

θ 参数法在涡轮盘蠕变变形分析中的应用

魏大盛¹, 陈妍妍¹, 李 昆¹, 王延荣¹, 高靖云²

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 中国航空发动机集团有限公司 商用航空发动机有限责任公司
上海商用飞机发动机工程技术研究中心, 上海 200241)

摘 要: 针对某直接时效 ZSGH4169 涡轮盘的蠕变变形展开研究,建立了 16 参数的 θ 参数法模型,对 ZSGH4169 高温合金在不同温度、不同载荷下的蠕变曲线进行了模拟;将该模型同有限元程序结合,开发了相应的用户子程序,并验证了子程序的计算能力及计算精度;将模型应用于涡轮盘的蠕变分析。结果表明:该模型能够准确模拟 ZSGH4169 在 650℃ 及 700℃ 下 3 个阶段的蠕变行为,与 Norton 率等传统模型相比,建模能力更强且精度更高,特别是能够开展变载、变温等复杂条件下蠕变的数值模拟。进而获得了涡轮盘盘心孔、盘缘螺栓孔两个危险位置处蠕变应变随时间的变化规律以及应力松弛曲线,其具有工程指导意义。

关 键 词: 涡轮盘; 蠕变; θ 参数法; 变温变载条件; 直接时效 ZSGH4169

中图分类号: V231.91

文献标志码: A

Application of θ projection method in analysis of creep deformation of turbine disc

WEI Dasheng¹, CHEN Yanyan¹, LI Kun¹,
WANG Yanrong¹, GAO Jingyun²

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Commercial Aircraft Engine,
Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: The creep deformation of direct aging ZSGH4169 turbine disc was studied. Firstly, a θ projection model with 16 parameters was established to characterize the creep behavior of the ZSGH4169 superalloy at different temperatures and loads. Secondly, the corresponding user subroutine combined with the general finite element program was developed, and the calculation precision was also validated. Thirdly, the model was used to simulate the creep deformation of the turbine disc. The calculated results show that the model can describe three stages of creep behaviors of ZSGH4169 under 650℃ and 700℃. Compared with the conventional models such as Norton rate model, the model had greater modeling capabili-

收稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51475024); 中国航空研究院上海分院指南项目(AR026)

作者简介: 魏大盛(1978—),男,副教授、博士生导师,博士,研究领域为航空发动机结构强度、振动及可靠性。

引用格式: 魏大盛,陈妍妍,李昆,等. θ 参数法在涡轮盘蠕变变形分析中的应用[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 2835-2541. WEI Dasheng, CHEN Yanyan, LI Kun, et al. Application of θ projection method in analysis of creep deformation of turbine disc [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2835-2541.

ty and higher accuracy, so it could be used particularly in case of the change of the loading and temperature. Furthermore, the long-time creep deformation and stress relaxation of the turbine disc at the center hole and bolt hole were obtained, providing a guidance for the engineering design.

Key words: turbine disc; creep; θ projection method; variable temperature and loading; direct aging ZSGH4169

航空燃气涡轮发动机中,在高温、高应力条件下,涡轮盘盘缘、涡轮叶片叶身等部位,通常会发生蠕变变形。以涡轮盘盘缘为例,若产生过大蠕变,叶片与机匣将发生碰磨、影响轮盘/叶片的装配、甚至导致轮盘榫槽破裂。因此,在航空发动机设计中要对热端盘件的蠕变进行分析^[1],并给出相应准则以保证寿命期内的工作安全^[2]。结合工程需求,本文将研究某直接时效(ZS)GH4169 涡轮盘的蠕变变形特征。

