2482-2489. LI Wei，JIANG Kanghe，MA Li，et al. Low cycle fatigue behavior and life prediction model of TiAl superalloy[J]. Journal of Aerospace Power，2021，36(12)：2482-2489.

ture，and the percentage of the interlamellar fracture decreased with the strain amplitude. It was noteworthy that oxidation was significantly accelerated at 750 ℃. Compared to the Manson-Coffin model，although the Cruse-Meyer model had simpler mathematical form and fewer material constants，it was not accurate enough to predict the life of the tenon part of turbine blades with lower temperature but heavy centrifugal load. Hence，the model was not suitable to be applied to TiAl turbine blade directly.

Key words：TiAl superalloy；low cycle fatigue(LCF)；cyclic stress-strain relationship；life prediction；fracture morphology

TiAl合金的密度仅为传统镍基高温合金一半左右，同时兼具优异的抗氧化能力和高温力学性能，成为新一代高温材料的代表之一[1-4]。TiAl合金在航空航天领域中具有广阔的应用前景，被视为先进航空发动机高压压气机及低压涡轮叶片的重要候选材料[5-7]。尽管如此，TiAl合金也具有较大的室温脆性、较低的断裂韧度、较高的裂纹扩展速率和加工制造困难等缺点[7-8]。当前，TiAl合金的研制、力学性能研究和工程化应用引起了国内外众多研究人员的高度重视。

早在20世纪60年代，美国空军已经意识到TiAl合金在航空发动机减重方面的巨大潜力[9-10]。2006年，通用电气公司宣布将在GEnx发动机中采用TiAl合金制造第6、7级低压涡轮叶片[11]。2013年，针对波音787飞机的GEnx 1B发动机和波音747-8飞机的GEnx 2B发动机，通用电气公司制造了超过40 000片TiAl合金低压涡轮叶片[12]。Pratt & Whitney(PW)公司和MTU公司将TiAl合金应用于在新型齿轮传动涡扇发动机的最后一级低压涡轮叶片上。Rolls-Royce公司宣布将在新一代先进发动机中采用TiAl合金低压涡轮叶片[13-14]。中国科学院金属研究所采用离心精密铸造工艺制造的TiAl合金低压涡轮叶片已在Rolls-Royce公司Trent XWB发动机上完成了覆盖一个大修周期的1750次模拟飞行循环考核试验[11]。此外，TiAl合金当前也已开始在国内军民用航空发动机上开展相应的应用研究工作[15]。由此可以看出，TiAl合金已逐步开始进入工程实用阶段。为了保证TiAl合金结构的服役安全，有必要针对TiAl合金力学性能开展深入研究。

当前，TiAl合金主要应用于大型涡扇发动机的低压涡轮叶片。叶片在服役过程中需要在一定的温度下承受高速旋转所致的离心力载荷，低循环疲劳是其主要失效模式之一[8,14,16]。Recina等探究了TiAl合金Ti-48Al-2W-0.5Si在600 ℃下的单轴拉伸性能、蠕变性能、低循环疲劳性能[17]。董成利、于慧臣等探究了TiAl合金Ti-43Al-9V-Y、Ti-44Al-3.0Nb-2.0Mn-0.02B、Ti-48Al-2.3V-1.2Cr-0.06O-0.01N-0.02C-0.006H在700 ℃、750 ℃、800 ℃下的低循环疲劳性能、失效机理和寿命预测方法[5,8,14]。梁泽芬等开展了TiAl合金Ti-43Al-8.5V-Y在常温、550 ℃和700 ℃下的低循环疲劳试验，探究了不同温度、不同应变幅值对TiAl合金低循环疲劳性能的影响[18]。尽管当前针对TiAl合金低循环疲劳性能的研究已开展了部分工作，但是不同类型TiAl合金、不同试验条件下的低循环疲劳性能存在较大差异。为了实现TiAl合金材料/结构低循环疲劳寿命的准确评估，包含低循环疲劳行为与寿命预测模型在内的TiAl合金力学性能测试与表征工作还需要进一步开展。

