

文章编号: 1000-8055(2003)05-0650-08

单晶涡轮叶片材料本构模型及应用研究

杨治国^{1,2}, 岳珠峰³, 尹泽勇², 魏鹏义⁴, 成晓鸣²

(1 南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210016;

2 株洲航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

3 西北工业大学 工程力学系, 陕西 西安 710072;

4 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 综述了各向异性单晶叶片强度分析和寿命预测方面的一些研究工作。这些工作包括: 建立并验证了弹性、蠕变滑移本构模型及蠕变持久寿命预测方法; 进行了不同晶体取向DD3单晶在不同温度、不同速率或不同温度、不同应力水平下的拉伸试验、蠕变、疲劳及热疲劳试验; 开发了大型单晶结构有限元分析软件SLAPSC和ABAQUS的umat; 用双剪切试样和模拟叶片等系列试验对模型和有限元进行考核。作为应用研究, 对某发动机单晶涡轮叶片进行了强度分析和寿命预测。

关键词: 航空、航天推进系统; 镍基单晶合金; 力学性能; 模型

中图分类号: V 231.9

文献标识码: A

Constitutive Relationship of Nickel-Base Single Crystal Superalloys and Applications

YANG Zhi-guo^{1,2}, YU E Zhu-feng³, YIN Ze-yong²,
WEI Peng-yi⁴, CHEN G Xiao-ming²

(1 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 Zhuzhou Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

3 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4 Beijing Aeronautical Research Institute, Beijing 100095, China)

Abstract: The work carried out in our research group in respect of the mechanic study of nickel-base single crystal (SC) superalloys has been reviewed. The models for crystallographic elastoplastic behavior, creep, fatigue and thermomechanical fatigue and life predictive models have been presented and validated. Experiments have been performed for the mechanic behaviors of SC superalloys at different loading conditions for different crystallographic orientations and temperatures, thus the basic data for the validation of the models were acquired. Two ad-hoc programs, SLAPSC and umat for ABAQUS, have been developed for the SC blades. The double shear creep specimens and modeling turbine blades have been experimented for the validation of the model. Finally, the SC turbine blades have been analyzed by the models for the strength and life.

收稿日期: 2002-10-28; **修订日期:** 2003-06-22

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); 长江学者奖励基金资助项目

作者简介: 杨治国(1965-), 男, 湖南宁乡人, 南京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 自然科学研究员, 主要从事发动机强度振动、材料的力学行为研究

Key words aerospace propulsion system; nickel-base single crystal superalloys; mechanic behavior; model

1 前言

单晶叶片技术是提高航空发动机及地面燃气轮机性能、寿命及可靠性的关键技术之一,但单晶材料机械、力学性能的各向异性特性制约了其发展和应用。本文综述了课题组开展了各向异性单晶叶片强度分析和寿命预测方面的一些研究工作,部分文献见[1~26]。

2 晶体滑移的基本理论

晶体的变形是由晶体的位错沿特定的结晶面的滑移造成的。八面体滑移系、六面体滑移系及十二面体滑移系为可以开动的滑移系。滑移系的分切剪切应力 τ 关系式为:

$$\tau^{(0)} = P^{(0)} \cdot \tau \tag{1}$$

其中:

$$P^{(0)} = 1/2 (S^{\alpha} m^{\alpha} + m^{\alpha} S^{\alpha}) \tag{2}$$

这里: S^{α} 和 m^{α} 为滑移系 α 的单位方向矢量。

一种滑移滑移系的滑移率 $\gamma^{(0)}$ 规律为:

$$\gamma^{(0)} = \gamma_0^{(0)} (\tau^{(0)} / g^{(a)})^{1/m} \tag{3}$$

式中: $g^{(a)}$ 为滑移系抗剪切力, m 为应变率敏感指数。

3 弹塑性晶体理论及应用

3.1 屈服特性

八面体滑移系的开动规律可在两个温度范围内讨论:在峰值温度以下,可用LCP或PPV模型加以定量描述;在峰值温度以上,完全遵循Schmid法则。六面体滑移系屈服应力存在着严重的拉/压不对称性,但分析结果表明,其受取向影响较小,即可以根据<111>取向的拉、压屈服应力推得其它取向屈服应力值。峰值温度的出现,可以认为六面体滑移系的开动和八面体滑移系的Kear-Wilsdorf机理遭破坏。分析单晶屈服特性的方法和步骤为:首先确定八面体滑移系、六面体滑移系开动区域以及峰值温度,之后再根据不同屈服规律确定其屈服应力。这样对于不同温度下,不同取向的屈服应力可由少数几个取向值标定获得。

