

镍基单晶合金热弹塑性应力-应变场数值模拟

丁智平, 陈吉平

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 利用 ANSYS 有限元结构分析软件参数化设计语言 APDL 和用户可编程特性 UPFs, 将考虑拉-剪耦合效应的镍基单晶合金屈服准则和弹塑性本构模型集成到 ANSYS 软件中, 实现对镍基单晶合金弹塑性有限元应力-应变场的分析。对温度为 680 °C 的 [001]、[011] 和 [111] 3 种取向的 DD3 镍基单晶合金试样进行单向拉伸热弹塑性应力-应变数值模拟, 并与试验数据进行对比, 最后, 对单晶涡轮盘片进行循环应力应变分析。

关键词: 单晶合金; 正交各向异性; 热弹塑性; 应力-应变

中图分类号: V231.91; O344.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)06-0031-05

Numerical Simulation of Thermo Elastic-Plastic Stress-Strain for Single Crystal Nickel-Based Superalloy

Ding Zhiping, Chen Jiping

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Based on the yield criterion and constitutive model of taking into account the effects that the components of tension stresses couple with components of torsional stresses for single crystal Nickel-based superalloy, a subroutine to calculating the thermo elastic-plastic stress-strain of single crystal Nickel-based superalloy on ANSYS platform is developed by APDL and UPFs of ANSYS. Numerical simulation of uniaxial tension thermo elastic-plastic stress-strain for single crystal nickel-based superalloy specimens at 680 °C is done along different orientations [001], [011] and [111], and the calculating results is validated by test data. At last, the three dimensional nonlinear cyclic stress-strain of single crystal turbine disk-blade assembly is analyzed.

Key words: single crystal material; orthotropy; elastic-plasticity; stress-strain

0 引言

镍基单晶高温合金因其优越的高温抗疲劳、抗蠕变性能, 成为航空发动机热端部件的重要材料。单晶合金是正交各向异性材料, 晶体取向不同, 应力-应变关系不一样。研究单晶合金在高温下的弹塑性力学行为, 是进行结构强度分析和寿命预测的必要前提。工程问题通常是很复杂的, 绝大多数工程构件的非线性应力-应变分析很难直接得到解析解。特别是各向

异性材料, 得到解析解的困难程度更大。而有限元方法对于完成这些复杂工程结构的分析是一种十分有效的方法。文献[1, 2]提出了单晶合金的屈服准则和弹塑性本构模型, 为了能够将其应用于工程实际, 本文将它们集成到 ANSYS 有限元结构分析软件中, 对 DD3 镍基单晶合金材料的拉伸试件进行了热弹塑性应力-应变数值模拟, 并与试验数据进行了对比。最后, 利用该模型对单晶涡轮盘片进行循环应力应变分析。

收稿日期: 2007-10-08

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY5014), 湖南省教育厅基金资助重点项目(05A047)

作者简介: 丁智平(1956-), 男, 湖南桃江人, 湖南工业大学研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事机械结构强度和优化设计方面的教学与研究。

1 单晶合金的屈服函数和弹塑性本构关系

文献[1]考虑正交各向异性材料在偏轴受载时存在的拉、剪应力耦合效应,对 Hill 屈服准则进行修正,并根据单晶合金的屈服特点提出了单晶合金屈服准则。其屈服函数为

$$\Omega = \sigma_s^2 = A \left[(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 \right] + B (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) + C \left[\sigma_{23}^2 (2\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \sigma_{31}^2 (2\sigma_{22} - \sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + \sigma_{12}^2 (2\sigma_{33} - \sigma_{11} - \sigma_{22})^2 \right], \quad (1)$$

式中: A 、 B 和 C 为各向异性参数,可由不同取向的单向拉伸试验确定;

σ_{ii} 为材料主轴方向的正应力;

σ_{ij} 为材料主轴方向的剪应力。

文献[2]采用联合流动法则,以屈服函数作为塑性势函数,建立了单晶合金的弹塑性本构方程

$$d\{\sigma\} = [C]_{ep} d\{\varepsilon\}, \quad (2)$$

式中: $[C]_{ep}$ 为弹塑性矩阵,

$$[C]_{ep} = [C] - \frac{[C] \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\}^T [C]}{H' + \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\}^T [C] \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\}}$$

$[C]$ 为弹性矩阵, H' 为硬化模量。

2 单晶合金的热弹塑性应力-应变关系及有限元算法

物体温度改变时,其几何尺寸将发生变化,产生热变形。当物体受热又受到外界位移约束,或内部受热不均匀时,物体将处于一种有内部应力的状态。若此时物体还受到弹性和塑性变形,则总变形为弹性应变、塑性应变与热应变三者之和,用增量形式表示为