鉴于此，为了支撑钛铝合金在新一代涡轴发动机末级涡轮叶片上的工程应用，本文以TiAl合金Ti-45Al-4Nb-1Mo-0.5B为对象，在典型温度400 ℃(榫头温度)和750 ℃(叶身温度)下开展低循环疲劳试验研究，探究其低循环疲劳性能，并建立工程适用的低循环疲劳寿命预测模型，为后续TiAl合金结构的低循环疲劳寿命设计和评估提供基础。

1　试验概况

1.1　材料与试样

本文试验材料为Ti-45Al-4Nb-1Mo-0.5BTiAl合金，其化学成分如表1所示。采用海绵钛、高纯Al豆、AlNb、AlMo、TiB_2压制成电极，而后采用两次自耗熔炼、一次感应熔炼浇铸成直径18 mm圆棒毛坯，进行1250 ℃、150 MPa保温保压4 h进行热等静压处理，并经过850 ℃保温8 h去应力退火热处理，处理后的得到均匀的$\alpha_2+\gamma$相片层组织。

TiAl合金的原始微观组织形貌如图1所示可以看出，该合金为典型的双相组织，其中黑色为

表 1 TiAl合金化学元素成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of chemical composition of TiAl superalloy

化学成分	质量分数/%
Ti	余量
Al	45.0
Nb	4.0
Mo	1.0
B	0.15

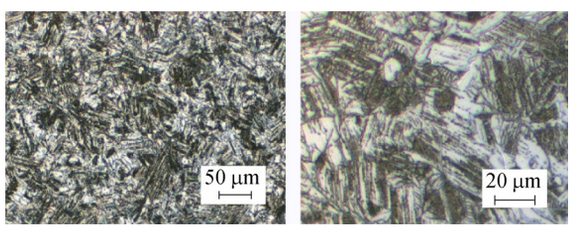


图 1 TiAl合金微观组织形貌

Fig.1 Microstructure of TiAl superalloy

γ/α_2相片层团，白色的为γ相，γ相的体积分数相对较高，晶粒尺寸在20～50 μm之间。由于经过了热等静压处理，材料的组织致密性较好，金相观测样品的微观组织未发现明显的空洞和裂纹等缺陷。

试验所用圆棒试样如图2所示。试样采用螺纹连接装夹，考虑到TiAl合金的室温脆性，螺纹采用磨削加工。试样标距段长度为15 mm，直径为6 mm，标距段的设计满足GB/T 15248-2008的推荐要求。标距段的最终加工工序采用纵抛处理，减少加工所致划痕等对材料低循环疲劳试验的影响。



图 2 低循环疲劳试验件

Fig.2 Photograph of the LCF experiment specimen

1.2 试验过程

TiAl合金低循环疲劳试验参照GB/T 15428-2008试验标准在MTS Landmark液压伺服疲劳试验机上开展，TiAl合金圆棒试样采用MTS680液压高温螺纹连接夹具装夹。试验中采用高温炉加热，试验环境为高温大气环境下试验，试验温度分别为400 ℃和750 ℃。试样装夹完后，先升温到试验温度，然后保温30 min使得试样受热均匀。试验所用波形为三角波，加载速率为4×10^{-3} s^{-1}，应变比$R=-1$，试验一直持续到试样断裂。在低循环疲劳试验过程中，采用通过缠绕捆绑方式固定在试件上的热电偶测量试件温度，采用标距为12 mm高温引伸计测量考核段的变形。

2 试验结果与分析

2.1 TiAl合金循环应力-应变关系

根据TiAl合金应变控制低循环疲劳试验结果，可以得到不同试验温度(t)和应变幅值(ε)下TiAl合金的应力-应变响应。TiAl合金稳定循环(取疲劳寿命的半数循环附近)的应力-应变响应曲线和应力峰值曲线分别如图3所示。从图3中可以看出，随着加载应变幅值的增加，虽然迟滞回线的宽度逐步增加，表现了每个循环累积损伤的增加，但是峰值应力的增加并不显著，表明在750 ℃下该TiAl合金表现出了显著的塑性变形特征。400 ℃下不同应变幅下的迟滞回线明显变窄，表明随着温度的降低，合金的塑性特征明显减弱。

