

文章编号: 1000-8055(2003) 04-0477-04

晶体取向的偏差和随机性 对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响

岳珠峰¹, 吕震宙², 杨治国³, 成晓鸣³, 尹泽勇³

(1. 西北工业大学 工程力学系, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 飞机工程系, 陕西 西安 710072;

3. 中国航空工业第二集团公司 第 608 研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 本文提出双参数蠕变损伤模型用以模拟镍基单晶合金叶片的强度和寿命。该模型得到单轴应力状态和模拟叶片、双剪切试样复杂应力状态的考核。叶片分析表明: 单晶叶片轴向的偏角增大, 强度的分散性变大。两个不受控的晶体取向变化时, 滑移系的分切应力最大有 15% 的变化; 轴向的偏角的增大, 寿命的分散性变大, 15 的偏角, 寿命偏差 6 倍。两个不受控的晶体取向变化时, 寿命有 50% 的变化。结果表明: 对叶片进行 3 维取向优化, 可以提高叶片的蠕变寿命。

关键词: 航空、航天推进系统; 晶体取向; 偏差; 镍基单晶叶片; 强度与寿命

中图分类号: V 232. 4; V 231. 91

文献标识码: A

Influence of Deviation and Randomness of Crystallographic Orientations on the Strength and Life of Nickel-Base Single Crystal Superalloy Turbine Blades

YUE Zhu-feng¹, LU Zhen-zhou¹, YANG Zhi-guo²;

CHENG Xiao-ming², YIN Ze-yong²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Aviation Institute 608, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: A two-damage-variable creep constitutive model has been presented for the strength and life of nickel-base single crystal superalloy turbine blades. Uniaxial creep experiments for different orientations and stress levels have been conducted and validated for the model parameters. Modeling creep blades and double shear creep specimens were tested experimentally. The model has been validated by the uniaxial stress state and multiaxial stress state specimens. With the increase in deviation of the axial crystallographic orientations of the blade, the deviation of the strength increases, by the name of resolved shear stress of the slip systems. The randomness of the two uncontrolled crystallographic orientations of the blades results in a 15% deviation of the strength. The life deviation increases with the increasing deviation of axial crystallographic orientation. If there is a 15° deviation of the axial orientation, the life will have a deviation of factor 6. The randomness of the two uncontrolled orientations reduces 50% deviation of life. The study shows that the blade crystallographic orientations should be optimized for a better conjunc-

收稿日期: 2002- 07- 26; 修订日期: 2002- 12- 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50005016); 航空科学基金资助项目(02C53011); 长江学者基金资助项目

作者简介: 岳珠峰(1965-), 男, 江苏丹阳人, 西北工业大学工程力学系教授, 博士, 主要从事材料力学性能与应用研究。

tion of strength and creep life.

Key words: aerospace propulsion system; crystallographic orientations; deviation; randomness; nickel-base single crystal superalloy turbine blade; strength and life

1 引言

镍基单晶合金不同于其它高温合金的最重要的特点为其力学性能的晶体取向相关性,例如相同应力和应变水平时,其蠕变和疲劳寿命可以相差数倍、数十倍、数百倍^[1~5]。迄今,镍基单晶叶片的轴向设计为[001],其它两个取向不加控制,即为随机状态。在叶片合格性检验时,仅要求轴向的晶体取向偏离[001]必须小于某个角度,例如5°或10°。因此镍基单晶叶片的三个方向的晶体取向事实上是处于某种程度的随机状态,如此,镍基单晶叶片的性能在某种程度上也为随机状态,即需要研究晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与寿命的影响,然而,迄今对此研究较少。

2 模型

本文采用的蠕变损伤本构方程将建立在滑移系的分切应力、滑移系的分切应变和它们的应变率基础上。开动的滑移系可为八面体滑移系、六面体滑移系和十二面体滑移系。滑移系的分切应力:

τ = σbl (1)

其中b和l为滑移系的滑移方向单位矢量和滑移面方向单位矢量,τ为滑移系的分切应力,σ为施加应力。宏观应变率ε由弹性部分ε和非弹性部分(蠕变应变率)ε组合而成:

ε = ε + ε (2)

