

# 基于临界平面法的镍基单晶高温合金高周疲劳寿命模型

王荣桥<sup>1,2</sup>, 李懋源<sup>1</sup>, 蒋康河<sup>1</sup>, 胡殿印<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;  
2. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 由于目前,国外已经基于八面体滑移系,采用临界平面法对镍基单晶高温合金〈001〉取向的高周疲劳寿命进行预测。然而,该方法未考虑〈111〉取向受载时滑移系参量的特点,所以不能较准确地预测镍基单晶高温合金〈111〉取向的高周疲劳寿命。为此,选取临界平面时综合考虑六面体、八面体滑移系,选定疲劳参量最大的滑移面作为临界平面,采用 SSR(shear stress range),CCB(Chu-Conle-Bonnen),Walls 寿命模型进行镍基单晶高温合金高周疲劳寿命预测,并根据 800℃下 DD6 镍基单晶高温合金〈001〉,〈011〉,〈111〉3 个取向的高周疲劳试验结果,对寿命模型的预测精度进行验证。结果表明:当基于两种滑移系预测镍基单晶高温合金的高周疲劳寿命时,寿命模型的拟合系数可达到 0.9134。

**关 键 词:** 镍基单晶高温合金; 高周疲劳; 寿命预测; 临界平面方法; 滑移系

**中图分类号:** V231.95      **文献标志码:** A

## High cycle fatigue life model of nickel-based single crystal superalloys based on critical plane approach

WANG Rong-qiao<sup>1,2</sup>, LI Mao-yuan<sup>1</sup>, JIANG Kang-he<sup>1</sup>, HU Dian-yin<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering,  
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;  
2. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength,  
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The high cycle fatigue life predication of the 〈001〉 orientation of nickel-based single crystal superalloys was studied by foreign scholars with critical plane approach based on octahedral slip system currently. However, without considering the characteristics of slip system parameters when the 〈111〉 orientation was loaded, the predication of high cycle fatigue life of the 〈111〉 orientation was inaccurate. Therefore hexahedral and octahedral slip systems was considered comprehensively when choosing the critical plane. Slid planes of maximum fatigue parameter could determine the position of critical plane, and the life models of the SSR (shear stress rang), CCB (Chu-Conle-Bonnen) and Walls were used for high cycle fatigue life prediction of single crystal superalloys. According to the results of high cycle fatigue test under 800℃ along 〈001〉, 〈011〉 and 〈111〉 orientations of DD6 nickel-based sin-

收稿日期:2015-06-25  
基金项目:国家自然科学基金(51375031);北京市科技专项(Z151100001615066)  
作者简介:王荣桥(1968—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事发动机结构强度可靠性、多学科优化设计等研究。  
引用格式:王荣桥,李懋源,蒋康河,等.基于临界平面法的镍基单晶高温合金高周疲劳寿命模型[J].航空动力学报,2017,32(3):677-682. WANG Rongqiao, LI Maoyuan, JIANG Kanghe, et al. High cycle fatigue life model of nickel-based single crystal superalloys based on critical plane approach[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 677-682.

gle crystal superalloys, the prediction accuracy of the life model was verified. The results indicate that the fitting coefficient of life model can reach to 0.9134 when the high cycle fatigue life of single crystal superalloys is predicted based on two slip systems.

**Key words:** nickel-based single crystal superalloys; high cycle fatigue; life prediction; critical plane approach; slip system

高周疲劳是燃气涡轮发动机部件失效的主要原因,其中,叶片振动导致的高周疲劳失效约占高周疲劳总失效事件的  $1/3^{[1-3]}$ . 涡轮叶片是航空发动机中的核心部件,由于工作环境恶劣并承受复杂的载荷,因此对制造材料的要求比较高. 而镍基单晶高温合金(下文简称单晶)拥有较好的高温强度、优异的蠕变和疲劳抗力以及良好的抗氧化性等特点<sup>[4-5]</sup>,因此广泛应用于航空发动机涡轮叶片的制造. 由于单晶的力学性能具有显著的各向异性,造成单晶不同取向的高周疲劳性能具有明显的差异<sup>[6]</sup>,所以一般采用临界平面法预测单晶高周疲劳寿命.