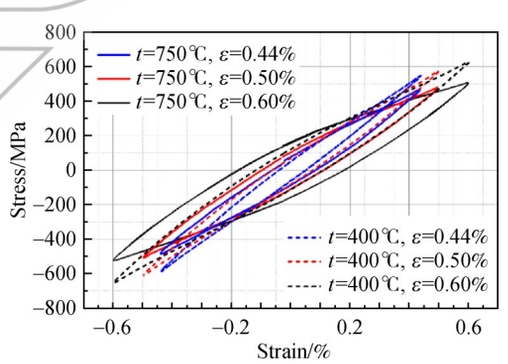


图 3 稳定循环的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of the stable cycle

图4为试验过程中循环峰值应力随着试验过程的变化情况，无论在400 ℃还是750 ℃，循环峰值应力并不随试验循环数的增加发生明显变化，表明该TiAl合金在应变循环载荷下具有较稳定的循环特性，没有表现出明显的循环软化或循环硬化现象。

为了描述TiAl合金低循环疲劳应力-应变响应，本文通过拟合试验结果获取了Ramberg-Osgood模型中的材料常数(强度系数、应变强化指数、弹性模量)。Ramberg-Osgood模型的表达式为

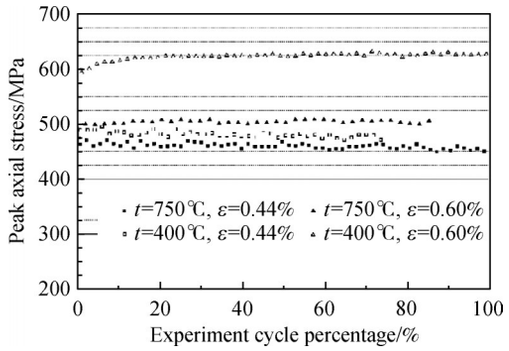


图4　循环峰值应力演化趋势

Fig.4　Cyclic peak stress evolution

$$\Delta\varepsilon/2=\sigma_a/E+(\sigma_a/K')^{1/n'} \quad (1)$$

其中K'为强度系数,n'为应变强化指数,E为对应温度下的弹性模量。

400 ℃和750 ℃下TiAl合金Ramberg-Osgood模型材料常数如表2所示,模型的循环应力-应变关系模拟结果如图5所示,模拟结果与试验结果符合良好。

表2　不同温度下Ramberg-Osgood模型材料常数

Table 2　Material constants of Ramberg-Osgood model at different temperatures

温度/℃	E/GPa	K'/MPa	n'
400	161	1 910.3	0.176 1
750	134	1 187.7	0.135 4

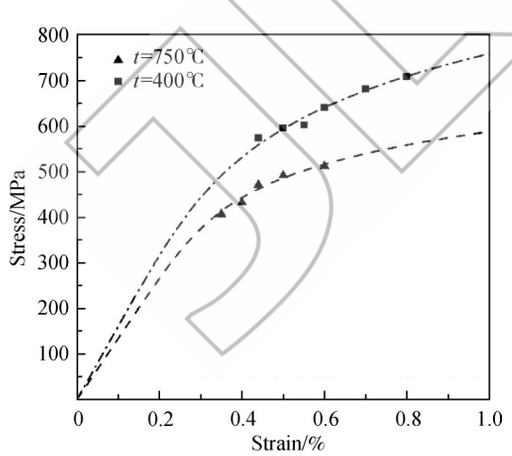


图5　基于Ramberg-Osgood模型的循环应力-应变曲线

Fig.5　Cyclic stress-strain curve based on Ramberg-Osgood model

2.2　TiAl合金低循环疲劳寿命

不同温度、不同应变幅值下TiAl合金的低循环疲劳试验寿命如表3所示,低循环疲劳寿命与应变幅值的关系如图6所示。总体上,试验结果

表3　TiAl合金应变控制低循环疲劳寿命

Table 3　Strain-controlled LCF life of TiAl superalloy

温度/℃	频率/Hz	应变/%	寿命循环数
400	0.227	0.44	33 716
	0.200	0.50	18 245
	0.182	0.55	3 639
	0.167	0.60	2 159
	0.143	0.70	412
	0.125	0.80	493
750	0.286	0.35	49 531
	0.250	0.40	15 431
	0.227	0.44	1 836
	0.200	0.50	1 243
	0.167	0.60	216