3.2 弹塑性规律

由屈服特性和Schmid定律有:

$$\tau = \tau_0 [1 + (\gamma/K_0)^{1/n}] \cdot [1 - B_2 S_2 - \delta B_3 S_3 + B_4 \ln(|\dot{\epsilon}|)] \tag{4}$$

式中: τ 为滑移系分切应力, τ_0 为滑移系临界分切应力, γ 为滑移系分切应变, K_0 , n , B_2 , B_3 和 B_4 为模型参数, S_2 为滑移系(010)[$\bar{1}01$]与(111)[$\bar{1}01$]的Schmid系数之比, S_3 为(111)[$\bar{1}21$]与(111)[$\bar{1}01$]的Schmid系数之比, b_1 , b_2 和 b_3 为与温度相关的材料参数, δ 为指示符号,拉伸时为+1,压缩时为-1。事实上, S_2 和 S_3 表示滑移系临界分切应力的反常部分,而 S_3 又表示拉/压不对称部分, $|\dot{\epsilon}|$ 为应变率。当用上式描述单滑移系滑移规律时, S_2 和 S_3 为0

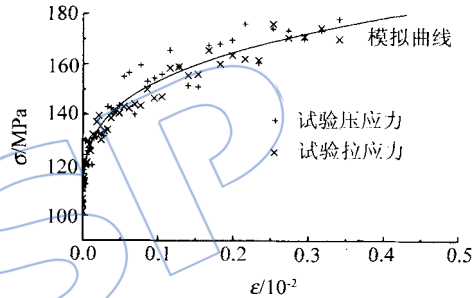


图1 DD3材料的滑移规律

Fig 1 The slip law of DD3 single crystal superalloy

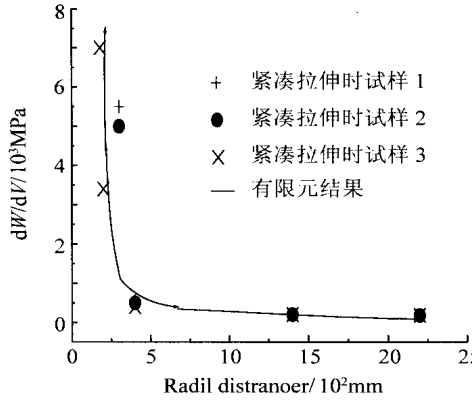


图2 试样心部裂纹启裂方向的 dw/dv 分布, 并与FEM比较

Fig 2 The distribution of dw/dv along the crack line, and compared with FEM results

图1给出模拟结果和试验结果的比较,可知式(4)可较好地模拟单滑移系滑移规律。

3.3 断裂特性研究

能量密度准则可以用来研究单晶的断裂特性,即:

表1 裂纹启裂和扩张方向与原裂纹方向的夹角(模型与试验的比较)

Table 1 The crack enlong direction (compaision between the FEM and experiments)

		CT1	CT2	CT3
$(dw /dv)_{min}^{max}$		0	60	32
试验 experiments	实测measured	0. 0, 0. 0, 0. 0	60, 61, 65	29, 29, 32
	平均averaged	0. 0	62	30