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon\}_e + \{d\varepsilon\}_p + \{d\varepsilon\}_T. \quad (3)$$

假设不考虑温度对材料硬化特性的影响,可导出增量形式的热弹塑性应力-应变关系^[3]

$$d\{\sigma\} = [C]_{ep} (d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon\}_T), \quad (4)$$

对于镍基单晶合金,假设仅考虑线性热膨胀,则由温度场的变化而引起的热应变为

$$\varepsilon_{xT} = \varepsilon_{yT} = \varepsilon_{zT} = \alpha \Delta T,$$

$$\gamma_{xyT} = \gamma_{yzT} = \gamma_{zxT} = 0,$$

写成增量矩阵形式为

$$d\{\varepsilon\}_T = \alpha [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T dT = \alpha \{\delta\} dT, \quad (5)$$

式中: α 是线膨胀系数;

dT 是温度变化增量;

$$\{\delta\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

根据有限元理论,温度变化产生的热应变所对应的单元热载荷为

$$\{R\}_T^e = \int_V [B]^T [C]_{ep} \{\varepsilon\}_T dV, \quad (6)$$

整个结构由于温度改变而引起的热载荷为

$$\{R\}_T = \sum \int_V [B]^T [C]_{ep} \{\varepsilon\}_T dV, \quad (7)$$

将式(5)和(6)代入式(7),得

$$\{R\}_T = \sum \int_V [B]^T [C]_{ep} \alpha \Delta T \{\delta\} dV. \quad (8)$$

求解弹塑性问题,增量形式的方法有变刚度法、初应力法和初应变法。由于变刚度法在计算上相对简单,故本文采用了这种方法。将总载荷分成若干次施加,对于第 i 次加载,可以列出平衡方程组

$$\{\Delta R\}_i = [K(\{\sigma\}_{i-1})]_{ep}^i \{\Delta q\}_{i0}. \quad (9)$$

显然,这是一个线性方程组。求解以后得到第 i 次加载后产生的位移增量 $\{q\}_{i-1}$, 应变增量 $\{\varepsilon\}_{i-1}$ 和应力增量 $\{\sigma\}_{i-1}$, 并由此得到新的应力水平 $\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta \sigma\}_i$ 。将它再代入 $[C]_{ep}$, 形成新的刚度矩阵,继续进行第 $(i+1)$ 次加载计算。重复上述过程,直到全部荷载加完为止,最后得到的位移、应变和应力就是所要求的弹塑性分析的结果。

3 DD3 单晶合金热弹塑性应力-应变数值模拟

单晶合金是正交各向异性材料,在进行有限元分析时须考虑其各向异性的特性。就弹塑性有限元分析而言,各向异性材料与各向同性材料的差别在于屈服准则以及相应的弹塑性矩阵的不同。单晶合金屈服准则以及相应的弹塑性本构方程是通过选择不同的各向异性参数来考虑材料的各向异性。本文利用 ANSYS 有限元结构分析软件参数化设计语言 APDL 和用户可编程特性 UPFs,将单晶合金屈服准则和弹塑性本构模型集成到 ANSYS 中,实现应用 ANSYS 软件进行单晶合金的弹塑性应力-应变分析。APDL (ANSYS Parametric Design Language) 主要面向具有一定编程技巧,

并希望用 ANSYS 变量设计语言进行开发的用户, 可以用它执行各种任务, 甚至进行参数化建模。UPFs (User Programmable Feathers) 是 ANSYS 作为开放结构而提供的一系列 FORTRAN 函数和程序示例, 用户可按自己的要求扩展或修改程序的功能, 也允许用户使用自己的 FORTRAN 程序功能^[4]。在本文中, 参数的输入、加载, 等效应力的计算, 应力或应变场的云图显示和列表都是 PDL 编写宏程序实现, 而屈服准则和本构模型的接入是通过编写 UPFs 提供的接口子程序 USERPL.F 得以实现。

本文分别对 DD3 单晶合金在温度为 680 °C 时的 [001]、[011]和[111] 3种取向进行了单向拉伸热弹性应力-应变数值模拟。DD3 单晶合金拉伸试样如图 1 所示, 试样标距长度为 11.5 mm。为使数值模拟计算结果能与试验值进行比较, 选取试样标距长度部分建立有限元模型。利用试样的对称性, 模型为试样的 1/4 结构, 其中含有 solid45 六面体单元 552 个, 共计节点 816