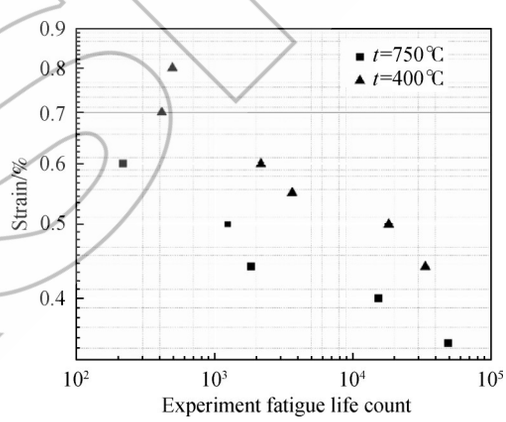


图6　低循环疲劳寿命与应变幅值的关系

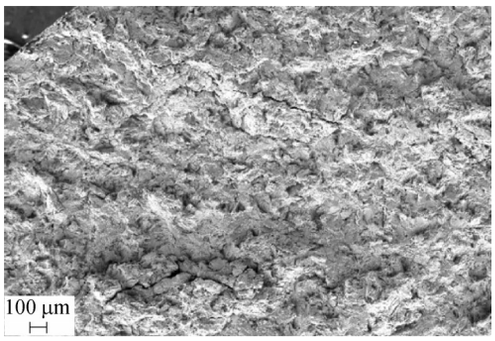
Fig.6　Relationship between LCF life and strain amplitude

的规律性较好,不同温度下TiAl合金的低循环疲劳寿命与总应变幅值呈对数线性关系。

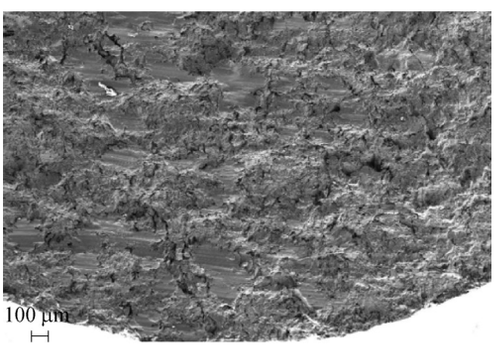
2.3　试件失效行为分析

TiAl合金在750 ℃和400 ℃条件下典型应变幅条件下疲劳试件断口的宏观形貌如图7所示。可以看到,与钛合金与镍基合金不同,该TiAl合金低循环试件宏观上呈现出相对粗糙的断口面,没有常规镍基高温合金疲劳试件明显可见的疲劳裂纹源区、裂纹扩展区和断裂区的区分,且出现少量散布的纵向裂纹。从图7(a)中750 ℃下典型疲劳试件断口的断面中可以看到韧窝分布比例较高,而在图7(b)中400 ℃下典型疲劳试件断口的断面中韧窝比例较低且尺寸相对较小,体现出该TiAl合金的塑性随着温度的下降而降低。

图8为不同温度条件下不同应变幅疲劳试件



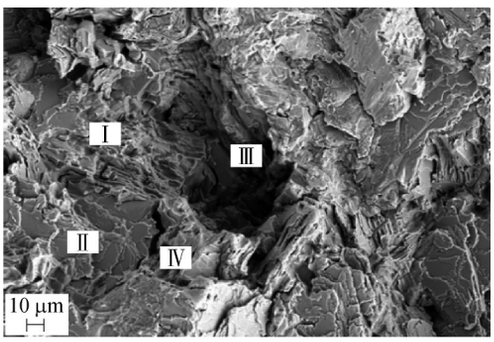
(a) t=750℃ (40×)



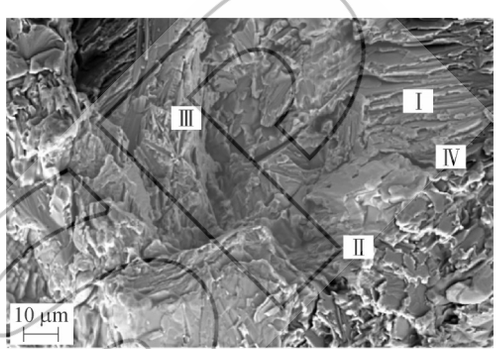
(b) t=400℃ (40×)

