

# 取向相关的单晶高温合金低周疲劳寿命 评估方法

隋天校<sup>1</sup>, 石多奇<sup>1</sup>, 王相平<sup>2</sup>, 杜伟<sup>3</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航天科工集团有限公司 北京空天技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 为研究单晶(SC)高温合金低周疲劳(LCF)性能各向异性规律,收集了SC7-14-6、DD3、PWA1480、Rene N4与DD6共5种单晶合金的低周疲劳试验数据,校验了文献中单晶合金不同晶体取向的弹性模量计算方法,利用不同取向的弹性模量对总应变幅进行修正,提出了一种简单的适用于单晶合金不同取向的低周疲劳损伤参量,进而形成了取向相关的单晶合金低周疲劳寿命评估方法,利用上述5种合金的试验数据对方法进行了验证。结果表明:弹性模量是单晶合金LCF性能各向异性的重要影响因素;文献中的不同晶体取向弹性模量换算方法较为可靠;所提低周疲劳寿命评估方法的预测结果大多在2倍分散带内。此方法形式简单、效果显著,较为适合工程应用。

**关 键 词:** 取向相关;低周疲劳(LCF);单晶(SC)高温合金;弹性模量;寿命评估方法

**中图分类号:** V232.4

**文献标志码:** A

## Orientation-dependent low-cycle fatigue life evaluation method for single crystal superalloys

SUI Tianxiao<sup>1</sup>, SHI Duoqi<sup>1</sup>, WANG Xiangping<sup>2</sup>, DU Wei<sup>3</sup>, YANG Xiaoguang<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Beijing Aerospace Technology Institute,

China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In order to investigate the anisotropy of low-cycle fatigue (LCF) properties of single crystal (SC) superalloys, the LCF experimental data of SC7-14-6, DD3, PWA1480, Rene N4 and DD6 were collected from literatures. The calculation method of elastic modulus of SC superalloys was verified. The elastic modulus of different orientations was introduced to modify the total strain amplitude. A simple expression of LCF damage parameter was proposed, which was suitable for different crystallographic orientations of single crystal superalloys. Furthermore, an orientation-dependent LCF life evaluation method was formed. The experimental data

**收稿日期:** 2020-12-04

**基金项目:** 国家科技重大专项(2017-IV-0012-0049)

**作者简介:** 隋天校(1993-),男,博士生,主要从事高温结构强度与疲劳断裂研究。

**引用格式:** 隋天校,石多奇,王相平,等. 取向相关的单晶高温合金低周疲劳寿命评估方法[J]. 航空动力学报,2021,36(10): 2139-2148. SUI Tianxiao, SHI Duoqi, WANG Xiangping, et al. Orientation-dependent low-cycle fatigue life evaluation method for single crystal superalloys[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(10): 2139-2148.

of the above five alloys were used to validate this method. The results showed that: the elastic modulus was an important factor influencing the anisotropy of SC superalloys' LCF performance; the elastic modulus conversion method among different orientations in literature was reliable; most prediction results of the proposed method were within a factor of two. The proposed method is quite simple and effective, and it is suitable for engineering applications.

**Key words:** orientation-dependent; low-cycle fatigue(LCF);  
single crystal (SC) superalloys; elastic modulus; life evaluation method

单晶高温合金具有优异的高温力学性能,因此被广泛用于制作先进燃气涡轮发动机的涡轮叶片<sup>[1-2]</sup>,低循环疲劳失效是其高温高应力区使用寿命的主要限制之一。涡轮叶片作为发动机的耐久关键件,设计准则<sup>[3]</sup>规定其在发动机整个寿命周期内要提供足够的低循环疲劳寿命。单晶高温合金为各向异性材料,不同晶体取向的低周疲劳性能差别很大,而先进发动机涡轮叶片带有气膜孔与冷却通道,其局部的应力状态复杂,造成单晶叶片的低循环寿命评估难度较大,目前在工程设计领域尚鲜有成熟有效的方法可以考虑晶体取向对单晶叶片低循环疲劳性能的影响。

国内外针对单晶高温合金低循环疲劳性能各向异性开展了大量工作<sup>[4-22]</sup>,考虑晶体取向影响的低循环疲劳寿命模型可大致分为3类:第1类<sup>[4,7]</sup>在寿命评估方程中引入1个与晶体取向相关的取向因子,借助该因子反映低循环疲劳性能的各向异性。第2类<sup>[4,6,8]</sup>是采用“等效应力/应变”的寿命模型,此类模型将各向异性矩阵引入等效应力/应变的表达式,以等效应力/应变为损伤参量评估低循环疲劳寿命。第3类<sup>[4,7,9]</sup>是将“滑移系上的分解剪切应力/非弹性应变”作为疲劳损伤参量的寿命模型。

南京航空航天大学姚卫星教授团队<sup>[4]</sup>对各类镍基单晶合金低循环疲劳寿命模型进行了评述,发现至今尚缺乏机理完整、适用性高的镍基单晶合金疲劳寿命模型。北京航空航天大学石多奇教授团队<sup>[5-8]</sup>利用上述3类方法评估了镍基高温合金(DD3、DD6等)不同取向的疲劳寿命,各种模型预测结果良好。北京航空航天大学王荣桥教授团队<sup>[9]</sup>将滑移系上的非弹性应变能密度作为疲劳损伤参量,预测了DD6合金3个典型取向的低周疲劳寿命,大部分寿命预测结果分布在2倍分散带内。西北工业大学岳珠峰教授团队<sup>[10-11]</sup>通过引入晶体取向和应变率参数,对Lall-Chin-Pope模型进行了修正,成功预测了DD3高温合金5种不同

取向的疲劳寿命。西北工业大学陆山教授团队<sup>[12]</sup>同时考虑滑移系上的最大剪应力范围、最大剪应变范围、应力比和法向应变,提出了多因素的低周疲劳(LCF)寿命分析模型,提高了预测精度。清华大学陈宏等<sup>[13]</sup>在寿命预测方程中引入晶体取向函数,成功预测了DD3和PWA1480单晶合金的疲劳寿命。此外,国内中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院<sup>[14]</sup>、中国航空发动机集团有限公司北京航空材料研究院<sup>[15]</sup>、东北大学<sup>[16]</sup>与中国科学院金属所<sup>[16]</sup>均对单晶高温合金低循环疲劳性能各向异性开展过研究。