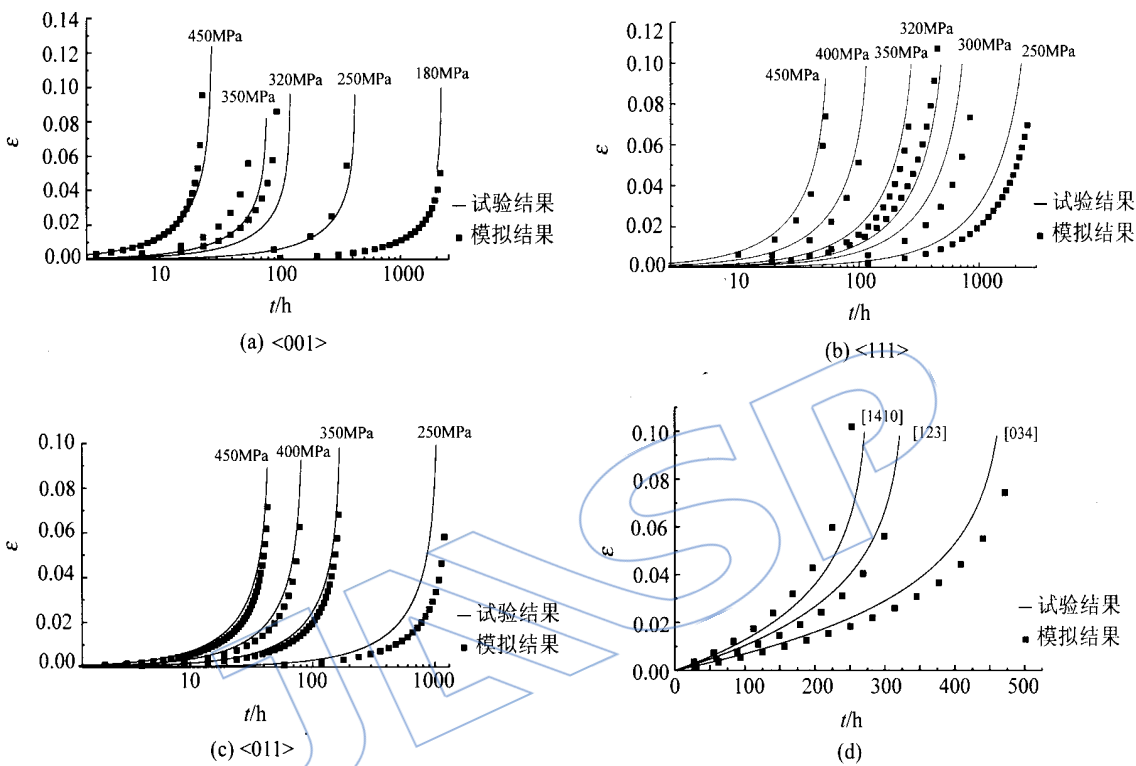


图3 试验结果和模拟结果的比较

Fig 3 Comparison between the experimental results and mdel results

$$\frac{dW}{dV} = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} = \left[\frac{dW}{dV} \right]_e + \left[\frac{dW}{dV} \right]_p \equiv$$
$$\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^e + \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (5)$$

其中: σ_{ij} 和 ϵ_{ij} 分别为应力和应变分量。对由DD3单晶板切割的三种紧凑拉伸(CT)试样进行试验和理论研究。试样心部裂纹启裂方向的 dW /dV 分布如图2所示。由图可见,CT1,CT2和CT3三种试样的数据基本落在同一曲线上。裂纹启裂和扩张方向与原裂纹方向的夹角的模型与试验结果见表1。由表1可知,能量密度准则 $(dw /dv)_{min}^{max}$ 能够作为断裂准则用于裂纹启裂的判断。

4 蠕变和持久寿命单晶本构模型

考虑空洞损伤和材质劣化时,损伤演化方程为:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_i \left(\frac{1}{1 - \omega} \right)^n e^S$$
$$\dot{\omega} = \frac{\dot{\omega}_0}{\omega} \dot{\gamma}^n, \quad S = C \dot{\gamma} \quad (6)$$

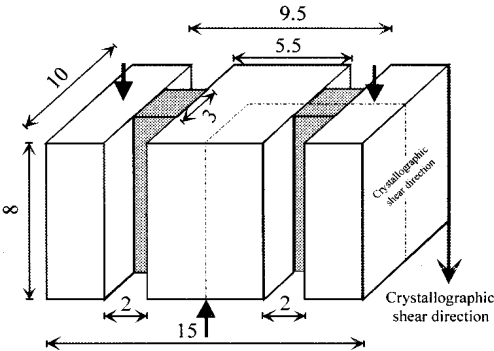
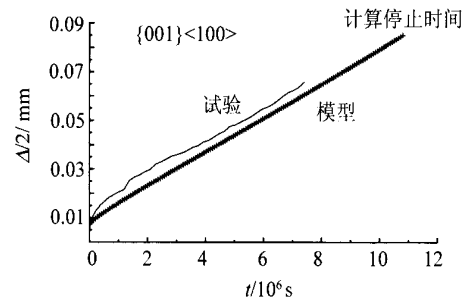


