

文章编号: 1000-8055(2008) 1222-1840-6

单晶涡轮叶片晶体取向优化设计

卿 华^{1,2}, 江和甫¹, 温卫东², 吴长波¹, 胡仁高¹, 覃志贤¹, 孙景国¹

(1. 中国燃气涡轮研究院, 成都 610500;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用损伤型晶体蠕变滑移本构模型, 对具体工况下某发动机单晶涡轮叶片进行蠕变变形分析. 应用多学科优化设计理论采用自适应模拟退火(ASA)算法和非线性序列二次规划(NLSQP)优化算法对单晶叶片晶体取向进行优化设计. 叶片分析结果表明: 叶片纵向的晶体取向偏角和叶片横向随机取向的晶向角, 对单晶叶片的叶尖蠕变变形具有较大的影响. 对随机晶向角进行一维优化, 当晶向角为 76.2° 时, 叶片具有最小的叶尖径向位移 0.077 74 mm, 优化幅度为 2.0%; 叶片纵向偏差角 0° 时的叶尖径向位移为 0.079 29 mm, 10° 时的叶尖最大位移为 0.093 52 mm, 最大变化幅度为 17.9%.

关 键 词: 镍基单晶; 晶体取向; 涡轮叶片; 优化设计; 损伤

中图分类号: V231.91

文献标识码: A

Optimization design of crystallographic orientation in single crystal turbine blade

QING Hua^{1,2}, JIANG He甫¹, WEN Weidong², WU Changbo¹,
HU Ren2gao¹, QIN Zhixian¹, SUN Jing2guo¹

(1. Gas Turbine Establishment of China, Chengdu 610500, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A two-dimensional damage variable creep constitutive model was used to analyze the creep deformation of nickel-based single crystal turbine blades. Based on multidisciplinary design optimization theory, the crystallographic orientation optimization was performed by ASA (adaptive simulation annealing) and NLSQP (nonlinear sequential quadratic programming) algorithm. The analysis results show that controlled orientation and uncontrolled orientation have profound influence on creep deformation of single crystal turbine blades. The minimal radial displacement of blade tip is 0.077 74 mm, when one of uncontrolled crystal orientations is 76.2° in one dimensional optimization state. The optimization amplitude is 2.0%. The minimal radial displacement of blade tip is 0.073 78 mm, when two uncontrolled crystal orientations are 63.7° and 81.4°, respectively in two dimensional optimization states. The optimization amplitude is 5.4%. The radial displacements of blade tip are 0.079 29 mm and 0.093 52 mm when the controlled orientations are 0° and 10°, respectively. The amplitude variation is 17.9%.

Key words: nickel-based single crystal; crystallographic orientation; turbine blade; optimization design; damage

单晶材料与传统铸造高温合金相比一个最重要的特点是存在严重的各向异性,在其它条件保持不变时,蠕变晶体取向不同,构件内的应力、应变分布不同,损伤分布不同,材料可能失效的最危险点位置和寿命也会有差异,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、数十倍甚至数百倍。镍基单晶高温超合金因其卓越的机械性能,而成为航空发动机涡轮叶片首选材料。为了提高涡轮叶片的高温机械性能,充分挖掘材料特有潜能,有必要对镍基单晶合金的各向异性性质及高温性能进行深入的了解。涡轮叶片的几何外形主要服从气动设计的要求,工作环境受发动机性能的制约,基本上没有变更的余地。目前单晶叶片铸造时,只控制叶片轴向(叶型积叠线方向)为结晶方向([001]方向),即便如此,现行的技术也无法保证控制方向的晶向和积叠线方向一致,故存在一定的偏差角。在叶片合格性检验时,仅要求轴向的晶体取向偏离[001]方向必须小于某个角度,例如 5b 或 10b。而对其余两个晶轴方向则没有要求,铸造出来的叶片其余晶轴方向处于随机状态。这就致使叶片的结构强度,持久寿命等特性具有较大的分散度。在单晶叶片的设计、加工过程中,通过控制叶型积叠线方向的晶体取向偏差角和叶片横截面(叶型面)内的晶轴方向,对单晶叶片的晶体取向进行优化设计,改善涡轮叶片的力学特性,具有重要的工程意义。然而,迄今对此研究较少。对此的研究不仅可以减少不确定因素,避免有关各类故障甚至灾难性事故发生,而且可以充分利用材料性能储备,更安全地确定单晶叶片强度和寿命^[125]。