图 7 断口典型宏观形貌

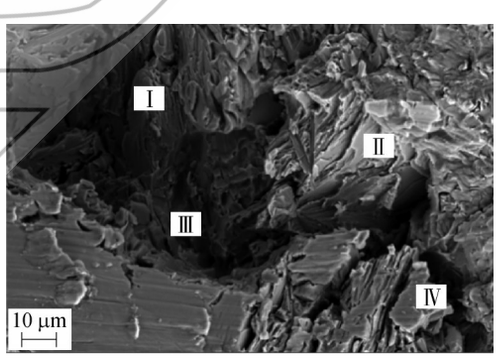
Fig.7 Typical macro fracture morphology



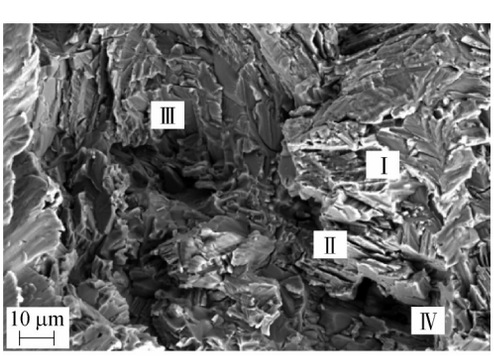
(a) t=750℃, ε=0.44% (400×)



(b) t=750℃, ε=0.60% (800×)



(c) t=400℃, ε=0.44% (800×)



(d) t=400℃, ε=0.60% (800×)

图 8 断口高倍形貌图片

Fig.8 High magnification fracture image

的高分辨率断口形貌图像，图中标识的Ⅰ表示跨层断裂，Ⅱ为层间断裂，Ⅲ为穿晶断裂，Ⅳ为晶界分离。750 ℃条件下试件断口(图 8(a)和图 8(b))上出现的韧窝较为规整，片层状组织以跨层断裂为主，出现了晶界分离，小应变幅条件下韧窝周围层间断裂比例更大，而穿晶断裂现象随应变幅增加而增多。400 ℃条件下的试件断口(图 8(c)和图 8(d))准解理断裂特征比较明显，韧窝形状变得更加尖锐和不规则，晶界分离现象同样存在，穿晶断裂现象随着应变幅的增加变得更加显著，同时，虽然层片状组织也以跨层断裂为主，但在小应变幅条件下，韧窝边缘的层间断裂比较明显，而在大应变幅条件下，层间断裂现象变得偶尔可见。疲劳试件的断口形貌充分表明，该 TiAl 材料的断裂机理与温度相关性较大，750 ℃条件下材料的韧性特征更加明显，而 400 ℃条件下呈现出一定的脆性断裂特征，与文中第 2.1 节中的结论是一致的。这也提醒将该 TiAl 合金应用于动力涡轮叶片时，需特别关注材料低韧性对大应力高梯度榫头部位的影响。

另外，针对不同温度下试件所做的能谱(energy dispersive spectroscopy，EDS)分析结果如表 4

所示。可以看出,在750 ℃条件下断口中氧元素质量分数几乎是400 ℃条件下的2倍,所选取试件的寿命能够表明这种氧化程度的差异并非由于时间效应造成的,而是由于该TiAl材料的在高温(750 ℃)下的氧化速度显著加快。这个结果提示将该材料应用于涡轮叶片时,需特别关注叶身部位的长时抗氧化性能,必要时应考虑增加抗氧化涂层。