目前,国内外学者通过单晶 $\langle 001 \rangle$ 取向的高周疲劳试验<sup>[7-9]</sup>,观察到单晶的疲劳裂纹沿八面体滑移系进行扩展. 同时 Naik 等<sup>[10]</sup>基于八面体滑移系,结合  $593\text{ }^{\circ}\text{C}$  下单晶合金 PWA1484 的高周疲劳试验数据,较精确地预测了 $\langle 001 \rangle$ 取向的高周疲劳寿命,但是该模型未考虑单晶沿 $\langle 111 \rangle$ 取向受载时的情况. 并且研究表明<sup>[11-12]</sup>,当单晶的 $\langle 111 \rangle$ 取向受载时,其六面体平面的应变能大于八面体平面,而且变形沿着六面体滑移系的 $(100)$ 和 $(001)$ 平面进行,所以选择八面体平面作为临界平面不能真实地反映 $\langle 111 \rangle$ 取向受载变形的特点.

因此本文在分析单晶的高周疲劳时,所选用的临界平面并未只局限于八面体滑移系,而是在六面体和八面体滑移系范围内进行选取. 参考 DD6 镍基单晶高温合金在  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的高周疲劳试验结果,通过计算各个滑移面的应力和应变,得到了每一个滑移面的疲劳参量. 选取疲劳参量最大的滑移面为临界平面,再根据寿命模型,进而获得单晶的高周疲劳寿命曲线. 通过对比单晶现有的高周疲劳寿命预测方法,验证了基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型.

# 1 滑移系参量获取

每个滑移系由晶体中一个滑移面及该面上一个滑移方向组成,对于面心立方的单晶,存在 12 个八面体滑移系和 6 个六面体滑移系<sup>[13]</sup>. 对于八面体滑移系: $\alpha=0, r=1\sim 12$ ;对于六面体滑移系:

$\alpha=c, r=1\sim 6$ ,其中  $\alpha$  表示滑移系的类型, $r$  表示滑移系的编号. 设第  $r$  个滑移系的切应力为  $\tau^r$ ,切应变为  $\gamma^r$ ,正应力为  $\sigma^r$ ,正应变为  $\epsilon^r$ . 由于应力、应变张量皆为 2 阶张量,通过坐标变换可将应力张量和应变张量转化到第  $r$  个八面体或六面体滑移系上,具体转换形式如下:

$$\tau^r = (\mathbf{m}_r^a)^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_r^a \quad (1)$$

$$\gamma^r = (\mathbf{m}_r^a)^T \boldsymbol{\epsilon} \mathbf{n}_r^a \quad (2)$$

$$\sigma^r = (\mathbf{n}_r^a)^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_r^a \quad (3)$$

$$\epsilon^r = (\mathbf{n}_r^a)^T \boldsymbol{\epsilon} \mathbf{n}_r^a \quad (4)$$

其中  $\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\epsilon}$  为晶体坐标系下的应力张量和应变张量; $\mathbf{m}_r^a$  和  $\mathbf{n}_r^a$  分别为滑移方向矢量和面法向矢量.

在晶体坐标系下,单晶的弹性本构关系为<sup>[14]</sup>

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{12} & D_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{pmatrix} \quad (5)$$

方程中 3 个变量分别为  $D_{11}, D_{12}, D_{44}$ , 其中  $D_{11} = \frac{E(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+\mu)}, D_{12} = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}, D_{44} = G; E, \mu, G$  分别为单晶 $\langle 001 \rangle$ 取向的弹性模量、泊松比和切变模量.

通过式(1)~式(5)即可计算出各个滑移面的应力和应变,为进一步分析单晶的高周疲劳寿命做准备.

# 2 临界平面寿命模型

由于临界平面法可以把多轴的应力状态等效成单轴应力状态,因此比较普遍地应用在多轴疲劳的寿命分析中<sup>[15]</sup>. 由于单晶疲劳裂纹的萌生和扩展沿特定的滑移面进行<sup>[16]</sup>,所以选取滑移面作为临界平面,不仅可以解释单晶疲劳破坏的微观机理,并且还能较好地描述单晶各向异性的特点.