美国航空航天局(NASA)学者Swanson等<sup>[17]</sup>将各类疲劳寿命评估模型用于预测PWA1480合金的疲劳寿命,发现将八面体滑移系的最大分解切应力范围作为疲劳损伤参量,模型可以较好描述不同取向的疲劳寿命。美国NASA学者Gabb等<sup>[18-19]</sup>测试了PWA1480与Rene N4单晶高温合金不同晶体取向的低循环疲劳寿命,发现弹性模量( $E$ )较低的晶体取向其低循环疲劳性能较好。美国Howmet公司的Dalal等<sup>[20]</sup>对SC7-14-6单晶合金力学性能开展了系统性研究,结果显示“将总应变范围与弹性模量乘积作为疲劳损伤参量可大致统一此合金不同晶体取向的低循环疲劳性能”。英国布里斯托大学研究者Li等<sup>[21-22]</sup>的研究显示“弹性模量各向异性是造成单晶合金不同取向的低循环疲劳性能差异显著的重要原因”,他们通过取向因子计算得到不同取向的弹性模量,将其引入疲劳模型,成功预测了SRR99与Rene N4合金不同取向的低循环疲劳寿命。

然而,形式简单的LCF模型往往脱离了疲劳机理,难以适用于多种单晶高温合金,无法同时准确预测多个晶体取向的LCF寿命;而反映损伤机理的疲劳模型通常含有大量材料参数或计算流程较为复杂,适用于不同晶体取向的LCF损伤参量不够简单实用,难以将其应用于工程结构设计。因此,工程界尚缺乏简单有效的方法来评估晶体

取向对单晶合金 LCF 性能的影响。

针对单晶合金 LCF 性能各向异性问题,本文收集了 5 种牌号的单晶高温合金试验数据,分析试验数据并总结其影响因素,验证了文献[22-23]中单晶高温合金不同晶体取向的弹性模量计算方法,提出了一种简单的适用于单晶高温合金不同晶体取向的疲劳损伤参量,形成了取向相关的低周疲劳寿命评估方法,并利用上述试验数据对所提方法进行了验证。

## 1 LCF 试验数据分析

### 1.1 LCF 性能各向异性影响因素分析

为探究晶体取向对单晶合金 LCF 性能的影响,收集了 SC7-14-6 等单晶高温合金不同取向的 LCF 试验数据及其弹性模量,如图 1 所示,图中  $N_f$

表示循环数,  $\Delta\epsilon_t/2$  表示总应变幅,  $E$  表示弹性模量。

SC7-14-6、DD3、PWA1480 合金的试验条件分别为  $t=982\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_e=0$ ;  $t=950\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_e=-1$ ;  $t=650\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_e=-1$ , 其中  $t$  为温度(摄氏温标),  $R_e$  为疲劳试验的应变比。图 1 中颜色代表单晶高温合金的晶体取向, 可发现: 尽管 3 种单晶合金的试验条件有所不同, 晶体取向对其低周疲劳性能影响均十分显著, 相同总应变幅下不同晶体取向试样的低周疲劳寿命可相差 10 倍以上。

结合图 1 中给出的弹性模量分析发现, 弹性模量越高的晶体取向, 其应变控制的低周疲劳性能越差, 文中收集的其他试验数据[8,17,19,24]同样符合此规律。因此, 弹性模量是单晶高温合金低周疲劳性能各向异性的重要影响因素。

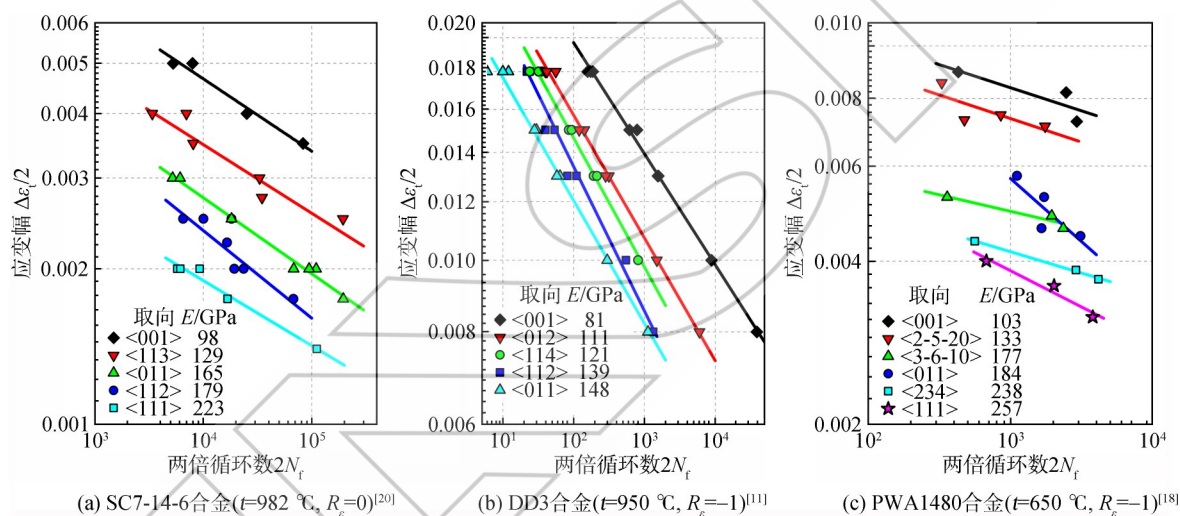


图 1 SC7-14-6、DD3 和 PWA1480 合金不同取向的低周疲劳性能及弹性模量

Fig.1 LCF properties and the elastic modulus of SC7-14-6, DD3 and PWA1480 with different orientations

### 1.2 温度影响分析

温度对单晶高温合金各向异性具有重要影响, 为探究温度对单晶合金低循环疲劳性能的影响, 收集了 Rene N4 与 DD6 合金在  $t=760\text{ }^\circ\text{C}$  和  $t=980\text{ }^\circ\text{C}$  下应变控制的低周疲劳数据, 如图 2。

通常温度升高, 单晶合金持久性能的各向异性减弱, 然而其低周疲劳性能并不遵循这一规律。Rene N4 与 DD6 合金的 LCF 性能在  $t=760\text{ }^\circ\text{C}$  和  $t=980\text{ }^\circ\text{C}$  下均表现出较强的各向异性。相同应变幅下,  $\langle 001 \rangle$  取向试样的低周疲劳寿命最长,  $\langle 111 \rangle$  取向试样的低周疲劳寿命最短, 单晶高温合金  $\langle 001 \rangle$  取向的弹性模量最小,  $\langle 111 \rangle$  取向的弹性模量最大, 这也进一步说明“弹性模量越高的晶体