弹性应变率ε可由宏观应力率σ得到,此时的弹

性本构性质与E、ν及G相关;ε由滑移系的分切应变率得到:

ε = ∑ γbl (3)

其中:γ为滑移系的分切应变率,∑表示对滑移系取和。

考虑空洞损伤和筏化-解筏的蠕变损伤本构方程可以为^[1,6,7]:

γ = γ_i { 1 / (1 - ω) }^n e^S } (4)

ω = ω_0 γ^m, S = C γ^P

式中:γ_i = γ_0 σ^n。γ_0和ω_0为初始蠕变率和初始损伤率,n、m和C及P为模型参数,与温度相关。ω和S为状态损伤变量。

3 晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与寿命的影响

即使对于单向应力状态,偏角的存在,除了对Schmid系数有影响外,还对激活滑移系数目有影响,其数目从激活1个到8个变化,示于表1中。当晶体取向严格为[001]取向时,同时为8个滑移系开动,但当有某一偏角时,加载后,初滑移系开动,由于晶格的转动,次滑移系也开动。这说明,严格控制晶体取向的偏角或准确给出试样的晶体取向是非常重要的,否则实验数据有很大的分散性。

叶片及网格划分如图1。共用了120个3-D单元,温度由叶根的538℃上升到叶尖的964℃,

表 1 偏角对激活滑移系数数量 N 和 Schmid 系数(S)的影响

Table 1 The influence of the deviation of orientation on the number of activation slip systems (N) and Schmid factor (S)

取向	偏角 5 °		偏角 10 °		偏角 15 °	
	S	N	S	N	S	N
[001] ^a	0.4405- 0.4080	2- 8	0.4657- 0.4080	2- 8	0.4837- 0.4080	1- 8
[011] ^a	0.4318- 0.4080	2- 4	0.4527- 0.4080	1- 4	0.4690- 0.4080	1- 4
[011] ^b	0.3829- 0.3535	2- 4	0.4087- 0.3535	2- 4	0.4286- 0.3535	1- 4
[111] ^b	0.4844- 0.4714	1- 3	0.4929- 0.4714	1- 3	0.4977- 0.4714	1- 3

注:a 为八面体滑移系{111} <110> 激活;b 为六面体滑移系{100} <110> 激活。

叶片承受 45000 r/min 的离心力,材料取自文献 [8],叶片下端固定。

移呈加速趋势。计算中止时间为一些单元的损伤达到 1。损伤示于图 3, 损伤集中在试样的近根部。

3. 1 对强度的影响

轴向的偏角对强度的分散性示于图 4。轴向偏角的增大,分散性变大。

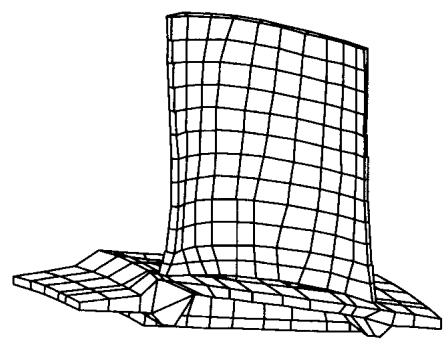


图 1 涡轮叶片构形和有限元网格划分
Fig.1 Configuration and FE finite element meshing of a turbine blade