Naik 等<sup>[10]</sup>采用临界平面法,对单晶 $\langle 001 \rangle$ 取向的高周疲劳进行了研究,得出当选择八面体滑

移面为临界平面时, SSR (shear stress range), CCB(Chu-Conle-Bonnen)和 Walls 寿命模型可比较准确地预测单晶<001>取向的高周疲劳寿命.

其中 SSR 寿命模型则基于临界平面上的切应力幅  $\Delta\tau$ ,  $D_{ssr}$  为 SSR 寿命模型疲劳参量 (MPa), 具体形式如下:

$$D_{ssr} = \frac{\Delta\tau}{2}$$

(6)

CCB 寿命模型通过临界平面的应变能预测疲劳寿命. 模型中的变量包括两部分: 一部分为临界平面上的最大切应力  $\tau_{max}$  和最大切应变幅  $\gamma_a$ ; 另一部分为临界平面上的最大正应力  $\sigma_{max}$  和最大正应变幅  $\epsilon_a$ ,  $D_{ccb}$  为 CCB 寿命模型的疲劳参量 (无量纲).

$$D_{ccb} = 2\gamma_a\tau_{max} + \epsilon_a\sigma_{max}$$

(7)

Walls 寿命模型主要考虑了临界平面的应变. 该寿命模型由普惠公司提出, 模型中包含了临界滑移面上的最大切应变  $\gamma_{max}$  和最大正应变  $\epsilon_{max}$ ,  $D_{walls}$  为 Walls 寿命模型的疲劳参量 (无量纲). 在早期研究中, Walls 模型对单晶的低周疲劳寿命预测取得了比较好的预测结果<sup>[17]</sup>.

$$D_{walls} = 50\gamma_{max}\epsilon_{max}\left[\frac{\pi}{\arctan(\gamma_{max}/\epsilon_{max}) + \pi/2}\right]^{0.5}$$

(8)

### 3 基于八面体滑移系的高周疲劳寿命模型

为了探究上述临界平面寿命模型是否能够准确地预测单晶各个取向的高周疲劳寿命, 选择八面体滑移面为临界平面, 并参考 DD6 镍基单晶高温合金在 800℃ 下<001>, <011>, <111>取向的高周疲劳试验结果<sup>[18]</sup>, 对各个寿命模型的参数进行拟合. 其中, 试验频率为 83.3 Hz, 应力比  $R = -1$ , 试验环境为大气. 计算所需的材料常数如表 1 所示, 对于单晶 800℃ 下的材料常数, 可利用线性插值方法获取.

根据单晶在晶体坐标系下应力和应变的关系, 可计算每个试验数据在八面体滑移面上的应力和应变, 将计算结果代入上述寿命模型中, 从而得到每个数据对应的疲劳参量, 并采用幂函数形式, 拟合单晶高周疲劳寿命曲线.

拟合结果如图 1、图 2 和图 3 所示, 与 CCB 和 Walls 寿命模型相比, SSR 寿命模型的预测精度相对高一些. 总体比较而言, 3 个寿命模型的预测精度都不是很理想, 而且 3 组取向的试验结果在

不同的寿命模型中有不同程度的分散性, 其中, SSR 模型的数据分散性最小, CCB 模型次之, Walls 模型最大. 在 SSR 和 CCB 模型中, <111>与<001>, <011>取向的数据完全分离, 而<001>和<011>这两个取向的数据分散性却很小; 在 Walls 模型中, <111>的数据与<001>, <011>取向严重偏离, 寿命曲线的拟合度仅为 0.112 2. 由上述拟合结果可得, 只考虑八面体滑移系的临界平面法, 不

表 1 DD6 的弹性性能  
Table 1 Elastic properties of DD6

| 温度/℃ | $E/10^{10}$ Pa | $\mu$ | $G/10^{10}$ Pa |
|------|----------------|-------|----------------|
| 700  | 10.7           | 0.374 | 10             |
| 760  | 10.6           | 0.377 | 10.5           |
| 850  | 9.8            | 0.383 | 6.06           |
| 980  | 8.05           | 0.39  | 7.42           |