个, 如图 2 所示。

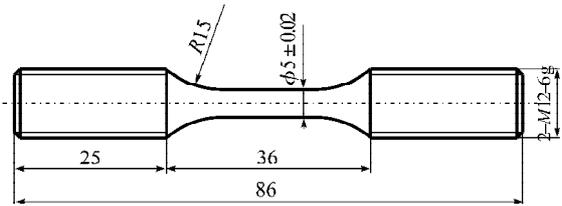


图 1 DD3 单晶合金拉伸试样

Fig. 1 Tension specimen of single crystal DD3

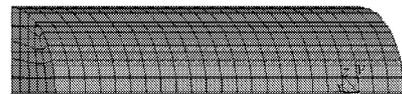


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

DD3 单晶合金的弹性常数、屈服应力和硬化模量试验值见表 1。

表 1 DD3 单晶合金弹性常数试验值

Tab. 1 Test values of elastic constants for single crystal DD3

取向	温度 / °C	E/GPa	G/GPa	μ	$\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	硬化模量 H'/GPa
[001]	680	99.7	113	0.322	14.6	943	1.328
[011]	680	115.8	113	0.322	14.6	896	-2.228
[111]	680	257.7	113	0.322	14.6	1085	3.014

对模型施加温度载荷和轴向位移载荷, 计算得出 3 种取向的应力、应变模型值, 与应力-应变试验曲线的对比结果见图 3~5。

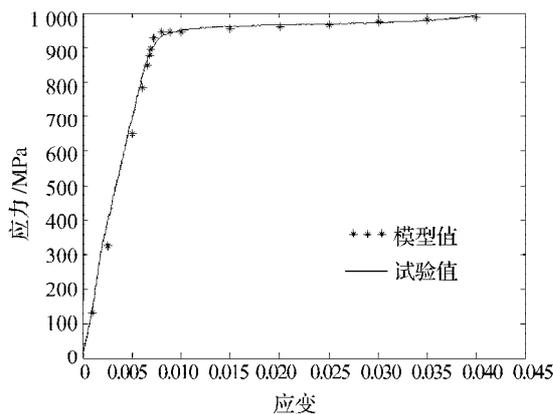


图 3 DD3 单晶合金[001]取向 680 °C 单向拉伸曲线
Fig. 3 Uniaxial tension curve of single crystal DD3 along [001] orientation at 680 °C

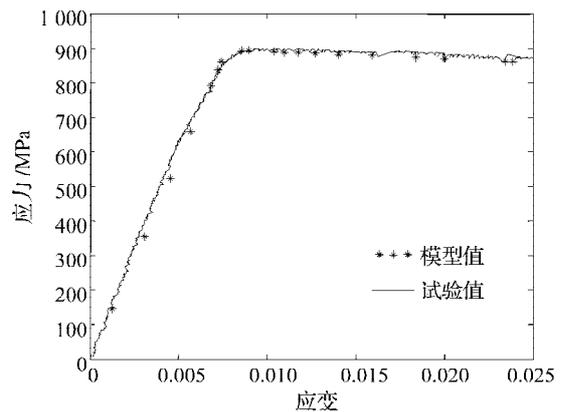


图 4 DD3 单晶合金[011]取向 680 °C 单向拉伸曲线
Fig. 4 Uniaxial tension curve of single crystal DD3 along [011] orientation at 680 °C

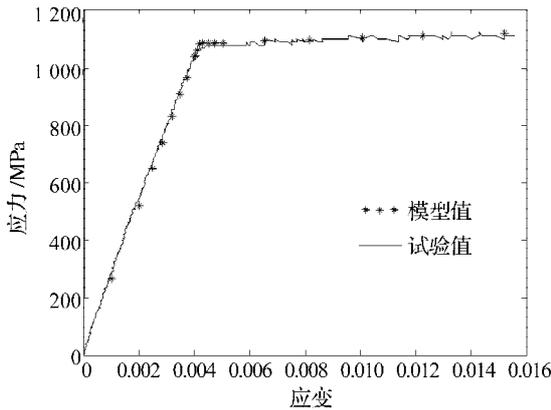


图5 DD3单晶合金[111]取向680 °C单向拉伸曲线
Fig. 5 Uniaxial tension curve of single crystal DD3 along [111] orientation at 680 °C