本文采用损伤型晶体蠕变滑移本构模型,对具体工况下某发动机各向异性单晶涡轮叶片进行蠕变变形和寿命分析。应用多学科优化设计理论采用合适的优化算法对单晶叶片晶体取向进行优化设计,使涡轮叶片的损伤变形和寿命等机械性能达到最优。

1 晶体蠕变滑移模型

采用的蠕变损伤本构方程是建立在滑移系的分切应力、滑移系的分切应变和他们的变化率基础上。镍基高温合金的蠕变机理主要为晶体滑移变形,其可能开动的滑移系族有三组,即:八面体滑移系族(Oct1, {110} < 111>),包含 12 个滑移系;十二面体滑移系族(Oct2, {111} < 112>),包含 12 个滑移系;六面体滑移系族(Cub, {111}

< 112>),包含 6 个滑移系。在晶体滑移模型,外力 R 作用下滑移系 A 的分切剪切应力可以表示为

$$S^A = R P^{(A)} \quad (1)$$

式中

$$P^{(A)} = \frac{1}{2} \left(m^{*(A)} a \cdot n^{*(A)} + n^{*(A)} a \cdot m^{*(A)} \right) \quad (2)$$

$m^{*(A)}$, $n^{*(A)}$ 分别为滑移系的滑移方向和滑移面法线方向的单位矢量。

对于同一滑移系族的各个滑移系,蠕变参数相同,不同族滑移系则不同。

宏观应变率 $\dot{E}$ 由弹性部分 $\dot{E}^e$ 和非弹性部分(蠕变应变率) $\dot{E}^c$ 组合而成:

$$\dot{E} = \dot{E}^e + \dot{E}^c \quad (3)$$

弹性应变率 $\dot{E}^e$ 可由宏观应力率 $\dot{R}$ 得到,此时的弹性本构性质与 E , ν 及 G 相关; $\dot{E}^c$ 由滑移系的分切应变率得到:

$$\dot{E}^c = \sum_{A=1}^N \dot{\epsilon}^{(A)} P^{(A)} \quad (4)$$

若多个滑移系族同时开动,则宏观蠕变应变为各个滑移系的蠕变应变之和,即

$$\left(\dot{E} \right)_c = \left(\dot{E} \right)_c^{\text{oct1}} + \left(\dot{E} \right)_c^{\text{oct2}} + \left(\dot{E} \right)_c^{\text{cub}} \quad (5)$$

式中上标 oct1, oct2, cub 分别表示八面体滑移系、十二面体滑移系和六面体滑移系。

本文采用文献[6]所建的考虑空洞损伤和筏化-解筏的蠕变损伤本构方程,模型认为,除了试样表面氧化外,存在空洞损伤和材质劣化两个机理。对镍基单晶合金,铸造空洞和缺陷将演化成蠕变空洞。蠕变过程中的强化相 α 筏化和解筏,事实上是材质劣化的重要方面。因此,考虑空洞损伤和筏化-解筏的蠕变损伤本构方程可以为

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} \left(\frac{1}{1-X} \right)^n e^S \quad (6)$$

式中 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} R$, $\dot{\epsilon}$ 和 $\dot{\epsilon}_0$ 为初始蠕变率和初始损伤率, n , m 和 C 为模型参数,与温度有关。 X 和 S 为状态损伤变量。总的损伤 D 为

$$D = X + \arctan(S) \quad (7)$$

上式本构模型已编入有限元软件 Abaqus 的用户子程序 Umat 中。

2 计算模型

计算中采用的某发动机单晶涡轮叶片由国产第一代镍基单晶合金 DD3 沿叶片积叠线方向定向铸造而成。图 1 给出单晶涡轮叶片的有限元网

格. 共有 120 个 20 节点六面体单元, 953 个节点. 根据叶片与涡轮盘的接触分析, 计算时约束三级榫齿法向位移和榫槽方向位移, 取材料主轴坐标与叶片几何坐标重合. 叶片高 25.2mm, 叶根 y 坐标为 86mm, 叶尖 y 坐标为 115.5mm. 实际工作中叶片受离心载荷、温度场以及气动载荷的共同作用. 由于气动载荷较小, 本文计算不考虑气动载荷, 计算发动机转速为 45 000 r/min, 总体坐标系建立在涡轮盘的型心上. 在优化过程中当总的损伤变量达到 1 时, 计算中止.