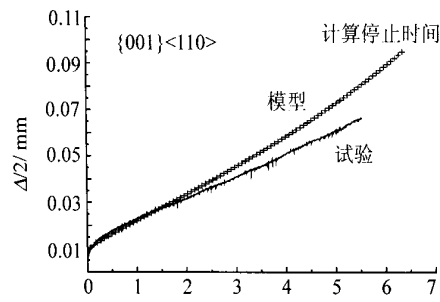
图4 双剪切试样

Fig. 4 Double shear creep specimen

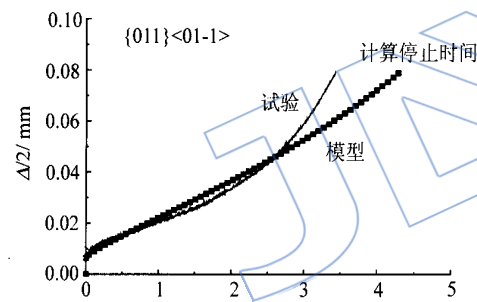
其中: $\bar{\omega}$ 和 S 为空洞损伤和材质劣化因子, $\dot{\gamma}$ 为滑移系分切应变率, 其它符号为常量。



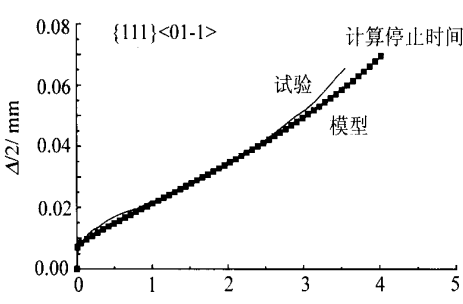
(a) {001}<100>



(b) {001}<110>



(c) {011}<01-1>



(d) {111}<01-1>

图5 双剪切试样试验结果与模型结果的比较

Fig 5 Comparison between the experimental and model results of double shear creep specimens

图3(a)~(c)为<001>、<011>和<111>取向的试验结果(950℃)和模型参数标定结果,由

图可知两者一致性较好。

图3(d)是用上述标定的参数来预测不同取向的单向应力试验结果。由该图可知,所建模型可以很好地描述蠕变规律。

图4为双剪切试样。图5为双剪切试样的蠕变响应的试验与理论比较。可知,模型能准确描述复杂应力状态下的结构蠕变响应。

5 低周疲劳规律

单晶的低周疲劳寿命公式为:

$$\frac{\Delta \gamma F^n}{2} = B (2N_f)^\beta \tag{7}$$

式中: B 和 β 为模型参数。

$$F = 1 - B_2 S_2 + B_4 \ln |\dot{\epsilon}|$$

式中: B_2 和 B_4 为系数, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, S_2 为滑移系分切系数比。

其宏观应变寿命关系为:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = B F^{-n} V_1 (2N_f)^\beta \tag{8}$$

如果处于弹性范围,疲劳寿命又可写成:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{A}{E_{[l,h,k]}} (2N_f)^\alpha \tag{9}$$

采用总应变范围,则:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{A}{E_{[l,h,k]}} (2N_f)^\alpha + B F^{-n} V_1 (2N_f)^\beta \tag{10}$$