表4　不同温度下断口元素质量分数

Table 4　Element mass fractions in fracture surfaces at different temperatures

温度/℃	ε/%	质量分数/%		
		Ti	Al	O
400	0.44	66.85	26.09	7.06
750	0.60	61.39	23.40	15.21

3　低循环疲劳寿命预测

3.1　Cruse-Meyer模型

Cruse-Meyer模型是PW提出的一种低循环疲劳寿命预测模型[19],该模型能够同时考虑应变幅值和平均应力对低循环疲劳寿命的影响。其中,平均应力对材料寿命的影响通过指数形式进行显式表达。Cruse-Meyer模型表达式为

$$N_f = A\Delta\varepsilon^B 10^{C\sigma_m} \tag{2}$$

其中A、B、C分别为模型的材料常数,$\Delta\varepsilon$为应变范围,σ_m为平均应力。由于该模型表达形式简单,材料常数少,目前在PW和MTU发动机公司的盘类转子件疲劳寿命设计中得到应用,使用经验表明:该模型配合少量拟合参数可以实现低循环疲劳寿命的准确预测[19]。由于TiAl合金的应用研究在国内尚在探索阶段,材料数据较为稀少,期望选取较少材料常数的寿命模型,以尽量提高寿命预测精度。

结合TiAl合金稳定循环的应力-应变响应曲线(图3),提取不同温度、应变幅值下试样的平均应力,结果如表5所示。可以看出,尽管试验过程中的应变比为−1,但是由于材料的拉压不对称性,仍产生了较小的非零平均应力。

通过拟合TiAl合金不同温度、不同应变幅值下的低循环疲劳寿命,可以获取Cruse-Meyer模型中的材料常数。不同温度下Cruse-Meyer模型材料常数拟合结果如表6所示。基于Cruse-Meyer模型的TiAl合金低循环疲劳预测寿命与试验寿命的对比结果如图9所示,不同温度、不同载荷下的寿命预测结果基本在2倍分散带内。但是值得注意的是Cruse-Meyer模型对温度较低(400 ℃)且机械载荷较大时的疲劳寿命的预测精度不高。这就限制了该模型在涡轮叶片榫头部位的应用,动力涡轮叶片榫头温度相对较低且需要

表5　应变比 R=−1 下的平均应力

Table 5　Average stress under strain ratio R=−1

温度/℃	ε/%	σ_m/MPa
400	0.44	−26.0
	0.50	−20.0
	0.55	−9.5
	0.60	−11.5
	0.80	−14.0
	0.70	−12.5
750	0.35	−8.5
	0.40	1.5
	0.44	−11.5
	0.50	−6.0
	0.60	−7.0

表6　Cruse-Meyer模型材料常数

Table 6　Material constants in Cruse-Meyer model

温度/℃	A	B	C
400	1.27×10^{-5}	−4.28	−0.024
750	2.17×10^{-17}	−9.96	0.031

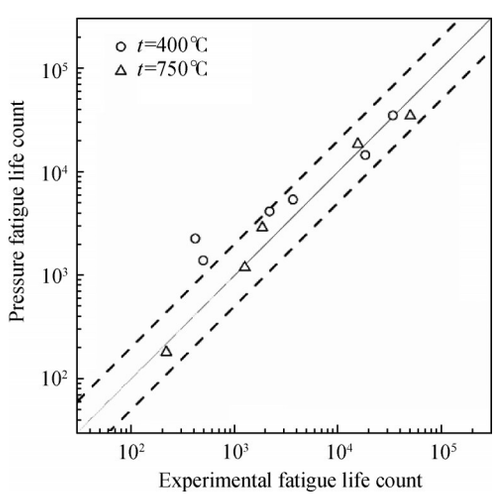


图9　基于Cruse-Meyer模型的低循环疲劳寿命预测

Fig.9　LCF life prediction based on Cruse-Meyer model

承载大的离心载荷，低循环疲劳是其主要的失效模式。

3.2 Manson-Coffin模型

为了对比Cruse-Meyer模型在TiAl合金上的适用性，本文选取工程广泛应用的Manson-Coffin模型作为基准模型。Manson-Coffin寿命预测模型的数学表达式为[20-22]

$$\Delta\varepsilon/2=(\sigma_f'/E)(2N_f)^b+\varepsilon_f'(2N_f)^c \tag{3}$$

其中σ_f'为疲劳强度系数，b为疲劳强度指数，表示材料损坏载荷作用下弹性疲劳特性；ε_f'疲劳延性系数，c为疲劳延性指数，表示材料循环塑性疲劳损伤特性。

Manson-Coffin模型中的4个材料常数可以基于唯象的经验公式进行估算[20-22]。通过最小二乘法，可以得到不同温度下Manson-Coffin模型中的材料常数如表7所示，基于Manson-Coffin模型的TiAl合金低循环疲劳预测寿命与试验寿命的对比结果如图10所示。可以看出，不同温度、不同载荷下的寿命预测结果基本在2倍分散带内。