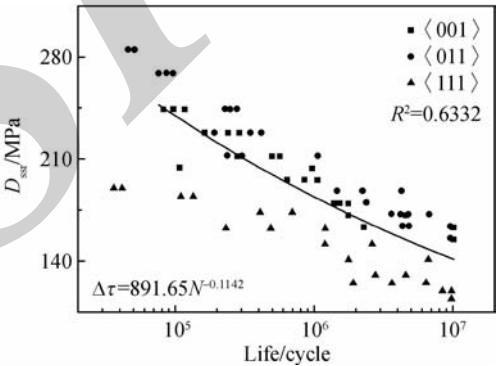


图 1 单晶<001>, <011>, <111>取向的 SSR 寿命曲线  
Fig. 1 SSR life curve of single crystal superalloys for <001>, <011> and <111> orientations

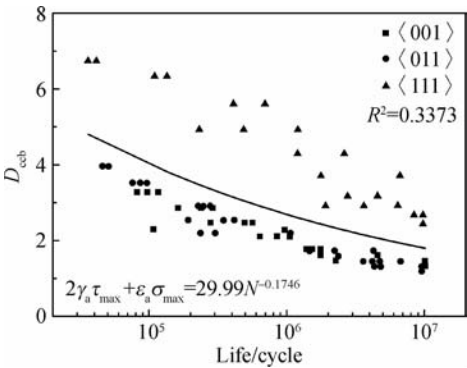


图 2 单晶<001>, <011>, <111>取向的 CCB 寿命曲线  
Fig. 2 CCB life curve of single crystal superalloys for <001>, <011> and <111> orientations

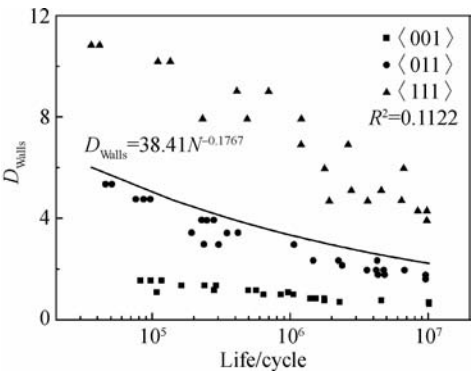


图 3 单晶<001>,<011>,<111>取向的 Walls 寿命曲线  
Fig. 3 Walls life curve of single crystal superalloys for <001>, <011> and <111> orientations

能准确地预测单晶<111>取向的高周疲劳寿命,因此应从单晶的<111>取向展开分析,对上述分析方法进行改进.

## 4 基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型

### 4.1 高周疲劳寿命模型计算流程

当单晶沿<111>取向受载时,其六面体滑移系的切应力及应变能要大于八面体系,而且变形沿着六面体滑移面进行. 因此为了更精确地预测单晶的高周疲劳寿命,本文在原有预测方法的基础上进行了改进,具体研究方法如图 4 所示,即在选取临界平面时,同时考虑了六面体和八面体滑移面. 从而根据单晶受载的取向,可确定每个滑移面

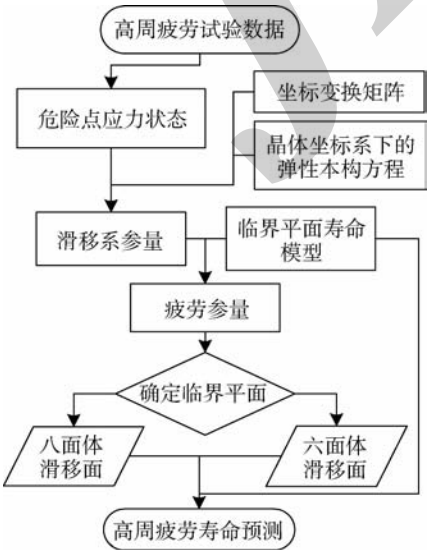


图 4 单晶高周疲劳寿命模型的计算流程  
Fig. 4 Calculation flow chart of high cycle fatigue life model of single crystal superalloys

的应力和应变,计算不同寿命模型在各滑移面的疲劳参量,并选取疲劳参量最大的滑移面作为临界平面,进而对单晶的高周疲劳寿命进行预测.

