镍基单晶涡轮叶片取向偏差可靠性研究

刘大顺，侯乃先，于庆民，岳珠峰

（西北工业大学力学与土木建筑学院，西安 710072）

摘要：针对镍基单晶叶片晶体取向的随机性，结合晶体塑性理论和线性累积疲劳寿命模型，研究了叶片轴向晶体取向偏差对叶片寿命的影响。研究表明：叶片取向偏差的分布规律符合三参数对数正态分布，在此基础上采用蒙特卡洛法对单晶叶片进行了寿命可靠性分析。结果表明：单晶叶片疲劳寿命分布规律符合三参数威布尔分布，由此建立了单晶涡轮叶片寿命的可靠性模型，为叶片的可靠性设计提出了一种有效的方法。

关键词：固体力学；可靠性；蒙特卡洛法；晶体取向；寿命分析

中图分类号：O34 **文献标识码**：B **文章编号**：1674-2850(2010)02-0293-6

Fatigue reliability analysis of crystallographic orientation in single crystal turbine blade

LIU Dashun, HOU Naixian, YU Qingmin, YUE Zhufeng

(*School of Mechanics and Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: Based on the single crystal plastic theory and the linear life prediction model, the Monte-Carlo method has been presented to analyze the influence of turbine blade crystal orientation on the single crystal blade life. The results show that the distribution of blade crystal orientation is 3-parameter lognormal distribution. Furthermore, the distribution of the single crystal blade life according with 3-parameter Weibull distribution is obtained, using the Monte-Carlo method. The method presented here is useful for designing turbine blade at a certain cycle life.

Key words: solid mechanics; reliability; Monte-Carlo method; crystallographic orientation; life prediction

0 引言

镍基单晶合金在高温下具有优越的力学性能，因而被广泛地应用于航空发动机的热端部件[1~2]。区别于常规的各向同性材料，镍基单晶合金是一种特殊的各向异性材料，其最显著的特点是力学性能的晶体取向相关性和晶体取向敏感性[3~5]。晶体取向相关性是指在相同应力水平下，不同晶体取向试样的蠕变、疲劳寿命有差别，对国产材料（如 DD3 和 DD6），这种差别（相同温度、相同应力等）可以达到几倍，甚至超过 100 倍[6~7]。我国目前生产的单晶叶片仅仅控制叶片轴向的晶体取向沿［001］方向偏差在 15°范围内，其他 2 个取向不做控制，即叶片的晶体取向是随机的[8]。因此，研究单晶叶片轴向晶体取向偏差对寿命可靠度的影响具有重要意义，并为叶片寿命设计提供参考依据。

基于某单晶叶片模型，对单晶涡轮叶片的强度和寿命进行确定性分析，在确定性分析的基础上，对影响叶片寿命的取向偏差进行测定并统计，得到取向偏差的分布规律和参数，基于其分布规律，采用蒙特卡洛法对叶片寿命进行可靠性分析，建立单晶涡轮叶片寿命的可靠性模型。

基金项目：国家自然科学基金（50775183，10802065）；高等学校博士学科点专项科研基金（20060699033，200806991051）

作者简介：刘大顺（1987—），男，博士研究生，主要研究方向：固体力学

通信联系人：岳珠峰，教授，主要研究方向：固体力学. E-mail：zfyue@nwpu.edu.cn

1 单晶叶片寿命计算分析

1.1 低周疲劳寿命计算

低周疲劳下，镍基单晶处于高应力状态，滑移系的开动是导致结构破坏的主要因素。研究表明[9~10]：镍基单晶的低周疲劳与滑移系上的分解剪切应力密切相关，可以采用式（1）计算低周疲劳寿命：