热端部件的蠕变变形分析^[3-5]、蠕变疲劳寿命预测^[6-8]中都将涉及到蠕变变形的准确计算。采用数值方法准确计算涡轮盘关键部位(盘心、螺栓孔边)的蠕变变形,首先必须对涡轮盘用高温合金的蠕变性能进行研究,通过试验获得高温合金的蠕变曲线(也即蠕变变形随时间的变化曲线^[9]),并准确描述其特征。从研究现状看,蠕变模型可分为两大类:一是从细观角度的蠕变机理出发建立模型^[10];二是从宏观蠕变特征出发,采用唯象学方法建立模型,本文研究的模型属于此类。为模拟合金的蠕变变形,众多学者提出了具有不同数学表达形式的方程对蠕变的不同阶段进行描述,工程中较为常见的是 Norton 率模型^[11]以及在其基础形式上发展而来的时间硬化模型、应变硬化模型。和其他大多数早期的经典蠕变模型^[12-13]一样,Norton 率模型只能描述第 1 阶段和第 2 阶段的蠕变。为完整描述蠕变的 3 个阶段,Evans 和 Wilshire 认为蠕变是一个应变硬化和空洞形核长大引起软化的综合作用过程,并由此提出了一种能描述 3 个阶段蠕变的模型,即 θ -参数法^[14],并针对该方法进行了应用研究^[15-16]。鉴于其对于蠕变变形描述的灵活性及准确性,本文尝试采用 θ 参数法对变温、变载下的蠕变进行模拟,并在验证计算精度的基础上,对某涡轮盘的蠕变进行分析。

1 θ 参数法模型及其建立

θ 参数法认为蠕变曲线是衰减的第 1 阶段和加速的第 3 阶段之间的叠加,而蠕变速率恒定的

第 2 阶段则体现了强化和弱化之间的相互平衡,基于此,形成了能够模拟 3 阶段蠕变曲线的方程,即

$$\epsilon_c = \theta_1 (1 - e^{-\theta_2 T}) + \theta_3 (e^{\theta_4 T} - 1) \tag{1}$$

式中为 ϵ_c 蠕变应变, T 为时间。第 1 项 $\theta_1 (1 - e^{-\theta_2 T})$ 描述材料的应变硬化,第 2 项 $\theta_3 (e^{\theta_4 T} - 1)$ 描述材料的弱化, θ_1 和 θ_3 可以反映应变的变化量, θ_2 和 θ_4 则可以反映应变的蠕变速率。 $\theta_i (i=1, 2, 3, 4)$ 由应力和温度决定,并存在以下关系式:

$$\lg \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i t + d_i \sigma t \tag{2}$$

式中 $a_i, b_i, c_i, d_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为材料参数,可根据试验数据通过优化获得。

θ 参数法的主要优势为:可完整描述 3 阶段的蠕变曲线;可采用一组参数模拟多个温度下不同载荷的蠕变曲线。 θ 参数法模型的建立实际上是一个多参数的优化过程,模型中总计 16 个参数,均与温度、载荷及时间相关,为获得使模型计算精度较高的参数,可采用分步优化策略:首先,确定单条蠕变曲线的参数;其次,确定相同温度、不同载荷下多条蠕变曲线的参数;再次,确定不同温度、不同载荷下多条蠕变曲线的参数。这一过程采用 Levenberg-Marquardt 优化算法实现,可参考文献[17]。需要特别说明的是,为便于优化并保证优化得到的参数在数量级上相差不过大,对参数进行了归一化处理,即:应力对屈服强度归一化,温度对熔点温度归一化。

对于本研究中涉及的 ZSGH4169 涡轮盘用高温合金,其蠕变试验曲线来自文献[18],采用 θ 参数法进行建模时,选取该合金在 650℃ 及 700℃ 时的蠕变曲线作为基础数据,得到的模型参数见表 1。

结合表 1 参数,在通用有限元程序 Abaqus 中通过 Ucreep 子程序实现了 θ 参数法蠕变模型。该子程序中需要定义 3 个变量,分别为蠕变应变增量 $\Delta\epsilon_{\text{creal}}$ 、蠕变应变增量对蠕变应变的导数 $\Delta\epsilon_{\text{crea2}}$ 和蠕变应变增量对等效应力的导数 $\Delta\epsilon_{\text{crea5}}$,根据 θ 参数法推导出相应公式如下:

表 1 θ 参数法蠕变模型参数 (ZSGH4169)
Table 1 Parameters of the θ projection method (ZSGH4169)