结果表明:在 SSR,CCB 和 Walls 寿命模型中,<001>和<011>取向的临界平面为八面体平面,<111>取向的临界平面为六面体平面,从而将单晶的高周疲劳问题演变到六面体和八面体平面进行分析.

### 4.2 基于两种滑移系的寿命模型验证

为了验证基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型的预测精度,参考相同的高周疲劳试验数据,并分别选择 SSR,CCB 和 Walls 寿命模型进行数据拟合,通过与之前的寿命预测方法作对比,对各个寿命模型的预测精度做出判断.

#### 4.2.1 SSR 寿命模型

图 5 表示以八面体滑移系为临界平面的 SSR 寿命模型的寿命曲线,而图 6 表示以六面体滑移系为临界平面的 SSR 寿命曲线. 比较图 1、图 5 和图 6 可得,单晶的晶体取向按照滑移平面划分之后,SSR 寿命模型的预测精度得到了显著地提高.

#### 4.2.2 CCB 寿命模型

图 7 表示以八面体滑移系为临界平面的 CCB 寿命曲线,而图 8 表示以六面体滑移系为临界平面的 CCB 寿命曲线. 比较图 2、图 7 和图 8 中曲线的拟合系数可得,CCB 寿命模型的预测精度也得到了显著地提高. 并且与 SSR 和 Walls 寿命模型的拟合结果相比,当采用基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型预测单晶的高周疲劳寿命时,CCB 寿命模型具有最高的预测精度.

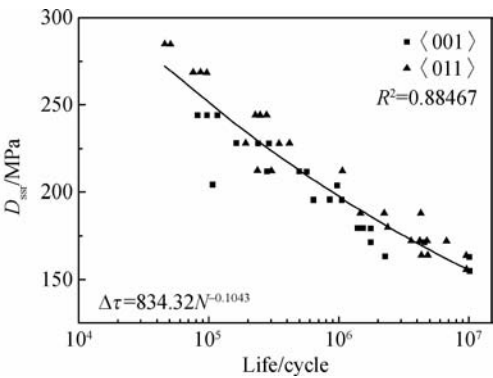


图 5 单晶<001>,<011>取向的 SSR 寿命曲线  
Fig. 5 SSR life curve of single crystal superalloys for <001> and <011> orientations

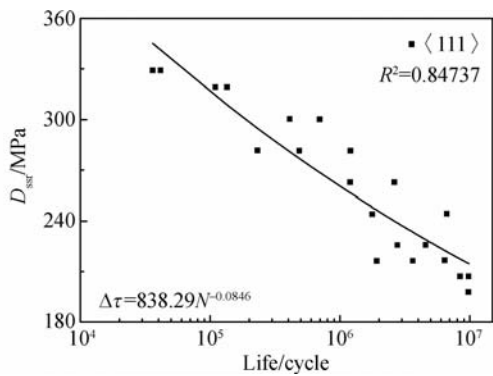


图 6 单晶<111>取向的 SSR 寿命曲线  
Fig. 6 SSR life curve of single crystal superalloys for <111> orientations

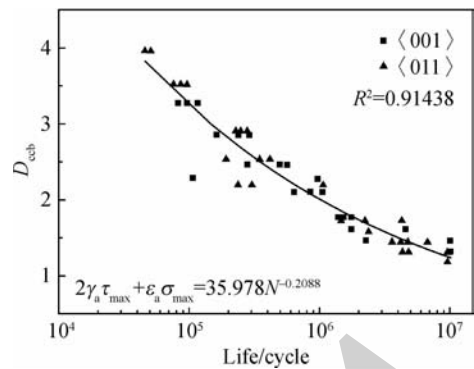


图 7 单晶<001>,<011>取向的 CCB 寿命曲线  
Fig. 7 CCB life curve of single crystal superalloys for <001> and <011> orientations