$$\frac{\Delta\tau_{\max}}{2} = AN_f^b, \tag{1}$$

其中，$\frac{\Delta\tau_{\max}}{2}$为最大分切应力幅；$A$ 和 b 为系数；N_f 为疲劳寿命。

1.2 高周疲劳寿命计算

高周疲劳应力较小，应变变形在弹性范围内，高周疲劳的取向相关性主要由弹性模量决定。高周疲劳寿命预测模型为

$$t_{\mathrm{HC}} = \alpha\Delta\sigma^n, \tag{2}$$

其中，α 和 n 为模型参数；$\Delta\sigma$ 为应力幅值。

1.3 高低周组合疲劳计算

叶片在工作过程中受到高低周组合作用，计算叶片的使用寿命必须考虑两者的相互作用。采用线性累积疲劳寿命预测模型[10]，形式如下：

$$\frac{1}{t_{\mathrm{TC}}} = \frac{1}{t_{\mathrm{HC}}} + \frac{1}{t_{\mathrm{LC}}}, \tag{3}$$

其中，t_{TC}为组合疲劳寿命；t_{HC}为纯高周疲劳寿命；t_{LC}为纯低周疲劳寿命。假设高低周组合时的载荷谱如图 1 所示。每个低周疲劳循环都保载 120 s，那么高周寿命为

$$t_{\mathrm{HC}} = \frac{T}{120f}, \tag{4}$$

其中，T 为总的低周疲劳寿命；f 为共振频率。

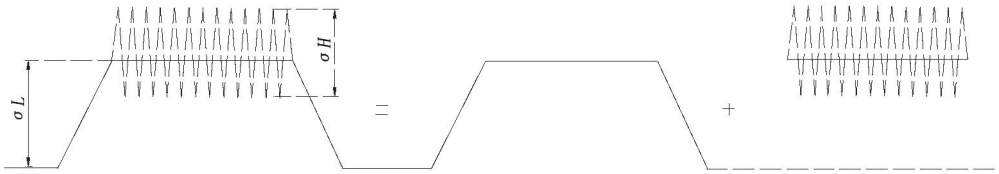


图 1 典型的高低周组合疲劳载荷谱

Fig. 1 The load spectrum of high and low cycle fatigue

1.4 有限元计算模型

考虑叶片结构的复杂性，将叶片分为 143 250 个四面体单元（网格如图 2 所示）。叶片工作在高温下，有限元计算必须考虑到温度的影响。通过计算流体软件 FLUENT 计算得到叶片的温度场，然后将插值程序导入到 ABAQUS 文件中，温度场分布如图 3 所示。由于单晶材料的特殊性，在有限元计算中使用了基于晶体塑性理论的 UMAT（user material，UMAT）用户子程序[11]，它对晶体材料的力学行为计算更为精确。