模型参数	数值	模型参数	数值
a_1	-19.73	a_3	-50.28
b_1	24.37	b_3	69.69
c_1	10.03	c_3	74.62
d_1	-11.99	d_3	-106.73
a_2	15.04	a_4	7.99
b_2	-28.17	b_4	-17.57
c_2	-21.33	c_4	-50.03
d_2	35.99	d_4	78.16

$$\Delta_{\text{decr}1} = (\theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 T} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 T}) \Delta T \tag{3}$$

$$\Delta_{\text{decr}2} = (-\theta_1 \theta_2^2 e^{-\theta_2 T} + \theta_3 \theta_4^2 e^{\theta_4 T}) / (\theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 T} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 T}) \Delta T \tag{4}$$

$$\Delta_{\text{decr}5} = \Delta t \{ \theta_1 \theta_2 \cdot$$

$$\ln 10 [c_1 + d_1 t + c_2 + d_2 t - \theta_2 (c_2 + d_2 t) T] + \theta_3 \theta_4 \ln 10 [c_3 + d_3 t + c_4 + d_4 t + \theta_4 (c_4 + d_4 t) T] \}$$

(5)

ZSGH4169 合金在 650 ℃ 及 700 ℃ 时的蠕变计算曲线可见图 1, 并与试验结果进行了对比。图中实心点表示试验数据, 空心点加线条为采用 Fortran 语言编写程序的计算结果, 线条为 Abaqus 结合子程序的计算结果。可以看出, 两者计算结果完全吻合, 可验证子程序的准确性, 为将 θ 参数法应用于涡轮盘的蠕变分析打下了基础。另外, θ 参数法能够模拟出蠕变第 3 阶段, 对不同温度、不

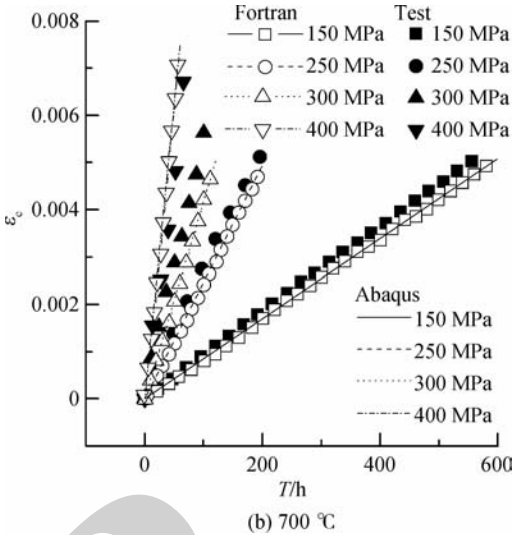


图 1 θ 参数法计算结果与试验结果
(ZSGH4169)

Fig. 1 Calculated results of the θ projection method and testing data (ZSGH4169)

同载荷下蠕变变形的模拟都能保证一定精度。

2 变载、变温下的蠕变模拟

蠕变试验通常是在恒温、恒载下开展的, 但实际工程结构(如涡轮盘)所承受的载荷往往随时间发生改变。因此, 本节将采用建立的 θ 参数法模型, 结合时间硬化及应变硬化理论, 探讨变载、变温下的蠕变特征。时间硬化及应变硬化的通式如下:

$$\dot{\epsilon}_c = f(\sigma, T) \tag{6}$$

$$\dot{\epsilon}_c = f(\sigma, \epsilon_c) \tag{7}$$

式(6)为时间强化, 认为蠕变过程中起到强化作用的是时间, θ 参数法恰好为时间强化模型, 将蠕变应变对时间求导即可, 可参考式(3)。

式(7)为应变强化, 认为蠕变过程中起到强化作用的是蠕变变形, 但 θ 参数法的蠕变应变率无法写成蠕变应变的显式表达, 因此在计算过程中采用时间对应的方法, 即: 若载荷在 T_1 时刻由 σ_1 变为 σ_2 , 且蠕变应变为 ϵ_{c1} , 变载后 T_1 时刻的蠕变应变率应等于在 σ_2 载荷下发生 ϵ_{c1} 蠕变应变时所对应的蠕变率。编写程序时, 则通过在求解区间内进行对分法搜索, 获得强化后的蠕变率, 从而实现应变硬化^[18]。

2.1 变载条件下的硬化模拟

首先, 考察低载荷向高载荷变化的情况。在如下载荷条件下计算变载对蠕变变形的影响: 0~500 h, 温度为 650 ℃, 载荷为 450 MPa; 500~1500 h, 温度为 650 ℃, 载荷为 500 MPa。计算结果如