模型预测结果和试验结果示于图6中,所有的值都位于2倍的偏差范围内。

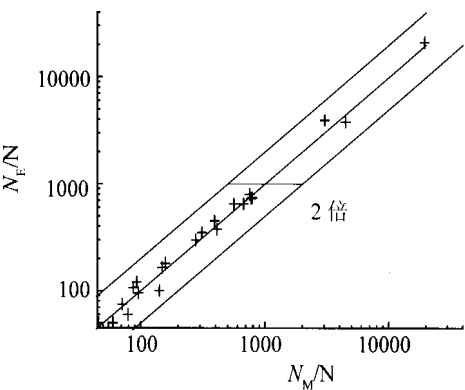


图6 低周疲劳性能模型预测结果 N_M 和试验结果 N_E 比较

Fig 6 The comparison of the LCF lives between the experimental and model results

薄壁圆筒试样考核试验结果列于表2。从表2可知,薄壁圆筒试样轴向为[001]晶体取向时,模型结果和实验结果相差最大为51.3%,因此该模

表2 模型分析结果
Table 2 Model results

试样号	八面体滑移系 应力 $\Delta T_f / \text{MPa}$	八面体滑移系 剪应变 $\Delta \gamma_f$	模型寿命 N /次	实验寿命 N_f /次	误差 /%
№1	237.57	0.004593	151370	100000	51.3
№2	381.26	0.01929	18276	20192	9.5
№3	444.94	0.03123	5176	4955	5.0
№4	573.93	0.03368	1321	1510	14.3
№31	494.73	0.02876	17374	13750	26.4
№32	657.10	0.05614	1610	1520	5.9
№33	812.67	0.0926	350	272	28.7
№51	495.61	0.0289	10004	11784	15.1
№52	698.10	0.0641	301	346	13.0
№91	443.36	0.0222	49781	55500	10.3
№92	679.33	0.0607	2977	3105	10.3
№93	879.37	0.1152	582	429	35.7

型具有较高的预测能力,可以用于单晶叶片的 LCF 寿命分析。

6 热机械疲劳蠕变

为了分析疲劳-蠕变交互作用规律,图7(a)

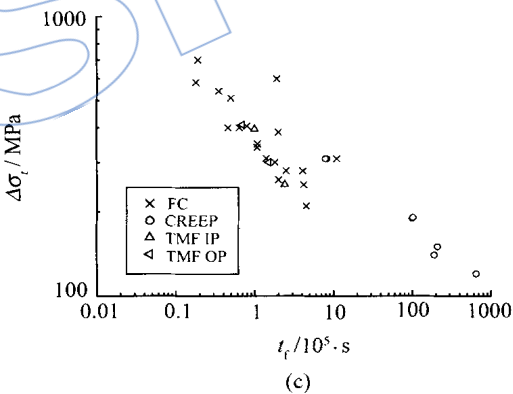
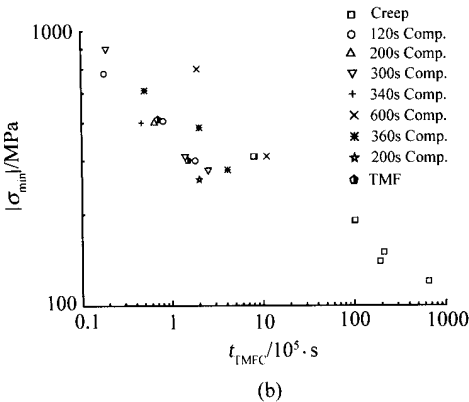
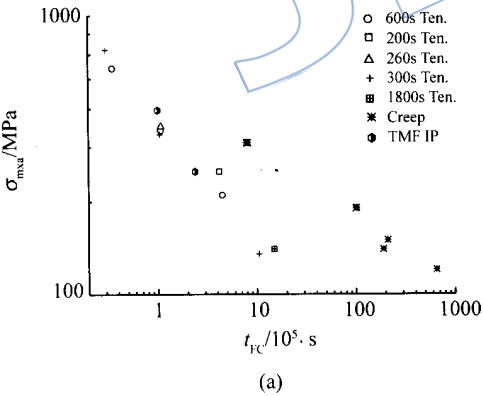


图7 热机械疲劳蠕变(TM FC) 试验
Fig 7 TM FC experimental results

给出一组对应于最大应力 $\sigma_{\max}$ 带不同保载时间的疲劳及蠕变寿命。结果表明,相对于蠕变寿命,疲劳将严重的降低寿命,且随着保载时间的增加,寿命将降低,但保载的影响将稍小一点。图7(b)给出了受压缩保载的情况。此时相对于最小应力的绝对值,整个趋势与图7(a)相同,保载时间的增加将增加寿命,其主要原因是减小了疲劳的影响。

为了对上述试验结果有个更好的理解,图7(c)以半应力范围为函数,建立与寿命的关系。从唯象来看,似乎可以用应力的指数函数来描述寿命,此时相对于考察的范围,相差为10倍。在相同的应力范围时,受压缩保载的寿命比受拉伸保载