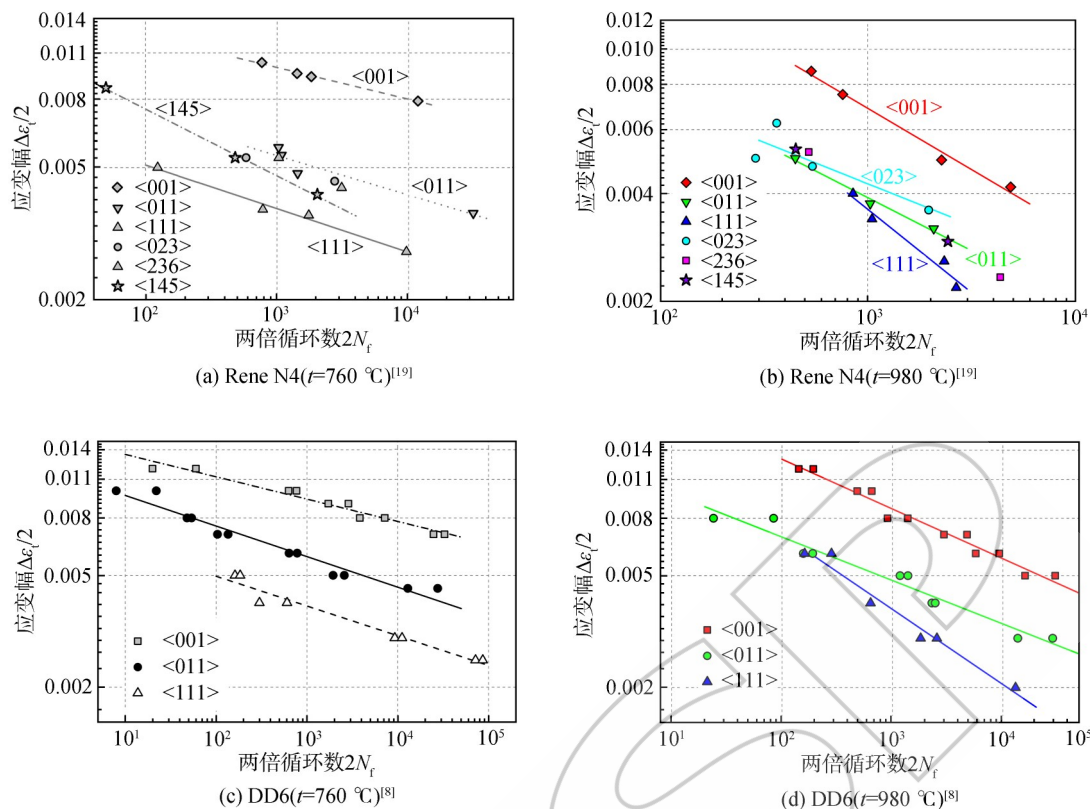
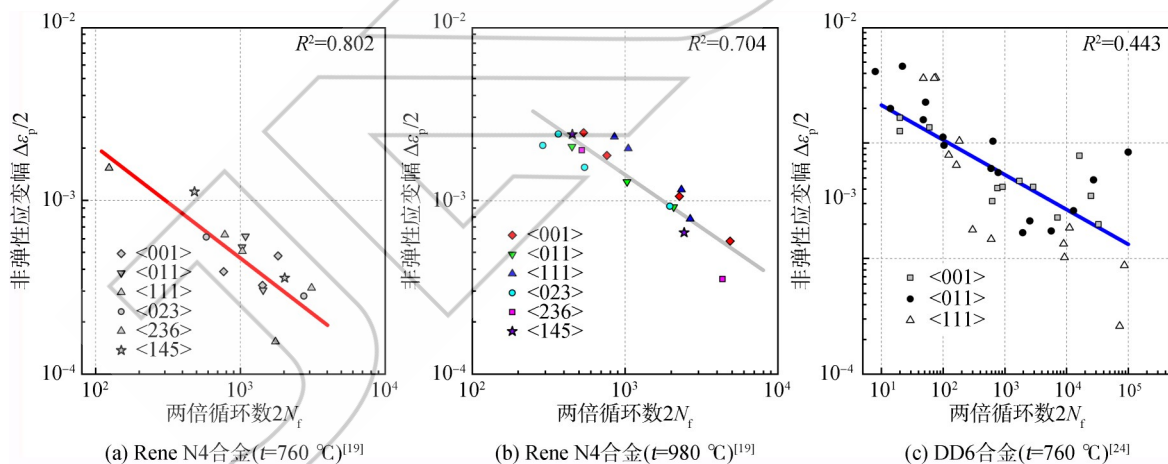
取向其应变控制低周疲劳性能越差”。

随着温度升高, 单晶合金晶体取向对其低周疲劳性能的影响并未显著减弱, 高温下单晶合金低周疲劳性能仍表现出强烈的各向异性。

### 1.3 “非弹性应变幅-寿命”曲线取向相关性分析

为探究单晶合金晶体取向对“非弹性应变幅-寿命”曲线的影响, 收集数据如图 3 所示。

图 3(a)、图 3(b) 分别表示 Rene N4 合金在  $t=760\text{ }^\circ\text{C}$  与  $t=980\text{ }^\circ\text{C}$  下不同取向的“非弹性应变幅-寿命”曲线, 图 3(c) 表示 DD6 合金在  $t=760\text{ }^\circ\text{C}$  下 3 个典型取向的“非弹性应变幅-寿命”曲线,  $\Delta\epsilon_p/2$  表示非弹性应变幅, 可观察到: 当选用“非弹性应变幅”作为损伤参量时, 两种单晶合金低周疲劳性能设计曲线的取向相关性并不明显, 但从整体上

图2 温度对单晶(SC)合金LCF性能各向异性影响( $R_e = -1$ )Fig.2 Influence of temperature on the anisotropy of the LCF properties of single crystal (SC) superalloys ( $R_e = -1$ )图3 Rene N4、DD6合金不同取向“非弹性应变幅-寿命”关系( $R_e = -1$ )Fig.3 “Inelastic strain amplitude-LCF life” relationship of Rene N4 and DD6 superalloys with different orientations ( $R_e = -1$ )

看试验数据的分散性相对较大。

为定量描述曲线对试验数据的拟合优度,计算了3组数据的判定系数 $R^2$ 。Rene N4合金在 $t=760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t=980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试验数据的 $R^2$ 分别为0.802与0.704,DD6合金在 $t=760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试验数据的 $R^2$ 为0.443。选择“非弹性应变幅”作为损伤参量时,文中两种单晶合金的低周疲劳数据均存在

一定的分散性,DD6合金数据分散性尤为显著。

因此,晶体取向对Rene N4和DD6单晶高温合金“非弹性应变幅-寿命”曲线的影响并不显著,这与部分学者的研究成果<sup>[4,25]</sup>一致。可选用“非弹性应变幅”作为疲劳损伤参量进而预测单晶合金低周疲劳寿命。然而相比于总应变幅,塑性应变幅较小且无法直接测量,并且此时试验数据分散

性较大,难以保证方法的精度。

## 2 弹性模量取向相关性分析

### 2.1 弹性模量计算模型及验证

弹性模量是单晶高温合金 LCF 性能各向异性的重要影响因素。单晶合金不同晶体取向的弹性模量不同,〈001〉取向弹性模量最小,〈111〉取向弹性模量最大。如图 4 所示,XYZ 轴构成全局坐标系,xyz 轴构成晶体坐标系。沿着全局坐标系 Z 轴加载,加载方向 OZ 在晶体坐标系中坐标为(u, v, w),载荷的大小为  $\sigma_z$ 。