根据文献[10]的试验拟合曲线，通过插值可以得到模型中危险点处的高周与低周疲劳寿命。高低周组合寿命可以通过线性累积公式（3）计算得到。



图 2 单晶叶片有限元网格
Fig. 2 Finite element mesh of single crystal blade

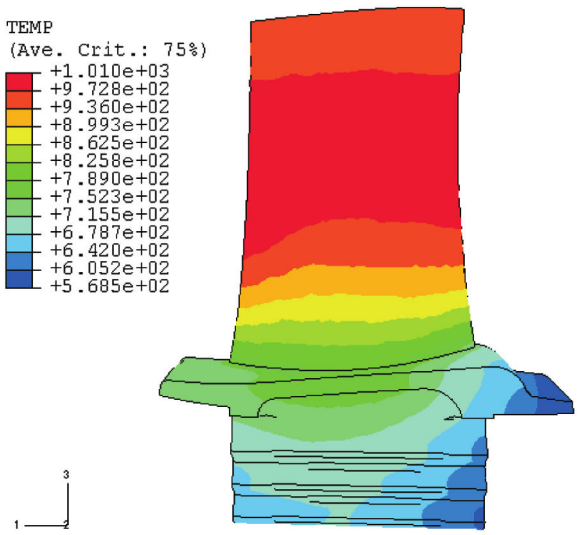


图 3 叶背的温度分布
Fig. 3 The temperature distribution of blade back side

2 单晶叶片取向可靠性分析

2.1 不同取向的单晶叶片强度寿命分析

单晶叶片仅仅控制叶片轴向的晶体取向沿[001]方向偏差在15°范围内，其他2个取向不做控制，这2个方向成为随机取向[8]。图4中α为随机取向；β为控制取向。

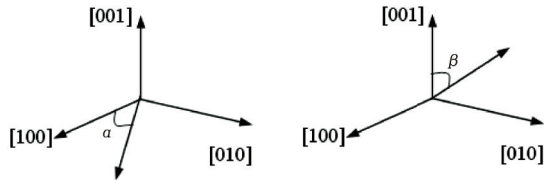


图 4 随机取向和轴向取向的定义
Fig. 4 Definition of randomness orientation and axial direction

由于单晶叶片一般只统计控制取向的偏差，而不统计随机取向的偏差，所以重点研究控制取向对叶片疲劳寿命的影响。

2.2 单晶叶片晶体取向的概率描述模型和参数

通过晶向检测仪一共测定了457个单晶叶片的[001]晶体取向偏差，并进行统计分析，发现叶片晶体取向符合三参数对数正态分布（如图5所示），其相关系数达到0.992.

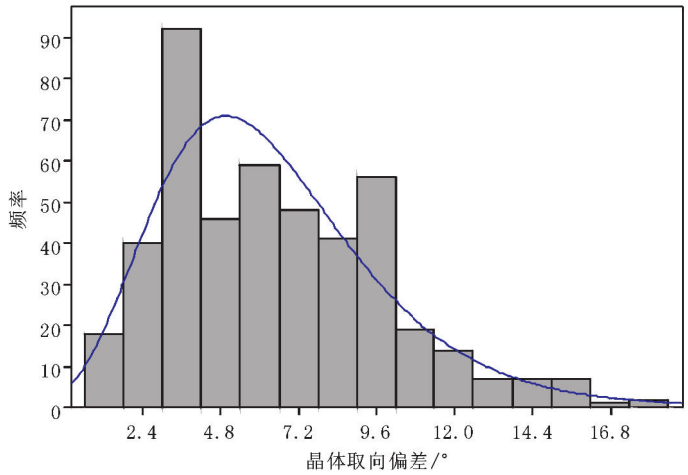


图 5 晶体取向偏差的概率分布
Fig. 5 Probability distribution of disorientation

所得到的叶片晶体取向偏差概率分布密度函数为

$$f(x)=\frac{1}{0.309\ 4\times(x+4.548)\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln(x+0.548)-2.348)^2}{0.191\ 46}\right](0<x<\infty). \tag{5}$$

2.3 单晶叶片的寿命概率分布

根据单晶叶片取向偏差的概率分布密度函数，对取向偏差进行随机取点，取的随机点个数为 2 000. 将得到的 2 000 个取向偏差数值进行统计分析，发现取出的 2 000 个随机点分布规律与实际统计的取向偏差分布一致，都服从三参数对数正态分布。可靠性分析采用的取向偏差统计如图 6 所示。基于蒙特卡洛方法的晶体取向可靠性分析流程如图 7 所示。