表7 Manson-Coffin模型材料常数

Table 7 Material constants in Manson-Coffin model

温度/℃	σ_f'	b	ε_f'	c
400	927.4	0.047 17	0.027 4	−0.330 3
750	652.6	0.042 93	0.008 94	−0.263 4

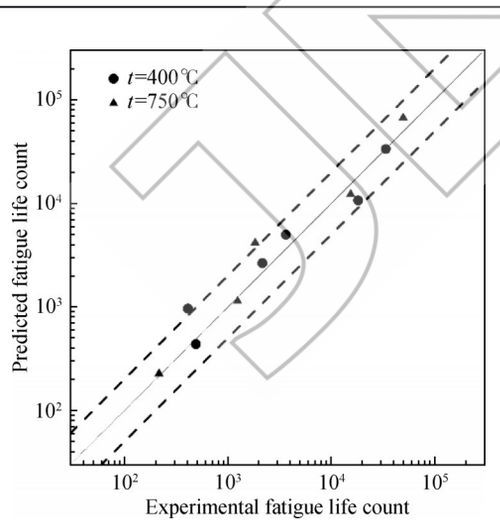


图10 基于Manson-Coffin模型低循环疲劳寿命预测结果

Fig.10 LCF life prediction based on Manson-Coffin model

相较于Cruse-Meyer模型，Manson-Coffin模型在宽应变范围下的疲劳寿命预测精度更高。虽然Cruse-Meyer模型材料常数少，且显式形式使寿命计算更加方便，但由于牺牲了预测精度，尤其是低温大载荷条件下的预测精度，这表明该模型不宜直接用于该TiAl合金叶片寿命预测。

4 结 论

1）针对TiAl合金Ti-45Al-4Nb-1Mo-0.5B开展了400 ℃和750 ℃下的应变控制低循环疲劳试验，TiAl合金在应变循环载荷下具有较稳定的循环特性，未出现明显的循环软化或循环硬化现象，不同温度下的低循环疲劳寿命与总应变幅值大致呈对数线性关系。

2）应力应变响应曲线和疲劳试件断口分析表明，该合金在400 ℃下表现出更加明显的脆性断裂特征，随应变幅的增大，穿晶断裂现象更加显著，层状组织的层间断裂大幅减少；而在750 ℃下表现出韧性断裂特征，层状组织也以跨层断裂为主，并且随应变幅增加层状组织的层间断裂也出现减少现象。另外，合金在高温条件下的疲劳断口氧化速度显著加快。

3）根据试验结果，采用Ramberg-Osgood方程准确模拟了该TiAl合金在400 ℃和750 ℃下的循环应力-应变关系，并获取了Manson-Coffin模型的疲劳强度系数、疲劳强度指数等材料常数。

4）Cruse-Meyer模型虽然具有结构形式简单和材料常数少的优点，但由于在榫头部位服役条件下的精度不高，应用于该TiAl合金仍需进一步修正。

参考文献：

[1] HODGE A M, HSIUNG L M, NIEH T G. Creep of nearly lamellar TiAl alloy containing W[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(5): 411-415.

[2] ZHANG S Z, ZHANG C J, DU Z X, et al. Microstructure and tensile properties of hot fogred high Nb containing TiAl based alloy with initial near lamellar microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 16-21.

[3] WEN Y F, SUN J. Generalized planar fault energies and mechanical twinning in gamma TiAl alloys[J]. Scripta Materialia, 2013, 68(9): 759-762.

[4] KITASHIMA T, KAWAMURA T. Prediction of oxidation behavior of near: α titanium alloys[J]. Scripta Materialia, 2016, 124: 56-58.