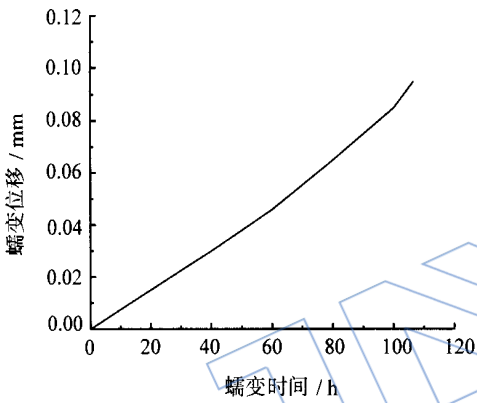


图 2 叶片的蠕变位移
Fig.2 The creep displacement of turbine blade

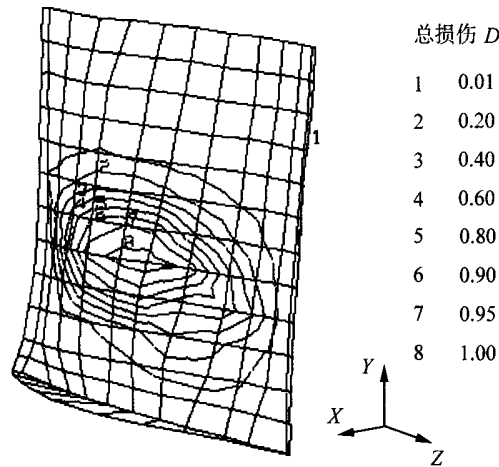


图 3 计算中止时的损伤分布
Fig.3 The contour of damage distribution in the calculation-stop time

叶尖的蠕变位移示于图 2。在变形的大部分时间, 位移- 时间近似线性关系; 在后期, 蠕变位

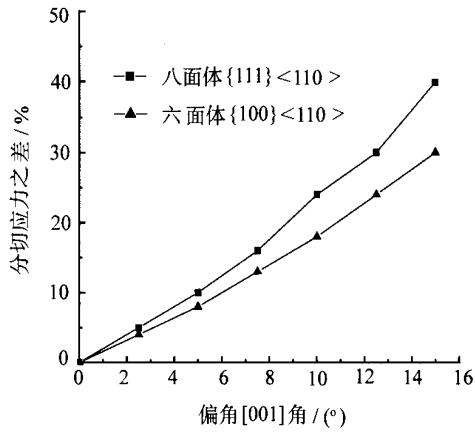


图 4 偏角对{111} <110> 和 {100} <110> 滑移系分切应力的影响
Fig.4 The influence of the deviation of the axial orientation to [001] on the resolved shear stress of {111} <110> and {100} <110> slip systems

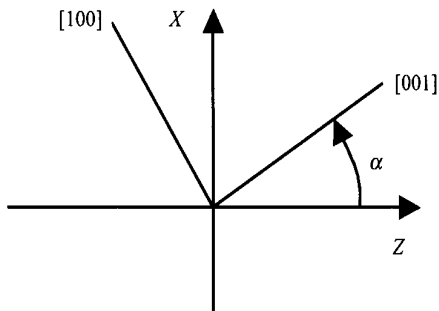


图 5 叶片不控取向偏角的定义
Fig.5 The definition of the two uncontrolled orientations of the blades

定义这两个不受控的晶体取向由 α 表示, 示于图 5。此时认为轴向为 [001] 取向, 可以得到相对于 $\alpha=0$ 时的滑移系的分切应力。计算结果表明, 所有情况都满足静强度的要求, 滑移系的分切应力最大有 15% 的变化。

3. 2 对寿命的影响

轴向的偏角对寿命的分散性示于图 6。轴向的偏角的增大, 分散性变大。15 的偏角, 寿命偏差 6 倍。图 7 和图 8 给出叶片寿命和叶尖蠕变位移随角度 α 的变化规律。图 7 显示有 2 个取向对应

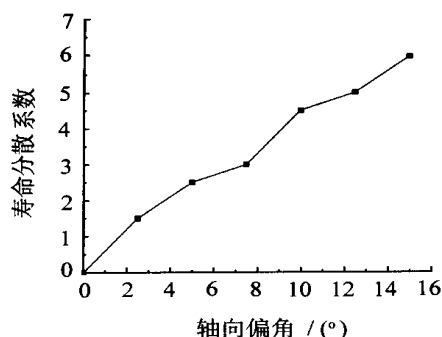


图 6 轴向偏角对蠕变寿命的影响

Fig. 6 The influence of the deviation of the axial orientation on the creep life of the turbine blade