的要长。

为了模拟发动机的真实工作状态, 同时进行了热机械疲劳(TM F) 试验, 温度和载荷(应变控制) 均为时间的函数, 共进行了两类 TM F 试验, 即同相(IP) 和反相(OP)。试验结果见图8。相对于高温疲劳, 在相同的最大应力时, TM F 寿命要偏小。相对于疲劳- 蠕变寿命, 热机械疲劳- 蠕变在相同应力时有较短的寿命。

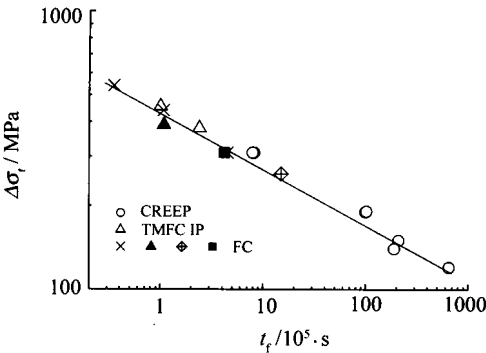


图8 热机械疲劳蠕变模型及试验

Fig 8 The results of TMFC experimental results and model results

总之, 对于所涉及的热机械疲劳- 蠕变、等温疲劳- 蠕变的试验结果, 在10倍寿命误差内, 可以由下式表示:

$$t_f = a \left(\frac{\Delta \sigma}{2} \right)^n \tag{11}$$

式中: a 和 n 为材料常数, 与温度无关。

7 单晶结构分析程序开发及考核

课题开发了单晶结构强度、寿命分析软件SLA PSC (Strength and L ife A nalysis Program of nickel-base Single Crystal structures)。SLA PSC 程序具有经典晶体滑移模型、统一晶体滑移粘塑性模型、立方对称各向异性唯象模型等单晶结构分析所用的本构模型。考虑了三类可能的滑移系, 即八面体滑移系、六面体滑移系及十二面体滑移系。

尽管它以面心立方晶体为对象, 但通过修改所带的数据库文件, 可以改变滑移系特征, 分析体心立方和六方晶体结构的强度及寿命问题。

课题开发了ABAQUS 的单晶umat, 功能与SLA PSC 相同。

8 模拟叶片试验与分析

某单晶涡轮叶片的强度分析表明, 其蠕变断裂危险截面位于距叶根大约1/3叶高处, 截面的面积为31.40 mm²。该处温度为914℃。

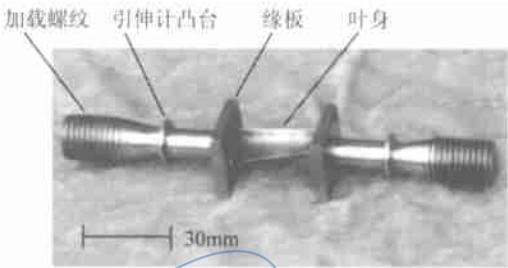


图9 模拟叶片

Fig 9 Modeling blade

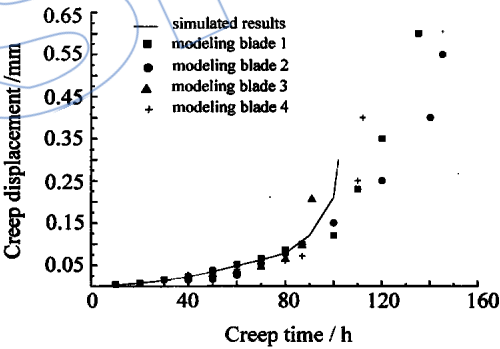


图10 模拟叶片位移

Fig 10 Displacement of Modeling blades

模拟叶片(图9)的蠕变试验在一台蠕变试验机上进行, 试验温度为914℃, 试验载荷为7918 N。在初始250小时试验后, 试验每50小时中断一次以检查叶身裂纹。在叶片断裂前均未在这样

表3 模拟叶片试验结果

Table 3 Results of modeling blades

试验编号	1	2	3	4
与叶片轴线的偏离角/(°)	1	11	9	5
蠕变持久寿命/h	435	202	337	470
蠕变伸长量/mm	0.742	0.8318	0.9765	0.9488

表4 x 轴向与[1 0 0]夹角对寿命的影响
Table 4 The influence of angle of x-axial direction to [1 0 0] to lives

x 轴与材料[1 0 0]向夹角/(°)	0	15	30	45	60	75	90
强度储备系数	1.25	1.31	1.13	1.21	1.13	1.31	1.25
寿命/h	4807	6103	3146	1109	3146	6103	4803