[5] DONG C, YU H, JIAO Z, et al. Low cycle fatigue, creep and creep-fatigue interaction behavior of a TiAl alloy at high temperatures[J]. Scripta Materialia, 2018, 144: 60-63.

[6] 杨益，党明珠，李伟，等. 激光选区熔化钛铝合金裂纹形成机理及抑制研究[J]. 机械工程学报，2020，56(3)：181-188.
YANG Yi, DANG Mingzhu, LI Wei, et al. Study on cracking mechanism and inhibiting process of TiAl alloys fabricat-

ed by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3):181-188.(in Chinese)

[7] 王茂松,杜宇雷.增材制造钛铝合金研究进展[J].航空学报,2021,42(7):625263.1-625263.24.
WANG Maosong, DU Yulei. Research progress of additive manufacturing of TiAl alloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 625263.1-625263.24.(in Chinese)

[8] 于慧臣,董成利,焦泽辉,等.一种TiAl合金的高温蠕变和疲劳行为及其寿命预测方法[J].金属学报,2013,49(11):1311-1317.
YU Huichen, DONG Chengli, JIAO Zehui, et al. High temperature creep and fatigue behavior and life prediction method of a TiAl alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(11): 1311-1317.(in Chinese)

[9] BARTOLOTTA P, BARRETT J, KELLY T, et al. The use of cast Ti-48Al-2Cr-2Nb in jet engines[J]. The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society, 1997, 49(5): 48-50.

[10] HUANG S C, LATHAM N Y. Titanium aluminum alloys modified by chromium and niobium and method of preparation: US4879092[P]. 1989-11-07.

[11] 杨锐.钛铝金属间化合物的进展与挑战[J].金属学报,2015,51(2):129-147.
YANG Rui. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129-147.(in Chinese)

[12] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 876-881.

[13] BEWLAY B, NAG S, SUZUKI A, et al. TiAl alloys in commercial aircraft engines[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(4/5): 549-559.

[14] 董成利,胡晓安.一种TiAl合金的高温疲劳-蠕变交互力学行为与寿命预测方法[J].航空材料学报,2020,40(4):36-44.
DONG Chengli, HU Xiaoan. High temperature fatigue-creep interactive behavior and life prediction of a TiAl alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(4): 36-44.(in Chinese)

[15] 张部声,祝济之,史剑,等.某型钛铝合金航空发动机叶片高温高周振动疲劳实验[J].航空动力学报,2020,35(6):1169-1175.
ZHANG Busheng, ZHU Jizhi, SHI Jian, et al. Test of vibration fatigue for the TiAl alloy aeroengine blade at high temperature and high cycle[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1169-1175.(in Chinese)

[16] ZHANG B, WANG R, HU D, et al. Stress-controlled LCF experiments and ratcheting behaviour simulation of a nickel-based single crystal superalloy with[001] orientation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 34(8): 112-121.

[17] RECINA V, LUNDSTRM D, KARLSSON B. Tensile creep, and low-cycle fatigue behavior of a cast γ-TiAl-based alloy for gas turbine applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2002, 33(9): 2869-2881.

[18] 梁泽芬,张俊喜,易湘斌,等.β/γ三相钛铝合金Ti-43Al-8.5V-Y的应变疲劳性能[J].化工机械,2020,47(1):28-32.
LIANG Zefen, ZHANG Junxi, YI Xiangbin, et al. Strain fatigue behavior of β/γ Ti-43Al-8.5V-Y alloy[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2020, 47(1): 28-32.(in Chinese)

[19] CRUSE T A, MEYER T G. A cumulative fatigue damage model for gas turbine engine disks subjected to complex mission loading[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1979, 101(4): 563-571.

[20] MANSON S S. Fatigue: a complex subject-some simple approximations[J]. Experimental Mechanics, 1965, 5(4): 193-226.

[21] 王延荣,杨顺,李宏新,等.总应变寿命方程中疲劳参数的确定和寿命预测[J].航空动力学报,2018,33(1):1-14.
WNAG Yanrong, YANG Shun, LI Hongxin, et al. Determination of fatigue parameters in total strain life equation and life prediction[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(1): 1-14.(in Chinese)

[22] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京:国防工业出版社,2003.

(编辑:王碧珺)