表 1~4 分别给出了 DD3 单晶材料参数弹性模量, 泊松比, 剪切模量和热膨胀系数随温度的变化关系, 计算程序中其它温度下的材料参数可由以上各表中的参数内插得到. 图 2 给出了经过气动分析得到的涡轮叶片温度场, 值得提出的是, 叶片气动分析是在流体分析软件 *Fleunt* 下完成, 因此本文开发了专门的温度转换程序将气动分析结

果导入到 *Abaqus* 软件中进行叶片强度及寿命分析.



图 1 某发动机涡轮叶片有限元网格
Fig.1 Finite element mesh of a turbine blade

表 1 DD3 单晶[001] 方向弹性模量与温度的关系

Table 1 Elastic modulus of DD3 in [001] orientation at different temperature

温度/ e	26	400	500	600	700	800	900	950
E/ GPa	131.5	112	117.5	113.5	108	104	98	93.5

表 2 DD3 单晶[001]方向泊松比与温度的关系

Table 2 Poisson s ratio of DD3 in [001] orientation at different temperature

温度/ e	26	400	500	600	700	800	900	950
泊松比	0.300	0.317	0.320	0.320	0.322	0.326	0.328	0.330

表 3 DD3 单晶[001] 方向剪切模量与温度的关系

Table 3 Shear modulus of DD3 in [001] orientation at different temperature

温度/ e	26	400	500	600	700	800	900	950
G/ GPa	137	119	115	113	113	107	101	96

表 4 DD3 单晶热膨胀系数与温度的关系

Table 4 Thermal expansion coefficient of DD3 in [001] orientation

温度/ e	0	400	500	600	700	850	950
热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ / e ⁻¹)	13.9	14.48	14.5	14.84	15.3	16.19	17.6

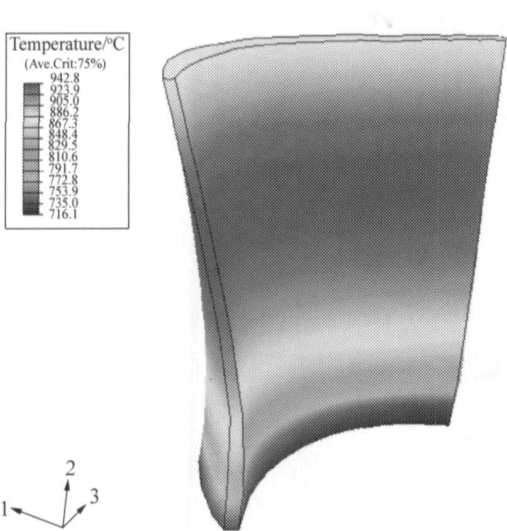


图 2 单晶涡轮叶片温度场

Fig. 2 Temperature field of turbine blade

3 优化设计分析

晶体取向优化设计思想是采用多学科优化设计软件 Isight 通过调用非线性软件 Abaqus 搭建一个有效、灵活的多学科优化设计平台,将晶体滑移理论有限元程序集成在 Abaqus 用户子程序 Umat 中,其中包括优化设计变量- 晶体取向.采用一定的优化算法对单晶涡轮叶片晶体取向进行优化,使优化目标- 单晶涡轮叶片的滑移系分解切应力最小.优化过程中 Isight 作为循环寻优的控制器,而 Abaqus 则为每一循环强度分析的求解器.图 3 给出了单晶涡轮叶片晶体取向优化设计流程图.

在优化设计中优化算法的选取是关系到优化运算时间长短和优化成功与否的重要因素.采用有限元方法计算单晶构件的蠕变损伤变形和蠕变寿命,属于材料非线性问题,涉及到的平衡方程和本构方程均为非线性方程,需要用迭代方法求解.由于很难找到目标函数与设计变量(晶体取向)之间的函数关系,所以采用全局搜索和局部搜索的方法来寻优.本文计算中采用自适应模拟退火算法(ASA)与非线性序列二次规划(NLSQP)算法的组合进行晶体取向的寻优,自适应模拟退火算法全局搜索最优之后使用序列二次规划算法达到快速收敛,这样既保证能取得全局最优解又能提高计算效率,降低计算成本.根据单晶材料特性可知,当晶向角变化时,单晶构件的力学性能应呈现周期为 90°的波状循环特征^[1].因此本文在 0°~ 90°晶向角内对叶型面内的随机取向的晶体取向角以及在 0°~ 15°晶向角内对晶体取向偏角进行