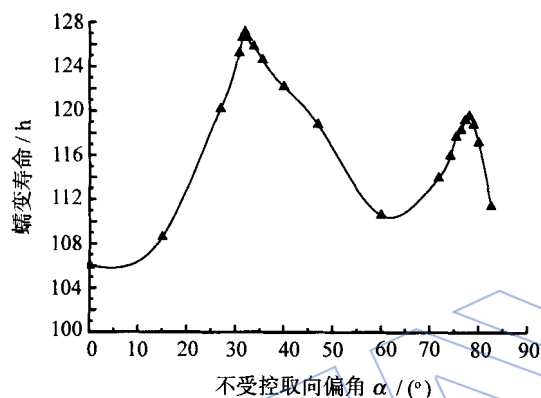


图 7 叶片不受控取向偏角 α 对蠕变寿命的影响

Fig. 7 The creep damage lives of blades vary with the angle α

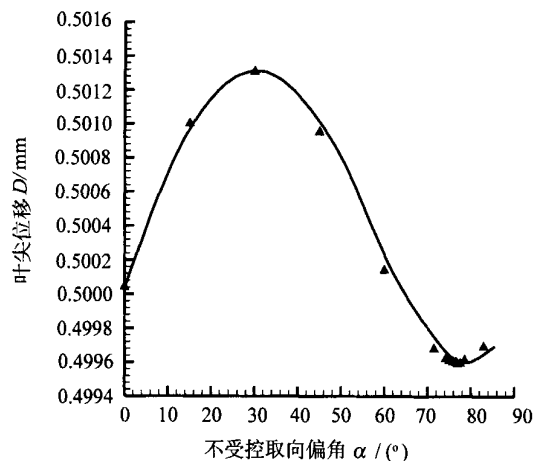


图 8 叶片不受控取向偏角 α 对失效时叶尖位移 D 的影响

Fig. 8 The creep displacement of blades varies with the angle α at the failure states

寿命峰值, 而图 8 则有 2 个取向对应叶片位移最小。综合而言, 对所考察叶片, $\alpha = 78^\circ$ 时对应较高寿命和较小位移。

4 结 论

(1) 本文提出的双参数蠕变损伤模型可以较好地模拟镍基单晶合金地蠕变损伤规律。该模型得到单轴应力状态和复杂应力状态的考核。模拟叶片和双剪切试样可以用来考核复杂应力状态时蠕变损伤本构模型。

(2) 随轴向的偏角增大, 强度的分散性变大。两个不受控的晶体取向变化时, 滑移系的分切应力最大有 15% 的变化。

(3) 随轴向偏角的增大, 寿命的分散性变大。15 的偏角, 寿命偏差 6 倍。两个不受控的晶体取向变化时, 寿命有 50% 的变化。

(4) 对叶片两个不受控取向对叶片蠕变性能影响的分析表明, 对叶片进行 3 维取向优化, 可以很大的提高叶片的蠕变寿命。

参考文献:

- [1] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q. The Creep-Damage Constitutive Life Predictive Model for Nickel-Base Single Crystal Superalloys[J]. Metallurgical and Material Transaction, 26A(1995): 1815- 1821.
- [2] Kanda M, Sakana M, Ohnami M, et al. High Temperature Low Cycle Fatigue of CMSX-2 Ni-Base Single Crystal Superalloy[J]. J. Eng. Mat. Tech., 119(1997): 153- 160.
- [3] Meric L, Poubanne P, Caillaud G. Single Crystal Modeling for Structure Calculations: Part I - Model Presentation, Eng [J]. Mater. Technol., 113(1991): 162- 170.
- [4] Mayr C, Eggeler G, Webster G A, et al. Double Shear Creep Testing of Superalloy Single Crystal at Temperatures Above 1000°C[J]. Mater. Sci. Eng., 199(1995): 121- 130.
- [5] Arrell D J, Valles D J. Rafting Prediction Criterion for Superalloys under a Multiaxial Stress[J]. Scripta Materialia, 35(1996): 727- 732.
- [6] Yue Z F, Lu Z Z. Rafting Prediction Criterion for Nickel-Base Single Crystals under Multiaxial Stresses and Crystallographic Orientation Dependence of Creep behavior[J]. Acta Metallurgica Sinica, 12(1999): 149- 152.
- [7] Yue Z F. Crystallographic Damage Constitutive and its Implement in Umat of ABAQUS[R]. Report for AvH research, 2000.
- [8] Yue Z F. Experimental Report of Material Parameter (DD3) [R]. Northwestern Polytechnical University, Xi'an: PR China, 2002.