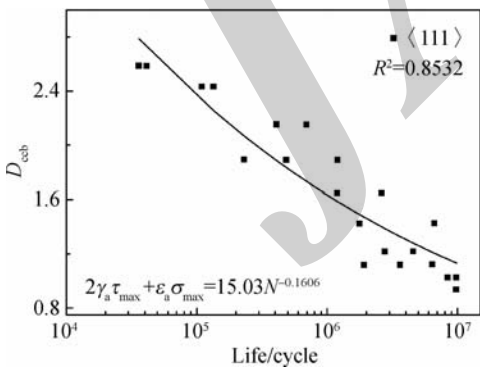


图 8 单晶<111>取向的 CCB 寿命曲线  
Fig. 8 CCB life curve of single crystal superalloys for <111> orientations

4.2.3 Walls 寿命模型

图 9 表示以八面体滑移系为临界平面的 Walls 寿命曲线,而图 10 表示以六面体滑移系为临界平面的 Walls 寿命曲线.与图 3 相比,当采用基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型时,Walls 寿命模型可较准确地预测单晶<111>取向高周疲

劳寿命.同时,Walls 模型对单晶<001>和<011>取向的寿命预测精度也有一定的提高,但预测精度并不是很理想.

在图 3 和图 9 中 Walls 寿命曲线的拟合度均小于 0.3,而且在图 9 中,<001>和<011>取向的数据完全分离.分析该组数据的计算过程得出,由于 Walls 寿命模型中包含的两个参数分别为八面体滑移面的切应变和正应变,在相同的试验条件下,<001>和<011>取向的切应变相差不大,但是<011>取向的正应变大约是<001>取向的 3 倍,由此导致它们在八面体滑移平面的 Walls 参数值最大相差 3.5 倍.同理可得出在相同循环寿命数下,单晶<111>取向对应的 Walls 参数值约为<001>取向的 8 倍.

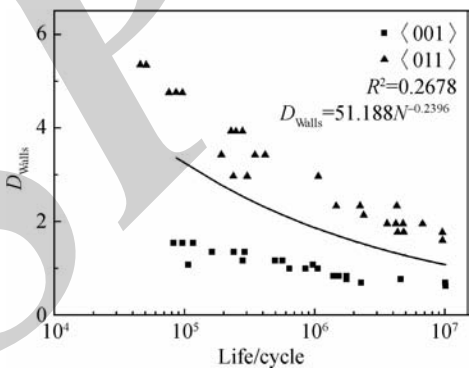


图 9 单晶<001>,<011>取向的 Walls 寿命曲线  
Fig. 9 Walls life curve of single crystal superalloys for <001> and <011> orientations

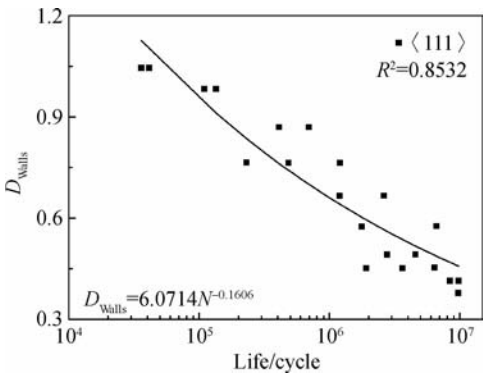


图 10 单晶<111>取向的 Walls 寿命曲线  
Fig. 10 Walls life curve of single crystal superalloys for <111> orientations

5 结 论

本文基于临界平面对单晶高周疲劳寿命的分析方法进行了改进,在选取临界平面时,综合考虑

了六面体和八面体滑移系,并采用 SSR,CCB 和 Walls 三种寿命模型对单晶的高周疲劳寿命进行了预测,得出如下结论:

1) 选取疲劳参量最大的滑移面为临界平面,则在 SSR,CCB 和 Walls 寿命模型中, $\langle 001 \rangle$ 和 $\langle 011 \rangle$ 取向的临界平面为八面体滑移面, $\langle 111 \rangle$ 取向的临界平面为六面体滑移面。