的检查中发现裂纹, 这表明裂纹扩展的时间小于 50 小时。试验结果见图10和表3。

9 单晶叶片分析

进行了某单晶叶片弹塑性分析, 图11给出了有限元模型。由于叶片铸造时控制[0 0 1]晶体取向与叶高方向的夹角小于150, 对其它晶体取向不进行控制。因此每个叶片的材料主轴([0 0 1], [0 1 0], [1 0 0]) 与叶片整体坐标轴(x, y, z)的夹

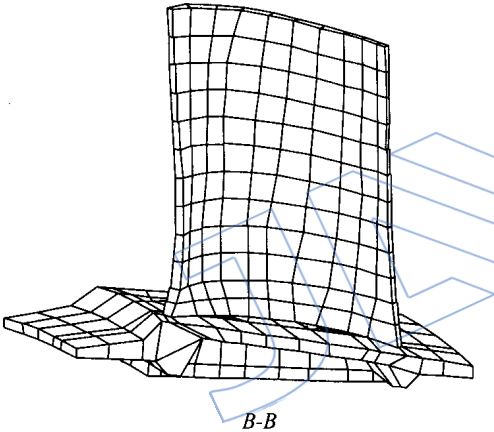


图11 有限元模型

Fig 11 FEM model

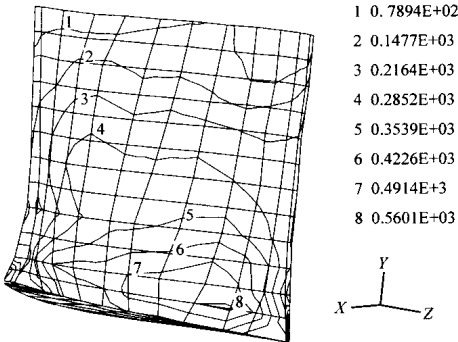


图12 0.0时刻八面体滑移系分切应力

Fig 12 Resolved shear stress of octahedral slip systems at creep time 0.0

角均不相同。由于叶片是各向异性材料, 不同的晶体取向将影响叶片的应力分布, 所以分析中考虑了多种不同晶体取向。图12和图13给出了不同时刻叶身应力分布。

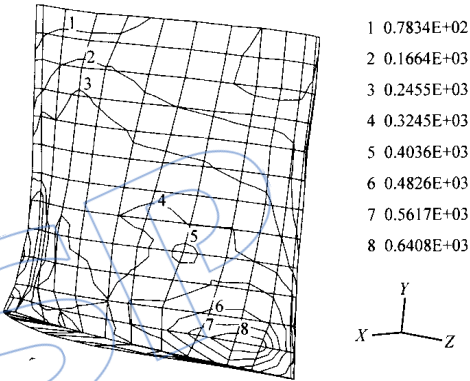


图13 91.71 h 八面体滑移系分切应力

Fig 13 Resolved shear stress of octahedral slip systems at creep time 91.7 h

表4列出了6种不同晶体取向下的叶片寿命及安全系数。

10 结 论

本项目对DD3单晶涡轮叶片材料基本材料数据库已经基本建立; 已经建立了相应的本构模型, 同时本构模型有限元程序化; 开发了大型单晶结构有限元分析软件 SLAPSC; 和 ABAQUS 的umat; 用双剪切试样和模拟叶片试验对模型和有限元进行考核, 在此基础上, 对典型叶片进行分析。

参考文献:

[1] Yue Z F. Multiaxial Creep Damage Constitutive Relationship for NickelBase Single Crystal Superalloys Based on the Microstructural Assessment and Application [R]. WCCM V, Fifth World Congress on the Computational Mechanics, Vienna, Austria, 2002, 7: 7- 12

[2] Yue Z F, Probst-Hein M, Eggeler G. Influence of Boundary Conditions on the Finite Element Creep Stress and Strain