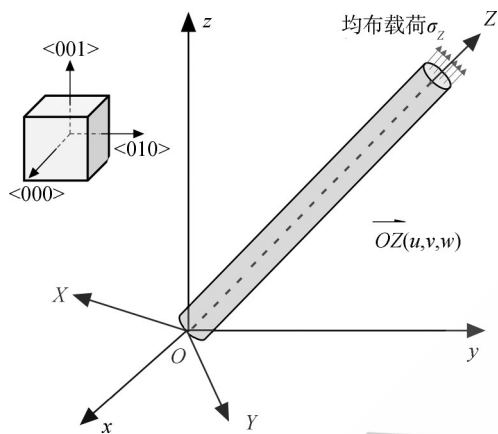


图 4 单晶合金不同取向弹性模量换算示意图

Fig.4 Illustration of the conversion process of elastic modulus of SC superalloys among different orientations

文献[22-23]利用应力、应变在不同坐标系间的转换关系及弹性本构方程推导了不同晶体取向的弹性模量表达式,〈uvw〉取向的弹性模量  $E_{uvw}$  可由单晶材料 3 个独立的弹性常数计算

$$\frac{\varepsilon_z}{\sigma_z} = \frac{1}{E} + \left( -\frac{2\mu}{E} - \frac{2}{E} + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{u^2v^2 + u^2w^2 + v^2w^2}{(u^2 + v^2 + w^2)^2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_{uvw}} = \frac{1}{E_z} = \frac{\varepsilon_z}{\sigma_z} \quad (2)$$

其中  $E$ 、 $G$ 、 $\mu$  分别为单晶高温合金〈001〉取向的弹性模量、切变模量与泊松比。经验证,  $E_{uvw}$  也可由〈001〉取向和〈111〉取向的弹性模量 ( $E_{001}$ ,  $E_{111}$ ) 换算,如式(3)所示。

$$\frac{1}{E_{uvw}} = \frac{1}{E_{001}} + 3 \left( \frac{1}{E_{111}} - \frac{1}{E_{001}} \right) \cdot \frac{u^2v^2 + u^2w^2 + v^2w^2}{(u^2 + v^2 + w^2)^2} \quad (3)$$

式(1)~式(3)建立在严格的数学基础上,式

(2)与式(3)是等效的,由式(3)可得:仅需测得单晶高温合金〈001〉取向与〈111〉取向的弹性模量,即可换算其他任意取向的弹性模量。

以下利用文献数据验证式(3)。文献[19]测试了 Rene N4 合金  $t=760^\circ\text{C}$  与  $t=980^\circ\text{C}$  下不同取向的弹性模量。利用〈001〉与〈111〉的弹性模量,结合式(3)计算其他非典型晶体取向的弹性模量,并与试验值进行对比,同理计算了 SC7-14-6 合金与 PWA1480 合金不同晶体取向的弹性模量,弹性模量计算值与试验值对比如图 5 所示。

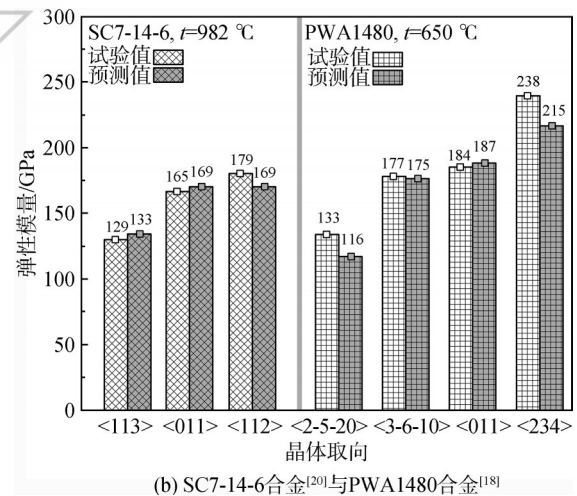
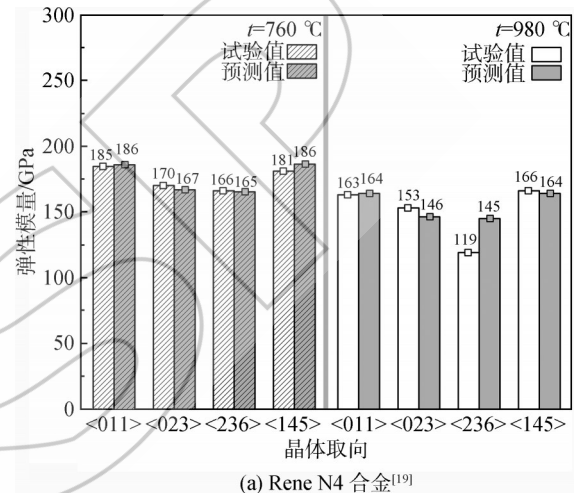


图 5 单晶合金弹性模量计算值与试验值对比

Fig.5 Comparison of the calculated and experimental values of elastic modulus of SC superalloys

Rene N4 合金  $t=760^\circ\text{C}$  下不同取向弹性模量预测值的误差不超过 3%;  $t=980^\circ\text{C}$  下〈236〉取向弹性模量预测值的误差为 22%, 其他取向误差不超过 5%。针对 SC7-14-6 合金与 PWA1480 合金不同取向弹性模量预测值的误差均不超过 13%。

因此,文献[22-23]推导得到的单晶合金不同取向弹性模量计算方法较为可靠,可利用此方法根据 $\langle 001 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 的弹性模量计算任意晶体取向的弹性模量,其结果能够保证一定的精度。

## 2.2 DD6合金不同取向弹性模量分布

文献[24]给出了 $t=760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下DD6单晶合金3个典型取向的循环应力应变曲线,由此得到其 $\langle 001 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 取向的弹性模量,结合 $t=980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $t=1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\langle 001 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 的弹性模量,利用式(3)求得DD6单晶合金此3种温度下任意晶体取

向的弹性模量,将多个非典型取向的弹性模量绘制于极射投影标准三角形中,插值处理得到DD6合金的弹性模量云图,如图6所示。

$\langle 001 \rangle$ 取向的弹性模量最低, $\langle 111 \rangle$ 取向的弹性模量最高,弹性模量最大值与最小值间大致相差2~3倍。随着温度升高,整体上弹性模量降低,但标准三角形中弹性模量分布规律并不改变,不同晶体取向间的弹性模量差异依然十分显著,这也是高温下单晶合金低周疲劳性能各向异性仍较为显著的原因之一。