2) 当采用基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型时,SSR,CCB 和 Walls 寿命模型可较好地预测单晶 $\langle 111 \rangle$ 取向的高周疲劳寿命。而在 $\langle 001 \rangle$ 和 $\langle 011 \rangle$ 取向的寿命分析中,CCB 和 SSR 寿命模型的预测精度比较高,Walls 模型的数据分散性较大且预测精度不理想。

3) 与现有的预测方法相比,采用基于两种滑移系的高周疲劳寿命模型,使单晶高周疲劳寿命的预测精度得到了明显地提高。随着单晶高周疲劳试验数据的完善,可进一步修正寿命模型,以提高预测精度。

参考文献:

[1] Cowles B A. High cycle fatigue in aircraft gas turbines an industry perspective[J]. International Journal of Fracture, 1996,80(2):147-163.

[2] Srinivasan A V. Flutter and resonant vibration characteristics of engine blades[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1997,119(4):742-775.

[3] 张庆民,张万秋,王立波. 发动机涡轮 II 级叶片断裂原因分析[J]. 失效分析与预防,2010,5(1):35-38.

ZHANG Qingmin,ZHANG Wanqiu,WANG Libo. Failure analysis of certain model aeroengine II grade turbine blade [J]. Failure Analysis and Prevention,2010,5(1):35-38. (in Chinese)

[4] 孙晓峰,金涛,周亦胄,等. 镍基单晶高温合金研究进展 [J]. 中国材料进展,2012,31(12):1-11.

SUN Xiaofeng,JIN Tao,ZHOU Yizhou, et al. Research progress of nickel-base single crystal supealloys[J]. Materials China,2012,31(12):1-11. (in Chinese)

[5] 胡春燕,刘新灵,陶春虎. DD6 单晶高温合金低周疲劳断裂特征的研究[J]. 失效分析与预防,2014,9(4):224-227.

HU Chunyan,LIU Xinling,TAO Chunhu. Low-cycle fatigue fracture features of single crystal superalloy DD6 [J]. Failure Analysis and Prevention,2014,9(4):224-227. (in Chinese)

[6] YU Jinjiang,SUN Yuelai,SUN Xiaofeng,et al. Anisotropy of high cycle fatigue behavior of a Ni-base single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013,566:90-95.

[7] LIU L,Husseini N S,Torbet C J,et al. In situ imaging of

high cycle fatigue crack growth in single crystal nickel-base superalloys by synchrotron X-radiation[J]. Journal of Engineering Materials and Technology,2008,130(2):223-225.

[8] Liu Y,Yu J J,Xu Y,et al. High cycle fatigue behavior of a single crystal superalloy at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 454/455: 357-366.

[9] SHI Zhenxue,LI Jiarong,LIU Shizhong,et al. High cycle fatigue behavior of the second generation single crystal superalloy DD6[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2011,21(5):998-1003.

[10] Naik R A,Deluca D P,Shah D M. Critical plane fatigue modeling and characterization of single crystal nickel superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2004,126(2):391-400.

[11] TIAN Sugui,LI Qiuyang,SU Yong,et al. Microstructure evolution and FEM analysis of a  $[111]$  oriented single crystal nickel-based superalloy during tensile creep [J]. Applied Physics:A,2015,118(4):1407-1417.

[12] Arakere N K,Swanson G A P. Effect of crystal orientation on fatigue failure of single crystal nickel base turbine blade superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2002,124(1):161-176.

[13] 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)

[14] 荆甫雷. 单晶涡轮叶片热机械疲劳寿命评估方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2013.

JING Fulei. Research on thermo-mechanical fatigue life assessment of single crystal turbine blades[D]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013. (in Chinese)

[15] Karolczuk A,Macha E. A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials[J]. International Journal of Fracture,2005,134(3):267-304.

[16] Ranjan S,Arakere N K. A fracture mechanics based methodology for fatigue life prediction of single crystal nickel based superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2008,130(3):032501. 1-032501. 8.

[17] Sayyah T,Swanson G R,Schonberg W P. A study of single crystal fatigue failure criteria[R]. NAS8-40836,2000.

[18] 《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.