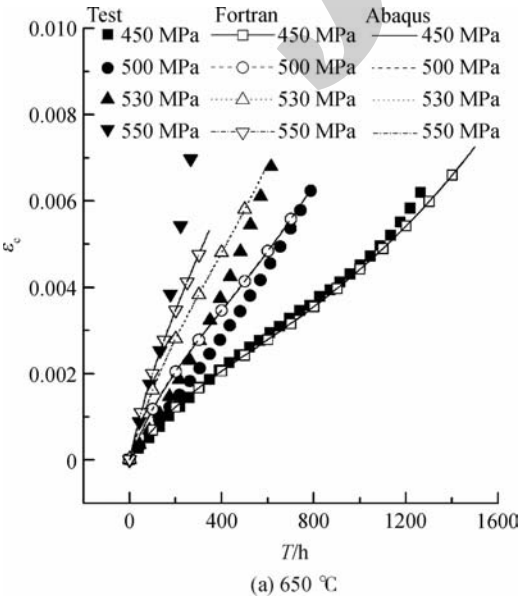


图 2 所示,实线表示 450 MPa 下的计算结果;间隔线表示 500 MPa 下的计算结果;圆点代表应变硬化;星点代表时间硬化。可以看出:时间硬化给出了一种纵向移动特征的曲线,而应变硬化给出了一种横向移动特征的曲线,一般认为应变硬化同实际情况更为接近。

其次,考察高载荷向低载荷变化的情况。在如下载荷条件下计算变载对蠕变变形的影响:0~500 h,温度为 650 ℃,载荷为 500 MPa;500~1500 h,温度为 650 ℃,载荷为 450 MPa。计算结果如图 3 所示,与图 2 中的结果有相似的变化趋势。

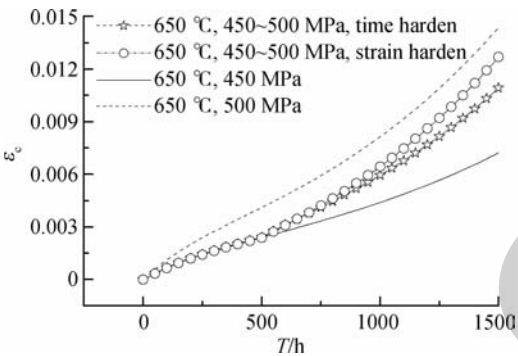


图 2 θ 参数法变载条件下的计算结果(载荷低向高)
Fig. 2 Calculated results of the θ projection method under changing loading (from low to high)

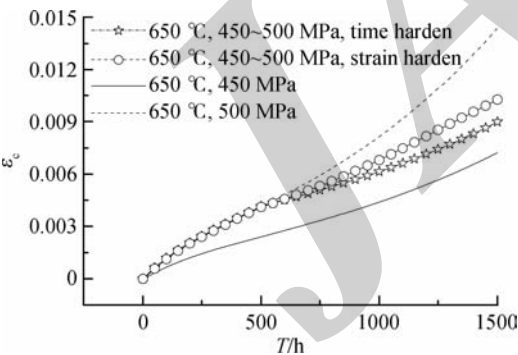


图 3 θ 参数法变载条件下的计算结果(载荷高向低)
Fig. 3 Calculated results of the θ projection method under changing loading (from high to low)

再次,考察变载速度对计算结果的影响。采用应变强化模型计算载荷由 450 MPa 变化至 500 MPa 时,变载速度对计算结果的影响,变载时间分别为 0、100、200 h。计算结果如图 4 所示,方块、圆点、星点分别代表不同变载速度,可以看出:变载越快(低变高),后续的蠕变变形越大。

2.2 变温条件下的硬化模拟

在如下载荷条件下计算变温对蠕变变形的影

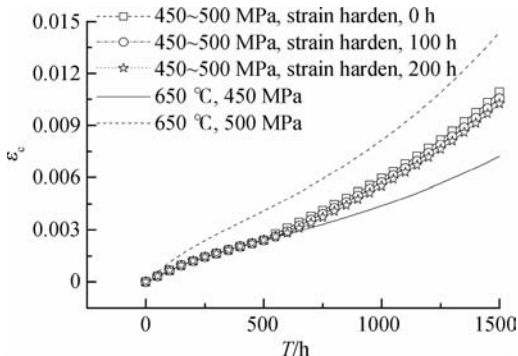


图 4 θ 参数法不同变载速度下的计算结果
Fig. 4 Calculated results of the θ projection method under different loading change rates