超过弹性应变增量的数量级。

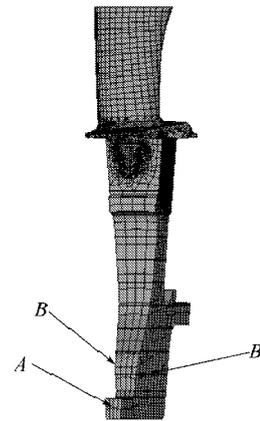


图6 叶片、轮盘组件模型
Fig. 6 Finite element model of turbine disk-blade assembly

4 单晶涡轮盘片循环应力应变分析

从以上分析可知,单晶合金弹塑性本构模型在接近材料屈服应力的低应力范围具有较高的计算精度。本文利用该模型对单晶涡轮盘片组件进行循环应力应变分析。

4.1 建立有限元模型

涡轮盘为各向同性材料,选用solid45(8节点等实体单元)划分网格。叶片榫头与涡轮盘榫槽接触面之间选用conta178点对点接触单元。叶片的单元坐标系(即材料坐标系)与整体坐标系重合。整个模型分为25 204个单元,其中叶片16 148个单元,轮盘8 486个单元;共有38 206个节点,其中有循环对称节点820个,点对点接触单元570个。计算模型的网格划分见图6。

4.2 加载与求解

计算载荷包括离心载荷和热载荷。离心载荷的计算转速为45 000转/min;热载荷是由传热计算给出的温度场,通过转换程序将温度场作为体载荷加到模型的有限元网格节点上(见图7)。由于涡轮叶片气动力产生的应力相对较小,故本模型没有考虑气动载荷。

对模型作弹塑性分析时必须考虑材料的非线性,采用分步加载,保证载荷变化产生的塑性应变增量不

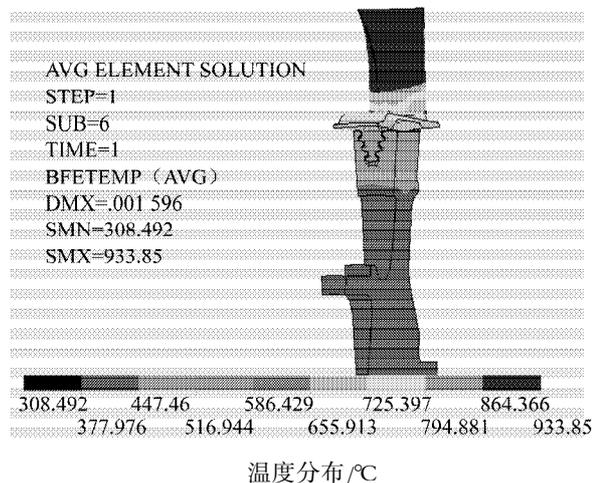


图7 叶片、轮盘组件温度分布
Fig. 7 Temperature distributing of turbine disk-blade assembly

对模型进行循环应力-应变分析,计算求解应包括加载和卸载两个连续过程,即加载过程计算完成后,紧接着进行卸载过程计算,中间不能间断。本文计算了一个加载-卸载循环的应力和变形。为了满足疲劳寿命预测所必需的数据,根据加载和卸载后的应力、应变值,计算了整个模型的等效应力范围 $\Delta\sigma$ 和等效应变范围 $\Delta\varepsilon_1$ 。计算公式分别为:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\Delta\sigma_{xx} - \Delta\sigma_{yy})^2 + (\Delta\sigma_{yy} - \Delta\sigma_{zz})^2 + (\Delta\sigma_{zz} - \Delta\sigma_{xx})^2 + 6(\Delta\sigma_{xy}^2 + \Delta\sigma_{yz}^2 + \Delta\sigma_{zx}^2) \right]^{0.5}$$

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{\sqrt{2} \times (1 + \mu)} \left[(\Delta\varepsilon_{xx} - \Delta\varepsilon_{yy})^2 + (\Delta\varepsilon_{yy} - \Delta\varepsilon_{zz})^2 + (\Delta\varepsilon_{zz} - \Delta\varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta\gamma_{yz}^2 + \Delta\gamma_{zx}^2) \right]^{0.5}$$

式中: $\Delta\sigma_{xx}$ 、 $\Delta\sigma_{yy}$ 、 $\Delta\sigma_{zz}$ 、 $\Delta\sigma_{xy}$ 、 $\Delta\sigma_{yz}$ 和 $\Delta\sigma_{zx}$ 分别为各应力分量范围;

$\Delta\varepsilon_{xx}$ 、 $\Delta\varepsilon_{yy}$ 、 $\Delta\varepsilon_{zz}$ 、 $\Delta\gamma_{xy}$ 、 $\Delta\gamma_{yz}$ 和 $\Delta\gamma_{zx}$ 分别