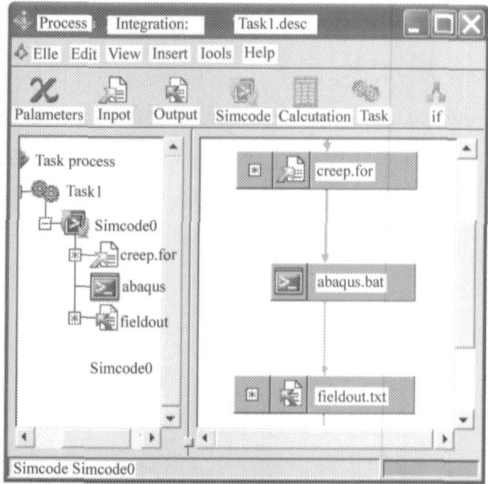
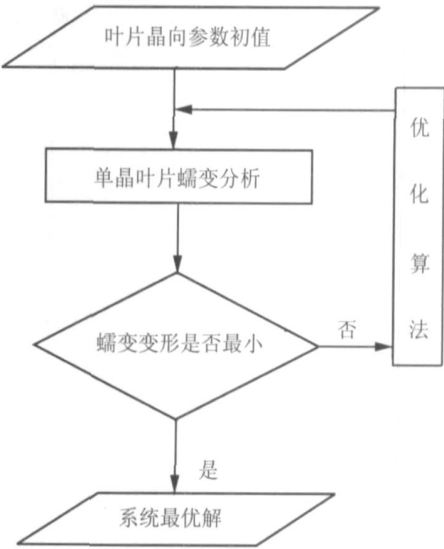


图 3 晶体取向优化设计流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization design in crystallographic orientation

涡轮叶片晶体取向寻优.

在分析各向同性材料和结构强度时常采用 Von. Mises 为等效应力,在晶体滑移理论中,定义滑移系最大分切应力为等效应力,滑移系分切应力是判断滑移系开动与否和滑移程度的最佳量值.根据参考文献[1]可知,对于涡轮叶片失效,重点要考虑叶片断裂和叶尖与机匣内壁碰磨,因此主要分析晶向角对叶尖最大径向位移的影响.本文计算了叶尖最大径向位移的优化结果.

4 计算结果与分析

4.1 随机晶向角优化

保持叶片叶型积叠线方向为< 001> 取向不变,另外叶片横截面内两晶轴方向处于随机状态,但两随机晶向角保持垂直的耦合关系,如图 4(a)

所示. 随机晶向角的变化范围为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 优化目标是使叶尖最大径向位移最小. 图 5 给出了随机晶向角随搜寻过程的变化情况. 图 6 给出了叶尖最大径向位移随搜寻过程的变化情况. 从图 5 和图 6 可以看出, 在对叶尖最大径向位移的最小值寻优过程中, 初始阶段, 自变量- 随机晶向角和目标值- 叶尖最大径向位移的变化都比较分散, 这是由于优化初期采用自适应模拟退火(ASA)算法进行全局搜索所致, 随后采用非线性序列二次规划(NLSQP)算法进行局部寻优, 优化参数和结果逐步收敛, 这说明 ASA 和 NLSQP 算法在晶体取向优化中是比较合适的. 图 7 给出了叶尖最大径向位移随随机晶向角改变的变化情况, 从图中可以看出, 在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 晶向角变化范围内, 叶片的叶尖最大径向位移有较大的差异. 当叶片横截面的晶向角为 76.2° 时, 叶片具有最小的叶尖最大径向位移为 0.07774 mm , 优化幅度相对 0° 时的位移 0.07929 有 2.0% . 当晶向角为 31.6° 时叶尖最大位移最大, 为 0.08445 mm . 最大变化幅度相对于 0° 时有 8.3% .