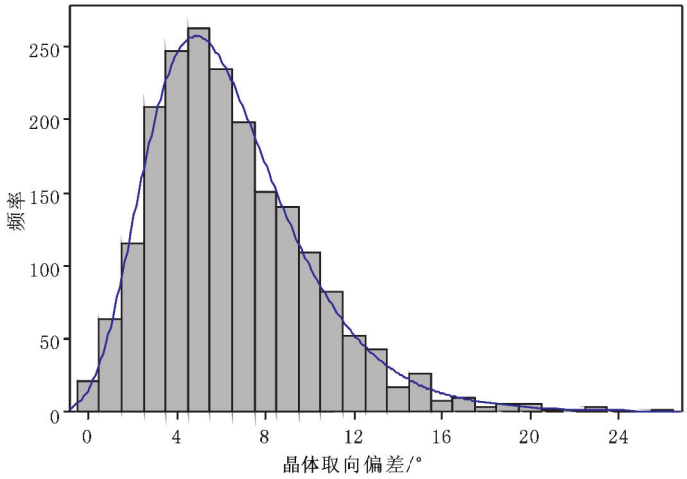


图 6 可靠性分析采用的晶体取向偏差分布

Fig. 6 Crystal orientation distribution used in the reliability analysis

经过 2 000 次的计算，得到了 2 000 个随机取向下的高低周组合疲劳寿命分布，其中，最大的疲劳寿命为 9 737 个循环（cycles），最小的疲劳寿命为 5 531 个循环。对随机取向下疲劳寿命进行统计分析，发现随机取向下的疲劳寿命服从三参数威布尔分布，其相关系数为 0.998. 随机晶体取向下的疲劳寿命分布如图 8 所示。随机晶体取向下疲劳寿命的概率累积密度分布如图 9 所示。

随机晶体取向下疲劳寿命的概率密度函数为

$$f(N)=\frac{3.831}{3\ 116}\left[\frac{N-4\ 923}{3\ 116}\right]^{2.831}\exp\left\{-\left[\frac{N-4\ 923}{3\ 116}\right]^{3.831}\right\}$$
$$(4\ 923<N<\infty). \tag{6}$$

对概率密度函数进行积分，得到分布函数为

$$F(N_p)=1-\exp\left\{-\left[\frac{N_p-4\ 923}{3\ 116}\right]^{3.831}\right\}, \tag{7}$$

可靠度

$$P=\exp\left\{-\left[\frac{N_p-4\ 923}{3\ 116}\right]^{3.831}\right\}. \tag{8}$$

如果设计的循环数为 5 000，那么这个实心叶片的可靠度为 99.999 930%.

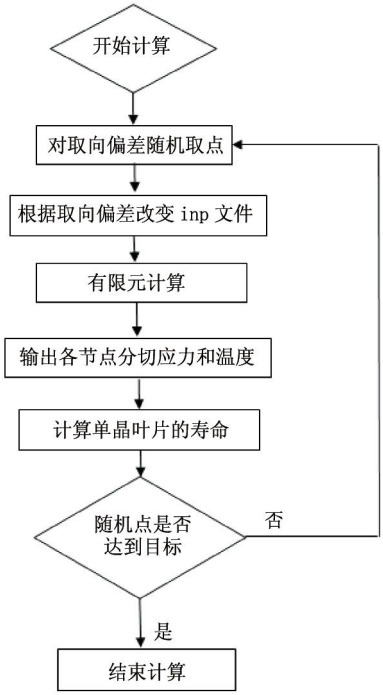


图 7 晶体取向可靠性分析流程图

Fig. 7 The flow process chart of crystal orientation reliability analysis

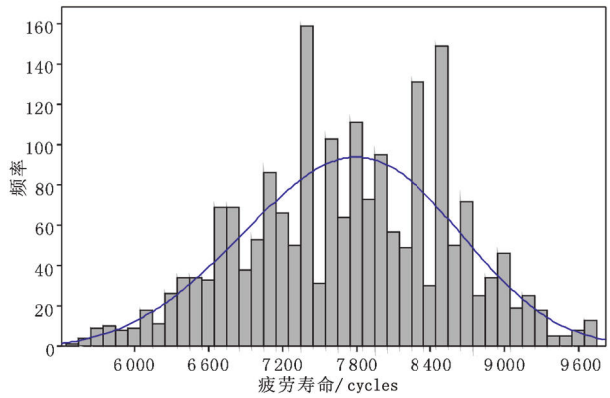


图 8 随机晶体取向下的疲劳寿命分布
Fig. 8 Fatigue life distribution at random crystal orientation

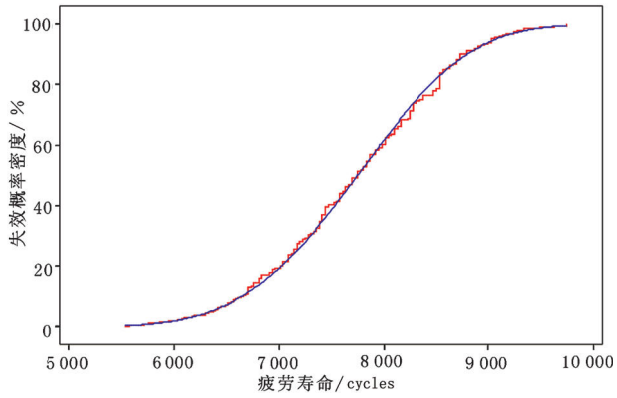


图 9 随机晶体取向下疲劳寿命的概率累积密度分布
Probability density distribution of fatigue life at random crystal orientation

如果设计的循环数为 5 500，那么这个实心叶片的可靠度为 99.843 774%.