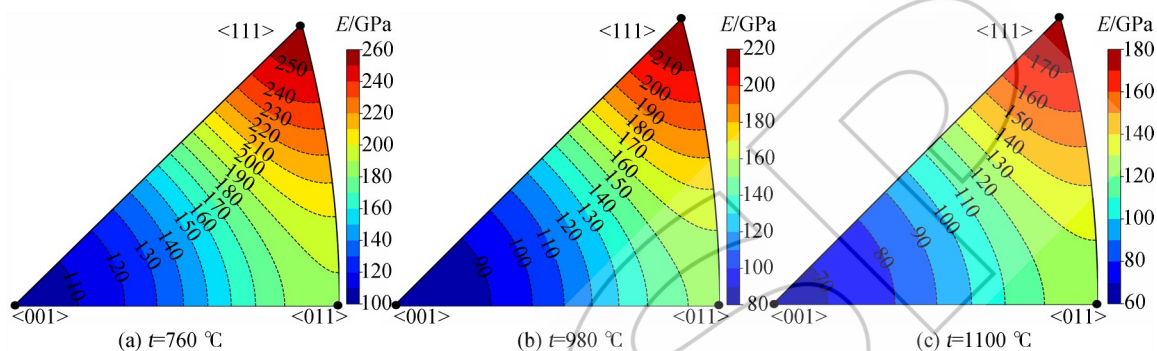


图6  $t=760, 980, 1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下标准三角形中DD6单晶合金弹性模量分布

Fig.6 Elastic modulus distribution of DD6 superalloys in standard stereographic triangle at  $t=760, 980, 1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 3 取向相关的LCF寿命模型

### 3.1 模型概述

弹性模量是单晶合金LCF性能各向异性的重要因素,弹性模量高的晶体取向其应变控制LCF性能差,这可能与循环耗散功相关。在应变控制条件下,若单晶合金某取向的弹性模量高,则该取向试样的循环耗散功通常偏大。

文献[24]给出了DD6合金在 $t=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\langle 001 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 的单调拉伸曲线,可将其近似为理想弹塑性材料,利用双线性模型描述其拉伸曲线,如图7所示。根据文献[24], $t=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下DD6合金 $\langle 001 \rangle$ 取向的弹性模量 $E_{001}=101\text{ GPa}$ ,其屈服应力 $\sigma_s^{001}=1\,020\text{ MPa}$ ; $\langle 111 \rangle$ 取向的弹性模量 $E_{111}=204\text{ GPa}$ ,其屈服应力 $\sigma_s^{111}=900\text{ MPa}$ 。这里不考虑包辛格效应,利用拉伸曲线构造迟滞回线,假设应变比 $R_e=-1$ ,应变幅 $\Delta\epsilon=1.2\%$ ,得到的迟滞回线为平行四边形,其中 $\epsilon_{\min}$ 为低循环疲劳试验过程中的最小应变, $\epsilon_{\max}$ 为其最大应变。

迟滞回线包围的面积即为循环耗散功,其表示每个循环中耗散的能量,可求得前述试验条件下的循环耗散功 $W$ 的解析表达式,如式(4)所示:

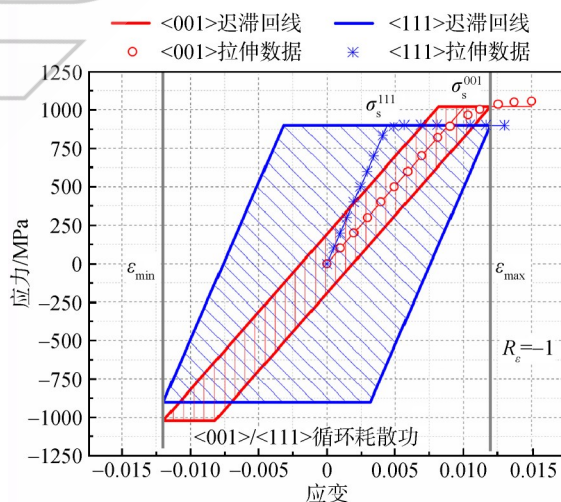


图7 DD6合金 $t=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\langle 001 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 取向的循环耗散功

Fig.7 Dissipated energy in one cycle of  $\langle 001 \rangle$  and  $\langle 111 \rangle$  orientation of DD6 superalloys at  $t=850\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$W = 4\sigma_s \left( \Delta\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right) \quad (4)$$

进而计算得到DD6单晶合金在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\langle 001 \rangle$ 取向在前述试验条件下的循环耗散功 $W_{001}$

数值大小为 7.756,  $\langle 111 \rangle$  取向循环耗散功  $W_{111}$  数值大小为 27.32, 约为  $W_{001}$  的 3.5 倍。

保持其他条件不变, 不断增大应变幅  $\Delta\epsilon$ , 若要满足  $W_{001} > W_{111}$ , 则  $\Delta\epsilon$  需大于 5.27%; 同理, 保持其他条件不变, 不断改变  $\sigma_s^{111}$ , 若要满足  $W_{001} > W_{111}$ , 则  $\sigma_s^{111}$  需大于 2 275 MPa 或小于 174 MPa。因此, 在合理的试验条件范围内  $\langle 111 \rangle$  取向的循环耗散功大于  $\langle 001 \rangle$  取向。根据文献[26]的测试结果, 不同晶体取向之间屈服应力的相对差异在 1/4 左右, 而单晶高温合金弹性模量的相对差异可达 2~3 倍。因此, 从总体上看, 在应变控制条件下, 若某晶体取向的弹性模量越大, 则其循环耗散功通常越大, 这与文献[20]对 SC7-14-6 合金的试验测试结果是一致的。

引入各取向的弹性模量对总应变幅进行修正, 并将其作为单晶高温合金的低周疲劳损伤参量, 如式(5)所示:

$$\frac{\Delta\epsilon_i^{\text{eq}}}{2} = \left( \frac{E_{uvw}}{E_{001}} \right)^n \frac{\Delta\epsilon_i}{2} \quad (5)$$

其中  $\Delta\epsilon_i^{\text{eq}}$  为等效总应变范围,  $E_{uvw}$  为  $\langle uvw \rangle$  取向的弹性模量,  $\Delta\epsilon_i$  为总应变范围,  $n$  为模型参数 ( $n \geq 0$ ), 反映了各向异性强弱。

$(E_{uvw}/E_{001})^n$  项主要用于考虑弹性模量各向异性带来的循环耗散功差异, 进而反映单晶高温合金低周疲劳性能的各向异性。当  $n=0$  时, 此项等于 1, 等效总应变幅即为总应变幅, 此时晶体取向对低周疲劳性能没有影响; 当  $n>0$  时, 由于  $\langle 001 \rangle$  取向的弹性模量最小, 故此项大于 1, 若某晶体取向的弹性模量越大, 此项取值越大, 即“等效总应变幅”越大, 体现出“弹性模量越大的晶体取向, 其低周疲劳性能越差”规律。 $n$  取值越大, 单晶合金低周疲劳各向异性越显著。而对于单晶高温合金的  $\langle 001 \rangle$  取向而言, 等效总应变幅始终与总应变幅相等。