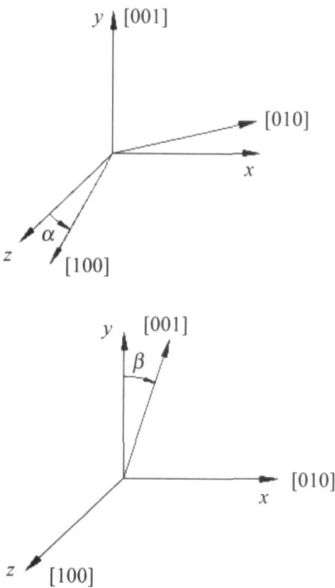


图 4 叶片不控取向偏角的定义
Fig. 4 Definition of the two uncontrolled orientations of the blades

4.2 叶片纵向偏差角优化

在此优化过程中, 保持叶片横截面内两晶轴的晶体取向不变, 叶片纵向(y 轴)偏离某一角度 β 如图 4(c)所示. 偏差角变化范围为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 优化目标是使叶尖最大径向位移最小. 图 8 和图 9 分别给出了纵向偏差角, 叶尖最大径向位移随寻

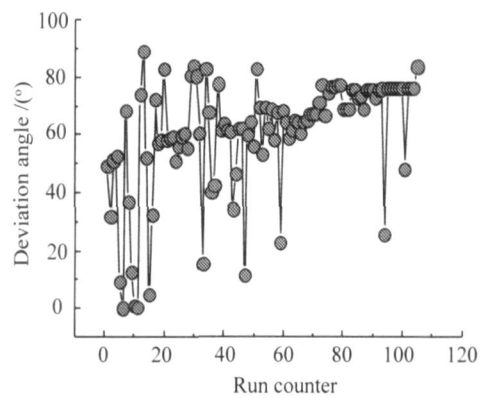


图 5 随机晶向角随搜寻过程的变化
Fig. 5 Change of uncontrolled orientation in optimization

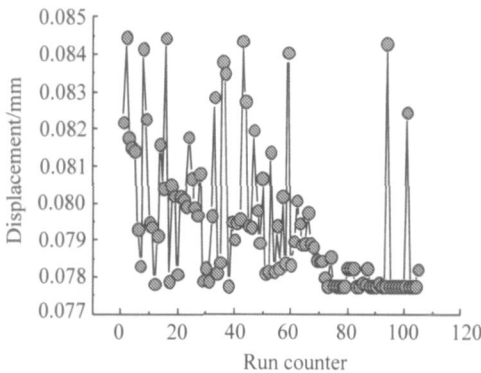


图 6 叶尖最大径向位移随搜寻过程的变化
Fig. 6 Change of radial displacement of blade tip in optimization

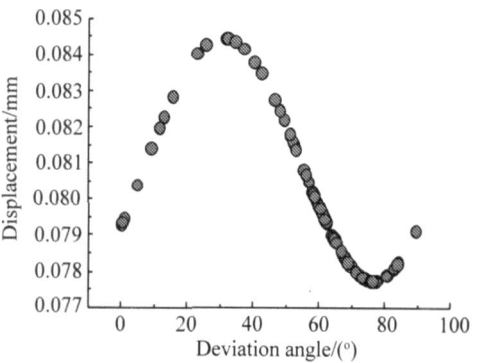


图 7 叶尖最大径向位移随偏离角改变的变化
Fig. 7 Change of radial displacement of blade tip with uncontrolled orientation

优过程的变化情况, 优化参数和结果同样是有分散逐步收敛. 图 10 给出了叶尖最大径向位移随纵向偏差角改变的变化情况. 从图中可以看出, 纵向偏差角对叶尖最大径向位移有较大的影响, 很显然随着纵向偏差角增大, 叶尖最大位移变大, 而且变化速率也随着偏差角增大而增大. 叶片纵向偏

差角 0b时的叶尖最大位移为 0. 079 29, 10b时的叶尖最大位移为 0. 093 52, 最大变化幅度为 17. 9%.