3 结论

基于某单晶叶片模型，对单晶涡轮叶片的强度和寿命进行确定性分析，在确定性分析的基础上，对影响叶片寿命的取向偏差进行测定并统计，得到取向偏差的分布符合三参数对数正态分布。基于取向偏差的分布规律，采用蒙特卡洛法在寿命分布区间，对随机取向下疲劳寿命进行统计分析，发现随机取向下的疲劳寿命服从三参数威布尔分布。最后分析了在一定设计循环数下，实心叶片寿命的可靠度。由此，用该方法可以建立单晶涡轮叶片寿命的可靠性模型。

[参考文献] (References)

[1] 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.
YUE Z F, YU Q M, WEN Z X, et al. Structural strength and life design of single crystal superalloy turbine blade[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[2] 万建松. 基于有限变形晶体滑移理论的单晶力学行为及应用研究[D]. 西安：西北工业大学，2003.
WANG J S. Study of mechanical behavior and application of single crystal superalloy base on finite deformation crystallographic theory[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)

[3] 岳珠峰，吕震宙，郑长卿，等. Ni 基单晶合金蠕变过程中的方向特性研究[J]. 机械强度，1995，17 (4)：57～61.
YUE Z F, LV Z Z, ZHENG C Q, et al. The crystallographic study of the creep-directional-properties of nickel-base

single crystal superalloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995, 17(4): 57～61. (in Chinese)

[4] 万建松，岳珠峰. 镍基单晶 DD3 涡轮叶片蠕变寿命晶向相关性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究，2004，17 (2)：18～22.
WANG J S, YUE Z F. The influence of controlled and uncontrolled crystal orientation on creep life of nickel based single crystal DD3 turbine blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 18～22. (in Chinese)

[5] YUE Z F, LU Z Z, ZHENG C Q, et al. Life study of nickel-based single crystal turbine blades: viscoplastic crystallographic constitutive behavior[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1996, 24(2): 139～145.

[6] 岳珠峰，吕震宙，杨治国，等. 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[J]. 航空动力学报，2003，18 (4)：477～480.
YUE Z F, LV Z Z, YANG Z G, et al. Influence of deviation and randomness of crystallographic orientations on the strength and life of nickel-base single crystal superalloy turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 477～480. (in Chinese)

[7] MAYR C, EGGELER G, WEBSTER G A, et al. Double shear creep testing of superalloy single crystals at temperatures above 1 000℃[J]. Materials Science and Engineering A: Structural Materials, 1995, 199(2): 121～130.

[8] 岳珠峰，尹泽勇，杨治国. 晶体取向对航空发动机单晶叶片结构强度和蠕变寿命的影响[J]. 航空发动机，1997 (4)：14，32～34.
YUE Z F, YIN Z Y, YANG Z G. The influence of crystal orientation on creep life and structural strength of single crystal turbine blade[J]. Aeroengine, 1997(4): 14, 32～34. (in Chinese)

[9] HOU N X, GOU W X, WEN Z X, et al. The influence of crystal orientations on fatigue life of single crystal cooled turbine blade[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 492(1～2): 413～418.

[10] HOU N X, WEN Z X, YU Q M, et al. Application of a combined high and low cycle fatigue life model on life prediction of SC blade[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(4): 616～619.

[11] 岳珠峰，尹泽勇，杨治国，等. 各向异性晶体滑移有限元程序及其应用[J]. 计算力学学报，1997，14 (4)：126～129.
YUE Z F, YIN Z Y, YANG Z G, et al. Anisotropic crystallographic program and its applications[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(4): 126～129. (in Chinese)