响:0~500 h,温度为 650 ℃,载荷为 150 MPa;500~1500 h,温度为 700 ℃,载荷为 150 MPa。计算结果如图 5 所示。

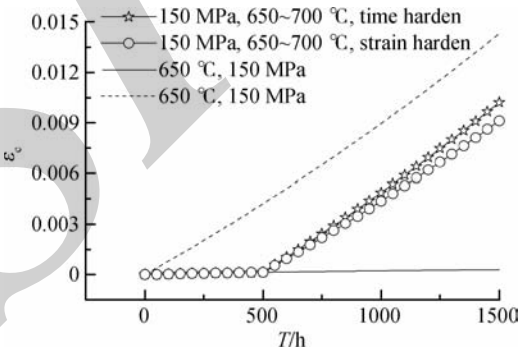


图 5 θ 参数法变温条件下的计算结果
Fig. 5 Calculated results of the θ projection method under changing temperature

进一步考察变温速度对计算结果的影响。采用应变强化模型计算 650 ℃ 变温至 700 ℃ 时,变温速度对计算结果的影响,变温时间分别为 0、100、200 h。计算结果如图 6 所示,方块、圆点、星

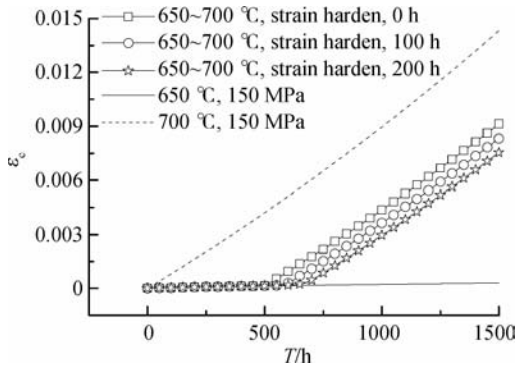


图 6 θ 参数法不同变温速度下的计算结果
Fig. 6 Calculated results of the θ projection method under different temperature change rates

点分别代表不同变温速度,可以看出:变温越快(低变高),后续的蠕变变形越大。

3 涡轮盘蠕变变形分析

将建立的 θ 参数法模型用于某 ZSGH4169 涡轮盘的蠕变计算,以考察模型的工程实用性。该轮盘的循环对称模型见图 7,边界条件如下:离心力(100%转速);叶片拉力(根据转速及叶片质量换算);温度场(100%转速时的温度场),见图 8。

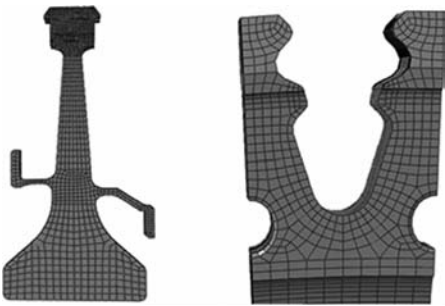


图 7 轮盘有限元模型
Fig. 7 Finite element model of turbine disc

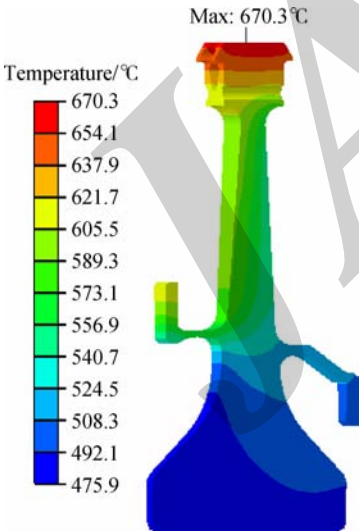
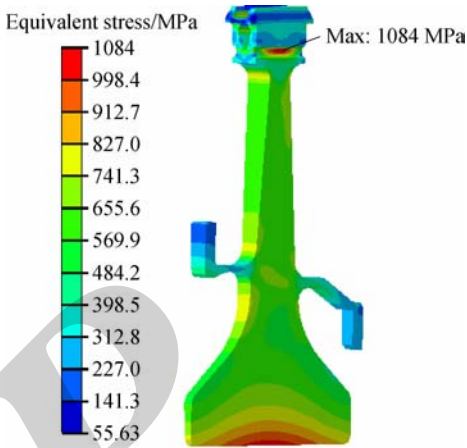