将“等效总应变幅”作为低周疲劳损伤参量, 整理收集到的单晶高温合金低周疲劳试验数据, 如图 8 所示。尽管文中单晶合金材料牌号、试验条件有所不同, 但当选取“等效总应变幅”为低周

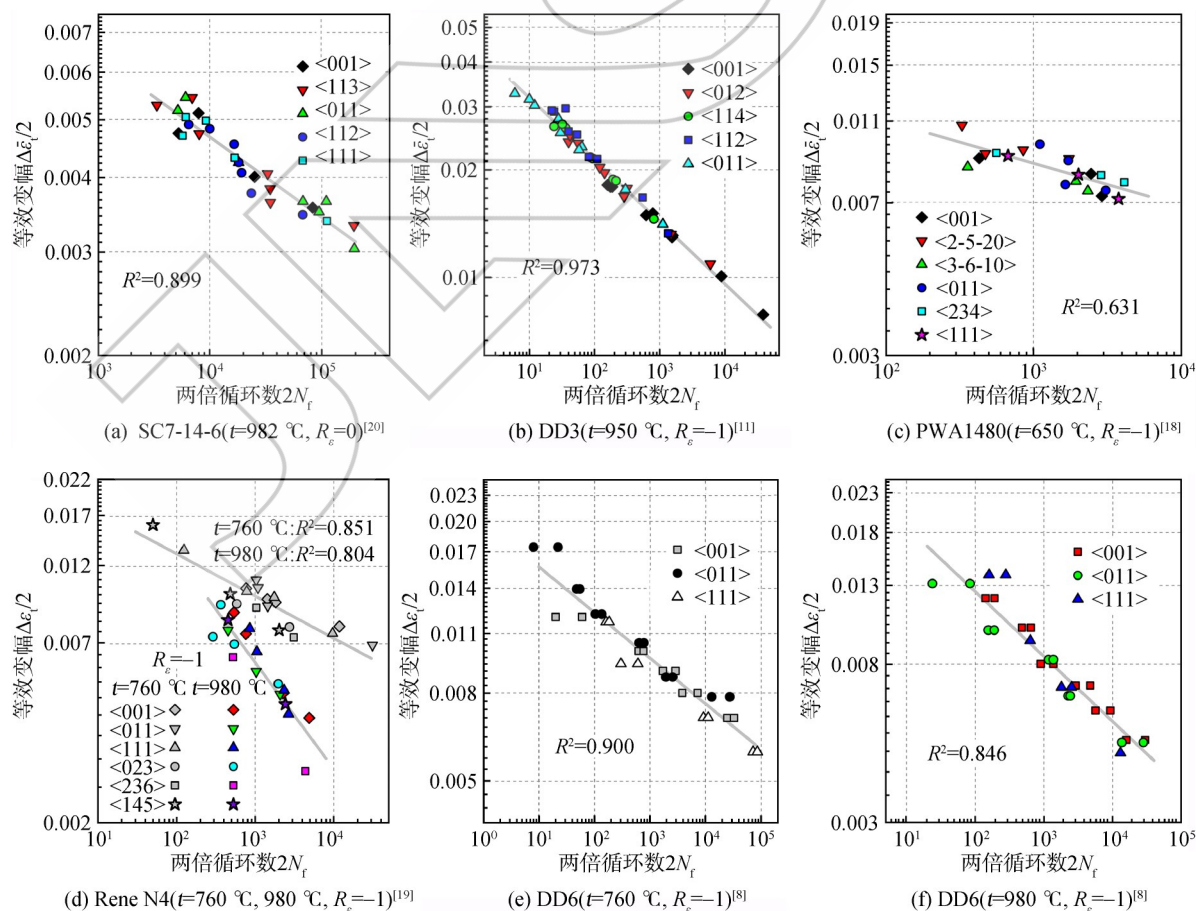


图 8 单晶高温合金不同取向的“等效应变幅-低周疲劳寿命”关系

Fig.8 “Equivalent total strain amplitude-LCF life” relationship of SC superalloys with different orientations

疲劳损伤参量时,单晶高温合金低周疲劳性能设计曲线均基本与取向无关。

5种单晶合金不同取向的弹性模量可从对应文献中找到或由式(3)计算,其“等效总应变幅”表达式中的参数 $n$ 取值如表1所示。

表1 单晶合金“等效总应变幅”参数 $n$ 取值

Table 1 Value of the parameter  $n$  in the “equivalent total strain” of single crystal superalloys

| 牌号       | 温度/℃ | $R_\epsilon$ | $n$     |
|----------|------|--------------|---------|
| SC7-14-6 | 982  | 0            | 1.096 1 |
| DD3      | 950  | -1           | 0.945 9 |
| PWA1480  | 650  | -1           | 0.894 6 |
| Rene N4  | 760  | -1           | 1.122 3 |
|          | 980  | -1           | 0.724 0 |
| DD6      | 760  | -1           | 0.950 4 |
|          | 980  | -1           | 0.843 3 |

在双对数坐标系中,图8中5种单晶合金的“等效总应变幅”与“两倍循环数”表现出极强的线性关系,因此可用式(6)描述两者间关系

$$\frac{\Delta\epsilon_t^{\text{eq}}}{2} = a(2N_f)^b \quad (6)$$

其中 $a$ 与 $b$ 为模型参数,需通过试验数据拟合。

为定量描述式(6)对文中试验数据的拟合优度,计算了图8中各类数据的判定系数 $R^2$ ,结果显示:除 $t=650\text{ }^\circ\text{C}$ 下的PWA1480合金外,其余单晶

合金试验数据的判定系数均在0.80以上。“等效总应变幅”基本统一了文中单晶合金特定试验条件下不同取向的低周疲劳性能。

### 3.2 单晶合金LCF寿命预测结果

可将式(6)进行简单数学变换后用于单晶高温合金低周疲劳寿命预测,如式(7)。

$$2N_f = \left( \frac{\Delta\epsilon_t^{\text{eq}}}{2a} \right)^{\frac{1}{b}} = c \left[ \left( \frac{E_{\text{arw}}}{E_{001}} \right)^n \frac{\Delta\epsilon_t}{2} \right]^d \quad (7)$$

其中 $c$ 、 $d$ 为模型参数,可用 $a$ 与 $b$ 进行表达,式(6)与式(7)并无本质区别。

利用收集到的试验数据拟合方程(式(6)、式(7))中的参数,其结果如图9所示,其中“ $\pm 2\times$ ”表示2倍寿命分散带,“ $\pm 5\times$ ”表示5倍寿命分散带,不同试验数据的晶体取向表示与右侧的极射投影三角形中,寿命方程中的参数 $a$ 、 $b$ 的取值如表2所示,部分牌号的参数 $n$ 列于表1。