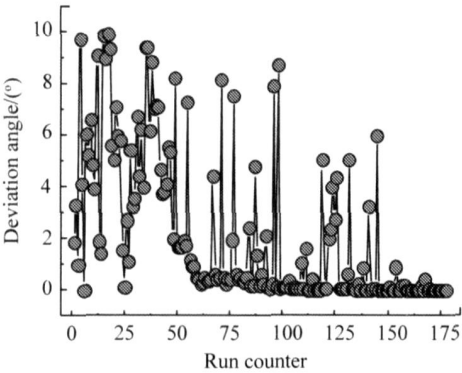


图 8 纵向偏差角随寻优过程的变化
Fig. 8 Change of deviation of the axial orientation in optimization

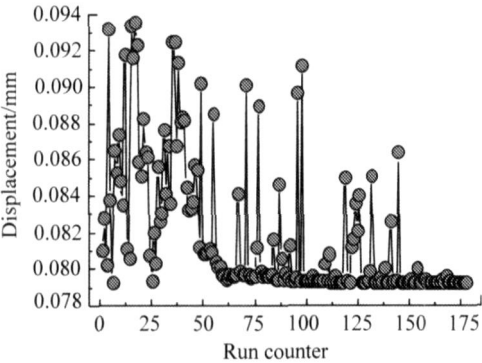


图 9 叶尖最大径向位移随寻优过程的变化
Fig. 9 Change of radial displacement of blade tip in optimization

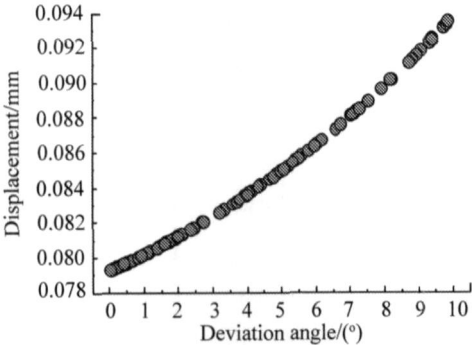


图 10 纵向偏差角对叶尖最大径向位移的影响
Fig. 10 Influence of deviation of the axial orientation on radial displacement of blade tip

5 结 论

本文采用双参数晶体滑移蠕变损伤模型对某某发动机 DD3 单晶涡轮叶片进行蠕变变形分析, 应用多学科优化设计理论对单晶涡轮叶片进行晶体取向的优化, 结果表明:

- 1) 优化过程中采用自适应模拟退火(ASA)算法和非线性序列二次规划(NLSQP)算法对优化目标进行全局搜索和局部寻优, 使优化参数和结果由初始的分散逐步的收敛. ASA 和 NLSQP 算法能很好的进行晶体取向优化.
- 2) 对叶片横界面内的随机晶向角进行优化, 当晶向角为 76. 2b时, 叶片具有最小的叶尖最大径向位移 0. 077 74 mm, 优化幅度为 2. 0%. 纵向偏差角对叶尖最大径向位移有较大的影响, 随着纵向偏差角增大叶尖最大位移变大. 叶片纵向偏差角 0b时的叶尖最大位移为 0. 079 29, 10b时的叶尖最大位移为 0. 093 52, 最大变化幅度为 17. 9%.
- 3) 单晶叶片高温蠕变性能与晶体取向相关, 充分利用晶向角对构件力学性能的影响, 有效控制单晶铸造角度, 能较大的提高单晶涡轮叶片机械性能.

参考文献:

[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.

[2] 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): 472-480.

YUE Zhufeng, LB Zhenzhou, YANG Zhiguo, et al. In2fluence of the deviation and randomness of the crystallographic orientations on the strength and life of nickelbase single crystal superalloy turbine blades [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 472-480. (in Chinese)

[3] 岳珠峰, 杨治国, 尹泽勇. 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: 32-34.

YUE Zhufeng, YANG Zhiguo, YIN Zeyong. Influence of the crystallographic orientations on the strength and life of nickelbase single crystal superalloy turbine blades [J]. Aerospace Power, 1997, 4: 32-34. (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]. 燃气轮机试验与研究, 2004, 17(2): 18-22.

WAN Jiansong, YUE Zhufeng. The influence of controlled and uncontrolled crystal orientation on creep life of nickelbased single crystal DD3 turbine blade [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 18-22. (in Chinese)

[5] 温志勋. 晶体塑性理论及其在镍基单晶和双晶合金中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

WEN Zhixun. Crystal plastic theory and its application on nickelbased single and bicrystal superalloys [D]. Xi an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)

[6] 岳珠峰, 吕震宙, 杨治国, 等. 镍基单晶结构的蠕变损伤寿命研究[J]. 推进技术, 2003, 24(3): 283-285.

YUE Zhufeng, LB Zhenzhou, YANG Zhiguo, et al. FEM creep damage study for nickelbase single crystal structure under multiaxial stress condition [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(3): 283-285. (in Chinese)