- Analysis of a Double Shear Specimen for Isotropic Creep Conditions [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2002, 33(7): 404- 409
- [3] Yue Z F, Hu W B. The Detail Stress and Strain Analysis of Double Shear Creep Specimen and its Application in Nickel-Base Single Crystal Superalloys[J]. *Rare Metals and Engineer*, 2001, 30: 221- 224
- [4] Yin Ze-yong, Cheng Xiao-ming, Yang Zhi-guo, Yue Zhu-feng Study on the Strength and Life of Anisotropic Single Crystal Blade- Part 1: Crystallographic Constitutive Models and Applications[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(1): 18- 23
- [5] Yin Ze-yong, Cheng Xiao-ming, Yang Zhi-guo, Yue Zhu-feng, Wei Peng-yi Study on the Strength and Life of Anisotropic Single Crystal Blade- Part 2: Experimental Research[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(1): 24- 29
- [6] 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]. *应用数学与力学*, 2000, 21: 373- 381.
- [7] 岳珠峰, 陶仙德, 吕震宙 镍基单晶超合金的剪切强度研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29: 221- 224
- [8] 岳珠峰, 吕震宙 复杂应力状态下镍基单晶合金低周疲劳寿命预测模型[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29: 28- 33
- [9] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿 镍基定向结晶合金蠕变损伤的细观模型[J]. *应用数学与力学*, 1999, 20: 175- 180
- [10] Yue Z F, Lu Z Z Multiaxial Crystallographic Creep Damage Constitutive Model and Applications to Nickel-Base Single Crystal Turbine Blades [R]. *Progress in Mechanical Behaviour of Materials (ICM8)*, Editors: Ellyin F, Provan J W, 1999, 3: 1216- 1221.
- [11] Yue Z F, Lu Z Z Low Fatigue Life Prediction Model for nickel-Base Single Crystal Superalloys under Multiaxial stress states[R]. *Fatigue'99: Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress, Vols 1- 4*, Editors: Wu X R, Wan Z G, 1999: 2013- 2018
- [12] 岳珠峰, 吕震宙, 何健 镍基单晶合金的 γ 相贫化准则及蠕变性能的晶体取向相关性[J]. *金属学报*, 1999, 35, 585- 588
- [13] 岳珠峰, 吕震宙 镍基单晶合金蠕变变形过程的描述[J]. *上海力学*, 1999, 20, 99- 104
- [14] Yue Z F, Lu Z Z The Influence of Crystallographic Orientation and Strain Rate on the High Temperature Low Cyclic Fatigue Property of a Nickel-Base Single Crystal Superalloy [J]. *Metallurgical and Material Transaction*, 1998, 29A: 1093- 1099
- [15] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q. Fracture Behavior Nickel-Base single crystal superalloys as predicted by the strain energy criterion [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1997, 26: 89- 104
- [16] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿 镍基单晶合金厚度效应研究[J]. *金属学报*, 1997, 33: 265- 270
- [17] 岳珠峰, 尹泽勇, 杨治国, 等 晶体滑移有限元程序及其应用[J]. *计算力学学报*, 1997, 14, 500- 503
- [18] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q, Yin Z Y. Life Study of Nickel-Base Single Crystal Turbine Blade: Viscoplastic Crystallographic Constitutive Behavior[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1996, 24: 139- 145
- [19] Yue Z F, Lu Z, Zheng C Q. Evaluation of Creep Damage Behavior of Nickel-Base Directionally Solidified Superalloys with Different Crystallographic Orientations[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1996, 25: 127- 138
- [20] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿, 等 Ni 基单晶叶片粘塑性分析[J]. *推进技术*, 1996, 17(3): 50- 55
- [21] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿 Ni 基单晶合金裂纹应力结构及断裂参数分析[J]. *计算结构力学及其应用*, 1996, 13: 176 - 179
- [22] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿, 等 一种立方对称唯象本构非线性模型及其应用[J]. *机械强度*, 1996, 18(2): 38- 41.
- [23] 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*, 1995, 26A: 1815- 1821.
- [24] 岳珠峰, 郑长卿 镍基单晶合金蠕变损伤规律研究[J]. *金属学报*, 1995, 31: A 356- 361.
- [25] 岳珠峰, 郑长卿 考虑热不协调性的 Ni 基单晶合金细观力学研究[J]. *金属学报*, 1994, 30: A 127- 136
- [26] 岳珠峰, 郑长卿 单晶叶片材料拉/压屈服特性的力学研究[J]. *航空学报*, 1993, 14: A 556- 559