图9中存在5类单晶高温合金数据,涉及8种试验条件,各类单晶合金共存在29种取向、209个低周疲劳试验数据。其中172个数据落在2倍分散带内,占全部试验数据的82.3%;有194个数据落在3倍分散带内,占全部试验数据的92.8%。文献[17]提供的PWA1480合金低周疲劳试验数据的参数 $n$ 取值为2.233 6,由于其 $R_\epsilon$ 并不统一,故此部分数据的寿命预测误差较大。

利用“等效总应变幅”构建的寿命预测方程仅包含3个待定参数,形式较为简单,且能够较为准确地预测单晶高温合金低周疲劳寿命。

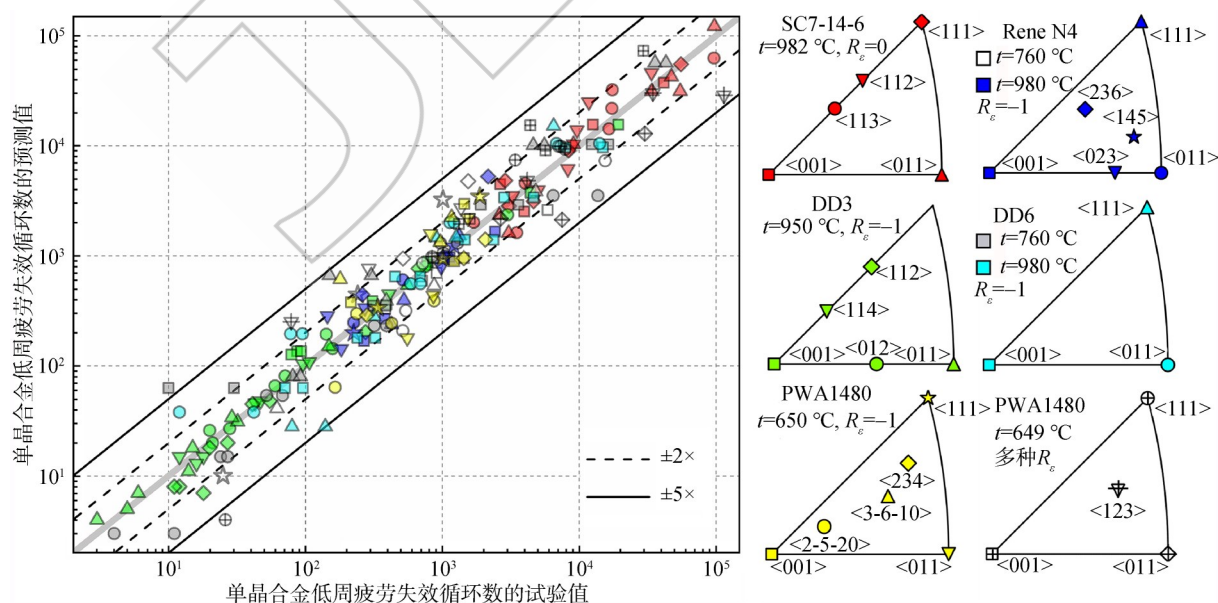


图9 SC7-14-6<sup>[20]</sup>、Rene N4<sup>[19]</sup>、DD3<sup>[11]</sup>、DD6<sup>[8]</sup>、PWA1480<sup>[17-18]</sup>低周疲劳寿命预测结果

Fig.9 Prediction results of the LCF lives of SC7-14-6<sup>[20]</sup>, Rene N4<sup>[19]</sup>, DD3<sup>[11]</sup>, DD6<sup>[8]</sup> and PWA1480<sup>[17-18]</sup>

表 2 单晶合金寿命预测方程参数  $a$  与  $b$  取值  
Table 2 Value of the parameter  $a$  and  $b$  in the life prediction equation of single crystal superalloys

| 牌号       | $t/^{\circ}\text{C}$ | 数据来源   | $a$      | $b$      |
|----------|----------------------|--------|----------|----------|
| SC7-14-6 | 982                  | 文献[20] | 0.016 12 | -0.135 1 |
| DD3      | 950                  | 文献[11] | 0.047 40 | -0.173 5 |
| PWA1480  | 650                  | 文献[18] | 0.017 64 | -0.102 3 |
|          | 649                  | 文献[17] | 0.025 50 | -0.148 4 |
| Rene N4  | 760                  | 文献[19] | 0.023 60 | -0.127 8 |
|          | 980                  | 文献[19] | 0.056 63 | -0.321 7 |
| DD6      | 760                  | 文献[8]  | 0.020 00 | -0.105 7 |
|          | 980                  | 文献[8]  | 0.027 87 | -0.174 1 |

4 结 论

本文收集了 SC7-14-6 等 5 种单晶合金不同取向的低周疲劳试验数据,分析试验数据,总结单晶高温合金低周疲劳性能各向异性的影响因素,形成了取向相关的单晶合金低周寿命评估方法,得到结论如下:

1) 弹性模量各向异性是单晶高温合金低周疲劳性能各向异性的重要影响因素。针对文中单晶高温合金,弹性模量越高的晶体取向其应变控制低周疲劳性能越差,这种现象可能与循环耗散功相关;而其“非弹性应变幅-低周疲劳寿命”曲线的晶体取向相关性并不显著。

2) 可根据  $\langle 001 \rangle$  与  $\langle 111 \rangle$  的弹性模量换算任意晶体取向的弹性模量。经验证,结果具有一定的可信度。随着温度升高,单晶高温合金的弹性模量整体上下下降,但极射投影标准三角形中弹性模量的分布规律并不改变,不同晶体取向间弹性模量差异仍然显著,高温下单晶高温合金低周疲劳性能仍具有显著的各向异性。

3) “等效总应变幅”可大致统一文中单晶合金不同取向的低周疲劳性能,以此为损伤参量的寿命方程可用于预测文中单晶合金不同取向的低周疲劳寿命,大部分预测结果分布在 2 倍分散带内。此方法仅包含 3 个待定系数,形式简单、效果较为显著,适于工程应用。

4)  $\langle 001 \rangle$  的弹性模量最低,  $\langle 111 \rangle$  的弹性模量最高。若仅仅从低周疲劳性能的角度考虑优化单晶涡轮叶片的结构设计,应使其主要的承力方向沿着单晶高温合金的  $\langle 001 \rangle$  晶体取向。

参考文献:

[1] 胡晓安,石多奇,庞学佳,等.某涡轮叶片热障涂层的寿命预测方法[J].航空动力学报,2018,33(1):48-53.  
HU Xiaolan, SHI Duoqi, PANG Xuejia, et al. Thermal barrier coating life prediction method for a turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(1):48-53. (in Chinese)

[2] 蒋康河,陈竞伟,荆甫雷,等.镍基单晶高温合金 DD6 气膜孔热机械疲劳试验[J].航空动力学报,2019,34(5):980-986.  
JIANG Kanghe, CHEN Jingwei, JING Fulei, et al. Thermo-mechanical fatigue on the nickel based single crystal superalloy DD6 with film cooling hole[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5):980-986. (in Chinese)

[3] 《航空涡轮、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》编委会.航空涡轮、涡扇发动机结构设计准则(研究报告):第 3 册叶片[M].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997:86-88.