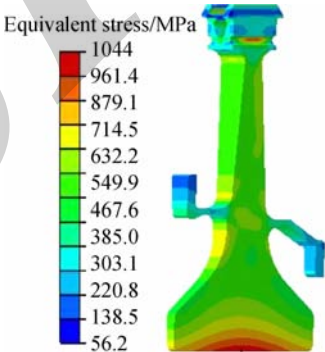
图 8 轮盘温度场
Fig. 8 Temperature distribution of turbine disc

在 Abaqus 中进行了时长为 300 h 的蠕变分析,图 9(a)和图 9(b)中分别为 0h 及发生 300h 蠕变后涡轮盘的等效应力分布,旨在寻找应力较高、易发生蠕变的轮盘位置。不难看出,盘心及盘缘螺栓孔为危险位置,应力水平较高。因此,在图 10 中给出了这两个危险位置的蠕变曲线及应力松弛曲线,其中实线代表盘心,虚线代表螺栓孔。

由图 10 可知,盘心处的蠕变较小,这是因为该处温度较低(小于 480 °C)。正因如此,盘心处的应力松弛也较小,仅由 1 055 MPa 松弛到 1 044 MPa。



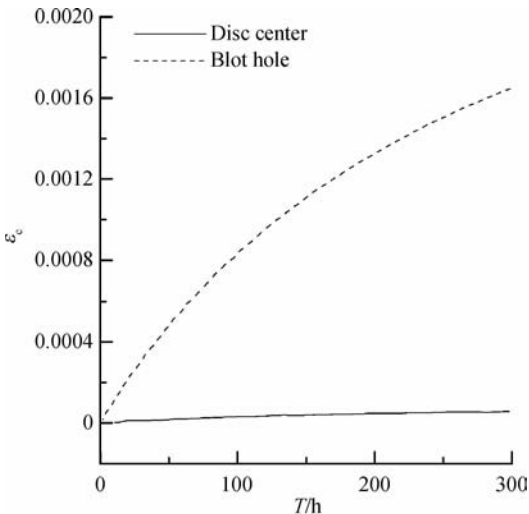
(a) 0 h 等效应力分布



(b) 发生 300 h 蠕变时的等效应力分布

图 9 轮盘等效应力分布

Fig. 9 Equivalent stress distribution of turbine disc



(a) 300 h 蠕变曲线

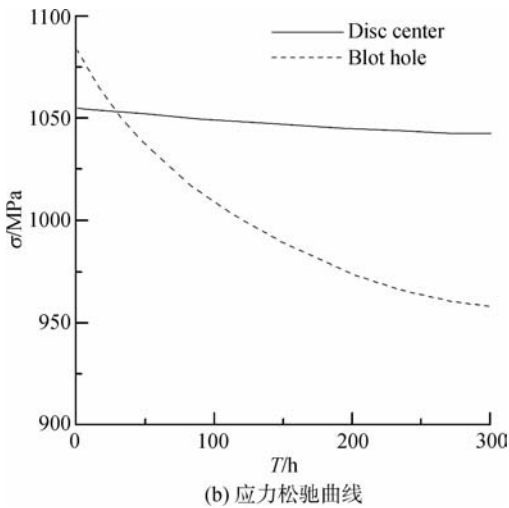


图10 蠕变曲线和应力松弛曲线

Fig. 10 Curves of creep and stress relaxation

而螺栓孔边的蠕变较大,这是因为该处温度较高(达到 620°C),且为应力最大点。因此,应力松弛也较显著,由 1084 MPa 松弛到 959 MPa 。

4 结 论

本文以 ZSGH4169 合金的蠕变数据为基础,建立了 θ 参数法模型,计算了复杂载荷条件下合金的蠕变行为,并应用于涡轮盘的蠕变分析,得出了一些具有工程意义的结论:

1) 所建立的 θ 参数法可用一组参数模拟不同温度、不同载荷下的蠕变,并具有较好的计算精度。

2) 结合时间硬化/应变硬化理论,可以模拟变载、变温条件下的蠕变行为。

3) 所建立的 θ 参数法可用于涡轮盘的蠕变分析,通过危险位置的蠕变计算曲线及应力松弛计算曲线,可以得出重要启示,即传统疲劳寿命预测方法需要改进,应考虑应力松弛对疲劳寿命的影响。

当然,本研究中尚存在一些不足,例如变温、变载条件下的试验验证尚未开展,涡轮盘蠕变计算精度如何评价,计算效率如何进一步提高,这些都是后续研究的重要内容。

参考文献:

[1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第18册 叶片轮盘及主轴强度分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[2] 《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则》编委会. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告): 第2册 轮盘[M]. 北京: 中国航空工业总公司发动机系统工程局, 1997.

[3] 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): 285-288.

YUE Zhufeng, LÜ Zhenzhou, YANG Zhiguo, et al. FEM creep damage study for nickel-base single crystal structure under multiaxial stress conditions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(3): 285-288. (in Chinese)

[4] 李娜, 杨晓光, 石多奇, 等. 服役工作条件对涡轮转子叶片蠕变寿命的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 2870-2875.

LI Na, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi, et al. Effect of operating conditions on turbine rotor blade creep life[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12): 2870-2875. (in Chinese)

[5] 洪杰, 高金海, 马艳红, 等. 火焰筒局部蠕变屈曲分析方法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 388-395.

HONG Jie, GAO Jinhai, MA Yanhong, et al. Local creep buckling analysis method of combustor liner[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 388-395. (in Chinese)

[6] 陆山, 高鹏. 考虑应力松弛的涡轮盘蠕变-疲劳寿命可靠性分析方法[J]. 推进技术, 2009, 30(3): 352-354.

LU Shan, GAO Peng. Reliability analysis method for creep-fatigue life of turbine discs with effect of stress relaxation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(3): 352-354. (in Chinese)

[7] 李骏, 宋友辉, 刘汉斌, 等. 涡轮叶片-榫头-轮盘的蠕变与低循环疲劳寿命预测[J]. 推进技术, 2015, 36(11): 1699-1704.

LI Jun, SONG Youhui, LIU Hanbin, et al. Creep and low cycle fatigue life prediction for turbine blade-tenon-disk structure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(11): 1699-1704. (in Chinese)

[8] 高靖云, 张成成, 侯乃先, 等. 考虑应力松弛的单晶涡轮叶片蠕变疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 539-547.

GAO Jingyun, ZHANG Chengcheng, HOU Naixian, et al. Creep-fatigue life prediction of single crystal turbine blade with the influence of stress relaxation[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 539-547. (in Chinese)

[9] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.

[10] 曹娟, 石多奇, 王延荣. 镍基单晶合金蠕变微观结构演化及表征模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1077-1084.

CAO Juan, SHI Duoqi, WANG Yanrong. Microstructural evolution and modeling for creep deformation of Ni base single crystal[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1077-1084. (in Chinese)

[11] SWINDEMAN R W, SWINDEMAN M J. A comparison of creep models for nickel base alloys for advanced energy systems[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(1): 72-79.

[12] ANDRADE E N D C. On the viscous flow in metals and allied phenomena[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, 1910, 84(1): 1-12.

[13] PRAGER M. Development of the MPC omega method for

life assessment in the creep range[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,1995,117(1):95-103.

[14] EVANS R W, WILSHIRE B. Creep of metals and alloys [M]. London: The Institute of Metals, 1985.

[15] BROWN S G R, EVANS R W, WILSHIRE B. A comparison of extrapolation techniques for long-term creep strain and creep life prediction based on equations designed to represent creep curve shape [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1986, 24(3): 251-268.

[16] EVANS R W, PARKER J D, WILSHIRE B. An extrapolation procedure for long-term creep strain and creep life prediction with special reference to 0.5 Cr 0.5 Mo 0.25 V ferritic steels [M]. Swansea, UK: Recent Advances in Creep and Fatigue of Engineering Materials and Structures, Pineridge Press, 1983.

[17] 李昆. 涡轮盘蠕变变形行为研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016.

LI Kun. Turbine disk creep deformation behavior research [D] Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

[18] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动机设计用材料数据手册: 第 3 册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

(编辑: 叶 青)