为各应变分量范围。

利用APDL参数化设计语言编写计算 $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon_1$ 的程序,进入ANSYS后处理器,调用求解模型的结果文

件进行计算。表2列出了加载周期内叶片危险点的应力、应变分量和相应的等效应力范围及等效应变范围。

表2 加载结束时危险点的应力、应变

Tab.2 Stress and strain of danger zone

危险点 部位	应变 /%							应力 /MPa						
	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	ϵ_{xy}	ϵ_{yz}	ϵ_{zx}	$\Delta \epsilon_t$	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{zx}	$\Delta \sigma$
叶片	-0.52212	-0.37286	1.29450	-0.27286	-1.50190	0.67047	1.36450	105.13	161.41	843.39	-47.86	-322.23	141.06	1381
涡轮盘	-0.13728	0.49473	0.11340	-0.17103	3.39670	0.18319	0.85867	243.97	524.00	419.52	-201.59	581.52	212.91	1839.7

图8和图9分别是单晶叶片应力范围和应变范围的云图。

从图中可以看出危险点位于叶片榫头的根部。

5 结论

1) 利用ANSYS有限元结构分析软件参数化设计语言APDL和用户可编程特性UPFs,将考虑拉-剪耦合效应的镍基单晶合金屈服准则和弹塑性本构模型集成到ANSYS软件中,实现镍基单晶合金的弹塑性有限元应力-应变分析;

2) 分别对DD3镍基单晶合金在温度为680℃的[001]、[011]和[111]3种取向进行单向拉伸热弹塑性应力-应变数值模拟,利用试验数据对计算结果进行对比验证,表明该模型在接近材料屈服应力的高应力范围具有较高的计算精度;

3) 应用镍基单晶合金弹塑性本构模型对镍基单晶涡轮盘片组件进行循环应力应变分析。

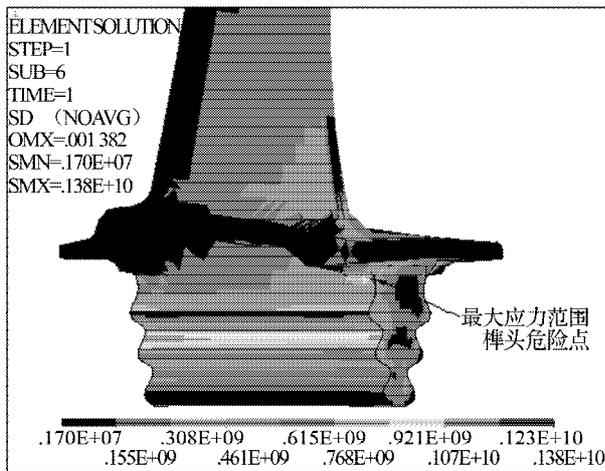


图8 叶片榫头等效力范围

Fig.8 Equivalent stress range of blade rabbet

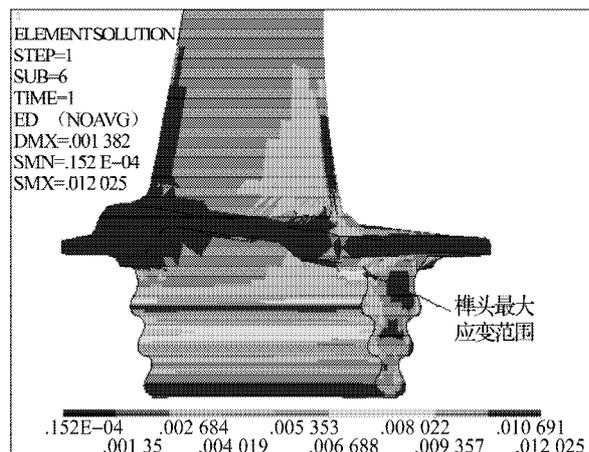


图9 叶片榫头等效应变范围

Fig.9 Equivalent strain range of blade rabbet

参考文献:

- [1] 丁智平, 刘义伦, 尹泽勇, 等. 镍基单晶高温合金的屈服准则研究[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 175-179.
- [2] 丁智平, 刘义伦, 尹泽勇, 等. 面心立方晶体单晶材料弹塑性本构模型研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(3): 423-428.
- [3] 张国瑞. 有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [4] 博嘉科技. 有限元分析软件——ANSYS融会与贯通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [5] 夏志皋. 塑性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.