[4] 李飘,姚卫星.镍基单晶合金低周机械疲劳寿命模型评述[J].材料导报,2020,34(5):9124-9131.  
LI Piao, YAO Weixing. A review of low cycle mechanical fatigue life models for nickel-based single crystal superalloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(5):9124-9131. (in Chinese)

[5] 石多奇,杨晓光,于慧臣.一种镍基单晶和定向结晶合金的疲劳寿命模型[J].航空动力学报,2010,25(8):1871-1875.  
SHI Duoqi, YANG Xiaoguang, YU Huichen. Fatigue life prediction model for nickel-based single crystal and directionally solidified superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8):1871-1875. (in Chinese)

[6] 潘东,杨晓光,胡晓安,等.镍基单晶合金叶片疲劳寿命预测方法研究[J].航空发动机,2014,40(3):45-48.  
PAN Dong, YANG Xiaoguang, HU Xiaolan, et al. Fatigue life prediction method of nickel-based single crystal blade[J]. Aeroengine, 2014, 40(3):45-48. (in Chinese)

[7] SHI Duoqi, HUANG Jia, YANG Xiaoguang, et al. Effects of crystallographic orientations and dwell types on low cycle fatigue and life modeling of a SC superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 49:31-39.

[8] DONG Chenli, YU Huichen, LI Ying, et al. Life modeling of anisotropic fatigue behavior for a single crystal nickel-base superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 61:21-27.

[9] 王荣桥,荆甫雷,胡殿印.基于临界平面的镍基单晶高温合金疲劳寿命预测模型[J].航空动力学报,2013,28(11):2587-2592.  
WANG Rongqiao, JING Fulei, HU Dianyin. Fatigue life prediction model based on critical plane of nickel-based single crystal superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(11):2587-2592. (in Chinese)

[10] 岳珠峰,陶仙德,尹泽勇,等.一种镍基单晶超合金高温低周疲劳的晶体取向相关性模型[J].应用数学和力学,2000,21(4):373-381.  
YUE Zhufeng, TAO Xiande, YIN Zeyong, et al. A crystallographic model for the orientation dependence of low cyclic fa-

- tigue property of a nickel-base single crystal superalloy[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2000, 21(4):373-381. (in Chinese)
- [11] YUE Z F, LU Z Z. The influence of crystallographic orientation and strain rate on the high-temperature low-cycle fatigue property of a nickel-base single-crystal superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 1998, 29(13):1093-1099.
- [12] 孙万超, 陆山. 多因素镍基单晶合金 LCF 寿命分析模型[J]. *机械强度*, 2013, 35(5):657-662.
- SUN Wanchao, LU Shan. LCF life model of single crystal alloys based on multivariate factors[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2013, 35(5):657-662. (in Chinese)
- [13] 陈宏, 蒋洪德. 一种镍基单晶合金高温低周疲劳寿命预测方法[J]. *机械强度*, 2015, 37(5):857-862.
- CHEN Hong, JIANG Hongde. Low cycle fatigue life prediction method for single crystal nickel-base superalloys at high temperatures[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015, 37(5):857-862. (in Chinese)
- [14] 罗辅欢, 卿华, 田洪宇, 等. 一种考虑各向异性的 DD6 单晶高温合金低周疲劳寿命预测方法[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2019, 32(6):41-44.
- LUO Fuhuan, QING Hua, TIAN Hongyu, et al. A method for predicting low cycle fatigue life of single-crystal high temperature alloy DD6 with anisotropy[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2019, 32(6):41-44. (in Chinese)
- [15] 李影, 苏彬, 吴学仁. 高温下取向对 DD6 单晶高温合金低周疲劳寿命的影响[J]. *航空材料学报*, 2001, 21(2):22-25.
- LI Ying, SU Bin, WU Xueren. Orientation dependence of low cycle fatigue life of single-crystal nickel-base superalloy DD6 under high temperature[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 21(2):22-25. (in Chinese)
- [16] LIU Liu, MENG Jie, LIU Jinlai, et al. Effect of crystal orientations on the low-cycle fatigue of a single-crystal nickel-based superalloy at 980 °C[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 32:381-390.
- [17] SWANSON G, ARAKERE N K. Effect of crystal orientation on analysis of single-crystal nickel-based turbine blade superalloy[R]. NASA/TP-2000-210074, 2000.
- [18] GABB T P, WELSCH G, MINER R V, et al. The low cycle fatigue deformation response of a single-crystal superalloy at 650 °C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1989, 108:189-202.
- [19] GABB T P, GAYDA J, MINER R V. Orientation and temperature dependence of some mechanical properties of the single-crystal nickel-base superalloy René N4: Part II low cycle fatigue behavior[J]. *Metallurgical Transactions: A*, 1986, 17(3):497-505.
- [20] DALAL R P, THOMAS C R, DARDI L E. The effect of crystallographic orientation on the physical and mechanical properties of an investment cast single crystal nickel-base superalloy[R]. Warrendale, US: Howmet Turbine Components Corporation, 1984.
- [21] LI S X, SMITH D J. High temperature fatigue-creep behavior of single crystal SRR99 nickel base superalloys: Part II fatigue-creep life behavior[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1995, 18(5):631-643.
- [22] LI S X, ELLISON E G, SMITH D J. The influence of orientation on the elastic and low cycle fatigue properties of several single crystal nickel base superalloys[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1994, 29(2):147-153.
- [23] 岳珠峰, 于庆民, 温志勋, 等. 镍基单晶涡轮叶片结构强度设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008:23-27.
- [24] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动机设计用材料数据手册: 第4册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010:306-322.
- [25] SEGERSALL M, LEIDERMARK D, MOVERARE J J. Influence of crystal orientation on the thermomechanical fatigue behavior in a single-crystal superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 623:68-77.
- [26] 张龙飞, 燕平, 赵京晨, 等. DD407 单晶高温合金 760 °C 屈服强度的 LCP 模型分析[J]. *金属学报*, 2013, 49(4):489-494.
- ZHANG Longfei, YAN Ping, ZHAO Jingchen, et al. Analyzing the yield strength of superalloy single crystal DD407 at 760 °C by LCP-model[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(4):489-494. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)